

République Algérienne Démocratique & populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Thèse de Doctorat

De

L'Université du 08 Mai 45 Guelma

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Productique

Présentée et soutenue par :

Abdel-Ali – Selaïmia

**Etude de l'usinage des aciers inoxydables
lors du fraisage de face**

Sous la Direction du : **Pr. M^{ed} Athmane YALLESE**

Devant le Jury

Président

L. BOULANOUAR Professeur Université Badji Mokhtar Annaba

Rapporteur

M. A. YALLESE Professeur Université 8 Mai 1945 Guelma

Examineur

M. Bengersallah Maître de conférences /A Université Badji Mokhtar Annaba
A. BELBAH Maître de conférences /A Université 8 Mai 1945 Guelma

Invité

H. Benssouilah Maître de conférences /A Université 8 Mai 1945 Guelma

Dédicaces

Je dédie cette thèse à :

La mémoire de ma mère et mon père, eux qui m'ont été un grand soutien jusqu'à leur décès. Que DIEU les accueille dans son vaste paradis ;

Ma femme qui m'a tant soutenu et encouragé ;

Mes chers enfants, à qui je souhaite plein de succès, saada wa hana : Younes, Nor, Nouha Malek et ma nouvelle née Rana ;

Mes sœurs et mes frères ;

Toute ma famille ;

Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre **DIEU**, notre seigneur et créateur pour nous avoir donné la force et la puissance pour accomplir ce travail. Car l'achèvement d'une thèse nécessite un effort particulier, mais il s'agit d'un travail d'équipe qui implique aussi la contribution de divers intervenants.*

J'utilise cette page pour remercier ces personnes qui ont permis l'aboutissement de ce travail de recherche à sa fin.

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire (LMS) du département de Génie mécanique à l'Université du 08 Mai 1945 Guelma, Sous la direction du Professeur **Yaltese Med Athmane**. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour toute la confiance qu'il m'a témoignée, les encouragements, le soutien, les conseils et l'aide qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de cette période.*

*Je désire confirmer mes remerciements et ma reconnaissance à Monsieur **Lakhdar BOULANOUAR**, Professeur à l'Université de Badji Mokhtar-Annaba d'avoir accepté de présider le jury.*

*Mes plus vifs remerciements vont également aux membres du jury le Dr **Ahmed Belbah** (MC/A) à l'Université*

*du 08 Mai 1945 Guelma et le Dr **Mohieddine Benghersallah** (MC/A) à l'Université de Badji Mokhtar-Annaba qui ont accepté de juger cette thèse et de m'avoir fait l'honneur de siéger parmi les membres de jury.*

*Je tiens à exprimer mes chaleureux remerciements et ma gratitude au Docteur **Hamza Benssouilah** pour son aide et pour ces encouragements.*

*J'adresse également mes aimables remerciements et ma gratitude au Docteur **Ikhlas Meddour**, pour m'avoir aidé.*

Je tiens aussi à remercier les Docteurs Hamdi Aouici et El Bah Mohamed pour leur aide et encouragements.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les membres, thésards et techniciens du Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) et du département de Mécanique de Guelma. Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé à différents stades de ce travail.

ملخص

يتميز الصلب المقاوم للصدأ بسوء التشغيل في الماكينات أو الآلات لليونته والتوصيلية الحرارية المنخفضة له. أشغال البحث التي أجريت في أطروحة الدكتوراه هذه تتعلق بالتفريز الطرفي للصلب الأوستنيتي المقاوم للصدأ X2CrNi18-9 باستعمال لقمات من الكريبيد المغلف (GC4040). قُسم العمل إلى ثلاثة أجزاء. الأول ويتمثل في نمذجة ردود الناتج من ذلك: خشونة السطح (Ra)، وجهد القطع (Fc)، استطاعة القطع (Pc)، واستطاعة القطع المحددة (Ks) وكمية الجذاذة المزالة (QCE)، وذلك باستخدام منهجية استجابة السطح (RMS). يتم استخدام تحليل التباين (ANOVA) لتقييم تأثير عناصر القطع، من ذلك، سرعة القطع (Vc)، التغذية بالسن (fz) وعمق التمريرة (ap) على عناصر الخروج. أما الجزء الثاني من العمل فيتمثل في نمذجة عناصر الخروج باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). يتم تطبيق هذه الأخيرة للنمذجة غير الخطية لطريقة التشغيل بالتفريز. وقد أجريت هذه الدراسة لعناصر التشغيل التكنولوجية (Ra، Fc، Ks، Pc، و QCE). وبلي هذه الدراسة مقارنة بين النمذجة باستعمال (RSM) والنمذجة باستعمال (ANN)، وهذا من أجل التحقق من فعالية ومثانة هذين الطريقتين على حد سواء. وأما الجزء الثالث والأخير من هذا البحث فيتعلق بإيجاد شروط القطع المثلى باستخدام منهجية "تاجوشي - Taguchi" والمتمثلة في (تحليل إشارة / ضوضاء) والمقاربة بوظيفة الرغبة (DF)، حسب ثلاث حالات. تقليل (Ra)، وتعظيم أو تضخيم (QCE) وتحسين مشترك بين (Ra) و (QCE) في آن واحد.

الكلمات المفتاحية للبحث: التشغيل، التفريز الطرفي، الصلب الأوستنيتي المقاوم للصدأ، الكريبيد المغلف، تحليل التباين (ANOVA)، منهجية استجابة السطح (RMS)، الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، Taguchi.

Résumé

L'acier inoxydable se caractérise par une mauvaise usinabilité due à sa grande ductilité et à sa faible conductivité thermique. Le travail de recherche réalisé dans cette thèse de doctorat concerne le fraisage de face de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 avec des plaquettes en carbure revêtues (GC4040). Le travail est divisé en trois parties. La première concerne la modélisation des réponses de sortie à savoir : La rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fc), la puissance de coupe (Pc), la pression spécifique de coupe (Ks) et la quantité de copeau enlevé (QCE), en utilisant la méthodologie de la surface de réponse (RSM). L'analyse de la variance (ANOVA) est utilisée afin d'évaluer l'influence des paramètres de coupe, à savoir : Vitesse de coupe (Vc), avance par dent et profondeur de passe (ap) sur les paramètres de sortie. La deuxième partie du travail concerne la modélisation des paramètres de sortie en utilisant 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 paramètres technologiques d'usinage (Ra, Fc, Ks, Pc et QCE). Cette partie est suivie par une comparaison entre la modélisation par (RSM) et la modélisation par (ANN) et cela dans le but de vérifier l'efficacité et la robustesse des deux méthodes. La troisième partie de ce travail de recherche concerne l'optimisation des conditions de coupe en utilisant l'approche de Taguchi (analyse signal / bruit) et la fonction de désirabilité (DF), selon trois cas; Minimiser (Ra), maximiser (QCE) et optimisation combinée entre (Ra) et (QCE) en même temps.

Mots clés : Usinage ; fraisage de face ; Acier inoxydable austénitique ; carbure revêtu ; ANOVA ; RSM ; Optimisation.

Abstract

Stainless steel is characterized by poor machinability due to its high ductility and low thermal conductivity. The research work carried out in this doctoral thesis concerns the face milling of austenitic stainless steel X2CrNi18-9 with coated carbide inserts (GC4040). The work is divided into three parts. The first concerns the modeling of output responses, namely the surface roughness (Ra), the cutting force (Fc), the cutting power (Pc), the specific cutting force (Ks) and the metal removal rate (MRR), using the Response Surface Methodology (RSM). Analysis of variance (ANOVA) is used to evaluate the influence of cutting parameters, such as: Cutting speed (Vc), feed per tooth and depth of cut (ap) on output responses. The second part of the work concerns the modeling of the output parameters using artificial neural networks (ANN). The latter is applied for the nonlinear modeling of the milling process. The study is carried out for the technological parameters of machining (Ra, Fc, Ks, Pc and MRR). This part is followed by a comparison between the modeling by (RSM) and the modelization by (ANN) in order to check the efficiency and the robustness of the two methods. The third part of this work concerns the optimization of the cutting conditions using the Taguchi approach (signal-/noise analysis) and the desirability function (DF), according to three cases; Minimize (Ra), maximize (QCE) and combined optimization between (Ra) and (QCE) at the same time.

Keywords: Machining; Face milling; Austenitic stainless steel; Coated carbide; ANOVA; RSM; ANN; Optimization.

Index des figures

Figure I.1	Fraise à surfacé, Fraise à surfacé en action	24
Figure I.2	Surfaçage en fraisage	25
Figure I.3	Surfaçage d'une pièce en fraisage	27
Figure I.4	Matériaux de coupe	27
Figure I.5	Substrat d'un carbure	28
Figure I.6	Revêtement multicouche d'un substrat carbure	30
Figure I.7	Différent types d'acier inoxydable	31
Figure I.8	principaux aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel (<i>molybdène</i>) dérivés de la nuance de base	33
Figure I.9	Composantes de l'effort de coupe	35
Figure I.10	Pression spécifique de coupe (Ks)	36
Figure I.11	Causes d'usure lors de l'usinage	37
Figure I.12	Usure en cratère	39
Figure I.13	Usure en dépouille	39
Figure I.14	Usure en entaille	39
Figure I.15	Usure par déformation plastique	40
Figure I.16	Usure par écaillage	40
Figure I.17	Usure par arête rapportée	41
Figure I.18	Principaux défauts de surface	41
Figure I.19	Paramètres d'état de surface	42
Figure I.20	Les critères de la rugosité	43
Figure I.21	Paramètres de coupes influençant l'intégrité de surface en usinage, sous la forme d'un diagramme d'Ishikawa	44
Figure I.22	Micro-copeaux soudé sur la surface usinée et arrête rapportée sur plaquette de coupe	45
Figure I.23	Influence de la vitesse de coupe et du revêtement des plaquettes de coupe sur la rugosité de surface et l'effort de coupe lors de l'usinage des aciers AISI 304 et AISI 316	46
Figure I.24	Energie de coupe et puissance demandée en fonction du volume de copeau enlevé (MRR)	47
Figure I.25	Valeurs prédites et valeurs observées de la rugosité de surface	48
Figure I.26	Effets des Interactions sur la rugosité de surface	49

Figure I.27	Rugosité de surface et usure en dépouille en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304	50
Figure I.28	Modèle de structure de réseau neuronal	51
Figure II.1	Eprouvette pour les essais de la rugosité de surface et des efforts de coupe	57
Figure II.2	Eprouvette pour les essais d'usure	57
Figure II.3	Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe	57
Figure II.4	Fraise à surfacer utilisée	58
Figure II.5	Cloche Coronill 245	58
Figure II.6	Chaine de mesure pour les efforts de coupe	60
Figure II.7	Rugosimètre Surfrest Sj201	61
Figure II.8	Station de métrologie optique Altisurf 500	62
Figure II.9	Microscopes Optique	63
Figure II.10	Montage des expériences pour la mesure de la rugosité et les efforts de coupe	70
Figure III.1	Graphique des effets principaux pour (Ra)	77
Figure III.2	Diagramme d'interaction pour (Ra)	77
Figure III.3	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra)	78
Figure III.4	Diagrammes (3D) de la rugosité de surface (Ra) en fonction de Vc , fz et ap	80
Figure III.5	Surface 3D pour la rugosité de surface (Ra) en fonction de (fz), (ap) et trois (Vc)	80
Figure III.6	Photos de micro-copeau soudé et de l'arête rapportée	81
Figure III.7	Graphique de Contour de (Ra) en fonction de Vc , fz et ap	83
Figure III.8	Graphique des effets principaux pour (Fc)	85
Figure III.9	Diagramme d'interaction pour (Fc)	888 5
Figure III.10	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Fc)	86
Figure III.11	Diagrammes (3D) de l'effort de coupe (Fc) en fonction de Vc , fz et ap	88
Figure III.12	Surface (3D) pour l'effort de coupe (Fc) en fonction de fz , Vc et trois (ap)	88
Figure III.13	Graphique de Contour de (Fc) en fonction de Vc , fz et ap	90
Figure III.14	Graphique des effets principaux pour (Ks)	92

Figure III.15	Diagramme d'interaction pour (K_s)	92
Figure III.16	Graphe des valeurs réelles et prédites de la pression spécifique de coupe (K_s)	96
Figure III.17	Diagrammes de surfaces de (K_s) en fonction de (V_c , f_z et ap)	95
Figure III.18	Surface 3D pour la pression spécifique de coupe (K_s) en fonction de f_z , V_c et trois (ap)	95
Figure III.19	Graphique de Contour de (K_s) en fonction de V_c , f_z et ap	97
Figure III.20	Graphique des effets principaux pour la puissance de coupe (P_c)	99
Figure III.21	Diagramme d'interaction pour la puissance de coupe (P_c)	100
Figure III.22	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la puissance de coupe (P_c)	101
Figure III.23	Diagrammes de surfaces de (P_c) en fonction de (V_c , f_z et ap)	102
Figure III.24	Surface 3D pour la puissance de coupe (P_c) en fonction de f_z , V_c et trois (ap)	103
Figure III.25	Graphique de Contour de (P_c) en fonction de V_c , f_z et ap	104
Figure III.26	Graphique des effets principaux pour la quantité du copeau enlevé (QCE)	106
Figure III.27	Diagramme d'interaction pour la quantité du copeau enlevé (QCE)	106
Figure III.28	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de la quantité du copeau enlevée (QCE)	107
Figure III.29	Diagrammes de surfaces de la quantité du copeau enlevé (QCE) en fonction de (V_c , f_z et ap)	109
Figure III.30	Surface 3D pour la quantité de copeau enlevé (QCE) en fonction de ap , f_z et trois (V_c)	110
Figure III.31	Graphique de Contour de (QCE) en fonction de V_c , f_z et ap	111
Figure III.32	Tenue de l'outil (T) pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et $ap=0.6\text{mm}$, $V_{c1}=111\text{m/min}$, $V_{c2}=222\text{m/min}$, $f_{z1}=0.12\text{mm}$, $f_{z2}=0.20\text{mm}$	112
Figure III.33	Rugosité de surface (R_a) pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et $ap=0.6\text{mm}$, $V_{c1}=111\text{m/min}$, $V_{c2}=222\text{m/min}$, $f_{z1}=0.12\text{mm}$, $f_{z2}=0.20\text{mm}$	113

Figure III.34	Topographies des surfaces fraisées, (a) $f=0.08\text{mm/dent}$, (b) $f=0.25\text{mm/dent}$ et $V_c=111\text{m/min}$	115
Figure III.35	Topographies des surfaces fraisées, (a) $f=0.08\text{mm/dent}$, (b) $f=0.25\text{mm/dent}$ et $V_c=222\text{m/min}$	115
Figure IV.1	Neurone naturel et neurone artificiel	118
Figure IV.2	Approche entre neurone artificiel et neurone naturel	118
Figure IV.3	Modèle d'un neurone artificiel	120
Figure IV.4	Schéma d'une couche de neurones	121
Figure IV.5	Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones	121
Figure IV.6	Schéma de principe du perceptron simple	122
Figure IV.7	Schéma du perceptron multicouche à 3 entrées, deux couches cachées à (6) neurones chacune et une sortie	
Figure IV.8	Système d'apprentissage du réseau de neurone	123
Figure IV.9	Structure du réseau de neurone du modèle de la rugosité de surface (R_a)	126
Figure IV.10	Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (R_a)	129
Figure IV.11	Graphique de profileur de prévision pour (R_a)	129
Figure IV.12	Structure ANN pour le modèle de l'effort de coupe (F_c)	130
Figure IV.13	Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (F_c)	131
Figure IV.14	Graphique de profileur de prévision pour (F_c)	132
Figure IV.15	Structure (ANN) pour le modèle de la pression spécifique de coupe (K_s)	133
Figure IV.16	Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (K_s)	134
Figure IV.17	Graphique de profileur de prévision pour (K_s)	135
Figure IV.18	Structure ANN pour le modèle de la puissance de coupe (P_c)	136
Figure IV.19	Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (P_c)	137
Figure IV.20	Graphique de profileur de prévision pour (P_c)	138
Figure IV.21	Structure ANN pour le modèle de la quantité du copeau enlevé (QCE)	139

Figure IV.22	Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (QCE)	140
Figure IV.23	Graphique de profileur de prévision pour (QCE)	141
Figure IV.24	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra)	147
Figure IV.25	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour l'effort de coupe (F_c)	147
Figure IV.26	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la pression spécifique de Coupe (K_s)	148
Figure IV.27	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la puissance de Coupe (P_c)	148
Figure IV.28	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la quantité de copeau enlevé (QCE)	149
Figure V.1	Graphique des effets principaux de V_c , f_z et a_p sur la rugosité de surface (Ra)	156
Figure V.2	Graphique des effets principaux de V_c , f_z et a_p sur l'effort de coupe (F_c)	157
Figure V.3	Graphique des effets principaux de V_c , f_z et a_p sur la pression de coupe spécifique (K_s)	158
Figure V.4	Graphique des effets principaux de V_c , f_z et a_p sur la puissance de coupe (P_c)	160
Figure V.5	Graphique des effets principaux de V_c , f_z et a_p sur la quantité de copeaux enlevés (QCE)	161
Figure V.6	Diagramme de désirabilité 2D, (a) Minimum, (b) Maximum	
Figure V.7	Rugosité de surface (Ra) pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et $a_p=0.6\text{mm}$, $V_{c1}=111\text{m/min}$, $V_{c2}=222\text{m/min}$, $f_{z1}=0.12\text{mm}$, $f_{z2}=0.20\text{mm}$	166
Figure V.8	Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et de la quantité du copeau enlevé (QCE)	167
Figure V.9	Rugosité de surface (Ra) pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et $a_p=0.6\text{mm}$, $V_{c1}=111\text{m/min}$, $V_{c2}=222\text{m/min}$, $f_{z1}=0.12\text{mm}$, $f_{z2}=0.20\text{mm}$	167
Figure V.10	Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et de la quantité du copeau enlevé	

	(<i>QCE</i>)	168
Figure V.11	Rugosité de surface (<i>Ra</i>) pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et $a_p=0.6\text{mm}$, $V_{c1}=111\text{m/min}$, $V_{c2}=222\text{m/min}$, $f_{z1}=0.12\text{mm}$, $f_{z2}=0.20\text{mm}$	168
Figure V.12	Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la Rugosité de surface (<i>Ra</i>) et de la quantité du copeau enlevé (<i>QCE</i>)	169

Index des tableaux

Tableau I.1	Influence des caractéristiques du matériau usiné sur K_s	36
Tableau I.2	Comparaison des résultats de (ANN) et (RMS) pour une faible rugosité de surface	52
Tableau II.1	Composition chimique de l'acier X2 Cr Ni 18-9	56
Tableau II.2	Caractéristiques mécaniques de l'acier X2CrNi18-9	56
Tableau II.3	Propriétés physiques de l'acier X2CrNi18-9	56
Tableau II.4	Géométrie des plaquettes utilisées	58
Tableau II.5	Géométrie et caractéristiques de la Cloche Coromill 245 utilisées	59
Tableau II.6	Niveaux de variation des facteurs	65
Tableau II.7	Matrice de planification par la méthode multifactorielle (Effort de coupe ; rugosité)	65
Tableau II.8	Codification des facteurs par la méthode multifactorielle pour l'usure	66
Tableau II.9	Matrice de planification par la méthode multifactorielle pour l'usure	66
Tableau II.10	Matrice orthogonale de Taguchi L8 ($2^4 \times 4^1$)	68
Tableau II.11	Matrice orthogonale de Taguchi L12 (2^{11})	69
Tableau III.1	Résultats expérimentaux pour un plan (L_{27})	73
Tableau III.2	Résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (R_a)	76
Tableau III.3	Résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe (F_c)	84
Tableau III.4	Résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe spécifique (K_s)	91
Tableau III.5	Résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe (P_c)	98
Tableau III.6	Résultats de l'ANOVA pour la quantité de copeau enlevé (QCE)	105
Tableau IV.1	Résultats expérimentaux des paramètres de performance	126
Tableau IV.2	R^2 et RMSE du modèle de la rugosité de surface (R_a)	128
Tableau IV.3	R^2 et RMSE du modèle de l'effort de coupe (F_c)	131
Tableau IV.4	R^2 et RMSE du modèle de la pression spécifique de coupe (K_s)	134
Tableau IV.5	R^2 et RMSE du modèle de la puissance de coupe (P_c)	137
Tableau IV.6	R^2 et RMSE du modèle du volume du copeau enlevé (QCE)	140

Tableau IV.7	Comparaison entre les modèles (<i>RMS</i>) et (<i>ANN</i>) par R^2	142
Tableau IV.8	Comparaison des résultats expérimentaux et prédits par (<i>RMS</i>) et (<i>ANN</i>) pour (<i>Ra</i>) et (<i>Fc</i>)	144
Tableau IV.9	Comparaison des résultats expérimentaux et prédits par (<i>RMS</i>) et (<i>ANN</i>) pour (<i>Ks</i>) et (<i>Pc</i>)	145
Tableau IV.10	Comparaison des résultats expérimentaux et prédits par (<i>RMS</i>) et (<i>ANN</i>) pour (<i>QCE</i>)	146
Tableau V.1	Signal/Bruit des paramètres de sorties étudiées	154
Tableau V.2	Moyenne des ratios $S/B_{(Ra)}$ pour chaque niveau des facteurs	155
Tableau V.3	Moyenne des ratios $S/B_{(Fc)}$ pour chaque niveau des facteurs	156
Tableau V.4	Moyenne des ratios $S/B_{(Ks)}$ pour chaque niveau des facteurs	158
Tableau V.5	Moyenne des ratios $S/B_{(Pc)}$ pour chaque niveau des facteurs	159
Tableau V.6	Moyenne des ratios $S/B_{(QCE)}$ pour chaque niveau des facteurs	160
Tableau V.7	But et gamme de paramètres pour le 1 ^{er} cas d'optimisation	164
Tableau V.8	But et gamme de paramètres pour le 2 ^{ème} cas d'optimisation	164
Tableau V.9	But et gamme de paramètres pour le 3 ^{ème} cas d'optimisation	165
Tableau V.10	Réponses de la surface de rugosité et de la quantité de copaux à enlevé pour le 1 ^{er} cas d'optimisation	165
Tableau V.11	Réponses de la surface de rugosité et de la quantité de copaux à enlevé pour le 2 ^{ème} cas d'optimisation	165
Tableau V.12	Réponses de la surface de rugosité et de la quantité de copaux à enlevé pour le 3 ^{ème} cas d'optimisation	166

Nomenclature

ae : Largeur de la pièce, mm.

fz : Avance par dent, mm/dent.

f : Avance par tour, tr/mm.

Vc : Vitesse de coupe, m/min.

ap : Profondeur de passe, mm.

Vf : Vitesse d'avance, mm/min.

Mc : Mouvement de coupe.

Mf : Mouvement d'avance.

Z : Nombre de dent.

n : Fréquence de rotation, tr/min.

D : diamètre de la fraise, mm.

Ra : Ecart arithmétique moyen, μm .

Rz : Profondeur moyenne de la rugosité, μm .

Rt : Rugosité totale, μm .

Fc : Effort de coupe, N.

Ks : Pression spécifique de coupe, MPa.

Pc : Puissance de coupe, W.

QCE : Quantité de copeau enlevé, mm^3/min .

ANOVA : Analyse de la variance.

MSR : Méthodologie de la surface de réponse.

[VB] : Usure en dépouille admissible, 0.3mm.

T : Tenue, min.

ANN : Réseaux de neurones artificiels

Des : Désirabilité.

DF : Fonction désirabilité.

GRA : Analyse Relationnelle Grise.

GA : Algorithme Génétique.

PSO : Optimisation par essaim Particulaire.

Sommaire

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	20
<i>Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</i>	23
I.1 Introduction	24
I.2 Notion de fraisage	24
I.2.1 Définition	24
I.2.2 Paramètres de coupe	25
I.2.3 Surfaçage	26
I.3 Les matériaux de coupe	27
I.3.1 Acier rapide supérieur	28
I.3.2 Les carbures	28
I.3.3 Les cermets	29
I.3.4 Les céramiques	29
I.3.5 Les revêtements	29
I.4 Acier inoxydable	30
I.4.1 Définition	30
I.4.2 Ordonnement des aciers inoxydables	31
I.5 Notion sur l'usinabilité des matériaux	33
I.6 Actions mécanique en usinage	34
I.6.1 Effort de coupe	34
I.6.2 Pression spécifique de coupe	35
I.6.3 Puissance de coupe	37
I.7 Paramètres de performances d'usinage	37
I.7.1 Usure de l'outil de coupe	37
I.7.1.1 Causes d'usure	38
I.7.2.1 Différentes formes d'usure des outils	38
I.7.2 Qualité de surface	41
I.7.2.1 principaux défauts de surface	41
I.7.2.2 Paramètres caractéristiques d'état de surface	42
I.7.2.3 Paramètres influençant la qualité de surface	43
I.7.3 Quantité de copeaux enlevés	44
I.8 Travaux de recherche	44
I.9 Conclusion	53

<i>Chapitre II :</i>	<i>MOYENS ET PROCEDURE EXPERIMENTALE</i>	54
II.1	Introduction	55
II.2	Moyens utilisés	55
II.2.1	Machine-outil	55
II.2.2	Nuance du matériau de la pièce	55
II.2.3	Fraise utilisée	57
II.3	Appareillage de mesure des paramètres de sortie	59
II.3.1	Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	59
II.3.2	Mesure de la rugosité 2D	60
II.3.3	Mesure de la rugosité 3D	61
II.3.4	Mesure de l'usure	62
II.4	Planification des expériences	63
II.4.1	Introduction	63
II.4.2	Méthode multifactorielle	64
II.4.2.1	Méthode multifactorielle multi-objectives	64
II.4.2.2	Méthode multifactorielle mono-objective (Méthode de Taguchi)	67
II.5	Expériences	69
II.6	Conclusion	69
<i>Chapitre III :</i>	<i>MODELISATION PAR METHODOLOGIE DES SURFACES DE REPONSE</i>	71
III.1	Introduction	72
III.2	Résultats expérimentaux	72
III.3	Méthode appliquée	74
III.4	Analyse statistique et modélisation des paramètres technologiques	75
III.4.1	Résultats de la rugosité de surface (Ra)	75
III.4.2	Résultats de l'effort de coupe (Fc)	83
III.4.3	Résultats de la pression spécifique de coupe (Ks)	90
III.4.4	Résultats de la puissance de coupe (Pc)	97
III.4.5	Résultats de la quantité de copeau enlevé (QCE)	105
III.5	Effet d'usure	111
III.5.1	Tenue de l'outil	111
III.5.2	Rugosité de surface	113
III.6	Topographie de surface 2D et 3D	114

V.2.1.1	Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra)	155
V.2.1.2	Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe (F_c)	156
V.2.1.3	Analyse des effets principaux sur la pression de coupe spécifique (K_s)	157
V.2.1.4	Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (P_c)	159
V.2.1.5	Analyse des effets principaux sur la quantité de copeau enlevé (QCE)	160
V.3	Optimisation par la méthode de la fonction désirabilité	161
V.3.1	Introduction	161
V.3.2	Cas d'optimisation étudiés	
V.4	Conclusion	169
	CONCLUSION GENERALE	171
	Perspectives	
	Références bibliographiques	176
	Publication	182

Introduction générale

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans les différents domaines à cause de leur résistance à la corrosion. Ils jouent un rôle très important dans l'industrie aéronautique, la fabrication des pièces médicales et dans l'agroalimentaire. Parmi les types de ces aciers il y a les martensitiques, les ferritiques et les austénitiques. Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques distinguées telles que la haute ductilité, le taux d'écrouissage élevé et le coefficient de frottement élevé.

D'autres parts, afin d'en assurer une qualité satisfaisante des produits finis, une consommation minimale d'énergie et une productivité élevée durant le processus de coupe, 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 pour la modélisation et l'optimisation du processus d'usinage. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche de notre thèse de doctorat et qui sont la suite logique des travaux réalisés dans le cadre du mémoire de Magister. La thèse de doctorat 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 sur le fraisage, la rugosité de surface, les efforts de coupe, l'usure des outils, les aciers inoxydables et le choix des matériaux de coupe. La dernière partie de la bibliographie traite une autre partie très importante (état de l'art), ayant pour but de présenter une synthèse sur les résultats des travaux de recherche (publications) relatifs à l'usinage en fraisage des aciers inoxydable ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation du processus de coupe en tournage et fraisage.

Dans le second chapitre, nous présentons les équipements nécessaires à la réalisation des essais (Fraiseuse, matériau de la pièce et de la fraise) et la planification

des expériences ainsi que les conditions de coupe. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont aussi présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expérience sont également exposés. A la fin de ce chapitre, un aperçu sur la méthode de Taguchi est exposé.

Dans le chapitre III, nous exposons les résultats expérimentaux des essais réalisés pour un plan de Taguchi (L_{27}) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiés. Nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse MSR et l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (V_c , f_z , et ap) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Pour cela nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «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. Ensuite, nous avons présenté une étude sur l'usure des plaquettes de coupe utilisées ainsi que la détermination des tenues et la relation entre l'usure et la rugosité de surface de l'acier inoxydable étudié. A la fin du chapitre, une attention particulière sur la topographie de surface 3 D en fonction des conditions de coupe a été réalisée.

Au chapitre IV, nous présentons 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, et dans notre cas c'est le fraisage. L'étude est réalisée pour modéliser les paramètres technologiques d'usinage (P_c , K_s , F_c , R_a et QCE) en fonction des différents paramètres du régime de coupe (V_c , f_z et ap) pour un plan de 27 essais. La fin du chapitre est réservé à une comparaison entre la modélisation par la méthode de la surface de réponse MSR et la modélisation par ANN et cela dans le but de vérifier l'efficacité et la robustesse des deux méthodes.

Au chapitre V, nous exposons les résultats d'une étude d'optimisation afin de déterminer le régime optimal. L'optimisation est réalisée suivant deux méthodes.

- Optimisation mono-objective, en se basant sur l'approche de Taguchi et l'analyse signal/ bruit pour les paramètres technologiques d'usinage (P_c , K_s , F_c , R_a et QCE).
- Optimisation multi-objective en se basant sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Cette optimisation est basée sur trois critères choisis, le premier est celui de la qualité, le deuxième et celui de la productivité, et le dernier représente une optimisation combinée entre la qualité et la productivité en même temps. A la fin de ce chapitre une analyse des deux méthodes d'optimisation est réalisée.

En dernier lieu, la thèse de doctorat se termine par une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques et les perspectives.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- Introduction

La fabrication mécanique est l'un des piliers sur lesquelles repose l'industrie d'aujourd'hui. L'usinage des métaux est l'un des procédés qui a contribué le plus dans la fabrication des travaux de finition des pièces de précision. Dans ce chapitre, un ensemble de notions de base de la coupe des métaux est présenté. Parmi ces notions citons, le fraisage qui se présente comme étant l'un des procédés d'usinage les plus utilisés pour l'usinage des pièces de formes prismatiques. Avec ce dernier s'accompagne, l'usinabilité des matériaux – spécifions en particulier dans notre cas " l'acier inoxydable "-, le matériau de coupe, différentes actions mécaniques ainsi que différents paramètres permettant de déterminer les performances d'usinage tel que : l'usure des plaquettes de coupe, la qualité de surface et le copeau enlevé. Pour en finir avec ce chapitre et dans le but d'élargir les connaissances et de se mettre à jour sur les techniques d'investigation, une synthèse des travaux de recherches sur l'usinage des aciers inoxydables et les méthodes d'optimisation dans le processus de coupe est présentée.

I.2- Notion de fraisage

I.2.1- Définition

Le fraisage est un procédé de fabrication par enlèvement de matière sous forme de copeaux qui résulte de la combinaison de deux mouvements : Un mouvement de rotation de l'outil de coupe, d'une part, et un mouvement rectiligne, l'avance de la pièce à usiner d'autre part. Le fraisage est généralement réalisé par une machine-outil, la fraiseuse qui est particulièrement appropriée à l'usinage de pièces prismatiques. L'outil utilisé dans ce procédé d'usinage est la fraise (*figure I-1*). La fraise est un outil à tranchants multiple, dont chacun enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux. La fraise peut être monobloc ou à plaquettes rapportée [1-2].

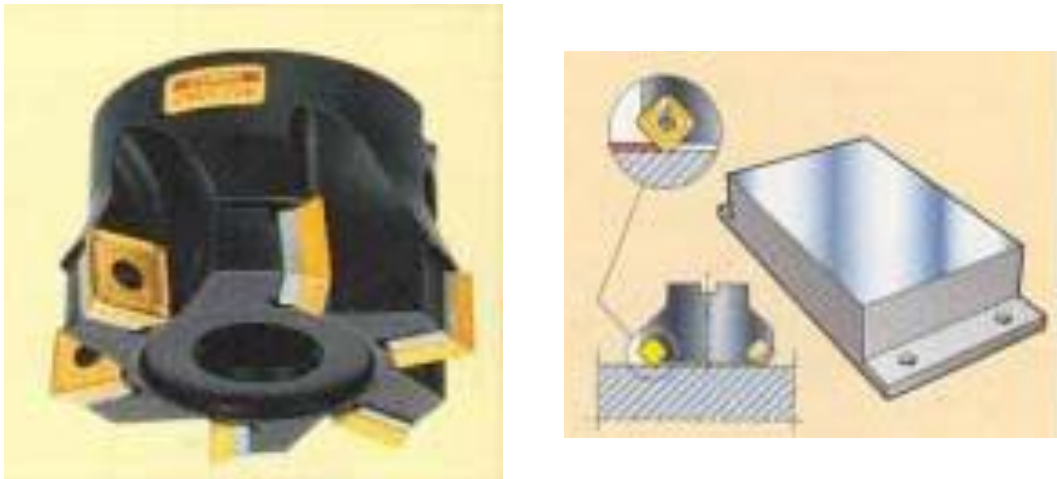


Fig. I.1- a-Fraise à surfacé, b- Fraise à surfacé en action [3].

I.2.2- Paramètres de coupe

La génération de surface est reliée à la combinaison d'un mouvement de coupe circulaire (M_c) attribué à l'outil et d'un mouvement d'avance (M_f) rectiligne attribué à la pièce figure (I-2). La surface obtenue est influencée par les stries engendrées par (M_c) et (M_f). L'état de surface usinée et le temps d'usinage dépendent en grande partie du choix des paramètres de coupe qui peuvent être résumé en :

- Vitesse de coupe (V_c).
- Avance par dent (f_z).
- Profondeur de passe (ap) [1-2,4].

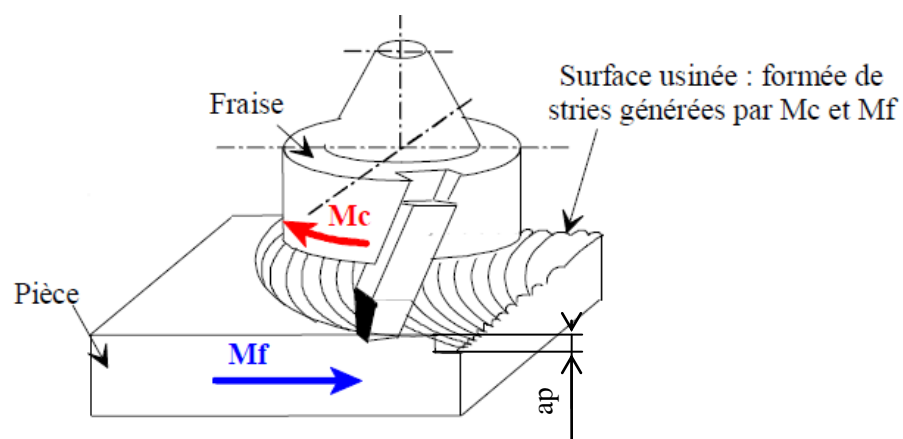


Fig. I.2- Surfaçage en fraisage.

a- La vitesse de coupe (V_c) [m/min]: C'est la vitesse relative de la pièce par rapport à la pointe d'une dent. Il s'agit d'un paramètre d'outil faisant partie des conditions de coupe, qui assure que l'opération est effectuée de manière efficace.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (I.1)$$

D : Le diamètre de la fraise [mm],

n : Fréquence de rotation,

b- La Fréquence de rotation (n) [tr/min]: C'est le nombre de rotations par minute effectuées par la fraise (montée sur la broche). Elle représente un paramètre qui se calcule pour être affiché sur la machine.

c- La vitesse d'avance (V_f) : C'est la vitesse de déplacement de la pièce par rapport à l'outil pour le déplacement des trois axes X, Y et Z en distance par unité de temps [mm/min].

$$V_f = Z \cdot f_z \cdot n \quad (I.2)$$

Z : Nombre de dent de la fraise,

f_z : Avance par dent,

d- L'avance par dent (f_z) [mm/dent] : C'est un paramètre propre au mode d'enlèvement de la matière en fraisage. Elle correspond à la distance linéaire parcourue par l'outil lorsqu'une dent donnée est en prise. La valeur de l'avance par dent est calculée à partir de la valeur de l'épaisseur de copeau maximale recommandée.

e- La profondeur de passe (a_p) [mm]: C'est l'engagement de l'outil dans la pièce. Elle correspond à la quantité de métal enlevée par l'outil sur la face de la pièce.

I.2.3- Surfaçage

Le surfaçage est une opération qui consiste à obtenir un plan en fraisage. L'outil utilisé est une fraise à surfacer qui permet de générer un plan qui sera perpendiculaire à l'axe de rotation de la fraise (*figure I. 3*) [2-3].

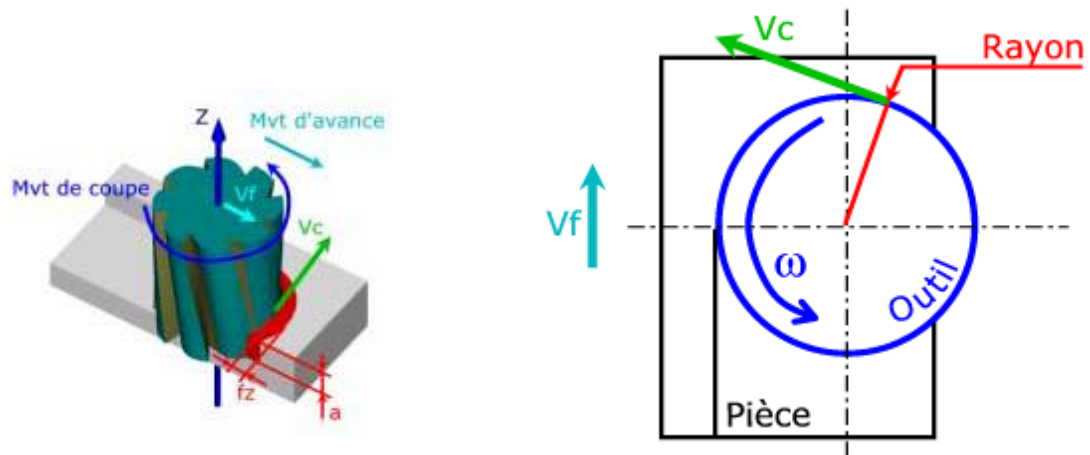


Fig. I.3- Surfaçage d'une pièce en fraisage.

I.3- Les Matériaux de coupe

Le choix du matériau de coupe est d'une importance primordiale pour l'obtention des performances désirées. Les matériaux utilisés au début dans les travaux d'usinage d'une manière générale, et dans le fraisage particulièrement sont les aciers rapides supérieurs (ARS) ou (*HHS en anglais*) et les carbures métalliques (CM) surtout pour les fraises monoblocs. La tendance depuis plusieurs années, s'est penché sur l'utilisation des fraises à plaquettes rapportées, vu leur gain du point de vue économique. Les matériaux utilisés dans ces plaquettes revêtue ou non sont fonction de la ténacité et la dureté (*figure I-4*) [5].

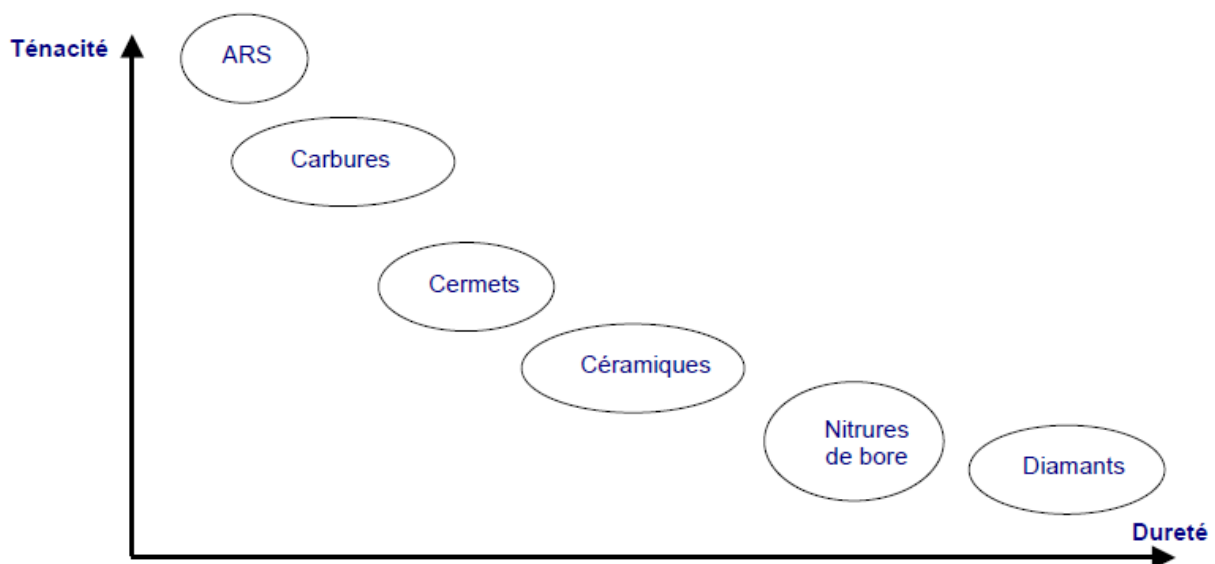


Fig. I.4- Les Matériaux de coupe.

I.3.1-Acier rapide supérieur

L'acier rapide ou acier rapide supérieur est un alliage de fer-carbone plus tungstène (*jusqu'à 20 %*) et quelques éléments d'addition (*cobalt, manganèse, chrome, vanadium, molybdène*). inventé par le français Henri Aimé Brustlein et mis au point dès 1896 par les Américains F.W. Taylor et White, présenté pour la première fois à paris en 1900 à l'Exposition universelle [6]. Cet outil est peu coûteux et existe de différentes formes, mais il a une capacité limitée de découpage. Il est surtout utilisé pour l'usinage des aciers qui ne sont pas trop durs, mais sera très durable.

I.3.2- Les carbures

Les carbures sont des mélanges poudreux de carbure de tungstène et de titane très durs liés dans du cobalt. Les grains de carbure de tungstène mesurent en moyenne de un demi à plusieurs micromètres (μm), le cobalt remplit les lacunes. En fonction de la composition et de la structure du substrat, le matériau de coupe présente différentes propriétés qui exercent elles aussi une influence directe sur la performance d'usinage (*figure I.5*). Ce matériau de coupe a été Inventé en 1928. Cette dureté naturelle n'est presque pas réduite à chaud (*70 HR à 800 °C*) ce qui permet des vitesses de coupe très élevées : 4 fois celles des aciers rapides. Bien qu'il est coûteux, fragiles et d'un affûtage lent et difficile (*meule en carbure de silicium*), ils permettent des travaux d'ébauche et de finition sur les fontes et aciers durs à des vitesses de coupe allant de 50 à 200 m/min. Les plaquettes de carbure sont obtenues par frittage et sont soit montées sur un corps d'outil par brasage ou maintenues mécaniquement [6-7].

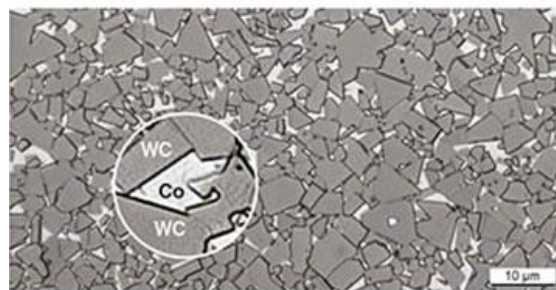


Fig. I.5- Substrat d'un carbure.

I.3.3- Les cermets

Le mot cermet désigne une combinaison entre deux matériaux Céramique et Métal (Cer +Met = Cermet). Les cermets sont des matériaux de coupe qui se présentent comme un carbure à base de carbure de titane (TiC) au lieu de carbure de tungstène et avec du nickel ou du cobalt comme liant (agglomérant). Les nouvelles nuances de cermet ne contiennent plus de nickel. Elles ont une structure basée sur des particules de carbonitride de titane Ti(C,N). Ce Ti(C, N) lui confère une meilleure résistance à l'usure, augmente la résistance à la déformation. Ce matériau se distingue alors par sa grande dureté, une meilleure résistance à l'usure et une tendance réduite au collage et une haute résistance chimique, mais au détriment de la ténacité. Il possède aussi une moins bonne résistance à la compression et aux chocs thermiques. Les cermet peuvent aussi avoir un revêtement PVD pour une meilleure résistance à l'usure. [8].

I.3.4-Les céramiques

Les outils en céramique sont composés principalement d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) ou de nitrure de silicium (Si_3N_4). Ils sont très stables d'un point de vue chimique et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées (allant de 100 à 800 m/min). Ils offrent une dureté à chaud très élevé de l'ordre de 82 HR, sans formation de copeau sur l'outil. Ils produisent un bon état de surface. Mais aussi ils ont une faible résistance à la flexion et une faible résistance à la fissuration (sauf pour Si_3N_4). Leur application est principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière, de même aux chocs et aux vibrations. Ce qui les rend très peu utilisés pour l'usinage des aciers inoxydables et en particulier pour la coupe discontinue (Fraisage). Ils sont principalement utilisés en tournage [6-7, 9].

I.3.5-Les revêtements

Afin d'améliorer les performances de l'outil, une couche fine de 3 à 15 μm d'épaisseur est solidement adhérente avec le substrat. Les revêtements monocouche ou multicouche (*figure I.6*) fournissent à l'outil une stabilité chimique, une protection thermique et par conséquent une résistance à l'usure élevée [10].

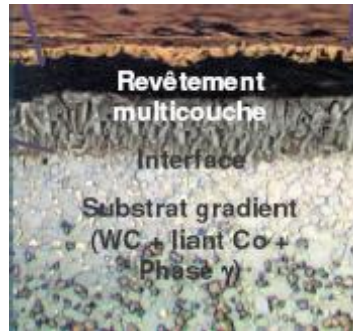


Fig. I.6- Revêtement multicouche d'un substrat carbure.

Deux méthodes de dépôt sont utilisées et chacun d'entre eux a des avantages et des inconvénients. Ces deux méthodes sont :

- Le CVD (dépôt chimique en phase vapeur).
- Le PVD (dépôt physique en phase vapeur).

Les revêtements largement utilisés sont le nitrure de titane TiN, le carbure de titane TiC, le carbonitrure de titane (TiCN) et l'alumine Al_2O_3 . Concernant les revêtements TiN et le TiCN, une réduction de dureté se manifeste au dessus de $500^{\circ}C$, ce qui limite ainsi leur utilisation à grande vitesse ou à sec. L'addition de l'aluminium au revêtement à base de TiN, il en résulte le TiAlN. Ce qui fourni non seulement une dureté élevée de 3300 HV, mais aussi une amélioration remarquable du comportement à hautes températures.

I.4-Acier inoxydable

Les matériaux destinés à la coupe des métaux sont d'une grande diversité, selon : leur emploi, leur caractéristiques, etc. Parmi ces matériaux on trouve l'acier inoxydable, qui occupe une assez bonne position dans le domaine de l'industrie vu sa résistance à la corrosion.

I.4.1- Définition:

L'acier inoxydable est un acier fortement allié dont l'élément d'alliage de base est le chrome avec une teneur de ($Cr \geq 10,5\%$). ce qui lui assure une résistance aux agents oxydants (résistance à la corrosion). ainsi que d'autres éléments d'alliages qui agissent sur l'état structural et sur la résistance à la corrosion à savoir : nickel, molybdène, cuivre, titane, niobium, etc... [11-12].

I.4.2- Ordonnancement des aciers inoxydables:

Les fortes additions d'éléments d'alliages (Cr, Mo,..) ou (Ni, Mn) modifient profondément l'état structural d'emploi de ces aciers, et alors on distingue quatre catégories (*figure I-7*) [11-12].

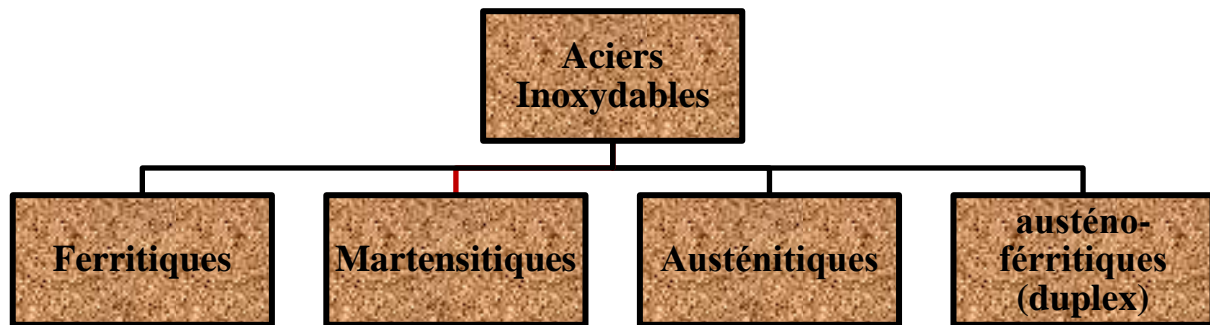


Fig. I.7- Différent types d'acier inoxydable.

a- Aciers inoxydables ferritiques:

Ce sont des aciers dont la teneur du chrome varie (de 12 à 20 %) et on les nomme **super-ferritiques** lorsque la teneur en chrome sera (> 20). Ils ne comportent pas d'addition de carbone et les résidus présents ($< 0,08$ %) sont généralement fixés par du titane ou du niobium. Leur composition leur permet de rester ferritiques à toute température et de présenter donc des propriétés mécaniques intéressantes. Cet acier est surtout utilisé Pour les éléments peu adaptés (-c.à.d- le niveau de résistance à la corrosion peut être qualifié de moyen, mais il devra présenter un état de surface permettant un lavage facile, afin d'éviter tout risque de conservation d'origine bactérienne). Le choix de la nuance est fonction du domaine d'utilisation.

b- Aciers inoxydables martensitiques:

Ce sont des aciers inoxydables dont la teneur en chrome est de 12 à 18% et celle du carbone varie de 0,1 à 1% environ. Ils sont utilisés après trempe martensitique et revenu qui leur permet d'acquérir des performances mécaniques élevées mais en contre partie, ils ne résistent pas à l'agression de tous les milieux. Les principales nuances de cet acier sont dérivées de la nuance X12Cr13 (410). Cet acier est surtout utilisé dans le domaine de la coutellerie, où l'élément déterminant est la qualité de coupe de la lame. Pour cela un alliage martensitique dont la teneur en carbone est au

moins 0.2% sera utilisé exemple (X20Cr13) ; de telle sorte qu'après un traitement de trempe, la structure obtenue sera d'une dureté suffisante pour assurer une bonne coupe.

c- Aciers inoxydables austénitiques:

Ce sont des aciers dont l'élément prépondérant est le chrome avec une teneur supérieur ou égale à 17% après l'élément de base " le fer " suivi par des éléments d'addition au moins 8% de nickel. La teneur en carbone est très basse et leur stabilité à toutes températures ainsi que leurs tenues aux corrosions peut être améliorée par des éléments d'addition tels que le molybdène, le cuivre, le titane, le niobium. Cet acier est le plus employé dans différent domaine, en raison de leur résistance chimique très élevée (résistance à l'oxydation), de leur ductilité comparable à celle du cuivre, et leurs caractéristiques mécaniques élevées (résistance au fluage et à la fatigue thermique). En plus de sa excellente ductilité, cet acier peut aussi être utilisé aux basses températures (jusqu'à moins 200 °C). Le choix de la nuance appropriée est fonction du domaine d'utilisation. La nuance X2CrNi18-9 à titre d'exemple est en compétition avec les alliages légers pour la réalisation d'équipements destinés à la cryogénie.

d- Aciers inoxydables austéno-férritiques (duplex):

La composition de cet acier (en chrome, nickel, molybdène et silicium) notamment équilibrée, pour conserver à l'état d'emploi une structure mixte constituée d'austénite (30 à 50%) et de ferrite (70 à 50%). Cet état confère à ces aciers des performances mécaniques élevées et une résistance particulière à certains types de corrosions (inter granulaires et sous contraintes). L'alliage le plus représentatif est le X2CrNiMoN22-5-3.

Remarque:

Les aciers inoxydables peuvent aussi être classés d'après leur structure cristalline qu'ils prennent après un traitement bien déterminé. De ce fait, il existe trois familles d'aciers inoxydables:

- Les aciers ferritiques (structure cubique centrée).
- Les aciers martensitiques (structure quadratique).

- Les aciers austénitiques (structure cubique à face centrée).

Le matériau pris en considération dans cette étude est l'acier inoxydable austénitique du type Fe-Cr-Ni. Cet acier représente 80% du marché mondial avec les aciers inoxydables ferritiques. Ceci est dû à leurs structures, qui leur accordent une ductilité et une ténacité exceptionnelle depuis des températures cryogéniques jusqu'à des centaines de degrés Celsius. La nuance de base est X5CrNi18-10 (304). La figure.I-8 présente les principaux aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel (*molybdène*) dérivés de la nuance de base [11].

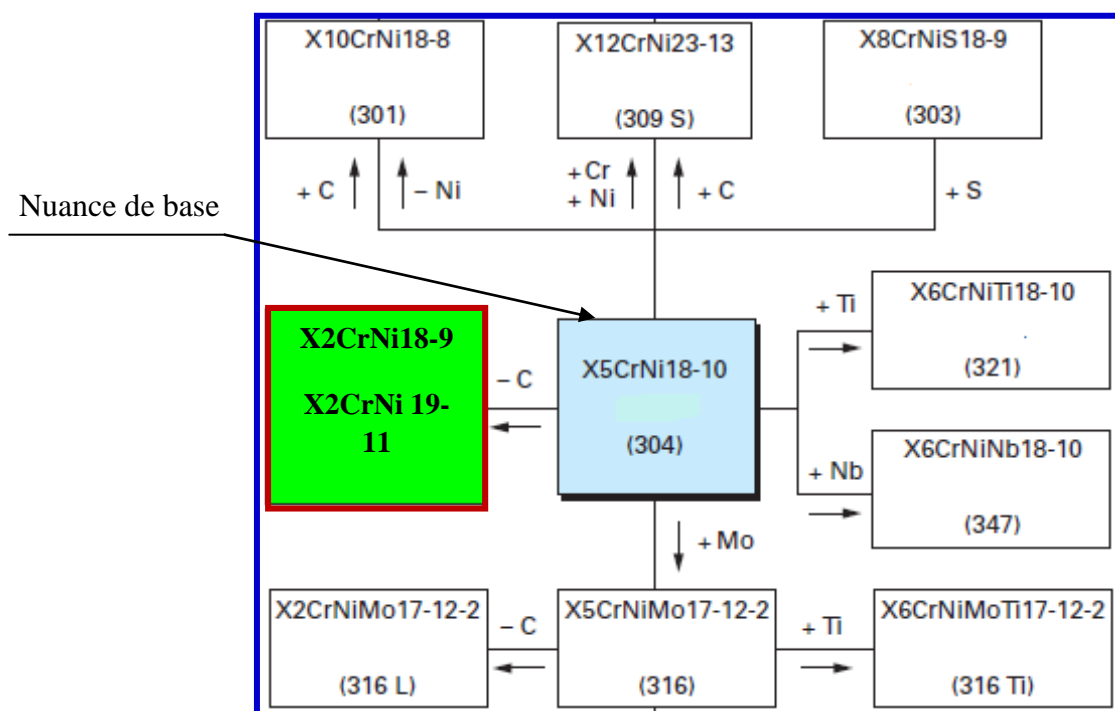


Fig. I.8- principaux aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel (*molybdène*) dérivés de la nuance de base.

I.5- Notion sur l'usinabilité des matériaux

L'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières, celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (*fraisage, à titre d'exemple*), dans des conditions de coupe toujours identiques à elles mêmes, à l'aide d'outils toujours identiques tant au point de vue de la composition chimique et du traitement thermique qu'au point de vue de leur forme et de leur affûtage [13]. Aussi, on peut définir l'usinabilité comme étant la propriété grâce à laquelle un matériau

donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc, en principe, d'une propriété inhérente à la matière envisagée [14].

L'usinabilité prend en compte les paramètres de :

- Metallurgie : composition du matériau,
- Mécanique : dureté, taux d'écaillage,
- Tribologie : frottement, usure,
- Paramètres d'usinage (*vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de passe*) [15].

I.6-Actions mécanique en usinage

L'usinage des pièces en fabrication mécaniques est en vérité influencé par plusieurs actions mécaniques. Ces actions mécaniques ne sont en fait que le triplet, effort de coupe puissance de coupe et pression spécifique de coupe [16].

I.6.1- Effort de coupe

En Plus des paramètres technologiques qui influencent le processus de coupe tel que la rugosité de surface et l'usure des outils, l'effort de coupe est également un bon indice de l'usinabilité. La connaissance des efforts nous informe sur les déformations plastiques et la puissance mécanique nécessaire à l'enlèvement de matière. Ils servent au dimensionnement des organes de la machine-outil (*boite des vitesses et des avances, bâti*) et du corps de l'outil. Cela nous permet de diminuer le choix des valeurs des efforts acceptables pour l'outil. L'intervalle de fonctionnement permis est établi principalement en considérant l'évolution de la pression spécifique de coupe (K_s) en fonction de la variation des différents paramètres d'usinage (V_c , f_z et ap) correspondant à celles du domaine de validité de l'outil coupant. Ceci peut s'inscrire dans la démarche nommée Couple-Outil-Matière (COM) (norme AFNOR XP E 66-520-5 [16-17]).

En fraisage l'effort de coupe peut être décomposé suivant trois directions privilégiées (*figure. I-9*). Il peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage.

Fc: Composante dans le sens de rotation de la fraise appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. Elle a la plus grande valeur absolue.

Fa: Composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance, ou effort axial.

Fr: Composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres (*suivant l'axe de la Fraise*), appelée effort de refoulement ou effort radial.

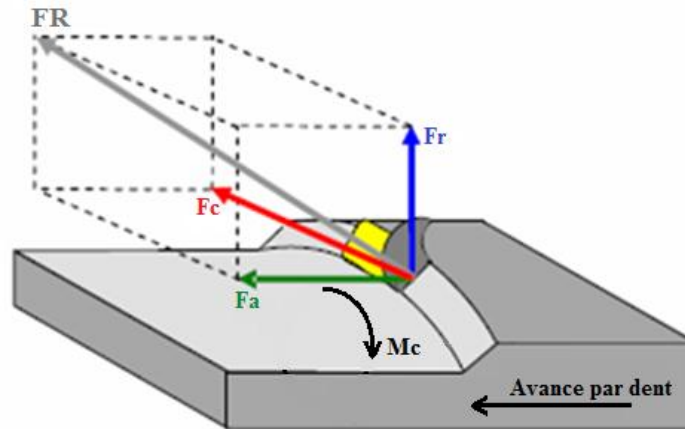


Fig. I.9- Composantes de l'effort de coupe.

I.6.2- Pression spécifique de coupe

L'effort de coupe par unité de surface peut être désigné comme « pression spécifique de coupe » dans ce point on ne s'intéresse qu'à l'effort de coupe (**Fc**). Les deux autres composantes ne sont pas pris en considération car elles n'interviennent presque pas dans le calcul de la puissance nécessaire à la coupe (*figure I.10*) [16].

Par définition de la Pression spécifique de coupe on a :

$$F_c = K_s \cdot a_p \cdot f \quad (I.3)$$

$$\implies K_s = F_c / a_p \cdot f \quad (I.4)$$

Fc : Effort de coupe tangentiel, [N]

Ks : Pression spécifique de coupe, [N/mm²]

ap : Profondeur de passe, [mm]

f : Avance par tour, [mm/tr]

avec : $f = fz \cdot Z \quad (I.5)$

fz : Avance par dent, [mm/dent]

Z : Nombre de dent de la fraise

De nombreux paramètres influence Ks, les principaux parmi eux sont :

-Matériaux de l'outil coupant et de la pièce usinée (caractéristiques mécaniques) ;

- + L'avance, et donc l'épaisseur nominale du copeau ;
- L'angle normal de coupe ;
- L'usure.

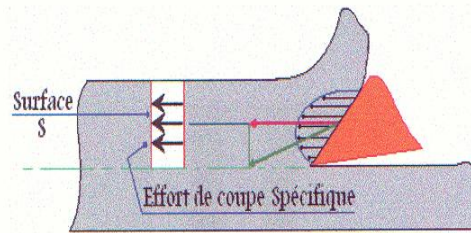


Fig. I.10- Pression spécifique de coupe (K_s) [18].

- **Influence des caractéristiques du matériau de l'outil de coupe sur K_s**

Il est évident que l'usinage d'un matériau ductile tel que l'aluminium nécessite moins d'effort qu'un matériau dur tel que le C45. Afin de quantifier l'effet des caractéristiques mécaniques du matériau usiné, Il est nécessaire d'usiné différents matériaux dans les mêmes conditions et de mesurer l'effort de coupe dans tous les cas. Ainsi on calcul la pression spécifique de coupe. Pour se faire voici un cas d'étude :

Matériau	F_c (N)	K_s (N/mm ²)
C10	586	2932
C35	680	3400
C85	886	4430
35CD4	720	3600
35NCD16	900	4500
AlCuMg	290	1450
FGL18	320	1600

Tab .I.1. Influence des caractéristiques du matériau usiné sur K_s [16].

Le tableau montre bien l'influence majeur du matériau usiné. D'où le modèle de la forme :

$$K_s = C \cdot K (f, ap, \gamma_n, \kappa_r, \dots)$$

Dans un état métallurgique donné, C : est une constante, K : une fonction des différents paramètres.

I.6.3- Puissance de coupe

La puissance de coupe est un paramètre machine. La puissance nette peut être calculée pour s'assurer que la machine en question est adaptée à la fraise et à l'opération envisagée. Cette puissance est donnée par la relation :

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60} \quad (I.6)$$

F_c : Effort de coupe tangentiel, [N]

V_c : Vitesse de coupe, [m/min]

Et alors : $P_b = \frac{P_c}{\eta} \quad (I.7)$

P_b : Puissance absorbée (puissance motrice), qui est un paramètre machine (W).

η : Rendement : paramètre machine.

I.7- Paramètres de performances d'usinage

I.7.1- Usure de l'outil de coupe

La qualité de la surface et la précision de la pièce usinée est fonction de la stabilité du système usinant d'une part et liée directement au degré d'usure de l'outil de coupe. L'usure résulte des sollicitations mécaniques et thermiques engendrées par les mouvements relatifs entre l'outil de coupe, la pièce à usinée et le copeau enlevé, qui provoquent un transfert de métal entre les surfaces en contact. L'usure est un phénomène complexe qui se produit par différents mécanismes sous différentes formes. Les causes d'usure sont les suivantes (*figure I-11*) :

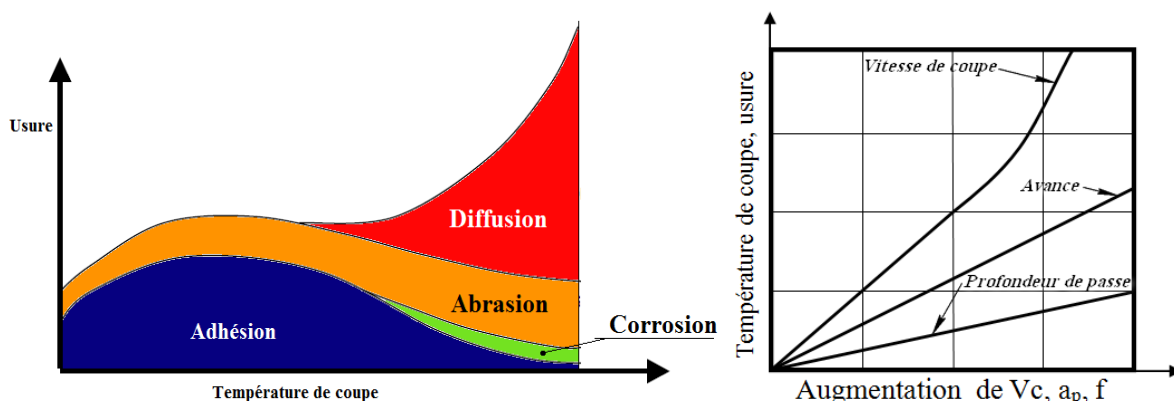


Fig. I.11- Causes d'usure lors de l'usinage.

I.7.1.1- Causes d'usure

Le phénomène d'usure des outils coupants est l'un des problèmes majeurs rencontré lors de l'usinage. Ce phénomène se manifeste de différentes manières selon les causes qui le provoquent [5,10].

❖ **Usure par abrasion:** Se manifeste par l'arrachement de micro copeaux par des particules très dure contenues dans la microstructure de la matière usinée. L'élévation de la température fait accentuer cette usure à cause de la diminution de la dureté de l'outil. Les produits d'abrasion sont évacués en continu avec les copeaux. Elle dépend donc de la composition chimique et du procédé d'élaboration du matériau usiné et croît avec la vitesse. L'usure est abrasive quand l'usinage est à sec, mais lorsque l'usinage est effectué avec lubrification, l'usure ainsi est dite érosive.

❖ **Usure par adhésion :** favorisée par les grandes pressions, des fragments du copeau peuvent adhérer dans l'outil en forme de microsoudure. Ces microsoudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage.

❖ **Usure par corrosion (oxydation):** C'est une usure qui est due en fait à l'oxydation de la matière de l'outil. Cette oxydation, en réalité n'est rien d'autre qu'une attaque chimique par l'oxygène.

❖ **Usure par diffusion :** elle est due à la diminution de l'inertie chimique de l'outil provoquée par des températures très élevées. En conséquence, les atomes de l'outil réagissent chimiquement avec les atomes de la matière usinée, spécialement lorsque il y'a une affinité chimique entre les deux matières.

I.7.1.2-Différentes formes d'usure des outils:

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent des paramètres essentiels déjà évoqués (couple outil matière, condition d'usinage). On trouve également quatre zones principales d'usure et plus clairement l'outil est soumis aux modes d'usures définis ci-après.

◆ **Usure en cratère:** Le frottement du copeau sur la face d'attaque de l'outil cause son usure (*Figure I.12*), soit par la diffusion ou par l'adhésion de ces particules sur le copeau à cause de l'élévation de la température de coupe qui fait diminuer la

durée de vie de l'outil. Cette usure est fréquente surtout dans l'usinage des matériaux à faible conductivité thermique. La forme du cratère est définie par sa profondeur maximale K_T .

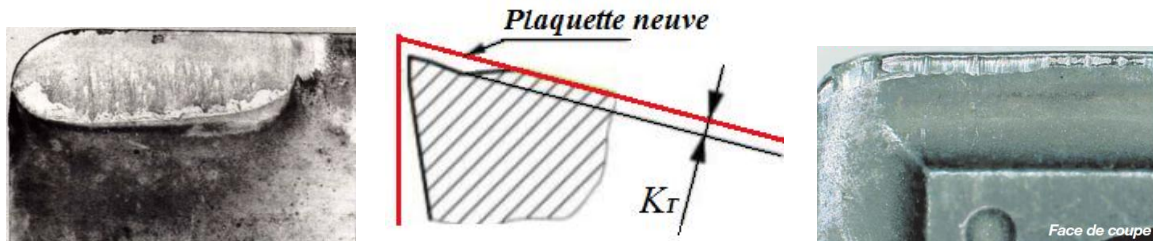


Fig. I.12- Usure en cratère [19-20].

♦ **Usure en dépouille:** C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable, étant donné qu'elle est plus prévisible et stable. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce (*figure I.13*).



Fig. I.13- Usure en dépouille [19-20].

♦ **Usure en entaille:** c'est une combinaison de l'usure en cratère et en dépouille au point de l'intersection de l'arrête tranchante principale avec la surface usinée (qui coïncide avec la ligne de la profondeur de passe). Elle est courante dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires (*figure I.14*).

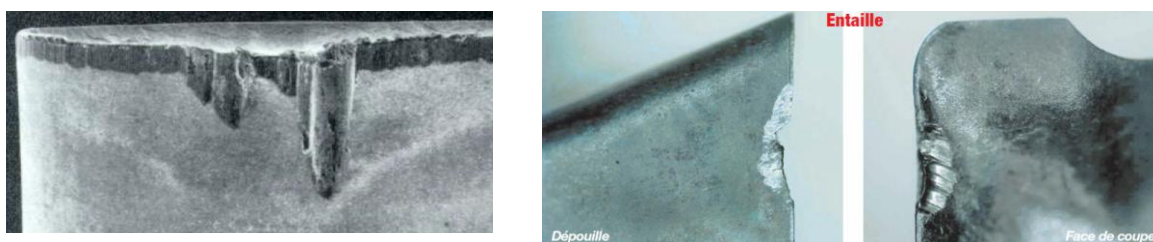


Fig. I.14- Usure en entaille [19, 20].

◆ **Usure par déformation plastique:**

Le bec de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des autres pressions régnant dans la zone de coupe. Cette déformation se traduit par un affaiblissement plastique du bec de l'outil, une déformation permanente et un refoulement sur les faces de dépouille (*figure I-15*).

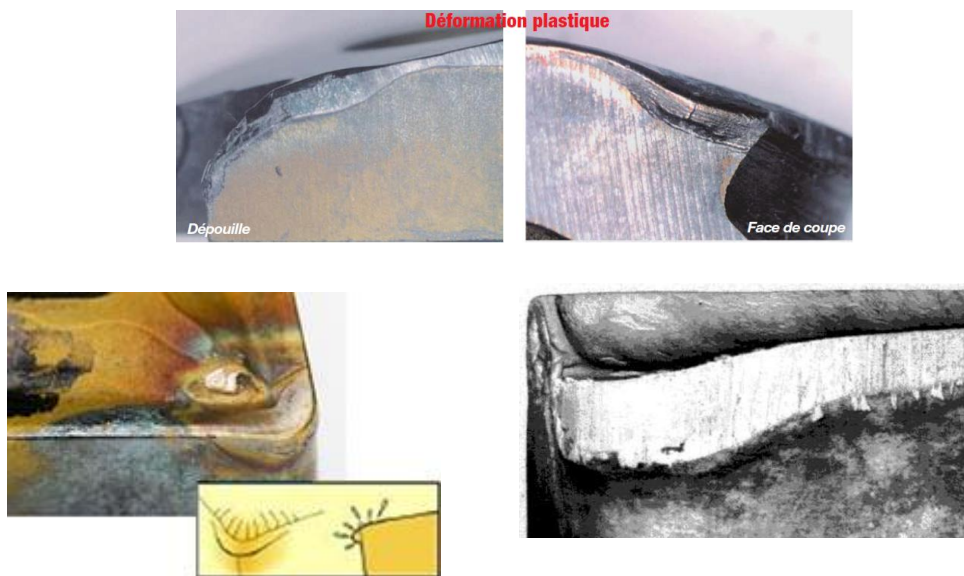


Fig. I.15- Usure par déformation plastique [19-21].

◆ **Usure par écaillage:**

On rencontre ce type d'usure dans le cas d'usinage avec des efforts cycliques ou des chocs thermiques provoqués par les usinages interrompus ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures ou d'ébréchures sur l'arête ou sur la face de coupe suite à l'enlèvement de matière qui se fait par fragmentation aléatoire. L'importance de l'écaillage et de la fissuration thermique est évaluée jusqu'à un certain point par la largeur maximale d'usure en dépouille VBB_{max} . (*fig. I-16*).

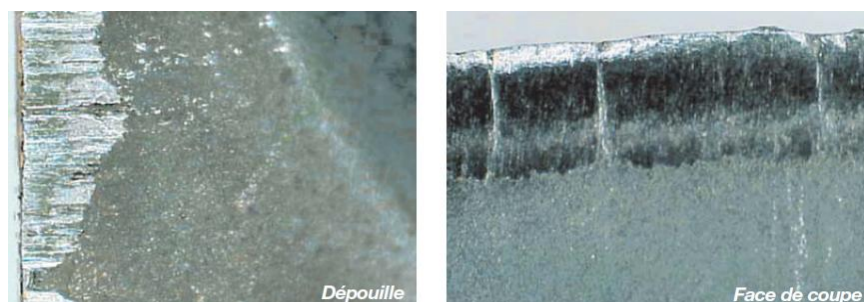


Fig. I.16- Usure par écaillage [19].

◆ **Usure par arête rapportée:** Cette usure est provoquée par la soudure de la matière de la pièce sur la plaquette. Le copeau atteint une température permettant de le rendre “collante” mais, à ce stade, il refroidit suffisamment vite pour adhérer à la plaquette. C’est le type d’usure le plus courant avec les matières collantes telles que les aciers bas carbone, les aciers inoxydables et l’aluminium. Une faible vitesse de coupe accélère la formation d’une arête rapportée (figure I-17).



Fig. I.17- Usure par arête rapportée [19,21].

I.7.2- Qualité de surface

L'aptitude d'une surface à une fonction donnée, dépend d'un ensemble de conditions, notamment des caractéristiques de ses 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 de nature géométrique ou physico- chimique. Dans notre cas, on ne s'intéresse qu'aux défauts géométriques. Ces derniers sont généralement sous quatre numéros d'ordre (figure. I-18) [22-23].

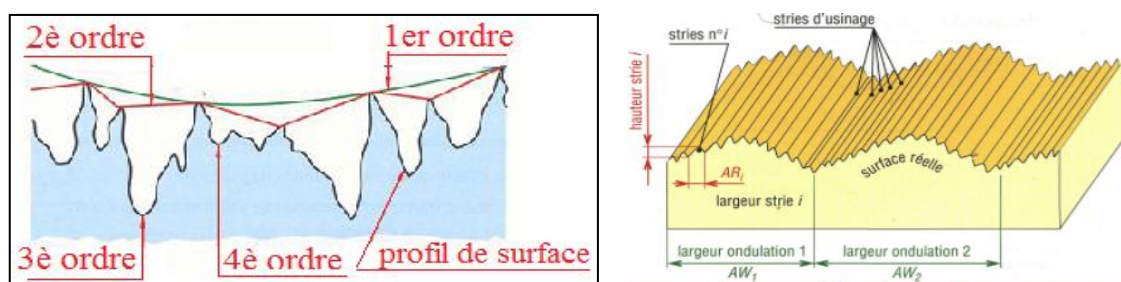


Fig. I.18- principaux défauts de surface.

I.7.2.1- principaux défauts de surface

■ **Défauts du premier 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 (*Figure I.18*).

■ **Défauts du deuxième ordre :** Défauts plus petits. Ayant l'aspect général d'une ondulation, et provenant de l'avance par tour au tournage ou de l'avance par dent en fraisage, de vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil de coupe (*Figure I.18*).

■ **Défauts du troisième ordre :** Se sont des stries ou des sillons laissés par l'outil de coupe. Ils sont fonction de l'avance par dent de la fraise, ou à des vibrations haute fréquence (figure I.18).

■ **Défauts du quatrième ordre :** Ils sont constitués par des arrachements, fente et piqûre, ... etc. Ils sont dus à des marques d'outil ou à des vibrations de hautes fréquences. Ce type de défaut a un caractère aperiodique. L'ensemble des défauts de 3^{ème} et 4^{ème} ordre constituent la rugosité de la surface (*figure I.18*).

I.7.2.2-Paramètres caractéristiques d'état de surface

Les normes et les paramètres désignant la rugosité de surface sont nombreux, on se limite à présenter les paramètres de surface fréquemment utilisées dans le domaine de la fabrication mécanique, définis selon la norme **ISO 4287** (*figure I.19*).

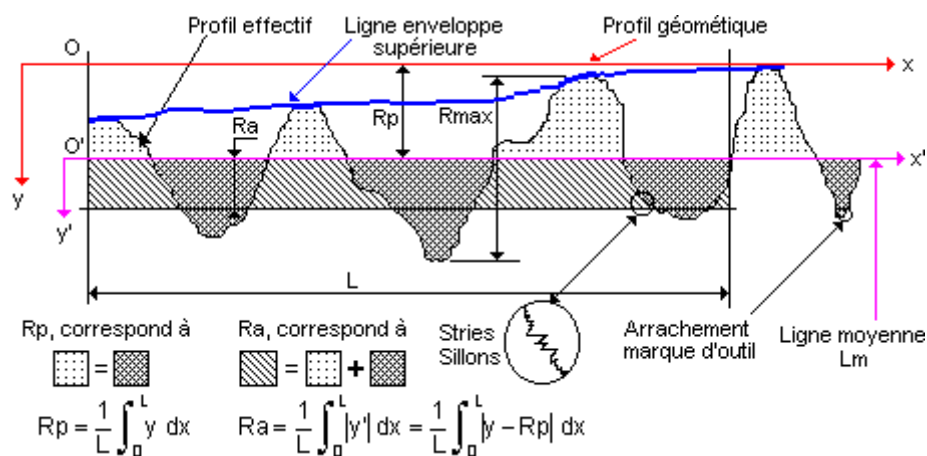


Fig.I.19- paramètres d'état de surface [24].

❖ **Rugosité moyenne arithmétique R_a** : Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation l_m (figure I.19-I.20).

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| dx \quad (I. 8)$$

❖ **Rugosité moyenne profondeurs R_z** : Moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones d'évaluations successives l_e (figure I.20).

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \quad (I. 9)$$

Hauteur maximale des pics R_p : Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation l_m (figure I.20).

$$R_p = R_{p3} \quad (I. 10)$$

❖ **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 (figure I.20).

❖ **Rugosité maximale R_t** : Ecart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité R , sur la longueur totale d'évaluation l_m (figure I.20).

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4} \quad (I. 11)$$

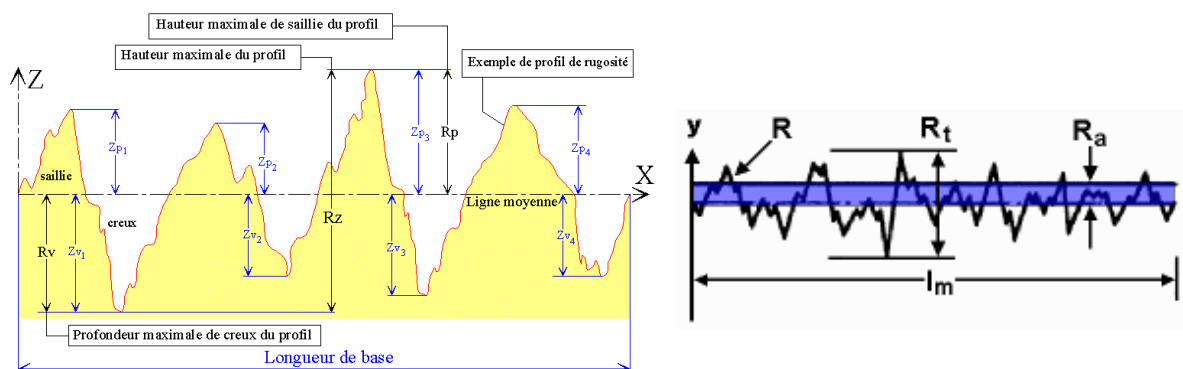


Fig. I.20- Les critères de la rugosité.

I.7.2.3-Paramètres influençant la qualité de surface

La réalisation d'un usinage de qualité varie selon l'opération à effectuer. Nombreux sont les paramètres qui influencent la qualité de surface de la pièce finale comme l'illustre le diagramme de la (figure I.21). Ce dernier englobe tous les facteurs

de coupe, humains et matériels, susceptibles d’agir sur l’intégrité de surface de la pièce usinée [10].

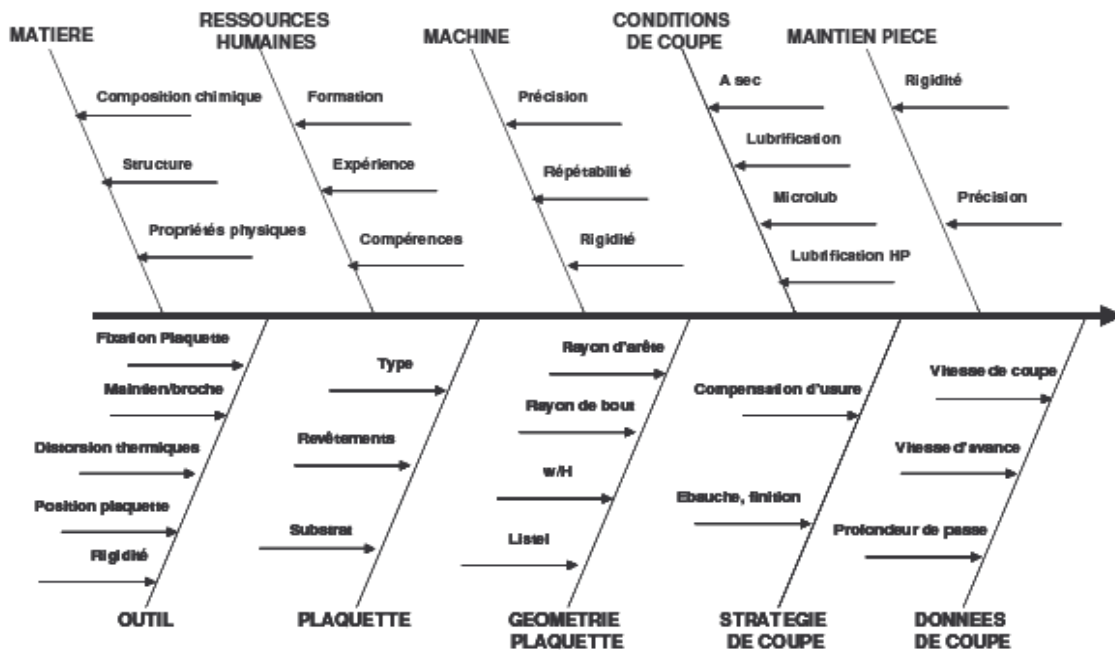


Fig. I.21- Paramètres de coupes influençant l’intégrité de surface en usinage, sous la forme d’un diagramme d’Ishikawa [10].

I.7.3- Quantité de copeaux enlevés

La quantité de métal enlevé au cours d’usinage en fraisage est fonction de, la profondeur de passe, de la largeur de coupe et de l’avance par unité de temps [mm³/min].

$$QCE = a_e \times a_p \times V_f \quad \text{où} \quad V_f = f \times n \quad (I-12)$$

$$D'où \quad QCE = \frac{1000 \times a_e \times a_p \times f \times z \times Z \times V_c}{\pi \times D} \quad (I-13)$$

I.8-Travaux de recherche

S. Berkani et al [25] ont évalué l’effort tangentiel (F_c), la rugosité de surface (R_a), l’effort spécifique (K_c) et la puissance de coupe (P_c) lors du tournage de l’acier inoxydable AISI304. La méthode de surface de réponse (RSM) et l’analyse de la variance ($ANOVA$) ont été utilisées afin de déterminer l’influence des paramètres de coupe et de modéliser les paramètres de sorties (R_a , F_c , P_c et K_c). Les résultats de

l'ANOVA ont montré que l'avance par tour est le facteur prépondérant qui affecte la rugosité de surface (Ra) avec une contribution de 71.04%. Cependant la profondeur de passe affecte considérablement l'effort (F_c) et la puissance de coupe (P_c) avec une contribution de (60.74% et 67.11%) respectivement. Tandis que l'effort spécifique (K_c) est influencé significativement par la vitesse de coupe avec une contribution de 41.43%. Les auteurs ont utilisé la fonction désirabilité afin de trouver le régime optimal ($V_c=104.54$ m/min, $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.295$ mm). En dernier lieu, ils indiquent que cet acier est caractérisé par sa mauvaise usinabilité avec l'apparition de micro-copeau soudé sur la surface usinée et l'arête rapportée sur le bec de l'outil (figure I.22).

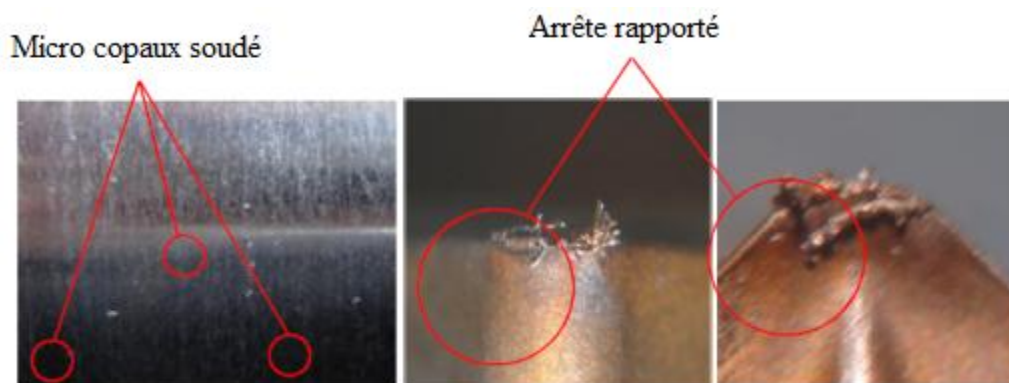


Fig. I.22- Micro-copeaux soudé sur la surface usinée et arête rapportée sur plaquette de coupe.

I. Ciftci et al [26] a fait une étude comparative entre deux aciers inoxydables (AISI 304 and AISI 316) lors du tournage à sec en terme de rugosité de surface et de l'effort de coupe. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de coupe variable tout en maintenant une profondeur de passe et une avance constante ($a_p=1.6$ mm et $f=0.16$ mm/tr). Les deux matériaux ont été usinés avec des outils en carbure possédant deux revêtements différents ($TiC/TiCN/TiN$ et $TiCN/TiC/Al_2O_3$). L'étude comparative a révélé que la vitesse de coupe a un effet significatif sur la rugosité de surface des deux aciers usinés. Avec l'augmentation de (V_c) la rugosité diminue jusqu'à la vitesse 180m/min, au-delà de cette valeur la rugosité augmente. Les auteurs attribuent cette augmentation à la présence de l'arête rapportée (BUE). Aussi les efforts de coupe générés lors de l'usinage de l'acier AISI 316 sont supérieur à ceux enregistré avec

l'acier AISI 304, ceci est dû à la présence du molybdène (2%) dans la structure de l'acier AISI 316, ce qui cause une augmentation des efforts de coupe (*figure I.23*).

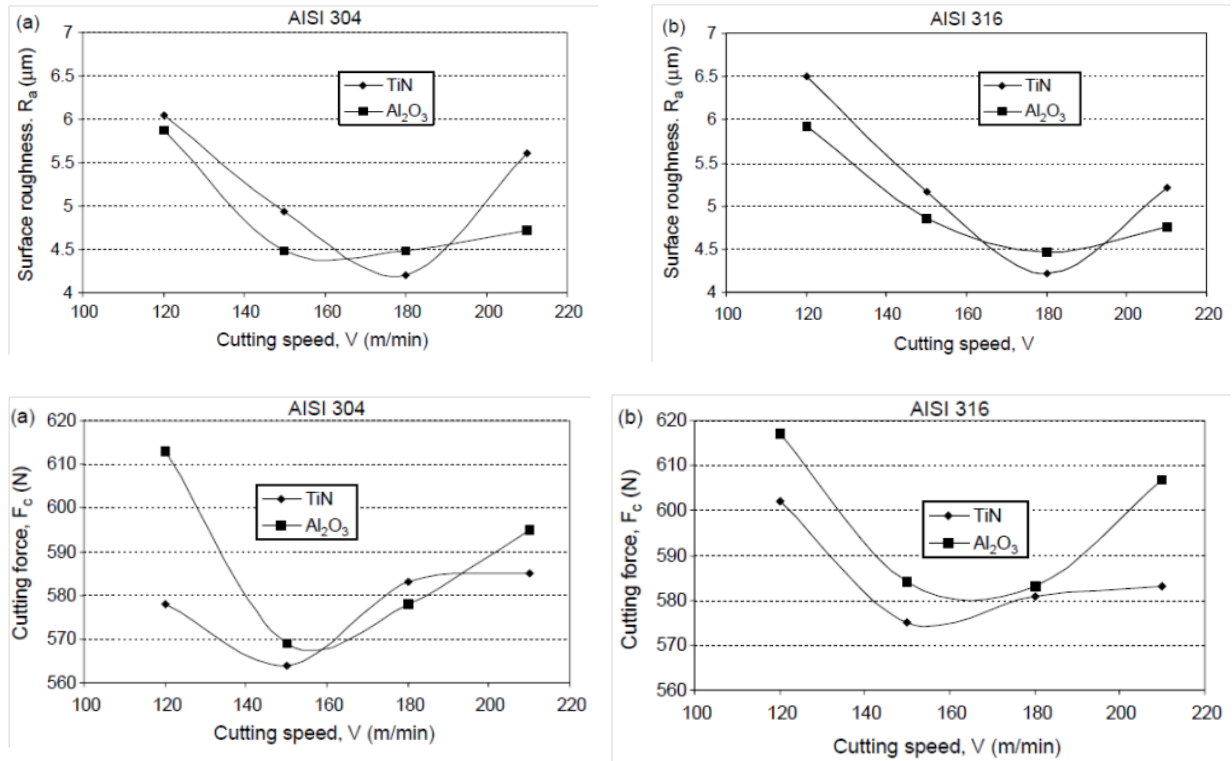


Fig. I.23- Influence de la vitesse de coupe et du revêtement des plaquettes de coupe sur la rugosité de surface et l'effort de coupe lors de l'usinage des aciers AISI 304 et AISI 316.

E. Kuram et al [27] ont menée une étude expérimentale pour investiguer l'influence de la vitesse de la broche, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur l'usure de l'outil, les efforts de coupe (F_x et F_y) et la rugosité de surface (R_a) pendant le micro-fraisage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304. Afin d'optimiser les paramètres technologiques un plan de Taguchi L_9 à été utilisé. La régression et la logique floue "fuzzy logic" ont été utilisées pour modéliser et optimiser le procédé de fraisage.

J. Yan et al [28] proposent une méthode d'optimisation multi-objectif basée sur l'analyse relationnelle grise (*grey relational analysis -GRA-*) et la méthodologie de surface de réponse (*RSM*), afin d'optimiser les paramètres de coupe lors du fraisage en fixant trois objectifs qui sont, la rugosité de surface, le taux d'enlèvement de matière et l'énergie de coupe. Les paramètres de coupe optimisés sont la fréquence de rotation, la

vitesse d'avance, la profondeur de passe et la largeur de coupe. Les résultats de l'analyse (*GRA*) des effets des facteurs indiquent que la largeur de coupe est le facteur le plus influent sur les paramètres de sortie suivi par la profondeur de passe, par la vitesse d'avance et enfin par la fréquence de rotation. Les auteurs ont trouvé que la combinaison optimale des paramètres de coupe obtenues à partir de la méthode d'optimisation multi-objective est, $n=1000\text{tr/min}$, $V_f=300\text{mm/min}$, $a_p=0.4\text{mm}$ et $a_e=15\text{mm}$. Ils indiquent à la fin que la méthode proposée est un outil efficace pour l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe car elle réduit la consommation d'énergie de coupe de 18.1% (*figure I-24*).

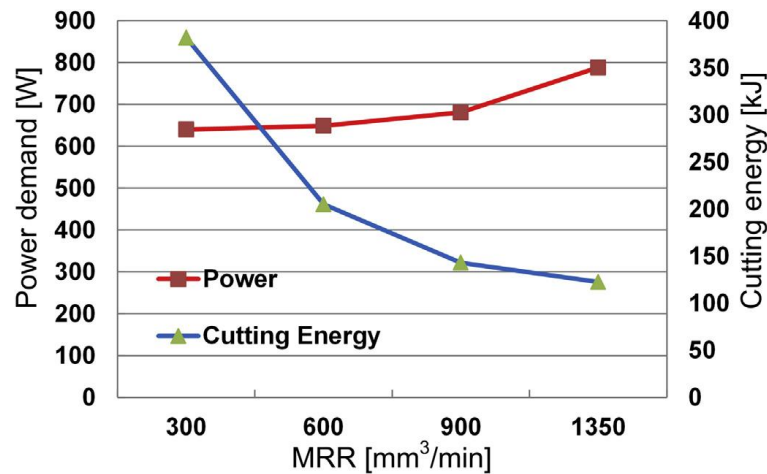


Fig. I.24- Energie de coupe et puissance demandée en fonction du volume de copeau enlevé (MRR).

Le travail de Mohammed. T et al [29], a porté sur l'étude des effets des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface lors du fraisage de finition de l'aluminium. Cela dans le but de mieux comprendre l'effet de la vitesse de la broche, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur la rugosité de surface et aussi d'établir un modèle de régression multiple. L'auteur a indiqué que le modèle développé avec les différents paramètres d'usinage et toutes les interactions, a prévu les valeurs de la rugosité de surface avec une précision d'environ 12% équation (I.2) et la (*figure I.25*). L'investigation des paramètres d'usinage considérés, a montré que le fini de la surface de la pièce usinée est significativement influencé par les interactions entre la vitesse d'avance et la profondeur de passe et entre la vitesse d'avance et la vitesse de la broche.

$$R_a = 1.178854 - 0.000492N + 0.009897Vf - 0.17625ap - 0.000003N \times Vf + 0.000811N \times ap - 0.003012Vf \times ap. \quad (I-14)$$

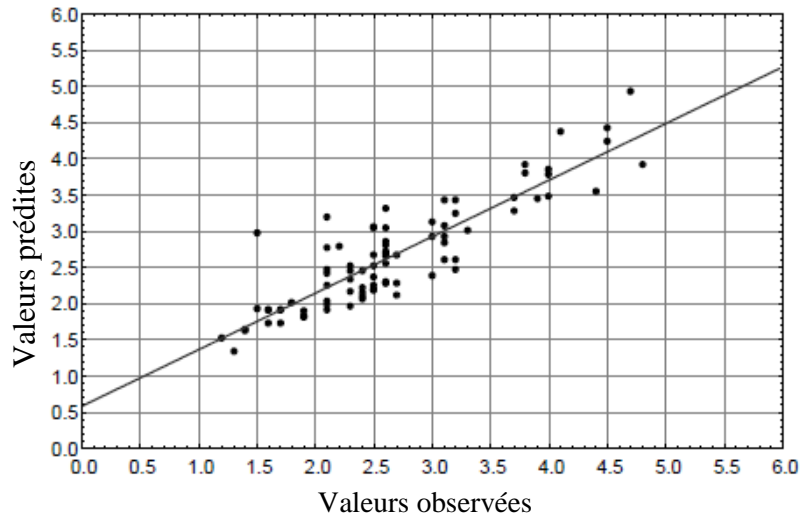


Fig. I.25- Valeurs prédites et valeurs observées de la rugosité de surface.

J. Paro et Al [30] exposent les mécanismes d'usure et d'endommagement des outils en carbure revêtus en TiN lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X5CrMnN18-18. L'usinabilité de cet acier est examinée en fonction de la durée de vie de l'outil et de la vitesse de coupe. L'effet de (V_c) et du pourcentage en azote est également analysé en mesurant les composantes de l'effort de coupe. Les auteurs affirment qu'une teneur en azote plus élevée diminue l'effort de coupe et l'usinabilité, et que l'usure admissible $[VB]=0.3\text{mm}$ est atteinte après 5min de travail pour une vitesse de 70m/min et une avance de 0.24mm/tr. En plus la présence de l'arrête rapportée (BUE) rend ce matériau difficile à usiner.

G. Campatelli et al [31] ont proposé une approche pour optimiser les paramètres de coupe à savoir : vitesse de coupe, profondeur de coupe axiale et radiale et la vitesse d'avance, lors du fraisage à sec sur une machine CNC moderne, dans le but de minimiser la consommation d'énergie des machines de production. Les essais menés ont été tous réalisés à sec pour éliminer l'impact néfaste sur l'environnement dû au lubrifiant, sans affecter sensiblement la consommation d'énergie. Les auteurs ont

utilisé la méthode RSM afin de modéliser la puissance consommée. Le modèle trouvé servira pour faire des prédictions et d'optimiser les conditions de coupe.

M. Yasir et al [32] ont fait une investigation sur l'influence des paramètres de coupe sur la topographie de surface de l'acier inoxydable AISI 316L en fraisage de finition. Ils ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (RSM) afin de proposer un modèle de prédiction de la rugosité de surface. Les résultats trouvés montrent que l'avance est le principal facteur qui affecte la rugosité de surface alors que la vitesse de coupe a une influence négligeable. Les auteurs affirment qu'aux grandes avances, des micro-copeaux apparaissent ce qui conduit à une mauvaise rugosité de surface de l'acier AISI 316L.

S. Kalidass et al [33] ont fait une étude prédictive de la rugosité de surface lors du fraisage de profile de l'acier inoxydable AISI 304 avec des outils en carbure métallique. Pour cela les auteurs ont prit comme paramètres d'entrés l'angle d'hélice, la vitesse de broche, l'avance et la profondeur de passe (figure I-26). Ils ont menés des expériences pour mesurer la rugosité de surface en fonction de la technique de conception des expériences (DOE) sur un centre d'usinage vertical. Les auteurs ont utilisé deux méthodes de modélisation, la régression mathématique et les réseaux de neurones artificiels (ANN). Ils ont jugés que les ANN sont capables de fournir des meilleures prévisions de la rugosité de surface comparativement à la régression.

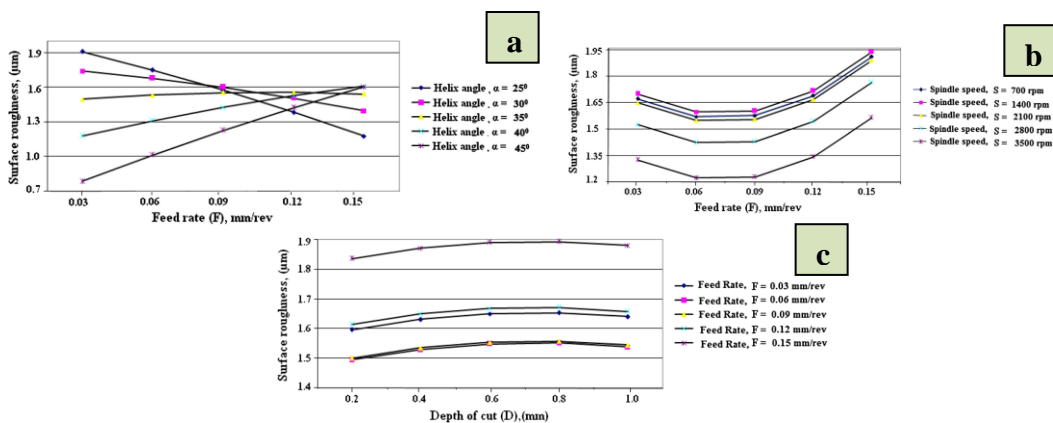


Fig. I.26- Effets des Interactions sur la rugosité de surface pour :

- (a) Avance par tour- Angle d'hélice
- (b) Avance par tour- Vitesse de la broche
- (c) Profondeur de passe- Avance par tour.

I. Korkut et al [34] ont étudié l'influence de la vitesse de coupe sur l'usure des outils et la rugosité de surface pendant le tournage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 en utilisant des outils de coupe en carbure cémenté. Ils ont constaté que l'usure de l'outil de coupe diminue lorsque la vitesse de coupe atteint la valeur de 180m/min, et que la rugosité (Ra) diminue aussi avec l'augmentation de la vitesse de coupe (figure I.27).

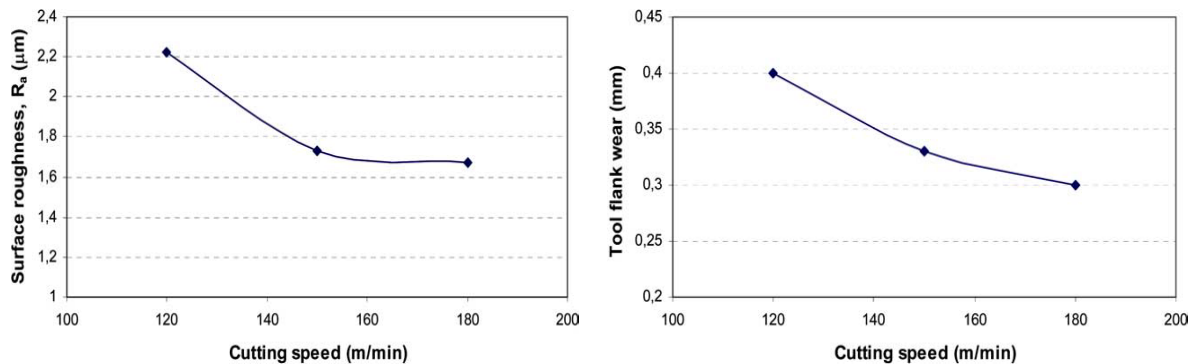


Fig. I.27- Rugosité de surface et usure en dépouille en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304.

B. S. Reddy et al [35] ont utilisé la méthode de la surface de réponse (*RSM*) à partir de la technique de conception des expériences (*DOE*), afin de développer un modèle prédictive de la rugosité de surface (Ra). En se basant sur le modèle trouvé, l'algorithme génétique (*GA*) est utilisé pour déterminer un régime de coupe optimal, dans le but de minimiser la rugosité de surface. Les paramètres d'usinage considérés dans ces essais sont, rayon de bec de l'outil de coupe, vitesse de coupe, l'avance, profondeur de passe et la largeur de passe. Les expériences ont été réalisées en fraisage en utilisant un plan orthogonal de Taguchi de 50 Essais (L_{50}).

A. M. Zain et al [36] ont présenté le modèle (*ANN*) comme technique essentielle pour prédire la mesure de la rugosité de surface lors du processus de fraisage. Dans cette étude les auteurs ont utilisé un plan d'expérience de 24 essais et trois type d'outils en carbure (*non revêtu, revêtu de $TiAlN$ et le dernier revêtu de SN_{TR}*) sur des échantillons en alliage de titane (*$Ti-6Al-4V$*). Les auteurs ont développé huit structures de réseaux en utilisant des nombres différents de nœuds dans la couche cachée, qui sont 3-1-1, 3-3-1, 3-6-1, 3-7-1, 3-1-1-1, 3-3-3-1, 3-6-6-1 et 3-7-7-1. Ils ont

constaté que la structure de réseau 3-1-1, a donné le meilleur modèle (ANN) pour prédire la valeur de la rugosité de surface. Ils ont indiqué aussi que le modèle de rugosité de surface dans le procédé de fraisage pourrait être amélioré en modifiant le nombre de couches et les nœuds dans les couches cachées de la structure du réseau (ANN) (figure I.28). À la suite de la prédiction, il a proposé une combinaison des conditions de coupe recommandée pour obtenir la meilleure valeur de rugosité de surface, à savoir une vitesse élevée avec une vitesse d'avance et un angle de coupe radial faible.

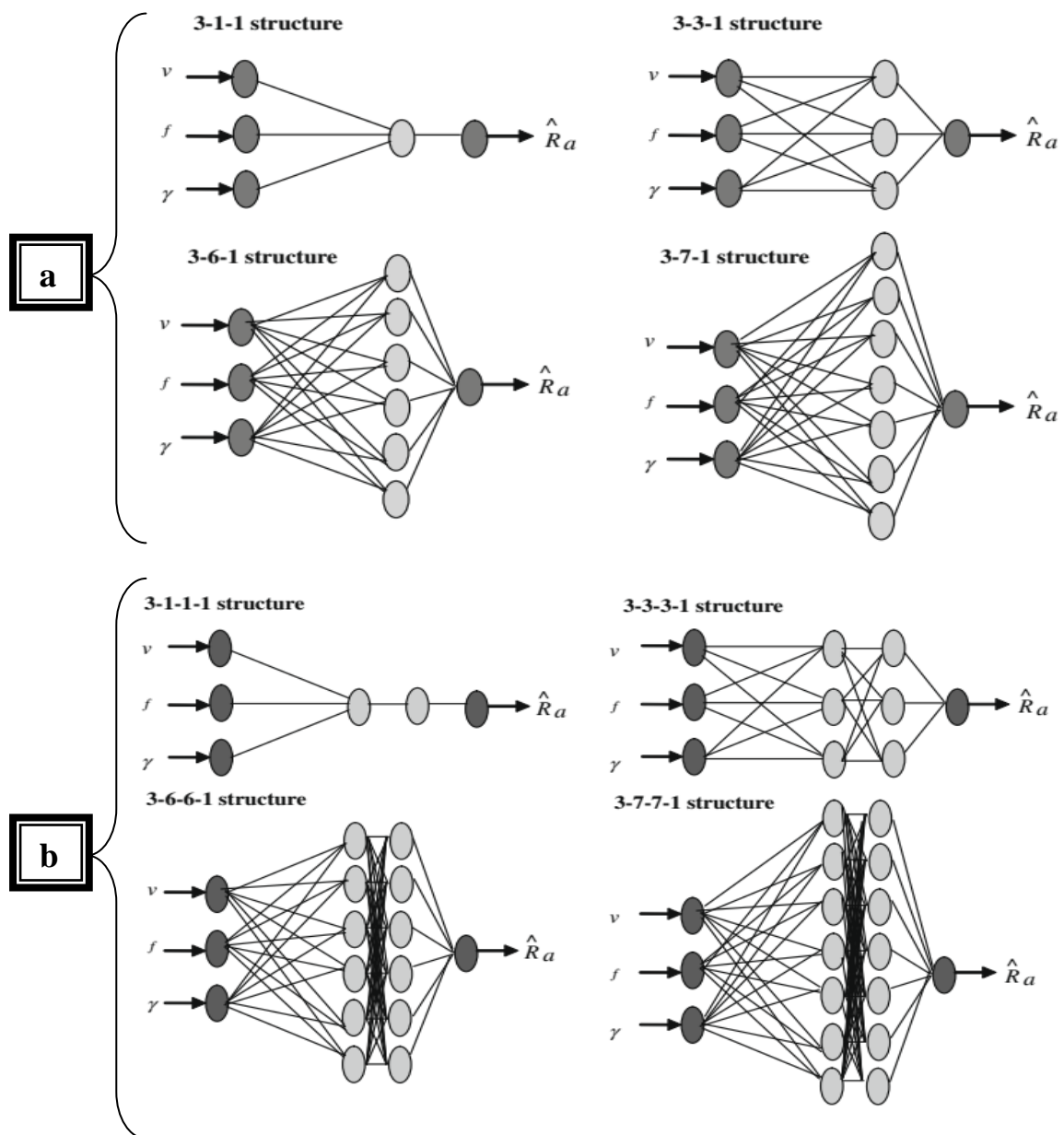


Fig. I-28. Modèle de structure de réseau neuronal, (a) avec une seule couche cachée.

(b) avec deux couches cachées.

T. Erzurumlu et al [37] ont développé des modèles pour prédire l'erreur de la rugosité de surface sur les surfaces d'un moule en utilisant la méthodologie de surface de réponse (*RSM*) et les réseaux de neurone artificiel (*ANN*). L'avance, La vitesse de coupe, la profondeur axiale-radiale de coupe et la tolérance à l'usinage sont considérés comme des variables du modèle. Les auteurs ont comparé le modèle de surface de réponse et celui du réseau neurone artificiel et indiquent que le modèle (*ANN*) est plus performant et précis que celui de (*RMS*) (tableau I.2).

Tableau I.2: Comparaison des résultats de (*ANN*) et (*RMS*) pour une faible rugosité de surface.

Set number	Surface roughness (μm)		
	Experimental measurements	RS model	ANN model
1	0.591	0.589	0.593
2	0.629	0.627	0.625
3	0.781	0.775	0.777
4	0.899	0.895	0.896
5	0.978	0.996	0.988
6	1.674	1.706	1.697
7	1.856	1.895	1.884
Maximum error (%)		2.05	1.48

Sangwan, K. S et al [38], ont indiqué que la rugosité de surface est un indice de qualité du produit largement utilisé en termes d'ajustement de précision des surfaces d'accouplement, de la résistance à la fatigue, de la résistance à la corrosion, d'esthétique, etc. Dans leur article, ils ont présenté une approche pour déterminer les paramètres d'usinage optimaux menant à une rugosité de surface minimale en intégrant les réseaux de neurones Artificiels (*ANN*) et l'algorithme génétique (*GA*). Pour vérifier la capacité de l'approche ANN-GA pour la prédiction et l'optimisation de la rugosité de la surface, ils ont réalisé une série d'expérience de 27 essais lors du tournage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V. La boîte à outils MATLAB a été utilisée pour déterminée le modèle de réseau neuronal. Les résultats prédis en utilisant (*RMS*) et (*ANN*) indiquent une bonne concordance entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales mais les modèles (*ANN*) sont plus précis. En outre, l'algorithme

génétique (GA) est intégré au modèle de réseau neuronal pour déterminer les paramètres optimaux d'usinage conduisant à une rugosité de surface minimale. L'analyse de cette étude prouve que l'approche ANN-GA est capable de prédire les paramètres d'usinages optimaux.

I.9- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique sur l'usinabilité des matériaux et les différents critères de son évaluation, les définitions essentielles sur le fraisage, certains paramètres technologique, ainsi que le choix des matériaux de coupe. Nous avons aussi définis les aciers inoxydables et leurs caractéristiques. A la fin de ce chapitre nous avons présenté quelques travaux de recherches liés au fraisage des aciers inoxydables, de même les moyens d'optimisation et les méthodes de modélisation du processus d'usinage en fraisage et tournage.

CHAPITRE II

MOYENS ET PROCEDURE

EXPERIMENTALE

II-1- INTRODUCTION:

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des moyens mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le but de caractériser le comportement du matériau de coupe étudié, vis à vis du matériau à usiner. Ce qui mène à la présentation des différents équipements utilisés qui ont servi au suivi de la rugosité des surfaces obtenues lors du fraisage de face à sec, des efforts de coupe générés et de l'évolution de l'usure. 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) du département de Génie Mécanique (Université du 08 Mai 1945 de Guelma).

II.2- MOYENS UTILISES

II.2.1- Machine-outil

Les expériences que nous avons effectuées lors de notre étude ont été réalisées en fraisage sur une fraiseuse universelle de la Société Nationale de Production des Machines Outils Industrielles (*PMO*), modèle almo. Elle dispose de:

- Une puissance de 5 KW,
- Une gamme de fréquence de rotation comme indiquée ci-après :
(45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min,
- Des vitesses d'avance comme mentionnée ci-après :
(16 ; 20 ; 25 ; 31.5 ; 40 ; 50 ; 63 ; 80 ; 100 ; 125 ; 160 ; 200 ; 250 ; 315 ; 400 ; 500 ; 630 ; 800) mm/min.

II.2.2- Nuance du matériau de la pièce

Les aciers inoxydables sont utilisés dans un domaine très vaste dans l'industrie à cause de leurs bonnes résistances à la corrosion. Cette caractéristique lui permet d'être utilisé dans différents secteurs, citons à titre d'exemple : L'industrie automobiles, secteur médical l'agroalimentaire, etc... [11,32]. Cet acier possède aussi d'autres caractéristiques qui le classent parmi les aciers difficiles à usiner tel que sa ductilité et sa mauvaise conductivité thermique [25,34]. De ce fait on a décidé d'effectuer notre étude sur l'usinage des aciers inoxydables en fraisage. La nuance de l'acier utilisé, est l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 (*304L*). La composition

chimique de cet acier, les caractéristiques mécaniques ainsi que les propriétés physiques sont indiqués dans les tableaux (II-1, II-2 et II-3). Les éprouvettes utilisées pour les essais des efforts de coupe et la rugosité de surface sont sous forme d'un bloc parallélépipédique fixé sur le dynamomètre piézoélectrique avec les dimensions (120mm x 80mm x 60mm). Tandis que pour les essais d'usure, les dimensions de l'éprouvette sont (335mm x 80mm x 60mm) qui est fixée directement sur la table de la fraiseuse. Ces éprouvettes sont présentées sur les figures (II-1 et II-2).

Tableau II.1- Composition chimique de l'acier X2 Cr Ni 18-9 (L'analyse métallurgique a été réalisée au complexe sidérurgique d'El-Hadjar - metal-steel).

Eléments Chimique	Pourcentages (%)	Eléments Chimique	Pourcentages (%)
C	0,02	Cr	16,91
Mn	1,44	Mo	0,402
Si	0,33	V	0,112
Cu	0,727	Fe	72,1
Ni	7,69	Autres	0,269

Tableau II.2- Caractéristiques mécaniques de l'acier X2CrNi18-9 [39].

d (mm)	Dureté (HB)	Limite d'élasticité		Résistance à la traction	Allongement à la rupture	
		$R_{p0,2}$	$R_{p1,0}$	R_m	A%	
		N/mm ²		N/mm ²	long.	Trans.
$d \leq 160$	142	175	210	450-680	45	-

Tableau II.3- Propriétés physiques de l'acier X2CrNi18-9 [39].

Masse volumique	Module d'élasticité à 20°C	Conductivité thermique à 20°C	Capacité thermique massique à 20°C	Résistivité électrique à 20°C	Magnétisable
(kg/dm ³)	(KN/mm ²)	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	(j.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	(Ω x mm ² /m)	
7,9	200	15	500	0,73	non

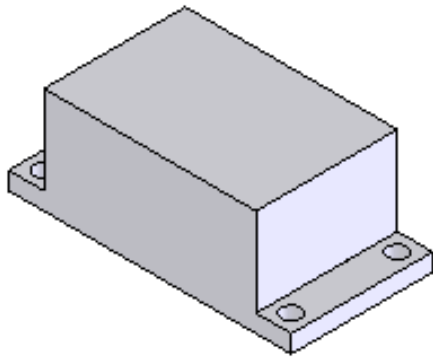


Fig. II-1 : Eprouvette pour les essais de la rugosité de surface et des efforts de coupe.

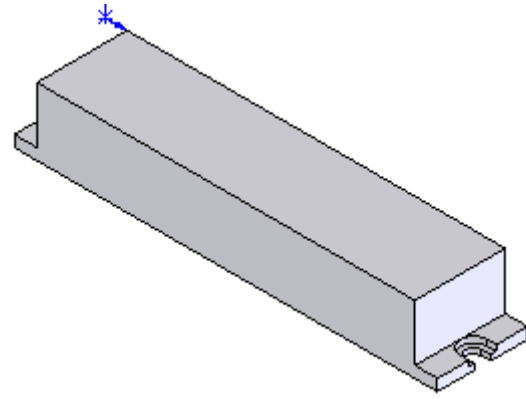


Fig. II-2 : Eprouvette pour les essais d'usure.

II.2.3-Fraise utilisée

La fraise que nous avons utilisée dans nos essais est composée de trois éléments essentiels: un cône morse (**a**), des plaquettes de coupe (**b**). Ces plaquettes de coupe sont en carbure revêtu de la firme (*Sandvik Coromant*) de désignation commerciale (*GC4040*), équivalente au grade ISO (*M20-M40*). Ces plaquettes possèdent trois couches de revêtement, nitrure de titane (*TiN*), Carbonitruure de titane (*TiCN*) et oxyde d'alumine (*AL₂O₃*). Chacune de ces plaquettes a une forme carrée avec quatre arêtes de coupe dont la désignation est R245-12 T3 E-PL. Les caractéristiques de ces plaquettes sont mentionnées dans la figure (*II.3*) et le tableau (*II.4*). Ces plaquettes de coupe sont montées mécaniquement avec des vis d'assemblage (**d**) sur une cloche coromille 245 (**c**) de désignation R245-100Q32-12L (*figure II.4*). Les caractéristiques de cette cloche sont montrées dans la figure (*II.5*) et le tableau (*II.5*).

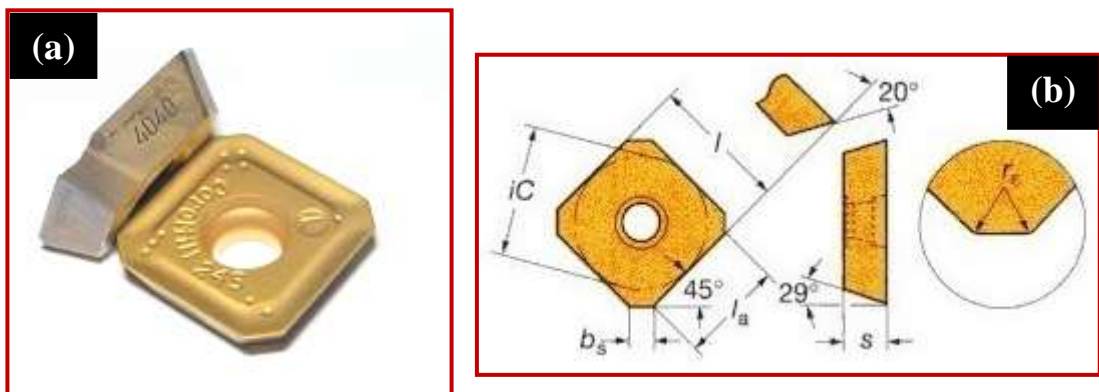


Fig. II-3: Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe [40].

a- Photo de plaquette (GC 4040) **b-** Géométrie de la plaquette.

Tableau II.4- Géométrie des plaquettes utilisées [40].


	Désignation	$l=iC$	s	bs	la	r_e
12	R245-12 T3 M-PL	13,4	3,97	2,1	10	1,5



Fig. II.4- Fraise à surfacer utilisée.

- a- Cône morse b- Plaquette de coupe
- c- Cloche coromille d- Vis de fixation

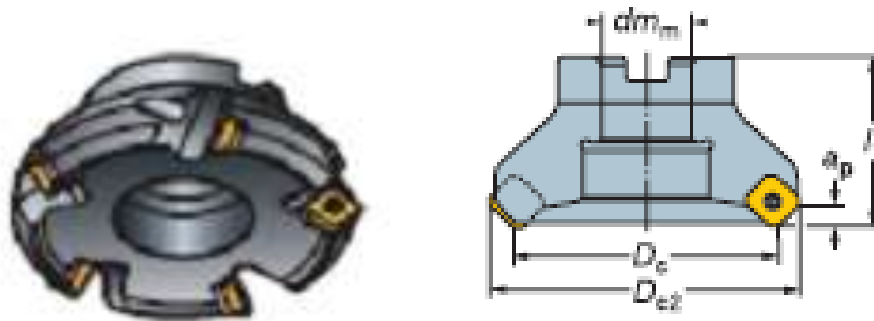


Fig. II.5- Cloche Coromill 245 [4].

Tableau II.5- Géométrie et caractéristiques de la Cloche Coromill 245 utilisées [40].

Designation	Dimensions							
	Dc	dm _m	D _{c2}	l ₁	a _p Max	tr/min max	κ _r	γ
R245-100Q32-12L	100	32	112,5	50	6	11300	45°	+23°

II.3- Appareillage de mesure des paramètres de sortie

II.3.1- Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour la mesure de la composante de l'effort de coupe (F_c) nous avons utilisé un dynamomètre qui se compose d'un support équipé de capteurs piézoélectriques, d'un transmetteur qui permet l'enregistrement sélectif des trois composantes de l'effort de coupe dans le cas général et d'un amplificateur de mesure à 4 canaux. L'acquisition des données sur PC se fait par une interface analogique numérique Black Star I/O 2308 via un câble RS 232 (figure II.6).

Le système de mesure des efforts de coupe se compose de :

- Amplificateur de mesure à 4 canaux, l'unité contient 3 amplificateurs autonomes et précis à tension continue avec facteur d'amplification réglable et un quatrième amplificateur qui sert à amplifier la tension de sortie délivrée par le thermocouple de l'outil pour mesurer la température de coupe.
- Transmetteur d'effort de coupe : enregistrement sélectif des trois composantes d'une force (Force de coupe, force axiale et force radiale).
- Transmetteur de mesure de la température des plaquettes.
- Transmetteur de force, moment de perçage.

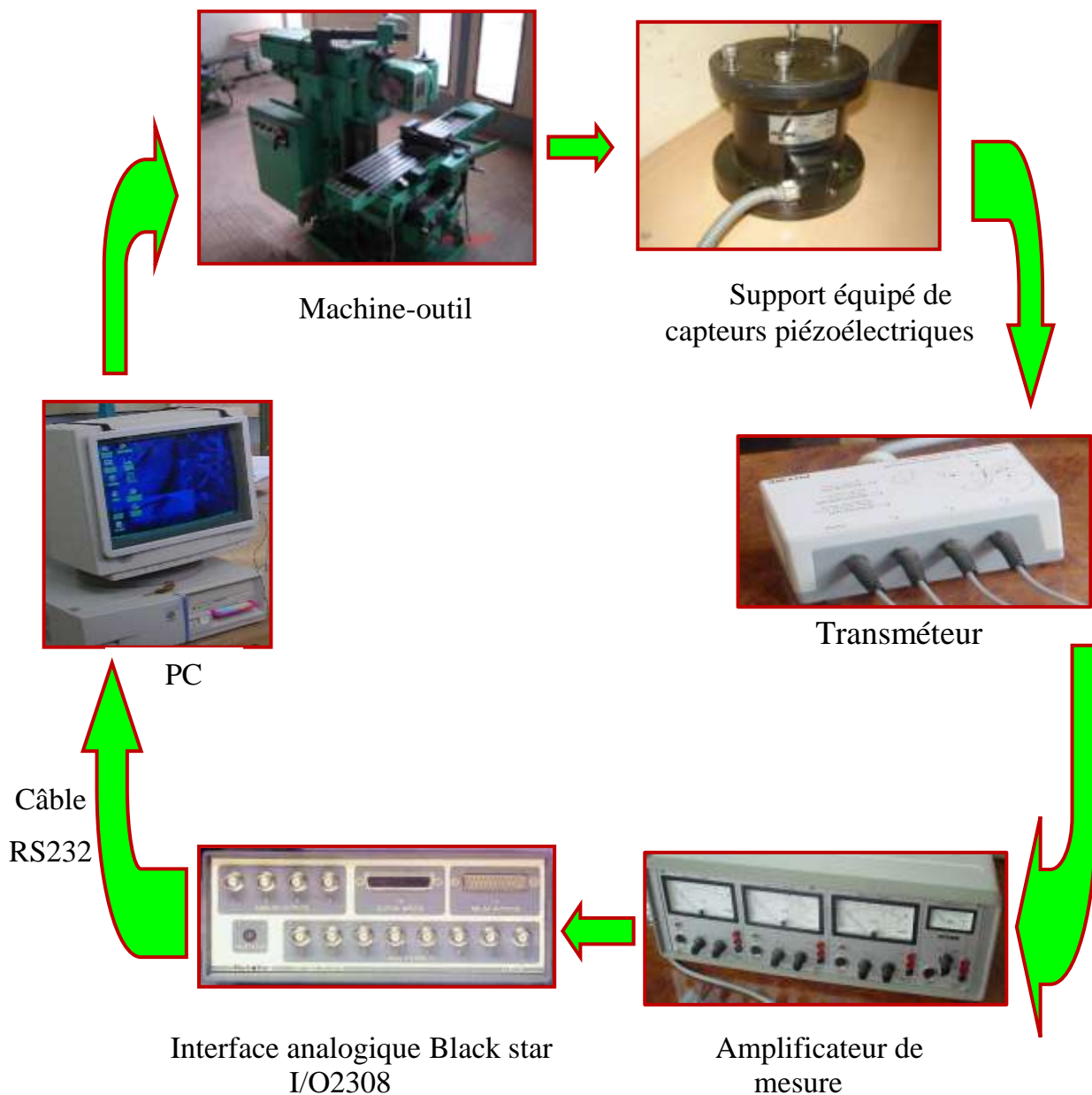


Fig. II-6. Chaîne de mesure pour les efforts de coupe.

II.3.2- Mesure de la rugosité 2D

Pour la mesure de la rugosité de surface (Ra) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest Rj201 (Mitutoyo) (figure II.7). Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (*palpeur*), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation (*cut-of*) de cet instrument que nous avons utilisé lors des mesures est de 12mm parmi les trois possibilités (4mm, 8mm et 12mm).

Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.



Fig. II.7- Rugosimètre Surftest Sj201.

II.3.3- Mesure de la rugosité 3D

Dans le but de mieux montrer la topographie de la surface fraisée, nous avons utilisé l'instrument de mesure Altisurf 500 (*Figure II.8*), qui permet de donner une vision topographique tridimensionnelle. Cet appareil de métrologie optique permet d'étudier finement la topographie des surfaces usinées des échantillons. Cet instrument se compose:

- D'une base en granite parfaitement plane;
- D'une table de déplacement motorisée de haute précision permettant le mouvement de l'échantillon selon les axes X et Y pouvant balayer une surface ($x \times y$) qui peut atteindre (100mm x 100mm) ;
- D'une plateforme rectangulaire permettant de poser l'échantillon à mesurer ;
- D'un support de capteur optique motorisé qui se déplace suivant l'axe Z pouvant atteindre un parcours de 100 mm ;
- D'une télécommande externe qui est connectée à la station de mesure, elle permet de déplacer les axes et de paramétrer une mesure à distance ;
- D'un ensemble qui se compose ; d'un boîtier de contrôle Altimate, d'une interface graphique et d'une unité centrale sur laquelle est installé un logiciel de traitement « Phénix » ;

L'exécution et le traitement des mesures est réalisé par le logiciel Phénix qui est un interface de l'Altisurf 500. Ce logiciel permet de configurer l'ensemble des paramètres et de programmer. Il se décompose en une partie graphique et une partie serveur qui dialogue en permanence avec le matériel et fait appel à différentes cartes placées dans le PC industriel. Une fois que la mesure est réalisée, elle est analysée par le logiciel d'analyse Altimap.



Fig. II.8- Station de métrologie optique Altisurf 500.

II-3-4- Mesure de l'usure

Concernant les essais d'usure que nous avons menés, on a utilisé le microscope HUND (*W-AD*) pour la mesure de l'usure en dépouille (*VB*). La mesure sur ce microscope, s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de $1\mu\text{m}$. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure V_B . Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée de la fraise, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (*figure II-9*).

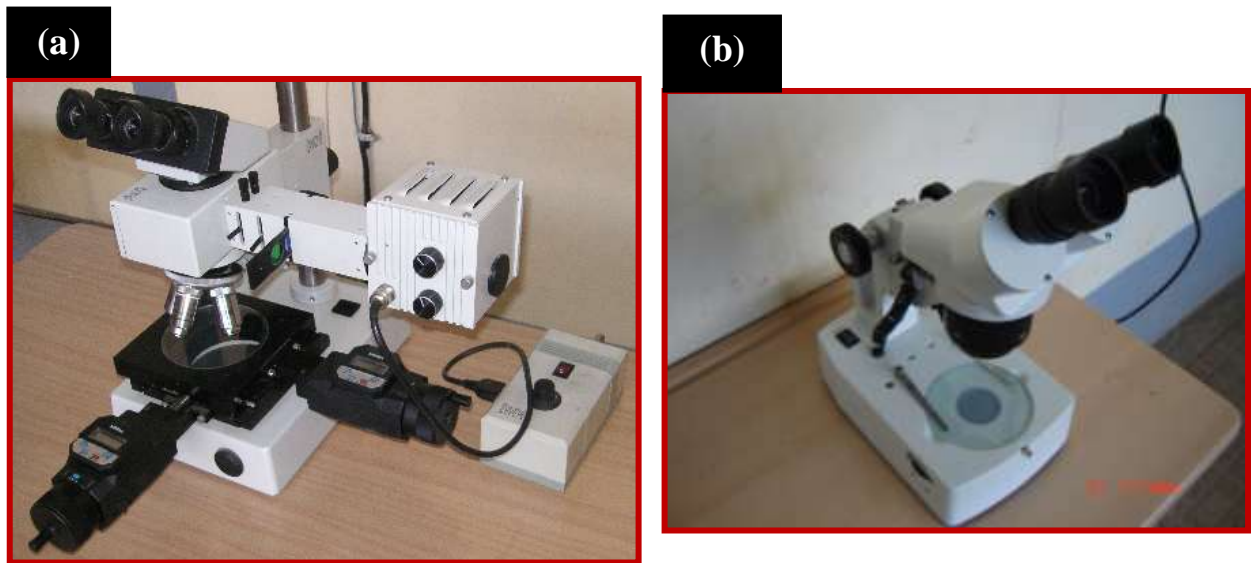


Fig. II.9-Microscopes Optique:

- a) HUND (W-AD), pour mesurer l'usure des plaquettes de coupe.
- b) Stéréo microscope, pour les photos de l'arrête rapportée de la plaquette de coupe.

II.4- Planification des expériences

II.4.1- Introduction

Le système d'usinage peut être influencer par un grand nombre de facteurs à savoir, les éléments du régime de coupe (V_c , f_z et a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (r , α , β , γ , ε_r , κ_r ...etc.), ainsi que les conditions de travail (*rigidité de la machine, lubrification*) et le mode d'usinage,..Etc. Tous ces facteurs peuvent être des paramètres d'entrée du système d'usinage. Alors que les efforts de coupe, la tenue de l'outil, la rugosité de surface et la température de coupe présentent les paramètres de sortie. Plusieurs points seraient intéressants d'être traité, mais à notre niveau on s'est limité à l'évolution des paramètres suivants:

- Evolution de la rugosité de surface en fonction des paramètres (V_c , f_z et a_p) ;
- Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres (V_c , f_z et a_p) ;
- Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps ;
- Evolution de la rugosité de surface en fonction de l'usure en dépouille VB ;

Les essais peuvent être réalisés suivant deux méthodes de planification des expériences ; méthode unifactorielle ou méthode multifactorielle ou les deux à la fois. Dans notre travail on s'est limité à la méthode de planification multifactorielle.

II.4.2- Méthode multifactorielle

Cette méthode permet d'ordonner et de réaliser les expériences d'une manière optimale, dans le but d'arriver à déterminer des modèles mathématiques, pour simuler des procédés des systèmes complexes. Mais cette méthode selon quelle soit mono-objective ou multi-objectives, le nombre d'essais et la manière de traitement peut différer.

II.4.2.1- Méthode multifactorielle multi-objectives

Cette méthode de recherche expérimentale consiste à déterminer avant tout le nombre d'essais nécessaires. Ce nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (*facteurs d'entrées*) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans cette étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f_z et ap) sur les diverses fonctions d'optimisation (*Rugosité, Efforts de coupe et durée de vie*). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

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

Où: - N: nombre d'essais;

- q: nombre de niveau de variations des facteurs de base;

- k: nombre de facteurs de base.

Dans cette étude, nous avons :

a- Effort de coupe et rugosité :

Trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur a trois niveaux de variation (*un niveau supérieur (+1), niveau moyen (0) et un niveau inférieur (-1)*) (*tableau II.6*).

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

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. Les différentes combinaisons des facteurs de base (*en valeurs codées ou réelles*) qui constituent les différents régimes de coupe sont donnés par la matrice de planification tableaux (*II.6 et II.7*).

Tableau II.6- Niveaux de variation des facteurs.

Niveaux de facteurs	Valeurs naturelles des facteurs		
	Vc (m/min)	fz(mm/dent)	ap (mm)
Niveau supérieur (+1)	Valeur maximale	Valeur maximale	Valeur maximale
Niveau moyen (0)	Valeur moyenne	Valeur moyenne	Valeur moyenne
Niveau inférieur (-1)	Valeur minimale	Valeur minimale	Valeur minimale

Tableau II.7- Matrice de planification par la méthode multifactorielle (Effort de coupe ; rugosité).

N° d'essai	Valeurs Codées			Valeurs réelles		
	X1	X2	X3	Vc(m/min)	fz(mm/min)	ap(mm)
1	-1	-1	-1	111	0,08	0,3
2	-1	-1	0	111	0,08	0,6
3	-1	-1	1	111	0,08	0,9
4	-1	0	-1	111	0,16	0,3
5	-1	0	0	111	0,16	0,6
6	-1	0	1	111	0,16	0,9
7	-1	1	-1	111	0,25	0,3
8	-1	1	0	111	0,25	0,6
9	-1	1	1	111	0,25	0,9
10	0	-1	-1	157	0,08	0,3
11	0	-1	0	157	0,08	0,6
12	0	-1	1	157	0,08	0,9
13	0	0	-1	157	0,16	0,3
14	0	0	0	157	0,16	0,6
15	0	0	1	157	0,16	0,9
16	0	1	-1	157	0,25	0,3
17	0	1	0	157	0,25	0,6
18	0	1	1	157	0,25	0,9

19	1	-1	-1	222	0,08	0,3
20	1	-1	0	222	0,08	0,6
21	1	-1	1	222	0,08	0,9
22	1	0	-1	222	0,16	0,3
23	1	0	0	222	0,16	0,6
24	1	0	1	222	0,16	0,9
25	1	1	-1	222	0,25	0,3
26	1	1	0	222	0,25	0,6
27	1	1	1	222	0,25	0,9

b- Essais d'usure :

Deux facteurs de base ($k=2$) où on n'a que deux niveaux de variation, un niveau supérieur (+1) et un niveau inférieur (-1).

Nous avons alors: $N=2^2=4$.

Les essais ont été numérotés de 1 à 4. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe tout en gardant le paramètre de la profondeur de passe constant. La codification des facteurs ainsi que la matrice de planification, sont alors illustrées dans les tableaux (II.8 et II.9).

Tableau II.8- Codification des facteurs par la méthode multifactorielle pour usure.

Niveau des facteurs	Valeurs naturelles des facteurs	
	Vc (m/min)	fz (mm/dent)
Niveau supérieur (+1)	Valeur maximale	Valeur maximale
Niveau inférieur (-1)	Valeur minimale	Valeur minimale

Tableau II.9- Matrice de planification par la méthode multifactorielle pour l'usure.

N° d'essai	Valeurs Codées		Valeurs réelles	
	X1	X2	Vc(m/min)	fz(mm/min)
1	-1	-1	111	0,12
2	-1	1	111	0,25
3	1	-1	222	0,12
4	1	1	222	0,25

II.4.2.2- Méthode multifactorielle mono-objective (Méthode de Taguchi)

Le docteur Genichi Taguchi a travaillé dans le domaine de la qualité, il a notamment mis au point une méthode nommée méthode Taguchi qui permet de maîtriser la qualité dès la conception des produits. L'utilisation du plan fractionnaire permet de diminuer considérablement le nombre d'expériences à effectuer pour identifier les coefficients d'un modèle. La mise au point de plans fractionnaires adaptés à un modèle est une procédure longue et peut être si complexe. Taguchi a mis au point une méthode originale permettant, à partir de quelques tables standard, de résoudre facilement la plupart des problèmes industriels en matière de plan d'expériences [41]. Ces tables standards de Taguchi considèrent que les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées. Et les interactions d'ordre supérieur à deux seront toujours considérées comme négligeables [42].

A- La démarche de la méthode de Taguchi

La démarche de Taguchi se présente en six étapes [43] :

- ❖ **Etape 1** : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.
- ❖ **Etape 2** : sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif. Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.
- ❖ **Etape 3** : construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans que l'effet influe sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais.
- ❖ **Etape 4** : réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignnant les réponses dans un tableau.
- ❖ **Etape 5** : Calculer le rapport S/N et analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).

- ❖ **Etape 6** : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus, sélectionnez les niveaux optimaux des paramètres du procédé et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.)

B- Le choix d'une matrice de Taguchi

Afin de choisir une matrice existante, il faut calculer le nombre d'essais minimum à effectuer. Ce calcul est basé sur la notion de degré de liberté (*ddl*) qui est défini mathématiquement comme suit :

- ✓ le (*ddl*) d'un facteur est égal au nombre de ces niveaux moins un;
- ✓ le (*ddl*) d'une interaction est égal au produit des (*ddl*) des facteurs qui la compose;
- ✓ le (*ddl*) d'un modèle est égal à la somme des (*ddl*) des facteurs et des interactions;
- ✓ le (*ddl*) d'un plan est égal au nombre d'essais moins un.

Il s'agit donc de choisir la plus petite matrice d'expériences compatible avec le modèle choisi, c'est-à-dire le nombre de (*ddl*) du plan doit être supérieur ou égal à celui du modèle. Les matrices de Taguchi sont désignées par trois symboles. A titre d'exemple, la matrice L8 ($2^4 \times 4^1$) comporte 8 essais pour étudier quatre facteurs à deux niveaux et 1 autre facteur à quatre niveaux (*tableau II.10*). La matrice L12 (2^{11}) comporte 12 essais pour étudier un problème possédant 11 facteurs avec deux niveaux pour chacun (*tableau II.11*).

Tableau II.10- Matrice orthogonale de Taguchi L8 ($2^4 \times 4^1$) [44].

N° essai	1	3	5	7	2 6 4
	Facteurs contrôlables				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	2	1	2	3
4	1	2	2	1	4
5	2	2	2	2	1
6	2	2	1	1	2
7	2	1	2	1	3
8	2	1	1	2	4

Tableau II.11- Matrice orthogonale de Taguchi L12 (2^{11}) [44].

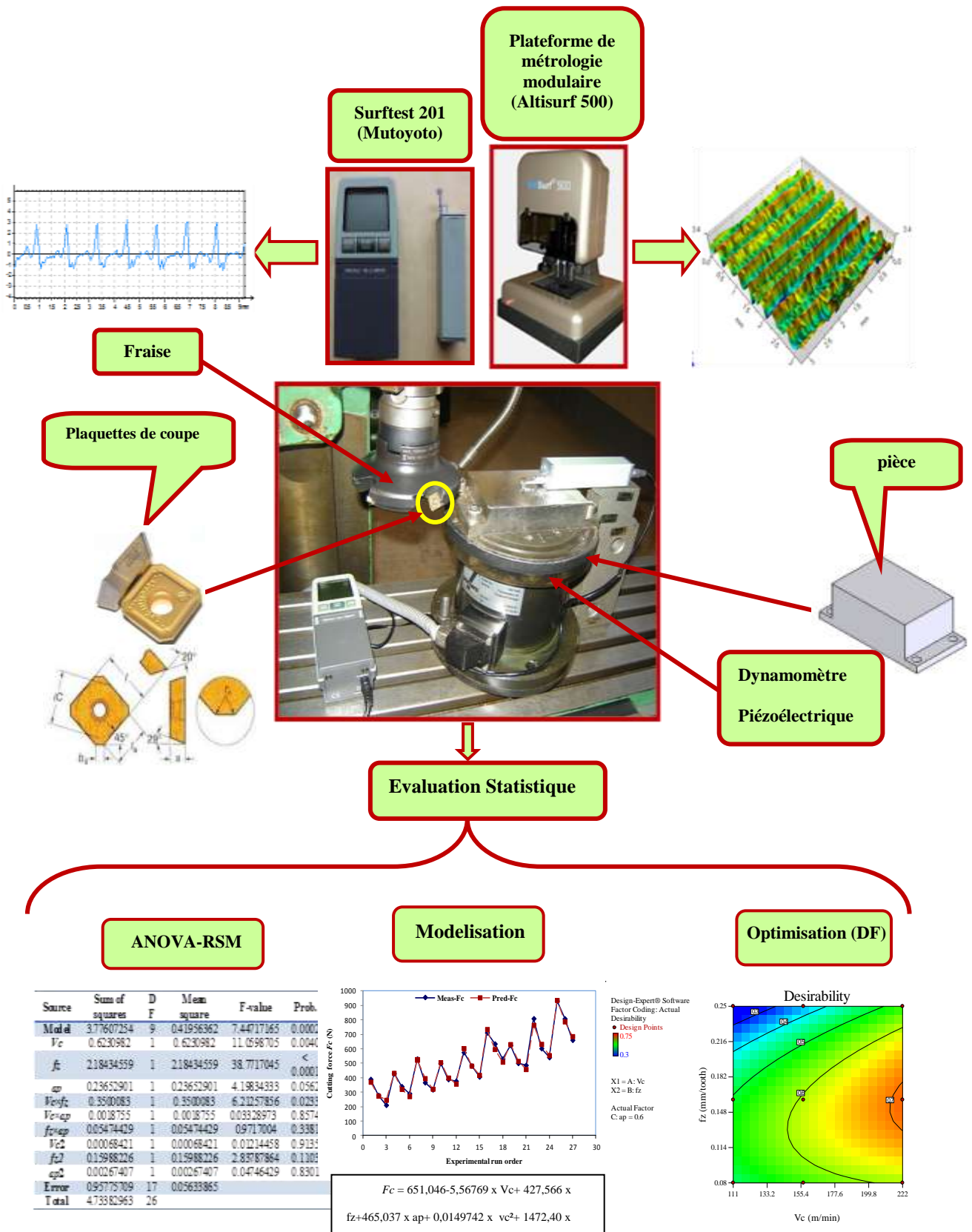
N° essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Facteurs controlables										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

II.5- Expériences

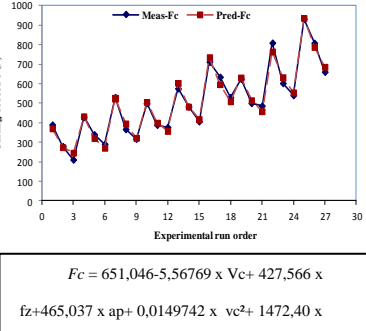
Les expériences que nous avons menées dans cette étude ont été réalisées suivant le montage sur la figure (II.10).

II.6- Conclusion

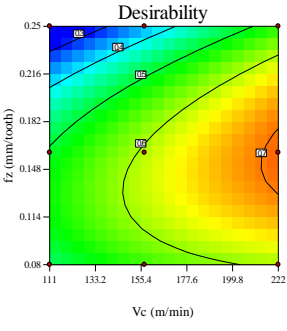
Dans le présent chapitre, nous avons exposé les équipements et les moyens utilisés au cours des expériences menées. La composition chimique du matériau usiné, Les caractéristiques mécaniques et physiques du matériau de coupe ont été indiquées. Pour en finir nous avons présenté les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences multi-objectives et mono-objective.



Source	Sum of squares	D	Mean square	F-value	Prob.
Total	3.77607254	9	0.41956362	7.44717165	0.0001
Vc	0.6230982	1	0.6230982	11.0598705	0.0040
fz	2.18434559	1	2.18434559	38.7717045	< 0.0001
ap	0.23652901	1	0.23652901	4.19834333	0.0361
Vc*fc	0.3500083	1	0.3500083	6.21257856	0.0293
Vc*ap	0.0018755	1	0.0018755	0.03328973	0.8574
fz*ap	0.05474429	1	0.05474429	0.9717004	0.3381
Vc²	0.00068421	1	0.00068421	0.01214458	0.9131
fz²	0.15988226	1	0.15988226	2.83787864	0.1109
ap²	0.00267407	1	0.00267407	0.04746429	0.8301
Error	0.95775709	17	0.056933865		
Total	4.73382963	26			



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Desirability
 ● Design Points
 0.75
 0.3
 X1 = A: Vc
 X2 = B: fz
 Actual Factor
 C: ap = 0.6



$$F_c = 651,046 - 5,56769 \times V_c + 427,566 \times f_z + 465,037 \times a_p + 0,0149742 \times v_c^2 + 1472,40 \times f_z^2$$

Fig. II.10. Montage des expériences pour la mesure de la rugosité et les efforts de coupe.

CHAPITRE III

MODELISATION PAR METHODOLOGIE

DES SURFACES DE REponses

III.1- Introduction

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques du processus de coupe en fraisage de face. Les modèles trouvés permettent d'exprimer les relations entre les éléments du régime de coupe (V_c , f_z et ap) et les paramètres technologiques étudiés (rugosité, effort de coupe, pression spécifique de coupe, puissance de coupe et la quantité de copeau enlevé). La méthodologie de surface de réponse (*MSR*) a été utilisée avec l'analyse de la variance (*ANOVA*) afin de déterminer l'influence (*contribution* %) des paramètres d'usinage sur les paramètres de sortie. Cette étude statistique est suivie par une autre investigation sur l'usure des plaquettes en carbure métallique revêtues et sa relation avec la rugosité de surface de l'acier inoxydable utilisé. En dernier lieu, nous avons terminé ce chapitre par une autre investigation sur la topographie de surface 3D.

III.2- Résultats expérimentaux

Dans le tableau (*III-1*) sont présentées les valeurs expérimentales de la rugosité (Ra), l'effort de coupe (F_c), la pression spécifique de coupe (K_s), la puissance de coupe (P_c) et la quantité de copeau enlevé (QCE). Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de Taguchi (L_{27}) lors du fraisage de face. L'idée de ce plan d'expérience est le prolongement du travail réalisé au paravent [**magister**], qui a été élargi à d'autres paramètres de sortie à savoir :

- La pression spécifique de coupe (K_s) qui a une influence directe sur les contraintes exercées sur la pointe de l'outil qui conduisent à sa rupture.
- La puissance de coupe (P_c) qui donne des informations sur la consommation d'énergie qui est en relation directe avec le coût.
- La quantité de copeau enlevé (QCE) qui a une relation directe avec la productivité.

Tableau III.1- Résultats expérimentaux pour un plan (L_{27}).

N° d'essais	Paramètres d'usinage			Facteurs technologiques de performances				
	V_c (m/min)	f_z (mm/dent)	a_p (mm)	R_a (μm)	F_c (N)	(K_s) (MPa)	(P_c) (W)	QCE (mm^3/min)
1	111	0.08	0.3	0.98	390	16250.00	721.50	3393.63
2	111	0.08	0.6	1	500	10416.67	925.00	6787.26
3	111	0.08	0.9	1.42	625	8680.56	1156.25	10180.89
4	111	0.16	0.3	1.14	430	8958.33	795.50	6787.26
5	111	0.16	0.6	0.66	576	6000.00	1065.60	13574.52
6	111	0.16	0.9	1.35	810	5625.00	1498.50	20361.78
7	111	0.25	0.3	2.04	531	7080.00	982.35	10605.10
8	111	0.25	0.6	2.05	712	4746.67	1317.20	21210.19
9	111	0.25	0.9	2.25	932	4142.22	1724.20	31815.29
10	157	0.08	0.3	0.64	279	11625.00	730.05	4800
11	157	0.08	0.6	1	389	8104.17	1017.88	9600
12	157	0.08	0.9	0.94	501	6958.33	1310.95	14400
13	157	0.16	0.3	1.23	340	7083.33	889.67	9600
14	157	0.16	0.6	1.27	483	5031.25	1263.85	19200
15	157	0.16	0.9	1.26	603	4187.50	1577.85	28800
16	157	0.25	0.3	1.57	367	4893.33	960.32	15000
17	157	0.25	0.6	2	635	4233.33	1661.58	30000
18	157	0.25	0.9	1.52	809	3595.56	2116.88	45000
19	222	0.08	0.3	0.74	211	8791.67	780.70	6787.26
20	222	0.08	0.6	0.82	377	7854.17	1394.90	13574.52
21	222	0.08	0.9	1.09	487	6763.89	1801.90	20361.78
22	222	0.16	0.3	0.86	291	6062.50	1076.70	13574.52
23	222	0.16	0.6	1.1	407	4239.58	1505.90	27149.04
24	222	0.16	0.9	1.33	541	3756.94	2001.70	40723.57
25	222	0.25	0.3	1.13	318	4240.00	1176.60	21210.19
26	222	0.25	0.6	1.28	531	3540.00	1964.70	42420.38
27	222	0.25	0.9	1.25	661	2937.78	2445.70	63630.57

L'analyse des résultats du tableau III.1 montre que la rugosité de surface est enregistrée dans l'intervalle des valeurs comprise entre (0.64 et 2.25) μm . Pour les autres paramètres (F_c , K_s , P_c et QCE), leurs variations est comprise entre (211 et 932)N, (2937.78 et 16250)MPa, (721.5 et 2445.7)W et (3393.63 et 63630.57) mm^3/min successivement.

III.3- Méthode appliquée

La méthode appliquée pour la détermination des modèles mathématiques est la méthodologie de surface de réponse (*MSR*), en utilisant un logiciel de statistique, Design-Expert 10. Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif. Pour cela on a choisi un niveau de signification α fixé à ($\alpha = 0.05$). La méthodologie de surface de réponse (*MSR*) est une procédure qui comprend six étapes [45]:

- 1) Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie voulues;
- 2) Choisir un plan de conception expérimentale;
- 3) Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique de (*MSR*);
- 4) Analyser par (*ANOVA*) les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse;
- 5) Déterminer la forme du modèle mathématique appropriée;
- 6) Optimiser les paramètres d'entré et faire les tests de confirmation afin de vérifier les performances prédites.

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

$$\Psi = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i X_i + \sum_{i=1}^k c_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j}^k c_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (\text{III-1})$$

- Ψ est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- X_i représente le niveau attribué au facteur i . C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est

parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;

- c_0, c_i, c_{ij}, c_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (III-2).

$$R^2 = \frac{\sum (\psi - \bar{\psi})^2}{\sum (\psi_i - \bar{\psi})^2} \quad (\text{III-2})$$

avec

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

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de la variance (*ANOVA*) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. L'*ANOVA* permet de tracer les surfaces de réponse, d'estimer l'influence et l'interaction simultanées des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés (*Ra, Fc, Ks, Pc et QCE*).

III.4- Analyse statistique et modélisation des paramètres technologiques

III.4.1- Résultats de la rugosité de surface (*Ra*)

III.4.1.1- Analyse de la variance pour (*Ra*)

Le tableau (III-2) expose les résultats de l'analyse de variance (*ANOVA*) pour le critère de rugosité (*Ra*). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions sur (*Ra*). Il est clair que l'avance par dent (*fz*) est le facteur le plus influent sur la rugosité (*Ra*) avec une contribution de 60,44%, suivie par la vitesse de coupe (*Vc*) avec une contribution de 17,24%, l'interaction (*Vc*×*fz*) avec une contribution 9,68% et en fin la profondeur de passe avec une contribution de 6,54%.

Les interactions ($fz \times ap$) et ($Vc \times ap$) ont des faibles contributions de (1,51% et 0,05%) par conséquent, ils ne sont pas significatifs. Les termes carrés (Vc^2 , fz^2 et ap^2) ne sont pas aussi significatifs. Des résultats similaires sont obtenus par [36,46].

Tableau III.2- Résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra)

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Modèle	3.77607254	9	0.41956362	7.44717165	0.0002		Signifiant
Vc	0.6230982	1	0.6230982	11.0598705	0.0040	17.242	Signifiant
fz	2.18434559	1	2.18434559	38.7717045	< 0.0001	60.444	Signifiant
ap	0.23652901	1	0.23652901	4.19834333	0.0562	6.545	Insignifiant
$Vc \times fz$	0.3500083	1	0.3500083	6.21257856	0.0233	9.685	Signifiant
$Vc \times ap$	0.0018755	1	0.0018755	0.03328973	0.8574	0.052	Insignifiant
$fz \times ap$	0.05474429	1	0.05474429	0.9717004	0.3381	1.515	Insignifiant
Vc^2	0.00068421	1	0.00068421	0.01214458	0.9135	0.019	Insignifiant
fz^2	0.15988226	1	0.15988226	2.83787864	0.1103	4.424	Insignifiant
ap^2	0.00267407	1	0.00267407	0.04746429	0.8301	0.074	Insignifiant
Error	0.95775709	17	0.05633865				
Total	4.73382963	26				100	

III.4.1.2- Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-1) présente les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité (Ra). On remarque que l'avance est le facteur le plus influent sur la rugosité (Ra) car il a la plus grande pente, suivie par la vitesse de coupe (Vc) et en dernier lieu par la profondeur de passe (ap). La figure (III-2) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la rugosité (Ra). L'analyse des graphes indique que l'interaction ($Vc \times fz$) est significative car les courbes se croisent, ce qui est en accord avec les résultats de l'ANOVA (tableau III-2). Par contre les deux autres interactions ($fz \times ap$) et ($Vc \times ap$) ne sont pas significatives.

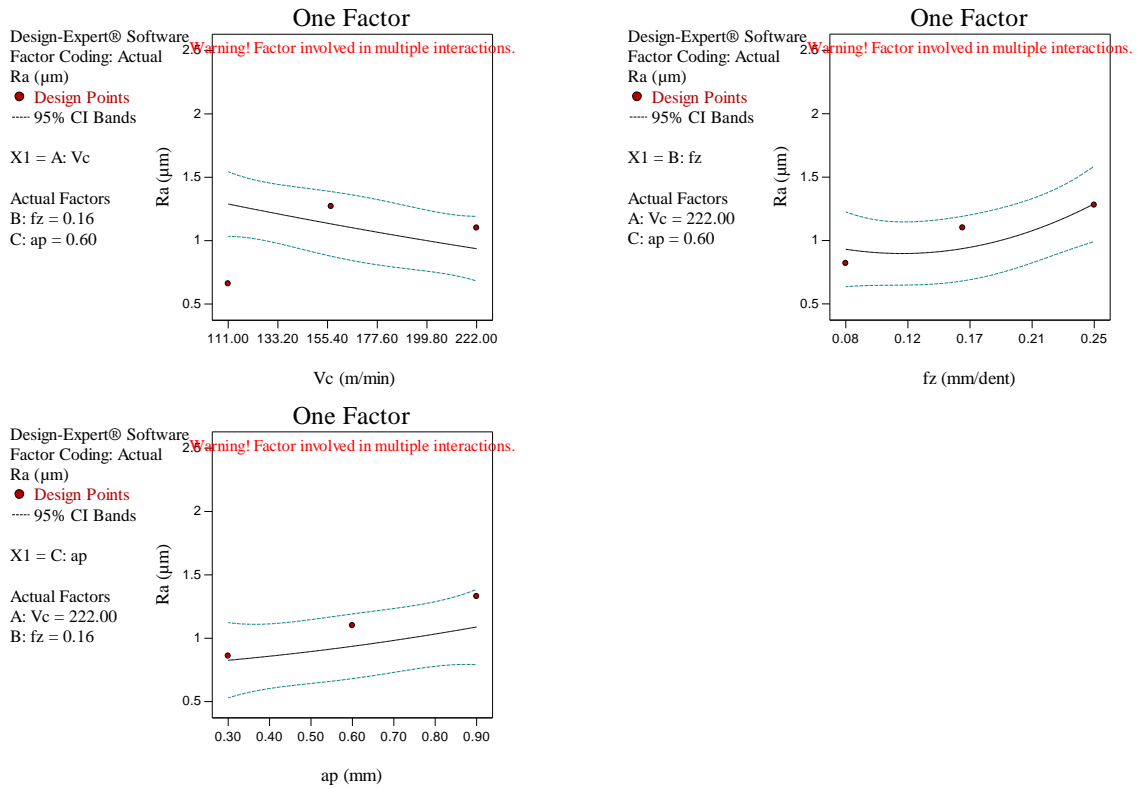


Fig. III.1- Graphique des effets principaux pour (Ra).

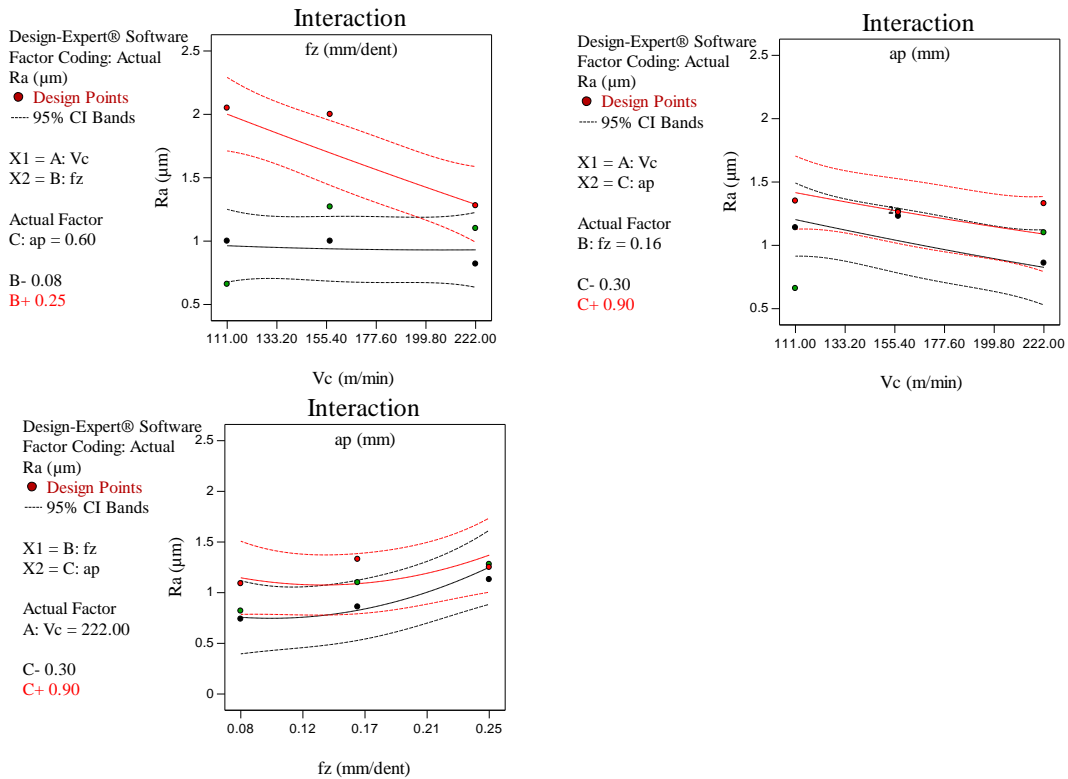


Fig. III.2- Diagramme d'interaction pour (Ra).

III.4.1.3- Equation de régression pour (Ra)

La relation entre la variable dépendante (Ra) et les variables indépendantes (Vc , fz et ap) sont exprimées par le modèle mathématique quadratique indiqué par l'équation (III.1) avec un coefficient de détermination (R^2) égale à 79,77%.

$$Ra = 39.723 \times 10^{-2} + 944.279 \times 10^{-6} Vc + 420.543 \times 10^{-2} fz + 41.404 \times 10^{-2} ap + 358.887 \times 10^{-8} Vc^2 + 22.685 fz^2 + 23.457 \times 10^{-2} ap^2 - 360.061 \times 10^{-4} Vc \times fz + 747.211 \times 10^{-6} Vc \times ap - 264.721 \times 10^{-2} fz \times ap \quad (III.3)$$

La Figure (III-3) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la rugosité (Ra). L'analyse de cette figure montre une corrélation acceptable entre les deux courbes avec un coefficient de détermination $R^2 = 79.77\%$.

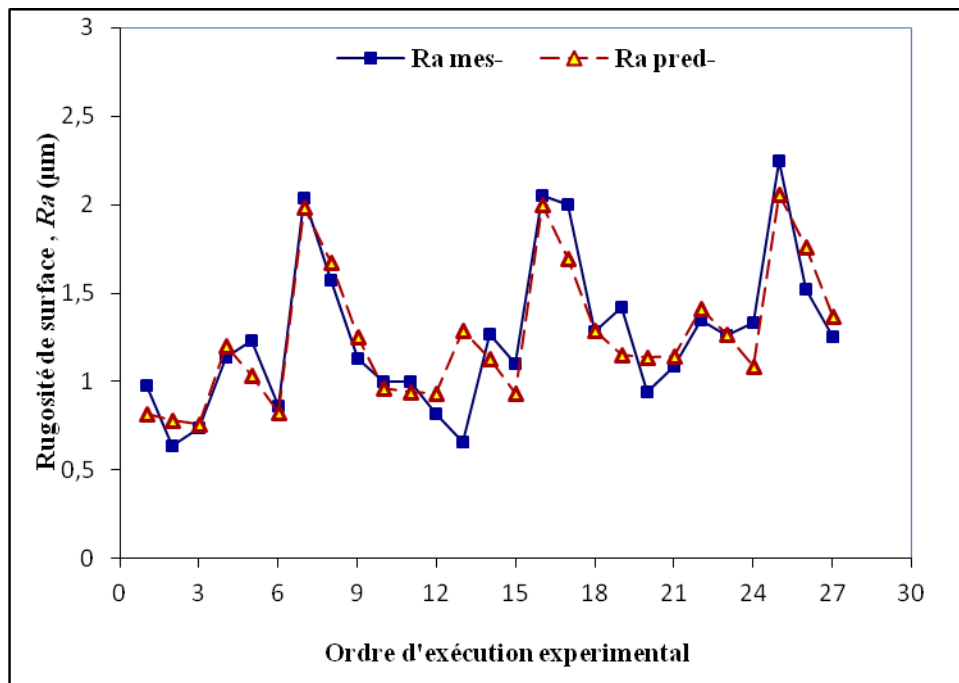
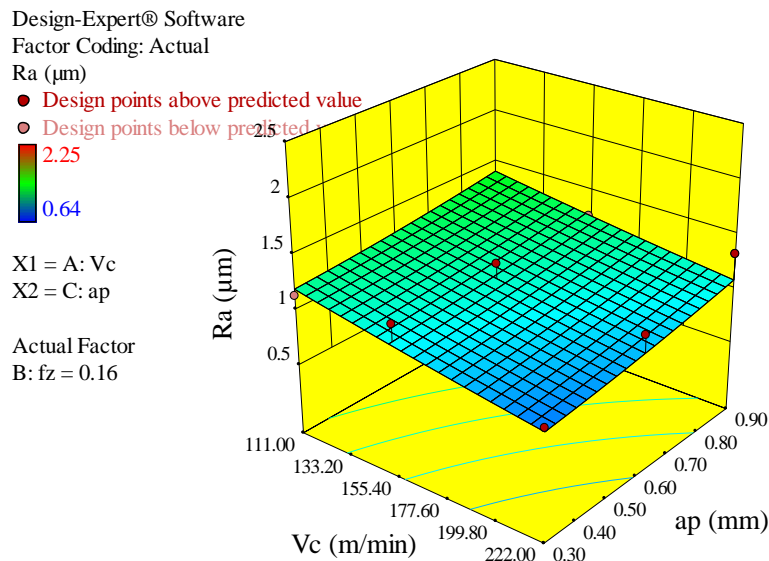
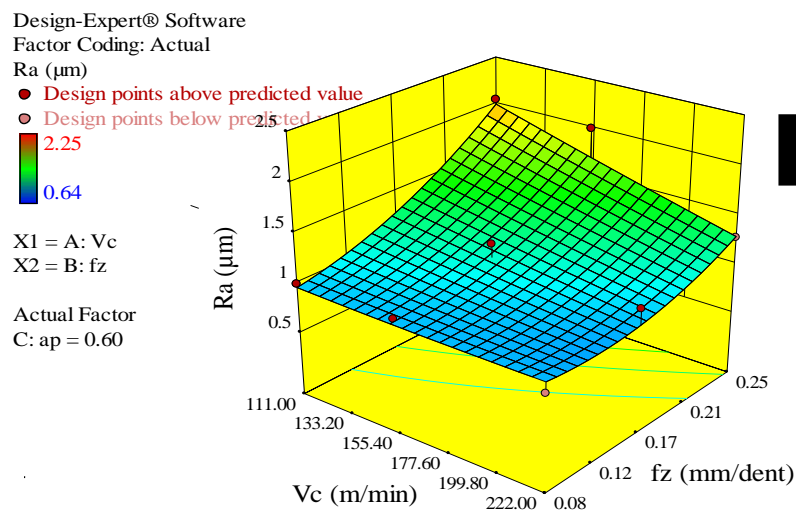


Fig. III.3- Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra).

III.4.1.4- Diagrammes de surfaces 3D et graphiques de Contours

La figure (III-4) présente les diagrammes (3D) de la rugosité de surface (Ra) en fonction des paramètres du régime de coupe. La figure (III-4-a) présente le diagramme (3D) de (Ra) en fonction de (Vc) et (fz), on remarque que l'avance a la plus grande influence car elle possède la plus grande pente, avec son augmentation la rugosité (Ra) augmente. Par contre l'augmentation de (Vc) induit une diminution moins importante de (Ra). La figure (III-4-b) présente le diagramme (3D) de (Ra) en fonction de (Vc) et (ap). On remarque une légère augmentation de (Ra) en fonction de (ap) et aussi une légère diminution de (Ra) en fonction de (Vc). La figure (III-4-c) présente le diagramme (3D) de (Ra) en fonction de (fz) et (ap). On remarque une légère augmentation de (Ra) en fonction de (ap) et aussi une grande influence de (fz) sur (Ra).



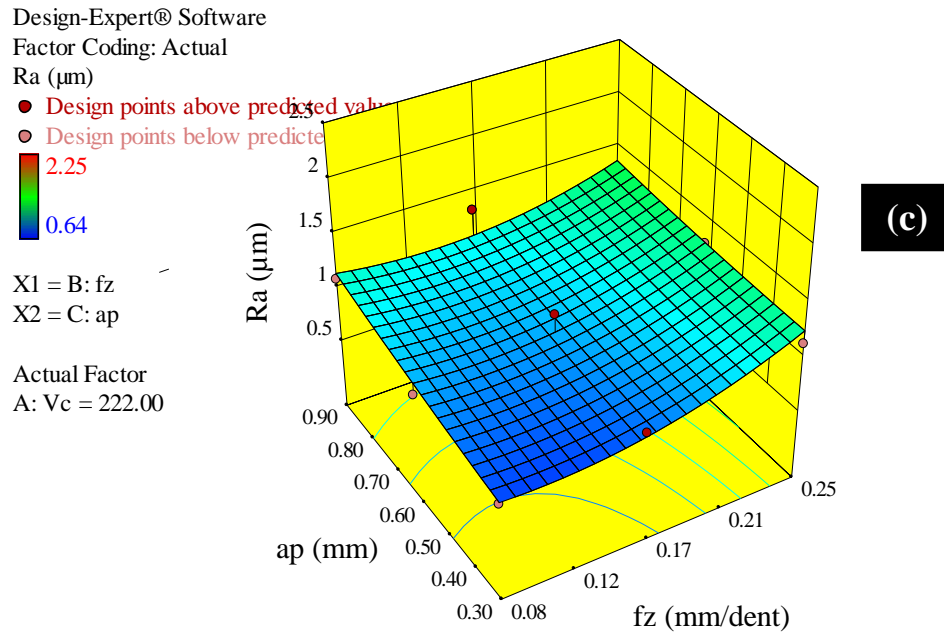


Fig. III.4- Diagrammes (3D) de la rugosité de surface (Ra) en fonction de Vc , fz et ap .

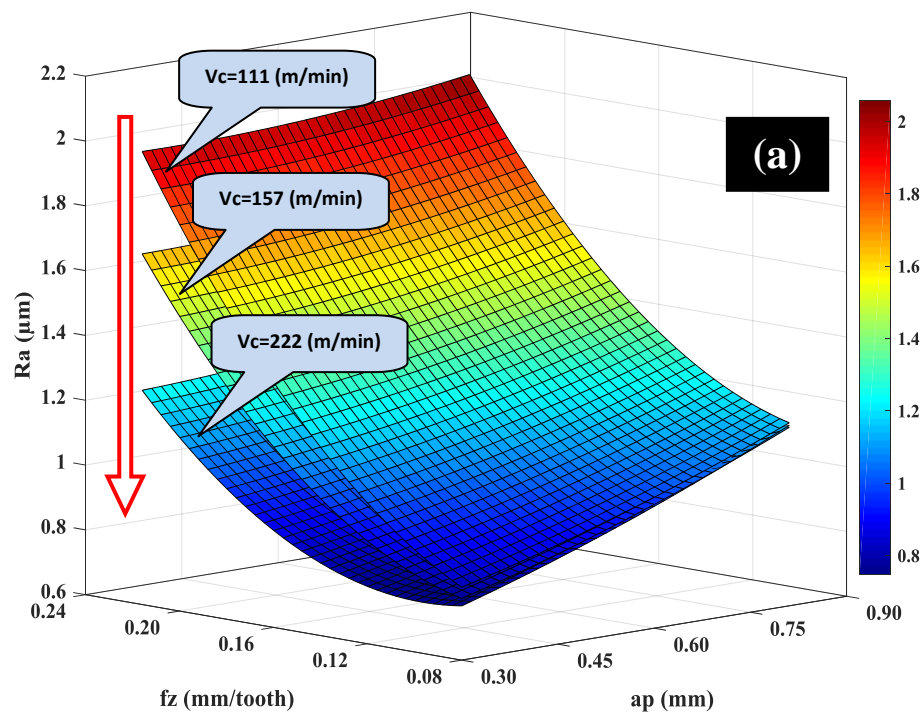


Fig.III.5- Surface 3D pour la rugosité de surface (Ra) en fonction de (fz) et (ap).

La figure (III.5) montre la variation de la rugosité de surface (Ra) en fonction de l'avance par dent (fz) et la profondeur de passe (ap) pour chacune des vitesses de coupe (Vc) égale à 111, 157 et 222 m/min. D'une manière générale on remarque d'après les trois graphes superposés que plus la vitesse de coupe croît plus la rugosité de la surface décroît (*s'améliore*) d'une part, et d'autre part on remarque que la profondeur de passe n'a presque aucun effet sur (Ra). Ce qui veut dire que les meilleurs résultats de (Ra) sont obtenus à faible avance par dent et profondeur de passe et à une vitesse de coupe élevée. Cela s'explique par l'augmentation des stries laissées par l'outil de coupe, ils sont d'autant plus larges que les valeurs de (fz) sont plus élevées. Les valeurs élevées de la rugosité de surface enregistrées sont attribuées aux micro-copeaux soudés sur la surface usinée et l'arête rapporté sur le bec de l'outil (Figure III.6). Des résultats similaires ont été reportés par [47-48].

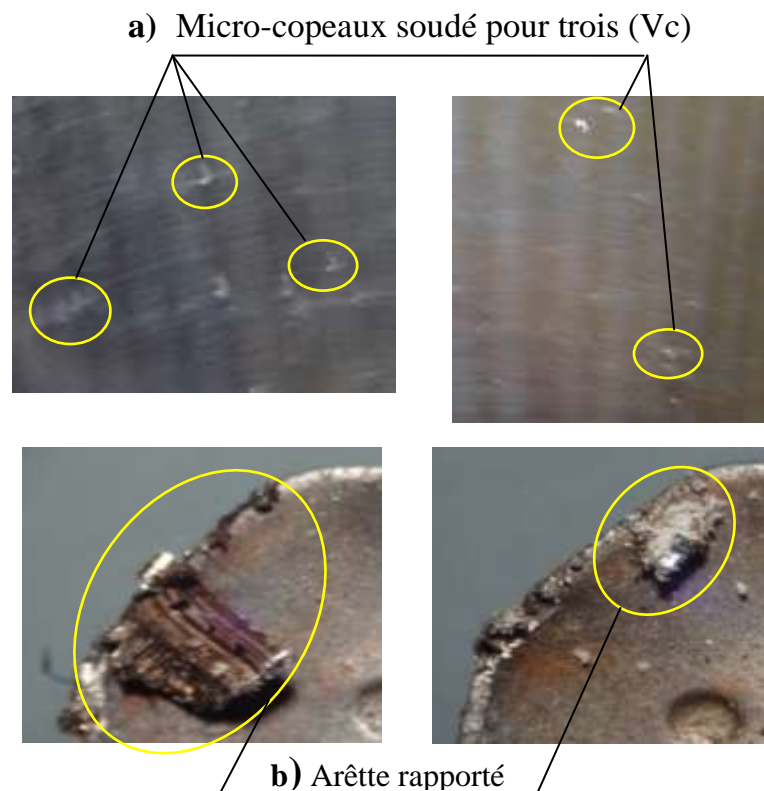
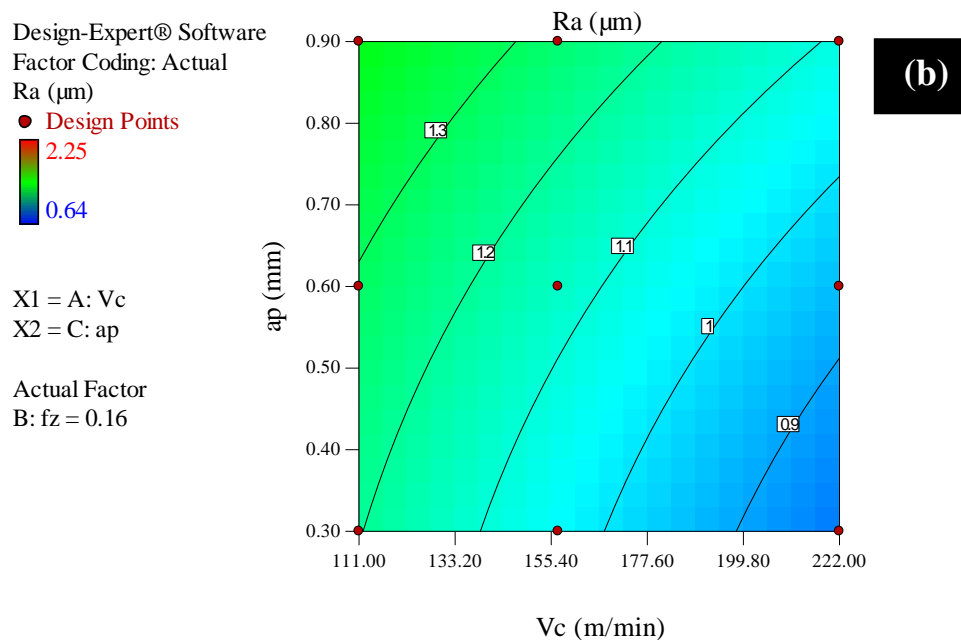
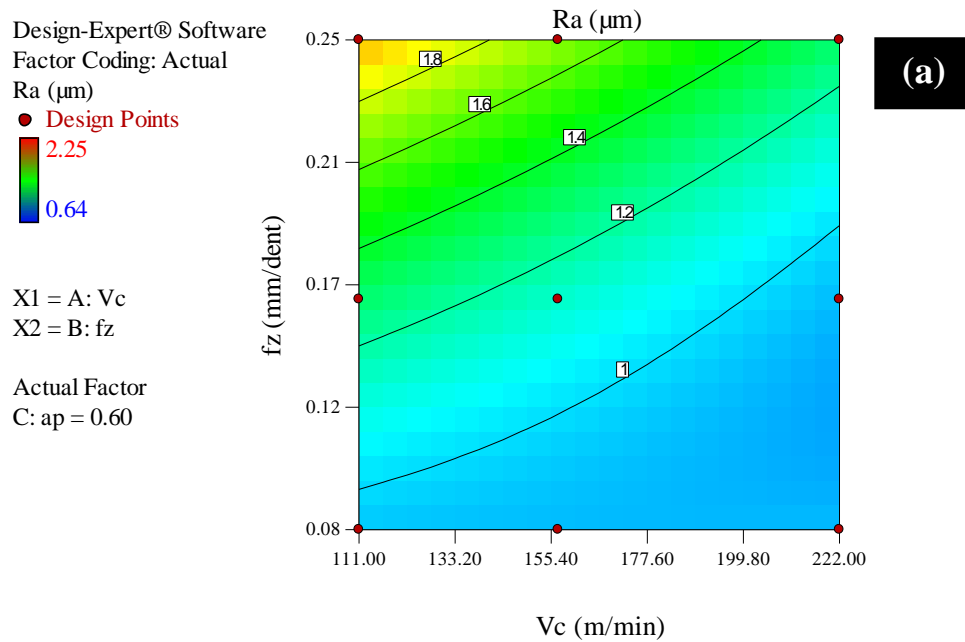


Fig. III.6- Photos de (a) Micro-copeau soudé sur la surface usinée (b) Arête rapporté sur plaquette de coupe.

Les graphes de contour figure (III.7.a.b.c) 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 Ra) 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.



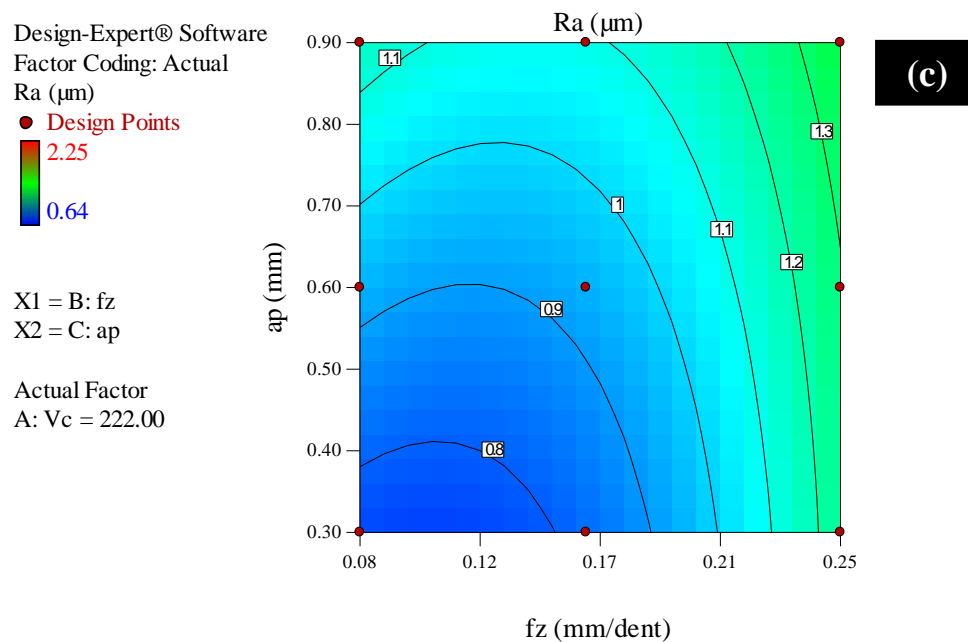


Fig. III.7- Graphique de Contour de (Ra) en fonction de Vc , fz , ap .

III.4.2- Résultats de l'effort de coupe (F_c)

III.4.2.1- Analyse de la variance pour (F_c)

Le tableau (III-3) expose les résultats de l'analyse de la variance (*ANOVA*) pour l'effort de coupe (F_c). L'objectif est d'analyser l'effet des facteurs principaux et de déterminer la contribution des différents facteurs et interactions sur l'effort de coupe (F_c). L'analyse des résultats indique que les paramètres significatifs sont (ap) avec une contribution de 55%, suivie par (fz) et (Vc) avec une contribution respective de (20,5 et 19,92)%. Les interactions ($Vc \times fz$), ($fz \times ap$) sont aussi significatives avec une légère contribution de moins de 2,2%. Pour le terme de (Vc^2), son effet est significatif avec une légère contribution (moins de 1.5 %). Des résultats similaires sont observés par [49-50].

Tableau III.3- Résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe (F_c).

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Modèle	794381.697	9	88264.633	120.256479	< 0.0001		Signifiant
V_c	158363.166	1	158363.166	215.762486	< 0.0001	19.921	Signifiant
f_z	163016.499	1	163016.499	222.102437	< 0.0001	20.506	Signifiant
ap	437266.414	1	437266.414	595.755257	< 0.0001	55.005	Signifiant
$V_c \times f_z$	4549.4083	1	4549.4083	6.19835832	0.0234	0.572	Signifiant
$V_c \times ap$	1740.67553	1	1740.67553	2.37158987	0.1420	0.219	Insignifiant
$f_z \times ap$	17278.2801	1	17278.2801	23.5408572	0.0001	2.173	Signifiant
V_c^2	11911.2753	1	11911.2753	16.2285615	0.0009	1.498	Signifiant
f_z^2	673.549411	1	673.549411	0.91767991	0.3515	0.085	Insignifiant
ap^2	163.62963	1	163.62963	0.2229378	0.6428	0.021	Insignifiant
Erreur	12477.4879	17	733.969879				
Total	806859.185	26				100	

III.4-2.2- Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-8) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort de coupe (F_c). On remarque que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influent sur l'effort de coupe (F_c) car il a la plus grande pente suivie par la vitesse de coupe (V_c) et en dernier lieu l'avance par dent (f_z). La figure (III-9) expose le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour l'effort de coupe (F_c). L'analyse des graphes dévoile que les courbes pour les interactions ($V_c \times f_z$) et ($ap \times f_z$) ne sont pas parallèle, ce qui veut dire qu'il y'a des interactions significatives avec des faibles contributions qui ne dépasse pas les 2.2% dans le meilleur des cas (tableau III-3).

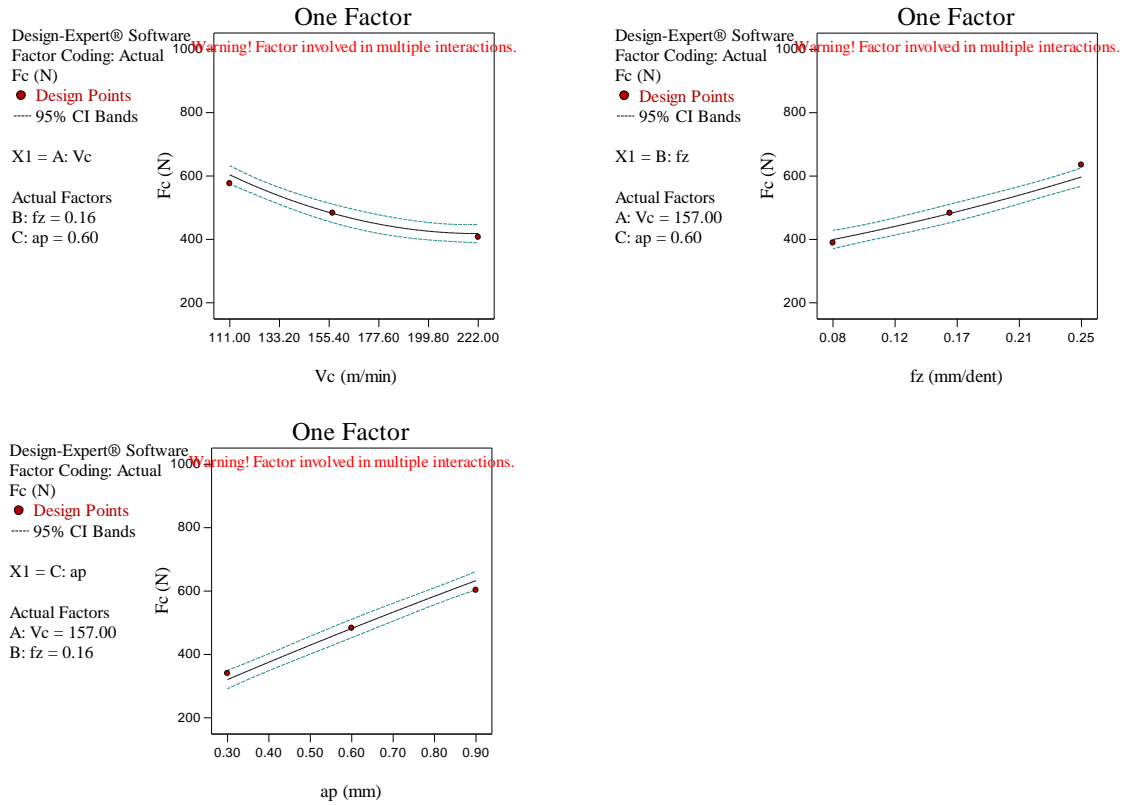


Fig. III-8 Graphique des effets principaux pour (F_c).

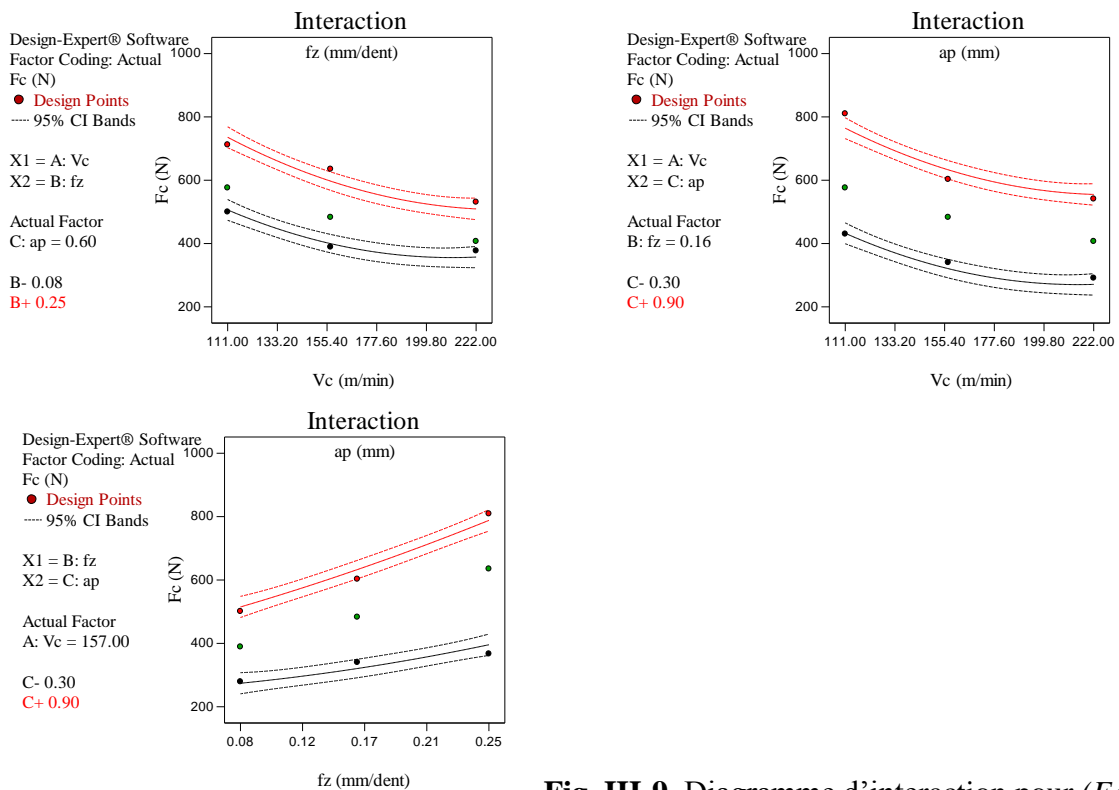


Fig. III-9 Diagramme d'interaction pour (F_c).

III.4.2.3- Equation de régression pour l'effort de coupe (F_c)

Le modèle de l'effort de coupe (F_c) est donné par l'équation suivante (III-4). Son coefficient de détermination (R^2) est de 98,45%

$$\begin{aligned}
 F_c = & 651.046 - 556.769 \times 10^{-2} V_c + 427.566 f_z + 465.037 ap \\
 & + 14.974 \times 10^{-3} V_c^2 + 1472.404 f_z^2 - 5802.469 \times 10^{-2} ap^2 \\
 & - 410.501 \times 10^{-2} V_c \times f_z - 719.85 \times 10^{-3} V_c \times ap + 14.872 \times 10^2 f_z \times ap
 \end{aligned} \quad (III.4)$$

La Figure (III-10) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de l'effort de coupe (F_c). L'analyse de la figure (III-10) montre une très bonne corrélation avec ($R^2 = 98.45\%$).

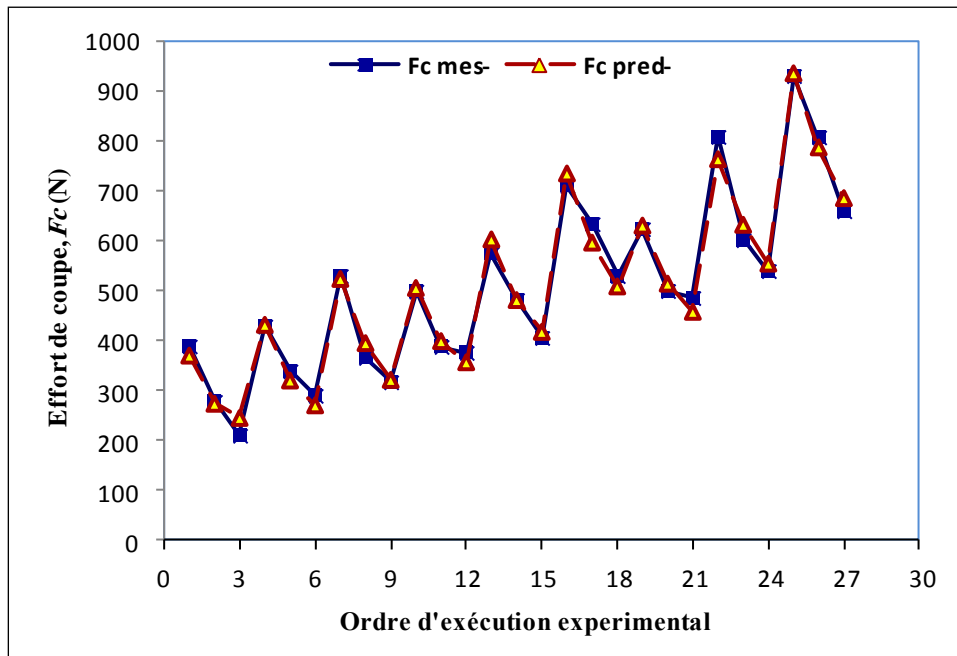
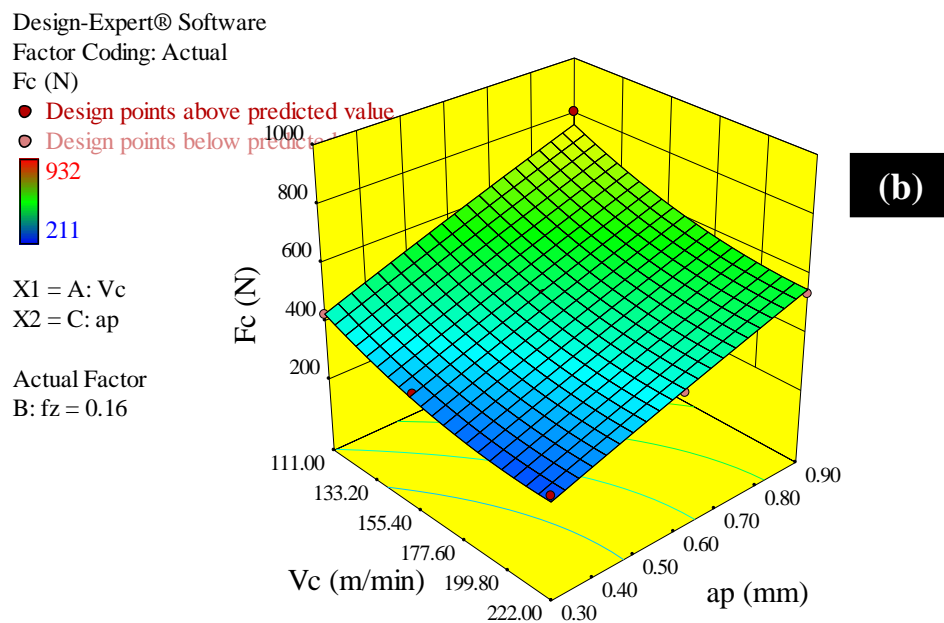
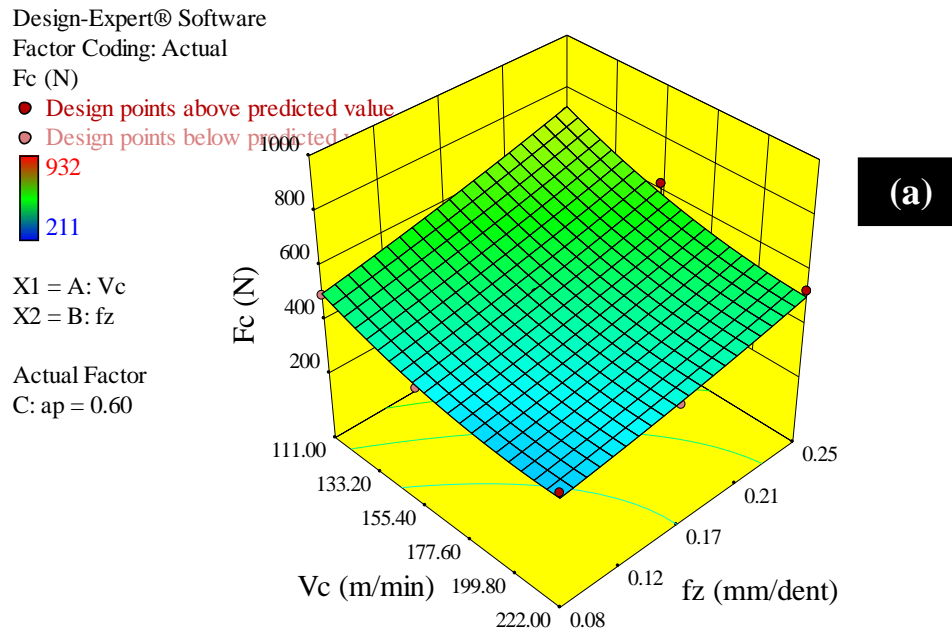


Fig. III.10- Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (F_c).

III.4.2.4- Diagrammes de surfaces 3D et graphique de Contour

Les graphiques 3D de l'effort de coupe (F_c) en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée dans la figure (III-11). La figure (III-11-a) montre que l'augmentation de la vitesse de coupe fait diminuer l'effort de coupe, par contre l'augmentation de l'avance par dent (f_z) induit une augmentation. La figure (III-11-b)

montre que la profondeur de passe (ap) a une grande influence sur (F_c) car elle a la plus grande pente. La figure (III-11-c) montre que l'augmentation de l'avance par dent et particulièrement celle de la profondeur de passe fond augmenter l'effort de coupe (F_c) considérablement. Par conséquent l'effort de coupe minimal est obtenu à une grande vitesse de coupe et une faible profondeur de passe et avance par dent.



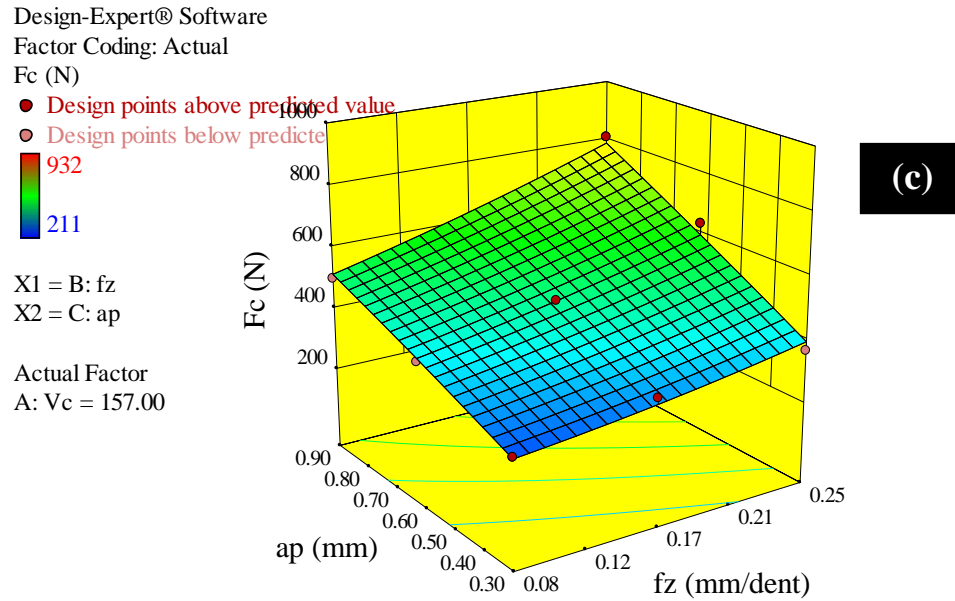


Fig. III.11- Diagrammes de surfaces de (F_c) en fonction de (V_c, fz, ap).

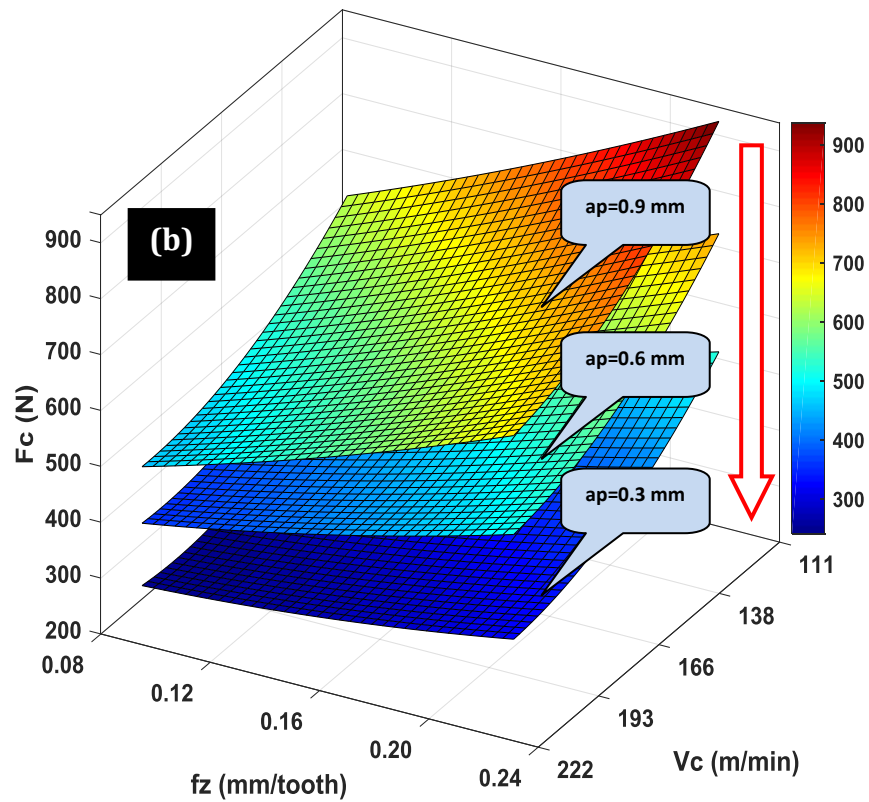
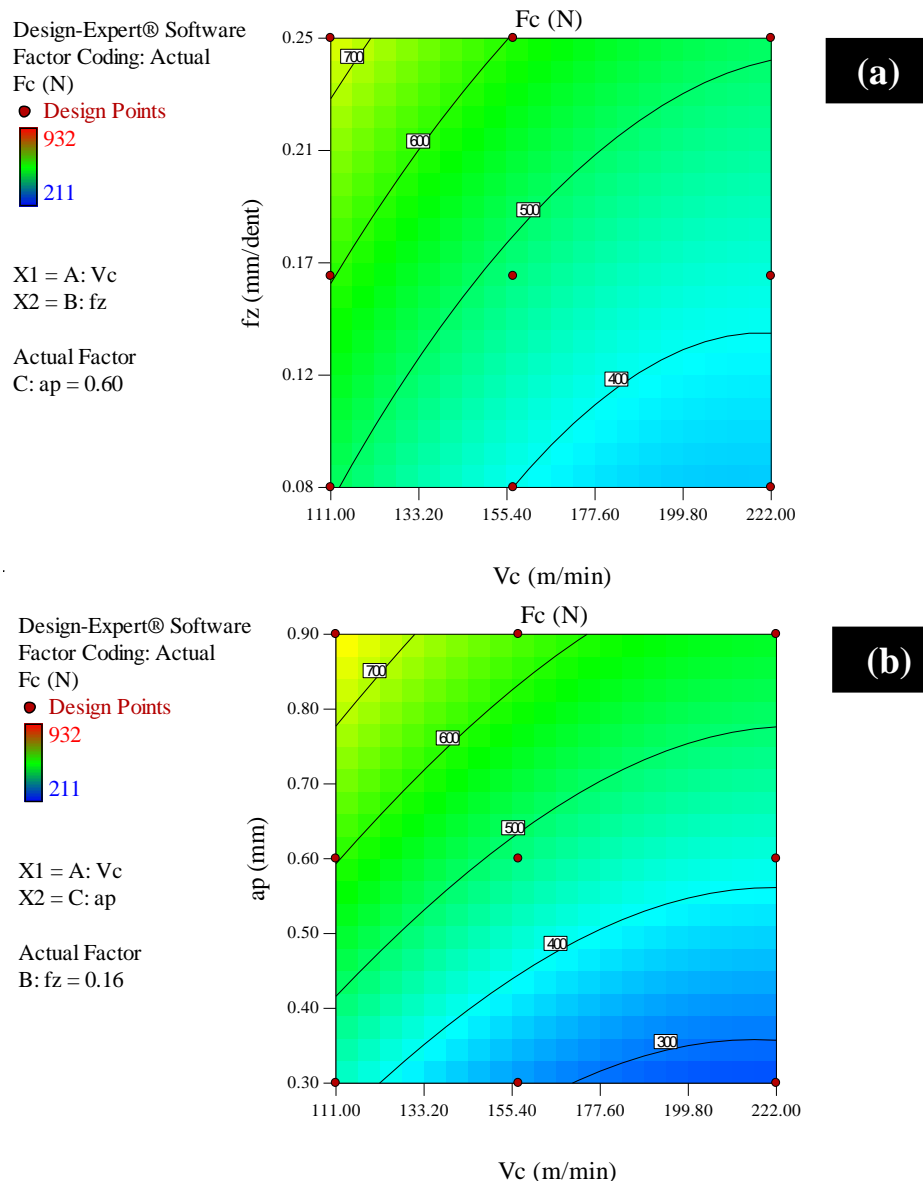


Fig. III.12- Surface 3D pour l'effort de coupe (F_c) en fonction de fz, V_c et trois (ap).

La figure III.12 présente le diagramme 3D de l'effort de coupe (F_c) en fonction de (V_c) et (f_z) pour trois valeurs de (a_p), respectivement (0,3, 0,6 et 0,9) mm. On remarque que l'effort de coupe diminue avec la diminution de (V_c) et augmente légèrement avec l'augmentation de (f_z). Le même comportement est observé pour les trois valeurs de (a_p). En outre, comme on l'avait prévu, l'augmentation des valeurs (a_p) conduit à l'augmentation de (F_c). Ainsi, on peut alors conclure que les faibles valeurs de (F_c) (moins d'effort fourni), sont obtenues à faibles valeurs de (a_p) et à des valeurs élevées de (V_c). Des résultats similaires ont été mentionnés par [51-52].



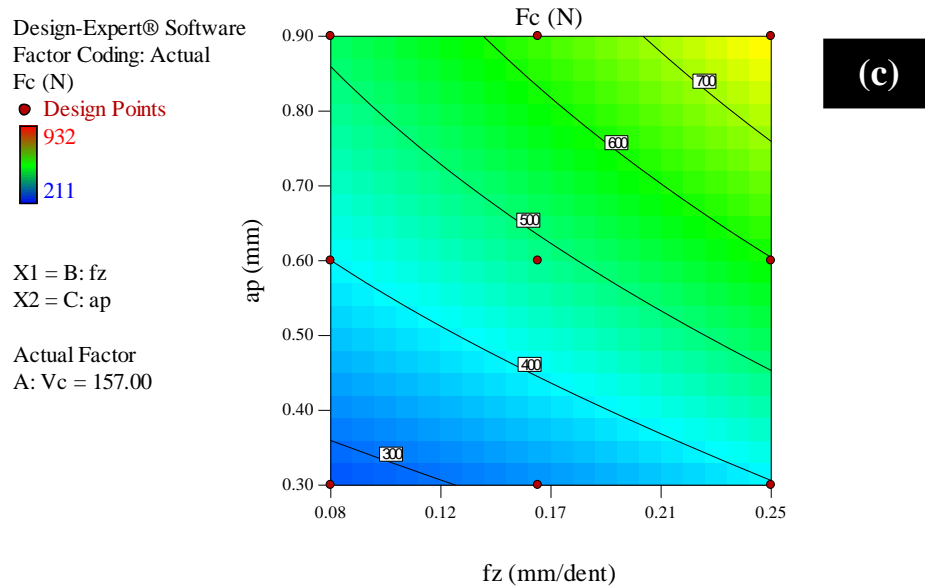


Fig. III.13- Graphique de Contour de (F_c) en fonction de V_c ; f_z ; a_p

Les graphes de contour sont illustrés dans figure (III.13). Ces graphes permettent de visualiser la surface de réponse. De même ils permettent d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation désirables. Ils montrent clairement que le moindre (F_c) est obtenu à grande (V_c), en contre partie le plus grand (F_c) est obtenu à grande (a_p).

III.4.3- Résultats de la pression spécifique de coupe (K_s)

III.4.3.1- Analyse de la variance pour (K_s)

Le tableau (III-4) présente les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour la pression spécifique de coupe (K_s). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux du régime de coupe ainsi que les interactions sur la pression spécifique de coupe (K_s). L'analyse des résultats montre que les paramètres significatifs sont l'avance par dent (f_z) avec une contribution de 51,99%, suivie par (a_p) et (V_c) avec (18,84 et 13,96)% de contributions respectivement. Tous les autres termes sont jugés significatifs avec de faibles contributions qui n'atteignent pas les 5.6%. Les mêmes résultats sont observés par [47,53].

Tableau III.4- Résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe spécifique (K_s).

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Modèle	223044642	9	24782738	54.5270088	< 0.0001		Signifiant
V_c	30734962.4	1	30734962.4	67.6230998	< 0.0001	13.964	Signifiant
f_z	114441433	1	114441433	251.794173	< 0.0001	51.993	Signifiant
ap	41468205.3	1	41468205.3	91.2383933	< 0.0001	18.840	Signifiant
$V_c \times f_z$	3346801.37	1	3346801.37	7.36363623	0.0147	1.521	Signifiant
$V_c \times ap$	5421081.6	1	5421081.6	11.92747	0.0030	2.463	Signifiant
$f_z \times ap$	6260522.23	1	6260522.23	13.7744082	0.0017	2.844	Signifiant
V_c^2	2967906.6	1	2967906.6	6.52999152	0.0205	1.348	Signifiant
f_z^2	12190995.6	1	12190995.6	26.8226425	< 0.0001	5.539	Signifiant
ap^2	3275877.57	1	3275877.57	7.20758962	0.0157	1.488	Signifiant
Error	7726566.25	17	454503.897				
Total	230771208	26				100	

III.4.3.2- Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-14) illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la pression spécifique de coupe (K_s). On remarque que l'avance par dent (f_z) est le facteur qui a le plus important impact sur la pression spécifique de coupe car il a la plus grande pente, suivie par la profondeur de passe (ap) et en dernier lieu la vitesse de coupe (V_c). La figure (III-15) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la pression spécifique de coupe (K_s). D'après l'allure des courbes, qu'il y'a des interactions entre tous les variables, ce qui est en accord avec les résultats de l'ANOVA du tableau (III-4). Ce dernier indique que tous les interactions sont significatives, mais avec de faibles contributions (inférieur à 3%).

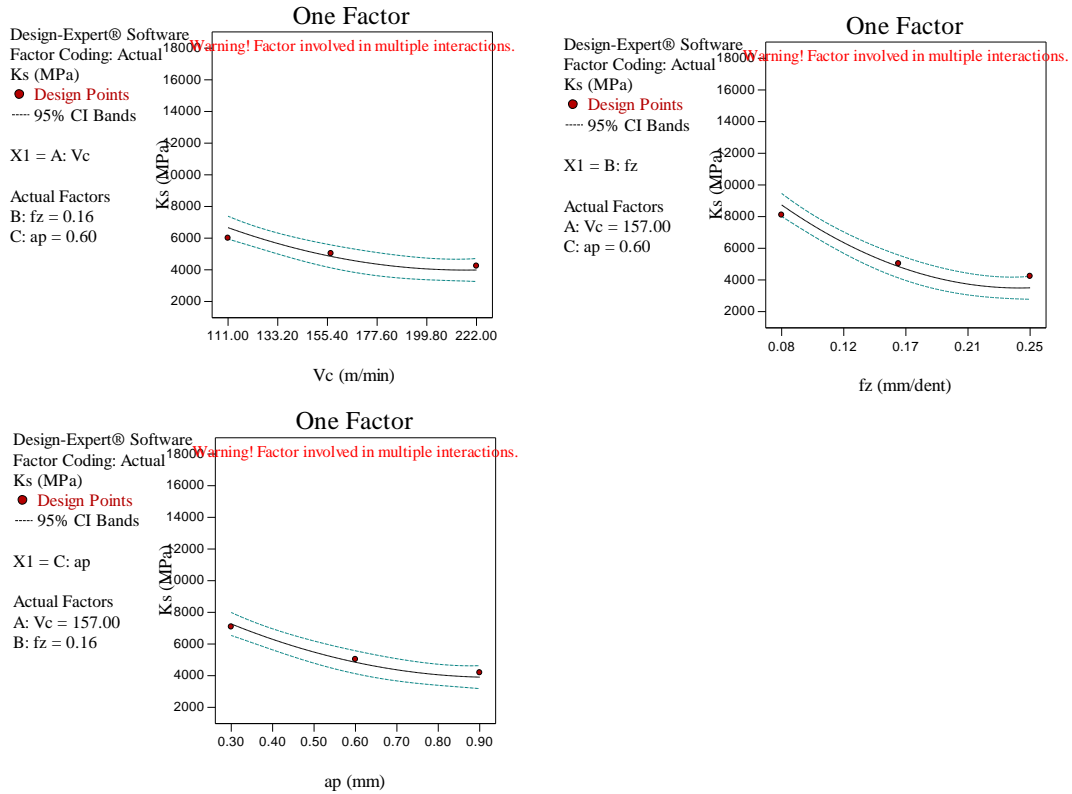


Fig. III.14- Graphique des effets principaux pour (K_s).

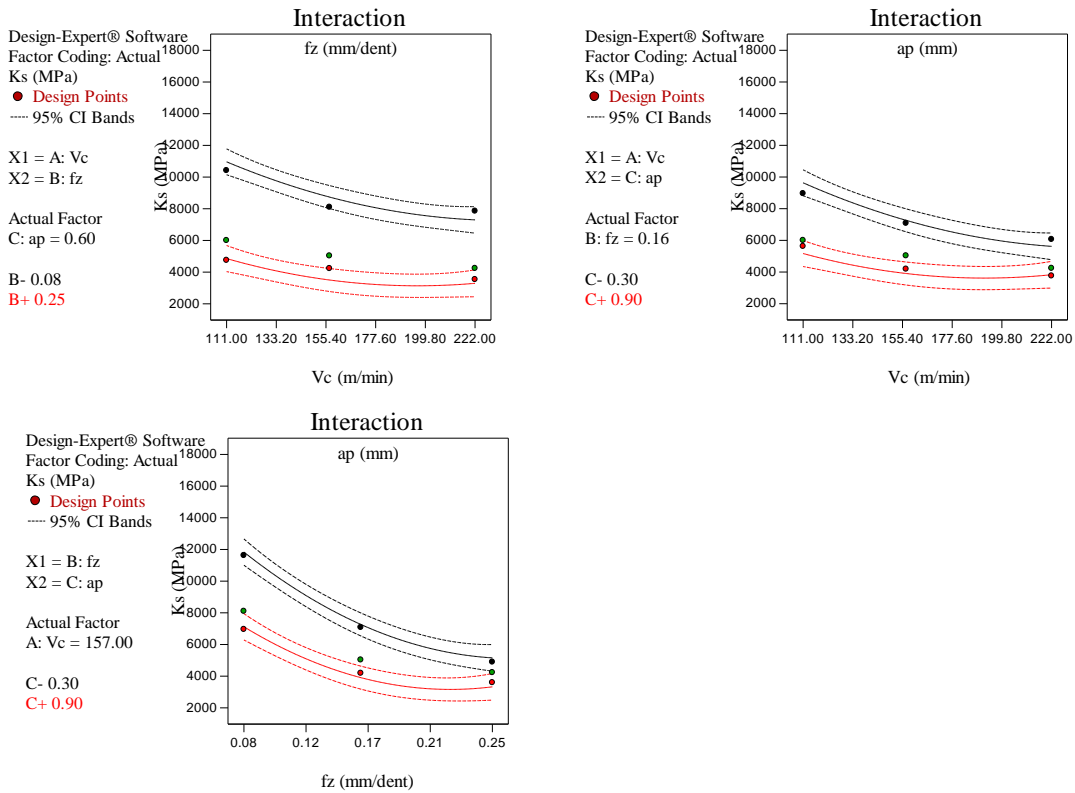


Fig. III.15- Diagramme d'interaction pour (K_s).

III.4.3.3- Equation de régression pour le critère (K_s)

Le modèle de la pression spécifique de coupe (K_s) est donné par l'équation ci-après (III.5). Son coefficient de détermination (R^2) est de 96,65%.

$$\begin{aligned}
 K_s = & 410.928 \times 10^2 - 144.736 Vc - 130.629 \times 10^3 fz - 262.848 \times 10^2 ap \\
 & + 111.34 Vc \times fz + 40.172 Vc \times ap + 283.09 \times 10^2 fz \times ap + \\
 & 23.637 \times 10^{-2} Vc^2 + 198.09 \times 10^3 fz^2 + 82.1 \times 10^2 ap^2
 \end{aligned}
 \tag{III.5}$$

La Figure (III-16) présente une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la pression spécifique de coupe (K_s). L'analyse de cette figure indique une bonne corrélation avec un coefficient de détermination $R^2 = 96,65\%$.

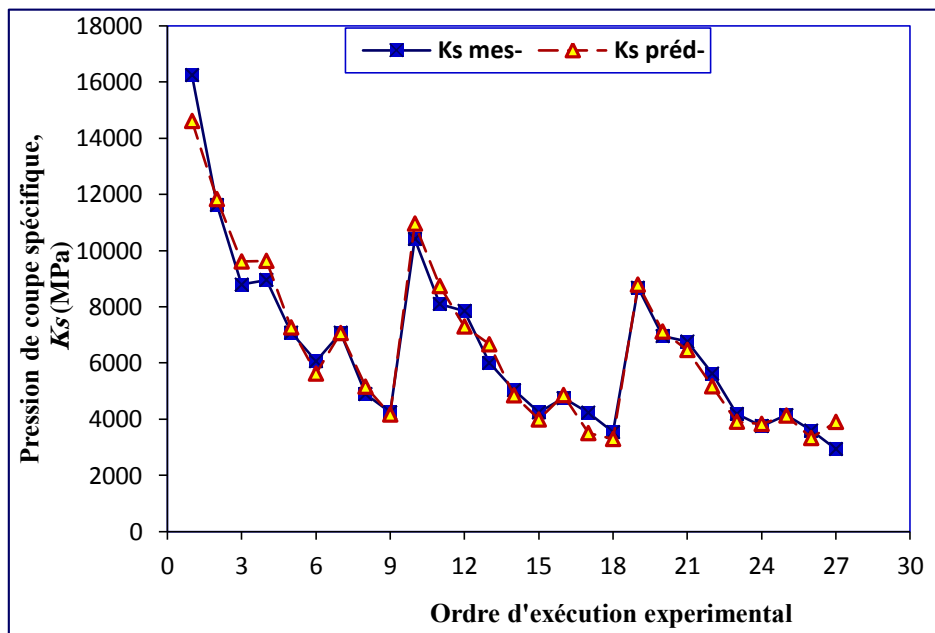
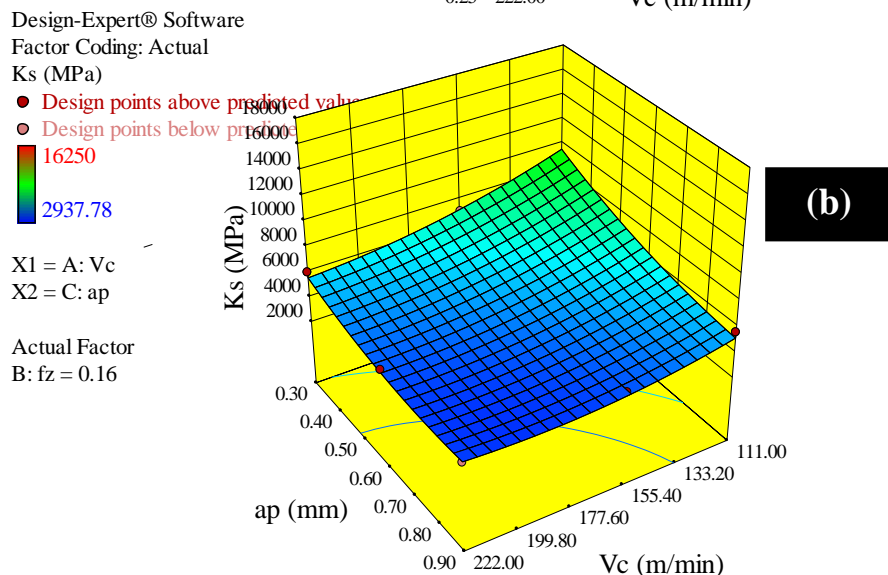
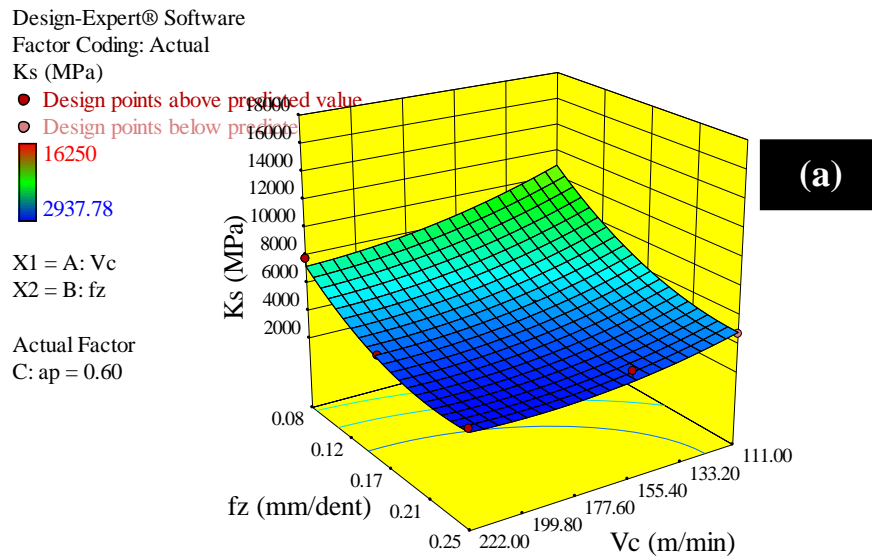


Fig. III.16- Graphe des valeurs réelles et prédites de la pression spécifique de coupe (K_s).

III.4.3.4- Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour

La figure (III-17) expose les diagrammes (3D) de la pression spécifique de coupe (K_s) en fonction des conditions de coupe (V_c , f_z et a_p). La figure (III-17-a) montre que l'avance par dent (f_z) a la plus grande influence sur la pression spécifique de coupe (K_s) vu sa pente élevée. Dans la figure (III-17-b), on remarque une légère diminution de (K_s) en fonction de la profondeur de passe (a_p) et la vitesse de coupe (V_c). La figure (III-17-c), montre la forte pente de (f_z) et (a_p), et que l'augmentation de ces deux facteurs diminue la pression spécifique de coupe (équation I.4), ce qui est bénéfique à l'usinage.



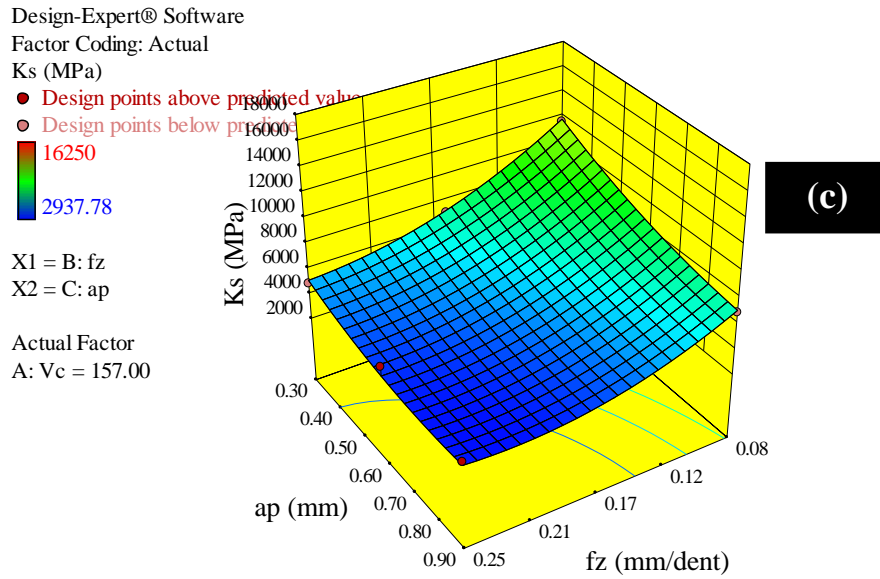


Fig. III.17- Diagrammes de surfaces de (K_s) en fonction de (V_c , f_z , ap).

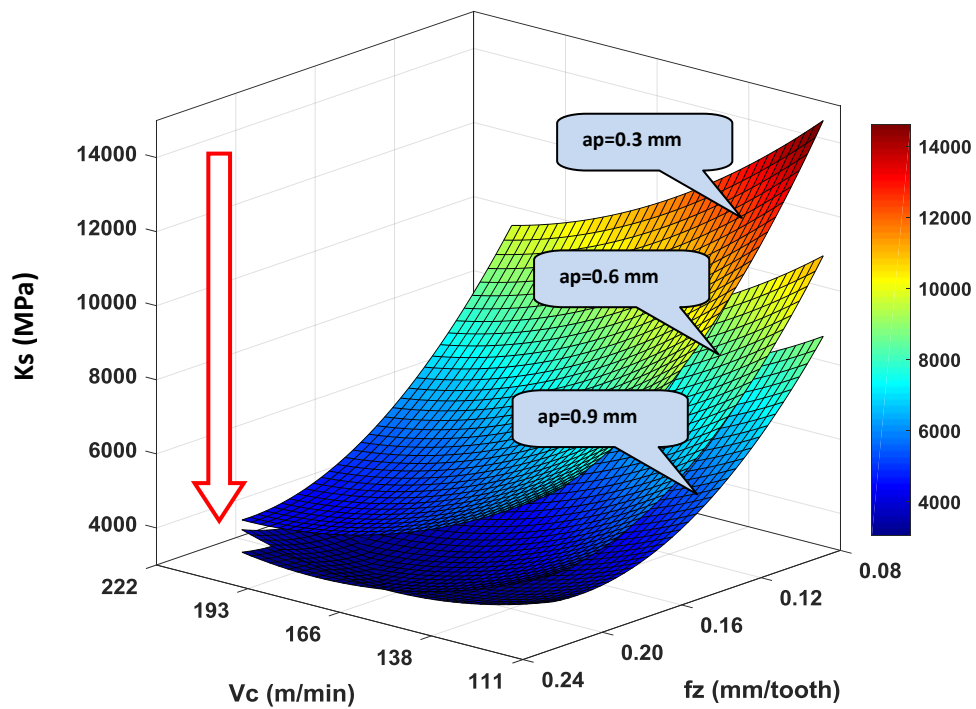
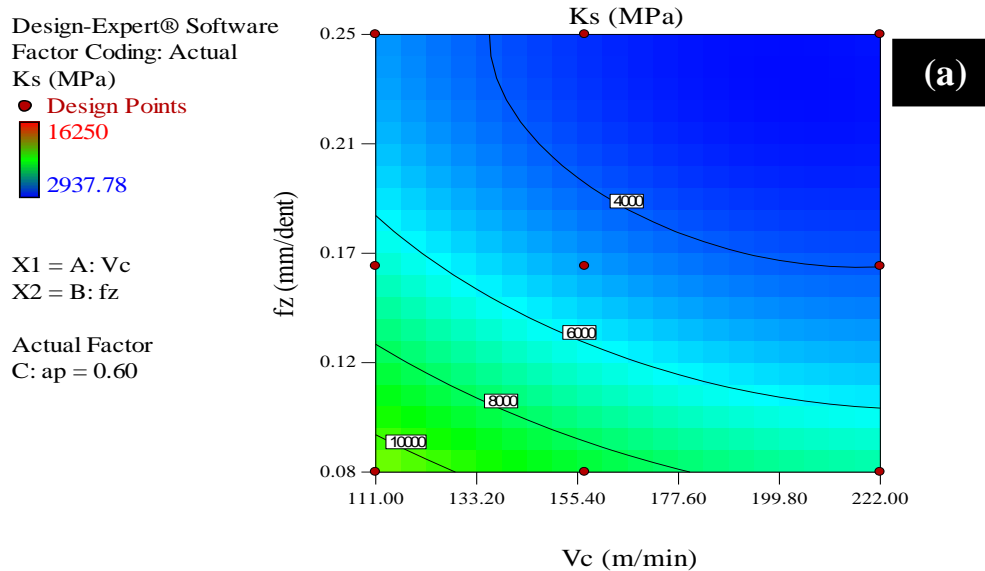


Fig. III.18- Surface 3D pour la pression spécifique de coupe (K_s) en fonction de f_z , V_c et trois (ap).

La variation de la pression spécifique de coupe (K_s) avec (V_c et f_z) pour les trois valeurs de (ap) respectivement (0,3, 0,6 et 0,9) mm est exposée sur la (figure III.18). Cette figure indique que (K_s) diminue significativement avec l'augmentation de (f_z) et (ap), ce qui convient très bien à l'usinage, car la pression (K_s) sur le bec de l'outil diminue ce qui évite la rupture de l'outil. Cependant, l'augmentation des valeurs de (f_z) conduit aussi à la détérioration de la rugosité de surface (Ra). Par conséquent, les valeurs optimales de (f_z) doivent être déterminées pour avoir un bon compromis entre (Ra et K_s) [54-55]. D'autre part on remarque que l'effet de (V_c) sur (K_s) est relativement faible.

Les graphes de contour figure (III-19) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi de prédire les valeurs de réponse de la pression spécifique dans n'importe quelle zone du domaine expérimental. Comme ils dévoilent nettement que la plus grande pression (K_s) est obtenue à faible avance (f_z) et profondeur de passe (ap).



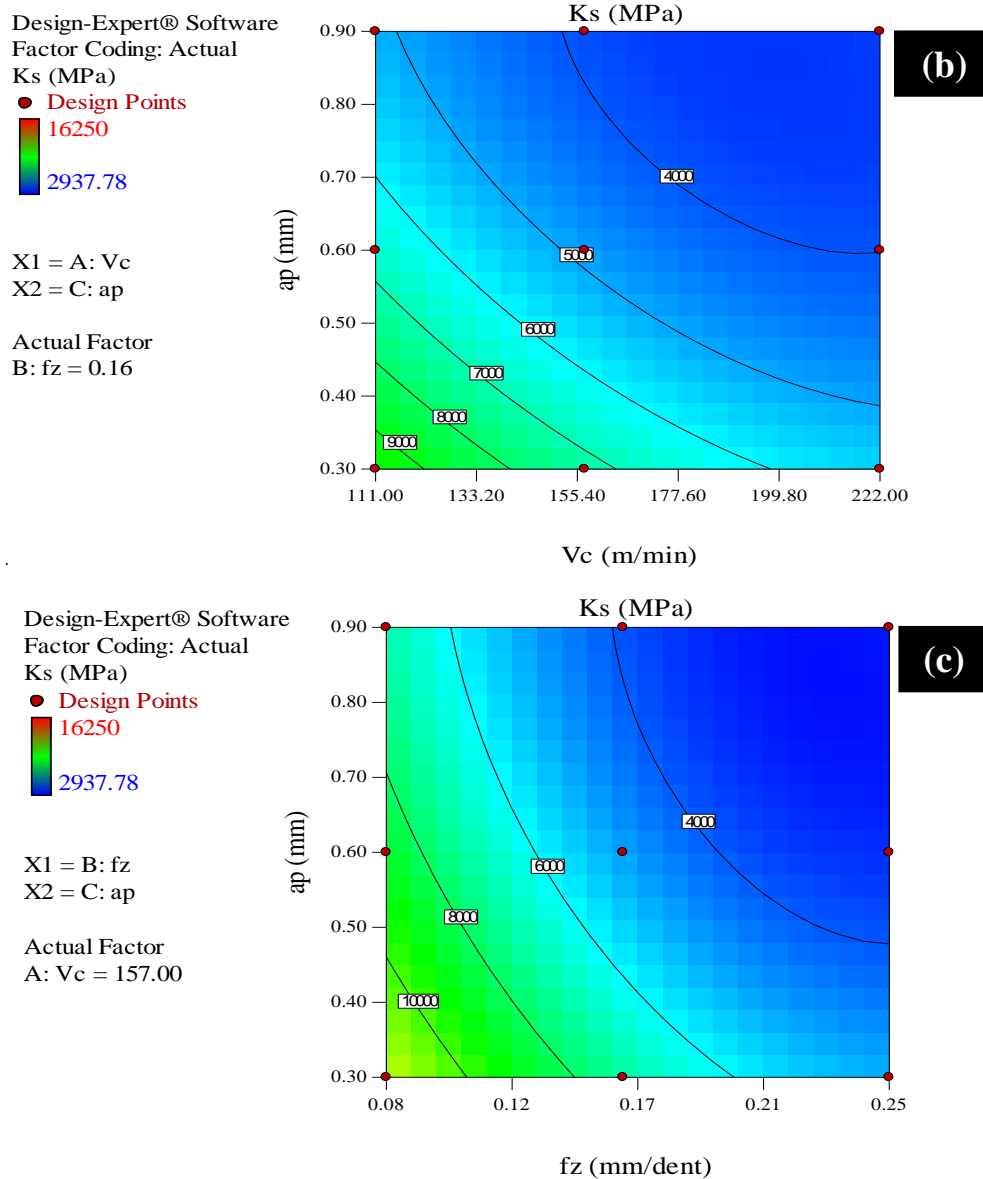


Fig. III.19- Graphique de Contour de (K_s) en fonction de V_c , f_z , a_p .

III.4.4- Résultats de la puissance de coupe (P_c)

III.4.4.1- Analyse de la variance pour (P_c)

Le tableau (III.5) présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour la puissance de coupe (P_c). L'objectif est d'analyser l'impact des facteurs principaux du régime de coupe ainsi que les interactions sur (P_c). Il est à noter que la profondeur de

passee est le paramètre qui a le plus grand effet sur (P_c) avec une contribution de 58,51%, suivie par (f_z) et (V_c) avec les contributions respectives de (20,53 et 15,78)%. Les faibles contributions correspondent aux interactions ($V_c \times ap$) et ($f_z \times ap$) avec un pourcentage inférieur à 2.8%. Des résultats similaires sont obtenus par [25,56].

Tableau III.5- Résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe (P_c).

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Modèle	5462072.6	9	606896.956	112.098827	< 0.0001		Signifiant
V_c	876554.494	1	876554.494	161.906778	< 0.0001	15.786	Signifiant
f_z	1140185.17	1	1140185.17	210.601518	< 0.0001	20.533	Signifiant
ap	3249395.4	1	3249395.4	600.189882	< 0.0001	58.517	Signifiant
$V_c \times f_z$	10908.2691	1	10908.2691	2.01484643	0.1738	0.196	InSignifiant
$V_c \times ap$	150316.739	1	150316.739	27.7647299	< 0.0001	2.707	Signifiant
$f_z \times ap$	108532.76	1	108532.76	20.0468877	0.0003	1.955	Signifiant
V_c^2	6569.94836	1	6569.94836	1.21352315	0.2860	0.118	InSignifiant
f_z^2	6069.25545	1	6069.25545	1.12104108	0.3045	0.109	InSignifiant
ap^2	4372.50013	1	4372.50013	0.8076365	0.3814	0.079	InSignifiant
Error	92037.076	17	5413.94564				
Total	5554109.68	26				100	

III.4.4.2- Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-20) présente les effets moyens des paramètres de coupe sur la puissance de coupe (P_c). On remarque que le facteur qui a la plus grande influence sur (P_c) est la profondeur de passe (ap) puisque elle a la plus grande pente, suivie par (f_z et V_c) avec des pentes proche l'une de l'autre. Ce qui est logique, puisque (P_c) dépend de l'effort de coupe, et la profondeur (ap) influe beaucoup sur ce dernier (équation I.6).

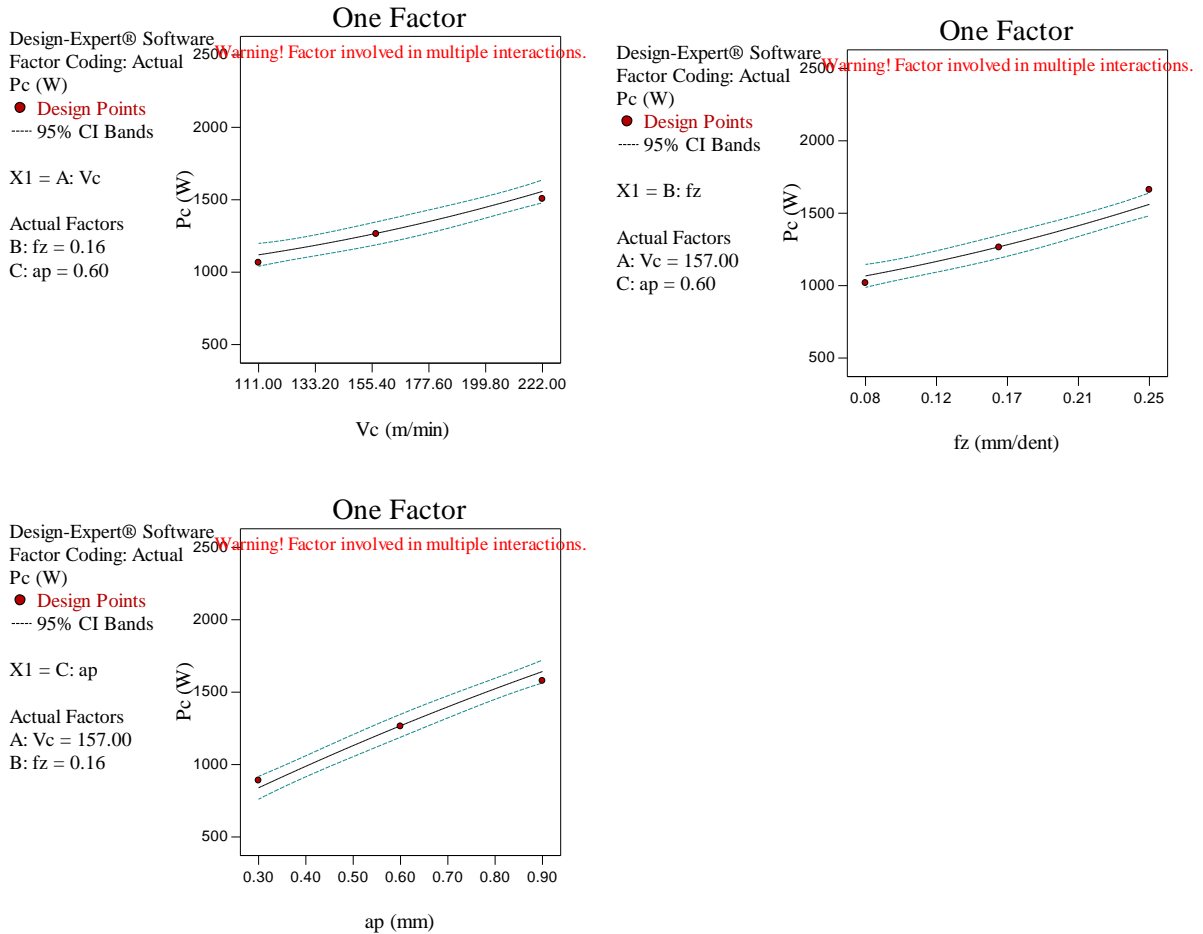


Fig. III.20- Graphique des effets principaux pour la puissance de coupe (P_c).

La figure (III-21) expose le diagramme des interactions des paramètres d'usinage pour la puissance de coupe (P_c). Cette figure montre une tendance de chevauchement entre les courbes des différents paramètres des interactions ($V_c \times ap$) et ($fz \times ap$), car (ap) a une grande pente par rapport à (V_c et fz), ce qui veut dire que leurs trajectoires vont se croiser. Alors il y'a des interactions entre ($V_c \times ap$) et ($fz \times ap$), mais avec des faibles contributions qui n'atteignent pas les 2.8% (tableau III.5).

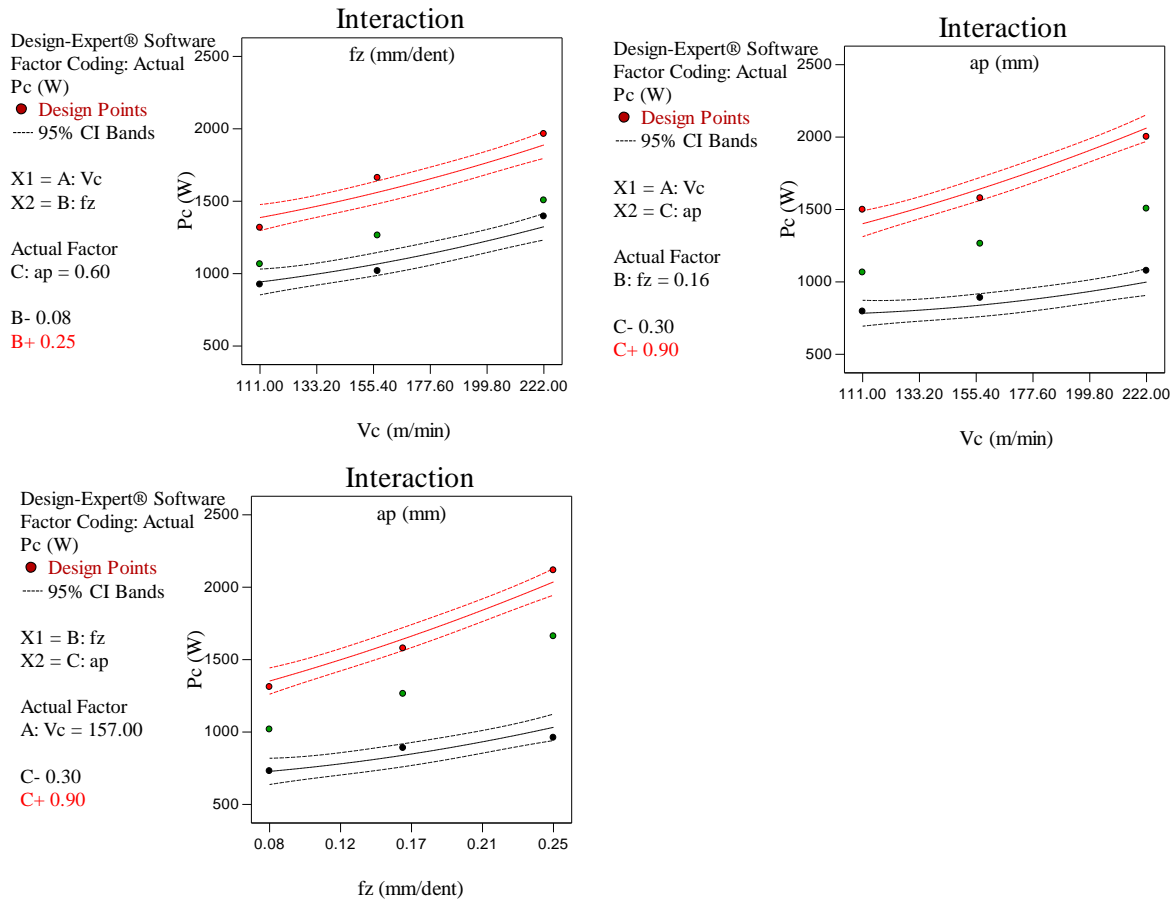


Fig. III.21- Diagramme d'interaction pour la puissance de coupe (P_c)

III-2-6-3 Equation de régression pour la puissance de coupe (P_c)

Le modèle de la puissance de coupe (P_c) est donné par l'équation (III.6) ci-après. Son coefficient de détermination (R^2) est de 98,34%.

$$\begin{aligned}
 P_c = & 847.853 - 478.85 \times 10^{-2} V_c - 1785.21 f_z + 5122.851 \times 10^{-2} a_p + \\
 & 111.21 \times 10^{-4} V_c^2 + 4419.874 f_z^2 - 299.948 a_p^2 + 635.645 \times 10^{-2} V_c \times f_z + \\
 & 668.942 \times 10^{-2} V_c \times a_p + 3727.342 f_z \times a_p
 \end{aligned} \quad (III.6)$$

La Figure (III.22) présente une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la puissance de coupe (P_c). L'analyse des résultats de la figure (III.22) montre une bonne corrélation entre les deux courbes avec un coefficient de détermination de $R^2 = 98,34\%$.

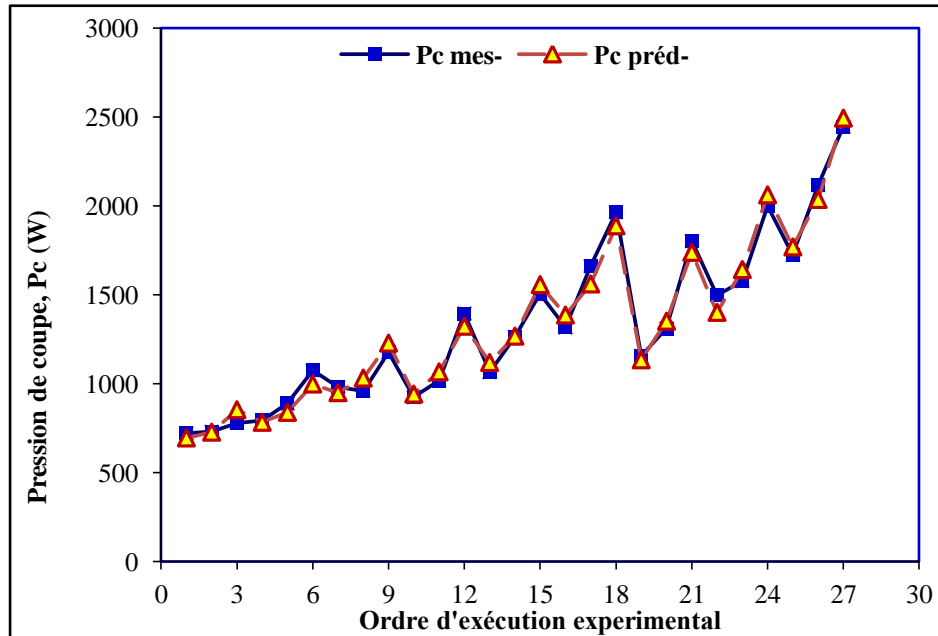


Fig. III.22- Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la puissance de coupe (P_c).

III.4.4.4- Diagrammes de surfaces 3D et graphiques de contours

Les graphiques (3D) de la puissance de coupe (P_c) en fonction des facteurs d'entrée sont représentés dans la figure (III.23). La figure (III.23.a) expose le diagramme (3D) de (P_c) en fonction de (f_z et V_c). On constate que l'augmentation de l'avance (f_z) et la vitesse de coupe induisent une légère augmentation de (P_c). Sur la figure (III.23.b) est représenté le diagramme de (P_c) en fonction de (ap et V_c). On remarque que l'augmentation de la profondeur de passe (ap) fait augmenter la puissance de coupe (P_c) d'une manière frappante, par contre l'augmentation de (V_c) influe peu sur (P_c). La figure (III.23.c) illustre le diagramme de (P_c) en fonction de (f_z et ap). Il est évident que la profondeur de passe est le paramètre qui a l'influence majeure sur l'augmentation de la puissance de coupe comparativement avec l'avance par dent, cela est justifié par la valeur de sa contribution de 58.517% (tableau III.5).

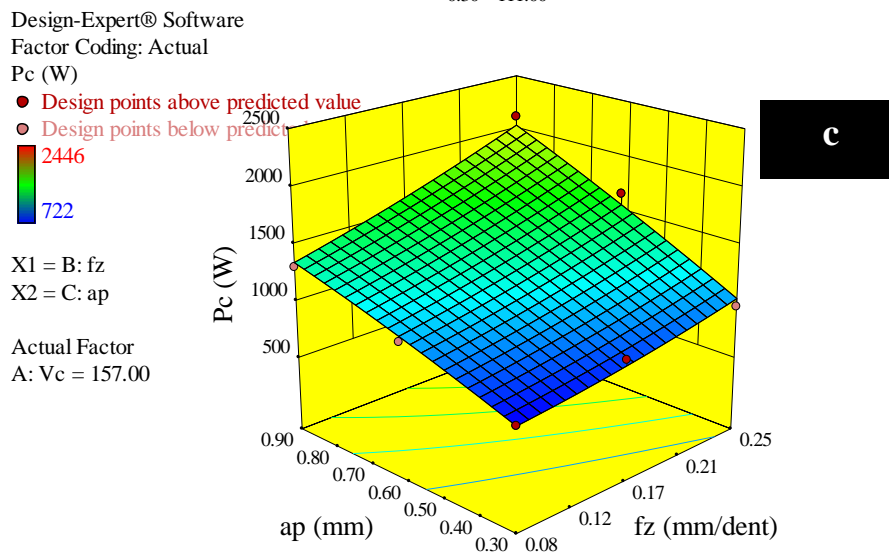
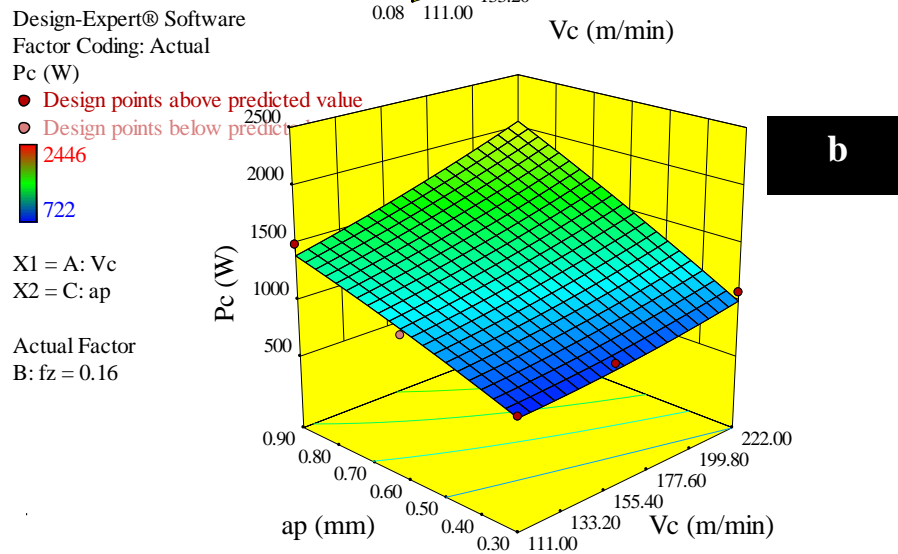
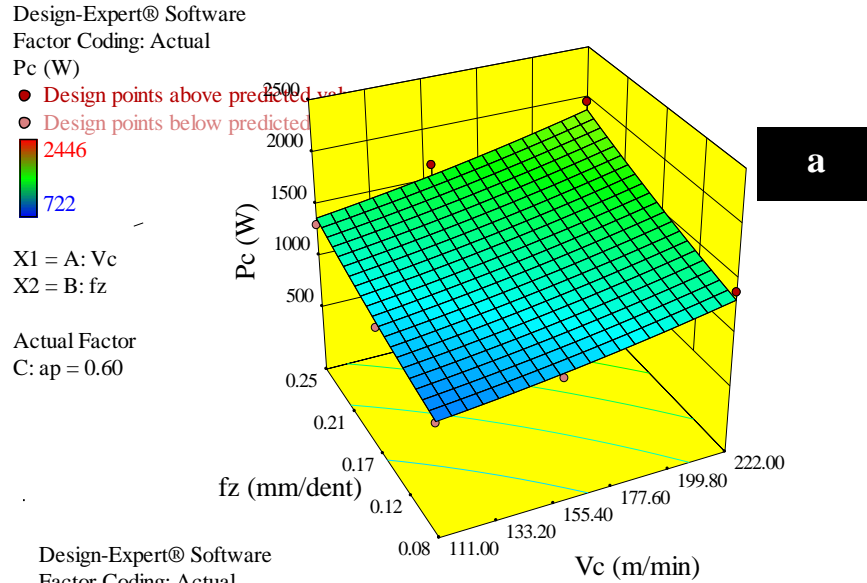


Fig. III.23- Diagrammes de surfaces de (P_c) en fonction de (V_c , f_z et a_p).

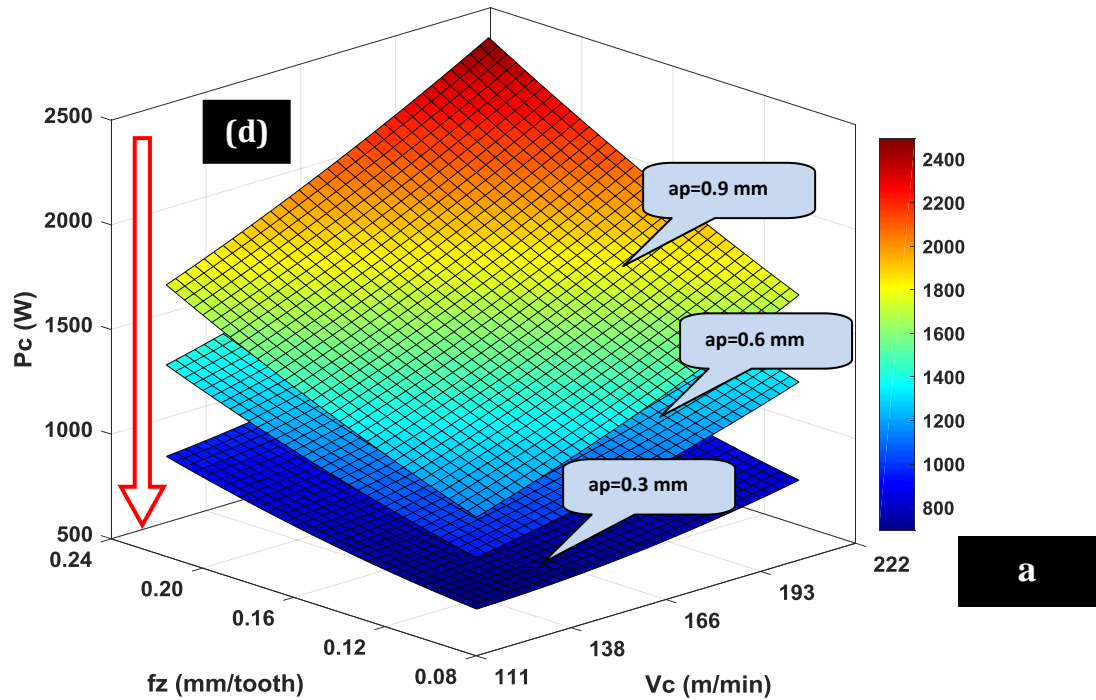


Fig. III.24- Surface 3D pour la puissance de coupe (P_c en fonction de f_z , V_c et trois (a_p)).

La figure III.24 illustre la variation de la puissance de coupe (P_c) en fonction de (V_c et f_z) pour trois valeurs de profondeurs de coupe (0,3 ; 0,6 et 0,9) mm. La tendance des courbes montre clairement que l'augmentation de (V_c et f_z) entraîne une augmentation de (P_c). On constate aussi que plus la profondeur de passe augmente, plus l'écart entre les courbes devient important. La valeur maximale de (P_c), 2400W, est enregistrée lorsque les paramètres de coupe (V_c , f_z et a_p) sont à leurs niveaux supérieurs. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par [25,57].

Les graphes de contour figure (III-25) 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 la valeur de réponse (P_c) et les trois facteurs à partir du modèle de l'équation. D'une simple vue à ces graphes on peut rapidement savoir que la plus grande puissance de coupe est atteinte aux grandes profondeurs de passe.

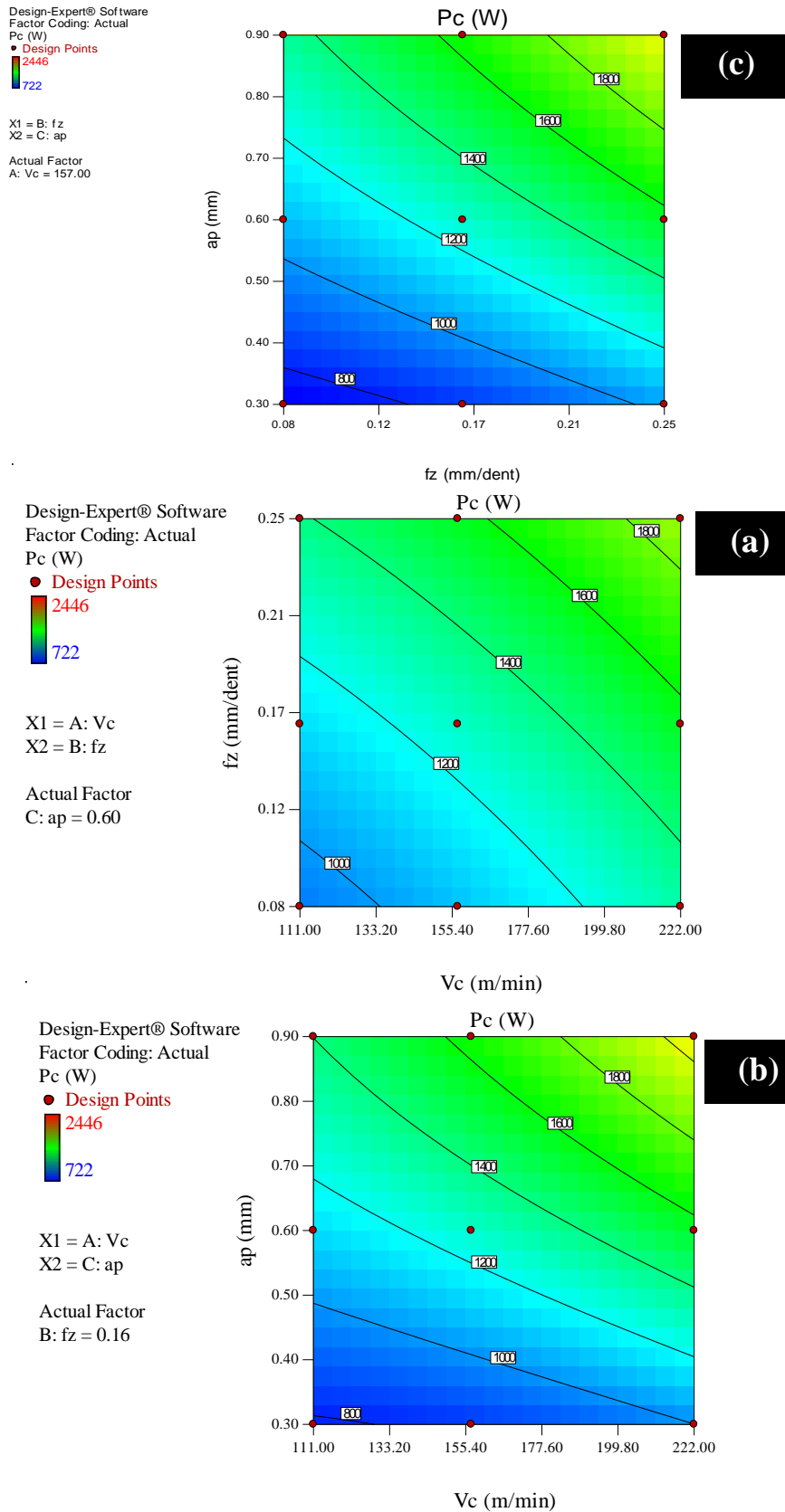


Fig. III.25- Graphique de Contour de (P_c) en fonction de V_c , f_z et a_p .

III.4.5- Résultats de la quantité du copeau enlevé

III.4.5.1- Analyse de la variance pour (QCE)

Le tableau (III.6) expose les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) la quantité du copeau enlevé (QCE). Le but ici est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que leurs interactions sur la (QCE). Il est clair d'après l'analyse de ce tableau que (fz) et (ap) ont la plus grande influence sur (QCE) avec les contributions respectives de (37.48 et 35.28)%, suivies par (Vc) Avec 15,76% de contribution. L'interaction ($fz \times ap$) est significative avec 6.04% de contribution. Les deux autres interactions sont significatives mais avec des contributions inférieures à 3% [48,55].

Tableau III.6- Résultats de l'ANOVA pour la quantité de copeau enlevé (QCE).

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Model	5.41E+09	9	6.02E+08	389.04	< 0.0001		Signifiant
Vc	8.81E+08	1	8.81E+08	569.97	< 0.0001	15.76213956	Signifiant
fz	2.10E+09	1	2.10E+09	1355.56	< 0.0001	37.48710617	Signifiant
ap	1.97E+09	1	1.97E+09	1275.77	< 0.0001	35.28056702	Signifiant
$Vc \times fz$	1.58E+08	1	1.58E+08	102	< 0.0001	2.820741855	Signifiant
$Vc \times ap$	1.45E+08	1	1.45E+08	94.05	< 0.0001	2.600889916	Signifiant
$fz \times ap$	3.38E+08	1	3.38E+08	218.72	< 0.0001	6.048555476	Signifiant
Vc^2	0	1	0	0	1	0	InSignifiant
fz^2	0	1	0	0	1	0	InSignifiant
ap^2	0	1	0	0	1	0	InSignifiant
Error	2.63E+07	17	1.55E+06				
Total	5.44E+09	26		3616.07		100	

III.4.5.2- Graphique des effets moyens et diagramme d'interaction

La figure (III.26) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la quantité de copeau enlevé (QCE). On remarque que les paramètres (fz et ap) ont plus d'influence que (Vc) sur (QCE) vu leurs pentes élevées. La figure (III.27) expose le diagramme des interactions des paramètres du régime de coupe pour la quantité du copeau enlevé. Cette dernière ne montre aucun croisement entre tous les courbes des trois variables, mais une tendance de chevauchement entre ($Vc \times fz$) et ($Vc \times ap$) et particulièrement entre ($fz \times ap$).

Donc ces interactions sont toutes significatives avec des faibles contributions qui sont successivement (2.82 ; 2.6 et 6.048)%.

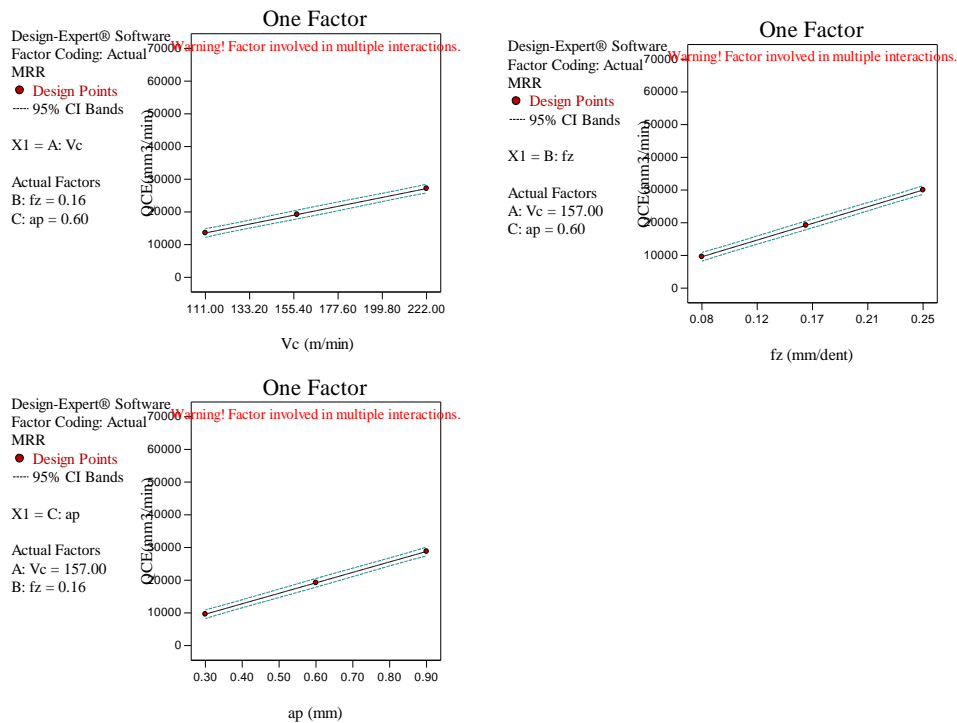


Fig. III.26-- Graphique des effets principaux pour la quantité du copeau enlevé (QCE).

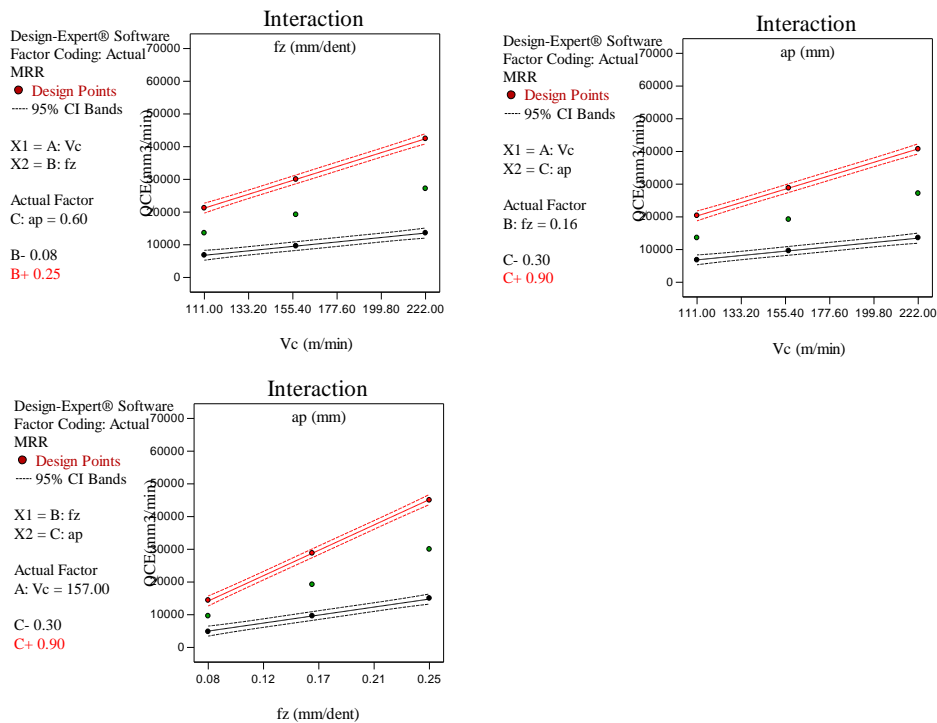


Fig. III.27- Diagramme d'interaction pour la quantité du copeau enlevé (QCE).

III.4.5.3- Equation de régression pour la quantité du copeau enlevé (QCE)

Le modèle de la quantité du copeau enlevé (QCE) est donné par l'équation suivante (III.7). Son coefficient de détermination (R^2) est de 99,52%.

$$\begin{aligned}
 QCE = & 203.907 \times 10^2 - 124.841Vc - 124.841 \times 10^3 fz - 339.844 \times 10^2 ap + \\
 & 764.331Vc \times fz + 208.068Vc \times ap + 208.068 \times 10^3 fz \times ap - \\
 & 603.649 \times 10^{-13}Vc^2 - 148.347 \times 10^{-7} fz^2 - 107.393 \times 10^{-8} ap^2
 \end{aligned}
 \tag{III.7}$$

La Figure (III.28) exprime une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la quantité du copeau enlevé (QCE). L'analyse de cette figure montre une excellente corrélation entre les deux courbes avec $R^2 = 99,52\%$.

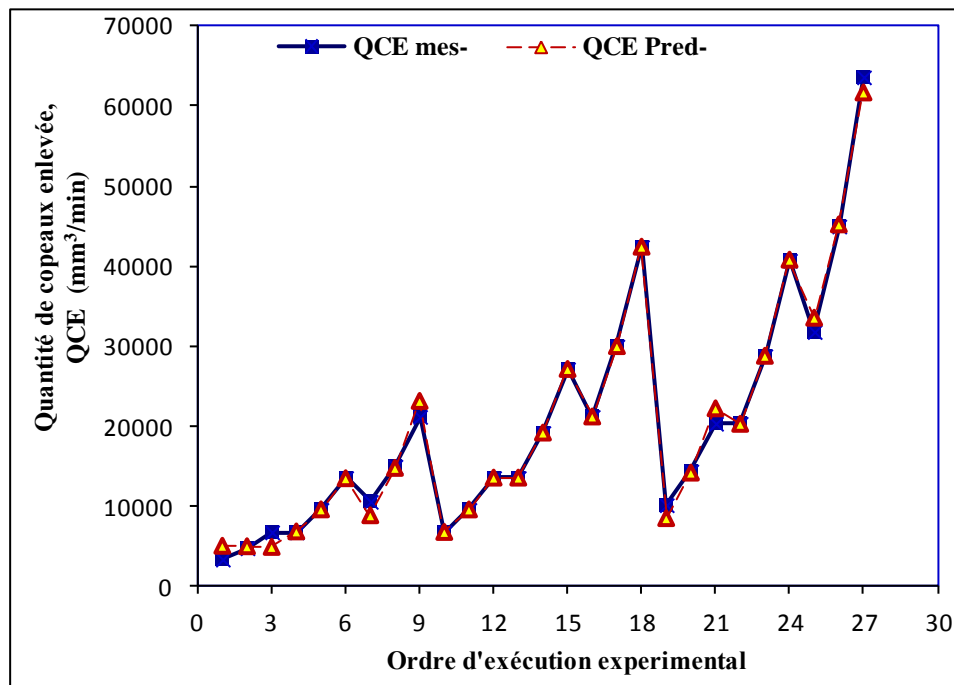
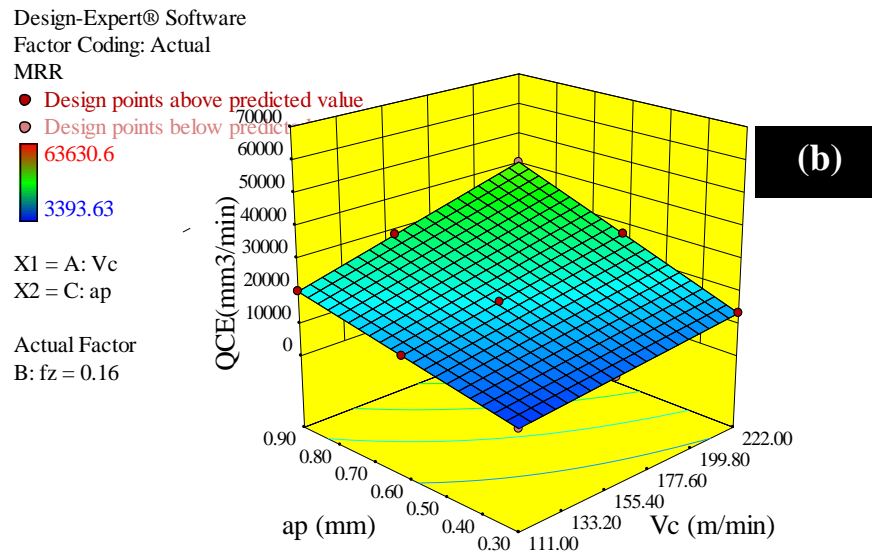
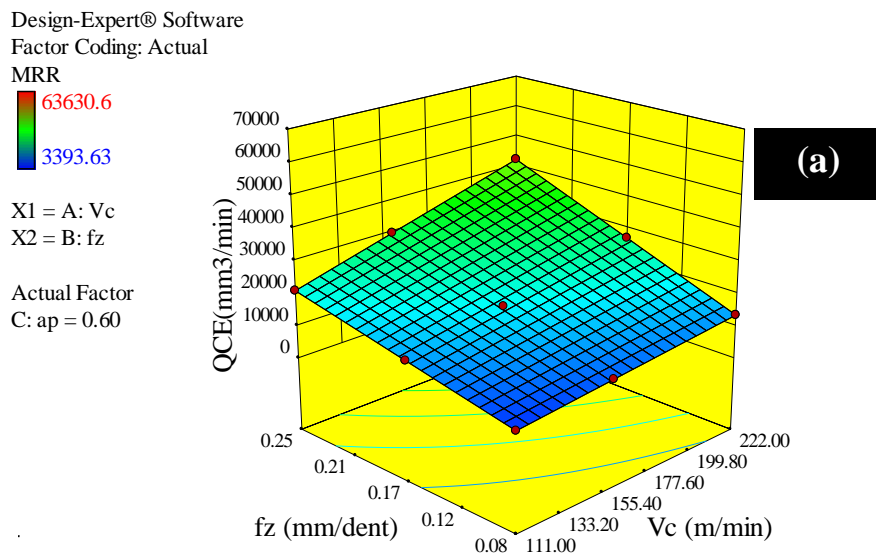


Fig. III.28- Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de la quantité du copeau enlevée (QCE).

III.4.5.4- Diagramme de surface 3D et graphique de contour

La figure (III.29) présente les diagrammes (3D) de la quantité du copeau enlevé (QCE) en fonction des paramètres du régime de coupe. La figure (III.29.a) présente le diagramme de (QCE) en fonction de (Vc) et (fz), on remarque que l'avance par dent est le

paramètre qui a la plus grande influence car elle possède la plus grande pente, avec son augmentation la quantité du copeau enlevé augmente énormément. La figure (III.29.b) présente le diagramme de (QCE) en fonction de (Vc) et (ap). Cette fois-ci la remarque qui peut être révélée dans cette figure est que l'augmentation de (QCE) est influencée beaucoup plus par l'augmentation de (ap) qu'avec l'augmentation de (Vc), vu la pente des deux paramètres. La figure (III.29.c) présente le diagramme de (QCE) en fonction de (fz) et (ap). On remarque nettement que (fz) et (ap) ont tous les deux un grand impact sur (QCE). Leurs augmentations engendrent une augmentation claire et nette de (QCE).



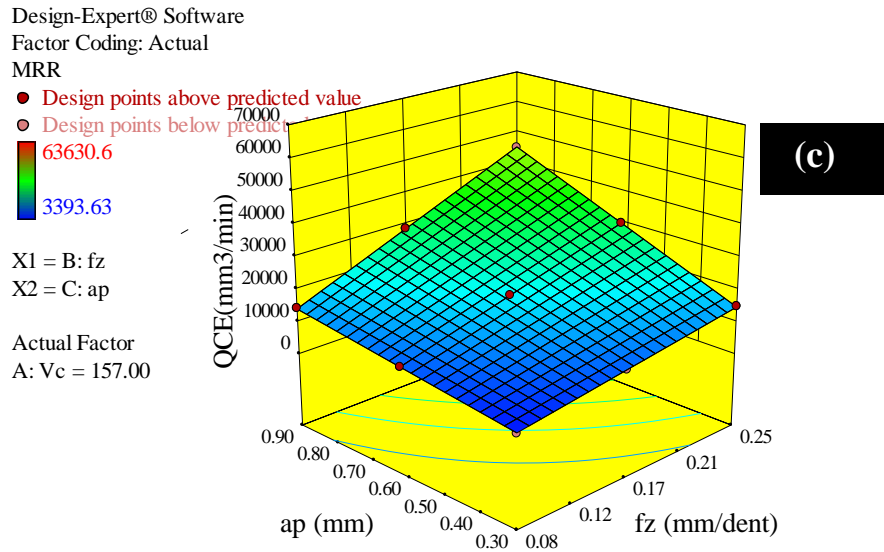


Fig.III.29- Diagrammes de surfaces de la quantité du copeau enlevé (QCE) en fonction de (V_c , f_z et ap).

L'évolution de la quantité du copeau enlevé (QCE) avec l'avance par dent (f_z) et la profondeur de passe (ap) pour les trois valeurs de vitesse de coupe (V_c) respectivement (111, 157 et 222) m/min est illustrée à la (figure III.30). Le diagramme 3D révèle que la (QCE) augmente significativement et linéairement de l'ordre de 6000 à plus de 60000 mm³/min. On constate que l'augmentation de (V_c) contribue en grande partie à l'augmentation de la quantité du copeau enlevé (équation I.13). Notons que le maximum de la (QCE) est obtenu aux niveaux les plus élevés des paramètres de coupe ($V_c = 222$ m/min, $f_z = 0.25$ mm / dents et $ap = 0.9$ mm), ce qui est en accord avec l'équation (I.13).

Les graphes de contour figure (III.31) 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 la réponse de la (QCE) et les trois facteurs à partir du modèle. Le maximum de la quantité de copeaux enlevé est obtenu avec les valeurs élevées des trois facteurs, en particulier avec (f_z) et (ap) figure (III.31.c).

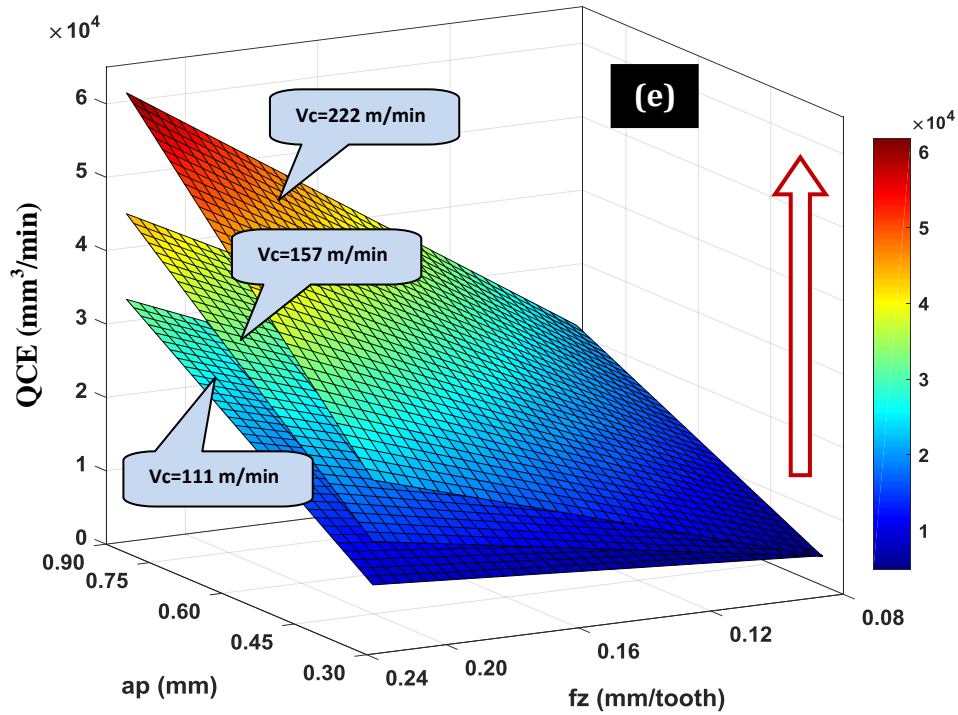
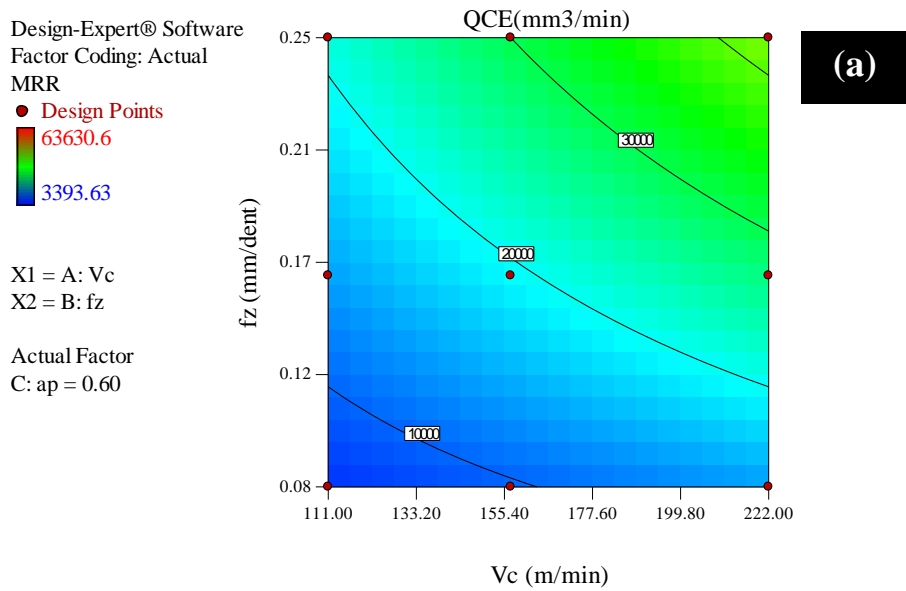


Fig. III.30- Surface 3D pour la quantité de copeau enlevé (QCE) en fonction de ap , fz et trois (V_c).



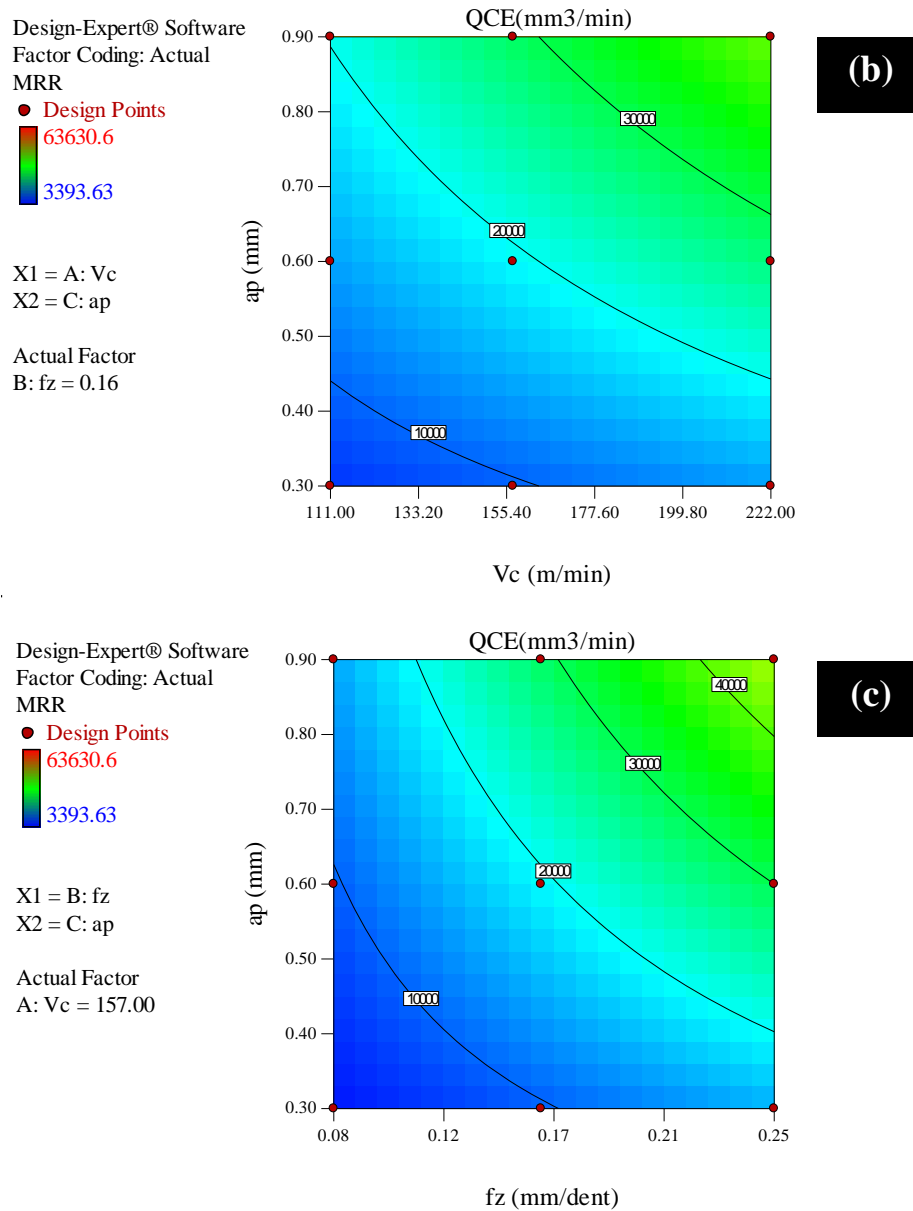


Fig. III.31- Graphique de Contour de (QCE) en fonction de Vc , fz et ap .

III.5- Effet d'usure

III.5.1- Tenue de l'outil

En général, la tenue d'un outil de coupe en fraisage est influencée par une série de facteurs à savoir, les propriétés physiques et mécaniques du métal en œuvre, nature du matériau constituant l'outil, l'état de l'arête tranchante et la géométrie de la partie active de l'outil, les facteurs mécaniques d'usinage (Vc , fz , ap), et l'état de la machine-outil (la

rigidité de l'ensemble porte-outil/outil ; porte-pièce/pièce). Dans notre cas on s'est intéressé à la vitesse de coupe (V_c) et l'avance par dent (f_z). La figure (III.32) expose les résultats de la tenue de l'outil en fonction de l'avance par dent, la vitesse de coupe et cela pour une usure admissible $[VB]=0.3\text{mm}$. Lors des essais, la profondeur de passe est maintenue constante. L'analyse des résultats montre que l'augmentation de (V_c) de (111 à 222) m/min, conduit à une chute de la tenue de 86.07% et 87%, pour $f_{z1}=0.12\text{mm/dent}$ et $f_{z2}=0.20\text{mm/dent}$ respectivement. D'autres part, l'élévation de l'avance par dent (f_z) de (0.12 à 0.20) mm/dent, conduit à une diminution de la tenue de 18.19% et 23.6% pour $V_{c1}=111\text{m/min}$ et $V_{c2}=222\text{m/min}$ respectivement. Ceci s'explique au fait, lorsque la vitesse de coupe augmente, les frottements outil-pièce augmentent, par conséquent il en résulte une génération de quantité de chaleur qui altère les arêtes de coupe par des phénomènes physico-chimiques complexes. De même à des avances importantes, l'intensité des efforts de coupe augmente [58]. Tout cela alors conduit à une augmentation de l'usure et donc à la diminution de la tenue [43,54].

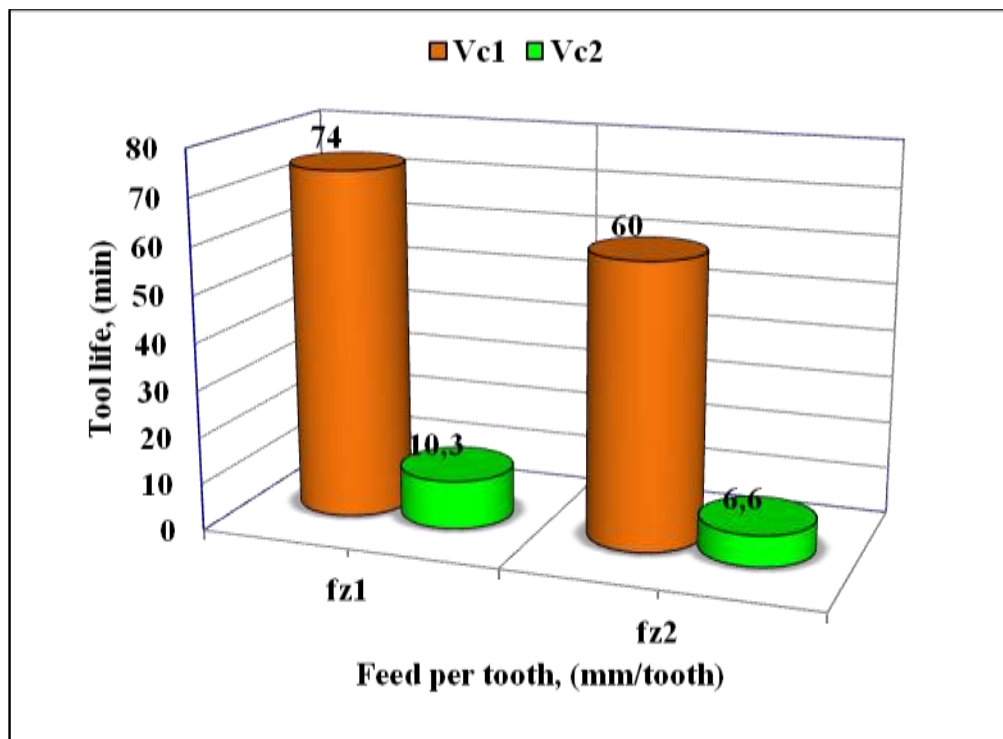


Fig. III.32- Tenue de l'outil (T) pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et $ap=0.6\text{mm}$,

$V_{c1}=111\text{m/min}$, $V_{c2}=222\text{m/min}$, $f_{z1}= 0.12\text{mm}$, $f_{z2}= 0.20\text{mm}$.

III.5.2- Rugosité de surface

La rugosité de la surface usinée en fraisage est d'une manière générale influencée par certains paramètres d'usinage, particulièrement l'avance par dent (f_z) en premier lieu suivie par la vitesse de coupe (V_c) [59]. La figure III.33 illustre les résultats de la rugosité (R_a) en fonction de la variation de (f_z) et (V_c) tout en maintenant la profondeur de passe constante, et ceci pour une usure admissible $VB=0.3\text{mm}$. L'analyse des résultats montre que pour une augmentation de l'avance par dent de 0.12 à 0.20mm/dent , la rugosité de la surface s'élève de (8.24% et 7.02%) pour $V_{c1}=111\text{m/min}$ et $V_{c2}=222\text{m/min}$ respectivement. D'autre part, la croissance de la vitesse coupe de 111 à 222m/min provoque une diminution de la rugosité de (4.64% et 5.71%) pour $f_{z1}=0.12\text{ mm/dent}$ et $f_{z2}=0.20\text{mm/dent}$ respectivement. Pour conclure ce point, on peut dire que l'augmentation de (V_c) améliore la rugosité (R_a) à cause de la diminution des efforts de coupe, tandis que l'accroissement de (f_z) favorise l'élévation de (R_a) ce qui dégrade la qualité de la surface usinée. Ceci est dû principalement à la profondeur des sillons laissés par les dents de la fraise sur la surface usinée et du phénomène d'adhésion des micros copaux.

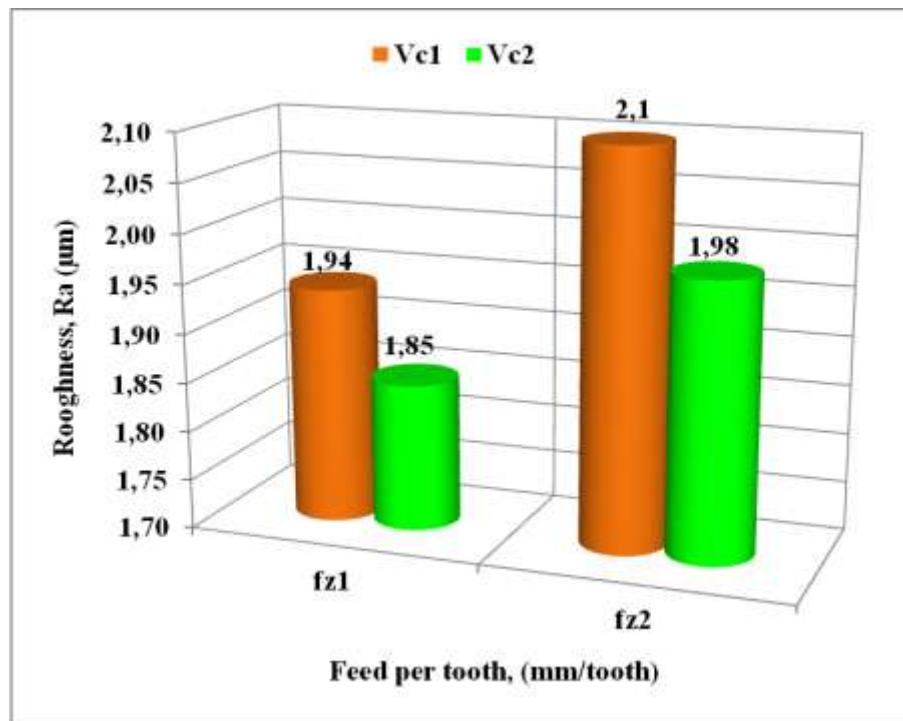


Fig. III.33- Rugosité de surface (R_a) pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et $a_p=0.6\text{mm}$,
 $V_{c1}=111\text{m/min}$, $V_{c2}=222\text{m/min}$, $f_{z1}=0.12\text{mm}$, $f_{z2}=0.20\text{mm}$.

III.6- Topographie de surface 2D et 3D

Les topographies (3D) illustrées aux figures (III.34 et III.35) présentent les surfaces usinées obtenues par deux valeurs d'avance par dent (0,08 et 0,25) mm/dent et deux vitesses de coupe (111 et 222) m/min. L'analyse des figures montre des pics tranchants qui indiquent un arrachement du métal en raison de sa ductilité. On peut mentionner que la distance entre deux pics successifs dépend des valeurs de (fz). Cette distribution est principalement due aux traces laissées par la coupe intermittente de la fraise sur la surface usinée, ainsi qu'à la combinaison du mouvement relatif entre la rotation de la fraise et la translation de la pièce usinée dans le processus du fraisage de face. On remarque aussi que les pics sont plus élevés aux faibles valeurs de (Vc) par rapport à ceux obtenus à des valeurs élevées de la vitesse de coupe. Par conséquent, l'utilisation de grande vitesse de coupe à faible avance (fz) résulte une diminution de l'hauteur de ces pics, ce qui conduit à une amélioration de la rugosité de surface (figure III.35.a). Les mêmes résultats ont été trouvés par Fnids [48].

Les figures (2D) des profils de surface dans la direction de l'avance par dent sont présentées en figures (III.34 et III.35). On constate que l'augmentation de la vitesse de coupe de (111 à 222) m/min conduit à la diminution de près de la moitié des trois critères de rugosité de surface (Ra , Rz et Rt). La même tendance est observée pour les valeurs d'avance par dent (0,08 et 0,25) mm/dent. En outre, il convient de noter que pour les quatre cas étudiés, tous les profils 2D ont une tendance périodique. Pour les plus faibles avance par dent, les profils sont approximativement proches de la forme sinusoïdale.

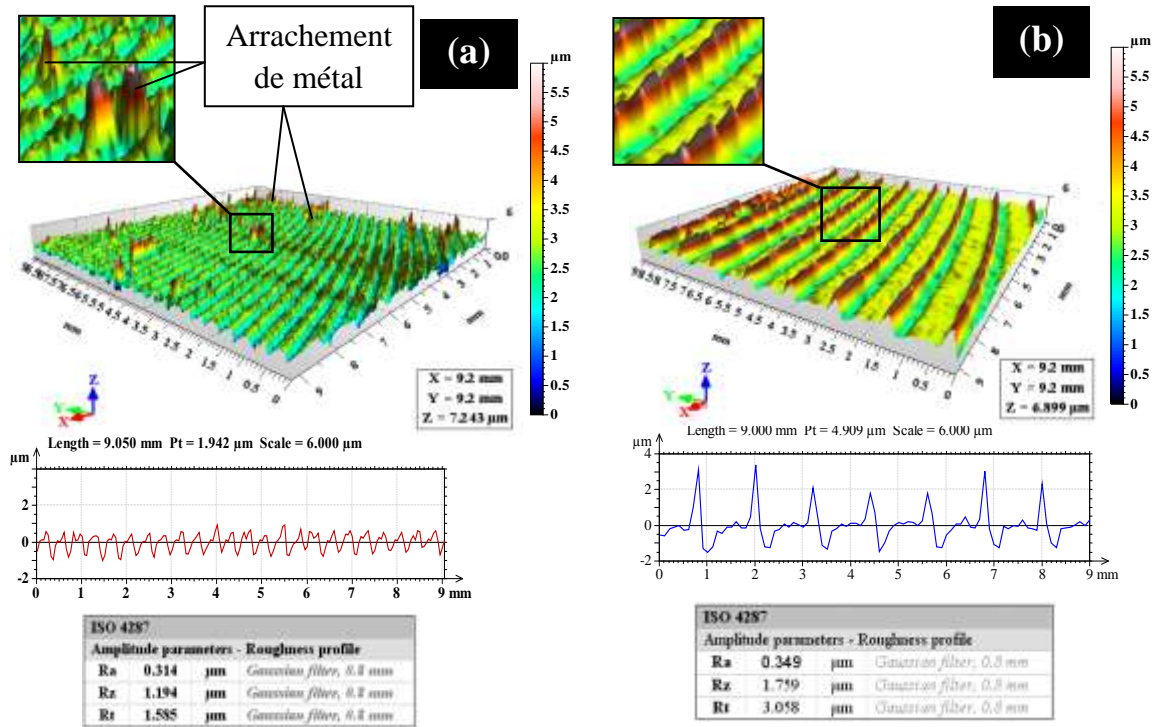


Fig. III.34- Topographies des surfaces fraisées, (a) $f_z=0.08\text{mm/dent}$, (b) $f_z=0.25\text{mm/dent}$ et $V_c=111\text{m/min}$.

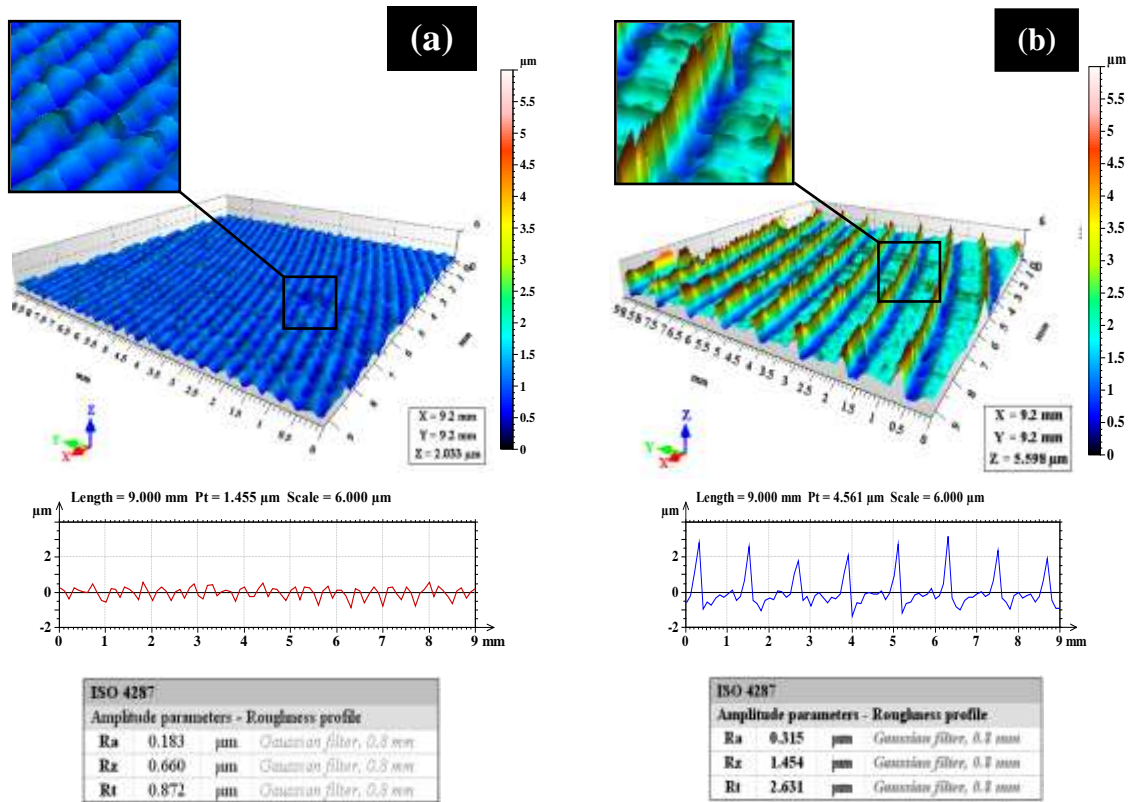


Fig. III.35- Topographies des surfaces fraisées, (a) $f_z=0.08\text{mm/dent}$, (b) $f_z=0.25\text{mm/dent}$ et $V_c=222\text{m/min}$.

III.7- Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse, nous ont permis de titrer les conclusions suivantes:

- D'après les résultats de l'analyse ANOVA nous avons trouvé que :
 - ✓ l'avance par dent est le paramètre principal affectant la rugosité de surface (Ra) et la pression spécifique de coupe (Ks).
 - ✓ L'effort de coupe (Fc) et la puissance de coupe (Pc) sont majoritairement influencés par la profondeur de passe (ap).
 - ✓ La quantité du copeau enlevée (QCE) est influencée en grande partie par (fz) et (ap).
- L'étude statistique a permis de modéliser les différents paramètres technologiques étudiés (Ra , Fc , Ks , Pc et QCE) et de donner de bons résultats avec des coefficients de déterminations (R^2) de 79.77%, 98.45%, 96.65%, 98.34 et 99.52%, respectivement.
- La durée de vie de l'outil est influencée beaucoup plus par la vitesse de coupe que par l'avance par dent.
- L'arrête rapportée et les micro-copeaux soudés apparus lors du fraisage de l'acier X2CrNi18-9 ont un grand impact sur la qualité de la surface usinée.
- Le rugosimètre (3D) (Alti surf 500) est un instrument très performant pour afficher les aspérités de la surface usinée et pour le développement des cartes topographiques tridimensionnelles.

CHAPITRE IV

MODELISATION PAR RESEAUX

DE NEURONES ARTIFICIELS

IV.1- Introduction

Un *réseau de neurones artificiels* (RNA) - Artificial Neural Networks (ANN) -, ou comme on l'appelle aussi réseau neuronal artificiel, est un ensemble de méthodes dont la conception est à l'origine approximativement inspirée du fonctionnement des *neurones* biologiques -humain ou animal- (*cellule nerveuse*) figures (IV.1-IV.2). Les réseaux de neurones artificiels sont des outils statistiques basés sur des notions fondamentales de mathématiques permettant de modéliser et d'optimiser les processus. Cette technique est surtout performante dans les cas de modélisation des relations non-linéaires complexes [60-61].

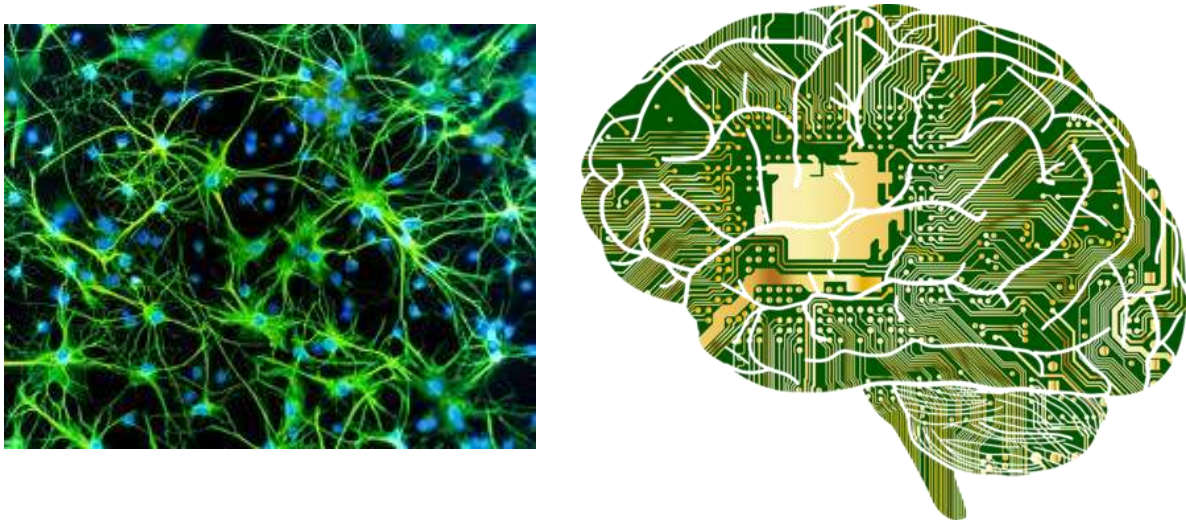


Fig. IV.1- Neurone naturel et neurone artificiel [62-63].

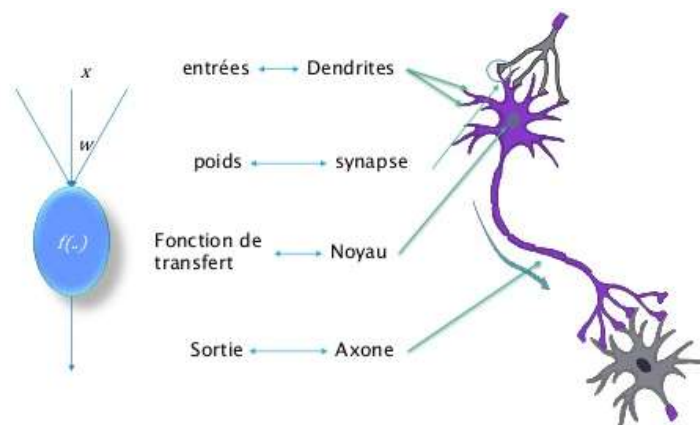


Fig. IV.2- Approche entre neurone artificiel et neurone naturel [64].

Les réseaux de neurones artificiels ont été développés pour résoudre des problèmes dans divers secteurs. Citons à titre d'exemple : Traitement de signal pour différentes applications militaires ou de sécurité (identification de source, filtrage,...), traitement d'image (lecture de chèques bancaires - reconnaissance de caractères et de signature-, cryptage,...), autopilote pour avion, système de guidage pour automobile, optimisation (planification pour évaluer le risque financier ou en assurance,...), control (diagnostic médical, exploration pétrolière ou gazière, en robotique, en télécommunication) , simulation (simulation de boîtes noires),...etc [65].

La productique est l'un des domaines où les exigences sont nombreuses et variées. Minimiser le coût d'usinage, améliorer la qualité et augmenter la productivité sont parmi les principaux objectifs que tous les industriels désirent atteindre. Ces objectifs ne peuvent avoir lieu qu'avec une optimisation et une prédiction du comportement fréquemment non-linéaire entre les différents paramètres du processus. En réalité il existe plusieurs méthodes statistiques de modélisation telle que la méthodologie des surfaces de réponse (MSR). Mais cette méthode peut ne pas donner des résultats précis pour des relations non-linéaires entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques. Depuis pas mal d'années, les réseaux de neurones artificiels sont devenus une alternative qui ne peut pas être ignoré, étant donné la grande précision des résultats obtenus lors de la résolution des problèmes de prédiction ou de control.

IV.2- Réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones naturels effectuent facilement un certain nombre d'applications telles que le traitement du signal, l'apprentissage, la mémorisation, la généralisation. Ces applications sont ceux qu'on retrouve aussi en algorithmique et en intelligence artificielle, dans la mesure du possible. Alors c'est sur la base du comportement des éléments de base du cerveau que les réseaux de neurones artificiels se sont développés [66].

IV.3- Composants d'un réseau de neurones artificiels

IV.3.1- Neurones artificiels

Un "neurone " est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids [67].

Un neurone artificiel (figure IV.2) est principalement constitué :

- De R entrées correspondant au vecteur $\mathbf{P} = [p_1 p_1 \dots p_R]^T$ (ou $\mathbf{X} = [x_1 x_1 \dots x_R]^T$)
- De vecteur des poids $\mathbf{W} = [w_{1,1} w_{1,2} \dots w_{1,R}]^T$
- D'un biais " b " du neurone (ou *seuil d'activation du neurone*)
- D'un intégrateur " n " (ou *niveau d'activation du neurone*) qui effectue la somme pondérée de ses entrées

$$n = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R - b = \mathbf{w}^T \mathbf{p} - b \quad (\text{IV.1})$$

Cette équation peut être aussi écrite sous forme matricielle :

$$n = \mathbf{Wp} - b \quad (\text{IV.2})$$

- D'une fonction d'activation " f "
- D'une sortie " a " (ou " y ")

En ajoutant une fonction d'activation f on obtient une sortie du neurone

$$a = f(n) = f(\mathbf{Wp} - b) \quad (\text{IV.3})$$

Pour résumer, chaque neurone calcule une sortie unique en se basant sur les informations qui lui sont données. La figure (IV.3) montre la composition d'un neurone artificiel [68].

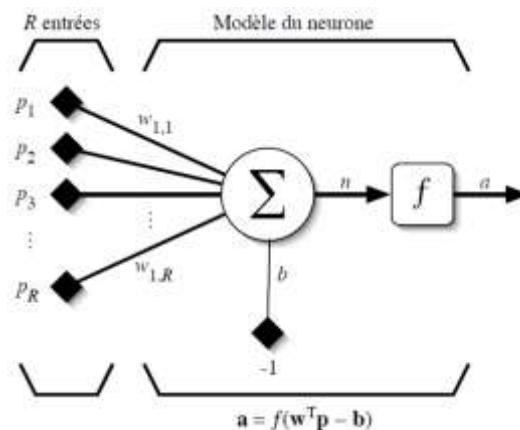


Fig. IV.3- Modèle d'un neurone artificiel.

Le neurone en tant qu'unité élémentaire procède de la façon suivante :

- **1^{er} temps** : Le neurone fait le calcul de la somme pondérée des entrées (en fonction de la force des connexions). L'apprentissage ayant été réalisé auparavant, le poids des connexions à cette étape est déjà déterminé et fixe.

- **2^{ème} temps** : À partir de la valeur obtenue, une fonction d'activation ou de transfert va calculer la valeur de l'état du neurone. Le neurone compare la somme pondérée des entrées à une valeur de seuil et fournit alors une réponse en sortie.

Une couche de neurones peut être représentée par le schéma et les connexions montrées sur la figure IV.4 ci-dessous :

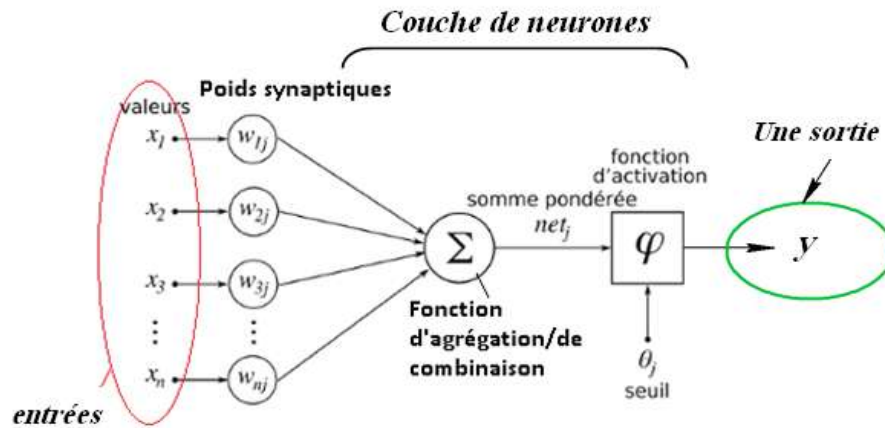


Fig. IV.4- Schéma d'une couche de neurones

IV.3.2- Fonctions de transfert

Les fonctions de transfert (fonction d'activation) déterminent la valeur de l'état du neurone qui sera transmise aux neurones avals. Il existe de nombreuses fonctions de transfert possibles, les plus utilisées sont présentées sur la figure (IV.5). Elles peuvent prendre une infinité de valeurs comprises dans l'intervalle [0 ; +1] ou [-1 ; +1] [68].

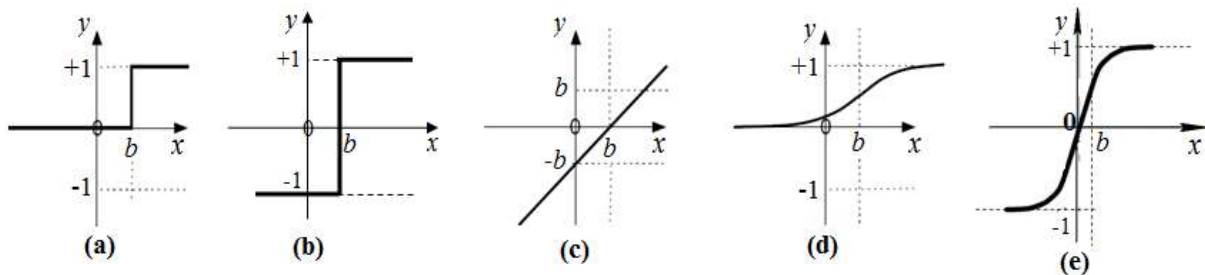


Fig. IV.5- Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones.

- (a) fonction seuil, $a = 0$ si $n < 0$ (c) fonction linéaire, $a = n$
 $a = 1$ si $n \geq 0$
- (b) fonction seuil symétrique, $a = -1$ si $n < 0$ (d) fonction sigmoïde, $a = \frac{1}{1 + \exp^{-n}}$
 $a = 1$ si $n \geq 0$
- (e) fonction tangente hyperbolique. $a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$

IV.3.3-Perceptron

Le Perceptron est un seul neurone en période d'utilisation.

IV.3.3.1- Perceptron simple

Le Perceptron simple est le perceptron à une seule couche de neurones dont les fonctions d'activation sont de type seuils. L'apprentissage ayant été effectué, les poids sont établis. Le neurone de la figure (IV.6) effectue une simple somme pondérée de ses entrées, compare une valeur de seuil, et fourni une réponse binaire (0 ou +1) ou aussi (-1 ou +1) en sortie. Cette réponse sera acceptée ou rejetée.

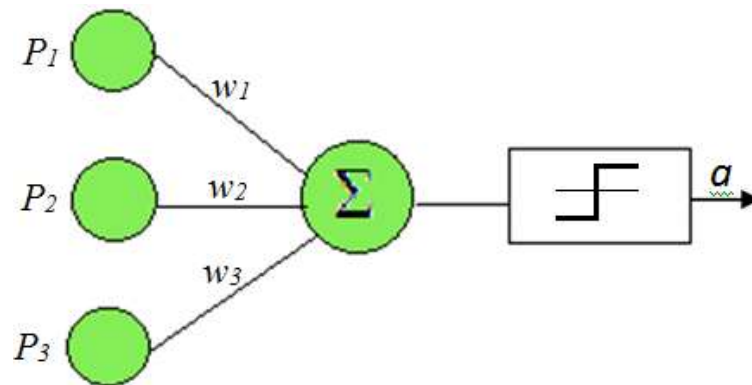


Fig. IV.6- Schéma de principe du perceptron simple.

IV.3.3.2- Perceptron multicouches

Le perceptron multicouche est l'un des réseaux de neurones les plus utilisés dans le cas d'approximation ou de prédiction. Il est souvent composé de deux ou trois couches de neurones successives complètement connectés figure (IV.7). Une couche est un ensemble de neurones ne possédant aucune connexion entre eux.

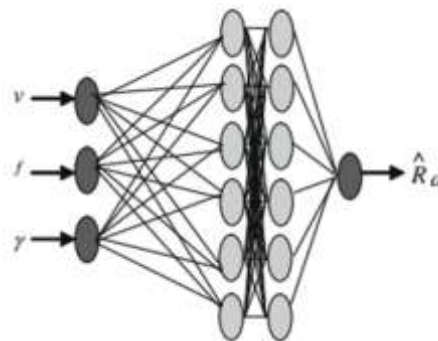


Fig. IV.7- Schéma du perceptron multicouche à 3 entrées, deux couches cachées à (6) neurones chacune et une sortie [36].

IV.3.4- L'apprentissage

L'apprentissage est une période d'évolution d'un réseau neuronal au cours de laquelle la forme du réseau est modifiée par itération jusqu'à l'obtention de la forme souhaitée. Dans la plupart des algorithmes d'approximation, l'apprentissage se traduit par une modification dans la valeur des poids $w_{i,j}$ qui relient les neurones d'une couche à l'autre figure (IV.8). C'est cette modification qui permet de rapprocher au mieux la réponse du réseau vers celle désiré.

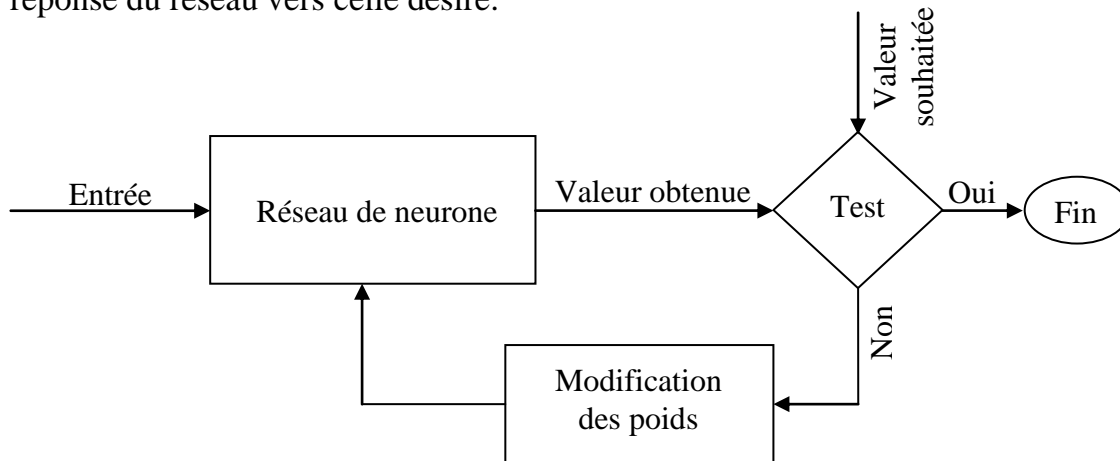


Fig. IV.8- Système d'apprentissage du réseau de neurone.

L'apprentissage peut être global, quand tous les poids des connexions d'un réseau sont modifiés à chaque itération. Comme il peut être local quand seulement certains poids sont modifiés à chaque itération. Cette modification des poids des neurones (ou mise à jour) peut se faire :

- Soit par apprentissage supervisé, dans ce cas l'exemple étudié doit être sous forme de couple (possédant une entrée et une valeur souhaité). Les poids du réseau de neurones sont ajustés en fonction de l'erreur qui est calculé par la différence entre la sortie obtenue du réseau et la sortie souhaité.
- Soit par apprentissage non-supervisé, dans ce deuxième cas on ne dispose que des entrées. l'adaptation des poids ne dépend que des critères internes au réseau. Alors aucune sortie désirée n'est fixée, aucune erreur n'est calculée [65].

IV.3.5- La rétropropagation

La rétropropagation « backpropagation » consiste à corriger l'erreur en arrangeant les poids des neurones et de leurs connexions en remontant du neurone de la couche de sortie aux neurones de la couche d'entrée passant par les neurones des couches cachées, en procédant à l'apprentissage local. Cela en utilisant le gradient descendant qui consiste à minimiser la moyenne des carrés des erreurs de N neurones de sortie en utilisant :

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (s_{k,p} - y_{k,p})^2 \quad (\text{IV.4})$$

Où $s_{k,p}$ = sortie souhaitée pour la $p^{\text{ème}}$ entrée.

Les poids des liens sont mis à jour en tant que

$$w_{ji(n+1)} = w_{ji(n)} - \eta \delta_{pj} y_{pj} + \alpha \Delta w_{ji(n)} \quad (\text{IV.5})$$

Où n est la phase d'apprentissage η Est le taux d'apprentissage et α est le moment constant.

Dans l'équation (IV.5), δ_{pj} est le terme d'erreur, qui est donné comme suit:

$$\text{Pour la couche de sortie: } \delta_{pk} = (s_{kp} - y_{kp})(1 - y_{kp}) \quad k = 1, \dots, K \quad (\text{IV.6})$$

$$\text{Pour la couche cachée: } \delta_{pj} = y_{pj}(1 - y_{pj}) \sum \delta_{pk} w_{kj} \quad j = 1, \dots, J \quad (\text{IV.7})$$

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

$$\bar{E} = \frac{1}{R} \sum_{P=1}^R \frac{1}{NA} \sum_{k=1}^N (s_{kp} - y_{kp})^2 \quad (\text{IV.8})$$

Où R = nombre d'échantillon d'apprentissage.

Le processus d'apprentissage s'arrêtera lorsque l'objectif défini de \bar{E} ou le nombre maximal d'itérations sera atteint [69-70].

IV.3.6- Taux d'apprentissage

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

IV.4- Modélisation des paramètres de performance par réseaux de neurones artificiels (ANN)

Afin de modéliser les paramètres de performance, rugosité de surface (Ra), effort de coupe (Fc), pression spécifique de coupe (Ks), puissance de coupe (Pc) et la quantité de copeau enlevé (QCE) en fraisage de face nous avons employé un perceptron multicouche (MLP). Les données expérimentales présentées dans le tableau (VI.1) ont été utilisées pour établir les modèles des différents paramètres étudiés. A cet effet un plan expérimental de 27 essais a été élaboré. L'apprentissage des réseaux de neurones ont été fait par l'algorithme de rétropropagation qui est basé sur le gradient descendant. Le logiciel de calcul qui a servi pour l'apprentissage et la validation des réseaux est le « JMP 10 ». Le taux d'apprentissage que nous avons adopté pour le traitement de tous les paramètres technologiques de sortie est $\eta = 0.1$ avec un nombre maximum d'itérations de 100.

IV.4.1- Modélisation de la rugosité de surface (Ra) par (ANN)

Pour la modélisation de la rugosité de surface (Ra), 25 essais parmi les 27 en tout, ont été employés pour l'apprentissage du réseau de neurone et 2 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. Plusieurs structures de réseaux ont été testées, nous nous sommes limités à présenter seulement la structure qui a donné le meilleur résultat qui est 3-20-1 (Figure VI.9). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée de 3 nœuds (au nombre des paramètres d'entrés), une couche cachée de 20 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique (IV.3.2.e), et une couche de sortie de 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire.

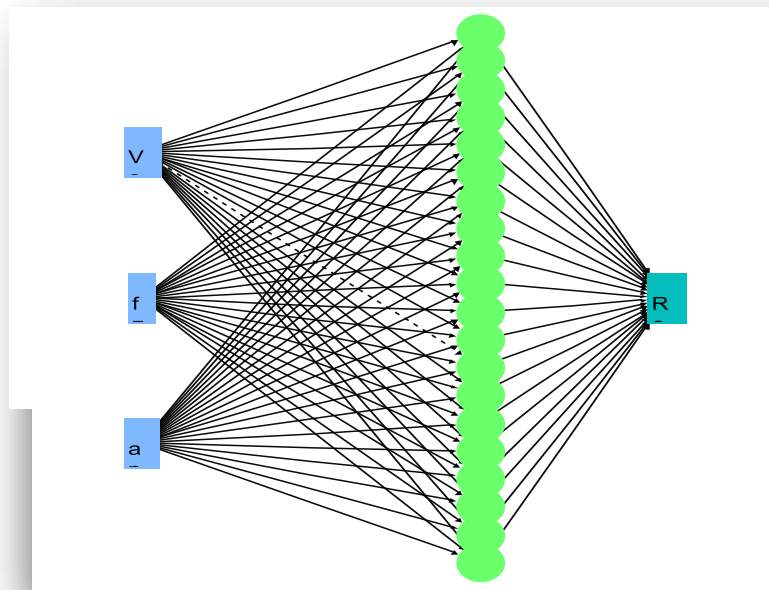


Fig. IV.9- Structure du réseau de neurone du modèle de la rugosité de surface (Ra).

Tableau IV.1- Résultats expérimentaux des paramètres de performance.

N° d'essais	Paramètres d'usinage			Facteurs de Réponse				
	V_c (m/min)	f_z (mm /dent)	a_p (mm)	Ra (μm)	F_c (N)	K_s (MPa)	P_c (W)	QCE (mm^3/min)
1	111	0.08	0.3	0.98	390	16250.00	721.50	3393.63
2	111	0.08	0.6	1	500	10416.67	925.00	6787.26
3	111	0.08	0.9	1.42	625	8680.56	1156.25	10180.89
4	111	0.16	0.3	1.14	430	8958.33	795.50	6787.26
5	111	0.16	0.6	0.66	576	6000.00	1065.60	13574.52
6	111	0.16	0.9	1.35	810	5625.00	1498.50	20361.78
7	111	0.25	0.3	2.04	531	7080.00	982.35	10605.10
8	111	0.25	0.6	2.05	712	4746.67	1317.20	21210.19
9	111	0.25	0.9	2.25	932	4142.22	1724.20	31815.29
10	157	0.08	0.3	0.64	279	11625.00	730.05	4800
11	157	0.08	0.6	1	389	8104.17	1017.88	9600
12	157	0.08	0.9	0.94	501	6958.33	1310.95	14400
13	157	0.16	0.3	1.23	340	7083.33	889.67	9600
14	157	0.16	0.6	1.27	483	5031.25	1263.85	19200

15	157	0.16	0.9	1.26	603	4187.50	1577.85	28800
16	157	0.25	0.3	1.57	367	4893.33	960.32	15000
17	157	0.25	0.6	2	635	4233.33	1661.58	30000
18	157	0.25	0.9	1.52	809	3595.56	2116.88	45000
19	222	0.08	0.3	0.74	211	8791.67	780.70	6787.26
20	222	0.08	0.6	0.82	377	7854.17	1394.90	13574.52
21	222	0.08	0.9	1.09	487	6763.89	1801.90	20361.78
22	222	0.16	0.3	0.86	291	6062.50	1076.70	13574.52
23	222	0.16	0.6	1.1	407	4239.58	1505.90	27149.04
24	222	0.16	0.9	1.33	541	3756.94	2001.70	40723.57
25	222	0.25	0.3	1.13	318	4240.00	1176.60	21210.19
26	222	0.25	0.6	1.28	531	3540.00	1964.70	42420.38
27	222	0.25	0.9	1.25	661	2937.78	2445.70	63630.57

Les équations ci-dessous H_1 à H_{20} sont obtenues par la méthode des réseaux de neurones artificiels. Ils présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 20 neurones) de la couche cachée.

$$H1 = \tanh(.5*(0.0263*Vc + 1.6208*fz - 0.8088*ap - 4.5457));$$

$$H2 = \tanh(.5*(0.0219*Vc - 3.4389*fz - 2.0089*ap - 1.5133));$$

$$H3 = \tanh(.5*(0.0014*Vc - 6.9639*fz + 7.9169*ap - 3.5692));$$

$$H4 = \tanh(.5*(-0.0032*Vc - 26.3692*fz - 5.8384*ap + 8.6572));$$

$$H5 = \tanh(.5*(0.0244*Vc - 11.9620*fz - 1.5371*ap - 1.9016));$$

$$H6 = \tanh(.5*(-0.0150*Vc - 19.2834*fz + 5.2627*ap + 3.3467));$$

$$H7 = \tanh(.5*(0.0037*Vc + 7.9409*fz - 0.7662*ap - 1.6299));$$

$$H8 = \tanh(.5*(-0.0305*Vc - 25.5033*fz + 2.2747*ap + 8.6827));$$

$$H9 = \tanh(.5*(-0.0044*Vc - 2.9272*fz + 8.8837*ap - 5.5468));$$

$$H10 = \tanh(.5*(0.0057*Vc + 1.7575*fz - 3.7961*ap + 0.6620));$$

$$H11 = \tanh(.5*(0.0568*Vc - 7.6190*fz - 0.5312*ap - 7.3135));$$

$$H12 = \tanh(.5*(0.0058*Vc - 11.0571*fz + 1.9396*ap + 0.5716));$$

$$H13 = \tanh(.5*(0.0239*Vc + 43.0389*fz + 1.1788*ap - 10.7053));$$

$$H14 = \tanh(.5*(0.0069*Vc - 4.7820*fz - 0.0075*ap - 1.7569));$$

$$H15 = \tanh(.5*(0.0176*Vc + 13.3070*fz + 6.4884*ap - 10.0151));$$

$$H16 = \tanh(.5*(-0.0235*Vc + 1.1811*fz - 5.6303*ap + 8.1126));$$

$$H17 = \tanh(.5*(-0.0330*Vc + 5.9635*fz + 0.2182*ap + 3.1625));$$

$$H18 = \tanh(.5*(0.0188*Vc - 11.6521*fz - 1.5559*ap - 0.1282));$$

$$H19 = \tanh(.5*(0.0150*Vc - 33.6384*fz + 1.4115*ap + 0.8512));$$

$$H20 = \tanh(.5*(0.0177*Vc + 9.2702*fz - 8.5153*ap + 2.2331));$$

La somme des sorties des 20 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle mathématique de la rugosité de surface (Ra) équation (IV.5).

$$\begin{aligned} Ra = & -0.3243*H1 - 2.4792*H2 + 3.0207*H3 - 0.5636*H4 - 2.4757*H5 - 1.9827*H6 - \\ & 1.5852*H7 + 0.8054*H8 + 1.9254*H9 + 2.1297*H10 - 0.4609*H11 - 2.7965*H12 + \\ & 0.5906*H13 + 9.0251*H14 + 1.0775*H15 + 2.0931*H16 + 0.3115*H17 + \\ & 4.6130*H18 + 0.2097*H19 + 2.3013*H20 + 6.7853; \dots \dots \dots (VI.9) \end{aligned}$$

Le tableau (VI.2) présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage validation).

Tableau IV.2- R^2 et $RMSE$ du modèle de la rugosité de surface (Ra).

Ra	<i>Apprentissage</i>	<i>Validation</i>
R^2	99.89	99.98
<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	0.0134	0.0030
<i>Nombre des essais</i>	25	2

La figure (VI.10) présente le graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs de la rugosité de surface (Ra) s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de la rugosité de surface est adéquat. Les coefficients de corrélations

pour l'apprentissage et pour la validation sont de l'ordre de 99,89% et 99,98% respectivement.

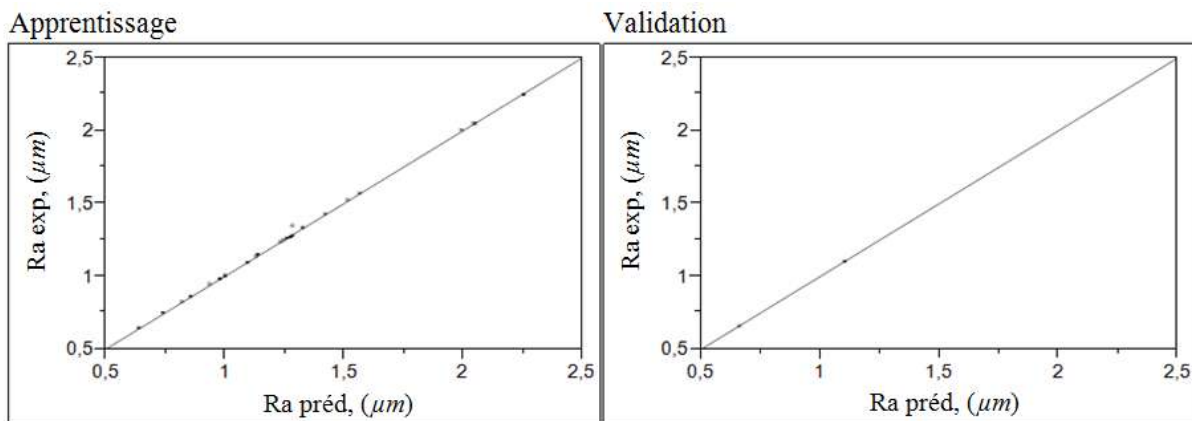


Fig. IV.10- Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (Ra).

La figure (IV.11) montre la rugosité de surface (Ra) en fonction des valeurs moyenne des paramètres d'entrée la vitesse de coupe (Vc), l'avance par dent (fz) et profondeur de passe (ap). D'après l'allure des trois courbes, on remarque que (fz) est le paramètre le plus influent sur (Ra).

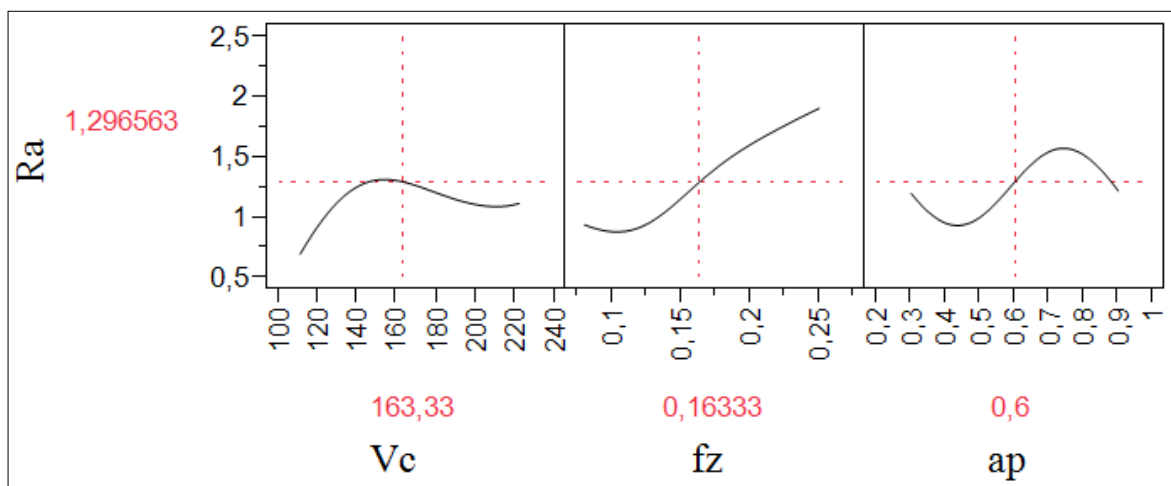


Fig. IV.11- Graphique de profileur de prévision pour (Ra).

VI.4.2- Modélisation de l'effort de coupe (Fc) par (ANN)

Concernant la modélisation de l'effort de coupe (Fc), pour les 27 essais réalisés, 22 parmi eux ont été utilisés pour l'apprentissage du réseau et 5 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. La structure que nous avons adoptée

dans ce cas est 3-7-1 (Figure VI.12), car elle a donnée de bons résultats par rapport à d'autres structures testées. Cette dernière est composée d'une couche d'entrée de 3 nœuds (paramètres d'entrée), une couche cachée de 7 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une couche de sortie de 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire.

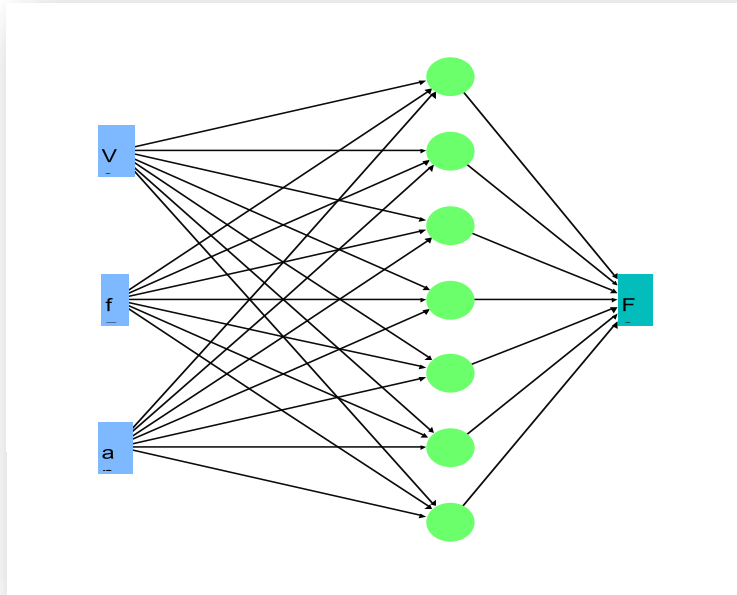


Fig. IV.12- Structure ANN pour le modèle de l'effort de coupe (F_c).

Les équations H_1 à H_7 suivante, présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée, dans ce cas là elles sont au nombre de 7. Elles sont obtenues par la méthode du réseau de neurones afin d'établir le modèle mathématique pour l'effort de coupe.

$$H1 = \tanh(.5*(-0.0290*V_c - 11.2628*f_z - 2.8100*ap + 10.2050));$$

$$H2 = \tanh(.5*(-0.0137*V_c - 4.4926*f_z + 0.4717*ap + 3.3125));$$

$$H3 = \tanh(.5*(0.0197*V_c - 47.4466*f_z + 15.9063*ap - 3.6265));$$

$$H4 = \tanh(.5*(-0.0263*V_c + 12.7128*f_z + 2.8216*ap - 1.5496));$$

$$H5 = \tanh(.5*(-0.1176*V_c + 113.2821*f_z - 14.8548*ap + 13.9239));$$

$$H6 = \tanh(.5*(-0.0340*V_c + -9.8483*f_z - 46.7110*ap + 33.7219));$$

$$H7 = \tanh(.5*(-0.0059*V_c - 1.2023*f_z + 1.5626*ap + 0.3646));$$

La somme des sorties des 7 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle mathématique de l'effort de coupe (F_c) équation (IV.6).

$$F_c = -124.903 * H1 + 61.4833 * H2 - 6.2163 * H3 + 248.488 * H4 + 22.6764 * H5 - 34.6036 * H6 + 244.4946 * H7 + 682.0861; \dots\dots\dots (VI.10)$$

Les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour l'apprentissage et la validation sont présentés dans le tableau (VI.3).

Tableau IV.3- R^2 et RMSE du modèle de l'effort de coupe (F_c).

F_c	Apprentissage	Validation
R^2	99.45	99.11
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	10.3649	23.7640
Nombre des essais	22	5

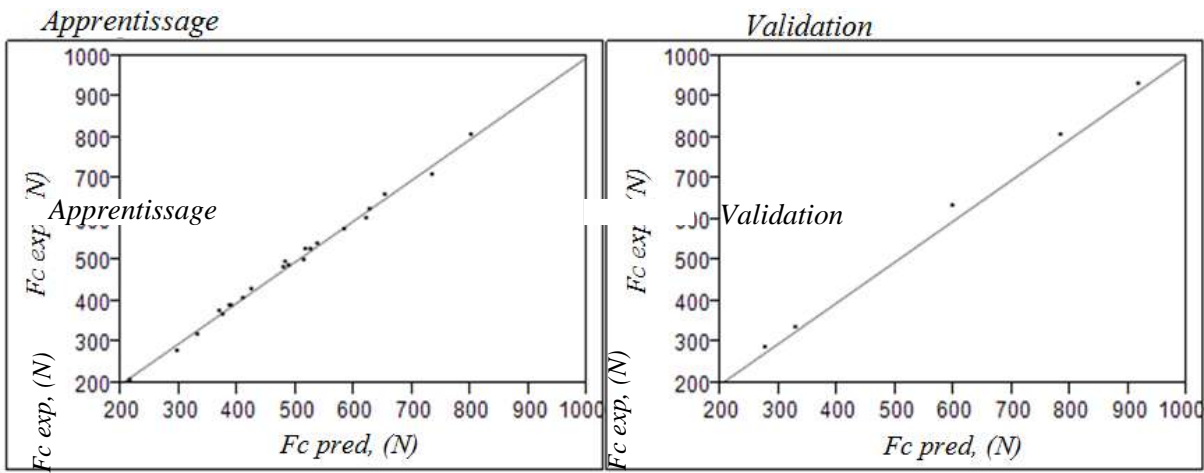


Fig. IV.13- Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (F_c).

Le graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites dans les deux cas (apprentissage et validation) sont présentés sur la figure (VI.13). Les valeurs de l'effort de coupe (F_c) s'alignent sur une droite, ce qui veut dire que le modèle mathématique de l'effort de coupe est approprié. Les coefficients de corrélations pour l'apprentissage et pour la validation sont successivement de l'ordre de 99,45% et 99,11%, ce qui représente un bon résultat.

La figure (IV.14) illustre l'effort de coupe (F_c) en fonction des valeurs moyenne des paramètres d'entrée (V_c , f_z et ap). D'après l'allure des trois courbes, on constate que (F_c) est influencé beaucoup plus par (ap) que par les deux autres paramètres d'entrée.

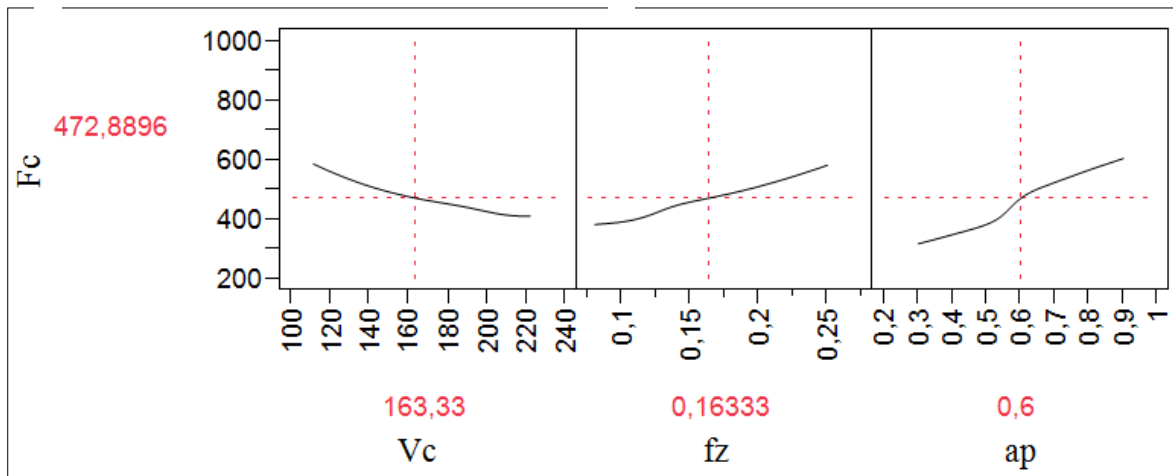


Fig. IV.14- Graphique de profil de prévision pour (F_c).

IV.4.3- Modélisation de la pression spécifique de coupe (K_s) par (ANN)

À propos de la modélisation de la pression spécifique de coupe, 22 essais parmi les 27 effectués, ont été utilisés pour l'apprentissage du réseau de neurones et 5 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. La structure favorisée pour (K_s) est 3-8-1 parce qu'elle a donné le meilleur résultat parmi plusieurs autres architectures essayées (Figure IV.15). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée de 3 nœuds (qui représentent les paramètres d'entrée), une couche cachée de 8 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une couche de sortie de 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire.

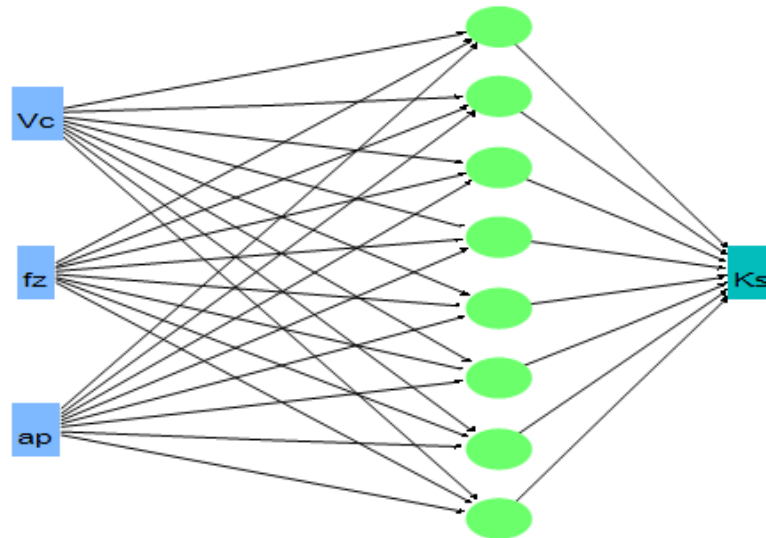


Fig. IV.15- Structure (ANN) pour le modèle de la pression spécifique de coupe (K_s).

Les équations suivantes sont obtenues par la méthode des (ANN) pour déterminer le modèle de la pression spécifique de coupe. H_1 à H_8 sont les sorties de chaque neurone de la couche cachée, (8 neurones dans ce cas).

$$H1 = \tanh(.5*(-0.0122*Vc - 17.1341*fz - 1.3978*ap + 4.1778));$$

$$H2 = \tanh(.5*(0.0139*Vc + 2.7674*fz + 5.6591*ap - 4.039));$$

$$H3 = \tanh(.5*(-0.0079*Vc + -24.3185*fz - 0.0056*ap + 3.8985));$$

$$H4 = \tanh(.5*(0.0114*Vc + 2.5059*fz + 2.4935*ap - 3.0733));$$

$$H5 = \tanh(.5*(-0.0143*Vc - 0.4578*fz + 4.1187*ap - 0.2328));$$

$$H6 = \tanh(.5*(-0.00046*Vc + 5.3776*fz - 5.2352*ap + 1.9763));$$

$$H7 = \tanh(.5*(0.0284*Vc - 2.6539*fz + 0.1516*ap - 3.3741));$$

$$H8 = \tanh(.5*(-0.0282*Vc - 35.5756*fz - 3.5711*ap + 10.7999));$$

Le modèle mathématique de la pression spécifique de coupe (K_s) est obtenu par la somme des sorties des 8 neurones de la couche cachée, multiplié par une fonction de transfert linéaire.

$$K_s = 15757.1596*H1 - 5430.5725*H2 + 1492.7916*H3 + 13551.2836*H4 - 2127.7879*H5 + 3082.265*H6 - 4222.7059*H7 - 4601.316*H8 + 12895.1006; \dots (VI.11)$$

Le tableau (VI.4) expose les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation):

Tableau IV.4- R^2 et *RMSE* du modèle de la pression spécifique de coupe (*Ks*).

<i>Ks</i>	<i>Apprentissage</i>	<i>Validation</i>
R^2	99.61	99.32
<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	185.0148	166.4155
<i>Nombre des essais</i>	22	5

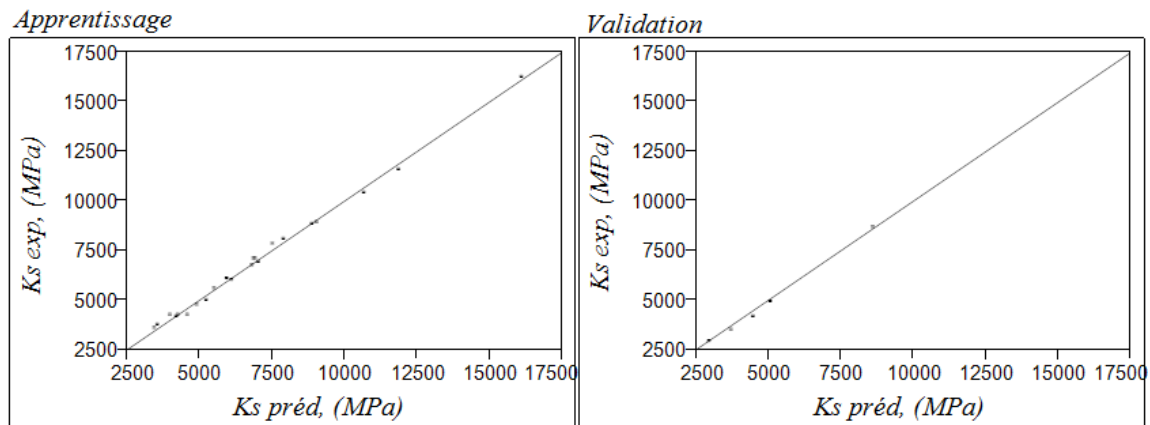


Fig. IV.16- Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (*Ks*).

Le graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour l'apprentissage et la validation de la pression spécifique de coupe (*Ks*) est illustré sur la figure (IV.16). Les valeurs de (*Ks*) sont presque confondues avec la courbe de tendance qui est une droite. Ce qui suppose que le modèle mathématique de (*Ks*) est conforme. La précision de ce modèle est certifiée par les coefficients de corrélations de l'apprentissage et la validation qui sont 99,61% et 99,32% successivement.

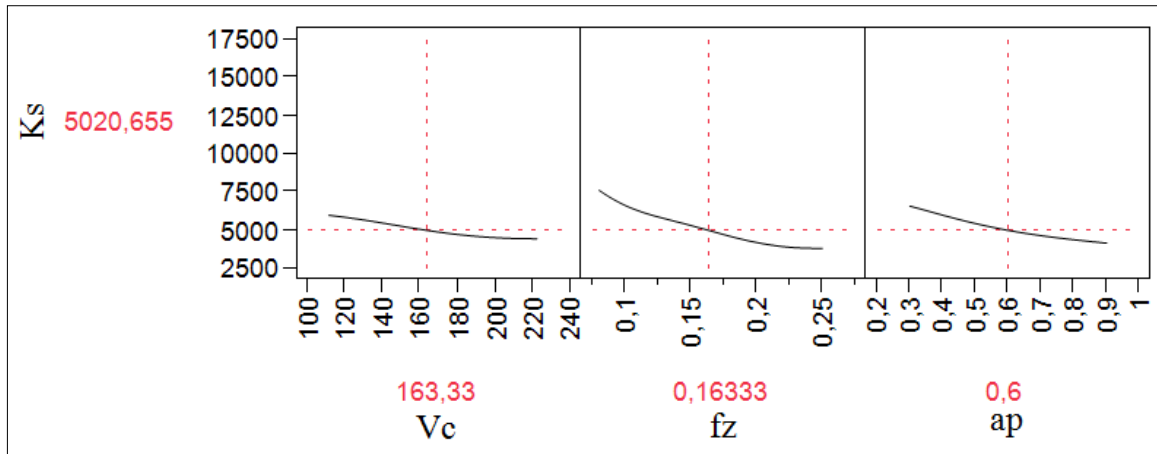


Fig. IV.17- Graphique de profil de prévision pour (K_s).

La figure (IV.17) présente la pression spécifique de coupe (K_s) en fonction des valeurs moyennes des paramètres d'entrée (V_c , f_z et ap). D'après l'allure des trois courbes, on distingue que (K_s) est influencé en premier lieu par (f_z), puis par (ap).

IV.4.4- Modélisation de la puissance de coupe (P_c) par (ANN)

Au sujet de la modélisation de la puissance de coupe (P_c), on a aussi 22 essais sur 27 qui ont été adoptés pour l'apprentissage du réseau de neurone artificiel et 5 essais ont été choisis aléatoirement pour vérifier l'efficacité du réseau. L'architecture sélectionnée parmi plusieurs autres structures du réseau qui ont été essayées est 3-6-1, à cause des meilleurs résultats qu'elle a donnés (Figure IV.18). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée de 3 nœuds (nombre des paramètres d'entrée), une couche cachée de 6 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une couche de sortie de 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire.

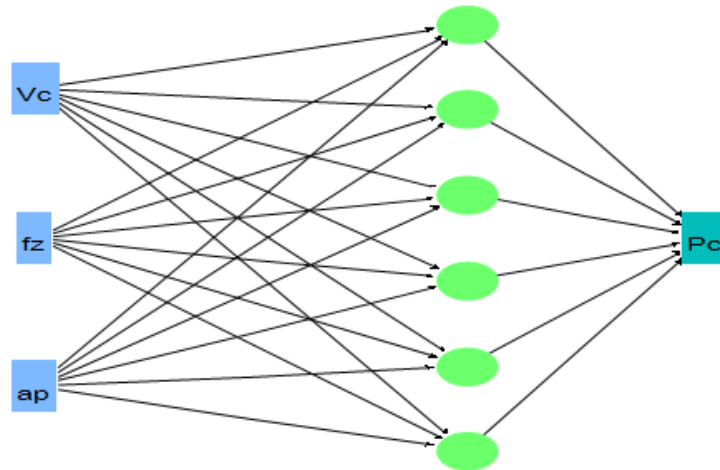


Fig. IV.18 Structure ANN pour le modèle de la puissance de coupe (P_c).

Les équations ci-après sont obtenues par la méthode du réseau de neurones artificiels afin d'établir le modèle mathématique de la puissance de coupe (P_c). H_1 à H_6 présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée qui sont au nombre de 6.

$$H1 = \tanh(.5*(-0.0195*V_c + 12.4708*f_z + 12.8082*ap - 6.055));$$

$$H2 = \tanh(.5*(-0.0601*V_c + 20.5159*f_z - 9.3336*ap + 13.6022));$$

$$H3 = \tanh(.5*(0.0194*V_c - 0.5384*f_z + 4.259*ap - 6.3576));$$

$$H4 = \tanh(.5*(-0.0103*V_c - 10.8809*f_z + 5.3544*ap + 3.0932));$$

$$H5 = \tanh(.5*(-0.0051*V_c - 25.4314*f_z + 0.5538*ap + 2.1803));$$

$$H6 = \tanh(.5*(0.0216*V_c + 33.9629*f_z - 2.0817*ap - 9.7021));$$

La somme des sorties des 6 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle mathématique de la puissance de coupe (P_c) équation (IV.6).

$$P_c = -37.7964*H1 + 255.3022*H2 + 943.2793*H3 + 763.6655*H4 - 214.9409*H5 + 322.5205*H6 + 915.3107; \dots \dots \dots (IV.12)$$

Le tableau (VI.5) présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour l'apprentissage et la validation de la puissance decoupe:

Tableau IV.5- R^2 et RMSE du modèle de la puissance de coupe (P_c).

P_c	Apprentissage	Validation
R^2	99.31	99.50
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	40.2133	18.1690
Nombre des essais	22	5

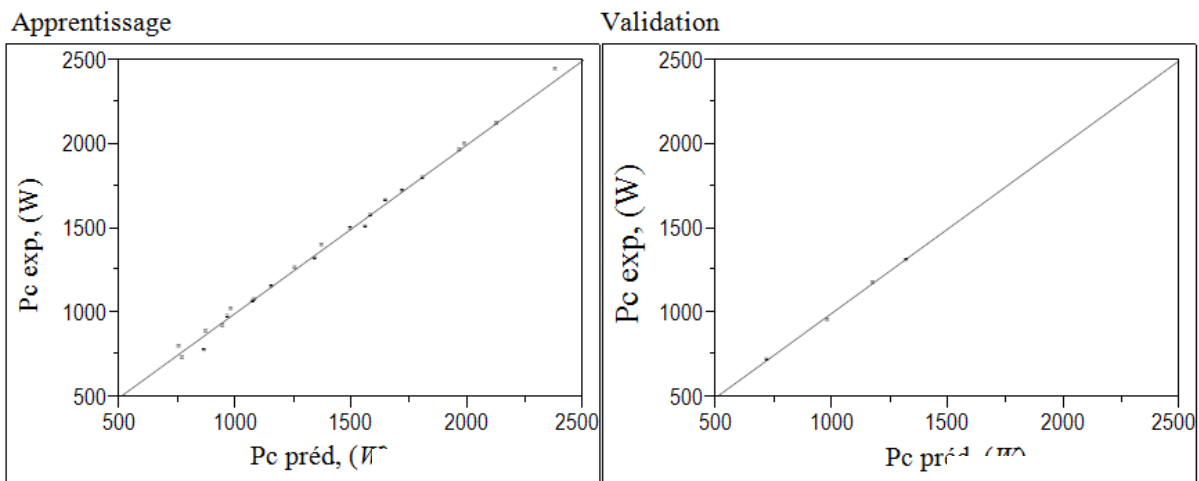


Fig. IV.19- Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (P_c).

La figure (VI.19) expose le graphique des valeurs expérimentales de la puissance de coupe (P_c) en fonction des valeurs prédites dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs expérimentales de (P_c) se trouvent approximativement confondues avec la droite qui représente les valeurs souhaitées. Ce qui implique que le modèle mathématique de (P_c) est adéquat. Les coefficients de corrélations (R^2) de l'apprentissage et la validation qui sont successivement 99,31% et 99,50% certifient la précision du modèle.

La puissance de coupe (P_c) en fonction des valeurs moyenne des paramètres de coupe (V_c , f_z et ap) est présentée sur (la figure IV.20). D'après l'allure de ces courbes, on distingue que (ap) est le paramètre le plus influent sur (P_c), suivi par les deux autres.

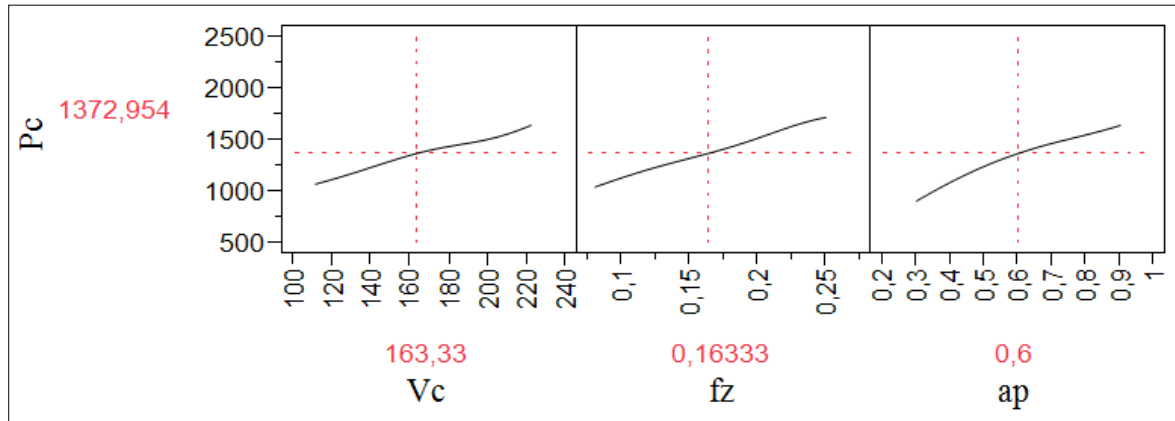


Fig. IV.20- Graphique de profileur de prévision pour (P_c).

IV.4.5- Modélisation de la quantité du copeau enlevé (QCE) par (ANN).

Seulement 18 essais sur les 27 en totalité ont servis pour l'apprentissage du réseau de neurones artificiels lors de la modélisation de la quantité du copeau enlevé (QCE), tandis que les 9 essais restant ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. La structure qui a donnée le résultat le plus distinguée entre Plusieurs architectures du réseau qui ont été expérimentées est 3-10-1. Cette dernière est représentée sur la Figure (IV.21). Elle est composée d'une couche d'entrée de 3 nœuds (paramètres d'entrée), une couche cachée de 10 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une couche de sortie de 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire.

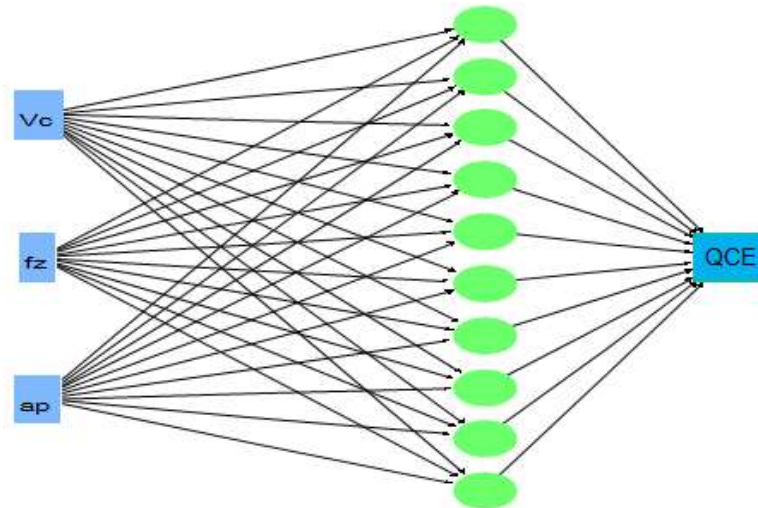


Fig. IV.21 Structure ANN pour le modèle de la quantité du copeau enlevé (*QCE*).

La méthode des (ANN) nous a aidés de tirer les équations suivantes. Ces dernières vont permettre d'obtenir le modèle mathématique de la quantité du copeau enlevé. H_1 à H_{10} présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée. Dans ce cas là, elles sont 10 neurones.

$$\begin{aligned}
 H1 &= \tanh(.5*(0.0388*Vc - 15.9245*fz + 6.0825*ap - 6.5348)); \\
 H2 &= \tanh(.5*(-0.0192*Vc - 15.4096*fz + 2.1204*ap + 5.3449)); \\
 H3 &= \tanh(.5*(0.0005*Vc - 16.4672*fz - 0.7198*ap + 3.2313)); \\
 H4 &= \tanh(.5*(0.0135*Vc + 7.943*fz + 7.2542*ap - 7.211)); \\
 H5 &= \tanh(.5*(-0.0053*Vc - 4.8975*fz - 3.9498*ap + 5.5448)); \\
 H6 &= \tanh(.5*(-0.0008*Vc + 1.3329*fz - 0.9248*ap + 0.4733)); \\
 H7 &= \tanh(.5*(0.01645*Vc - 13.8872*fz + 1.0091*ap + 1.229)); \\
 H8 &= \tanh(.5*(-0.0111*Vc - 5.6591*fz + 11.7795*ap - 4.4897)); \\
 H9 &= \tanh(.5*(-0.0134*Vc - 8.7246*fz - 11.2895*ap + 9.1718)); \\
 H10 &= \tanh(.5*(0.0085*Vc - 8.4589*fz + 2.8657*ap - 1.745));
 \end{aligned}$$

La somme des sorties des 10 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de la quantité du copeau enlevé (*QCE*).

$$QCE = 1494.6185 * H1 - 9300.2613 * H2 + 8305.2347 * H3 - 42013.2273 * H4 - 75996.6232 * H5 + 190920.0048 * H6 + 10034.1925 * H7 + 3242.371 * H8 - 39695.8979 * H9 + 10879.0921 * H10 + 55716.6056 ; \dots \dots \dots (IV.13)$$

Le tableau (IV.6) présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour l'apprentissage et la validation de la quantité de copeau enlevé:

Tableau IV.6- R² et RMSE du modèle du volume du copeau enlevé (QCE).

QCE	Apprentissage	Validation
R ²	99.99	99.23
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	110.7791	1005.8861
Nombre des essais	18	9

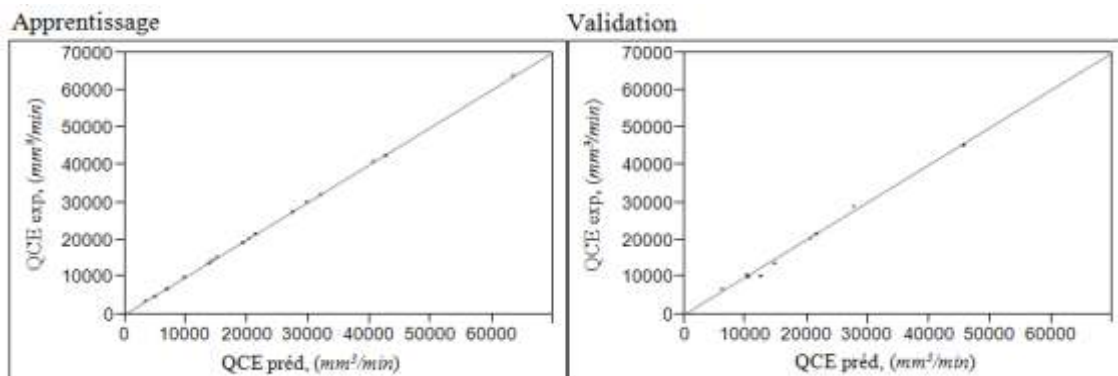


Figure VI.22 Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour (QCE).

Le graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites pour l'apprentissage et la validation de la quantité du copeau enlevé (QCE) est présenté sur la figure (VI.22). On remarque que les valeurs expérimentales de la (QCE) sont pratiquement confondues avec la droite qui représente les valeurs prédites. Ce qui suppose que le modèle mathématique de la (QCE) est conforme. Les coefficients de

corrélations de l'apprentissage et de la validation sont successivement 99,99% et 99,23%.

La quantité du copeau enlevé (QCE) en fonction des valeurs moyenne des paramètres de coupe (Vc , fz et ap) est illustrée sur (la figure IV.23). L'allure de ces courbes, montre que (fz et ap) sont les paramètres les plus influent sur (QCE), en dernier lieu vient l'effet de Vc .

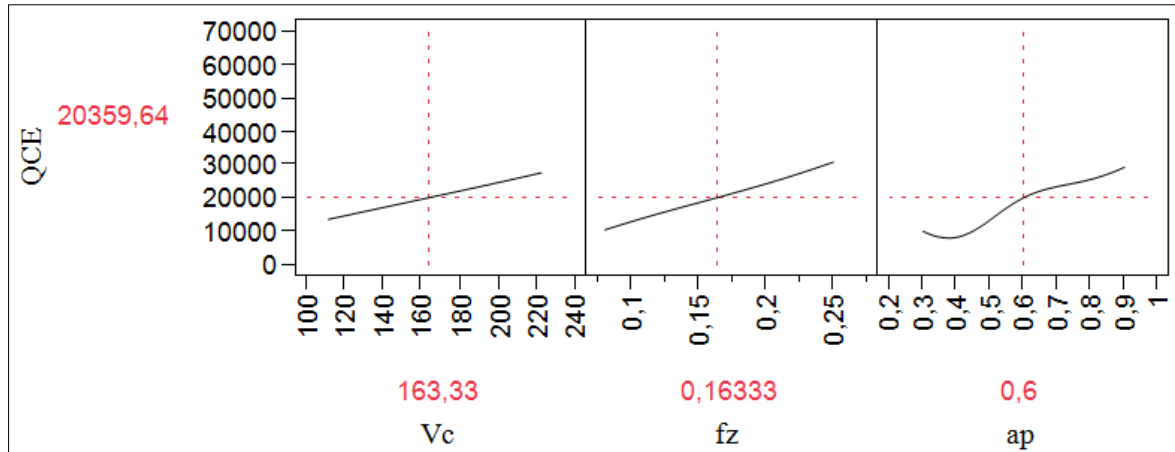


Fig. VI.23- Graphique de profil de prévision pour (QCE)

VI.5- Comparaison entre les modèles (ANN) et (RMS) à partir de R^2

La comparaison entre les valeurs expérimentales pour la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fc), la pression spécifique de coupe (Ks), la puissance de coupe (Pc) et la quantité du copeau enlevé (QCE) avec ceux prédites par les modèles pour le plan de Taguchi 27 essais obtenus par la Méthodologie de Surface de Réponse (RMS) et par les réseaux de neurone artificiels (ANN) est présentée dans le tableau (IV.7). Le coefficient de corrélation du modèle avec (ANN) est donné par la relation:

$$R^2 = \frac{R^2_{aprent} + R^2_{valid}}{2} \quad (IV.14)$$

Tableau VI.7 Comparaison entre les modèles (*RMS*) et (*ANN*) par R^2 .

Modèle	Coefficient de corrélation R^2			
	RMS	ANN Apprentissage	ANN Validation	ANN Modèle
$R_a = f(V_c, f_z, a_p)$	79,77	99,89	99,98	99,93
$F_c = f(V_c, f_z, a_p)$	98,45	99,45	99,11	99,28
$K_s = f(V_c, f_z, a_p)$	96,65	99,61	99,32	99,46
$P_c = f(V_c, f_z, a_p)$	98,34	99,31	99,50	99,40
$QCE = f(V_c, f_z, a_p)$	99,52	99,99	99,23	99,61

Le tableau (VI.7) récapitule les résultats de la modélisation par régression multiple et par réseau de neurones artificiel des paramètres technologiques. En se rapportant aux coefficients de corrélation (R^2), les résultats s'avèrent généralement satisfaisants. Ainsi, les modèles proposés peuvent être employés efficacement pour prédire la rugosité de surface et les efforts de coupe générés par le processus de fraisage de face, de même la pression spécifique de coupe, la puissance de coupe et la quantité de copeau enlevé. Cependant, il est à noter que les modèles (*ANN*) produisent des résultats meilleurs comparés à ceux de la régression multiple. Concernant la rugosité de surface, le tableau montre que la différence entre les coefficients de corrélation du modèle basé sur les paramètres de coupe, développé par la méthodologie de surface de réponse et celui du modèle neuronal basé seulement sur les paramètres de coupe est flagrante. Car il se trouve que le coefficient de corrélation du modèle (*RMS*) est de 79,77%. Par contre, le coefficient de corrélation avec (*ANN*) est de 99,89% pour l'apprentissage et 99,98 pour la validation, ce qui montre la robustesse du modèle (*ANN*). Pour l'effort de coupe, le coefficient de corrélation du modèle (*RMS*) est de 98,45% tandis que celui du modèle (*ANN*) est de 99,45% pour l'ensemble d'apprentissage et 99,11% pour l'ensemble de validation. Alors on distingue, qu'une petite amélioration du coefficient de corrélation du modèle neuronal de l'effort de coupe est enregistrée. Concernant la pression spécifique de coupe, la différence entre les coefficients de corrélation des deux modèles est remarquable, car on aperçoit que le coefficient de corrélation du modèle (*RMS*) est de 96,65% tandis que celui du modèle (*ANN*) est de 99,61% pour l'apprentissage et 99,32% pour la validation. À propos de la

puissance de coupe, la différence entre les coefficients de corrélation des deux modèles est minime. Elle est de l'ordre d'environ 1%, puisque le coefficient de corrélation du modèle (RMS) est de 98,34% Alors que celui du modèle (ANN) est de 99,31% pour l'apprentissage et 99,50% pour la validation. Enfin pour la quantité de copeau enlevé, la différence entre les coefficients de corrélation des deux modèles est très proche. Ceci s'apercevait à travers le coefficient de corrélation du modèle (RMS) qui est de 99,52% quand à celui du modèle (ANN) est de 99,99% pour l'apprentissage et 99,23% pour la validation.

IV.6- Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par les modèles RSM et ANN pour la rugosité de surface et l'effort de coupe

Le tableau IV.8 expose une comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux obtenus par prédiction en utilisant les modèles RSM et ANN pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort de coupe (Fc). On constate que l'erreur entre le modèle ANN et les résultats expérimentaux est comprise entre 0.0004 et 0.0253% pour (Ra) et entre 0,0001 et 0.0518% pour (Fc). Tandis que l'erreur entre les résultats expérimentaux et le modèle RMS est de son côté comprise entre 0.008 et 0.488% pour (Ra) et entre 0.0019 et 0.1415 % pour (Fc). Ce qui montre que les deux modèles donnent de bons résultats. Cependant le modèle ANN est clairement meilleur que celui RSM pour (Ra) par contre pour (Fc), le modèle RMS est celui qui donne la moindre erreur.

Tableau IV.8- Comparaison des résultats expérimentaux et prédits par (RMS) et (ANN) pour (Ra) et (Fc).

N° Essai	Rugosité de surface, Ra (μm)					Effort de coupe, Fc (N)				
	Exp-	Préd-		% erreur		Exp-	Préd-		% erreur	
		(ANN)	(RMS)	(ANN)	(RMS)		(ANN)	(RMS)	(ANN)	(RMS)
1	0,98	0,977	0,815	0,0033	0,203	390	374,317	370,717	0,0419	0,0520
2	0,64	0,638	0,780	0,0027	0,180	279	280,304	274,164	0,0047	0,0176
3	0,74	0,759	0,757	0,0253	0,023	211	215,068	245,770	0,0189	0,1415
4	1,14	1,135	1,204	0,0048	0,053	430	422,514	432,432	0,0177	0,0056
5	1,23	1,227	1,037	0,0027	0,187	340	340,881	320,774	0,0026	0,0599
6	0,86	0,849	0,826	0,0125	0,041	291	291,424	271,033	0,0015	0,0737
7	2,04	2,045	1,988	0,0022	0,026	531	530,269	524,390	0,0014	0,0126
8	1,57	1,579	1,672	0,0055	0,061	367	365,337	395,737	0,0046	0,0726
9	1,13	1,143	1,251	0,0116	0,097	318	315,720	321,982	0,0072	0,0124
10	1	0,994	0,964	0,0064	0,038	500	480,358	506,283	0,0409	0,0124
11	1	0,993	0,940	0,0067	0,064	389	388,712	399,796	0,0007	0,0270
12	0,82	0,827	0,931	0,0082	0,119	377	374,109	357,365	0,0077	0,0549
13	0,66	0,669	1,289	0,0137	0,488	576	575,266	603,691	0,0013	0,0459
14	1,27	1,279	1,132	0,0066	0,122	483	478,665	482,099	0,0091	0,0019
15	1,1	1,119	0,937	0,0168	0,174	407	429,248	418,321	0,0518	0,0271
16	2,05	2,048	2,002	0,0012	0,024	712	714,489	735,804	0,0035	0,0324
17	2	1,991	1,696	0,0044	0,179	635	665,937	597,216	0,0465	0,0633
18	1,28	1,278	1,290	0,0016	0,008	531	531,038	509,425	0,0001	0,0424
19	1,42	1,417	1,155	0,0021	0,230	625	624,603	631,405	0,0006	0,0101
20	0,94	0,940	1,141	0,0004	0,176	501	506,282	514,984	0,0104	0,0272
21	1,09	1,093	1,147	0,0025	0,050	487	486,305	458,516	0,0014	0,0621
22	1,35	1,356	1,417	0,0046	0,047	810	807,804	764,506	0,0027	0,0595
23	1,26	1,263	1,270	0,0022	0,008	603	608,876	632,979	0,0097	0,0474
24	1,33	1,329	1,089	0,0008	0,221	541	536,655	555,165	0,0081	0,0255
25	2,25	2,257	2,058	0,0032	0,093	932	929,104	936,773	0,0031	0,0051
26	1,52	1,530	1,763	0,0065	0,138	809	803,269	788,251	0,0071	0,0263
27	1,25	1,254	1,371	0,0032	0,088	661	659,367	686,422	0,0025	0,0370

IV.7- Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par les modèles RSM et ANN pour la Pression spécifique de coupe et la Puissance de coupe

D'après le tableau IV.9 qui présente une comparaison des résultats obtenus d'un côté expérimentalement et d'un autre côté par modélisation avec RSM et ANN pour la pression spécifique de coupe (K_s) et la puissance de coupe (P_c). On distingue que le modèle ANN est formellement meilleur que celui RSM. Cela suite à l'erreur enregistrée pour les paramètres (K_s) et (P_c) par le modèle ANN et RMS d'une part et les résultats expérimentaux d'autre part.

Cette erreur qui est entre 0,0019 et 0.2473% pour (K_s) et entre 0.0023 et 0.0865% pour (P_c) avec RMS. Alors qu'elle est entre 0.0011 et 0.0452% pour (K_S) et entre 0.0001 et 0.0765% pour (P_c) avec ANN. Ce qui nous permis d'affirmer que le modèle ANN est nettement meilleur que celui RSM.

Tableau IV.9- Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par (RMS) et (ANN) pour (K_s) et (P_c).

N° Essai	la pression spécifique de coupe (K_s) (MPa)					la puissance de coupe (P_c) (W)				
	Exp	Préd-		% erreur		Exp	Préd-		% erreur	
		(ANN)	(RMS)	(ANN)	(RMS)		(ANN)	(RMS)	(ANN)	(RMS)
1	16250,00	16077,15	14616,17	0,0108	0,1118	721,50	722,35	695,85	0,0012	0,0369
2	11625,00	11625,67	11836,36	0,0001	0,0179	730,05	790,44	728,39	0,0764	0,0023
3	8791,67	8668,67	9613,76	0,0142	0,0855	780,70	789,38	854,60	0,0110	0,0865
4	8958,33	9009,01	9637,28	0,0056	0,0704	795,50	799,96	783,80	0,0056	0,0149
5	7083,33	7067,96	7267,20	0,0022	0,0253	889,67	872,18	839,73	0,0200	0,0595
6	6062,50	6047,49	5623,57	0,0025	0,0781	1076,70	1059,54	998,99	0,0162	0,0778
7	7080,00	6923,93	7066,79	0,0225	0,0019	982,35	925,38	950,36	0,0616	0,0337
8	4893,33	4914,39	5157,66	0,0043	0,0512	960,32	948,30	1032,61	0,0127	0,0700
9	4240,00	4165,87	4165,38	0,0178	0,0179	1176,60	1168,52	1229,06	0,0069	0,0427
10	10416,67	10824,57	10964,59	0,0377	0,0500	925,00	913,51	942,45	0,0126	0,0185
11	8104,17	7870,37	8739,16	0,0297	0,0727	1017,88	1042,00	1067,30	0,0231	0,0463
12	7854,17	7986,39	7299,92	0,0166	0,0759	1394,90	1388,50	1323,95	0,0046	0,0536
13	6000,00	6070,00	6665,11	0,0115	0,0998	1065,60	1067,75	1119,85	0,0020	0,0484
14	5031,25	5017,42	4849,41	0,0028	0,0375	1263,85	1270,00	1268,09	0,0048	0,0033
15	4239,58	4440,49	3989,15	0,0452	0,0628	1505,90	1596,06	1557,80	0,0565	0,0333
16	4746,67	4567,19	4858,97	0,0393	0,0231	1317,20	1395,13	1387,05	0,0559	0,0504
17	4233,33	4144,53	3504,22	0,0214	0,2081	1661,58	1669,04	1561,61	0,0045	0,0640
18	3540,00	3530,26	3295,30	0,0028	0,0743	1964,70	1949,42	1888,50	0,0078	0,0403
19	8680,56	8757,26	8790,82	0,0088	0,0125	1156,25	1157,94	1135,06	0,0015	0,0187
20	6958,33	6786,51	7119,77	0,0253	0,0227	1310,95	1303,56	1352,22	0,0057	0,0305
21	6763,89	6756,57	6463,89	0,0011	0,0464	1801,90	1805,25	1739,32	0,0019	0,0360
22	5625,00	5533,64	5170,76	0,0165	0,0878	1498,50	1496,73	1401,91	0,0012	0,0689
23	4187,50	4161,72	3909,44	0,0062	0,0711	1577,85	1578,32	1642,47	0,0003	0,0393
24	3756,94	3607,51	3832,53	0,0414	0,0197	2001,70	2001,45	2062,62	0,0001	0,0295
25	4142,22	4232,96	4128,96	0,0214	0,0032	1724,20	1723,36	1769,75	0,0005	0,0257
26	3595,56	3617,94	3328,59	0,0062	0,0802	2116,88	2113,49	2036,62	0,0016	0,0394
27	2937,78	2930,40	3903,02	0,0025	0,2473	2445,70	2448,71	2493,96	0,0012	0,0194

IV.8- Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par les modèles RSM et ANN pour la quantité du copeau enlevé

En Ce qui concerne le tableau IV.10 qui expose une comparaison des résultats expérimentaux et estimés par les modèles RSM et ANN pour la quantité du copeau enlevé (*QCE*). On perçois que l'erreur enregistrée par les deux modèles est proche l'une de l'autre, d'après l'intervalle des valeurs qui est entre 0 et 0,3939 pour ANN et entre 0 et 0,3798 pour RSM. Néanmoins celle donnée par le modèle ANN est absolument meilleur que celle issue du modèle RSM.

Tableau VI.10- Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par (*RMS*) et (*ANN*) pour (*QCE*).

N° Essai	Quantité de copeau enlevé (<i>QCE</i>) (mm^3/min)				
	Exp-	Préd-		% erreur	
		(ANN)	(RMS)	(ANN)	(RMS)
1	3393,63	3384,99	5060,30	0,00255	0,32936
2	4800,00	4825,11	5001,70	0,00520	0,04033
3	6787,26	6787,12	4918,90	0,00002	0,37983
4	6787,26	6789,76	6853,93	0,00037	0,00973
5	9600,00	9697,78	9608,07	0,01008	0,00084
6	13574,52	13523,56	13499,79	0,00377	0,00554
7	10605,10	10647,89	8871,76	0,00402	0,19538
8	15000,00	15025,04	14790,23	0,00167	0,01418
9	21210,19	21265,54	23153,29	0,00260	0,08392
10	6787,26	6797,47	6787,26	0,00150	0
11	9600,00	9637,84	9600,00	0,00393	0
12	13574,52	13508,86	13574,52	0,00486	0
13	13574,52	13500,43	13574,52	0,00549	0
14	19200,00	19231,98	19200,00	0,00166	0
15	27149,04	27219,88	27149,04	0,00260	0
16	21210,19	21284,73	21210,19	0,00350	0
17	30000,00	29990,57	30000,00	0,00031	0
18	42420,38	42557,78	42420,38	0,00323	0
19	10180,89	9944,35	8514,23	0,02379	0,19575
20	14400,00	14400,00	14198,30	0,00000	0,01421
21	20361,78	20639,31	22230,15	0,01345	0,08405
22	20361,78	14607,39	20295,12	0,39394	0,00328
23	28800,00	28800,00	28791,93	0,00000	0,00028
24	40723,57	40594,61	40798,30	0,00318	0,00183
25	31815,29	31332,05	33548,62	0,01542	0,05167
26	45000,00	45000,00	45209,77	0,00000	0,00464
27	63630,57	63487,34	61687,47	0,00226	0,03150

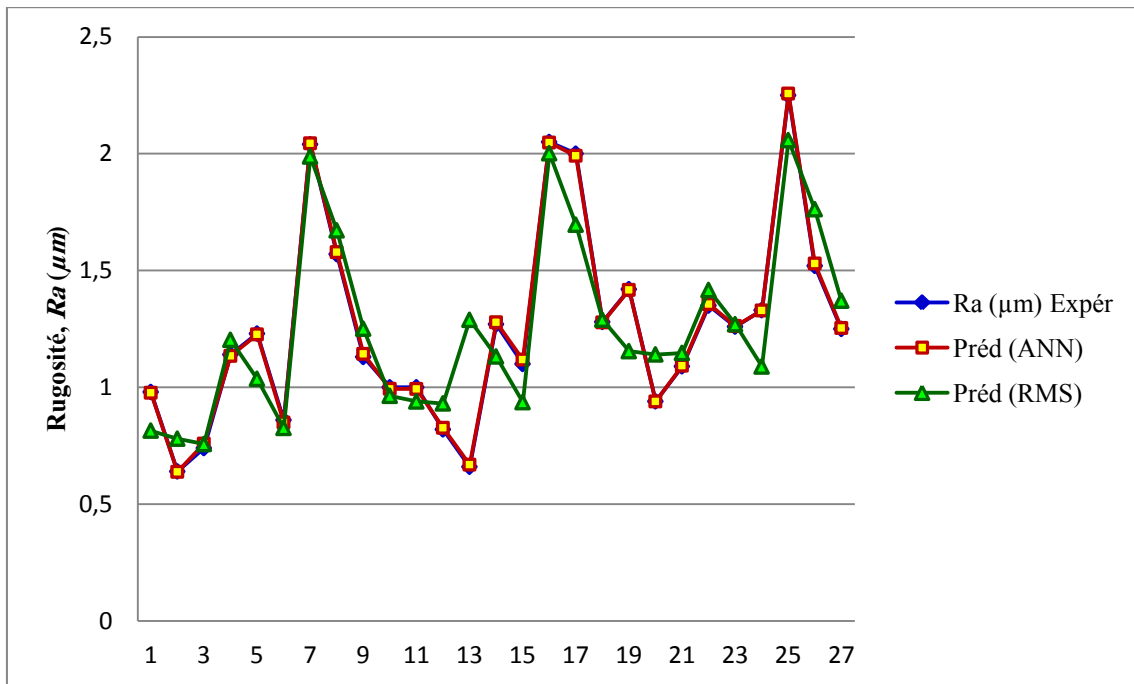


Fig. IV.24- Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra).

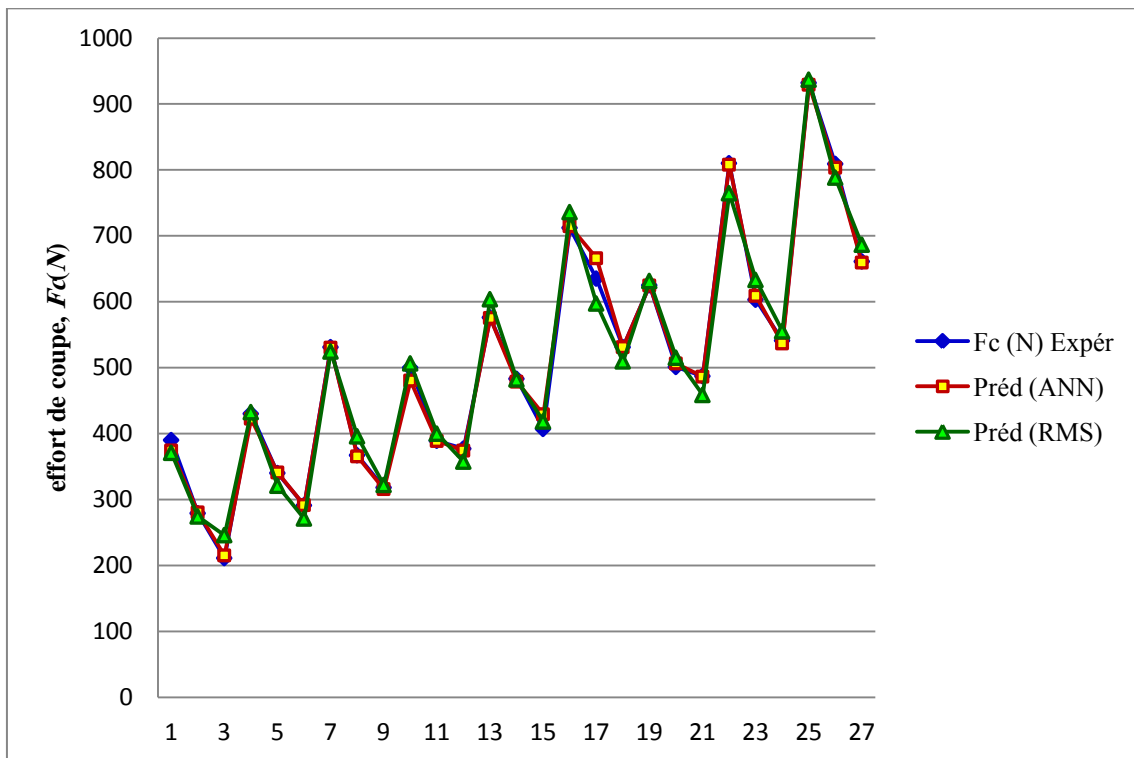


Fig. VI.25- Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour l'effort de coupe (F_c).

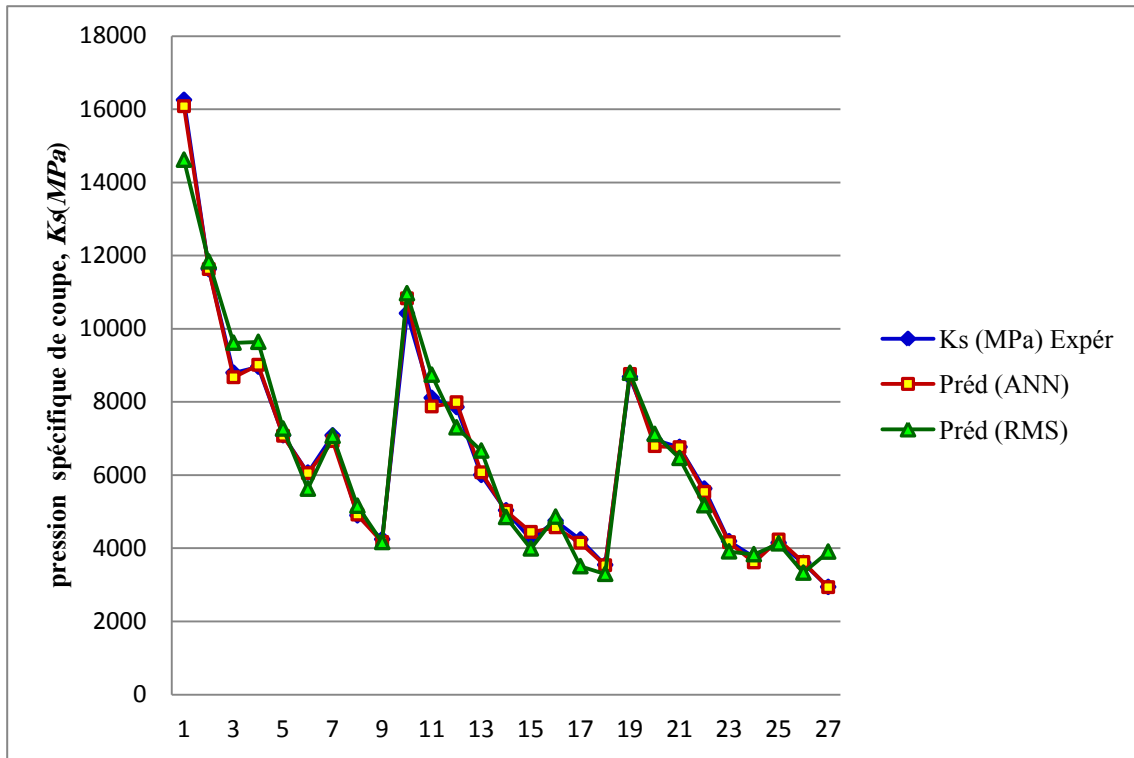


Fig. IV.26- Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la pression spécifique de Coupe (K_s).

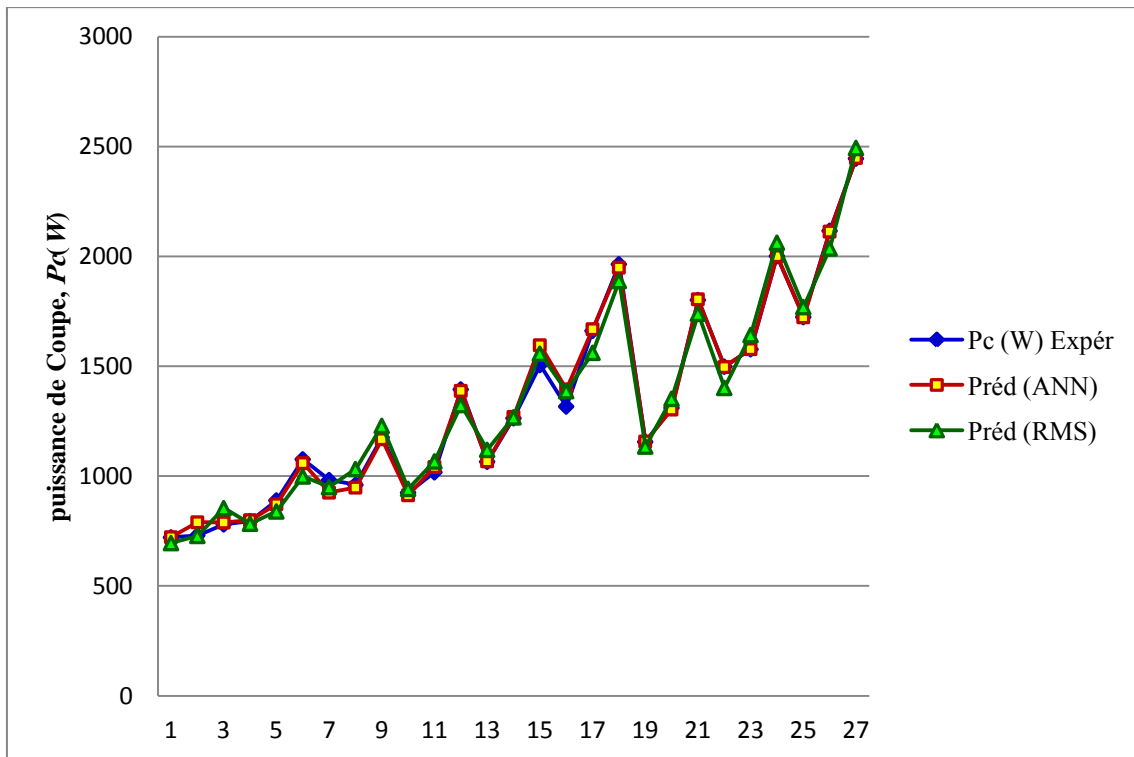


Fig. IV.27- Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la puissance de Coupe (P_c).

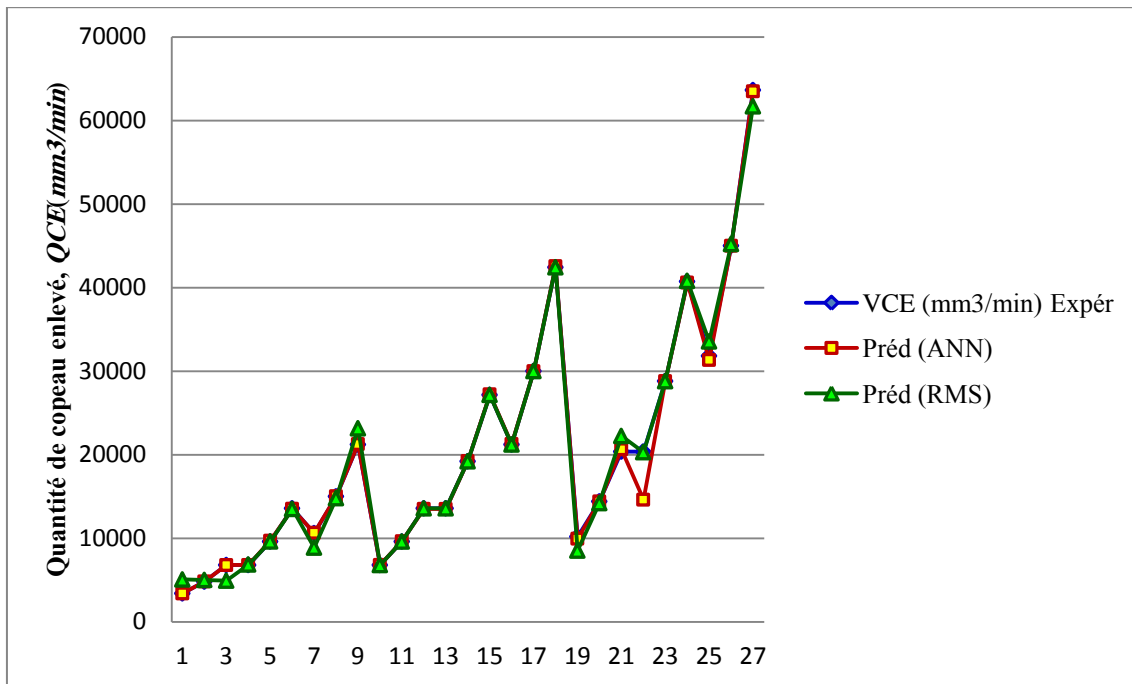


Fig.I V.28- Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la quantité de copeau enlevé (QCE).

Les figures (IV.21, IV.22, IV.23, IV.24 et VI.25), montrent que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont d'une manière générale très proche. Comme on peut aussi remarquer que les valeurs données par le modèle des réseaux de neurones artificiels sont plus proches aux valeurs expérimentales que celles données par le modèle de la méthodologie des surfaces de réponse. Pour cela on peut dire que les modèles (ANN) sont jugés les meilleurs par rapport aux modèles (RMS).

IV.8- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la technique des réseaux de neurones artificiels (ANN) pour développer des modèles de prédiction de la rugosité de surface, l'effort de coupe, la pression spécifique de coupe, la puissance de coupe et la quantité du copeau enlevé. Par la suite, nous avons procédé à la comparaison entre les modèles obtenus par (ANN) et ceux développés par la méthodologie de surface de réponse (RMS). L'étude réalisée a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Avec la technique des (ANN) on peut parvenir à obtenir des résultats adéquats avec un nombre limité d'expériences. Les modèles obtenus ont été testés par une partie du plan expérimental qui n'a été pas introduite lors de l'apprentissage du réseau.

- Une bonne prédiction ne repose pas en fait sur le nombre d'échantillons.
L'architecture du réseau peut influencer beaucoup le résultat à obtenir, qui peut être modifié à partir du nombre des couches cachées et de leurs nœuds. De même, il faut prendre en considération qu'un choix judicieux du taux d'apprentissage peut améliorer le modèle et activer le résultat.
- La comparaison des résultats expérimentaux et ceux prédits par les modèles, obtenus par la méthodologie des surface de réponse et par la méthode des réseaux de neurones artificiels montre formellement que, les modèles issus de la méthode des ANN donnent des résultats excellents par rapport aux modèles issus par RSM.

CHAPITRE V

OPTIMISATION PAR LA METHODE

TAGUCHI ET LA

FONCTION DESIRABILITE

V.1- Introduction

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques, tels que les méthodes, Taguchi, GRA, GA, PSO, DF, etc.... [72-73]. Elle permet le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus. Ce qui a généralement un impact économique direct sur la production tel que : le temps technologique d'usinage ou le coût global d'opération. L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation de différentes méthodes d'optimisation.

Deux types d'optimisation ont été utilisés dans ce chapitre:

- Optimisation mono-objectif en utilisant la méthode de Taguchi ;
- Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode de la fonction désirabilité.

V.2- Optimisation par la méthode de Taguchi

Dans le but de fabriquer des pièces de haute qualité avec une productivité maximale, un coût minimum et dans un bref délai; les paramètres de coupe devraient être correctement choisis. Le but de notre tâche est: d'optimiser les paramètres technologiques, la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe (F_c), la pression spécifique de coupe (K_s), la puissance coupe (P_c) et la quantité du copeau enlevé (QCE), lors du fraisage de face à sec de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 avec des plaquettes en carbure revêtu GC4040, en fonction de la variation des paramètres de coupe (*vitesse de coupe* (V_c), *l'avance par dent* (f_z) et *la profondeur de passe* (ap)). La matrice de Taguchi L_{27} (3^{13}) a été utilisée, les paramètres du régime de coupe (V_c , f_z et ap) sont affectés successivement aux colonnes 1, 2 et 5.

L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit (S/B). Le premier terme de ce rapport (signal), représente la variable principale à l'entrée du procédé et le second terme (bruit), représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie [74-75]. Le rapport (S/B) mesure les caractéristiques de qualité provenant des valeurs désirées. Selon le cas étudié, le rapport (S/B) qu'il soit le plus faible ou le plus élevé est le paramètre décisif du niveau optimal des paramètres du processus de coupe. Dans cette étude, La plus faible rugosité de surface, effort de

coupe, pression spécifique de coupe et puissance coupe d'une part et la plus élevée quantité de copeau enlevé d'autre part sont souhaitables. La caractéristique (S/B) la plus petite est la meilleur (*smaller-the-better*) a été utilisé pour (Ra, Fc, Ks et Pc). La caractéristique (S/B) la plus grande est la meilleur (*larger-the-better*) a été utilisé pour (QCE), tableau (V.1). Les caractéristiques de qualité (S/B), sont calculées avec les équations suivantes [47]:

- a) L'optimum est une valeur minimale (*plus petit c'est meilleur*) : la valeur cible (m) est égale à zéro, on vise la minimisation de la caractéristique de performance. La caractéristique de performance Y a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec (y). Taguchi recommande l'utilisation de la fonction représentée par l'équation (V-1):

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

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

n = nombre de mesures effectuées

- b) L'optimum est une valeur maximale (*plus grand c'est meilleur*): la valeur cible (m) est égale à l'infini, on vise la maximisation de la caractéristique de performance. Maximiser Y revient à minimiser $1/Y$ et, Taguchi recommande l'utilisation de l'équation (V-2):

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

Tableau V.1- Signal/Bruit des paramètres de sorties étudiées.

N°	S/B-Ra	S/B-Fc	S/B-Ks	S/B-Pc	S/B-QCE
1	0,17547849	-51,8212921	-84,2170673	-57,1647267	70,6132913
2	0	-53,9794001	-80,3545753	-59,3228347	76,6338912
3	-3,04576689	-55,9176003	-78,7709504	-61,2610349	80,1557164
4	-1,13809703	-52,6693691	-79,0445444	-58,0128037	76,6338912
5	3,60912129	-55,2084497	-75,563025	-60,5518842	82,6544911
6	-2,60667537	-58,1697004	-75,0024505	-63,5131349	86,1763163
7	-6,19260335	-54,5018904	-77,0006652	-59,845325	80,5102917
8	-6,23507722	-57,0495999	-73,5277747	-62,3930344	86,5308916
9	-7,04365036	-59,3883182	-72,3446679	-64,7317528	90,0527168
10	3,87640052	-48,9120841	-81,3078592	-57,2670521	73,6248247
11	0	-51,798992	-78,1741673	-60,1539601	79,6454247
12	0,53744293	-53,9967545	-76,8501046	-62,3517226	83,1672498
13	-1,79810223	-50,6295783	-77,0047536	-58,9845464	79,6454247
14	-2,07607442	-53,6789426	-74,033518	-62,0339107	85,6660246
15	-2,0074109	-55,6063462	-72,4390964	-63,9613143	89,1878498
16	-3,91799305	-51,2933213	-73,792096	-59,6482893	83,5218252
17	-6,02059991	-56,0554745	-72,5336493	-64,4104425	89,5424251
18	-3,63687176	-58,1589704	-71,1153201	-66,5139385	93,0642503
19	2,61536561	-46,4856491	-78,8814243	-57,8496836	76,6338912
20	1,72372295	-51,526827	-77,9020023	-62,8908615	82,6544911
21	-0,74852996	-53,7505792	-76,6039293	-65,1146137	86,1763163
22	1,31003098	-49,2778598	-75,653035	-60,6418943	82,6544911
23	-0,8278537	-52,1918882	-72,5464635	-63,5559227	88,675091
24	-2,47703282	-54,6639453	-71,4966955	-66,0279798	92,1969162
25	-1,06156887	-50,0485424	-72,5473171	-61,4125769	86,5308916
26	-2,14419939	-54,5018904	-70,9800652	-65,8659249	92,5514915
27	-1,93820026	-56,4040292	-69,3603788	-67,7680637	96,0733167

V.2.1- Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios (S/B) des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des trois paramètres d'usinage (V_c , f_z et ap). La moyenne des ratios (S/B) pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios (S/B) pour le même niveau du facteur divisé par le nombre des ratios pour le niveau du facteur. Les valeurs relatives du rapport (S/B) les plus grandes permettront d'identifier le ou les designs optimaux. On peut estimer l'effet de chaque facteur sur le rapport (S/B) en effectuant une analyse de la variance. On peut donc ainsi identifier les facteurs de design les plus importants. De plus on peut déterminer la modalité optimale de chaque facteur [46].

V.2.1.1- Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (R_a)

Du tableau (V-2) et de la figure (V-1), on remarque que les paramètres d'usinage (V_c , f_z et ap) présentent des effets différents sur la rugosité de surface (R_a). La plus importante influence correspond à l'avance par dent (f_z) avec un effet de 4,8139 suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec un effet de 2,1032 et en dernier lieu vient la profondeur de passe (ap) avec 1,8706 d'effet.

Tableau V.2- Moyenne des ratios S/B(R_a) pour chaque niveau des facteurs.

Préférer plus petit

Niveau	V_c	f_z	ap
1	-0,4975	0,5705	-0,6812
2	-1,6715	-0,8902	-1,3301
3	-0,3943	-4,2434	-2,5519
Δ	2,1032	4,8139	1,8706
Rang	2	1	3

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (R_a) correspond aux niveaux V_{c3} , f_{z1} et $ap1$. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (R_a) sont donc la plus grande vitesse de coupe $V_c = 222$ m/min, la plus faible avance par dent $f_z = 0,08$ mm/dent et la petite profondeur de

pas, $ap = 0,3$ mm. Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence avec des cercles (figure V.1).

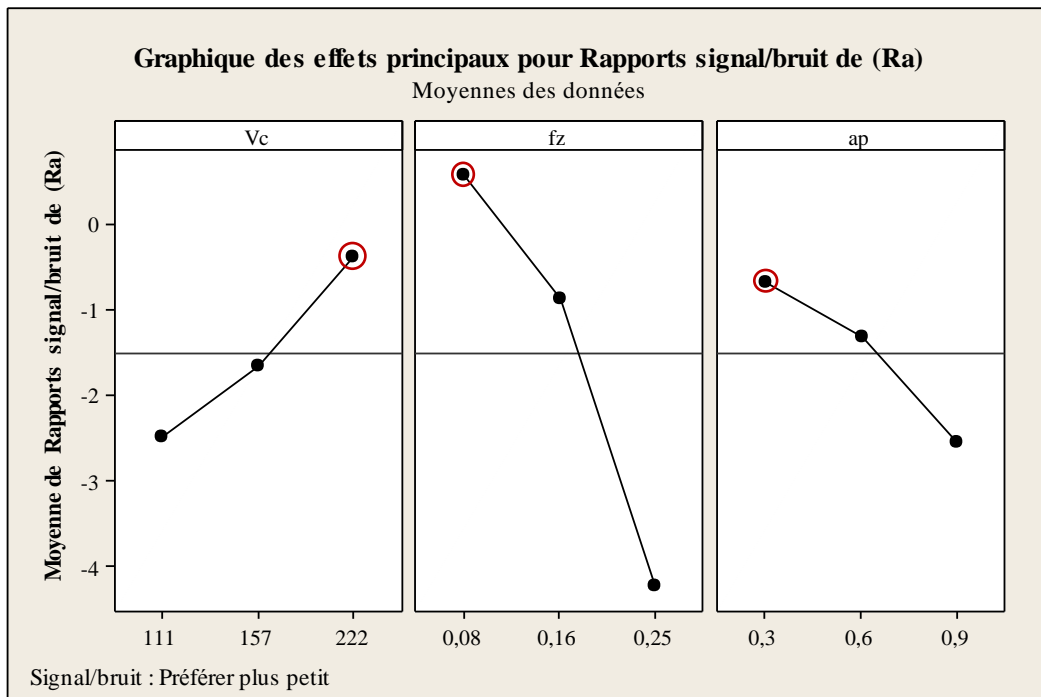


Fig. V.1- Graphique des effets principaux de V_c , f_z et ap sur la rugosité de surface (R_a).

V.2.1.2- Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe (F_c)

A partir du tableau (V.3) et de la figure (V.2), on remarque que les paramètres d'entrée (V_c , f_z et ap) montrent des effets différents sur l'effort de coupe (F_c). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe (ap) avec un effet de 5,6 suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec un effet de 3,32 et en dernier rang vient l'avance par dent (f_z) avec un effet de 3,25.

Tableau V.3- Moyenne des ratios $S/B_{(F_c)}$ pour chaque niveau des facteurs.

Préférer plus petit

Niveau	V_c	f_z	ap
1	-55,41	-52,02	-50,63
2	-53,35	-53,57	-54
3	-52,09	-55,27	-56,23
Δ	3,32	3,25	5,6
Rang	2	3	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (F_c) correspond aux niveaux $Vc3$, $fz1$ et $ap1$. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de l'effort de coupe (F_c) sont donc la plus grande vitesse de coupe $Vc = 222$ m/min, la plus faible avance par dent $fz = 0,08$ mm/dent et la petite profondeur de passe, $ap = 0,3$ mm. Les paramètres d'usinage optimaux ont été désignés par des cercles (figure V.2).

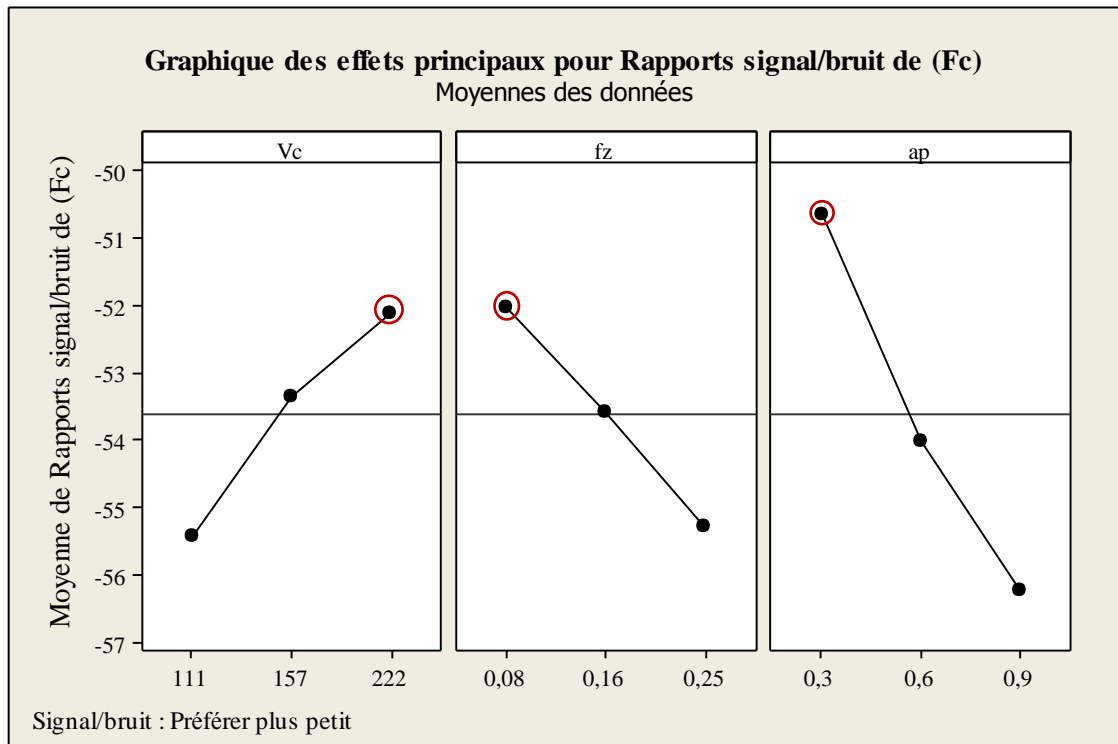


Fig. V.2- Graphique des effets principaux de Vc , fz et ap sur l'effort de coupe (F_c).

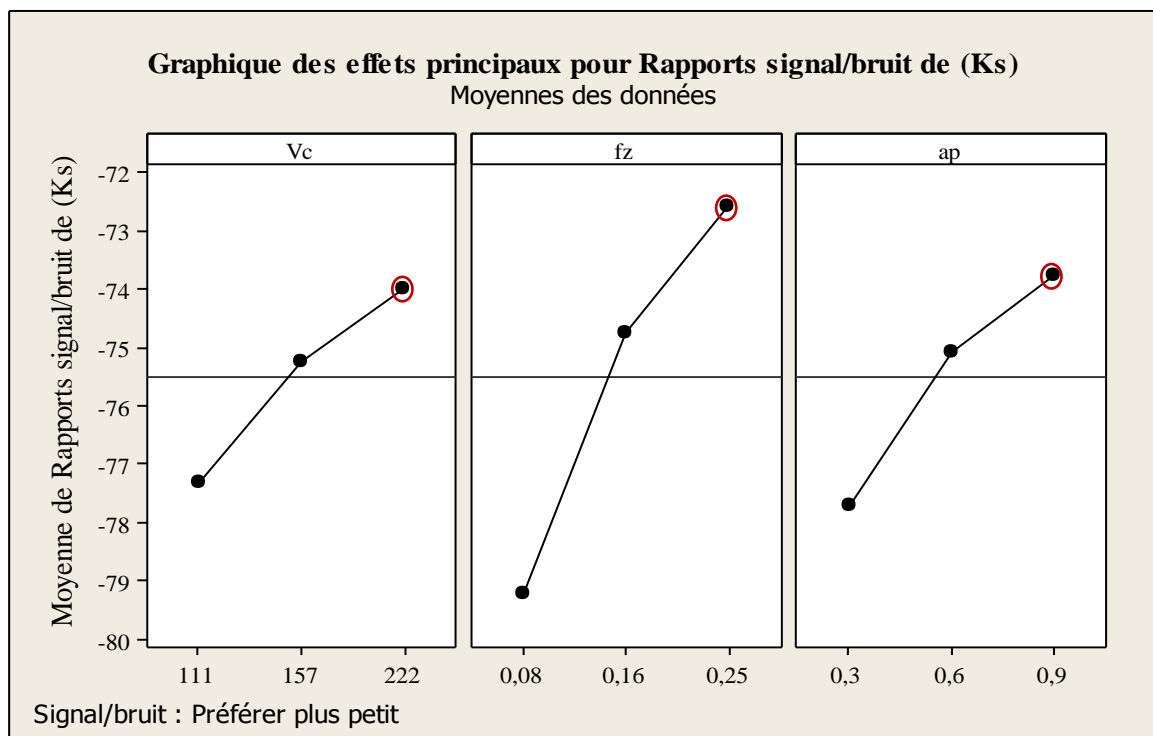
V.2.1.3- Analyse des effets principaux sur la pression de coupe spécifique (K_s)

Du tableau (V.4) et de la figure (V.3), on remarque que les paramètres d'usinage (Vc , fz et ap) dévoilent des effets différents sur la pression de coupe spécifique (K_s). L'influence la plus significative correspond à l'avance par dent (fz) avec un effet de 6,65 suivie par la profondeur de passe (ap) avec un effet de 3,94 et en fin vient la vitesse de coupe (Vc) avec 3,32 d'effet.

Tableau V.4- Moyenne des ratios $S/B_{(Ks)}$ pour chaque niveau des facteurs.*Préférer plus petit*

Niveau	Vc	fz	ap
1	-77,31	-79,23	-77,72
2	-75,25	-74,75	-75,07
3	-74	-72,58	-73,78
Δ	3,32	6,65	3,94
Rang	3	1	2

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Ks) correspond aux niveaux Vc_3 , fz_3 et ap_3 . Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (Ra) sont donc la plus grande vitesse de coupe $Vc = 222$ m/min, la plus faible avance par dent $fz = 0,25$ mm/dent et la petite profondeur de passe, $ap = 0,9$ mm. Les paramètres du régime de coupe optimaux ont été mentionnés avec des cercles (*figure V.3*).

**Fig. V.3-** Graphique des effets principaux de Vc, fz et ap sur la pression de coupe spécifique (Ks).

V. 2.1.4- Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (P_c)

Du tableau (V.5) et de la figure (V.4), on remarque que les paramètres d'usinage (V_c , f_z et ap) exposent des effets différents sur la puissance de coupe (P_c). L'influence la plus importante correspond à la profondeur de passe (ap) avec un effet de 5,6 suivie par l'avance par dent (f_z) avec un effet de 3,25 et en fin vient la vitesse de coupe (V_c) avec 2,7 d'effet.

Tableau V.5- Moyenne des ratios $S/B_{(P_c)}$ pour chaque niveau des facteurs.

Préférer plus petit

Niveau	V_c	f_z	ap
1	-60,76	-60,38	-58,98
2	-61,7	-61,92	-62,35
3	-63,46	-63,62	-64,58
Δ	2,7	3,25	5,6
Rang	3	2	1

D'après l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (P_c) correspond aux niveaux V_{c1} , f_{z1} et $ap1$. Les niveaux des paramètres prévus sous les conditions optimales de la puissance de coupe (P_c) sont donc la plus faible vitesse de coupe $V_c = 111$ m/min, la plus faible avance par dent $f_z = 0,08$ mm/dent et la plus petite profondeur de passe, $ap = 0,3$ mm. Les paramètres du régime de coupe optimaux ont été signalés avec des cercles (figure V.4).

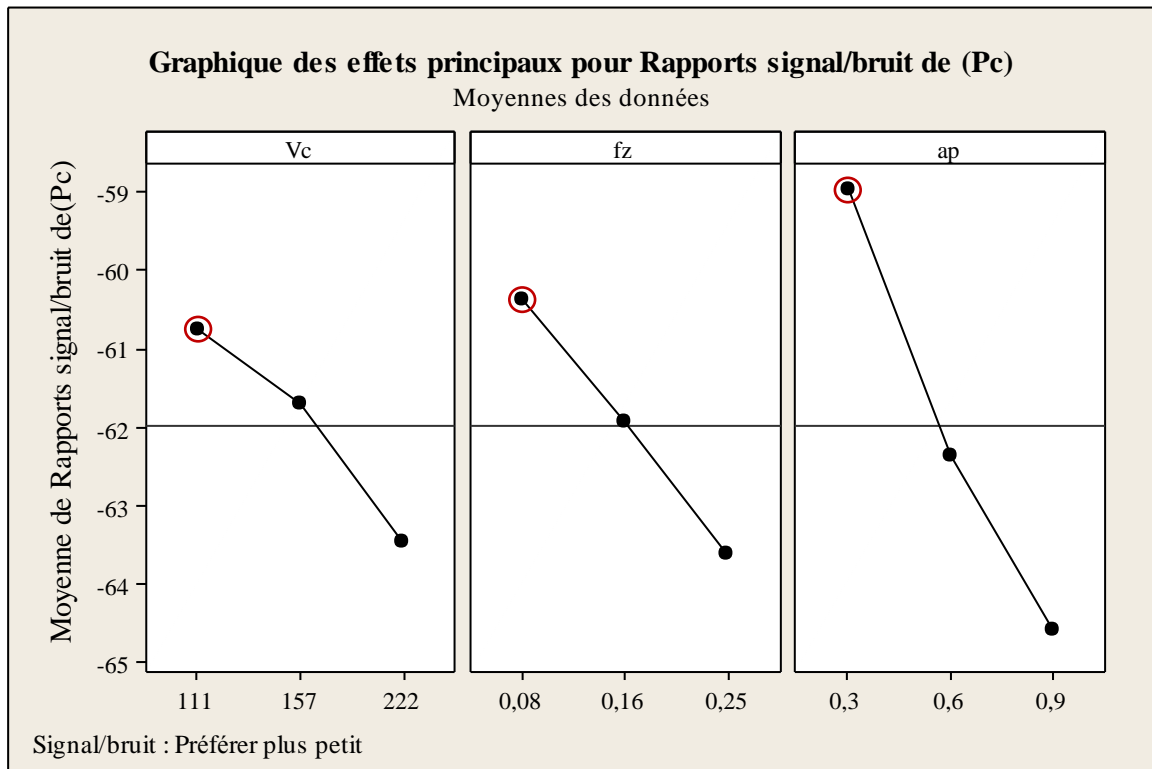


Fig. V.4- Graphique des effets principaux de Vc, fz et ap sur la puissance de coupe (Pc).

V.2.1.5- Analyse des effets principaux sur la quantité de copeau enlevé (QCE)

Du tableau (V.6) et de la figure (V.5), on remarque que les paramètres d'usinage (Vc, fz et ap) présentent des effets différents sur la quantité du copeau enlevé (QCE). L'influence majeure correspond à l'avance par dent (fz) avec un effet de 9,9 suivie par la profondeur de passe (ap) avec un effet de 9,54 et en dernier lieu vient la vitesse de coupe (Vc) avec 6,02 d'effet.

Tableau V.6- Moyenne des ratios S/B_(QCE) pour chaque niveau des facteurs.

Préférer plus grand

Niveau	Vc	fz	ap
1	81,11	78,81	78,93
2	84,12	84,83	84,95
3	87,13	88,71	88,47
Δ	6,02	9,9	9,54
Rang	3	1	2

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse de la quantité du copeau enlevé (QCE) correspond aux niveaux $Vc3$, $fz3$ et $ap3$. Les niveaux des paramètres souhaités sous les conditions optimales du (QCE) sont donc la plus grande vitesse de coupe $Vc = 222$ m/min, la plus grande avance par dent $fz = 0,25$ mm/dent et la grande profondeur de passe, $ap = 0,9$ mm. Les paramètres d'usinage optimaux ont été indiqués avec des cercles (figure V.5).

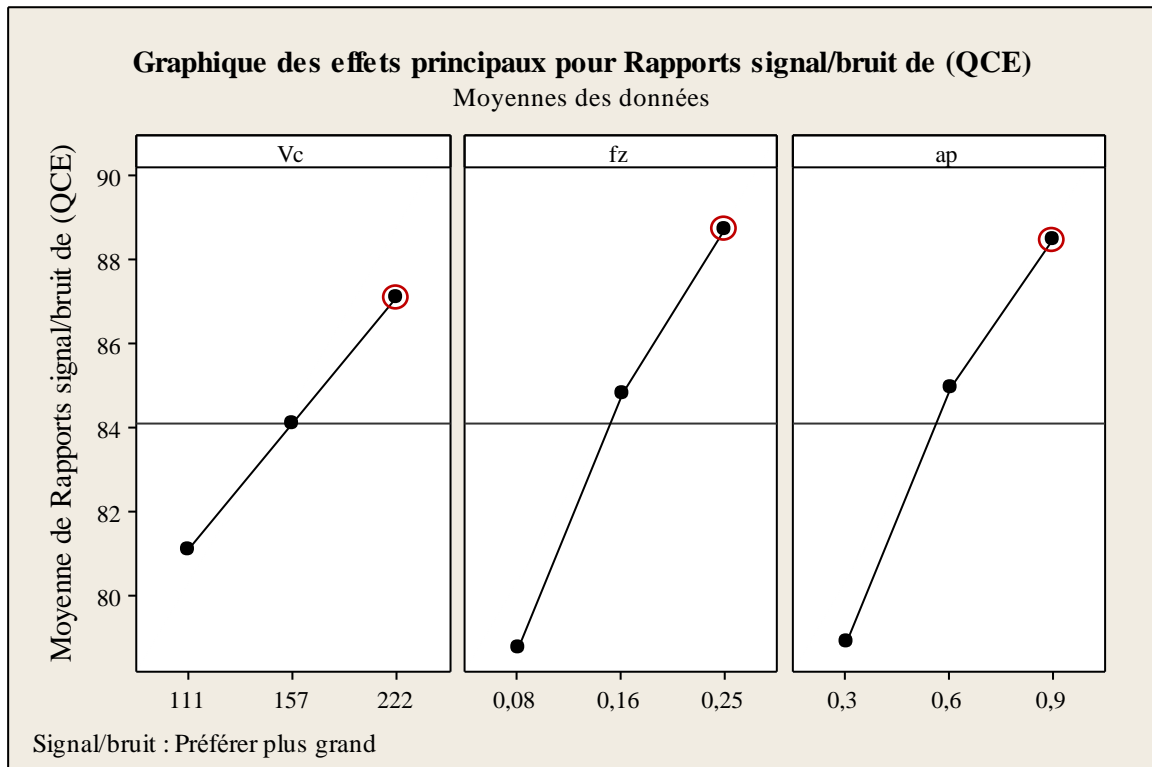


Fig. V.5- Graphique des effets principaux de Vc , fz et ap sur la quantité de copeaux enlevé (QCE).

V.3- Optimisation par la méthode de la fonction désirabilité

V.3.1- Introduction

L'approche de la fonction désirabilité est largement utilisée par les chercheurs pour l'optimisation multi-objective des réponses. L'utilisation considérable de cette approche est due en fait à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques [77-78].

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

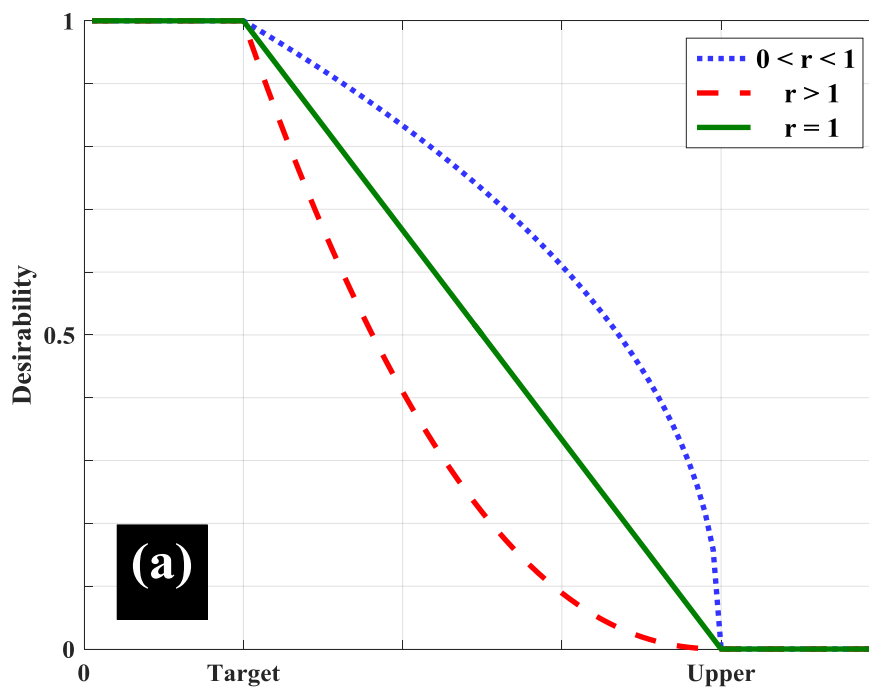
En recherchant un minimum ou un maximum, les desirabilités peuvent être calculées par les équations suivantes respectivement (V.3, V.4 et V.4).

$$Des(y) = \begin{cases} 0, & y < Low \\ \left(\frac{y - Low}{Tar - Low}\right)^w, & Low \leq y \leq Tar \\ 1, & y > Tar \end{cases} \quad (V.3)$$

$$Des(y) = \begin{cases} 1, & y < Tar \\ \left(\frac{Up - y}{Up - Tar}\right)^w, & Tar \leq y \leq Up \\ 0, & y > Up \end{cases} \quad (V.4)$$

$$Des_{comb} = (Des_1 \times Des_2 \times \dots \times Des_i \times \dots \times Des_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n Des_i\right)^{\frac{1}{n}} \quad (V.5)$$

La figure (V.6) représente la desirabilité en 2D. Elle a été mise au point à partir des équations (V.3 à V5). La figure (V.6.a) montre la minimisation de la réponse, c'est-à-dire qu'au-dessous de la cible, la réponse est un, mais au-dessus de la limite supérieure, elle est nulle. Par contre la figure (V.6.b) expose la maximisation de la réponse, (c.a.d) qu'au-dessous de la cible, la réponse est un, tandis qu'au-dessus de la limite supérieure, elle est nulle.



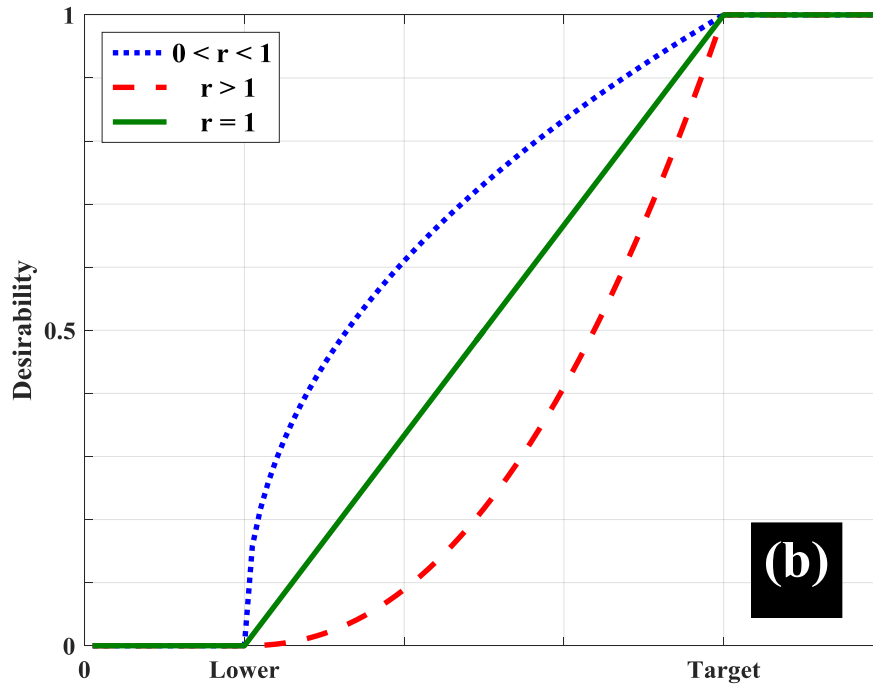


Fig. V.6- Diagramme de désirabilité 2D, (a) Minimum, (b) Maximum.

V.3.2- Cas d'optimisation étudiés

Dans notre étude, on s'est intéressé à trois cas d'optimisation qui sont: (i) Rugosité minimale, (ii) productivité maximale, (iii) compromis entre rugosité et productivité. Les tableaux (V.7, V.8 et V.9) présentent les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, les poids et l'importance affectés à chaque paramètre pour les trois cas d'optimisation. Les tableaux (V.10, V.11 et V.12), illustrent les solutions correspondantes aux trois cas cités. Pour le premier cas d'optimisation, on a donné l'importance maximale à la rugosité de surface (5+), tout en gardant la quantité de copeaux enlevé (QCE) à son bas niveau (1+) de même pour les poids on a donné 0.5 à celui qui a plus d'importance et un poids de 0.1 à celui qui a moins d'importance. Le régime optimale des conditions de coupe trouvé est de $V_c=222\text{m/min}$, $f_z=0.132\text{mm/dent}$ et $a_p=0.3\text{mm}$. La rugosité prend une valeur minimale de $R_a=0.696\mu\text{m}$, la $QCE=10449.674\text{mm}^3/\text{min}$ et la désirabilité $Des=0.950$. Ce cas est intéressant pour un fraisage de finition où la qualité est exigée (rugosité minimale). Concernant le deuxième cas d'optimisation, la (QCE) est devenu la mieux considérée avec une importance (5+), tandis que la rugosité a pris un niveau minimal avec une importance (1+). Le régime optimale des conditions de coupe trouvé est de

$V_c=222.000\text{m/min}$, $f_z= 0.25\text{mm/dent}$ et $a_p=0.9\text{mm}$. La (QCE) prend une valeur maximale de la $QCE=61687.473\text{mm}^3/\text{min}$, la rugosité $R_a=1.55\mu\text{m}$ et la désirabilité $Des=0.971$. Ce cas d'optimisation est réservé pour une production maximale souhaité dans le fraisage d'ébauche. Le troisième cas s'intéresse à une optimisation combinée entre une rugosité minimale et une quantité de copeaux à enlevé maximale avec une même importance (5+) pour les deux sorties. Le régime optimale des conditions de coupe trouvé est de $V_c=222\text{m/min}$, $f_z=0.201\text{mm/dent}$ et $a_p=0.9\text{mm}$. La rugosité, la QCE et la désirabilité prennent successivement les valeurs ($1.279\mu\text{m}$, $50412.737\text{mm}^3/\text{min}$ et 0.816).

Tableau. V. 7- But et gamme de paramètres pour le 1^{er} cas d'optimisation.

Constraints						
		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
Vc	is in range	111	222	1	1	3
B:fz	is in range	0.08	0.25	1	1	3
C:ap	is in range	0.3	0.9	1	1	3
Ra	minimize	0.64	2.12	1	0.5	5
MRR	maximize	3393.63	63630.6	0.1	1	1

Tableau. V. 8- But et gamme de paramètres pour le 2^{ème} cas d'optimisation.

Constraints						
		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A:Vc	is in range	111	222	1	1	3
B:fz	is in range	0.08	0.25	1	1	3
C:ap	is in range	0.3	0.9	1	1	3
Ra	minimize	0.64	2.12	1	0.1	1
QCE	maximize	3393.63	63630.6	0.5	1	5

Tableau V. 9- But et gamme de paramètres pour le 3^{ème} cas d'optimisation.

Constraints						
		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A:Vc	is in range	111	222	1	1	3
B:fz	is in range	0.08	0.25	1	1	3
C:ap	is in range	0.3	0.9	1	1	3
Ra	minimize	0.64	2.12	1	0.5	5
MRR	maximize	3393.63	63630.6	0.5	1	5

Tableau V. 10- Réponses de la surface de rugosité et de la quantité de copaux à enlevé pour le 1^{er} cas d'optimisation.

Solutions						
Number	Vc	fz	ap	Ra	MRR	Desirability
1	222.000	0.132	0.300	0.696	10449.674	0.950
2	221.997	0.132	0.300	0.696	10524.122	0.950
3	221.998	0.133	0.300	0.697	10640.516	0.950
4	221.984	0.128	0.300	0.693	10088.801	0.949
5	221.999	0.136	0.300	0.700	10902.185	0.949
6	221.998	0.127	0.300	0.692	9980.772	0.949
7	221.538	0.130	0.300	0.695	10310.414	0.949

Tableau V. 11- Réponses de la surface de rugosité et de la quantité de copaux à enlevé pour le 2^{ème} cas d'optimisation.

Solutions						
Number	Vc	fz	ap	Ra	MRR	Desirability
1	222.000	0.250	0.900	1.550	61687.473	0.971
2	221.602	0.250	0.900	1.551	61585.361	0.970
3	221.999	0.249	0.900	1.543	61445.521	0.969
4	222.000	0.250	0.896	1.547	61441.703	0.969
5	222.000	0.249	0.897	1.542	61313.578	0.968
6	222.000	0.250	0.894	1.546	61282.138	0.968
7	220.524	0.250	0.900	1.554	61312.908	0.968

Tableau V.12- Réponses de la surface de rugosité et de la quantité de copeaux à enlevé pour le 3^{ème} cas d'optimisation.

Solutions						
Number	Vc	fz	ap	Ra	MRR	Desirability
1	222.000	0.201	0.900	1.279	50412.737	0.816
2	222.000	0.200	0.900	1.274	50117.571	0.816
3	222.000	0.199	0.900	1.268	49797.942	0.816
4	222.000	0.204	0.900	1.290	50999.224	0.816
5	222.000	0.201	0.896	1.276	50178.848	0.816
6	221.999	0.202	0.896	1.281	50427.854	0.816
7	222.000	0.204	0.894	1.285	50639.748	0.816
8	221.581	0.204	0.900	1.291	50933.131	0.815

La figure (V.7) montre le domaine de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f_z et a_p) pour obtenir une rugosité de surface minimale (*meilleur qualité de surface*). D'une autre manière, la figure (V.8) expose les valeurs optimales exacte des paramètres (V_c , f_z et a_p), ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés (Ra et QCE) et la désirabilité pour ce cas.

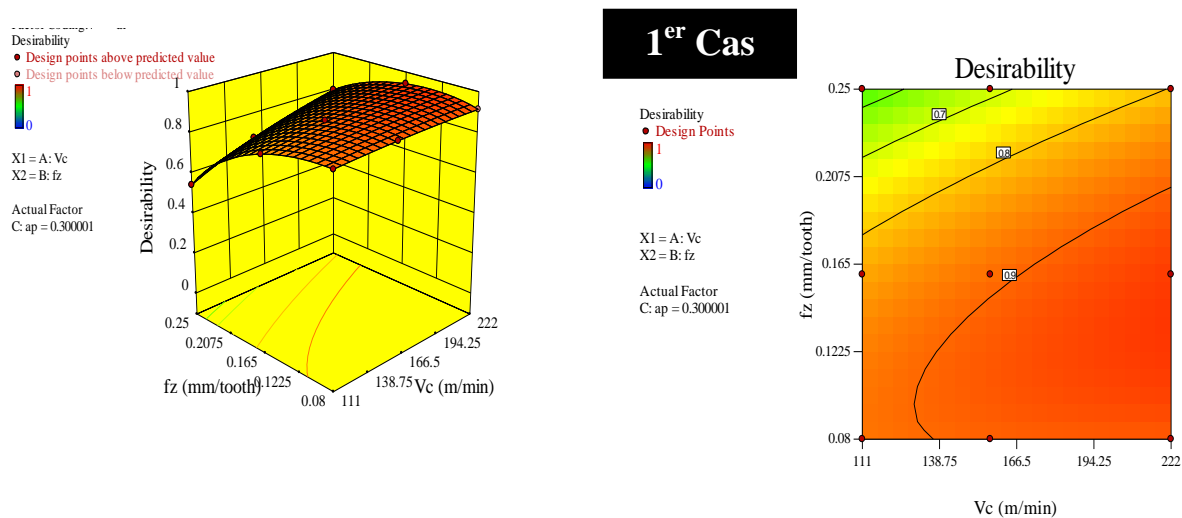


Fig. V.7- Graph de désirabilité de Ra et QCE (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 1^{er} cas.

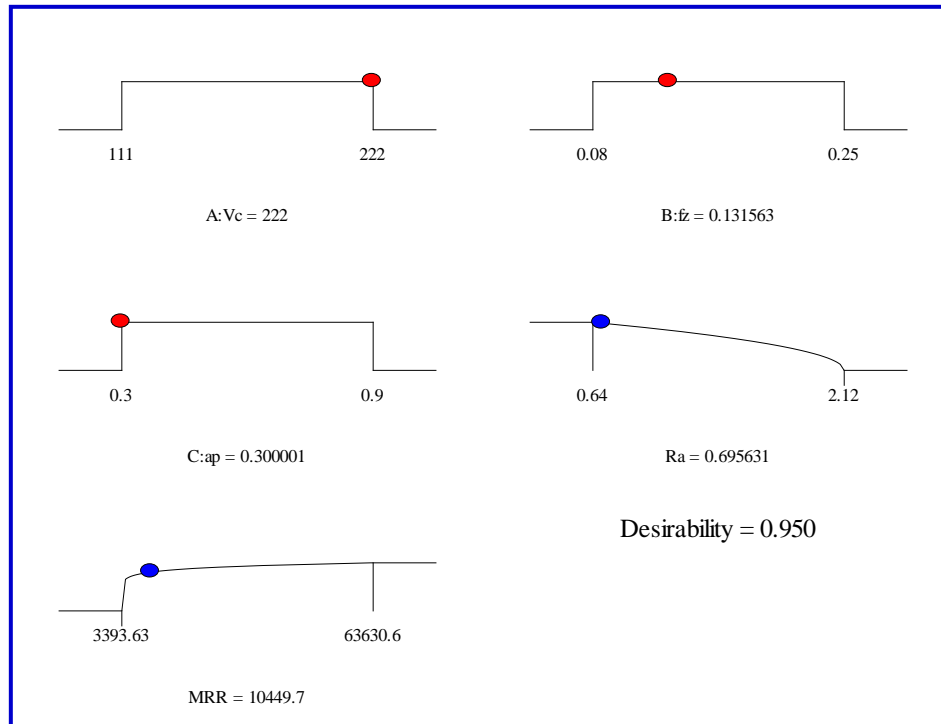


Fig. V.8- Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et de la quantité du copeau enlevé (QCE).

La figure V.9 présente l'espace de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres du régime de coupe (V_c , f_z et ap) pour obtenir une quantité de copeau enlevé maximale (productivité maximale). D'une autre façon La figure V.10 expose, les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrée (V_c , f_z et ap), de même celles des paramètres technologiques (Ra et QCE) et la désirabilité pour ce deuxième cas.

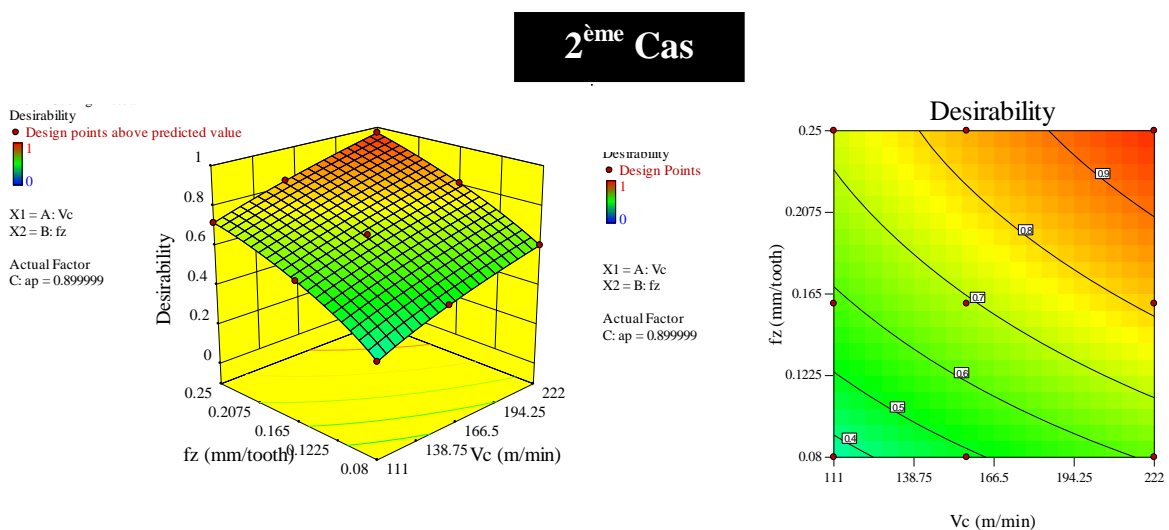


Fig. V.9- Graph de désirabilité de Ra et QCE (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 2^{ème} cas.

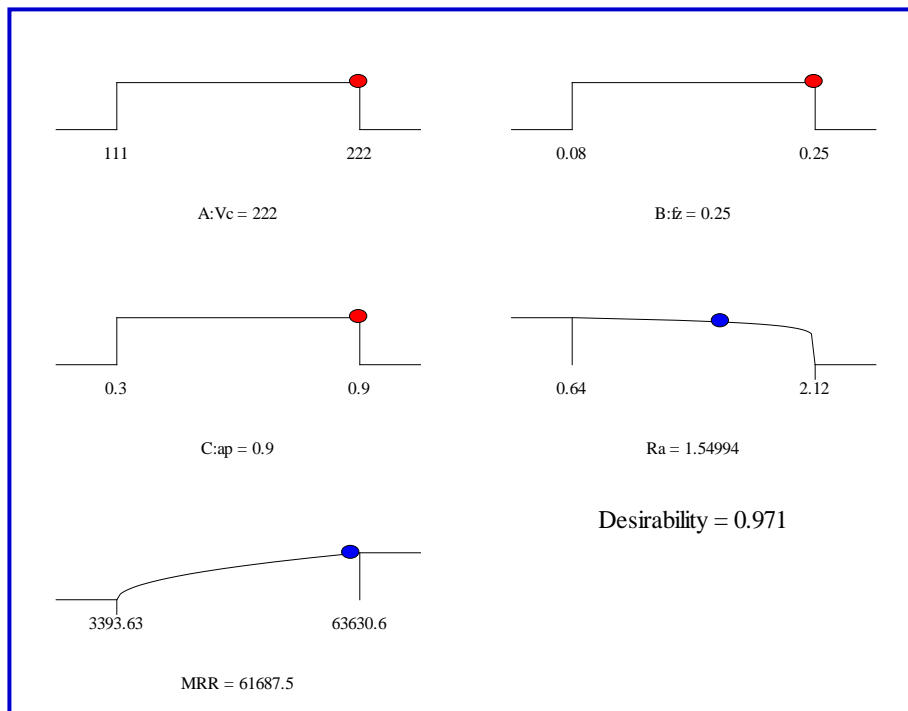


Fig. V.10- Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et de la quantité du copeau enlevé (QCE).

La figure V.11 présente l'usage de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres de coupe (Vc , fz et ap) pour obtenir un compromis entre qualité de surface et productivité exprimée par la rugosité de surface et la quantité de copeau enlevé. La figure V.12 exprime d'une manière différente, les valeurs optimales exactes des paramètres (Vc , fz et ap), de même celles des paramètres technologiques (Ra et QCE) et la désirabilité pour le dernier cas étudié.

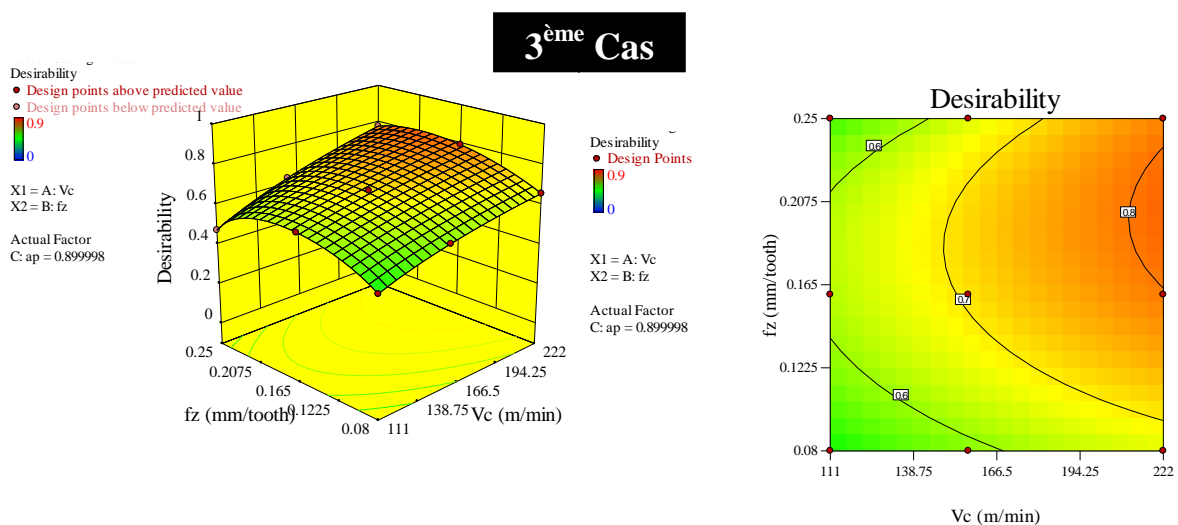


Fig. V.11- Graph de désirabilité de Ra et QCE (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 3^{ème} cas.

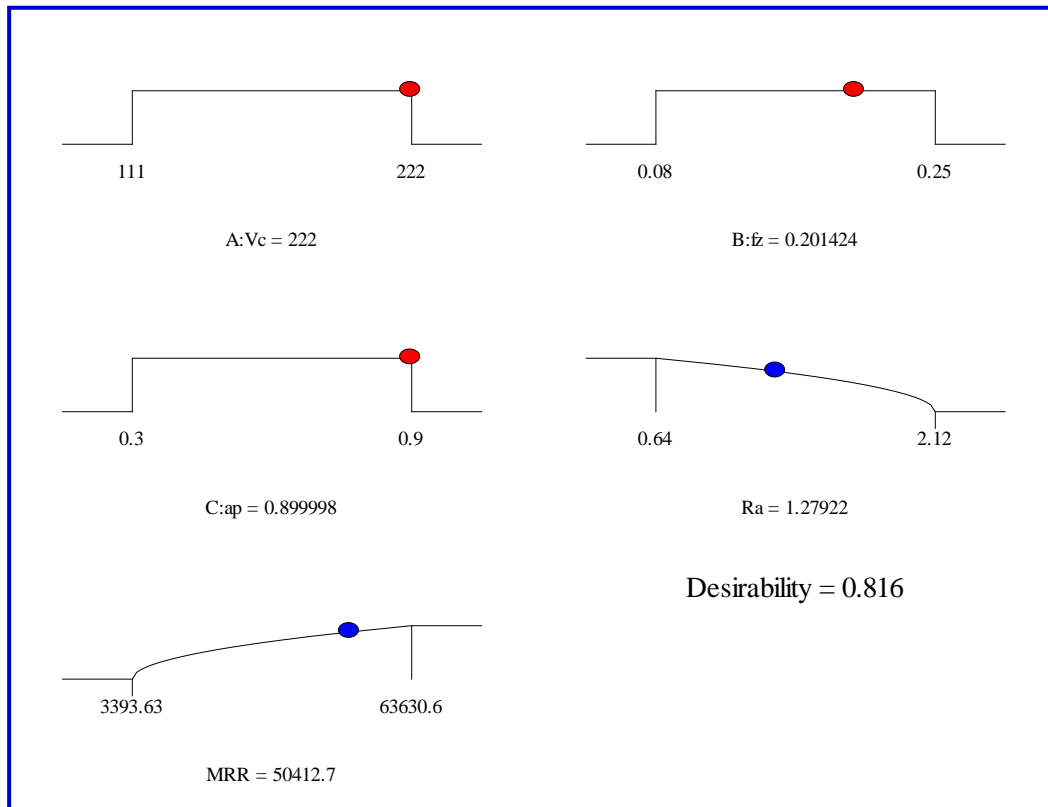


Fig. V.12- Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et de la quantité du copeau enlevé (QCE).

V.4- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux types d'optimisation: l'optimisation mono-objective, dans laquelle nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser la rugosité de surface (Ra) et la quantité de copeau enlevé (QCE), et l'optimisation multi-objectives, où nous avons utilisé l'approche de la fonction désirabilité pour optimiser la rugosité de surface (Ra) et la quantité de copeau enlevé (QCE) simultanément. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- L'optimisation mono-objective réalisée dans ce travail est basée sur la méthode de Taguchi. Selon son approche, l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/Bruit (S/B) représente la meilleure performance de la réponse (Ra), (Fc), (Ks), (Pc) et (QCE).

- L'optimisation multi-objective réalisée dans ce travail est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (*DF*). Cette optimisation est basée sur trois critères choisis qui sont la qualité, la productivité et une optimisation combinée entre les deux cités en même temps.

Conclusion générale

Dans ce travail, une recherche expérimentale est conduite afin de modéliser les paramètres de performances d'usinage (la rugosité de surface, l'effort de coupe principale, la pression spécifique de coupe, la puissance de coupe et le volume de copeau enlevé) et optimiser les conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe) lors du fraisage de face de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 avec des plaquettes en carbure revêtues. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

- ❖ L'analyse ANOVA de la rugosité de surface révèle que l'avance par dent est le facteur le plus important qui affecte la rugosité (Ra) avec une contribution de 60,44%, suivie par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 17,24%, l'interaction ($Vc \times fz$) avec une contribution 9,68% et en fin la profondeur de passe avec une contribution de 6,54%. Les interactions ($fz \times ap$) et ($Vc \times ap$) ont des faibles contributions de (1,51% et 0,05%) par conséquent, ils ne sont pas significatifs. Les termes carrés (Vc^2 , fz^2 et ap^2) ne sont pas aussi significatifs.
- ❖ L'analyse ANOVA des résultats de l'effort de coupe (Fc) indique que les paramètres significatifs sont (ap) avec une contribution de 55%, suivie par (fz) et (Vc) avec une contribution respective de (20,5 et 19,92)%. Les interactions ($Vc \times fz$), ($fz \times ap$) sont aussi significatives avec une légère contribution de moins de 2,2%. Pour le terme de (Vc^2), son effet est significatif avec une légère contribution (moins de 1.5 %).
- ❖ L'analyse ANOVA des résultats de la pression spécifique de coupe (Ks) indique que les paramètres significatifs sont (fz) avec la contribution de 51,99%, suivie par (ap) et (Vc) avec (18,84 et 13,96)% de contributions respectivement. Tous les autres termes sont jugés significatifs avec de faibles contributions qui ne dépassent pas les 5,6%. Le choix d'une avance (fz) et d'un (ap) trop faible génère des pressions de coupe énormes qui peuvent endommager l'arête tranchante de l'outil. Les grandes vitesses de coupe engendrent d'une part une diminution des efforts et d'autre part une accélération de l'usure. Ce qui nous pousse à chercher un compromis entre un effort minimal et une tenue exploitable sur le plan industriel.
- ❖ L'analyse ANOVA des résultats de la puissance de coupe montre que la profondeur de passe est la plus influente sur (Pc) avec une contribution de 58,51%, suivie par (fz) et (Vc) avec les contributions respectives (20,53 et 15,78)%. Les faibles contributions

correspondent aux interactions ($V_c \times a_p$) et ($f_z \times a_p$) avec un pourcentage inférieur à 2.8%.

- ❖ L'analyse ANOVA des résultats de la quantité de copeau enlevée (QCE) indique que (f_z) et (a_p) ont la plus grande influence avec les contributions respectives de (37.48 et 35.28)%, suivies par (V_c) avec 15,76% de contribution. L'interaction ($f_z \times a_p$) est significative avec 6.04% de contribution. Les deux autres interactions sont significatives mais avec des contributions inférieures à 3%.
- ❖ Les modèles mathématique basés sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour la rugosité de surface, l'effort de coupe, la pression spécifique de coupe, la puissance de coupe et la quantité du copeau enlevé, ayant un (R^2) de 79.77%, 98.45%, 96.65%, 98.34 et 99.52%, respectivement, présentent la bonne concordance avec les données expérimentales. Ces modèles ont un intérêt industriel parce qu'ils peuvent être employés pour la prédiction des paramètres technologiques d'usinage et aussi pour l'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.
- ❖ L'apparition des micro-copeaux soudés sur la surface usinée de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 et la formation de l'arête rapportée sur le bec de l'outil, contribuent de manière significative à la dégradation de la rugosité de surface, en raison des caractéristiques physiques et mécaniques de l'acier inoxydable austénitique testé.
- ❖ Malgré la mauvaise usinabilité de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9, qui se manifeste par la présence du micro-copeau soudé sur la surface usinée, la rugosité (R_a) n'a pas dépassé la valeur de 2 μm et cela pour une avance $f_z = 0.12$ mm/dent et une usure admissible $[VB] = 0,3$ mm. Cela est attribuer à la géométrie des plaquettes utilisées, qui contiennes une arête de raclage qui écrase les aspérités de la surface usinée de cet acier.
- ❖ L'utilisation du rugosimètre (3D) (Alti surf 500) s'est révélée être un outil très utile pour le développement de cartes topographiques tridimensionnelles des surface usinées, ce qui a pour effet dans notre cas de comprendre les caractéristiques des surfaces fraisées de l'acier inoxydable X2CrNi18-9. Il est clair sur les graphes 3D

que les arrachements de la matière sont bien visibles et cela est dû à la ductilité du matériau de la pièce.

- ❖ Les résultats du plan expérimental de la durée de vie de l'outil (T_2) montrent que l'augmentation de la vitesse de coupe de (111 à 222) m/min conduit à une baisse de la durée de vie de l'outil de 86,07% pour $fz_1 = 0,12$ mm/dent et 89% pour $fz_2 = 0,20$ mm/dent. En ce qui concerne l'avance par dent, l'augmentation de ce paramètre de (0,12 à 0,20) mm/dent entraîne une diminution de la durée de vie de 18,19% pour $Vc_1 = 111$ m/min et 23,6% pour $Vc_2 = 222$ m/min.
- ❖ Les résultats du plan expérimental (T_2) indiquent aussi une augmentation de la rugosité de surface de 8,24% lorsque (fz) augmente de 0,12 à 0,20 mm/dent pour $Vc_1 = 111$ m/min. De même, pour $Vc_2 = 222$ m/min, la rugosité de surface augmente de 7,02%. D'autre part, lorsque (Vc) augmente de 111 à 222 m/min, on observe une amélioration de la rugosité de surface (4.64% et 5.71%) pour $fz_1 = 0.12$ mm/dents et $fz_2 = 0.20$ mm/dents, respectivement.
- ❖ La modélisation des paramètres de performance (rugosité de surface, efforts de coupe, pression spécifique, puissance de coupe et volume de copeau enlevé) par la méthodologie de surface de réponse et par les réseaux de neurones artificiels a montré une ultime efficacité compte tenu des indicateurs d'adéquation (le coefficient de détermination, la valeur du tableau de Fisher (F -table) et le niveau de signification ou la probabilité d'obtenir ce résultat par hasard P). La comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimés par les modèles RSM et ANN montre formellement que, les modèles issus de la méthode des réseaux de neurones donnent des résultats excellents ($R^2_{(Ra)} = 99,89\%$, $R^2_{(Fc)} = 99,45\%$, $R^2_{(Ks)} = 99,61\%$, $R^2_{(Pc)} = 99,31\%$ et $R^2_{(QCE)} = 99,99\%$) par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse ($R^2_{(Ra)} = 79.77\%$, $R^2_{(Fc)} = 98,45\%$, $R^2_{(Ks)} = 96.65\%$, $R^2_{(Pc)} = 98.34\%$ et $R^2_{(QCE)} = 99,52\%$).
- ❖ L'optimisation mono-objective réalisée dans ce travail est basée sur la méthode de Taguchi qui (Selon son approche) :
 - ✓ L'optimum de la réponse (Ra et Fc) est obtenu aux paramètres d'usinage ($Vc=222m/min$, $fz=0.08$ et $ap=0.3$). cet optimum est la valeur la plus élevée du Signal / Bruit (S/B_{Ra} et S/B_{Fc}).

- ✓ L'optimum de la réponse (P_c) correspond aux paramètres d'usinage ($V_c=111\text{m/min}$, $f_z=0.08$ et $a_p=0.3$) V_{c1} , f_{z1} et a_{p1} et l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/ Bruit (S/B) représente la meilleure performance de la réponse (P_c).
- ✓ L'optimum des réponses de (K_s et QCE) correspond aux paramètres d'usinage ($V_c=222\text{m/min}$, $f_z=0.25$ et $a_p=0.9$). Cet optimum est la valeur la plus élevée du Signal/ Bruit (S/B_{K_s} et S/B_{QCE}).
- ❖ L'optimisation multi-objective réalisée dans ce travail est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Les régimes optimaux obtenus par cette optimisation selon les trois critères choisis sont :
 - ✓ (R_a minimisée) : $V_c = 222\text{m/min}$, $f_z = 0,13\text{mm/dent}$ et $a_p = 0,3\text{mm}$.
 - ✓ (QCE maximisé) : $V_c = 222\text{m/min}$, $f_z = 0,25\text{mm/dent}$ et $a_p = 0,9\text{mm}$.
 - ✓ compromis entre la rugosité (R_a) et le Volume de copeau enlevé (QCE) :
 $V_c = 222\text{m/min}$, $f_z = 0,2\text{mm/dent}$ et $a_p = 0,9\text{mm}$.
- ❖ l'analyse des deux méthodes d'optimisation montre que la méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse, elle est simple et rapide. Par contre l'utilisation de la fonction de désirabilité est meilleure pour l'optimisation multi-objective.

Perspectives

Les résultats obtenus dans ces travaux de recherche ouvrent d'importantes perspectives:

- 1-** De nouveaux tests d'usinage peuvent être réalisés, 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 types d'outils (géométries d'outils, différents outils et revêtements, etc.).
- 2-** L'étude de l'évolution de la température dans la zone de coupe et les contraintes résiduelles en fonction des conditions de coupe, pourrait également faire l'objet de recherches lors de nouvelles campagnes d'usinage.
- 3-** L'application des autres méthodes de modélisation et d'optimisation modernes telles que (la logique floue et les algorithmes génétiques ...etc).
- 4-** L'étude des vibrations lors du fraisage en fonction des conditions de coupe et aussi le type de fraisage (opposition et avalent), pourrait aussi faire l'objet de recherches lors de nouvelles campagnes d'usinage.

Références Bibliographiques

- [1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fraisage>
- [2] Sandvik. Coromant, Fraisage, étude de cas, Technique de l'ingénieur, BM7082, (2004).
- [3] <https://www.fichier-pdf.fr/2013/10/20/cours-complet-ecran/cours-complet-ecran.pdf>
- [4] <http://www.profmpk.fr/Documents%20eleves/Annee%202015%202016/2%20TU/parametre2coupe.pdf>
- [5] P. DEPEYRE, Fabrication Mécanique, Université de la Réunion, Faculté des Sciences et Technologies, 2004-2005.
- [6] <http://www.ceratzit.com/fr/produits/coupe/materiaux-de-coupe/>.
- [7] <https://www.Transaction of American Society for Steel Treating>, vol. XIV, n°5, nov. 1928, p. 714.
- [8] http://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/knowledge/materials/materials/cutting_tools/materials/cermet.
- [9] P. REUSSER, Méthodes pour l'optimisation des paramètres de coupe, FSRM
- [10] B. VASQUES, Etude du comportement du rayon d'arête et de son influence sur l'intégrité de surface en tournage sec, Université François- Rabelais de Tours-, juin 2008.
- [11] P-J.CUNAT, Aciers inoxydables, Critères de choix et structure, Technique de l'ingénieur, M 4540, (2004).
- [12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier_inoxydable
- [13] L. CZAPLICKI. L'usinabilité et la coupe des métaux. Revue de la société royale belge des ingénieurs et des industries, n°12. pp. 708 – 736 (décembre 1962).
- [14] B. GRUBER, Outillage et mesure, Dunod spes, pp 51-63. 1981.
- [15] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Usinage>.
- [16] http://francois.cnam.fr.free.fr/CNAM_FAB206/Coupe/Actions_mecaniques.pdf
- [17] M. Habek, étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100cr6, l'école nationale supérieure d'arts et métiers, spécialité “ mécanique - matériaux - procédés ”, le 11 décembre, 2006.
- [18] A. BENYOUCEF, Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécanistique, Mémoire de magister, Université de Batna, 06-2006.

- [19] http://vsncq.free.fr/IMG/pdf/4_Usure_des_outils-Lois_d_usure.pdf
- [20] www.trametal.com. Outils coupants, Les plaquettes de coupe, Trametal, (mars-2006), 06-14.
- [21] Documentation Sandvik Coromant. Main catalogue, the official website of the sandvik coromant (2006): <http://www.coromant.sandvik.com> (accessed april 10, 2007).
- [22] A. CHEVALIER. Guide du dessinateur industriel, Hachette technique - édition -2004.
- [23] http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Etat_Surface.htm
- [24] <http://actu-imprimante3d.blogspot.com/2014/11/technique-impression-3d-rugosite-etats.html>
- [25] S. BERKANI, M. A. YALLESE, L. BOULANOUAR, Statistical analysis of AISI304 austenitic stainless steel machining using Ti (C, N)/Al₂O₃/TiN CVD coated carbide tool, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6 (2015) 539-552.
- [26] I. CIFTCI, Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools, *Tribology International*, 39 (2006) 565-569.
- [27] E. KURAM, B. OZCELIK, Micro-milling performance of AISI 304 stainless steel using Taguchi method and fuzzy logic modelling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27 (2016) 817-830.
- [28] J. YAN, L. LI, Multi-objective optimization of milling parameters—the trade-offs between energy, production rate and cutting quality, *Journal of Cleaner Production*, 52 (2013) 462-471.
- [29] M. T. HAYAJNEH, M. S. TAHAT, J. BLUHM, 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, N° 1 (2007) 1-5.
- [30] J. PARO, H. HÄNNINEN, V. KAUPPINEN, Tool wear and machinability of X5 CrMnN 18 18 stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 119 (2001) 14-20.
- [31] G. CAMPATELLI, L. LORENZINI, A. SCIPPA, Optimization of process parameters using a response surface method for minimizing power consumption in the milling of carbon steel, *Journal of cleaner production*, 66 (2014) 309-316.

- [32] M. YASIR, T.L. GINTA, B. ARIWAHOEDI, A. U. ALKALI, M. DANISH, Effect of cutting speed and feed rate on surface roughness of AISI 316L using end-milling. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11 (2016) 2496-2500.
- [33] S. KALIDASS, P. PALANISAMY, Prediction of surface roughness for AISI 304 steel with solid carbide tools in end milling process using regression and ANN models, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (2014) 8065-8075.
- [34] I. KORCUT, M. KASAP, I. CIFTICI, U. SEKER, Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel, *Materials and Design*, 25 (2004) 303–305.
- [35] B. S. REDDY, J. S. KUMAR, K. V. K. REDDY, (2011). Optimization of surface roughness in CNC end milling using response surface methodology and genetic algorithm. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(8), 102-109.
- [36] A. M. ZAIN, , H. HARON, S. SHARIF, (2010), Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network, *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1755-1768.
- [37] T. ERZURUMLU, H. OKTEM, (2007), Comparison of response surface model with neural network in determining the surface quality of moulded parts, *Materials & design*, 28(2), 459-465.
- [38] K. S. SANGWAN, S.SAXENA, G. KANT, (2015), Optimization of machining parameters to minimize surface roughness using integrated ANN-GA approach, *Procedia CIRP*, 29, 305-310.
- [39] P-J.CUNAT, *Aciers inoxydables, Propriétés et résistance à la corrosion, Technique de l'ingénieur*, M4541, (2004).
- [40] *Catalogue général, Outils de coupe, Sandvik Coromant*, (2007).
- [41] G. TAGUCHI, *Taguchi on robust technology development methods*, ASME Press, New York, pp. 1– 40 (1993).
- [42] <https://www.google.dz+Pratiquedes+plans+d'expériences-+Méthodologie+Taguchi> (Introduction à la méthode des plans d'expériences par la méthode Taguchi).
- [43] G. TAGUCHI. *System of experimental design*, unipub/kraus, international publication (1987).
- [44] P. ALEXIS, *Cours de plan d'expérience (forme littérale)*, Copyright, 15 déc. 2015.

- [45] K. T. CHIANG. Modeling and analysis of the effects of machining parameters on the performance characteristics in the EDM process of Al₂O₃+TiC mixed ceramic. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, pp. 523-533 (2008).
- [46] M. CHAHAL, V. SINGH, R. GARG, Optimum surface roughness evaluation of dies steel H-11 with CNC milling using RSM with desirability function, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, (2016) 1-13.
- [47] T. KIVAK, Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts, *Measurement*, 50 (2014) 19-28.
- [48] M. FNIDES, M. A. YALLESE, R. KHATTABI, T. MABROUKI, F. GIRARDIN, Modeling and optimization of surface roughness and productivity thru RSM in face milling of AISI 1040 steel using coated carbide inserts, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8 (2017) 493-512.
- [49] M. SUBRAMANIAN, M. SAKTHIVEL, K. SOORYAPRAKASH, R. SUDHAKARAN, Optimization of Cutting Parameters for Cutting Force in Shoulder Milling of Al7075-T6 Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm, *Procedia Engineering*, 64 (2013) 690 – 700.
- [50] L. TANG, C. GAO, J. HUANG, X. LIN. J. ZHANG, Experimental investigation of the three-component forces in finish dry hard turning of hardened tool steel at different hardness levels, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70 (2014) 1721 – 1729.
- [51] H. AOUCI, H. BOUCHELAGHEM, M. A. YALLESE, Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73 (2014) 1775-1788.
- [52] H. BENSOUILAH, H. AOUCI, I. MEDDOUR, Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process, *Measurement*, 82 (2016) 1-18.
- [53] R. K. BHUSHAN, Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites, *Journal of Cleaner Production*, 39 (2013) 242-254.

- [54] M. A. YALLESE, K. CHAOUI, N. ZEGHIB, Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (2009) 1092-1104.
- [55] M. A. YALLESE, J. F. RIGAL, K. CHAOUI, L. BOULANOUAR , The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60 HRC), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219 (2005) 35-55.
- [56] H. BOUCHELAGHEM, M. A. YALLESE, A. AMIRAT, Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel, *Mechanics*, 65 (2016) 57-65.
- [57] M. A. YALLESE, L. BOULANOUAR, K. CHAOUI, Machining of hardened 100Cr6 steel using a cubic boron nitride tool, *Mécanique & Industries*, 5 (2004) 355-368.
- [58] R. FERREIRA, J. ŘEHOŘ, C. H. LAURO, J. P. DAVIM, Analysis of the hard turning of AISI H13 steel with ceramic tools based on tool geometry: surface roughness, tool wear and their relation, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38 (2016) 2413-2420.
- [59] C. LU, Study on prediction of surface quality in machining process, *Journal of materials processing technology*, 205 (2008) 439-450.
- [60] <https://www.Réseaux de neurones>.
- [61] I. RIVALS, L. PERSONAZ, G. DREIFUS, Modélisation, classification et commande par réseaux de neurones – principes fondamentaux, méthodologie de conception et illustrations industrielles - Les réseaux de neurones pour la modélisation et la conduite des procédés, J.-P. Corriou coordonnateur, Lavoisier Technique et Documentation, Paris.
- [62] http://www.etab.ac-caen.fr/discip/geologie/SVT/travaux/travmich/synweb/images/reseau_01.gif
- [63] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/81/Deep_learning.png/459px-Deep_learning.png
- [64] <https://image.slidesharecdn.com/prsentationrn-151107223049-1va1-app6891/95/rseaux-de-neurones-artificiels-7-638.jpg?cb=1446935583>
- [65] P. WIRA, (2009). Réseaux de neurones artificiels -architectures et applications-. Cours en ligne, Université de Haute-Alsace.

- [66] C. TOUZET, (1992), Les réseaux de neurones artificiels Introduction au Connexionnisme - Cours, Exercices et Travaux Pratique.
- [67] G. Dreyfus, Les réseaux de neurones, Mécanique Industrielle et Matériaux, n°51 (1998)
- [68] M. PARIZEAU, (2006), Réseaux de neurones artificiels, Cours en ligne, Université LAVAL.
- [69] J. PAULO DAVIM, V.N. GAITONDE, S.R. KARNIK, Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models, *journal of materials processing technology*, 205 (2008) 16-23.
- [70] N. MUTHUKRISHNAN, J. PAULO DAVIM, Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN analysis, *journal of materials processing technology*, 209 (2009) 225-232.
- [72] A. CHABBI, M. A. YALLESE, M. NOUIOUA, I. MEDDOUR, T. MABROUKI, F. GIRARDIN, Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2017) 1-24.
- [73] N. YUSUP, A. M. ZAIN, S. Z. M. HASHIM, Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007–2011), *Expert Systems with Applications*, 39 (2012) 9909-9927.
- [74] I. ASILTÜRK, H. AKKUŞ, Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, *Measurement* 44 (2011) 1697–1704
- [75] www.groupe.polymtl.ca/mth6301/mth8301/PDF/Clement-DesignRobuste.pdf
- [76] C. CONSTANT, La méthodologie Taguchi , introduction à la recherche technologique-gestion fonctionnelle de la qualité ou gestion « off-line », *Revue de statistique appliquée*, tome 37 n° 2 (1989), p. 47-77
- [77] N. R. COSTA, J. LOURENÇO, Z. L. PEREIRA, Desirability function approach: a review and performance evaluation in adverse conditions, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 107 (2011) 234-244.
- [78] I. J. JEONG, K. J. KIM, An interactive desirability function method to multiresponse optimization, *European Journal of Operational Research*, 195 (2009) 412-426.

Publication

Les travaux de cette thèse ont été présentés dans un article international qui est intitulé comme suit :

“Modeling and optimization in dry face milling of X2CrNi18-9 austenitic stainless steel using RMS and desirability approach” à été publié dans la revue internationale « Measurement, (Elsevier), 107 (2017) 53-67».

<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.012>

0263-2241/2017© Elsevier Ltd.

Auteurs: **Abdel-Ali Selaimia**, Mohamed Athmane Yallese, Hamza Bensouilah, IKhlas Meddour, Riad Khattabi, Tarek Mabrouki