

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Université 8 Mai 1945 Guelma**  
**Département de Génie Mécanique**



**THÈSE**

Présentée pour obtenir le grade de :

**DOCTEUR**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : mécanique des matériaux

Présenté par

**FNIDES MOHAMED**

**Etude de l'impact des conditions d'usinage sur la rugosité  
de surface et des vibrations lors de fraisage de face**

**Directeur de thèse : Pr. Yaltese Mohamed Athmane**

*Devant le jury composé de :*

Pr. S. Boutabba	Président	Professeur Université de Guelma
Pr. K. Bey	Examineur	Professeur Université de Annaba
Pr. H. Hamadache	Examineur	Professeur Université de Annaba
Pr. M. A. Yaltese	Rapporteur	Professeur Université Guelma
Dr. S. Belhadi	Invité d'honneur	MC /A Université Guelma

2017

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Université 8 Mai 1945 Guelma**  
**Département de Génie Mécanique**



**THÈSE**

Présentée pour obtenir le grade de :

**DOCTEUR**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : mécanique des matériaux

Présenté par

**FNIDES MOHAMED**

**Etude de l'impact des conditions d'usinage sur la rugosité  
de surface et des vibrations lors de fraisage de face**

**Directeur de thèse : Pr. Yallese Mohamed Athmane**

*Devant le jury composé de :*

Pr. S. Boutabba	Président	Professeur Université de Guelma
Pr. K. Bey	Examineur	Professeur Université de Annaba
Pr. H. Hamadache	Examineur	Professeur Université de Annaba
Pr. M. A. Yallese	Rapporteur	Professeur Université Guelma
Dr. S. Belhadi	Invité d'honneur	MC /A Université Guelma

## *Dédicaces*

*À la mémoire de mes parents;*

*à nos martyrs ;*

*à ma femme ; à mes enfants pour leur soutien permanent et leur réconfort*

*moral ;*

*à mes frères et sœur ;*

*à mon encadreur Pr. Yallèse. M.A ;*

*à ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois*

*de l'amour et de la reconnaissance.*

## Remerciements

Je tiens à remercier vivement mon encadreur le Professeur M.A. Yaltese pour son appui scientifique et ses judicieux conseils et de m'avoir fait confiance, efficacement guidé et fortement soutenu durant toute la période de la réalisation de cette thèse.

Je remercie également Monsieur le Professeur *S.Boutabba* pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.

Tous mes remerciements vont à Monsieur le Professeur *K. Bey*, à Monsieur le Professeur H. Hamadache et à monsieur le docteur S. belhadi pour leur participation au jury.

Je remercie ma femme Dr Aissaoui, mes adorables enfants Naila et Chahine, qui sont venus illuminer ma vie et éclaircir mes idées, qu'ils sachent qu'ils sont les principales sources de mes inspirations.

Je tiens à remercier mon cher cousin et frère : Dr. Fnides Brahim pour son aide et ses conseils bénéfiques.

Ce travail n'aurait pu aboutir sans le soutien de toute ma famille que je remercie d'une façon exceptionnelle.

Je remercie aussi tous les membres du laboratoire de Mécanique et Structures (LMS).

## Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet des paramètres de coupe sur les critères de la rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ), le débit de copeaux ( $Q$ ) et les vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ) lors du fraisage de face de l'acier AISI 1040 avec deux matériaux de coupe (carbure revêtu : GC103 et cermet : CT530). Afin d'évaluer l'influence des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) et de faire une modélisation, les méthodes ANOVA, RSM, ANN ont été utilisées et cela pour un plan factoriel ( $L_{27}$ ) et un plan box-behnken. Pour optimiser les conditions de coupe, la fonction de désirabilité (DF) a été utilisée dans le but de maximiser le débit de copeaux et minimiser la rugosité de surface. L'étude a également été menée pour étudier la durée de vie des plaquettes de coupe et la relation entre l'usure et la rugosité de surface. Pour permettre l'élaboration des cartes topographiques tridimensionnelles, cela a pour effet, la bonne compréhension des caractéristiques des surfaces fraisées un rugosimètre (3D) a été utilisé.

*Mots clés : Fraisage de face, RSM, Optimisation, Modélisation, Usure, Rugosité et productivité.*

## Abstract

The objective of this study is to evaluate the effect of cutting parameters on surface roughness, Material Removed Rate and vibration during face milling of AISI 1040 steel with two cutting materials (coated carbide: GC103 and cermets: CT350). The technique used is Response Surface Methodology (RSM), which determines factors and interactions that have a significant effect on surface roughness and Material Removed Rate (MRR) and determine the mathematical models of the cutting process. Based on a complete factorial design  $3^3$  (L27) and another box-behnken (15 tests) designed for piece vibrations, an Analysis of the Variance (ANOVA) was performed to identify significant factors on technological parameters. A multi-objective optimization procedure has made to minimize the criteria for roughness and maximize MRR using the desirability function (DF). The study was also conducted to study the tool life of the inserts and the relationship between wear and roughness. The results show that ( $V_c$ ) is the parameter that most affected the surface roughness. The special geometric shape of the inserts which have a scraping edge makes it possible to obtain a good surface roughness even at a high wear. A comparison between the coefficients of determination developed by the mathematical models using the methodology of the response surface and the artificial neural networks was presented.

**Keywords:** *Face milling, RSM, Optimization, Flank wear, Surface roughness and productivity*

## ملخص

الهدف من هذه الدراسة إيجاد تأثير شروط القطع (سرعة القطع، سرعة التغذية، عمق التمريرة) على خشونة السطح، ومعدل التدفق والاهتزازات أثناء عملية تفريز الفولاذ (AISI 1040) باستعمال نوعين من مواد القطع، الكربيد المُلبس و السرمي (GC1030 و CT530).  
باستعمال منهجية استجابة السطح RSM والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). من ناحية أخرى كان اهتمامنا في استعمال الطريقة التحسينية في حالة وجود هدف وحيد وفي حالة تعدد الأهداف للعثور على القيم المثلى لشروط القطع. المعادلات الرياضية النموذجية الموجودة تسمح لنا باستنتاج مدى تأثير كل عنصر من شروط القطع على النتائج. تمثل المعادلات النموذجية مصلحة عظمى للصناعة، لأنها تسمح لنا باستنتاج الشروط الحسنى للتشغيل و اعداد جداول خاصة لهذا الاخير.

و قد أجريت الدراسة أيضا إلى دراسة حياة إدراج القطع والعلاقة بين الخشونة و التآكل.

**الكلمات المفتاحية :** التفريز، RSM، تحسين (Optimisation)، التآكل، خشونة السطح والإنتاجية

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Vitesse de la broche, vitesse de coupe et avances.....	8
Figure I.2. Largeur et profondeur de passe.....	9
Figure I.3. Modes d'usinage.....	10
Figure I.4. État de surface dégradé par les vibrations.....	15
Figure I.5. Fréquences de vibrations le long d'un usinage.....	15
Figure I.6. Caractéristiques du profil.....	18
Figure I.7. Défauts Macro géométriques et Micro géométriques.....	20
Figure I.8. Paramètres géométriques de la norme « ligne moyenne ».....	21
Figure I.9. Les différents critères de la rugosité.....	21
Figure I.10. Composantes de l'effort de coupe.....	23
Figure I.11. Mécanismes d'usure.....	24
Figure I.12. Différentes formes d'usure.....	24
Figure I.13. Diagramme de Pareto des effets normalisés pour Ra montrant les facteurs et l'interaction significatifs.....	29
Figure I.14. Graphiques des effets principaux et d'interaction pour la rugosité de surface Ra.....	30
Figure I.15. Rapport entre l'amplitude de vibration et l'usure de l'outil (a) déplacement et (b) vitesse.....	31
Figure 1.16. Configuration expérimentale.....	33
Figure I.17. Configuration expérimentale.....	34
Figure I.18. L'accélération de vibration signalée en usinant l'acier inoxydable AISI304 austénitique.....	34
Figure I.19. Optimisation facteurs de réponse multiple (Ra et Rt).....	35
Figure I.20. Profil de rugosité où la vibration est prise en compte.....	35
Figure I.21. Evolution de l'usure en dépouille des outils en carbure : a) avec revêtement et b) sans revêtement à $V_c = 25$ et $50$ m/min.....	36
Figure I.22. Progression de l'usure en dépouille avec l'augmentation du volume de copeau enlevé avec un outil en CBN.....	37



Figure II.1. Machine-outil utilisée (Fraiseuse Almo) .....	41
Figure II.2. Fraise à surfacer Coromill 245.....	42
Figure II.3. Plaquettes de coupe utilisées : carbure revêtu (a) et cermet (b) .....	43
Figure II.4. Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.....	43
Figure II.5. Dispositif pour mesurer la rugosité sans démonter la pièce .....	44
Figure II.6. RugosimètreSj-201p (Mitutoyo).....	44
Figure II.7. Alti surf 500 .....	44
Figure II.8. Standard gage- Visual 250.....	44
Figure II.9. Méthode de mesure de la rugosité et les vibrations.....	45
Figure II.10. Schenk Smart Balancer (2).....	45
Figure II.11. Vibration complexe .....	46
Figure III.1. Effet de l'avance par dent sur la rugosité : $V_c = 222$ m/min; $a_p = 0,3$ mm ....	55
Figure III.2. Effet de la profondeur de passe sur la rugosité : $V_c = 222$ m/min; $f_z =$ 0.0563 mm/dt.....	56
Figure III.3. Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité : $f_z = 0,16$ mm/dt; $a_p = 0,3$ mm ..	57
Figure III.4. Effet de l'avance par dent sur la rugosité : $V_c = 222$ m/min; $a_p = 0,3$ mm .....	58
Figure III.5. Effet de la profondeur de passe sur la rugosité : $V_c = 222$ m/min; $f_z =$ 0.0563mm/dt .....	59
Figure III.6. Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité : $f_z = 0,16$ mm/dt; $a_p = 0,3$ mm ..	60
Figure III.7. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le carbure revêtu : $a_p = 0,3$ mm; $V_c = 222$ m/min.....	61
Figure III.8. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le carbure revêtu : $f_z =$ 0,0282 mm/dt; $V_c = 222$ m/min.....	61
Figure III.9. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le carbure revêtu : $f_z = 0,08$ mm/dt; $a_p = 0,3$ mm.....	62
Figure III.10. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le cermet : $a_p = 0,3$ mm/dent; $V_c = 222$ m/min.....	63
Figure III.11. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le cermet : $f_z = 0,0282$ mm/dt; $V_c = 222$ m/min.....	63

Figure III.12. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le cermet : $f_z = 0,08$ mm/dt ; $a_p = 0,3$ mm .....	64
Figure III.13. Effet de l'arrosage sur la rugosité avec carbure revêtu : $a_p = 0,3$ mm/dt; $V_c = 222$ m/min .....	65
Figure III.14. Effet de l'arrosage sur la rugosité avec carbure revêtu : $f_z = 0,0282$ mm/dt; $V_c = 222$ m/min.....	65
Figure III.15. Effet d'arrosage sur la rugosité avec le carbure revêtu : $f_z = 0,08$ mm/dt; $a_p = 0,3$ mm .....	66
Figure III.16. Effet d'arrosage sur la rugosité avec le cermet : $a_p = 0,3$ mm; $V_c = 222$ m/min.....	67
Figure III.17. Effet d'arrosage sur la rugosité avec le cermet : $f_z = 0,0282$ mm/dt; $V_c = 222$ m/min .....	68
Figure III.18. Effet d'arrosage sur la rugosité avec le cermet : $f_z = 0,08$ mm/dt; $a_p = 0,3$ mm .....	68
Figure III. 19. Effet de l'avance par dent sur la rugosité : $V_c = 222$ m/min; $a_p = 0,3$ mm .	69
Figure III. 20. Effet de la profondeur de passe : $V_c = 222$ m/min; $f_z = 0.0563$ mm/dt .....	70
Figure III. 21. Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité : $f_z = 0,16$ mm/dt; $a_p = 0,3$ mm.....	70
Figure III. 22. Evolution de l'usure ( $V_B$ et $V_{bmax}$ ) en fonction de la longueur de coupe ( $L_c$ ): $V_c = 439,6$ m / min; $f_z = 0,114$ mm / dt; $a_p = 0,6$ mm.....	72
Figure III. 23. Evolution de la rugosité ( $R_a$ ) en fonction de l'usure ( $V_{bmax}$ ): $V_c = 439.6$ m/min and $f_z = 0.114$ mm/td (carbure).....	72
Figure III. 24. Micrographie de la plaquette après différents temps d'usinage .....	73
Figure III. 25. Evolution de l'usure ( $V_{bmax}$ ) en fonction de longueur de coupe, ( $L_c$ , mm): $V_c = 439.6$ m/min and $f_z = 0.114$ mm/td (cermet et carbure) .....	74
Figure III. 26. Evolution de la rugosité ( $R_a$ ) en fonction de l'usure ( $V_{bmax}$ ) : $V_c = 439.6$ m/min and $f_z = 0.114$ mm/dt.....	74
Figure III. 27. Exemple de présentation de la rugosité en 3D pour $R_a$ .....	75
Figure IV.1. Graphiques des effets principaux et Graphiques des interactions pour $R_a$ (a. b), $R_y$ (c. d), $R_z$ (e. f) et $Q$ (g. h) .....	85
Figure IV.2. Graphe Résiduel pour ( $R_a$ ) .....	87

Figure IV.3. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra) .....	88
Figure IV.4. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ry) .....	88
Figure IV.5. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Rz). .....	89
Figure IV.6. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Q) .....	89
Figure IV.7. Surface de réponse pour Ra en tant que fonction de (Vc, fz), (Vc, ap) et (ap, fz) .....	90
Figure IV.8. Surface de réponse pour Ry en tant que fonction de (Vc, fz), (Vc, ap) et (ap, fz) .....	90
Figure IV.9. Surface de réponse pour Ra en tant que fonction de (Vc, fz), (Vc, ap) et (ap, fz) .....	91
Figure IV.10. Graphique de contour pour $Ra = f(Vc, fz, ap)$ .....	91
Figure IV.11. Graphique de contour pour $Ry = f(Vc, fz, ap)$ .....	93
Figure IV.12. Graphique de contour pour $Rz = f(Vc, fz, ap)$ .....	93
Figure IV.13. Surface de réponse pour Q en tant que fonction de (Vc, fz), (Vc, ap) et (ap, fz) .....	94
Figure IV.14. Graphique de contour pour $Q = f(Vc, fz, ap)$ .....	94
Figure IV.15. Ram fonction graph pour (Ra, Ry, Rz et Q).....	96
Figure IV.16. Graphique de contour pour Composite désirabilité (Ra, Ry, Rz et Q) .....	96
Figure IV.17. Surface de réponse de Composite désirabilité pour (Ra, Ry, Rz et Q) .....	97
Figure IV.18. graphique de désirabilité (3D) pour (Ra, Ry, Rz et Q) .....	97
Figure IV.19. Graphiques des effets principaux pour (Ra).....	103
Figure IV.20. Graphiques des effets principaux pour (Ry) .....	103
Figure IV.21. Graphiques des effets principaux pour (Rz) .....	104
Figure IV.22. Graphiques des effets principaux pour (Q) .....	104
Figure IV.23. Graphiques des interactions pour (Ra) .....	105
Figure IV.24. Graphiques des interactions pour (Ry) .....	106
Figure IV.25. Graphiques des interactions pour (Rz) .....	106
Figure IV.26. Graphiques des interactions pour (Q) .....	107
Figure IV.27. Evolution de $Ra = f(Vc, fz \text{ et } ap)$ .....	108

Figure IV.28. Graphe des contours de $R_a = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$ .....	108
Figure IV.29. Evolution de $R_y = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$ .....	109
Figure IV.30. Graphe des contours de $R_y = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$ .....	109
Figure IV.31. Evolution de $R_z = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$ .....	110
Figure IV.32. Graphe des contours de $R_z = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$ .....	110
Figure IV.33. Evolution de $Q = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$ .....	111
Figure IV.34. Graphe des contours de $Q = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$ .....	111
Figure IV.35. Valeurs réelles et prédites de $(R_a)$ .....	112
Figure IV.36. Valeurs réelles et prédites de $(R_y)$ .....	112
Figure IV.37. Valeurs réelles et prédites de $(R_z)$ .....	112
Figure IV.38. Valeurs réelles et prédites de $(Q)$ .....	112
Figure IV.39. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de $(R_a)$ .....	113
Figure IV.40. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $(R_y)$ .....	113
Figure IV.41. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de $(R_z)$ .....	114
Figure IV.42. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de $Q$ .....	114
Figure V.1. Effet de la vitesse de coupe sur les vibrations : $f_z = 0.02 \text{ mm/dt}$ ; $a_p = 0.2$ mm.....	117
Figure V.2. Effet de l'avance par dent sur les vibrations : $V_c = 222 \text{ m/min}$ ; $a_p = 0.2 \text{ mm}$ .	118
Figure V.3. Effet de la profondeur de passe sur les vibrations : $V_c=222\text{m/min}$ , $f_z = 0.02$ mm/dt.....	119
Figure V.4. Influence du mode d'usinage sur les vibrations : $V_c = 78 \text{ m/min}$ , $f_z = 0,04$ mm/dt, $a_p = 0,75 \text{ mm}$ .....	120
Figure V.5. Influence du mode d'usinage sur les vibrations : $V_c = 200 \text{ m/min}$ , $f_z = 0,1$ mm/dt, $a_p = 0,5 \text{ mm}$ .....	120
Figure V.6. Influence du mode d'usinage sur les vibrations : $V_c = 200 \text{ m/min}$ , $f_z = 0,16$ mm/dt, $a_p = 0,75 \text{ mm}$ .....	121
Figure V.7. Influence du mode d'usinage sur les vibrations : $V_c = 150 \text{ m/min}$ , $f_z = 0,16$ mm/dt, $a_p = 0,5 \text{ mm}$ .....	121

Figure V.8. Influence du mode d'usinage sur les vibrations : $V_c = 150$ m/min, $f_z = 0,16$ mm/dt, $a_p = 1$ mm .....	122
Figure V.9. Graphes des effets principaux sur ( $V_x$ ).....	125
Figure V.10. Surface de réponse des vibrations ( $V_x$ ) en fonction de ( $V_c$ , $f_z$ , $a_p$ ) .....	127
Figure V.11. Graphe des contours des vibrations $V_x$ en fonction de ( $V_c$ , $f_z$ , $a_p$ ) .....	128
Figure V.12. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de $V_x$ .....	129
Figure V.13. Graphes des effets principaux sur ( $V_y$ ) .....	132
Figure V.14. Surface de réponse des vibrations ( $V_y$ ) en fonction de ( $V_c$ , $f_z$ ), ( $V_c$ , $a_p$ ) et ( $f_z$ , $a_p$ ). .....	133
Figure V.15. Graphe des contours des vibrations ( $V_y$ ) en fonction de ( $V_c$ , $f_z$ ), ( $V_c$ , $a_p$ ) et ( $f_z$ , $a_p$ ).....	134
Figure V.16. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de $V_y$ .....	135
Figure V.17. Graphes des effets principaux pour ( $R_a$ ) .....	138
Figure V.18. Surface de réponse de la rugosité ( $R_a$ ) en fonction de ( $V_c$ , $f_z$ ), ( $V_c$ , $a_p$ ) et ( $f_z$ , $a_p$ ). .....	139
Figure V.19. Graphe des contours de la rugosité ( $R_a$ ) en fonction de ( $V_c$ , $f_z$ ), ( $V_c$ , $a_p$ ) et ( $f_z$ , $a_p$ ).....	140
Figure V.20. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de ( $R_a$ ) .....	141
Figure V.21. Valeurs réelles et prédites de ( $V_x$ ) .....	142
Figure V.22. Valeurs réelles et prédites de ( $V_y$ ).....	142
Figure V.23. Valeurs réelles et prédites de ( $R_a$ ) .....	143
Figure VI.1. Schéma d'un réseau de neurones récurrents à une unité reliant l'entrée et la sortie du réseau. A droite la version « dépliée » de la structure.....	146
Figure VI.2. Représentation d'un neurone formel (ou logique).....	146
Figure VI.3. Fonctions de transfert de réseau de neurones (a) : fonction seuil, (b) : linéaire, (c) : tangente sigmoïde, (d) tangente hyperbolique .....	147
Figure VI.4. Perceptron multicouche élémentaire avec une couche cachée et une couche de sortie .....	148
Figure VI.5. Trajectoire de la descente du gradient pour différents taux d'apprentissage : (a) taux faible ; (b) taux moyen ; (c) taux (trop) élevé .....	149

Figure VI.6. Architecture choisie pour les critères de la rugosité (Ra, Ry and Rz) .....	151
FigureVI.7. Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour (Ra) .....	154
Figure VI.8. Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour (Ry) .....	154
Figure VI.9. Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour (Rz) .....	154
Figure VI.10. Profils de prédiction: Rugosité de la surface en fonction de paramètres de coupe .....	155
Figure VI.11. Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par RSM et ANN pour (Ra).....	157
Figure VI.12. Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par RSM et ANN pour (Ry).....	157
Figure VI.13. Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par RSM et ANN pour (Rz).....	157

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau. I.1._Les outils de fraisage .....	11
Tableau II.1. Composition chimique de l'acier AISI 1040.....	41
Tableau II.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 1040.....	41
Tableau II.3. Caractéristiques physiques de l'acier AISI 1040 .....	41
Tableau II.4. Caractéristiques géométriques et dimensions de la fraise. ....	42
Tableau II.5. Désignation des plaquettes de coupe .....	43
Tableau II.6. Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.....	43
Tableau II.7. Caractéristiques mécaniques .....	47
Tableau. II.8. Matrice de planification par la méthode unifactorielle.....	48
Tableau. II.9. Conditions de coupe pour les essais unifactoriels .....	48
Tableau II.10. Plan général des expériences .....	50
Tableau II.11. Matrice de planification (plan de Box-Behnken) .....	51
Tableau IV. 1. Essais expérimentaux et résultats pour les paramètres technologiques (L27).....	81
Tableau IV. 2. Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra) .....	82
Tableau IV.3. Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ry) .....	83

Tableau IV. 4. Analyse de la variance (ANOVA) pour (Rz) .....	83
Tableau IV. 5. Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de copeaux (Q) .....	86
Tableau IV. 6. Valeurs des paramètres de coupe pour optimisation.....	97
Tableau IV. 7. Optimisation de la réponse pour la rugosité de surface et Q .....	98
Tableau IV.8. Essais expérimentaux et les résultats pour les paramètres technologiques (L27).....	99
Tableau IV.9. Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra).....	100
Tableau IV.10. Analyse de la Variance (ANOVA) pour (Ry) .....	100
Tableau IV.11. Analyse de la Variance (ANOVA) pour (Rz) .....	101
Tableau IV.12. Analyse de la Variance (ANOVA) pour (Q) .....	101
Tableau V.1. Plan de box behenken .....	123
Tableau V.2. Analyse de la Variance pour Vx .....	124
Tableau V.3. Coefficients pour Vx .....	125
Tableau V.4. Pourcentage d'erreur pou Vx .....	129
Tableau V.5. Analyse de la Variance (ANOVA) pour (Vy) .....	130
Tableau V.6. Coefficients pour Vy .....	131
Tableau V.7. Pourcentage d'erreur pou Vy .....	135
Tableau V.8. Analyse de la Variance (ANOVA) pour (Ra) .....	137
Tableau V.9. Coefficients pour Ra .....	137
Tableau V.10. Pourcentage d'erreur pou (Ra) .....	141
Tableau VI.1. Résultats expérimentaux des critères de la rugosité (Ra, Ry, and Rz) .....	150
Tableau VI.2. Valeurs statistiques de l'analyse ANN de (Ra).....	152
Tableau VI.3. Valeurs statistiques de l'analyse ANN pour la rugosité (Ry).....	153
Tableau VI.4. Valeurs statistiques de l'analyse ANN pour la rugosité (Rz).....	153
Tableau IV.5. Détermination des coefficients de RSM et ANN .....	156

# SOMMAIRE

---

## CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Procédés d'usinage .....	6
I.2. Les besoins liés à l'usinage. ....	6
I.3. Procédé de fraisage.....	7
I.3.1. Principales définitions cinématiques et géométriques .....	8
I.3.2 Choix des outils .....	9
I.3.3. Choix de l'angle d'attaque .....	10
I.3.4. Outils de fraisage .....	10
I.4. Vibrations en usinage.....	13
I.4.1. Introduction.....	13
I.4.2. Problématique des vibrations d'usinage.....	14
I.4.3. Types de vibration .....	15
I.4.3.1. Vibrations libres .....	15
I.4.3.2. Vibrations forcées .....	15
I.4.3.3. Vibrations auto-excitées.....	16
I.4.3.4. Vibrations auto-entretenues .....	16
I.4.4. Maîtrise des vibrations d'usinage .....	16
I.5. Rugosité de surface en usinage .....	17
I.5.1. Généralités sur les états de surface.....	17
I.5.2. Description de la rugosité .....	17
I.5.3. Définitions de la Rugosité.....	17
I.5.4. Principaux défauts de la rugosité.....	19
I.5.5. Critères de rugosité.....	20
I.6. Efforts de coupe.....	22
I.6.1. Définition et intérêt de la mesure des efforts de coupes.....	22
I.7. Usure des matériaux de coupe .....	23



1.7.1. Mécanismes et formes d'usure .....	23
1.7.2. Facteurs influençant l'usure .....	24
I.8. Copeaux et Lubrifiants .....	25
1.8.1. Morphologie et types de copeaux.....	25
1.8.2. Lubrifiant et son rôle.....	26
1.8.2.1. Choix du lubrifiant .....	26
I.9. Etat de l'art.....	27
I.10. Conclusion .....	38

## CHAPITRE II. PROTOCOLE DES ESSAIS

II.1. Introduction.....	40
II.2. Moyens utilisés.....	40
II.2.1. Machine-outil .....	40
II.2.2 Matériau utilisé pour les essais de fraisage .....	40
II-2-3- Outil de coupe .....	42
II.2.4. Plaquettes de coupe .....	42
II.3. Equipement de mesure .....	44
II.3.1. Mesure de la rugosité des surfaces .....	44
II.3.2. Mesure de l'usure .....	44
II.3.3. Mesure des vibrations.....	45
II.4. Planification des expériences .....	47
II.4.1. Méthode unifactorielle .....	47
II.4.2. Conditions de coupe .....	48
II.4.3. Méthode multifactorielle.....	49
II.4.4. Plan box-behnken .....	51
II.4.5. Méthode des réseaux de neurones.....	52
II.5. Conclusion.....	52

## CHAPITRE III. INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE EN FRAISAGE DE FACE

III.1. Introduction .....	54
III.2. Influence des paramètres de coupe sur la rugosité (cas de carbure revêtu) .....	54
III.2.1. Influence de l'avance par dent .....	54
III.2.2. Influence de la profondeur de passe .....	55
III.2.3 Influence de la vitesse de coupe .....	56
III.3. Influence des paramètres du régime de coupe sur la rugosité (cas de cermet).....	57
III.3.1. Influence de l'avance par dent .....	57
III.3.2. Influence de la profondeur de passe .....	58
III.3.3. Influence de la vitesse de coupe .....	59
III.4. Influence du mode d'usinage sur la rugosité (cas de carbure revêtu) .....	60
III.5. Influence du mode d'usinage sur la rugosité (cas de cermet) .....	62
III.6. Influence de l'arrosage sur la rugosité (cas de carbure revêtu) .....	64
III.6.1. Influence de l'avance par dent sur la rugosité .....	64
III.6.2. Influence de la profondeur de passe sur la rugosité .....	65
III.6.3. Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité .....	66
III.7. Influence de l'arrosage sur la rugosité (cas de cermet) .....	66
III.7.1. Influence de l'avance par dent sur la rugosité .....	66
III.7.2. Influence de la profondeur de passe sur la rugosité .....	67
III.7.3. Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité .....	68
III.8. Influence du matériau de coupe sur la rugosité .....	69
III.9. Evolution de l'usure en dépouille.....	70
III.9.1. Carbure revêtu GC1030.....	70
III.9.2. Cermet CT530.....	73
III.9.3. Mesure de la rugosité en 3D pour Ra .....	74
III.10. Conclusion.....	76

## CHAPITRE IV. MODELISATION ET OPTIMISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES

IV.1. Introduction .....	78
IV.2. Modélisation de (Ra, Ry, Rz et Q) : Cas de carbure revêtu GC1030.....	80
IV.2.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra, Ry et Rz) .....	82
IV.2.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de copeaux (Q). .....	84
IV.2.3. Analyse de régression de (Ra, Ry, Rz et Q). .....	86
IV.2.4. Les graphes résiduels pour Ra .....	87
IV.2.5. Surface de réponse et graphe de contour pour (Ra, Ry, Rz et Q) .....	89
IV.2.6. Fonction de désirabilité: Optimisation Multi-Réponses .....	95
IV.3. Modélisation des critères de rugosité en fonction de ( $V_c$ , $f_z$ et $ap$ ) : cas de cermet .....	98
IV.3.1. Analyse de la variance pour (Ra, Ry, Rz et Q) .....	100
IV.3.2. Analyse de régression pour (Ra, Ry, Rz et Q) .....	102
IV.3.3. Comparaison entre (Ra, Ry, Rz et Q) expérimentales et prédites .....	113
IV.4. Conclusion .....	114

## CHAPITRE V. INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR LES VIBRATIONS ET MODELISATION

V.1. Introduction.....	116
V.2. Influence des paramètres d'usinage sur les vibrations .....	116
V.2.1. Influence de la vitesse de coupe sur les vibrations .....	116
V.2.2. Influence de l'avance par dent sur les vibrations.....	117
V.2.3. Influence de la profondeur de passe sur les vibrations .....	118
V.3. Influence du mode d'usinage sur les vibrations .....	119
V.4. Modélisation des vibrations ( $V_x$ et $V_y$ ) et de la rugosité (Ra).....	122
V.4.1. Résultats expérimentaux.....	122
V.4.2. Modélisation des vibrations .....	122
V.4.2.1. ANOVA pour ( $V_x$ ) .....	123

V.4.2.1.1. Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction .....	125
V.4.2.1.2. Diagrammes des surfaces 3D et Graphiques de Contour .....	126
V.4.2.1.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Vx) .	128
V.4.2.2. ANOVA pour (Vy). .....	130
V.4.2.2.1. Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction pour (Vy) .....	131
V.4.2.2.2. Diagrammes de surfaces 3D et Graphiques de Contour pour Vy .....	132
V.4.2.2.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Vy ...	134
V.4.2.3. ANOVA pour (Ra) .....	136
V.4.2.3.1. Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction .....	138
V.4.2.3.2. Diagrammes de surfaces 3D et Graphiques de Contour pour (Ra) .....	138
V.4.2.3.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites .....	140
V.5. Conclusion.....	143

## CHAPITRE VI. APPLICATION DE L'APPROCHE DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

VI.1. Introduction .....	145
VI.2. Réseau de neurones artificiels .....	145
VI.2.1. Neurone formel .....	146
VI.2.2. Perceptron simple .....	147
VI.2.3. Perceptrons multicouches.....	148
VI.2.4. Algorithme de rétropropagation .....	148
VI.2.5. Apprentissage .....	148
VI.3. Modélisation des critères de la rugosité de surface (Ra, Ry, and Rz) par ANN .....	149
VI.4. Comparaison entre les modèles ANN et RMS .....	156
VI.5. Conclusion .....	158

## NOMENCLATURE

$V_c$	Vitesse de coupe, m/min
$f_z$	Avance par dent, mm/dt
$a_p$	Profondeur de passe, mm
$a_e$	largeur de coupe radiale, mm
<b><math>R_a</math></b>	Rugosité moyenne arithmétique, $\mu\text{m}$
$R_y$	Rugosité totale, $\mu\text{m}$
$R_z$	hauteur des irrégularités, $\mu\text{m}$
$R_q$	moyenne quadratique, $\mu\text{m}$
$Z$	Nombre de dents
$D$	Diamètre de la fraise, mm
$DF$	fonction désirabilité
$\Omega$	usinabilité désiré
$d_i$	désirabilité
$ANOVA$	Analyse de la variance
$df$	Degrés de liberté
$Cont. \%$	Contribution, %
$P$	Probabilité
$R^2$	Coefficient de détermination
$Q$	Débit de copeaux, $\text{mm}^3/\text{min}$
$VB$	Usure en dépouille, mm.
$VB_{\text{max}}$	Usure en dépouille maximale, mm
$RSM$	Méthode de surface de réponse
$\Phi$	Fonction de réponse

## INTRODUCTION GENERALE

L'État de surface est un paramètre technologique très important du fait qu'il est en relation avec de nombreuses propriétés d'usage des pièces mécaniques, les défauts de surface jouent un rôle primordial dans l'aptitude d'une pièce à remplir une fonction donnée. L'usinage est l'un des procédés les plus utilisés dans l'industrie mécanique. Le fraisage reste le plus souvent nécessaire à l'obtention des produits finaux, surtout si les tolérances exigées sur le produit final sont faibles. Les performances dans le domaine de l'automatisation des machines-outils, le développement rapide des techniques de commande numérique, des outils de coupe et des logiciels de FAO ont aidé à maintenir la compétitivité du procédé d'usinage, particulièrement si ces performances s'accompagnent de gains non négligeables en productivité et en qualité. D'autre part, afin d'en assurer une qualité satisfaisante des produits finis, une attention particulière doit être portée sur la modélisation des paramètres technologiques et aussi l'optimisation des conditions de coupe permettant d'améliorer la qualité et la productivité en utilisant les méthodes statistiques. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche de notre thèse de doctorat qui est structurée comme suit :

Le premier chapitre de la thèse est consacré à l'étude bibliographique sur l'usinabilité des matériaux et les critères de son évaluation, les principales définitions cinématiques et géométriques sur le fraisage, la rugosité de surface, le choix des matériaux de coupe, le rôle de la lubrification, des notions sur le couple outil-matière et en dernier lieu le problème des vibrations lors de l'usinage. La bibliographie traite une autre partie très importante dans ce chapitre, ayant pour but de présenter une synthèse sur les résultats des travaux de recherche (publications) relatifs à l'usinage en fraisage ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation.

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

opérateurs des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

Dans le chapitre III, nous présentons les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur les différents critères de rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier AISI 1040 par deux matériaux de coupe (le carbure revêtu : GC1030 et le cermet : CT530). Les résultats de l'influence du mode de fraisage (opposition et avalent) et la lubrification (avec ou sans arrosage) sont aussi présentés dans ce chapitre. En dernier lieu, nous terminons notre travail par l'exposition des résultats de l'évolution de l'usure ( $VB$  et  $VB_{max}$ ) en fonction de la longueur de coupe ( $L_c$ ), ainsi que la rugosité ( $R_a$ ) en fonction de l'usure ( $VB_{max}$ ).

Dans le quatrième chapitre, nous exposons les résultats des essais pour un plan de Taguchi ( $L_{27}$ ) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Nous avons utilisé la méthode de surface de réponse RSM et l'analyse de la variance ANOVA afin de connaître la contribution des différents facteurs ( $V_c$ ,  $f_z$ , et  $a_p$ ) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Ce chapitre présente aussi une optimisation multi objective des paramètres technologiques étudiés pour le choix optimal des conditions de coupe. Nous avons utilisé deux logiciels de statistique appelés «MINITAB» et «Design-Expert» pour le calcul des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse.

Dans le chapitre V, nous présentons les résultats de l'influence des conditions de coupe sur les vibrations de la pièce dans la direction radiale ( $V_x$ ) et longitudinale ( $V_y$ ) dans le but de comprendre le comportement vibratoire de la pièce selon des essais unifactoriels. La méthode de surface de réponse RMS a été employée pour la modélisation de la vibration de la pièce et la rugosité de surface en fonction des conditions en utilisant un plan de box-behnken (15 essais).

Au chapitre VI, nous avons présenté une deuxième méthode de modélisation qui concerne les réseaux de neurones artificiels (ANN). Cette dernière est appliquée pour la modélisation non linéaire du processus de coupe en fraisage. L'étude est réalisée pour les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) en fonction de différents paramètres de régime de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) pour un plan de 27 essais. La fin du chapitre est réservée à une

comparaison entre la modélisation par la méthode de la surface de réponse RSM et la modélisation par ANN et cela dans le but de vérifier l'efficacité et la robustesse des deux méthodes.

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



# CHAPITRE I

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## **I. Etude bibliographique**

### **I.1. Procédés d'usinage**

L'usinage par enlèvement de matière est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir de pièces moulées, extrudées ou forgées, ainsi la principale technique utilisée dans la production des pièces mécaniques pour l'industrie automobile, aéronautique, ferroviaire etc. Il représente une partie importante du coût des pièces. L'introduction de nouvelle génération de machines travaillant à grande vitesse de coupe et à grande vitesse d'avance, le développement de nouveaux outils et la nécessité d'une plus grande productivité associée à une meilleure qualité des produits élaborés nécessitent une connaissance approfondie des processus d'usinage [1] et [2].

Avec le travail à grande vitesse, la machine-outil passe à la vitesse supérieure. La pièce usinée par UGV est d'une précision supérieure. Tout d'abord, les efforts de coupe sont réduits. Donc, la pièce subit moins de déformation. Ensuite, les calories sont dissipées dans les copeaux avant d'avoir le temps de pénétrer dans la pièce. Moins sollicitée en température, la pièce conserve sa stabilité dimensionnelle originale.

L'état de surface de la pièce à usiner est amélioré par l'écoulement plastique du matériau dans la zone de cisaillement. L'augmentation du débit des copeaux autorise une meilleure productivité. UGV autorise l'usinage de pièces qu'il était impossible d'usiner auparavant avec les moyens conventionnels [3].

UGV a été rendue possible grâce aux progrès réalisés dans le développement des outils de coupe, aux avancées très récentes et considérables au niveau des broches des machines-outils, des guidages, de transmissions de mouvement, des commandes numériques, etc.... [4].

### **I.2. Les besoins liés à l'usinage.**

Depuis leur apparition, les techniques d'usinage ont subi de multiples améliorations. Les procédés de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de rester en phase avec les exigences industrielles, qu'elles soient économiques ou écologiques. Aujourd'hui, l'ingénieur de

fabrication se doit donc de pouvoir répondre à une multitude de questions afin de réaliser rapidement des pièces avec la qualité demandée et à moindre coût.

Par exemple, dans le cas de l'usinage :

- Quel type de machine faut-il utiliser et suffira-t-elle en termes de puissance et de précision ?
- Quelles sont les conditions de coupe à utiliser pour minimiser l'endommagement des outils ou du matériau usiné ?
- Quelles sont les solutions à adopter lors de la conception des outils et dans quels matériaux doivent-ils être fabriqués pour améliorer leur durée de vie et/ou la qualité des états de surface des pièces usinées ?
- Quelles sont les propriétés mécaniques de la pièce après usinage ?
- Est-il possible d'usiner sans apport de lubrifiant ? ... [4].

### **I.3. Procédé de fraisage**

Le fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de copeaux qui s'effectue donc sur différents types de machines, allant des fraiseuses conventionnelles dont la conception date du début du siècle jusqu'aux machines CNC sophistiquées à axes multiples. Il faut donc étudier le type d'usinage concerné afin de déterminer comment l'exécuter au mieux, ce qui permettra un double gain de temps et de qualité au niveau du résultat. Lorsqu'il est décidé qu'une pièce doit être usinée par fraisage, l'étape suivante consiste à choisir la machine appropriée : fraiseuse horizontale, verticale, universelle, à portique, à commande numérique ou centre d'usinage, c'est-à-dire la meilleure solution pour l'opération en question. Une fois obtenue une bonne compatibilité entre les paramètres d'usinage et les capacités de la machine choisie, il convient de déterminer divers facteurs tels que stabilité, précision et rugosité de surface désirée.

L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux. Les avantages du fraisage sont un rendement élevé, une bonne rugosité de surface et une haute précision, ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes [5].

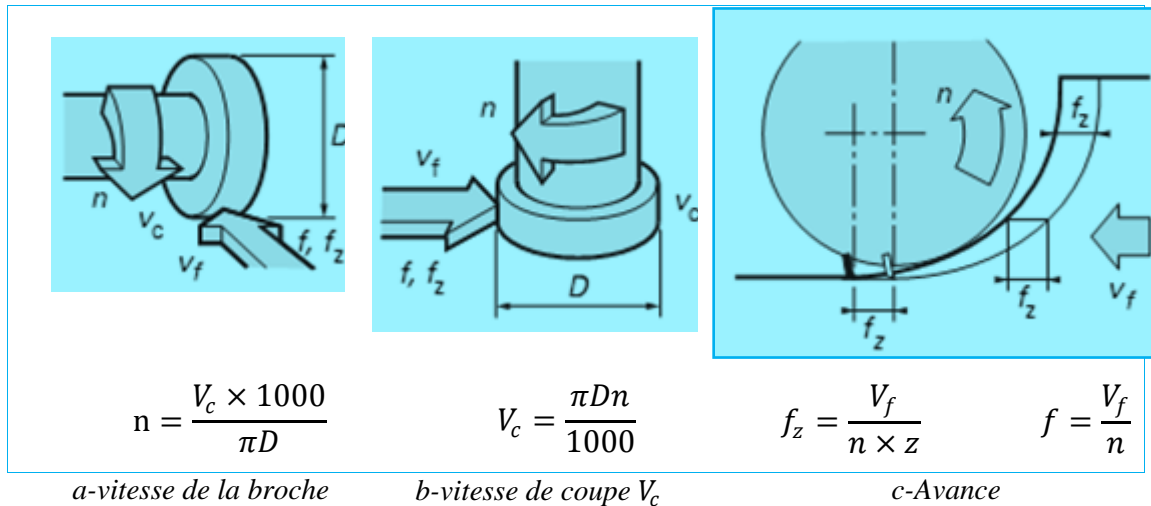
- L'instabilité est la principale menace en usinage des métaux par enlèvement de copeaux, non seulement pour la qualité des résultats obtenus, mais également en ce qui concerne la durée de vie et les performances de l'outil.

- La stabilité est essentielle pour obtenir de bons résultats. La machine a-t-elle une rigidité suffisante, la broche est-elle suffisamment robuste, ses paliers sont-ils en bon état, le mécanisme d'avance est-il également en bon état, les outils sont-ils solidement fixés et la pièce est-elle fermement fixée ?

### I.3.1. Principales définitions cinématiques et géométriques

- La vitesse de broche ( $n$  en tr /min) est le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil effectue par minute.

- La vitesse de coupe ( $V_c$  en m/min) est la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné. (Fig. I.1a et 1b).



$n$  : vitesse de la broche (tr/min),  $V_c$  : vitesse de coupe (m/min),  $D$  : diamètre de l'outil (mm),  $V_f$  : avance par minute (mm/min),  $f$  : avance par tour (mm/tr),  $f_z$  : avance par dent (mm/dt),  $Z$  : nombre de dent.

**Fig. I.1.** Vitesse de la broche, vitesse de coupe et avances

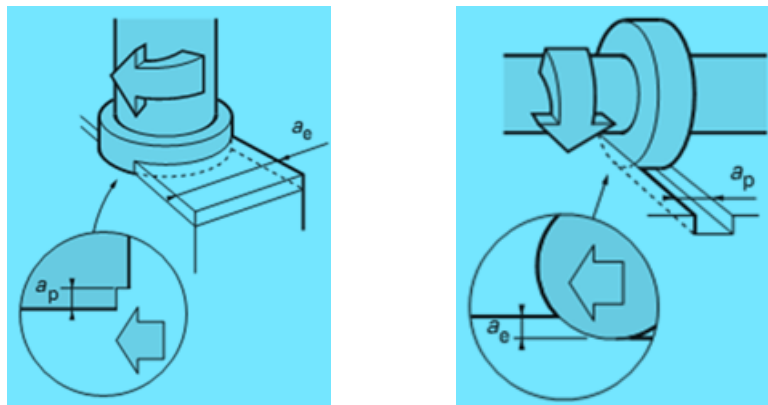
- L'avance par minute ou vitesse d'avance ( $V_f$  en mm/min) (Fig. I.1c) est l'avance de l'outil en direction de la pièce. On parle également ici d'avance de table.

- L'avance par tour ( $f$  en mm/tr) (Fig. I.1c) est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfacer à travailler en finition.

- L'avance par dent ( $f_z$  en mm/dent) (Fig. I.1c) est un important paramètre en fraisage. La fraise étant un outil à arêtes multiples, il faut en effet disposer d'un moyen de mesure pour contrôler que chacune de ces arêtes travaille dans des conditions satisfaisantes. La capacité d'enlèvement de matière de chaque dent est l'élément limitatif au niveau des performances de l'outil. L'avance par dent indique la distance linéaire parcourue par l'outil alors qu'une certaine dent est engagée.

- La profondeur de coupe, axiale ( $a_p$ ) en surfacage ou radiale ( $a_e$ ) pour le fraisage d'épaulements, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce.

- La largeur de coupe ou profondeur de coupe radiale ( $a_e$ ) en surfacage et axiale ( $a_p$ ) pour le fraisage d'épaulements, est la distance parcourue par l'outil sur la surface de la pièce (Fig. I.2).



$a_p$  : Profondeur de coupe axiale       $a_e$  : largeur de coupe radiale

**Fig. I.2.** Largeur et profondeur de passe.

### I.3.2 Choix des outils

Le type de matière à usiner peut restreindre le choix des outils envisageables. Il existe ainsi des fraises à surfacer universelles, capables d'usiner l'acier, l'acier inoxydable, la fonte, le titane et, dans une certaine mesure, les alliages d'aluminium ou de cuivre.

Sept types principaux de matières sont à prendre en considération pour le choix de l'outil.

- les matières à copeaux longs (aciers principalement) ;
- l'acier inoxydable ;
- les matières à copeaux courts (fonte grise, fonte nodulaire, etc.) ;
- les alliages réfractaires à haute limite d'élasticité ;
- les matières douces (alliages d'aluminium ou de cuivre, etc.) ;
- les matières dures ;
- le titane.

### I.3.3 Choix de l'angle d'attaque

L'angle d'attaque est l'un des indicateurs essentiels en ce qui concerne les différents types de fraises à surfacer. C'est là également où le choix diverge entre fraise à surfacer proprement dite ou fraise à surfacer-dresser. S'il est nécessaire d'exécuter un dressage, la fraise choisie doit obligatoirement avoir un angle d'attaque de 90 degrés [6].

### I.3.4. Outils de fraisage

Un outil de fraisage peut couper dans deux directions, parfois connues sous le nom de fraisage *conventionnel* ou en *opposition* et fraisage en *avalant*. (Fig. I.3 et Tab. I.1).

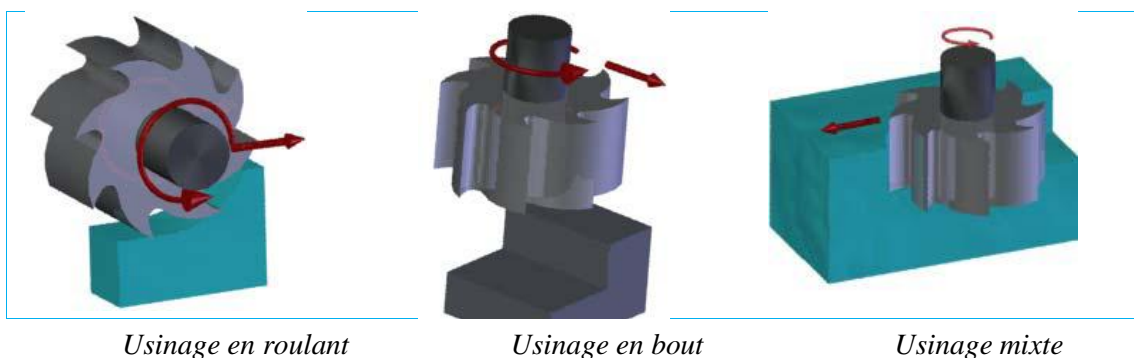
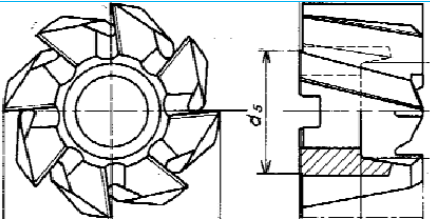

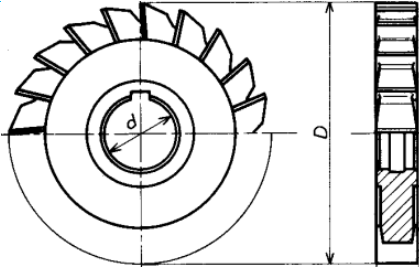
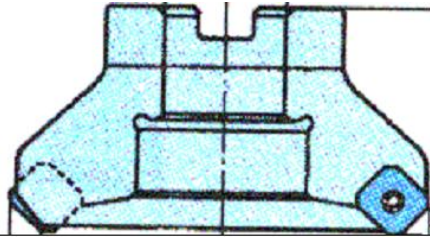
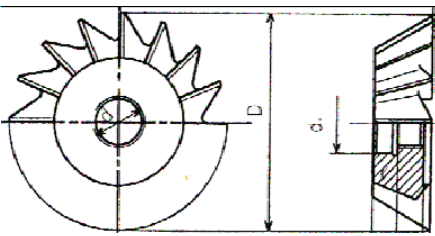


Fig. I.3. Modes d'usinage

**Tableau. I.1.**  
Les outils de fraisage

<p>Fraise deux tailles ARS</p>	<p>Usinages de plans. La fraise est en ARS. Cette fraise, une des plus courante, est remplacée par des fraises carbure.</p>	
<p>Fraise deux tailles à plaquettes rapportées</p>	<p>Fraise carbure, de défonçage. Cette fraise permet des ébauches rapides, mais ne permet pas de plonger dans la matière (pas de « coupe au centre »)</p>	
<p>Fraise 3 tailles</p>	<p>Fraise pour usiner les rainures. 3 plans sont usinés dans une seule passe.</p>	
<p>Fraise à surfacer</p>	<p>Fraise carbure à surfacer pour usiner des grands plans.</p>	
<p>Fraise conique de forme</p>	<p>Fraise de forme pour usiner des rainures de queue d'aronde.</p>	

**a- Fraisage conventionnel (opposition):**

Le mouvement d'avance de la pièce et le mouvement de coupe de la fraise dans la zone fraisée sont de sens contraire. La coupe est si légère au début comme l'outil ne coupe pas, mais glisse à travers la surface du matériel, jusqu'à ce que la pression suffisante soit accumulée et les morsures de dent soudainement commencent à couper. Ceci déforme le matériel (diagramme gauche), le durcissement de travail. Le glissement laisse une finition faible sur le matériel [7].

**Avantage:**

- L'engagement de la dent n'est pas fonction des caractéristiques de surface de la pièce usinée.
- Les souillures ou écailles de la surface n'affectent pas la durée de vie de l'outil.
- Le procédé de coupe est adouci, d'autant plus que les dents de la fraise sont affutées.

**Inconvénients :**

- L'outil a tendance à trembler.
- La pièce usinée a tendance à être décalée vers le haut, ce qui implique d'importants blocages.
- Usure plus rapide de l'outil qu'en fraisant en avalant.
- Les copeaux tombent devant la fraise – évacuation difficile.
- La force ascendante a tendance à relever la pièce usinée.
- Plus de puissance est requise à cause d'une friction accrue.
- La surface de finition n'est pas bonne à cause de l'évacuation des copeaux.

**b-Fraisage en avalant:**

Lors du fraisage en avalant, l'usinage démarre avec un copeau dans son état le plus épais. Le mouvement d'avance et la rotation de l'outil ont la même direction.

**Avantage:**

- Les forces de coupe vers le bas permettent de maintenir la pièce usinée en place, particulièrement pour les parties peu épaisses.
- Evacuation plus facile des copeaux – Les copeaux sont évacués derrière la fraise.
- Moins d'usure – diminution de 50% de la durée de vie de l'outil.
- Finition de surface améliorée – Les copeaux sont moins emmenés par la dent.
- Moins de puissance requise – on peut utiliser une fraise avec un angle de coupe élevé.
- Le fraisage en avalant exerce une force sur la pièce à usiner.

**Inconvénients :**

- Lors de l'engagement des dents dans la pièce usinée les forces ont un impact important, c'est pourquoi cette opération doit avoir un montage rigide, et tout jeu doit être éliminé.
- Le fraisage en avalant ne convient pas à l'usinage de pièces ayant un mauvais état de surface, telles que les pièces de forge et moulées. En effet les écailles sur la



matière causent une usure excessive et abîment les dents, réduisant ainsi la durée de vie.

## **I.4. Vibrations en usinage**

### **I.4.1. Introduction**

Depuis plus d'un siècle les vibrations d'usinage sont identifiées comme un frein majeur à la productivité. Lionel ARNAUD [8] montre d'abord que ce problème est multifactoriel, en faisant intervenir au même niveau des caractéristiques de la machine, de l'outil, de la pièce ainsi que les choix des conditions de coupe.

De plus, le problème est multifacette car il peut se manifester par des bruits, des états de surface dégradés, des casses d'outil, de l'usure de la machine, etc.

En 1907, dans son ouvrage fondateur sur l'art de la coupe des métaux, [9] :« le problème des vibrations d'usinage est le problème le plus obscur auquel est à faire face l'usineur ». Les solutions trouvées par les usineurs, sont souvent obtenues par tâtonnement et par le fruit de l'expérience (changer la vitesse, changer l'outil, augmenter le nombre de passes, brider la pièce différemment, mettre des éléments en caoutchouc, etc.....).

Les vibrations, phénomène dit aussi broutement, du système machine-montage-outil-pièce dégradant la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Un broutement important diminue la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil [8].

De mauvais choix des conditions de coupe peuvent provoquer, lors de l'usinage, des vibrations de l'outil, se transmettant au porte-outil et à la machine. Les vibrations constituent un obstacle majeur pour la recherche d'une plus grande productivité et d'une meilleure qualité des pièces réalisées. Ils accélèrent l'usure, dégradent le bec de l'outil et conduisent à des états de surface médiocres. Néanmoins, dans le processus d'enlèvement de matière sur machines-outils l'apparition de vibrations est inévitable. Dès que l'amplitude dépasse les limites de la précision dimensionnelle et selon la forme des surfaces génératrices, le phénomène vibratoire est préjudiciable. Les vibrations à l'interface outil/copeau, lors de l'usinage sont principalement dues aux

variations du frottement à l'interface, au contact sur la face en dépouille de l'outil et aux variations d'épaisseur et de largeur usinées [1].

Ainsi, il est nécessaire de développer des modèles permettant d'étudier les phénomènes vibratoires rencontrés au cours de l'usinage et de prévoir les conditions de stabilité des processus de coupe [2].

#### **I.4.2. Problématique des vibrations d'usinage**

L'obtention d'un état de surface dégradé par des ondulations plus ou moins régulières et de cotes hors tolérance est la manifestation la plus classique des vibrations d'usinage (Fig. I.4 et I.5). Parfois la dégradation est telle que la pièce est rebutée.

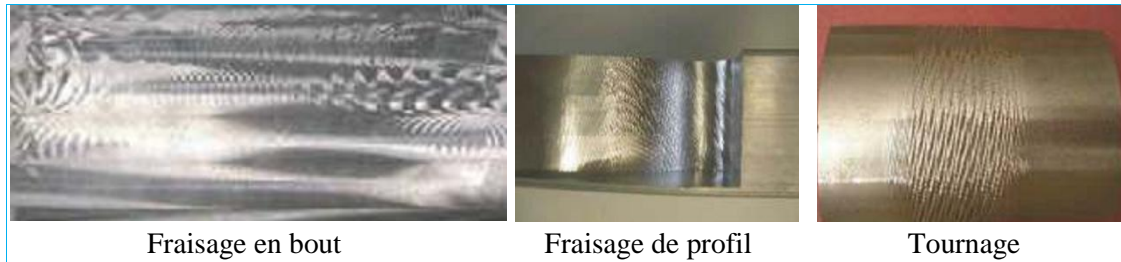
Les bruits, généralement stridents, sont aussi très caractéristiques. Ils sont parfois si puissants et désagréables qu'ils obligent les opérateurs à porter des protections auditives ou même à s'éloigner de la machine. Il est très courant, voire quotidien, d'entendre de tels bruits dans les ateliers d'usinage.

L'usure prématurée des outils est aussi un phénomène assez caractéristique des vibrations d'usinage. Sous l'effet des vibrations, l'outil subit des chocs importants sur sa face de dépouille, ce qui entraîne une détérioration rapide de l'arête de coupe.

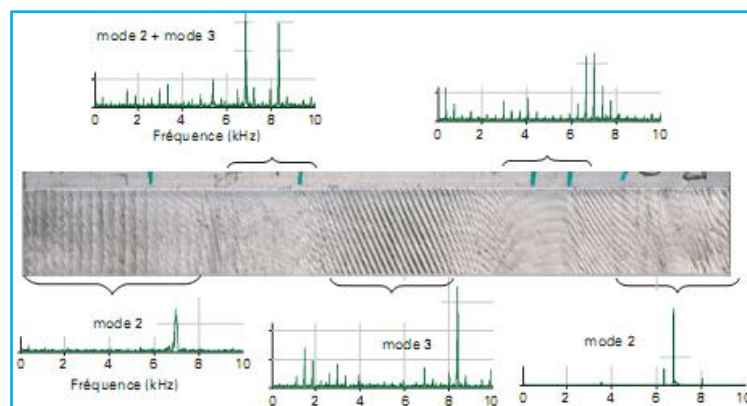
On constate aussi des usures prématurées sans bruits caractéristiques ni états de surface ondulés, ce qui rend plus délicate leur association avec les vibrations. Ces derniers cas sont souvent confondus avec une mauvaise adéquation outil-matière et seule une étude précise permet de montrer que ce sont bien des vibrations qui génèrent cette usure prématurée.

L'usure prématurée de broche est souvent associée aux vibrations. Surtout depuis que les broches UGV se sont généralisées, car elles sont relativement plus fragiles et plus coûteuses que la génération de broches précédentes (le coût de remplacement d'une broche de fraisage UGV variait entre 10 k€ et 20 k€ en 2011). Le sujet fait encore débat, certaines études montrent que les vibrations peuvent engendrer de fortes surcharges sur les paliers, alors que d'autres études semblent montrer que l'usure des broches UGV est surtout liée à la succession d'incidents (rupture d'outil, surcharges ponctuelles, manque de lubrification, etc.) et assez rarement aux vibrations.

La réduction de la productivité est souvent le symptôme le plus évident du problème. En effet, dans les situations typiques évoquées précédemment (outils longs, parois minces, machines souples, etc.), il est très courant de constater que ni les engagements d'outils ni la puissance de la machine ne sont exploités à 100 %. On observe ainsi très souvent une réduction de plus de moitié entre les conditions de coupe initialement prévues et celles réellement en production, avec pour seule justification que « sinon cela vibre trop », comme le disent souvent les usieurs. [8].



*Fig. I.4. État de surface dégradé par les vibrations [8]*



*Fig. I.5. Fréquences de vibrations le long d'un usinage [8]*

### I.4.3. Types de vibration

En fraisage, trois types de vibrations peuvent apparaître : les vibrations libres, les vibrations forcées et les vibrations auto-entretenues [10].

#### I.4.3.1. Vibrations libres

Il s'agit de vibrations d'une structure (outil, broche, pièce) en réponse à un choc ou un lâcher. Ce type de vibrations n'intervient généralement pas pendant l'usinage [11].

#### I.4.3.2. Vibrations forcées

Les vibrations forcées sont causées par la présence d'une sollicitation périodique. En usinage, ces vibrations interviennent essentiellement en fraisage ou en tournage

interrompu. Ils naissent de la variation périodique des efforts de coupe, liée par exemple au passage des dents en fraisage. Mais il existe d'autres sources de vibrations forcées, telles qu'une excentration de l'outil ou une hétérogénéité dans la matière usinée. En général, les vibrations forcées dégradent peu l'état de surface de la pièce.

Les vibrations forcées apparaissent sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par:

- La variation des forces qui s'exercent sur le système, variation due à la coupe intermittente ou une surépaisseur variable.
- Les effets dynamiques provoqués par un mauvais équilibrage des masses en mouvement.
- La précision insuffisante des guidages et organes de transmission.

#### **I.4.3.3. Vibrations auto-excitées**

Les vibrations auto-excitées générées par le processus de formation du copeau qui sont bien plus fréquentes que les vibrations forcées, sont à rechercher dans le phénomène de coupe proprement dit; ce sont: La variation de la force de frottement du copeau sur l'outil, de l'outil sur l'ébauche. L'écroûissage irrégulier de la couche enlevée suivant son épaisseur [8].

#### **I.4.3.4. Vibrations auto-entretenues**

Contrairement aux vibrations forcées, les vibrations auto-entretenues sont propres aux opérations d'usinage par enlèvement de matière. Ces vibrations entre l'outil et la pièce sont la cause du broutement (chatter). Ce phénomène est très néfaste pour l'usinage, car il dégrade fortement l'état de surface, en générant des stries sur la pièce. Ce phénomène augmente également la dégradation de l'outil coupant et de la broche, tout en générant parfois beaucoup de bruit [10].

#### **I.4.4. Maîtrise des vibrations d'usinage**

De nombreuses opérations existent en usinage par outil coupant : fraisage, tournage, perçage... Elles sont toutes soumises au problème des vibrations d'usinage, initiées par la coupe elle-même. Ceci fait de l'étude des vibrations d'usinage une thématique consistante [11].

L'utilisation de l'UGV permet souvent des gains importants dans l'enlèvement de matière. L'apparition de vibrations pendant l'usinage peut cependant limiter sa mise en œuvre dans un contexte industriel. Ces vibrations limitent le débit copeau, détériorent la qualité de la pièce, et peuvent conduire à une ruine accélérée de l'outil et de la machine. Pour éviter leur apparition, plusieurs types de réponses ont été apportés. Elles incluent le développement d'outils, ou de porte-outils plus rigides, ou ayant des propriétés d'amortissement [12] et des études plus détaillées du phénomène de vibration [13]. En fraisage, la qualité de la coupe peut être dégradée par deux phénomènes vibratoires : le broutement, provoqué principalement par le mécanisme de régénération des surfaces usinées et les vibrations forcées dues à la périodicité de la coupe. Afin de déterminer les conditions favorables d'usinage, G. Peigne [14] a développé un simulateur de fraisage qui utilise une modélisation dynamique de la coupe à l'échelle macroscopique et intègre le comportement dynamique de l'ensemble "pièce outil machine".

## **I.5. Rugosité de surface en usinage**

### **I.5.1. Généralités sur les états de surface**

La structure superficielle lors de l'usinage des métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la surface usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération.

### **I.5.2. Description de la rugosité**

Les rugosités de surfaces, auxquelles on ne peut échapper, avaient déjà attiré l'attention de grands noms de l'histoire telle [15] et [16]. Jusqu'aux années 1930, l'analyse et la caractérisation de surfaces rugueuses se limitaient à une comparaison visuelle et tactile avec des étalons obtenus par les méthodes d'usinage les plus courantes. La technique de mesure de la rugosité est très utilisée, elle a subi aujourd'hui de nombreuses améliorations.

### **I.5.3. Définitions de la Rugosité**

La rugosité est une caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide.

Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication.

✓ *Surface géométrique* : sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de côtes nominales.

✓ *Surface spécifiée* : Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des côtes nominales du dessin.

✓ *Surface mesurée* : Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.

✓ *Surface réelle* : Surface obtenue au cours de la fabrication (Fig. I.6).

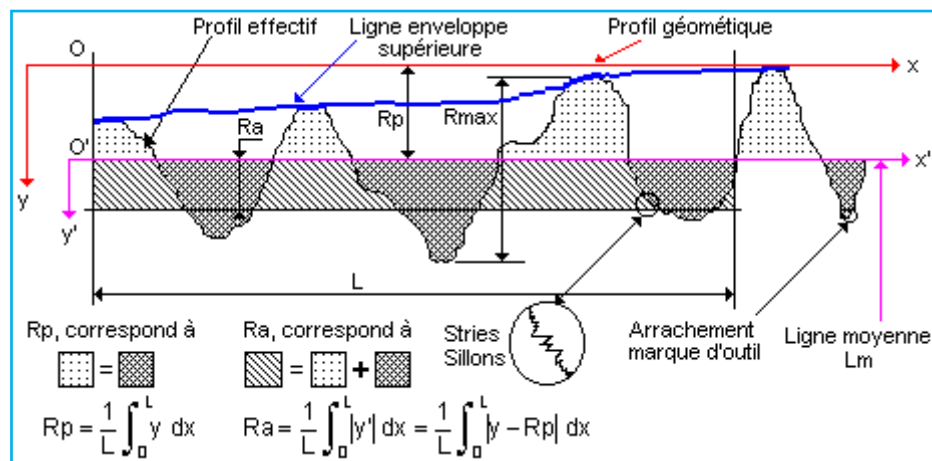


Fig. I.6. Caractéristiques du profil

- $L$  : Longueur de base du profil moyen
- $R_p$  : Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée  $y$  de tous les points du profil sur la longueur de base  $L$ .
- $R_a$  : Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée  $y'$  (entre chaque point de la courbe et l'axe  $Ox'$ ).

#### I.5.4. Principaux défauts de la rugosité

On appelle état de surface l'ensemble des écarts géométriques de la surface d'une pièce par rapport à sa spécification idéale [17]. L'aptitude d'une surface à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions notamment des caractéristiques de ces états de surface. Les défauts de surface jouent un rôle important dans l'aptitude d'une pièce mécanique à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (Fig. 1.7). L'état de rugosité dépend en effet des caractéristiques très diverses telles que :

- le frottement de glissement et de roulement,
- la résistance au matage,
- l'étanchéité,
- la résistance à l'écoulement des fluides,
- la facilité d'accrochage des revêtements,
- la résistance aux efforts alternés.

Les défauts sont :

✓ *Défauts de 1<sup>er</sup> ordre* : ce sont des défauts dus à des écarts de forme (rectitude, cylindricité, etc.) et de position (perpendicularité, parallélisme, etc.) provenant de la déformation de la pièce pendant et après l'usinage, des défauts de bridage, de la flexion des éléments de la machine, d'un mauvais guidage des éléments mobiles ou de l'usure des organes de la machine-outil (Fig. 1.7.).

✓ *Défaut de 2<sup>ème</sup> ordre* : Défauts plus petits. ayant l'aspect général d'une ondulation, et provenant de l'avance par tournage ou en fraisage, de vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil.

✓ *Défauts de 3<sup>ème</sup> ordre* : Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations haute fréquence.

✓ *Défauts de 4<sup>ème</sup> ordre* : Fentes et piqûres dues à des marques d'outil ou à des vibrations haute fréquence. L'ensemble des défauts de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordres constituent la rugosité de la surface.

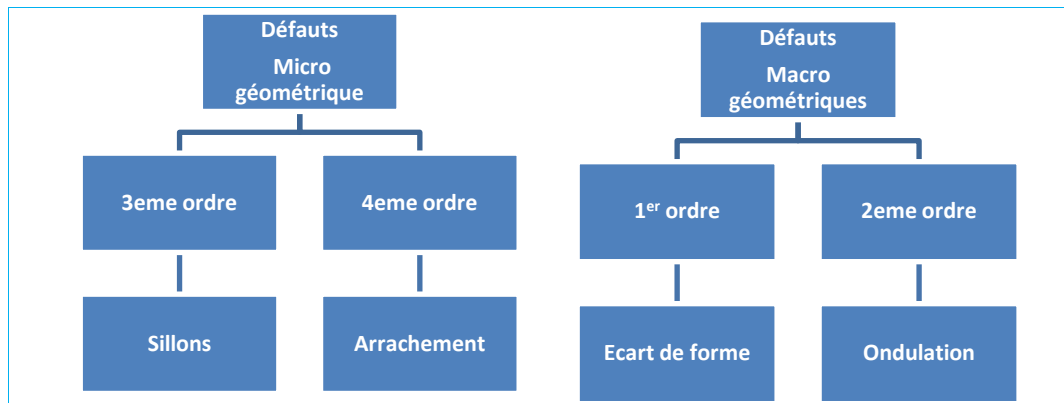


Fig. I.7. Défauts Macro géométriques et Micro géométriques

Les défauts microgéométriques (3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordres) caractérisent la rugosité de la surface ; celle-ci se définit à partir de l'état d'une portion de surface très limitée, donc indépendamment de la qualité macrogéométrique globale de la surface. Les défauts du 3<sup>ème</sup> ordre sont caractérisés par la forme théorique de la surface engendrée par le déplacement de l'outil (sillons hélicoïdaux dans le chariotage).

Les défauts du 4<sup>ème</sup> ordre découlent des imperfections associées à l'action de l'outil (présence du copeau adhérent).

### I.5.5. Critères de rugosité

- *Rugosité moyenne arithmétique  $R_a$*  : Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité située perpendiculairement à la médiane dans le segment mesuré (Fig. I.8, I.9 et Eq. I.1),  $R_a$  mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation  $l_m$ .

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| dx \quad (I.1)$$

- *Rugosité moyenne profondeurs  $R_z$*  (Eq. I.2) : Profondeur moyenne de rugosité, c'est la valeur moyenne de rugosité sur cinq longueurs mesurées à la suite.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \quad (I.2)$$

- *Hauteur maximale des pics  $R_p$*  (Eq. I.3) : C'est la hauteur maximale de saillie de rugosité.  $R_p$  est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).



$$R_p = R_{p3} \tag{I.3}$$

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4} \tag{I.4}$$

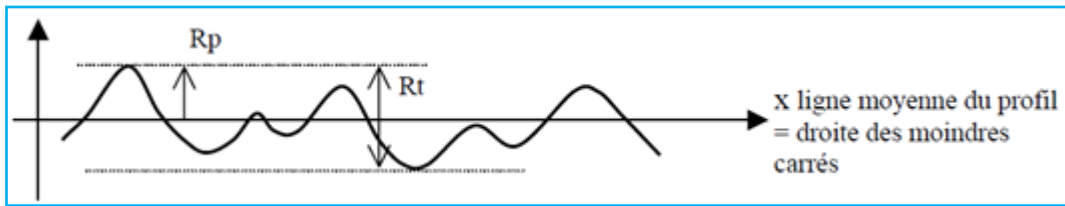


Fig. I.8. Paramètres géométriques de la norme « ligne moyenne »

- Profondeur maximale des vallées  $R_v$  : Profondeur maximale du profil de rugosité R en dessous de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation  $l_m$ .

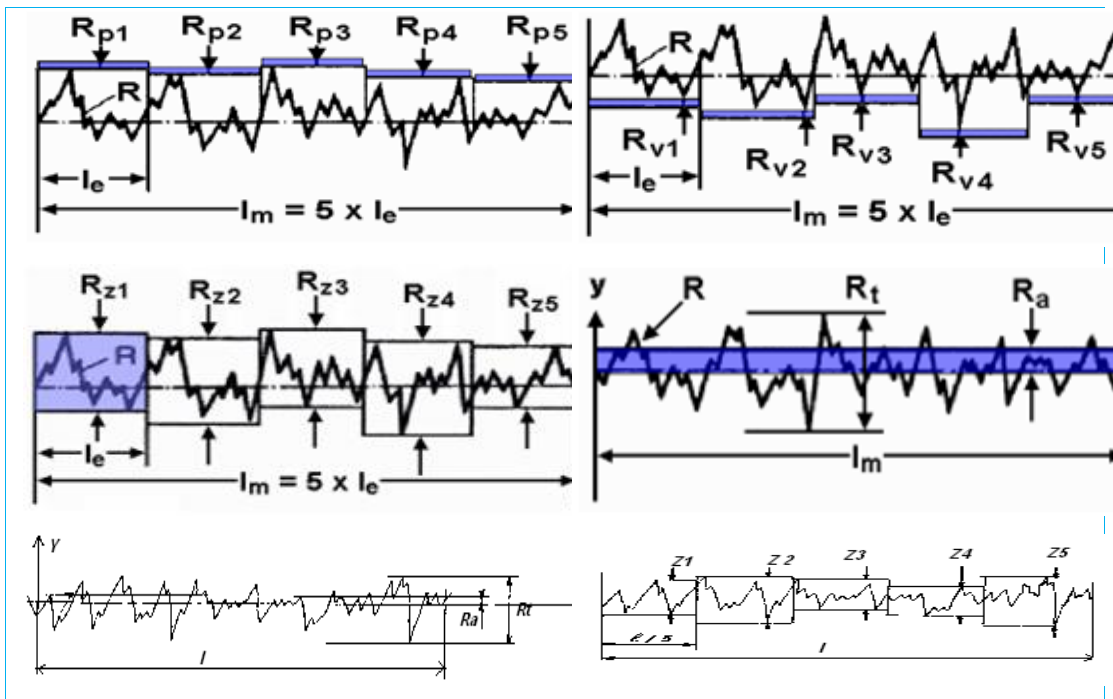


Fig. I.9. Les différents critères de la rugosité.

## I.6. Efforts de coupe

La prédiction des efforts de coupe en usinage est un outil pour l'étude et l'optimisation de la stabilité de la coupe, de l'intégrité de surface obtenue, de l'usure des outils mais aussi de leurs trajectoires et de leur géométrie propre [18].

Dans le contexte actuel de la recherche du haut niveau de qualité des produits fabriqués, la possibilité d'obtenir des prédictions réalistes des valeurs d'efforts de coupe devient très importante. En effet, connaître le niveau des efforts de coupe pendant une opération d'usinage permettrait de réduire le nombre d'essais longs et coûteux dont le but est la détermination des meilleures conditions de coupe et de la meilleure géométrie d'outil pour une opération d'usinage donnée.

### I.6.1. Définition et intérêt de la mesure des efforts de coupes

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 les renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage dans les conditions de l'apparitions des vibrations auto-excitées ou broutage et indirectement, dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur le matériau coupé [19].

Le fraisage donne naissance 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 (Fig. I.10).

- $F_v$  (ou  $F_y$ ): composante dans le sens de rotation de la fraise appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. Elle a la plus grande valeur absolue.
- $F_a$  (ou  $F_x$ ): composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance, ou effort axial [20].
- $F_r$  (ou  $F_z$ ): composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres (suivant l'axe de la fraise), appelée effort de refoulement ou effort radial.

➤  $F$  : La résultante de coupe - peu utilisée en pratique - représente la diagonale d'un parallélépipède. Elle est égale à la somme vectorielle des trois composantes (Eq. I.5).

$$F = \sqrt{F_v^2 + F_a^2 + F_r^2} \quad (\text{Eq. I.5})$$

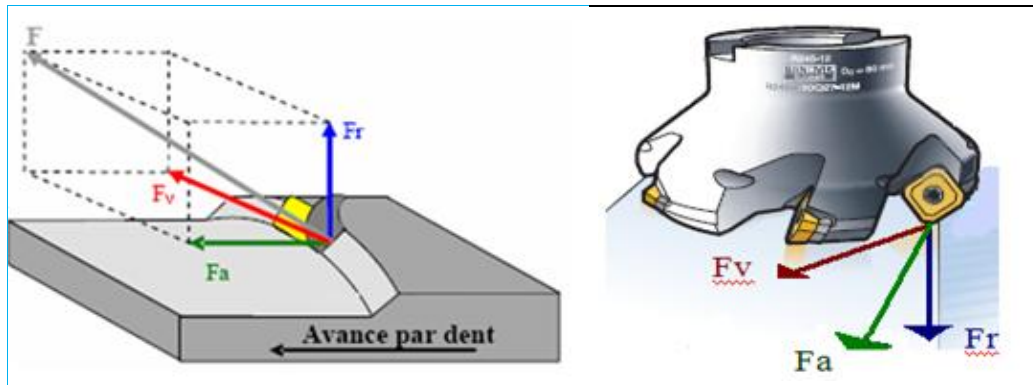


Fig. I.10. Composantes de l'effort de coupe [21]

## I.7. Usure des matériaux de coupe

Durant le processus de coupe et suite à l'action intensive et mutuelle entre les surfaces de contact de la partie active de l'outil et celles de la pièce à usiner, surgissent de grands efforts de coupe, des frottements et de hautes températures, qui provoquent l'apparition de l'usure sur les facettes de l'outil. Celle-ci conduit à l'endommagement de la qualité de l'état de surface et affecte la précision de la pièce usinée. L'usure des outils de coupe est un processus très complexe, durant lequel, sur les surfaces de contact de l'outil avec les copeaux et la pièce à usiner, apparaissent des phénomènes physico-chimiques. Elle affecte également les paramètres géométriques (angles et rayon du bec) de l'outil, la température, les efforts de coupe, la durée de vie, la précision macro et microgéométrique de la surface usinée [22].

### I.7.1. Mécanismes et formes d'usure

Le mécanisme d'usure s'explique par l'effritement, l'abrasion, l'adhésion, la diffusion, corrosion et la fatigue thermique (Fig. I.11). En fonction des conditions de travail (propriétés physico-mécaniques de la matière à usiner et celles du matériau de l'outil, éléments du régime de coupe, liquides de lubrification et d'arrosage, rigidité du système usinant... etc.), l'usure des outils de coupe se manifeste d'une manière très variée. En règle générale, l'outil s'use suivant plusieurs surfaces et en particulier la

surface d'attaque et ses surfaces de dépouille (Fig. I.12) suivant 6 modes d'usures (en dépouille, en cratère, en entaille, par déformation plastique, par écaillage et par rupture de la pointe de l'outil) [22].

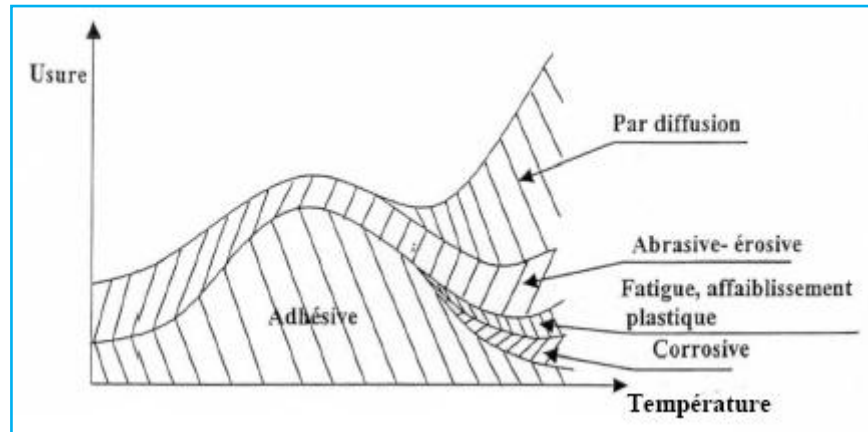


Fig. I.11. Mécanismes d'usure [23]

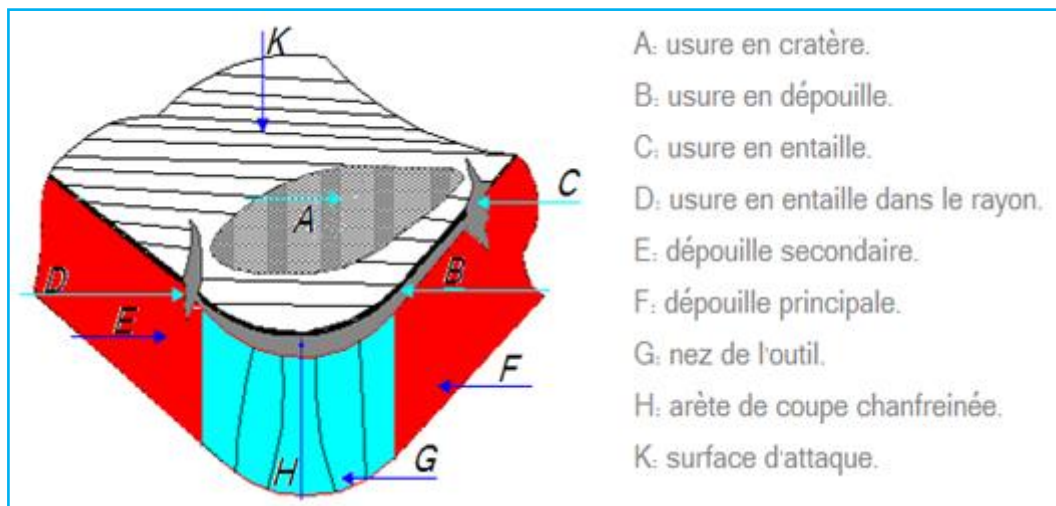


Fig. I.12. Différentes formes d'usure [22]

### 1.7.2. Facteurs influençant l'usure

- *Vitesse de coupe* : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe. Ce paramètre a une très grande influence sur l'usure,
- *Avance* : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe et diminuent la durée de vie de l'outil.

- *Profondeur de passe* : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur de long de l'arête tranchante son influence reste modeste sur l'usure.

- *Matériau usiné* : Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de ces certains éléments d'addition).

- *Lubrification* : Son influence permet une amélioration de 25% sur la durée de vie.

De nombreux essais ont été effectués pour démontrer l'effet des différents facteurs sur l'usure des outils. Il est bien établi que la vitesse de coupe est une variable importante qui influe sur l'usure des outils [24].

## **I.8. Copeaux et Lubrifiants**

### **I.8.1. Morphologie et types de copeaux**

Les copeaux sont continus (forme de ruban) dans le cas des métaux malléables (acier) et fragmentés dans le cas des métaux non malléables (bronze et fonte). Les copeaux doivent être évacués, sinon ils tracent des sillons sur la surface usinée. La formation de copeaux est toujours accompagnée d'un dégagement de chaleur dû au frottement du copeau glissant sur la face de coupe et au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil. Ce dégagement de chaleur provoque une augmentation de la température de la pièce et de l'outil. L'échauffement de la partie active de l'outil est fonction d'une part de la vitesse de coupe  $V_c$  et croit avec cette dernière. La morphologie de copeaux est fortement influencée par les paramètres de coupe (essentiellement l'avance, la profondeur de passe). Il se forme par refoulement du métal devant la surface d'attaque de l'outil suivie d'un cisaillement d'un élément de copeau et du glissement de cet élément cisailé sur la face d'attaque. Les mécanismes de génération de copeaux et les phénomènes thermomécaniques, intervenant conduisent, à l'échelle micrographique, à la formation de copeaux de natures et de morphologies très différentes. Les copeaux peuvent être classifiés suivant trois grands groupes :

- Copeaux continus : écoulement sans cisaillement se rencontre dans les matériaux ductiles (grand allongement) ou avec autre matériaux, mais à grande vitesse avec lubrifiant.

- Copeaux discontinus, fragmentés, brisés ou cisillés : sur tout rencontrés dans l'usinage des fontes ou avec d'autres matériaux à vitesse faible, c'est-à-dire avec un frottement intense sur la face d'attaque d'outil.

- Copeau dit avec arête rapportée : lorsque la surface de coupe est obtenue par ce copeau adhérent, c'est-à-dire sans contact avec l'arête de l'outil. On obtient souvent dans ce cas une surface usinée rigoureuse [22].

La pratique industrielle exige des copeaux courts. Les copeaux longs, lorsqu'ils sont enchevêtrés à la pièce, nuisent à son état de surface.

### **I.8.2. Lubrifiant et son rôle**

Le procédé de lubrification n'est efficace que si le liquide circule effectivement et abondamment dans la zone de coupe. Il permet de:

- Réduire l'usure de l'outil de coupe.
- Augmenter la vitesse de coupe donc de diminuer les coûts d'usinage.
- D'améliorer l'écoulement des copeaux et diminuer les risques d'arrachement, donc bonne rugosité de la surface usinée.
- Diminuer le coefficient de frottement copeaux-outil et outil-pièce, c'est l'effet lubrifiant, empêcher dans certains cas la formation de microsoudures.
- Evacuer la chaleur par refroidissement de l'outil et de la pièce par effet réfrigérant
- Réduire la chaleur dégagée c'est-à-dire réfrigérer la pièce et l'outil. Dans ce cas on utilise l'huile soluble.
- Réduire la chaleur dégagée avec effet lubrifiant pour limiter l'usure c'est-à-dire réfrigérer et lubrifier pour limiter le coefficient de frottement du copeau dans ce cas on utilise les huiles de coupe (huiles minérales).

#### **I.8.2.1. Choix du lubrifiant**

Un bon lubrifiant doit présenter les qualités suivantes:

- *Pouvoir mouillant très élevé* : C'est la qualité qui permet au liquide de s'étendre de lui-même en nappe sur le support au lieu de se disperser en filets.
- *Pouvoir réfrigérant important et efficace* : Pour que l'évacuation de la chaleur soit immédiate et rapide et le film de glissement se maintient entre le copeau et la face d'attaque de l'outil même sans porte pression.
- *Stabilité durable et neutralité chimique* : C'est-à-dire absence d'oxydation à l'air et absence de dépôt poisseux et évitant l'oxydation des métaux [8].

## I.9. Etat de l'art

Diverses études ont été entreprises pour étudier l'usinabilité des aciers de traitement thermique en fraisage, la modélisation des paramètres technologiques d'usinage, l'optimisation des conditions de coupe et les vibrations lors de l'usinage. Les paragraphes qui suivent, résument plusieurs publications réalisées dans ce contexte.

Khairi Yusuf and al [25] ont travaillé sur le fraisage de finition des alliages de titane, ils ont étudié les paramètres optimaux qui pourraient donner une bonne rugosité de la surface. Ils ont utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser la rugosité de surface. Les paramètres d'entrée étaient la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe et le type du matériau de l'outil. D'autre part, les paramètres de bruit étaient la pression de fluide de refroidissement. Un plan d'expérience de 8 essais a été réalisé et une analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée pour identifier les facteurs significatifs affectant la rugosité de la surface. Les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs indiquent que les facteurs les plus significatifs affectant la rugosité de la surface de l'alliage titane pendant le processus de fraisage de finition étaient principalement : premièrement la vitesse de la broche de la machine, deuxièmement le type d'outil utilisé, troisièmement la vitesse d'avance adoptée et pour finir la profondeur de passe choisie.

K. Kadirgama and al [26] ont étudié l'optimisation de la rugosité de la surface en fraisage d'un moule en alliages d'aluminium 6061-T6 avec des plaquettes en carbure revêtu. L'optimisation du fraisage est très importante pour réduire le coût et le temps d'usinage pour le moule. Les objectifs visés par les auteurs dans cette étude sont de développer un modèle de prédiction de la rugosité de surface et étudier la variable la plus dominante, ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$  et  $ae$ ) et aussi d'optimiser ces variables en fraisage.

Les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs indiquent :

✓ La technique RSM est efficace pour effectuer l'analyse des tendances de la rugosité de surface par rapport à différentes combinaisons de variables de conception ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$  et  $ae$ ).

✓ Les modèles de première et de deuxième ordre sont jugés suffisamment représentant la rugosité de surface avec les résultats expérimentaux.

✓ Le modèle de RSM indique que l'avance par tour est le paramètre le plus significatif pour prédire la réponse de rugosité de la surface par rapport à d'autres variables.

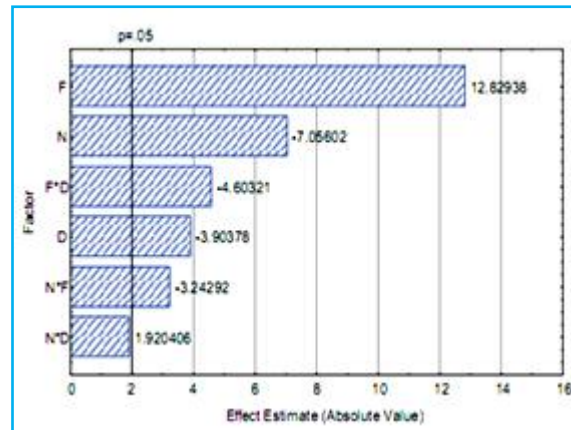
✓ Le modèle de premier ordre ne montre aucune interaction entre les variables.

✓ Avec les équations du modèle obtenu, une analyse peut ensuite choisir la meilleure combinaison des variables d'usinage pour l'obtention de la rugosité de surface optimale. Cela réduit finalement le temps d'usinage et de sauver les outils de coupe.

Dans le travail de Mohammed T et al [27], un plan d'expériences de 84 essais (4 vitesses de coupe  $\times$  7 vitesses d'avances  $\times$  3 profondeurs de coupe) a été conçu pour commencer la caractérisation de la qualité de surface sur des échantillons en aluminium pour le processus de fraisage de finition. L'objectif de cette étude est de développer une meilleure compréhension des effets de la vitesse de broche, de l'avance par tour et de la profondeur de passe sur la rugosité de la surface et d'établir un modèle de régression multiple. Une telle compréhension peut fournir la maîtrise dans le contrôle des problèmes de finition des surfaces usinées quand les paramètres de processus sont ajustés pour obtenir un certain état de la surface. Le modèle, qui inclut l'effet de la vitesse de broche, l'avance par tour et la profondeur de passe et toutes les interactions, sur les valeurs de rugosité de la surface a une précision d'environ de 12 %. Le modèle trouvé par les auteurs est donné par l'équation I.6. Le diagramme de Pareto des effets normalisés pour  $R_a$  montrant les facteurs et l'interaction significatifs est illustré sur la figure I.13.

$$R_a = 1.178854 - 0.000492 \cdot N + 0.009897 \cdot F - 0.17625 \cdot D - 0.000003 \cdot N \cdot F + 0.000811 \cdot N \cdot D - 0.003012 \cdot F \cdot D \quad (I.6)$$





*Fig. I.13. Diagramme de Pareto des effets normalisés pour Ra montrant les facteurs et l'interaction significatifs [27].*

Eyup Bagci et al [28] ont présenté un développement de la méthode d'optimisation de Taguchi pour minimiser la rugosité de surface, lors du fraisage de face d'un alliage à base de cobalt. Les paramètres de coupe utilisés en fraisage sont : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe. Une série d'expériences de fraisage a été effectuée pour mesurer les valeurs de la rugosité de surface. Les plans orthogonaux de Taguchi, le rapport signal/bruit (S/N) et l'analyse de la variance (ANOVA) sont utilisés pour trouver les niveaux optimaux et d'analyser l'effet des paramètres de fraisage sur la rugosité de surface. Les auteurs ont aussi fait des tests de confirmation des niveaux optimaux afin d'illustrer l'efficacité de la méthode d'optimisation de Taguchi. Ils ont ainsi démontré que la méthode de Taguchi est très appropriée pour résoudre le problème de qualité de surface produite lors du surfaçage de la matière Stellite 6. Ils ont conclu que les tests de confirmation expérimentale de régime optimal trouvé ont prouvé l'efficacité de la méthode d'optimisation de Taguchi (Fig. I.14).

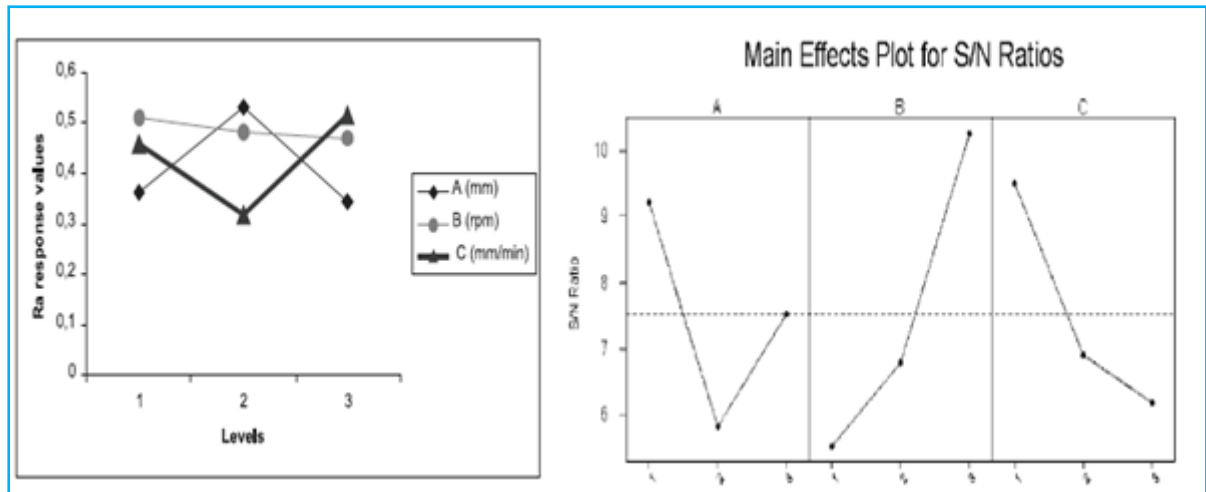


Fig. I.14. Graphiques des effets principaux et d'interaction pour la rugosité de surface  $R_a$  [28].

Razfar et al [29] ont présenté une approche à la détermination des paramètres de coupe optimum pour obtenir une rugosité de surface minimum lors de fraisage de l'acier inoxydable X20Cr13. L'approche proposée est d'employer une méthode d'optimisation basée sur les réseaux de neurone, pour créer un modèle prédictif de rugosité de surface basé sur les données expérimentales. Les auteurs ont observé une bonne concordance entre les valeurs prévues de rugosité et ceux obtenues en mesures expérimentales effectuées en utilisant les conditions de coupe optimaux souhaitées. Parallèlement, Kurt [30] utilise les plans d'expériences pour prédire la rugosité de surface lors des opérations de perçage de l'aluminium 2024 en fonction de l'avance, de la vitesse de coupe et du type de revêtement du foret.

Récemment, Keblouti et al [31] ont analysé l'influence des paramètres d'usinage sur la rugosité de la surface lors du tournage à sec de l'acier AISI 52100. Ils ont observé que la valeur minimale de rugosité de surface est obtenue en utilisant l'insert revêtu de PVD (TiCN / TiN) par rapport à l'outil non revêtu.

Davim [32] a établi une corrélation entre la vitesse, l'avance et la profondeur de passe pour l'évaluation des critères de rugosité  $R_a$  et  $R_t$ . Il a ensuite présenté l'influence des conditions de coupe sur la rugosité de surface en tournage et se basant sur le plan de Taguchi.

Aouici et al [33]) ont étudié et analysé la rugosité de surface dans l'usinage de l'AISI H11. L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour étudier l'effet des conditions de coupe sur la rugosité de la surface, et les modèles mathématiques ont

été développés grâce à la méthode de la surface de réponse utilisée pour prédire les facteurs incontrôlables.

En fraisage, la qualité de la coupe peut être dégradée par deux phénomènes vibratoires : le broutement, provoqué principalement par le mécanisme de régénération des surfaces usinées et les vibrations forcées dues à la périodicité de la coupe. Afin de déterminer les conditions favorables d'usinage, G. Peigne [14] a utilisé une modélisation dynamique de la coupe à l'échelle macroscopique et intègre le comportement dynamique de l'ensemble "pièce outil machine". L'originalité de son travail réside dans un nouveau modèle géométrique d'enlèvement de matière, qui accroît la précision des calculs et permet d'étudier la surface usinée à l'échelle de la rugosité tout en conservant de faibles temps de calcul, indispensables pour balayer l'espace des conditions de coupe.

Sadettin Orhan and al [34] ont étudié le rapport entre la vibration et l'usure de l'outil en fraisage de finition (Fig. I.15). Ils ont utilisé une fraiseuse verticale, des plaquettes amovibles de CBN. Le fraisage est réalisé sur un acier durci à 35 HRC. Les vibrations ont été mesurées seulement dans la direction d'usinage, qui a des signaux plus dominants que dans les deux autres directions. Ils ont utilisé dans la mesure une sonde d'accélération assemblée sur un analyseur de vibration.

Les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs indiquent :

✓ Il n'y avait aucune augmentation considérable dans l'amplitude de vibration jusqu'à ce qu'une valeur d'usure en dépouille qui est voisine de 160  $\mu\text{m}$ , au-dessus l'amplitude des vibrations ait augmenté de manière significative.

✓ L'amplitude de vibration augmente progressivement avec l'usure de l'outil

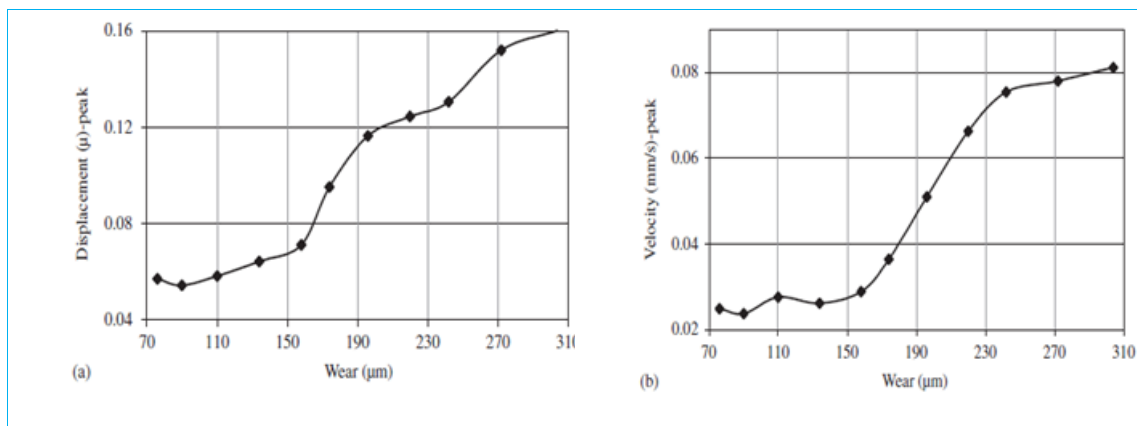


Fig. I.15. Rapport entre l'amplitude de vibration et l'usure de l'outil (a) déplacement et (b) vitesse [34]

Subramanian et al [35] ont développé un modèle statistique pour prévoir l'amplitude des vibrations en fonction des paramètres géométriques de l'outil et les paramètres d'usinage. Les auteurs ont réalisé des expériences suivant un plan de 32 essais et ils ont utilisé la technique de la méthodologie de surface de réponse. Deux accéléromètres piézo-électriques ont été utilisés pour mesurer l'amplitude de vibration. Les auteurs ont proposé un modèle mathématique du second degré en fonction des paramètres d'usinage pour prédire l'amplitude de vibration. L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour vérifier la précision du modèle proposé. D'autres investigations sur l'effet direct et interactif du paramètre de processus avec les amplitudes de vibrations ont été réalisées pour la sélection du paramètre de processus de telle sorte que l'amplitude des vibrations est maintenue à un minimum, ce qui assure la stabilité du processus de fraisage de finition. Les valeurs optimales obtenues à partir de processus d'usinage de finition sont, un angle d'attaque radial  $12^\circ$ , un rayon de 0,8 mm, une vitesse de coupe de 115 m/min, une vitesse d'avance de 0,04 mm/dent et une profondeur de coupe axiale de 2,5 mm. L'amplitude de vibration a montré le rapport négatif avec l'angle d'attaque et le rayon du bec. Les facteurs dominants sur l'amplitude des vibrations sont l'avance et la profondeur de passe.

Les modèles trouvés pour la direction de la broche et de la vis en  $\text{mm/s}^2$  sont respectivement donnés par les équations I.7 et I.8.

$$\begin{aligned} A(\text{broche}) = & 28.8324 - 2.697.\gamma - 5.0831.R + 1.2007.Vc \\ & + 5.3488.fz + 3.247.ap - 3.4271.R^2 + 5.562.Vc^2 \\ & + 8.175.ap^2 + 2.2112.\gamma.fz - 1.045.\gamma.ap - 3.2777.R.fz \\ & - 3.04404.R.ap - 10.6599.Vc.fz - 4.9561.Vc.ap + 3.3218.fz.ap \end{aligned} \quad (\text{I.7})$$

$$\begin{aligned} A(\text{vis}) = & 23.0548 - 3.7552.\gamma - 9.093.R + 28.3159.fz - 3.4178.ap \\ & + 7.9736.\gamma^2 + 57.9326.fz^2 + 26.8553.ap^2 + 7.8909.\gamma.R \\ & + 9.8269.\gamma.ap - 17.1036.R.fz - 14.4851.R.ap \end{aligned} \quad (\text{I.8})$$

L'usinage et l'usure de l'outil sont affectés énormément par la vibration de l'outil due à la longueur de la barre d'alésage. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail de recherche élaboré par Venkata Rao et al [36]. Le travail a pour but d'estimer l'effet des paramètres de coupe sur les vibrations de la pièce à usiner, la rugosité de surface, la durée de vie de l'outil et le volume des copeaux enlevés lors de l'alésage de l'acier

(AISI 1040). Les auteurs ont utilisé un laser à effet Doppler vibromètre (LDV) pour l'acquisition des données en ligne et un analyseur à grande vitesse de FFT a été aussi utilisé pour mesurer la vibration de la pièce (Fig. I.16). Les auteurs ont préparé un plan d'expérience de huit expériences avec deux niveaux de coupe des paramètres tels que la vitesse de rotation de la broche, l'avance par tour et le rayon de bec de l'outil. La méthode de Taguchi a été employée pour optimiser les paramètres des coupes et une analyse de régression multiple est faite pour obtenir la relation empirique de la durée de vie de l'outil, la rugosité de la surface usinée, le volume du copeau et l'amplitude des vibrations de la pièce usinée.

Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

- ✓ Les amplitudes de vibration de la pièce se trouvent augmentées avec la progression de l'usure de l'outil,
- ✓ Le rayon du bec est le paramètre le plus significatif qui affecte l'amplitude de vibration de la pièce usinée avec une contribution de (45.81%),
- ✓ L'avance par tour est le paramètre le plus significatif qui affecte la rugosité de la surface de la pièce avec une contribution de (55.57%),
- ✓ L'avance par tour est le paramètre le plus significatif qui affecte le volume du copeau avec une contribution de (51.26%).

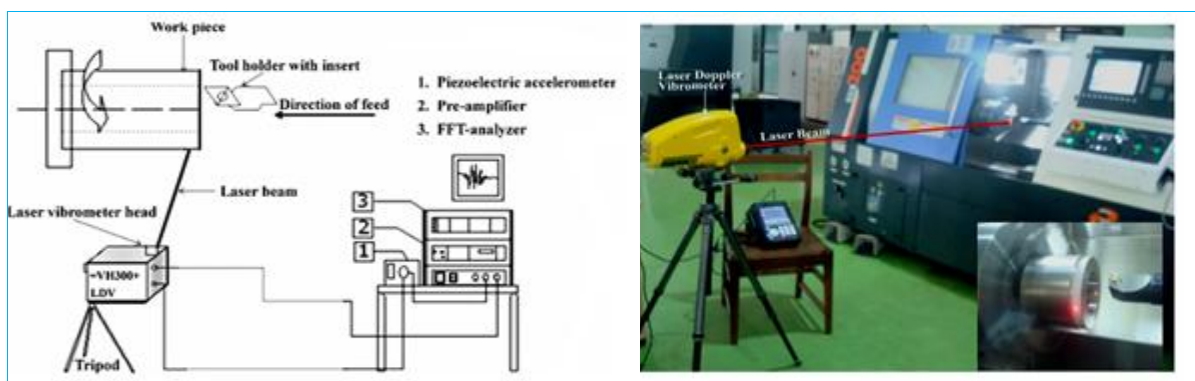


Diagramme schématique pour l'installation (a) Installation expérimentale pour l'alésage (b)

**Fig. I.16.** Configuration expérimentale [36]

Le travail de SHEN Yang et al [37] a pour but d'étudier l'influence de la profondeur radiale sur les vibrations, la formation de copeaux et de la rugosité de surface pendant le fraisage de l'acier inoxydable AISI 304 austénitique avec une fraise à plaquettes amovibles en carbure cimenté (Fig. I.17). Les résultats montrent

que l'amplitude d'accélération vibratoire augmente avec l'augmentation de la profondeur radiale, et le domaine de fréquences de vibration varie avec la profondeur radiale. Les auteurs ont trouvé lors de l'usinage trois types de copeaux : Forme de C, forme longue et une forme en spirale. Durant les expériences, les auteurs indiquent que la valeur minimale de la rugosité de la surface s'est produite quand la profondeur radiale est égale à 40 mm. Le changement irrégulier de rayon de courbure du copeau et l'épaisseur de copeaux peut être attribué à différents nombres des dents alternativement engagées. La rugosité de surface est liée à la vibration forcée et à la formation des copeaux. La profondeur radiale avec différents nombres de dents engagées alternativement pourrait influencer de manière significative la vibration forcée, la formation des copeaux, et la rugosité des surfaces (Fig. I.18).

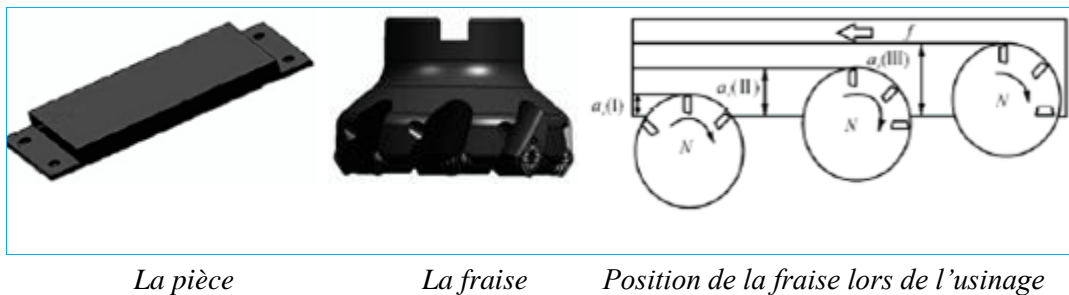
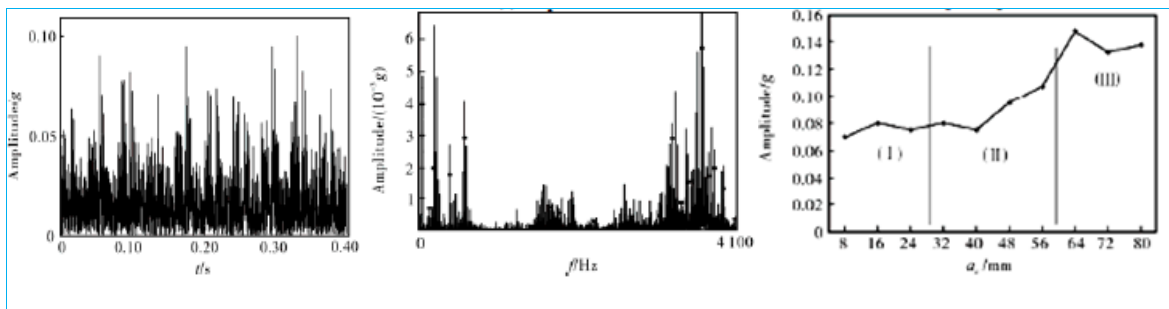


Fig. I.17. Configuration expérimentale [37]



Temps de réponse

Spectre de réponse

Amplitude d'accélération de vibration de différentes profondeurs radiales avec différents nombres des dents alternativement engagées

Fig. I.18. Les vibrations pendant l'usinage de l'acier inoxydable AISI304 austénitique [37]

Hessainia et al [38] et al ont présenté une étude de la rugosité de la surface et la vibration d'outil de coupe en utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR). Ils ont utilisé cette technique pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe en se servant d'un plan factoriel complet pour étudier la rugosité de la surface et la vibration d'outil de coupe sous l'influence de trois variables indépendantes,

l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de passe. Les tests sont réalisés en tournage dur sur un acier 42CrMo4 trempé (56 HRC). Le matériau de l'outil de coupe utilisé est une céramique mixte (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC). Les auteurs ont obtenu des modèles avec une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et théoriques prédictifs obtenus à partir de la méthodologie de surfaces de réponses. La fonction de désirabilité a été employée pour l'optimisation des facteurs de réponse multiple (Ra et Rt) (Fig. I.19).

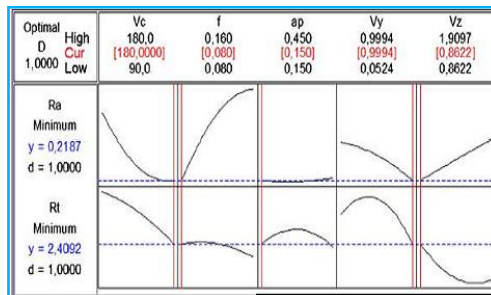


Fig. I.19. Optimisation des facteurs de réponse multiple (Ra et Rt) [38]

Jang et al [39] ont développé un algorithme de surveillance en temps réel pour calculer la rugosité de surface. L'algorithme superpose le profil théorique et le profil oscillant déterminés par la vibration relative entre l'outil et la pièce (Fig. I.20). L'amplitude des vibrations relatives a été mesurée par une sonde de déplacement (type inductance). Les résultats expérimentaux ont montré une bonne corrélation entre la rugosité simulée, obtenue par l'algorithme proposé, et la rugosité mesurée.

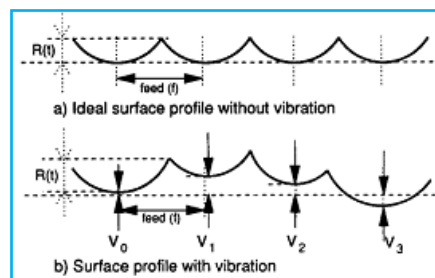
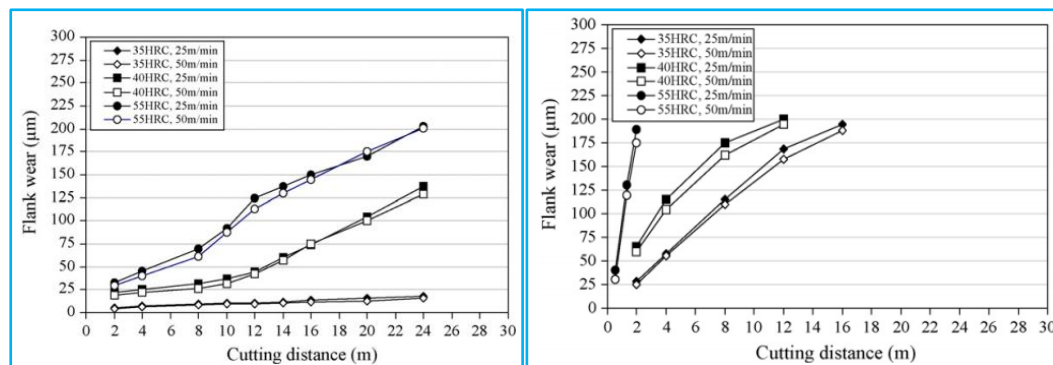


Fig. I.20. Profil de rugosité où la vibration est prise en compte [39].

H. Liew et al [40] ont étudié l'usure des outils en carbure avec un revêtement PVD et sans revêtement, pendant le fraisage de STAVAX (acier inoxydable AISI 420 modifié) à des basses vitesses. Ils n'ont observé aucun changement significatif de l'usure d'outil quand la vitesse de coupe a été augmentée de 25 à 50 m/min. Ils ont trouvé que l'augmentation de la dureté de la pièce de 35 à 55 HRC a causé une augmentation remarquable de l'usure en dépouille. En usinant le STAVAX avec une

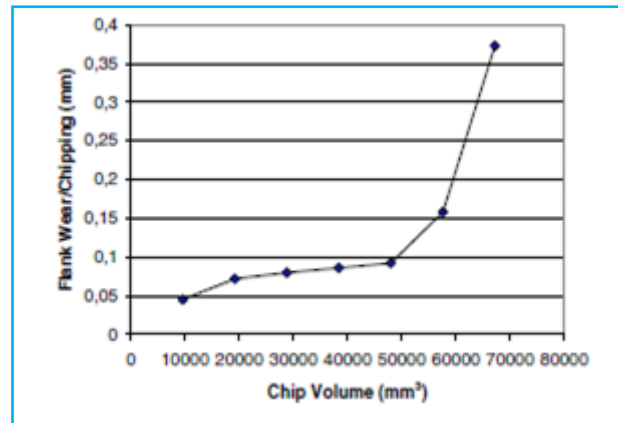
dureté de 35 et 40 HRC, l'outil revêtu a été principalement soumis à l'usure abrasive durant toute la durée de l'essai. Pendant l'usinage du STAVAX avec une dureté de 55 HRC avec l'outil revêtu. Les auteurs indiquent que l'outil revêtu a montré une résistance de rupture beaucoup plus élevée que l'outil non revêtu. La résistance élevée de rupture montrée par l'outil revêtu pourrait être attribuée à l'efficacité de revêtement en empêchant la formation des fissures qui agiraient en tant qu'emplacements préférentiels pour que la rupture ait lieu. Les résultats expérimentaux prouvent également que le revêtement empêche la détérioration de l'arête et augmente la résistance à l'usure abrasive de l'outil. La ductilité de la pièce et l'usure d'outil ont des influences sur l'état de surface de la pièce. Ils ont constaté aussi que le fluide de coupe était efficace en empêchant la rupture catastrophique de l'outil, (Fig. I.21).



**Fig. I.21.** Evolution de l'usure en dépouille des outils en carbure : a) avec revêtement et b) sans revêtement à  $V_c = 25$  et  $50$  m/min [40].

Aslan [41] a exploré les performances et le comportement d'usure de différents outils de coupe lors du fraisage de finition de l'acier d'outil pour travail à froid X210Cr12 durci à 62 HRC. Le but de ces expériences est l'étude de l'usure d'un carbure de tungstène revêtu TiCN, un carbure de tungstène revêtu TiCN+TiAlN, un cermet revêtu TiAlN, céramique mixte avec l' $Al_2O_3$ +TiCN et des outils en CBN. Les résultats trouvés par les auteurs ont indiqué que l'outil CBN a une meilleure performance de coupe en matière d'usure en dépouille et d'état de surface. Le volume d'enlèvement du métal le plus élevé a été obtenu avec l'outil CBN (Fig. I.22).





*Fig. I.22. Progression de l'usure en dépouille avec l'augmentation du volume de copeau enlevé avec un outil en CBN [41].*

Choudhury et El-Baradie [42] ont utilisé les plans d'expériences pour étudier l'effet de l'avance, de la vitesse et de la profondeur de passe sur la durée de vie de l'outil, la rugosité de surface et les forces de coupe lors du tournage de l'inconel 718. Ils ont utilisé pour le traitement des résultats, l'analyse de la variance et la méthodologie de surface de réponse.

Daniavi et al [43] ont prouvé que l'application de l'analyse de la variance (ANOVA) a montré que l'impact de l'avance et la vitesse sont les facteurs les plus significatifs sur la rugosité. Huang, L, & Chen, J. C [44] utilisent la technique de régression linéaire multiple pour développer un modèle empirique complet de la rugosité qui tient compte de plusieurs facteurs tels que l'avance, la dureté de la pièce, la profondeur de passe, la vitesse de coupe.

Lorsqu'on veut connaître la dépendance d'une variable de sortie d'un tel processus, on se retrouve confronté à plusieurs difficultés :

- ✓ Quels sont les facteurs les plus influents ?
- ✓ Existe-t-il des interactions entre les facteurs ?
- ✓ Peut-on linéariser le processus en fonction de ces facteurs et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ?
- ✓ Comment minimiser le nombre de points de mesure du processus pour obtenir le maximum d'informations ?
- ✓ Existe-t-il des biais dans les résultats des mesures ?

La méthodologie des plans d'expériences répond à ces questions et peut être appliquée dans de nombreux processus permettant l'évaluation de la qualité des processus industriels les plus complexes. Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des recherches industrielles (GOUPY, [45]).

### **I.10. Conclusion**

Ce chapitre a été réservé à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux en général et le fraisage en particulier. D'autres points ont été considérés dans cette étude, les vibrations en usinage, les matériaux de coupe, les efforts de coupe, l'usure des outils, la rugosité de surface et la formation de copeaux ont été définis. La dernière partie de cette étude bibliographique a été consacré aux travaux de recherche en fraisage et particulièrement la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe.

# CHAPITRE II

## PROTOCOLE DES ESSAIS

## II.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des outils mis en œuvre pour la réalisation des expériences afin de caractériser le comportement du couple (outil-matière). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés qui servent au suivi de l'évolution de l'usure, de la rugosité des surfaces obtenue lors de fraisage de face. Nous présentons également les différentes méthodes utilisées pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences nécessaires à notre étude ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS), département de Mécanique de l'Université du 8 mai 1945 de Guelma.

## II.2. Moyens utilisés

### II.2.1. Machine-outil

La machine-outil qui a servi à nos essais est une fraiseuse verticale de la Société Nationale de Production des Machines Outils Industrielles (PMO), modèle almo de puissance 5 KW (Fig. II.1).

Les fréquences de rotation disponibles sur la fraiseuse : 45 ; 63 ; 90 ; 125 ; 180 ; 250 ; 355 ; 500 ; 710 ; 1000, 1400 ; 2000.

Les différentes vitesses d'avance de cette machine sont en (mm/min) : 10 ; 16 ; 20, 25 ; 31,5, 50 ; 63 ; 80 ; 100 ; 125 ; 160 ; 200 ; 250 ; 314 ; 400 ; 500 ; 630 ; 800.

### II.2.2 Matériau utilisé pour les essais de fraisage

Le matériau que nous avons utilisé dans nos essais pour tester nos plaquettes de coupe est un acier de traitement thermique de nuance AISI 1040. Les éprouvettes utilisées sont des blocs de dimension 405 mm X 73,5 mm X 73,5 mm (Fig. II.2). Cet acier couvre un large domaine d'utilisation, (Pièces moyennement soumises aux chocs et nécessitant une assez bonne résistance : engrenage, vis sans fin, axes, paliers, pignons, boulonnerie, forge (leviers, arbres.....)). Les propriétés de cet acier sont équivalentes à celles de la nuance C35, avec une meilleure aptitude aux traitements thermiques. Acier au carbone souvent utilisé en mécanique générale de par sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques. Sa composition chimique est représentée sur le [tableau II.1](#).



*Fig. II.1. Machine-outil utilisée (Fraiseuse Almo)*

**Tableau II.1.**

*Composition chimique de l'acier AISI 1040*

C	S	Mn	P	Si
0,37 - 0,4	<0, 35	0,5 - 0,8	<0, 35	0,4 Max

Les caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé) et physiques sont illustrés respectivement aux [tableaux II.2, II.3.](#)

**Tableau II.2.**

*Caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 1040*

Rm(N/mm <sup>2</sup> )	Re(N/mm <sup>2</sup> )	A(%)	Dureté HB
530/580	260/320	16/17	201 HB (13 RC)

**Tableau II.3.**

*Caractéristiques physiques de l'acier AISI 1040*

Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	<b>7670</b>
Module d'élasticité (KN/mm <sup>2</sup> )	<b>165</b>
Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	<b>37</b>
Capacité thermique massique à20CC (j.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	<b>650</b>
Résistivité électrique à 20°C (Ω x mm <sup>2</sup> /m)	<b>0.57</b>
Coefficient de Poisson	<b>0.36</b>
Coefficient de dilatation linéique (10 <sup>-6</sup> x K <sup>-1</sup> )	<b>16.6</b>

### II-2-3- Outil de coupe

L'outil de coupe qui a servi aux essais, est une fraise à surfacer de 100 mm de diamètre, (Fig. II.2). Elle est composée de trois éléments essentiels: Un cône morse, des plaquettes et une cloche.

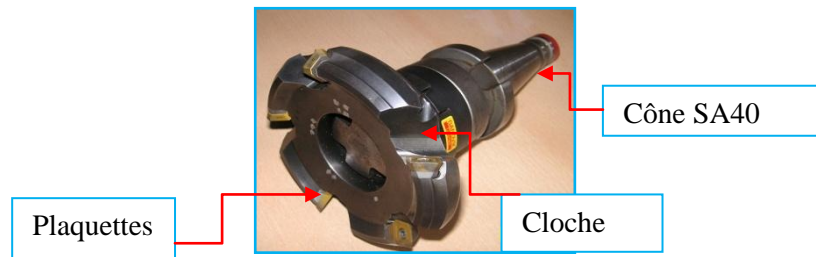


Fig. II.2. Fraise à surfacer Coromill 245

CoroMill 245 est une fraise à surfacer sur laquelle sont montées 5 plaquettes amovibles à fixation par vis fabriquées à la firme SANDVIK, dont les caractéristiques géométriques de cette fraise sont données sur le tableau II.4.

Tableau II.4.

Caractéristiques géométriques et dimensions de la fraise.

Désignation	R245-100Q32-12L							
Dimensions	Dc,	dm,m,	Dc2,	l1,	ap Max,	tr/min max,	$\kappa_r$ ,	$\Gamma$ ,
	100	32	112,5	50	6	11300	45°	23°

Où,

$\kappa_r$  : Angle de direction principale,

$\Gamma$  : Angle d'attaque.

### II.2.4. Plaquettes de coupe

Toutes les opérations d'usinage ont été faites par deux différentes plaquettes de coupe (SANDVIK COROMANT) :

- Carbure revêtu GC1030 (Fig. II.3), sa désignation est donnée au tableau II.5, la figure II.4 et le Tableau II.6 illustrent les caractéristiques géométriques de ces plaquettes où on a une arête de coupe qui permet de racler les copeaux et les bavures pour donner des faibles rugosités de surface.

- Cermet CT530 (Fig. II.3) : Un cermet est un matériau composite composé d'un renfort en céramique (Cer) et d'une matrice métallique (Met). Ils appartiennent à la famille des

composites à matrice métallique. Les métaux les plus utilisés sont le nickel, le molybdène et le cobalt.

Les plaquettes sont amovibles, de forme carrée et chacune d'elles possède quatre arêtes de coupe. Elles se fixent mécaniquement soit par bride de serrage pour plaquette sans trou soit par levier pour plaquette avec trou.

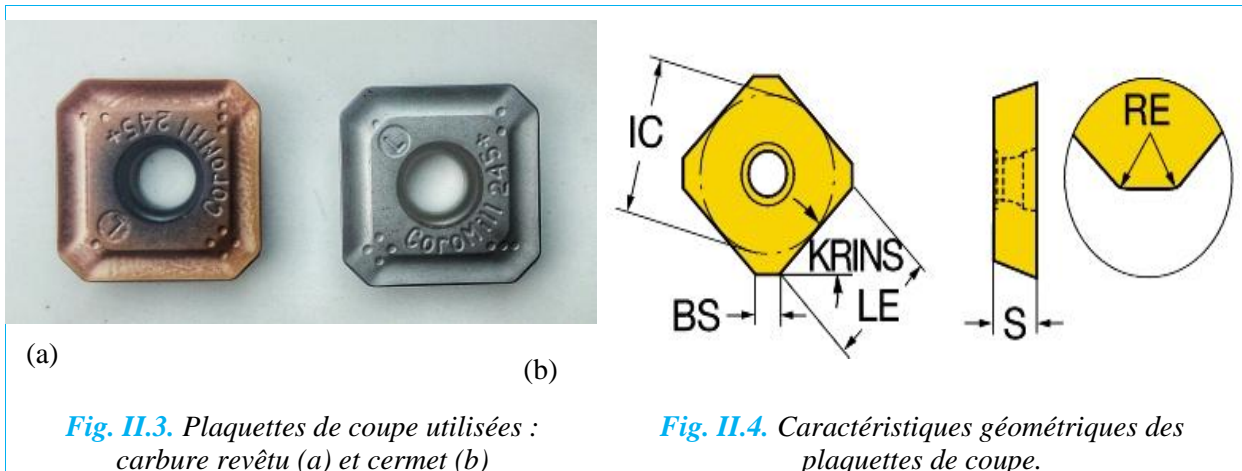


Fig. II.3. Plaquettes de coupe utilisées : carbure revêtu (a) et cermet (b)

Fig. II.4. Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.

Tableau II.5.

Désignation des plaquettes de coupe

Matériau de coupe	Désignation SANDVIK	R245-12 T3 EPL
Carbure revêtu	GC1030	Désignation ISO
Cermet	CT530	R245-12 T3 EPL

Tableau II.6.

Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.

Désignation	cutting edge length = inscribed circle diameter	insert thickness	Wiper edge length	depth of cut maximum	Corner radius
R245-12 T3 EPL	$l=iC = 13,4 \text{ mm}$	$S = 3.96875 \text{ mm}$	$Bs = 2,1 \text{ mm}$	$ap_{Max} = 6.5 \text{ mm}$	$r_{\epsilon} = 1,5 \text{ mm}$

## II.3. Equipement de mesure

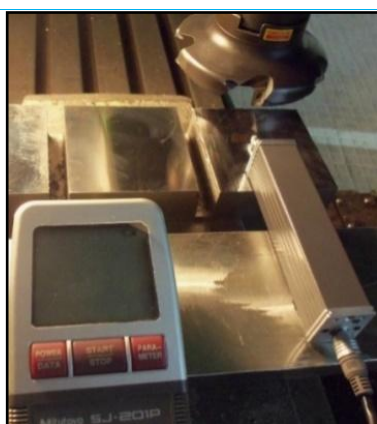
### II.3.1. Mesure de la rugosité des surfaces

Les valeurs des quatre critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) ont été mesurées à l'aide d'un rugosimètre 2D SurfTest SJ-201 (Mitutoyo) (Fig. II.5. II.6). Cet appareil 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 fraiseuse et sans démontage de la pièce.

L'utilisation du rugosimètre (3D) s'est avéré un outil très intéressant permettant l'élaboration des cartes topographiques tridimensionnelles, cela a pour effet, la bonne compréhension des caractéristiques des surfaces fraisées de l'acier AISI 1040, c.à.d. pics et les vallées. Pour la mesure de la rugosité en 3D, nous avons utilisé un rugosimètre 3D (Alti surf 500) (Fig. II.7). La figure II.9 montre la méthode de mesure des quatre critères de rugosité et des vibrations.

### II.3.2. Mesure de l'usure

L'usure admissible retenue selon la norme ISO est  $VB = 0,3\ \text{mm}$ . L'usure en dépouille a été mesurée à différents intervalles à la fin de chaque passage (c'est-à-dire, après que l'outil de coupe se déplace le long d'une longueur totale de la pièce à usiner). Les images des outils usés ont été sélectionnées et capturées au microscope (Standard gage-Visual 250) équipé d'un logiciel (Visual Gage 2.2.0) (Fig. II.8).



*Fig. II.5. Dispositif pour mesurer la rugosité sans démonter la pièce*



*Fig. II.6. Rugosimètre Sj-201p (Mitutoyo)*

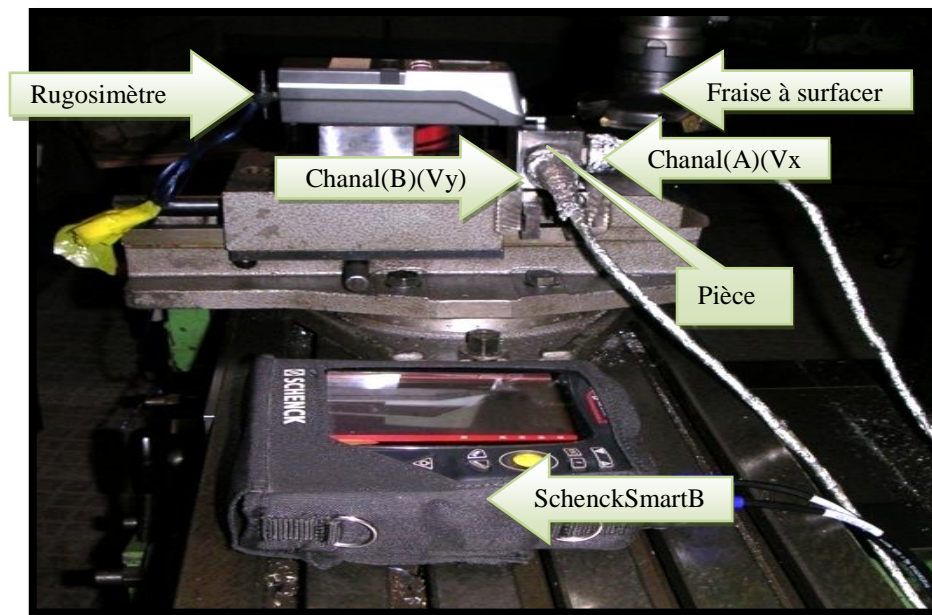


*Fig. II.7. Alti surf 500*



*Fig. II.8. Standard gage-Visual 250*

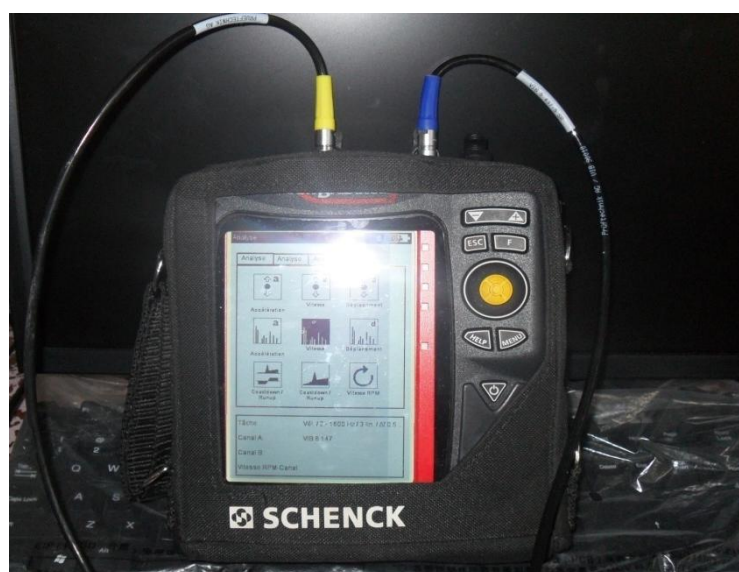




*Fig. II.9. Méthode de mesure de la rugosité et les vibrations.*

### II.3.3. Mesure des vibrations

Pour la mesure des vibrations sur les plaquettes nous avons utilisé un analyseur équilibreur Schenck Smart Balancer (2) (équilibreur intelligent) (Fig. II. 10). Ce dernier est un appareil de mesure portable pour évaluer les vibrations dans deux directions. Il traite les différentes formes de vibration sur machine, l'état des roulements (en option), ainsi les données de processus ou d'inspection visuelle, ses caractéristiques mécaniques sont illustrées sur le [tableau II.7](#). La [figure II.9](#) montre la méthode de mesure de la rugosité et les vibrations.



*Fig. II.10. Schenk Smart Balancer (2)*

L'appareil ne doit être utilisé que pour mesurer des signaux sur les machines industrielles dans la limite des spécifications techniques. Capteurs et câbles ne sont utilisables que dans un environnement conforme aux données. Dans l'analyseur Schenck Smart Balancer(2) l'indication en valeur RMS (*Root Mean Square*), aussi appelée l'amplitude efficace ( $A_{eff}$ ) ou niveau efficace (Fig. II.11).

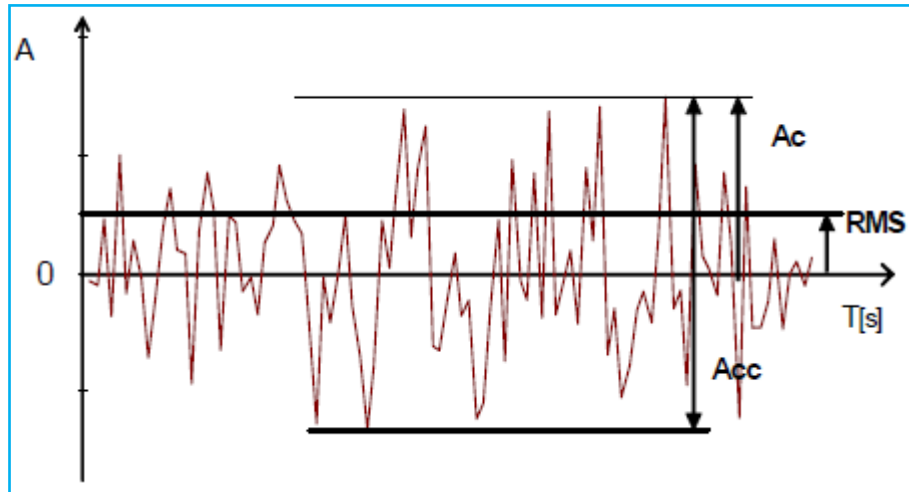


Fig. II.11. Vibration complexe.

Exemples :

- Cas d'une vibration sinusoïdale :

Dans le cas d'une vibration de type sinusoïdal, l'amplitude efficace s'exprime en fonction de l'amplitude crête de la façon suivante (éq. II.1).

$$A_{eff} = \frac{A_c \cdot \sqrt{2}}{2} = 0.707 \cdot A_c \quad (\text{II.1})$$

- Cas d'une vibration quelconque :

Dans le cas d'une vibration complexe quelconque, il n'existe pas de relation simple entre la valeur crête de l'amplitude ( $A_c$ ) et la valeur efficace de l'amplitude ( $A_{eff}$ ) qui se définit mathématiquement par la relation (éq. II.2).

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (\text{II.2})$$

Où,  $T$  : durée d'analyse du signal,  $x(t)$  : amplitude instantanée.

**Tableau II.7.***Caractéristiques mécaniques*

Raccordements	-Entrées analogiques par douille: miniSnap -Entrée numérique 1:douille miniSnap (RS232) -Entrée numérique 2 douille miniSnap (Ethernet-10 Mbit, USB)! Thermo-élément (NiCrNi): QLA
Clavier	Matériau élastomère
Boitier	Matériau: ABS
Encombrement	180 x 160 x 50 mm (LxlxH)
Poids	1,2 kg (EX-Version: 2,3 kg)

**II.4. Planification des expériences**

Des méthodes de planification ont été utilisées pour la réalisation des essais : la méthode unifactorielle, la méthode multifactorielle, box-behnken et la méthode des réseaux de neurones.

**II.4.1. Méthode unifactorielle**

Cette méthode est indispensable lorsqu'il s'agit de caractériser l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y. Pour cela, on donne une série de valeurs discrètes au facteur examiné [ $X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$ ] tout en maintenant tous les autres facteurs constants (Tab. II.8). Pour chaque  $X=X_i$ , on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de  $Y_i$ , ( $i=1 \div N$ ). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation  $Y = f(X)$ .

**Tableau. II.8.**

Matrice de planification par la méthode unifactorielle.

N°	Facteurs variables				Paramètres de sortie			
	X	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	-	Y <sub>g</sub>	-	Y <sub>n</sub>	Y <sub>moy</sub>
<b>1</b>	X <sub>1</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>	-	Y <sub>g1</sub>	-	Y <sub>n1</sub>	Y <sub>moy1</sub>
<b>2</b>	X <sub>2</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>22</sub>	-	Y <sub>g2</sub>	-	Y <sub>n2</sub>	Y <sub>moy2</sub>
<b>3</b>	X <sub>3</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>23</sub>	-	Y <sub>g3</sub>	-	Y <sub>n3</sub>	Y <sub>moy3</sub>
<b>I</b>	X <sub>i</sub>	X <sub>li</sub>	Y <sub>2i</sub>	-	Y <sub>gi</sub>	-	Y <sub>ni</sub>	Y <sub>moyi</sub>
-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>N</b>	X	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	-	Y <sub>g</sub>	-	Y <sub>n</sub>	Y <sub>moy</sub>

### II.4.2. 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 (Vc, fz, ap), les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées sur le [tableau II.9](#).

**Tableau. II.9**

Conditions de coupe pour les essais unifactoriels

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	222	fz (mm/dt)	0.007, 0.0141, 0.0282, 0.0563,
ap (mm)	0.3		0.1127, 0.2254
Vc (m/min)	222	ap (mm)	0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9
fz (mm/dt)	0.0563		
ap (mm)	0.3	Vc (m/min)	19.78, 39.25, 78, 157, 222, 314
fz (mm/dt)	0.16		

### II.4.3. Méthode multifactorielle

Cette méthode permet d'exécuter et d'organiser les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes. Les modèles mathématiques sont développés en utilisant uniquement les paramètres importants qui influencent le processus de coupe plutôt que d'inclure tous les paramètres. Afin d'atteindre cet objectif, l'analyse statistique des résultats expérimentaux a été faite à l'aide des logiciels Minitab15 et Design-Expert. La méthode de la surface de réponse (RSM) et l'analyse de régression. Cette technique de calcul permet d'estimer la contribution relative de chacun des facteurs de contrôle sur la réponse globale mesurée pour l'optimiser.

Dans notre étude, nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base ( $V_c$ ,  $f_z$ ,  $ap$ ) sur les diverses fonctions d'optimisation (critères de la rugosité et Q). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires, nous appliquons l'équation II.3.

$$N = q^k \quad (\text{II.3})$$

Où ;

$N$  : Nombre d'essais ;

$q$  : Nombre de niveaux de variation des facteurs de base ;

$k$ : Nombre de facteurs de base.

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

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. Le [tableau II.10](#) présente le plan général des expériences effectuées. La première colonne (C1) correspond à la vitesse de coupe  $V_c$ , la deuxième colonne (C2) à l'avance  $f_z$  et la cinquième colonne (C5) à la profondeur de passe  $ap$ . Les colonnes restantes correspondent aux différentes interactions.

**Tableau II.10.**

*Plan général des expériences*

<b>Test</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>	<b>C8</b>	<b>C9</b>	<b>C10</b>	<b>C11</b>	<b>C12</b>	<b>C13</b>
<b>1</b>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<b>2</b>	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>3</b>	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
<b>4</b>	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	+1	+1	+1
<b>5</b>	-1	0	0	0	0	0	0	+1	+1	+1	-1	-1	-1
<b>6</b>	-1	0	0	0	+1	+1	+1	-1	-1	-1	0	0	0
<b>7</b>	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0	0	0
<b>8</b>	-1	+1	+1	+1	0	0	0	-1	-1	-1	+1	+1	+1
<b>9</b>	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	0	0	-1	-1	-1
<b>10</b>	0	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
<b>11</b>	0	-1	0	+1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1
<b>12</b>	0	-1	0	+1	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0
<b>13</b>	0	0	+1	-1	-1	0	+1	0	+1	-1	+1	-1	0
<b>14</b>	0	0	+1	-1	0	+1	-1	+1	-1	0	-1	0	+1
<b>15</b>	0	0	+1	-1	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+1	-1
<b>16</b>	0	+1	-1	0	-1	0	+1	+1	-1	0	0	+1	-1
<b>17</b>	0	+1	-1	0	0	+1	-1	-1	0	+1	+1	-1	0
<b>18</b>	0	+1	-1	0	+1	-1	0	0	+1	-1	-1	0	+1
<b>19</b>	+1	-1	+1	0	-1	+1	0	-1	+1	0	-1	+1	0
<b>20</b>	+1	-1	+1	0	0	-1	+1	0	-1	+1	0	-1	+1
<b>21</b>	+1	-1	+1	0	+1	0	-1	+1	0	-1	+1	0	-1
<b>22</b>	+1	0	-1	+1	-1	+1	0	0	-1	+1	+1	0	-1
<b>23</b>	+1	0	-1	+1	0	-1	+1	+1	0	-1	-1	+1	0
<b>24</b>	+1	0	-1	+1	+1	0	-1	-1	+1	0	0	-1	+1
<b>25</b>	+1	+1	0	-1	-1	+1	0	+1	0	-1	0	-1	+1
<b>26</b>	+1	+1	0	-1	0	-1	+1	-1	+1	0	+1	0	-1
<b>27</b>	+1	+1	0	-1	+1	0	-1	0	-1	+1	-1	+1	0

#### II.4.4. Plan box-behnken

Un plan de Box-Behnken (Tab. II.11) est un type de plan de surface de réponse qui ne contient pas un plan factoriel fractionnaire ou un plan factoriel imbriqué. Les paramètres de sorties pour ce plan sont : les vibrations  $V_x$  et  $V_y$  ainsi que la rugosité  $R_a$ .

**Tableau II.11.**  
Matrice de planification (plan de Box-Behnken)

Test	C1	C2	C3
1	0	0	0
2	-	0	-
3	0	0	0
4	+	+	0
5	0	-	+
6	-	-	0
7	+	0	-
8	0	+	-
9	-	0	+
10	0	0	0
11	+	-	0
12	0	-	-
13	+	0	+
14	0	+	+
15	-	+	0

Dans notre cas, nous souhaitons déterminer les meilleures conditions pour avoir un bon état de surface par fraisage de face. Les facteurs que nous pouvons définir sont les suivants :

- ❖ Vitesse de coupe : 78 m/min et 200 m/min
- ❖ Avance par dent : 0,04 mm/dt et 0,16 mm/dt
- ❖ Profondeur de passe : 0,5 mm et 1 mm

Dans le cas d'un plan de Box-Behnken, les points du plan se situent à des combinaisons des niveaux de facteurs supérieurs et inférieurs et de leurs points centraux :

- ❖ Vitesse de coupe : 78 m/min, 150 m/min et 222 m/min
- ❖ Avance par dent : 0,04 mm/dt, 0,1 mm/dt et 0,16 mm/dt
- ❖ Profondeur de passe : 0,5 mm, 0,75 mm et 1 mm.

#### **II.4.5. Méthode des réseaux de neurones**

Le principe de la méthode ANN est inspiré à partir du principe de fonctionnement d'un vrai neurone (Humain ou animal).

Nous avons utilisé aussi la modélisation par réseau de neurones avec un plan factoriel complet de 27 essais.

#### **II.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements de travail et de mesure indispensables aux essais (machine-outil, éprouvettes, plaquettes de coupe, porte-outil, Rugosimètre 2D : Sj-201p Mitutoyo, Rugosimètre 3D : Alti surf 500 microscope (Standard gage-Visual 250). La composition chimique et les caractéristiques mécaniques et physiques des éprouvettes et la désignation et les caractéristiques géométriques des matériaux de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.



## CHAPITRE III

# **INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE EN FRAISAGE DE FACE**

### III.1. Introduction

Les paramètres qui peuvent influencer sur le processus de coupe sont d'une manière générale les paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) cités dans le chapitre II. Les essais expérimentaux en fraisage de face effectués dans notre étude sur l'acier AISI 1040, ont été menés en se limitant sur les conditions de coupe illustrées sur le [tableau II.9](#).

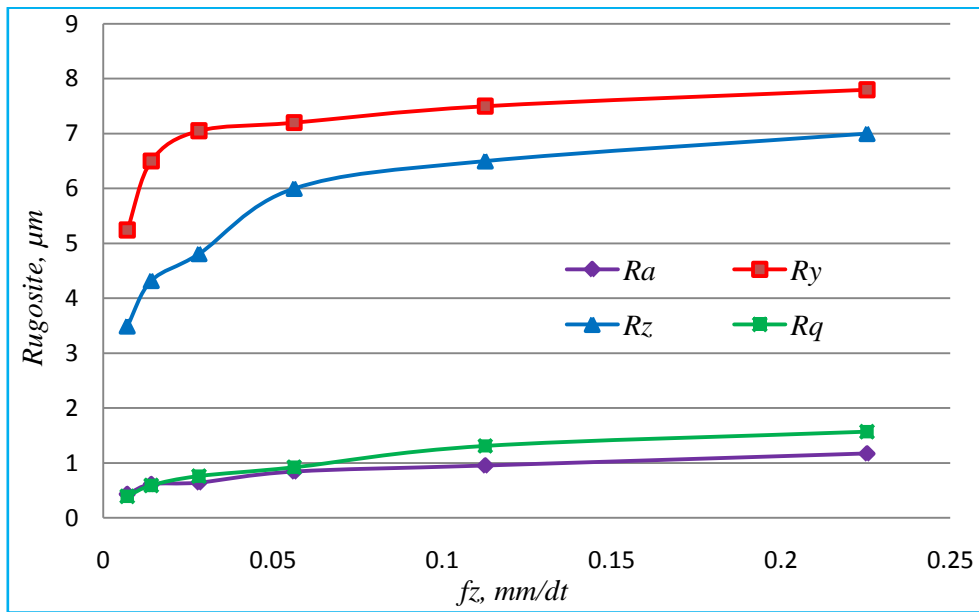
Les types d'essais que nous avons menés concernent la rugosité de surface de l'acier AISI 1040 et l'usure réalisée dans ce chapitre sont détaillées comme suit:

- L'influence des différents paramètres de coupe sur les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ).
- L'influence du mode d'usinage - en opposition ou en avalant – sur les critères de la rugosité de surface.
- L'influence de l'arrosage sur les critères de la rugosité de surface.
- L'influence du matériau de l'outil qui consiste aussi à faire des essais expérimentaux en utilisant deux nuances de plaquettes de coupe : Carbure revêtu (GC1030) et cermet (CT530).
- Nous avons aussi étudié l'usure des outils de coupe en fonction des paramètres de coupe. Dans ce travail, on a choisi les paramètres qui ont plus d'influence sur ce phénomène d'usure d'après la bibliographie de Groover et al [\[46\]](#).

### III.2. Influence des paramètres de coupe sur la rugosité (cas du carbure revêtu)

#### III.2.1. Influence de l'avance par dent

Nous constatons à travers les résultats obtenus et représentés sur la [figure III.1](#) que l'effet de l'avance par dent sur la rugosité montre qu'avec l'augmentation de ce paramètre la rugosité de surface se dégrade, cette augmentation des critères de la rugosité est caractérisée par l'ondulation engendrée par la zone de contact outil matière et du frottement qui fait croître la température dans cette zone. On peut remarquer que l'avance est l'un des paramètres de coupe dont l'effet est significatif sur l'état de surface usinée, elle contribue à l'évolution de la rugosité. L'augmentation de l'avance de 0.007 à 0.2254 (mm/dent) fait accroître les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) respectivement de (63,24 %, 32,82 %, 50,14 % et 75,16 %). Des résultats similaires sont rapportés par [\[25\]](#) et [\[27\]](#).



**Fig. III.1.** Effet de l'avance par dent sur la rugosité :

$V_c = 222 \text{ m/min}$ ;  $a_p = 0,3 \text{ mm}$

### III.2.2. Influence de la profondeur de passe

On peut constater sur l'illustration de la [figure III.2](#) que la profondeur de passe ( $a_p$ ) ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité des surfaces usinées. Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce, ce qui améliore les conditions d'évacuations de la chaleur de la zone de coupe et par conséquent elle freine le processus du mécanisme d'usure. Pour une profondeur de passe minimale de 0,15 mm les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) sont respectivement de (0,51, 6,29, 4,83 et 0,98)  $\mu\text{m}$  et pour une valeur maximale de la profondeur de passe égale à 0,9 mm les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) sont respectivement de (0,75, 7,01, 5,73 et 1,12)  $\mu\text{m}$ . Ce constat nous permet de conclure que l'augmentation est de (32%, 10,27%, 15,71%, 20,53%) pour les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ).

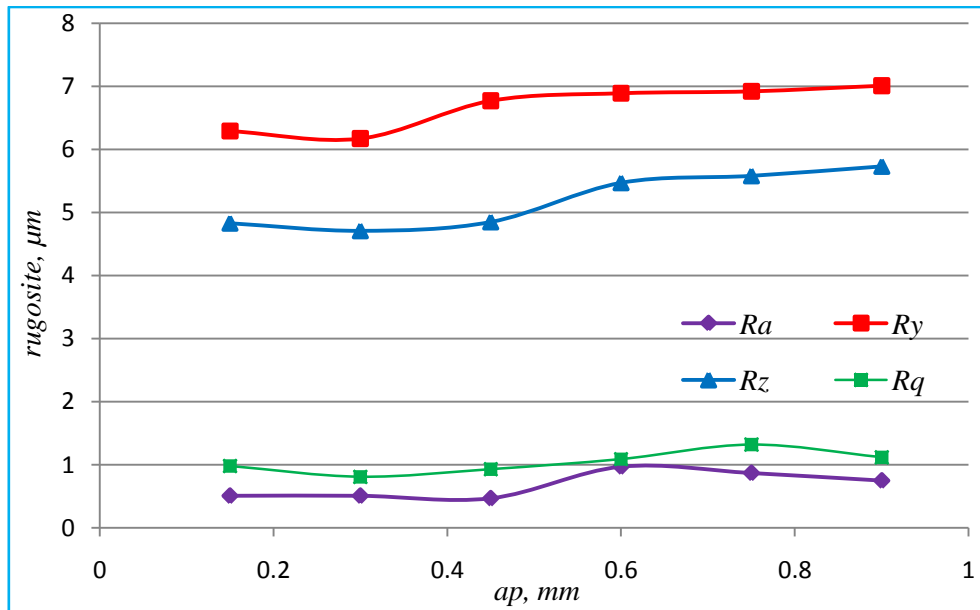
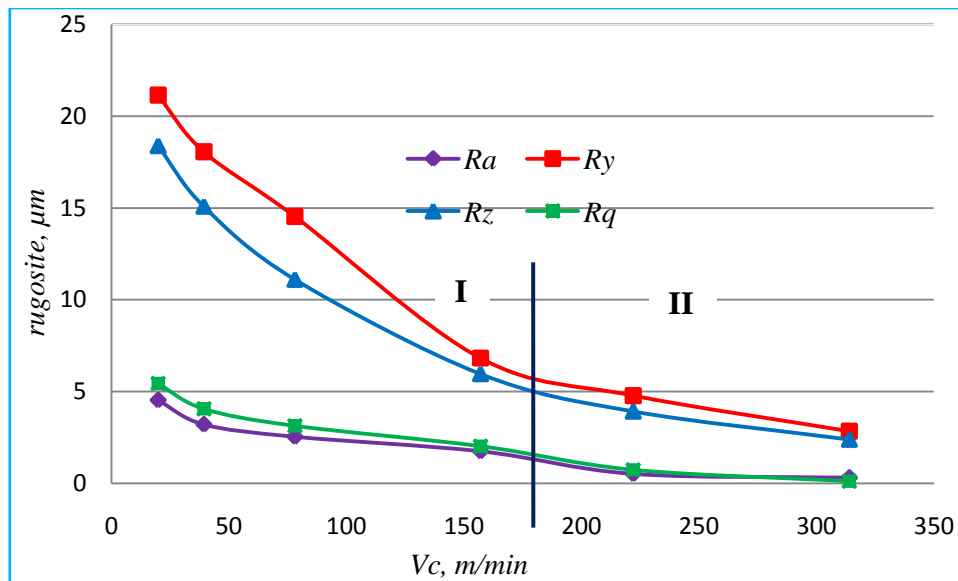


Fig. III.2. Effet de la profondeur de passe sur la rugosité :

$$V_c = 222 \text{ m/min}; f_z = 0.0563 \text{ mm/dt}$$

### III.2.3 Influence de la vitesse de coupe

Nous constatons à travers les résultats obtenus et représentés sur la figure III.3 que la tendance des courbes se divise en deux zones. Dans la première zone (zone I), le graphe montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe, l'état de surface s'améliore d'une manière très significative, on remarque aussi que si on augmente la vitesse de coupe, l'arrachement de copeaux devient plus facile à cause de la température élevée et le méplat important de six (5) mm de la plaquette ce qui nous donne une rugosité réduite. Dans la deuxième zone (zone II) on observe une stabilisation dans les critères de rugosité qui se traduit par une stabilité du système usinant. D'une façon générale l'augmentation de la vitesse de coupe de 19,78 à 314 m/min fait diminuer les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ , et  $R_z$  et  $R_q$ ) respectivement de (92,95%, 92,95%, 86,95% et 97,79%). Aux basses vitesses de coupe les critères de rugosité sont à leurs hauts niveaux et au-delà de 220 m/min presque une stabilité.



**Fig. III.3.** Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité :

$$fz = 0,16 \text{ mm/dt}; ap = 0,3\text{mm}$$

### III.3. Influence des paramètres du régime de coupe sur la rugosité (cas du cermet)

#### III.3.1. Influence de l'avance par dent

Nous constatons à travers les résultats obtenus et représentés sur la [figure III.4](#) que l'augmentation de l'avance par dent dégrade l'état de surface, cette dégradation est caractérisée par les vibrations engendrée par la zone de contact outil matière et du frottement qui fait croître la température dans cette zone. On peut remarquer que l'avance est l'un des paramètres de coupe dont l'effet est significatif sur la rugosité de surface, elle contribue à l'évolution de la rugosité. L'augmentation de l'avance de 0.007 à 0.2254 mm/dt fait accroître les critères de rugosité (Ra, Ry, Rz et Rq) respectivement de (74,42%, 52,39%, 32,46% et 75,21%).

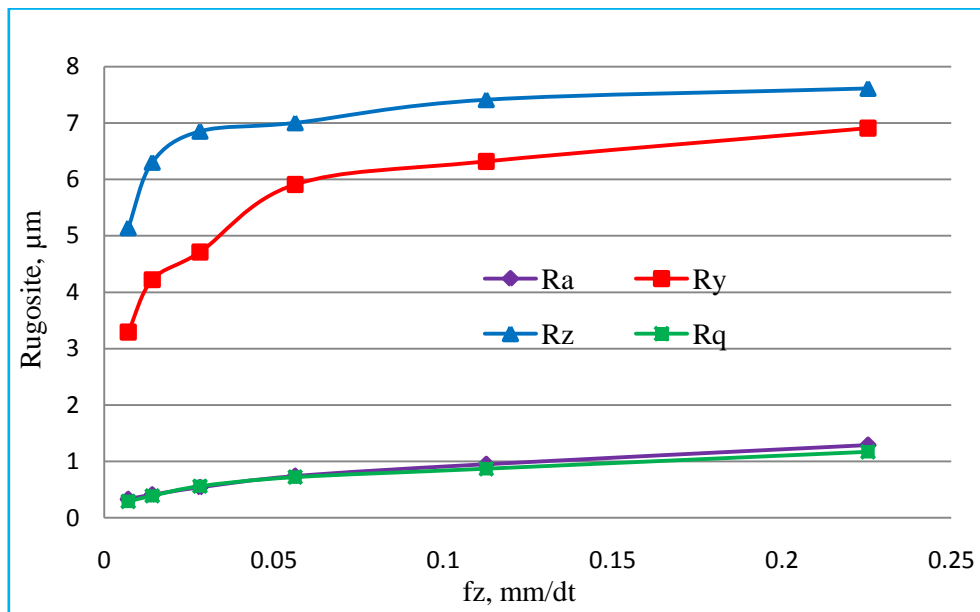
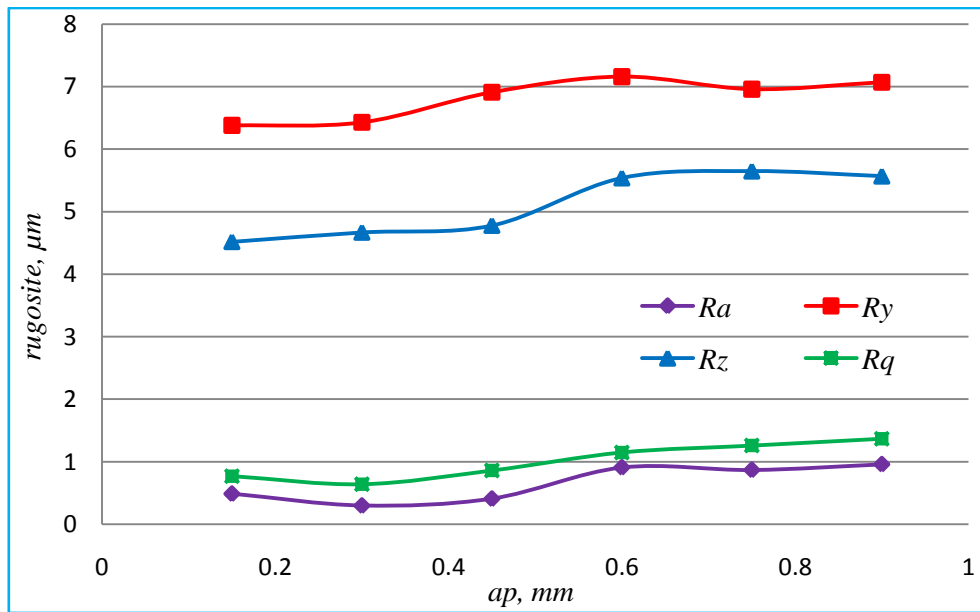


Fig. III.4. Effet de l'avance par dent sur la rugosité :

$$V_c = 222 \text{ m/min}; a_p = 0,3 \text{ mm}$$

### III.3.2. Influence de la profondeur de passe

La figure III.5 illustre l'évolution des critères de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour le cermet à  $V_c = 222 \text{ m/min}$  et  $f_z = 0,0563 \text{ mm/dt}$ . L'analyse des résultats montre que ce paramètre est moins important que l'avance et ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité des surfaces usinées. Ceci est dû à l'augmentation de la largeur de contact entre l'outil et la pièce. Ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe et par conséquent elle freine le processus du mécanisme d'usure. Pour une profondeur de passe minimale de 0,15 mm les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) sont respectivement de (0,49, 6,38, 4,52 et 0,77)  $\mu\text{m}$  et pour une valeur maximale de la profondeur de passe égale à 0,9 mm les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) sont respectivement de (0,96, 7,07, 5,57 et 1,57)  $\mu\text{m}$ . Ce constat nous permet de conclure que l'augmentation est de (48,96%, 09,76%, 18,85% et 43,79%) pour les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_z$ ) (stabilisation des critères de rugosité). Des résultats similaires sont rapportés par [26], [46] et [47].



**Fig. III.5.** Effet de la profondeur de passe sur la rugosité :

$$V_c = 222 \text{ m/min}; f_z = 0.0563 \text{ mm/dt}$$

### III.3.3. Influence de la vitesse de coupe

La figure III.6, expose les résultats de l'évolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe pour le cermet. On remarque que la tendance des courbes se divise en deux zones. Dans la première zone (zone I), l'effet de la vitesse de coupe montre qu'avec l'augmentation de ce paramètre, l'état de surface s'améliore d'une manière très significative, on remarque aussi que si on augmente la vitesse de coupe, l'arrachement de copeaux devient plus facile à cause de la température élevée et le méplat important de six (5) mm de la plaquette ce qui nous donne une rugosité réduite. Dans la deuxième zone (zone II) on observe une stabilisation dans les critères de la rugosité qui se traduit par une stabilité du système usinant. L'augmentation de la vitesse de coupe de 19.78 à 314 m/min fait diminuer les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) respectivement de (95,28%, 92,09%, 92,6% et 96%).

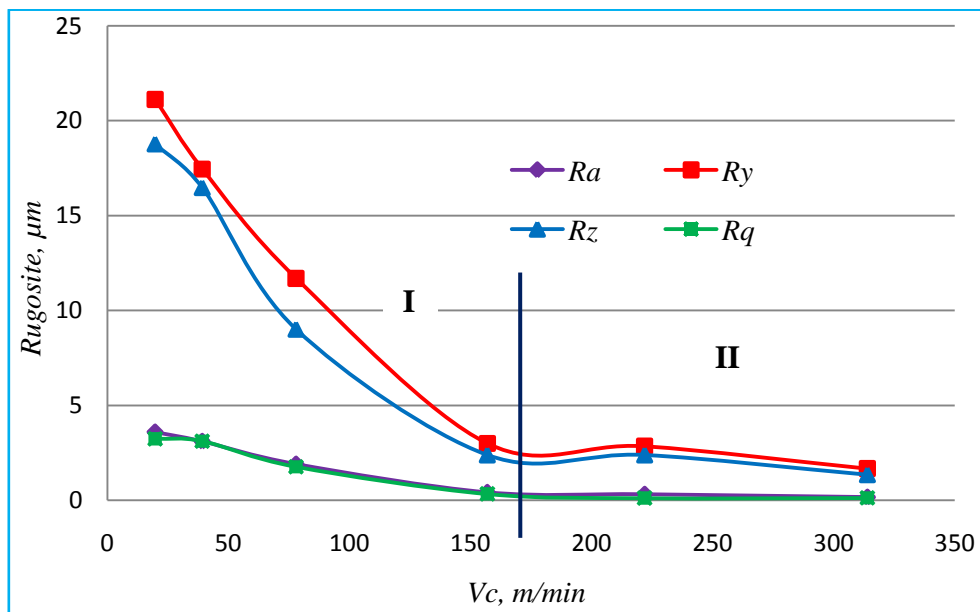


Fig. III.6. Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité :

$$f_z = 0,16 \text{ mm/dt}; a_p = 0,3 \text{ mm}$$

#### III.4. Influence du mode d'usinage sur la rugosité (cas du carbure revêtu)

Les figures III.7 à III.9 illustrent l'évolution de la rugosité de surface usinée de l'acier AISI1040 en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$  et  $f_z$ ), et cela pour deux modes d'usinage (le fraisage en opposition et le fraisage en avalant). L'analyse des résultats montre une augmentation de la rugosité avec l'augmentation de l'avance par dent et son amélioration avec la croissance de la vitesse de coupe. Ces figures montrent aussi clairement que le fraisage en avalant donne des résultats de la rugosité de surface meilleurs que le fraisage en opposition et cela pour toutes les conditions de coupe utilisées, à titre d'exemple pour une avance  $f_z = 0,0282 \text{ mm/dt}$ ,  $a_p = 0,3 \text{ mm/dt}$  et  $V_c = 222 \text{ m/min}$  conduit à une augmentation des critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) lorsque le fraisage est en opposition successivement de (78,83%, 67,25%, 61,11%, 76,10%) (Fig. III.7) et pour  $V_c = 314 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,08 \text{ mm/dt}$  et  $a_p = 0,3 \text{ mm}$  conduit à une augmentation des critères de la rugosité de (36,49%, 35,22%, 34,26%, 36,07%). (Fig. III.9) et cela toujours lorsque le fraisage est en opposition.



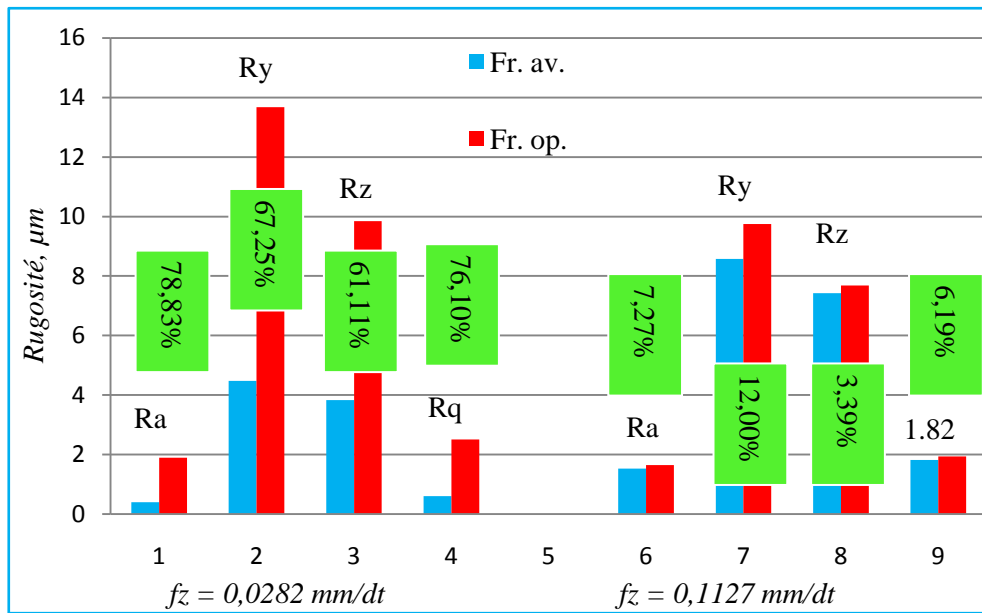


Fig. III.7. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le carbure revêtu :  
 $ap = 0,3 \text{ mm}$ ;  $Vc = 222 \text{ m/min}$

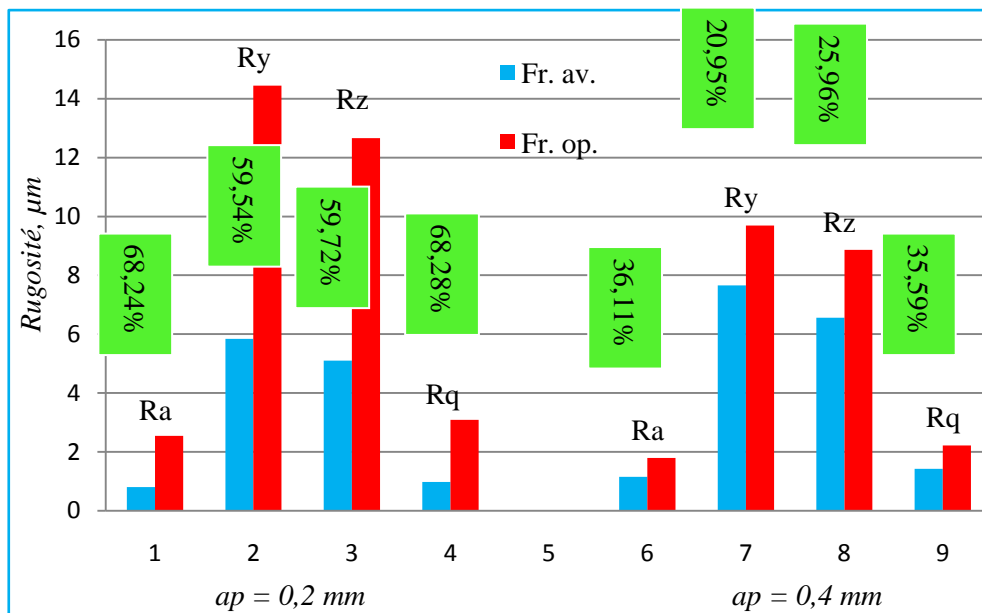
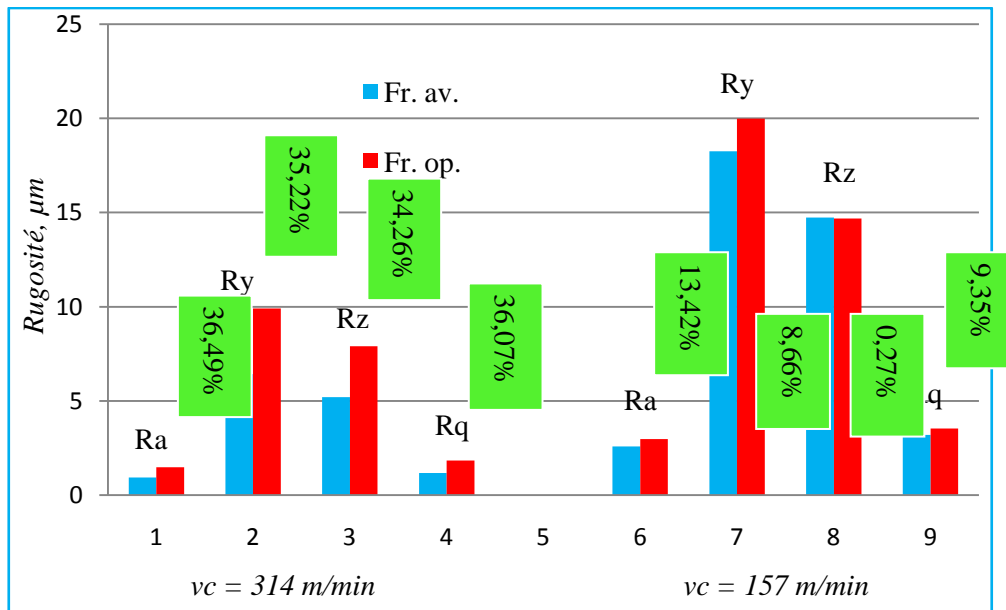


Fig. III.8. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le carbure revêtu :  
 $fz = 0,0282 \text{ mm/dt}$ ;  $Vc = 222 \text{ m/min}$



**Fig. III.9.** Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le carbure revêtu :

$$fz = 0,08 \text{ mm/dt}; ap = 0,3 \text{ mm}$$

### III.5. Influence du mode d'usinage sur la rugosité (cas du cermet)

Les figures III.10 à III.12 montrent, pour différents paramètres de coupe ( $fz$ ;  $ap$ ;  $Vc$ ) qu'il y a une différence dans le comportement selon le mode d'usinage et les valeurs des paramètres de coupe, d'une manière générale le fraisage en avalant donne des résultats meilleurs que le fraisage en opposition. Cela est dû à la résistance à la coupe qui est faible au début et qui croît avec l'augmentation du paramètre de coupe pour le fraisage en opposition. Tandis que pour le fraisage en avalant, la fraise attaque par-derrière et alors la résistance à la coupe diminue.

En pratique, les conséquences de l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité sont comme suit : pour  $fz = 0,1127 \text{ mm/dt}$ ,  $ap = 0,3 \text{ mm/dent}$  et  $Vc = 222 \text{ m/min}$  on constate une réduction des critères de rugosité ( $Ra$ ,  $Ry$ ,  $Rz$  et  $Rq$ ) successivement de (24%, 11,67%, 7,25%, 22,58%) en faveur du fraisage en avalant.

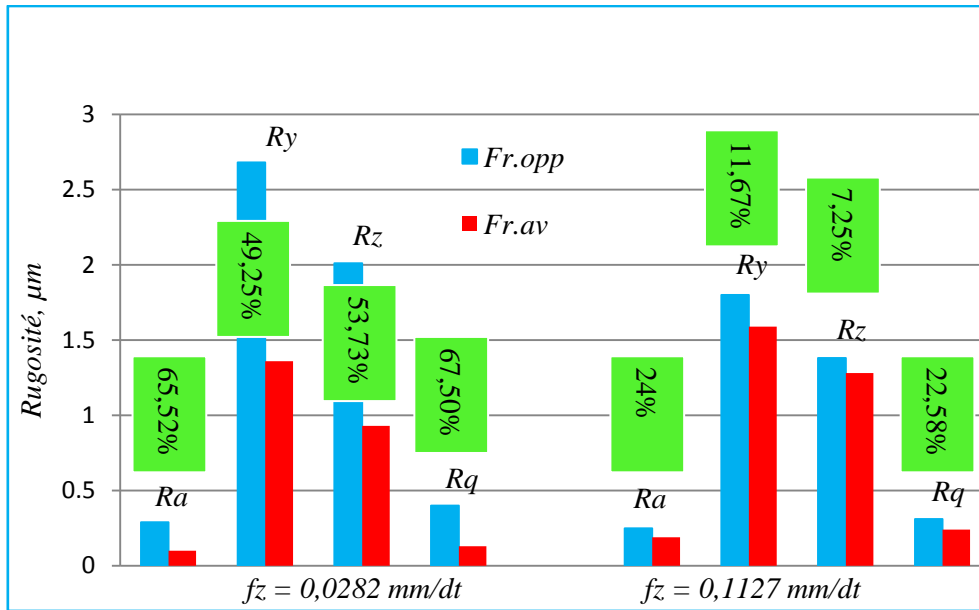


Fig. III.10. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le cermet :  
 $ap = 0,3 \text{ mm/dent}$ ;  $Vc = 222 \text{ m/min}$

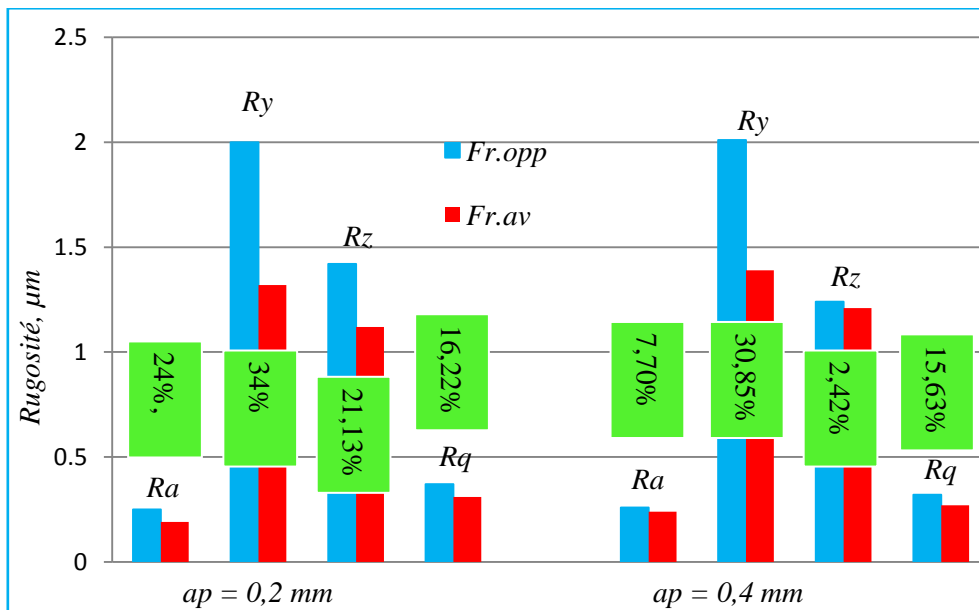


Fig. III.11. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le cermet :  
 $fz = 0,0282 \text{ mm/dt}$ ;  $Vc = 222 \text{ m/min}$

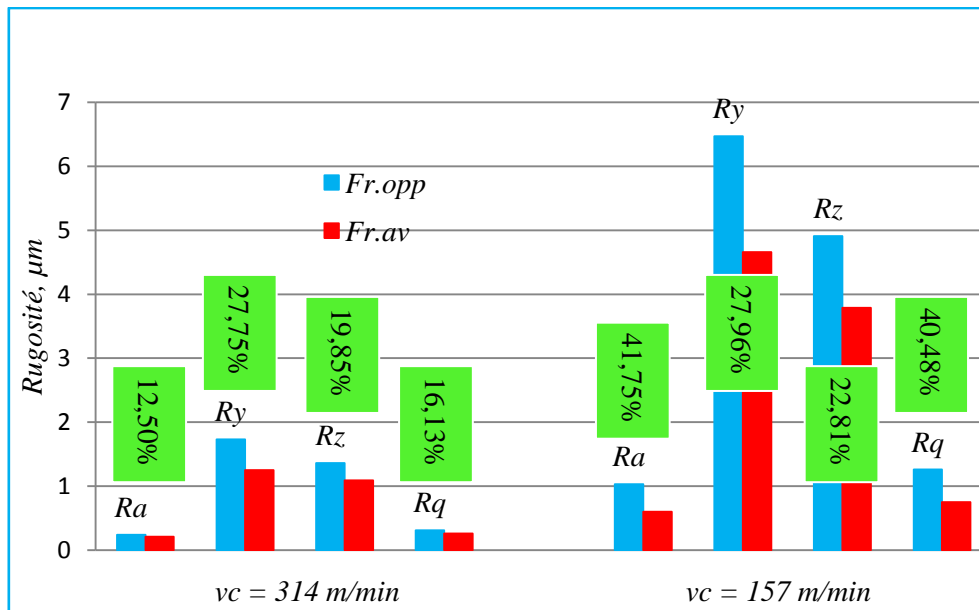


Fig. III.12. Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le cermet :

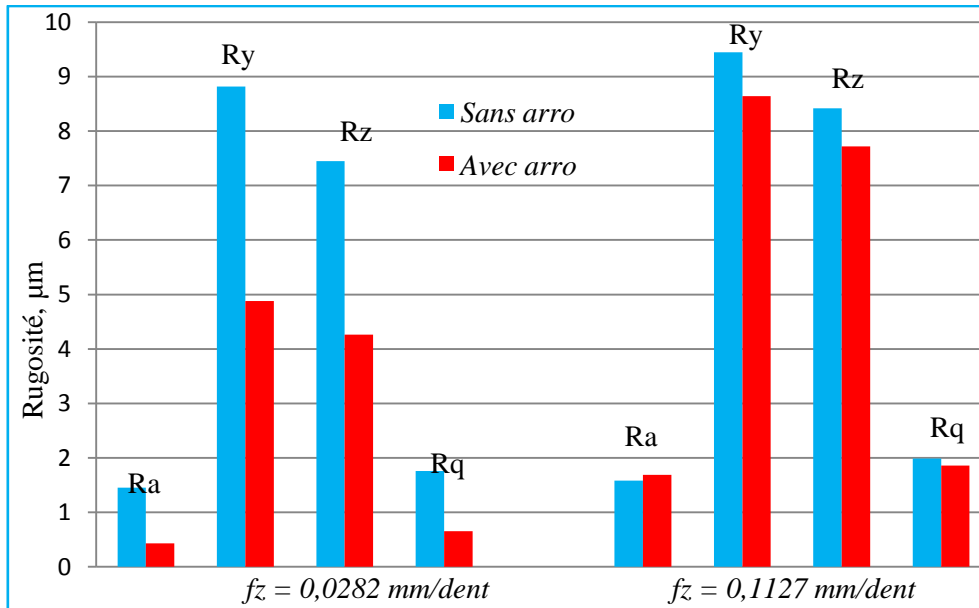
$$f_z = 0,08 \text{ mm/dt} ; a_p = 0,3 \text{ mm}$$

### III.6. Influence de l'arrosage sur la rugosité (cas du carbure revêtu)

Les figures III-13 à III-15 illustrent l'évolution de la rugosité de surface usinée en fonction des paramètres du régime de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f_z$ ) pour le fraisage avec lubrification et sans lubrification.

#### III.6.1. Influence de l'avance par dent sur la rugosité

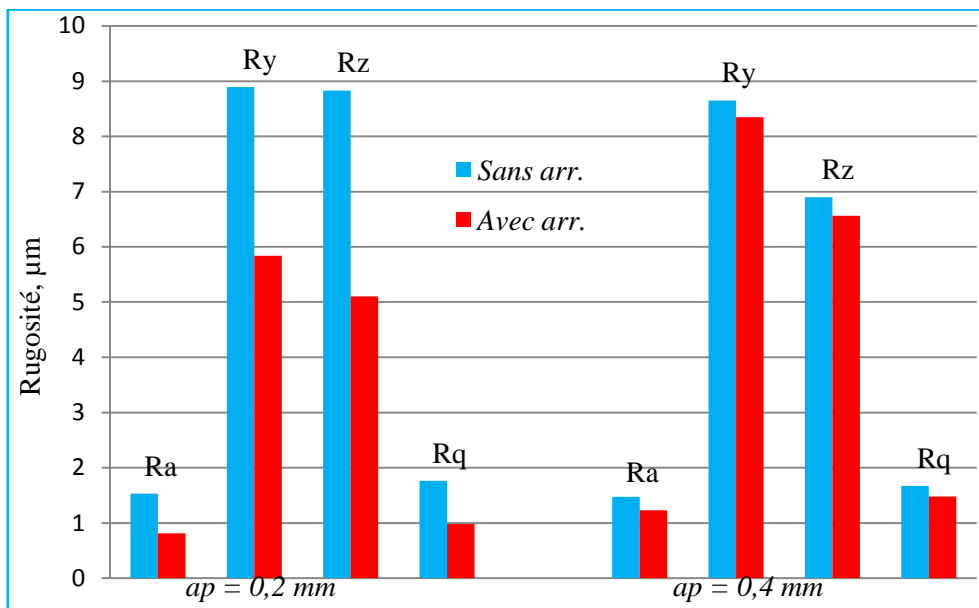
La figure III.13 illustre l'évolution des différents critères de la rugosité de surface usinée de l'acier AISI 1040 en fonction de l'avance par dent pour un travail à sec et avec lubrification. Il ressort d'une manière générale que l'usinage avec lubrification donne des résultats meilleurs que l'usinage à sec. A titre d'exemple pour une avance par dent de 0,0282 mm/dt,  $a_p = 0,3$  mm/dt et  $V_c = 222$  m/min on remarque une réduction des critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) lors du fraisage lubrifié par rapport au fraisage à sec respectivement de (70,34%, 44,67%, 42,82%, 63,07%), et pour une avance par dent de 0,1127 mm/dt,  $a_p = 0,3$  mm/dt;  $V_c = 222$  m/min la réduction est de (7,70%, 8,57%, 8,31%, 6,53%) toujours lorsque le fraisage est avec lubrification. Cela est dû au fluide d'arrosage qui a permis le refroidissement du couple outil matière et l'évacuation des copeaux enlevés en dehors de la zone de coupe et aussi la diminution du frottement.



**Fig. III.13.** Effet de l'arrosage sur la rugosité avec carbure revêtu :  
 $ap = 0,3$  mm/dt;  $Vc = 222$  m/min

### III.6.2. Influence de la profondeur de passe sur la rugosité

La figure III.14 illustre l'évolution des différents critères de la rugosité de surface usinée en fonction de la profondeur de passe lorsque le fraisage est réalisé à sec et lubrifier. Pour une profondeur de passe  $ap = 0,2$  mm,  $f_z = 0,0282$  mm/dt et  $Vc = 222$  m/min on remarque une augmentation dans les critères de la rugosité (Ra, Ry Rz et Rz) lorsque le fraisage est réalisé sans lubrification de (47,06%, 34,31%, 42,24%, 44,32%). Et pour une profondeur de passe  $ap = 0,4$  mm,  $f_z = 0,0282$  mm/dt et  $Vc = 222$  m/min, l'augmentation est de (16,33%, 3,47%, 4,93%, 11,38%) toujours lorsque le fraisage est réalisé à sec.



**Fig. III.14.** Effet de l'arrosage sur la rugosité avec carbure revêtu :  
 $f_z = 0,0282$  mm/dt;  $Vc = 222$  m/min

### III.6.3. Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité

La figure III.15 illustre l'évolution des différents critères de la rugosité de surface usinée de l'acier AISI 1040 en fonction de la vitesse de coupe pour les deux cas, à sec et lubrifié. A titre d'exemple : pour une vitesse de coupe de 314 m/min,  $f_z = 0,08$  mm/dt et  $ap = 0,3$  mm on remarque une augmentation dans les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) lorsque le travail est à sec est de (15,53%, 1,71%, 1,47%, 10,40%) et pour  $V_c=157$  m/min,  $f_z = 0,08$  mm/dt et  $ap = 0,3$  mm l'augmentation est de (8,86%, 10,85%, 10,26%, 3,38%) même chose lorsque le fraisage est à sec.

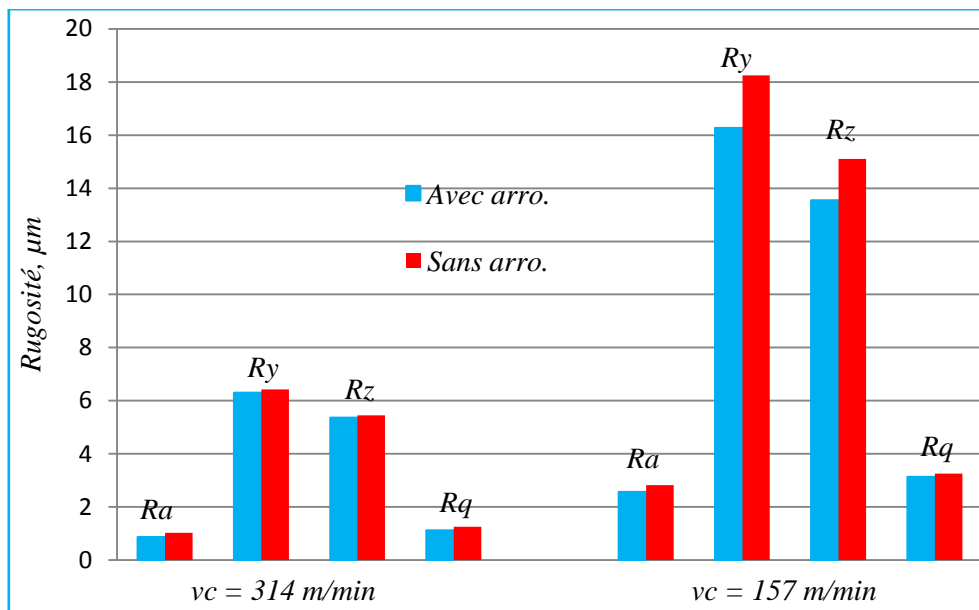


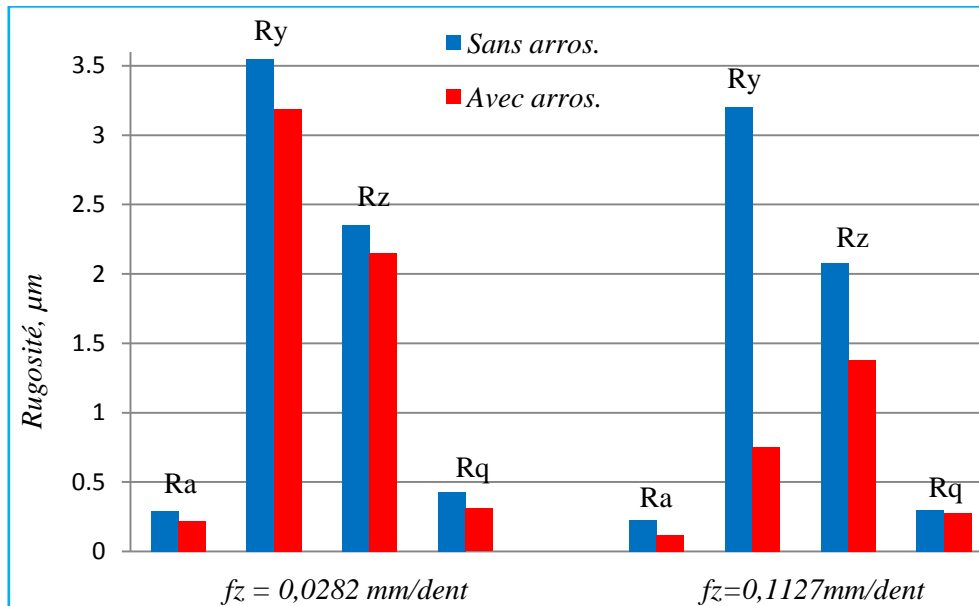
Fig. III.15. Effet d'arrosage sur la rugosité avec le carbure revêtu :  
 $f_z = 0,08$  mm/dt;  $ap = 0,3$  mm

### III.7. Influence de l'arrosage sur la rugosité (cas du cermet)

#### III.7.1. Influence de l'avance par dent sur la rugosité

Les figures III.16 à III 18 montrent l'évolution des différents critères de la rugosité de surface usinée ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) de l'acier AISI 1040 en fonction des différents paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $ap$ ) pour le cas des plaquettes en cermet. La figure III.16 montre que l'usinage avec lubrification donne des résultats de la rugosité meilleurs que ceux obtenues à sec. En pratique, les conséquences de l'influence de l'arrosage sur la rugosité sont comme suit : Pour une avance par dent  $f_z = 0,0282$ ,  $ap = 0,3$  mm/dt et  $V_c = 222$  m/min conduit à une augmentation des critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) et cela lorsque le fraisage est à sec successivement de 24,14%, 10,14%, 8,51%, 27,91%, et pour  $f_z$

= 0,1127 mm/dt,  $ap = 0,3$  mm et  $Vc = 222$  m/min on constate une diminution des critères de la rugosité de surface lorsque le fraisage est avec lubrification de 47,83%, 76,56%, 33,65%, 6,67% respectivement.



**Fig. III.16.** Effet d'arrosage sur la rugosité avec le cermet :  
 $ap = 0,3$  mm;  $Vc = 222$  m/min

### III.7.2. Influence de la profondeur de passe sur la rugosité

La [figure III.17](#) illustre l'évolution des différents critères de la rugosité de surface usinée en fonction de la profondeur de passe pour un fraisage à sec et lubrifié. Pour une profondeur de passe de 0.2 mm,  $fz = 0,0282$  mm/dt et  $Vc = 222$  m/min on remarque une augmentation dans les critères de rugosité (Ra, Ry, Rz et Rq) est cela lorsque le fraisage est sans lubrification de (58,93%, 67,58%, 67,05%, 64,77%) respectivement et pour  $ap = 0,4$  mm  $fz = 0,0282$  mm/dt et  $Vc = 222$  m/min l'augmentation est de 74,29%, 63,68%, 75,52%, 72,63%.

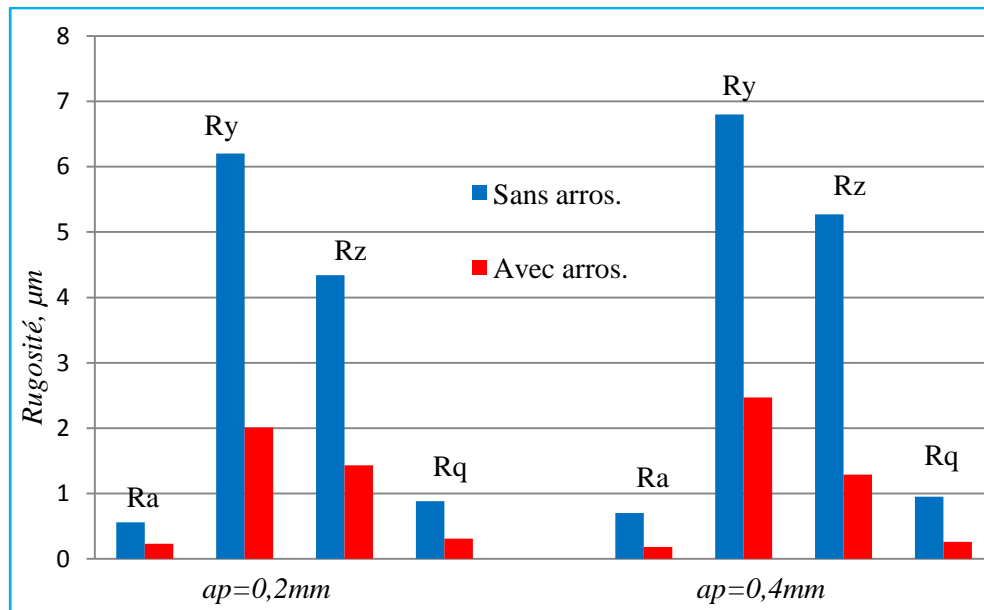


Fig. III.17. Effet d'arrosage sur la rugosité avec le cermet :

$$f_z = 0,0282 \text{ mm/dt}; V_c = 222 \text{ m/min}$$

### III.7.3. Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité

La figure III.18 illustre l'évolution des différents critères de la rugosité de surface usinée de l'acier AISI 1040 en fonction de la vitesse de coupe lorsque le fraisage est à sec et lubrifier. Pour une vitesse de coupe de 314 m/min,  $f_z = 0,08 \text{ mm/dt}$  et  $ap = 0,3 \text{ mm}$  on remarque une augmentation dans les critères de rugosité (Ra, Ry, Rz et Rz) lorsque le fraisage est à sec de (60%, 25,43%, 16,91%, 48,39%) respectivement et pour  $V_c = 157 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,08 \text{ mm/dt}$  et  $ap = 0,3 \text{ mm}$  l'augmentation est de (37,86%, 35,26%, 39,36%, 39,10%).

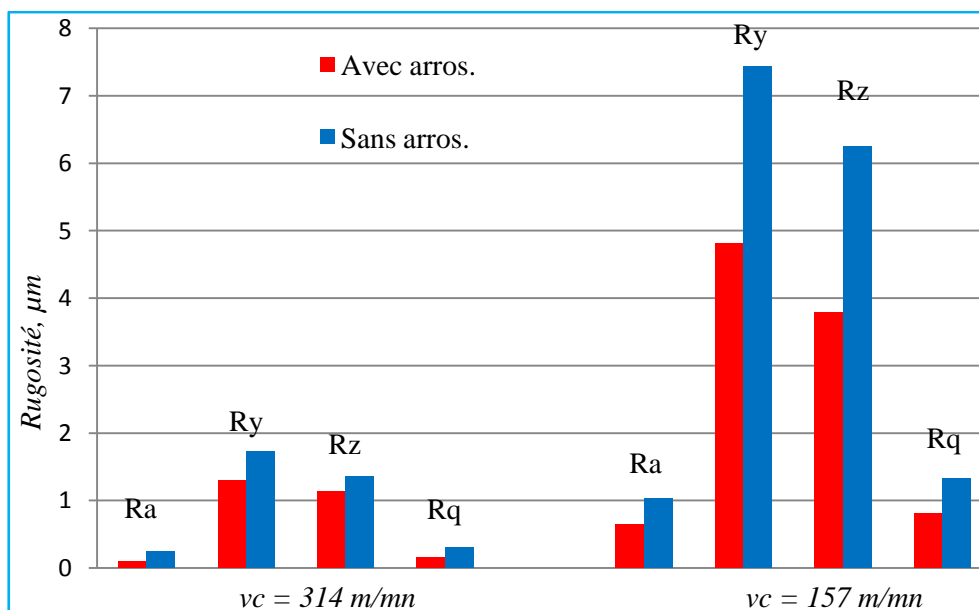


Fig. III.18. Effet d'arrosage sur la rugosité avec le cermet :

$$f_z = 0,08 \text{ mm/dt}; ap = 0,3 \text{ mm}$$



### III.8. Influence du matériau de coupe sur la rugosité

Les valeurs de la rugosité obtenues en fonction des différents paramètres de régime de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) pour le fraisage de l'acier AISI 1040 selon deux types de matériau de coupe (le carbure revêtu ou le cermet), se diffèrent d'un cas à un autre. Pour montrer l'influence du matériau de coupe, nous présentons dans les figures III. 19 à III. 21, une comparaison entre les deux matériaux de coupe pour deux critères de rugosité ( $R_a$  et  $R_y$ ). L'analyse des résultats de cette comparaison montre que pour toutes les avances par dent testées, les rugosités ( $R_a$  et  $R_y$ ) obtenues par le cermet (CT530) sont meilleures que celles obtenues par le carbure revêtu (GC1030). (Fig. III.19).

D'une manière générale pour les grandes profondeurs de passe, les rugosités ( $R_a$  et  $R_y$ ) obtenues par le carbure revêtu et le cermet sont presque les mêmes avec un avantage pour le carbure revêtu à cause des ébréchures de ce dernier. (Fig. III.20).

Pour toutes les vitesses de coupe testées, les rugosités ( $R_a$  et  $R_y$ ) obtenues par le cermet sont meilleures que celles obtenues par le carbure revêtu. (Fig. III.21).

L'amélioration des rugosités obtenues par le cermet en comparaison avec le carbure revêtu, est attribuée à la nature du matériau lui-même, à sa composition chimique et ses caractéristiques physico-chimiques car un cermet est un matériau composite composé d'un renfort en céramique (Cer) et d'une matrice métallique (Met).

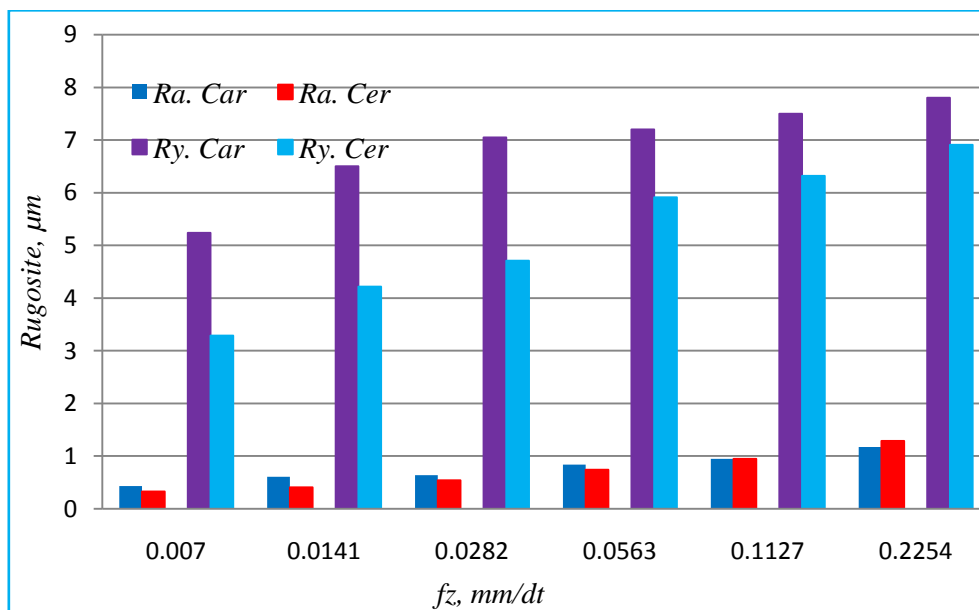


Fig. III. 19. Effet de l'avance par dent sur la rugosité :

$$V_c = 222 \text{ m/min}; a_p = 0,3 \text{ mm}$$

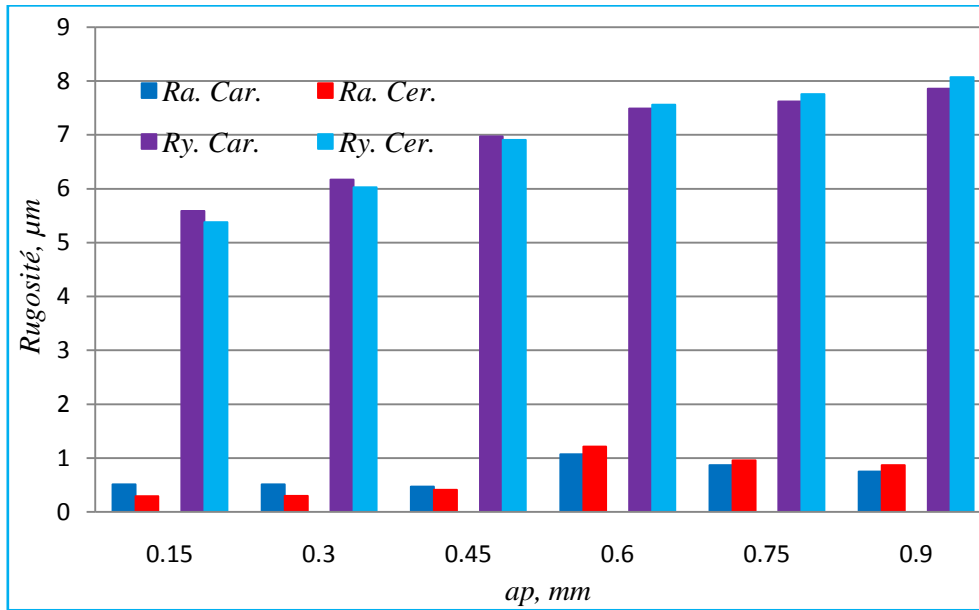


Fig. III. 20. Effet de la profondeur de passe :

$$V_c = 222 \text{ m/min}; f_z = 0.0563 \text{ mm/dt}$$

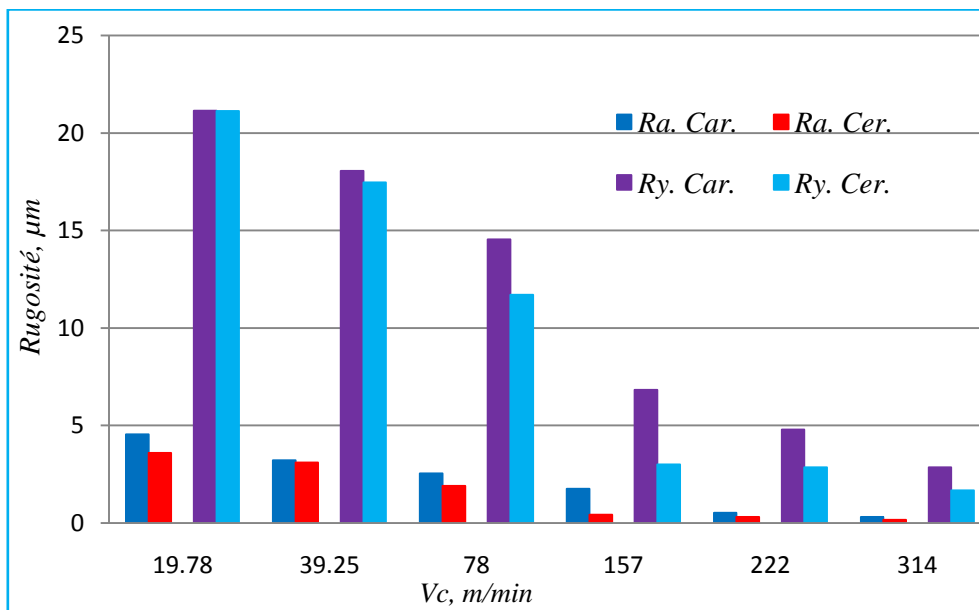


Fig. III. 21. Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité :

$$f_z = 0,16 \text{ mm/dt}; a_p = 0,3 \text{ mm}$$

### III.9. Evolution de l'usure en dépouille

#### III.9.1. Carbure revêtu GC1030

Pour des faibles et moyennes vitesses de coupe (78 et 157 m/min) et avances par dent (0,0282 et 0,1127 mm/dent), l'usure ne se produit qu'à une longueur de coupe correspondant à 120000 mm (300 passes d'usinage). C'est pour cela qu'il est nécessaire de prendre des

conditions de coupe sévères, telles que  $V_c = 439,6$  m/min ( $n = 1400$  tr/min);  $f_z = 0,114$  mm/dt ( $V_f = 800$  mm/min);  $ap = 0,6$  mm. L'usure admissible retenue selon la norme ISO est  $VB=0,3$  mm. L'usure en dépouille a été mesurée à différents intervalles à la fin de chaque passage (c'est-à-dire, après que l'outil de coupe se déplace le long d'une longueur totale de la pièce à usiner). Les images des outils usés ont été sélectionnées et capturées au microscope (Standard gage-Visual 250) équipé d'un logiciel (Visual Gage 2.2.0) (Fig. II.9).

La figure III.22 montre l'évolution de l'usure en dépouille ( $VB$ ) et ( $VB_{max}$ ) en fonction de la longueur de coupe ( $L_c$ ). La valeur d'usure indiquée dans la courbe est la moyenne des valeurs de l'usure des cinq plaquettes de coupe. Les résultats obtenus montrent que l'usure en dépouille comporte trois zones. Dans la première zone, l'usure en dépouille est relativement accélérée, atteignant  $VB = 0,147$  mm lorsque la longueur de coupe  $L_c = 6684$  mm (501 sec), ceci s'explique par la première mise en service de l'outil de coupe. La deuxième zone est la période d'usure normale, pendant laquelle l'outil traverse une longueur de coupe totale  $L_c = 29960$  mm (2247 sec) atteignant une usure  $VB = 0,32$  mm. Au-delà de ce point, la température dans la zone de contact de la partie active de la plaquette augmentera de plus en plus, ce qui favorise l'accélération du mécanisme d'usure jusqu'à  $VB_{max} = 0,72$  mm avec  $L_c = 34000$  mm (2551Sec). Ensuite, son changement devient indispensable après cette usure, les plaquettes sont endommagées et nécessitent leur changement.

La figure III.23 montre les résultats de l'évolution de la rugosité de surface ( $R_a$ ) en fonction de l'usure en dépouille  $VB_{max}$ . Il est clair que dans la première zone l'augmentation de l'usure  $VB_{max} = 0,147$  mm, entraîne une augmentation de la rugosité  $R_a$  de l'ordre de  $0,6$   $\mu\text{m}$  et ceci pour une longueur de coupe  $L_c = 6684$  mm (501 sec). Dans la deuxième zone correspondant à la phase d'usure normale et lorsque  $VB = 0,32$  mm pour une longueur de coupe totale  $L_c = 29960$  mm (2247 sec), il y a une légère augmentation de la rugosité  $R_a = 0,75$   $\mu\text{m}$ . Dans la troisième zone, qui commence à partir de  $VB = 0,32$  mm, on note que la rugosité reprend une courbe ascendante après une certaine stabilité. Le comportement d'usure des outils a également été souligné par Khrais et al [48], Yallese et al [49]. Enfin, lorsque la valeur de  $VB_{max} = 0,72$ , dans ce cas, la rugosité  $R_a$  est à sa valeur maximale ( $1,2$   $\mu\text{m}$ ). Ces bonnes qualités de surface obtenues s'expliquent par la forme spéciale de la plaquette (forme aplatie) qui minimise la profondeur des sillons creusés sur la surface usinée et favorise par conséquent la réduction de la rugosité de la surface. Des résultats analogues ont été développés par Bouchelaghem et al [50], Yallese et al [49], [51] et [52]. La figure III. 24 illustre la morphologie de l'usure en dépouille de l'une des plaquettes de coupe à différentes

longueurs de coupe, on remarque qu'après une longueur de coupe de 29960 mm ( $T = 2247$  sec) l'usure de la plaquette devient remarquable.

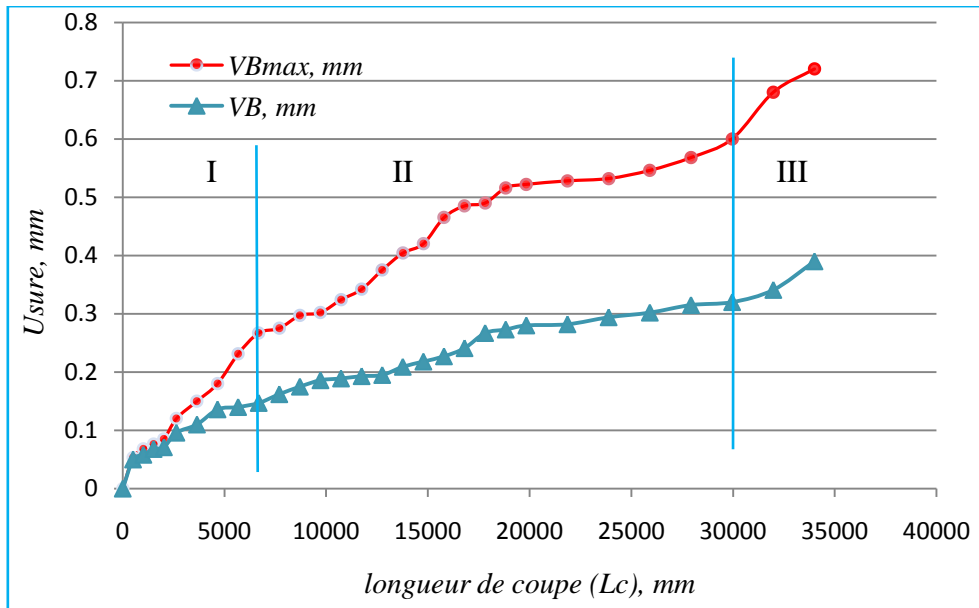


Fig. III. 22. Evolution de l'usure (VB et Vbmax) en fonction de la longueur de coupe (Lc):  
 $V_c = 439,6$  m / min;  $f_z = 0,114$  mm / dt;  $a_p = 0,6$  mm

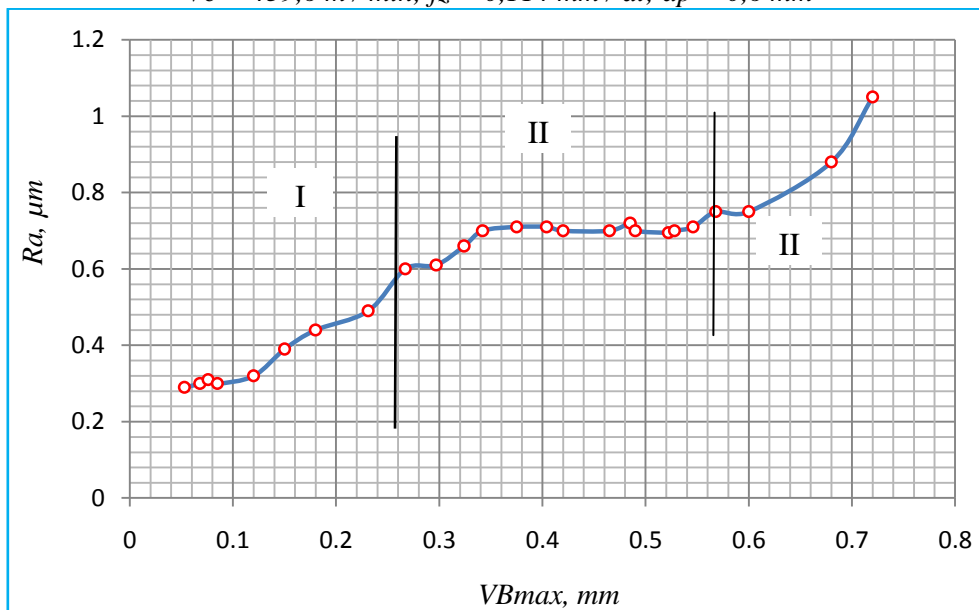
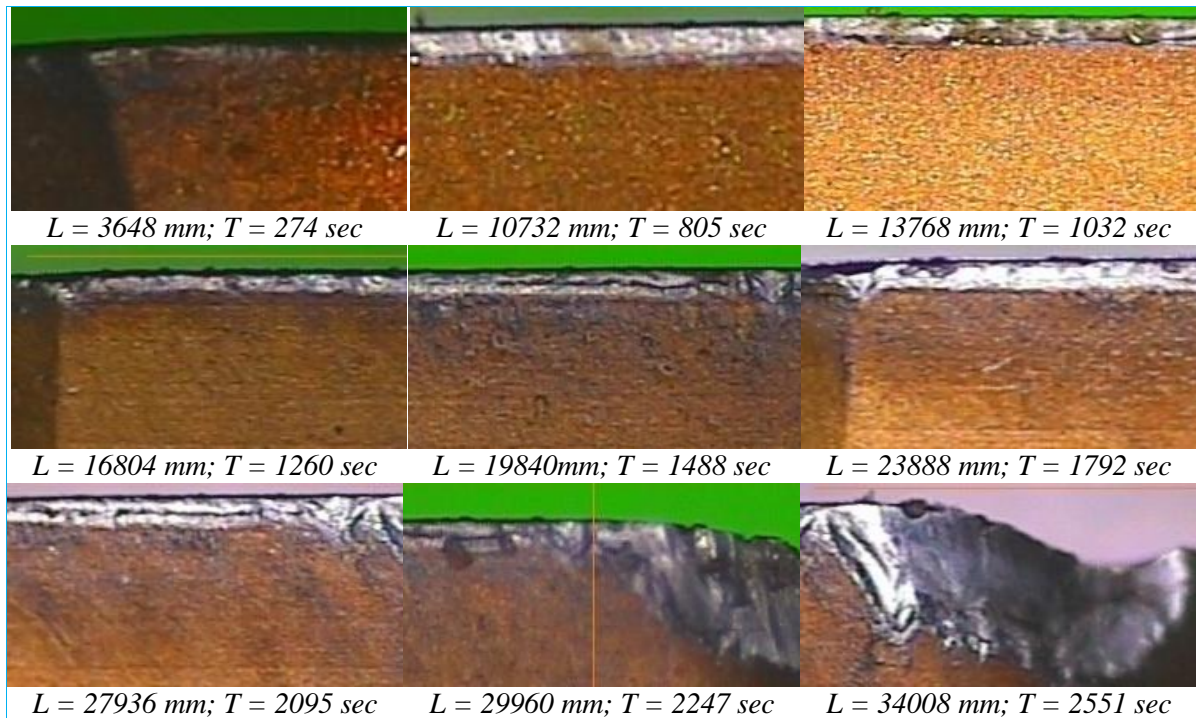


Fig. III. 23. Evolution de la rugosité (Ra) en fonction de l'usure (Vbmax):  
 $V_c = 439.6$  m/min and  $f_z = 0.114$  mm/td (carbure)



**Fig. III. 24.** Micrographie de la plaquette après différents temps d'usinage

### III.9.2. Cermet CT530

Les plaquettes cermets "CT530" ont montré un comportement à l'usure nettement meilleur que celui des plaquettes en carbure revêtu (GC1030). Cette performance de supériorité est caractérisée par un pourcentage de 60 %.

La qualité des surfaces obtenues lors de l'usinage avec les outils en cermet CT530 est comparable à celle obtenue en rectification. Cet avantage présente un atout économique, puisqu'il nous permet de réduire les phases de fabrication des pièces (ébauche, demi-finition, finition) sur la même machine-outil.

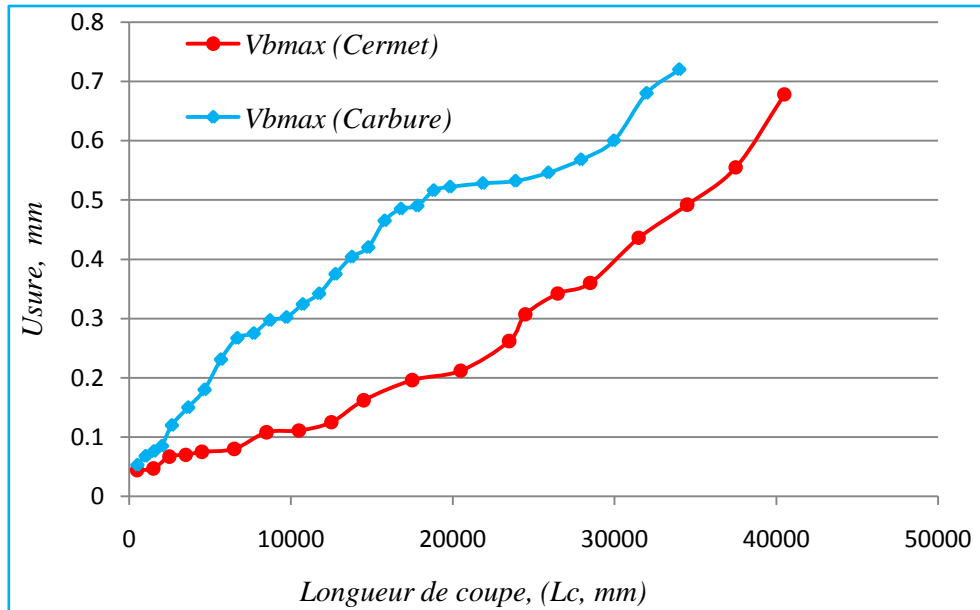


Fig. III. 25. Evolution de l'usure ( $V_{bmax}$ ) en fonction de longueur de coupe, ( $L_c$ , mm):  $V_c = 439.6$  m/min and  $f_z = 0.114$  mm/td (cermet et carbure)

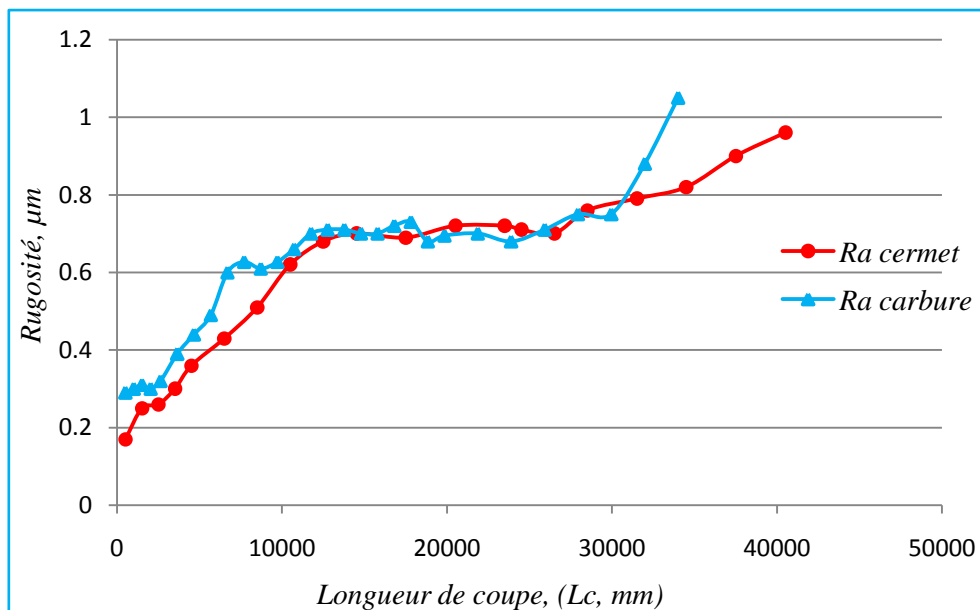
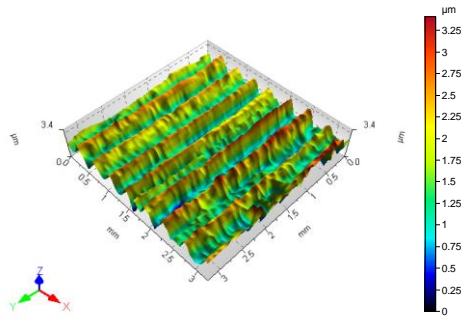


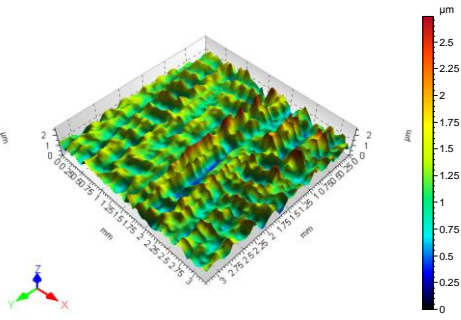
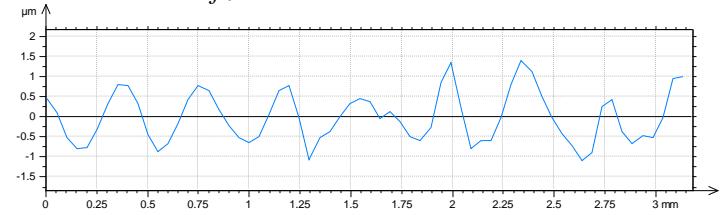
Fig. III. 26. Evolution de la rugosité ( $R_a$ ) en fonction de l'usure ( $V_{bmax}$ ):  
 $V_c = 439.6$  m/min and  $f_z = 0.114$  mm/dt

### III.9.3. Mesure de la rugosité en 3D pour Ra

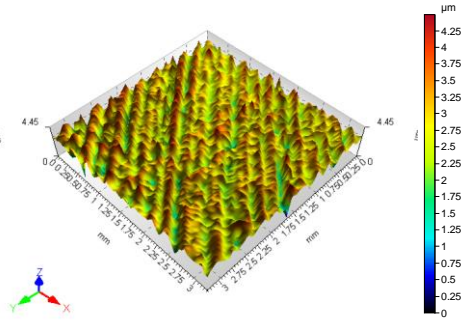
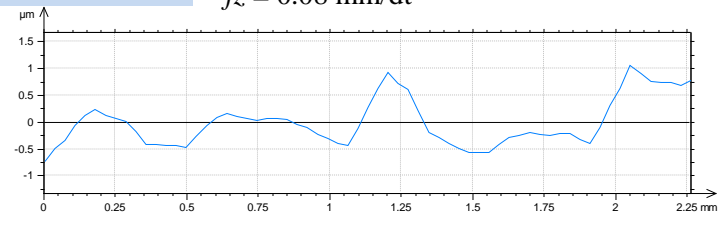
L'utilisation du rugosimètre (3D) s'est avéré un outil très intéressant permettant l'élaboration des cartes topographiques tridimensionnelles, cela a pour effet, la bonne compréhension des caractéristiques des surfaces fraisées produites avec les deux inserts testés de l'acier AISI 1040, c.à.d., pics et les vallées.(Fig. III.27).



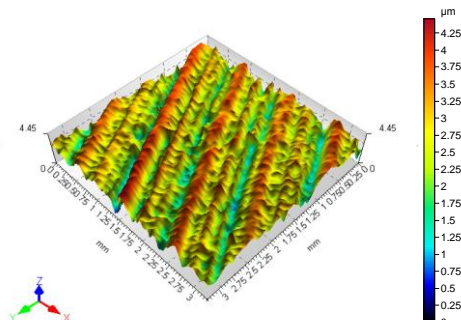
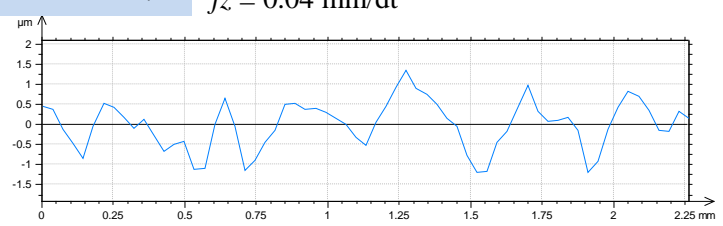
**Ra = 0.404 μm**  $V_c = 78 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.6 \text{ mm}$  et  $f_z = 0.08 \text{ mm/dt}$



**Ra = 0.181 μm**  $V_c = 314 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.6 \text{ mm}$  et  $f_z = 0.08 \text{ mm/dt}$



**Ra = 0.339 μm**  $V_c = 157 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.6 \text{ mm}$  et  $f_z = 0.04 \text{ mm/dt}$



**Ra = 0.362 μm**  $V_c = 157 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.6 \text{ mm}$  et  $f_z = 0.16 \text{ m/dt}$

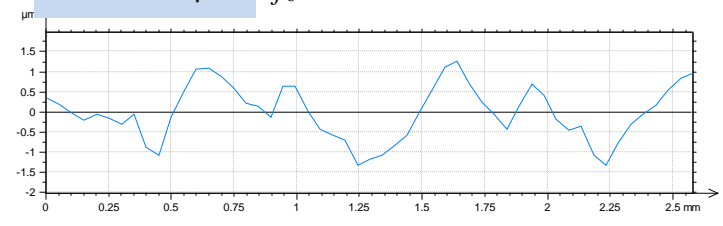


Fig. III. 27. Exemple de présentation de la rugosité en 3D pour Ra

**III.10. Conclusion**

Ce chapitre traite les résultats des essais obtenus lors de fraisage de face de l'acier AISI 1040 par deux matériaux de coupe (plaquettes) : GC1030 et CT350. Ces essais nous ont permis d'évaluer les performances de ces deux différentes plaquettes de coupe en matière de rugosité des surfaces usinées et d'usure en dépouille.



## CHAPITRE IV

# **MODELISATION ET OPTIMISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE**

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$ , et  $ap$ ) et les paramètres technologiques étudiés : critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) et volume de copeau  $Q$ , ils permettent aussi d'optimiser le processus de coupe. Nous avons utilisé les logiciels Minitab 15 et Design-Expert pour faire une analyse de la variance (ANOVA) et pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques des paramètres technologiques étudiés ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (SR). L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés et cela lors du fraisage de face de l'acier AISI 1040 avec deux matériaux de coupe (carbure revêtu : GC103 et cermet : CT530).

La méthode de la surface de réponse (RSM) (Bouzzid et al [53], Aouici et al [54], Hessainia et al [55], Fnides et al [56]) est à la fois une technique statistique et mathématique utilisée pour la modélisation et l'analyse des problèmes dans lesquels les réponses peuvent être affectées par plusieurs variables, Myers et al [57] déterminent l'approximation appropriée pour la vraie relation fonctionnelle entre la réponse et l'ensemble des variables indépendantes et est communément évalué par des fonctions polynomiales où les modèles sont obtenus en effectuant un petit nombre d'expériences suivant un plan d'expérience (Sahoo et al [58]).

Les étapes de la procédure de la méthode de la surface de réponse (RSM) sont les suivantes :

- a) Définir les paramètres d'entrée et les paramètres technologiques de sortie souhaités;
  - b) Choisir un plan de conception expérimentale;
  - c) Effectuer une analyse de régression et détermination des modèles;
  - d) Effectuer l'analyse de la variance (ANOVA) des paramètres d'entrée qui affectent les paramètres technologiques;
  - e) Vérification de l'adéquation des modèles obtenus;
  - f) Effectuer une optimisation des variables d'entrée et effectuer des tests de confirmation.
- Pour calculer les constantes et les coefficients des modèles mathématiques, les logiciels

Minitab et Design-Expert ont été utilisés et caractérisés par l'analyse de la variance (ANOVA), la régression multiple et la méthode de la surface de réponse (RSM). Dans l'étude actuelle, la relation entre les conditions de coupe et les paramètres technologiques est donnée par l'équation IV.1.

$$\Omega = \phi(Vc, fz, ap) \quad (IV.1)$$

Où  $\Omega$  est la réponse désirée,  $\phi$  est la fonction de réponse et l'approximation de  $\Omega$  est proposée à l'aide d'un modèle mathématique linéaire avec interaction, qui convient pour l'étude des effets des interactions des paramètres de régime de coupe sur les caractéristiques d'usinabilité.

La méthode de modélisation des données pour laquelle nous avons opté est la régression linéaire avec interaction. C'est l'outil statistique le plus habituellement mis en œuvre pour l'étude des données multidimensionnelles. C'est une méthode de modélisation des données qui consiste à expliquer la variation d'une variable quantitative  $Y$  ; dite variable dépendante ; par celle d'une ou plusieurs variables appelées indépendantes:  $X_1, \dots, X_k$  [55, 59]. Le modèle de régression linéaire avec interaction s'écrit (Eq. IV.2) :

$$Y = \beta_0 + \beta_1.Vc + \beta_2.fz + \beta_3.ap + \beta_4.Vc.fz + \beta_5.Vc.ap + \beta_6.fz.ap + e. \quad (IV.2)$$

$Y$  = réponse;  $X_i$  = Variable prédictive;  $\beta_i$  = coefficients de régression.et  $e$  est le terme d'erreur.

L'adéquation du modèle est exprimée par le coefficient de détermination qui exprime la fraction de la variabilité de la variable de dépendance au moyen de l'équation de régression.

La somme des carrés (SS) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale (Eq. IV. 3).

$$SS_f = \frac{N}{Nn_f} \sum_{i=1}^{Nn_f} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (IV.3)$$

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

La moyenne des carrés (MS) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté (Eq. IV.4).

$$MS = \frac{SS_i}{DF_i} \quad (\text{IV.4})$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice F-value est utilisé avec la base que les valeurs de F-calculées devraient être supérieures à celles obtenues à partir du F-table. (Eq. IV.5).

$$F - value = \frac{MSS_i}{MS_{error}} \quad (\text{IV.5})$$

Avec :  $MS_{error}$  les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA montre le pourcentage de contribution de chaque facteur sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat est calculé par l'équation IV.6.

$$Cont.\% = \frac{SS_i}{SS_{mod}} \times 100 \quad (\text{IV.6})$$

$R^2$  (R-sq): Le coefficient de corrélation représente la proportion de variation de la réponse qui est expliquée par le modèle. Il est déduit par l'équation. IV.7. Plus ce coefficient s'approche de l'unité plus le modèle est bon.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{error}}{SS_{Total}} = \frac{SS_{regression}}{SS_{Total}} \quad (\text{IV.7})$$

## IV.2. Modélisation de (Ra, Ry, Rz et Q) : Cas de carbure revêtu GC1030

Les valeurs expérimentales de différents critères de la rugosité de surface (Ra, Ry et Rz) et le débit de copeaux (Q) sont indiquées sur le tableau IV.1. Ces valeurs ont été obtenues en utilisant des différentes combinaisons des éléments de régime de coupe (vitesse de coupe, vitesse par dent et Profondeur de passe) selon la matrice de planification des expériences pour un plan  $3^3$ .

Tableau IV. 1.

Essais expérimentaux et résultats pour les paramètres technologiques (L27)

N° Essais	Facteurs			Réponses			
	$V_c$ , m/min	$f_z$ , mm/dt	$a_p$ , mm	$R_a$ , $\mu\text{m}$	$R_y$ , $\mu\text{m}$	$R_z$ , $\mu\text{m}$	$Q$ , $\text{mm}^3/\text{min}$
1	78	0.04	0.2	2.23	13.84	12.18	730
2	78	0.04	0.4	2.29	15.12	12.22	1460
3	78	0.04	0.6	2.32	14.86	12.66	2190
4	78	0.08	0.2	2.37	12.93	12.22	1460
5	78	0.08	0.4	2.4	15.83	12.83	2920
6	78	0.08	0.6	2.42	16.05	13.09	4380
7	78	0.16	0.2	2.58	16.82	13.65	2920
8	78	0.16	0.4	2.6	18.67	14.61	5840
9	78	0.16	0.6	2.62	20.55	15.47	8760
10	157	0.04	0.2	1.5	7.89	7.47	1460
11	157	0.04	0.4	1.54	8.16	7.64	2920
12	157	0.04	0.6	1.55	8.17	7.92	4380
13	157	0.08	0.2	1.59	8.56	7.68	2920
14	157	0.08	0.4	1.6	8.57	7.74	5840
15	157	0.08	0.6	1.61	9.3	8.28	8760
16	157	0.16	0.2	1.62	9.84	7.86	5840
17	157	0.16	0.4	1.64	10.22	8.62	11680
18	157	0.16	0.6	1.65	11.04	9.38	17520
19	314	0.04	0.2	0.5	3.27	2.73	2920
20	314	0.04	0.4	0.48	3.71	3.01	5840
21	314	0.04	0.6	0.51	2.85	3.05	8760
22	314	0.08	0.2	0.55	2.92	3.81	5840
23	314	0.08	0.4	0.6	3.32	3.14	11680
24	314	0.08	0.6	0.62	3.77	3.3	17520
25	314	0.16	0.2	0.65	3.7	3.36	11680
26	314	0.16	0.4	0.76	3.35	3.74	23360
27	314	0.16	0.6	0.82	4.83	4.17	35040

### IV.2.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra, Ry et Rz)

En 1930, cette méthode (ANOVA) a été développée par Mr Ronald Fisher, l'objectif de cette étude est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif (Eyup et al [28]). L'analyse de la variance (ANOVA) des critères de rugosité de surface (Ra, Rz et Ry) ont été respectivement indiquées dans les tableaux IV.2, IV.3 et IV.4. Ces chiffres montrent que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus influent sur la rugosité de surface suivie par l'avance par dent ( $f_z$ ) et enfin la profondeur de coupe ( $ap$ ) avec une contribution négligeable. La contribution de ( $V_c$ ) sur les critères de la rugosité (Ra, Ry et Rz) est respectivement de (96,05 %, 86,75 % et 92,21%), pour les avances par dent ( $f_z$ ) la contribution est de (1,5 %, 3,52 % et 1,88 %), enfin la profondeur de passe ( $ap$ ) avec des contributions de (0,10 %, 0,95 % et 0,49 %). Nous avons noté, au contraire, ce qui est généralement connu que l'effet de la vitesse de coupe est supérieur à l'avance par dent. Ceci est dû à la géométrie de la plaquette de coupe qui a un bord de raclage qui permet d'obtenir une faible rugosité même à des avances importantes. Des résultats similaires ont été trouvés par Yusuf et al [25].

**Tableau IV. 2.**

*Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra)*

Source	DF	SS	MS	F	P	Cont%
<b>Regression</b>	6	14.4889	2.4148	118.613	0.0000	97.26%
<b><math>V_c</math></b>	1	14.2278	1.3353	65.591	0.0000	95.51%
<b><math>f_z</math></b>	1	0.2167	0.0188	0.925	0.3477	1.4%
<b><math>ap</math></b>	1	0.0338	0.0000	0.001	0.9786	0.2%
<b><math>V_c*f_z</math></b>	1	0.0049	0.0049	0.243	0.6273	0.032%
<b><math>V_c*ap</math></b>	1	0.0018	0.0018	0.089	0.7688	0.012%
<b><math>f_z*ap</math></b>	1	0.0039	0.0038	0.191	0.6667	0.026%
<b>Error</b>	20	0.4072	0.0203			
<b>Total</b>	26	14.8961				

**Tableau IV. 3**

Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ry)

Source	DF	SS	MS	F	P	Cont%
<b>Regression</b>	6	715.982	119.330	45.3023	0.0000	93.14%
<i>Vc</i>	1	666.773	24.694	9.3746	0.0061	86.74%
<i>fz</i>	1	27.724	5.458	2.0719	0.1655	3.60%
<i>ap</i>	1	7.540	1.277	0.4848	0.4942	0.98%
<i>Vc*fz</i>	1	9.344	9.344	3.5474	0.0742	1.21%
<i>Vc*ap</i>	1	2.668	2.668	1.0128	0.3262	0.34%
<i>fz*ap</i>	1	1.933	1.933	0.7338	0.4018	0.25%
<b>Error</b>	20	52.682	2.634			
<b>Total</b>	26	768.663				

**Tableau IV. 4.**

Analyse de la variance (ANOVA) pour (Rz)

Source	DF	SS	MS	F	P	Cont%
<b>Regression</b>	6	430.403	71.7338	66.5546	0.0000	95.23%
<i>Vc</i>	1	416.738	25.2347	23.4128	0.0001	92.20%
<i>fz</i>	1	8.502	0.7966	0.7391	0.4001	1.88%
<i>ap</i>	1	2.247	0.1756	0.1629	0.6907	0.49%
<i>Vc*fz</i>	1	1.462	1.4619	1.3563	0.2578	0.32%
<i>Vc*ap</i>	1	0.586	0.5856	0.5433	0.4696	0.13%
<i>fz*ap</i>	1	0.868	0.8680	0.8054	0.3801	0.19%
<b>Error</b>	20	21.556	1.0778			
<b>Total</b>	26	451.959				

Les contributions des interactions (*Vc \* fz*, *Vc \* ap* et *fz \* ap*) sont respectivement (0,032 %, 0,012%, 0,026 %), (1,21 %, 0,34 %, 0,25 %) et (0,32 %, 0,13 %, 0,19 %) pour (Ra, Ry et Rz).

Un graphique des effets principaux permet d'examiner les différences entre les moyennes des niveaux d'un ou plusieurs facteurs. On parle d'effet principal lorsque les différents niveaux d'un facteur ont une incidence sur la réponse. Un graphique des effets principaux affiche la moyenne de la réponse pour chaque niveau de facteur connecté par une ligne.

Le diagramme des effets principaux montre que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur la rugosité de surface des critères ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) puisqu'elle présente la plus grande pente, suivie de l'avance par dent et enfin l'effet de la profondeur de passe n'a pas un impact significatif par rapport à la vitesse de coupe et à l'avance par dent (Fig. IV.1.a, IV.1.c et IV.1.e).

Dans un diagramme des interactions, des droites parallèles indiquent l'absence d'interactions. Plus la différence de pente est grande entre les lignes, plus le degré d'interaction est élevé. Toutefois, le diagramme des interactions n'indique pas si l'interaction est statistiquement significative.

Il ressort clairement d'après les figures IV.1.b, IV.1.d et IV.1.f que les diagrammes d'interaction des paramètres de coupe n'ont pas d'effet significatif sur les critères de la rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) car les lignes ne se croisent pas.

#### IV.2.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de copeaux (Q).

L'étude de ce paramètre est très importante pour améliorer la productivité car l'objectif est de fabriquer avec des produits à faible coût, de haute qualité et en temps minimum (Fnides et al [60]; Bouzid et al [53]). La valeur du débit de copeaux est calculée pour chaque essai par l'équation IV.2.

$$Q(\text{mm}^3/\text{min}) = ap(\text{mm}) \times ae(\text{mm}) \times fz(\text{mm}/\text{tooth}) \times Z \times \frac{Vc(\text{m}/\text{min}) \times 1000}{\pi \times D(\text{mm})} \quad (\text{IV.8})$$

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour le débit de copeaux sont présentés sur le tableau IV.5. L'analyse (ANOVA) montre que la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sont les facteurs les plus importants, leurs contributions sont de 30,76% pour les deux paramètres, suivis de la profondeur de passe avec une contribution de 17%. Les contributions des interactions ( $Vc * fz$ ,  $Vc * ap$  et  $fz * ap$ ) sont respectivement de (8,79%, 5,13% et 5,13%) pour le débit de copeau (Q).



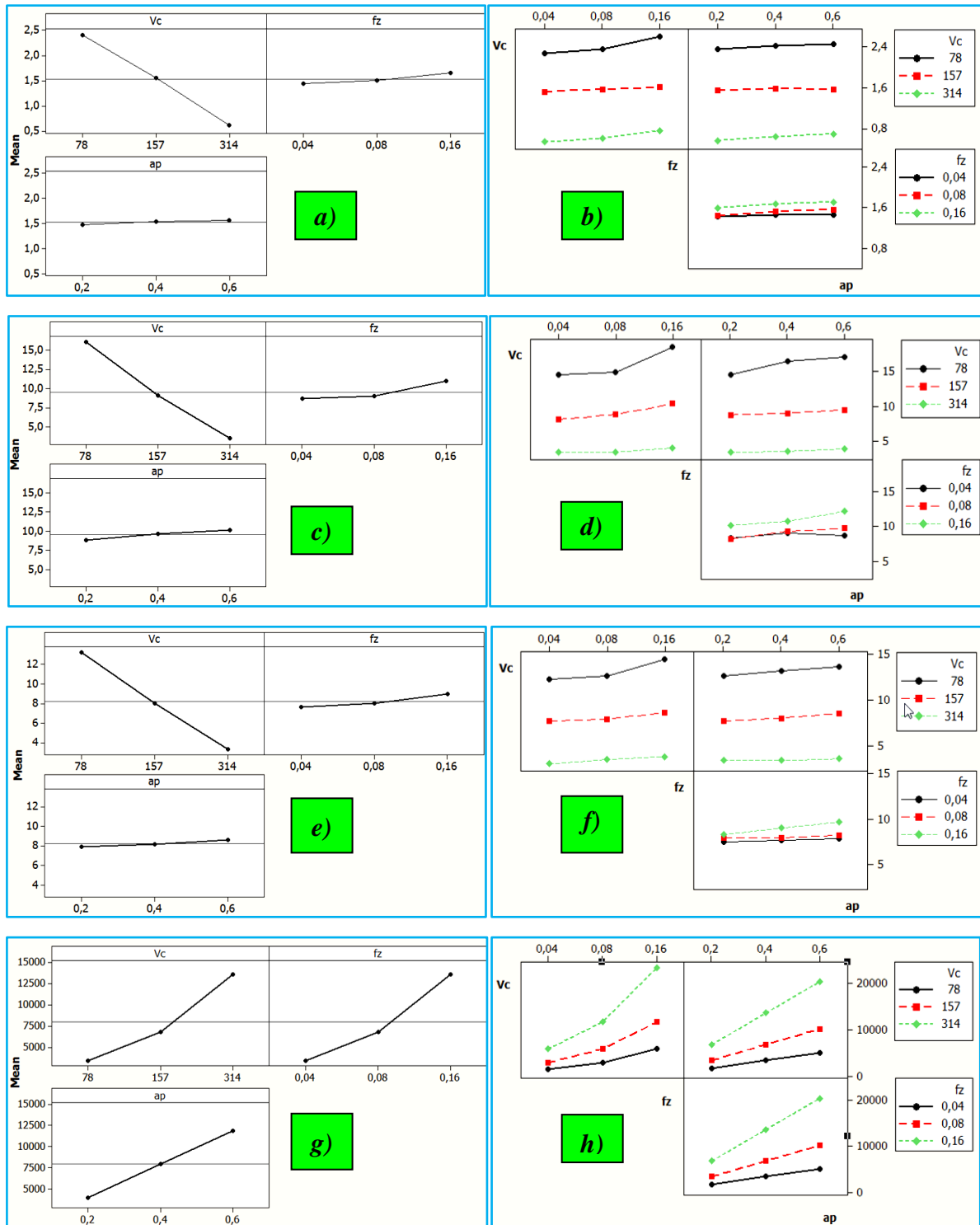


Fig. IV.1. Graphiques des effets principaux et Graphiques des interactions pour Ra (a. b), Ry (c. d), Rz (e. f) et Q (g. h).

**Tableau IV. 5.**Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de copeaux ( $Q$ )

Source	DF	SS	MS	F	P	Cont%
<b>Regression</b>	6	1560921559	260153593	224.149	0.0000000	98.53%
<b>Vc</b>	1	487424660	46421396	39.997	0.0000036	30.76%
<b>fz</b>	1	487425867	46252592	39.851	0.0000037	30.76%
<b>ap</b>	1	284331756	35432272	30.529	0.0000208	17.94%
<b>Vc*fz</b>	1	139264189	139264189	119.991	0.0000000	8.79%
<b>Vc*ap</b>	1	81237643	81237643	69.995	0.0000001	5.13%
<b>fz*ap</b>	1	81237644	81237644	69.995	0.0000001	5.13%
<b>Error</b>	20	23212508	1160625			
<b>Total</b>	26	1584134067				

Pour le diagramme des effets principaux, nous voyons que les trois paramètres ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) ont une influence sur le débit de copeaux (Fig. IV.1.g). La figure IV.1.h montre le graphique d'interaction des paramètres de coupe pour  $Q$ , les contributions des interactions ( $V_c*f_z$ ,  $V_c*a_p$  et  $f_z*a_p$ ) sont respectivement de (8.79%, 5.13% et 5.13%).

#### IV.2.3. Analyse de régression de ( $R_a$ , $R_y$ , $R_z$ et $Q$ ).

Les modèles mathématiques et les corrélations entre les facteurs et les mesures de la performance ont été modélisés et développés à l'aide de la méthode de régression.  $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $Q$  sont successivement donnés par les équations. IV.9 à IV.12, leurs coefficients de détermination ( $R^2$ ) est respectivement de (97,27%, 93,15%, 95,23% et 98,53%). Des résultats similaires sont trouvés par Hessainia et al [38] et Bouzid et al [61].

$$\begin{aligned}
 R_a &= 2.65599 - 0.00726733 \times V_c + 1.70439 \times f_z - 0.012765 \times a_p \\
 &\quad - 0.00273646 \times V_c \times f_z + 0.000505119 \times V_c \times a_p + 1.47321 \times f_z \times a_p \\
 R^2 &= 97.27\%, \quad R^2(\text{adj}) = 96.45\%, \quad R^2(\text{pred}) = 94.77\%
 \end{aligned}
 \tag{IV.9}$$

$$\begin{aligned}
 R_y &= 13.3783 - 0.0315938 \times V_c + 29.1751 \times f_z + 3.76226 \times a_p \\
 &\quad - 0.120222 \times V_c \times f_z - 0.0196253 \times V_c \times a_p + 32.8423 \times f_z \times a_p \\
 R^2 &= 93.15\%, \quad R^2(\text{adj}) = 91.09\%, \quad R^2(\text{pred}) = 87.33\%
 \end{aligned}
 \tag{IV.10}$$

$$\begin{aligned}
 R_z &= 13.1258 - 0.0319381 \times V_c + 11.1464 \times f_z + 1.39511 \times a_p \\
 &\quad - 0.0475516 \times V_c \times f_z - 0.00919462 \times V_c \times a_p + 22.0089 \times f_z \times a_p \\
 R^2 &= 95.23\%, \quad R^2(\text{adj}) = 93.80\%, \quad R^2(\text{pred}) = 91.28\%
 \end{aligned}
 \tag{IV.11}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= 7927.21 - 43.31 \times Vc - 84934.4 \times fz - 19818 \times ap \\
 &+ 464.12 \times Vc \times fz + 108.295 \times Vc \times ap + 212917 \times fz \times ap \\
 R^2 &= 98.53\%, \dots R^2(\text{adj}) = 98.10\%, \dots R^2(\text{pred}) = 94.79\%
 \end{aligned}
 \tag{IV.12}$$

Ces équations peuvent être utilisées pour prédire les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) et le débit copeaux ( $Q$ ) à partir des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) et cela dans l'intervalle des essais.

#### IV.2.4. Les graphes résiduels pour $R_a$

Pour les graphes résiduels, nous étudions uniquement la rugosité de surface  $R_a$ . Le graphe de la [figure IV.2.a](#) (Droite de Henry) permet de repérer une non-normalité. Si les points forment une ligne à peu près droite, cela signifie que les valeurs résiduelles sont réparties normalement. Par contre le graphique de la [figure IV.2.b](#) (Histogramme) permet de détecter les pics multiples, les valeurs aberrantes et la non-normalité. Un histogramme normal doit être à peu près symétrique et avoir la forme d'une cloche. D'autre part le graphique de la [figure IV.2.c](#) (en fonction des valeurs ajustées) permet de détecter les variances non-constantes, les termes d'ordre supérieurs manquants et les valeurs aberrantes. Les valeurs résiduelles sont normalement distribuées de manière aléatoire autour du zéro et enfin le graphique de la [figure IV.2.d](#) (en fonction de l'ordre) permet de détecter la dépendance temporelle des valeurs résiduelles.

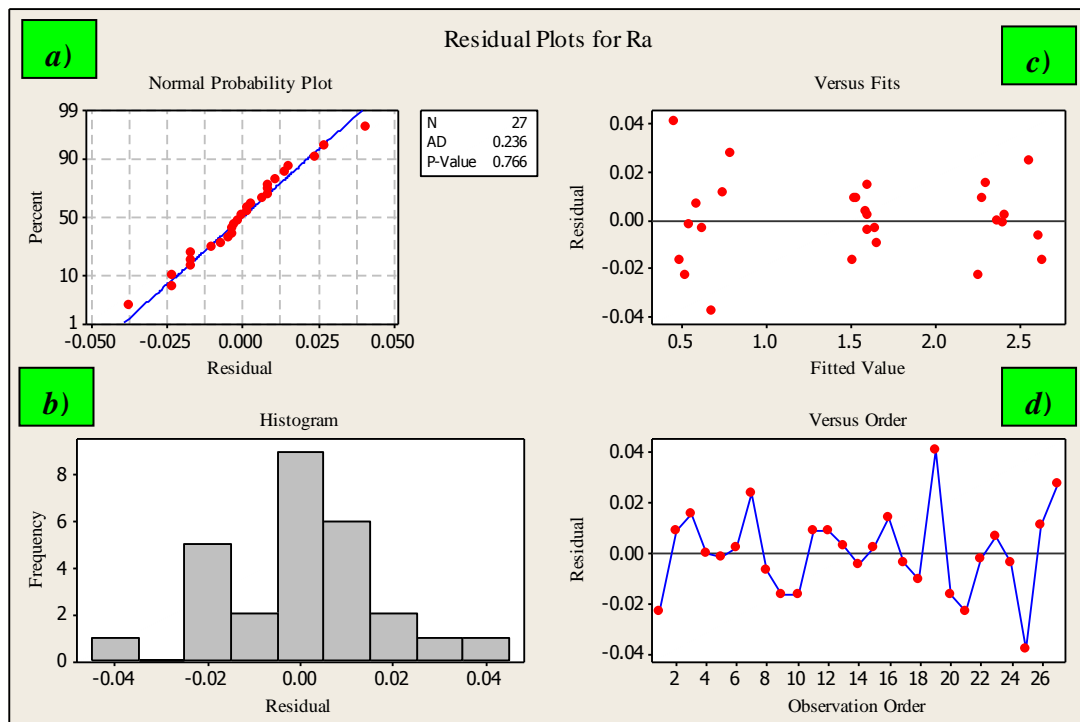


Fig. IV.2. Graphe Résiduel pour ( $R_a$ )

Enfin, les courbes de la Fig. IV.3, IV 4, IV 5 et IV 6 sont utilisées pour comparer les valeurs prédites (fournies par le modèle) des critères de la rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) et le débit de copeaux enlevé avec les valeurs expérimentales afin d'évaluer l'ajustement du modèle. L'analyse a montré une bonne corrélation entre les deux courbes. Les valeurs expérimentales et prédites des critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) sont très proches les unes des autres. Ainsi, les modèles mathématiques développés peuvent effectivement être utilisés pour prédire la rugosité de la surface et le débit de copeaux.

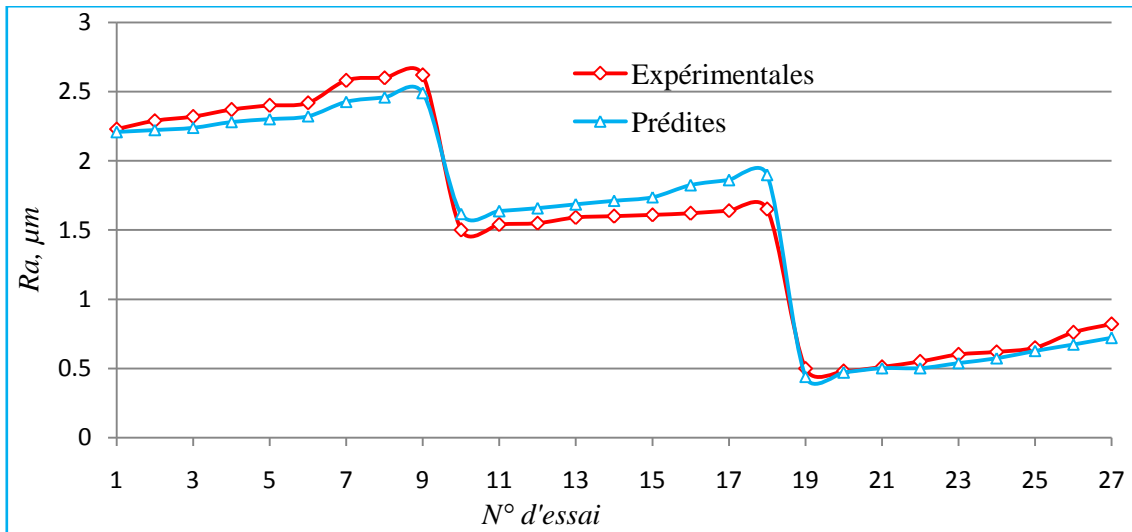


Fig. IV.3. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de ( $R_a$ )

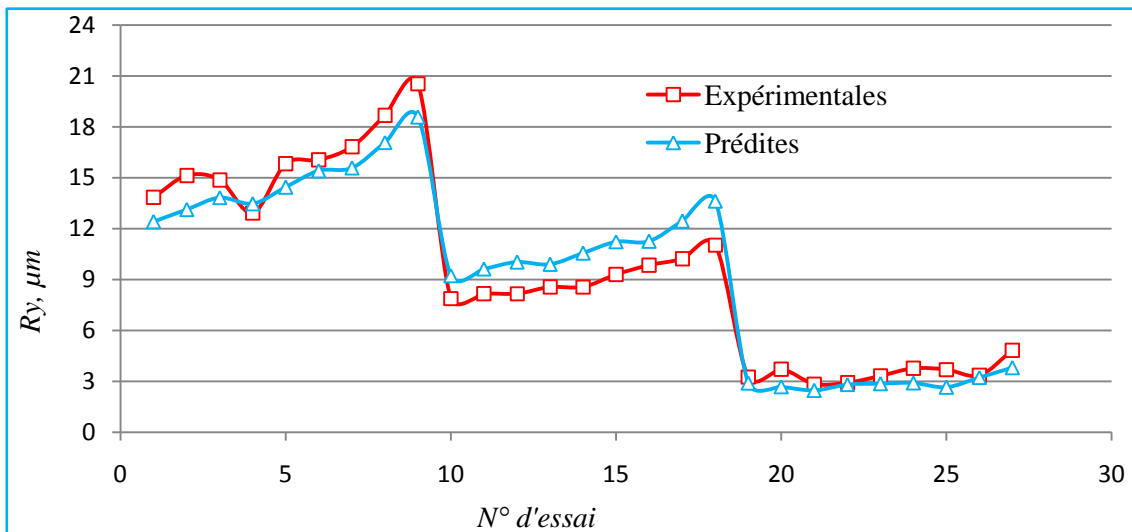


Fig. IV.4. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de ( $R_y$ )

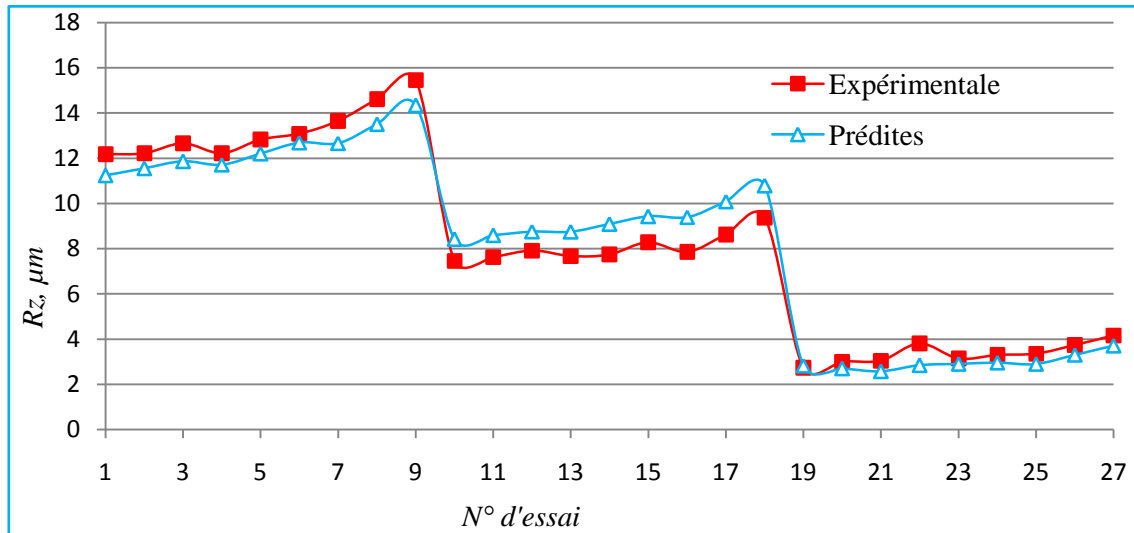


Fig. IV.5. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Rz).

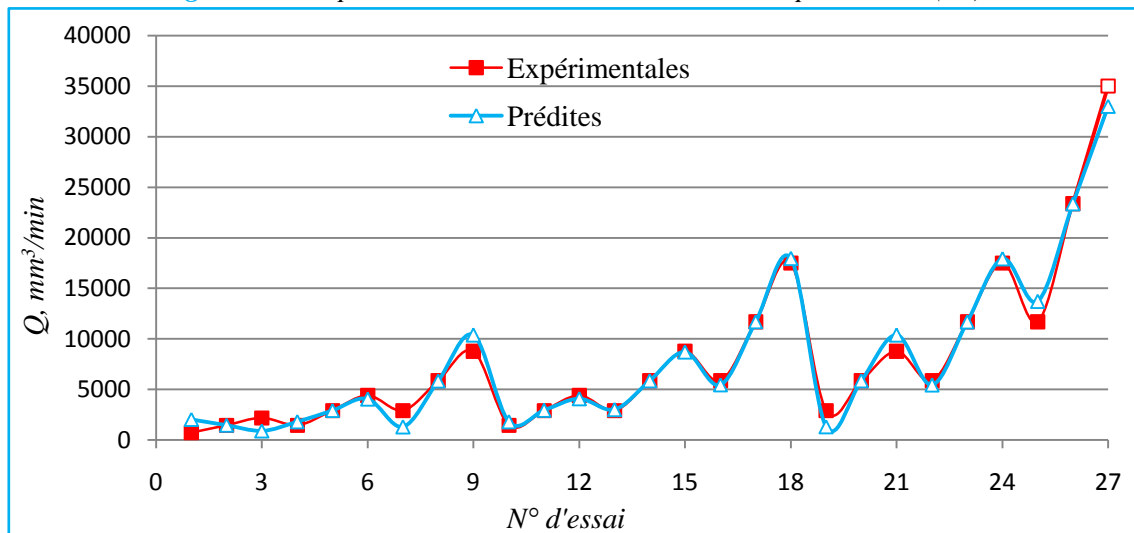


Fig. IV.6. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Q)

#### IV.2.5. Surface de réponse et graphe de contour pour (Ra, Ry, Rz et Q)

La surface de réponse 3D (Fig. IV.7, IV.8 et IV.9) montre que l'augmentation de la vitesse de coupe diminue les critères de la rugosité de surface (Ra, Ry et Rz), en augmentant l'avance par dent, la rugosité de la surface augmente aussi. La profondeur de passe a une faible influence. Ces résultats sont similaires avec [62]. Ces diagrammes montrent aussi que les mauvaises rugosités de surface (Ra, Rz et Ry) sont données pour des grandes valeurs de vitesse d'avance (0,16 mm/dt) et de faibles vitesses de coupe (78 m/min).

Par conséquent, la meilleure rugosité est obtenue en appliquant une faible avance par dent et une vitesse de coupe élevée.

Ces figures ont été obtenues en utilisant la méthode de la surface de réponse selon leurs modèles mathématiques.

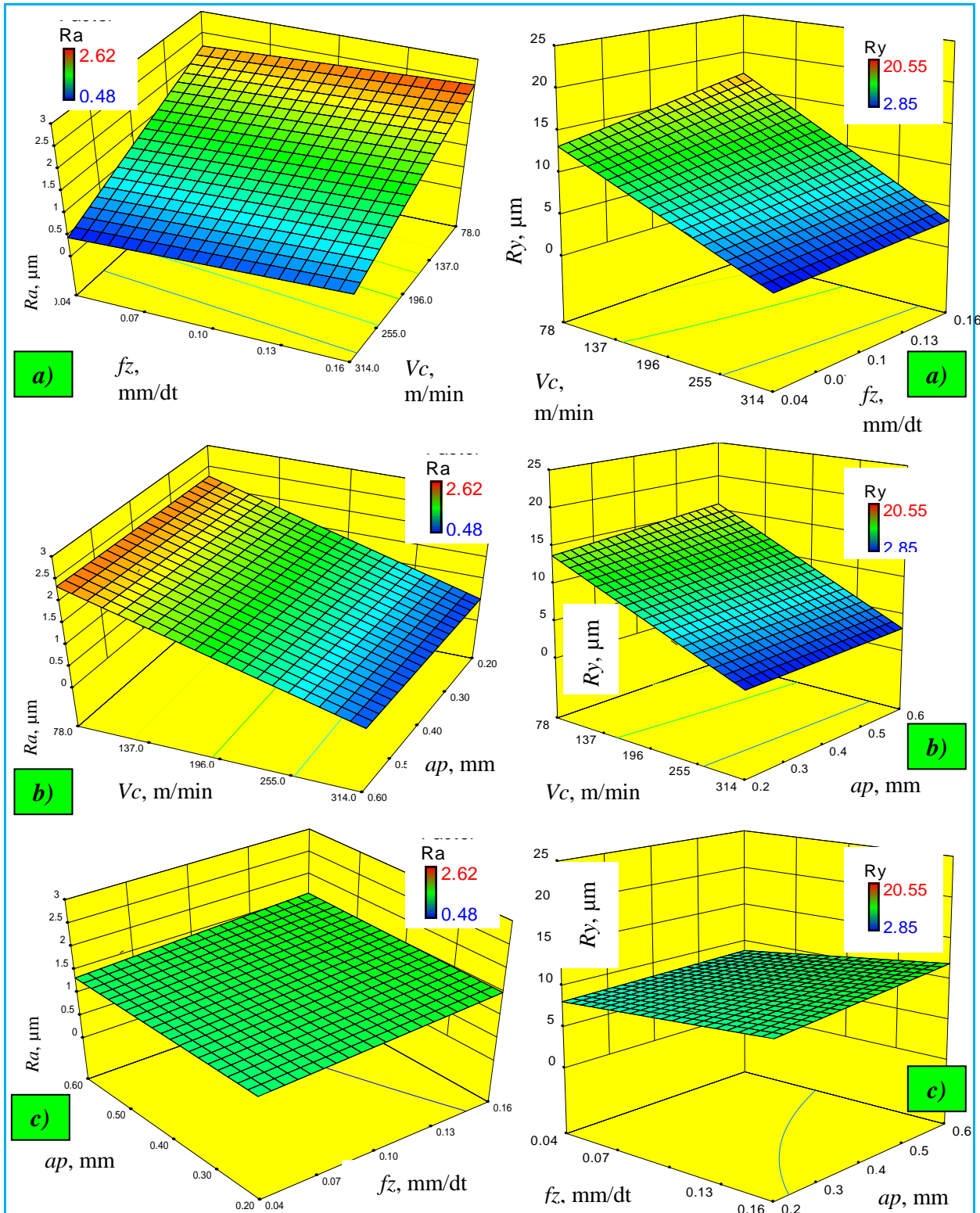


Fig. IV.7. Surface de réponse pour  $R_a$  en tant que fonction de  $(V_c, f_z)$ ,  $(V_c, a_p)$  et  $(a_p, f_z)$

Fig. IV.8. Surface de réponse pour  $R_y$  en tant que fonction de  $(V_c, f_z)$ ,  $(V_c, a_p)$  et  $(a_p, f_z)$

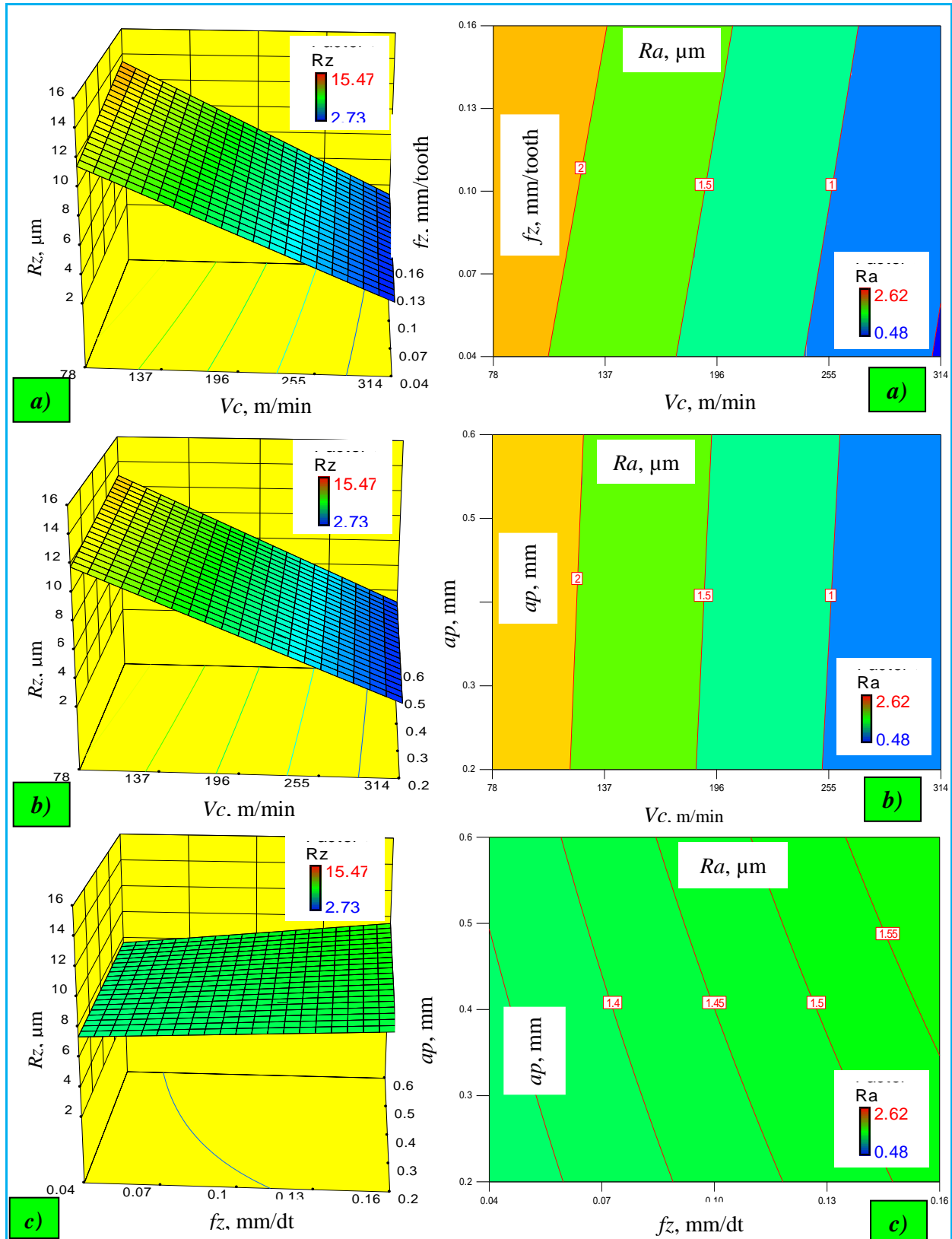


Fig. IV.9. Surface de réponse pour Ra en tant que fonction de (Vc, fz), (Vc, ap) et (ap, fz)

Fig. IV.10. Graphique de contour pour  $Ra = f(Vc, fz, ap)$

D'autre part, les graphiques de contour (Fig. IV.10, IV.11 et IV.12) permettent de visualiser la surface de réponse et d'établir les valeurs de réponse. Ils montrent le rapport entre une valeur de réponse ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) et les facteurs ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $ap$ ) d'une équation de modèle. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contour de réponses constantes.

Le diagramme de surface de réponse (3D) du débit de copeau ( $Q$ ) en fonction des paramètres de coupe est illustré sur la figure IV.13. Cette figure montre que la pente de l'avance par dent ( $f_z$ ) et la vitesse de coupe ( $V_c$ ) sont plus élevées, ce qui implique que ces facteurs ont une influence importante sur le volume de copeau suivi de la profondeur de passe ( $ap$ ). D'autre part, les graphes de contour (Fig. IV.14) permettent de visualiser la surface de réponse et d'établir les valeurs de réponse.



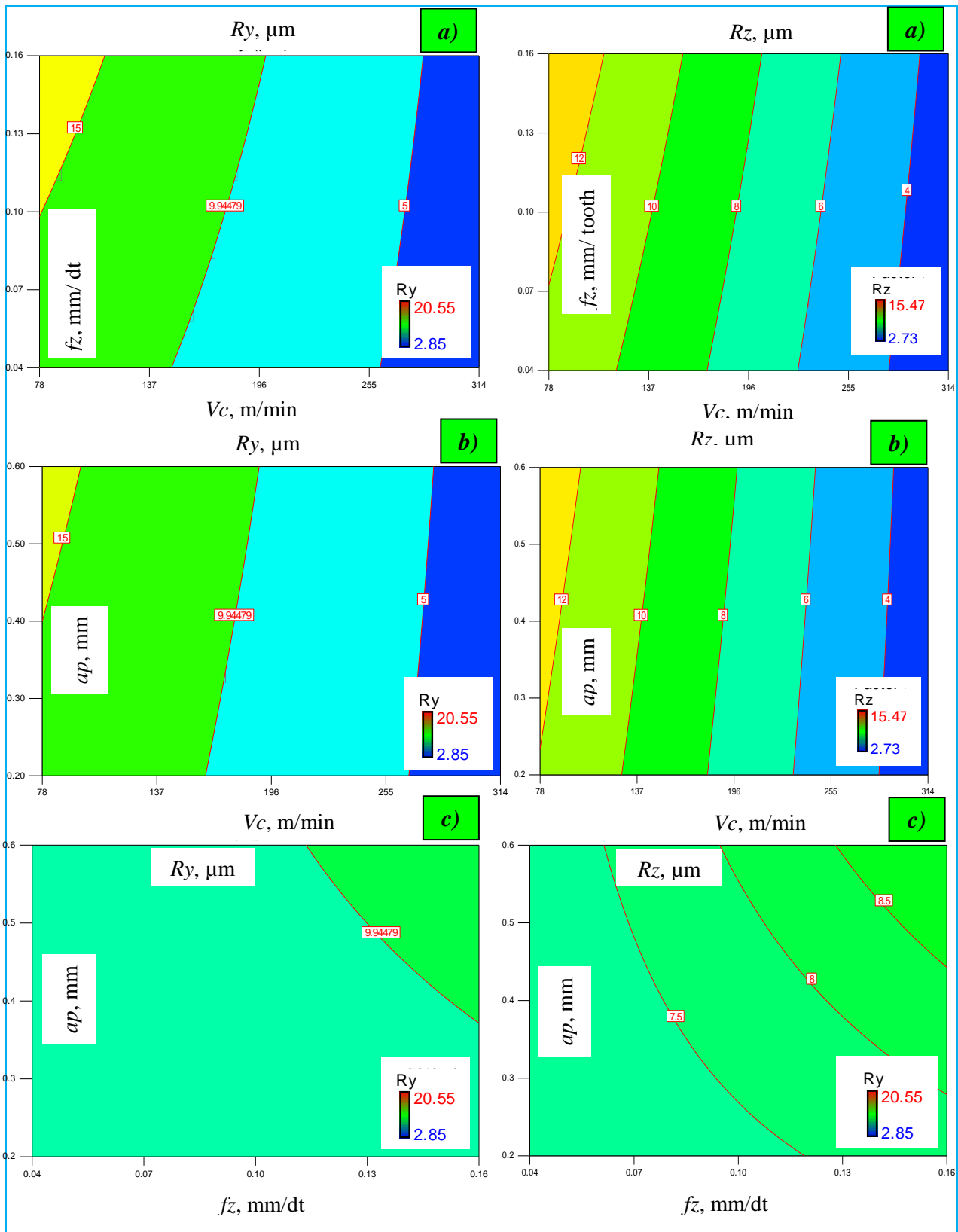


Fig. IV.11. Graphique de contour pour  $R_y = f(V_c, f_z, a_p)$

Fig. IV.12. Graphique de contour pour  $R_z = f(V_c, f_z, a_p)$

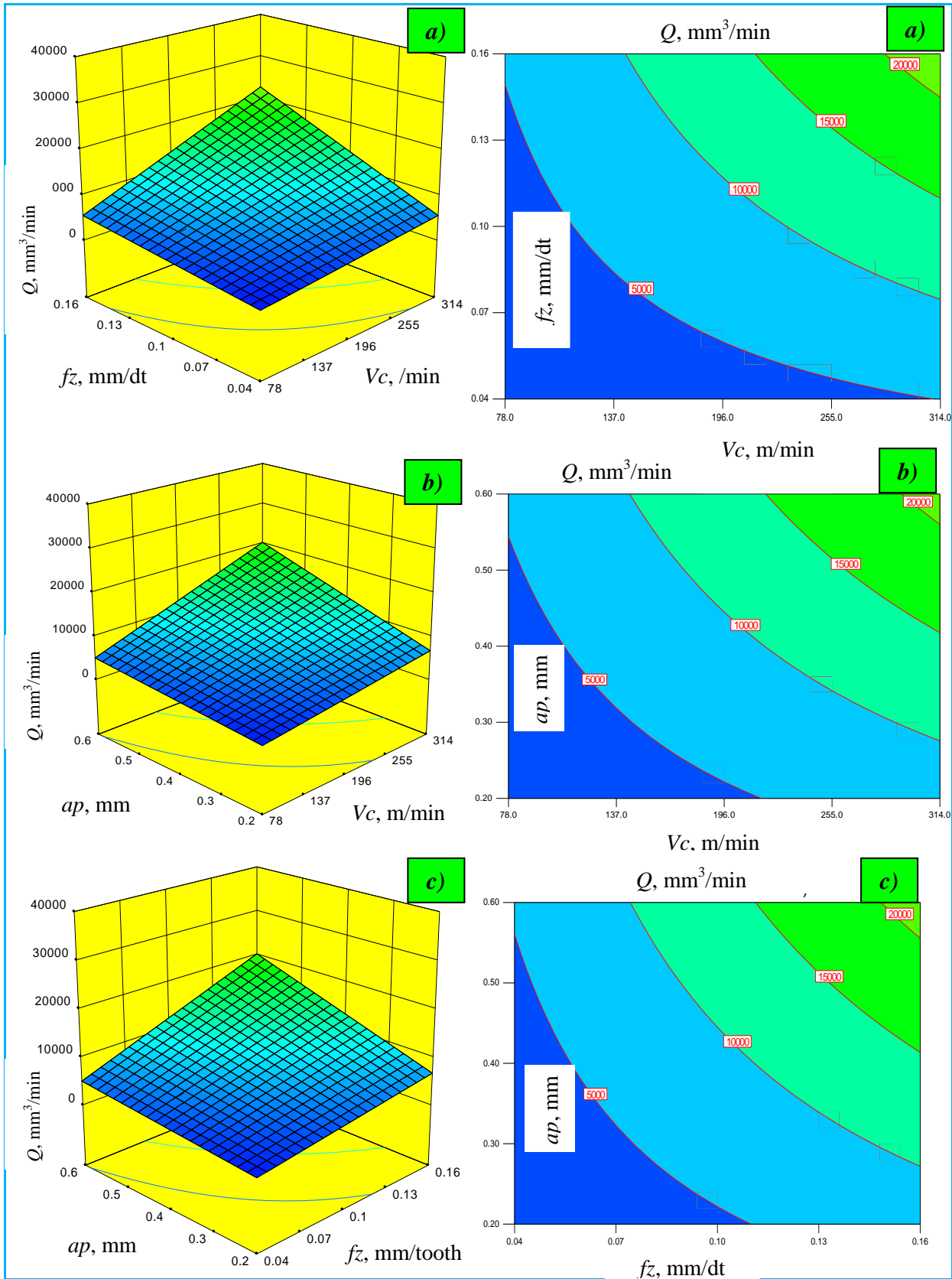


Fig. IV.13. Surface de réponse pour  $Q$  en tant que fonction de  $(V_c, f_z)$ ,  $(V_c, ap)$  et  $(ap, f_z)$

Fig. IV.14. Graphique de contour pour  $Q = f(V_c, f_z, ap)$

#### IV.2.6. Fonction de désirabilité: Optimisation Multi-Réponses

Les méthodes d'optimisation doivent être utilisées pour obtenir les conditions d'usinage optimales pour les opérations de fraisage en utilisant comme réponses la rugosité de surface et le débit de copeaux (Bouزيد et al [53]; Routara et al [63]).

La fonction de désirabilité proposée par Derringer et Suich [64] et qui figure dans de nombreux logiciels de plans d'expériences, est une fonction qui a pour objectif de trouver les valeurs optimales des paramètres d'usinage afin de minimiser les critères de la rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) et de maximiser le débit de copeaux à la fois. La désirabilité globale  $D$ , c'est-à-dire qui prend en compte à la fois les exigences sur toutes les réponses, est la moyenne géométrique des désirabilités individuelles  $d_i$ . La désirabilité  $D$  est déterminée par l'équation IV.13 (Myers et al [57]).

$$DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (IV.13)$$

$$F(x) = -DF$$

Où :  $d_i$  est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et  $w_i$  est la fonction de pondération de  $d_i$ . Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité  $d_i$  est définie dans différentes formes.

La valeur de la désirabilité varie, en fonction des niveaux de facteurs, dans l'intervalle [0,1].

La valeur 1 correspond à une satisfaction maximale et la valeur 0 correspond à un refus complet.

Les paramètres de régime de coupes utilisés lors du processus d'optimisation sont résumés dans [tableau IV.6](#).

Les solutions optimales sont présentées dans le [tableau IV.7](#) afin de diminuer le niveau de désirabilité, la [figure IV.15](#) et [tableau IV.7](#) montrent les résultats d'optimisation. Le régime de coupe optimale se révèle comme suit:  $V_c = 314$  m/min,  $f_z = 0,16$  mm/dt et  $ap = 0,6$  mm. Les critères de la rugosité de surface et le débit de copeaux optimaux sont les suivants:  $R_a = 0.709548$ ,  $R_y = 3.79162$ ,  $R_z = 3.69408$   $\mu\text{m}$  et  $Q = 32804.9$   $\text{mm}^3/\text{min}$ . Les [figures IV.16](#), [IV.17](#) et [IV.18](#) présentent respectivement le graphe du contour, surface de réponse et le graphique à

barres de composite désirabilité pour les facteurs et les réponses avec une désirabilité combinée = 0,924.

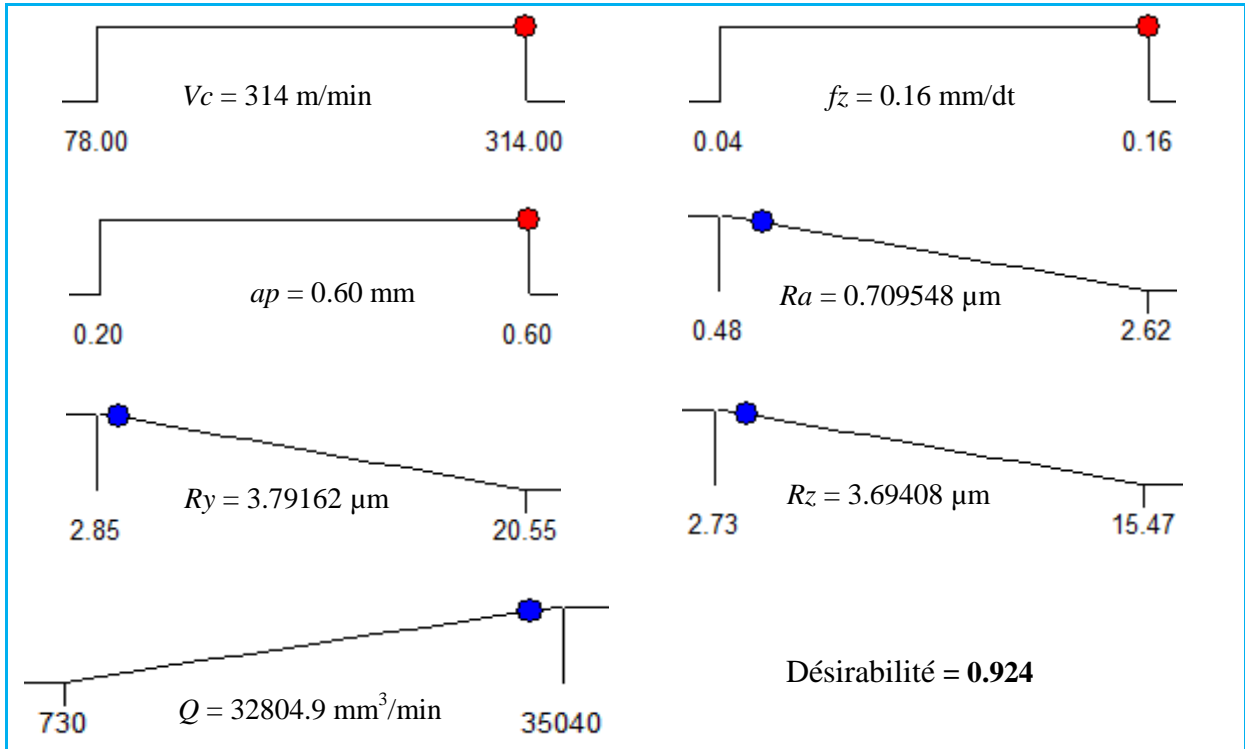


Fig. IV.15. Ram fonction graph pour ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $Q$ )

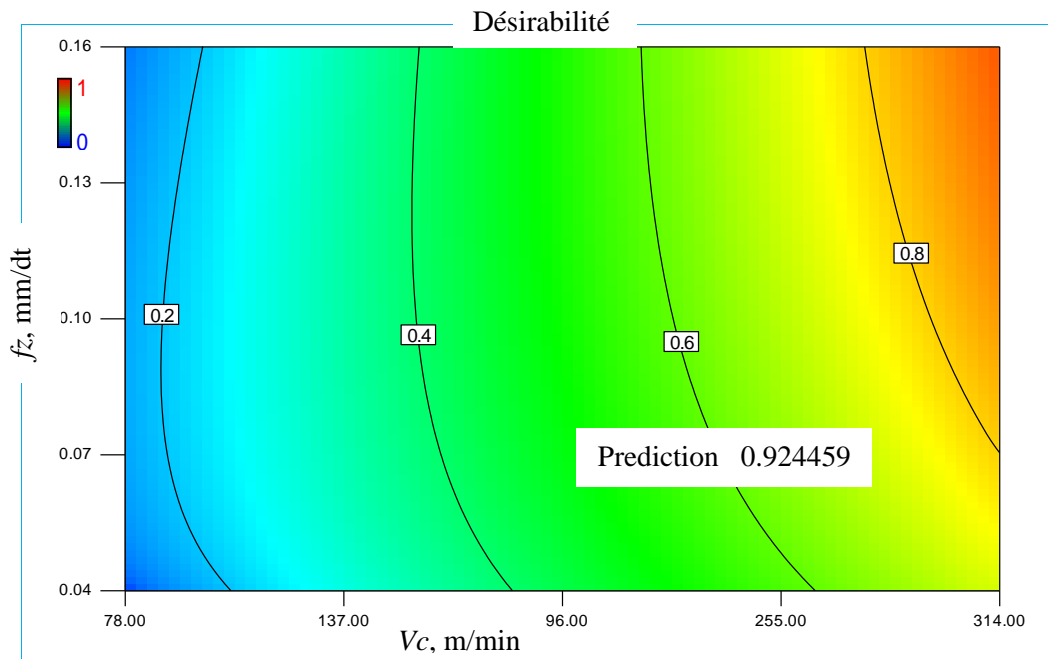


Fig. IV.16. Graphique de contour pour Composite désirabilité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $Q$ )

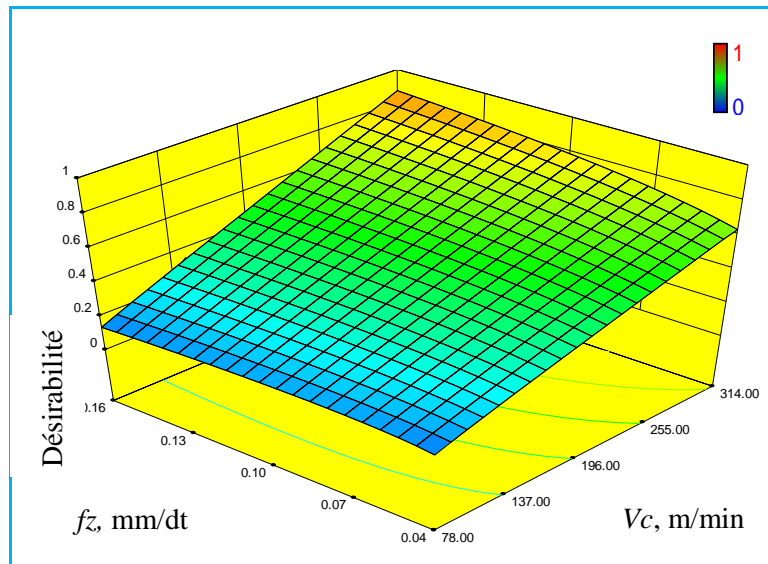


Fig. IV.17. Surface de réponse de Composite desirabilité pour (Ra, Ry, Rz et Q)

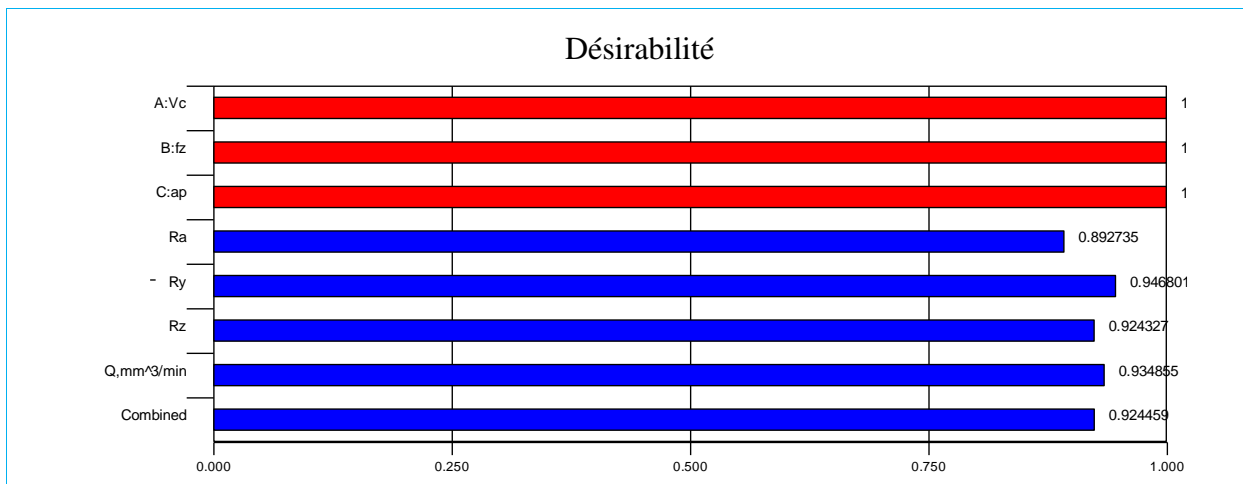


Fig. IV.18. graphique de desirabilité (3D) pour (Ra, Ry, Rz et Q)

Tableau IV. 6.

Valeurs des paramètres de coupe pour optimisation

Constraints	Goal	Lower limit	Upper limit
Vc, m/min	In range	78	314
fz, mm/dt	In range	0.04	0.16
ap, mm	In range	0.2	0.6
Ra, µm	Minimize	0.48	2.62
Ry, µm	Minimize	2.85	20.55
Rz, µm	Minimize	2.73	15.47
Q, mm³/min	Maximize	730	35040

**Tableau IV. 7.**

Optimisation de la réponse pour la rugosité de surface et Q

N <sup>ber</sup>	Vc, m/min	fz, mm/dt	ap, mm	Ra, µm	Ry, µm	Rz, µm	Q, m <sup>3</sup> /min	Désirabilité
<b>1</b>	<b>314.000</b>	<b>0.160</b>	<b>0.600</b>	<b>0.710</b>	<b>3.792</b>	<b>3.694</b>	<b>32804.878</b>	<b>0.924</b>
2	314.000	0.160	0.600	0.709	3.787	3.690	32722.181	0.924
3	313.999	0.160	0.596	0.709	3.780	3.686	32607.955	0.923
4	314.000	0.159	0.600	0.707	3.777	3.681	32551.972	0.923
5	313.994	0.158	0.600	0.706	3.770	3.676	32430.457	0.923
6	313.997	0.160	0.593	0.709	3.771	3.680	32459.469	0.923
7	313.999	0.160	0.591	0.708	3.766	3.677	32377.561	0.922
8	314.000	0.156	0.600	0.702	3.743	3.653	31993.905	0.921

#### IV. 3. Modélisation des critères de rugosité en fonction de (Vc, fz et ap) : cas de cermet

Les résultats expérimentaux correspondants aux critères de la rugosité (Ra, Ry et Rz) et au débit de copeaux (Q) pour le cas du cermet CT530 présentés dans le [tableau IV. 8](#), ont été obtenus suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan  $N = 3^3$ ) lors de fraisage de face de l'acier AISI 1040. On remarque que les valeurs minimales des critères de la rugosité (Ra, Ry et Rz) ont été trouvées suivant les conditions des essais N° 19, 20 et 21 c.-à-d. pour les conditions de coupe suivantes ( $Vc = 314$  m/min;  $fz = 0,04$  mm/dt et  $ap = 0,2$  à  $0,6$  mm). Mais la valeur maximale du débit de copeaux (Q) a été observée dans l'essai N° 27 où ( $Vc = 314$  m/min;  $fz = 0.16$  mm/dt et  $ap = 0,6$  mm).

**Tableau IV.8.***Essais expérimentaux et les résultats pour les paramètres technologiques (L27)*

N° essai	Facteurs			Réponses			
	$V_c$ , m/min	$f_z$ , mm/dt	$a_p$ , mm	$R_a$ , $\mu\text{m}$	$R_y$ , $\mu\text{m}$	$R_z$ , $\mu\text{m}$	$Q$ , $\text{mm}^3/\text{min}$
1	78	0.04	0.2	2.68	17.57	14.67	730
2	78	0.04	0.4	2.47	16.6	13.11	1460
3	78	0.04	0.6	2.28	14.91	12.23	2190
4	78	0.08	0.2	2.77	18.07	14.97	1460
5	78	0.08	0.4	2.55	16.83	13.93	2920
6	78	0.08	0.6	2.7	15.46	13.76	4380
7	78	0.16	0.2	2.84	18.41	15.52	2920
8	78	0.16	0.4	2.82	18.31	15.74	5840
9	78	0.16	0.6	2.81	17.94	15.31	8760
10	222	0.04	0.2	1.13	7.93	6.56	1460
11	222	0.04	0.4	0.9	7.21	4.78	2920
12	222	0.04	0.6	1.02	4.73	4.14	4380
13	222	0.08	0.2	1.27	8.02	6.91	2920
14	222	0.08	0.4	1.02	7.73	5.1	5840
15	222	0.08	0.6	1.07	5.25	4.17	8760
16	222	0.16	0.2	1.3	8.51	7.44	5840
17	222	0.16	0.4	1.12	9.54	6.52	11680
18	222	0.16	0.6	1.54	9.89	7.96	17520
19	314	0.04	0.2	0.77	4.31	3.74	2920
20	314	0.04	0.4	0.79	3.82	3.91	5840
21	314	0.04	0.6	0.84	3.94	3.76	8760
22	314	0.08	0.2	0.97	4.9	3.83	5840
23	314	0.08	0.4	1.01	4.95	4.93	11680
24	314	0.08	0.6	0.94	4.85	4.47	17520
25	314	0.16	0.2	0.98	6.1	5.75	11680
26	314	0.16	0.4	1.07	6.31	6.16	23360
27	314	0.16	0.6	1.4	7.04	6.31	35040

### IV.3.1. Analyse de la variance pour (Ra, Ry, Rz et Q)

Selon les résultats présentés sur les tableaux IV. 9, IV. 10 et IV. 11, l'analyse détaillée des valeurs permet de classer les trois éléments du régime de coupe et leurs interactions par ordre d'influence sur les trois critères de la rugosité (Ra, Ry et Rz). La vitesse de coupe a un effet statistique significatif sur les trois critères de rugosité avec la plus grande contribution (86,36 % sur Ra, 90,28 % sur Ry et 85,80 % sur Rz). L'effet de l'avance est également significatif avec une petite contribution de (3 % sur Ra, 3,46 % sur Ry et 4,40 % sur Rz). La profondeur de passe vient en troisième position avec une faible contribution.

**Tableau IV. 9.**

Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
<b>Regression</b>	6	14,7149	14,7149	2,45248	31,6946	0,000000	90,48 %
<i>Vc</i>	1	14,0442	1,8627	1,86267	24,0721	0,000085	86,36 %
<i>fz</i>	1	0,4879	0,0011	0,00111	0,0144	0,905665	3,00 %
<i>ap</i>	1	0,0007	0,1651	0,16506	2,1332	0,159671	0,004 %
<i>Vc*fz</i>	1	0,0000	0,0000	0,00001	0,0002	0,989939	0 %
<i>Vc*ap</i>	1	0,0744	0,0744	0,07442	0,9618	0,338443	0,46 %
<i>fz*ap</i>	1	0,1077	0,1077	0,10771	1,3920	0,251904	0,66 %
<b>Error</b>	20	1,5476	1,5476	0,07738			
<b>Total</b>	26	16,2625					

**Tableau IV.10.**

Analyse de la Variance (ANOVA) pour (Ry)

Source	D F	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
<b>Regression</b>	6	733,061	733,061	122,177	73,7473	0,000000	95,68 %
<i>Vc</i>	1	691,744	94,699	94,699	57,1614	0,000000	90,28 %
<i>fz</i>	1	26,513	0,400	0,400	0,2413	0,628638	3,46 %
<i>ap</i>	1	5,346	12,523	12,523	7,5590	0,012364	0,70 %
<i>Vc*fz</i>	1	0,312	0,312	0,312	0,1883	0,668941	0,04 %
<i>Vc*ap</i>	1	2,922	2,922	2,922	1,7637	0,199119	0,38 %
<i>fz*ap</i>	1	6,223	6,223	6,223	3,7562	0,066859	0,81 %
<b>Error</b>	20	33,134	33,134	1,657			
<b>Total</b>	26	766,194					



**Tableau IV.11.**

Analyse de la Variance (ANOVA) pour (Rz)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
<b>Regression</b>	6	485,123	485.123	80.8539	36.5326	0.000000	91.64 %
<b>Vc</b>	1	454,219	58.491	58.4912	26.4284	0.000050	85,80 %
<b>fz</b>	1	23,316	0.013	0.0126	0.0057	0.940633	4,40 %
<b>ap</b>	1	2,944	6.583	6.5825	2.9742	0.100023	0,56 %
<b>Vc*fz</b>	1	0,018	0.018	0.0176	0.0080	0.929744	0,003 %
<b>Vc*ap</b>	1	1,729	1.729	1.7295	0.7814	0.387207	0,32 %
<b>fz*ap</b>	1	2,897	2.897	2.8971	1.3090	0.266079	0,55 %
<b>Error</b>	20	44,264	44.264	2.2132			
<b>Total</b>	26	529,387					

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour le débit de copeaux sont présentés dans le [tableau IV.12](#). L'analyse (ANOVA) montre que la vitesse d'avance est le facteur le plus important, sa contribution est de 30,77 % suivi par la vitesse de coupe avec une contribution de 27,79 % et enfin la profondeur de passe avec une contribution de 17,95 %. Toutes les interactions ( $Vc * fz$ ,  $Vc * ap$  et  $fz * ap$ ) ont un effet significatif sur le débit de copeaux. Respectivement, leurs contributions sont de 7,94 %, 4,63 % et 5,13 %.

**Tableau IV.12.**

Analyse de la Variance (ANOVA) pour (Q)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont%
<b>Regression</b>	6	1492278573	1492278573	248713096	54.1531	0.0000000	94,90 %
<b>Vc</b>	1	440162277	41920217	41920217	9.1274	0.0067465	27,79 %
<b>fz</b>	1	487425867	48813780	48813780	10.6284	0.0039188	30,77 %
<b>ap</b>	1	284331756	36436824	36436824	7.9335	0.0106571	17,95 %
<b>Vc*fz</b>	1	125760650	125760650	125760650	27.3823	0.0000403	7,94 %
<b>Vc*ap</b>	1	73360379	73360379	73360379	15.9730	0.0007091	4,63 %
<b>fz*ap</b>	1	81237644	81237644	81237644	17.6881	0.0004349	5,13 %
<b>Error</b>	20	91855493	91855493	4592775			
<b>Total</b>	26	1584134067					

### IV.3.2. Analyse de régression pour (Ra, Ry, Rz et Q)

L'analyse de régression des critères de la rugosité de surface (Ra, Ry et Rz) et le débit de copeaux (Q) en fonction de ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) donne les équations des modèles complets (Eq. IV.14 à IV.17) avec des coefficients de détermination ( $R^2$ ) respectifs de (90,48, 95,68, 91.64 et 94,90)%.

$$\begin{aligned} Ra = & 3.43852 - 0.00876311 V_c - 0.435618 f_z - 1.43168 a_p \\ & + 0.000141069 V_c * f_z + 0.00331032 V_c * a_p + 7.75298 f_z * a_p \end{aligned} \quad \text{(IV.14)}$$

$$R^2 = 90.48 \%, R^2 (\text{adj}) = 87.63 \%, R^2 (\text{pred}) = 84.37 \%$$

$$\begin{aligned} Ry = & 24.1921 - 0.0624832 V_c - 8.24923 f_z - 12.4702 a_p \\ & + 0.0221868 V_c * f_z + 0.0207418 V_c * a_p + 58.9286 f_z * a_p \end{aligned} \quad \text{(IV.15)}$$

$$R^2 = 95.68 \%, R^2 (\text{adj}) = 94.38 \%, R^2 (\text{pred}) = 92.64 \%$$

$$\begin{aligned} Rz = & 18.9804 - 0.0491061 V_c + 1.4639 f_z - 9.04098 a_p \\ & + 0.00527564 V_c * f_z + 0.0159576 V_c * a_p + 40.2083 f_z * a_p \end{aligned} \quad \text{(IV.16)}$$

$$R^2 = 91.64 \%, R^2 (\text{adj}) = 89.13 \%, R^2 (\text{pred}) = 86.50 \%$$

$$\begin{aligned} Q = & 8508.43 - 41.5721 V_c - 91161.7 f_z - 21271.1 a_p \\ & + 445.416 V_c * f_z + 103.93 V_c * a_p + 212917 f_z * a_p \end{aligned} \quad \text{(IV.17)}$$

$$R^2 = 94.20 \%, R^2 (\text{adj}) = 92.46 \%, R^2 (\text{pred}) = 86.55 \%$$

Les figures IV.19; IV.20, IV.21 et IV.22 illustrent les graphes des effets moyens des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) sur les critères de la rugosité de surface (Ra, Ry, et Rz) et le débit de copeaux respectivement.

Les figures montrent l'impact des paramètres de coupe et leurs degrés d'influence sur l'évolution des trois critères de rugosité. En effet, la vitesse de coupe est le paramètre le plus important suivie de l'avance par dent. La profondeur de passe n'a pratiquement aucun effet sur les rugosités.

D'après ces figures, on constate que les critères de la rugosité diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe et augmentent avec l'augmentation de l'avance par

dent. D'autre part, les trois paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) ont tous un effet significatif sur le débit de copeau, puisque les pentes des trois facteurs sont élevées.

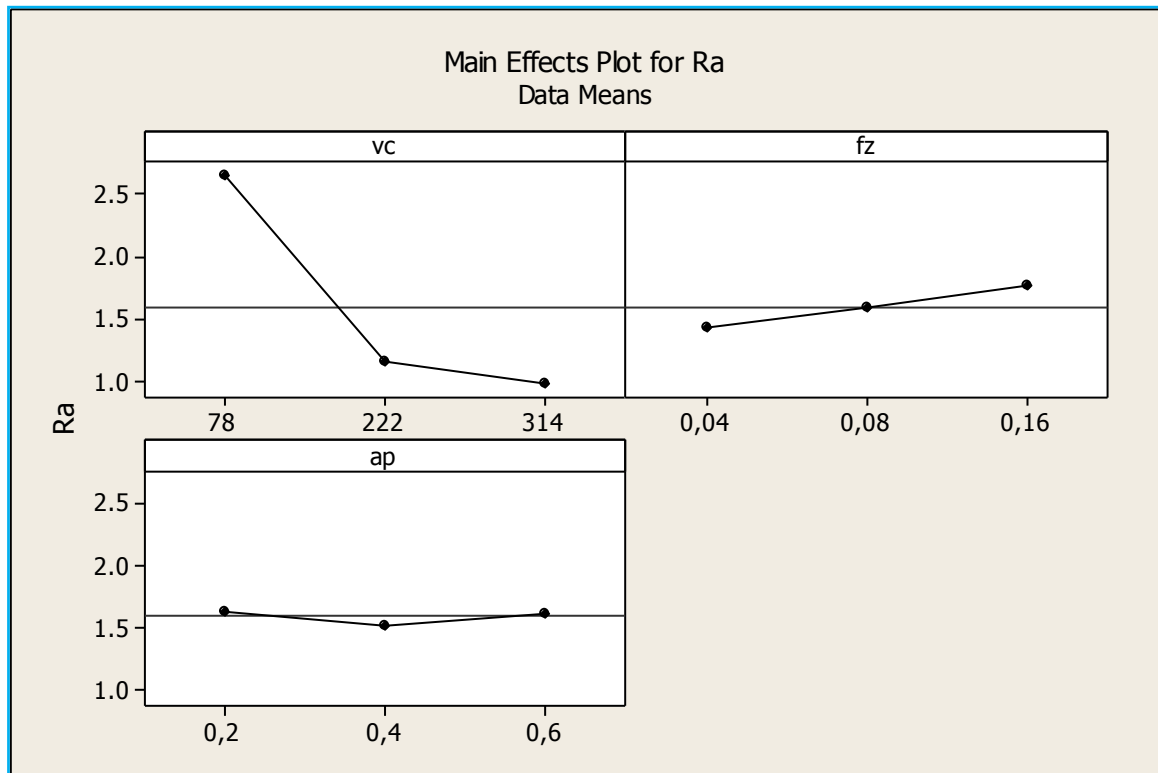


Fig. IV.19. Graphiques des effets principaux pour (Ra)

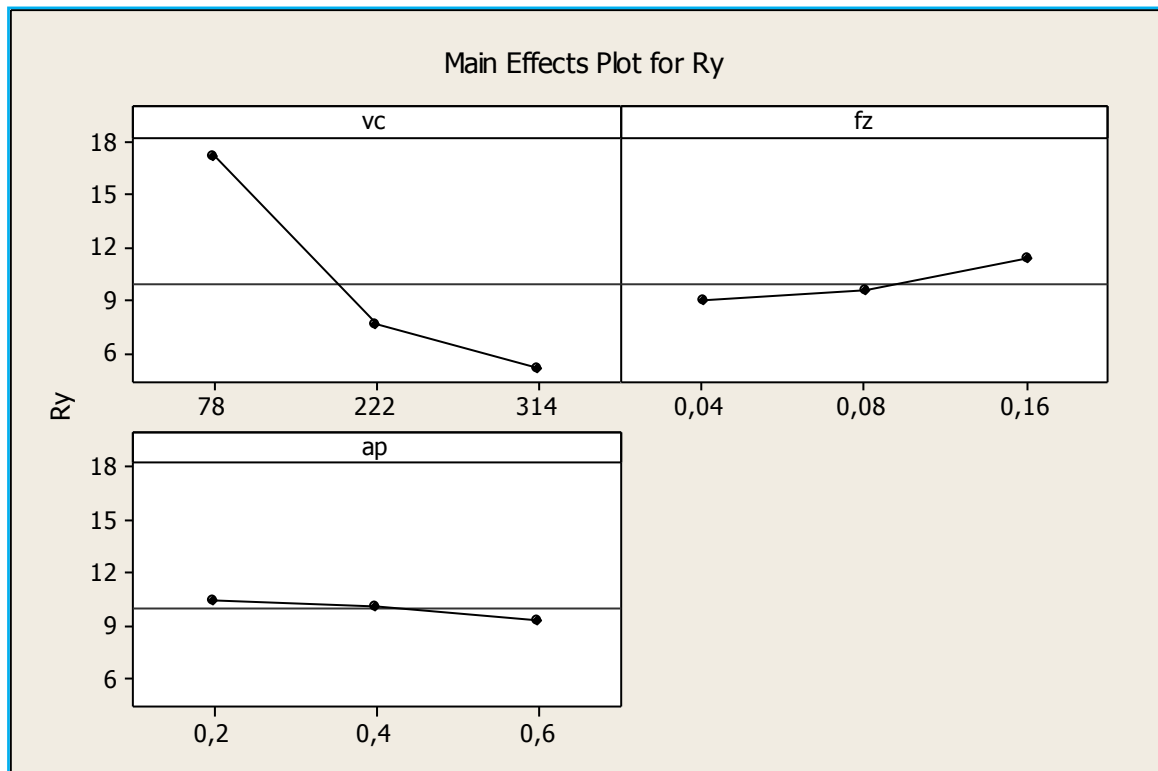


Fig. IV.20. Graphiques des effets principaux pour (Ry)

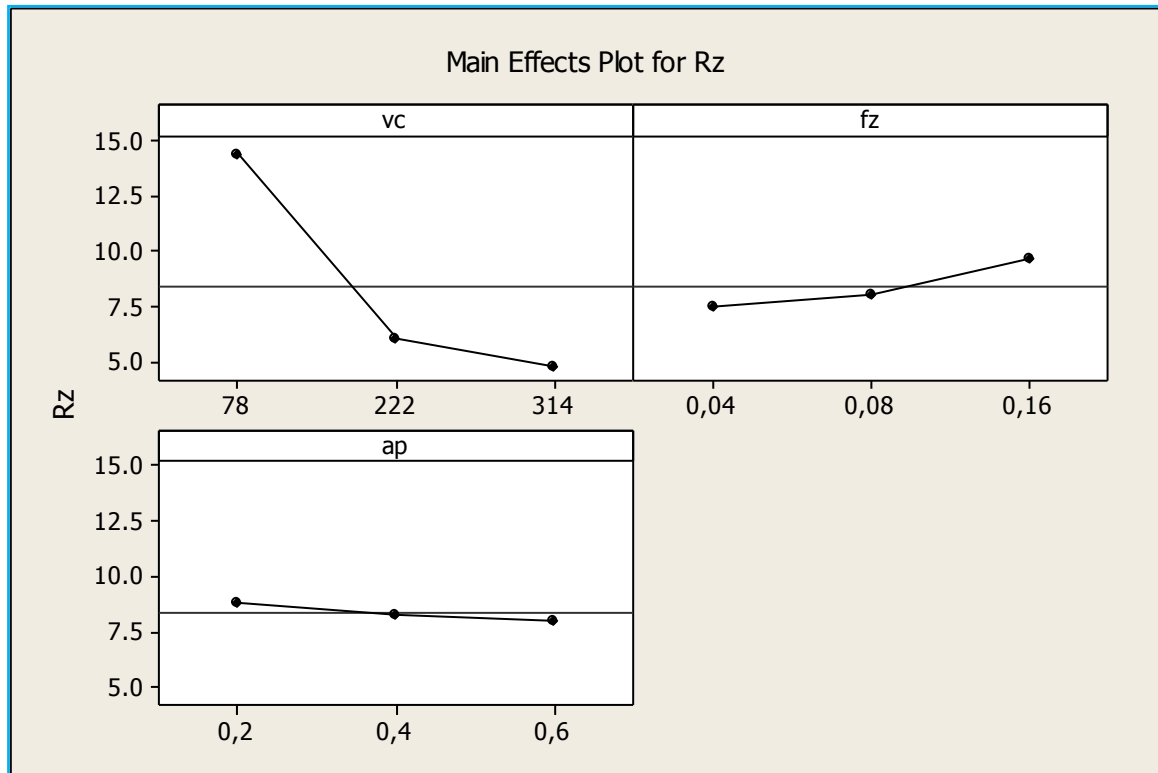


Fig. IV.21. Graphiques des effets principaux pour (Rz)

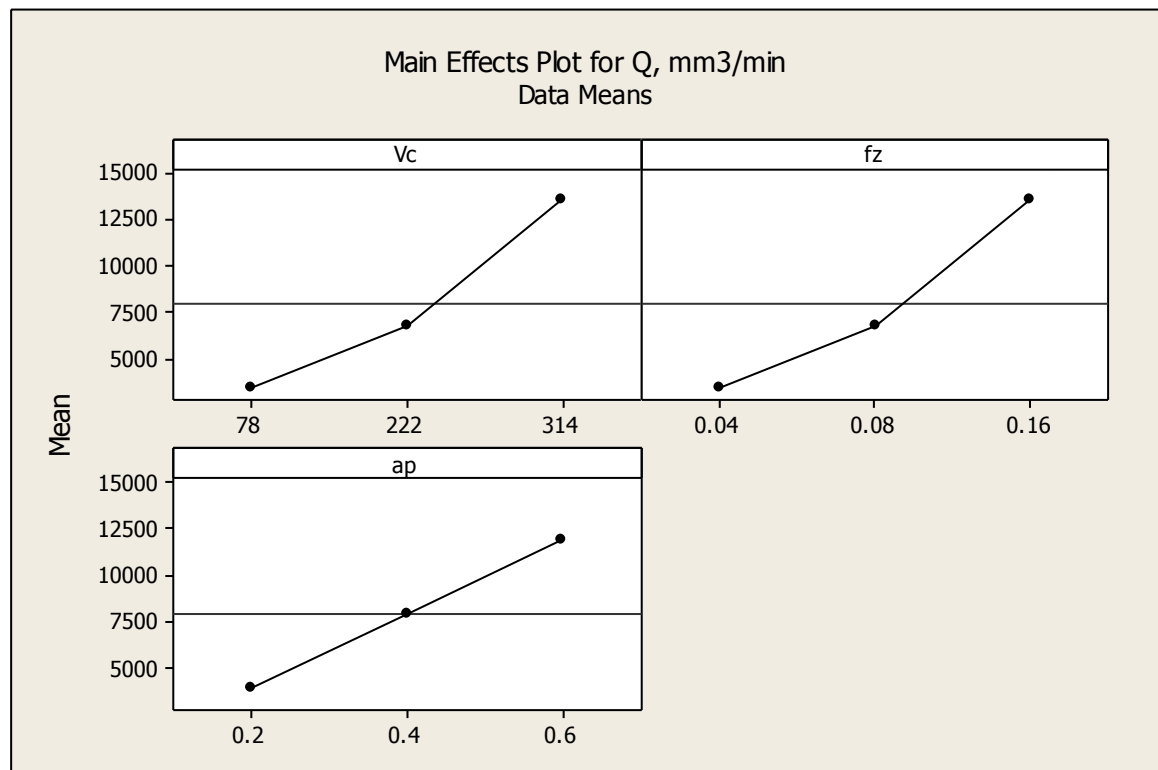


Fig. IV.22. Graphiques des effets principaux pour (Q)

Les figures IV.23; IV.24, IV.25 et IV.26 illustrent respectivement les graphiques des interactions des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) sur les trois critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) et le débit de copeaux ( $Q$ ). Dans un diagramme des interactions, les droites parallèles indiquent l'absence d'interactions. Plus la différence de pente est grande entre les lignes, plus le degré d'interaction est élevé. Toutefois, le diagramme des interactions n'indique pas si l'interaction est statistiquement significative.



Fig. IV.23. Graphiques des interactions pour ( $R_a$ )

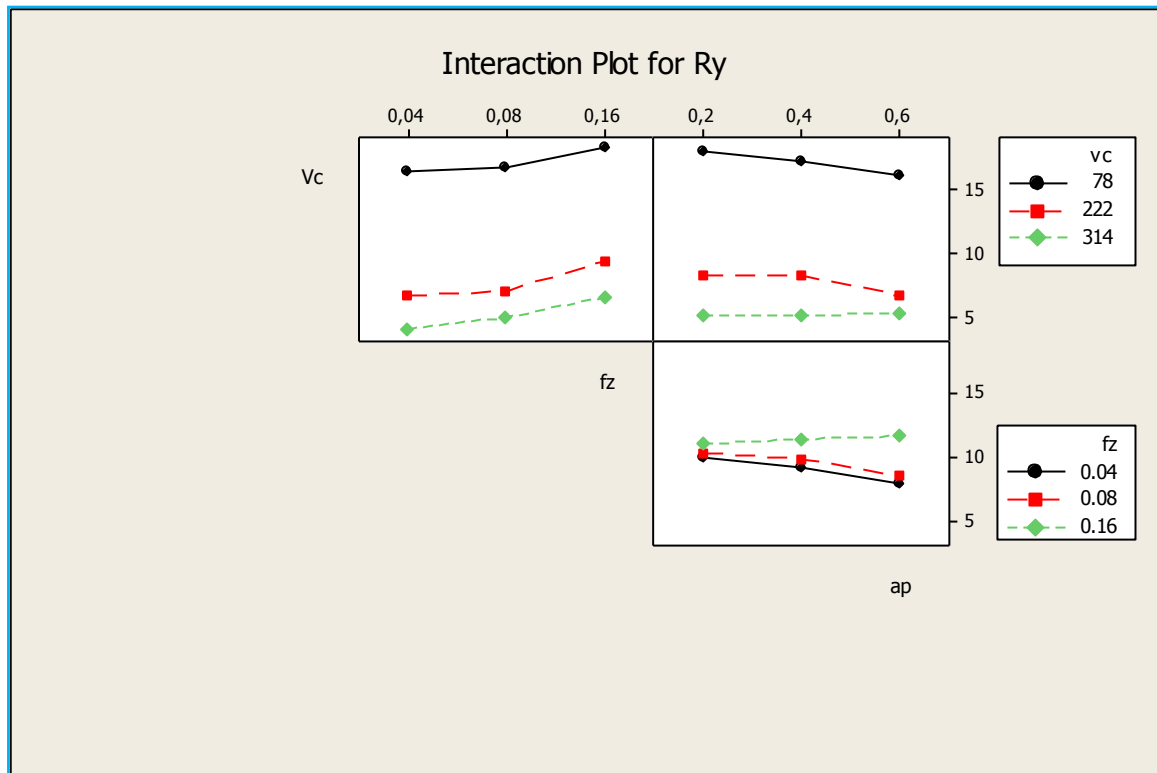


Fig. IV.24. Graphiques des interactions pour (Ry)

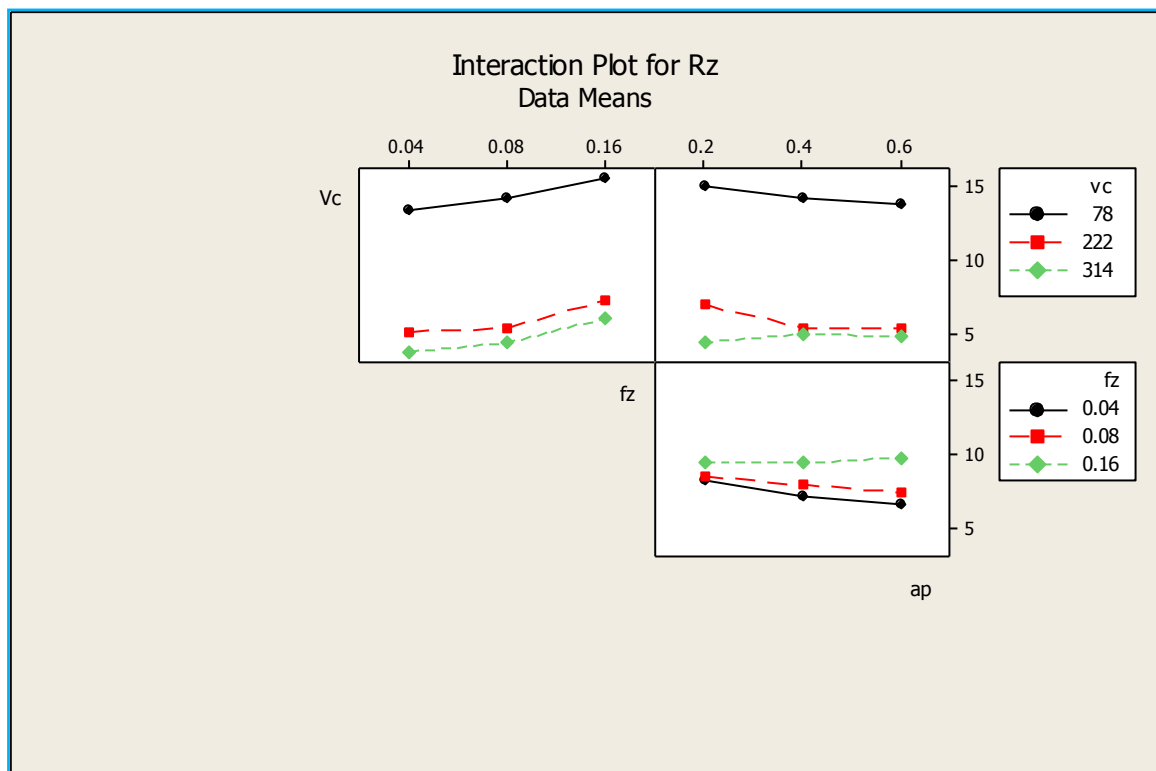


Fig. IV.25. Graphiques des interactions pour (Rz)

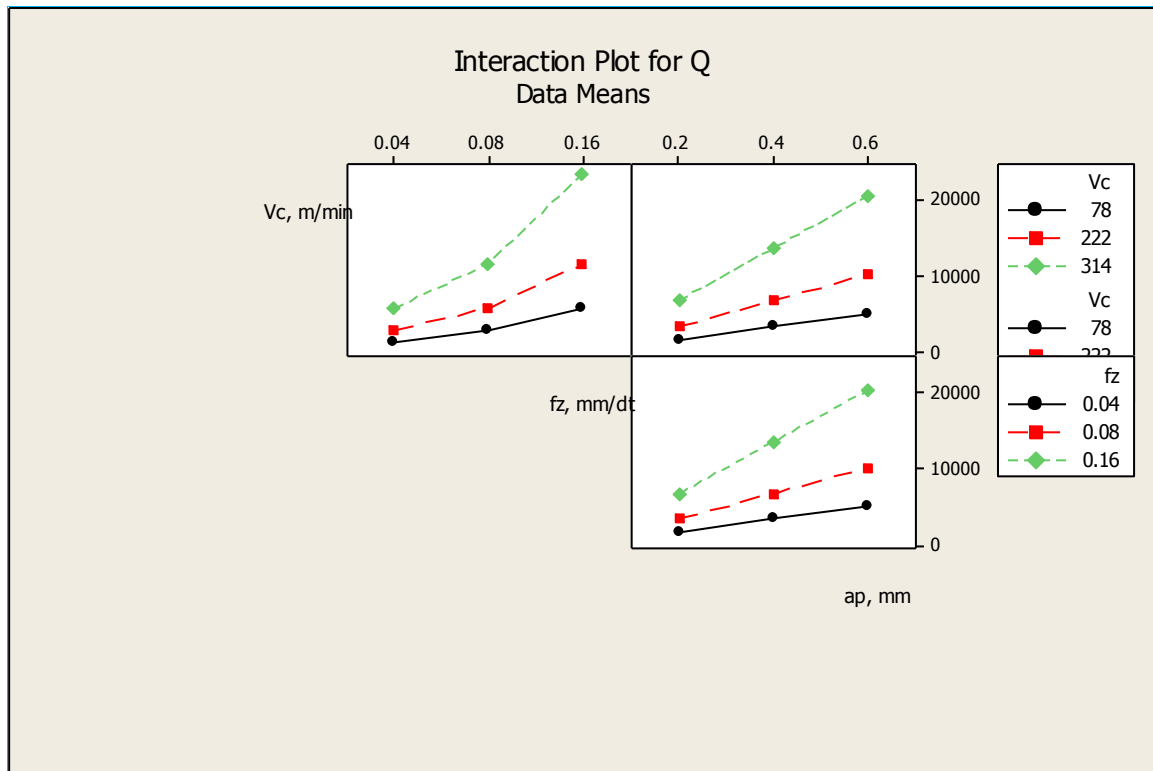


Fig. IV.26. Graphiques des interactions pour ( $Q$ )

Un plan de surface de réponse est un ensemble de techniques avancées de DOE (plan d'expériences) qui nous permettent de mieux comprendre et d'optimiser notre réponse ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $Q$ ). La méthode du plan de surface de réponse est souvent utilisée pour mettre au point des modèles suite à la détermination de facteurs importants ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) à l'aide de plans factoriels. Les figures IV.27, IV.29, IV.31 et IV.33, montrent l'influence de la vitesse de coupe ( $V_c$ ), de l'avance par dent ( $f_z$ ) et de la profondeur de passe ( $a_p$ ) sur les critères de la rugosité de surface et le débit de copeaux. Les résultats d'ANOVA montrent que l'effet de la vitesse de coupe est le facteur le plus significatif sur les critères de la rugosité de surface suivi de l'avance par dent, cependant, la profondeur de passe a une très faible influence. On peut observer que, ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe, d'autre par les trois paramètres de coupe ont un effet significatif sur le débit de copeaux.

Les graphes des contours de critères de la rugosité sont présentés dans les figures IV.28, IV.30, IV.32 et IV.34, ils permettent de visualiser les points ayant la même réponse en les joignant par une ligne.

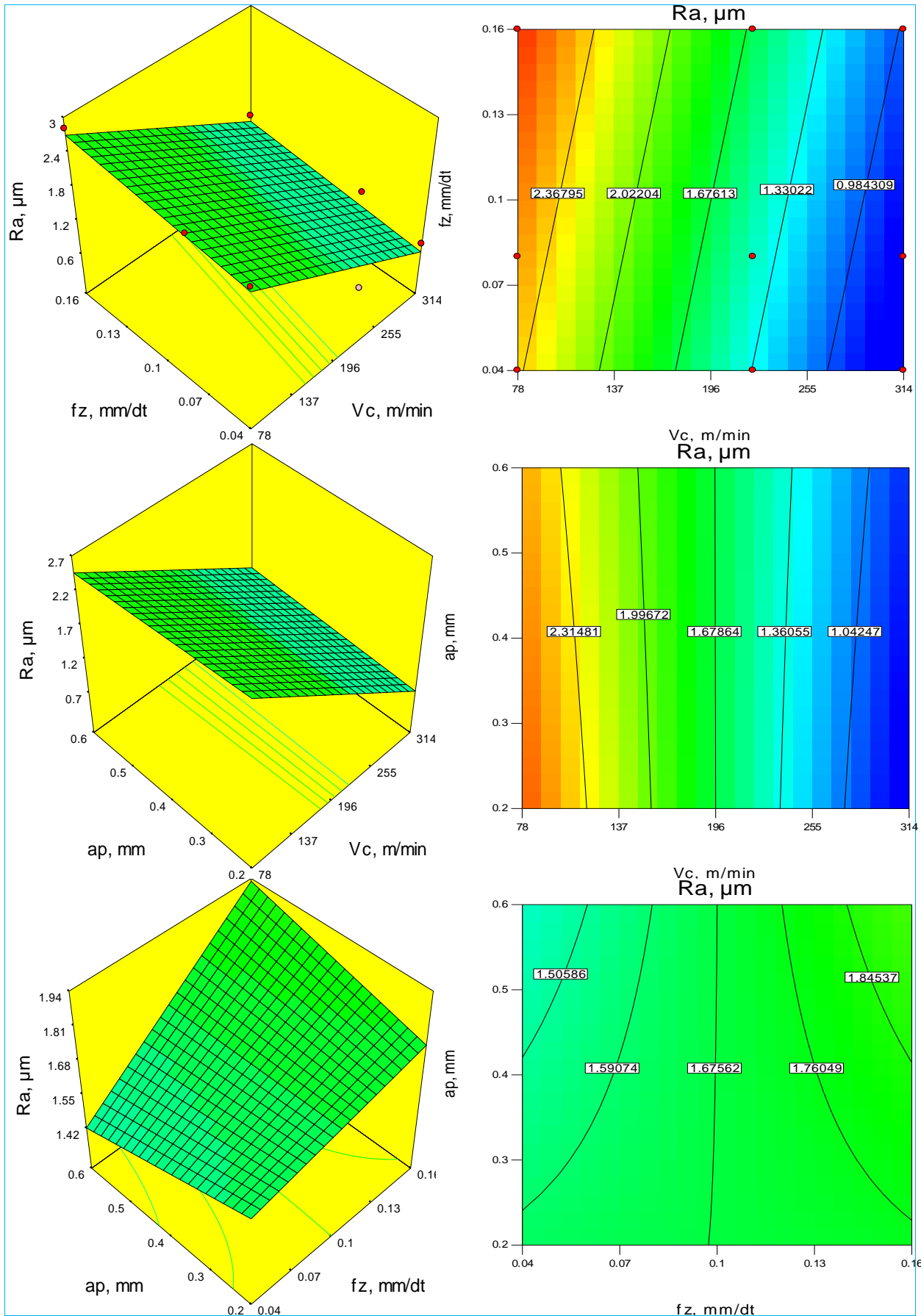


Fig. IV.27. Evolution de  $Ra = f(Vc, fz \text{ et } ap)$

Fig. IV.28. Graphe des contours de  $Ra = f(Vc, fz \text{ et } ap)$



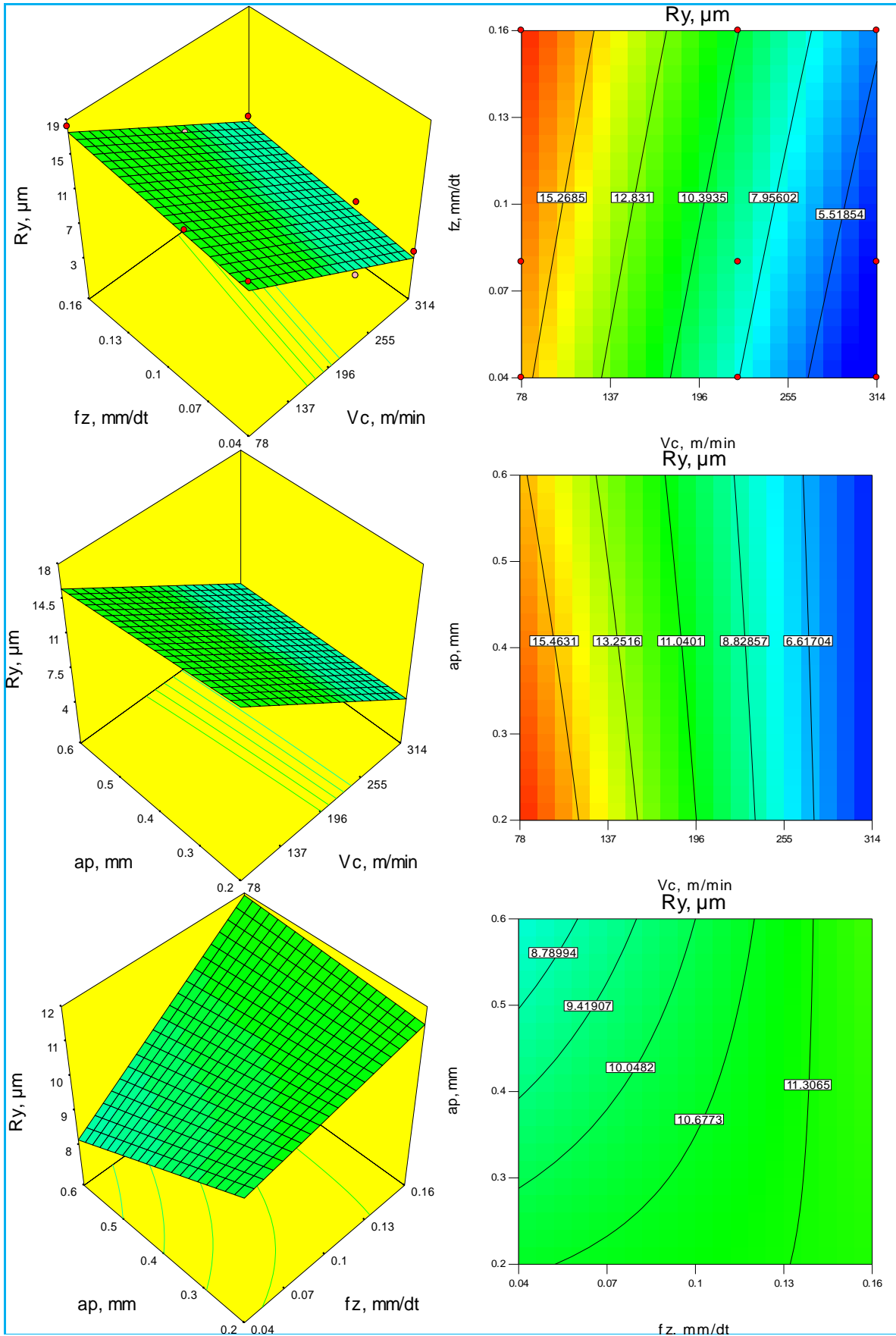


Fig. IV.29. Evolution de  $R_y = f(V_c, f_z \text{ et } ap)$

Fig. IV.30. Graphe des contours de  $R_y = f(V_c, f_z \text{ et } ap)$

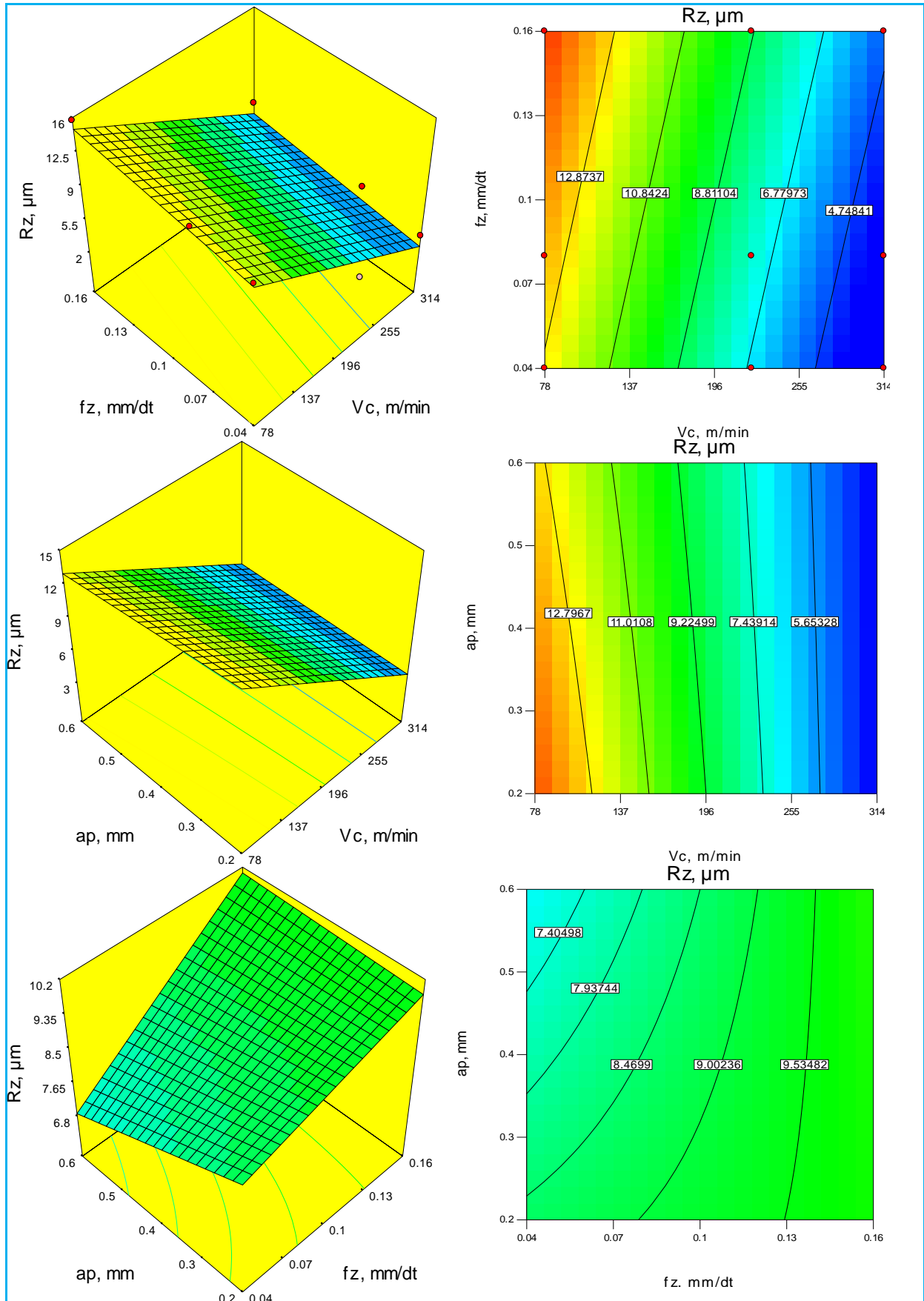


Fig. IV.31. Evolution de  $R_z = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$  Fig. IV.32. Graphe des contours de  $R_z = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$

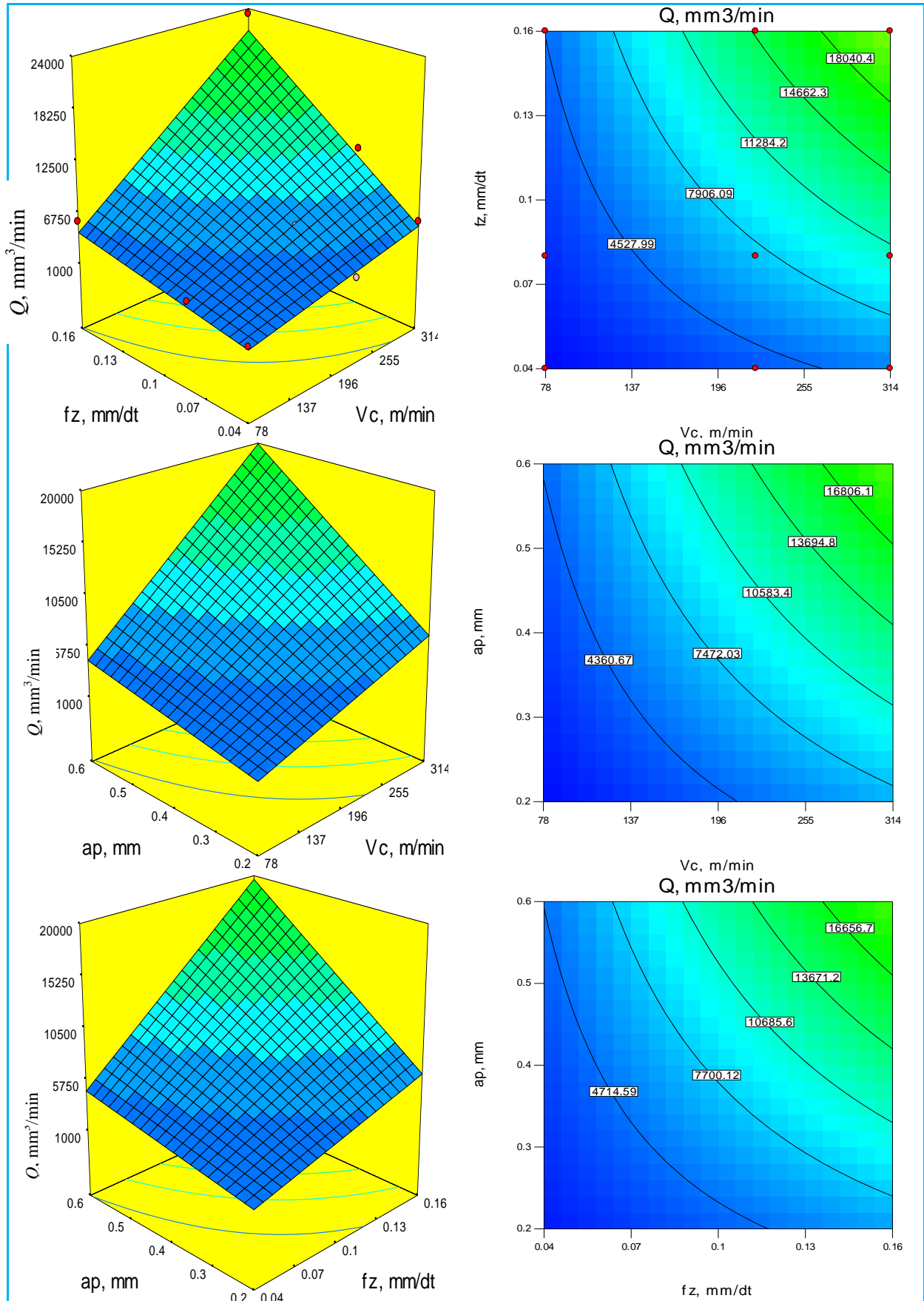


Fig. IV.33. Evolution de  $Q = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$

Fig. IV.34. Graphe des contours de  $Q = f(V_c, f_z \text{ et } a_p)$

La comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites des trois critères de rugosité (Ra, Ry et Rz) et le débit de copeaux (Q) obtenus par la méthode de surface de réponse (RSM), sont représentées graphiquement sur les figures IV.35; IV.36, IV.37 et IV.38. On remarque que les valeurs sont très proches d'où une bonne corrélation entre ces deux valeurs.

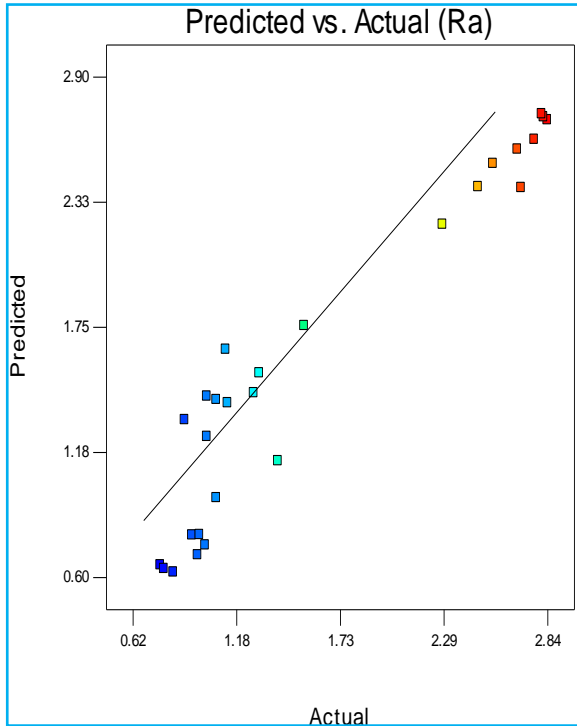


Fig. IV.35. Valeurs réelles et prédites de (Ra)

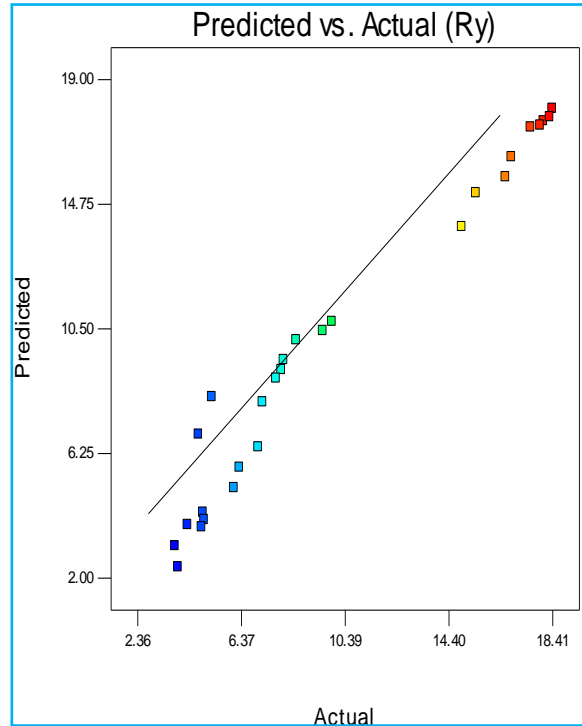


Fig. IV.36. Valeurs réelles et prédites de (Ry)

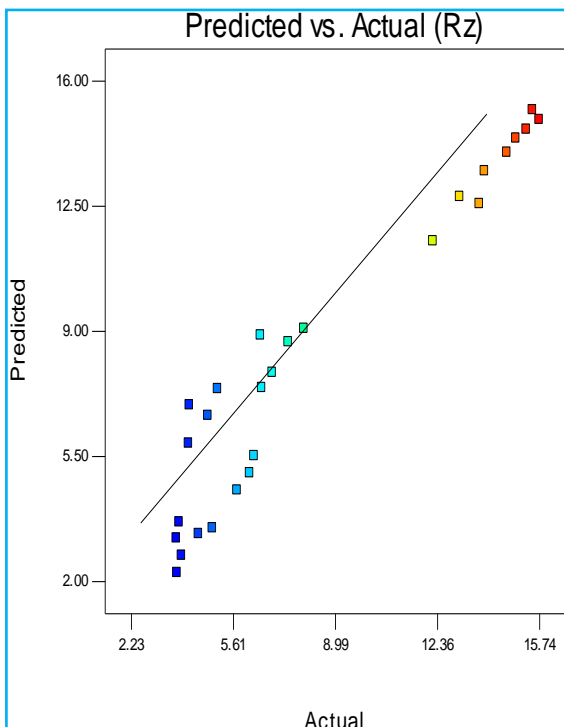


Fig. IV.37. Valeurs réelles et prédites de (Rz)

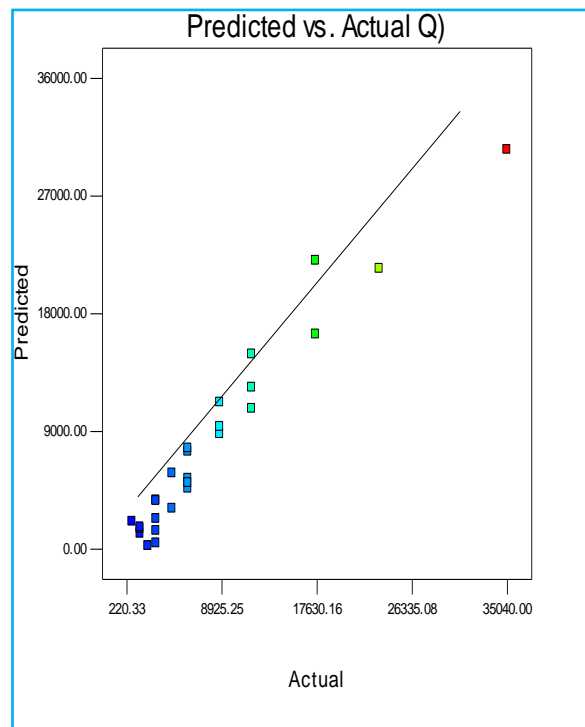


Fig. IV.38. Valeurs réelles et prédites de (Q)

### IV.3.3. Comparaison entre (Ra, Ry, Rz et Q) expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de (Ra, Ry et Rz) obtenues par la méthode de la surface de réponse, est présentée sur les figures IV.39, IV.40, IV.41 et IV.42 respectivement. On peut conclure que les modèles issus de la méthode de la surface de réponse (MSR) donnent des résultats fiables, c.-à-d. l'allure générale de la courbe des valeurs prédites suit celle de la courbe des valeurs expérimentales. Néanmoins, quelques divergences sont observées.

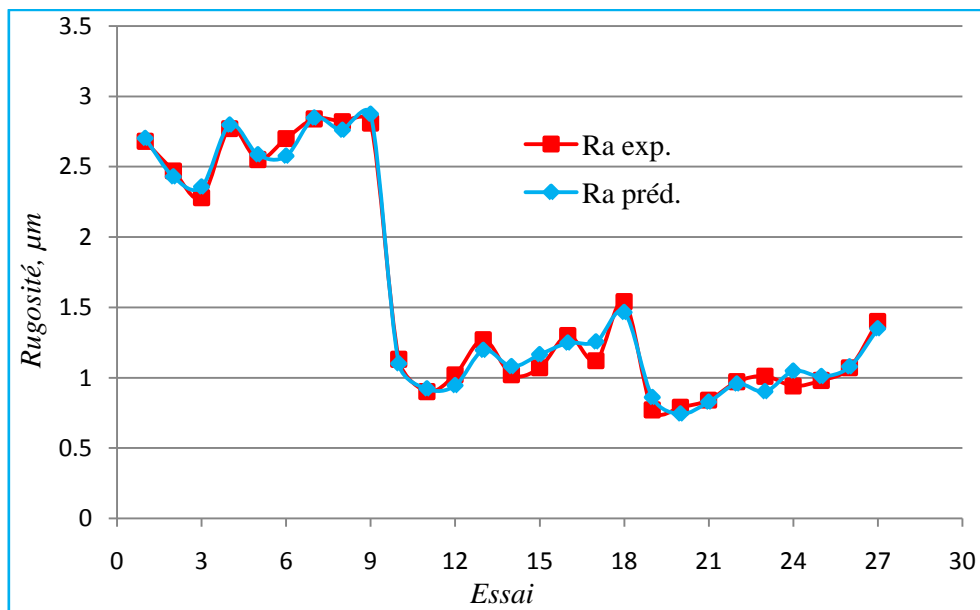


Fig. IV.39. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra)

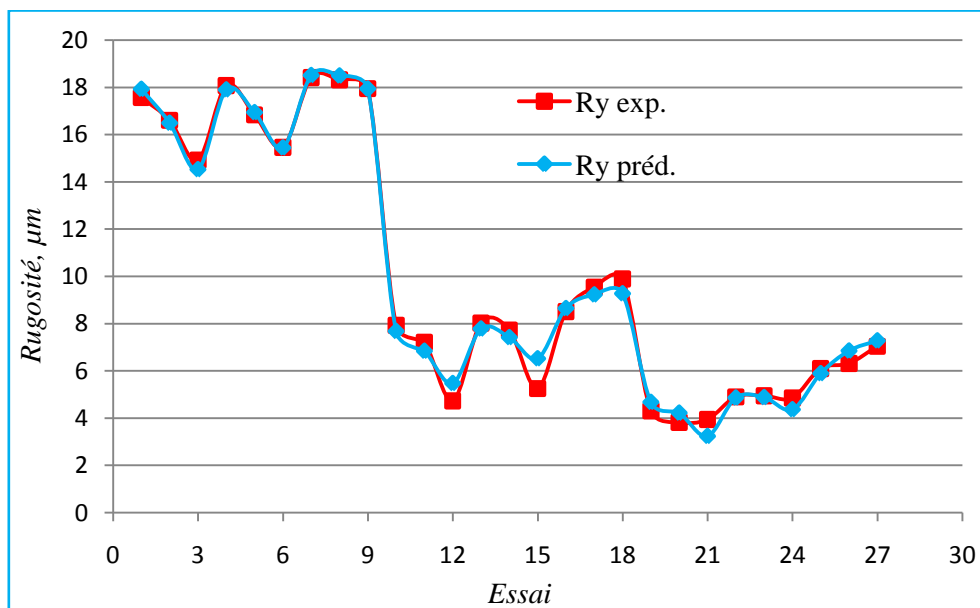


Fig. IV.40. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (Ry)

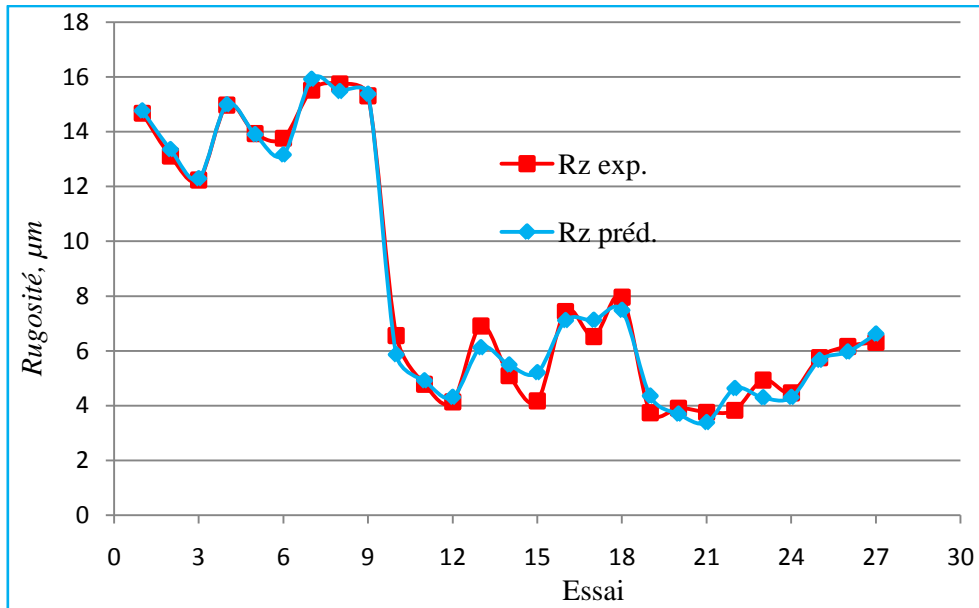


Fig. IV.41. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Rz)

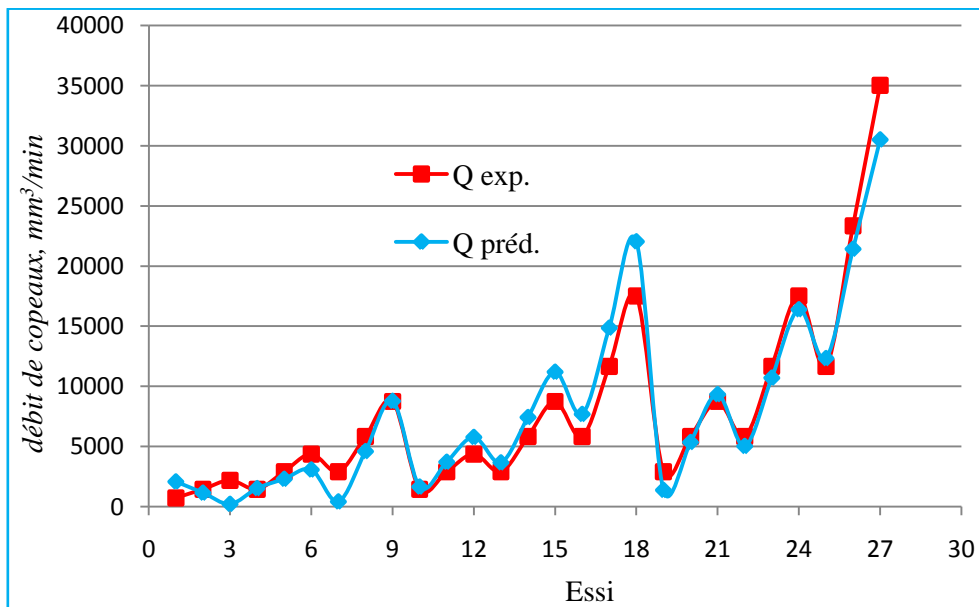


Fig. IV.42. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Q

#### IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression en fraisage de face de l'acier AISI 1040 avec des plaquettes de coupe en carbure revêtu GC1030 et le cermet CT530 ont permis d'obtenir des modèles mathématiques à la fois pour les critères de la rugosité de surface (Ra, Ry et Rz) et pour le débit de copeau (Q) en fonction des paramètres d'usinage. Cette technique définit le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe.

# CHAPITRE V

## **INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR LES VIBRATIONS ET MODELISATION**

## V.1. Introduction

Les paramètres qui peuvent influencer le processus de coupe sont d'une manière générale les paramètres d'entrée cités dans le chapitre II. Les essais expérimentaux de la coupe en fraisage effectués dans notre étude sur l'acier AISI1040, ont été menés en se limitant sur quelques paramètres qui sont, la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de passe.

Les résultats présentés dans ce chapitre concernent l'influence des différents paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) sur les vibrations ( $V_x$ ,  $V_y$ ) ainsi que la modélisation des vibrations et de la rugosité de surface ( $R_a$ ) pour le cas de l'acier AISI 1040 usiné par le carbure revêtu GC1030.

## V.2. Influence des paramètres d'usinage sur les vibrations

### V.2.1. Influence de la vitesse de coupe sur les vibrations

La [figure V.1](#) expose les résultats de l'évolution des vibrations en fonction de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) pour une avance ( $f_z$ ) = 0,02 mm/dt et une profondeur de passe  $a_p$  = 0,2 mm.

L'analyse des résultats montre que la tendance des courbes se divise en deux zones. Dans la première zone l'effet de la vitesse de coupe montre une légère augmentation des vibrations dans les deux directions, cela se traduit par une stabilité du système usinant. Dans la deuxième zone et à partir de  $V_c = 222$  m/min, on observe une augmentation des vibrations ( $V_x$ ,  $V_y$ ). Cette augmentation des vibrations dans les deux directions de la pièce peut être expliquée par l'augmentation de la fréquence de rotation de la fraise ce qui a pour effet l'augmentation du contact (choc) du couple dent/pièce et par conséquent les vibrations de la pièce augmentent dans les deux directions mesurées. L'analyse des résultats montre aussi que l'augmentation de la vitesse de coupe de 78.5 à 314, fait augmenter les deux accélérations ( $V_x$  et  $V_y$ ) respectivement de (54,09%, 82,78%).



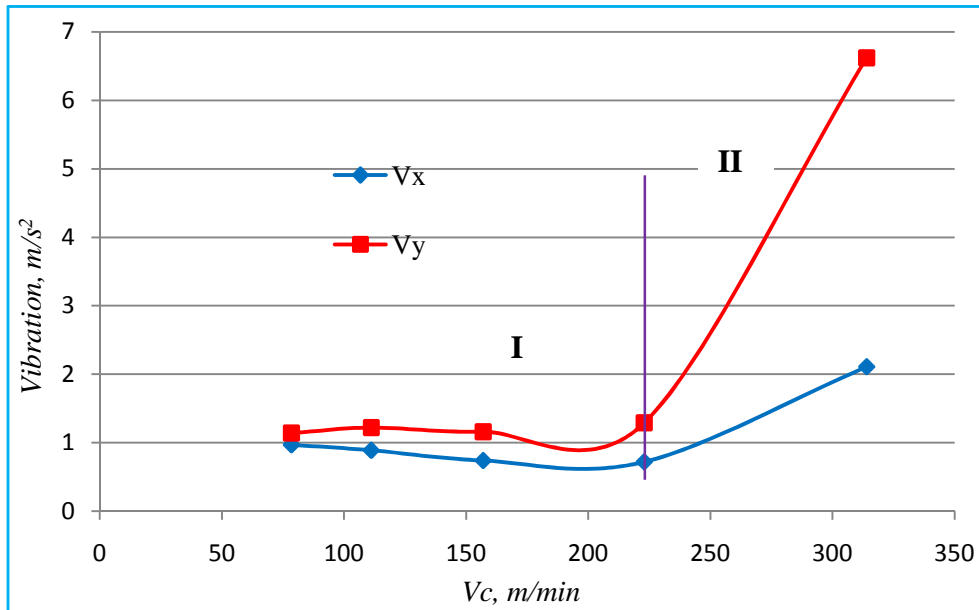


Fig. V.1. Effet de la vitesse de coupe sur les vibrations :  $f_z = 0.02$  mm/dt;  $ap = 0.2$  mm

### V.2.2. Influence de l'avance par dent sur les vibrations

La figure V.2 montre les résultats de l'évolution des vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ) en fonction de l'avance par dent ( $f_z$ ) et cela pour une vitesse de coupe  $V_c = 222$  m/min et une profondeur de passe  $ap = 0,2$  mm.

L'analyse des résultats montre que l'augmentation de l'avance par dent ( $f_z$ ) fait augmenter les vibrations dans les deux directions ( $V_x$  et  $V_y$ ), cela est expliqué par l'augmentation de la section des copeaux enlevés ce qui augmente le débit de copeaux et par conséquent les trois composantes de l'effort de coupe et tout ce la produit une augmentation des vibrations de la pièce augmentent dans les deux directions. L'analyse des résultats montre aussi que l'augmentation de l'avance par dent de 0.03 à 0.225 fait augmenter les deux accélérations ( $V_x$  et  $V_y$ ) respectivement de (63,66%, 49,77 %).

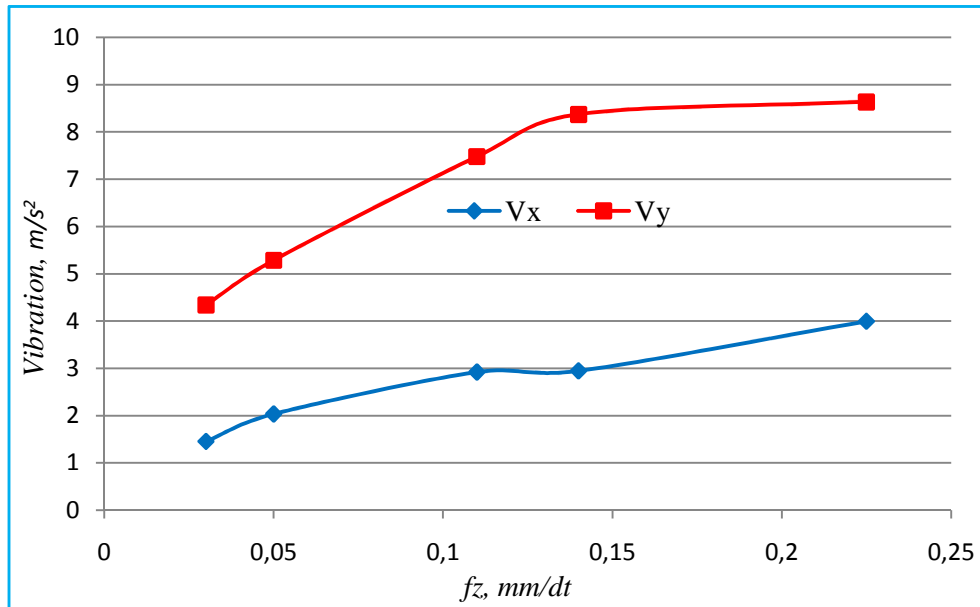
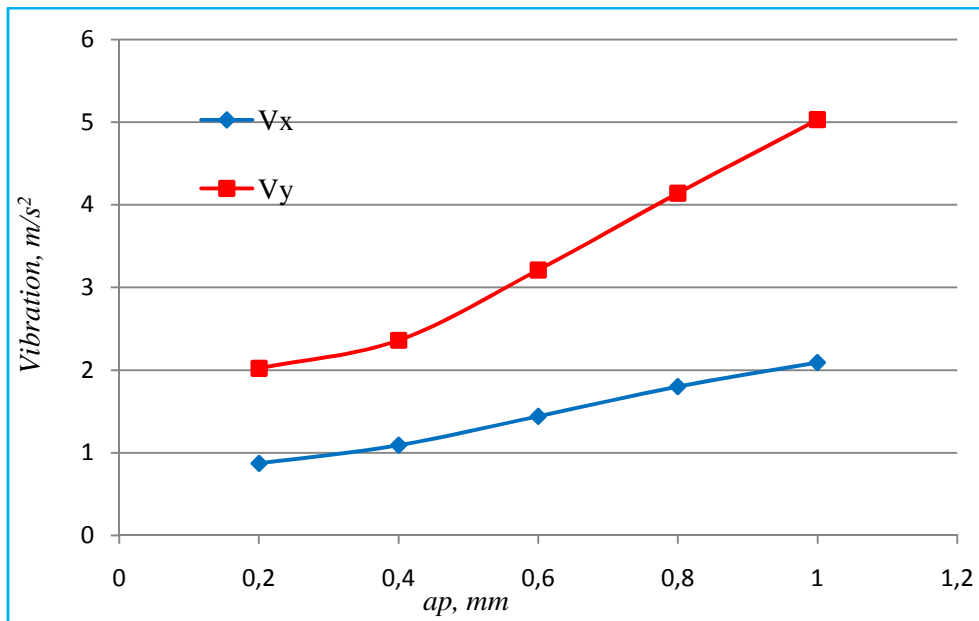


Fig. V.2. Effet de l'avance par dent sur les vibrations :  $V_c = 222$  m/min;  $a_p = 0.2$  mm

### V.2.3. Influence de la profondeur de passe sur les vibrations

La figure V.3, illustre, l'évolution des vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ) en fonction de la profondeur de passe ( $a_p$ ) et cela pour une vitesse de coupe  $V_c = 222$  m/min et une avance par dent  $f_z = 0,02$  mm/dt.

L'analyse des résultats montre que l'augmentation de la profondeur de passe induit une augmentation des vibrations dans les deux directions de la pièce ( $V_x$  et  $V_y$ ), cette augmentation peut être expliquée par l'augmentation de la section des copeaux enlevés ce qui augmente les trois composantes de l'effort de coupe et par conséquent les vibrations de la pièce augmentent dans les deux directions. L'analyse des résultats montre aussi que l'augmentation de la profondeur de passe de 0.2 à 1 mm fait augmenter les deux accélérations ( $V_x$  et  $V_y$ ) successivement de (58,37%, 59,84%).

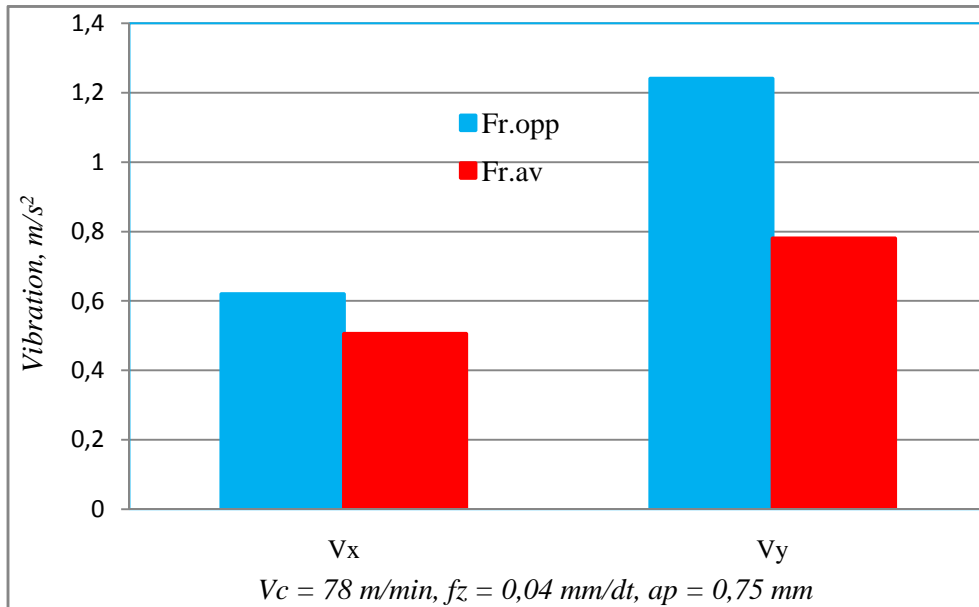


**Fig. V.3.** Effet de la profondeur de passe sur les vibrations :  $V_c=222\text{m/min}$ ,  $f_z = 0.02 \text{ mm/dt}$

### V.3. Influence du mode d'usinage sur les vibrations

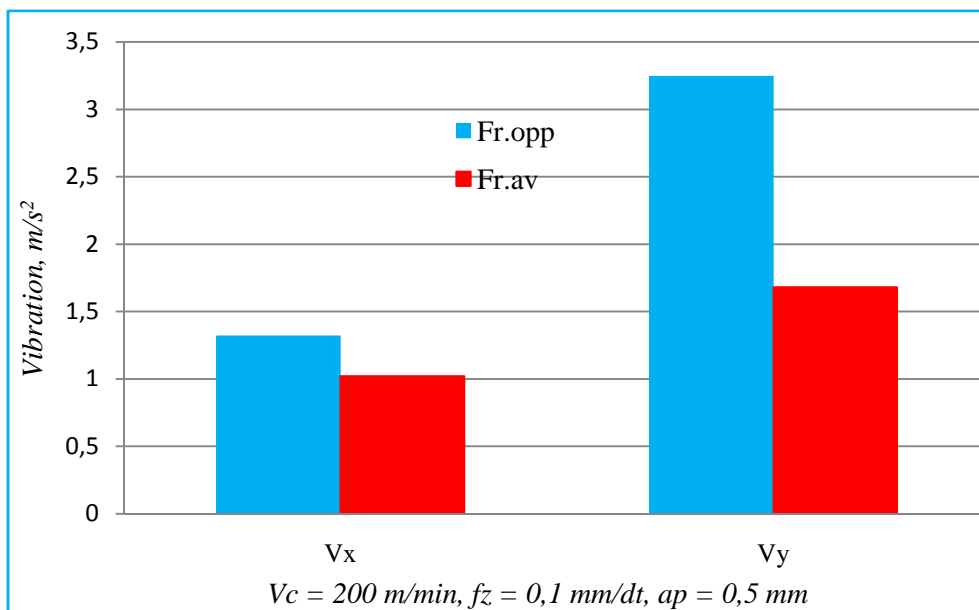
Les Figures V.4 à V.8 exposent les résultats de l'évolution des vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ) en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) à différentes vitesses de coupe, avances par dent et profondeurs de passe. Les vibrations ont été enregistrées pour deux modes d'usinage (fraisage en opposition et fraisage en avalant).

L'analyse des résultats (Fig. V.4 à V.8), montre que les deux modes d'usinage donnent presque les mêmes valeurs de vibration pour la direction ( $V_x$ ) avec un avantage pour le fraisage en avalant, par contre pour la vibration ( $V_y$ ) le fraisage en opposition donne des vibrations élevées et cela est valable pour toutes les conditions de coupe testées. L'analyse montre aussi que l'augmentation des vibrations ( $V_x$ ) causées par les deux modes d'usinage (fraisage en opposition et fraisage en avalant) et cela pour les cinq régimes de coupe (Fig. V.4 à V.8) est de (18,55 %, 22,65 %, 03,85 %, 05, 10 % et 10,93 %) et celle de ( $V_y$ ) est de (37,10 %, 48,24 %, 47,30 %, 49,16 %, 48,95%) respectivement.



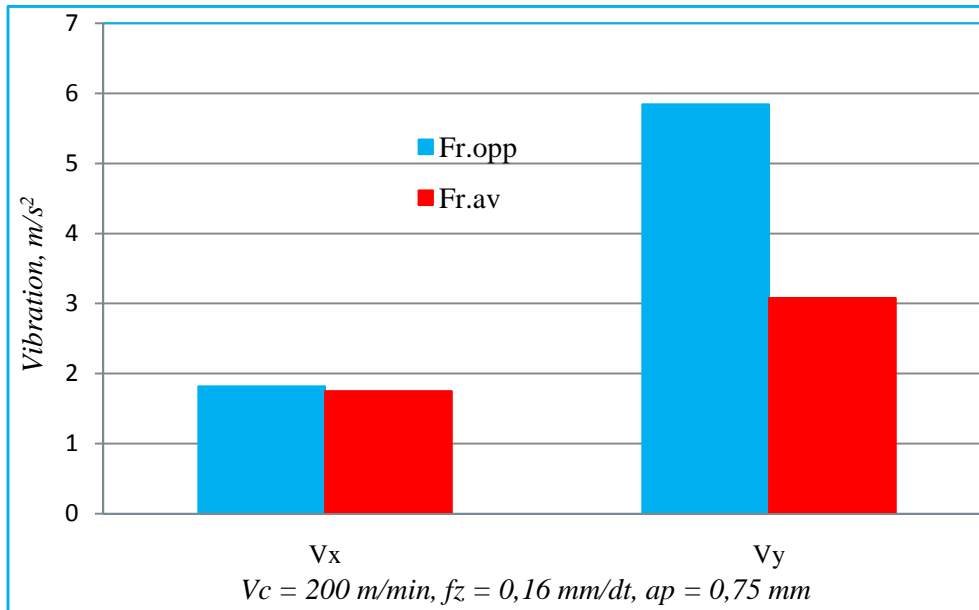
**Fig. V.4.** Influence du mode d'usinage sur les vibrations :

$V_c = 78 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,04 \text{ mm/dt}$ ,  $a_p = 0,75 \text{ mm}$



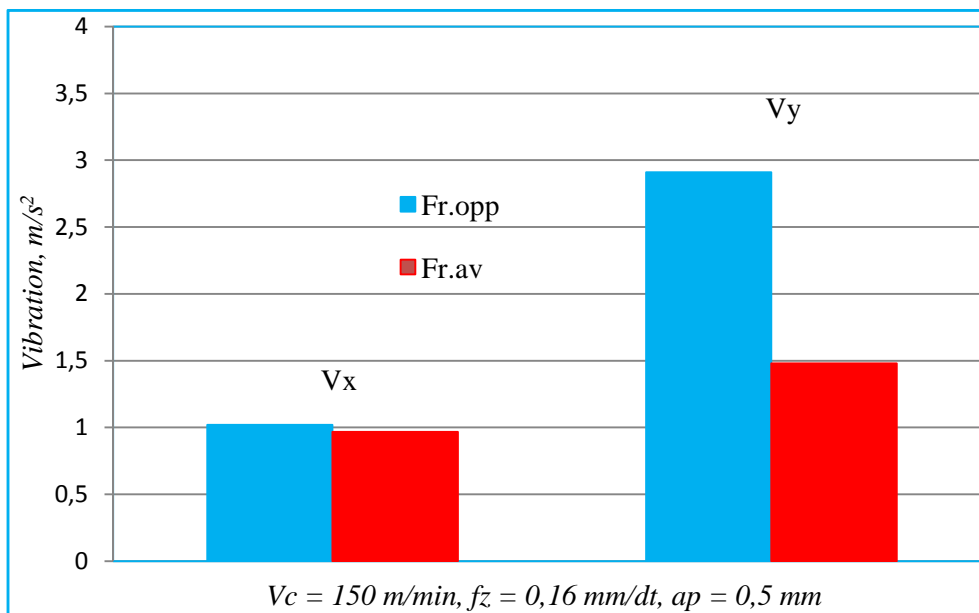
**Fig. V.5.** Influence du mode d'usinage sur les vibrations :

$V_c = 200 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,1 \text{ mm/dt}$ ,  $a_p = 0,5 \text{ mm}$



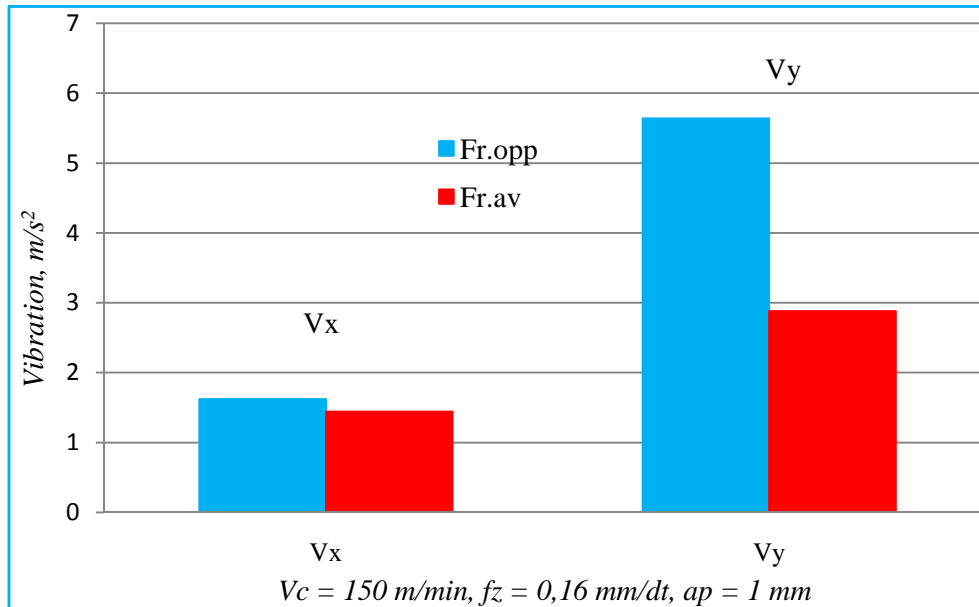
**Fig. V.6.** Influence du mode d'usinage sur les vibrations :

V<sub>c</sub> = 200 m/min, f<sub>z</sub> = 0,16 mm/dt, a<sub>p</sub> = 0,75 mm



**Fig. V.7.** Influence du mode d'usinage sur les vibrations :

V<sub>c</sub> = 150 m/min, f<sub>z</sub> = 0,16 mm/dt, a<sub>p</sub> = 0,5 mm



**Fig. V.8.** Influence du mode d'usinage sur les vibrations :

$$V_c = 150 \text{ m/min}, f_z = 0,16 \text{ mm/dt}, a_p = 1 \text{ mm}$$

#### V.4. Modélisation des vibrations ( $V_x$ et $V_y$ ) et de la rugosité ( $R_a$ )

##### V.4.1. Résultats expérimentaux

Dans le [tableau V.1](#) sont présentés les valeurs expérimentales des différents paramètres technologiques, la rugosité ( $R_a$ ) et les vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ). Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de box Behnken lors du fraisage de face de l'acier AISI1040 avec des plaquettes en carbure revêtues (GC1030).

La méthode appliquée pour la détermination des modèles mathématiques est la méthode de surface de réponse (MSR), en utilisant un logiciel statistique Minitab 16. Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la rugosité et les vibrations. Pour cela on doit choisir un niveau de signification fixé à ( $\alpha = 0.05$ ).

##### V.4.2. Modélisation des vibrations

Les valeurs des composantes des vibrations présentées dans le [tableau V.1](#), ont été obtenues selon la matrice de planification des expériences pour un plan de box behnken.

On remarque que les valeurs maximales des vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ) ont été obtenues pour le régime de coupe suivant:  $V_c = 222 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,16 \text{ mm/dt}$  et  $a_p = 0,75 \text{ mm}$  (essai n°4),

l'augmentation des paramètres de coupe implique un débit de copeau important ce qui cause une élévation des vibrations. Alors que leurs valeurs minimales ont été enregistrées pour les conditions suivantes :  $V_c = 78$  m/min,  $f_z = 0,04$  mm/dt et  $ap = 0,75$  mm (essai n°6). La diminution de la vitesse de coupe avec de faibles valeurs d'avance par dent ( $f_z$ ) conduit généralement à une diminution des vibrations.

**Tableau V.1.***Plan de box behenken*

Run	$V_c$ , m/min	$f_z$ , mm/dt	$ap$ , mm	$V_x$ , m/s <sup>2</sup>	$V_y$ , m/s <sup>2</sup>	$R_a$ , μm	FITS1	FITS2	FITS3
1	150	0,1	0,75	0,968	2,911	1,14	0,96800	2,91100	1,14000
2	78	0,1	0,5	0,527	1,392	1,47	0,56963	0,62212	1,39875
3	150	0,1	0,75	0,968	2,911	1,14	0,96800	2,91100	1,14000
4	222	0,16	0,75	1,750	5,844	0,55	1,72538	5,54450	0,71500
5	150	0,04	1	0,843	2,794	1,01	0,81300	2,43938	1,08625
6	78	0,04	0,75	0,505	1,240	1,52	0,52963	1,53950	1,35500
7	222	0,1	0,5	1,021	3,246	1,31	1,01563	3,19088	1,22125
8	150	0,16	0,5	0,918	3,253	1,21	0,94800	3,60763	1,13375
9	78	0,1	1	0,735	2,316	1,42	0,74038	2,37112	1,50875
10	150	0,1	0,75	0,968	2,911	1,14	0,96800	2,91100	1,14000
11	222	0,04	0,75	0,736	2,689	1,73	0,80862	2,27375	1,58250
12	150	0,04	0,5	0,657	1,515	1,05	0,58975	1,98538	1,28625
13	222	0,1	1	1,673	2,689	0,64	1,63038	3,45888	0,71125
14	150	0,16	1	1,443	5,641	1,17	1,51025	5,17063	0,93375
15	78	0,16	0,75	0,741	2,207	1,77	0,66838	2,62225	1,91750

#### V.4.2.1. ANOVA pour ( $V_x$ )

Les tableaux V.2 et V.3 exposent respectivement les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) et des coefficients de régressions des modèles mathématiques estimés pour ( $V_x$ ). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions et de classer les trois éléments du régime de coupe et leurs interactions par ordre d'influence sur la vibration ( $V_x$ ). La vitesse de coupe vient en première position avec une contribution de 44,18 %, l'avance par dent vient en deuxième position avec une contribution de 27,58 % et la profondeur de passe vient en troisième position avec une contribution de 15,27 % sur ( $V_x$ ).

On constate que les interactions de la vitesse de coupe avec l'avance par dent ( $Vc* fz$ ) et la vitesse de coupe avec la profondeur de passe ( $Vc* ap$ ) ont respectivement une contribution significative sur  $V_x$  (7,49 %, 2,44 %), par contre les autres interactions et les termes carrés ( $Vc*Vc$ ,  $fz*fz$ ,  $fz*ap$  et  $ap*ap$ ) ont respectivement de faible contribution (0,0054 %, 0,18 %, 1,42 % et 0,13 %).

**Tableau V.2.**

Analyse de la Variance pour  $V_x$

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
<b>Regression</b>	9	1,99372	1,99372	0,221525	42,1178	0,000349	98,70 %
<i>Vc</i>	1	0,89245	0,01156	0,011560	2,1979	0,198304	44,18 %
<i>fz</i>	1	0,55704	0,01370	0,013696	2,6040	0,167513	27,58 %
<i>ap</i>	1	0,30851	0,00968	0,009680	1,8404	0,232944	15,27%
<i>Vc*Vc</i>	1	0,00011	0,00012	0,000117	0,0222	0,887349	0,0054 %
<i>Vc*fz</i>	1	0,15132	0,15132	0,151321	28,7702	0,003030	7,49 %
<i>Vc*ap</i>	1	0,04928	0,04928	0,049284	9,3702	0,028067	2,44 %
<i>fz*fz</i>	1	0,00367	0,00319	0,003186	0,6058	0,471597	0,18 %
<i>fz*ap</i>	1	0,02873	0,02873	0,028730	5,4624	0,066614	1,42 %
<i>ap*ap</i>	1	0,00262	0,00262	0,002617	0,4976	0,512035	0,13 %
<b>Error</b>	5	0,02630	0,02630	0,005260			
<b>Lack-of-Fit</b>	3	0,02630	0,02630	0,008766			
<b>Pure Error</b>	2	0,00000	0,00000	0,000000			
<b>Total</b>	14	2,02002					



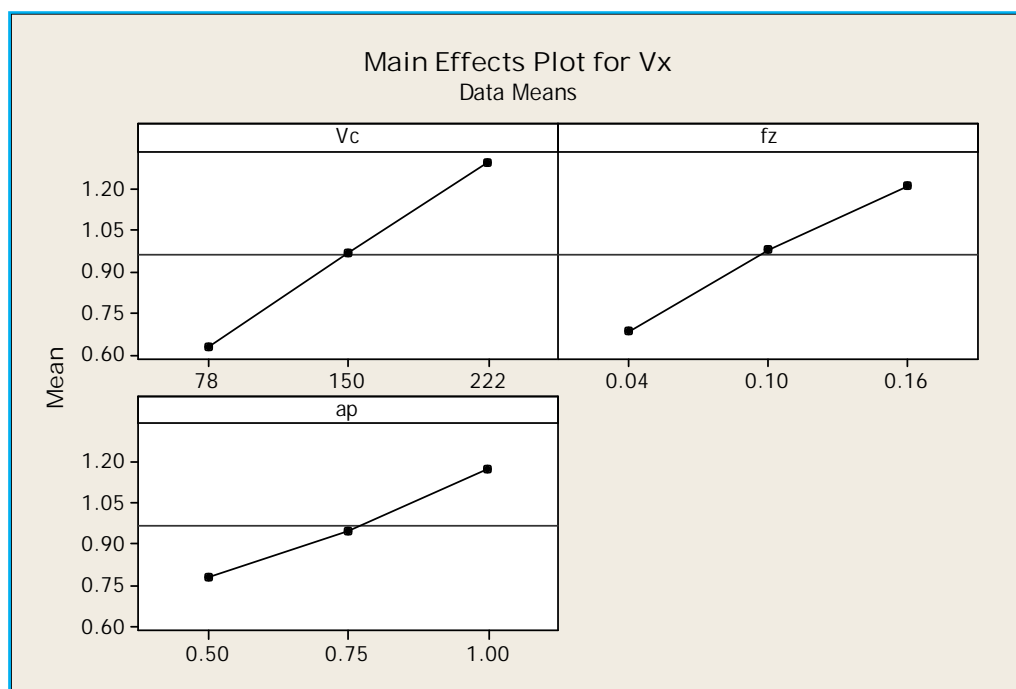
Tableau V.3.

Coefficients pour  $V_x$ 

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,16971	0,5041	2,32060	0,068
$V_c$	-0,00416	0,0028	-1,48252	0,198
$f_z$	-4,96111	3,0744	-1,61370	0,168
$ap$	-1,34350	0,9903	-1,35660	0,233
$V_c*V_c$	-0,00000	0,0000	-0,14904	0,887
$V_c*f_z$	0,04502	0,0084	5,36378	0,003
$V_c*ap$	0,00617	0,0020	3,06108	0,028
$f_z*f_z$	-8,15972	10,4840	-0,77830	0,472
$f_z*ap$	5,65000	2,4174	2,33718	0,067
$ap*ap$	0,42600	0,6039	0,70544	0,512

#### V.4.2.1.1. Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La figure V.9 illustre les graphes des effets principaux des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $ap$ ) sur la vibration ( $V_x$ ). On remarque que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus influent sur les vibrations ( $V_x$ ) car il a la plus grande pente suivi par l'avance par dent ( $f_z$ ) et en dernier lieu la profondeur de passe ( $ap$ ).

Fig. V.9. Graphes des effets principaux sur ( $V_x$ )

L'équation de régression pour la vibration ( $V_x$ ) en fonction des paramètres de coupe et le coefficient de détermination  $R^2$  est donnée par l'équation V.1.

$$\begin{aligned}
 V_x = & 1.16971 - 0.00416291 V_c - 4.96111 f_z - 1.3435 a_p \\
 & - 1.08507e-006 V_c * V_c + 0.0450231 V_c * f_z + 0.00616667 V_c * a_p \\
 & - 8.15972 f_z * f_z + 5.65 f_z * a_p + 0.426 a_p * a_p
 \end{aligned} \tag{V.1}$$

Avec,

$$R^2 = 98,70 \%, R^2 (\text{adj}) = 96.35 \%, R^2 (\text{pred}) = 79.17 \%$$

#### V.4.2.1.2. Diagrammes des surfaces 3D et Graphiques de Contour

La figure V.10 présente les diagrammes (3D) de la vibration ( $V_x$ ) en fonction des paramètres de régime de coupe. Cette figure montre que la pente de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur les vibrations ( $V_x$ ) suivi par l'avance ( $f_z$ ) et en dernier lieu par la profondeur de passe  $a_p$ . D'autre part les graphes de contour figure V.11 permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas  $V_x$ ) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

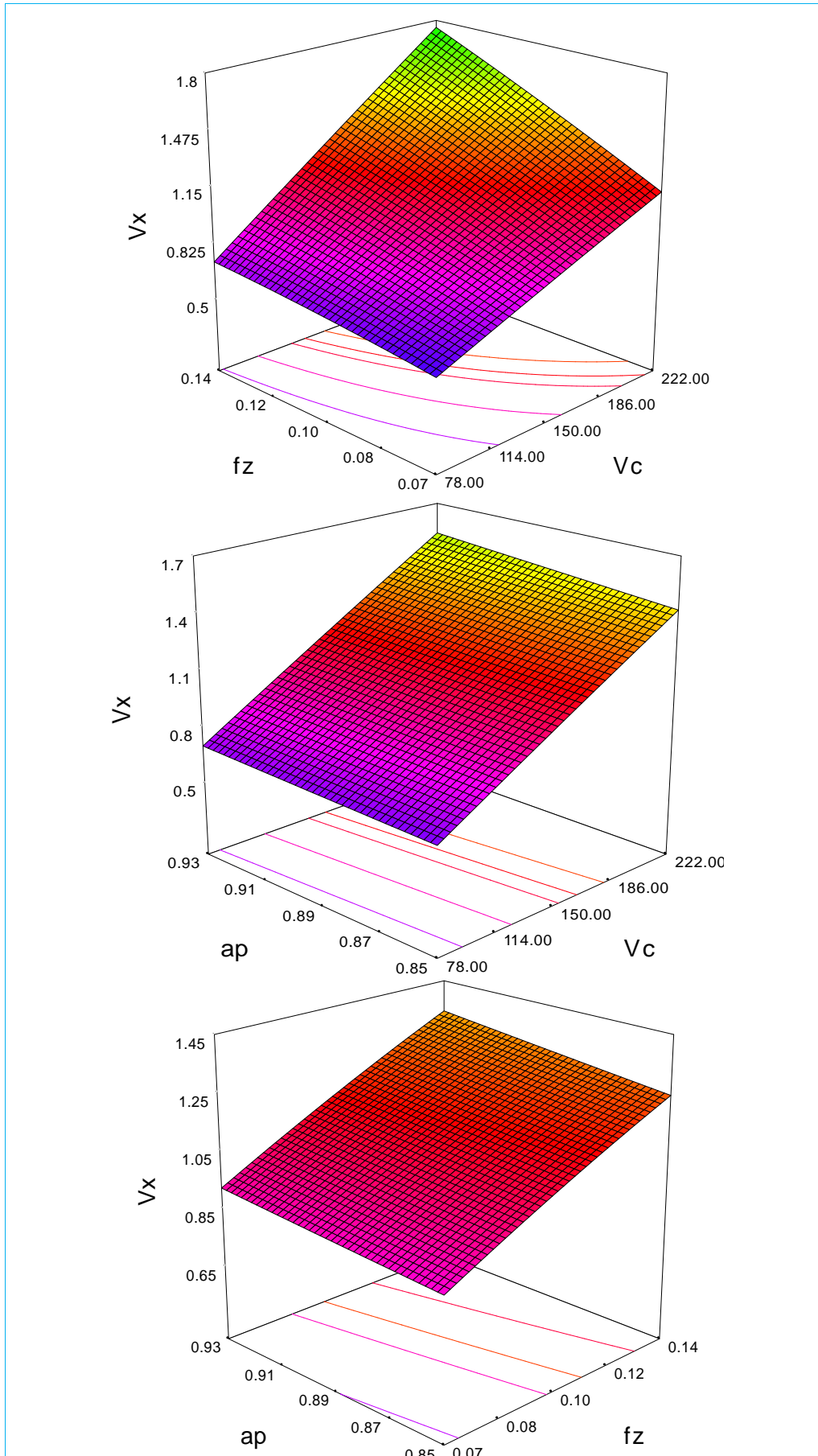


Fig. V.10. Surface de réponse des vibrations ( $V_x$ ) en fonction de ( $V_c, fz, ap$ )

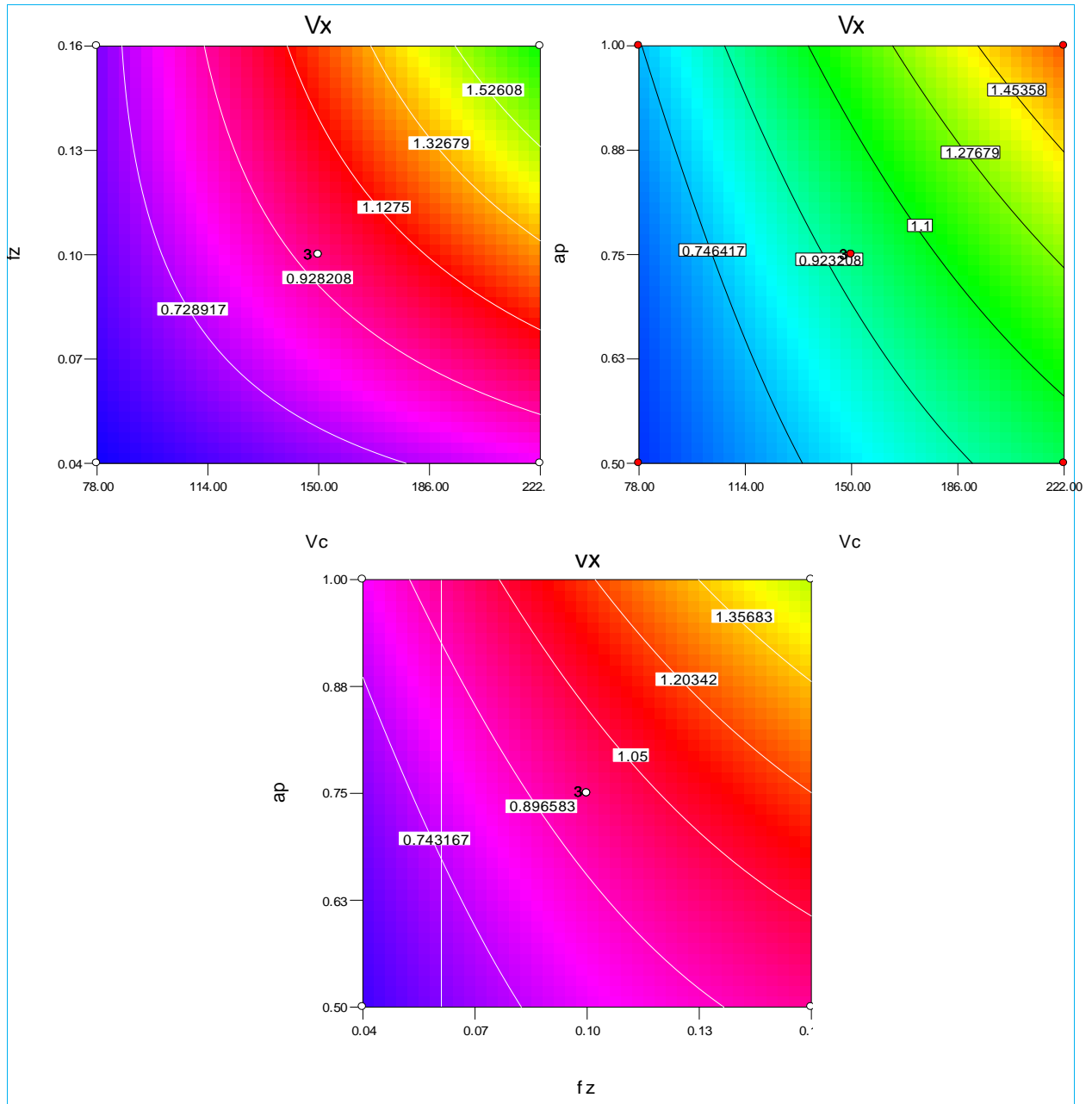


Fig. V.11. Graphe des contours des vibrations Vx en fonction de (Vc, fz, ap)

#### V.4.2.1.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Vx)

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la vibration (Vx) sont représentées sur la figure V.12. L'analyse montre une bonne corrélation entre les deux courbes. Le tableau V.4 montre le pourcentage d'erreur pour les 15 essais réalisés, il varie entre (0 et ...10.23) %.

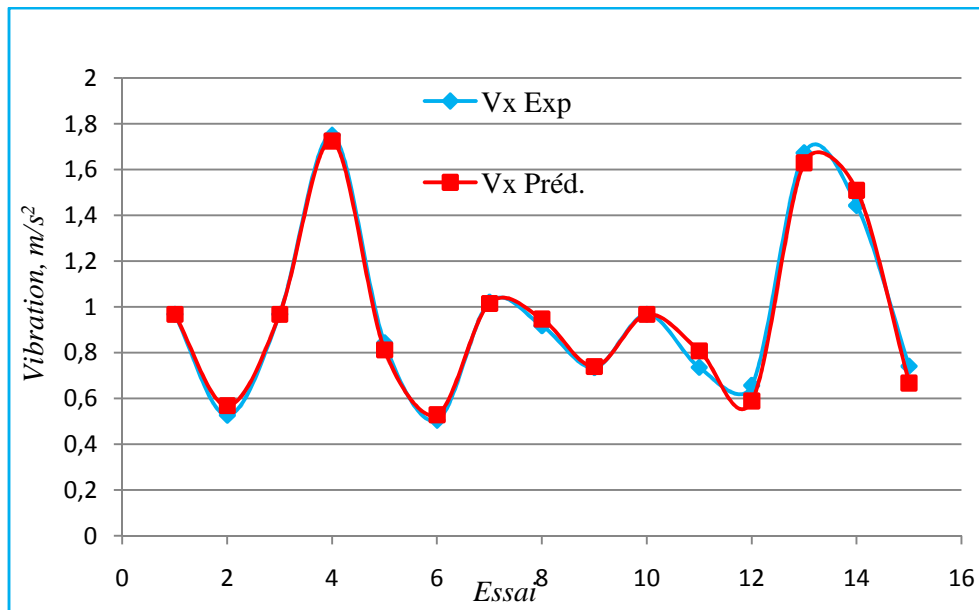


Fig. V.12. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Vx

Tableau V.4.

Pourcentage d'erreur pou Vx

Test	Vx mesurés	Vx prédites	Erreur %
1	0,968	0,96800	0 %
2	0,527	0,56963	7,48 %
3	0,968	0,96800	0 %
4	1,750	1,72538	1,40 %
5	0,843	0,81300	3,55 %
6	0,505	0,52963	4,65 %
7	1,021	1,01563	0,52 %
8	0,918	0,94800	3,16 %
9	0,735	0,74038	0,72 %
10	0,968	0,96800	0 %
11	0,736	0,80862	8,98 %
12	0,657	0,58975	10,23 %
13	1,673	1,63038	2,54 %
14	1,443	1,51025	4,45 %
15	0,741	0,66838	9,80 %

### V.4.2.2. ANOVA pour (Vy).

Les tableaux V.5 et V.6 illustrent respectivement les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) et des coefficients de régressions des modèles mathématiques estimés pour (Vy). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions et de classer les trois éléments du régime de coupe et leurs interactions par ordre d'influence sur la vibration (Vy). L'avance par dent vient en première position avec une contribution de 39,01 %, la vitesse de coupe vient en deuxième position avec une contribution de 27,52 % et la profondeur de passe vient en troisième position avec une contribution de 8,37 % sur (Vy). On constate que toutes les interactions n'ont pas un impact significatif. L'équation de régression pour la vibration (Vy) en fonction des paramètres de coupe et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est donnée par l'équation V.2.

$$\begin{aligned}
 V_y = & -2.62025 + 0.038783 V_c - 41.7715 f_z + 5.58808 a_p \\
 & - 7.77392e - 005 V_c * V_c + 0.12662 V_c * f_z - 0.0205694 V_c * a_p \\
 & + 135.278 f_z * f_z + 18.4833 f_z * a_p - 1.556 a_p * a_p
 \end{aligned} \tag{V.2}$$

Avec,

$$R^2 = 90.08 \%$$

**Tableau V.5.**

Analyse de la Variance (ANOVA) pour (Vy)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
<b>Regression</b>	9	21,8844	21,8844	2,43160	5,04526	0,044729	90,08 %
<i>V<sub>c</sub></i>	1	6,6850	1,0033	1,00334	2,08180	0,208651	27,52 %
<i>f<sub>z</sub></i>	1	9,4765	0,9710	0,97097	2,01464	0,215013	39,01 %
<i>a<sub>p</sub></i>	1	2,0341	0,1675	0,16746	0,34746	0,581181	8,37 %
<i>V<sub>c</sub>*V<sub>c</sub></i>	1	0,6930	0,5997	0,59966	1,24423	0,315378	2,85 %
<i>V<sub>c</sub>*f<sub>z</sub></i>	1	1,1968	1,1968	1,19684	2,48329	0,175883	4,93 %
<i>V<sub>c</sub>*a<sub>p</sub></i>	1	0,5483	0,5483	0,54834	1,13774	0,334903	2,26 %
<i>f<sub>z</sub>*f<sub>z</sub></i>	1	0,9082	0,8757	0,87570	1,81697	0,235522	3,74 %
<i>f<sub>z</sub>*a<sub>p</sub></i>	1	0,3075	0,3075	0,30747	0,63796	0,460688	1,27 %
<i>a<sub>p</sub>*a<sub>p</sub></i>	1	0,0349	0,0349	0,03492	0,07246	0,798550	0,14 %
<b>Error</b>	5	2,4098	2,4098	0,48196			
<b>Lack-of-Fit</b>	3	2,4098	2,4098	0,80326			
<b>Pure Error</b>	2	0,0000	0,0000	0,00000			
<b>Total</b>	14	24,2941					

**Tableau V.6.**Coefficients pour  $V_y$ 

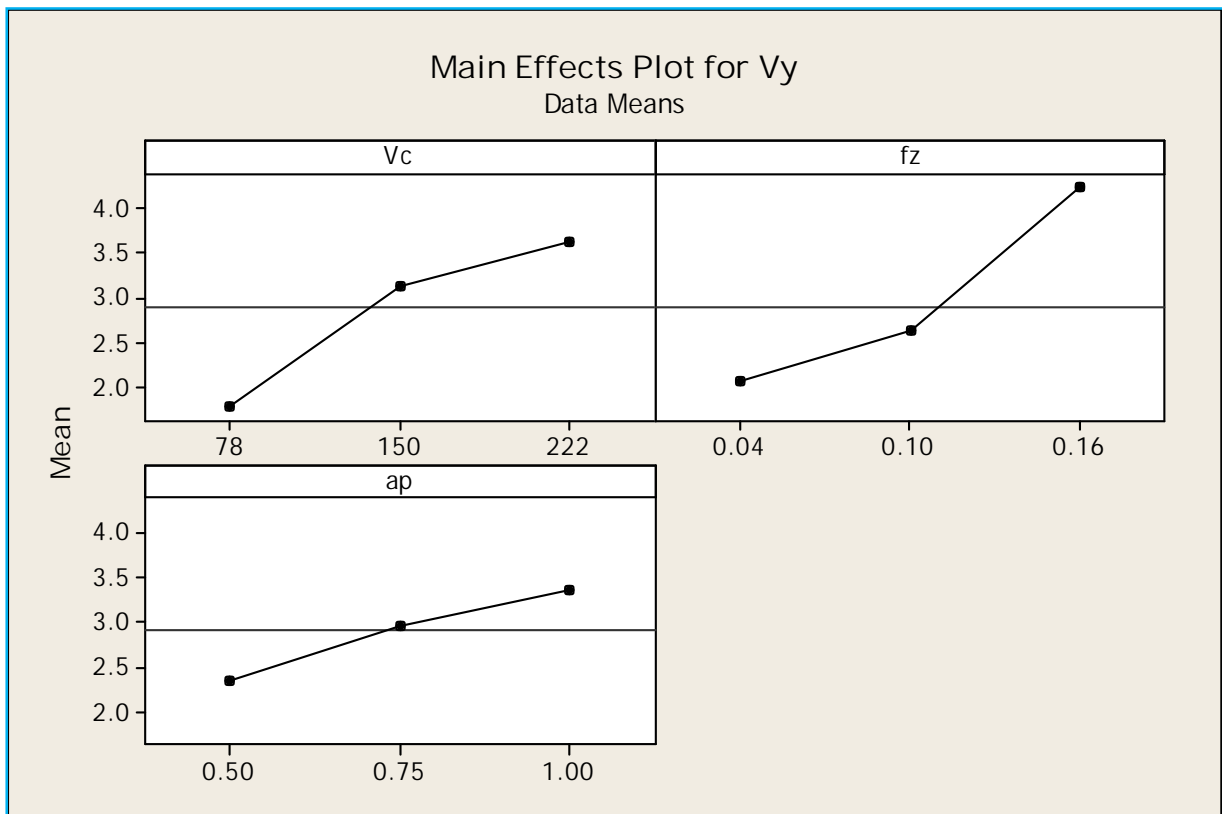
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-2,620	4,825	-0,54305	0,610
$V_c$	0,039	0,027	1,44285	0,209
$f_z$	-41,772	29,429	-1,41938	0,215
$ap$	5,588	9,480	0,58946	0,581
$V_c*V_c$	-0,000	0,000	-1,11545	0,315
$V_c*f_z$	0,127	0,080	1,57585	0,176
$V_c*ap$	-0,021	0,019	-1,06665	0,335
$f_z*f_z$	135,278	100,358	1,34795	0,236
$f_z*ap$	18,483	23,141	0,79873	0,461
$ap*ap$	-1,556	5,781	-0,26918	0,799

#### V.4.2.2.1. Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction pour ( $V_y$ )

La [figure V.13](#) illustre les graphes des effets principaux des paramètres ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $ap$ ) sur les vibrations ( $V_y$ ). On remarque que l'avance par dent ( $f_z$ ) est le facteur le plus influent sur la vibration ( $V_y$ ) car il a la plus grande pente, il est suivi par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et en dernier lieu la profondeur de passe ( $ap$ ).

#### V.4.2.2.2. Diagrammes de surfaces 3D et Graphiques de Contour pour $V_y$

La [figure V.14](#) présente les diagrammes (3D) des vibrations ( $V_y$ ) en fonction des paramètres de régime de coupe. Cette figure montre que la pente de l'avance par dent ( $f_z$ ) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur les vibrations ( $V_y$ ). Elle est suivie par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et en dernier lieu par la profondeur de passe ( $ap$ ). D'autre part les graphes de contour [figure V.15](#) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas  $V_y$ ) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.



*Fig. V.13. Graphes des effets principaux sur ( $V_y$ )*



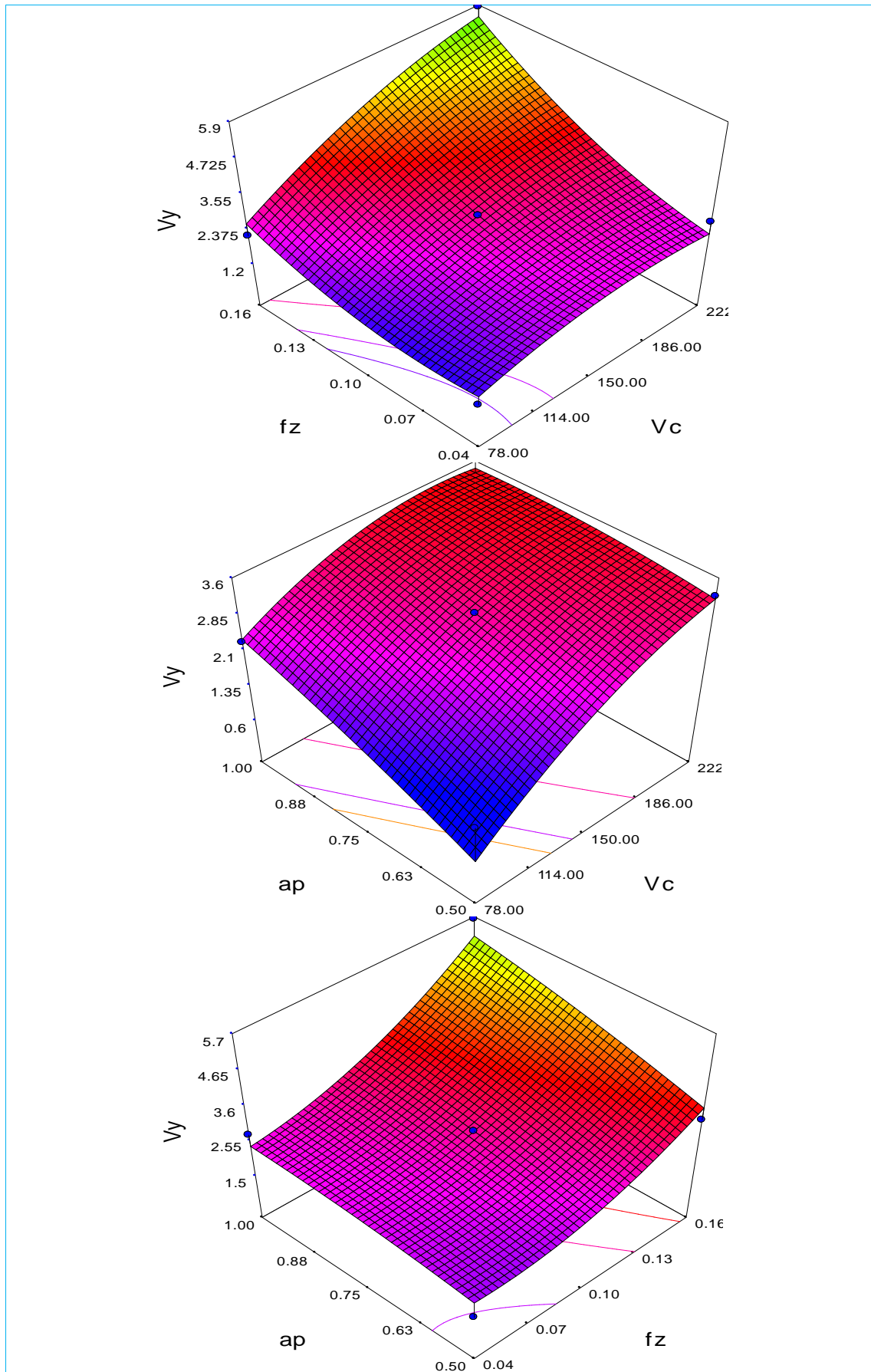


Fig. V.14. Surface de réponse des vibrations ( $V_y$ ) en fonction de ( $V_c, f_z$ ), ( $V_c, a_p$ ) et ( $f_z, a_p$ ).

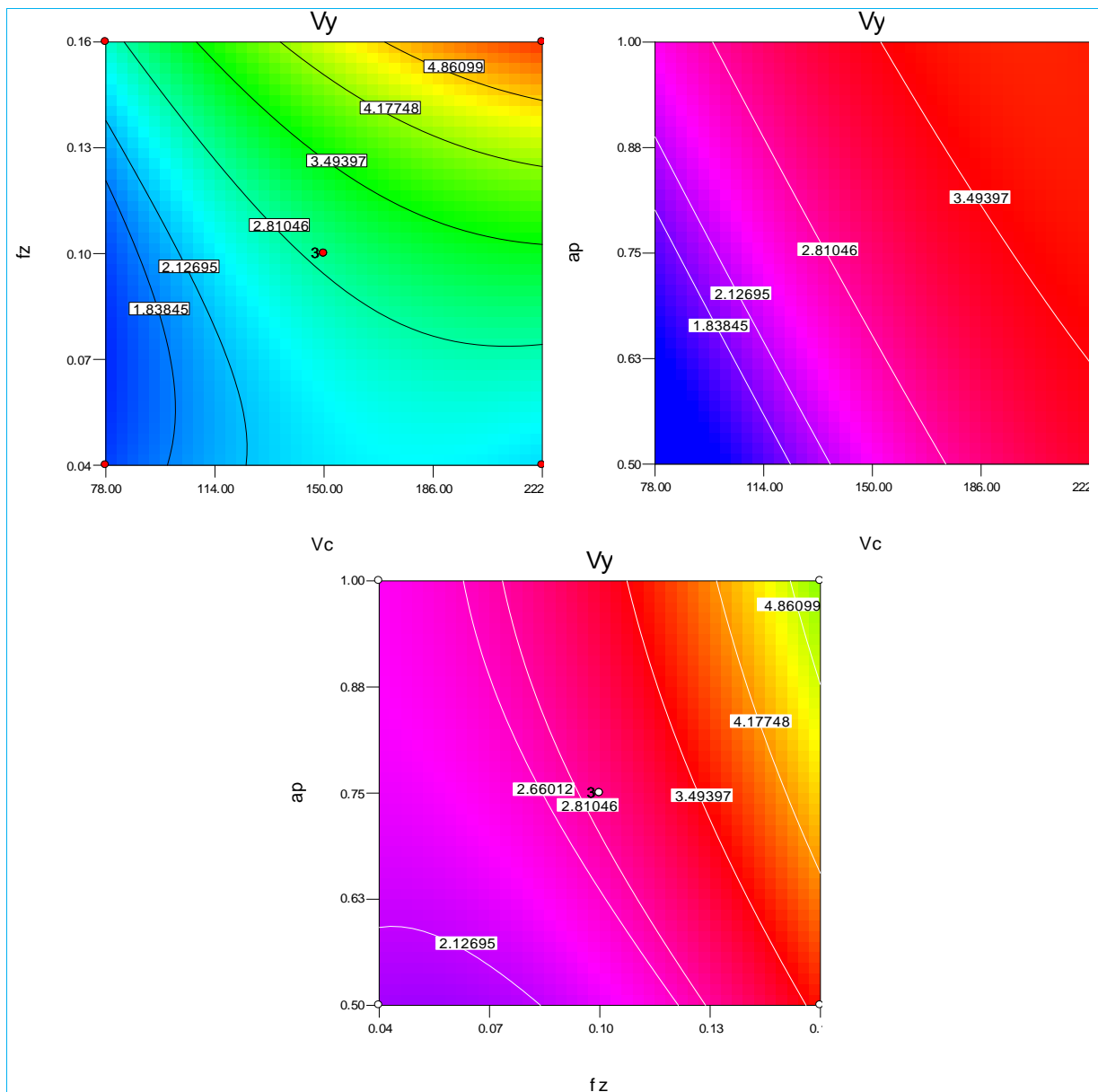


Fig. V.15. Graphe des contours des vibrations ( $V_y$ ) en fonction de ( $V_c, f_z$ ), ( $V_c, a_p$ ) et ( $f_z, a_p$ )

#### V.4.2.2.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour $V_y$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la rugosité ( $V_y$ ) sont représentée sur la figure V.16. L'analyse de cette figure montre une bonne corrélation entre les deux courbes. Le tableau V.7 montre le pourcentage d'erreur pour les 15 essais réalisés.

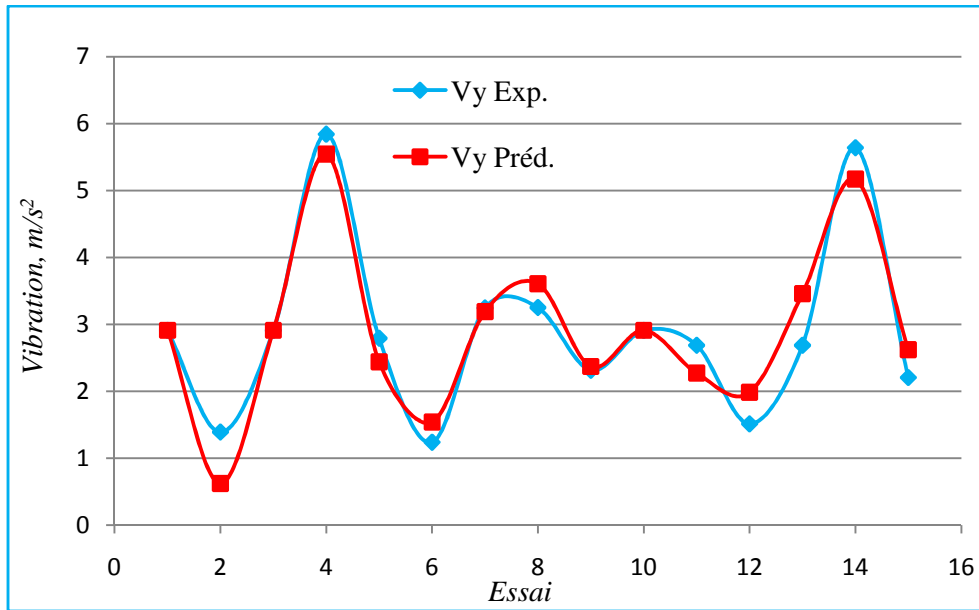


Fig. V.16. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de  $V_y$

Tableau V.7.

Pourcentage d'erreur pou  $V_y$

Essai	$V_y$ mesurés	$V_y$ prédites	Erreur %
1	2,911	2,91100	0 %
2	1,392	0,62212	55,30 %
3	2,911	2,91100	0 %
4	5,844	5,54450	5,12 %
5	2,794	2,43938	12,69 %
6	1,240	1,53950	12,45 %
7	3,246	3,19088	1,69 %
8	3,253	3,60763	9,82 %
9	2,316	2,37112	2,32 %
10	2,911	2,91100	0 %
11	2,689	2,27375	21,89 %
12	1,515	1,98538	23,69 %
13	2,689	3,45888	22,25 %
14	5,641	5,17063	8,33 %
15	2,207	2,62225	15,83 %

### V.4.2.3. ANOVA pour (Ra)

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) et des coefficients de régression des modèles mathématiques estimés pour la rugosité de surface (Ra) sont représentés aux [tableaux V.8](#) et [V.9](#) respectivement. Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions et de classer les trois éléments du régime de coupe et leurs interactions par ordre d'influence sur la rugosité (Ra).

La vitesse de coupe vient en première position avec une contribution de 28,93 %, la profondeur de passe vient en deuxième position avec un impact de 4,87 % et l'avance par dent vient en troisième position avec un effet de 2,83 % sur la rugosité (Ra).

On constate que l'interaction vitesse de coupe avec l'avance par dent ( $V_c * f_z$ ) a un impact significatif sur Ra, par contre les autres interactions n'ont pas un impact significatif.

L'équation de régression pour le critère de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $ap$ ) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) sont donnés par [l'équation V.3](#).

$$\begin{aligned} Ra = & -0.114644 + 0.00114873 V_c + 6.90625 f_z + 3.44167 ap \\ & + 3.39988e - 005 V_c * V_c - 0.0827546 V_c * f_z - 0.00861111 V_c * ap \\ & + 21.1806 f_z * f_z + 8.71018e - 015 f_z * ap - 1.7 ap * ap \end{aligned} \quad (V.3)$$

Avec,

$$R^2 = 84,96 \%$$

**Tableau V.8.**Analyse de la Variance (ANOVA) pour ( $R_a$ )

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
<b>Regression</b>	9	1,39611	1,39611	0,155124	3,1386	0,11038	84,96 %
<i>Vc</i>	1	0,47531	0,00088	0,000880	0,0178	0,89904	28,93 %
<i>fz</i>	1	0,04651	0,02654	0,026542	0,5370	0,49657	2,83 %
<i>ap</i>	1	0,08000	0,06352	0,063522	1,2852	0,30834	4,87 %
<i>Vc*Vc</i>	1	0,11881	0,11470	0,114698	2,3206	0,18817	7,23 %
<i>Vc*fz</i>	1	0,51122	0,51122	0,511225	10,3434	0,02357	31,11 %
<i>Vc*ap</i>	1	0,09610	0,09610	0,096100	1,9444	0,22198	5,85 %
<i>fz*fz</i>	1	0,02647	0,02147	0,021467	0,4343	0,53900	1,61 %
<i>fz*ap</i>	1	0,00000	0,00000	0,000000	0,0000	1,00000	0 %
<i>ap*ap</i>	1	0,04168	0,04168	0,041683	0,8434	0,40057	2,54 %
<b>Error</b>	5	0,24712	0,24712	0,049425			
<b>Lack-of-Fit</b>	3	0,24712	0,24712	0,082375			
<b>Pure Error</b>	2	0,00000	0,00000	0,000000			
<b>Total</b>	14	1,64324					

**Tableau V.9.**Coefficients pour  $R_a$ 

Term	Coef	SE Coef	T	P
<b>Constant</b>	-0,1146	1,5452	-0,07420	0,944
<i>Vc</i>	0,0011	0,0086	0,13345	0,899
<i>fz</i>	6,9062	9,4244	0,73281	0,497
<i>ap</i>	3,4417	3,0359	1,13367	0,308
<i>Vc*Vc</i>	0,0000	0,0000	1,52337	0,188
<i>Vc*fz</i>	-0,0828	0,0257	-3,21612	0,024
<i>Vc*ap</i>	-0,0086	0,0062	-1,39440	0,222
<i>fz*fz</i>	21,1806	32,1382	0,65905	0,539
<i>fz*ap</i>	0,0000	7,4106	0,00000	1,000
<i>ap*ap</i>	-1,7000	1,8512	-0,91834	0,401

### V.4.2.3.1. Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La figure V.17 montre les graphes des effets principaux des paramètres ( $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ ) sur la rugosité ( $R_a$ ). On remarque que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus influent sur la rugosité ( $R_a$ ) car il a la plus grande pente suivi par la profondeur de passe ( $ap$ ) et l'avance par dent ( $f_z$ ).

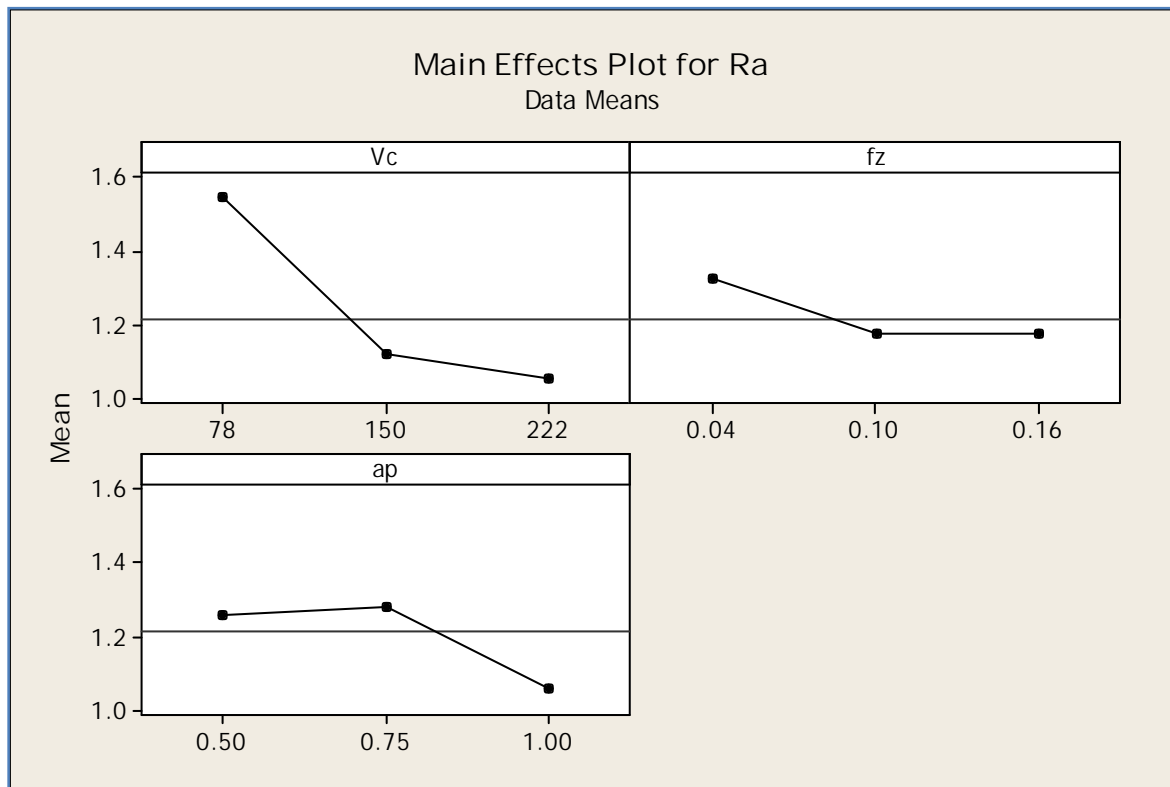


Fig. V.17. Graphes des effets principaux pour ( $R_a$ )

### V.4.2.3.2. Diagrammes de surfaces 3D et Graphiques de Contour pour ( $R_a$ )

La figure V 18 présente les diagrammes (3D) de la rugosité de surface ( $R_a$ ) en fonction des paramètres de régime de coupe. Cette figure montre que la pente de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité ( $R_a$ ), il est suivi par la profondeur de passe ( $ap$ ) et en dernier lieu par l'avance par dent ( $f_z$ ). D'autre part les graphes de contour (Fig. V.19) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas  $R_a$ ) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

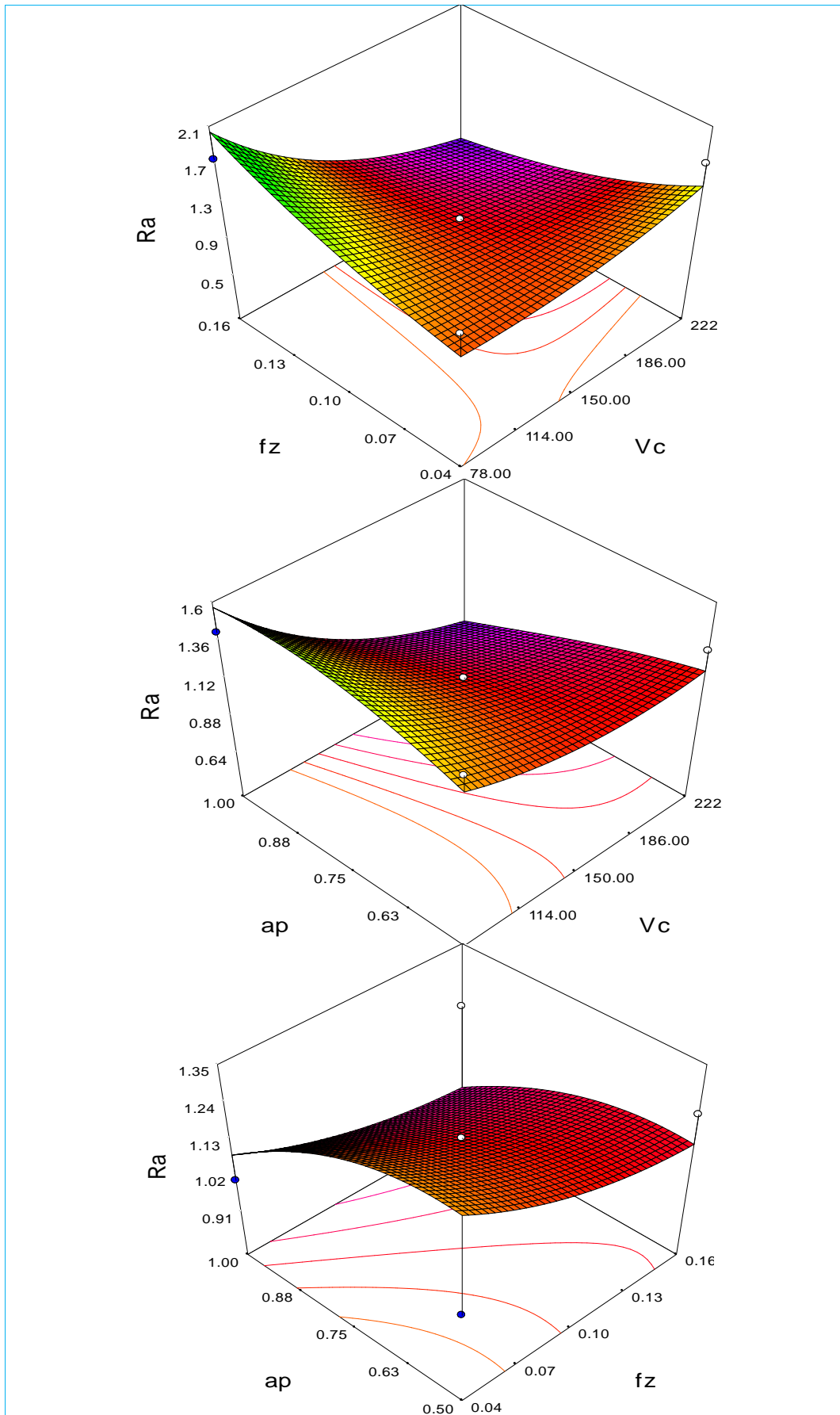


Fig. V.18. Surface de réponse de la rugosité ( $R_a$ ) en fonction de ( $V_c, f_z$ ), ( $V_c, a_p$ ) et ( $f_z, a_p$ ).

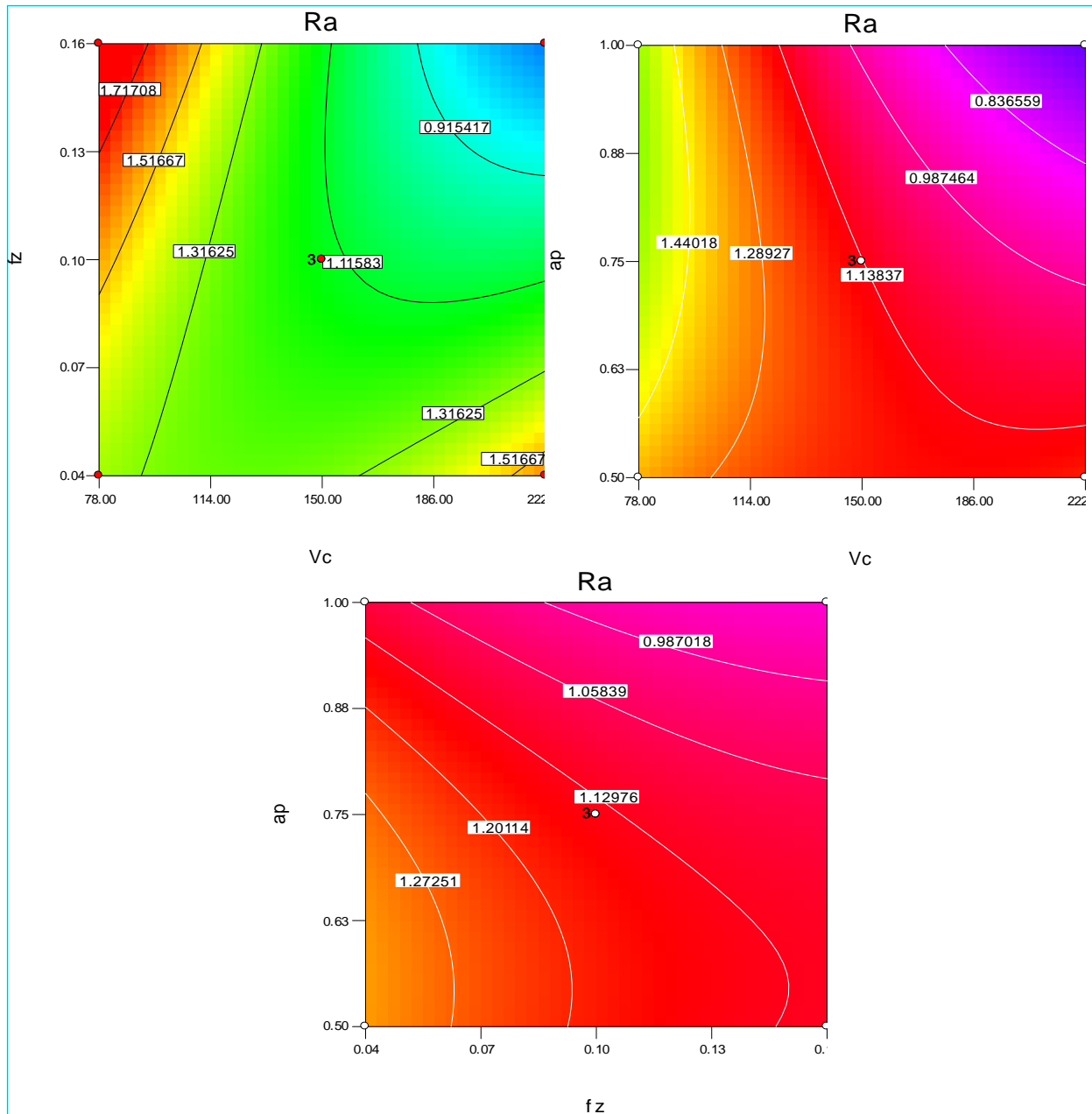


Fig. V.19. Graphe des contours de la rugosité ( $Ra$ ) en fonction de ( $Vc, fz$ ), ( $Vc, ap$ ) et ( $fz, ap$ )

#### V.4.2.3.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la rugosité ( $Ra$ ) sont représentées sur la figure V.20. L'analyse des résultats montre une bonne corrélation entre les deux courbes. Le tableau V.10 représente le pourcentage d'erreur pour les 15 essais réalisés.



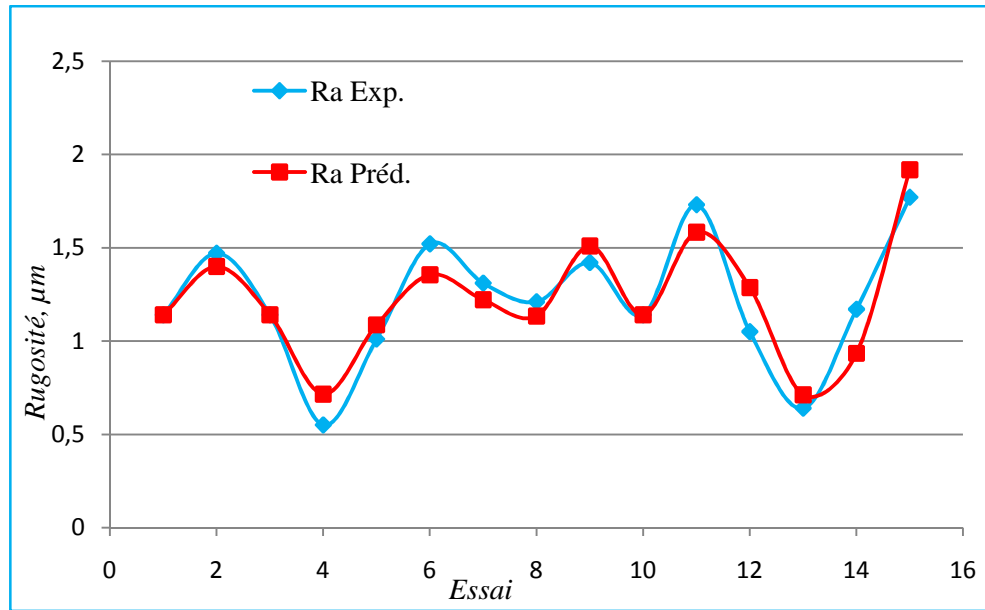


Fig. V.20. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra)

Tableau V.10.

Pourcentage d'erreur pou (Ra)

Essai	Ra mesurés	Ra prédites	Erreur %
1	1,14	1,14000	0 %
2	1,47	1,39875	4,84 %
3	1,14	1,14000	0 %
4	0,55	0,71500	23,07 %
5	1,01	1,08625	7,01 %
6	1,52	1,35500	10,85 %
7	1,31	1,22125	6,77 %
8	1,21	1,13375	0,94800 %
9	1,42	1,50875	6,30 %
10	1,14	1,14000	0 %
11	1,73	1,58250	8,52 %
12	1,05	1,28625	18,36 %
13	0,64	0,71125	10,01 %
14	1,17	0,93375	20,19 %
15	1,77	1,91750	7,69 %

La comparaison entre les valeurs réelles et prédites des vibrations ( $V_x$ ,  $V_y$ ) et la rugosité de surface ( $R_a$ ) est illustrée sur les figures V.21 à IV.23 respectivement. La légère différence entre ces deux valeurs prouve la bonne corrélation.

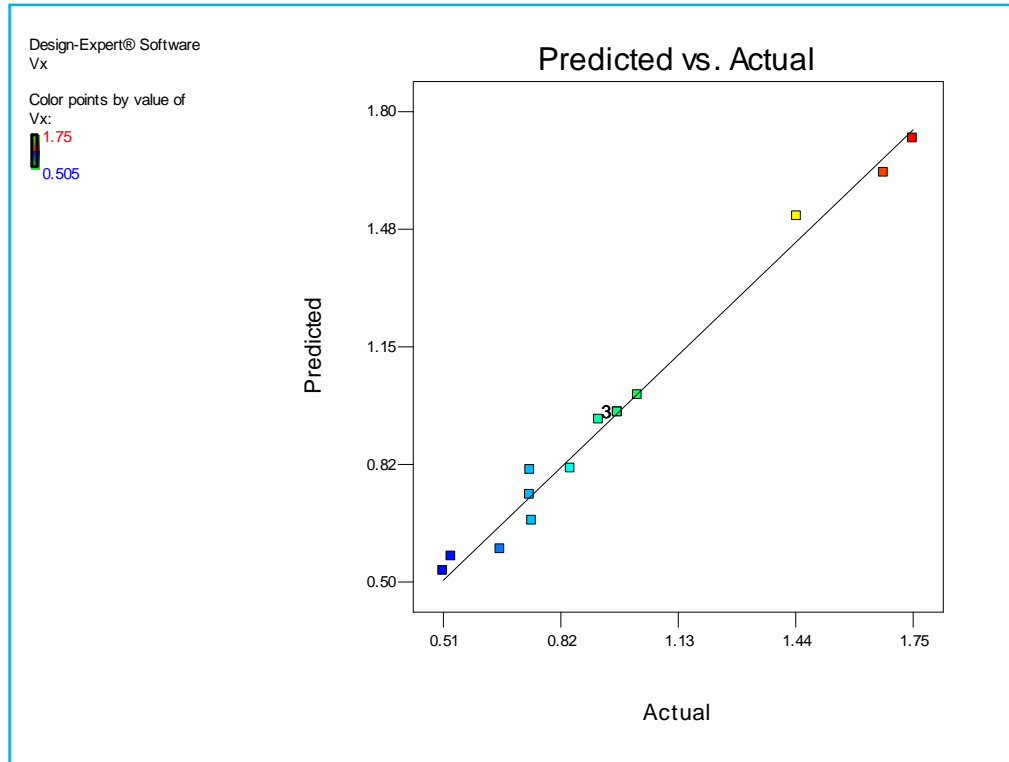


Fig. V.21. Valeurs réelles et prédites de ( $V_x$ )

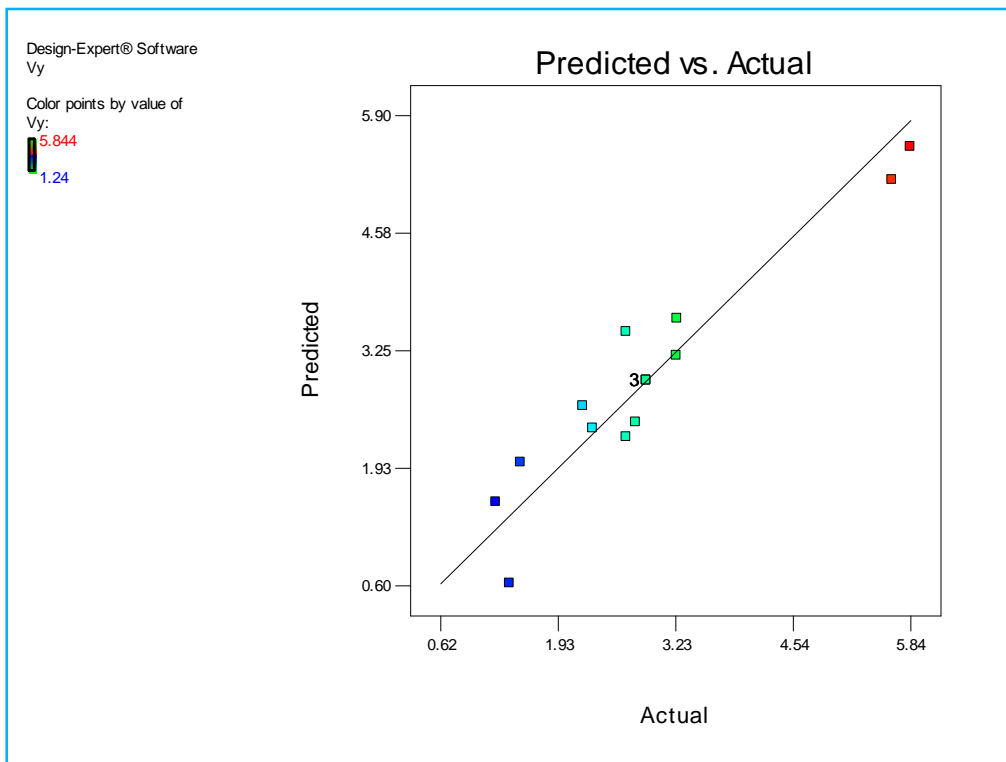
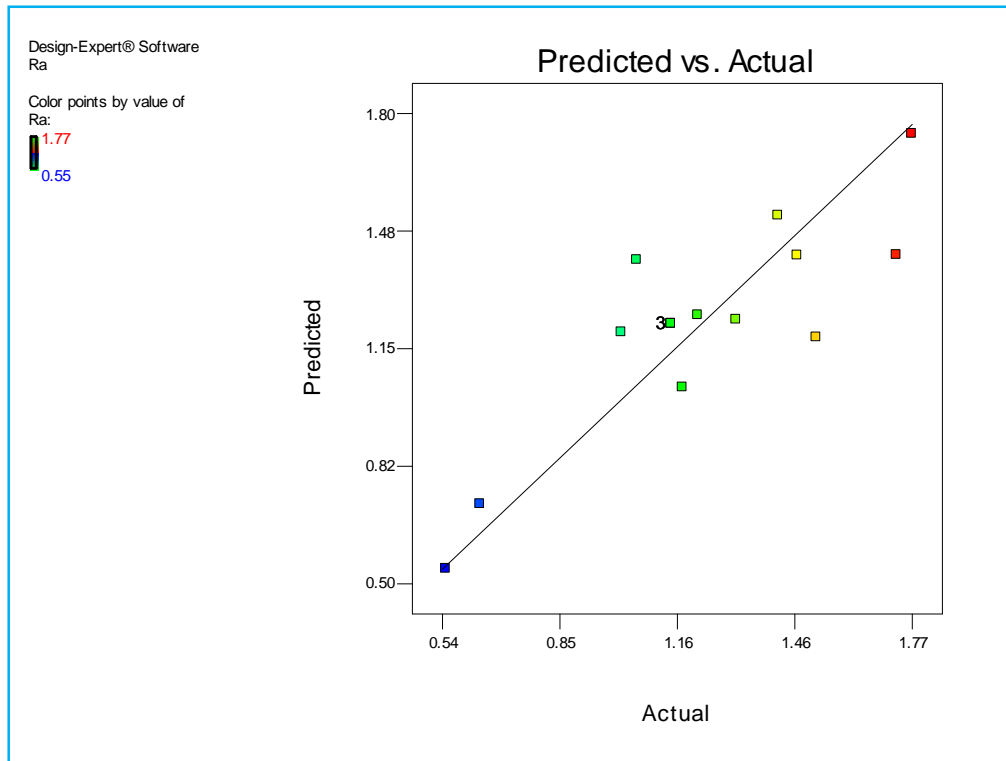


Fig. V.22. Valeurs réelles et prédites de ( $V_y$ )



*Fig. V.23. Valeurs réelles et prédites de (Ra)*

## V.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de bien comprendre l'influence des différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par dent, profondeur de passe) sur les différents paramètres technologiques ( $R_a$ ,  $V_x$  et  $V_y$ ) lors de fraisage de l'acier AISI1040. Aussi, l'application de la méthodologie de surface de réponse associée à l'analyse de la variance (ANOVA) nous ont permis de voir les paramètres de coupe qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres de sortie. Les modèles mathématiques trouvés, ont une grande importance économique dans le milieu industriel. Parce qu'ils permettent de prédire les paramètres de sortie ( $R_a$ ,  $V_x$ ,  $V_y$ ) et de faire une optimisation des conditions de coupe.

## CHAPITRE VI

### **APPLICATION DE L'APPROCHE DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS (ANN)**

## VI.1. Introduction

Les réseaux de neurones sont largement utilisés dans divers domaines, ils sont l'une des méthodes d'intelligence artificielle, qui sont basées sur le comportement du cerveau humain, tels que la reconnaissance de caractères, l'optimisation, la surveillance, la prévision, la compression de données, la parole, la médecine et de la vision ...etc. [65].

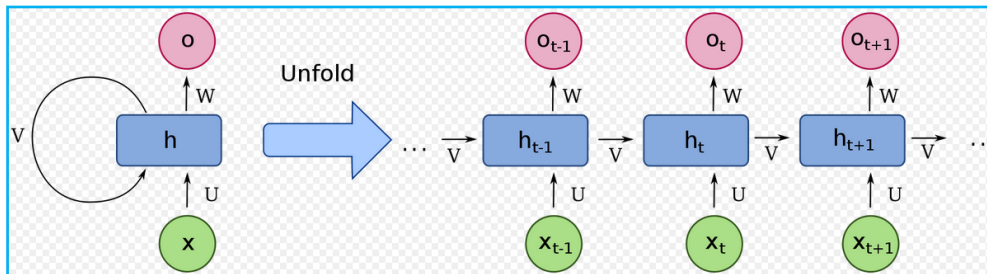
Dans la fabrication mécanique et les exigences de qualité, la minimisation du temps et du coût d'usinage poussent les fabricants à chercher des modèles capables de prédire le comportement souvent non linéaire entre différents paramètres du processus [66]. Ainsi, les modèles expérimentaux et analytiques, ou ceux appelés explicites (empiriques) qui sont développés en employant les approches conventionnelles telles que la technique statistique de régression qui est combinée avec la méthode de surface de réponse (MSR), sont restés comme une alternative dans la modélisation du processus d'usinage. Bien que la technique statistique de régression puisse fonctionner, cette technique peut ne pas décrire avec précision la relation complexe non linéaire entre les paramètres d'usinage et ceux de performance [67].

Récemment, il s'avère que les modèles basés sur l'intelligence artificielle sont devenus la tendance préférée des chercheurs grâce à leur grande efficacité à résoudre les problèmes de prédiction ou de surveillance [68].

## VI.2. Réseau de neurones artificiels

Un réseau de neurones récurrents (Fig. VI-1) est un réseau de neurones artificiels présentant des connexions récurrentes. Il est constitué d'unités (neurones) interconnectés interagissant non-linéairement et pour lequel il existe au moins un cycle dans la structure. Les unités sont reliées par des arcs (synapses) qui possèdent un poids. La sortie d'un neurone est une combinaison non linéaire de ses entrées [69]. Les réseaux de neurones récurrents sont adaptés pour des données d'entrée de taille variable. Ils conviennent en particulier pour l'analyse de séries temporelles. Ils sont utilisés en reconnaissance automatique de la parole ou de l'écriture manuscrite - plus en général en reconnaissance de formes - ou encore en traduction automatique. « Dépliés », ils sont comparables à des réseaux de neurones classiques avec des contraintes d'égalité entre les poids du réseau (voir schéma à droite). Les techniques d'entraînement du réseau sont les mêmes que pour les réseaux classiques (rétropropagation du gradient), néanmoins les réseaux de neurones récurrents se heurtent au problème de disparition du gradient pour apprendre à mémoriser des événements passés. Des architectures particulières répondent à ce dernier problème, on peut citer en particulier les

réseaux Long short-term memory. On peut étudier les comportements des réseaux de neurones récurrents avec la théorie des bifurcations, mais la complexité de cette étude augmente très rapidement avec le nombre de neurones.



**Fig. VI.1.** Schéma d'un réseau de neurones récurrents à une unité reliant l'entrée et la sortie du réseau. A droite la version « dépliée » de la structure [69]

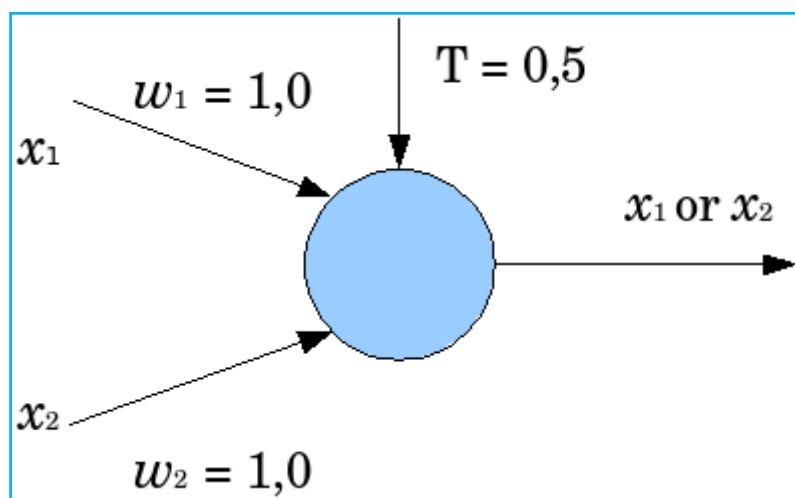
### VI.2.1. Neurone formel

Un neurone formel (Fig. VI.2) est une unité de traitement qui reçoit un nombre  $R$  d'entrées, sous la forme d'un vecteur  $P = [p_1, p_2, \dots, p_R]^T$ , chaque entrée est pondérée par un poids approprié  $w$  soit (Eq VI.1):

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b = Wp + b \quad (\text{VI.1})$$

La somme des entrées pondérées et des biais forme par la suite l'entrée de la fonction de transfert soit (Eq VI.2):

$$a = f(Wp + b) \quad (\text{VI.2})$$



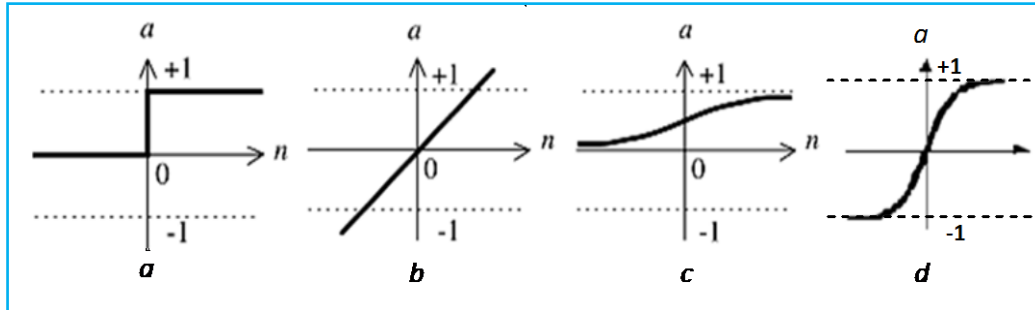
**Fig.VI.2.** Représentation d'un neurone formel (ou logique)

C'est cette valeur qui sera transmise aux neurones avales. Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert. A la différence des neurones biologiques dont l'état est binaire, la plupart des fonctions de transfert sont continues, offrant une infinité de valeurs possibles comprises dans l'intervalle  $[0, +1]$  (ou  $[-1, +1]$ ) [70].

Les différents types de neurones se distinguent donc par la nature  $f$  de leur fonction de transfert (Fig. VI.3). Les principaux types sont :

- Seuil  $f(x) = 1_{[0, +\infty[}(x)$ ,
- Linéaire  $f$  est la fonction identité ;
- Sigmoide  $f(x) = 1/(1 + e^x)$  ;
- Tangente hyperbolique (sigmoïde)  $f(x) = (2 / (1 + e^{-2x})) - 1$  ;
- Stochastiques  $f(x) = 1$  avec la probabilité  $1 / (1 + e^{-x/H})$ , 0 sinon (H intervient comme une température dans un algorithme de recuit simulé).

Les modèles linéaires et sigmoïdaux sont bien adaptés aux algorithmes d'apprentissage impliquant une rétropropagation du gradient car leur fonction d'activation est différentiable ; ce sont les plus utilisés [71].



**Fig.VI.3.** Fonctions de transfert de réseau de neurones (a) : fonction seuil, (b) : linéaire, (c) : tangente sigmoïde, (d) tangente hyperbolique [71]

### VI.2.2. Perceptron simple

Le perceptron simple est le réseau le plus simple qui existe puisqu'il se compose d'un seul neurone. On peut, par exemple, utiliser un tel réseau pour une tâche de classification d'un seul caractère. Pour classifier les 26 caractères de l'alphabet, on devrait alors combiner 26 perceptrons simples. Parce que nous considérons un seul neurone à la fois, nous n'utiliserons pas d'index pour le neurone de sortie [72].

### VI.2.3. Perceptrons multicouches

Les perceptrons multicouches (Fig.VI.4) sont organisés en couche de neurones. Les couches situées entre les nœuds d'entrée et les nœuds de sortie sont appelées : couches cachées. Les perceptrons multicouches sont plus flexibles que les perceptrons simples et peuvent résoudre des problèmes qui ne sont pas linéairement séparables. La règle d'apprentissage la plus importante pour ces réseaux est l'algorithme de rétropropagation [72].

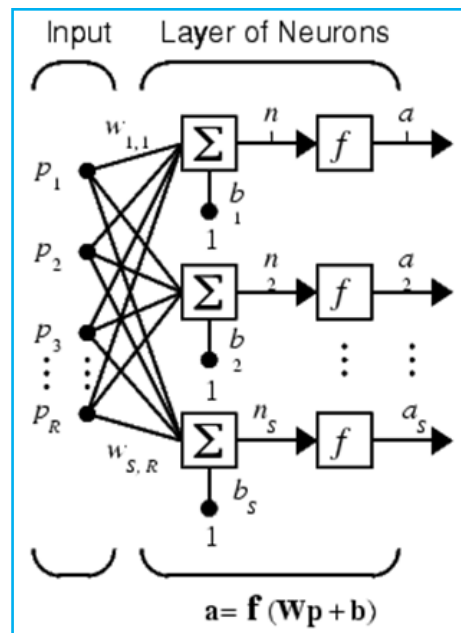


Fig.VI.4. Perceptron multicouche élémentaire avec une couche cachée et une couche de sortie [72]

### VI.2.4. Algorithme de rétropropagation

L'algorithme de rétropropagation est une descente de gradient appliquée à des perceptrons multicouches. Le but reste donc le même : minimiser la fonction d'erreur [72].

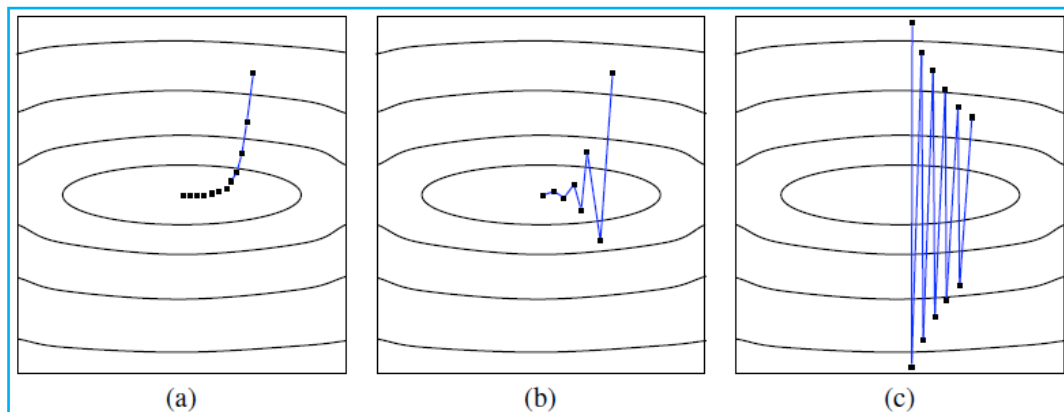
### VI.2.5. Apprentissage

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



En général, la fonction de performance utilisée dans l'apprentissage des modèles à réseau de neurones est la moyenne des carrés des erreurs entre les valeurs cibles et les valeurs obtenues par le réseau.

La trajectoire de la descente du gradient pour différents taux d'apprentissage est représentée sur la figure VI.5.



**Fig. VI.5.** Trajectoire de la descente du gradient pour différents taux d'apprentissage :  
(a) taux faible ; (b) taux moyen ; (c) taux (trop) élevé [72]

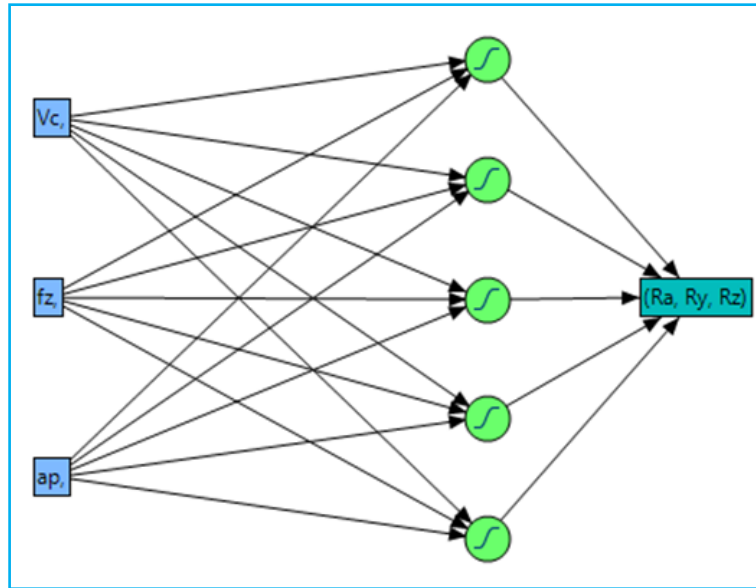
### VI.3. Modélisation des critères de la rugosité de surface ( $R_a$ , $R_y$ , and $R_z$ ) par ANN

Pour la modélisation par la méthode des ANN des critères de la rugosité de surface lors de fraisage de face de l'acier AISI 1040 par le carbure GC1030, on a utilisé un perceptron multicouche. Les résultats expérimentaux présentés dans le tableau VI.1 sont utilisés pour faire l'analyse. Le plan expérimental est composé de 27 essais, dont 24 essais sont employés pour l'apprentissage du réseau et 3 essais sont choisis arbitrairement pour tester la validité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones est fait par l'algorithme de rétropropagation qui est basé sur le gradient descendant. Plusieurs structures de réseau ont été testées, nous nous limitons à présenter seulement la structure qui a donné de meilleurs résultats qui est 3-5-1 (Fig. VI.6). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds qui correspond au nombre de paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $ap$ ), une couche cachée à 5 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul JMP 11 est utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau et l'enregistrement de différents résultats obtenus de l'ANN tel que le modèle mathématique et les coefficients de corrélation ( $R^2$ ) ainsi que la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

Tableau VI.1.

Résultats expérimentaux des critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ , and  $R_z$ )

N° d'essai	Facteurs			Réponses		
	$V_c$ , m/min	$f_z$ , mm/dt	$a_p$ , mm	$R_a$ , $\mu\text{m}$	$R_y$ , $\mu\text{m}$	$R_z$ , $\mu\text{m}$
1	78	0.04	0.2	2.23	13.84	12.18
2	78	0.04	0.4	2.29	15.12	12.22
3	78	0.04	0.6	2.32	14.86	12.66
4	78	0.08	0.2	2.37	12.93	12.22
5	78	0.08	0.4	2.4	15.83	12.83
6	78	0.08	0.6	2.42	16.05	13.09
7	78	0.16	0.2	2.58	16.82	13.65
8	78	0.16	0.4	2.6	18.67	14.61
9	78	0.16	0.6	2.62	20.55	15.47
10	157	0.04	0.2	1.5	7.89	7.47
11	157	0.04	0.4	1.54	8.16	7.64
12	157	0.04	0.6	1.55	8.17	7.92
13	157	0.08	0.2	1.59	8.56	7.68
14	157	0.08	0.4	1.6	8.57	7.74
15	157	0.08	0.6	1.61	9.3	8.28
16	157	0.16	0.2	1.62	9.84	7.86
17	157	0.16	0.4	1.64	10.22	8.62
18	157	0.16	0.6	1.65	11.04	9.38
19	314	0.04	0.2	0.5	3.27	2.73
20	314	0.04	0.4	0.48	3.71	3.01
21	314	0.04	0.6	0.51	2.85	3.05
22	314	0.08	0.2	0.55	2.92	3.81
23	314	0.08	0.4	0.6	3.32	3.14
24	314	0.08	0.6	0.62	3.77	3.3
25	314	0.16	0.2	0.65	3.7	3.36
26	314	0.16	0.4	0.76	3.35	3.74
27	314	0.16	0.6	0.82	4.83	4.17



**Fig. VI.6.** Architecture choisie pour les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  and  $R_z$ )

Le modèle mathématique de la rugosité de surface ( $R_a$ ) développé par ANN est exprimé comme suit (Eq. VI.3) :

$$R_a = -0.3057 * H1 - 1.5849 * H2 - 0.0337 * H3 + 0.4771 * H4 + 0.1040 * H5 + 2.3940 \quad (\text{VI.3})$$

Les valeurs des poids et des biais du modèle neuronal de la rugosité de surface ( $R_a$ ) sont :

$$H1 = \tanh(0.5 * (-0.0039 * V_c - 30.4689 * f_z + 0.9410 * a_p + 288852))$$

$$H2 = \tanh(0.5 * (0.01298 * V_c - 0.5045 * f_z + 0.0782 * a_p - 0.5679))$$

$$H3 = \tanh(0.5 * (0.01581 * V_c + 12.9429 * f_z + 6.4444 * a_p - 5.9696))$$

$$H4 = \tanh(0.5 * (-0.0186 * V_c - 14.1945 * f_z - 0.7818 * a_p + 5.3686))$$

$$H5 = \tanh(0.5 * (0.00037 * V_c + 6.5038 * f_z + 13.592 * a_p - 5.6502))$$

Le modèle proposé donne un coefficient de corrélation ( $R^2$ ) de 99,95721%, pour l'apprentissage et la validation ( $R^2$ ) est de 99,99972 % (tab. VI.2).

**Tableau VI.2.***Valeurs statistiques de l'analyse ANN de (Ra)*

	Apprentissage	Validation
R carré	0,9995721	0,9999972
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0157932	0,0011071
Écart absolu moyen	0,0054873	6.1279e <sup>-6</sup>
Nombre d'essais	22	5

Concernant le modèle de la rugosité (Ry) développé par ANN est exprimé par l'équation VI.4.

$$Ry = 1.8541 * H1 + 2.2513 * H2 - 6.6473 * H3 - 10.1933 * H4 - 4.9895 * H5 + 15.3532 \quad (\text{VI.4})$$

Où,

$$H1 = \tanh(0.5 * (-0.0297 * Vc + 8.3350 * fz - 13.0558 * ap + 9.2130))$$

$$H2 = \tanh(0.5 * (-0.0549 * Vc - 21.7392 * fz - 3.9119 * ap + 15.3289))$$

$$H3 = \tanh(0.5 * (-0.0216 * Vc + 8.4383 * fz + 0.9252 * ap + 3.3782))$$

$$H4 = \tanh(0.5 * (0.0206 * Vc - 3.5129 * fz - 1.7412 * ap - 1.7665))$$

$$H5 = \tanh(0.5 * (0.0045 * Vc - 14.0532 * fz - 2.9204 * ap + 3.1098))$$

Le modèle proposé donne un coefficient de corrélation de 99,65746 % pour l'apprentissage et pour la validation le R<sup>2</sup> est de 99,17698 %. (Tab. VI.3).

**Tableau VI.3.***Valeurs statistiques de l'analyse ANN pour la rugosité (Ry)*

	Apprentissage	Validation
R carré	0,9965746	0,9917698
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,3189613	0,417748
Écart absolu moyen	0,2631884	0,3558928
Nombre d'essais	22	5

Enfin l'équation VI.5 représente le modèle mathématique de la rugosité (Rz) développé par ANN.

$$Rz = 7.3060 * H1 + 4.1938 * H2 - 7.4869 * H3 + 7.9298 * H4 + 1.2155 * H5 + 13.3829 \quad (VI.5)$$

Avec;

$$H1 = \tanh(0.5 * (-0.0148 * Vc + 62.8745 * fz - 4.8181 * ap - 1.6204))$$

$$H2 = \tanh(0.5 * (-0.0494 * Vc - 11.8896 * fz + 0.5732 * ap + 8.7119))$$

$$H3 = \tanh(0.5 * (-0.0181 * Vc + 68.7779 * fz - 4.2329 * ap - 2.0809))$$

$$H4 = \tanh(0.5 * (-0.0111 * Vc + 7.9150 * fz + 1.0994 * ap - 1.1739))$$

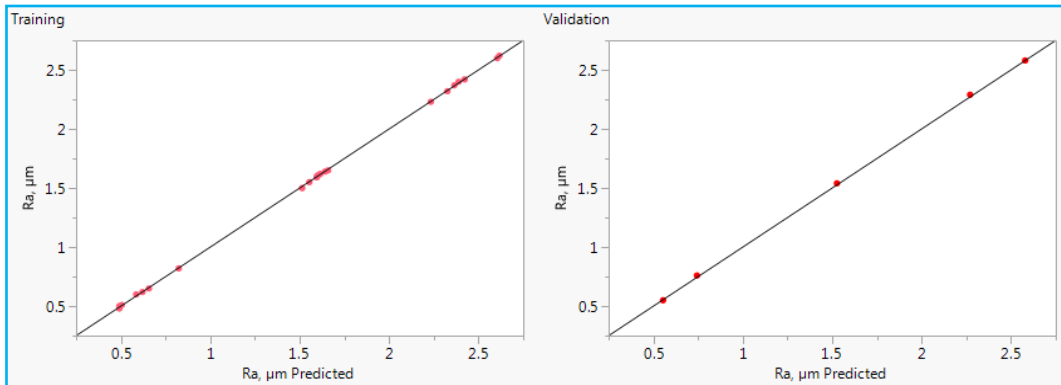
$$H5 = \tanh(0.5 * (0.3774 * Vc + 620.1952 * fz + 24.1552 * ap - 146.0737))$$

Le modèle proposé donne un coefficient de corrélation de 99,99998 % pour l'apprentissage et pour la validation le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) est de 99,9802 %. (Tab. VI.2).

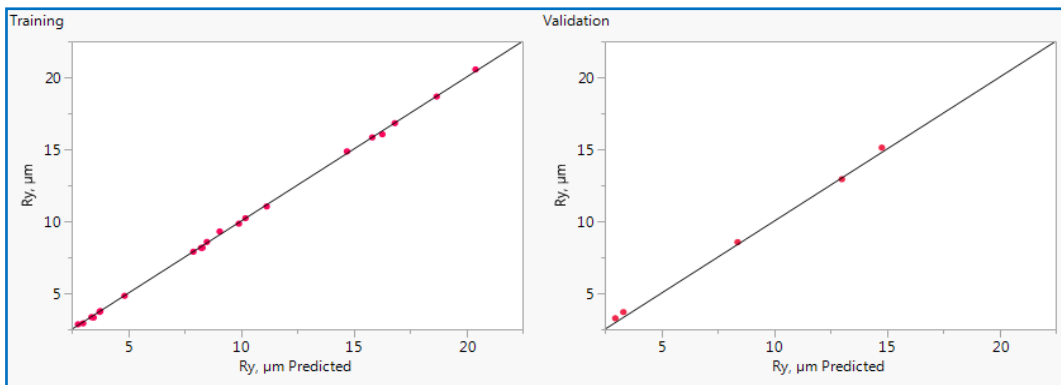
**Tableau VI.4.***Valeurs statistiques de l'analyse ANN pour la rugosité (Rz)*

	Apprentissage	Validation
$R^2$	0,9999998	0,999802
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0017111	0,0670902
Écart absolu moyen	0,0013144	0,055055
Nombre d'essais	21	6

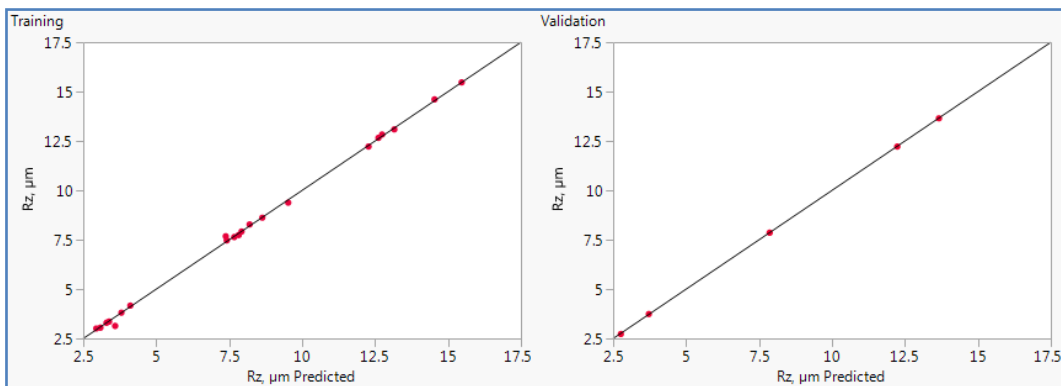
La figure VI.7 à VI.9 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et celles prédites des critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) respectivement à l'aide des modèles trouvés par l'analyse ANN. En analysant ces figures, nous pouvons remarquer que les points d'intersection entre les valeurs expérimentales et estimées sont très proches à la ligne moyenne ce qui prouve l'efficacité du modèle soit pour les valeurs destinées à l'apprentissage ou celles destinées pour la validation du modèle.



*Fig. VI.7. Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour ( $R_a$ )*



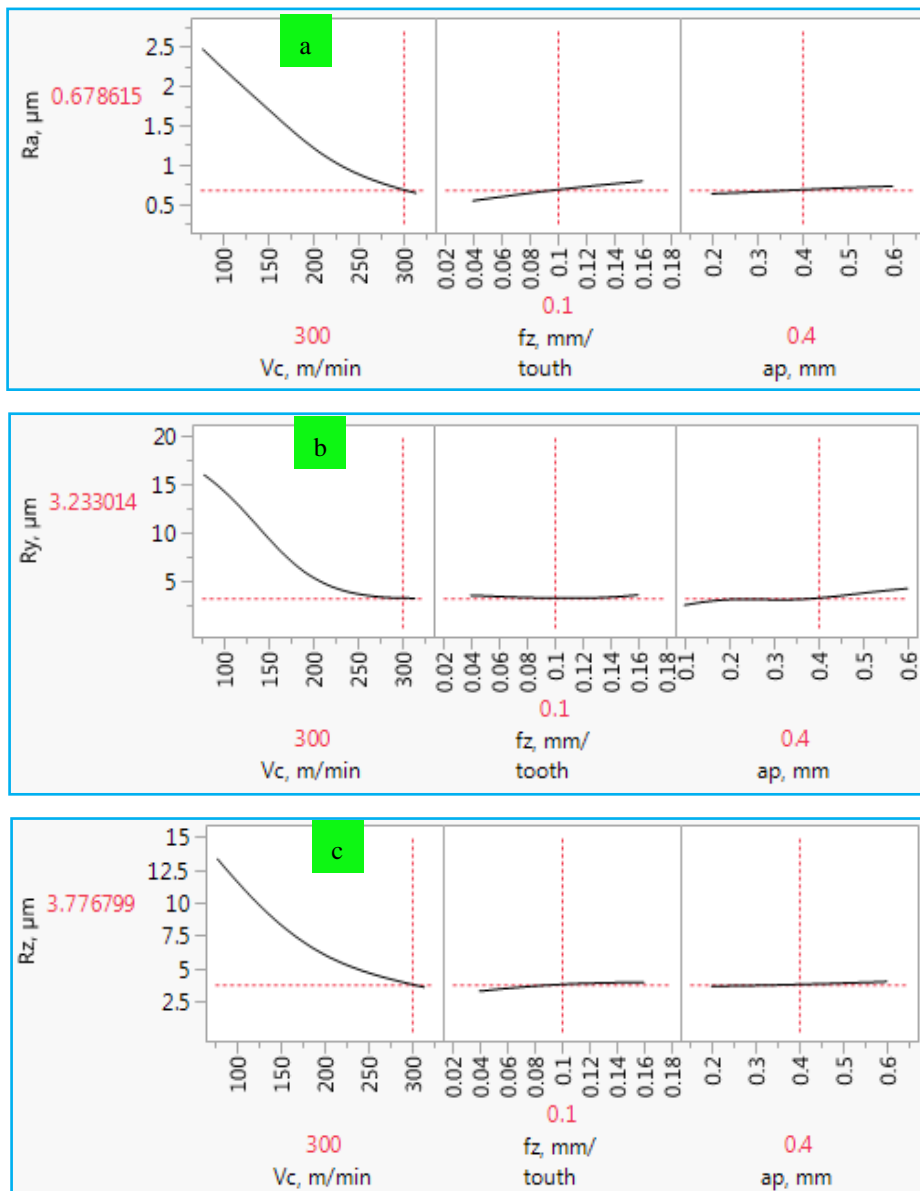
*Fig. VI.8. Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour ( $R_y$ )*



*Fig. VI.9. Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour ( $R_z$ )*

L'évolution des critères de la rugosité de surface en fonction de différentes conditions de coupe est illustrée dans les figures VI.10.a, b et c. Cette dernière est tracée à partir du modèle et on peut conclure que la rugosité ( $R_a$ ) diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et augmente avec l'avance par dent.

A titre d'exemple: pour les valeurs de  $R_a = 0,678615 \mu\text{m}$ ,  $R_y = 3,233014 \mu\text{m}$  et  $R_z = 3,776797 \mu\text{m}$ , il est nécessaire de choisir  $V_c = 300 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,1 \text{ mm/dent}$  et  $a_p = 0,4 \text{ mm}$ .



**Fig. VI.10.** Profils de prédiction: Rugosité de la surface en fonction de paramètres de coupe

#### VI.4. Comparaison entre les modèles ANN et RMS

Le [tableau V.5](#) présente les coefficients de détermination ( $R^2$ ) des modèles des critères de la rugosité (Ra, Ry et Rz) développés en utilisant la méthode de la surface de réponse (RSM) et les réseaux neuronaux artificiels (ANN). On remarque que les deux méthodes donnent des coefficients de corrélation très proche à un (1).

**Tableau IV.5.**

*Détermination des coefficients de RSM et ANN*

Response	Coefficient de détermination ( $R^2$ )		
	ANN		RSM
	Apprentissage	Validation	
Ra ( $\mu\text{m}$ )	99,95721 %	99,99972 %	97.27
Ry ( $\mu\text{m}$ )	99,65746 %	99,17698 %	93.15
Rz ( $\mu\text{m}$ )	99,99998 %	99,9802 %	98.53

Enfin, les courbes des [figures VI.11](#) à [VI.13](#) sont utilisées pour comparer les valeurs prédites (fournies par les modèles) des critères de rugosité de surface (Ra, Ry et Rz) en utilisant les modèles RSM et ANN avec les valeurs expérimentales afin d'évaluer l'ajustement des modèles. L'analyse a montré une bonne corrélation entre les trois courbes (les valeurs prédites et expérimentales sont presque les mêmes), mais avec une légère précision pour les modèles ANN contrairement aux valeurs estimées par RSM où il y a des valeurs qui sont éloignées aux valeurs expérimentales. Ainsi, les modèles mathématiques développés peuvent effectivement être utilisés pour prédire les critères de rugosité de surface.



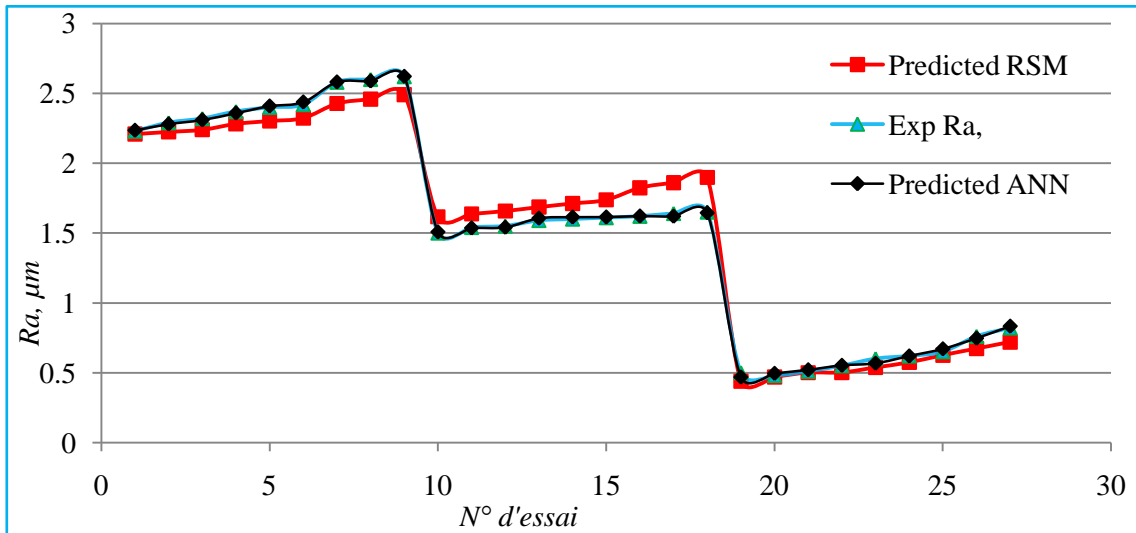


Fig. VI.11. Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par RSM et ANN pour ( $R_a$ )

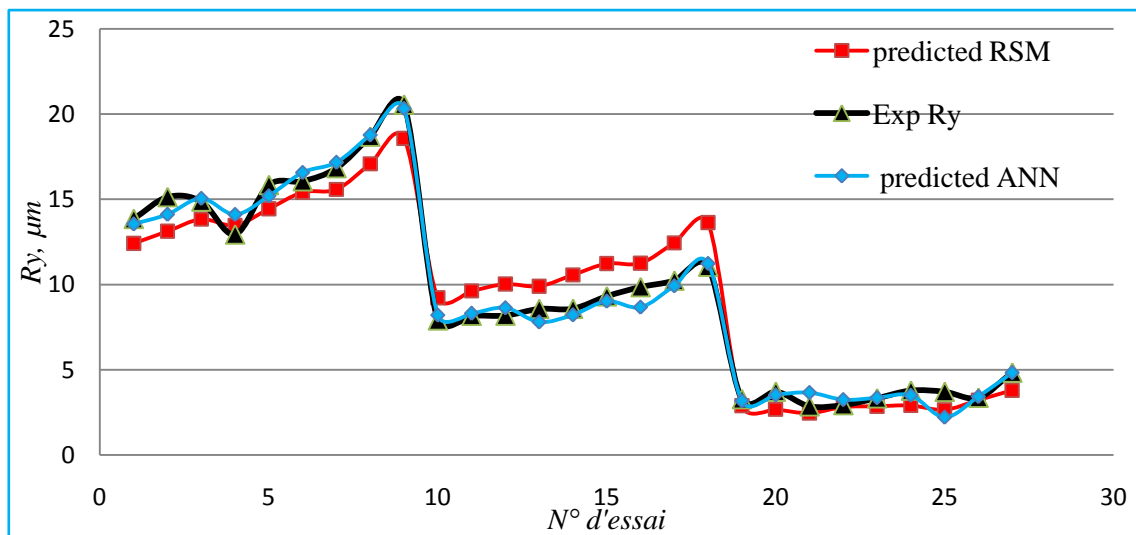


Fig. VI.12. Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par RSM et ANN pour ( $R_y$ )

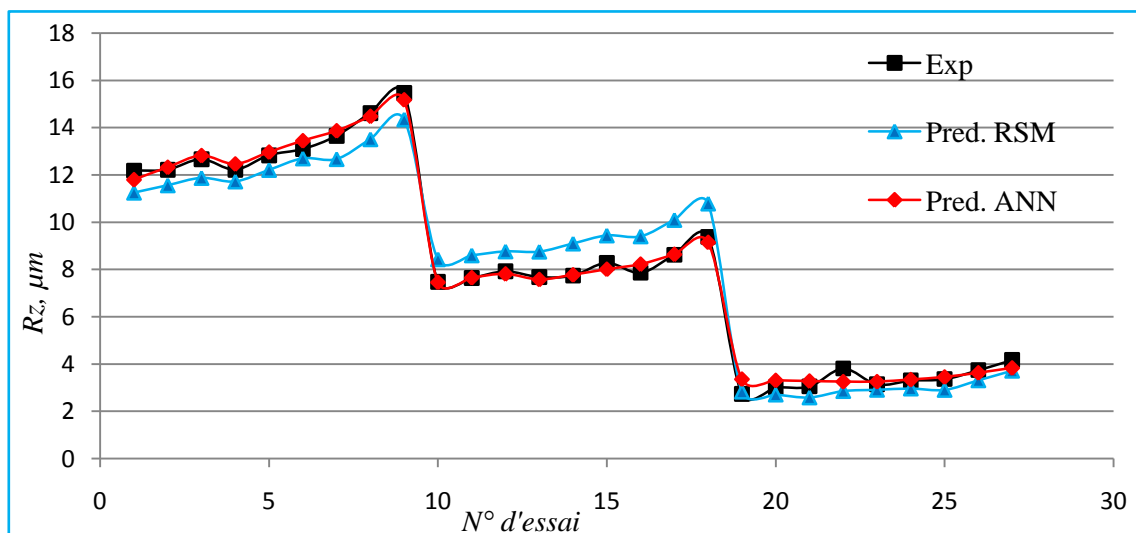


Fig. VI.13. Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par RSM et ANN pour ( $R_z$ )

### **VI.5. Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, on a utilisé la méthode de réseau de neurones artificiels pour modéliser les critères de la rugosité de surface pour un plan complet L27 pour l'acier AISI 1040 par des plaquettes de coupe en carbure revêtu. On a conclu que cette méthode donne un coefficient de corrélation très proche de un (1). La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par RSM et ANN nous a conduits à conclure que les modèles des ANN sont plus robustes et plus fiables par rapport aux modèles obtenus par la méthode de la surface de réponse RSM.

## CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Les essais de fraisage de face de l'acier AISI 1040 à l'aide des plaquettes de coupe en carbure revêtu GC1030 et cermet CT 530 nous ont permis d'évaluer les performances de ces deux différentes plaquettes de coupe en terme critères de rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ), de débit de copeaux ( $Q$ ), de vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ), d'usure en dépouille et de développer des modèles prédictifs et d'optimiser les conditions de coupe afin de minimiser les critères de la rugosité et maximiser le débit de copeaux. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

- Les résultats des essais paramétriques (uni-factoriels) lors du fraisage de l'acier AISI 1040 avec les plaquettes en carbure revêtu GC1030 et cermet CT 530 montrent que :

- ✓ L'avance par dent est l'un des paramètres de coupe dont l'effet est significatif sur les critères de la rugosité de surface pour les deux matériaux de coupe. L'augmentation de l'avance de 0.007 à 0.2254 (mm/dent) fait accroître les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) de (63,24 %, 32,82 %, 50,14 % et 75,16 %) pour GC1030 et pour CT530 l'augmentation est de (74,42%, 52,39%, 32,46% et 75,21%) respectivement.

- ✓ L'augmentation de la vitesse de coupe améliore d'une manière significative l'état de surface pour les deux matériaux de coupe. L'accroissement de la vitesse de coupe de 19.78 à 314 m/min fait diminuer les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ , et  $R_q$ ) respectivement de (92,95%, 92,95%, 86,95% et 97,79%) pour la plaquette GC1030. Et pour le cermet CT530 l'augmentation de ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ , et  $R_q$ ) est de (95,28%, 92,09%, 92,6% et 96%) respectivement.

- ✓ La profondeur de passe ( $ap$ ) est moins importante que l'avance et la vitesse de coupe, elle ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité des surfaces usinées.

- ✓ Le fraisage en avalant donne des résultats de rugosité de surface meilleurs que le fraisage en opposition et cela pour toutes les conditions de coupe utilisées.

- ✓ Les valeurs de la rugosité obtenus par le fraisage avec lubrification sont meilleures que celles obtenues par l'usinage à sec. A titre d'exemple pour une avance par dent  $f_z = 0.0282$  mm/dt,  $ap = 0,3$  mm/dt et  $V_c = 222$  m/min, le

pourcentage de réduction de ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) lors du fraisage lubrifié par rapport au fraisage à sec et respectivement de (70,34%, 44,67%, 42,82%, 63,07%) pour le GC1030, pour CT530 le pourcentage de réduction et de 24,14%, 10,14%, 8,51%, 27,91%.

✓ La qualité des surfaces obtenues lors de l'usinage avec les outils en cermet CT530 est comparable à celle obtenue en rectification. Cet avantage présente un atout économique, puisqu'il nous permet de réduire les phases de fabrication des pièces (ébauche, demi-finition, finition) sur la même machine-outil.

- Les résultats des essais d'usure du carbure GC1030 et avec les conditions de coupe suivantes:  $V_c = 439,6$  m/min (1400 tr/min),  $f_z = 0,114$  mm/dt (800 mm/min) et  $a_p = 0,6$  mm montrent que :

✓ La durée de vie de la plaquette est de 2247 Sec équivalent à une longueur de coupe totale  $L_c = 29960$  mm.

✓ Bien que l'usure en dépouille maximale  $VB_{max} = 0,6$  mm, la rugosité de surface ( $R_a$ ) ne dépasse pas la valeur de  $0,7 \mu\text{m}$ , ceci est dû à la géométrie de la plaquette, qui a un bord de raclage. Ce résultat est très intéressant pour les fabricants, lorsque la rugosité de surface minimale est recherchée.

- L'utilisation du rugosimètre (3D) (Alti surf 500) s'est révélée être un outil très utile pour le développement des cartes topographiques tridimensionnelles des surfaces usinées, ce qui a pour effet dans notre cas de comprendre les caractéristiques des surfaces fraisées de l'acier AISI 1040. Il est clair sur les graphes 3D que les arrachements de la matière sont bien visibles.

- Les méthodes de modélisation et d'optimisation utilisées à savoir, RSM, ANOVA et la fonction de désirabilité (DF) pour le plan factoriel (L27) lors des essais de fraisage de l'acier AISI 1040 avec le carbure revêtu (GC1030) mènent aux conclusions suivantes :

✓ L'analyse ANOVA des critères de la rugosité de surface révèle que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) a un impact significatif sur les différents critères de rugosité étudiés ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) avec des contributions de 95,51%, 86,74% et 92,20% respectivement. Pour les avances par dent ( $f_z$ ) les contributions sont respectivement de 1,5 %, 3,52 % et 1,88 %, ceci est dû à la géométrie des plaquettes de coupe qui présentent un bord

de raclage qui permet d'obtenir une faible rugosité même à des vitesses d'avance importantes. D'autre part la profondeur de passe ( $ap$ ) a des faibles contributions.

✓ L'analyse ANOVA concernant le débit de copeaux indique que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et l'avance par dent ( $f_z$ ) sont les paramètres les plus influents, leurs contributions sont de 30,76 % pour ces deux facteurs, par contre la profondeur de passe ( $ap$ ) sa contribution est de 17,94%.

✓ Les coefficients de détermination ( $R^2$ ) des différents modèles ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $Q$ ) sont tous élevés et qui varient entre (93,15 et 98,53) %, ce qui prouve la bonne adéquation. Ces modèles mathématiques ont un intérêt industriel important car ils permettent de faire une prédiction et une optimisation.

✓ Les graphes de contour déterminés dans ce travail, permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

✓ En se basant sur la méthode de la surface de réponse (RSM) et la fonction de désirabilité, les paramètres de coupe optimales qui minimisent la rugosité et maximisent le débit de copeaux sont comme suit:  $V_c = 314$  m/min,  $f_z = 0,16$  mm/dt et  $ap = 0,6$  mm. Les réponses optimales sont  $R_a = 0.709548$   $\mu\text{m}$ ,  $R_y = 3.79162$ ,  $R_z = 3.69408$   $\mu\text{m}$  et  $Q = 32804.9$   $\text{mm}^3/\text{min}$ , avec une désirabilité combinée de 0.924.

• Les résultats des essais paramétriques pour l'étude de l'influence des différents paramètres de régime de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $ap$ ) sur la rugosité  $R_a$  et les vibrations  $V_x$  et  $V_y$  ainsi que leur modélisation pour un plan box-behnken ont abouti aux conclusions suivantes :

✓ les deux modes d'usinage donnent presque les mêmes valeurs de vibration pour la direction ( $V_x$ ) avec un avantage pour le fraisage en opposition.

✓ Pour la direction ( $V_y$ ), le fraisage en opposition donne des vibrations élevées et cela est valable pour toutes les conditions de coupe testées.

✓ L'analyse ANOVA de la vibration  $V_x$  révèle que la vitesse de coupe est le facteur le plus important qui affecte  $V_x$  avec une contribution de 44,18 %, suivie par l'avance par dent ( $f_z$ ) avec une contribution de 27,58 %, enfin la profondeur de passe avec une contribution de 15,27 %. L'interaction ( $V_c*f_z$ ) a une contribution de 7,49 %, les interactions ( $f_z*ap$ ) et ( $V_c*ap$ ) ont des faibles contributions, par conséquent, ils ne sont pas significatifs.

✓ L'analyse ANOVA de la vibration  $V_y$  indique que l'avance par dent vient en première position avec une contribution de 39,01 %, suivi par la vitesse de coupe avec une contribution de 27,52 % et la profondeur de passe vient en troisième position avec un effet de 8,37 %. On constate que toutes les interactions ont des faibles contributions.

✓ L'analyse ANOVA de la rugosité de surface  $R_a$  révèle que la vitesse de coupe vient en première position avec une contribution de 28,93 %, suivie de la profondeur de passe avec un impact de 4,87 % et enfin l'avance par dent avec un effet de 2,83 % sur  $R_a$ . L'interaction ( $V_c * f_z$ ) a un impact significatif sur  $R_a$  de 31,11 %, par contre les autres interactions ont des faibles contributions.

✓ L'analyse de résultat montre que le modèle mathématique de  $V_x$  est le modèle le plus représentatif car son  $R^2 = 98,70$  %, il est suivi par le modèle de  $V_y$  avec un  $R^2 = 90,08$  % et en dernier le modèle de  $R_a$  avec un  $R^2 = 84,96$  %.

- Les coefficients de corrélation ( $R^2$ ) des modèles ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) développés en utilisant la méthode des réseaux neuronaux artificiels (ANN) lors de fraisage de face de l'acier AISI 1040 par GC1030 sont tous très proches de 100 %. Pour le modèle ( $R_a$ ) le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) est de (99,95721 et 99,99972) %, pour ( $R_y$ ) est de (99,65746 et 99,17698) % et pour ( $R_z$ ) est de (99,99998 et 99,9802)% respectivement pour l'apprentissage et la validation.

- Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- ✓ L'utilisation d'autres outils de coupe, et autres géométries d'outils pour l'étude de l'usinabilité de l'acier AISI 1040 quand il subit un traitement thermique (trempe).

- ✓ La réalisation de nouveaux tests d'usinage, afin de vérifier la validité des observations effectuées dans d'autres conditions expérimentales. La modification des paramètres tels que la vitesse de coupe, la profondeur de passe.

- ✓ L'utilisation d'autres méthodes de modélisation et d'optimisation.

- ✓ L'étude de l'évolution de la température de coupe et de la puissance en fonction des conditions de coupe.

- ✓ L'étude de l'influence des paramètres de coupe sur les vibrations de la fraise.

---

## Références bibliographiques

- [1] Segreti, M. (2002). Vibrations en coupe orthogonale. Modélisation, étude de stabilité et validation expérimentale, Thèse, Université de Metz.
- [2] Claudiu-Florinel, B., Philippe, D., Jean-Yves, K., Olivier, C., Raynald, L., Alain, G., Constantin, I. (2007). New vibrations phenomena analysis in turning. *Mécanique & Industries*, 8 (5) 497-503.
- [3] Philippe, D. (2004-2005). Fabrication Mécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Licence de Technologie et Mécanique.
- [4] Raynald, L. (2004). Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux, École doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur.
- [5] Société Sandvik-Coromant. (Date de publication : 10 janv. 2001). Fraisage – Principes, Référence BM7082 |
- [6] Procédés d'usinage (Les Sélections Techniques de l'Ingénieur), Réf. Internet : 42190.
- [7] From Wikipedia, the free encyclopedia. (Octobre 2008). Milling cutter.
- [8] Lionel, A. Vibrations d'usinage-Comment les identifier et les limiter.
- [9] Taylor, F.W. On the art of cutting metals. *Transaction of ASME*, 28 (1907).
- [10] Seguy, S. (2008). De l'adaptation à la variation continue de la vitesse de broche afin de contrôler le broutement en fraisage de parois minces : modélisations et études expérimentales. *Mécanique [physics.med-ph]*. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT. Français. <tel-00374725>.
- [11] Wehbe, T. (2010). Étude des vibrations de pièce mince durant l'usinage par stéréo corrélation d'images. *Génie mécanique [physics.class-ph]*. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT. Français. <Tel-00744372>.
- [12] Coromant, S. (1997). Comment réduire les vibrations lors de l'usinage des métaux, Guide de l'utilisateur Sandvik Coromant. 9, 44–58.

- 
- [13] Blanchard, N., Thierry, R et Emmanuel, D. (2005). Lobes de stabilité en UGV approche expérimentale en usinage de poches. *Mécanique & Industries*, 6(4), 411-415.
- [14] Peigne, G. (2003). Etude et simulation des effets dynamiques de la coupe sur la stabilité de la coupe et la qualité géométrique de la surface usinée : application au fraisage de profil, Thèse de l'Institut national polytechnique de Grenoble.
- [15] Dowson, D. (1979). *History of Tribology*, Longman, London.
- [16] Coulomb, A. (1782). *Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages*. Imprimerie du Moutard, Paris.
- [17] Tony Da Silva, B. (2004). Contribution à l'étude du comportement elasto plastique de surfaces métalliques rugueuses revêtues d'un métal de faible dureté. Thèse Pour l'obtention du Grade de Docteur de l'Université de Poitiers.
- [18] Michaël, F., Arnaud, D. & Daniel, D. 2007. Optimisation de la géométrie d'outil en fraisage à partir de la prédiction analytique des efforts de coupe. *AFM, Maison de la Mécanique*, 39/41 rue Louis Blanc - 92400 Courbevoie. [Http://hdl.handle.net/2042/16168](http://hdl.handle.net/2042/16168).
- [19] Recommandations Générales Pour le Fraisage.  
[Http://www.dormertools.com/sandvik/2531/internet/s004114.nsf](http://www.dormertools.com/sandvik/2531/internet/s004114.nsf).
- [20] Fraisage sur petite fraiseuse. Guide méthodique micromécanicien, édition 2007.  
[http://jvr33.free.fr/pdf\\_laser/16\\_cnc/Proc%E9d%E9s\\_et\\_Techniques/Fraisage\\_sur\\_petite\\_fraiseuse.pdf](http://jvr33.free.fr/pdf_laser/16_cnc/Proc%E9d%E9s_et_Techniques/Fraisage_sur_petite_fraiseuse.pdf).
- [21] Claude Barlier. Les matériaux pour outils de coupe en usinage. Novembre 2012 - Equip'prod. <http://www.equip-prod.com/voir43megazinesrcPDF6.pdf>.
- [22] Bouchelaghem, H. (2011). Etude du comportement des outils CBN lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D3. Université de Guelma. Thèse de doctoral.
- [23] Dawson.T.G, Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools Gorgia institute of technology 2002.
- [24] Mosan. A. « Optimisation économique des opérations de tournage » *Ingénieurs et techniciens* 12,1975, pp.43-48.
- [25] Yusuf, K., Nukman, Y., Yusof, T. M. , Dawal, S. Z. , Qin Yang, H. , Mahlia, T. M. I. and Tamrin, K. F. (2010). Effect of cutting parameters on the surface roughness of titanium alloys using end milling process. *Scientific Research and Essays*. 5(11), 1284-1293.



- 
- [26] Kadirgama, K., Noor, M.M., Rahman, M.M. Rejab, R.M.M., Haron, C.H.C., Abou-El-Hossein K.A. (2009). Surface Roughness Prediction Model of 6061-T6 Aluminum Alloy Machining Using Statistical Method. *European Journal of Scientific Research*, 25 (2). pp. 250-256. ISSN 1450-216X.
- [27] Mohammed, T.H., Montasser, S.T., Joachim, B. (2007). A study of the effects of machining parameters on the surface roughness in the end-milling process. *Jordan journal of mechanical and industrial engineering*. vol:1, pp 1-5.
- [28] Eyup, B., Eref, A. (2006). A study of Taguchi optimization method for identifying optimum surface roughness in CNC face milling of cobalt-based alloy (Stellite 6), *Int J Advanced manufacture Technology*, 29, 940–947.
- [29] Razfar, M.R., Asadnia, M., Haghshenas, M., Farahnakian, M. (2010). Optimum surface roughness prediction in face milling X20Cr13 using particle swarm optimization algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224 no. 11, pp. 1645-1653.
- [30] Kurt, M., Kaynak, Y., Bagci, E. (2008). Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy. *Int J Adv Manuf Technol*, 37, 1051–1060.
- [31] Keblouti, O., Boulanouar, L., Azizi, M.W. and Yallese, M.A. (2017). Modeling and multi-objective optimization of surface roughness and productivity in dry turning of AISI 52100 steel using (TiCN-TiN) coating cermet tools. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(1), 71–84. DOI: 10.5267/j.ijiec.2016.7.002.
- [32] Paulo Davim, J. (2001). A note on the determination of optimal cutting conditions of surface finish obtained in turning using desing of experiments. *Journal of materials processing technology*, 116, 305-308.
- [33] Aouici, H., Fnides, B., Elbah, M., Benlahmidi, S., Bensouilah, H. and Yallese, M.A. (2016). Surface roughness evaluation of various cutting materials in hard turning of AISI H11. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(2), 339–352. DOI: 10.5267/j.ijiec.2015.9.002.
- [34] Sadettin, O., Ali Osman, E., Necip, C., Ersan, A. (2007). Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. *NDT&E International*, 40, 121–126.

- 
- [35] Subramanian, M., Sakthivel, M. Sooryaprakash, K., Sudhakaran, R. (2013), Optimization of end mill tool geometry parameters for Al7075-T6 machining operations based on vibration amplitude by response surface methodology. *Measurement*. vol 46.pp 4005–402.
- [36] Venkata Rao, K., Murthy, B.S.N., Mohan Rao, N. (2013). Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring. *Measurement* vol 46. .pp 4075–4084.
- [37] Shen, Y., Chen, Y., Zhang, L. et al. (2011) Effect of radial depth on Vibration and surface roughness during face milling of austenitic stainless steel. *Trans. Tianjin Univ* vol 17. pp 336-339.
- [38] Hessainia, Z., Belbah, A., Yallese, M.A., Mabrouki, T., Rigal, J.F. (2013). On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. *Measurement*, 46. 1671–1681.
- [39] Jang, D.Y., Choi, Y.G., Kim, H.G., Hsiao, A. (1996). Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning *Int J Mach Tools Manuf*, 36: 453–464.
- [40] Liew, H., Ding, X. (2008). Wear progression of carbide tool in low-speed end milling of stainless steel. *Wear*. 265, 155–166.
- [41] Aslan, E. (2004). Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC) *Materials and design-Elsevier*. Volume 26, Issue 1, 21-27.
- [42] Choudhury, I.A., El-Baradie, M.A. (1999). Machinability assessment of inconel 718 by factorial disign of experiment coupled with response surface methodology. *Journal of materials processing technology*, 116, 395-401.
- [43] Doniavi, M., Eskanderzade, M. Tahmsebian. (2007). Empirical modeling of surface roughness in turning process of 1060 steel using factorial design methodology. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7 (17), 2509-2513.

- 
- [44] Huang, L., & Chen, J. C. (2001). A Multiple Regression Model to Predict In-Process Surface Roughness in Turning Operation Via Accelerometer, *Journal of Industrial Technology*. Volume 17, Number 2.
- [45] GOUPY, J. (2001). Introduction aux Plans d'expériences. *Dunod*, Paris. 303 pages.
- [46] Groover, M. P. (2007). Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems. *John Wiley & Sons*.
- [47] BOUZID, W., ZAGHAL, A., SAÏ, L. (2003). Optimisation de la rugosité des surfaces fraises. *Revue de mécanique appliquée et théorique*, 1(5), 341-356.
- [48] Khrais, S.K., Lin, Y.J. (2007). Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel. *Wear*, 262(1-2):64–69. doi: 10.1016/j.wear2006.03.052.
- [49] Yallese, M.A., Chaoui, K., Zeghib, N., Boulanouar, L. & Rigal, J.F. (2009). Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 1092-1104.
- [50] Bouchelaghem, H., Yallese, M.A., Mabrouki, T., Amirat, A. and Régal, J.F. (2010). Experimental investigation and performance analyses of cbn insert in hard turning of cold work tool steel (d3). *Machining Science Technology*, 14(4), 471-501. <http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2010.533621>.
- [51] Yallese, M.A., Rigal, J.F., Chaoui K., Boulanouar, L. (2005). The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12steel (60 HRC). *J Eng Manuf*, 219(1), 35–55.
- [52] Yallese, M.A., Boulanouar, L., Chaoui, K. (2004). Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique. *Mécanique & Industries*, 5(4), 355–368.
- [53] Bouzid, L., Boutabba, S., Yallese, M.A, Belhadi, S., Girardin, F. (2014.a). Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel. *Int J Adv Manuf Technol*, 74 (5), 879–891. doi:10.1007/s00170-014-6043-9.
- [54] Aouici, H., Bouchelaghem, H., Yallese, M.A., Elbah, M. & Fnides, B. (2014). Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic

- 
- tool using response surface methodology. *Int J Adv Manuf Technol*, 73(9), 1775-1788.doi:10.1007/s00170-014-5950-0.
- [55] Hessainia, Z., Yallese, M.A., Bouzid, L. and Mabrouki, T. (2015). On the application of response surface methodology for predicting and optimizing surface roughness and cutting forces in hard turning by PVD coated insert. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6(2), 267–284.DOI: 10.5267/j.ijiec.2014.10.003.
- [56] Fnides, B., Yallese, M.A., Mabrouki, T., Rigal, J.F. (2009). Surface roughness model in turning hardened hot work steel using mixed ceramic tool. *Mechanika*, 3(77), 68–73.
- [57] Myers, R.H., Montgomery, D.C. (2002). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 2<sup>nd</sup>ed. *John Wiley and Sons, Inc.: New York*.
- [58] Sahoo, A.K. and Mishra. P.C. (2014). A response surface methodology and desirability approach for predictive modeling and optimization of cutting temperature in machining hardened steel. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 5(3), 407–416.
- [59] Saporta, G. (2006). Probabilités, analyse des données, Statistiques. *Editions TECHNIP, 3e édition révisée, Paris*. ISBN : 9782710809807. 656 pages.
- [60] Fnides, B., Boutabba, S., Fnides, M., Aouici, H. and Yallese, M.A. (2013). Cutting tools flank wear and productivity investigation in straight turning of X38CrMoV5-1 (50 HRC). *International Journal of Applied Engineering and Technology*, 3(1), 1-10.<http://www.cibtech.org/jet.htm>.
- [61] Bouzid, L., Yallese, M.A., Belhadi, S., Mabrouki, T., Boulanouar, L. (2014b). RMS-based optimisation of surface roughness when turning AISI 420 stainless steel. *Int. J. of Mater and Product Technol*, 49(4), 224-251.
- [62] Barua, M.K., Rao, J.S. (2010). Measurement surface roughness through RSM: effect of coated carbide tool on 6061-t4 aluminium. *International Journal of Enterprise Network Management (IJENM)*, 4(2), 136-153.
- [63] Routara, B.C., Bandyopadhyay, A., Sahoo, P. (2009). Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece

- 
- material variation. *Int J Adv Manuf Technol*, 40(11), 1166-1180.DOI: 10.1007/s00170-008-1440-6.
- [64] Derringer, D., Suich, R. (1980) Simultaneous optimisation of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12, 214-219.
- [65] Ilhan, A., Mehmet, Ç. (2011). Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert Systems with Applications*, 38, 5826–5832.
- [66] Asiltürk, I., & Ünüvar, A. (2009). Intelligent adaptive control and monitoring of band intelligent adaptive control and monitoring of band. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2302–2313.
- [67] Mukherjee, I., & Ray, P.K. (2006). A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computer and Industrial Engineering*, 50, 15–34.
- [68] Azlan, M.Z., Habibollah, H., Safian, S. (2010). Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network. *Expert Systems with Applications*, 37, 1755–1768.
- [69] [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau\\_de\\_neurones\\_r%C3%A9currents](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_neurones_r%C3%A9currents)
- [70] Claude, T. (1992). Les Réseaux De Neurones Artificiels Introduction Au Connexionnisme. Cours, Exercices Et Travaux Pratiques.
- [71] Dipanda A. Cours réseaux de neurones.
- [72] Gerstner, W., Beaulieu, B.L., Souksavanh, S et Beuchat, J.L. (2006). Réseaux de neurones artificiels, une introduction à l'apprentissage automatique. *Laboratory of computational neuroscience*.

**Publications:**

1- L'article intitulé: *Modeling and optimization of surface roughness and productivity thru RSM in face milling of AISI 1040 steel using coated carbide inserts* a été publié dans la revue: International Journal of Industrial Engineering Computations . Volume 8 Issue 4 pp. 493-512 , 2017

Auteurs : Mohamed Fnides, Mohamed Athmane Yallese, Riad Khattabi, Tarek Mabrouki, François Girardin

2- L'article intitulé: *Cutting tools flank wear and productivity investigation in straight turning of X38CRMOV5-1 (50 HRC)*, a été publié dans la revue: International Journal of Applied Engineering and Technology ISSN: 2277-212X 2013 Vol. 3 (1) January-March, pp.1-10/Fnides et al.

Auteurs : B. Fnides, S. Boutabba, **Mohamed Fnides**, H. Aouici, and M. A. Yallese

3- L'article intitulé: *Tool life evaluation of cutting materials in hard turning of AISI H11*, a été publié dans la revue: Estonian Journal of Engineering, 2013, 19, 2, 143–151, doi: 10.3176/eng.2013.2.04

Auteurs: Brahim Fnides, S. Boutabba, **Mohamed Fnides**, Hamdi Aouicic, and Med.A. Yallese

**Communications :**

1- Participation à la 8<sup>e</sup> CPI qui s'est tenue les 21-23 Octobre 2013 à Tlemcen par la communication: *Cutting tools flank wear and lifespan investigation in straight turning of X38CRMOV5-1 (50 HRC)*

Auteurs : B. Fnides, S. Boutabba, **Mohamed Fnides**, H. Aouici, and M. A. Yallese

2- Participation au Troisième Congrès Tunisien de Mécanique COTUME'2014, qui s'est tenu à Sousse les 24-26 Mars 2014 par la communication : *Influence des paramètres de coupe sur la rugosité lors du fraisage de face de l'acier XC42 par un carbure revêtu.*

Auteurs : **Mohamed Fnides**, S. Boutabba, M A. Yallese, S. Belhadi and L. Boulanouar

3- Participation à l'ICMM2014, qui s'est tenu les 16-17 Décembre 2014 à sétif1, Algérie par la communication : *Caractérisation d'alliage d'aluminium AlSi8Cu3 par des essais de torsion.*

Auteurs : **Mohamed Fnides**, S Boutabba, M.A. Yallese, B Fnides et J-C. Boyer

4- Participation aux **JM'EMP09 EMP** qui se sont tenus à Bordj El Bahri les 15-16 Avril 2014 par la communication : *Etude de l'impact des conditions d'usinage sur la rugosité de surface basée sur la méthodologie de la surface de réponse en Fraisage de face.*

Auteurs : **Mohamed Fnides**, S. Boutabba, M A. Yallese, S. Belhadi and L. Boulanouar

5- Participation au **Deuxième Journée d'Étude sur la Mécanique et l'Electromécanique, JEMEM II** qui s'est déroulée le 24 avril 2014 à l'université d'El-oued par la communication : *Prédiction de la rugosité de surface et des vibrations de la pièce lors du fraisage de face de l'acier XC42 en utilisant la méthode de Taguchi.*

Auteurs : O.ZERTI, M.A.YALLESE, **Mohamed Fnides**, S.BELHADI, L.BOULANOUAR

6- Participation aux 3èmes journées d'Etudes Nationales de Mécanique qui se sont tenues à l'Université Kasdi Merbah –Ouargla les 21 et 22 Avril 2015 avec une communication orale intitulée : *Modélisation des efforts de coupe en tournage dur à sec de l'axe interne d'un rotor usiné par un carbure revêtu GC3015 en appliquant le plan de Taguchi.*

B. Fnides, H. Aouici, **Mohamed Fnides**, N. Kribes, S. Boutabba, M. A. Yallese

7- Participation aux **JM'EMP10 EMP** qui se sont tenus à Bordj El Bahri les 12-13 Avril 2016 par la communication : *Modélisation des rugosités de l'axe interne d'un rotor en tournage dur à sec usiné par un carbure revêtu GC3015 en appliquant le plan de Taguchi.*

B. Fnides, **Mohamed Fnides**, S. Boutabba, H. Aouici, N. Kribes, M.A.Yallese