

République Algérienne Démocratique & Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR 3^{ème} cycle

De

L'université de 8 Mai 1945 Guelma

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Mécanique Appliquée

Présentée par

ZERTI Oussama

Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de
l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA

Directeur de thèse : Pr. YALLESE Mohamed Athmane

Devant le jury d'examen composé de :

Pr. LAHMAR. M	Professeur, Université de Guelma	Président
Pr. YALLESE. M.A	Professeur, Université de Guelma	Rapporteur
Pr. AMARA. I	Professeur, Université de Constantine	Examineur
Pr. BOUTABBA. S	Professeur, Université de Guelma	Examineur
Dr. BELHADI. S	Maître de conférences/B, Université de Guelma	Invité

Dédicaces

Je tiens à dédier cette thèse :

A mon maître de passion, de patience et de persévérance . . . Mon père, A ma source d'inspiration, de motivation et de bénédiction . . . Ma mère, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

Mes sœurs et mes frères ;

Toute ma famille ;

Mes chers amis

A La mémoire de mes grands-pères et mes grands-mères

REMERCIEMENTS

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre **DIEU**, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Ce travail a été réalisé au laboratoire de mécanique et structures (**LMS**) de l'université de Guelma sous la direction de Monsieur le professeur **YALLESE Mohamed Athmane**, qui a fait preuve d'une grande disponibilité à mon égard tout au long de la période que j'ai passé au labo, pour m'avoir intégré rapidement au sein du laboratoire, pour la confiance qu'il m'a accordé dès mon arrivée, pour son esprit scientifique qui restera une grande source d'inspiration.*

*Je tiens à remercier Mr., **LAHMAR Mustapha**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université de Guelma, de l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury de thèse.*

*Je remercie vivement Messieurs : **AMARA Idris**, Professeur à l'Université de Constantine et **BOUTABBA Smail**, Professeur à l'Université de Guelma, pour avoir accepté la tâche d'examineurs, et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux de thèse.*

*Mes sincères remerciements à Messieurs : **BELHADI Salim**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, **BOUZID LAKHDAR** Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université oum Lebouaghi pour ses conseils, pour son soutien durant ces années.*

Rien n'aurait été possible sans la présence et le soutien indéfectible de ma famille trouve en cet aboutissement le fruit de la confiance qu'ils m'ont toujours accordée, et des sacrifices qu'ils ont faits pour moi durant ces années.

*Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé à différents stades de ce travail et particulièrement MM: M^{ed} AIB, A/Aziz MADI et à tous les membres, les thésards et l'ingénieur du Laboratoire de Mécanique et Structure (**LMS**) Mr. **OUERFELLA Rabeh**.*

Résumé

Le but des industriels aujourd'hui est d'abaisser au maximum les coûts des opérations d'usinage grâce à l'introduction de nouveaux matériaux de coupe. De ce fait, la modélisation et l'optimisation des conditions opératoires des outils coupants doit contribuer largement au développement et à la productivité. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux de cette thèse de doctorat. Le but est de faire une investigation expérimentale lors du tournage à sec de l'acier AISI D3 par des plaquettes de coupe en céramique mixte et en carbure revêtu en CVD en utilisant les méthodes statistiques de modélisation et d'optimisation (MSR, ANN, Taguchi, GRA et DF).

La première partie de cette thèse consiste à étudier le comportement d'usinabilité du couple d'usinage (Acier AISI D3/ carbure revêtu en CVD) c.-à-d. de quantifier l'influence des paramètres de coupe (V_c , f et ap) sur les paramètres technologiques d'usinage (les critères de la rugosité de surface (R_a , R_z et R_t), les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z), l'effort résultant (F_r), l'effort spécifique (K_s), la puissance de coupe (P_c), volume de copeau enlevé (MRR)). Dans cette partie sont présentés également les résultats de l'évolution de l'usure d'outil en fonction du temps d'usinage et aussi l'impact de ces deux derniers sur les critères de la rugosité de surface et sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe. La deuxième partie est consacrée à la modélisation des paramètres technologiques d'usinage en fonction des paramètres de coupe, en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM) associée à la technique d'optimisation des réponses multiples (désirabilités) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). La dernière partie du travail est réservée à l'optimisation mono et multi objective afin de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs fixés de l'optimisation. Les résultats trouvés prouvent que la modélisation par la méthode (ANN) donne des résultats excellents par rapport à la méthode (RSM). La méthode de Taguchi a été adaptée avec succès pour déterminer le régime optimal des paramètres de coupe afin d'améliorer les paramètres technologique pour une optimisation mono-objective. Par contre la méthode (GRA) est la meilleure pour le cas de l'optimisation multi-objective.

Mots clés : AISI D3, tournage, optimisation, plan d'expérience, carbure métallique, céramique mixte, ANOVA, RSM, ANN, méthode de Taguchi, GRA, DF, conditions de coupe.

Abstract

Today's the goal of industrialists is to reduce the cost of machining operations as much as possible by introducing new cutting materials. Therefore, the modeling and optimization of the operating conditions of cutting tools must contribute widely to development and productivity. It is in this context that the work of this doctoral thesis is inscribed. The aim is to carry out an experimental investigation during the dry turning of AISI D3 steel by mixed ceramic and CVD-coated carbide cutting inserts using statistical methods of modeling and optimization (MSR, ANN, Taguchi, GRA and DF).

The first part of this thesis consists in studying the machinability behavior of the machining couple (AISI D3 steel / CVD-coated carbide) ie. to quantify the influence of the cutting parameters (V_c , f and ap) on the machining technology parameters (the criteria of surface roughness (R_a , R_z and R_t), the components of the cutting force (F_x , F_y and F_z), the resultant force (F_r), the specific force (K_s), the cutting power (P_c), the material removal rate (MRR)). In this part are also presented the results of the evolution of tool wear in function of machining time and also the impact of these last two on the criteria of surface roughness and the evolution of the components of the cutting force. The second part is devoted to the modeling of the machining technology parameters in function of the cutting parameters, using the response surface methodology (RSM) associated with the multiple responses optimization technique (desirability) and the artificial neural networks (ANN). The last part of the work is reserved for mono and multi-objective optimization in order to find the optimal values of the cutting parameters compared to the fixed objectives of the optimization. The results found prove that modeling by the method (ANN) gives excellent results compared to the method (RSM). Taguchi's method has been successfully adapted to determine the optimal regime of the cutting parameters in order to improve the technological parameters for a mono-objective optimization. On the other hand, the method (GRA) is the best for the case of multi-objective optimization.

Key words: AISI D3, turning, optimization, experimental design, metal carbide, mixed ceramic, ANOVA, RSM, ANN, Taguchi method, GRA, DF, cutting conditions.

ملخص

هدف المصنعين اليوم هو خفض تكلفة عمليات القطع قدر الإمكان من خلال إدخال مواد القطع الجديدة. ونتيجة لذلك، يجب اسهام نمذجة وتحسين ظروف تشغيل أدوات القطع بشكل كبير في التنمية والإنتاجية. وفي هذا السياق تم تدوين أعمال رسالة الدكتوراه. والهدف من ذلك هو إجراء تحقيق تجريبي خلال خراطة جافة للفولاذ (AISI D3) بإستعمال مواد القطع السيراميك المختلط و الكاربيد المغلفة (CVD) باستخدام الأساليب الإحصائية للنمذجة والتحسين (DF, GRA, Taguchi, ANN, MSR).

الجزء الأول من هذه الأطروحة يتوقف على دراسة سلوك التقطيع لثنائي القطع (فولاذ (AISI D3) / أداة الكاربيد المغلفة (CVD)) أي. لتحديد تأثير عوامل القطع (ap, f, Vc) على العوامل التكنولوجية للقطع (معايير خشونة السطح (Rt, Rz, Ra)، مكونات جهد القطع (Fz, Fy, Fx)، الجهد الناتج (Fr)، الجهد الخاص (Ks)، قوة القطع (Pc)، و حجم المادة المنزوعة (MRR)). في هذا الجزء أيضا عرض نتائج تطور تآكل أداة القطع بدلالة وقت القطع وأيضا تأثير هذين الأخيرين على معايير خشونة السطح وعلى تطور مكونات قوة القطع. وخصص الجزء الثاني لنمذجة العوامل التكنولوجية للقطع بدلالة عوامل القطع، وذلك باستخدام منهجية (RSM) المرتبطة بتقنية التحسين المتعدد الاجابات (désirabilités) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). الجزء الأخير من العمل محجوز للتحسين الأحادي ومتعدد الأهداف من أجل إيجاد القيم المثلى لعوامل القطع بالنسبة لأهداف التحسين المحددة. أظهرت النتائج أن النمذجة بالطريقة (ANN) تعطي نتائج ممتازة مقارنة بالطريقة (RSM). وقد تم تكيف منهجية Taguchi بنجاح لتحديد العوامل المثلى للقطع من أجل تحسين العوامل التكنولوجية في حالة التحسين أحادي الهدف. ومن ناحية أخرى، فإن منهجية (GRA) هي الأفضل بالنسبة للتحسين متعدد الأهداف.

الكلمات المفتاحية: AISI D3، الخراطة، التحسين، التخطيط التجريبي، الكاربيد الحديدي، السيراميك المختلط، ANOVA، RSM، ANN، منهجية Taguchi، GRA، DF، شروط القطع.

INDEX DES FIGURES

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA COUPE DES METAUX

Figure I.1 :	<i>Représentation du tournage (chariotage).</i>	5
Figure I.2 :	<i>Les opérations classiques en tournage [5].</i>	6
Figure I.5 :	<i>Matériaux de coupe.</i>	9
Figure I.4 :	<i>Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe [13].</i>	9
Figure I.5 :	<i>Classification des matériaux de coupe.</i>	10
Figure I.6 :	<i>Domaines d'utilisation des divers types de matériaux à outils de coupe [13].</i>	13
Figure I.7 :	<i>Les céramiques [13].</i>	14
Figure I.8 :	<i>Usure des outils</i>	17
Figure I.9 :	<i>Usure par abrasion</i>	19
Figure I.10 :	<i>Usure chimique</i>	20
Figure I.11 :	<i>Usure par adhérence</i>	20
Figure I.12 :	<i>Usure par adhérence</i>	20
Figure I.13 :	<i>Usure thermique</i>	21
Figure I.14 :	<i>Usure thermique</i>	21
Figure I.15 :	<i>Usure mécanique</i>	21
Figure I.16 :	<i>Caractéristiques du profil.</i>	23
Figure I.17 :	<i>Profil de surface tournée.</i>	24
Figure I.18 :	<i>Les critères de la rugosité.</i>	25
Figure I.19 :	<i>Composantes des efforts de coupe</i>	26
Figure I.20 :	<i>Synopsis de la méthodologie du COM [28].</i>	31
Figure I.21 :	<i>Domaine des contraintes [29].</i>	32
Figure I.22 :	<i>Schématisation d'un processus expérimental.</i>	35
Figure I.23 :	<i>Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.</i>	36
Figure I.24 :	<i>Définition de l'espace expérimental.</i>	37
Figure I.25 :	<i>Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental.</i>	37
Figure I.26 :	<i>Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur.</i>	38
Figure I.27 :	<i>Définition de la surface de réponse.</i>	38
Figure I.28 :	<i>L'effet de la vitesse d'avance et vitesse de coupe sur la rugosité de surface.</i>	40
Figure I.29 :	<i>L'effet de la profondeur de passe et la vitesse d'avance vitesse de sur l'effort de coupe.</i>	40
Figure I.30 :	<i>L'effet de la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur l'effort de coupe spécifique</i>	40

Figure I.31 :	<i>L'effet de la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur la puissance de coupe</i>	40
Figure I.32 :	<i>Photo par MEB de l'usure en de dépouille et en cratère d'un outil de coupe en CBN.</i>	41
Figure I.33 :	<i>Exemple de l'analyse par rayon X sur la surface de dépouille d'un outil de coupe en CBN.</i>	41
Figure I.34 :	<i>Effets moyen pour l'usure de l'outil</i>	43
Figure I.35 :	<i>Interaction pour l'usure de l'outil.</i>	43
Figure I.36 :	<i>Usure en fonction du temps des différents matériaux</i>	44
Figure I.37 :	<i>Etapas d'optimisation pour Ra et débit de coupeau</i>	51
Figure I.38 :	<i>Configuration de l'expérimentation</i>	53
Figure I.39	<i>Configuration expérimentale (a), (b)</i>	55

CHAPITRE II

APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Figure II.1 :	<i>Tour à charioter et à fileter modèle SN40</i>	56
Figure II.2 :	<i>Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais de rugosité, des efforts de coupe et de vibration</i>	58
Figure II.3 :	<i>Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais d'usure</i>	58
Figure II.4 :	<i>Plaquettes de coupe utilisées : (1) Outil en carbure métallique GC4215 avec revêtement CVD, (2) outil en céramique noire CC650. (a) $r=0.8$ mm, (b) $r=1.2$ mm et (c) $r=1.6$ mm.</i>	59
Figure II.5 :	<i>Portes outils utilisés avec illustration de la géométrie</i>	60
Figure II.6 :	<i>Chaine de mesure des efforts de coupe.</i>	61
Figure II.7 :	<i>Rugosimètre 2D (Surftest 201, Mitutoyo)</i>	62
Figure II.8 :	<i>Chaine de mesure de la rugosité en 3D</i>	63
Figure II.9 :	<i>Positionnement des accéléromètres sur le porte outil.</i>	64
Figure II.10 :	<i>Microscope pour la mesure de l'usure.</i>	65

CHAPITRE III

ÉTUDE DE L'USINABILITÉ DE L'ACIER FORTEMENT ALLIÉ (AISI D3)

Figure III.1 :	<i>Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe ($f=0,08$mm/tr et $a_p=0.2$mm).</i>	72
Figure III.2 :	<i>Evolution de la rugosité en fonction de l'avance de l'outil ($V_c=280$m/min et $a_p=0.2$mm).</i>	72
Figure III.3 :	<i>Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe ($V_c=280$m/min et $f=0.08$mm/tr)</i>	73
Figure III.4 :	<i>Evolution des composantes de l'effort de coupe (F_x, F_y et F_z) en fonction de la vitesse de coupe pour $f= 0.08$mm/tr et $a_p= 0.2$mm.</i>	74
Figure III.5 :	<i>Evolution des trois composantes des efforts de coupe (F_x, F_y et F_z) en fonction de l'avance d'outil pour $V_c= 280$ m/min et $a_p= 0.2$mm.</i>	74

Figure III.6 :	<i>Evolution des trois composantes des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=280\text{m/min}$ et $f=0.08\text{mm/tr}$.</i>	75
Figure III.7 :	<i>Effort résultant.</i>	76
Figure III.8 :	<i>Evolution de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe pour $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.</i>	76
Figure III.9 :	<i>Evolution de l'effort résultant en fonction de l'avance d'outil pour $V_c=280\text{m/min}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.</i>	77
Figure III.10 :	<i>Evolution de l'effort résultant en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=280\text{m/min}$ et $f=0.08\text{mm}$.</i>	78
Figure III.11 :	<i>Force de coupe spécifique.</i>	79
Figure III.12 :	<i>Evolution de la pression de coupe (K_s) en fonction de la vitesse de coupe à $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$ pour l'outil de coupe.</i>	80
Figure III.13 :	<i>Evolution de la pression de coupe (K_s) en fonction de l'avance d'outil à $V_c=280\text{m/min}$ et $a_p=0.2\text{mm}$ pour l'outil de coupe.</i>	80
Figure III.14 :	<i>Evolution de la pression de coupe (K_s) en fonction de la vitesse de coupe à $V_c=280\text{m/min}$ et $f=0.08\text{mm}$ pour l'outil de coupe.</i>	81
Figure III.15 :	<i>Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe</i>	83
Figure III.16 :	<i>Evolution du volume de copeau enlevé en fonction des paramètres de coupe.</i>	84
Figure III.17 :	<i>Usure en dépouille VB</i>	85
Figure III.18 :	<i>Évolution de l'usure en fonction du temps à $V_c=280\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$.</i>	86
Figure III.19 :	<i>Valeurs de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage pour $V_c=280\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.</i>	87
Figure III.20 :	<i>Évolution de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage à $V_c=280\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$.</i>	88
Figure III.21 :	<i>Évolution de la rugosité de surface en fonction de l'usure en dépouille à $V_c=280\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$.</i>	89
Figure III.22 :	<i>Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à $V_c=280\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.</i>	90
Figure III.23 :	<i>Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille à $V_c=280\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.</i>	90

CHAPITRE IV

MODÉLISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUE EN UTILISANT LES APPROCHES RSM ET ANN

Figure IV.1 :	<i>Étapes de la méthodologie de surface de réponse [31].</i>	94
Figure IV.2 :	<i>Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour (R_a) : (a) test de normalité de la distribution des résidus ; (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustée.</i>	102
Figure IV.3 :	<i>Courbe du critère de la rugosité (R_a) expérimentale et estimé.</i>	103

Figure IV.4 :	<i>Graphique des effets principaux pour Ra.</i>	103
Figure IV.5 :	<i>Diagramme de surface 3D pour Ra en fonction de Vc, f et ap et les graphes de contour. a) En fonction de Vc et f ; b) En fonction de Vc et ap ; c) En fonction de f et ap.</i>	105
Figure IV.6 :	<i>Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour l'effort de coupe tangentiel (Fz):(a) test de normalité de la distribution des résidus ; (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustée.</i>	107
Figure IV.7 :	<i>Courbe des valeurs de l'effort de coupe tangentiel (Fz) expérimentales et estimés.</i>	107
Figure IV.8 :	<i>Graphique des effets principaux pour Fz.</i>	108
Figure IV.9 :	<i>Diagramme de surface 3D pour Fz en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour. a) En fonction de Vc et f ; b) En fonction de Vc et ap ; c) En fonction de f et ap.</i>	109
Figure IV.10 :	<i>Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour le volume de copeau (MRR):(a) test de normalité de la distribution des résidus ; (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustée.</i>	111
Figure IV.11 :	<i>Courbe des valeurs du volume de copeau enlevé (MRR) expérimentales et estimés.</i>	112
Figure IV.12 :	<i>Graphique des effets principaux pour MRR.</i>	112
Figure IV.13 :	<i>Diagramme de surface 3D pour MRR en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour. a) En fonction de Vc et f ; b) En fonction de Vc et ap ; c) En fonction de f et ap.</i>	113
Figure IV.14 :	<i>Optimisation simultané pour la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé en utilisant la fonction de désirabilité.</i>	116
Figure IV.15 :	<i>Réseau de neurones artificiels</i>	118
Figure IV.16 :	<i>Topologie d'un réseau de neurones</i>	119
Figure IV.17 :	<i>Représentation d'un neurone formel [80].</i>	120
Figure IV.18 :	<i>Représentation d'un neurone formel [80].</i>	120
Figure IV.19 :	<i>Processus d'apprentissage du réseau de neurones</i>	121
Figure IV.20 :	<i>Structure du réseau de neurone du modèle de la rugosité de surface.</i>	122
Figure IV.21 :	<i>Valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour l'apprentissage et pour la validation pour (Ra)</i>	125
Figure IV.22 :	<i>Valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour l'apprentissage et pour la validation pour (MRR)</i>	128
Figure IV.23 :	<i>Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par (RSM et ANN) pour (Ra)</i>	130
Figure IV.24 :	<i>Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par (RSM et ANN) pour (MRR)</i>	130

CHAPITRE V

OPTIMISATION MONO ET MULTI-OBJECTIVE DES PARAMÈTRE D'USINAGE EN
UTILISANT LA MÉTHODE DE TAGUCHI ET GRA

Figure V.1 :	<i>Procédure de la planification de Taguchi.</i>	133
Figure V.2 :	<i>Démarche d'optimisation multi-objective de l'analyse relationnelle grise (GRA) basée sur la planification expérimentale de Taguchi.</i>	136
Figure V.3 :	<i>Exemple du profil en 2D et topographie en 3D de surface usinée.</i>	141
Figure V.4:	<i>la carte de Pareto, pour l'effet des paramètres de coupe sur: (a) rugosité de surface, (b) force tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.</i>	149
Figure V.5:	<i>Tracé 3D pour: (a) Effet du ($f \times ap$) sur $S/N_{(Ra)}$, (b) Effet du ($\chi r \times Vc$) sur $S/N_{(Ks)}$.</i>	150
Figure V.6 :	<i>Contours des surfaces de réponses pour: (a) Effet du ($f \times ap$) sur $S/N_{(Ra)}$, (b) Effet du ($\chi r \times Vc$) sur $S/N_{(Ks)}$.</i>	151
Figure V.7:	<i>Relation entre les valeurs des réponses observées et prédites: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.</i>	156
Figure V.8:	<i>Valeurs Observées vs. Prédites des paramètres technologiques: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.</i>	158
Figure V.9:	<i>Effets principaux de S/N pour: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.</i>	163
Figure V.10 :	<i>Effets principaux pour GRG.</i>	167

INDEX DES TABLEAUX

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA COUPE DES METAUX

Tableau I.1 :	<i>La dureté et les utilisations générales de l'acier [12].</i>	12
Tableau I.2 :	<i>Céramiques utilisées pour les outils de coupe [13].</i>	15
Tableau I.3 :	<i>L'analyse de variance pour la rugosité de surface.</i>	46

CHAPITRE II

APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Tableau II.1 :	<i>Composition chimique de l'acier AISI D3</i>	57
Tableau II.2 :	<i>Informations relatives à la plaquette de coupe.</i>	59
Tableau II.3 :	<i>Caractéristiques géométriques de porte outil.</i>	59
Tableau II.4 :	<i>Réalisation d'essais d'après la méthode uni-factorielle.</i>	66
Tableau II.5 :	<i>Matrice de planification pour un plan de 64 essais</i>	67
Tableau II.6 :	<i>Matrice de planification pour un plan de Taguchi $L_{18} (3^4 \times 2^1)$</i>	69
Tableau II.7 :	<i>Conditions de coupe pour les essais de la rugosité et des efforts de coupe préliminaire</i>	70
Tableau II.8 :	<i>Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan 4^3</i>	70
Tableau II.9 :	<i>Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan Taguchi $L_{18} (3^4 \times 2^1)$</i>	70

CHAPITRE IV

MODÉLISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUE EN UTILISANT LES APPROCHES RSM ET ANN

Tableau IV.1 :	<i>Résultats de la rugosité de surface (R_a) de l'effort de coupe (F_z) et le volume de copeau enlevé (MRR) en fonction des différentes combinaisons des conditions de coupe.</i>	99
Tableau IV.2 :	<i>Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité (R_a)</i>	101
Tableau IV.3 :	<i>Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort de coupe tangentiel (F_z)</i>	105
Tableau IV.4 :	<i>Analyse de la variance (ANOVA) pour le volume de copeau enlevé (MRR)</i>	110
Tableau IV.5 :	<i>Conditions d'optimisation</i>	116
Tableau IV.6 :	<i>Optimisation simultanée pour la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé en utilisant la fonction de désirabilité.</i>	116
Tableau IV.7 :	<i>Résultats expérimentaux et prédites du modèle ANN de la rugosité de surface</i>	123
Tableau IV.8 :	<i>Valeurs statistique du modèle (ANN) de la rugosité de surface</i>	124
Tableau IV.9 :	<i>Résultats expérimentaux et prédites du modèle ANN du volume de copeau enlevé</i>	126
Tableau IV.10 :	<i>Valeurs statistique du modèle (ANN) du volume de copeau enlevé</i>	128
Tableau IV.11 :	<i>Coefficients de corrélation pour (RSM et ANN)</i>	129

CHAPITRE V

OPTIMISATION MONO ET MULTI-OBJECTIVE DES PARAMÈTRE D'USINAGE EN
UTILISANT LA MÉTHODE DE TAGUCHI ET GRA

Tableau V.1 :	<i>Résultats expérimentaux pour la rugosité de surface, l'effort tangentiel, l'effort spécifique, la puissance de coupe, le volume de coupe enlevé et la vibration axiale et tangentielle.</i>	138
Tableau V.2 :	<i>Analyse de la variance pour S/N (Ra).</i>	140
Tableau V.3 :	<i>Analyse de la variance pour S/N (Fz).</i>	142
Tableau V.4 :	<i>Analyse de la variance pour S/N (Ks).</i>	143
Tableau V.5 :	<i>Analyse de la variance pour S/N (Pc).</i>	144
Tableau V.6 :	<i>Analyse de la variance pour S/N (Va).</i>	144
Tableau V.7 :	<i>Analyse de la variance pour S/N (Vt).</i>	145
Tableau V.8 :	<i>Analyse de la variance pour S/N (MRR).</i>	146
Tableau V.9 :	<i>tableau de réponse des S/N pour: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.</i>	164
Tableau V.10 :	<i>Résultats de la génération relationnelle grise, calcul de $\Delta_{oi}(k)$, coefficient relationnel gris et grade relationnel gris.</i>	166
Tableau V.11 :	<i>Moyenne du rapport GRG pour chaque niveau des paramètres d'usinage.</i>	167
Tableau V.12 :	<i>Résultats des tests de confirmation pour: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.</i>	169
Tableau V.13 :	<i>Résultats des expériences de confirmation de GRG</i>	171

Nomenclatures

V_c	Vitesse de coupe [m/min]
f	Avance par tour [mm/tr]
ap	Profondeur de passe [mm]
$F_x (F_a)$	Effort de coupe axial [N]
$F_y (F_r)$	Effort de coupe radial [N]
$F_z (F_t)$	Effort de coupe tangentiel [N]
$F_{rés}$	Effort de coupe résultant [N]
MRR	Volume de copeau enlevé (Débit de copeau) [cm ³ /min]
P_c	Puissance de coupe [W]
K_s	Effort spécifique (Pression de coupe) [MPa] ou [N/mm ²]
HB	Dureté Brinell
HRC	Dureté Rockwell
R_a	Rugosité moyenne arithmétique [μ m]
R_t	Rugosité totale [μ m]
R_q	Rugosité moyenne quadratique du profil [μ m]
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité [μ m]
VB	Usure en dépouille [mm]
t	Temps d'usinage [min]
V_a	Vibration axiale [m/s ²]
V_t	Vibration tangentielle [m/s ²]
r_ϵ	Rayon de bec de l'outil [mm]
A	Section du copeau [mm ²]
$ANOVA$	Analyse de la variance
SS	Somme des carrés
MS	Les carrés moyens
$Cont.\%$	Pourcentage de contribution
DL	Degré de liberté
F	Valeur de Fisher
R^2	Coefficient de détermination
S/N	Rapport signal sur bruit [dB]
MSR	Méthodologie de surface de réponse
ANN	Réseau de neurones artificiels
GRA	Analyse Relationnelle Grise
GRC	Coefficient relationnel gris
GRG	Grade relationnel gris

Symboles

χ_r	Angle de direction principal [°]
α	Angle de dépouille principal [°]
β	Angle de tranchant [°]
γ	angle d'attaque [°]
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [°]
α'	Niveau de signification

TABLE DES MATIÈRES

<i>Dédicace</i>	II
<i>Remerciement</i>	III
<i>Résumé</i>	IV
<i>Index des figures</i>	VII
<i>Index des tableaux</i>	XII
<i>Nomenclatures et Symboles</i>	XIV
<i>Table des matières</i>	XV
<i>Introduction générale</i>	1

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA COUPE DES METAUX

I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralité sur la coupe des métaux.....	3
I.3 Généralités sur l'usinage.....	3
I.3.1 Le procédé de tournage.....	4
I.3.2 Opérations de bases en tournage.....	5
I.4 Usinabilité et caractéristiques des matériaux.....	6
I.4.1 Définition de l'usinabilité.....	6
I.4.2 Critère d'évaluation de l'usinabilité.....	7
I.4.3 Caractéristiques des matériaux influençant l'usinabilité.....	8
I.5 Matériaux de coupe.....	8
I.5.1 Introduction.....	8
I.5.2 Caractéristiques d'un matériau de coupe.....	9
I.5.3 Classification des matériaux des outils de coupe.....	10
I.5.3.1 Acier Rapides Supérieurs (ARS)	10
I.5.3.2 Acier au carbone.....	11
I.5.3.3 Acier allié.....	11
I.5.3.4 Acier rapide.....	11
I.5.3.5 Les carbures métalliques.....	12
I.5.3.6 Cermets.....	14
I.5.3.7 Les céramiques de coupe.....	14
I.5.3.8 Le nitrure de bore cubique (CBN)	15
I.5.3.9 Le diamant.....	16
I.6 Endommagement des outils de coupe.....	16
I.6.1 L'usure des outils.....	16
I.6.1.1 Mécanisme et forme d'usure.....	17
I.6.1.2 Analyse des critères d'usure	18
I.6.2 Usure des arêtes de coupe.....	18
I.6.2.1 Usure en dépouille.....	18
I.6.2.2 Usure en cratère.....	19
I.6.2.3 Arête rapportée.....	19
I.6.2.4 Usure en entaille.....	19
I.6.2.5 Déformation plastique.....	20

I.6.2.6 Usure en peigne.....	20
I.6.2.7 Ecaillage ou rupture de l'arête.....	20
I.7 Etat de surface des pièces mécanique.....	22
I.7.1 Généralités sur les états de surface.....	22
I.7.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques.....	22
I.7.2.1 Définitions de la rugosité.....	22
I.7.3 État de surface en tournage.....	23
I.7.4 Caractéristiques de la surface.....	24
I.8 Efforts de coupe.....	25
I.8.1 Définition et intérêt de leur mesure.....	25
I.9 Vibrations en usinage.....	27
I.9.1 Les effets des vibrations sur le processus de coupe.....	27
I.9.2 Influence des différents facteurs sur les vibrations.....	28
I.9.3 Comment limiter le broutement : (la recherche de la stabilité d'usinage).....	29
I.10 Le couple outil-matière (C.O.M.)	30
I.10.1 Généralités.....	30
I.11 Planification expérimentale.....	33
I.11.1 Plans d'expériences.....	35
I.11.1.1 Terminologie (Réponses, facteurs, niveaux).....	35
I.11.1.2 Notion d'espace expérimental.....	36
I.12 Travaux de recherche (état de l'art)	39
I.13 Conclusion.....	55

CHAPITRE II

APPROCHE EXPÉRIMENTALE

II.1 Introduction.....	56
II.2 Matériels utilisés.....	56
II.2.1 Machine-outil.....	56
II.2.2 Matériau à usiner.....	57
II.2.3 Outils de coupes utilisés.....	58
II.2.3.1 Plaquette de coupe.....	58
II.2.3.2 Portes outils.....	59
II.2.4 Appareillage de mesures utilisées.....	60
II.2.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	60
II.2.4.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	62
II.2.4.3 Mesure des vibrations.....	64
II.2.4.4. Microscope pour la mesure de l'usure.....	65
II.2.4.5 Autres équipements.....	65
II.3 Planification des expériences.....	66
II.3.1 Méthode de planification des expériences.....	66
II.3.1.1 Méthode uni-factorielle.....	66
II.3.1.2 Méthode multifactorielle	67
II.3.1.3 Conditions de coupe.....	70
II.4 Conclusion.....	70

CHAPITRE III**ÉTUDE DE L'USINABILITÉ DE L'ACIER FORTEMENT ALLIÉ (AISI D3)**

III.1 Introduction.....	71
III.2 Evolution des paramètres technologiques en fonction des paramètres de coupe.....	71
III.2.1 Evolution de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe.....	71
III.2.1.1 Influence de la vitesse de coupe.....	71
III.2.1.2 Influence de l'avance de l'outil.....	71
III.2.1.3 Influence de la profondeur de passe.....	72
III.2.2 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe.....	73
III.2.2.1 Influence de la vitesse de coupe.....	73
III.2.2.2 Influence de l'avance de l'outil.....	73
III.2.2.3 Influence de la profondeur de passe.....	75
III.2.3 Evolution de l'effort résultant en fonction des paramètres de coupe.....	76
III.2.3.1 Influence de la vitesse de coupe.....	76
III.2.3.2 Influence de l'avance de l'outil.....	77
III.2.3.3 Influence de la profondeur de passe.....	77
III.2.4 Evolution de l'effort spécifique en fonction des paramètres de coupe.....	78
III.2.4.1 Influence de la vitesse de coupe.....	79
III.2.4.2 Influence de l'avance de l'outil.....	79
III.2.4.3 Influence de la profondeur de passe.....	80
III.2.5 Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe.....	81
III.2.6 Evolution du volume de copeau enlevé en fonction des paramètres de coupe.....	83
III.2.7 Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage.....	85
III.2.8 Evolution de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage.....	87
III.2.9 Evolution de la rugosité de surface en fonction de l'usure.....	88
III.2.10 Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de l'usure et du temps d'usinage.....	89
III.3 Conclusion.....	91

CHAPITRE IV**MODÉLISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUE EN UTILISANT LES APPROCHES RSM ET ANN**

IV.1 Introduction.....	93
IV.2 La méthodologie des surfaces de réponse	93
IV.2.1 Les principes généraux.....	93
IV.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse.....	93
IV.2.3 Les étapes de la RSM	94
IV.2.3.1 Planification expérimentale.....	94
IV.2.3.2 Modélisation.....	94
IV.2.3.2.1 Validation des modèles.....	96
IV.3 Résultats et discussion.....	98
IV.3.1 Modélisation de la rugosité de surface en fonction des paramètres d'usinage.....	100
IV.3.1.1 Analyse de la variance pour la rugosité de surface (Ra).....	100

IV.3.1.2	Analyse de régression.....	101
IV.3.1.3	Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour (Ra).....	102
IV.3.1.4	Comparaison entre les valeurs de la rugosité de surface (Ra) expérimentales et estimés.....	102
IV.3.1.5	Graphique des effets principaux pour Ra.....	103
IV.3.1.6	Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe....	104
IV.3.2	Modélisation de l'effort de coupe tangentiel en fonction des paramètres d'usinage.....	105
IV.3.2.1	Analyse de la variance pour l'effort de coupe tangentiel (Fz).....	105
IV.3.2.2	Analyse de régression.....	106
IV.3.2.3	Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour (Fz).....	106
IV.3.2.4	Comparaison entre les valeurs de l'effort de coupe tangentiel (Fz) expérimentales et estimés.....	106
IV.3.2.5	Graphique des effets principaux pour Fz.....	107
IV.3.2.6	Evolution de l'effort Fz en fonction des paramètres du régime de coupe.....	108
IV.3.3	Modélisation du volume de copeau enlevé en fonction des paramètres d'usinage.....	109
IV.3.3.1	Analyse de la variance pour le volume de copeau enlevé (MRR).....	109
IV.3.3.2	Analyse de régression.....	110
IV.3.3.3	Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour (MRR).....	111
IV.3.3.4	Comparaison entre les valeurs de l'effort de coupe tangentiel (MRR) expérimentales et estimés.....	111
IV.3.3.5	Graphique des effets principaux pour MRR.....	112
IV.3.3.6	Evolution du MRR en fonction des paramètres du régime de coupe.....	113
IV.3.4	Optimisation des réponses par la fonction de désirabilité.....	114
IV.3.4.1	Optimisation des conditions de coupe.....	115
IV.3.5	Réseaux de neurones artificiels (ANN).....	117
IV.3.5.1	Calcul de la valeur prédite.....	118
IV.3.5.2	Les neurones formels.....	119
IV.3.5.3	Différentes fonctions de transfert.....	120
IV.3.5.4	Perceptron simple.....	120
IV.3.5.5	Perceptron multicouches.....	121
IV.3.5.6	Algorithme de rétro-propagation.....	121
IV.3.5.7	Apprentissage.....	121
IV.3.5.8	Modélisation de la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé par ANN.....	122
IV.3.5.8.1	Modélisation de la rugosité de surface (Ra).....	122
IV.3.5.8.2	Modélisation du volume de copeau enlevé (MRR).....	126
IV.3.5.9	Comparaison entre les modèles ANN et RMS.....	129
IV.4	Conclusion.....	130

CHAPITRE V

OPTIMISATION MONO ET MULTI-OBJECTIVE DES PARAMÈTRE D'USINAGE EN UTILISANT LA MÉTHODE DE TAGUCHI ET GRA

V.1. Introduction.....	132
V.2 Description de la méthode de Taguchi.....	132
V.3 Description de l'analyse relationnelle grise (GRA).....	134
V.4 Optimisation par l'analyse relationnelle grise basé sur la planification de Taguchi.....	136
V.5 Analyse multi-objective des résultats expérimentaux basé sur le plan de Taguchi L ₁₈	137
V.6 Analyse de la variance (ANOVA).....	137
V.6.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N(Ra).....	139
V.6.2 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N(Fz).....	142
V.6.3 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N(Ks).....	142
V.6.4 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N(Pc).....	143
V.6.5 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N(Va).....	143
V.6.6 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N(Vt).....	145
V.6.7 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N(MRR).....	145
V.7 Analyse de Pareto.....	146
V.8 Effet des interactions sur les réponses (tracés 3D et contours).....	149
V.9 Analyse de régression.....	151
V.10 Optimisation des paramètres d'usinage.....	158
V.10.1 Optimisation mono-objective des paramètres technologiques en utilisant la méthode de Taguchi.....	158
V.10.2 Optimisation multi-objective des paramètres technologiques en utilisant l'Analyse Relationnelle Grise (GRA).....	165
V.11 Tests de confirmation.....	168
V.11.1 Tests de confirmation du régime optimal pour l'optimisation mono-objective.....	168
V.11.2 Tests de confirmation du régime optimal pour l'optimisation multi-objective.....	170
V.12 Conclusion.....	171
<i>Conclusion générale et perspectives</i>	174
<i>Références bibliographiques</i>	179

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La fabrication comprend divers types de procédés et les processus de fabrication actuelle sont pris entre les besoins croissants de qualité, haute sécurité des processus, un minimum de coûts de fabrication et délais de fabrication courts. Afin de répondre aux exigences, les paramètres du processus de fabrication doivent être choisis dans la meilleure manière possible. La sélection des paramètres optimaux de processus joue un rôle important pour assurer la qualité du produit, de réduire le coût de fabrication et d'accroître la productivité dans le processus de fabrication. Pour une telle optimisation, il est nécessaire de représenter le processus de fabrication dans un modèle. Cependant, le défi principal pour l'optimisation des processus de fabrication provient souvent du fait que la procédure est en générale fortement contrainte et hautement non linéaire. En outre, les modèles de processus de fabrication sont probablement discontinus, non-explicites ou, pas dérivables analytiquement avec les variables de planification. En raison de l'énorme complexité de nombreux processus de fabrication et du nombre élevé des paramètres d'influence, les approches classiques de la modélisation et de l'optimisation ne sont plus suffisantes. Des techniques avancées de modélisation et d'optimisation sont nécessaires pour être développées et utilisées car la modélisation et l'optimisation des processus de fabrication deviennent de plus en plus importantes dans l'industrie dans le sens de la «fabrication agile». C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche de cette thèse qui est répartie en cinq chapitres:

Dans le premier chapitre de la thèse nous avons présenté une synthèse bibliographique et des définitions techniques relatives à la coupe des métaux. Ensuite on a traité les phénomènes régissant le processus de coupe en particulier, l'usure des outils, la rugosité de surface, les efforts de coupe et les vibrations générées en usinage. Aussi, nous avons fait une description de la planification expérimentale. La dernière partie de ce chapitre est réservée pour exposer les travaux de recherche relatifs au tournage des aciers fortement alliés, l'utilisation des plans d'expérience et les méthodes statistiques de modélisation et d'optimisation, soit conventionnelle ou non-conventionnelle.

Le deuxième chapitre est réservé à la description des équipements exploités et les conditions expérimentales utilisées lors de la réalisation des essais. Les dispositifs de mesure et le couple outil - matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

Dans le troisième chapitre, nous avons exposé les résultats des essais préliminaires (unifactoriels) pour le couple d'usinage (Acier AISI D3/ carbure revêtu en CVD 'GC4215') afin de déterminer le comportement des paramètres technologiques qui sont : la rugosité de surface, les composantes de l'effort de coupe, l'effort résultant, la pression spécifique, la puissance de coupe, le volume de copeau enlevé et cela en fonction du changement des paramètres de coupe tels que : la

vitesse de coupe (V_c), l'avance de l'outil (f) et la profondeur de passe (ap). Aussi nous avons présenté également les résultats de l'évolution de l'usure d'outil en fonction du temps d'usinage et aussi l'impact de ces deux derniers sur la rugosité de surface et sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe.

Le quatrième chapitre a été dédié à la présentation d'une étude statistique basé sur la méthodologie de la surface de réponse (RSM) des résultats trouvés expérimentalement afin de quantifier les effets des paramètres de coupe qui sont (V_c, f et ap) sur les paramètres technologiques (R_a, F_z , et MRR) par l'analyse de la variance (ANOVA) lors de l'usinage de l'acier AISI D3 avec un outil en carbure revêtu en CVD (GC4215). Aussi, Nous avons déterminé des modèles mathématiques pour exprimer la relation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques étudiés, ainsi que les graphes en 3D. Ce chapitre présente aussi une optimisation multi-objective nommée (fonction de désirabilité) des paramètres technologiques étudiés pour le choix optimal des conditions de coupe. La fin du chapitre est réservée à la modélisation de la qualité de surface (R_a) et la productivité (MRR) par une méthode d'intelligence artificielle nommé les réseaux de neurones artificiels (ANN).

Dans le cinquième chapitre nous exposons les résultats d'une étude d'optimisation (mono et multi) objective basée sur un plan d'expérience réduit et mixte de Taguchi L_{18} pour le couple d'usinage (Acier AISI D3/ céramique mixte CC650) afin de déterminer le régime optimal. Les paramètres de coupe pris en compte lors de cette étude sont les suivants: (χ_r, r, V_c, f et ap) car les paramètres technologiques étudiés sont : ($R_a, F_z, K_s, P_c, V_a, V_t$ et MRR). Pour l'optimisation mono-objective des paramètres technologiques, nous avons utilisé l'approche de Taguchi basée sur l'analyse du rapport signal/bruit (S/N). Par contre l'optimisation multi-objective a été réalisée par la méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA) seulement pour deux paramètres technologiques qui sont (la qualité de surface et la productivité). Les régimes optimaux trouvés par les méthodes d'optimisation utilisés dans les deux cas sont confirmé par des tests de confirmation. Dans ce chapitre on présente aussi d'une part, l'analyse de variance des rapports signal sur bruit (S/N) pour les paramètres technologiques étudiés et le graphe de Pareto qui permet d'évaluer les effets principaux des paramètres de coupe ainsi que ceux de leurs interactions sur les facteurs étudiés. D'une autre part nous avons présenté des modèles mathématiques par l'analyse de régression.

Cette thèse de doctorat termine par une conclusion générale qui expose une synthèse des résultats obtenus durant se travail de recherche ainsi que les perspectives suivi d'une liste des références bibliographiques.

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA COUPE DES METAUX

Ce chapitre commence par un aperçu sur des généralités de la coupe des métaux tels que : la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité des aciers et les nouvelles perspectives de développement des matériaux à outils. Il traite aussi les paramètres technologiques d'usinage intervenant dans le processus de coupe. Ce point est suivi par une description de la planification expérimentale. En dernier lieu, un état d'art sur l'usinage des aciers, l'utilisation des plans d'expérience et les méthodes statistiques de modélisation et d'optimisation conventionnelles et non- conventionnelles, a été abordé.

I.1 Introduction

Depuis toujours, le fabricant essaye dans les stratégies d'optimisation des processus d'usinage actuellement préconisées visent à l'augmentation de la productivité, de la qualité de surface, ou à réduire les coûts par plusieurs voies, recherche du débit optimal d'enlèvement de matière, amélioration de la précision de l'usinage, réduction du nombre d'opérations (traitement thermique et rectification finale par exemple) et recherche d'une plus grande fiabilité au niveau des propriétés d'usage des pièces usinées. Il est important d'utiliser un matériau de coupe et une géométrie de plaquette adaptée à la matière à usiner pour obtenir un processus d'usinage productif et exempt de problèmes. D'autres paramètres, tels que les conditions de coupe, la trajectoire d'outil, etc. doivent aussi être pris en compte pour obtenir de bons résultats.

I.2 Généralité sur la coupe des métaux

Il est important de délimiter clairement le domaine de la coupe des métaux et celui très voisin de l'étude de l'usinabilité. La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe sur le comportement d'un matériau (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, arrosage...) en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) et de géométries différentes. Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage [1].

I.3 Généralités sur l'usinage

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de matière (formation de copeaux) en utilisant un outil coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil-matière, c'est-à-dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de passe ... etc.). On cherche depuis toujours des solutions pour améliorer ses performances, afin de faire face à des défis lancés par les autres technologies de fabrication mécanique.

Les techniques d'usinage sont nombreuses, la plupart pouvant être appliquées aux aciers. Nous les diviserons en deux catégories :

➤ Usinages par méthodes non traditionnelles

Ces méthodes sont classées en fonction des mécanismes physiques mis en jeu :

- ❖ méthodes thermiques, utilisant : les faisceaux d'électron, le plasma, le laser ;
- ❖ méthodes chimiques, entre autre la dissolution chimique, l'usinage électrochimique ;
- ❖ méthodes mécaniques, à savoir les jets liquides avec abrasifs, les ultrasons.

➤ Usinages par outils coupants (méthodes traditionnelles)

Nous limiterons à ces méthodes d'usinage, qui resteront pour longtemps encore le moyen privilégié d'usinage des aciers. L'enlèvement de matière par un outil coupant peut être obtenu par diverses méthodes, principalement fonction des caractéristiques géométriques de la pièce à réaliser : tournage, fraisage, filetage, perçage, alésage, taraudage, opérations de décolletage (chariotage, fonçage, tronçonnage, perçage, ... etc.).

Durant notre étude, nous nous intéresserons plus précisément à la technique d'enlèvement de matière par tournage. La productivité, la qualité des surfaces générées, le temps et les coûts de fabrication sont les critères qui décident du choix de procédé de fabrication le plus adéquat.

I.3.1 Le procédé de tournage

Le tournage est un procédé de mise en forme par enlèvement de matière. Il fait intervenir un outil de coupe à arête unique qui enlève de la matière sur une pièce mise en rotation. La matière enlevée est évacuée sous forme de copeau. Les paramètres de coupe sont les grandeurs que l'on peut contrôler lors d'une opération. Ils conditionnent les phénomènes mécaniques mis en jeu au cours de la coupe et sont à l'origine des puissances mécaniques et thermiques dissipées.

En tournage, dans une opération de chariotage par-axial : la pièce et l'outil sont respectivement animés par un mouvement de rotation autour d'un axe bien défini et par un mouvement de déplacement parallèle à cet axe (*fig. I.1*). La rotation de la pièce définit la vitesse de coupe, quant au déplacement de l'outil, il définit la vitesse d'avance. La configuration de ces deux mouvements associés à la géométrie de l'outil permet d'obtenir la création du copeau [2, 3].

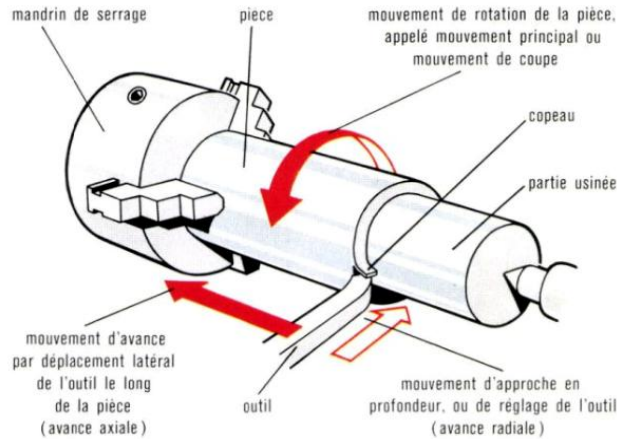


Figure I.1 : Représentation du tournage (chariotage).

I.3.2 Opérations de bases en tournage

En tournage, les pièces complexes sont facilement décomposables en profils de coupe élémentaire. Chacun de ces profils correspondant à une des quatre opérations de bases existant en tournage :

- **Le tournage longitudinal ou chariotage (1)** : où le mouvement d'avance correspond à une translation rectiligne de l'outil parallèlement à l'axe de révolution de la pièce, ce qui permet de réaliser des cylindres.
- **Le dressage (2)** : où le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculairement à l'axe de révolution de la pièce, ce qui permet d'ajuster la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe.
- **Le tournage de cônes (3)** : combine les deux types d'opérations précédentes pour générer des cônes de révolution.
- **Le contournage (4)** : consiste à imposer une trajectoire plane quelconque à l'outil, des formes de révolution quelconques peuvent alors être réalisées.

Toutes les opérations présentées dans (*fig. I.2*) correspondent à un usinage dit de génération ou d'enveloppe, car la forme obtenue n'est pas générée par la forme de l'outil. En d'autres termes la forme dépend uniquement de la trajectoire de l'outil. Lorsque des formes sont obtenues par reproduction du profil de l'outil dans la pièce, il s'agit d'usinage de forme. Les travaux de forme classiques sont le filetage ou encore la réalisation de gorges [4].

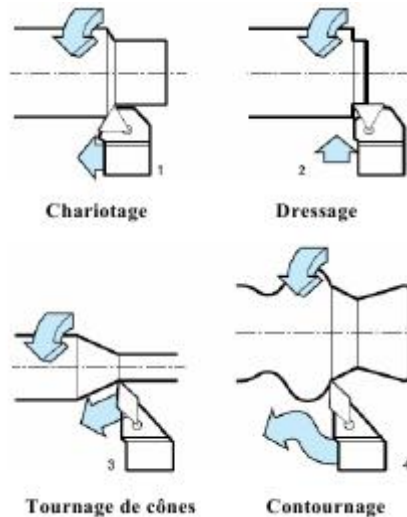


Figure I.2 : Les opérations classiques en tournage [5].

I.4 Usinabilité et caractéristiques des matériaux

I.4.1 Définition de l'usinabilité

L'usinabilité n'a pas de définition formelle basée sur les nuances ou sur des chiffres. Dans son sens le plus large, l'usinabilité désigne la possibilité d'usiner une matière, l'usure qu'elle occasionne sur les arêtes de coupe et la formation des copeaux qui la caractérise. Dans ce sens, un acier bas carbone est plus facile à usiner qu'un acier fortement alliés. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers fortement alliés. Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une durée de vie d'outil correcte. Le plus souvent l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables. D'autres facteurs tels que la microstructure, la tendance au collage, la machine-outil utilisée, la stabilité, le bruit, la durée de vie d'outil, etc. sont aussi pris en compte.

Selon les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux, l'usinabilité est définie aussi sous différentes formes:

- L'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée [6].
- l'usinabilité ou l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage. Il ne s'agit pas d'une propriété simple de la matière, elle n'est pas une grandeur mesurable. L'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité, plus ou

moins grande, d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux à une forme et à des côtes fixes [7].

- La notion d'usinabilité décrit l'aptitude d'un matériau, compte tenu de toutes ses propriétés, à être mis en forme par outil coupant [8].

I.4.2 Critères d'évaluation de l'usinabilité

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Selon les chercheurs qui ont investigué la notion de l'usinabilité, on trouve une variété des critères de son évaluation.

- Selon CZAPLICKI A [6] : les critères d'évaluation de l'usinabilité sont:
 - ✓ Durée de vie d'outil coupant permettant la production maximale;
 - ✓ Les efforts de coupe donnant une indication sur la puissance nécessaire à la broche de la machine-outil;
 - ✓ Le fini des surfaces usinées permettant de choisir les conditions de coupe en fonction de la destination finale de la pièce usinée.
- Selon MATHON P [9] : Les principaux critères sont classés selon l'ordre suivant:
 - ✓ La rugosité de la surface usinée, définissant l'aptitude au fini de surface;
 - ✓ La force de coupe définissant la résistance de la coupe;
 - ✓ La durée de vie de l'outil, ou la vitesse de coupe permettant d'obtenir une durée d'outil donnée ou l'usure pour un temps donné. Par contre d'autre chercheur prennent l'usure comme l'effet le plus observable;
- Selon ROBELET M [10] : Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont:
 - ✓ L'usure de l'outil;
 - ✓ L'effort de coupe;
 - ✓ La température de coupe;
- La majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères ordonnés comme suit :
 - ✓ La tenue de l'outil, ou un critère dépendant (VB);
 - ✓ Les efforts des coupes;
 - ✓ La qualité de la surface usinée;

- L'absence de la température de coupe prouve qu'il s'agit d'un effet perturbateur lié fortement avec les critères:
 - ✓ Usure ;
 - ✓ Effort de coupe;

I.4.3 Caractéristiques des matériaux influençant l'usinabilité

Plusieurs Caractéristiques des matériaux influencent l'usinabilité et ce, de plusieurs façons:

- Dureté
- Propriétés mécaniques
- Composition chimique
- Microstructure
- Rigidité de la pièce
- Susceptibilité à l'écaillage
- Degré de travail à froid
- Forme et dimension de la partie usinée

I.5 Matériaux de coupe

I.5.1 Introduction

Les matériaux de coupe contemporains sont le résultat d'un long développement. Grâce à ce développement, les opérations d'usinage qui demandent une centaine de minutes en 1900 peuvent prendre actuellement moins d'une minute. L'importance des matériaux à outil de coupe ne peut pas être surestimée, parce que le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances des outils de coupe.

Pour choisir un outil de coupe convenable, il faut prendre en compte plusieurs facteurs comme : la nature de l'opération de coupe (ébauche ou finition, précision demandée, coupe continue ou intermittente), la forme et la matière de la pièce (structure, dureté, résistance, état de couche superficielle, affinité chimique, inclusions), le type de machine-outil (puissance, rigidité, capacité), les conditions de coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe), l'état de surface demandé (rugosité, contraintes résiduelles) et les coûts associés à cette opération. Étant donné le nombre de facteurs à considérer et la difficulté de les définir précisément, le choix d'un outil de coupe devient un problème très complexe [11, 12].

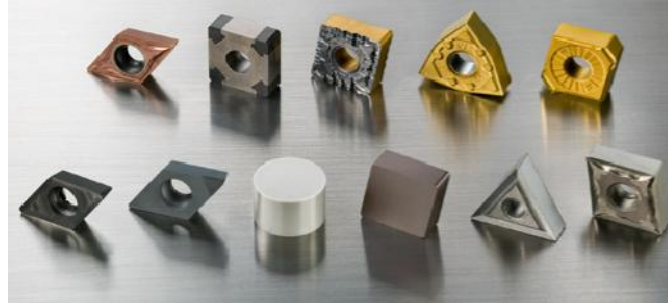


Figure I.3 : Matériaux de coupe.

I.5.2 Caractéristiques d'un matériau de coupe

Les caractéristiques recherchées dans un matériau de coupe peuvent être résumées comme suit [11]:

- posséder une dureté permettant de résister à l'usure et à la déformation, même à une température élevée,
- posséder une ténacité élevée pour résister à la rupture,
- être chimiquement inerte vis à vis du matériau usiné,
- être chimiquement stable pour résister à l'oxydation et à la dissolution,
- offrir une bonne conductibilité thermique et une bonne résistance aux chocs thermiques.

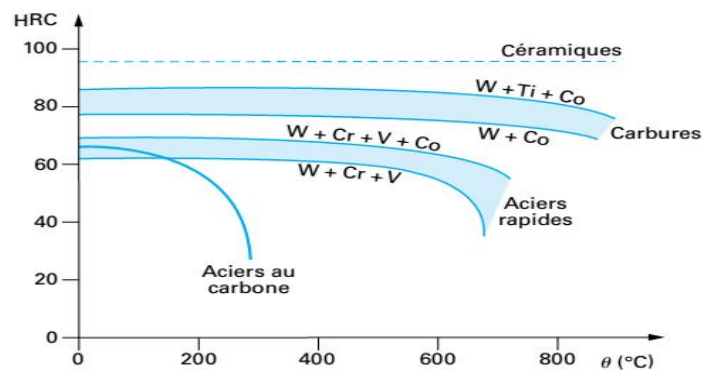


Figure I.4 : Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe [13].

I.5.3 Classification des matériaux des outils de coupe

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure (*fig. I.5*). Ils sont divisés en un grand nombre de nuances dotées de propriétés spécifiques. De manière générale, les matériaux de coupe doivent posséder les propriétés suivantes :

- Dureté : résistance à l'usure en dépouille et à la déformation ;
- Ténacité : résistance à la rupture ;
- Neutralité chimique : absence de réaction chimique avec la matière à usiner ;
- Stabilité chimique : résistance à l'oxydation et à la diffusion ;
- Résistance aux variations thermiques brusques [14].

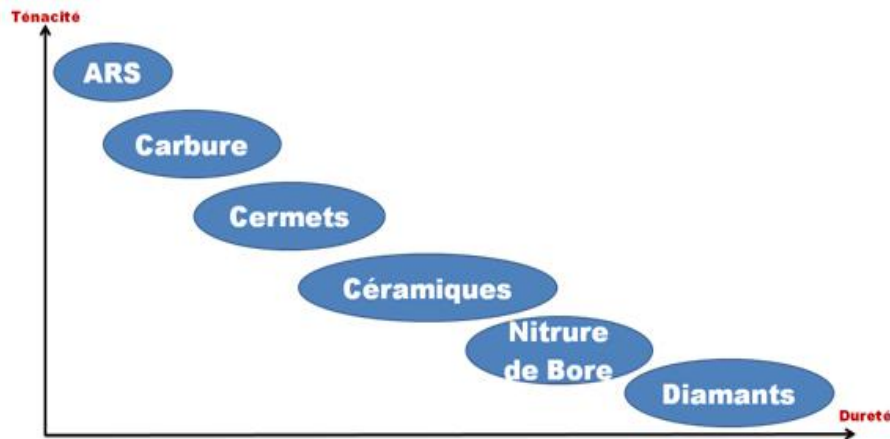


Figure I.5 : Classification des matériaux de coupe.

Les matériaux de coupe utilisés en tournage des pièces peuvent être classés en plusieurs groupes: les aciers rapides, les aciers rapides revêtus, les aciers rapides frittés, les carbures métalliques, les carbures micro-grains, les cermets, les céramiques, le Nitrure de Bore Cubique (CBN) et les diamants [11, 15, 16].

I.5.3.1 Acier Rapides Supérieurs (ARS)

Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forets, ou les outils nécessitant un angle de tranchant très faible.

Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement rapide de l'arête de coupe.

Fabrication: par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres.

Composition: 0,7 % de C, minimum 4 % de Chrome environ Tungstène, Molybdène, Vanadium, Cobalt pour les plus durs.

Dureté: de 63 à 66 HRC.

I.5.3.2 Acier au carbone

Ces outils sont constitués en acier au carbone non allié à forte teneur en carbone C= 0,8 à 1,4% trempé à l'eau à 750-800 °C et revenu à 180 °C, ils permettent de travailler à des vitesses de coupe de l'ordre de 10 m/min, et ne résistent pas à des t° de coupe supérieures à 200-300 °C. Leur dureté et comprise entre 57-65 HRC plus le % de C est élevé plus la dureté des outils est élevée. Ils sont utilisés comme outils à main – lime – tarauds [16].

I.5.3.3 Acier allié

C'est un acier contenant des éléments d'addition tels que: tungstène, chrome, vanadium, molybdène, silicium, manganèse. Les aciers alliés résistent à une t° allant de 250-300°C, ils permettent une vitesse de coupe allant jusqu'à 20 m/min dans l'acier. Leur dureté varie de 59 à 65 HRC, ils sont surtout utilisés pour les outils manuels et les petits outils travaillant l'acier doux, (Forêt – alésoir) [16].

Exemple : 100Cr6 (1 % de carbone; 1,5% chrome).

35CrDo4 (0,35 % de carbone; 1 % de chrome).

I.5.3.4 Acier rapide

C'est un acier fortement allié, contenant des proportions importantes de tungstène, Cr, Va, Co. Un des plus classiques parmi eux est l'acier rapide contenant W 18%, Cr 4%, Va 1%, C= (0,5 à 0,8%). Ces outils subissent une trempe à 1350 °C est un revenu à 600 C°. La dureté des aciers rapide varie de 62-65 HRC, ils permettent une vitesse de coupe allant jusqu'à 40 m/min, ils peuvent supporter une t° allant jusqu'à 600 °C [16].

Bien que leurs performances soient relativement faibles, ils sont encore utilisés dans les domaines :

- Des outils à tranchants multiples (fraises, tarauds, forets, etc.),
- Des outils de forme complexe,
- Des outils à tranchants unique utilisés pour la fabrication des outillages.

Il est nécessaire de choisir une nuance d'acier rapide adaptée aux travaux à réaliser (**Tableau I.1**). Une révolution importante semble se dessiner avec l'introduction sur le marché des outils en aciers rapides revêtu d'une couche de nitrure de titane dans la dureté (HRC = 80) permet une meilleure résistance à l'usure et à la corrosion (50 à 300 %) [12].

Tableau I.1 : La dureté et les utilisations générales de l'acier [12].

Nuances	Dureté		Utilisations générales
	Rockwell HRC	Wickers HV	
Z 80 WKCV 18 08 04 02	64	806	} Aciers rapides pour toutes opérations courantes d'usinage
Z 150 WKCV 12 05 05 04	66	860	
Z 110 DKCWV 09 08 04 02	68	928	} Aciers rapides pour travaux difficiles, ils possèdent une plus grande résistance à l'abrasion
Z 110 DKCWV 6.5, 05, 04, 3.7, 02	67	890	
Acier rapide revêtu d'une couche de nitrure de titane (ép ^f = 5 µm)	80	1 040	} Travaux difficiles, résistent très bien à l'usure et à l'abrasion

Exemple: X80W18; X80WDo12; X85WK18-10; (18% W; 10% Co).

✓ Les aciers rapides revêtus

On recouvre l'acier rapide d'une fine couche de TiN ou TiCN.

➤ Avantages du revêtement

Les caractéristiques augmentent, elles permettent des conditions de coupes plus élevées. Ce revêtement améliore nettement la durée de vie des outils, grâce à une réduction importante du frottement copeau/outil et pièce/outil. Les résultats sont spectaculaires sur les aciers rapides (certains fabricants de fraises annoncent une augmentation de la durée de vie de 500%).

I.5.3.5 Les carbures métalliques

Les carbures métalliques ont été développés dans les années quarante et ont permis d'augmenter radicalement la vitesse de coupe par rapport aux aciers rapides. Ils sont fabriqués selon la technique de métallurgie de poudres par frittage et sont constitués de particules dures (70 à 90 %) de différents types de carbures agglomérés par l'intermédiaire d'un liant qui donnent la dureté et donc la résistance à l'usure. Ces différents carbures sont principalement des carbures de tungstène (WC) phase (γ) (T° de fusion 2600°), de carbure titane (TiC) (3100°), de carbure tantale (TaC) (3780°) et de carbure de niobium (NbC) (phase γ) (3500°).

Le liant le plus employé est le cobalt (Co) (le plus courant ou nickel) car il dissout facilement différents carbures (phase β) [11, 17].

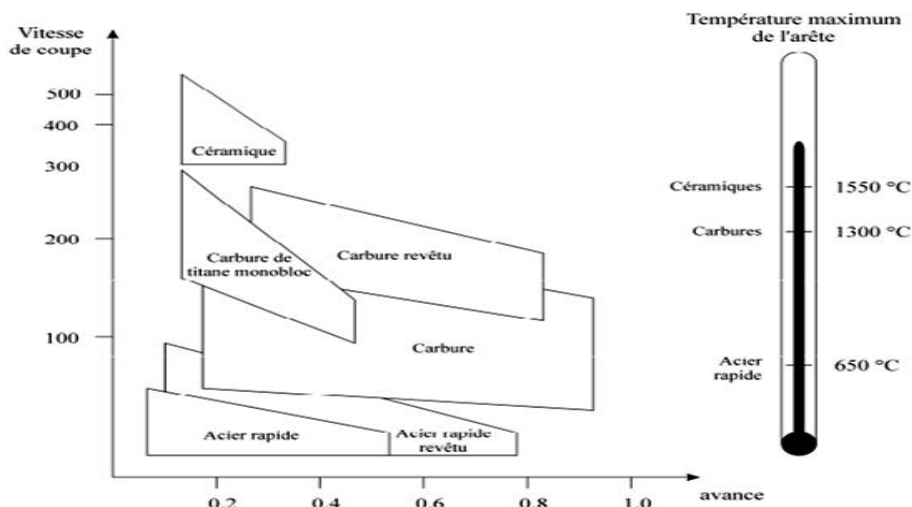


Figure I.6 : Domaines d'utilisation des divers types de matériaux à outils de coupe [13].

Les particules dures sont de dimensions variables, comprises entre 1 et 10 microns. Les carbures métalliques possèdent une dureté (HRA 89 à 93), une résistance à la flexion importante, une bonne conductivité thermique et une petite dilatation thermique, ce qui explique qu'ils sont très répandus dans l'industrie [11].

Étant donné une large utilisation de carbures, il existe un très grand nombre de nuances de carbures pour différentes applications. La classification des carbures a fait l'objet de la norme ISO 513. Les nuances y sont divisées en trois grandes catégories :

- **P (couleur bleue) :** pour l'usinage de métaux à copeaux longs tels que l'acier, l'acier coulé, l'acier inoxydable et la fonte malléable;
- **M (couleur jaune) :** pour l'usinage de métaux plus difficiles tels que l'acier inoxydable austénitique, les matériaux réfractaires, l'acier au manganèse, la fonte alliée, etc.
- **K (couleur rouge) :** pour l'usinage de métaux ferreux à copeaux courts, métaux non ferreux et matières non métalliques tels que la fonte, l'acier trempé, l'aluminium, le bronze, les matières plastiques, les matériaux composites etc.

Dans chaque catégorie, un nombre allant de 01 à 50 indique la ténacité croissante et la diminution de la résistance à l'usure. Par exemple, les carbures d'un groupe P20 sont recommandés pour le tournage, copiage, fraisage, vitesse de coupe et section de copeaux moyennes, rabotage à petite section de copeaux [11, 12].

I.5.3.6 Cermets

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane (Ti), de carbonitride de Titane (TiCN) ou de nitrure de Titane (TiN).

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène (MoC) pour augmenter leur ténacité. La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques [12]. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...).

I.5.3.7 Les céramiques de coupe

Les céramiques (*fig. I.7*) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Ils sont très durs et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe sont réunies dans le (*Tableau I.2*) [13].

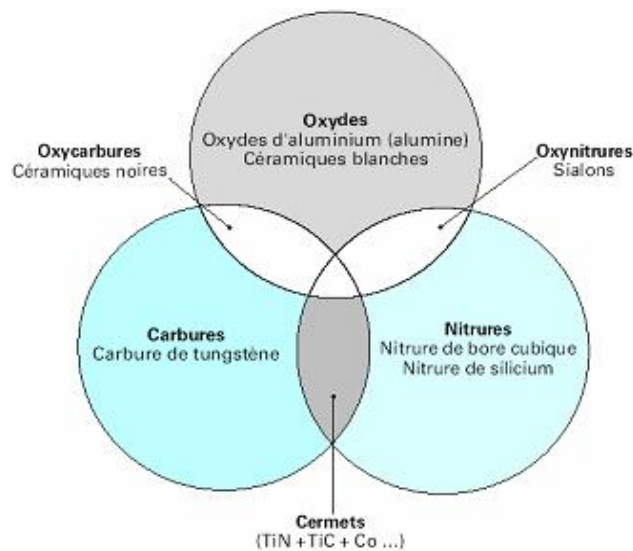


Figure I.7 : Les céramiques. [13]

Les avantages des céramiques sont : leur faible masse volumique et leur température d'utilisation nettement plus élevée que celle des alliages courants. Cependant, leur ténacité, c'est-à-dire leur aptitude à résister aux microfissures en fait leur principale faiblesse.

Tableau I.2 : Céramiques utilisées pour les outils de coupe [13].

Céramiques oxydées	Céramiques mixtes		Céramiques non oxydées
Céramiques Blanches	Céramiques mixtes noires	Céramiques renforcées vertes (whiskers)	Sialons gris
Al ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	Al ₂ O ₃ -TiC (30 %) Al ₂ O ₃ -TiN-TiC Al ₂ O ₃ -WC, TaC	Al ₂ O ₃ -fibres SiC	base Si ₃ N ₄

✓ **Propriétés**

- Température limite d'utilisation 1400°.
- Usinage de matériau dont la dureté maximale est voisin de :
 - 60 HRC pour les céramiques à base d'alumine.
 - 72 HRC pour les céramiques à base de nitrure de bore.
- Absence de copeau adhérent pendant la coupe.
- Très bon acuité de l'arête de coupe, ce qui autorise éventuellement un copeau minimum d'épaisseur voisin de 0,01 mm.
- Obtention d'une bonne rugosité ($Ra = 0,8 \mu m$).
- Utilisation de vitesse de coupe 3 à 5 fois supérieurs à celles admise pour les carbures.
- Elles ont l'inconvénient d'être d'une utilisation plus délicate que celle des carbures, par exemple :
 - elles sont plus sensibles aux chocs,
 - elles nécessitent des machines robustes et puissantes [12].

I.5.3.8 Le nitrure de bore cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique est un matériau de synthèse dont les propriétés sont voisines de celles du graphite. Sous l'effet de températures très élevées (supérieures à 1500°C) et de pressions importantes comprises (entre 50 et 100 bars), le nitrure de bore cubique subit une transformation structurale (passage d'une structure hexagonale à une structure cubique), qui lui confère une grande dureté [16].

Le nitrure de bore cubique est le second des matériaux les plus durs connus, juste après le diamant, il est donc plus résistant à l'usure que les céramiques ou les carbures métalliques. Le CBN ne réagit pas avec les alliages ferreux et il est thermiquement stable

jusqu'à 1400°C. Le CBN peut donc usiner des alliages par contre le diamant ne peut pas, tels que les aciers à outil, les fontes trempées, les superalliages à base de nickel ou de cobalt.

I.5.3.9 Le diamant

Le diamant naturel monocristallin est le matériau le plus dur connu à l'heure actuelle. Cependant, le diamant s'oxyde dans l'air et réagit chimiquement avec des métaux ferreux. Pour cette raison, il est utilisé pour l'usinage des métaux non ferreux comme les alliages d'aluminium, les composites à matrice de métal, les alliages de cuivre, les métaux précieux (or, platine), les plastiques abrasifs, les verres, les composites à fibre de carbone, les céramiques vertes, les carbures de tungstène, le bois et les pierres naturelles [11].

En usinage, les diamants sont utilisés sous trois formes : le diamant naturel monocristallin, le diamant synthétique poly-cristallin et comme un revêtement des carbures [15].

Il se présente sous forme de :

- poudre collée sur un support en fonte pour les meules destinées à l'affûtage des outils carbures,
- d'un grain serti ou brasé sur un corps pour les outils à tranchant unique (outil à charioter, grain d'alésage, etc.). Ces outils sont réservés pour les travaux de finition. Ils permettent d'obtenir une très bonne rugosité et une grande précision [12].

I.6 Endommagement des outils de coupe

Les outils de coupe ont une géométrie généralement complexe qui résulte assez souvent de mises au point d'atelier purement empiriques, quelquefois d'études plus analytiques à partir de divers critères (résistance à l'endommagement ou qualité de la surface générée), rarement d'une véritable optimisation qui nécessiterait une modélisation de l'écoulement du ou des copeaux. [18]

I.6.1 L'usure des outils

L'usure est une caractéristique utilisée souvent pour décrire l'état d'un système mécanique. Elle est une conséquence due au frottement entre deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre. Concrètement, l'usure (*fig. I.8*), avec ses deux composantes, l'adhésion et l'abrasion. Ce phénomène peut entraîner des modifications dimensionnelles, géométriques et structurelles par une augmentation des jeux fonctionnels [19].

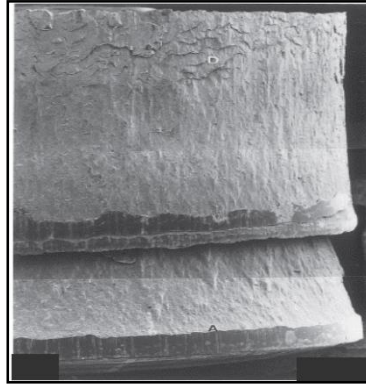


Figure I.8 : Usure des outils.

Si l'on fait un inventaire des configurations de coupe que l'on rencontre dans un atelier d'usinage, on observe une très grande diversité des vitesses de coupe (entre 10 et plusieurs milliers de m/min), de la géométrie des copeaux et de leurs conditions d'évacuation, de la rigidité du contact pièce usinée/outil, de la nature et de la géométrie des outils. Dans une telle variété de configurations de coupe, il n'est pas surprenant d'observer une grande variété de faciès de dégradation.

I.6.1.1 Mécanisme et forme d'usure

L'usure de l'outil de coupe est la conséquence directe des sollicitations très sévères qui subissent les faces de coupe et de dépouille. Ces mécanismes d'endommagement sont maintenant bien connus, notamment [20]:

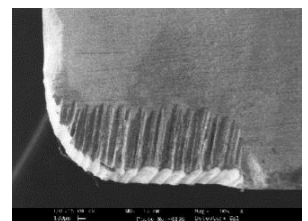
Mécanisme d'usure mécanique

Abrasion

Description du phénomène

L'usure par abrasion est essentiellement due aux frottements outil/pièce et copeau/outil. L'usure abrasive des outils résulte d'arrachement en surface de l'outil causé par des particules souvent anguleuses et de grande dureté contenues dans le matériau usiné (précipités en inclusions). Ces particules sont toujours renouvelées au cours de l'usinage. Les produits d'abrasion sont évacués en continu avec les copeaux. La vitesse d'usure abrasive croît avec la quantité de particules abrasives qui entrent en contact avec l'outil par unité de temps. Elle dépend donc de la composition chimique et du procédé d'élaboration du matériau usiné et croît avec la vitesse.

Illustration



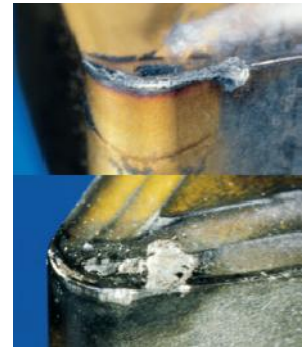
Mécanisme d'usure
physico-chimique

Adhérence

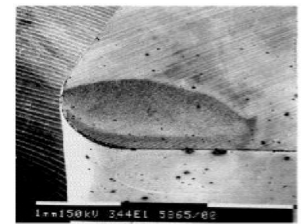
Diffusion

Oxydation

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. Lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Les rugosités et microrugosités des surfaces, en contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des micro-soudures. Ces micro-soudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus continu génère l'apparition d'arêtes rapportées.



Ce type d'usure ne peut se produire qu'à des températures élevées. Les zones de températures élevées sont également le lieu de fortes pressions. Ainsi sous l'effet des températures et pressions élevées les atomes vont subir une migration de l'outil vers le copeau. Ce processus est grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques entre les atomes de la matière usinée et de l'outil.

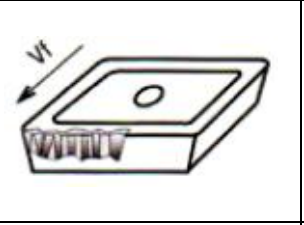

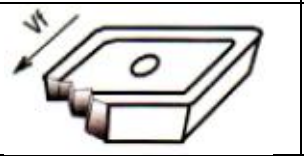


L'environnement de l'usinage est constitué d'oxygène dans l'air, de hautes températures, de l'eau provenant des huiles de coupe solubles. Cet environnement est propice au phénomène d'oxydation et peut provoquer localement une fragilisation de l'outil. De plus, le potentiel d'oxydo-réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.



I.6.1.2 Analyse des critères d'usure

Défaut	Illustration	Causes	Remèdes
Usure en dépouille		Conditions de coupe inadaptées. Outil au-dessus du centre. Avance inadaptée.	Réduire la vitesse de coupe ou choisir une nuance plus résistante. Mettre l'outil au centre. Augmenter l'avance.
Usure en cratère		Conditions de coupe inadaptées.	Réduire la vitesse de coupe ou choisir une nuance plus résistante.
Écaillage de l'arête		Mauvaise stabilité outil-pièce. Avance inadaptée. Outil en dessous du centre. Copeau adhérent.	Améliorer la stabilité. Réduire l'avance. Mettre l'outil au centre. Modifier les conditions de coupe.

Arête rapportée (copeau adhérent)		Conditions de coupe inadaptées. Géométrie de l'outil inadaptée à la matière usinée. Avance inadaptée.	Augmenter la vitesse de coupe, vérifier l'arrosage. Utiliser un brise-copeau. Augmenter l'avance.
Brûlage de l'arête	 Acier rapide	Conditions de coupe inadaptées. Géométrie de l'outil inadaptée à la matière usinée.	Diminuer la vitesse de coupe, vérifier l'arrosage. Rayon de bec trop petit.
Bris de l'outil		Conditions de coupe inadaptées. Chocs, mauvais bridage. Défaut dans la pièce.	Vérifier toutes les conditions d'usinage.

I.6.2 Usure des arêtes de coupe

Pour comprendre les avantages et les limites de chaque matière, il est important de connaître les différents mécanismes d'usure qui agissent sur les outils [14].

I.6.2.1 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.9 : Usure par abrasion.

I.6.2.2 Usure en cratère

L'usure en cratère apparaît sur la face de coupe de la plaquette. Elle est provoquée par la réaction chimique entre la matière de la pièce et le matériau de coupe. La vitesse de coupe l'amplifie. Une usure en cratère excessive affaiblit l'arête de coupe qui peut se rompre.



Figure I.10 : *Usure chimique.*

I.6.2.3 Arête rapportée

Ce type d'usure est provoqué par le soudage sous pression du copeau sur 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.

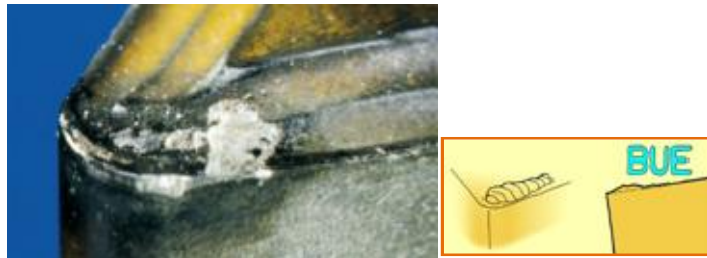


Figure I.11 : *Usure par adhérence.*

I.6.2.4 Usure en entaille

Ce type d'usure se caractérise par une entaille localisée tant sur la face de coupe que sur la face de dépouille, au niveau de la profondeur de coupe. Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires.



Figure I.12 : *Usure par adhérence.*

I.6.2.5 Déformation plastique

La déformation plastique survient lorsque le matériau de coupe est ramolli par une température trop élevée. De manière générale, plus une nuance est dure et plus le revêtement est épais, meilleure est la résistance à la déformation plastique.

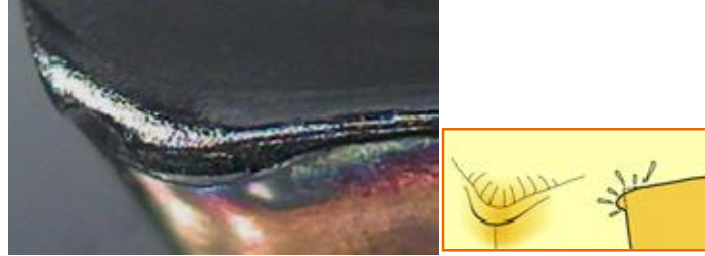


Figure I.13 : *Usure thermique*

I.6.2.6 Usure en peigne

Lorsque l'arête de coupe subit des refroidissements brusques, des fissures perpendiculaires à l'arête apparaissent. Ce type de fissure est fréquent en cas de coupes interrompues, ce qui est courant en fraisage. L'utilisation de l'arrosage aggrave ce phénomène.

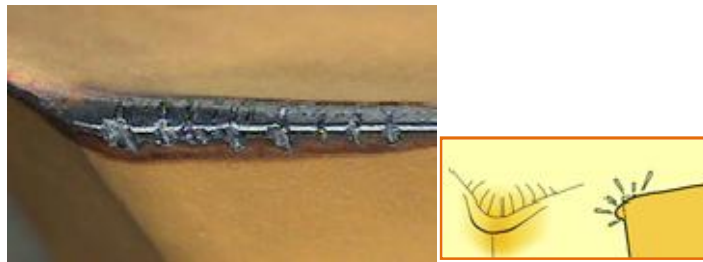


Figure I.14 : *Usure thermique*

I.6.2.7 Ecaillage ou rupture de l'arête

L'écaillage ou la rupture de l'arête survient en cas de surcharge des contraintes de traction. Celles-ci sont dues à différentes causes telles que le martèlement des copeaux, une profondeur de coupe ou une avance excessive, des inclusions de sable dans la matière de la pièce, des arêtes rapportées, des vibrations ou une usure excessive de la plaquette.

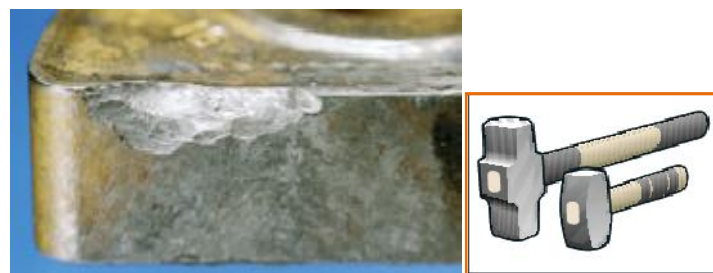


Figure I.15 : *Usure mécanique*

I.7 Etat de surface des pièces mécanique

I.7.1 Généralités sur les états de surface

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

I.7.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques

I.7.2.1 Définitions de la rugosité

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [21, 22].

✓ **Surface géométrique**

Surface parfaite; sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

✓ **Surface spécifiée**

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

✓ **Surface mesurée**

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

✓ **Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication (*fig. I.16*).

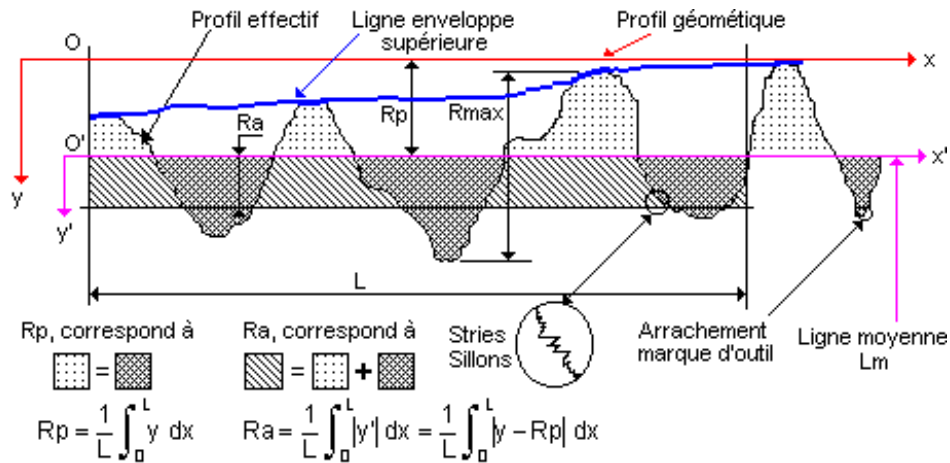


Figure I.16 : Caractéristiques du profil.

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

I.7.3 État de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par la **Figure I.17**. Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maximale du profil de rugosité R_{max} et donné par [23]:

$$R_{max} = \frac{f^2}{8 \times r} \quad (\text{I.1})$$

R_{max} : la rugosité maximale en millimètre;

f : l'avance en millimètre;

r : le rayon de l'outil de coupe maximal en millimètre;

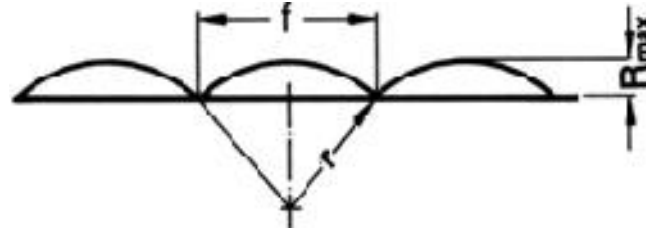


Figure I.17 : Profil de surface tournée.

I.7.4 Caractéristiques de la surface

La nouvelle norme ISO 25178 définit l'analyse en 3D de l'état de surface, ce qui permet également la caractérisation des surfaces anisotropes ou périodiques difficile avec les anciens paramètres 2D d'état de surface [24].

➤ Paramètres caractéristiques des états de surface

- ❖ **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

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| dx \quad (\text{I.2})$$

- ❖ **Rugosité moyenne profondeurs R_z** : Moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones d'évaluations successives l_e

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \quad (\text{I.3})$$

- ❖ **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

$$R_p = R_{p3} \quad (\text{I.4})$$

- ❖ **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

- ❖ **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 (fig. I.18) [25].

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4} \quad (\text{I.5})$$

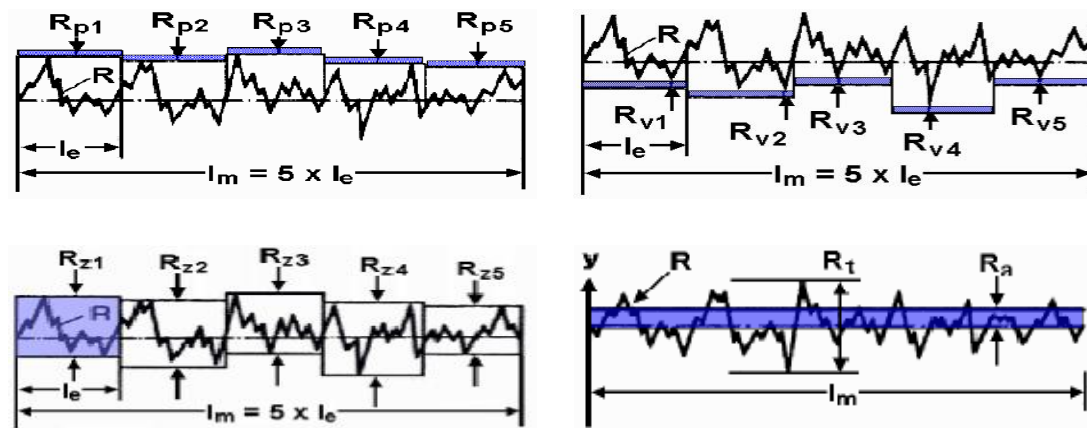


Figure I.18 : Les critères de la rugosité.

I.8 Efforts de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire: l'effort double environ quand la vitesse d'avance double) [11].

I.8.1 Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe $F_{rés}$, peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes (*fig. I.19*).

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

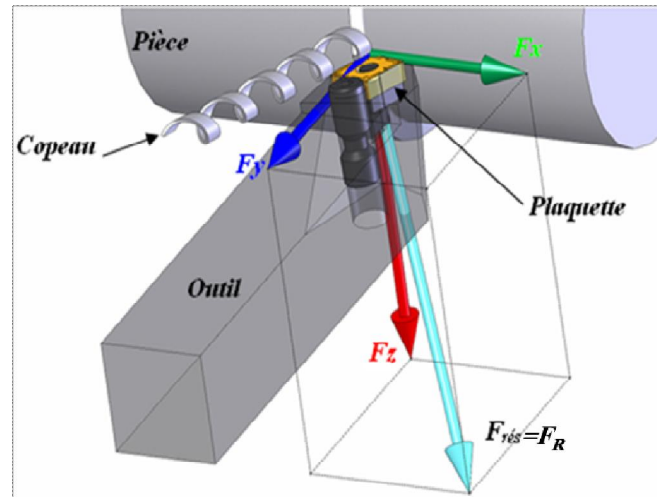


Figure I.19 : Composantes des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe, aussi elle est nécessaire pour l'évaluation du rendement mécanique d'une machine-outil. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machine et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau. D'après la (*fig. I.19*), la force de coupe résultante $F_{rés}$, étant une diagonale du parallélépipède elle sera donnée par l'expression :

$$F_{rés} = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \quad (\text{I.6})$$

L'évaluation des composantes peut être donnée à travers des modèles empiriques déterminés par des méthodes statistiques à partir de résultats expérimentaux.

$$F_a = C_1 a p^{x_1} \cdot f^{y_1} \cdot V_c^{n_1} \cdot K_a \quad (\text{I.7})$$

$$F_r = C_2 a p^{x_2} \cdot f^{y_2} \cdot V_c^{n_2} \cdot K_r \quad (\text{I.8})$$

$$F_t = C_3 a p^{x_3} \cdot f^{y_3} \cdot V_c^{n_3} \cdot K_t \quad (\text{I.9})$$

Où les coefficients C_1, C_2, C_3 sont des constantes qui dépendent des propriétés mécaniques du métal à usiner et conditions de son usinage. Les coefficients K_a, K_r, K_t se sont les coefficients correctifs relatifs aux conditions concrètes d'usinage. Les exposants $x_{1,2,3}, y_{1,2,3}, n_{1,2,3}$, caractérisent le degré d'influence des paramètres V_c, f et ap sur les forces de coupes F_a, F_r, F_t .

I.9 Vibrations en usinage

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

La compréhension et la maîtrise de ces problèmes ont suscité de nombreuses recherches scientifiques, principalement focalisées sur l'instabilité de la coupe dont la principale manifestation est le broutement. Elles ont permis d'identifier les causes de ces phénomènes et de proposer des modèles prédictifs. Ainsi, elles ont révélé l'existence de plages de vitesses de rotation de l'outil où le comportement vibratoire de l'usinage est satisfaisant, en particulier aux hautes vitesses et ce même pour de fortes conditions d'engagement des outils de coupe. Suivant leurs origines, elles peuvent être classées en deux types : les vibrations forcées et les vibrations auto-excitées (générées par le processus de la formation du copeau) [26].

a) Les vibrations forcées :

Elles apparaissent sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par :

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

b) Les vibrations auto-excitées :

Les causes essentielles des vibrations auto-excitées, qui sont bien plus fréquentes que les vibrations forcées, sont à rechercher dans le phénomène de coupe proprement dit ; Ce sont :

- La variation de force de frottement du copeau sur l'outil, de l'outil sur l'ébauche.
- L'érouissage irrégulier de la couche enlevée suivant son épaisseur.
- Les variations dimensionnelles de l'arête rapportée qui modifient en cours d'usinage l'angle de coupe.

I.9.1 Les effets des vibrations sur le processus de coupe

Les vibrations du système (machine- porte pièce- pièce- outil- porte outil), phénomène dit aussi de broutement, qui apparaissent lors des opérations d'usinage sont les sources de multiples difficultés.

- Ils dégradent la qualité de la surface usinée.
- Ils affectent la durée de l'outil et accélèrent son usure.

- Ils conduisent à une détérioration rapide de certains organes de la machine-outil (roulements- glissières...).
- Ils peuvent entraîner des dérèglages de certains organes de la machine outil.
- Les vibrations entre la pointe de l'outil et la surface usinée engendrent sur la pièce des défauts géométriques qui peuvent amener à rebuter la pièce (du point de vue des côtes).
- Les vibrations importantes diminuent la productivité et rendent même parfois impossible l'opération sur la machine-outil.
- Ils peuvent être aussi une source de fatigue et de gêne pour l'opérateur.
- L'augmentation des performances des outils, l'apparition de nouveaux matériaux difficilement usinables rendent ces problèmes de plus en plus aigus, les machines étant alors souvent poussées au maximum de leurs possibilités.

I.9.2 Influence des différents facteurs sur les vibrations

- L'aptitude de ces vibrations est en fonction du métal en œuvre et des propriétés mécaniques, des facteurs d'usinage (V_c , f , a_p), de la géométrie de la partie active.
 - A mesure que V_c croît, les vibrations augmentent d'abord puis diminuent.
 - Les vibrations augmentent avec la profondeur de passe mais sont moins influencées par l'avance.
 - L'augmentation du rayon du bec de l'outil conduit à une augmentation des vibrations.
 - En augmentant l'angle de direction de l'arrête de coupe, les vibrations diminuent.
- Influence du porte-à-faux de l'outil et de la pièce :

On met facilement en évidence l'influence des porte-à-faux de l'outil et de la pièce sur le broutement à l'aide d'expériences très simples. Condition d'expérimentations:
Travail de chariotage au tour avec un outil en acier rapide toutes les conditions de travail sont identiques sauf un facteur variable : le porte-à-faux de l'outil.

* Expérience A1: $l = 20$ mm

- Le travail de coupe est correct.
- La rugosité est régulière, $R_a = 3,2 \mu\text{m}$
- L'état de la partie active de l'outil après 30 min de coupe est correct.

* Expérience A2: $l = 60$ mm

- Le travail de coupe est très perturbé, l'outil vibre.
- Les vibrations de l'outil se transmettent à toute la machine.
- La rugosité est très mauvaise $R_a = 12,5 \mu\text{m}$.
- Le bec de l'outil est détérioré au bout de quelques minutes.

• L'augmentation du porte-à-faux de l'outil conduit à une variation de la flèche, donne naissance au phénomène de vibration.

I.9.3 Comment limiter le broutement : (la recherche de la stabilité d'usinage)

La stabilité d'usinage est le résultat de plusieurs stabilités composées :

Pièce, machine-outil, système d'ablocage, outil, et conditions d'usinage.

a) Action sur l'outil : La stabilité de l'outil est assurée par :

- Une longueur de porte-à-faux minimale.
- Une fixation sûre et suffisante de l'outil.
- Une liaison rigide et efficace avec le porte-outil.
- Un choix de section d'outil optimale.
- Le maintien de l'arête de coupe en bon état.
- Un entretien approprié de l'outil utilisé (changement des composants endommagés, nettoyage de la surface d'assise de la plaquette etc...).
- L'utilisation d'un outil et d'un matériau de coupe adaptée de manière optimale.
- L'augmentation de l'angle d'attaque pour diminuer les efforts de coupe.
- La réduction de la longueur d'arête en prise.
- La réduction du rayon du bec de l'outil en tournage.

b) Action sur le porte outil :

- Choisir un porte outil assurant une trajectoire dégageant.
- Choisir un porte outil rigide.

c) Action sur la pièce et le porte-pièce :

- Réduire au maximum les porte-à-faux.
- Utiliser des porte-pièces rigides.
- Supporter les pièces flexibles par des vérins ou des lunettes.

d) Action sur la machine :

- Réduire les jeux fonctionnels dans les broches et les glissières.
- Choisir la rigidité de la machine en fonction des conditions de travail.

I.10 Le couple outil-matière (C.O.M.)

I.10.1 Généralités

L'usinage par enlèvement de copeaux est l'opération la plus importante dans l'industrie. On trouve de nombreuses variables qui ont une importance fondamentale au niveau de la finition du produit. Le déclassement de la pièce ou la nécessité d'un nouveau passage par la machine a pour résultat soit une perte de productivité (moins de pièces produites dans la même unité de temps) soit une perte de matière première.

De ce fait, on introduit le concept "Couple outil-matière" (C.O.M.) appliqué souvent dans l'industrie mécanique. Il s'agit là de produire en diminuant les délais et les coûts et en augmentant la qualité. Mais ceci ne suffit plus pour persister sur le marché aujourd'hui. Il faut de nos jours "faire bon du premier coup" tout en "maîtrisant les procédés" et en "pré-dimensionnant le système de production" [27].

L'importance des conditions de coupe est sensible à plusieurs niveaux :

- Au niveau du bris d'outils, ceci est un problème souvent lié à une variation brutale des conditions d'usinage, comme par exemple une prise de matière trop importante, la non-fragmentation du copeau, etc,
- Dans la recherche des bonnes conditions d'usinage et la manipulation des potentiomètres sur les CNC. 20% du temps opérationnel est perdu en moyenne,
- Par des conditions de coupe mal réglées ou par un mauvais choix de l'outil, on peut perdre 10 à 30% des budgets outils.

La méthode est basée sur cinq étapes qui s'enchaînent séquentiellement :

- Déterminer un point de qualification,
- Définir la plage de vitesse de coupe,
- Définir les plages d'engagement de l'outil (ap) et d'avances,
- Quantifier l'usure de l'outil,
- Déterminer les valeurs des paramètres auxiliaires.

Ainsi, on peut envisager les objectifs suivants :

- l'augmentation de la productivité,
- l'amélioration de la qualité et la régularité des qualités obtenues,
- la régularité des temps de fabrication (pas de bris d'outils, pas de modifications des paramètres de coupe),
- l'augmentation de la durée de vie des outils,
- éviter la surcharge des machines.

- **Réalisation de l'optimisation des conditions de coupe**

- Si l'outil est sélectionné en considérant les conditions de coupe données, il faut connaître les caractéristiques de la machine, de la matière et du type d'usinage.
- Si la sélection des conditions de coupe se fait en fonction des données COM, on peut alors optimiser les vitesses de coupe et d'avance en fonction de la quantité de matière enlevée, de la profondeur de passe et de la largeur de coupe.

La méthode du COM comporte des données d'entrée correspondant aux descriptions des matériaux constituant l'outil et la pièce, les géométries de l'outil et des opérations d'usinage. En sortie les plages d'utilisation des paramètres de coupe, sont définies par une valeur minimale et une valeur maximale. Les paramètres auxiliaires utilisés pour définir la durée de vie et les efforts de coupe sont obtenus. Toutes les activités se déroulent sur une machine outil de production équipée d'un wattmètre ou d'un dynamomètre pour mesurer la puissance consommée ou les efforts de coupe. Certains instruments sont nécessaires pour mesurer l'usure des outils et les états de surface obtenus. Toutes les étapes de la méthode se déroulent sous contrôle (sur la (fig. I.20) ce sont les flèches arrivant sur le bord supérieur des rectangles).

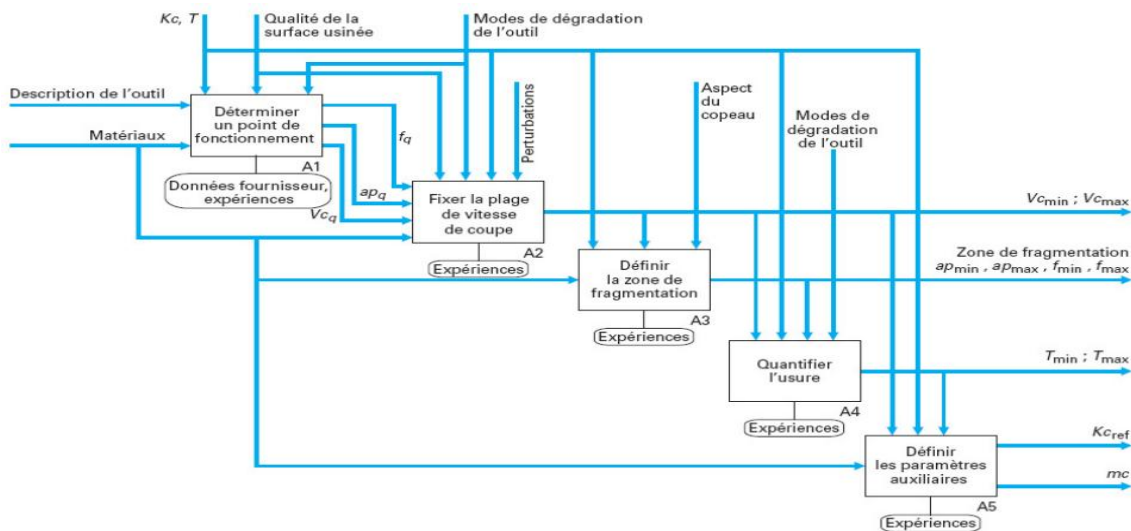


Figure I.20 : Synopsis de la méthodologie du COM [28].

Le contrôle porte essentiellement sur la pression spécifique de coupe ou effort par unité de section du copeau, K_c , et sur la durée de vie de l'outil T . K_c doit rester dans la proximité de valeurs connues pour des COM analogues avec des matériaux usinant et usiné et ou des géométries d'outil voisines. De plus, l'activité doit se dérouler sans que la machine outil ne vibre et la surface usinée doit présenter un état de surface standard et sans copeau adhérent [27].

Etape 1 - Déterminer un point de qualification

Pour le tournage, cette détermination consiste à rechercher un premier triplet (V_c , ap , f) pour lequel la coupe est stable. La coupe est dite stable si une petite variation des paramètres ne conduit pas à des vibrations, à une usure rapide voire à une rupture d'outil ou encore à une dégradation importante de la surface usinée. Il s'agit en fait de trouver un point le plus centré possible à l'intérieur du volume $[(V_{c_{min}}, V_{c_{max}}), (ap_{min}, ap_{max}), (f_{min}, f_{max})]$, (fig. I.21). En pratique, on choisira fréquemment une valeur indiquée par le fournisseur d'outil. Le triplet (V_{c_q} , ap_q , f_q) obtenu en sortie est le point de qualification.

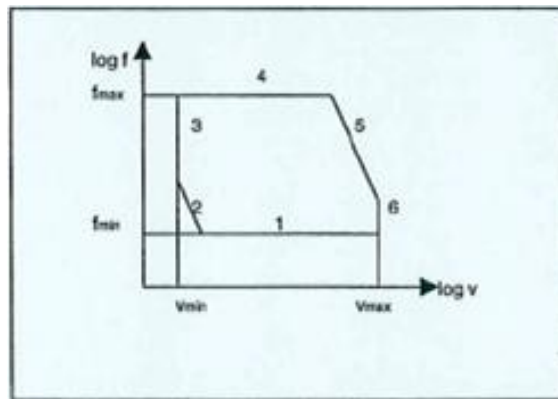


Figure I.21 : Domaine des contraintes [29].

Donc, il définit ces contraintes comme:

- Contrainte 1: f minimum (machine, copeau minimum),
- Contrainte 2 : limite de formation d'une arête rapportée,
- Contrainte 3: vitesse de coupe minimum,
- Contrainte 4 : f maximum, limite inférieure des contraintes correspondant à l'avance maximum,
- Contrainte 5 : contrainte de puissance,
- Contrainte 6 : vitesse de coupe maximum (machine-outil, effondrement d'arête).

Etape 2 - Fixer la plage de vitesse de coupe

L'évolution de l'effort spécifique de coupe K_c est relevée pour diverses valeurs de V_c . La courbe obtenue est établie avec les valeurs ap_q et f_q . La variation de V_c autour de V_{c_q} est de grande amplitude. La courbe obtenue permet de définir les limites $V_{c_{min}}$ et $V_{c_{max}}$. $V_{c_{min}}$ est la valeur en dessous de laquelle la variation de K_c est faible et pour laquelle la surface usinée ne présente plus de copeau adhérent. $V_{c_{max}}$ correspond à une durée de vie d'outil trop faible pour permettre une exploitation industrielle en production.

Etape 3 - Définir les plages de prises de passe et de l'avance

La zone de bon fonctionnement de l'outil est définie pour l'avance f et la profondeur de passe a_p . Cette zone, où le copeau est fragmenté, par les formes réalisées à cet effet sur la face de coupe de l'outil, s'inscrit dans le domaine du plan $[f_{\min}, f_{\max}] \times [a_{p\min}, a_{p\max}]$.

Etape 4 - Quantifier l'usure de l'outil

Il s'agit de déterminer une loi expérimentale liant la durée de vie de l'outil T et les paramètres de coupe (V_c , a_p , f). Dans la pratique, on considère fréquemment la loi de Taylor généralisée :

$$a_p \times l \times f^m \times V_c^{\frac{n}{T}} = Cte \quad (\text{I.10})$$

La méthode consiste alors à déterminer les 4 constantes l , m , n et Cte . Pour réduire le coût, souvent important, de cette activité expérimentale, la méthodologie des plans d'expériences est fréquemment utilisée.

Etape 5 - Déterminer les valeurs des paramètres auxiliaires

Cette étape a pour but de fixer des paramètres supplémentaires tels que la force spécifique de coupe $K_{c\text{ref}}$ pour un triplet ($V_{c\text{ref}}$, $a_{p\text{ref}}$, f_{ref}) de référence pour extrapoler de manière empirique les résultats obtenus dans un voisinage technologique de travail (lubrification, variantes géométriques d'outils, nuances de matériaux proches,...). En projet de production, pour une matière à usiner définie, cette approche COM permet de choisir un outil et les plages des paramètres de coupe adaptées parmi toutes celles qui ont déjà été caractérisées avec la matière concernée. Pour la métallurgie classique, l'expérience et les données acquises pour certains aciers peuvent être transposées à des compositions voisines. Mais la méthode nécessite tout de même un grand nombre d'essais coûteux et difficiles à mettre en œuvre de façon rigoureuse.

I.11 Planification expérimentale

La planification expérimentale regroupe un ensemble de techniques statistiques destinées à analyser le comportement d'un système expérimental dans le but de comprendre et d'améliorer son fonctionnement. Dans le domaine industriel en particulier, l'utilisation des plans expérimentaux est en développement constant et peut servir de support pour l'optimisation des procédés de fabrication et de contrôle, comme dans le cas qui nous intéresse, ainsi que pour la formulation des produits [30].

La planification expérimentale consiste à imposer aux entrées du problème des variations particulières et mesurer les variations induites aux sorties afin de déduire les relations de causes à effets. Elle peut donc être considérée comme un système donnant l'expression d'une ou plusieurs réponses dépendamment d'un certain nombre de facteurs. Les réponses de ce système sont généralement constituées de variables qui serviront à l'optimisation. Ces variables d'entrées du système qui doivent varier indépendamment les unes des autres lors de l'expérimentation, sont appelées facteurs [31].

➤ **Facteurs**

Les facteurs caractérisant les conditions expérimentales peuvent être très variés. Il existe :

- Des facteurs quantitatifs continus tels qu'une température, un débit, une pression, une concentration, une vitesse etc;
- Des facteurs quantitatifs discontinus comme le nombre de vis d'un montage etc;
- Des facteurs qualitatifs comme la nature d'un procédé (discontinu ou continu), le type de climat etc.

Les facteurs peuvent également être classés selon d'autres critères dont:

- Des facteurs contrôlés, auxquels il est possible d'imposer un état déterminé à l'avance. C'est ce type de facteurs que l'expérimentateur fait varier lors du processus expérimental;
- Des facteurs mesurables, auxquels il n'est pas possible d'imposer un état donné, mais dont le niveau peut être connu précisément (exemple : température extérieure);
- Des facteurs constants, qui sont maintenus dans un état fixe tout au long des différentes expériences;
- Des facteurs bruits, dont l'effet ne s'exerce que sur la dispersion ou la qualité des résultats (Exemple : vieillissement du matériel, fatigue de l'opérateur).

➤ **Les réponses**

Les réponses caractérisent ce que l'expérimentateur considère comme conséquence du phénomène et constituent des objectifs à optimiser. Elles peuvent, comme les facteurs, être de natures très variées comme:

- Des réponses quantitatives continues tels qu'un rendement, une viscosité, une résistance à la traction etc;
- Des réponses quantitatives discontinues. Il s'agit de réponses ne pouvant prendre que certaines valeurs discrètes;

- Des réponses qualitatives quantifiables ou au moins ordonnables parmi lesquelles on retrouve les appréciations, telles que "très bon", "bon", etc.);
- Des réponses binaires (0 ou 1, avec ou sans, etc.);
- Des réponses sous forme de courbe. (Exemple : cinétique, profil de température, etc.).

Le processus expérimental est résumé dans la (**fig. I.22**) suivante :

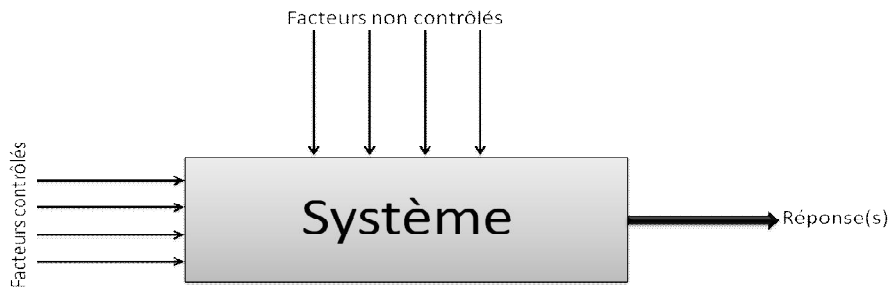


Figure I.22 : Schématisation d'un processus expérimental.

I.11.1 Plans d'expériences

I.11.1.1 Terminologie (Réponses, facteurs, niveaux)

Avant d'aborder l'étude des plans d'expériences, il convient de préciser le vocabulaire que nous allons utiliser. Nous nous inspirerons pour cela de la norme AFNOR X 06-080 et des usages des différentes disciplines auxquelles nous ferons appel.

Un phénomène peut toujours être mis sous la forme mathématique suivante :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (\text{I.11})$$

- avec
- Y_i grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur : cette grandeur est appelée la réponse ou la grandeur d'intérêt ;
 - X_i variables sur lesquelles l'expérimentateur peut agir ; ces variables peuvent être continues ou discontinues ; on les appelle les facteurs ; les plans d'expériences permettent d'étudier l'influence d'un grand nombre de facteurs sans multiplier exagérément le nombre des essais ;
 - f fonction mathématique qui explique le mieux les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux X_i . Dans le cas des plans d'expériences, cette fonction mathématique est souvent un polynôme dont nous préciserons la forme dans les paragraphes suivants.

Lorsque l'on étudie un facteur X_i , par exemple l'usure en dépouille (VB), on ne le fait pas varier dans de larges proportions. On définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par deux bornes.

I.11.1.2 Notion d'espace expérimental

Supposons qu'un expérimentateur lance une étude. Il s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » nous emploierons le mot facteur. On dit que la réponse dépend de plusieurs facteurs.

Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (*fig. I.23*). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsque l'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes :

- la borne inférieure est le niveau bas ;
- la borne supérieure est le niveau haut.

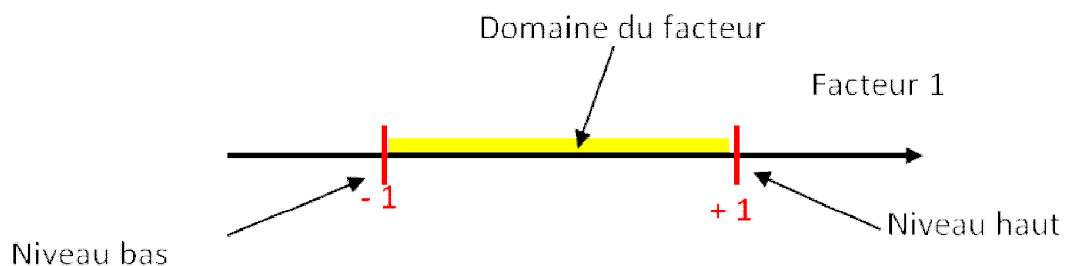


Figure I.23 : *Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut*

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur, ou plus simplement, le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (*fig. I.24*).

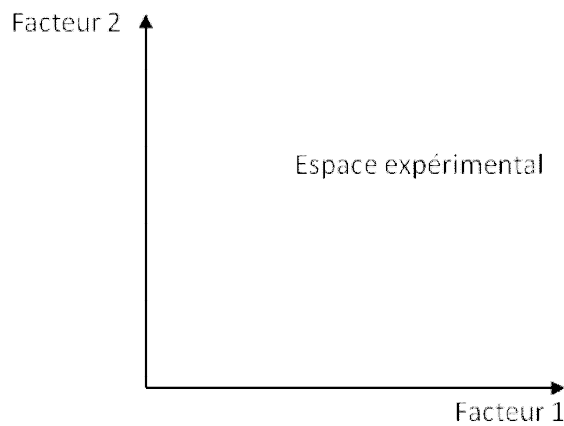


Figure I.24 : *Définition de l'espace expérimental*

Le niveau X_1 du facteur 1 et le niveau X_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (*fig. I.25*). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

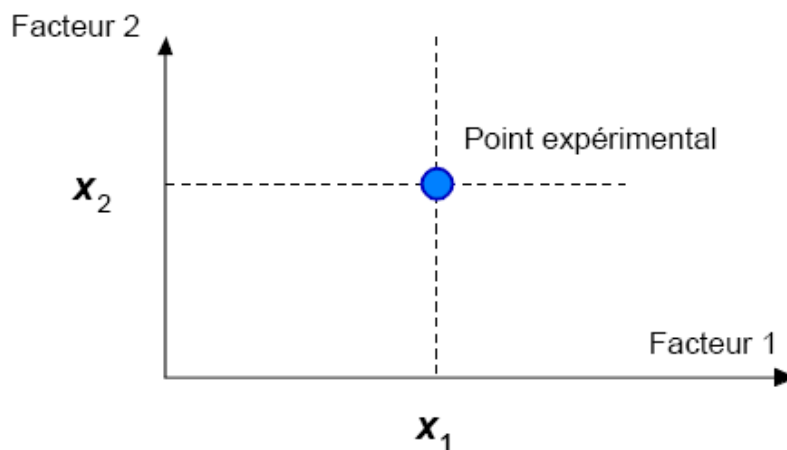


Figure I.25 : *Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental*

La réunion des domaines de chaque facteur définit le « domaine d'étude ». Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (*fig. I.26*).

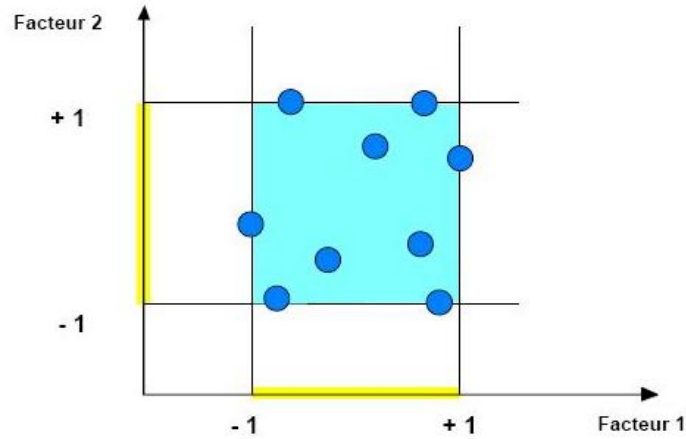


Figure I.26 : Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur

Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude. La définition que nous venons de donner s'applique bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables qui ne sont pas continues.

Les niveaux X_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et Y est la valeur de la réponse en ce point. On attribue à la réponse un axe orthogonal à l'espace expérimental. La représentation géométrique d'un plan d'expériences et des réponses associées nécessite donc un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. La représentation géométrique des résultats d'un plan à deux facteurs nécessite un espace à trois dimensions : une pour la réponse, deux pour les facteurs.

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (*fig. I.27*).

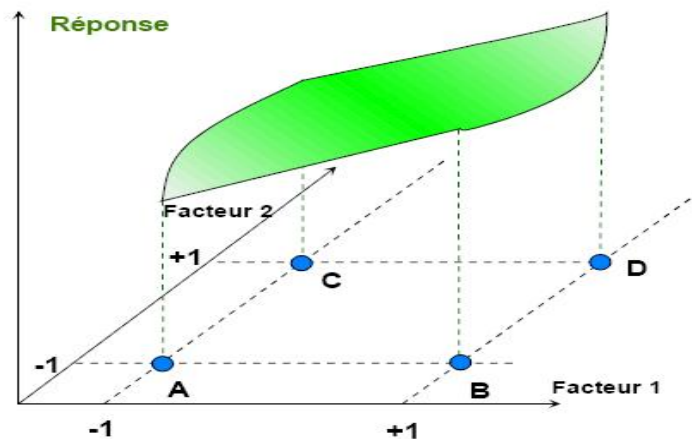


Figure I.27 : Définition de la surface de réponse

I.12 Travaux de recherche (état de l'art)

Plusieurs chercheurs ont adopté l'utilisation de la planification expérimentale dans le but de modéliser et d'optimiser les paramètres technologiques.

Aouici et al. [32] ont réalisé une étude expérimentale dont le but est de déterminer l'effet de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe sur la rugosité de surface, l'effort de coupe, la puissance de coupe et l'effort spécifique lors du tournage dur du couple d'usinage (céramique mixte/ Acier AISI D3 traité thermiquement à une dureté de 60 HRC). Les auteurs ont choisi un plan factoriel complet de 27 essais (3^3), afin développer un modèle de prédiction des réponses.

Les résultats trouvés montrent que l'effort de coupe est affecté principalement par la vitesse d'avance (36.672%) suivie par la profondeur de passe (27.541%) et en dernier lieu par la vitesse de coupe (5.03%). Pour la rugosité de surface, elle est fortement influencée par la vitesse d'avance avec une contribution de (87.334%), suivie par le terme f^2 avec une contribution de (6.455%). Les auteurs ont déterminé les conditions de coupe optimales en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'approche de la fonction de désirabilité. L'utilisation de la profondeur minimale, une vitesse de coupe élevée (140 m/min) et en limitant l'avance par tour à 0.12 et 0.13mm/tr assure un effort de coupe minimal et une meilleure rugosité de surface. Des valeurs plus élevées de la profondeur de coupe sont nécessaires pour minimiser l'effort spécifique. En dernier lieu les auteurs affirment que l'utilisation des modèles empiriques développés peut être utilisée pour optimiser les paramètres de coupe lors l'usinage de l'acier AISI D3 avec la céramique mixte.

Les modèles mathématiques trouvés par les auteurs sont comme suit :

$$Ft = 869.4041 - 11.8788Vc + 188.9881f - 494.6603ap + 0.2265Vc \times f + 9.0410Vc \times ap + 2,328.05556 f \times ap + 0.0368Vc^2 - 1,101.9965f^2 - 1,097.23ap^2$$

$$Ra = 0.1601 + 0.0411Vc - 24.1438f - 3.4665ap + 0.1016Vc \times f + 0.0507Vc \times ap + 4.5834f \times ap + 0.0003Vc^2 + 74.1319f^2 - 5.0617ap^2$$

$$Ks = 41,069.3571 - 307.9261Vc - 84,073.9032f - 55,353.482ap + 191.6098Vc \times f + 306.3561Vc \times ap + 70,128.6008f \times ap + 0.6642Vc^2 + 75,921.5053f^2 - 831.5043ap^2$$

$$Pc = 1,6161368 - 21,12434 Vc - 1,0666711 - 1,7217994 ap + 11,5675 Vc \times f + 21,7368 Vc \times ap + 4,8423032 f \times ap + 0,0624 Vc^2 - 2,0085648 f^2 - 1,6533374 ap^2$$

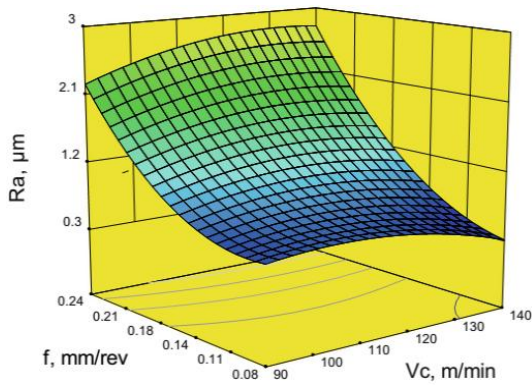


Figure I.28 : *L'effet de la vitesse d'avance et vitesse de coupe sur la rugosité de surface.*

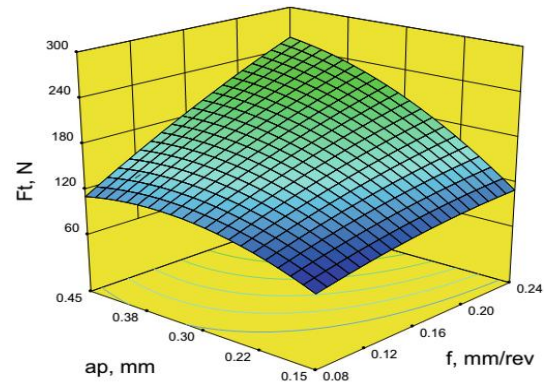


Figure I.29 : *L'effet de la profondeur de passe et la vitesse d'avance de sur l'effort de coupe.*

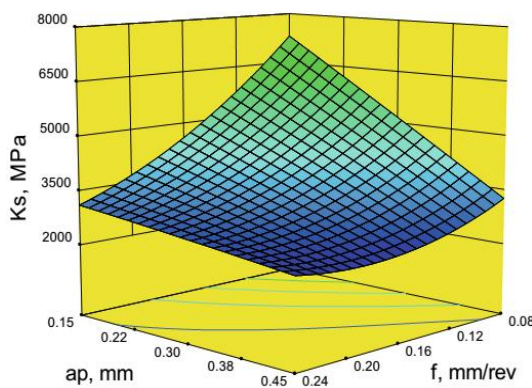


Figure I.30 : *L'effet de la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur l'effort de coupe spécifique*

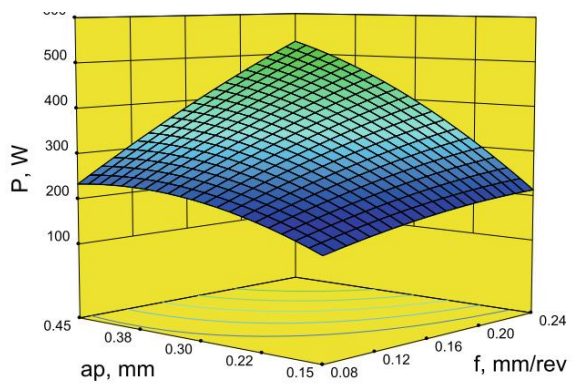


Figure I.31 : *L'effet de la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur la puissance de coupe spécifique*

Bouchlaghem et al [33] ont conduit une recherche expérimentale pour déterminer l'influence des variables de coupe tels que, la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la rugosité, l'effort de coupe, la durée de vie et la température dans la zone de coupe, lors du tournage dur de l'acier AISI D3 (60HRC) avec des plaquettes en CBN. Les auteurs ont montrés dans cette étude, que la rugosité de surface est très sensible à la variation de l'avance et aussi ils ont trouvé que le principal mécanisme d'usure pour les outils CBN est l'abrasion du liant du matériau CBN par les particules dures en carbure de la pièce. En plus, les résultats montrent que l'effort axial est très sensible à la variation de la profondeur de passe.

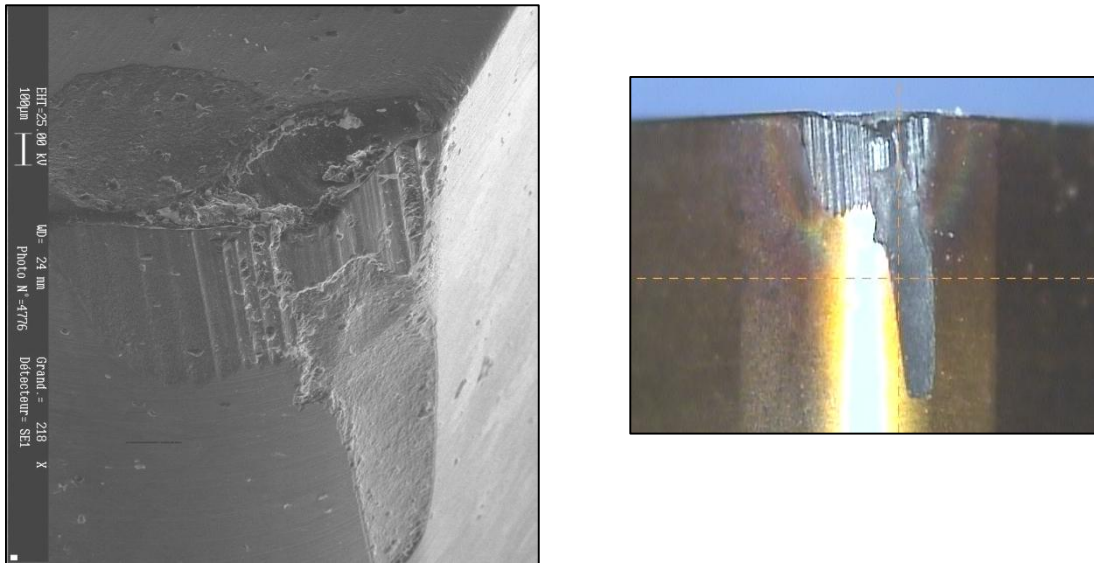


Figure I.32: Photo par MEB de l'usure en de dépouille et en cratère d'un outil de coupe en CBN.

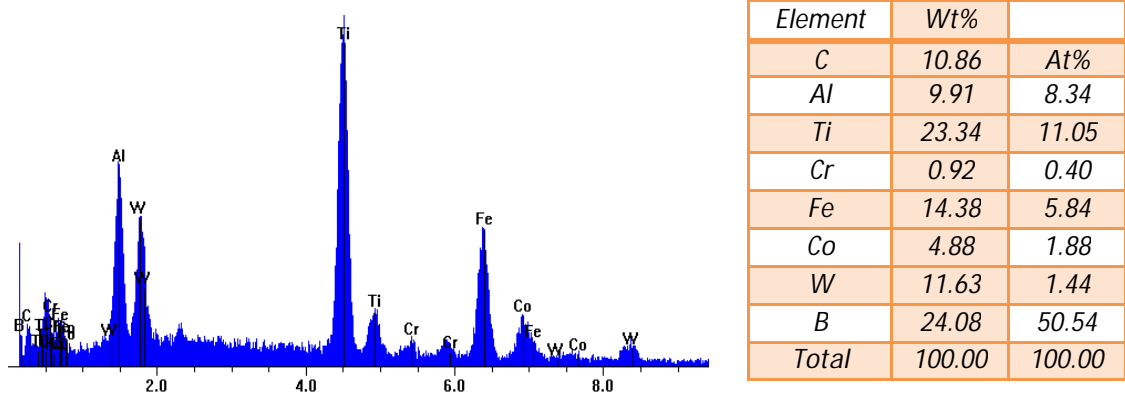


Figure I.33: Exemple de l'analyse par rayon X sur la surface de dépouille d'un outil de coupe en CBN.

Rupinder Singh et al. [34] ont réalisé un travail de recherche sur l'usure de l'outil et la rugosité de surface (R_a) pendant le tournage dur de finition de l'acier AISI D3 (58HRC) avec un outil de coupe en carbure revêtu (TiSiN-TiAlN PVD revêtement). Les chercheurs ont adopté pour la planification expérimentale un plan de Taguchi (L_9), et ils ont réalisé une analyse de la variance (ANOVA) pour identifier les paramètres qui ont l'effet le plus importants sur l'usure des outils et la rugosité de surface. Les résultats trouvés par les chercheurs dans le cadre de ce travail sont comme suit :

- ✓ La vitesse de coupe et l'avance sont les facteurs les plus importants qui influencent l'usure de l'outil, l'avance est le facteur le plus important qui influence sur la rugosité de surface (R_a).

- ✓ L'analyse d'ANOVA montre que les contributions en pourcentage des paramètres d'entrée qui influencent l'usure en dépouille (VB) sont comme suit: $V_c = 73.65\%$, $f = 8.18\%$ et $a_p = 9.28\%$, ce qui signifie que la vitesse de coupe est le facteur qui le plus influençant l'usure.
- ✓ L'analyse d'ANOVA montre que les contributions en pourcentage des paramètres d'entrée qui influencent la rugosité Ra est: $V_c = 19.47\%$, $f = 52.98\%$ et $a_p = 12.98\%$, cela signifie que la vitesse d'avance est le facteur dominant sur la rugosité de surface (Ra).
- ✓ Les conditions d'usinage optimales pour minimiser l'usure de l'outil selon l'analyse Taguchi sont comme suit: La vitesse de coupe de 130 m/min, l'avance de 0.10 mm/tr, profondeur de coupe de 0.40 mm.
- ✓ Les conditions d'usinages optimisés pour minimiser Ra selon l'analyse Taguchi sont : La vitesse de coupe de 155 m/min, l'avance de 0.10 mm/tr, profondeur de coupe de 0.25 mm avec un Ra d'environ 0.57 μm .
- ✓ L'optimisation de la fonction de désirabilité pour optimiser simultanément les réponses, VB et Ra : $V_c = 130$ m/min, $f = 0.13$ mm/tr et $a_p = 0.21$ mm. Cette solution fournie par l'optimisation de la fonction de désirabilité est assez proche des solutions optimales fournies par l'analyse Taguchi bien que pour un paramètre de réponse (VB ou Ra) à la fois.

Les modèles mathématiques de l'usure VB et la rugosité Ra de surface sont trouvés comme suit :

$$VB = 121.06 + 20.5V_c - 2.26f - 0.55a_p + 5.62V_c \times f - 0.080V_c \times a_p + 15.00 f \times a_p$$

$$Ra = 0.73 + 0.12V_c + 0.55f - 0.38a_p - 0.18V_c \times f + 0.27V_c \times a_p + 0.34 f \times a_p$$

Varaprasad B et al. [35] ont réalisé une étude expérimentale basée sur un plan composite central (CCD) qui a pour but, d'élaborer un modèle mathématique par la méthodologie de surface de réponse (RSM). Ce modèle mathématique permet de prévoir l'usure en dépouille d'outil de coupe (plaquette en céramique mixte CC6050 avec un rayon de 0.8 mm) durant l'usinage dur de l'acier AISI D3. Les auteurs ont étudié les effets des interactions de la vitesse de coupe, vitesse d'avance et la profondeur de coupe à l'aide des tracés de contours et des surfaces de réponse. Ils ont vérifié l'adéquation du modèle développé par l'analyse de variance (ANOVA).

D'après cette étude, les auteurs ont trouvé les conclusions suivantes :

- ✓ La méthodologie de surface de réponse (RSM) basé sur les plans d'expériences est un outil très efficace pour déterminer les paramètres de coupe optimale à vitesse de 165 m/min, l'avance de 0,05 mm/tr et la profondeur de coupe de 0,3 mm pour atteindre une faible usure de l'outil de 0.148 mm.
- ✓ La profondeur de coupe est le paramètre qui a une grande influence sur l'usure en dépouille de l'outil de coupe. La vitesse de coupe et l'avance ont peu d'influence sur la variation totale de l'usure.
- ✓ La relation entre la caractéristique de performance et les paramètres de coupe est exprimée par une équation de régression multiple qui peut être utilisée pour estimer les valeurs exprimées du niveau de performance pour tous les niveaux des paramètres.

Le modèle mathématique de l'usure VB est trouvé comme suit :

$$VB = 0.172945 + 0.004550V_c + 0.003700f + 0.013400a_p + 0.009125V_c \times f + 0.010125V_c \times a_p + 0.005125f \times a_p$$

$$R^2 = 96.5\%$$

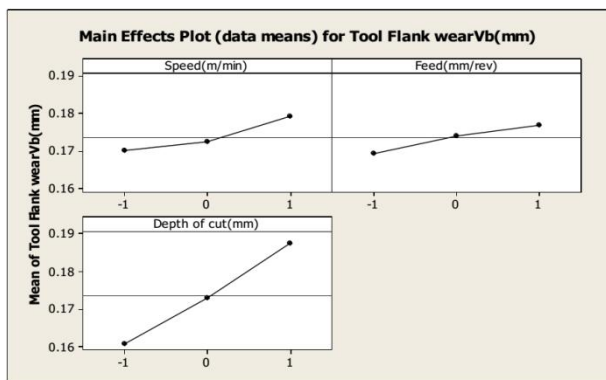


Figure I.34: Effets moyen pour l'usure de l'outil

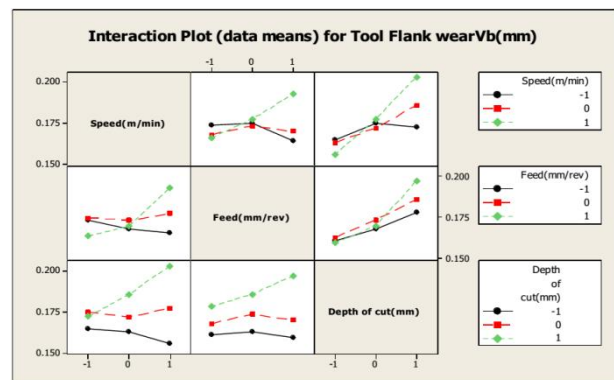


Figure I.35: Interaction pour l'usure de l'outil.

Fnides B et al. [36] ont réalisé une étude expérimentale pour l'évaluation de la durée de vie des matériaux de coupe utilisés lors du tournage dur à sec de l'acier AISI H11, traité à 50 HRC. Cet acier est destiné pour le travail à chaud et la fabrication des moules et matrices. Les essais de tournage sont réalisés par plusieurs matériaux de coupe: carbures (H13A et GC3015), céramique (CC650 et CC670 mixte renforcé) et cermets (CT5015 et GC1525). Les essais sont réalisés avec le régime de coupe suivant (profondeur de passe $a_p = 0.15$ mm, vitesse d'avance $f = 0.08$ mm/tr et la vitesse de coupe $V_c = 120$ m/min).

Les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs ont permis d'étudier l'influence des temps d'usinage sur l'usure en dépouille VB de ces matériaux de coupe et de déterminer leur durée

de vie. Il ressort de ces résultats que la céramique mixte (insert de CC650) est plus résistante à l'usure que les autres matériaux de coupe. Sa durée de vie est de 49 min et par conséquent, ce matériau est plus performant. Pour les autres matériaux, la durée de vie des cermet revêtus et non revêtus (CT5015 et les cermet GC1525) est inférieure à 2 min. La durée de vie du carbure non revêtu H13A est de 4,5 min. Par contre la durée de vie de la céramique renforcée CC670 est que de 8 min. Toutefois, la durée de vie du carbure revêtu GC3015 est de 16 min. Quant à la céramique mixte, sa durée de vie de l'outil est de 49 min.

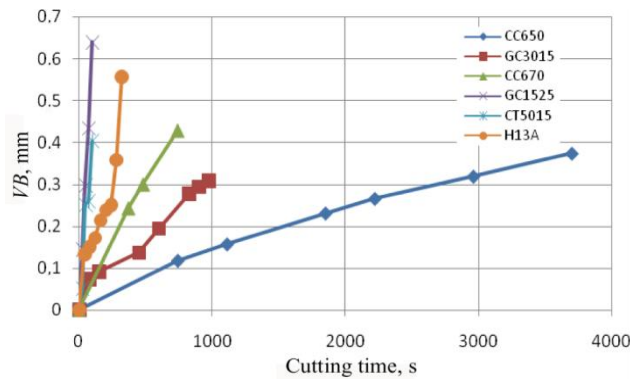


Figure I.36 : Usure en fonction du temps des différents matériaux

Doniavi et al [37] ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (MSR) afin de développer un modèle empirique pour la prédiction de la rugosité de surface et de choisir les conditions de coupe optimales lors du tournage dur. Les auteurs ont montré que l'avance a un impact significatif sur la rugosité de surface. L'analyse de variance (ANOVA) a été appliquée et a montré que l'influence de la profondeur de coupe sur la rugosité de surface est faible par rapport à l'avance et la vitesse de coupe.

Asiltürk et al [38] ont présenté une nouvelle méthode d'optimisation multi-objective pour déterminer les conditions de coupe optimales et les modèles mathématiques pour la rugosité de surface (R_a et R_z) lors du tournage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 par un outil en carbure revêtu dans des conditions à sec. Les influences de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur la rugosité de surface sont examinées. Les modèles mathématiques de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe sont obtenus en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). Les résultats indiquent que la vitesse d'avance est le facteur dominant affectant la rugosité de surface, qui est réduite au minimum quand la vitesse d'avance et la profondeur de passe sont placées au niveau le plus bas, alors que la vitesse de coupe est placée au niveau le plus élevé. La méthode de Taguchi et l'analyses statistiques de surface de réponse ont indiqué que la vitesse

d'avance est un facteur significatif sur la rugosité de surface de la pièce (R_a et R_z) avec une contribution de 85.5%.

Une tentative a été faite par **Gaitonde V. N. et al. [39]** pour analyser les effets de la profondeur de coupe et du temps d'usinage sur des aspects d'usinabilité. Ces aspects considérés sont : l'effort de coupe, la puissance de coupe, l'effort spécifique, la rugosité de surface et l'usure de l'outil. L'étude a été réalisée sur un acier à outil de travail à froid à haute teneur en chrome AISI D2 en utilisant des plaquettes de coupe en céramique classique et wiper. Les auteurs ont trouvé dans l'analyse des résultats que la puissance de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance, tandis que l'effort spécifique diminue, alors que l'effort de coupe requis est faible pour des faibles valeurs d'avance et de temps d'usinage. Ils ont également trouvé que à travers l'analyse de la surface de réponse que la rugosité de la surface diminue à des valeurs plus faibles pour la vitesse d'avance et de temps d'usinage avec des vitesses de coupe plus élevées, alors que l'usure maximale des outils se produit à $V_c = 150$ m/min.

Pour le même matériau, **Davim et Figueira [40]** ont étudié l'usinabilité de l'acier à outils AISI D2 en utilisant des techniques expérimentales et statistiques. Des opérations de tournage dur ont été effectuées sur un matériau ayant une dureté de 60 HRC. Les tests ont été effectués en utilisant la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et le temps comme paramètres d'entrée, et l'analyse a été effectuée sur la base des réponses. L'influence des paramètres de coupe sur l'usure de l'outil, l'effort spécifique et la rugosité de surface est évaluée durant l'opération du tournage avec des outils de coupe en céramique classique et wiper à l'aide de l'analyse d'ANOVA. Ils ont découvert qu'avec des plaquettes de coupe en céramique « wiper », des surfaces usinées avec $R_a < 0,8 \mu\text{m}$ sont réalisables. Par conséquent, des qualités de surface (précision dimensionnelle) dans une pièce de précision mécanique, $IT < 7$, sont possibles.

Les mêmes auteurs **[41]** ont utilisé des outils de coupe en céramique, composés à environ (70%) de Al_2O_3 et (30%) de TiC , dans des opérations de finition de surface sur le même matériau (acier AISI D2) traité à une dureté de 60 HRC. Ils ont adopté un plan d'expérience de Taguchi. Les résultats des tests trouvés par les auteurs ont montré qu'avec des paramètres de coupe appropriés, il est possible d'obtenir une rugosité de surface ($R_a < 0,8 \mu\text{m}$) qui permettent d'éliminer les opérations de rectification.

Dans le but de l'optimisation des paramètres de coupe et la géométrie d'outil pour des opérations de tournage, **Süleyman Neşeli et al [42]** ont réalisés une investigation expérimentales sur l'influence des paramètres de coupe et la géométrie de l'outil sur la finition

de surface obtenu dans l'opération durant le tournage de l'acier AISI 1040, Ils ont utilisés la méthode de surface de réponse (RSM), et ils ont développés un modèle de prédiction lié à la rugosité moyenne de surface (Ra) à partir des données expérimentales.

Les résultats trouvés par les auteurs dans cette recherche indiquent que (**Tableau I.3**) :

1. le résultat d'ANOVA a montré que les modèles mathématiques quadratiques permettent la prévision du paramètre de la rugosité de surface avec un intervalle de confiance de 96%.
2. le rayon de bec d'outil est le facteur le plus important sur la rugosité de surface avec la contribution de 51.45% de la variabilité totale du modèle. Un petit effet quadratique de rayon de bec de l'outil fournit une petite contribution au modèle.
3. En outre, l'angle de direction et l'angle d'inclinaison sont des facteurs significatifs sur la rugosité de surface avec une contribution de 18.24% et 17.74% de la variabilité totale du modèle, respectivement.
4. L'interaction entre les facteurs n'a pas d'effet significatif sur la rugosité de surface.
5. En plus, ils ont observés une bonne concordance entre la rugosité de la surface mesurée et prédite.
6. L'utilisation de l'optimisation de la réponse (Ra), montre que la combinaison optimale des paramètres d'usinage est ($r=0,4$ mm, $\chi=60^\circ$, $\gamma=-3^\circ$).

Tableau I.3 : L'analyse de variance pour la rugosité de surface.

	SS	df	MS	F	P	PC%
Γ	54.031478	1	54.031478	266.901958	0.000000	51.45
κ	19.151861	1	19.151861	94.605391	0.000000	18.24
γ	18.631443	1	18.631443	92.034658	0.000000	17.74
$\Gamma * \Gamma$	5.343041	1	5.343041	26.393282	0.000082	5.09
$\kappa * \kappa$	0.084728	1	0.084728	0.418536	0.526308	0.08
$\gamma * \gamma$	1.584148	1	1.584148	7.825295	0.012374	1.51
$\Gamma * \kappa$	0.372416	1	0.372416	1.839643	0.192734	0.35
$\Gamma * \gamma$	1.290352	1	1.290352	6.374016	0.021816	1.23
$\kappa * \gamma$	1.078800	1	1.078800	5.329003	0.033811	1.03
Residual error	3.441470	17	0.202439			3.28
Total SS	105.0097	26				

Le but du travail rapporté par **Asiltürk et Neseli [43]** est de modéliser la rugosité de surface durant le tournage à sec de l'acier inoxydable austénitique AISI 304, en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). Un plan orthogonal a été appliqué pour étudier l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de coupe) sur la rugosité de surface.

Le travail de **Bhushan [44]**, présente une étude expérimentale sur les effets de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance, de la profondeur de coupe et du rayon de bec lors du

tournage du l'alliage composite 7075 Al SiC sur CNC. Les paramètres de coupe qui ont été optimisés sont : la consommation d'énergie et la durée de vie de l'outil. La méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'analyse de désirabilité ont été utilisées pour déterminer les valeurs optimales des paramètres de coupe qui minimisent la consommation d'énergie et maximisent la durée de vie de l'outil.

Dureja et al [45] ont étudié la modélisation de l'usure de l'outil et la rugosité de la surface, par la méthodologie de surface de réponse (MSR) lors du tournage dur de l'acier AISI H11 avec des plaquettes céramiques mixtes revêtues de TiN. L'effet des paramètres de coupe, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce sur les facteurs de réponse, tels que: l'usure en dépouille et la rugosité de surface, ont été étudiés en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA). Les auteurs ont proposé un modèle quadratique, et la fonction de désirabilité a été employée pour l'optimisation multiple des facteurs de réponse. Ils indiquent aussi des tests de confirmation pour vérifier la validité des modèles développés. Les résultats de ce travail indiquent que l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce ont un impact statistiquement significatif sur l'usure en dépouille, par contre l'avance et la dureté de la pièce sont les facteurs significatifs affectant la rugosité de surface. L'usure de l'outil a été observée par un microscope, et la caractérisation d'usure de certaine plaquette a été effectuée par un microscope électronique à balayage et une analyse par rayon X. D'après les auteurs, l'outil semble être usé par l'abrasion, l'usure en entaille et l'écaillage de la surface d'outil dû au frittage et à l'impact des particules dures dans le matériau de coupe ce qui provoque une usure adhésive.

Al-Ahmari et al [46] ont élaboré des modèles empiriques de la durée de vie de l'outil, la rugosité de surface et la force de coupe pour les opérations de tournage. Les paramètres de coupes utilisées dans l'étude étaient la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le rayon du bec de l'outil. Ils ont utilisé deux méthodes pour l'élaboration des modèles mathématiques. La première est la méthodologie de surface de réponse (MSR) et le deuxième est les réseaux de neurones (NN).

Ranganathan et al. [47] ont étudié l'usinabilité de l'acier inoxydable 316L pendant le tournage à chaud à différentes températures (200, 400 et 600°C) à l'aide d'un outil en carbure de tungstène. Ils ont utilisé deux méthodes statistiques qui sont la méthode de la surface de réponse et réseau de neurone pour modéliser l'évolution de l'état de surface en fonction de différents conditions de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Les auteurs ont constaté que l'avance est le facteur le plus influant sur la rugosité Ra avec une contribution de 51% à la température de 200°C, 29% à 400°C et 20% à 600°C. En plus, les

deux méthodes ANN et RSM ont été comparées de point de vue précision, la première méthode était plus fiable par rapport à la deuxième.

Kara et al. [48] ont effectué une étude pour la modélisation des efforts de coupe générés lors du tournage de l'acier inoxydable austénitique AISI 316L. La méthode de réseau de neurones artificiels (ANN) et l'analyse de régression multiple ont été utilisées. Les paramètres d'entrée du modèle étaient la vitesse de coupe, l'avance et le type de revêtement. Les outils de coupe en carbure de tungstène non revêtu et à revêtements ($\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ et Al_2O_3), ont été choisis. Ils ont noté que l'augmentation de l'effort de coupe tangentiel dépende à l'augmentation de l'avance. En plus l'augmentation de la vitesse de coupe mène à la diminution de l'effort tangentiel. Ils ont conclu aussi que le carbure non revêtu donne des efforts de coupe plus grands que les autres nuances de coupe, ceci est très claire surtout pour des vitesses inférieure à 100 m/min. D'après les auteurs, les résultats de prédiction ont montré que l'ANN a été la méthode la plus souhaitable par rapport à la méthode de régression multiple en termes de précision.

Das et al. [49] justifient l'utilisation des ANN pour le développement des modèles de la rugosité de surface lors de l'usinage du matériau composite Al-4.5Cu-1.5TiC, par sa grande compétence de détecter le comportement non linéarité des systèmes.

Bachy et Franke [50] utilisent l'ANN et MSR pour développer des modèles mathématiques du processus Lazer, les résultats montrent que les réseaux de neurones artificiels génèrent la plus faible erreur, ce qui justifie la conclusion qui concerne la haute précision de l'ANN comparé à la méthodologie de surface de réponse MSR.

Yang et Tarnng ont appliqué la technique de Taguchi pour déterminer les paramètres de coupe optimaux lors du tournage des barres d'acier S45C à l'aide d'outils de coupe en carbure de tungstène [51]. La vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (f) et la profondeur de coupe (a_p) ont été sélectionnées comme des paramètres d'entrée. Le rapport signal/bruit (S/N) et l'analyse ANOVA ont été utilisés pour déterminer l'effet des paramètres de coupe sur la durée de vie de l'outil et la qualité de la surface, ce qui a permis de sélectionner et d'affirmer les paramètres de coupe optimaux.

Dans un autre aspect, **Yücel et Günay [52]** ont présenté une étude visant à modéliser l'effort de coupe (F_c) et de la rugosité moyenne (R_a) et d'optimiser les conditions de coupe lors de l'usinage d'une fonte blanche fortement alliée (Ni-Hard) basé sur le plan de Taguchi (L_{18} OA). Le matériau de l'outil de coupe, la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe ont été choisis comme conditions de coupe (facteurs de contrôle). La caractéristique de performance «le plus petit est le meilleur» a été appliquée afin d'obtenir les

conditions de coupe optimales. Les effets des conditions de coupe sur les variables de sortie d'usinage ont été évalués par l'analyse de la variance. Les résultats ont montré que la profondeur de coupe et la vitesse d'avance sont les facteurs les plus significatifs sur F_c et R_a , respectivement. En outre, les conditions de coupe optimales ont été établies aux différents niveaux pour l'effort de coupe et la rugosité de surface mesurées.

La méthode de Taguchi a été également appliquée par **Thamizhmanii et al. [53]** pour obtenir optimiser les conditions de coupe afin de minimiser la rugosité de surface lors du tournage de l'acier allié SCM 440. Ils ont constaté que les causes d'un mauvais état de surface sont les vibrations de la machine-outil et les vibrations de l'outil dont les effets sont ignorés durant l'analyse. Les auteurs ont conclu que la profondeur de coupe a un effet significatif sur la rugosité de surface suivie par la vitesse d'avance et la vitesse de coupe. Selon cette étude, une profondeur de coupe comprise entre 1 et 1.5 mm est recommandée pour obtenir la meilleure rugosité de surface.

L'objectif de l'étude de **Selvaraj et al. [54]** est d'optimiser les paramètres de tournage à sec de deux qualités différentes d'acier inoxydable duplex alliées à l'azote en utilisant la méthode de Taguchi. Les résultats ont révélé que la vitesse d'avance est le paramètre le plus important qui affecte à la fois la rugosité de la surface et l'effort de coupe. La vitesse de coupe a été identifiée comme le paramètre le plus important lorsque l'usure de l'outil est considérée.

Bhattacharya et al. [55] ont étudié les effets des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et la consommation d'énergie en utilisant la méthode de Taguchi. Ils ont utilisé une technique combinée en utilisant la matrice orthogonale et l'analyse de la variance pour étudier la contribution et les effets de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe sur trois critères de rugosité de surface et de la consommation d'énergie. Les résultats d'ANOVA ont prouvé que le facteur le plus significatif affectant à la fois la rugosité de surface et la consommation d'énergie est la vitesse de coupe, tandis que les autres paramètres n'ont pas un effet significatif sur les réponses.

Fratila et Caizar [56] ont minimisé la puissance de coupe et la rugosité de surface lors du fraisage de l'acier ($AlMg_3$). La méthode d'optimisation de Taguchi a été appliquée pour atteindre l'objectif fixé dans cette étude.

Aslan et autres [57] ont réalisé une étude expérimentale en utilisant les techniques de Taguchi, concernant le tournage de l'acier endurci AISI 4140 avec un outil en céramique mixte. Tout en s'appuyant sur les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA), les auteurs ont indiqué que la rugosité de surface était principalement influencée par les interactions

suivante ; vitesse de coupe-avance et avance-profondeur de passe. La rugosité surface (Ra) a été modélisé par la régression linéaire multiple.

Bouzid et al. [58] ont déterminé la rugosité de surface minimale qui correspond à un maximum de volume de copeau enlevé avec des méthodes optimisations mono et multi-objectif. Dans cet article, les auteurs ont suivi une démarche qui contient quatre étapes : investigation statistique des résultats expérimentaux basés sur l'ANOVA, modélisation basée sur l'analyse de régression et optimisations mono- et multi-objectif. Dans la première étape, les auteurs ont effectués des expériences de tournage sur la base d'un plan réduit de Taguchi (L_{16}). Ils ont utilisé l'analyse de la variance et le diagramme des effets d'interaction pour déterminer les effets des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et le volume de copeaux enlevé. Dans la deuxième étape, les chercheurs ont utilisé l'analyse de régression pour formuler des modèles mathématiques de second ordre qui aide à faire des prédictions des réponses dans le processus de tournage de l'acier X20Cr13 avec une erreur minimale. Dans la troisième étape, ils ont utilisé seulement les réponses dans l'étude d'optimisation en tant que fonction objectif. Pour minimiser toutes les réponses, ils ont employé le rapport signal-sur-bruit de Taguchi. Dans la dernière étape, ils ont fait une optimisation simultanée des réponses basée sur l'analyse relationnelle grise.

Les différentes conclusions tirées par les auteurs sont comme suit :

- ✓ L'avance et de la profondeur de coupe sont respectivement les facteurs les plus importants pour Ra et MRR.
- ✓ Pour l'optimisation par la méthode de Taguchi les valeurs optimales trouvées pour minimiser la rugosité de surface sont : vitesse de coupe 120 m/min, l'avance de 0.08 mm/tr et la profondeur de coupe 0.15 mm. Les valeurs optimales pour maximiser MRR sont : la vitesse de coupe 280 m/min, l'avance 0.2 mm/tr et la profondeur de coupe 0.6 mm.
- ✓ Pour l'optimisation par l'analyse relationnelle grise, les valeurs optimales trouvées pour minimiser la rugosité de surface et maximiser le volume de copeaux enlevé sont : la vitesse de coupe 280 m/min, l'avance 0.08 mm/tr et la profondeur de coupe de 0.6 mm. Le pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites pour Ra et MRR en utilisant GRA sont 3.27% et 0.01%, respectivement.

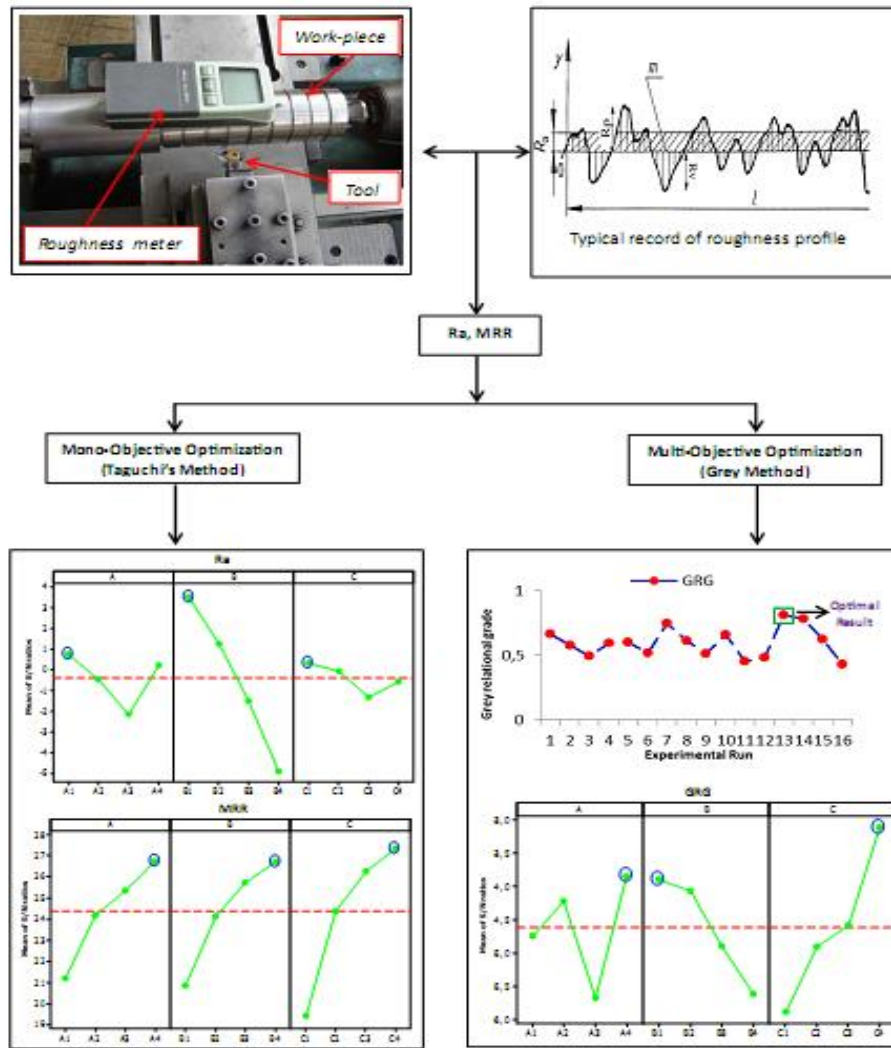


Figure I.37 : Etapes d'optimisation pour Ra et MRR

Sahoo et al [59] ont mené une étude sur le tournage dur de l'acier AISI 4340 (47 HRC) avec une plaquette en carbure revêtu (revêtement multicouche ZrCN). Les auteurs ont utilisé la méthode Grey et Taguchi pour développer des modèles mathématiques pour la rugosité de surface et l'usure en dépouille et l'optimisation du processus d'usinage. Les modèles mathématiques proposés sont statistiquement significatifs et adéquats en raison de leur valeur R^2 (coefficient de corrélation) élevée.

Hanafi et al. [60] ont appliqué de la méthode d'analyse relationnelle grise basé sur la méthode de Taguchi afin d'optimiser les paramètres de coupe pour le PEEK renforcé par 30% de fibres de carbone. Le matériau est usiné en utilisant des outils avec revêtement TiN dans des conditions de coupe à sec. L'objectif d'optimisation est d'atteindre simultanément la consommation minimale de la puissance de coupe et la meilleure qualité de surface. Les résultats obtenus ont indiqué que la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont les paramètres les plus influents. Le régime de coupe optimale permet d'atteindre une

minimisation simultanée de rugosité de surface et de puissance de coupe a été déterminée en utilisant l'analyse relationnelle grise basé sur la méthode de Taguchi. Les auteurs ont indiqué que la combinaison optimale des paramètres de coupe est : la vitesse de coupe de 100 m/min, avance de 0.05 mm/tr et une profondeur de passe de 0.5 mm.

L'effet néfaste d'avance sur la rugosité a été pareillement signalé par **Kacal et Yildirim [61]** pendant le tournage dur de l'acier d'outillages à froid AISI D6 par des plaquettes de céramique et de CBN. Les auteurs ont appliqué l'analyse relationnelle grise (GRA) pour optimiser les conditions de coupe en faveur de la rugosité de surface, il s'agit de la puissance de coupe, l'usure d'outil et de l'effort de coupe spécifique.

Wu [62] et **Arfaoui [63]** ont démontré que le comportement vibratoire de l'outil de coupe en tournage dépend principalement de l'angle d'attaque, l'angle de dépouille, l'avance, la profondeur de passe et la vitesse de coupe.

Thomas et al [64] ont collecté et analysé les résultats de la rugosité superficielle et la vibration de l'outil lors du tournage de l'acier au carbone à différents niveaux de vitesse d'avance, profondeur de coupe, rayon de l'outil, porte à faux de l'outil et la longueur de la pièce. L'analyse des vibrations a révélé que la force dynamique, liée à la variation d'épaisseur de copeau agissant sur l'outil, est liée à l'amplitude des vibrations de l'outil à sa fréquence naturelle pendant la coupe.

Cheung et Lee [65] ont examiné les vibrations de coupe entre l'outil et la pièce et ils ont montré que la rugosité de surface usinée présente des composantes particulières dans la plage de fréquence inférieure qui sont étroitement liées aux fréquences propres du système de la broche de la pièce dans la gamme des hautes fréquences.

Arizmendi et al [66] ont observé dans cette étude que la vibration de l'outil pendant le processus de coupe est l'un des facteurs qui influence plus la surface usinée et peut détériorer la qualité de la surface. Les auteurs ont investigué l'influence de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et le temps d'usinage sur les aspects d'usinabilité tels que la force de coupe spécifique, la rugosité de surface et l'usure de l'outil lors du tournage dur de l'acier AISI D2. Les auteurs ont proposé des modèles mathématiques en utilisant la méthodologie de surface de réponse MSR.

Vikas Upadhyay et al [67] ont fait une tentative pour utiliser des signaux de vibration pour la prédiction de la rugosité de surface pendant la l'usinage de l'alliage Ti-6Al-4V (figure I.38). L'étude a été réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, seulement l'amplitude de l'accélération des vibrations de l'outil dans la direction axiale, radiale et tangentielle a été

utilisée pour développer des modèles de régressions multiples. Le premier et le deuxième modèle de régression ainsi développés n'étaient pas trouvés assez précis.

Modèle du premier ordre (*FOM*)

$$Ra = 1.84 - 2.05V_x + 0.124V_y + 0.084V_z$$

$$R^2 = 52.8\%$$

Modèle du second ordre (*SOM*)

$$Ra = -27.6 + 171V_x + 0.43V_y - 1.1V_z - 247V_x^2 - 0.0167V_y^2 + 0.47V_z^2 + 0.24V_x \times V_y - 0.126V_y \times V_z - 0.7V_x \times V_z$$

$$R^2 = 70.5\%$$

Dans la deuxième étape, les auteurs ont proposé un modèle où l'avance et la profondeur de passe coupe ont été incluse en tant que paramètres d'entrée mis à part les accélérations dans la direction radiale et tangentielle. Le modèle trouvé est comme suit, avec un $R^2=93,2\%$.

$$Ra = -0.035 + 7.96 \times s + 0.116 \times t + 0.0455 \times V_y - 0.0351 \times V_z$$

$$R^2 = 93.2\%$$

Le modèle trouvé fournit une bonne précision de prédiction (erreur maximale inférieure à 7,45%) de la rugosité de surface. Finalement, les auteurs ont développé un modèle de réseau neuronal artificiel car il peut être facilement intégré dans un environnement de fabrication.

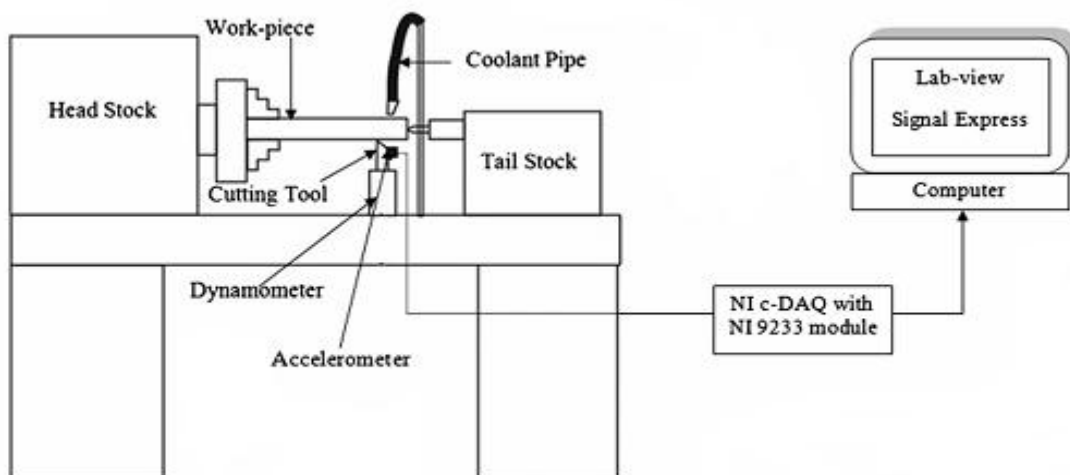


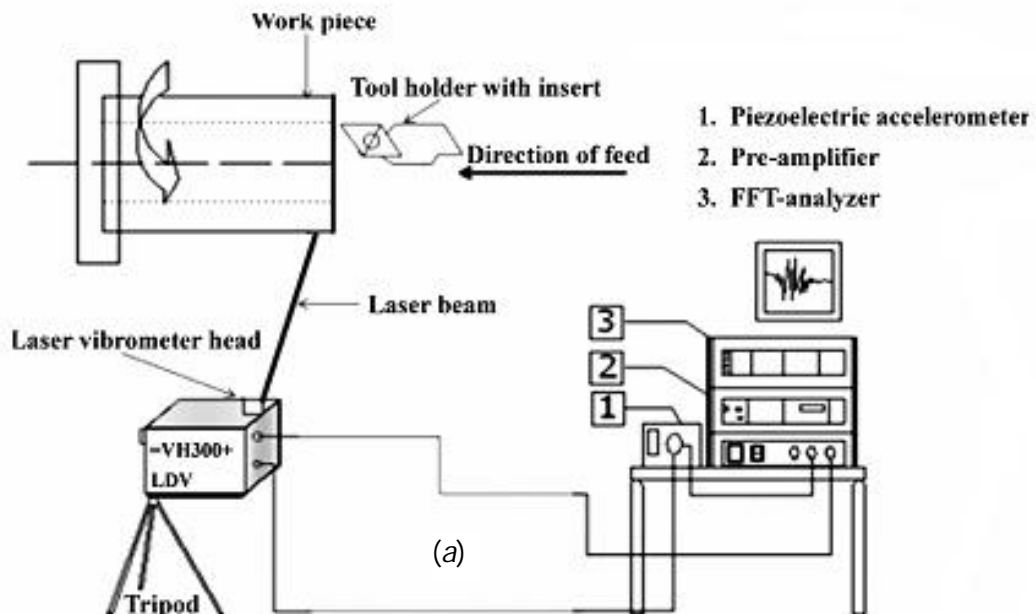
Figure I.38 : Configuration de l'expérimentation

La vibration est l'un des problèmes intenses dans le processus d'alésage. L'usinage et l'usure de l'outil sont affectés énormément par la vibration de l'outil due à la longueur de la barre

d'alésage. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail de recherche élaboré par **Venkata Rao et al [68]**. Le travail a pour but d'estimer l'effet des paramètres de coupe sur les vibrations de la pièce à usiner, la rugosité de surface et le volume de métal enlevé lors de l'alésage de l'acier (AISI 1040). Les auteurs ont utilisé un laser à effet Doppler vibromètre (LDV) pour l'acquisition des données en ligne et un analyseur à grande vitesse de FFT a été aussi utilisé pour la vibration de la pièce (figure I.39 (a et b)). Les auteurs ont préparé un plan d'expérience de huit expériences avec deux niveaux de coupe des paramètres tels que la vitesse de rotation de la broche, l'avance par tour et le rayon de bec de l'outil. La méthode de Taguchi a été employée pour optimiser les paramètres de coupe et une analyse de régression multiple est faite pour obtenir la relation empirique de durée de vie de l'outil, la rugosité de la surface usinée, le volume de métal coupé et l'amplitude des vibrations de la pièce usinée.

Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

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





(b)

Figure I.39 : (a), (b) Configuration expérimentale

I.13 Conclusion

Ce chapitre a été réservé à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux en générale et le tournage en particulier. La dernière partie de cette étude bibliographique est consacrée aux travaux de recherche en tournage et particulièrement la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe. Cette étude nous a permis de comprendre les phénomènes physiques intervenants dans le processus de coupe et aussi les méthodes modernes d'optimisation des conditions de coupe.

CHAPITRE II

APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des moyens et techniques expérimentales exploités pour la réalisation des expériences, afin de caractériser le comportement du couple (outil-matière). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés et qui servent au suivi de l'évolution des paramètres technologiques obtenue lors des essais. Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la réalisation des expériences ainsi que le choix des plans d'expériences et les conditions de coupe.

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'ensemble des moyens et des techniques expérimentales utilisés pour l'élaboration des expériences afin d'examiner, modéliser et optimiser les paramètres technologiques obtenue lors du tournage de l'acier AISI D3 avec des plaquettes de coupe en céramique mixte et des carbures métalliques revêtu en CVD en fonction de la variation des paramètres de coupe. Il s'agit de la présentation d'un banc d'essais comportant un tour, une plate forme pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre (2D et 3D) pour déterminer la rugosité de la pièce usinée, un microscope pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe et un vibromètre pour la mesure de la vibration. Les spécifications des plans adoptés pour l'approche expérimentale avec les conditions de coupe sont également présentées. Les expériences ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) du département de génie mécanique de l'université du 08 Mai 1945 de Guelma.

II.2 Matériels utilisés

Pour la réalisation des expériences concernant l'étude envisagée, il est nécessaire de préparer les équipements et les moyens de mesure :

II.2.1 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40C de puissance sur la broche égale à 6,6 KW (*fig. II.1*).

Les fréquences de rotation disponibles sur le tour sont : (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400 et 2000) tr/min. Les avances disponibles sur la machine sont : (0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24;...0,8... ; 6,4) mm/tr.



Figure II.1: Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

II.2.2 Matériau à usiner

Le matériau utilisé dans cette étude expérimentale est l'acier fortement allié AISI D3, il a plusieurs désignations tels que : DIN 1.2080, JIS SKD1, GB Cr12, AFNOR Z200Cr12. Ce matériau est un acier à outil à haute teneur en chrome présentant le minimum de risques de déformation et d'altération des dimensions aux traitements thermiques. Il a une excellente tenue à l'usure (haute résistance à l'usure). Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suit [69]:

- Densité : 7.7g/cm³.
- Module d'élasticité (module de Young) : 210 GPa.
- Conductibilité thermique : 20 W/m.C°.
- Coefficient moyen de dilatation en m/m°K :
 - entre 20°C et 100°C : 10,8.10⁻⁶
 - entre 20°C et 200°C : 11,7.10⁻⁶
 - entre 20°C et 300°C : 12,2.10⁻⁶
 - entre 20°C et 400°C : 12,6.10⁻⁶
 - entre 20°C et 500°C : 12,8.10⁻⁶
 - entre 20°C et 600°C : 13,1.10⁻⁶
 - entre 20°C et 700°C : 13,3.10⁻⁶
- Dureté : 250 HB ou 23,5 HRC
- Conductibilité thermique en W/(m°K):
 - à 20°C : 16,7
 - à 350°C : 20,5
 - à 700°C : 24,2

La composition chimique de l'acier AISI D3 est présentée dans le tableau II.1 comme suit:

Tableau II.1: Composition chimique de l'acier AISI D3.

Elément	C	Si	Mn	Cr	T	P	S	Cu	Mo	Ni
%	2,00	0,31	0,29	12,00	0,70	0,011	0,009	0,162	0,124	0,259

L'acier fortement allié AISI D3 est utilisé surtout pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, outillage d'usinage du bois, outillage de presses à blocs, tiges de fermeture et moules à matières plastiques très résistants à l'usure, rouleaux profilés, filières d'étréage, galets profileurs, mollettes, outils à bois, peignes à rouler des filets, etc.... [69]. Les éprouvettes utilisées pour les essais de rugosité, des efforts de coupe, de vibration et d'usure, sont coupées sur des barres plaines en acier AISI D3 laminées à chaud et qui possèdent un diamètre D=70 mm et une longueur L= 400 mm (*fig. II.2 et fig. II.3*).

L'éprouvette utilisée pour les essais de rugosité, des efforts de coupe, de vibration est composée de plusieurs paliers de 15 mm de longueur pour chacun.

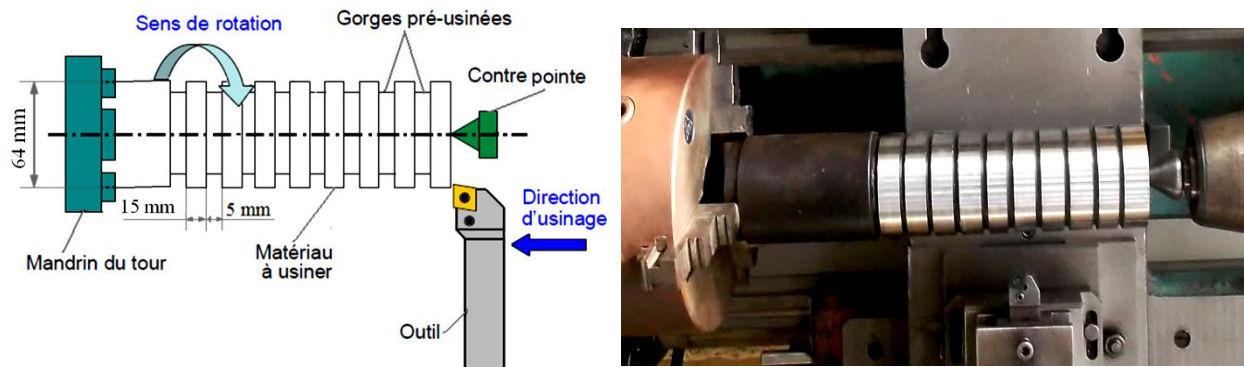


Figure II.2 : Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais de rugosité, des efforts de coupe et de vibration.

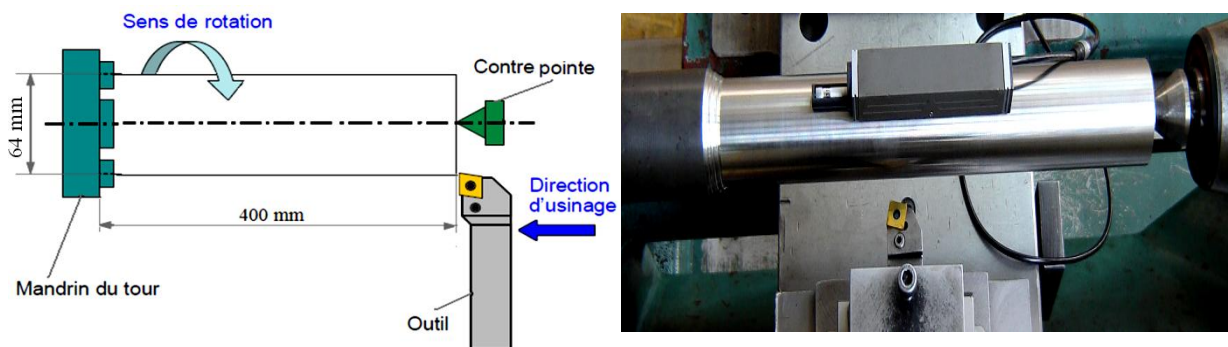


Figure II.3 : Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais d'usure.

II.2.3 Outils de coupe utilisés

II.2.3.1 Plaquette de coupe

Toutes les opérations de chariotage durant cette étude expérimentale ont été usinées par deux types de matériaux de coupe : trois plaquettes en céramique noire CC650 dont chaque plaquette est caractérisées par un rayon de bec $r = 0.8 \text{ mm}$, 0.12 mm , 0.16 mm et des plaquettes en carbure métallique GC4215 revêtu en CVD. Ces dernières sont amovibles, de forme carrée à fixation mécanique par trou centrale et chacune d'elles possède huit arêtes de coupe. Elles sont de marque SANDVIK. Les informations relatives aux plaquettes sont mentionnées dans le tableau (II.2).

Tableau II.2: Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.

Matériau de coupe	Désignation firme	Désignation ISO	Firme	Composition	Rayon r_e
Carbure revêtu	4215	SNMG 12 04 08-PM	Sandvik	$Al_2O_3+TiC+TiCN$	0.8
Céramique mixte	CC650	SNGA120408T01020	Sandvik	70% Al_2O_3 et 30% TiC	0.8
Céramique mixte	CC650	SNGA120412T01020	Sandvik	70% Al_2O_3 et 30% TiC	1.2
Céramique mixte	CC650	SNGA120416T01020	Sandvik	70% Al_2O_3 et 30% TiC	1.6

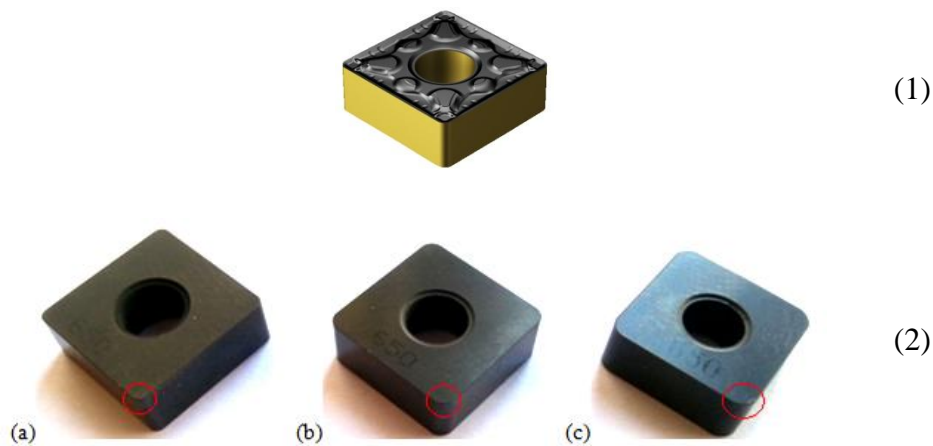


Figure II.4: Plaquettes de coupe utilisées : (1) Outil en carbure métallique GC4215 avec revêtement CVD, (2) outil en céramique noire CC650. (a) $r=0.8$ mm, (b) $r=1.2$ mm et (c) $r=1.6$ mm.

II.2.3.2 Portes outils

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé deux portes outils sur lesquels on fixe les plaquettes mécaniquement par trou central. La géométrie des portes outils est la même mais elle se diffère uniquement pour l'angle de direction principale, elle est donnée dans le tableau (II.3). La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte outil, une cale-support en carbure métallique vissé et rectifiée, protège le porte outil et garantit un contact parfait de la plaquette (fig. II.5).

Tableau II.3: Caractéristiques géométriques des portes outils.

Désignation	Marque	Section (mm^2)	χ_r°	α°	γ°	λ°
PSBNR2525K12	SANDVIK	25×25	75°	6°	-6°	-6°
PSDNN2525M12	SANDVIK	25×25	45°	6°	-6°	-6°

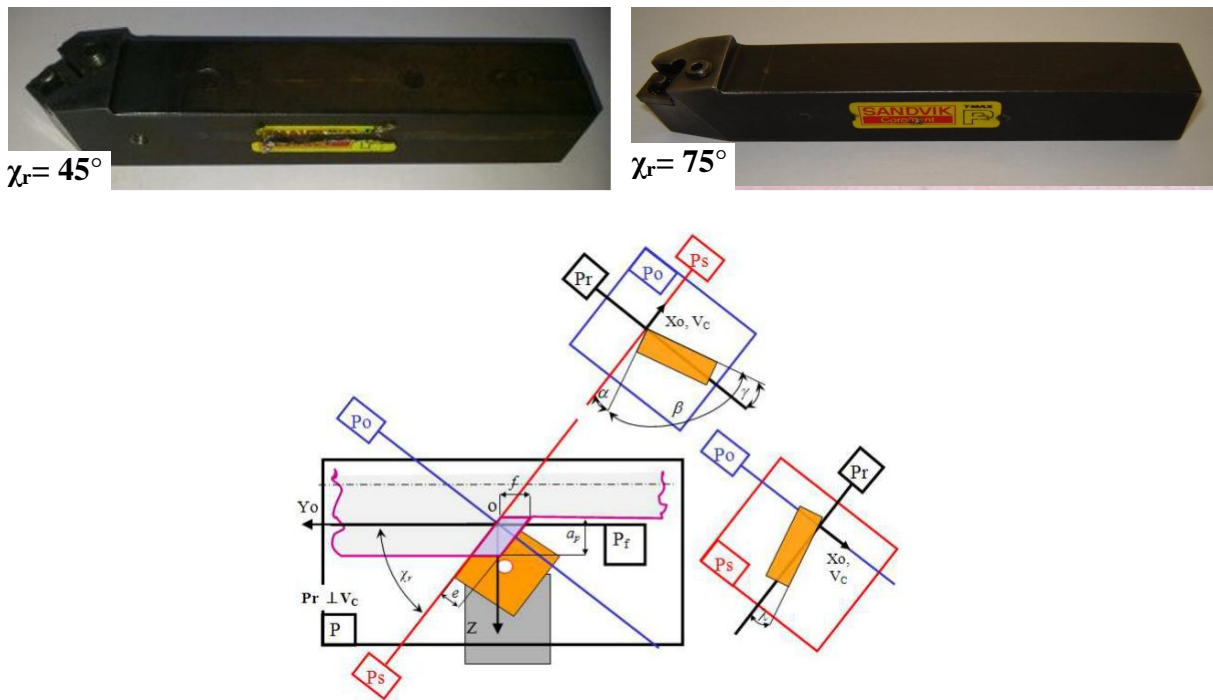


Figure II.5: Portes outils utilisés avec illustration de la géométrie.

II.2.4 Appareillage de mesures utilisées

II.2.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour connaître l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne dynamomètre (*KISTLER 9257 B*), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (*fig. II.6*). Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques. Ces dernières sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (*DYNOWARE*) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes :

- force axiale : $F_x (Fa)$;
- force radiale : $F_y (Fr)$;
- force tangentielle : $F_z (Ft)$.

Le dynamomètre (9257 B) présente les caractéristiques suivantes :

- Grande rigidité, fréquence propre très élevée;
- Large gamme de mesure ;
- Bonne linéarité, sans hystérésis;
- Faible interaction (<1%) ;
- Utilisation simple (prêt à l'emploi);
- Construction compacte ;
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- Ordinateur personnel (PC).

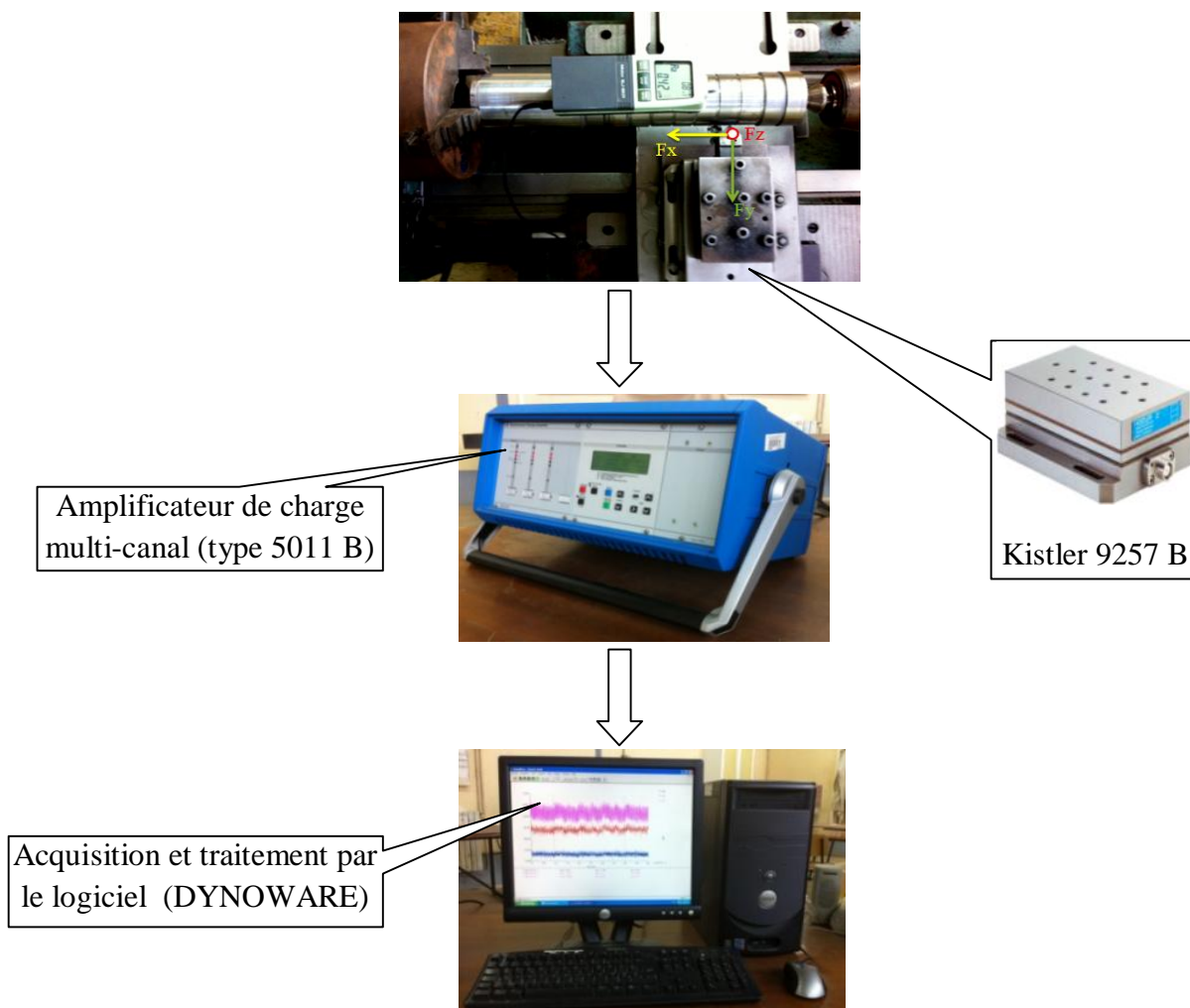


Figure II.6 : Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II.2.4.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

➤ Rugosimètre 2D

Pour la mesure des différents critères de rugosité (Ra , Rt et Rz) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) Surf-test 201 (Mitutoyo). Il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. 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. Les mesures sont répétées à trois reprises sur la surface de la pièce usinée à trois lignes de référence également positionnés à 120° et le résultat final est une moyenne de ces valeurs (**fig. II.7**).

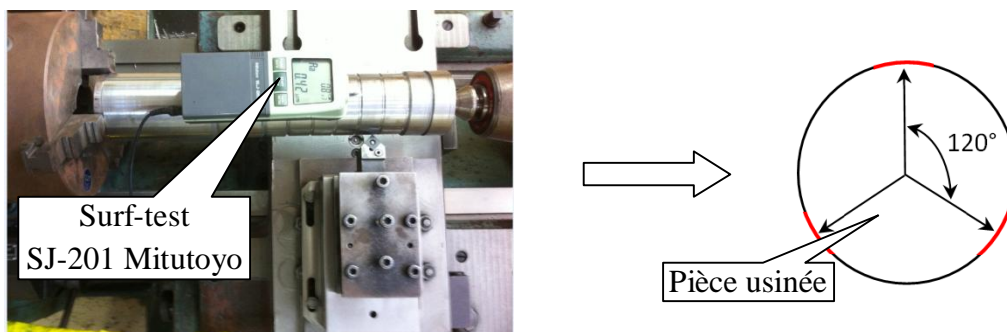


Figure II.7 : Rugosimètre 2D (Surf-test 201, Mitutoyo)

➤ Rugosimètre 3D

Pour mieux visionné la surface usinée nous avons utilisé un appareil de métrologie optique *AltiSurf*® 500. Cet appareil permet d'étudier finement la topographie de la surface des pièces usinée (**fig. II.8**).

L'appareil *AltiSurf*®500 standard est composé :

- ✓ D'une base en granite ;
- ✓ D'un ensemble inférieur ou base de déplacement : Plusieurs tables de déplacement motorisées de haute précision permettant le mouvement de l'échantillon selon les axes X et Y, éventuellement selon un ou plusieurs axes rotatifs. Une plateforme rectangulaire permet de poser l'échantillon à mesurer ;
- ✓ D'un ensemble supérieur ou ensemble mesurant : Une table de déplacement motorisée de haute précision commande le mouvement de l'ensemble. Un support multi position accueille différents capteurs *AltiProbe*® optique, inductif, micro force, laser. Une caméra CCD haute définition à zoom optique et/ou numérique aide à la définition de la zone de mesure. Elle permet en outre la prise de clichés ;
- ✓ De différents accessoires :

Quatre poignées de transport amovibles. Fixées sur le marbre, elles facilitent le déplacement de la platine. Un jeu de quatre amortisseurs antivibratoires. Un jeu de cale-étalon (plan de verre, cale de rugosité, cale de step).

L'exécution des mesures est réalisée par le logiciel Phénix qui est l'interface de l'AltiSurf. 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.

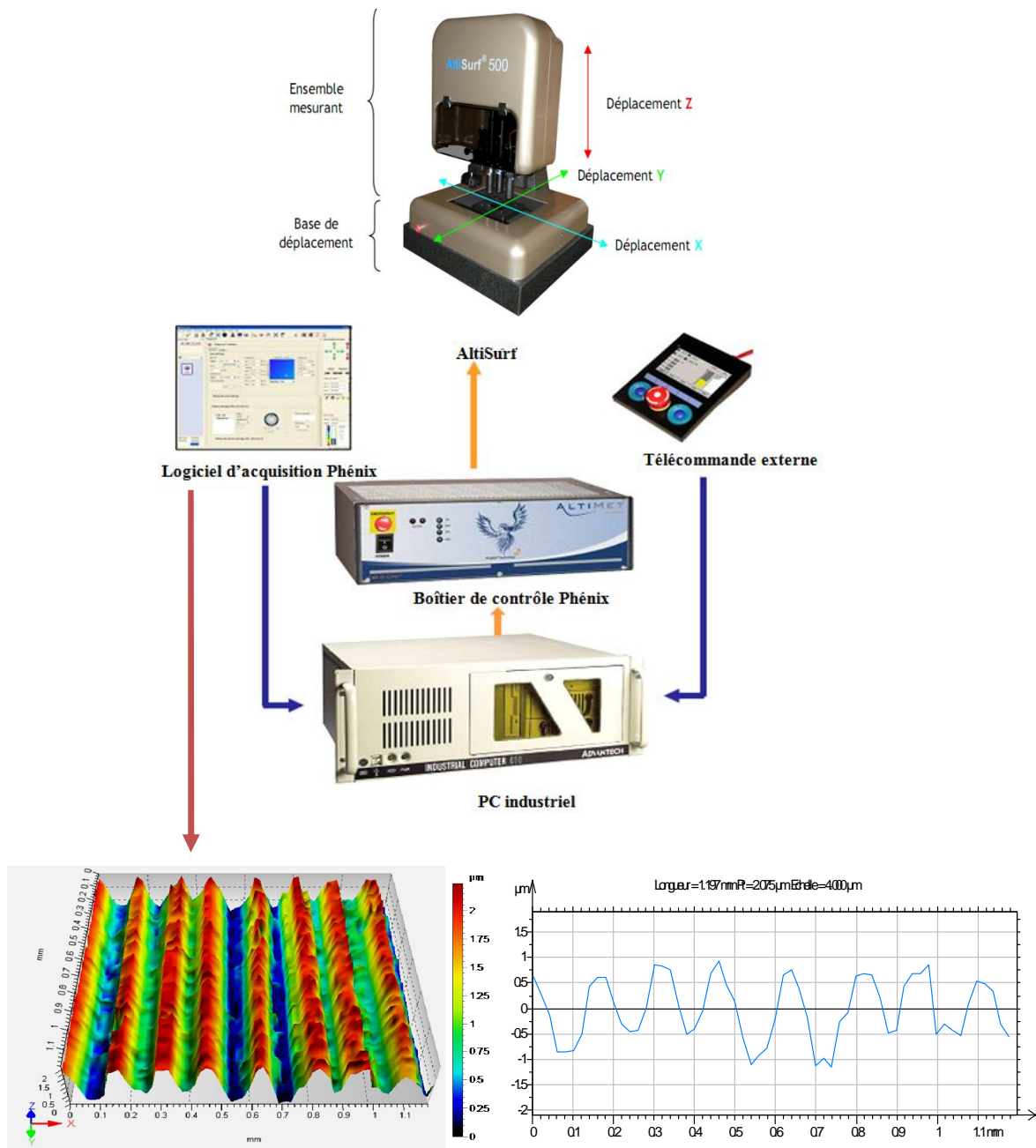


Figure II.8 : Chaîne de mesure de la rugosité en 3D

II.2.4.3 Mesure des vibrations

Pour la mesure des vibrations de l'outil nous avons utilisé un appareil de mesure « Schenck » (Smart Balancer 2), ce dernier est un instrument pour faire l'équilibrage des rotors sur site et l'analyse des vibrations, il contient 2 canaux analogiques de mesure simultanés (capteurs piézoélectriques) dont la plage de fréquence s'étend de: 0,5 Hz jusqu'à 40 kHz, et d'une fréquence d'échantillonnage jusqu'à 131 kHz par canal. Il peut mesurer les signaux temporels tels que: accélération, vitesse, déplacement; Spectre des fréquences; Amplitude max; RMS; la valeur crête ... ect. Les deux capteurs sont fixés sur le porte-outil pour mesurer la valeur RMS dans les directions axiale (V_a) et tangentielle (V_t) respectivement (*fig. II.9*). La valeur RMS (Root Mean Square) d'un signal périodique ou d'un signal aléatoire est la racine carrée de la moyenne de cette amplitude au carré, sur un intervalle de temps donné [70]. Pour un signal $S(t)$, le RMS est donné par l'équation (II.1):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} (S_k)^2} \quad (II.1)$$

Où N_e est le nombre d'échantillons du signal.

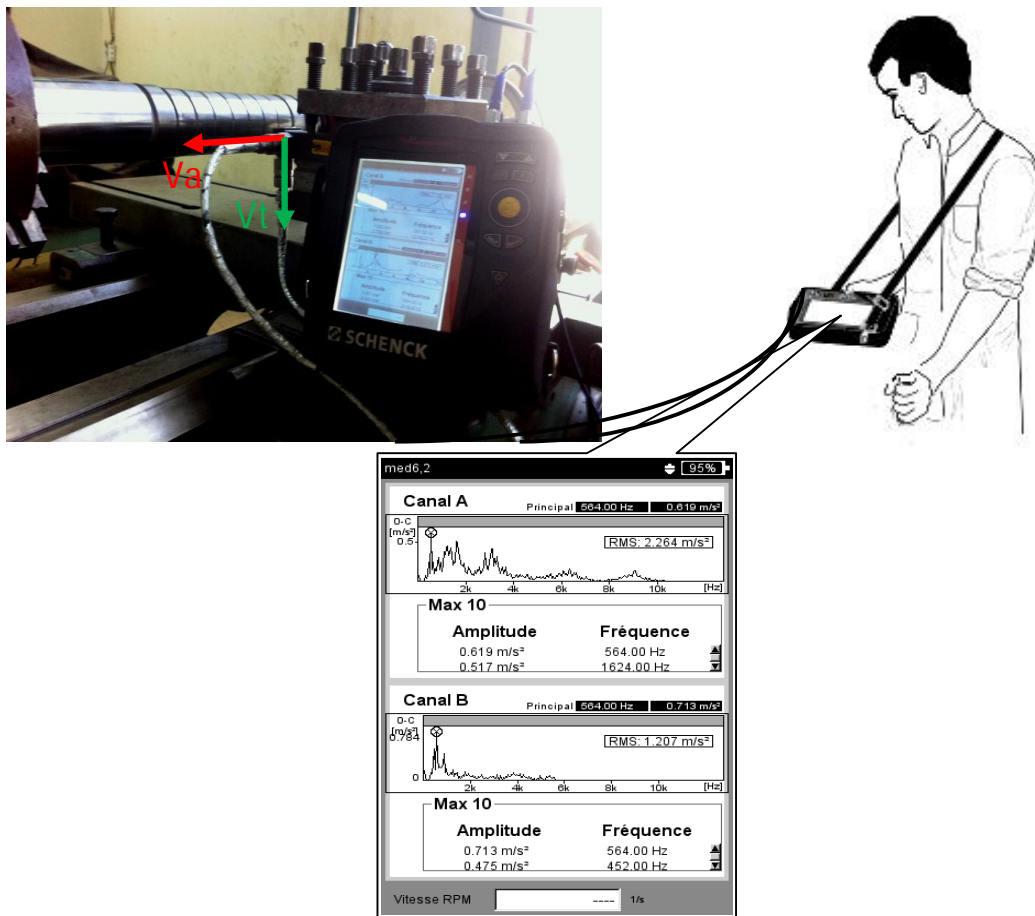


Figure II.9 : Positionnement des accéléromètres sur le porte outil.

II.2.4.4 Microscope pour la mesure de l'usure

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) et entaille (VN) est un dispositif binoculaire de marque (*Visual Gage 250*), avec un ordinateur équipé d'un logiciel *Visual Gage 2.2.0*. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (*fig. II.10*).

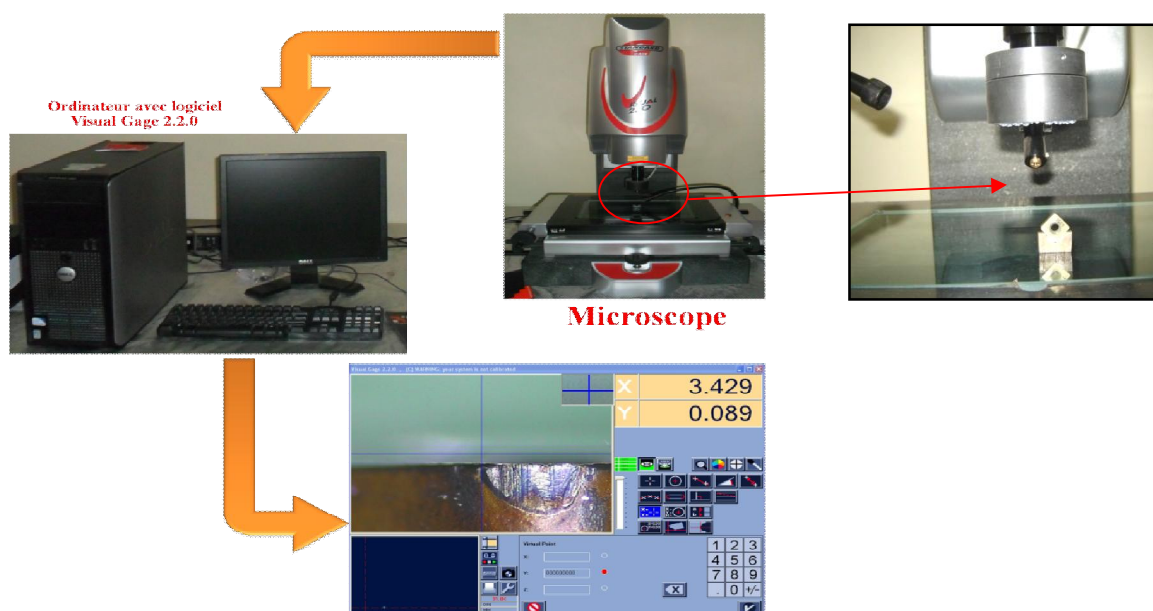


Figure II.10 : Microscope pour la mesure de l'usure.

II.2.4.5 Autres équipements

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

II.3 Planification des expériences

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer, les paramètres du régime de coupe (V_c, ap, f), le temps d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil ($\alpha, \gamma, \lambda, \chi$), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. Les efforts de coupe, les vibrations d'usinage, les pressions de coupe, la puissance de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité, le volume de copeau enlevé et l'usure en dépouille de l'outil représentent les paramètres de sortie.

II.3.1 Méthode de planification des expériences

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe. La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

II.3.1.1 Méthode uni-factorielle

On fait appel à cette méthode pour évaluer l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y. L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné X [$X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$], tout en maintenant tous les autres facteurs constants (**Tableau II.4**). Pour chaque X = X_i , on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i , ($i = 1 \div N$). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation $Y = f(X)$. Dans ce cas, on varie seulement le facteur X, tout en maintenant les autres facteurs constants.

Tableau II.4 : Réalisation d'essais d'après la méthode uni-factorielle.

N°	Facteur variable	Paramètre de sortie						
	X	Y ₁	Y ₂	-	Y _g	-	Y _n	Y _{moy}
1	X ₁	Y ₁₁	Y ₂₁	-	Y _{g1}	-	Y _{n1}	Y _{moy1}
2	X ₂	Y ₁₂	Y ₂₂	-	Y _{g2}	-	Y _{n2}	Y _{moy2}
3	X ₃	Y ₁₃	Y ₂₃	-	Y _{g3}	-	Y _{n3}	Y _{moy3}
i	X _i	Y _{1i}	Y _{2i}	-	Y _{gi}	-	Y _{ni}	Y _{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X _N	Y _{1N}	Y _{2N}	-	Y _{gN}	-	Y _{nN}	Y _{moyN}

II.3.1.2 Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y_j . C'est une relation qui a la forme :

$$Y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (\text{II.2})$$

Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

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

Où:

N: nombre d'essais ;

q: nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;

k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas de la première série, nous avons trois facteurs de base ($k=3$), (Vc, ap, f) et chaque facteur à quatre niveaux de variation (niveau 1, niveau 2, niveau 3, niveau 4). Nous avons alors: $N=4^3=64$. Les essais sont numérotés de 1 à 64. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le **Tableau II.5**.

Tableau II.5 : Matrice de planification pour un plan de 64 essais.

N° Essai	Valeurs codées		
	$Vc, (m/min)$	$f, (mm/tr)$	$ap, (mm)$
	X_1	X_2	X_3
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	1	4
5	1	2	1
6	1	2	2
7	1	2	3
8	1	2	4
9	1	3	1
10	1	3	2
11	1	3	3
12	1	3	4
13	1	4	1
14	1	4	2
15	1	4	3
16	1	4	4
17	2	1	1
18	2	1	2
19	2	1	3

20	2	1	4
21	2	2	1
22	2	2	2
23	2	2	3
24	2	2	4
25	2	3	1
26	2	3	2
27	2	3	3
28	2	3	4
29	2	4	1
30	2	4	2
31	2	4	3
32	2	4	4
33	3	1	1
34	3	1	2
35	3	1	3
36	3	1	4
37	3	2	1
38	3	2	2
39	3	2	3
40	3	2	4
41	3	3	1
42	3	3	2
43	3	3	3
44	3	3	4
45	3	4	1
46	3	4	2
47	3	4	3
48	3	4	4
49	4	1	1
50	4	1	2
51	4	1	3
52	4	1	4
53	4	2	1
54	4	2	2
55	4	2	3
56	4	2	4
57	4	3	1
58	4	3	2
59	4	3	3
60	4	3	4
61	4	4	1
62	4	4	2
63	4	4	3
64	4	4	4

Pour la deuxième série d'expérience, nous avons étudié l'impact des différents paramètres de coupe (V_c , f , ap) et la géométrie de l'outil (χr , r) sur la rugosité de surface et les efforts de coupe, les vibrations d'usinage, l'effort spécifique, la puissance de coupe et le volume de copeau enlevé. Nous avons choisi un plan factoriel réduit mixte de Taguchi L_{18} comme planification expérimentale à 5 facteurs. Les facteurs (V_c , f , ap , r) varient à trois niveaux (3^4) et le facteur (χr) varie à deux niveaux (2^1). Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe. Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le **Tableau II.6**.

Tableau II.6 : *Matrice de planification pour un plan de Taguchi L_{18} ($3^4 \times 2^1$)*

N° Essai	Valeurs codées				
	χr (°)	r (mm)	V_c (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	1	2
5	1	2	2	2	3
6	1	2	3	3	1
7	1	3	1	2	1
8	1	3	2	3	2
9	1	3	3	1	3
10	2	1	1	3	3
11	2	1	2	1	1
12	2	1	3	2	2
13	2	2	1	2	3
14	2	2	2	3	1
15	2	2	3	1	2
16	2	3	1	3	2
17	2	3	2	1	3
18	2	3	3	2	1

II.3.1.3 Conditions de coupe

Les essais préliminaire du couple d'usinage (acier AISI D3/ Carbure revêtu GC4215 (CVD)) ont été réalisé sur la base des conditions de coupe qui sont illustrés dans le **Tableau II.7**.

Tableau II.7 : Conditions de coupe pour les essais de la rugosité et des efforts de coupe préliminaire.

Les Paramètres constants	valeur	paramètre variable	Valeurs
f (mm/tr) ap (mm)	0.08 0.2	Vc (m/min)	100 ; 140 ; 200 ; 280 ; 400 (m/min)
Vc (m/min) ap (mm)	280 0.2	f (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 ; 0.20 ; 0.24 (mm/tr)
Vc (m/min) f (mm/tr)	280 0.08	ap (mm)	0.1 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5 (mm)

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais réalisés sont indiquées dans les **Tableaux (II.8 et II.9)**. Tous les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification.

Tableau II.8 : Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan 4^3 .

Niveau	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	140	0.08	0.1
2	200	0.11	0.2
3	280	0.14	0.3
4	400	0.16	0.4

Tableau II.9 : Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan Taguchi L_{18} ($3^4 \times 2^1$).

Niveau	γr (°)	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	45	0.8	220	0.08	0.15
2	75	1.2	307	0.12	0.3
3	-	1.6	440	0.16	0.45

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé (machine- outil, éprouvettes, plaquette de coupe, porte-outil, Plateforme KISTLER, Rugosimètre (2D et 3D), analyseur de vibration « Schenck » (Smart Balancer 2) et microscope pour mesurer l'usure). La planification des expériences et les conditions de coupe ont été également illustrées. Nous avons aussi choisi les plans d'expérience ainsi que les conditions de coupe. Dans les chapitres qui suivent, nous allons exposer les résultats des essais réalisés dans cette étude.

CHAPITRE III

ÉTUDE DE L'USINABILITÉ DE L'ACIER FORTEMENT ALLIÉ (AISI D3)

Dans ce troisième chapitre, nous examinons le comportement d'usinabilité lors du tournage à sec du couple d'usinage (Acier AISI D3/ carbure métallique revêtu en CVD) dont le but est de définir les plages de bon fonctionnement de ce couple d'usinage. Pour atteindre cet objectif, nous présentons les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe tels que : la vitesse de coupe, l'avance de l'outil, la profondeur de passe et le temps d'usinage, sur les paramètres technologiques qui sont : la rugosité de surface, l'usure, l'effort de coupe, l'effort résultant, l'effort spécifique, la puissance de coupe, le volume de copeau enlevé.

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'évolution de différents phénomènes rencontrés dans la zone de coupe tels que : la rugosité de surface (Ra , Rz , Rt), les composantes de l'effort de coupe (Fx , Fy , Fz), l'effort résultant (Fr), l'effort spécifique (Ks), la puissance de coupe (Pc), le volume de copeau enlevé (MRR) lors de l'usinage à sec de l'acier fortement allié AISI D3 par un carbure métallique avec un revêtement en CVD (GC4215). Cela en fonction de la variation des paramètres de coupe tels que : la vitesse de coupe (Vc), l'avance de l'outil (f) et la profondeur de passe (ap). Aussi nous présentons également les résultats de l'évolution de l'usure d'outil (VB) en fonction du temps d'usinage (t) et aussi l'impact de ces deux derniers sur les critères de la rugosité de surface et sur les composantes de l'effort de coupe.

III.2 Evolution des paramètres technologiques en fonction des paramètres de coupe

III.2.1 Evolution de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe

Les critères de la rugosité retenus dans cette étude sont (Ra , Rz et Rt) afin de caractériser la qualité de la surface usinée. En analysant les courbes présentées dans les figures (III.1, III.2 et III.3) qui illustrent l'influence des paramètres de coupe (Vc , f et ap) sur la rugosité obtenue.

III.2.1.1 Influence de la vitesse de coupe

La figure III.1 présente l'évolution des trois critères de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage à sec de l'acier AISI D3 à $f = 0.08$ mm/rev, $ap = 0.2$ mm. On remarque que la vitesse de coupe possède une influence significative sur la rugosité de surface, les résultats obtenus (**fig. III.1**) montrent que l'état de surface s'améliore lorsque la vitesse de coupe augmente. Il est à noter que pour une augmentation de la vitesse de coupe de 100 à 400 m/min, cela conduit à une diminution de (43.15% pour Ra , 30.59% pour Rz et 28.67% pour Rt).

III.2.1.2 Influence de l'avance de l'outil

La figure III.2 présente la variation de la rugosité en fonction de l'avance de l'outil à $Vc=280$ m/min et $ap=0.2$ mm. Ce paramètre de coupe possède l'effet le plus significatif, en effet sur la courbe d'évolution de la rugosité en fonction de la variation de l'avance (**fig. III.2**), on constate une augmentation importante des trois critères de rugosité avec l'augmentation de l'avance d'outil. Ceci est principalement dû à la cinématique de coupe, car l'augmentation de l'avance engendre des sillons hélicoïdaux dus à la forme de l'outil et au mouvement hélicoïdal

de l'outil par rapport à la pièce. Ces sillons sont autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée. Sur le plan pratique, une augmentation d'avance f de 0.08 à 0.24mm/tr conduit à une augmentation des critères de rugosité (Ra , Rz et Rt) de (91.89%, 79.04%, 59.18%) respectivement.

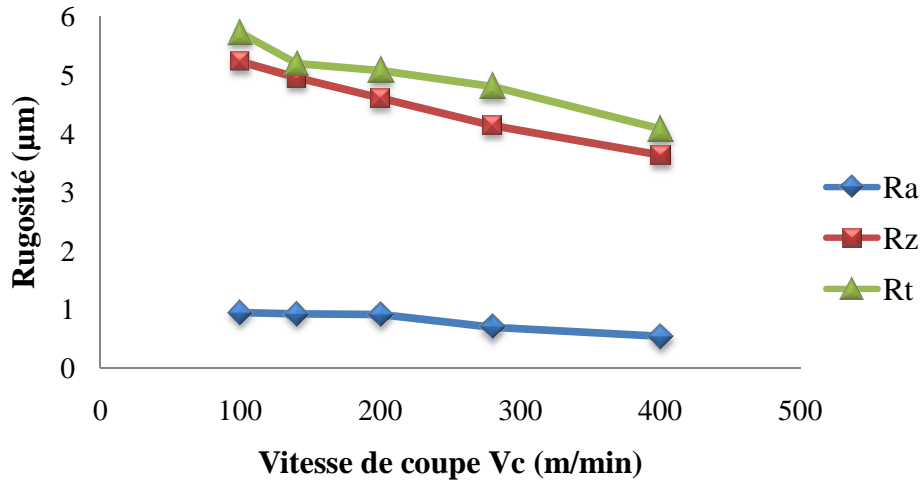


Figure III.1 : Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe ($f=0,08\text{mm/tr}$ et $ap=0.2\text{mm}$).

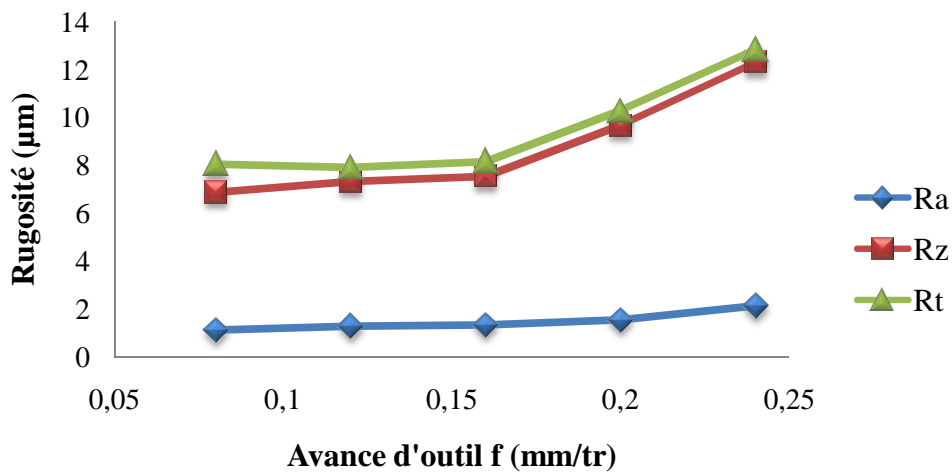


Figure III.2 : Evolution de la rugosité en fonction de l'avance de l'outil ($Vc=280\text{m/min}$ et $ap=0.2\text{mm}$).

III.2.1.3 Influence de la profondeur de passe

La figure III.3 illustre l'évolution des critères de rugosité en fonction de la profondeur de passe à $Vc = 280 \text{ m/min}$ et $f = 0.08 \text{ mm/tr}$. L'analyse des résultats montre que l'influence

de ce paramètre est moins importante que l'avance. L'élévation de la profondeur de passe de 0.1 à 0.5 mm, conduit à une légère augmentation des critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) successivement de (9.09, 22.62 et 18.26) %. Ceci est dû à l'augmentation de la largeur de contact entre l'outil et la pièce. Ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe.

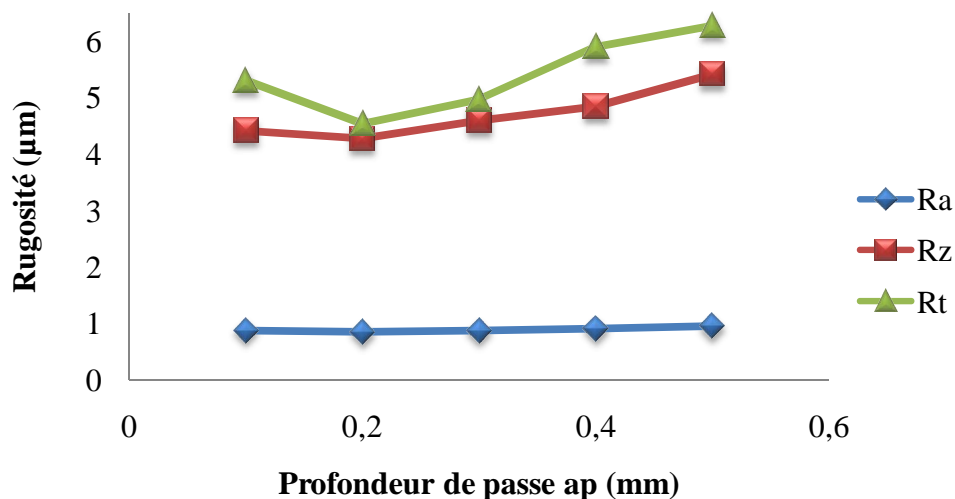


Figure III.3 : Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe ($V_c=280\text{m/min}$ et $f=0.08\text{mm/tr}$)

III.2.2 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe

III.2.2.1 Influence de la vitesse de coupe

La (fig. III.4) montre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0.08\text{mm/tr}$ et $a_p = 0.2\text{mm}$. L'analyse des résultats montre que l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c) de 100 m/min jusqu'à 200 m/min conduit à une diminution des efforts de coupe. Ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui rend le métal usiné plus plastique et par conséquent les efforts nécessaires à la coupe diminuent [71]. Cette diminution est de (14.97%, 11.20%, 17.13%) pour (F_x , F_y , F_z), respectivement. Au-delà de cette vitesse de coupe et jusqu'à 400 m/min, les efforts de coupe augmentent de (57.29%, 36.13%, 56.16%) pour (F_x , F_y , F_z), respectivement, à cause de l'usure de l'outil.

III.2.2.2 Influence de l'avance d'outil

La figure (III.5) illustre l'influence de l'avance sur les trois composantes de l'effort de coupe à $V_c = 280\text{ m/min}$ et $a_p = 0.2\text{mm}$. Avec l'augmentation de l'avance la section du copeau cisailé accroît et par conséquent la force demandée pour l'enlèvement de la matière

s'accroît. Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de l'avance sur les efforts de coupe sont comme suit: Pour une augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 mm/tr on a enregistré une élévation de (130.99% pour F_x , 49.45% pour F_y , 74.75% pour F_z). L'analyse des résultats montre aussi que l'effort axial (F_x) est le plus affecté par l'avance, suivi par l'effort tangentiel (F_z) et en dernier lieu l'effort radial (F_y).

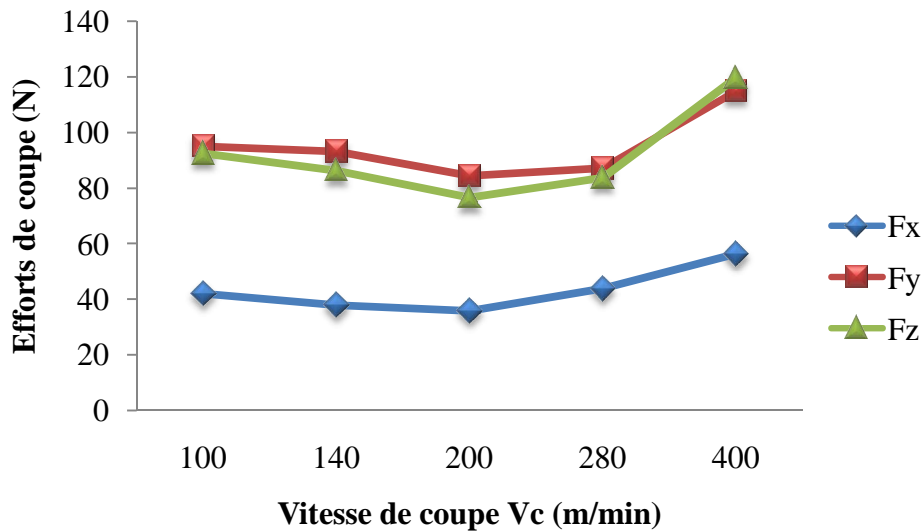


Figure III.4 : Evolution des composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) en fonction de la vitesse de coupe pour $f= 0.08\text{mm/tr}$ et $a_p= 0.2\text{mm}$.

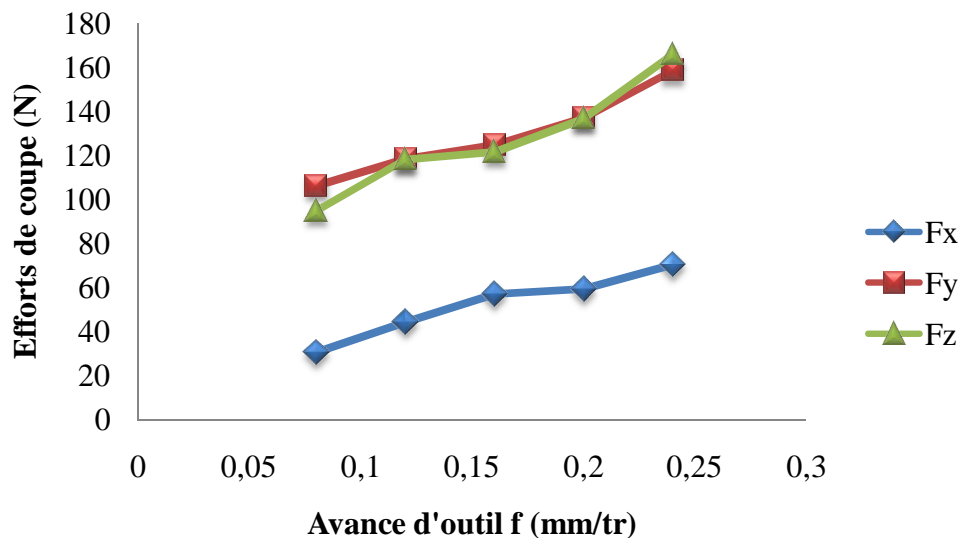


Figure III.5 : Evolution des trois composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) en fonction de l'avance d'outil pour $V_c= 280\text{ m/min}$ et $a_p= 0.2\text{mm}$.

III.2.2.3 Influence de la profondeur de passe

La figure (III.6) présente les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe à $V_c = 280$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr. Les résultats montrent une augmentation des efforts de coupe avec l'augmentation de la profondeur de passe et cela à cause de l'augmentation de l'épaisseur (section) du copeau c.à.d ; la section du copeau devient très importante conduisant à une augmentation du volume de métal à déformer et nécessitant ainsi des efforts de coupe importants pour l'enlèvement du copeau. Aux petites valeurs de la profondeur de passe, l'effort radial est prépondérant. Au-delà de la valeur de $ap = 0.4$ mm, l'effort tangentiel dépasse l'effort radial, et l'effort axial reste toujours en dernière position. Cela peut être expliqué par le travail de l'outil durant l'opération du chariotage, c'est que la coupe se fait par le rayon du bec de l'outil coupant aux petites profondeurs de passe. Car, avec l'augmentation de la profondeur (ap), la coupe se fait en dehors de la limite du rayon du bec de l'outil. Si on compare les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe et l'avance, on remarque que la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance. Pour une profondeur de passe de (0.1 à 0.5) mm, on obtient une augmentation de (F_x , F_y et F_z) d'une valeur de (774.695%, 102.182%, 277.617%), respectivement.

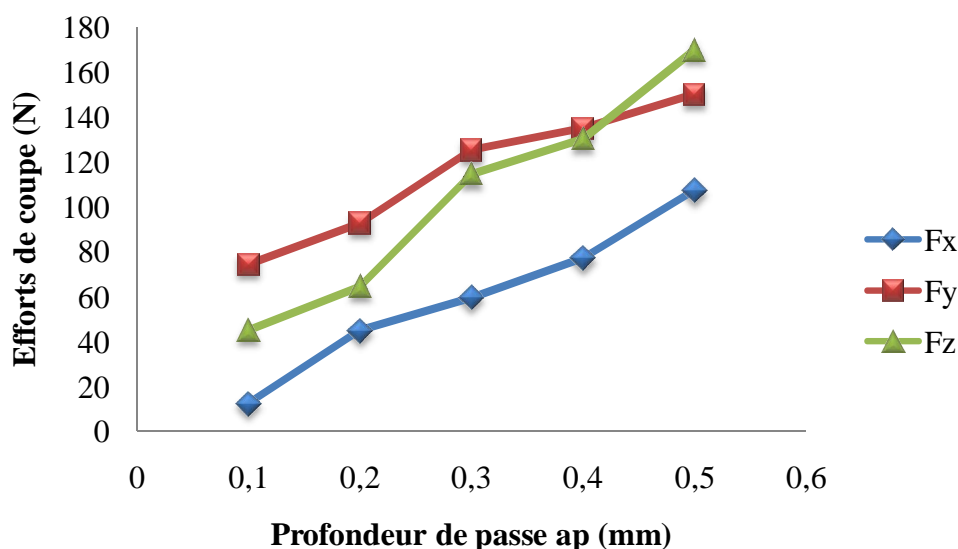


Figure III.6 : Evolution des trois composantes des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $V_c = 280$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr.

III.2.3 Evolution de l'effort résultant en fonction des paramètres de coupe

L'effort résultant est la racine des trois composantes des efforts de coupe au carrée, l'effort résultant s'exprime par la formule suivante :

$$F_{\text{résu}} = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (\text{III.1})$$

Où : F_x , F_y et F_z sont les trois composantes des efforts de coupe.

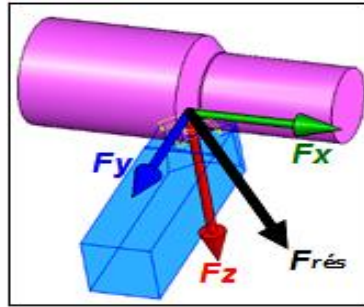


Figure III.7 : Effort résultant.

III.2.3.1 Influence de la vitesse de coupe

La figure (III.8) présente l'évolution de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.2$ mm. L'analyse des résultats montre une décroissance de l'effort résultant entre les vitesses (100 à 200 m/min), ensuite on note une croissance de se denier avec l'augmentation de vitesse de coupe jusqu'à 400 m/min. Cet effort est à son minimum à la vitesse 200 m/min et prend la valeur 119.45N. Par contre, à la vitesse 400 m/min, l'effort résultant est à son maximum et prend la valeur 152.89 N.

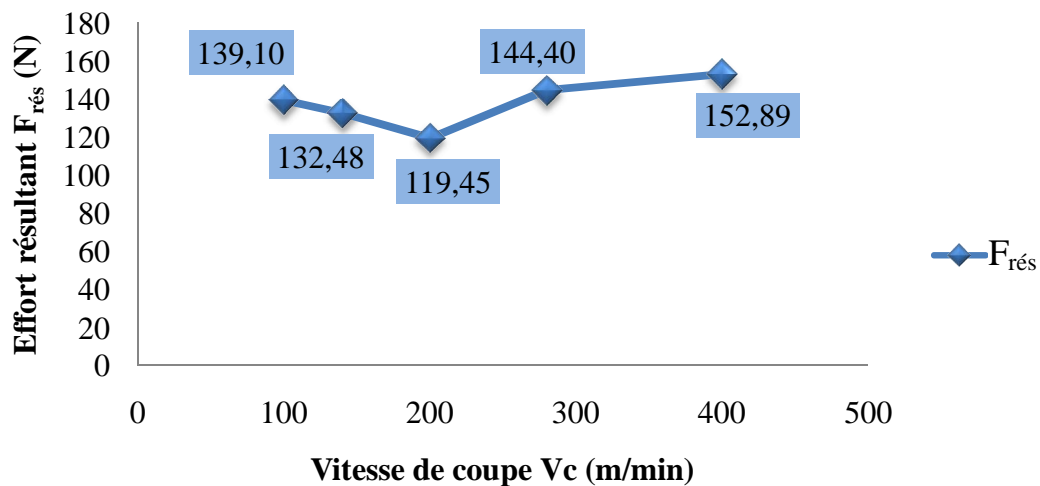


Figure III.8: Evolution de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe pour $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.2$ mm.

III.2.3.2 Influence de l'avance d'outil

Les résultats présentés sur la (fig. III.9) illustre l'évolution de l'effort résultant en fonction de l'avance d'outil à $V_c = 280$ m/min et $ap = 0.2$ mm. On remarque que l'augmentation de l'avance induit une augmentation de l'effort résultant. Les conséquences sur le plan pratique sont comme suit : pour une avance de 0.08mm/tr, l'effort résultant est de 145.71N. L'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.24 mm/tr, conduit à une élévation de l'effort résultant de 64.87%.

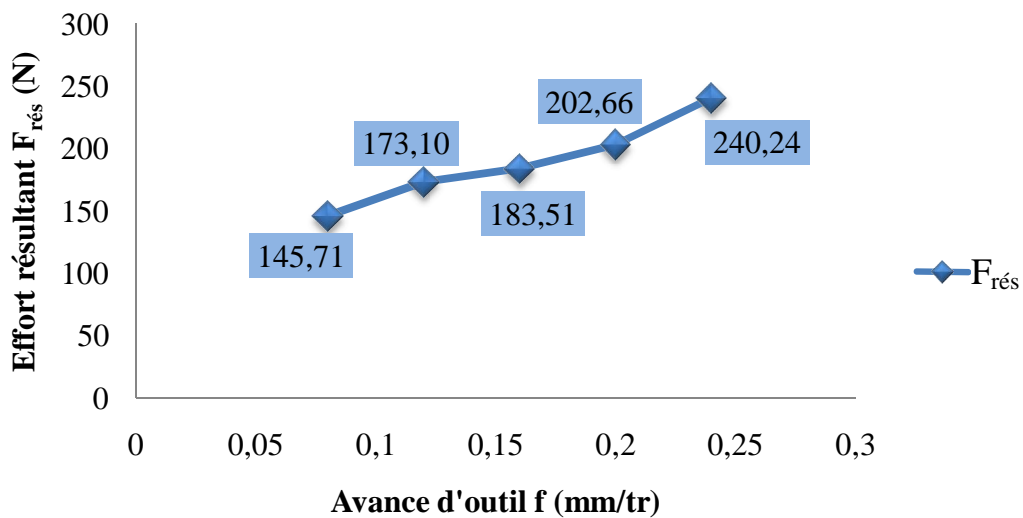


Figure III.9: Evolution de l'effort résultant en fonction de l'avance d'outil pour $V_c=280$ m/min et $ap=0.2$ mm.

III.2.3.3 Influence de la profondeur de passe

La figure (III.10) présente l'évolution de l'effort résultant ($F_{rés}$) en fonction de la profondeur de passe à $V_c = 280$ m/min et $f = 0.08$ mm. L'analyse des résultats montre une croissance proportionnelle de l'effort résultant en fonction de la profondeur de passe. Pour une augmentation de la profondeur de passe de 0.1 à 0.5 mm, on enregistre une élévation de l'effort résultant de 186.144%. On note que la plus grande valeur de l'effort de coupe ($F_{rés} = 250.92$ N) correspond à la grande valeur de la profondeur de passe qui est de 0.5 mm. Dont la petite valeur de la profondeur de passe ($ap = 0.1$ mm) correspond à la plus petite valeur d'effort résultant qui est de 87.69 N.

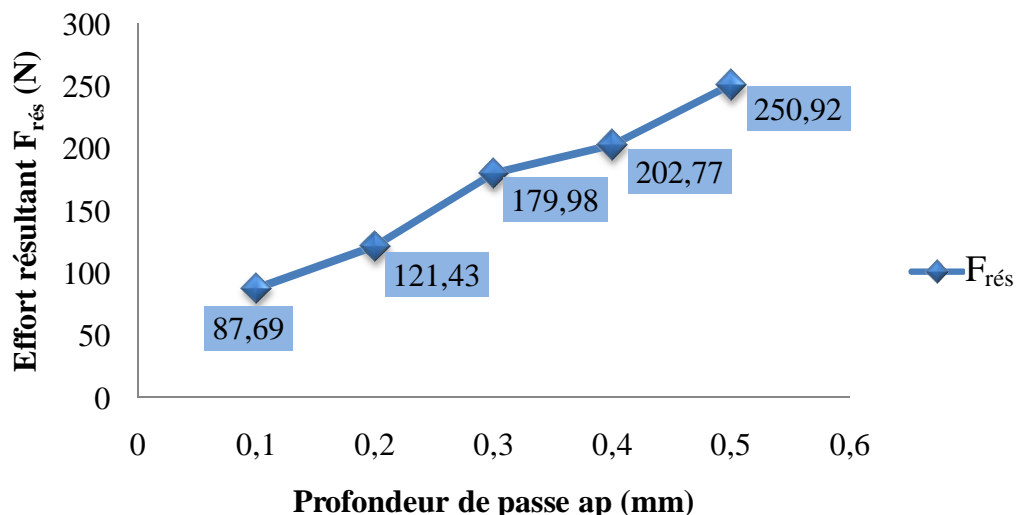


Figure III.10: Evolution de l'effort résultant en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=280$ m/min et $f=0.08$ mm.

III.2.4 Evolution de l'effort spécifique en fonction des paramètres de coupe

Pour définir l'effort spécifique (pression de coupe), on admet que l'énergie nécessaire à l'enlèvement d'un volume donné de copeau est proportionnelle à ce volume. Des lors, nous avons :

$$K_i = \frac{F_i}{f \times ap} \quad \text{(III.2)}$$

Avec K_i pression de coupe (N/mm^2) ou (MPa), avec $i = (x, y \text{ et } z)$;
 F_i $\left\{ \begin{array}{l} F_x \text{ effort axial (N) ;} \\ F_y \text{ effort radial (N) ;} \\ F_z \text{ effort tangentiel (N) ;} \end{array} \right.$
 f avance (mm/tr) ;
 ap profondeur de passe (mm).

La vitesse de coupe est le paramètre qui contrôle majoritairement l'énergie fournie au système et qui endommage l'outil de coupe. L'étude de l'effort de coupe sur la pointe de l'outil permet de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant utilisé en fonction de la matière retenue. Le bon contrôle de la plage de vitesse de coupe permet donc une meilleure maîtrise de processus de coupe. Cette démarche inspirée du concept industriel de couple outil-matière [72, 73 et 74], dans lequel on ne conçoit pas séparément l'outil et la matière pour adopter des conditions de coupe (fig. III.11).

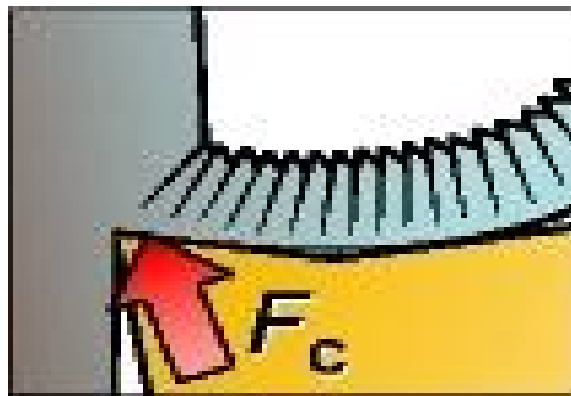


Figure III.11 : Force de coupe spécifique.

III.2.4.1 Influence de la vitesse de coupe

La figure (III.12) présente l'évolution de l'effort spécifique en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.2$ mm. On peut remarquer sur cette figure que la courbe de cette évolution prend une allure descendante avec l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à atteindre une valeur minimale de 4788.75 MPa à la vitesse de 200 m/min avec une diminution de 17.13% de K_s . Cette diminution peut s'expliquer par les hautes températures générées dans la zone de coupe lors de l'opération du chariotage, à l'interface pièce-outil-copeau, qui à leur tour entraînent un adoucissement plastique important du matériau usiné et ainsi une diminution des efforts de coupe et par conséquent l'effort spécifique. Au-dessus de la vitesse de 200m/min, la courbe prend une allure ascendante avec une augmentation de 56.16% de K_s dans l'intervalle de variation de la vitesse de coupe V_c entre 200 jusqu'à 400 m/min. cette augmentation explique qu'à des vitesses élevées, le comportement du matériau change et cela à cause de la dominance du caractère visqueux sur l'adoucissement thermique du matériau.

III.2.4.2 Influence de l'avance d'outil

La figure (III.13) présente l'évolution de l'effort spécifique (K_s) en fonction de l'avance (f) à $V_c = 280$ m/min et $ap = 0.2$ mm. On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance, l'effort spécifique a un comportement décroissant. Pour les faibles avances, on enregistre des pressions extrêmement élevées. Avec une avance de 0.08 mm/tr, l'effort spécifique (K_s) est de l'ordre de 5937.5 N/mm². Avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0.24 mm/tr la pression chute de 41.74%. Il faut donc chercher un compromis entre la diminution de la pression de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance.

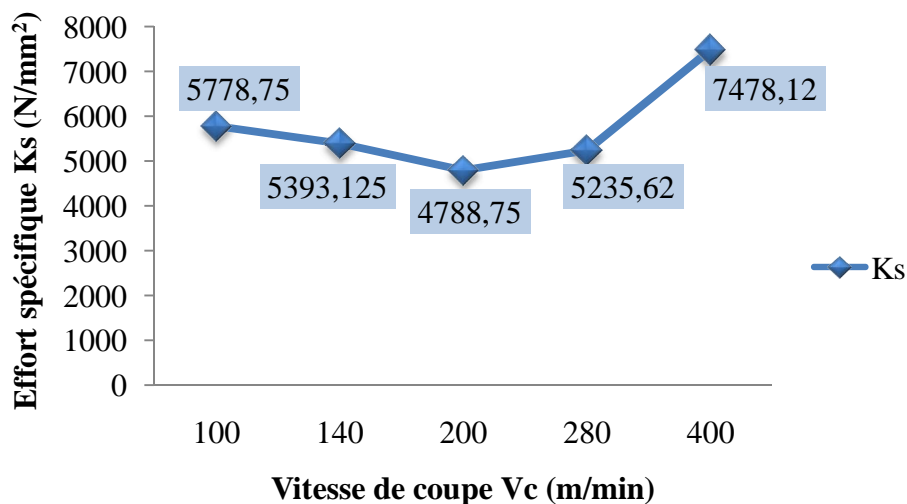


Figure III.12 : Evolution de la pression de coupe (K_s) en fonction de la vitesse de coupe à $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{ mm}$ pour l'outil de coupe.

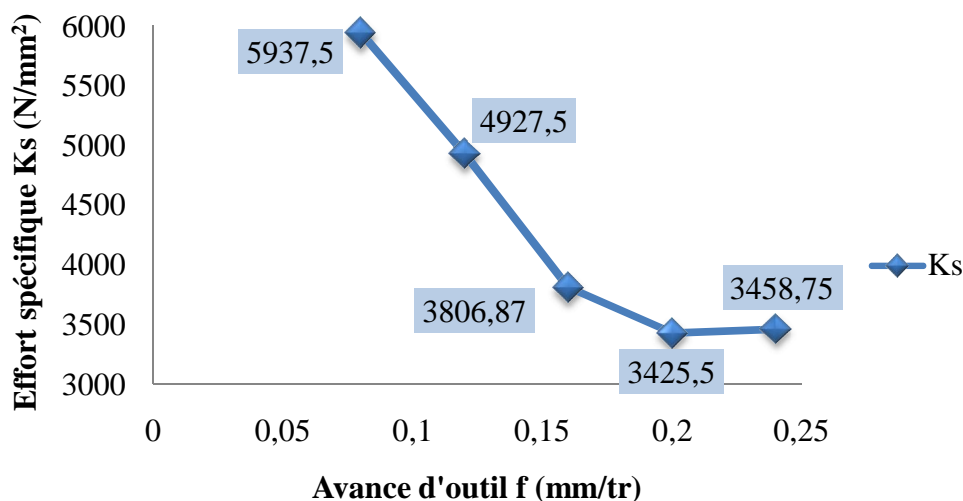


Figure III.13 : Evolution de la pression de coupe (K_s) en fonction de l'avance d'outil à $V_c=280\text{m/min}$ et $a_p=0.2\text{mm}$ pour l'outil de coupe.

III.2.4.3 Influence de la profondeur de passe

La figure (III.14) présente l'évolution de l'effort spécifique en fonction de la profondeur de passe à $V_c = 280\text{ m/min}$ et $f = 0.08\text{ mm}$. Il ressort de cette figure que l'augmentation de la profondeur de passe a pour effet de diminuer l'effort spécifique. Pour une profondeur $a_p = 0.1\text{ mm}$, la pression est à son maximum. On enregistre un effort spécifique (K_s) de l'ordre de (5623.75 N/mm^2). Par conséquent, il est déconseillé de travailler avec cette faible profondeur de passe, car la pression engendrée est extrêmement élevée ce qui

peut endommager l'arête de l'outil de coupe. Dans l'intervalle (0.1 à 0.3) mm, l'effort spécifique (K_s) chute de 15.07%. De 0.3 à 0.5 mm, K_s est à son bas niveau, on enregistre une chute de 11.06%. Là aussi un compromis doit chercher entre l'effort spécifique, la profondeur de passe et l'usure de l'outil.

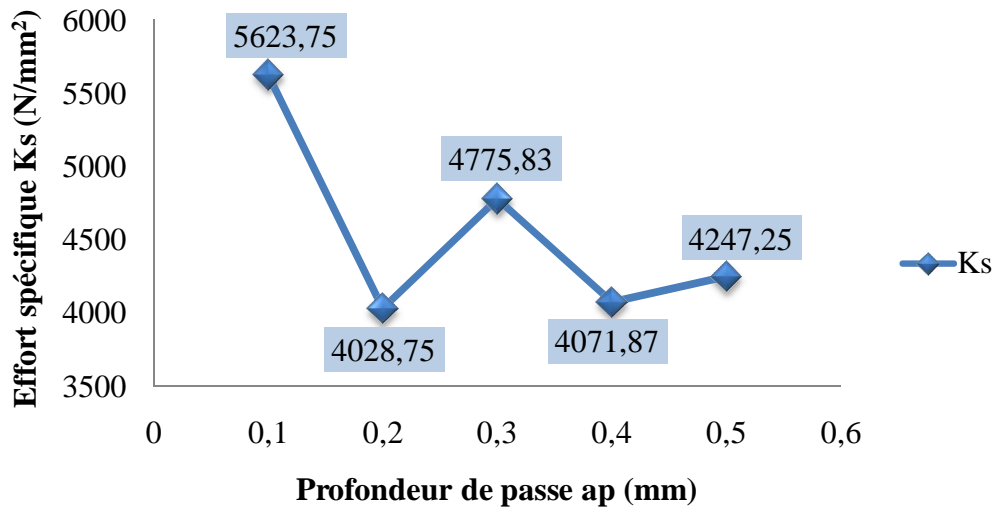


Figure III.14 : Evolution de la pression de coupe (K_c) en fonction de la vitesse de coupe à $V_c=280\text{m/min}$ et $f=0.08\text{ mm}$ pour l'outil de coupe.

III.2.5 Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe

Lors d'une opération d'usinage la connaissance de la puissance de coupe est nécessaire afin de s'assurer que les organes de la machine permettent la transmission de cette puissance et qu'elle soit inférieure à la puissance disponible sur la broche de la machine.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_C}{60.10^3}, [kW] \quad \text{(III.3)}$$

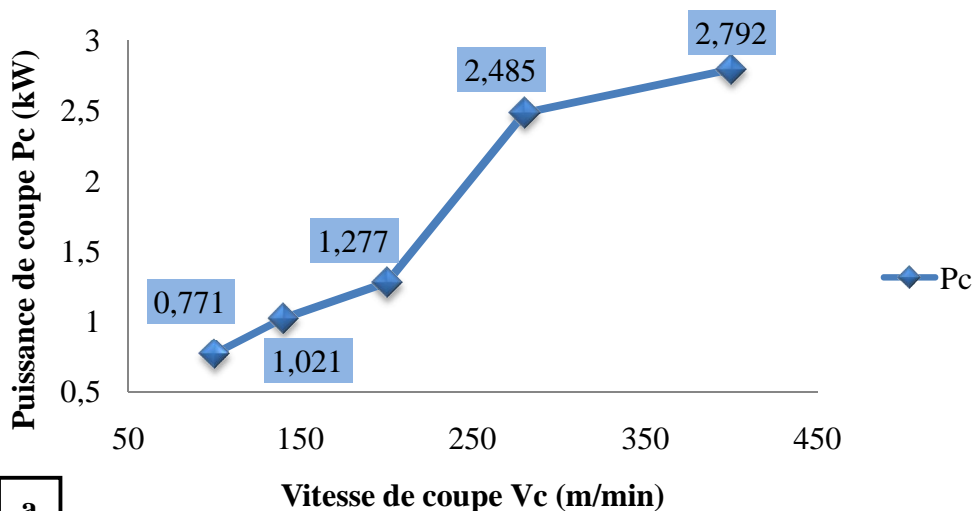
P_c : puissance de coupe (kW).

F_c : effort principal de coupe (tangential) (N).

V_c : vitesse de coupe (m/min).

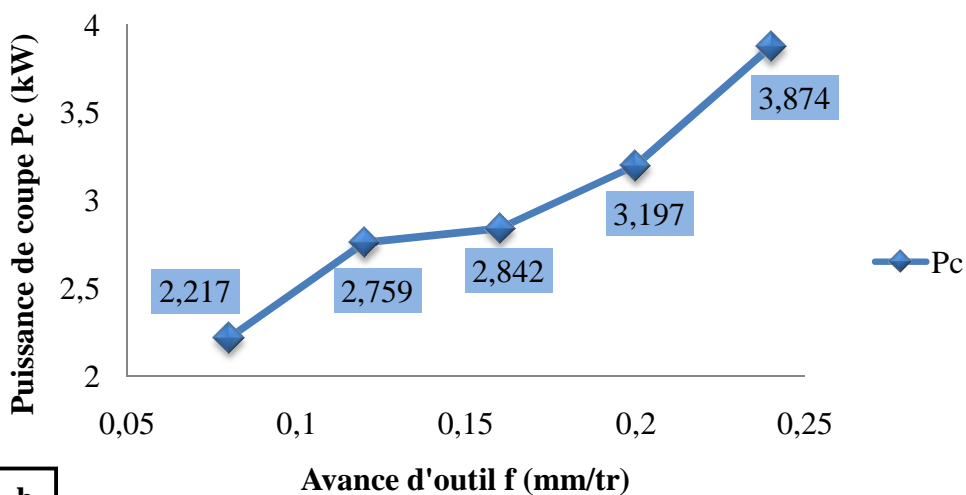
L'étude et l'évaluation des forces de coupe générées en usinage permet principalement de dimensionner les outils et les éléments de la machine - outil (porte-pièce, etc) et aussi pour évaluer la puissance de coupe et permettre le choix rationnel de la machine. **La figure (III.15)** (a, b et c) montre l'évolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres d'usinage

(V_c, f, ap). L'analyse de cette figure illustre que la courbe de cette évolution prend une allure ascendante avec l'augmentation de la vitesse de coupe V_c , de l'avance d'outil f et de la profondeur de passe ap . Une élévation de la vitesse de coupe de (100 à 400 m/min) (**fig. III.15a**) conduit à une élévation de la puissance de coupe de 262.12%. De la même manière l'augmentation de l'avance de (0.08 à 0.24 mm/tr), conduit à une élévation de la puissance de coupe de 74.74% (**fig. III.15b**). Aussi, l'élévation de la profondeur de passe de (0.1 à 0.5 mm) conduit à une élévation de la puissance de coupe de 277.52% (**fig. III.15c**).



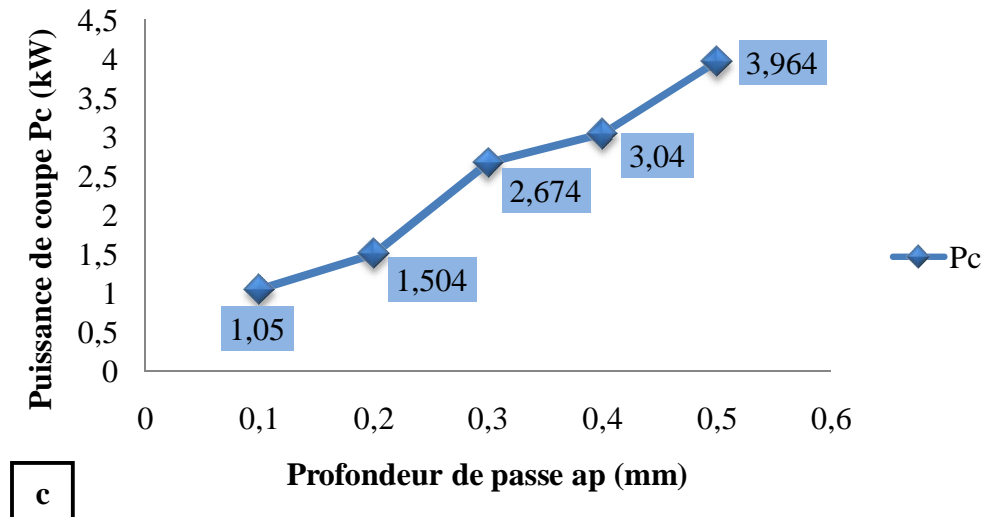
a

a) Influence de la vitesse de coupe, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $ap=0.2\text{mm}$.



b

b) Influence de l'avance d'outil, $V_c=120\text{m/min}$ et $ap=0.2\text{mm}$.



c) Influence de la profondeur de passe, $V_c=120\text{m/min}$ et $f=0.08\text{ mm/tr}$.

Figure III.15 : Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe.

III.2.6 Evolution du volume de copeau enlevé en fonction des paramètres de coupe

Le volume de copeau enlevé permet d'estimer la productivité lors de l'usinage. Le débit d'enlèvement de copeaux (MRR) désigne la quantité de copeaux enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivante:

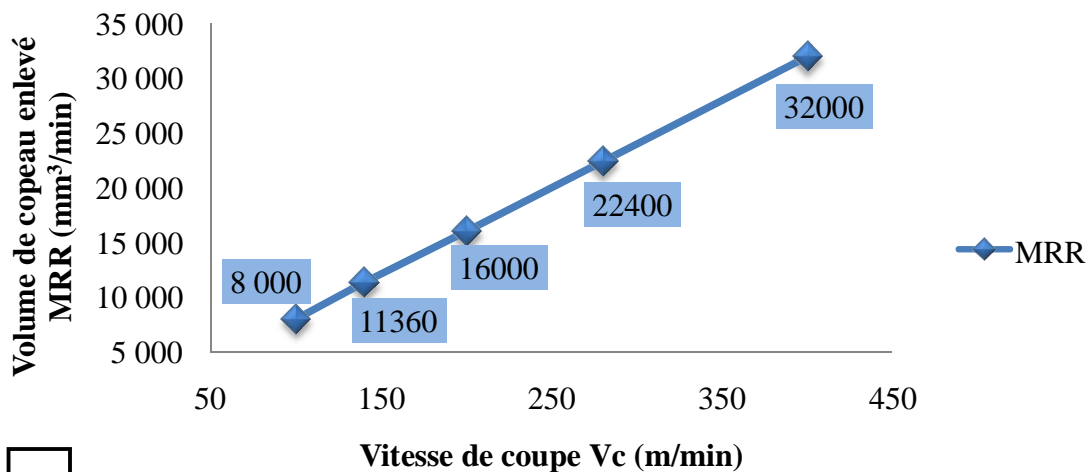
$$MRR = V_c \times A = V_c \times f \times a_p \quad (\text{III.4})$$

MRR : Volume de copeau enlevé [cm^3/min]

A : Section de coupe [mm^2] avec ($A = a_p \times f$)

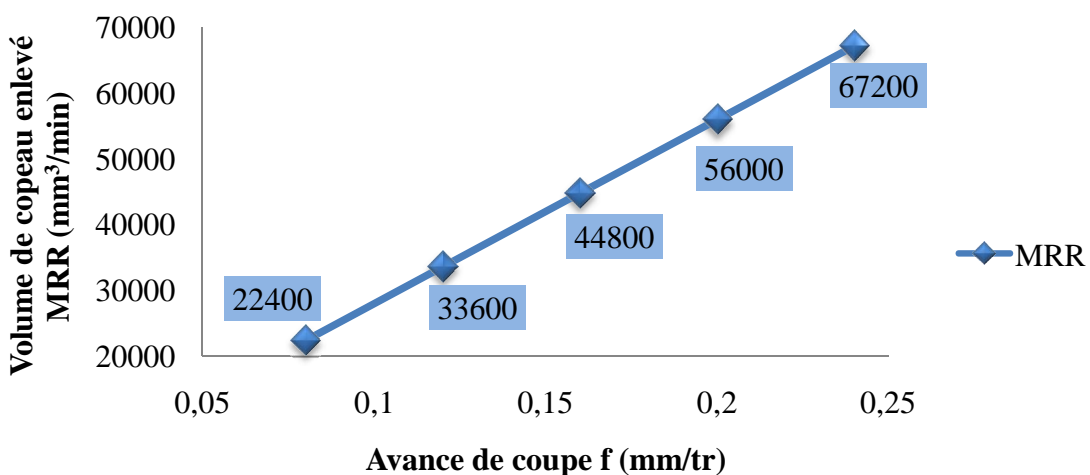
V_c : Vitesse de coupe [m/min]

La figure (III.16) (a, b et c) montre l'évolution du volume de copeau enlevé (MRR) en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , a_p) pour le couple d'usinage (Acier AISI D3/ Carbure revêtu en CVD GC4215). L'analyse de cette figure montre une augmentation proportionnelle du volume de copeau enlevé avec l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c), de l'avance d'outil (f) et de la profondeur de passe (a_p). Une élévation de la vitesse de coupe (fig. III.16a) conduit à une élévation du volume de copeau enlevé de 300%. De la même manière l'augmentation de l'avance (f) conduit à une élévation du volume de copeau de 200% (fig. III.16b). Aussi, l'élévation de la profondeur de passe a_p de (0.1 à 0.5 mm) conduit à une élévation du volume de copeau de 400% (fig. III.16c).



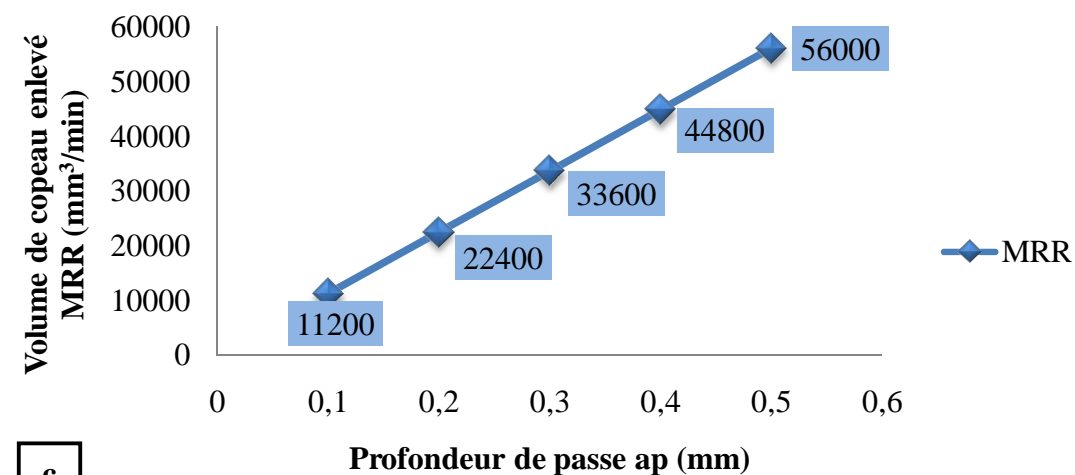
a

a) Influence de la vitesse de coupe, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.



b

b) Influence de l'avance, $V_c=120\text{m/min}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.



c

c) Influence de la profondeur de passe, $V_c=120\text{m/min}$ et $f=0.08\text{ mm/tr}$.

Figure III.16 : Evolution du volume de copeau enlevé en fonction des paramètres de coupe.

III.2.7 Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage

Le tranchant de l'outil constituant l'élément actif effectuant le travail de déformation, est soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques très sévères qui provoquent son usure et sa détérioration dans un temps relativement limité. Le frottement à l'interface copeau-outil s'effectue entre un métal naissant et l'outil à des pressions très élevées et des températures élevées, ce qui peut générer des effets physico-chimiques aggravant l'usure de l'outil.

Les essais réalisés en tournage sont ceux d'usure de longue durée et cela pour évaluer la tenue du matériau de coupe utilisé. Lors des essais réalisés, le suivie de l'usure a été limité seulement à l'usure en dépouille VB . Cette dernière se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante sur la face de dépouille principale de la plaquette (*fig. III.17*)

- La largeur moyenne de cette bande est notée : VB
- La norme fixe comme critère de durée de vie : $[VB]= 0.3\text{mm}$

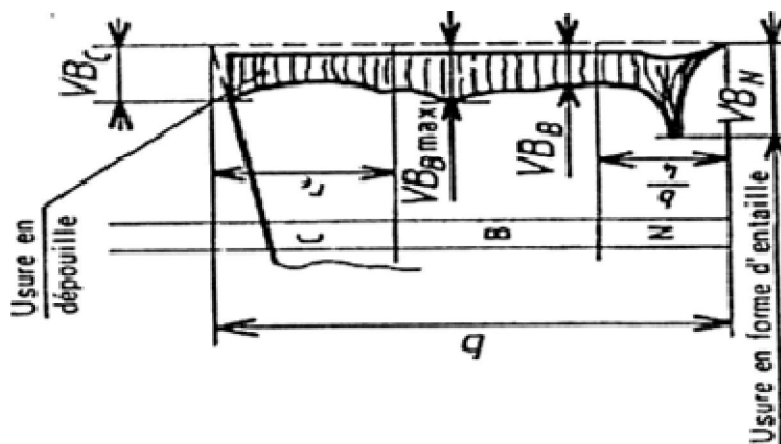


Figure III.17 : Usure en dépouille VB

La figure (III.18) illustre l'évolution de l'usure VB et VB_{max} en fonction du temps d'usinage pour une vitesse de $V_c=280\text{m/min}$, une avance d'outil de $f=0.08\text{mm/tr}$ et de profondeur de passe $ap=0.2\text{mm}$. L'analyse des résultats montrent que l'usure est intimement liée avec le temps d'usinage. Plus le temps augmente, plus l'usure croit.

Après 5min d'usinage, l'usure est de $VB = 0.085 \text{ mm}$, après 30min d'usinage l'usure VB atteint la valeur de 0.398 mm , ce qui représente une augmentation de 368.24%. Pour déterminer le temps d'usinage requis pour une usure en dépouille de 0.3 mm (Norme ISO 8688-1, 1989) en traçant une ligne parallèle à l'axes du temps d'usinage passant par $VB = 0.3 \text{ mm}$ et en extrapolant le temps correspondant. Ce temps d'usinage est alors considéré comme vie utile de l'outil. On note ici que la tenue de la plaquette en carbure métallique avec un revêtement CVD (GC4215) lors du tournage à sec de l'acier AISI D3 est de 24min.

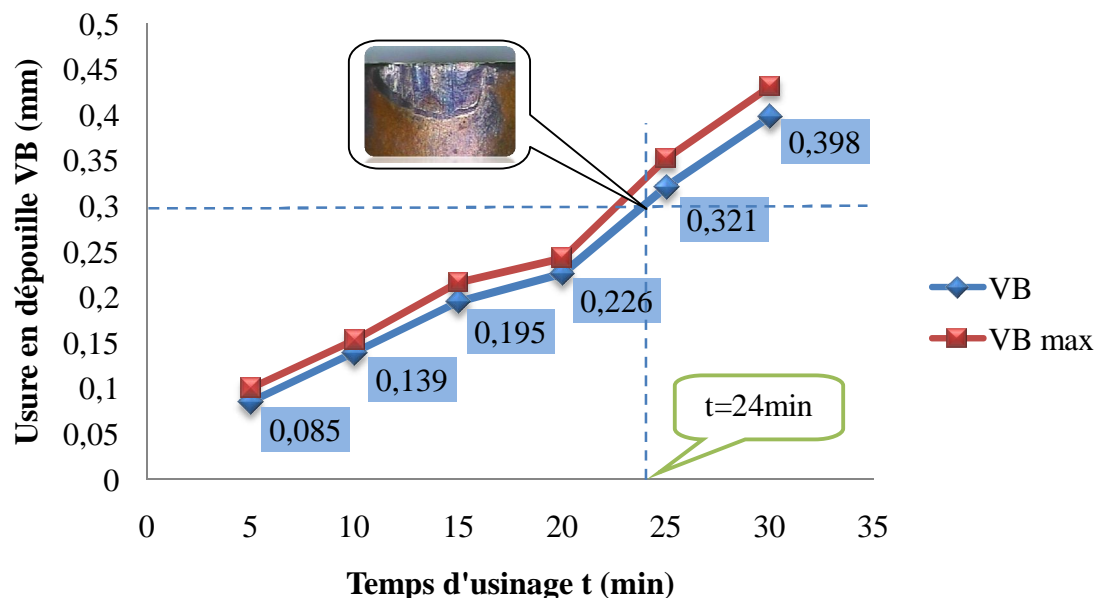


Figure III.18 : Évolution de l'usure en fonction du temps à $V_c=280$ m/min ; $f=0.08$ mm/tr ; $ap=0.2$ mm.

La figure (III.19) expose la morphologie de l'usure en dépouille VB du carbure GC4215 à $V_c = 280$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.2$ mm. Initialement, l'usure en dépouille du carbure se développe suivant une bande régulière qui s'élargit avec le temps. On remarque qu'après 24 minutes de travail l'usure VB se manifeste à la fin de l'usinage par une usure régulière (*fig. III.19*). Ce qui nous a conduits à dire que ce matériau est bien adapté à l'usinage de l'acier AISI D3.

D'autre part, on remarque que l'augmentation de la morphologie de l'usure de la plaquette GC4215 montre que l'usure est bien régulière et que le bec de l'outil n'a pas subi d'effondrement, ce qui nous pousse à adopter un autre critère d'usure $VB = [0.4]$ mm pour les travaux d'ébauchage ce qui a pour effet d'augmenter la durée de vie de l'outil.

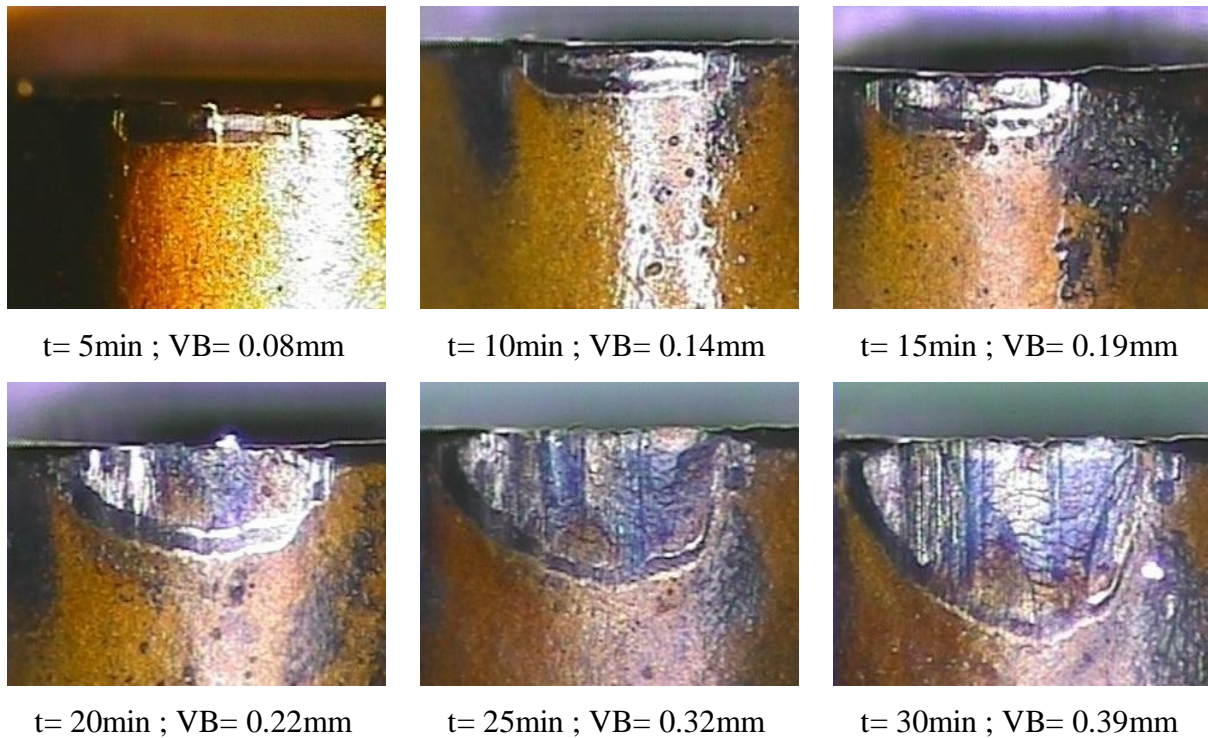


Figure III.19 : Valeurs de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage pour $V_c=280\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.

III.2.8 Evolution de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage

La figure (III.20) illustre les résultats de l'évolution des critères de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage pour les paramètres de coupe ($V_c = 280 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$). On remarque que toutes les courbes prennent une allure ascendante ce qui signifie que le temps d'usinage a un effet important sur la rugosité de surface. Pour un temps d'usinage qui varie de 5 à 30 minutes, les critères de rugosité (R_a , R_q , R_z et R_t) passent de (0.78, 0.78, 4.19 et 4.63) μm à (1.25, 1.64, 8.15 et 9.64) μm respectivement, soit une variation qui correspond à une augmentation de (60.25, 110.25, 94.51 et 108.2)% respectivement. Cette augmentation est étroitement liée avec l'usure. Alors on peut dire que l'endommagement superficiel l'arête tranchante de la partie active de l'outil coupant conduit à la dégradation de l'état de surface du matériau usiné (Acier AISI D3).

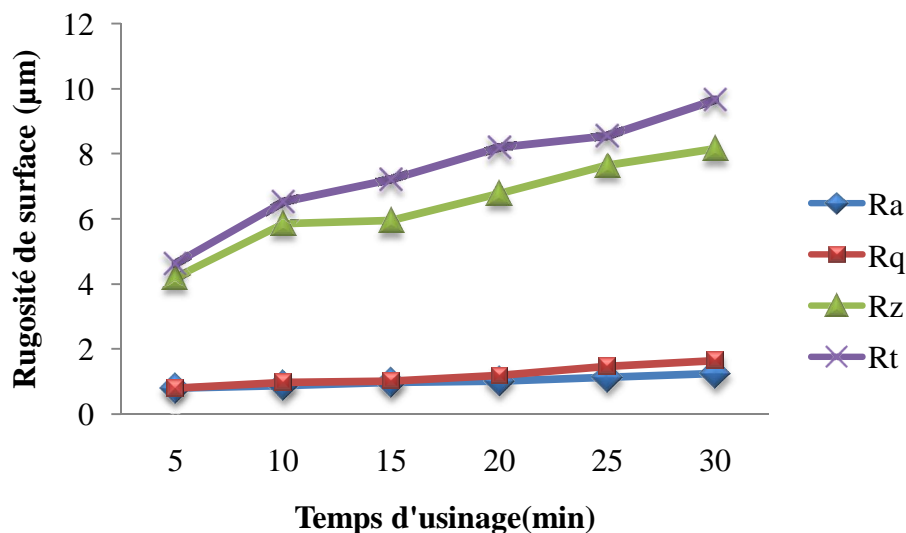


Figure III.20 : Évolution de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage à $V_c=280\text{m/min}$; $f=0.08\text{ mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$.

III.2.9 Evolution de la rugosité de surface en fonction de l'usure

Les résultats des essais de l'influence de l'usure en dépouille VB de matériau de coupe testé sur l'état de surface de l'acier AISI D3, sont représentés sur la (*fig. III.21*). La vitesse de coupe, l'avance d'outil et la profondeur de passe sont maintenues constantes et elles sont égales respectivement à 280m/min , 0.08mm/tr et 0.2mm . Les résultats trouvés montrent que la valeur de la rugosité n'est pas stable et uniforme, mais elle subit une augmentation et une diminution en fonction de l'évolution de l'usure en dépouille VB du carbure revêtu en CVD GC4215. La courbe est divisée en trois zones :

- La première zone correspond à une zone de rodage et d'adaptation de la surface du matériau usiné avec la surface de l'arrête de coupe de l'outil, dans ce cas l'augmentation de l'usure conduit à une augmentation de la rugosité.
- Dans la deuxième zone, l'augmentation de l'usure (l'usure progressive ou normale) conduit à une diminution de la rugosité. Cela peut être expliqué par la forme de l'usure (régulière) est comme une bande plate qui écrase les rugosités et casse les aspérités sur la surface de la pièce.
- Dans la troisième zone, l'augmentation de l'usure (l'usure catastrophique) dégrade de l'état de surface car elle n'est pas régulière. Malgré la valeur de l'usure dépasse $0,35\text{mm}$, on remarque que la rugosité de surface ne dépasse pas la valeur de un micron ($<1\mu\text{m}$).

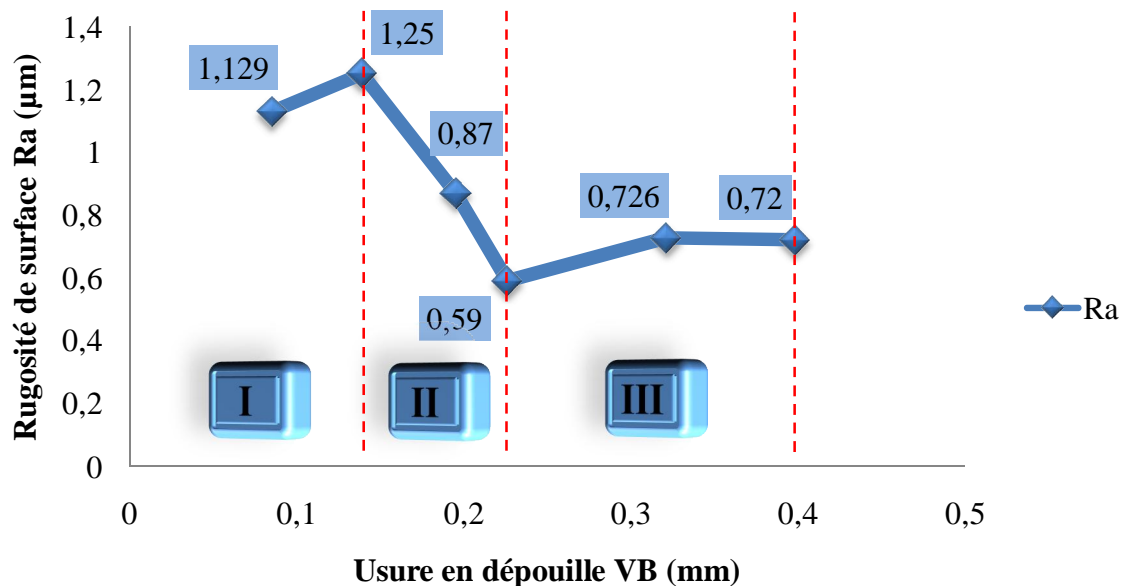


Figure III.21 : Évolution de la rugosité de surface en fonction de l'usure en dépouille à $V_c=280$ m/min ; $f=0.08$ mm/tr ; $a_p=0.2$ mm.

III.2.10 Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de l'usure et du temps d'usinage

Les figures (III.22 et III.23) illustrent l'évolution des composantes de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage et de l'usure, lors de l'usinage de l'acier AISI D3 avec le carbure revêtu en CVD (GC4215) et cela pour les paramètres de coupe testés ($V_c=280$ m/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.2$ mm). Il ressort que les composantes de l'effort de coupe augmentent en fonction du temps d'usinage. Ceci est une conséquence de l'évolution de l'usure sur les surfaces en dépouille et d'attaque de l'outil coupant, puisque dans ce cas la surface de contact entre l'outil coupant et la pièce augmente ce qui augmente les forces de frottements qui s'ajoutent aux efforts de coupe. L'analyse des courbes montre que l'évolution des composantes de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage et de l'usure en dépouille, passe par trois périodes. La première période est d'une durée de coupe de 15 minutes ce qui correspond à une usure VB de 0.195 mm. Les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) augmentent successivement d'une valeur de (21.19%, 19.88%, 11.22%). La deuxième période varie de 15 à 25 minutes d'usinage, ce qui correspond à une augmentation de l'usure VB de 0.195 à 0.32 mm. Cela a pour effet d'augmenter Les efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) successivement d'une valeur de (55.12%, 88.69%, 11.43%). On remarque clairement que durant cette période l'évolution des composantes de l'effort de coupe sont plus accentuée que la première période. La troisième période est caractérisée par une évolution rapide de l'usure VB , qui passe d'une valeur de 0.32 à 0.398 mm et cela durant la période qui varie de

25 à 30 minutes. Alors les composantes de l'effort de coupe se trouvent dans leur haut niveau avec une augmentation de (0.84%, 6.92%, 10.36%). Si on compare les valeurs des composantes de l'effort de coupe au début et à la fin de l'usinage et cela durant une période d'usinage de 30 minutes. On remarque que les efforts (F_x , F_y et F_z) ont augmenté successivement de (89.56%, 141.85%, 36.77%).

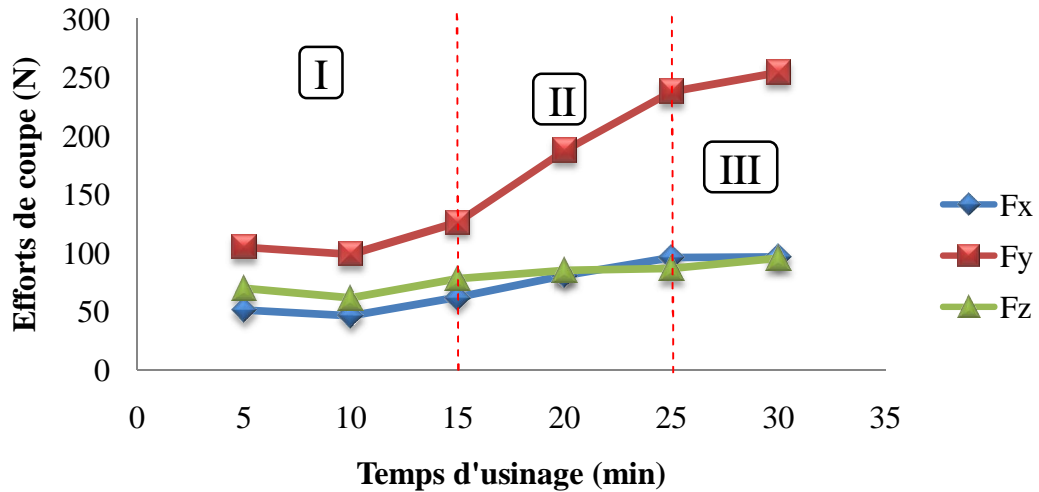


Figure III.22 : Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à $V_c=280$ m/min ; $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.2$ mm.

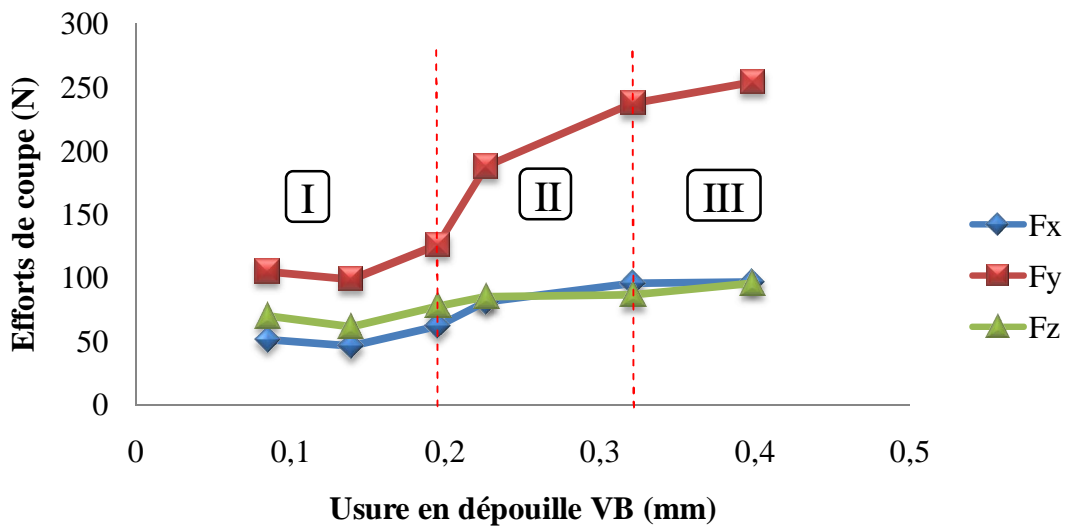


Figure III.23 : Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille à $V_c=280$ m/min ; $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.2$ mm.

III.3 Conclusion

Les essais préliminaires ont apporté des informations intéressantes sur le comportement d'usinabilité du couple d'usinage (Acier AISI D3/ Carbure métallique avec revêtement CVD (GC4215)) car ils nous ont permis d'étudier l'influence des paramètres suivants : la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), la profondeur de passe (ap) et le temps d'usinage (t) sur la rugosité de surface, l'usure, l'effort de coupe, l'effort résultant, l'effort spécifique, la puissance de coupe, le volume de copeau enlevé. Ainsi, les plages des paramètres de coupe liées au bon fonctionnement d'outil coupant, les mieux adaptées et les durées de vie ont été déterminées. Il ressort d'après l'analyse des résultats obtenues que :

- La vitesse de coupe possède une influence significative sur la rugosité de surface, car l'état de surface de l'éprouvette s'améliore lorsque la vitesse de coupe augmente, par contre l'élévation de l'avance d'outil engendre des mauvais états de surface. On a noté aussi que l'influence de la profondeur de passe est moins importante.
- L'évolution des composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) et l'effort résultant (F_r) en fonction des paramètres de coupe est presque la même, on a remarqué une légère diminution puis une augmentation des trois composantes de l'effort de coupe et aussi l'effort résultant avec l'augmentation de la vitesse de coupe. La hausse de l'avance conduit à une augmentation des efforts de coupe. Cependant, l'augmentation de la profondeur de passe mène à une élévation plus importante de (F_x , F_y , F_z et $F_{rés}$) comparant à l'effet de l'avance.
- La vitesse de coupe de 200 m/min correspond à une valeur minimale de 4788.75 MPa de l'effort spécifique (K_s). Par contre, pour des faibles valeurs d'avance et profondeur de passe on enregistre des pressions extrêmement élevées. Par conséquent, il est déconseillé de travailler avec des faibles valeurs d'avance et profondeur de passe, et il est recommandé de chercher un compromis entre la diminution de la pression de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance et aussi entre l'effort spécifique, la profondeur de passe et l'usure de l'outil.
- L'augmentation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe mène à l'élévation de la puissance de coupe et le volume de copeau enlevé avec une influence majeure de ap et V_c par rapport à f .
- la tenue de la plaquette en carbure métallique avec un revêtement CVD (GC4215) lors du tournage à sec de l'acier AISI D3 est de 24min pour $VB_{adm}=0.3$ mm.

- Le temps d'usinage a un effet important sur la rugosité de surface. Car avec son élévation la qualité de surface se dégrade. Cette dégradation est étroitement liée avec l'usure.
- L'étude de l'évolution de la rugosité de surface en fonction de l'usure en dépouille montre que l'augmentation de l'usure engendre une dégradation de l'état de surface. Malgré la valeur de l'usure dépasse 0,35mm, la rugosité de surface ne dépasse pas le un micron ($<1\mu\text{m}$). Ce qui nous pousse à adopter un autre critère d'usure $VB = [0.4]$ mm pour les travaux d'ébauchage. Cela a pour effet d'augmenter la durée de vie de l'outil.
- L'usure de l'outil de coupe et le temps d'usinage ont un impact significatif sur les composantes de l'effort de coupe, en particulier l'effort radial. On note que l'effort radial (F_y) est le plus sensible à l'usure de l'outil par rapport à l'effort axial et tangentiel.

CHAPITRE IV

MODÉLISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUE EN UTILISANT LES APPROCHES RSM ET ANN

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques de la rugosité de surface arithmétique (R_a), l'effort de coupe tangentiel (F_z) et le volume de copeau enlevé (MRR) lors de l'usinage de l'acier AISI D3 en utilisant un outil de coupe en carbure revêtu en CVD (GC4215). Les modèles sont déterminés en appliquant la Méthodologie de surface de réponse (RSM) et les réseaux de neurones (ANN) pour mettre en évidence la relation entre les paramètres de coupe à savoir (la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe) et les réponses étudiées (R_a , F_z et MRR). Les deux approches sont comparées en matière de (R^2). Dans ce chapitre nous allons présenter aussi une optimisation multi-objective nommée (fonction de désirabilité) des paramètres technologiques (R_a et MRR).

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons comparer les modèles mathématiques de la rugosité de surface arithmétique (Ra), l'effort de coupe tangentiel (Fz) et le volume de copeau enlevé (MRR), en utilisant deux techniques de modélisation à savoir la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones, lors de l'usinage de l'acier AISI D3 en utilisant un outil de coupe en carbure revêtu en CVD (GC4215). Les modèles développés par la méthodologie de surface de réponse sont obtenus en se basant sur un plan factoriel complet de 64 essais. Les paramètres du processus de coupe choisis comme variables, sont la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap). La comparaison entre les deux approches est faite en se basant sur l'évaluation du coefficient de détermination (R^2). Dans ce chapitre nous allons présenter aussi une optimisation multi-objective nommée (fonction de désirabilité) des paramètres technologiques (Ra et MRR).

IV.2 La méthodologie des surfaces de réponse

IV.2.1 Les principes généraux

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants [75]. L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs.

IV.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse

La (*fig. IV.1*) schématise l'enchaînement des étapes de la méthodologie de surface de réponses. Les phases de construction du plan et de modélisation sont étroitement liées et peuvent être menées de manière itérative. Dans une première étape, on construit un plan d'expérience optimal pour le modèle le plus simple possible. Ensuite, ce plan pourrait, éventuellement, être complété si les phases de modélisation et de validation montrent que le modèle présupposé s'avère inadéquat.

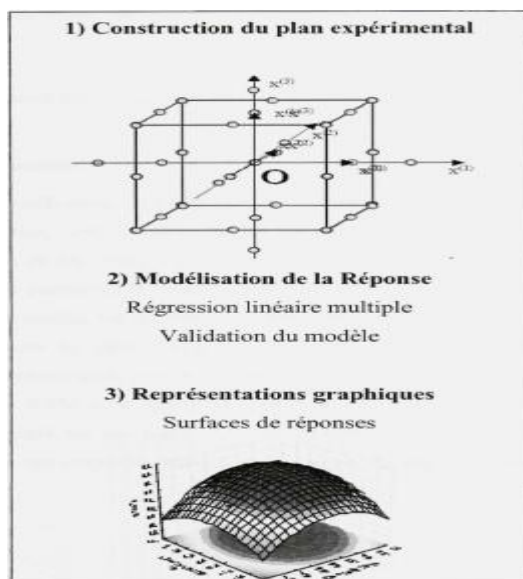


Figure IV.1 : Etapes de la méthodologie de surface de réponse [31].

IV.2.3 Les étapes de la RSM

IV.2.3.1 Planification expérimentale

Pour une bonne planification expérimentale, il est souhaitable que le nombre d'expériences effectuées, soit le plus faible possible afin de réduire les besoins informatiques, le délai et les coûts d'expérimentation. Une bonne sélection des points pour l'expérimentation permettra de réduire la variance des coefficients de notre modèle mathématique, ce qui rendra les surfaces de réponses obtenues plus fiables. Pour ce faire, il faut déterminer le plan d'expérience le plus approprié afin d'obtenir les expériences les plus intéressantes pour notre type de problème. Les plans utilisés dans le cadre d'une étude de RSM sont des plans quadratiques tels que les plans centraux composites (Box-Wilson) ou les plans de Box-Behnken. Le plan central composite (CCD) est le plus souvent employé. Mais d'autres types de plan quadratique s'offrent à l'expérimentateur [31].

IV.2.3.2 Modélisation

Lorsque l'on utilise la RSM, on cherche à relier une réponse continue y à k facteurs continus et contrôlés X_1, X_2, \dots, X_k à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire :

$$y = f_{\beta}(X_1, X_2, \dots, X_p) + \varepsilon \tag{IV.1}$$

Bien que la forme précise de la fonction de réponse f_{β} soit inconnue, l'expérience montre que l'on peut en avoir une bonne approximation par un polynôme.

Dans le cas de deux facteurs, le modèle de régression linéaire est de la forme :

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \tag{IV.2}$$

Il s'agit d'un des modèles les plus simples qui correspond à un modèle du premier degré avec interaction. Lorsque ce modèle est insuffisant pour décrire avec efficacité la réalité

expérimentale, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs qui, dans la plupart des cas, est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés.

Un modèle de surface de réponses du second degré avec d variables peut s'écrire de la manière suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{IV.3})$$

Où:

x_i : variables de prédiction codées appelées facteurs

β : coefficient de régression

ε : erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse

Dans la phase d'expérimentation de RSM, il convient de transformer les variables de conception réelles en variables codées, qui sont définies comme étant sans dimension avec une moyenne de zéro et le même écart-type. Le but de l'opération est de traiter tous les facteurs de la même manière et de façon plus aisée car, simplifiée. La règle de passage des variables courantes aux variables codées est :

$$x_i = \frac{2R_i - [R_{max} + R_{min}]}{[R_{max} - R_{min}]} \quad (\text{IV.4})$$

Où:

x_i : variables de prédiction centrée réduite (codée)

R_i : Variable courante (naturelle, réelle)

Les coefficients de régression, paramètres inconnus du modèle équation (IV.3), sont estimés par la technique des moindres carrés et la qualité d'ajustement du modèle est évaluée à l'aide d'outils classiques de régression linéaire multiple.

Le modèle d'approximation peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\hat{y} = Xb \quad (\text{IV.5})$$

Où:

$\hat{y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$: estimation du vecteur de réponse des n réponses observées

X : la matrice de terme de modèle évalué aux points de conception

b : est l'estimateur des moindres carrés du vecteur de régression β , dont la valeur est estimée en minimisant la somme des carrés de l'erreur SS_E définie par :

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{IV.6})$$

Une fois les modèles mathématiques obtenus, il est nécessaire de vérifier que ces modèles donnent une approximation adéquate du système réel à l'étude.

IV.2.3.2.1 Validation des modèles

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des mesures statistiques importantes sont à considérer :

- le coefficient de détermination statistique : R^2 ;
- le coefficient de détermination ajusté : R_{adj}^2 ;
- l'erreur rms : RMSE.

Leurs définitions impliquent la partition de l'erreur totale :

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2 \quad (\text{IV.7})$$

En une somme de l'erreur accidentelle et de l'erreur systématique.

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (\text{IV.8})$$

Où:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad \text{est la moyenne des réponses.}$$

Quant au coefficient de détermination R^2 il permet d'estimer la variation de la réponse autour de la moyenne qui peut être représentée par le modèle. Il est compris entre 0 et 1 et un R^2 de 1 exprime une correspondance parfaite entre l'évaluation et la valeur réelle ($\hat{y}_i = y_i$). Par contre, un R^2 de 0 signifie que l'évaluation est incapable de prédire la valeur réelle.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (\text{IV.9})$$

Le coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 est une mesure améliorée de R^2 . Contrairement à R^2 , R_{adj}^2 , n'augmente pas lorsque des paramètres redondants sont ajoutés à l'approximation de surface de réponse.

$$R_{adj}^2 = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2) \quad (\text{IV.10})$$

Quant à la RMSE, il s'agit d'une estimation de la déviation standard de l'erreur aléatoire et peut s'écrire :

$$RMSE = \sqrt{\frac{SS_E}{(n-p)}} \quad (\text{IV.11})$$

- Graphiques des valeurs résiduelles : Les graphiques des valeurs résiduelles utiles pour vérifier les hypothèses des modèles et peuvent être affichés pour tous les plans et ils sont déterminées par l'évaluation de l'équation (IV.12) [76].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (\text{IV.12})$$

Où :

y_{ij} : l'observation correspondante des valeurs non ajustées.

\hat{y}_{ij} : l'observation des valeurs ajustées.

- Graphique des valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles

- Test de normalité d'Anderson Darling : le test d'Anderson Darling est utilisé pour tester si un échantillon de données est issu d'une population ayant une distribution spécifique. Ce test est une alternative au test de chi carré ou de Kolmogorov-Smirnov. Il est basé sur ce dernier mais il est plus puissant. Le test Anderson Darling est défini comme suit :

• L'hypothèse nulle H_0 : Les données proviennent d'une population distribuée normalement.

• L'hypothèse alternative H_1 : Les données ne proviennent pas d'une population distribuée normalement.

La statistique du test d'Anderson Darling est donnée par [59]:

$$A = -N - S \quad (\text{IV.13})$$

Où :

N est la taille de l'échantillon.

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\log F(Y_i) + \log(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad (\text{IV.14})$$

Où :

F : est la fonction de répartition de la distribution spécifiée

Les valeurs critiques dépendent des distributions (normale, log-normale, exponentielle...). Les valeurs de P sont souvent utilisées dans les tests d'hypothèses dans lesquels on peut ou non rejeter une hypothèse nulle. La valeur de P représente la probabilité de faire une erreur de type 1, ou de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. Plus la valeur de P est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. Une valeur limite de 0.05 est utilisée. Autrement dit, rejetez l'hypothèse nulle si la valeur de P est inférieure à 0.05.

Pour prendre une décision, on choisit le niveau de signification, α (alpha), avant le test :

- Si P est inférieur ou égal à α , on rejette H_0 .
- Si P est supérieur à α , on ne rejette pas H_0 .

IV.3. Résultats et discussion

Le *tableau IV.1* montre les résultats expérimentaux de la rugosité de surface (Ra) de l'effort de coupe (Fz) et le volume de copeau enlevé (MRR) qui sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe. Les essais sont réalisés suivant un plan factoriel complet $P = 4^3 = 64$ essais. L'analyse statistique est faite dans l'objectif d'analyser les effets de la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) sur les réponses. Et cela, en choisissant un niveau de signification de 5% (l'intervalle de confiance de 95 %). Le traitement statistique des résultats du tableau (*IV.1*) a été réalisé en trois phases. La première phase portait sur l'analyse de la variance et de l'effet des facteurs et des interactions. La deuxième phase a permis d'obtenir des modèles mathématiques des paramètres étudiés (régression quadratique). Enfin, une optimisation des conditions de coupe qui permis de proposer un régime optimal grâce à la fonction de désirabilité.

Tableau IV.1 : Résultats de la rugosité de surface (Ra) de l'effort de coupe (Fz) et le volume de copeau enlevé (MRR) en fonction des différentes combinaisons des conditions de coupe.

N° d'essai	Valeurs codifiées			Valeurs réelles			Réponses		
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	MRR (mm ³ /min)
1	1	1	1	140	0.08	0.1	0.95	100.37	1120
2	1	1	2	140	0.08	0.2	1.09	102.64	2240
3	1	1	3	140	0.08	0.3	1.16	119.95	3360
4	1	1	4	140	0.08	0.4	1.25	158.42	4480
5	1	2	1	140	0.11	0.1	1.26	69.57	1540
6	1	2	2	140	0.11	0.2	1.23	142.7	3080
7	1	2	3	140	0.11	0.3	1.29	138.76	4620
8	1	2	4	140	0.11	0.4	1.36	166.99	6160
9	1	3	1	140	0.14	0.1	1.38	67.08	1960
10	1	3	2	140	0.14	0.2	1.38	112.55	3920
11	1	3	3	140	0.14	0.3	1.45	167.73	5880
12	1	3	4	140	0.14	0.4	1.58	216.84	7840
13	1	4	1	140	0.16	0.1	1.40	58.07	2240
14	1	4	2	140	0.16	0.2	1.46	121.77	4480
15	1	4	3	140	0.16	0.3	1.58	164.22	6720
16	1	4	4	140	0.16	0.4	1.79	202.85	8960
17	2	1	1	200	0.08	0.1	0.89	93.11	1600
18	2	1	2	200	0.08	0.2	1.08	114.64	3200
19	2	1	3	200	0.08	0.3	1.1	75.57	4800
20	2	1	4	200	0.08	0.4	1.16	87.21	6400
21	2	2	1	200	0.11	0.1	1.17	58.97	2200
22	2	2	2	200	0.11	0.2	1.14	99.62	4400
23	2	2	3	200	0.11	0.3	1.26	132.91	6600
24	2	2	4	200	0.11	0.4	1.32	148.87	8800
25	2	3	1	200	0.14	0.1	1.19	67.69	2800
26	2	3	2	200	0.14	0.2	1.28	97.96	5600
27	2	3	3	200	0.14	0.3	1.31	89.57	8400
28	2	3	4	200	0.14	0.4	1.35	245.63	11200
29	2	4	1	200	0.16	0.1	1.39	85.82	3200
30	2	4	2	200	0.16	0.2	1.33	142.7	6400
31	2	4	3	200	0.16	0.3	1.42	163.6	9600
32	2	4	4	200	0.16	0.4	1.59	215.32	12800
33	3	1	1	280	0.08	0.1	0.77	61.2	2240
34	3	1	2	280	0.08	0.2	0.99	49.13	4480
35	3	1	3	280	0.08	0.3	1.07	118.67	6720
36	3	1	4	280	0.08	0.4	1.09	193.23	8960
37	3	2	1	280	0.11	0.1	1.12	69.8	3080
38	3	2	2	280	0.11	0.2	1.17	90.23	6160
39	3	2	3	280	0.11	0.3	1.21	127.71	9240
40	3	2	4	280	0.11	0.4	1.27	159.76	12320
41	3	3	1	280	0.14	0.1	1.16	71.92	3920
42	3	3	2	280	0.14	0.2	1.21	156.77	7840

43	3	3	3	280	0.14	0.3	1.17	166.42	11760
44	3	3	4	280	0.14	0.4	1.35	198.37	15680
45	3	4	1	280	0.16	0.1	1.36	99.7	4480
46	3	4	2	280	0.16	0.2	1.41	110.27	8960
47	3	4	3	280	0.16	0.3	1.45	209.65	13440
48	3	4	4	280	0.16	0.4	1.57	200.69	17920
49	4	1	1	400	0.08	0.1	0.58	36.28	3200
50	4	1	2	400	0.08	0.2	0.86	67.11	6400
51	4	1	3	400	0.08	0.3	1.04	125.84	9600
52	4	1	4	400	0.08	0.4	1.07	123.43	12800
53	4	2	1	400	0.11	0.1	1.11	62.52	4400
54	4	2	2	400	0.11	0.2	1.16	101.58	8800
55	4	2	3	400	0.11	0.3	1.19	130.66	13200
56	4	2	4	400	0.11	0.4	1.20	164.66	17600
57	4	3	1	400	0.14	0.1	1.15	71.59	5600
58	4	3	2	400	0.14	0.2	1.21	116.2	11200
59	4	3	3	400	0.14	0.3	1.17	130.77	16800
60	4	3	4	400	0.14	0.4	1.36	176.46	22400
61	4	4	1	400	0.16	0.1	1.29	71.28	6400
62	4	4	2	400	0.16	0.2	1.31	122.35	12800
63	4	4	3	400	0.16	0.3	1.35	222.52	19200
64	4	4	4	400	0.16	0.4	1.39	205.26	25600

IV.3.1 Modélisation de la rugosité de surface en fonction des paramètres d'usinage

IV.3.1.1 Analyse de la variance pour la rugosité de surface (Ra)

Les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour le critère de la rugosité de surface (Ra) en utilisant le ($Seq SS$) pour les tests ainsi que les coefficients de régression estimés sont exposés dans le tableau (IV.2). L'analyse est effectuée pour un niveau de signification $\alpha = 0.05$ (c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95%). Dans ce tableau sont mentionnés les valeurs des degrés de liberté (DL), la somme des carrés des écarts ($Seq SS$), les carrés moyens ($Adj MS$), la valeur de la probabilité ($Prob$) indiquant le niveau de signification des paramètres pour chaque source de variation. La valeur de ($Prob$) inférieur à 0.05 pour n'importe quel facteur à un impact significatif sur la réponse mesurées [77], la propriété statistique (F) et la contribution en pourcentage ($Cont\%$) de chaque facteur et des différentes interactions. L'analyse a été effectuée en utilisant des données non codées. En outre, la dernière colonne du tableau montre la contribution en pourcent ($Cont\%$) de chaque facteur et des différentes interactions, indiquant le degré d'influence sur les résultats. Plus le pourcentage de contribution ($Cont\%$) est grand plus le facteur à un effet sur les paramètres étudiées.

Le **Tableau (IV.2)** présente l'analyse de variance ANOVA pour le critère de rugosité (Ra). On note que la vitesse d'avance est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 59.495%, suivi par la profondeur de passe (ap) avec une contribution 16.226%, puis de la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 11.749%. Le produit ($Vc \times Vc$) a un très légère effet de 0.956%. Par contre les interactions ($Vc \times f$), ($Vc \times ap$), ($f \times ap$), les produits ($f \times f$) et ($ap \times ap$) n'ont pas un effet significatif puisque la valeur de probabilité ($Prob$) est supérieure à 0.05.

Tableau IV.2 : Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité (Ra)

Source	DL	Seq SS	CM ajust	Adj MS	F	Prob	Cont%	Remarque	
Vc	1	0.299	0.036	0.036	7.125	0.010	11.74	Significatif	
f	1	1.515	0.0303	0.030	2546594	0.018	59.49	Significatif	
ap	1	0.413	0.0147	0.0147	2489160	0.095	16.22	Significatif	
$Vc \times f$	1	0.000	0.0000	0.000	0.007	0.931	0.001	Non significatif	
$Vc \times ap$	1	0.000	0.0004	0.000	0.080	0.777	0.016	Non significatif	
$f \times ap$	1	0.012	0.0122	0.012	670253	0.129	0.479	Non significatif	
Vc^2	1	0.024	0.0243	0.024	1961810	0.034	0.956	Significatif	
f^2	1	0.002	0.0021	0.002	0.413	0.522	0.083	Non significatif	
ap^2	1	0.001	0.0018	0.001	0.350	0.556	0.071	Non significatif	
Error	54	0.278	0.2781	0.005			10.91		
Total	63	2.546			23.837		100		
							$R^2 = 89.08\%$	$R^2(adj) = 87.26\%$	

IV.3.1.2 Analyse de régression

L'équation (IV.15) exprime le modèle de la rugosité arithmétique (Ra) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Ra = 0.571411 - 2.12158 \cdot 10^{-3} Vc + 8.05165f + 1.01242ap + 2.64585 \times 10^{-6} Vc^2 + 2.62057 \times 10^{-4} Vc \times f - 2.34169 \times 10^{-4} Vc \times ap - 8.44816f^2 - 4.07823f \times ap + 0.53125ap^2 \quad (IV.15)$$

Où : Le coefficient de détermination $R^2 = 89.08\%$.

Le modèle qui décrit la variation de (Ra) en fonction des facteurs et des interactions significatif peut être défini par l'équation (IV.16):

$$Ra = 0.789692 - 0.00214802Vc + 5.07653f + 0.71875ap + 2.64585 \times 10^{-6} Vc^2 \quad (IV.16)$$

Où :

Le coefficient de détermination $R^2 = 88.43\%$.

IV.3.1.3 Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour (Ra)

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de la rugosité de surface (Ra) est : $R^2=89.08\%$. Cette valeur indique que 89.08% d'une simple variation de la rugosité (Ra) est expliquée par les variables. La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une haute signification du modèle et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.

Pour valider ce modèle, il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différence entre les valeurs expérimentales de la rugosité (Ra) et celles obtenues à partir du modèle de prédiction). La distribution des résidus est déterminée par l'évaluation de l'équation (IV.9) [78]. Le test de la normalité (d'Anderson - Darl) de cette distribution doit suivre la loi normale (*fig. IV.2 a*).

Les tracés des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées sont illustrés dans la (*fig.IV.2b*), l'analyse montre que la structure comparative de distribution des points au dessus et au dessous de l'axe des abscisses (valeurs ajustées) montre que l'erreur est indépendamment distribuée et la variance est constante. Des résultats semblables ont été rapportés par Douglas et al. [79].

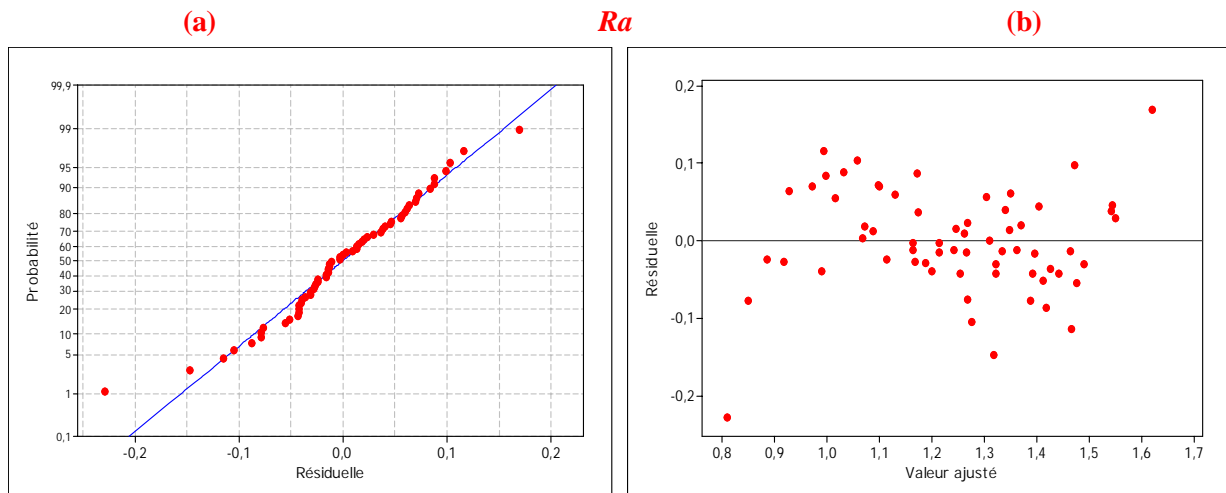


Figure IV.2 : Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour (Ra) :
 (a) test de normalité de la distribution des résidus ;
 (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustée.

IV.3.1.4 Comparaison entre les valeurs de la rugosité de surface (Ra) expérimentales et estimés

La comparaison entre les valeurs expérimentales de la rugosité de surface (Ra) et celles estimées par le modèle obtenu par la méthodologie de surface de réponse (MSR) est présentée sur la (*fig. IV.3*). Les résultats de la comparaison prouvent que les valeurs prédites

des paramètres technologiques sont très proches aux valeurs expérimentalement (bon accord entre valeurs prédites et observées). La (fig. IV.3) indique que le modèle de régression quadratique est capables de représenter le système sous le domaine expérimental donné.

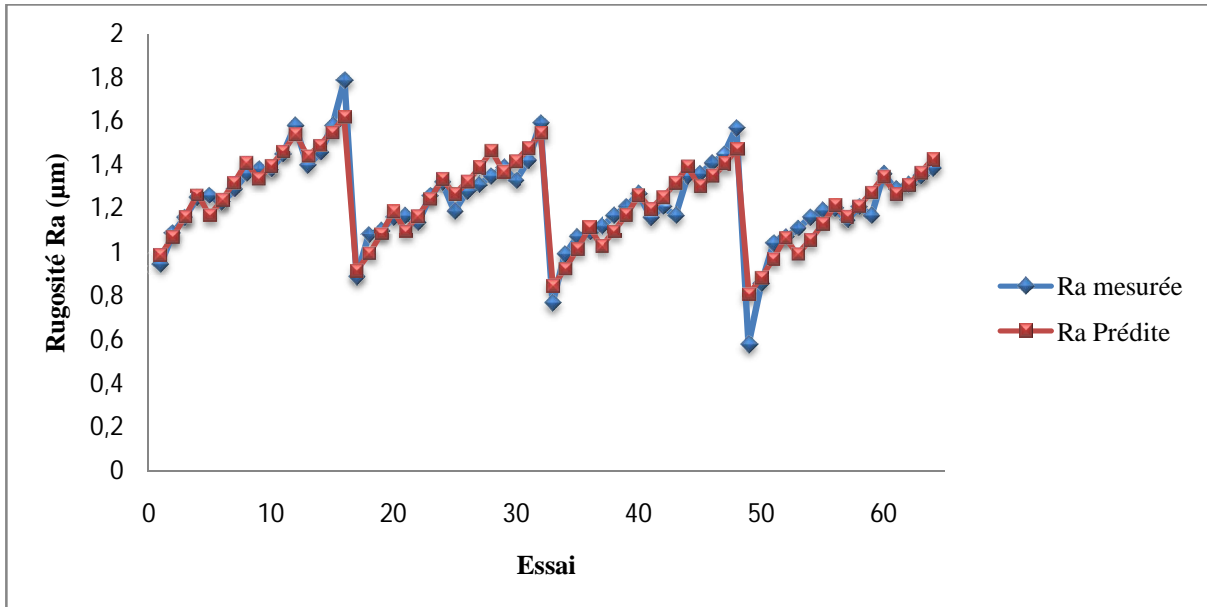


Figure IV.3 : Courbe du critère de la rugosité (Ra) expérimentale et estimé.

IV.3.1.5 Graphique des effets principaux pour Ra

La figure (IV.4) montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur la rugosité de surface (Ra).

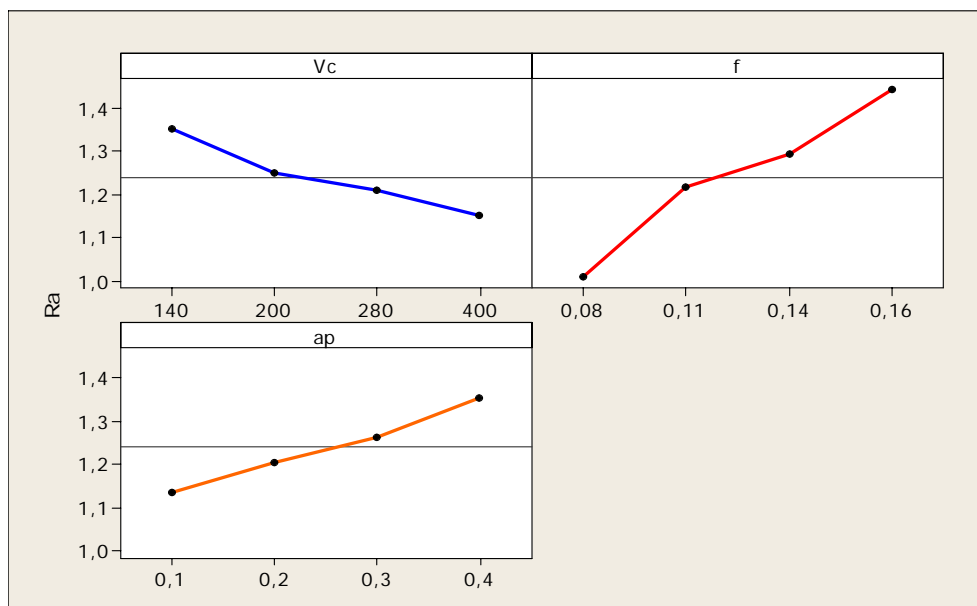
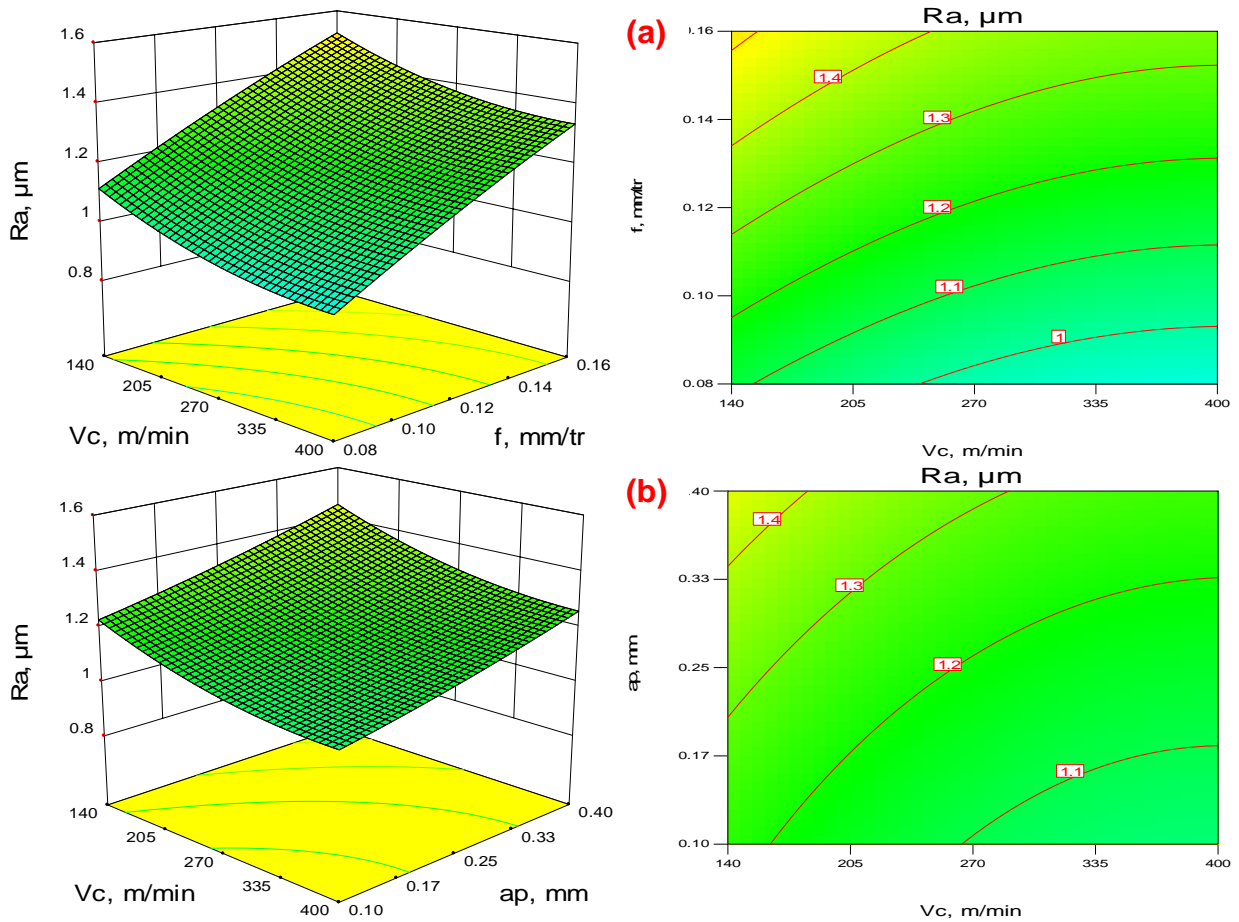


Figure IV.4 : Graphique des effets principaux pour Ra.

Cette figure montre que l'avance a un effet significatif sur (Ra). En effet, on remarque que la pente du paramètre (f) est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de la profondeur de passe. L'analyse des résultats de la (fig. IV.4) montre que l'augmentation de l'avance, la profondeur de passe entraine une augmentation de la rugosité de surface (Ra).

IV.3.1.6 Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe

La présentation en 3D (fig. IV.5) montre que la pente de l'avance est la plus grande par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité de surface (Ra). D'autre part les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



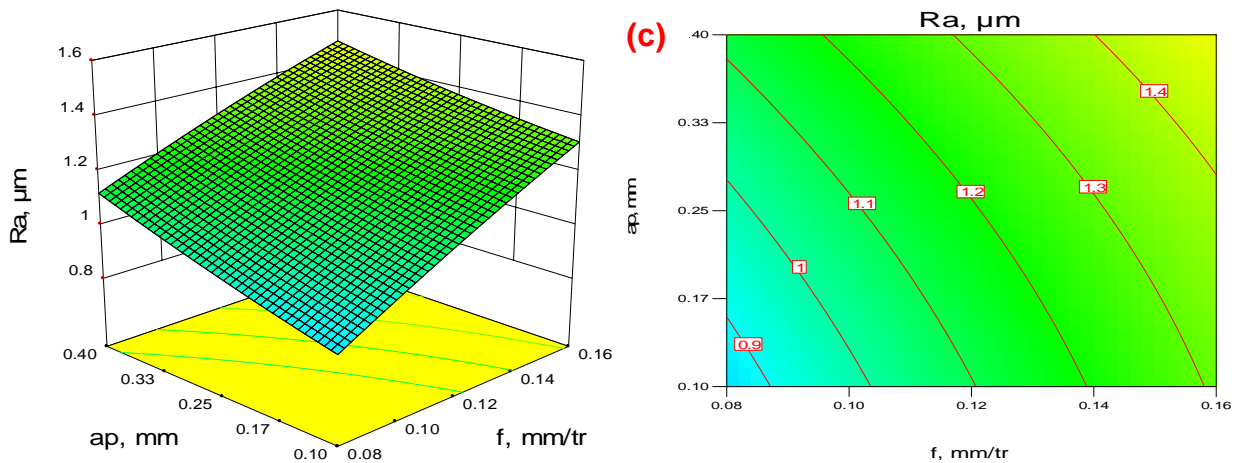


Figure IV.5: Diagramme de surface 3D pour Ra en fonction de V_c , f et a_p et les graphes de contour. a) En fonction de V_c et f ; b) En fonction de V_c et a_p ; c) En fonction de f et a_p .

IV.3.2 Modélisation de l'effort de coupe tangentiel en fonction des paramètres d'usinage

IV.3.2.1 Analyse de la variance pour l'effort de coupe tangentiel (F_z)

L'analyse de variance ANOVA présentée dans le **tableau (IV.3)** pour la composante de l'effort tangentiel (F_z) montre que la profondeur de passe vient en première position d'influence sur l'effort tangentiel (F_z) suivi par la vitesse d'avance avec des contributions de 62.61% et 12.94, respectivement car le produit ($f \times a_p$) a un effet significatif, sa contribution est de 3.921% sur la variation de cette composante. Par contre, les autres interactions et les produits n'ont pas un effet significatif sur l'effort tangentiel.

Tableau IV.3 : Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort de coupe tangentiel (F_z)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont%	Remarque	
V_c	1	451	555	554.5	0.968	0.329	0.27	Non significatif	
f	1	20934	565	565.1	0.986	0.324	12.93	Non significatif	
a_p	1	101296	7	7	0.012	0.912	62.61	Non significatif	
$V_c \times f$	1	1516	1516	1516.4	2.648	0.109	0.93	Non significatif	
$V_c \times a_p$	1	156	156	155.9	0.272	0.603	0.09	Non significatif	
$f \times a_p$	1	6345	6345	6345.5	11.082	0.001	3.92	significatif	
V_c^2	1	0,23	0	0.2	0.000	0.984	0.00	Non significatif	
f^2	1	152	152	152.2	0.265	0.608	0.09	Non significatif	
a_p^2	1	9	9	8.9	0.015	0.901	0.00	Non significatif	
Error	54	30920	30920	572.6			19.11		
Total	63	161780			16.2522		100		
							$R^2 = 80.89\%$	$R^2(adj) = 77.70\%$	

IV.3.2.2 Analyse de régression

L'équation (IV.17) exprime le modèle de l'effort de coupe tangentiel (F_z) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$F_z = 149.092 - 0.260802V_c - 1099.15f - 22.0697ap - 8.11084 \times 10^{-6}V_c^2 + 1.64978V_c \times f + 0.143423V_c \times ap + 2258.12f^2 + 2938.25f \times ap - 37.2031ap^2 \quad (\text{IV.17})$$

Où :

Le coefficient de détermination $R^2=80.89\%$.

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

$$F_z = 60.5404 - 0.0272793V_c - 137.889f - 4.09833ap + 2938.25f \times ap \quad (\text{IV.18})$$

Où :

Le coefficient de détermination $R^2=79.75\%$.

IV.3.2.3 Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour (F_z)

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de l'effort de coupe tangentiel (F_z) est : ($R^2=80.89\%$). Cette valeur indique que 80.89% d'une simple variation de l'effort de coupe (F_z) est expliquée par les variables. La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une signification du modèle et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.

Pour valider ce modèle, il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différence entre les valeurs expérimentales de l'effort de coupe (F_z) et celles obtenues à partir du modèle de prédiction) (**figure (IV.6) (a et b)**).

IV.3.2.4 Comparaison entre les valeurs de l'effort de coupe tangentiel (F_z) expérimentales et estimés

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'effort de coupe tangentiel (F_z) et celles estimés par les modèle mathématique (modèle quadratique) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR) sont présentées graphiquement sur la **figure (IV.7)**. D'après cette figure, les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont proches. Donc on peut conclure que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse donne des résultats fiables.

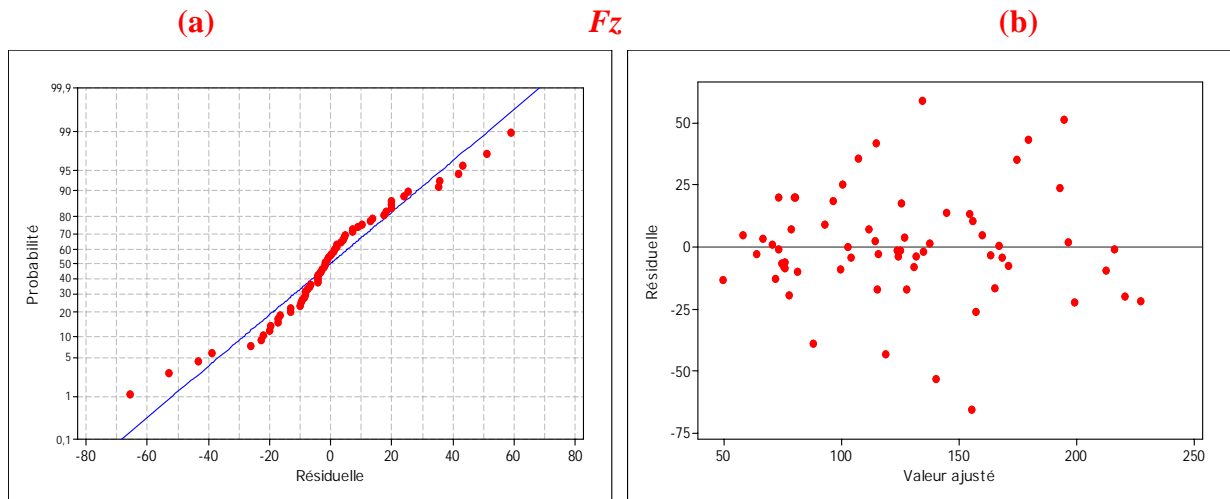


Figure IV.6 : Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour l'effort de coupe tangentiel (F_z) : (a) test de normalité de la distribution des résidus ; (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustée.

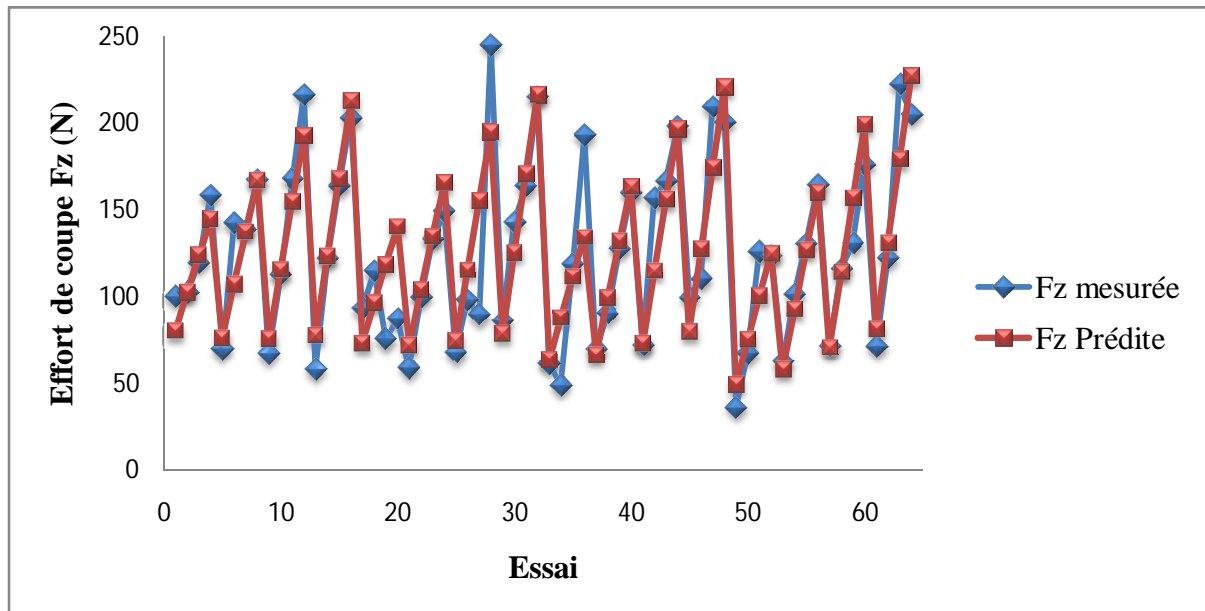


Figure IV.7 : Courbe des valeurs de l'effort de coupe tangentiel (F_z) expérimentales et estimés.

IV.3.2.5 Graphique des effets principaux pour F_z

La *figure (IV.8)* illustre les effets principaux des paramètres de coupe sur l'effort tangentiel (F_z). On remarque que (F_z) s'élève légèrement avec l'augmentation de l'avance. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande. L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une diminution de l'effort (F_z), cette augmentation conduit à une augmentation de la température générée dans la zone de coupe ce

qui réduit considérablement la dureté de la pièce et facilite ainsi l'opération d'enlèvement de matière.

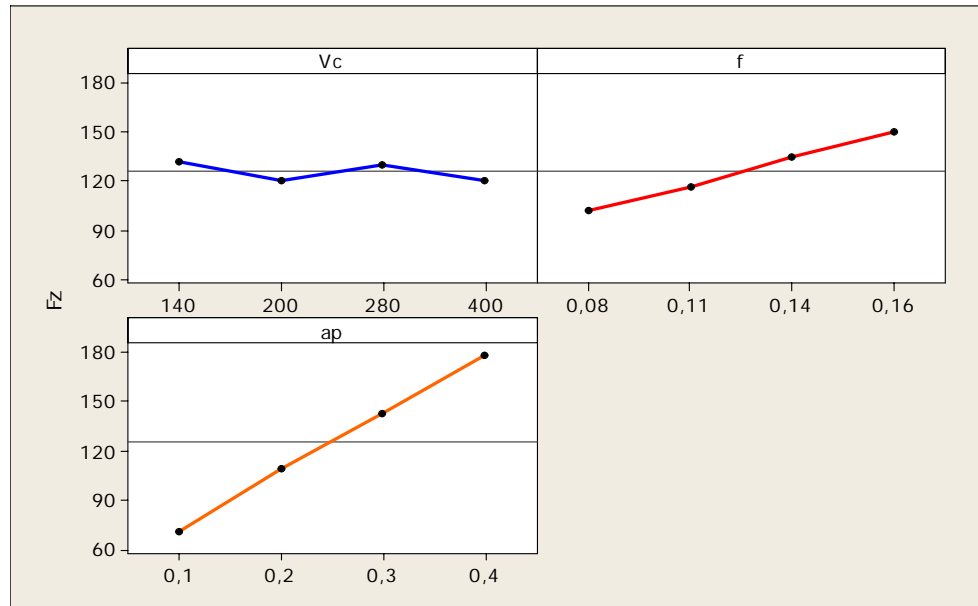


Figure IV.8 : Graphique des effets principaux pour F_z .

L'analyse détaillée de surface de réponse de l'effort tangentiel (F_z) trouvé (fig. IV.8), confirme que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à la diminution de l'effort tangentiel. La variation de la profondeur de passe conduit à une croissance de l'effort tangentiel. On constate alors que l'effort tangentiel (F_z) augmente avec l'augmentation la profondeur de passe, car la zone de l'interface outil/copeau augmente ce qui ramène à l'augmentation de la composante de l'effort de coupe tangentiel (F_z).

IV.3.2.6 Evolution de l'effort F_z en fonction des paramètres du régime de coupe

La figure (IV.9) illustre la surface de réponse de l'effort tangentiel (F_z) en fonction de (V_c , f , ap) et les graphes de contour. On remarque que l'influence de la profondeur de passe est plus importante, et ce à partir de la pente de la variation de l'effort tangentiel suivant l'axe ap . Comme il a été prévu, on remarque que l'effort tangentiel augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance. Ceci est dû à l'élargissement de la section de contact entre l'outil et la pièce usinée. Le graphe de contour montre les lignes de valeurs maximales, intermédiaires et minimales. Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (F_z) et les conditions d'exploitation souhaitables.

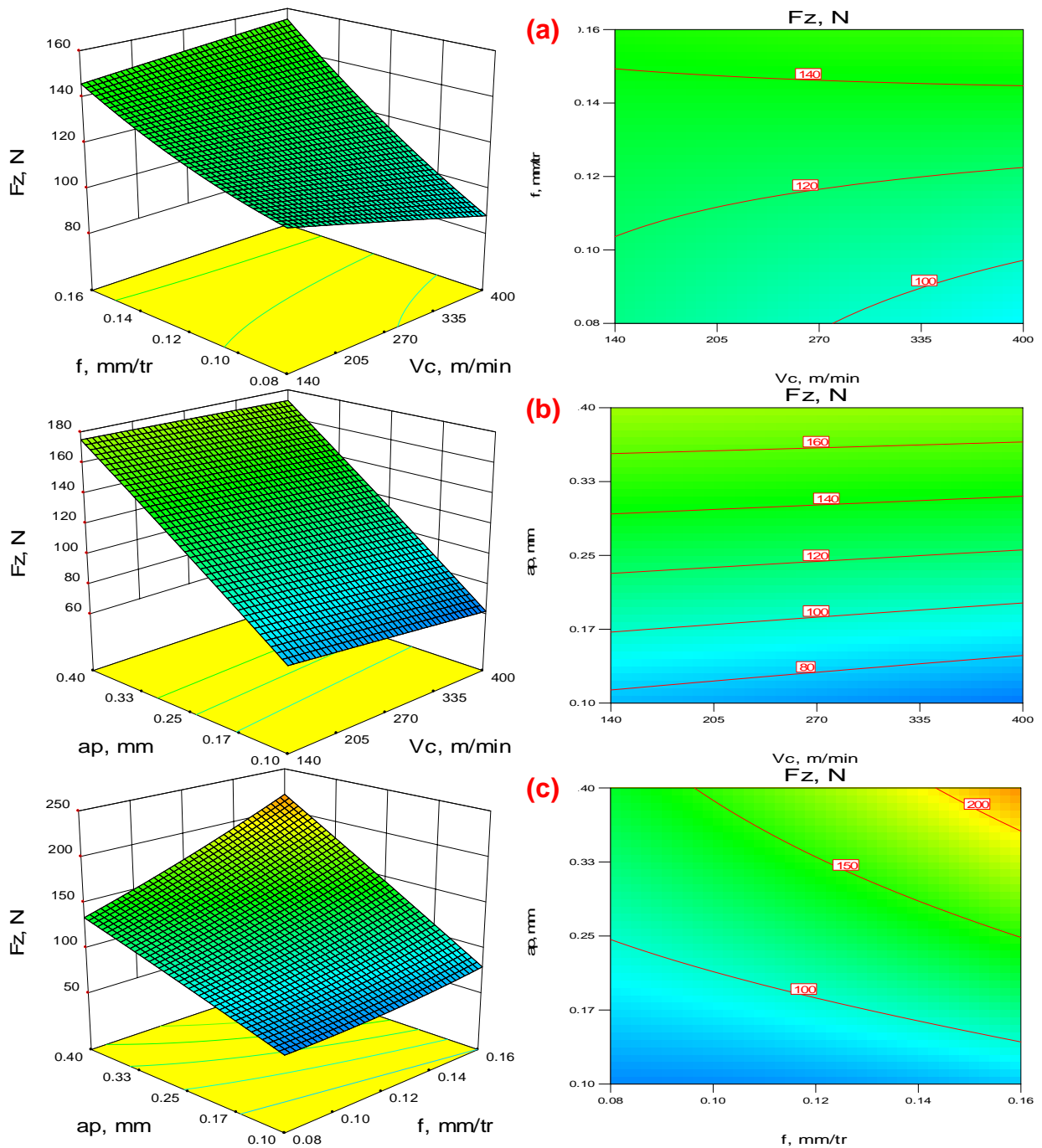


Figure IV.9: Diagramme de surface 3D pour F_z en fonction de V_c , f , ap et graphe de contour. **a)** En fonction de V_c et f ; **b)** En fonction de V_c et ap ; **c)** En fonction de f et ap .

IV.3.3 Modélisation du volume de copeau enlevé en fonction des paramètres d'usinage

IV.3.3.1 Analyse de la variance pour le volume de copeau enlevé (MRR)

L'analyse de la variance ANOVA présentée dans le **tableau (IV.4)** pour volume de copeau enlevé (MRR) montre que la profondeur de passe (ap) a un grand effet significatif, sa

contribution est de 43.57%, suivi par la vitesse de coupe (V_c) puis par la vitesse d'avance (f) avec une contribution 31.74% et 13.34%, respectivement. On remarque que les produits ($V_c \times f$), ($V_c \times ap$) et ($f \times ap$) sont significatifs aussi avec des contributions 1.94%, 6.35% et 2.67% respectivement. Par contre les produits V_c^2 , f^2 et ap^2 n'ont pas un effet significatif sur le volume de copeau (MRR) puisque la valeur de $Prob P$ est supérieure à 0.05.

Tableau IV.4 : Analyse de la variance (ANOVA) pour le volume de copeau enlevé (MRR)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont. %	Remarque
V_c	1	568736875	7646612	7646612	59.29	0	31.74	significatif
f	1	238966875	1900819	1900819	14.74	0.000	13.33	significatif
ap	1	780625125	14078983	14078983	109.17	0	43.57	significatif
$V_c \times f$	1	34820625	34820625	34820625	270	0	1.94	significatif
$V_c \times ap$	1	113747375	113747375	113747375	882	0	6.34	significatif
$f \times ap$	1	47793375	47793375	47793375	370.59	0	2.66	significatif
V_c^2	1	0	0	0	0	1	0	Non significatif
f^2	1	0	0	0	0	1	0	Non significatif
ap^2	1	0	0	0	0	1	0	Non significatif
Error	54	6964125	6964125	128965			0.38	
Total	63	1791654375			1705,79		100	
							$R^2 = 99.61\%$	$R^2(adj) = 99.55\%$

IV.3.3.2 Analyse de régression

L'équation (IV.19) exprime le modèle du volume de copeau enlevé (MRR) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$\begin{aligned}
 MRR = & 7809.38 - 30.625V_c - 63750f - 31237.5ap + 1.83031 \times 10^{-16}V_c^2 + \\
 & 250V_c \times f + 122.5V_c \times ap + 1.91488 \times 10^{-10}f^2 + 2.55 \times 10^5 f \times ap + \\
 & 1.53738 \times 10^{-11}ap^2
 \end{aligned} \tag{IV.19}$$

Où :

Le coefficient de détermination $R^2=99.61\%$

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

$$\begin{aligned}
 MRR = & 7809.38 - 30.625V_c - 63750f - 31237.5ap + 250V_c \times f + 122.5V_c \times ap \\
 & + 2.55 \times 10^5 f \times ap
 \end{aligned} \tag{IV.20}$$

Où :

Le coefficient de détermination $R^2=99.61\%$.

IV.3.3.3 Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour (MRR)

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de le volume de copeau enlevé (MRR) est : ($R^2=99.61\%$). Cette valeur indique que 99.61% d'une simple variation du volume de copeau (MRR) est expliquée par les variables. La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une haute signification du modèle et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales. Pour valider ce modèle, il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différence entre les valeurs expérimentales de (MRR) et celles obtenues à partir du modèle de prédiction) ((fig. IV.10) (a et b)).

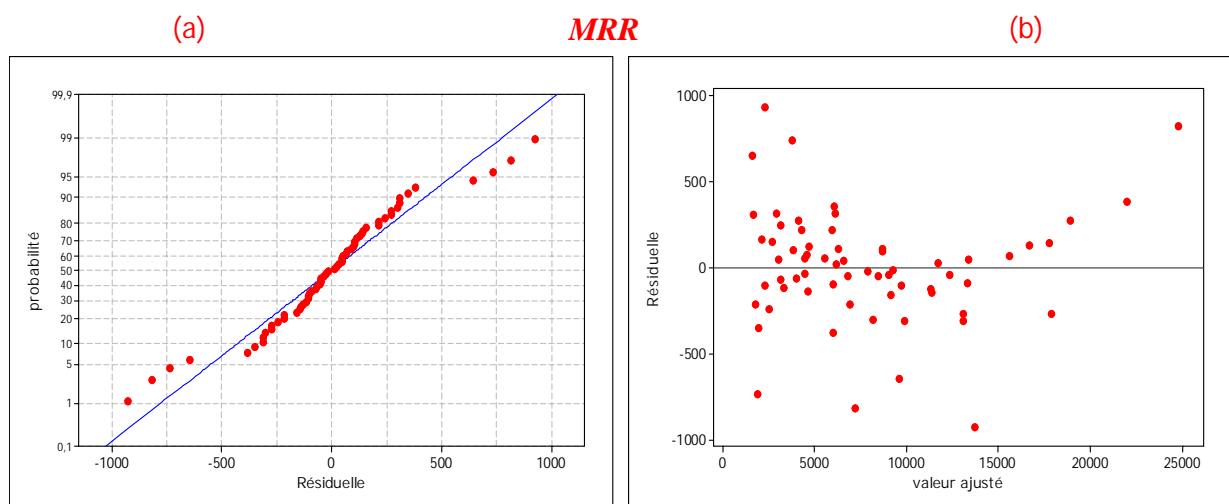


Figure IV.10 : Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour le volume de copeau (MRR) : (a) test de normalité de la distribution des résidus ; (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustée.

IV.3.3.4 Comparaison entre les valeurs de l'effort de coupe tangentiel (MRR) expérimentales et estimés

La comparaison entre les valeurs expérimentales du volume de copeau enlevé (MRR) et celles estimées par le modèle obtenu par la méthodologie de surface de réponse (RSM) est présentée sur la (fig. IV.11). Les résultats de la comparaison prouvent que les valeurs prédites sont très proches aux valeurs expérimentales (bon accord entre valeurs prédites et observées). La (fig. IV.11) indique que le modèle de régression quadratique est capables de représenter le système sous le domaine expérimental donné. Il est clair d'après cette comparaison que le modèle issu de la (RSM) donne un très bon résultat.

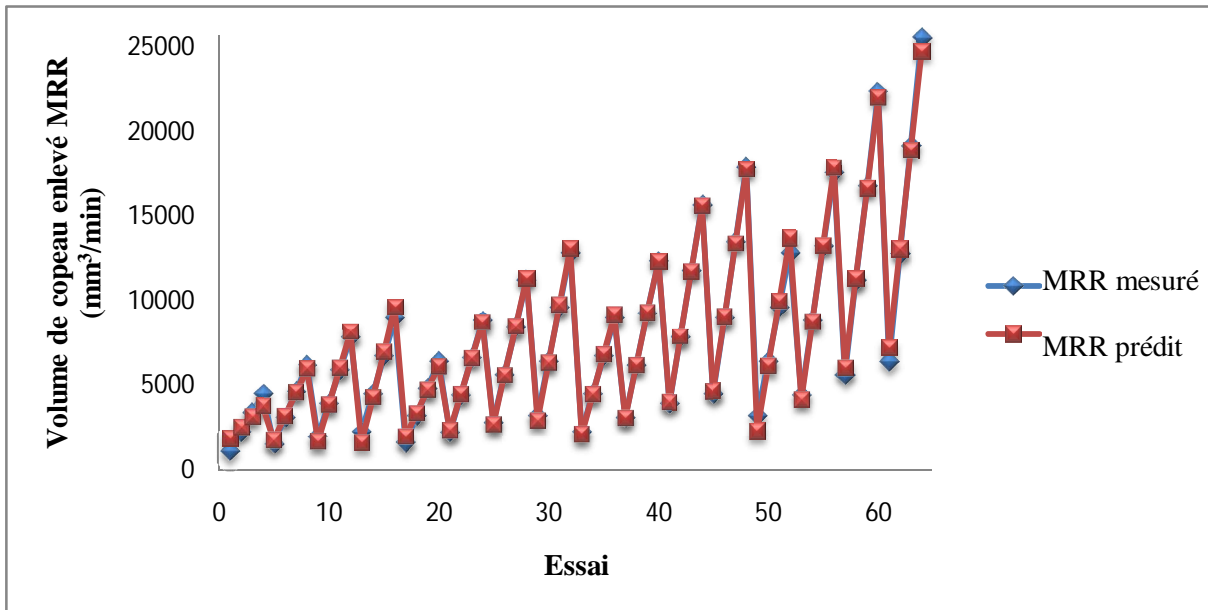


Figure IV.11 : Courbe des valeurs du volume de copeau enlevé (MRR) expérimentales et estimés.

IV.3.3.5 Graphique des effets principaux pour MRR

La figure (IV.12) illustre les effets principaux des paramètres de coupe sur le volume de copeau enlevé (MRR). On remarque que (MRR) augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est la plus grande. L'augmentation de l'avance entraîne une légère augmentation du (MRR) par apport aux (ap et V_c).

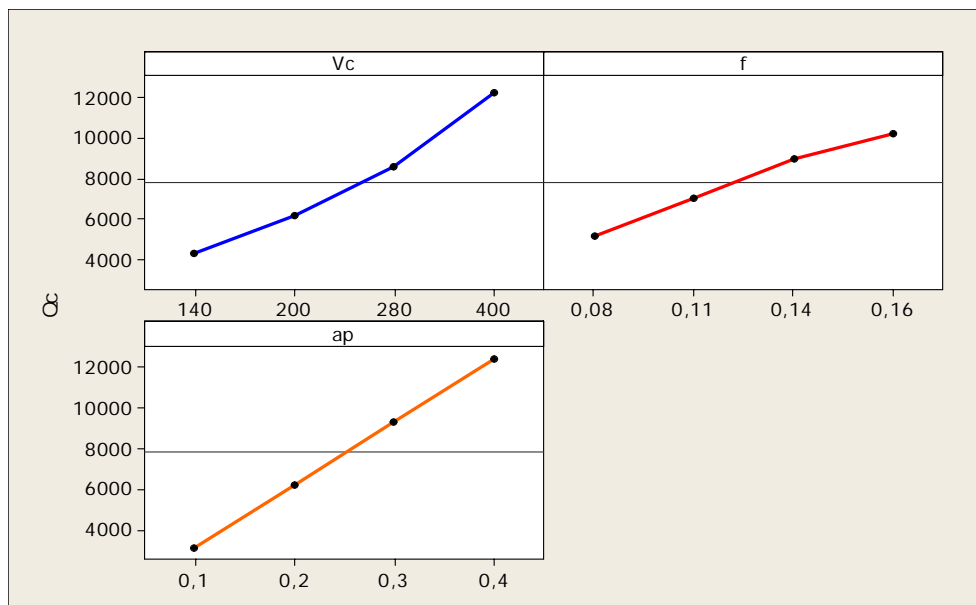


Figure IV.12 : Graphique des effets principaux pour MRR .

IV.3.3.6 Evolution du MRR en fonction des paramètres du régime de coupe

La **figure (IV.13)** illustre la surface de réponse du volume de copeau enlevé (MRR) en fonction de (V_c, f, ap) et les graphes de contour. On remarque que l'influence de (ap) est plus importante suivie par (V_c et f), et ce à partir de la pente de la variation de (MRR) suivant les axes (ap, V_c et f). Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (MRR) et les conditions d'exploitation souhaitables.

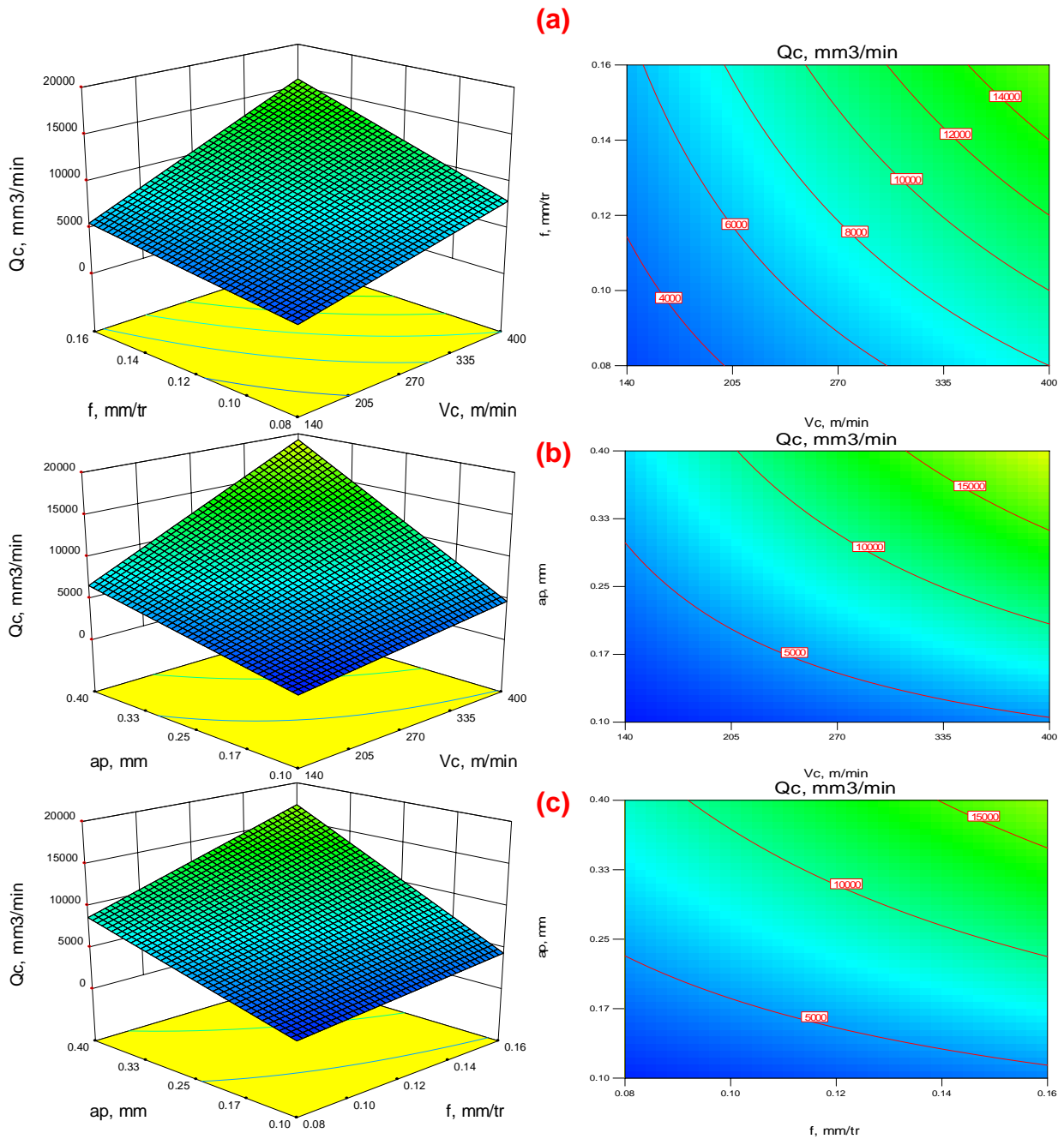


Figure IV.13: Diagramme de surface 3D pour MRR en fonction de V_c, f, ap et graphe de contour. **a)** En fonction de V_c et f ; **b)** En fonction de V_c et ap ; **c)** En fonction de f et ap .

IV.3.4 Optimisation des réponses par la fonction de désirabilité

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la planification (RSM) a été étudié à quatre niveaux différents. Le choix des quatre niveaux pour chaque variable est exigé par cette planification afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (RSM) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation des réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface (Ra) et le volume de copeau enlevé (MRR) souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la fonction de désirabilité pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (Ra) et de maximiser le volume de copeau enlevé (MRR).

Pour résoudre ce type de problème de planification des paramètres, une fonction objective, $F(x)$, est définie comme suit [76]:

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (\text{IV.21})$$

$$F(x) = -DF$$

Où d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et w_i est la fonction de pondération de d_i . Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité d_i est définie dans différentes formes. Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de T_i , la désirabilité d_i est :

$$\begin{aligned}
 di &= 0 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i \\
 di &= \left[\frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \\
 di &= \left[\frac{Y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \\
 di &= 0 \quad \text{Si } Y_i \geq \text{Sup}_i
 \end{aligned} \tag{IV.22}$$

Pour un objectif de trouver un maximum, la désirabilité est montrée comme suite :

$$\begin{aligned}
 di &= 0 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i \\
 di &= \left[\frac{Y_i - \text{Inf}_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \\
 di &= 1 \quad \text{Si } Y_i \geq \text{Sup}_i
 \end{aligned} \tag{IV.23}$$

Pour un objectif de rechercher un minimum la désirabilité peut être définies par les formules suivantes :

$$\begin{aligned}
 di &= 1 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i \\
 di &= \left[\frac{\text{Sup}_i - Y_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \\
 di &= 0 \quad \text{Si } Y_i \geq \text{Sup}_i
 \end{aligned} \tag{IV.24}$$

Donc, l'objectif de notre étude est de choisir un réglage optimal qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF , C'est-à-dire minimisé $F(x)$.

IV.3.4.1 Optimisation des conditions de coupe

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait les objectifs suivants :

- Bon état de surface (Ra mini)
- Volume de copeau enlevé maximal (MRR max)

Les objectifs et les plages des paramètres de coupe définis pour le processus d'optimisation sont résumés dans le **Tableau 5**. La **Figure 14** et le **Tableau 6** montrent les résultats d'optimisation. Les paramètres de coupe optimaux sont : vitesse de coupe (Vc) de 400 m/min, une vitesse d'avance (f) de 0.08 mm/tr, une profondeur de coupe (ap) de 0.4 mm.

La rugosité de surface et le volume de copeau enlevé obtenus par l'utilisation du régime de coupe optimal sélectionné par la fonction de désirabilité sont: $Ra = 1.06 \mu\text{m}$, $MRR = 13720 \text{ mm}^3/\text{min}$, avec une désirabilité composite = 0.98.

Tableau IV.5: Conditions d'optimisation

Conditions	Objectifs	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe, V_c (m/min)	Gamme	140	400
Vitesse d'avance, f (mm/tr)	Gamme	0.08	0.16
Profondeur de passe, ap (mm)	Gamme	0.1	0.4
Rugosité de surface, Ra (μm)	Mini	0.58	1.79
Volume de copeau enlevé MRR , (mm^3/min)	Maxi	1120	25600

Tableau IV.6 : Optimisation simultanée pour la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé en utilisant la fonction de désirabilité.

Conditions de coupe optimale			Rugosité de surface	Volume de copeau enlevé
V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	MRR (mm^3/min)
400	0.08	0.4	1.06	13720
Désirabilité			0.99	0.97
désirabilité composite = 0.98				

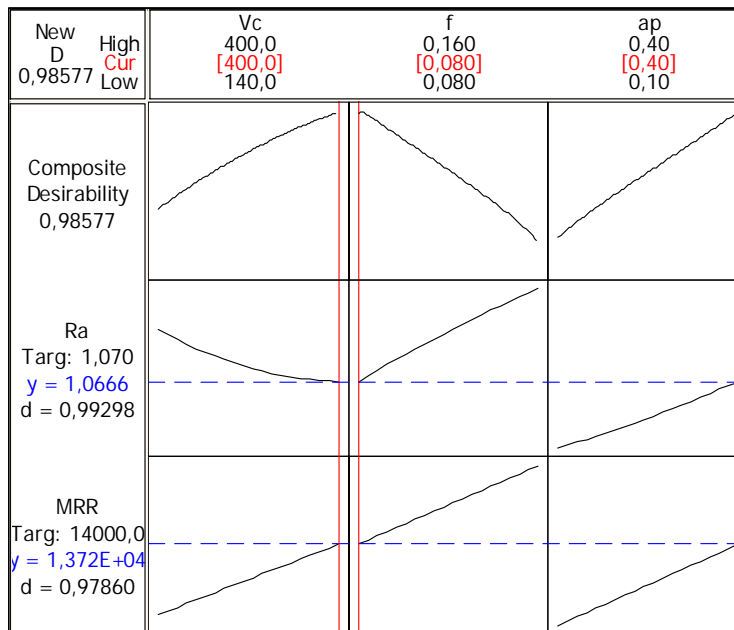


Figure IV.14 : Optimisation simultanée pour la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé en utilisant la fonction de désirabilité.

IV.3.5 Réseaux de neurones artificiels (ANN)

Les vingt dernières années ont vu naître des applications basées sur une technologie appelée “réseaux de neurones artificiels”. Ces applications couvrent de nombreux domaines tels que la reconnaissance de caractères, l’optimisation de tâches répétitives ou encore les prédictions financières. Le terme de “réseaux de neurones artificiels” décrit des familles d’algorithmes qui étaient à l’origine inspirés des réseaux de neurones humains, mais qui se sont ensuite éloignées des modèles du cerveau et rapprochées des méthodes statistiques.

Un réseau de neurones (*fig. IV.15*) est un outil d’analyse statistique permettant de construire un modèle de comportement à partir de données qui sont des exemples de ce comportement. Un réseau de neurones est constitué d’un graphe pondéré orienté dont les nœuds symbolisent les neurones. Ces neurones possèdent une fonction d’activation qui permet d’influencer les autres neurones du réseau. Les connexions entre les neurones, que l’on nomme liens synaptiques, propagent l’activité des neurones avec une pondération caractéristique de la connexion. On appelle poids synaptique la pondération des liens synaptiques. Les neurones peuvent être organisés de différentes manières, c’est ce qui définit l’architecture et le modèle du réseau. L’architecture la plus courante est celle dite du perceptron multicouche. Avant de pouvoir utiliser les capacités de classification d’un réseau de neurones, il faut le construire. Ceci se déroule en quatre temps:

1. La construction de la structure du réseau (généralement empirique).
2. La constitution d’une base de données de vecteurs représentant au mieux le domaine à modéliser. Celle-ci est scindée en deux parties : une partie servant à l’apprentissage du réseau (on parle de base d’apprentissage) et une autre partie aux tests de cet apprentissage (on parle de base de test).
3. Le paramétrage du réseau par apprentissage. Au cours de l’apprentissage, les vecteurs de données de la base d’apprentissage sont présentés séquentiellement et plusieurs fois au réseau. Un algorithme d’apprentissage ajuste le poids du réseau afin que les vecteurs soient correctement appris. L’apprentissage se termine lorsque l’algorithme atteint un état stable.
4. La phase de reconnaissance qui consiste à présenter au réseau chacun des vecteurs de la base de test. La sortie correspondante est calculée en propageant les vecteurs à travers le réseau. La réponse du réseau est lue directement sur les unités de sortie et comparée à la réponse attendue. Une fois que le réseau présente des performances acceptables, il peut être utilisé pour répondre au besoin qui a été à l’origine de sa construction.

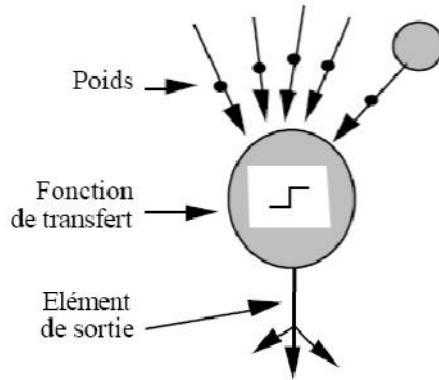


Figure IV.15 : Réseau de neurones artificiels

IV.3.5.1 Calcul de la valeur prédite

Le calcul de la valeur prédite par un réseau de neurones se compose de quelques étapes simples. Premièrement, on calcule une série de combinaisons linéaires des variables explicatives :

$$v_i = \alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j \quad (\text{IV.25})$$

Où x_j est la $j^{\text{ème}}$ de n variables explicatives et $\alpha_{i,0}$ et $\alpha_{i,j}$ sont les coefficients de la $i^{\text{ème}}$ combinaison linéaire. Le résultat de la combinaison linéaire, v_i , représente une projection dans une direction de l'espace des variables explicatives. Chacune de ces projections combine de l'information provenant potentiellement de plusieurs variables.

La seconde étape consiste à appliquer une transformation non-linéaire à chacune des combinaisons linéaires afin d'obtenir les valeurs de ce que l'on appelle les unités cachées ou neurones qui forment ensemble la couche cachée. Typiquement, on utilise la tangente hyperbolique pour effectuer la transformation non-linéaire :

$$h_i = \tanh(v_i) = \frac{e^{v_i} - e^{-v_i}}{e^{v_i} + e^{-v_i}} \quad (\text{IV.26})$$

Où h_i est la $i^{\text{ème}}$ unité cachée. L'utilisation d'une telle fonction de transfert avec une expansion infinie dans ses termes joue un rôle fondamental dans la capacité d'un réseau de neurones de capter les dépendances de haut niveau entre les variables explicatives.

Finalement, les unités cachées sont recombinaisonnées linéairement afin de calculer la valeur prédite par le réseau de neurones :

$$\vec{p}(x) = \beta_0 \sum_{i=1}^{n_h} \beta_i h_i \quad (\text{IV.27})$$

où $\vec{p}(x)$ est la valeur prédite par le réseau de neurones, n_h est le nombre d'unités cachées du réseau et β_0 et β_i sont les coefficients de la combinaison linéaire. Les n variables explicatives sont représentées sous forme vectorielle par \vec{x} . On peut résumer les étapes du calcul en une seule équation :

$$p(\vec{x}) = \beta_0 \sum_{i=1}^{n_h} \beta_i \tanh \left(\alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j \right) \quad (\text{IV.28})$$

Donc, la visualisation de la structure d'un réseau de neurones est illustrée dans la Figure IV.16.

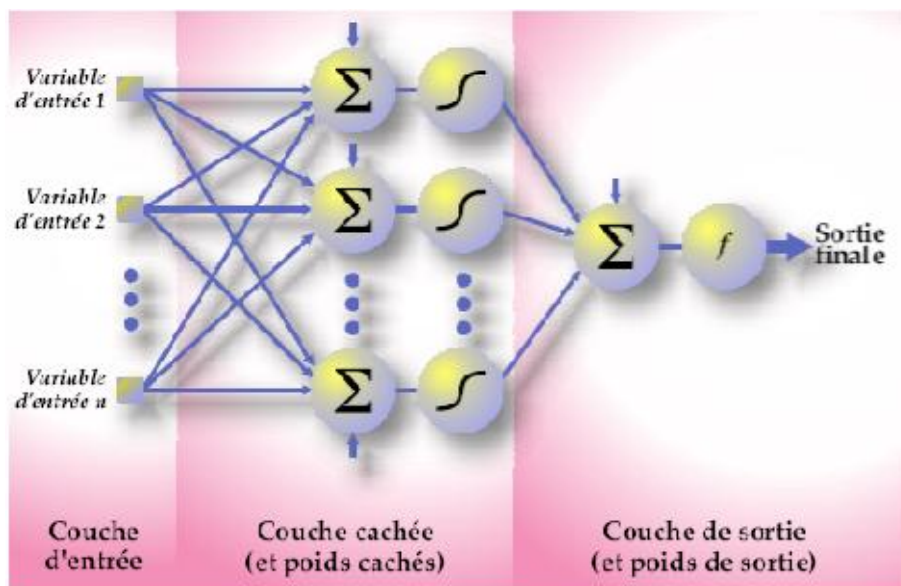


Figure IV.16 : Topologie d'un réseau de neurones

IV.3.5.2 Les neurones formels

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie" [80].

Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de logiciel. On a pris l'habitude de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la *figure IV.17*.

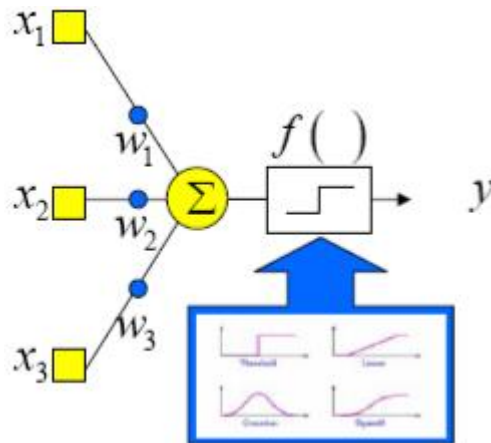


Figure IV.17 : Représentation d'un neurone formel [80].

IV.3.5.3 Différentes fonctions de transfert

Les différents types de neurones se distinguent donc par la nature f de leur fonction de transfert (Figure IV.18). Les principaux types sont :

- seuil $f(x) = 1_{[0, +\infty[}(x)$,
- linéaire f est la fonction identité,
- sigmoïde $f(x) = 1 / (1 + e^x)$,
- tangente hyperbolique (sigmoïde) $f(x) = (2 / (1 + e^{-2x})) - 1$,
- stochastiques $f(x) = 1$ avec la probabilité $1 / (1 + e^{-x/H})$, 0 sinon (H intervient comme une température dans un algorithme de recuit simulé),

Les modèles linéaires et sigmoïdaux sont bien adaptés aux algorithmes d'apprentissage impliquant une rétro-propagation du gradient car leur fonction d'activation est différentiable ; ce sont les plus utilisés [81].

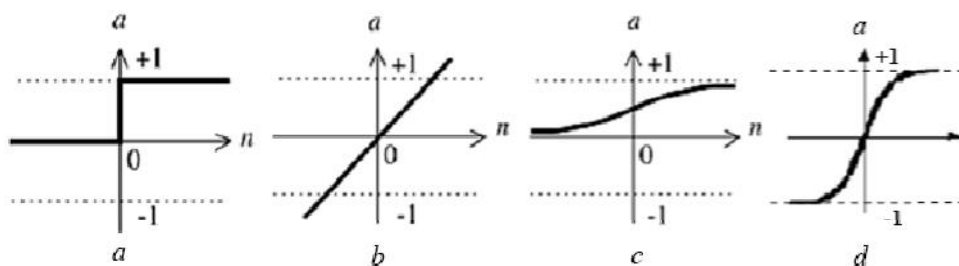


Figure IV.18 : Différentes fonction de transfert de réseau de neurones [81].

IV.3.5.4 Perceptron simple

Le perceptron simple est le réseau le plus simple qui existe puisqu'il se compose d'un seul neurone. On peut, par exemple, utiliser un tel réseau pour une tâche de classification d'un seul caractère. Pour classifier les 26 caractères de l'alphabet, on devrait alors combiner 26

perceptrons simples. Parce que nous considérons un seul neurone à la fois, nous n'utiliserons pas d'index pour le neurone de sortie [82].

IV.3.5.5 Perceptron multicouches

Les perceptrons multicouches sont organisés en couche de neurones. Les couches situées entre les nœuds d'entrée et les nœuds de sortie sont appelées « couches cachées ». Les perceptrons multicouches sont plus flexibles que les perceptrons simples et peuvent résoudre des problèmes qui ne sont pas linéairement séparables. La règle d'apprentissage la plus importante pour ces réseaux est l'algorithme de rétro-propagation [82].

IV.3.5.6 Algorithme de rétro-propagation

L'algorithme de rétro-propagation est une descente de gradient appliquée à des perceptrons multicouches. Le but reste donc le même : minimiser la fonction d'erreur [82].

IV.3.5.7 Apprentissage

Une fois que les poids et les biais du réseau sont aléatoirement initialisés, le réseau est prêt pour l'apprentissage. Ce processus exige un ensemble de données approprié au réseau qui sont les entrées P et les cibles C de sorties. Pendant l'apprentissage les poids et les biais du réseau sont itérativement ajustés pour minimiser la fonction de performance (*Figure IV.19*). En général, la fonction de performance utilisée dans l'apprentissage des modèles à réseau de neurone est la moyenne des carrés des erreurs entre les valeurs cibles et les valeurs obtenues par le réseau.

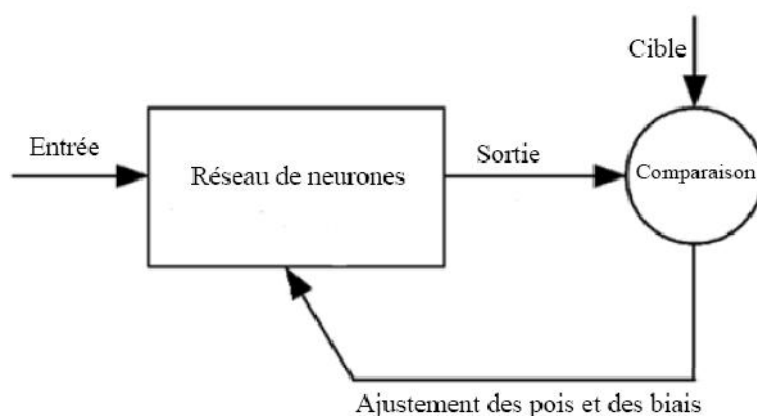


Figure IV.19 : Processus d'apprentissage du réseau de neurones

IV.3.5.8 Modélisation de la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé par ANN

IV.3.5.8.1 Modélisation de la rugosité de surface (Ra)

A fin de modéliser la rugosité de surface nous avons employé un perceptron multicouche MLP. Les données expérimentales présentées dans le *tableau IV.7* ont été utilisées pour établir le modèle. Le plan expérimental se compose de 64 essais, dont 42 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 22 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones a été fait par l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant. Plusieurs structures de réseau ont été testées, nous nous limitons à présenter seulement la structure qui a donnée de meilleurs résultats qui est 3-7-1 (*Figure IV.20*). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds (au nombre de paramètres), une couche cachée à 7 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul JMP 10 a été utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau.

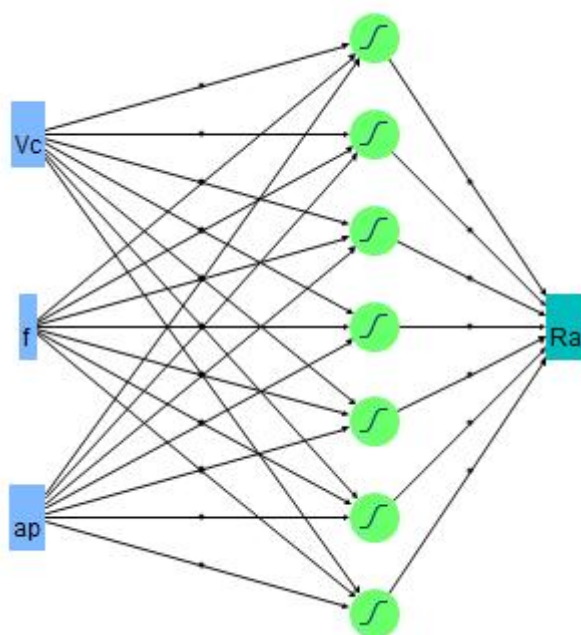


Figure IV.20 : Structure du réseau de neurone du modèle de la rugosité de surface.

**Tableau IV.7 : Résultats expérimentaux et prédites du modèle
ANN de la rugosité de surface**

N° d'essai	Valeurs réelles			Réponses	
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (exp) (μm)	Ra (pré) (μm)
1	140	0.08	0.1	0.95	0.96
2	140	0.08	0.2	1.09	1.11
3	140	0.08	0.3	1.16	1.19
4	140	0.08	0.4	1.25	1.23
5	140	0.11	0.1	1.26	1.23
6	140	0.11	0.2	1.23	1.24
7	140	0.11	0.3	1.29	1.28
8	140	0.11	0.4	1.36	1.37
9	140	0.14	0.1	1.38	1.39
10	140	0.14	0.2	1.38	1.41
11	140	0.14	0.3	1.45	1.47
12	140	0.14	0.4	1.58	1.55
13	140	0.16	0.1	1.40	1.40
14	140	0.16	0.2	1.46	1.48
15	140	0.16	0.3	1.58	1.58
16	140	0.16	0.4	1.79	1.70
17	200	0.08	0.1	0.89	0.88
18	200	0.08	0.2	1.08	1.05
19	200	0.08	0.3	1.1	1.13
20	200	0.08	0.4	1.16	1.16
21	200	0.11	0.1	1.17	1.19
22	200	0.11	0.2	1.14	1.20
23	200	0.11	0.3	1.26	1.24
24	200	0.11	0.4	1.32	1.32
25	200	0.14	0.1	1.19	1.20
26	200	0.14	0.2	1.28	1.23
27	200	0.14	0.3	1.31	1.31
28	200	0.14	0.4	1.35	1.43
29	200	0.16	0.1	1.39	1.35
30	200	0.16	0.2	1.33	1.37
31	200	0.16	0.3	1.42	1.41
32	200	0.16	0.4	1.59	1.48
33	280	0.08	0.1	0.77	0.78
34	280	0.08	0.2	0.99	0.98
35	280	0.08	0.3	1.07	1.06
36	280	0.08	0.4	1.09	1.08
37	280	0.11	0.1	1.12	1.12
38	280	0.11	0.2	1.17	1.16
39	280	0.11	0.3	1.21	1.22
40	280	0.11	0.4	1.27	1.28
41	280	0.14	0.1	1.16	1.23
42	280	0.14	0.2	1.21	1.21

43	280	0.14	0.3	1.17	1.24
44	280	0.14	0.4	1.35	1.32
45	280	0.16	0.1	1.36	1.41
46	280	0.16	0.2	1.41	1.42
47	280	0.16	0.3	1.45	1.47
48	280	0.16	0.4	1.57	1.54
49	400	0.08	0.1	0.58	0.61
50	400	0.08	0.2	0.86	0.86
51	400	0.08	0.3	1.04	1.00
52	400	0.08	0.4	1.07	1.07
53	400	0.11	0.1	1.11	1.10
54	400	0.11	0.2	1.16	1.16
55	400	0.11	0.3	1.19	1.18
56	400	0.11	0.4	1.20	1.20
57	400	0.14	0.1	1.15	1.18
58	400	0.14	0.2	1.21	1.19
59	400	0.14	0.3	1.17	1.24
60	400	0.14	0.4	1.36	1.34
61	400	0.16	0.1	1.29	1.27
62	400	0.16	0.2	1.31	1.28
63	400	0.16	0.3	1.35	1.34
64	400	0.16	0.4	1.39	1.43

D'après les résultats présentés dans le *tableau IV.7* on peut constater d'une première vue que les valeurs prédites sont très proches des valeurs expérimentales. Une profonde comparaison entre les valeurs obtenues par le modèle neuronal et celles obtenues expérimentalement a été réalisée en utilisant les méthodes statistiques, dont les résultats sont montrés dans le *tableau IV.8*. Ce dernier indique pour le groupe d'apprentissage et celui de validation que les coefficients de détermination R^2 sont respectivement (0.98 et 0.95), les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (0.0192 et 0.0509) et les écarts absolus moyens sont respectivement (0.015 et 0.041). Ces résultats prouvent que le modèle neuronal explique très bien la variation de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe.

Tableau IV.8 : Valeurs statistique du modèle (ANN) de la rugosité de surface

Apprentissage		Validation	
Ra	Mesures	Ra	Mesures
R carré	0,988229	R carré	0,9526886
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0192837	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0509371
Écart absolu moyen	0,0153093	Écart absolu moyen	0,0414932
-Log-vraisemblance	-106,2413	-Log-vraisemblance	-34,28095
Somme des carrés des écarts (SSE)	0,0156182	Somme des carrés des écarts (SSE)	0,057081
Somme fréquences	42	Somme fréquences	22

Les tracés des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites des ensembles de validation et d'apprentissage sont illustrés dans la **figure IV.21**. Ces tracés indiquent que la majorité des résidus avoisinent la ligne du zéro.

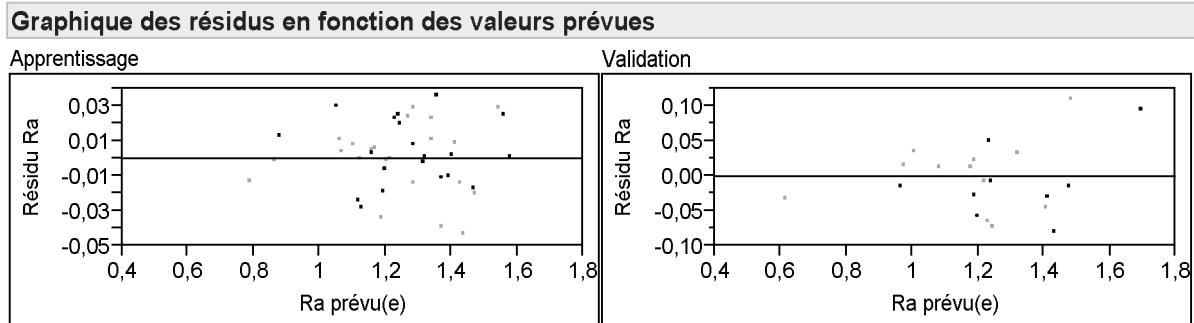


Figure VI.21 : Valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour l'apprentissage et pour la validation pour (Ra)

Les valeurs des poids et des biais du modèle neuronale de la rugosité de surface (Ra) sont les suivant :

Pour la couche cachée :

$$H1 = \tanh(.5 \times (-0.00287968326371664 \times Vc + 44.635339762458 \times f + 7.06693570661442 \times ap + -4.76405158425161));$$

$$H2 = \tanh(.5 \times (0.0629039217383524 \times Vc + 195.814839832019 \times f + -6.07250900225256 \times ap + -38.6254907362389));$$

$$H3 = \tanh(.5 \times (0.00455605400453371 \times Vc + -26.33336202359 \times f + 2.8353298014159 \times ap + 0.970620284090553));$$

$$H4 = \tanh(.5 \times (-0.00596143687825906 \times Vc + 46.50172810078 \times f + -5.61082544317919 \times ap + -2.06260758911643));$$

$$H5 = \tanh(.5 \times (-0.0018190052082216 \times Vc + 11.7724099328489 \times f + 0.93117778840906 \times ap + -2.89280619858991));$$

$$H6 = \tanh(.5 \times (-0.00263632864250459 \times Vc + 42.5815229036487 \times f + 4.50198667987158 \times ap + -2.42121181458249));$$

$$H7 = \tanh(.5 \times (0.0320303539134197 \times Vc + 56.0635153218624 \times f + -2.76454808837762 \times ap + -15.2884423203908));$$

Pour la couche de sortie :

$$\begin{aligned} \text{THETA1} = & -0.583356512813062 \times H1 + -0.14067773083123 \times H2 + -0.412443870517771 \times H3 \\ & + -0.409747918435666 \times H4 + 2.40425527950821 \times H5 + 1.57728721343818 \times H6 + \\ & 0.194448021314823 \times H7 + 1.8986718145855; \end{aligned} \quad \text{(IV.29)}$$

Ou: THETA1=Ra (pré);

IV.3.5.8.2 Modélisation du volume de copeau enlevé (MRR)

La structure du réseau de neurones qui a donnée de meilleurs résultats dans la modélisation de l'effort radial est 3-7-1. Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds (au nombre de paramètres), une couche cachée à 7 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Pareillement au cas précédent, 42 essais ont été utilisés pour l'apprentissage du réseau et 22 essais ont été choisis aléatoirement pour valider le modèle.

Tableau IV.9 : Résultats expérimentaux et prédites du modèle ANN
du volume de copeau enlevé

N° d'essai	Valeurs réelles			Réponses	
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	MRR (exp) (mm ³ /min)	MRR (pré) (mm ³ /min)
1	140	0.08	0.1	1120	1155.23
2	140	0.08	0.2	2240	2215.88
3	140	0.08	0.3	3360	3250.48
4	140	0.08	0.4	4480	4584.61
5	140	0.11	0.1	1540	1191.14
6	140	0.11	0.2	3080	2982.73
7	140	0.11	0.3	4620	4490.66
8	140	0.11	0.4	6160	6148.24
9	140	0.14	0.1	1960	1452.93
10	140	0.14	0.2	3920	3950.28
11	140	0.14	0.3	5880	5810.99
12	140	0.14	0.4	7840	7887.83
13	140	0.16	0.1	2240	1687.80
14	140	0.16	0.2	4480	4564.39
15	140	0.16	0.3	6720	6759.33
16	140	0.16	0.4	8960	9290.53
17	200	0.08	0.1	1600	1662.14
18	200	0.08	0.2	3200	3219.00
19	200	0.08	0.3	4800	4775.45
20	200	0.08	0.4	6400	6618.99
21	200	0.11	0.1	2200	2230.14
22	200	0.11	0.2	4400	4532.42
23	200	0.11	0.3	6600	6563.59
24	200	0.11	0.4	8800	8920.59

25	200	0.14	0.1	2800	2890.96
26	200	0.14	0.2	5600	5816.48
27	200	0.14	0.3	8400	8317.63
28	200	0.14	0.4	11200	11338.32
29	200	0.16	0.1	3200	3095.64
30	200	0.16	0.2	6400	6419.31
31	200	0.16	0.3	9600	9460.41
32	200	0.16	0.4	12800	12801.02
33	280	0.08	0.1	2240	2194.49
34	280	0.08	0.2	4480	4551.62
35	280	0.08	0.3	6720	6685.57
36	280	0.08	0.4	8960	9051.42
37	280	0.11	0.1	3080	3027.36
38	280	0.11	0.2	6160	6235.77
39	280	0.11	0.3	9240	9119.19
40	280	0.11	0.4	12320	12387.84
41	280	0.14	0.1	3920	3902.69
42	280	0.14	0.2	7840	7886.79
43	280	0.14	0.3	11760	11750.04
44	280	0.14	0.4	15680	15637.36
45	280	0.16	0.1	4480	4297.73
46	280	0.16	0.2	8960	8930.50
47	280	0.16	0.3	13440	13393.12
48	280	0.16	0.4	17920	18062.79
49	400	0.08	0.1	3200	3232.02
50	400	0.08	0.2	6400	6505.82
51	400	0.08	0.3	9600	9582.96
52	400	0.08	0.4	12800	13107.80
53	400	0.11	0.1	4400	4433.32
54	400	0.11	0.2	8800	8884.41
55	400	0.11	0.3	13200	13071.73
56	400	0.11	0.4	17600	17129.22
57	400	0.14	0.1	5600	5606.72
58	400	0.14	0.2	11200	11312.50
59	400	0.14	0.3	16800	16406.55
60	400	0.14	0.4	22400	22444.70
61	400	0.16	0.1	6400	6470.53
62	400	0.16	0.2	12800	12717.65
63	400	0.16	0.3	19200	19263.69
64	400	0.16	0.4	25600	25520.12

Le *tableau IV.9* montre que les valeurs prédites par le modèle neuronal avoisinent les valeurs expérimentales. Les résultats statistiques présentés dans le *tableau IV.10* le confirme aussi, car il a été trouvé pour le groupe d'apprentissage et celui de validation que les coefficients de détermination R^2 sont respectivement (0.99 et 0.99), les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (70.34 et 261.34) et les écarts absolus moyens sont respectivement (60.40 et 206.027). D'après ces résultats on peut conclure que le modèle

neuronal explique très bien la variation du volume de copeau enlevé en fonction des paramètres de coupe.

Tableau IV.10 : Valeurs statistique du modèle (ANN) du volume de copeau enlevé

Apprentissage		Validation	
Qc	Mesures	Qc	Mesures
R carré	0,999831	R carré	0,9973228
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	70,343763	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	261,34337
Écart absolu moyen	60,401403	Écart absolu moyen	206,02737
-Log-vraisemblance	238,23797	-Log-vraisemblance	153,66502
Somme des carrés des écarts (SSE)	207826,29	Somme des carrés des écarts (SSE)	1502607,8
Somme fréquences	42	Somme fréquences	22

Les résidus des valeurs prédites du modèle neuronal de l'ensemble de validation et celui d'apprentissage sont tracés dans la *figure IV.22*. Il est bien clair que la totalité des résidus se trouvent sur ou très proches de la ligne du zéro.

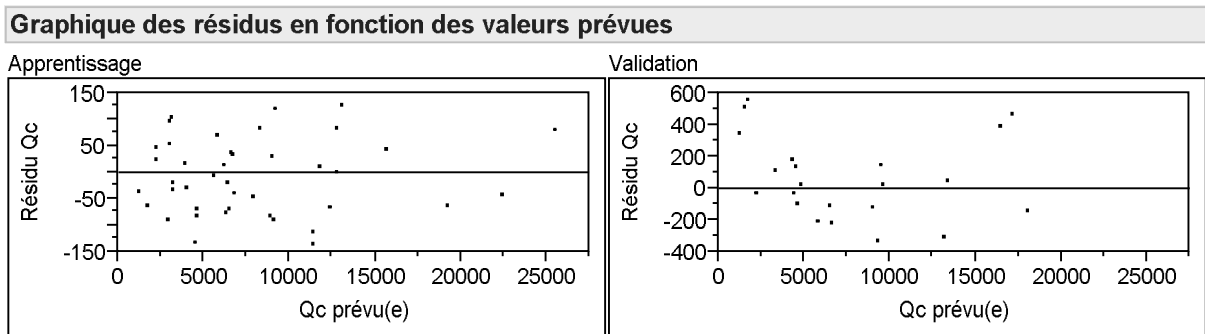


Figure VI.22 : Valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour l'apprentissage et pour la validation pour (MRR)

Les valeurs des poids et des biais du modèle neuronale du volume de copeau enlevé (MRR) sont les suivant :

Pour la couche cachée :

$$H1 = \tanh(.5 \times (0.021236298909654 \times Vc + 64.3087202067197 \times f + 19.6425278996812 \times ap + -25.217600188554));$$

$$H2 = \tanh(.5 \times (0.0158153182616517 \times Vc + 47.0702329350959 \times f + 14.4816540535785 \times ap + -15.5848823199202));$$

$$H3 = \tanh(.5 \times (-0.004473502797829 \times Vc + -16.6032561109482 \times f + 9.63477075825576 \times ap + 3.46258164941591));$$

$$H4 = \tanh(.5 \times (-0.009904306517616 \times Vc + -1.34729026265233 \times f + -5.0251683453920 \times ap + 3.32199635361355));$$

$$H5 = \tanh(.5 \times (-0.0057325074959534 \times Vc + -26.33548022682 \times f + -5.14566187916673 \times ap + 5.3127515886606));$$

$$H6 = \tanh(.5 \times (-0.0221457925267528 \times Vc + 27.5824383357989 \times f + 0.565074388740602 \times ap + -0.711924419495375));$$

$$H7 = \tanh(.5 \times (0.0169039766097519 \times Vc + -11.7956368373451 \times f + 6.66875595645358 \times ap + -4.77677124782293));$$

Pour la couche de sortie :

$$\begin{aligned} \text{THETA2} = & 5340.83193513128 \times H1 + 2706.19412132018 \times H2 + 6676.24963892898 \times H3 + \\ & 3400.94673809648 \times H4 + -6332.80276132538 \times H5 + -2496.12236901933 \times H6 + \\ & 2139.13812881133 \times H7 + 6505.2975809971; \end{aligned} \quad \text{(IV.30)}$$

$$\text{THETA2} = \text{MRR (pré)};$$

IV.3.5.9 Comparaison entre les modèles ANN et RMS

Le *tableau IV.11* expose les coefficients de détermination des deux méthodes utilisées pour la modélisation de (*Ra* et *MRR*) qui sont la méthode de la surface de réponse et les réseaux de neurones artificiels. L'analyse des valeurs de ce tableau montre que les R^2 de la méthode (ANN) sont plus grands que la méthode (RSM) ce qui prouve la robustesse et la fiabilité de la méthode (ANN). Pour mieux visionner ça, on a tracé des courbes de comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées par (RSM et ANN) (*figures IV.23* et *IV.24*). L'analyse de ces figures nous permet de dire que les valeurs estimées par (ANN) sont complètement confondues avec les résultats expérimentaux, contrairement aux valeurs estimées par (RSM) où il y a des valeurs qui sont éloignées aux valeurs expérimentales.

Tableau IV.11 : Coefficients de corrélation pour (RSM et ANN)

	Coefficient de détermination %	
	RSM	ANN
Rugosité de surface (Ra)	89.08	98.82
volume de copeau enlevé (MRR)	99.61	99.98

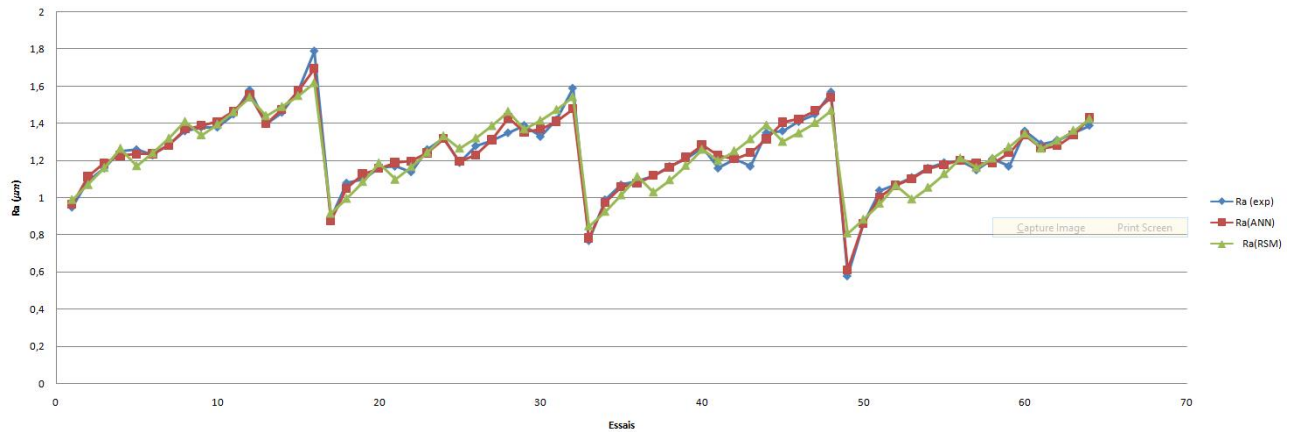


Figure IV.23 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par (RSM et ANN) pour (Ra)

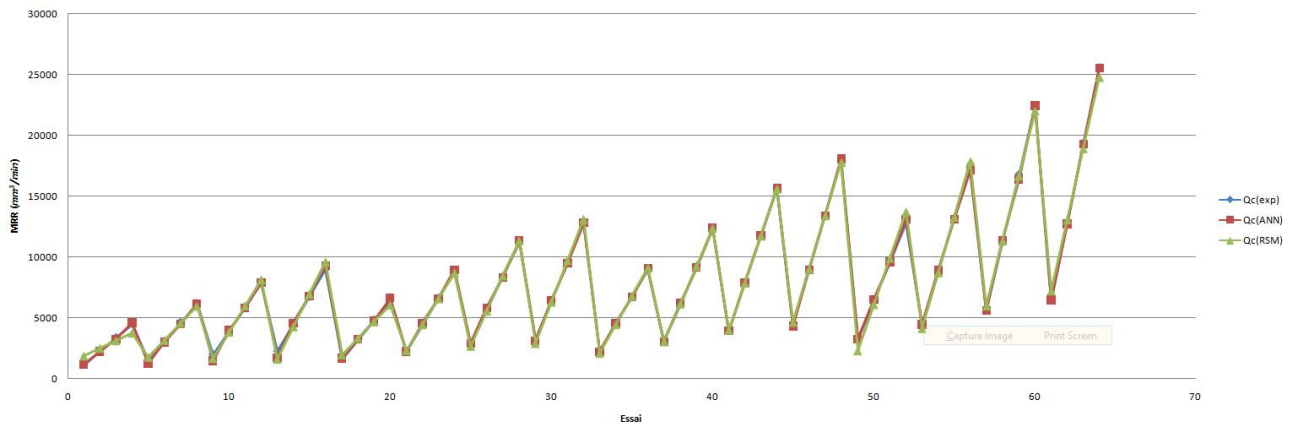


Figure IV.24: Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par (RSM et ANN) pour (MRR)

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de la méthodologie de surface de réponse (MSR) et les (ANN) en tournage de l'acier AISI D3 avec le carbure revêtu (GC4215) a permis d'obtenir à la fois des modèles mathématiques pour la rugosité (Ra), l'effort de coupe tangentiel (Fz), le volume de copeau enlevé (MRR) en fonction des paramètres de coupe. Les valeurs optimales des paramètres d'usinage ont été sélectionnées par la fonction de désirabilité. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- L'analyse de la variance (ANOVA) montre que l'avance est le facteur le plus dominant sur la rugosité de surface et elle représente une contribution de 59.496% suivie de la profondeur de coupe de 16.226% et de la vitesse de coupe avec une contribution de 11.749%.

- L'effort de coupe tangentiel est fortement affecté par la profondeur de coupe et représente une contribution de 62.613%, respectivement.
- L'analyse de la variance (ANOVA) montre que la profondeur de passe (ap) a un grand effet significatif sur le volume de copeau enlevé, sa contribution est de 43.57%, suivi par la vitesse de coupe (V_c) puis par la vitesse d'avance (f) avec une contribution 31.74% et 13.34%,
- Les régressions quadratiques ont un grand intérêt industriel car ils ont été utilisées pour prédire la rugosité de surface, l'effort de coupe tangentiel et le volume de copeau enlevé dans les intervalles du domaine d'étude.
- Les valeurs des coefficients de détermination trouvés sont élevées suggérant une haute signification des modèles et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.
- Les paramètres de coupe optimaux sont : vitesse de coupe (V_c) de 400 m/min, une vitesse d'avance (f) de 0.08 mm/tr, une profondeur de coupe (ap) de 0.4 mm. La rugosité de surface et le volume de copeau enlevé obtenus par l'utilisation du régime de coupe optimal sélectionné par la fonction de désirabilité sont: $Ra = 1.06 \mu\text{m}$, $MRR = 13720 \text{ mm}^3/\text{min}$, avec une désirabilité composite = 0.98.
- L'application de la technique (ANN) sur un plan factoriel complet d'expériences est capable de donner des résultats très satisfaisants. Les modèles obtenus ont été testés par une partie du plan expérimental qui n'a pas été introduite lors de l'apprentissage du réseau.
- La comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimés par les modèles (RSM et ANN) montre clairement que, les modèles issus de la méthode des réseaux de neurones donnent des résultats excellents ($R^2_{(Ra)} = 98.82\%$ et $R^2_{(MRR)} = 99.98\%$) par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse ($R^2_{(Ra)} = 89.08\%$ et $R^2_{(MRR)} = 99.61\%$).
- La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par (RSM et ANN) nous a conduits à conclure que la méthode (ANN) est plus robuste et plus fiable par rapport à la méthodologie de la surface de réponse.

CHAPITRE

V

OPTIMISATION MONO ET MULTI- OBJECTIVE DES PARAMÈTRE D'USINAGE EN UTILISANT LA MÉTHODE DE TAGUCHI ET GRA

Dans ce chapitre, nous appliquons deux types d'optimisation : L'optimisation mono-objective, en se basant sur l'approche de Taguchi basée sur l'analyse du rapport signal/bruit (S/N) des paramètres technologiques (R_a , F_z , K_s , P_c , MRR , V_a et V_t) et l'optimisation multi-objective en utilisant la méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA) afin d'optimiser simultanément la qualité de surface (R_a) et la productivité (MRR).

V.1 Introduction

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif des chercheurs en général est de chercher les conditions optimales d'usinage, qui permettent d'atteindre deux types d'objectifs, soit économiques soit technologiques soit les deux à la fois. Ce chapitre est consacré à présenter la démarche de l'application de deux méthode d'optimisation « mono et multi-objective » sur un plan d'expérience réduit et mixte de Taguchi L_{18} pour le couple d'usinage (Acier AISI D3/ céramique mixte CC650) afin de déterminer le régime optimal. Les paramètres de coupe pris en compte lors de cette étude sont les suivants: (χr , r , V_c , f et ap) car les paramètres technologiques étudiés sont : (R_a , F_z , K_s , P_c , MRR , V_a et V_t). L'optimisation mono-objective a été effectuée en se basant sur l'approche de Taguchi et l'analyse du rapport signal/bruit (S/N). Par contre l'optimisation multi-objective a été réalisée par la méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA).

V.2 Description de la méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi est une technique utile qui a une grande contribution dans l'amélioration des performances des systèmes et de résoudre les problèmes d'optimisation complexes (paramètres) pendant la production du produit, par la mise en œuvre de la planification des expériences, qui sont basées sur l'utilisation des tableaux orthogonaux proposés par Taguchi. Le but est de minimiser le nombre d'essais et de se concentrer seulement sur les expériences essentielles pour l'analyse, ce qui conduit à gagner du temps et réduire les coûts [83]. De plus, cette méthode permet de contrôler simultanément les facteurs contrôlables et incontrôlables en convertissant les réponses en rapport signal/bruit (S/N) pour identifier les performances du système [84]. Le rapport S/N est le critère essentiel dans la méthode de Taguchi, il permet de définir le degré d'influence du bruit indésirable sur le signal voulu [85]. **Taguchi [83]** recommande l'utilisation des plans orthogonaux pour attribuer les facteurs choisis pour l'expérience. Le plus couramment utilisé sont des types de L_8 (c.-à-d., huit essais expérimentaux), L_{16} et L_{18} . La puissance de la méthode Taguchi, c'est qu'il intègre des méthodes statistiques dans le processus d'ingénierie. **Bendell et al. [86]** et **Rowlands et al. [87]** ont rapporté la réussite de l'application de la méthode de Taguchi dans l'automobile, les plastiques, les semi-conducteurs, de la transformation des métaux, et de la fonderie industrielle.

Les rapports S/N sont généralement divisés en trois catégories données par les équations suivantes [88] :

$$\text{Nominale est le meilleur: } S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{S_y} \right) \quad (\text{V.1})$$

$$\text{Plus grand est-le meilleur (maximiser): } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right) \quad (\text{V.2})$$

$$\text{Plus petit est-le meilleur (minimiser): } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (\text{V.3})$$

Où \bar{y} est la moyenne des données observées, S_y^2 est la variance de y , n est le nombre d'observations et y_i est les données observées.

Pour atteindre la qualité des produits souhaitable, Taguchi suggère un processus en trois étapes (**Figure V.1**) : la planification du système, la planification des paramètres, et la planification de tolérance.

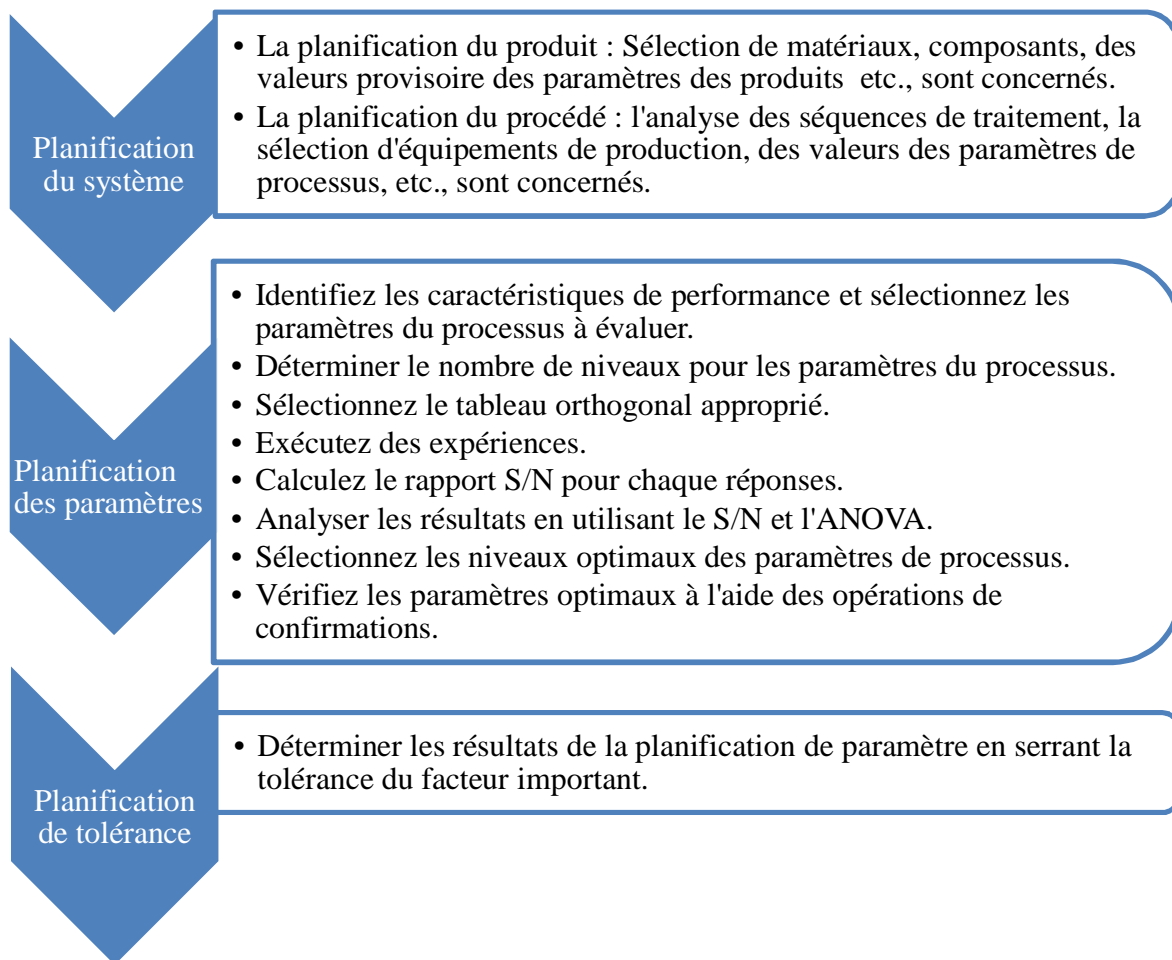


Figure V.1 : Procédure de la planification de Taguchi.

V.3 Description de l'analyse relationnelle grise (GRA)

L'analyse relationnelle grise est une technique proposée pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant le multi-objectif en un objectif unique dans le but d'atteindre une combinaison optimale de niveaux de paramètres pour l'amélioration simultanée de multiples caractéristiques d'usinage [89]. L'utilisation de cette méthode contient les étapes suivantes:

➤ **Étape 1: Génération relationnelle grise**

Selon l'objective de l'optimisation prévue pour minimiser ou maximiser les résultats expérimentaux, la normalisation du rapport S/N pour les résultats expérimentaux dans la gamme entre zéro et un est nécessaire pour la génération relationnelle grise. En fonction de la fonction objective de l'optimisation, la normalisation peut être effectuée pour deux cas. Si la plus petite-la-meilleure est la caractéristique sélectionnée dans la séquence d'origine pour la minimisation, elle devrait être normalisée par l'équation (V.4).

$$x_i^*(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{V.4})$$

Si le plus grand-le-meilleur est la caractéristique sélectionnée dans la séquence d'origine pour la maximisation, elle devrait être normalisée par l'équation (V.5).

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{V.5})$$

Ou $x_i^*(k)$ est la valeur après la génération relationnelle grise (valeur normalisée), et $\max(x_i^0(k))$ et $\min(x_i^0(k))$ sont les valeurs les plus grandes et les plus petites de $(x_i^0(k))$ pour la réponse k^{th} . La plus grande valeur des résultats normalisés indique la meilleure caractéristique de performance et les meilleurs résultats normalisés seront égaux à un.

➤ **Étape 2: Coefficient Relationnel Gris (GRC)**

Le coefficient relationnel gris décrit la corrélation entre les résultats expérimentaux idéaux et obtenus. La formule mathématique du coefficient relationnel gris ($\xi_i(k)$) est donnée comme suit:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi\Delta_{\max}} \quad (\text{V.6})$$

$$0 < \xi_i(k) \leq 1$$

$\Delta_{0i}(k)$ Est la différence absolue entre la séquence de référence $x_0^k(k)$ et le rapport S/N de la séquence mesurée $x_i^k(k)$.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{V.7})$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{V.8})$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{V.9})$$

ψ est le coefficient de distinction ($\psi \in [0, 1]$). Dans notre cas la valeur de ψ est 0.5.

➤ **Étape 3: Grey Relational Grade (GRG)**

GRG représente la corrélation entre les séries, elle est donnée par la formule suivante:

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (\text{V.10})$$

Où n est le nombre des réponses.

➤ **Étape 4: Détermination des paramètres d'usinage optimum**

Une fois que GRG est calculée, la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est faite en fonction du diagramme d'effets principaux pour (GRG). La plus grande valeur de GRG qui se trouve à proximité de la valeur normalisée idéale correspond à la combinaison optimale. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres du processus est le niveau avec la plus grande valeur GRG.

➤ **Étape 5: tests de confirmation**

Une fois que les niveaux optimaux sont sélectionnés, le test de validation a occupé la dernière étape dans la procédure d'optimisation pour confirmer la fiabilité des niveaux optimaux proposés par l'analyse relationnelle grise afin d'améliorer les performances du système. Ce test se fait en comparant la valeur du rapport S/N de GRG obtenu du test optimal avec celui prédit par la formule (V.11) avec l'utilisation de niveaux optimaux [88]:

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (\text{V.11})$$

Où η_m est la moyenne totale du rapport S/N , $\bar{\eta}_i$ est la moyenne du rapport S/N au niveau optimal, et q est le nombre des facteurs principaux d'entrée qui ont un effet significatif sur les réponses de sortie.

V.4 Optimisation par l'analyse relationnelle grise basé sur plan de Taguchi

Sur la base de la discussion ci-dessus, l'utilisation de l'analyse relationnelle grise couplée avec la planification de Taguchi afin d'optimiser les paramètres d'usinage comprend les étapes suivantes, comme le montre la **Figure V.2**.

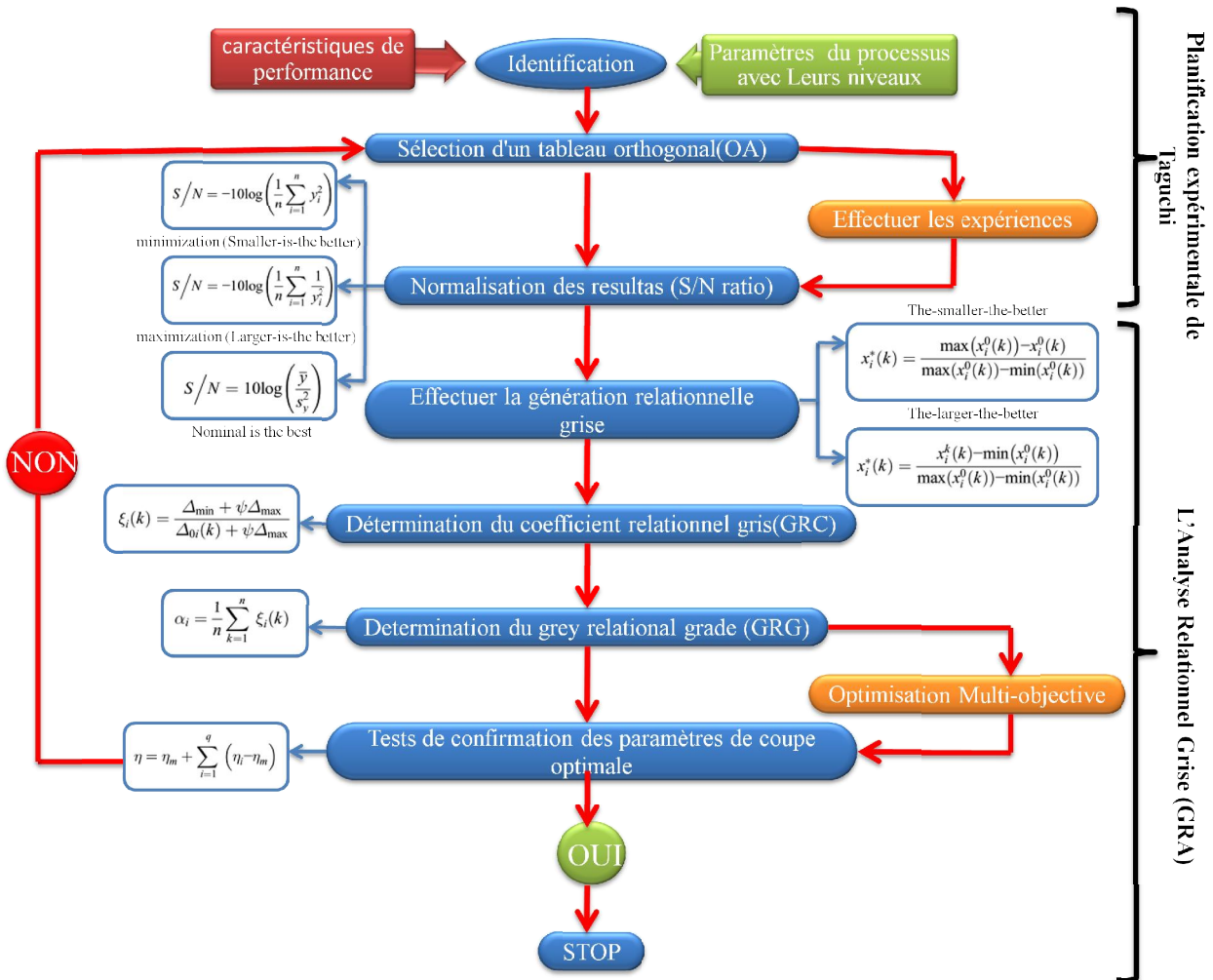


Figure V.2 : Démarche d'optimisation multi-objective par l'analyse relationnelle grise (GRA) basée sur la planification expérimentale de Taguchi.

V.5 Analyse multi-objective des résultats expérimentaux basé sur le plan de Taguchi L₁₈

Les résultats expérimentaux de (Ra , Fz , Ks , Pc , MRR , Va et Vt) avec leurs rapports S/N calculé sont présentés dans le **Tableau V.1**. Les résultats de (Ra , Fz , Va et Vt) ont été obtenus suite aux diverses combinaisons de niveaux de paramètres de coupe basés sur un plan factoriel réduit et mixte de Taguchi L₁₈. Les résultats de (Ks et Pc) ont été calculés avec les résultats obtenus de la force tangentielle en utilisant les équations (**V.12** et **V.13**). Le volume de copeau enlevé (MRR) est calculé par la formule (**V.14**). La caractéristique « Plus petit est-le meilleur » (formule **V.3**) est utilisée pour calculer le rapport S/N afin de minimiser (Ra , Fz , Ks , Pc , Va et Vt). La caractéristique « Plus grand est-le mieux » (formule **V.2**) est utilisée pour calculer le rapport S/N du volume de copeau enlevé (MRR) afin de le maximiser.

$$Ks = \frac{Fz}{S} = \frac{Fz}{f \times ap} \quad (\text{V.12})$$

$$Pc = \frac{Fz \times Vc}{60} \quad (\text{V.13})$$

Où Ks est l'effort spécifique (MPa), Fz est l'effort tangentiel (N), et S est l'aire de cisaillement (mm^2), Pc est la puissance de coupe (W), f est la vitesse d'avance (mm/tr), ap est la profondeur de coupe (mm) et Vc est la vitesse de coupe (m/min).

$$MRR = 1000 \times Vc \times f \times ap \quad (\text{V.14})$$

Où Vc est la vitesse de coupe (m/min), f est la vitesse d'avance (mm/tr), et ap est la profondeur de coupe (mm), MRR est le volume de copeau enlevé (mm^3/min).

V.6 Analyse de la variance (ANOVA)

L'ANOVA est une technique statistique, cette technique est un outil entrant dans le cadre général du modèle linéaire et/ou une variable quantitative s'explique par une ou plusieurs variables qualitatives. Cette analyse permet de tester la signification de tous les facteurs principaux (χr , r , Vc , f , ap) et leurs interactions dans l'ordre d'influence sur les réponses en comparant le carré moyen à une estimation des erreurs expérimentales à des niveaux de confiance spécifiques. Ceci est réalisé en séparant la variabilité totale des rapports S/N, qui est mesurée par la somme des écarts carrés par rapport au rapport S/N moyen total, en contributions par chacun des paramètres de conception et l'erreur. Tout d'abord, la somme totale des écarts au carré SS_T du rapport S/N moyen η_m peut être calculée comme suit [90]:

Tableau V.1 : Résultats expérimentaux pour la rugosité de surface, l'effort tangentiel, l'effort spécifique, la puissance de coupe, le volume de coupe enlevé et la vibration axiale et tangentielle.

N° Essai	Paramètres d'usinage					Reponses													
	χ_r (°)	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	S/N (dB)	Fz (N)	S/N (dB)	Ks (MPa)	S/N (dB)	Pc (W)	S/N (dB)	MRR (mm^3/min)	S/N (dB)	Va (m/s^2)	S/N (dB)	Vt (m/s^2)	S/N (dB)
1	45	0.8	220	0.08	0.15	0.47	6.56	53.6	-34.58	4466.67	-72.99	196.53	-45.87	2640	68.43	2.05	-6.24	4.93	-13.86
2	45	0.8	307	0.12	0.3	0.59	4.63	131.5	-42.38	3652.78	-71.25	672.84	-56.56	11052	80.87	2.45	-7.78	5.30	-14.48
3	45	0.8	440	0.16	0.45	0.63	3.97	231.15	-47.28	3210.42	-70.13	1695.10	-64.58	31680	90.02	2.53	-8.08	5.97	-15.52
4	45	1.2	220	0.08	0.3	0.43	7.26	88.33	-38.92	3680.42	-71.32	323.88	-50.21	5280	74.45	2.29	-7.20	6.07	-15.67
5	45	1.2	307	0.12	0.45	0.55	5.14	173.82	-44.8	3218.89	-70.15	889.38	-58.98	16578	84.39	2.89	-9.24	6.42	-16.15
6	45	1.2	440	0.16	0.15	0.78	2.20	93.2	-39.39	3883.33	-71.78	683.47	-56.69	10560	80.47	2.03	-6.19	3.90	-11.82
7	45	1.6	220	0.12	0.15	0.39	8.10	70.66	-36.98	3925.56	-71.88	259.09	-48.27	3960	71.95	1.75	-4.87	5.60	-14.96
8	45	1.6	307	0.16	0.3	0.57	4.83	161.01	-44.14	3354.38	-70.51	823.83	-58.32	14736	83.37	2.12	-6.56	6.27	-15.94
9	45	1.6	440	0.08	0.45	0.40	8.03	138.61	-42.84	3850.28	-71.71	1016.47	-60.14	15840	84.00	1.69	-4.57	3.78	-11.55
10	75	0.8	220	0.16	0.45	1.01	-0.09	201.04	-46.07	2792.22	-68.92	737.15	-57.35	15840	84.00	7.03	-16.94	8.71	-18.80
11	75	0.8	307	0.08	0.15	0.43	7.40	64.4	-36.18	5366.67	-74.59	329.51	-50.36	3684	71.33	1.96	-5.88	2.55	-8.11
12	75	0.8	440	0.12	0.3	0.65	3.70	112	-40.98	3111.11	-69.86	821.33	-58.29	15840	84.00	3.46	-10.79	4.00	-12.04
13	75	1.2	220	0.12	0.45	0.39	8.18	171.9	-44.71	3183.33	-70.06	630.30	-55.99	11880	81.50	4.18	-12.44	6.52	-16.29
14	75	1.2	307	0.16	0.15	0.54	5.35	99.21	-39.93	4133.75	-72.33	507.62	-54.11	7368	77.35	2.33	-7.37	3.01	-9.56
15	75	1.2	440	0.08	0.3	0.33	9.72	87.3	-38.82	3637.50	-71.22	640.20	-56.13	10560	80.47	2.61	-8.34	2.73	-8.72
16	75	1.6	220	0.16	0.3	0.51	5.79	176.2	-44.92	3670.83	-71.30	646.07	-56.21	10560	80.47	3.97	-11.99	5.94	-15.48
17	75	1.6	307	0.08	0.45	0.41	7.74	139.8	-42.91	3883.33	-71.78	715.31	-57.09	11052	80.87	3.02	-9.60	3.35	-10.51
18	75	1.6	440	0.12	0.15	0.43	7.33	87.71	-38.86	4872.78	-73.76	643.21	-56.17	7920	77.97	1.86	-5.43	2.45	-7.80

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2 \quad (\text{V.15})$$

Où n est le nombre des essais dans le plan d'expérience et η_i est le rapport S/N moyen pour l' $i^{\text{ème}}$ expérience.

La somme totale des écarts au carré SS_T se décompose en deux sources: la somme des écarts au carré SS_d par chaque paramètre de conception et la somme de l'erreur au carré SS_e .

$$SS_T = SS_d + SS_e \quad (\text{V.16})$$

Statistiquement, il existe un outil appelé un test F, nommé d'après Fisher [91], pour voir quels paramètres de conception ont un effet significatif sur la caractéristique de qualité. Dans l'analyse, le rapport F-value est un rapport de l'erreur carrée moyenne à l'erreur résiduelle, et est traditionnellement utilisé pour déterminer la signification d'un facteur. Cette analyse a été effectuée pour un niveau de signification de 5%, c'est-à-dire pour 95% d'un niveau de confiance. La dernière colonne du tableau montre la contribution "en pourcentage" (Cont. en %) de chaque facteur et interaction en tant que variation totale, indiquant son influence sur le résultat.

V.6.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(Ra)}$

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour $S/N_{(Ra)}$ sont présentés dans le **Tableau V.2**. On observe que la vitesse d'avance (f) vient en première position d'influence sur la qualité de surface avec une contribution de 50.21%, car lors de l'avance de l'outil de coupe sur la pièce à usiner dans le processus de tournage, la forme de l'outil génère des sillons d'hélicoïdes sur la surface de la pièce à usiner. Ces sillons sont plus profonds et plus larges avec l'augmentation de la vitesse d'avance, donc la qualité de la surface diminue. Le deuxième paramètre d'usinage influent est le rayon du bec de l'outil (r) avec un impact de 22.27%. De même, **Dilbag et Venkateswara [92]**, **Ashvin et Nanavati [93]** ont constaté que la vitesse d'avance est le facteur principal suivi par le rayon du bec de l'outil affectant la rugosité de surface. L'interaction $f \times ap$ vient en troisième position avec un effet de 12,69% sur la qualité de surface, la même signification d'interaction obtenue par **Aslan et al. [94]** lors du tournage de l'acier AISI 4140 durci avec l'outil céramique mixte $Al_2O_3 + TiCN$. Les facteurs (χr , Vc , ap) et les autres interactions ont un léger effet sur la qualité de surface.

Un modèle populaire établi [95] pour estimer la rugosité de la surface, avec un outil de rayon différent de zéro, est:

$$Ra = \frac{f^2}{32 \times r} \quad (\text{V.17})$$

Où Ra est la rugosité moyenne de la surface (μm), f est la vitesse d'avance (mm/tr), r est le rayon du bec de l'outil de coupe (mm). Selon l'équation (V.17), l'augmentation du rayon du bec de l'outil diminue la rugosité de la surface.

Tableau V.2 : Analyse de la variance pour $S/N_{(Ra)}$.

Source	SS	DF	MS	F-value	Cont. %	Remarque
χr	1.0755	1	1.0755	116.9	1.07	Signifiant
r	20.4583	1	20.4583	2223.73	20.27	Signifiant
Vc	0.0569	1	0.0569	6.18	0.06	Insignifiant
f	50.6817	1	50.6817	5508.88	50.21	Signifiant
ap	1.3091	1	1.3091	142.29	1.3	Signifiant
$\chi r \times r$	1.3651	1	1.3651	148.38	1.34	Signifiant
$\chi r \times Vc$	0.0179	1	0.0179	1.95	0.02	Insignifiant
$\chi r \times f$	1.1715	1	1.1715	127.34	1.16	Signifiant
$\chi r \times ap$	3.8569	1	3.8569	419.23	3.82	Signifiant
$r \times Vc$	2.7503	1	2.7503	298.95	2.72	Signifiant
$r \times f$	0.1536	1	0.1536	16.7	0.15	Insignifiant
$r \times ap$	2.9522	1	2.9522	320.89	2.92	Signifiant
$Vc \times f$	0.3393	1	0.3393	36.88	0.34	Signifiant
$Vc \times ap$	1.9258	1	1.9258	209.33	1.91	Signifiant
$f \times ap$	12.8056	1	12.8056	1391.91	12.69	Signifiant
Erreur	0.0183	2	0.0092		0.02	
Totale	100.938	17			100	

La **figure V.3** montre un exemple représentatif de profil 2D et de la topographie 3D de surface usinée envisagée au moyen d'une plate-forme optique de métrologie modulaire Altisurf 500 avec vue isométrique. Le but de cette étude est d'examiner l'effet de la vitesse d'avance et du rayon du bec de l'outil sur la rugosité de surface par une comparaison entre le profil 2D et la topographie 3D des surfaces usinées obtenues à l'aide de divers niveaux de paramètres d'usinage. Les opérations de tournage ont été effectuées avec les mêmes niveaux de paramètres d'usinage, à l'exception de la vitesse d'avance et du rayon du bec de l'outil; pour la surface usinée (a): $\chi r = 75^\circ$, $r = 0.8$ mm, $Vc = 220$ m / min, $f = 0.08$ mm / tr, $ap = 0.15$ mm, pour la surface usinée (b): $\chi r = 75^\circ$, $r = 0.8$ mm, $Vc = 220$ m / min, $f = 0.16$ mm / tr, $ap = 0.15$ mm; pour la surface usinée (c): $\chi r = 75^\circ$, $r = 1.6$ mm, $Vc = 220$ m / min, $f = 0.16$ mm / tr, $ap = 0.15$ mm. Il apparaît clairement par une comparaison sur la **figure V.3** (a, b) que l'utilisation d'une grande vitesse d'avance entraîne une mauvaise rugosité de surface. Parce que la distance entre les aspérités de rugosité augmente avec les augmentations de la vitesse d'avance. Tandis que, par une comparaison des surfaces usinées (b et c) sur la **figure V.3**, il

est remarquable que l'utilisation d'un grand rayon de bec d'outil améliore la rugosité de surface par l'écrasement des aspérités. Lorsque le rayon de bec de l'outil de coupe augmente, la longueur de contact entre le bec de l'outil et la surface usinée augmente, ce qui entraîne l'écrasement des aspérités et des traces d'avance de l'outil comme représenté sur la *figure V.3* (c).

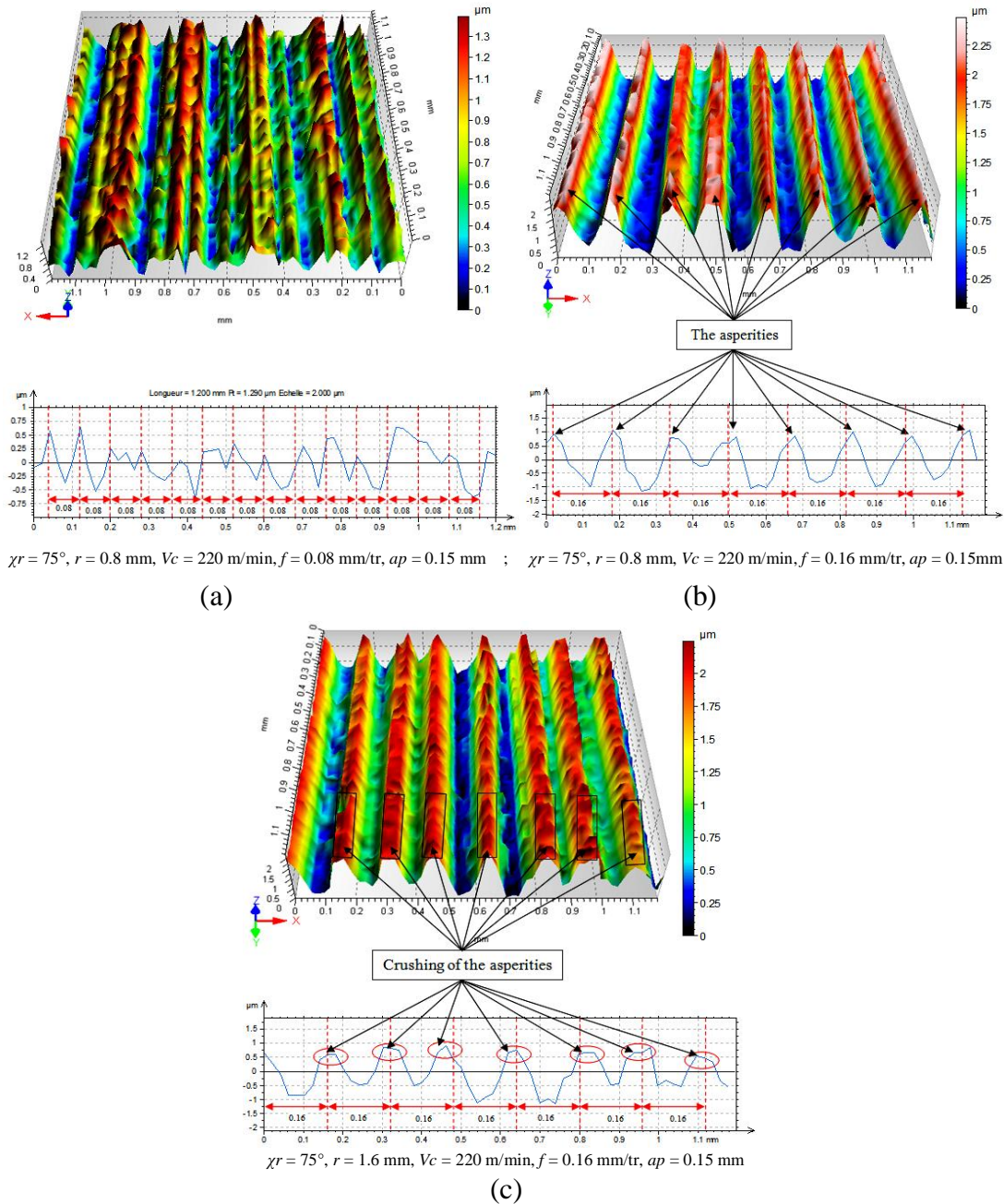


Figure V.3 : Exemple du profil en 2D et topographie en 3D de surface usinée.

V.6.2 Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(Fz)}$

Il ressort clairement des résultats d'ANOVA pour $S/N_{(Fz)}$ que la profondeur de coupe est le facteur dominant affectant l'effort tangentiel Fz (**Tableau V.3**). Sa contribution est de 60.9%. Le deuxième facteur influençant Fz est la vitesse d'avance. Sa contribution est de 19.5%. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les travaux antérieurs des chercheurs **Yucel et Günay [52]**, **Bouchelaghem et al. [33]**. L'effort de coupe tangentiel augmente à mesure que la profondeur de coupe et la vitesse d'avance sont augmentées en raison de l'augmentation de la zone de coupe. Le rayon du bec de l'outil de coupe a un léger effet, sa contribution est de 8.5%.

Tableau V.3: Analyse de la variance pour $S/N_{(Fz)}$.

Source	SS	DF	MS	F-value	Cont. %	Remarque
χr	2.683	1	2.683	1.69	1.55	Insignifiant
r	14.708	1	14.708	9.24	8.5	Insignifiant
Vc	1.94	1	1.94	1.22	1.12	Insignifiant
f	33.734	1	33.734	21.19	19.5	Signifiant
ap	105.344	1	105.344	66.17	60.9	Signifiant
$\chi r \times r$	0.003	1	0.003	0.00	0.00	Insignifiant
$\chi r \times Vc$	5.209	1	5.209	3.27	3.01	Insignifiant
$\chi r \times f$	0.05	1	0.05	0.03	0.03	Insignifiant
$\chi r \times ap$	2.375	1	2.375	1.49	1.37	Insignifiant
$r \times Vc$	0.95	1	0.95	0.6	0.55	Insignifiant
$r \times f$	0.036	1	0.036	0.02	0.02	Insignifiant
$r \times ap$	0.158	1	0.158	0.1	0.09	Insignifiant
$Vc \times f$	0.896	1	0.896	0.56	0.52	Insignifiant
$Vc \times ap$	1.178	1	1.178	0.74	0.68	Insignifiant
$f \times ap$	0.519	1	0.519	0.33	0.3	Insignifiant
Erreur	3.185	2	1.592		1.84	
Totale	172.969	17			100	

V.6.3 Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(Ks)}$

Les résultats d'ANOVA pour $S/N_{(Ks)}$ présentés dans le **tableau V.4** montrent que les facteurs ap et f sont les plus significatifs avec la contribution respective (51.91, 18.27)%. Cependant, une comparaison qualitative peut être faite; par exemple, **Aouici et al. [32]** ont constaté que la profondeur de coupe et la vitesse d'avance sont les facteurs importants affectant l'effort spécifique. L'interaction ($\chi r \times Vc$) présente une signification statistique avec une contribution de 10.3%.

Tableau V.4 : Analyse de la variance pour $S/N_{(Ks)}$.

Source	SS	DF	MS	F-value	Cont. %	Remarque
χr	0.2374	1	0.2374	1.45	0.69	Insignifiant
r	0.8428	1	0.8428	5.14	2.46	Insignifiant
Vc	0.1965	1	0.1965	1.2	0.58	Insignifiant
f	6.2395	1	6.2395	38.05	18.27	Signifiant
ap	17.7205	1	17.7205	108.05	51.91	Signifiant
$\chi r \times r$	1.1699	1	1.1699	7.13	3.42	Insignifiant
$\chi r \times Vc$	3.5155	1	3.5155	21.44	10.3	Signifiant
$\chi r \times f$	0.0586	1	0.0586	0.36	0.17	Insignifiant
$\chi r \times ap$	2.5705	1	2.5705	15.67	7.53	Insignifiant
$r \times Vc$	0.4836	1	0.4836	2.95	1.42	Insignifiant
$r \times f$	0.1708	1	0.1708	1.04	0.5	Insignifiant
$r \times ap$	0.0231	1	0.0231	0.14	0.07	Insignifiant
$Vc \times f$	0.0312	1	0.0312	0.19	0.09	Insignifiant
$Vc \times ap$	0.2548	1	0.2548	1.55	0.75	Insignifiant
$f \times ap$	0.2964	1	0.2964	1.81	0.87	Insignifiant
Erreur	0.3281	2	0.164		0.96	
Totale	34.1393	17			100	

V.6.4 Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(Pc)}$

À partir du **tableau V.5** qui représente l'ANOVA pour $S/N_{(Pc)}$, on observe que la profondeur de coupe est le paramètre qui a l'effet le plus important sur la puissance de coupe avec une contribution de (44.22%) suivi par la vitesse de coupe avec une contribution de (34.14%). Cependant, la vitesse d'avance occupe la troisième position dans l'ordre d'influence avec une contribution de (18.33%). Un résultat similaire a été obtenu par **Hanafi et al. [60]** a révélé que la profondeur de coupe est le paramètre d'influence le plus important suivi par la vitesse de coupe et de l'avance sur la puissance de coupe. Les autres facteurs et toutes les interactions ne présentent aucune contribution significative sur la puissance de coupe (Pc).

V.6.5 Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(Va)}$

Les résultats d'analyse de la variance du rapport S/N correspond à la vibration axiale (Va) présentés dans le **tableau V.6** ont montré que la profondeur de coupe et l'angle de direction principale sont les paramètres qui vient en première position d'influence avec une contribution de 30.74% et 25.99% respectivement. Les facteurs (Vc , f , r) viennent en deuxième position d'influence avec un impact de 11.85%, 11.59%, 8% respectivement.

Toutes les interactions ne présentent aucune contribution significative sur la vibration axiale (V_a) sauf l'interaction ($\chi r \times ap$) présente une signification statistique avec un impact de 5.83%.

Tableau V.5 : Analyse de la variance pour $S/N_{(P_c)}$.

Source	SS	DF	MS	F-value	Cont. %	Remarque
χr	0.237	1	0.237	0.21	0.07	Insignifiant
r	0.843	1	0.843	0.76	0.25	Insignifiant
V_c	117.156	1	117.156	104.98	34.14	Signifiant
f	62.887	1	62.887	56.35	18.33	Signifiant
ap	151.744	1	151.744	135.97	44.22	Signifiant
$\chi r \times r$	1.17	1	1.17	1.05	0.34	Insignifiant
$\chi r \times V_c$	0.069	1	0.069	0.06	0.02	Insignifiant
$\chi r \times f$	0.41	1	0.41	0.37	0.12	Insignifiant
$\chi r \times ap$	4.533	1	4.533	4.06	1.32	Insignifiant
$r \times V_c$	0.014	1	0.014	0.01	0.00	Insignifiant
$r \times f$	0.468	1	0.468	0.42	0.14	Insignifiant
$r \times ap$	0.323	1	0.323	0.29	0.09	Insignifiant
$V_c \times f$	0.387	1	0.387	0.35	0.11	Insignifiant
$V_c \times ap$	0.519	1	0.519	0.47	0.15	Insignifiant
$f \times ap$	0.13	1	0.13	0.12	0.04	Insignifiant
Erreur	2.233	2	1.116		0.65	
Totale	343.124	17			100	

Tableau V.6 : Analyse de la variance pour $S/N_{(V_a)}$.

Source	SS	DF	MS	F-value	Cont. %	Remarque
χr	43.698	1	43.698	66.82	25.99	Signifiant
r	13.441	1	13.441	20.55	8.00	Signifiant
V_c	19.926	1	19.926	30.47	11.85	Signifiant
f	19.488	1	19.488	29.80	11.59	Signifiant
ap	51.678	1	51.678	79.02	30.74	Signifiant
$\chi r \times r$	0.019	1	0.019	0.03	0.01	Insignifiant
$\chi r \times V_c$	1.711	1	1.711	2.62	1.02	Insignifiant
$\chi r \times f$	0.679	1	0.679	1.04	0.40	Insignifiant
$\chi r \times ap$	9.797	1	9.797	14.98	5.83	Insignifiant
$r \times V_c$	0.045	1	0.045	0.07	0.03	Insignifiant
$r \times f$	1.153	1	1.153	1.76	0.69	Insignifiant
$r \times ap$	0.548	1	0.548	0.84	0.33	Insignifiant
$V_c \times f$	0.128	1	0.128	0.20	0.08	Insignifiant
$V_c \times ap$	2.174	1	2.174	3.32	1.29	Insignifiant
$f \times ap$	2.323	1	2.323	3.55	1.38	Insignifiant
Erreur	1.307	2	0.654		0.78	
Totale	168.115	17			100	

V.6.6 Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(Vt)}$

Les résultats d'analyse de la variance du rapport S/N correspondent à la vibration tangentielle (Vt) et qui sont présentés dans le **tableau V.7** ont montré que la vitesse de coupe et la profondeur de coupe sont les paramètres qui viennent en première position d'influence avec une contribution de 32.42% et 23.79% respectivement. L'avance vient en deuxième position d'influence avec une contribution de 16.14%. Le facteur (χr) vient en troisième position d'influence avec un impact de 15.78%. Le rayon du bec de l'outil de coupe et les interactions ($\chi r \times Vc$, $r \times f$, $\chi r \times ap$, $r \times ap$) présentent une légère signification statistique. Le reste ne présente aucune contribution significative sur la vibration tangentielle (Vt).

Tableau V.7 : Analyse de la variance pour $S/N_{(Vt)}$.

Source	SS	DF	MS	F-value	Cont. %	Remarque
χr	28.482	1	28.482	1265.87	15.78	Signifiant
r	3.623	1	3.623	161.02	2.01	Signifiant
Vc	58.524	1	58.524	2601.07	32.42	Signifiant
f	29.125	1	29.125	1294.44	16.14	Signifiant
ap	42.936	1	42.936	1908.27	23.79	Signifiant
$\chi r \times r$	1.173	1	1.173	52.13	0.65	Signifiant
$\chi r \times Vc$	3.748	1	3.748	166.58	2.08	Signifiant
$\chi r \times f$	0.444	1	0.444	19.73	0.25	Signifiant
$\chi r \times ap$	3.945	1	3.945	175.33	2.19	Signifiant
$r \times Vc$	0.263	1	0.263	11.69	0.15	Insignifiant
$r \times f$	1.84	1	1.84	81.78	1.02	Signifiant
$r \times ap$	5.398	1	5.398	239.91	2.99	Signifiant
$Vc \times f$	0.333	1	0.333	14.80	0.18	Insignifiant
$Vc \times ap$	0.001	1	0.001	0.04	0.00	Insignifiant
$f \times ap$	0.62	1	0.62	27.56	0.34	Signifiant
Erreur	0.045	2	0.0225		0.02	
Totale	180.499	17			100	

V.6.7 Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(MRR)}$

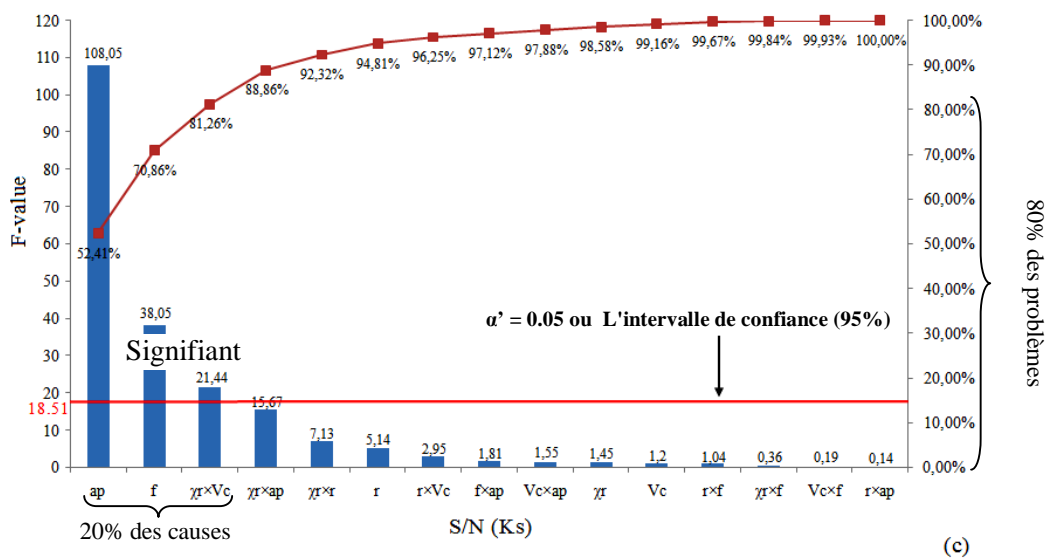
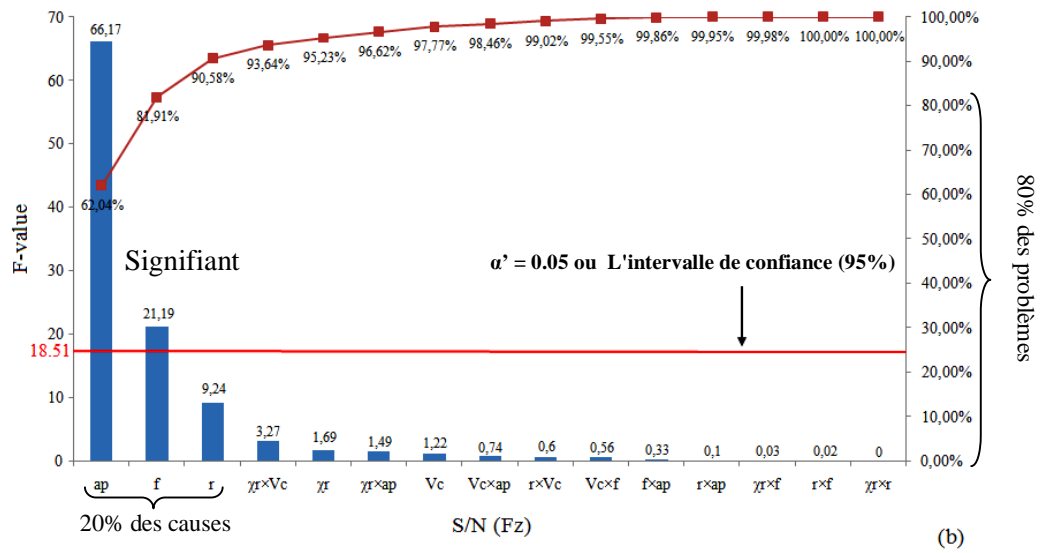
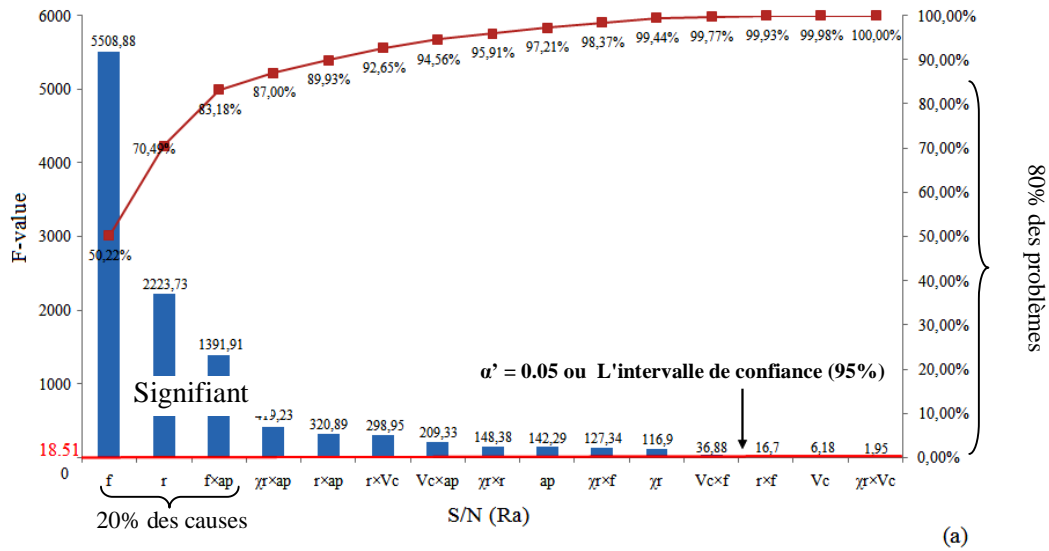
D'après l'analyse du **tableau V.6**, on peut constater que Vc , f et ap ont un effet significatif sur (MRR). Néanmoins, ap est le facteur primordial affectant MRR avec une contribution de 54.85% suivis par f et Vc . Leurs contributions sont respectivement de 21.84% et 21.64%. Le reste des termes ne représente aucun effet significatif sur MRR . Le même ordre d'effet significatif des paramètres d'usinage sur le MRR trouvé par **Bouzid et al. [58]** lors du tournage de l'acier inoxydable X20Cr13.

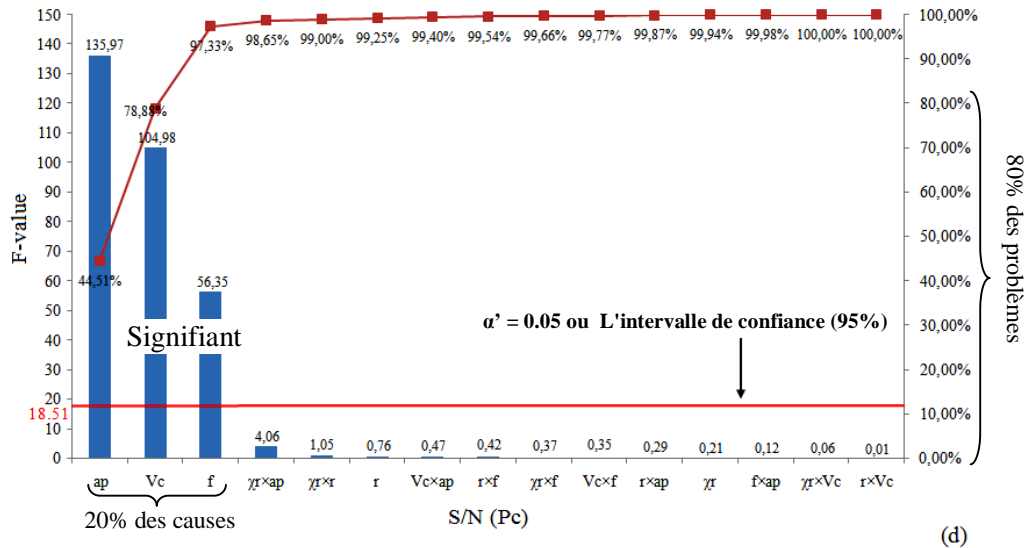
Tableau V.8 : Analyse de la variance pour $S/N_{(MRR)}$.

Source	SS	DF	MS	F-value	Cont. %	Remarque
V_c	107.757	1	7.253	10	21.64	Signifiant
f	108.743	1	8.151	11.24	21.84	Signifiant
ap	273.174	1	11.392	15.71	54.85	Signifiant
$V_c \times f$	0.306	1	0.264	0.36	0.06	Insignifiant
$V_c \times ap$	0.034	1	0.027	0.04	0.01	Insignifiant
$f \times ap$	0.012	1	0.012	0.02	0	Insignifiant
Erreur	7.978	11	0.725		1.60	
Totale	498.004	17			100	

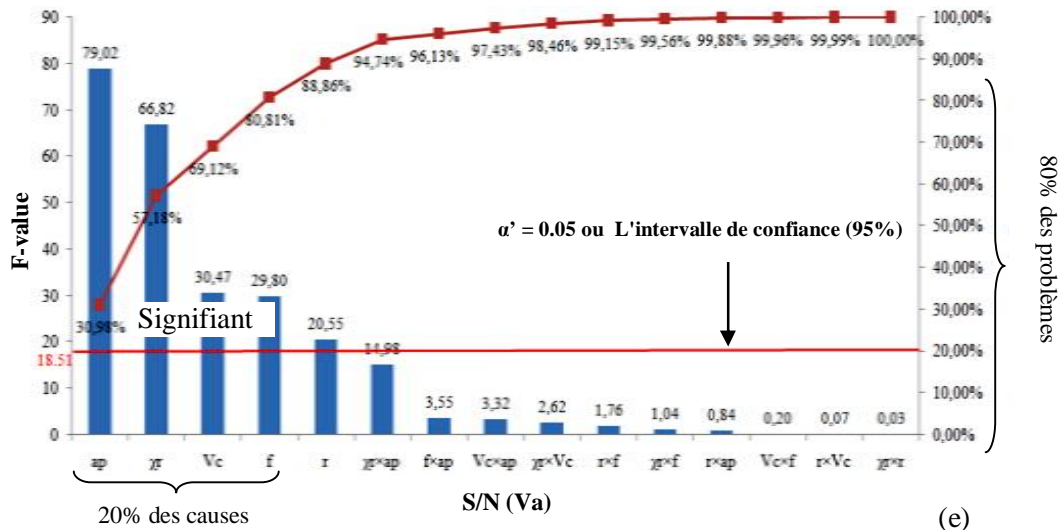
V.7 Analyse de Pareto

L'analyse de Pareto est une technique simple pour prioriser la résolution des problèmes. Elle est basée sur le principe de Pareto également connu sous le nom de règle 80/20 qui, en général, signifie que 80% des problèmes peuvent être causés par seulement 20% des causes [96]. Pour confirmer les résultats obtenus par l'analyse d'ANOVA pour le S/N des paramètres technologiques, un graphique de Pareto est intégré (*figure V.4*). Le but de cette analyse est de classer par ordres décroissants d'influence des paramètres de coupe et leurs interactions sur la rugosité de surface (Ra), l'effort tangentiel (Fz), l'effort spécifique (Ks), la puissance de coupe (Pc), la vibration axiale (Va), la vibration tangentielle (Vt) et le volume de copeau enlevé (MRR). Les effets des facteurs et leurs interactions sur les réponses sont normalisés pour une meilleure comparaison. Les valeurs normalisées appelées (F-value) dans le tableau d'ANOVA sont obtenues en divisant la moyenne des carrés de chaque facteur par la moyenne des carrés de l'erreur. Plus l'effet est normalisé, plus le facteur considéré influencé. Si les valeurs de F-value qui correspondent aux paramètres d'usinage et à leurs interactions sont supérieures à 18.51 pour (Ra , Fz , Ks , Pc , Va et Vt) et 4.84 pour (MRR); les effets sont significatifs. Par contre, si les valeurs de F-value sont inférieures à 18.51 pour (Ra , Fz , Ks , Pc , Va et Vt) et 4.84 pour (MRR); Les effets ne sont pas significatifs. L'intervalle de confiance choisi est de 95% ($\alpha' = 0.05$).

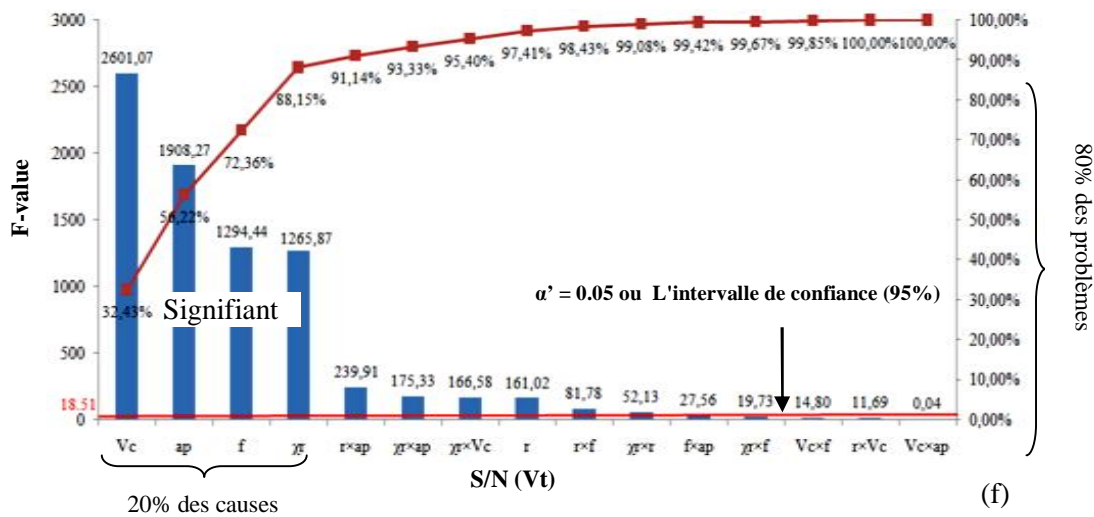




(d)



(e)



(f)

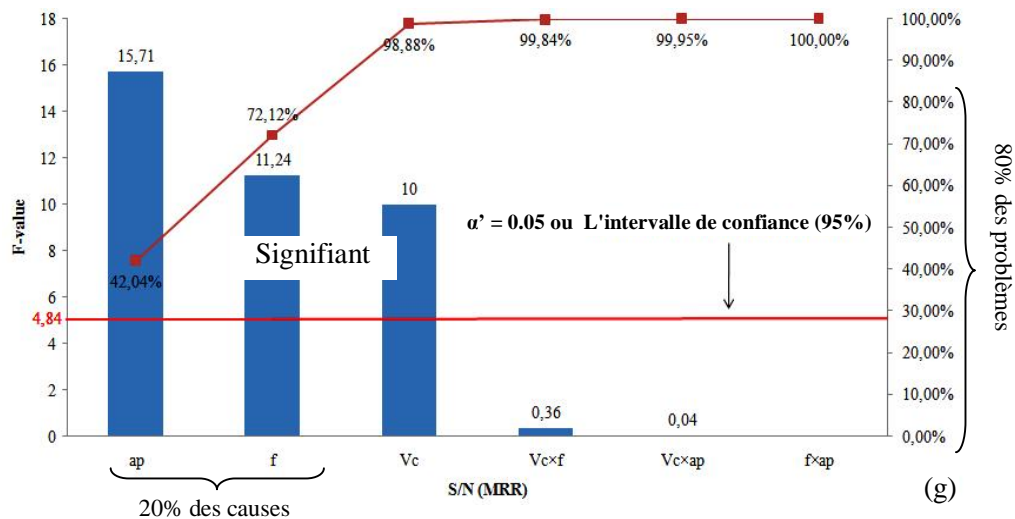


Figure V.4: la carte de Pareto, pour l'effet des paramètres de coupe sur: (a) rugosité de surface, (b) force tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.

V.8 Effet des interactions sur les réponses (tracés 3D et contours)

Afin de vérifier l'influence des interactions $f \times ap$ et $\chi r \times Vc$ sur le rapport S/N pour (Ra) et (Ks), respectivement, les graphiques des interactions des facteurs pour chaque surface de réponse sont dessinés dans la **figure V.5** (a et b). Les variables non représentées dans la figure sont maintenues constantes (le niveau intermédiaire). **Figure V.5.a** montre la surface de réponse 3D pour l'effet de l'interaction de la profondeur de coupe et de la vitesse d'avance sur la qualité de la surface (rapport S/N pour Ra), en maintenant l'angle de direction principale, le rayon du bec de l'outil et la vitesse de coupe au niveau moyen ($\chi r = 60^\circ$, $r = 1.2$ mm, $Vc = 330$ m/min), respectivement. Cette figure indique que, pour une profondeur de coupe donnée, la dégradation de la qualité de la surface est enregistrée avec l'augmentation de la vitesse l'avance de l'outil de coupe. On peut voir à travers cette figure que la qualité de la surface est sensible à la vitesse d'avance; une augmentation de ce dernier diminue la qualité de la surface. Ceci est en accord avec le travail de recherche publié par **Bouid et al. [97]** où ils ont observé que la rugosité de surface (Ra) augmente rapidement avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Cependant, cette diminution de la qualité de surface devient de plus en plus petite avec des valeurs inférieures de la profondeur de coupe.

Figure V.5.b montre l'impact de l'angle de direction principale et de la vitesse de coupe sur le rapport $S/N_{(Ks)}$. Alors que le rayon du bec de l'outil, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe sont maintenues à un niveau moyen ($r = 1.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr, $ap = 0,3$ mm). Cette figure indique que pour l'angle de direction principale ($\chi r = 75^\circ$),

l'augmentation du rapport S/N pour (K_s) est notable avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Par contre, pour l'angle de direction principale ($\chi_r = 45^\circ$), il y avait une légère diminution du rapport $S/N_{(K_s)}$ avec une vitesse de coupe croissante. Pour des faibles vitesses de coupe, le rapport $S/N_{(K_s)}$ diminue avec l'augmentation de l'angle de direction principale. Par contre, pour les vitesses élevées, il est clair que le $S/N_{(K_s)}$ diminue avec la diminution de l'angle de direction principale.

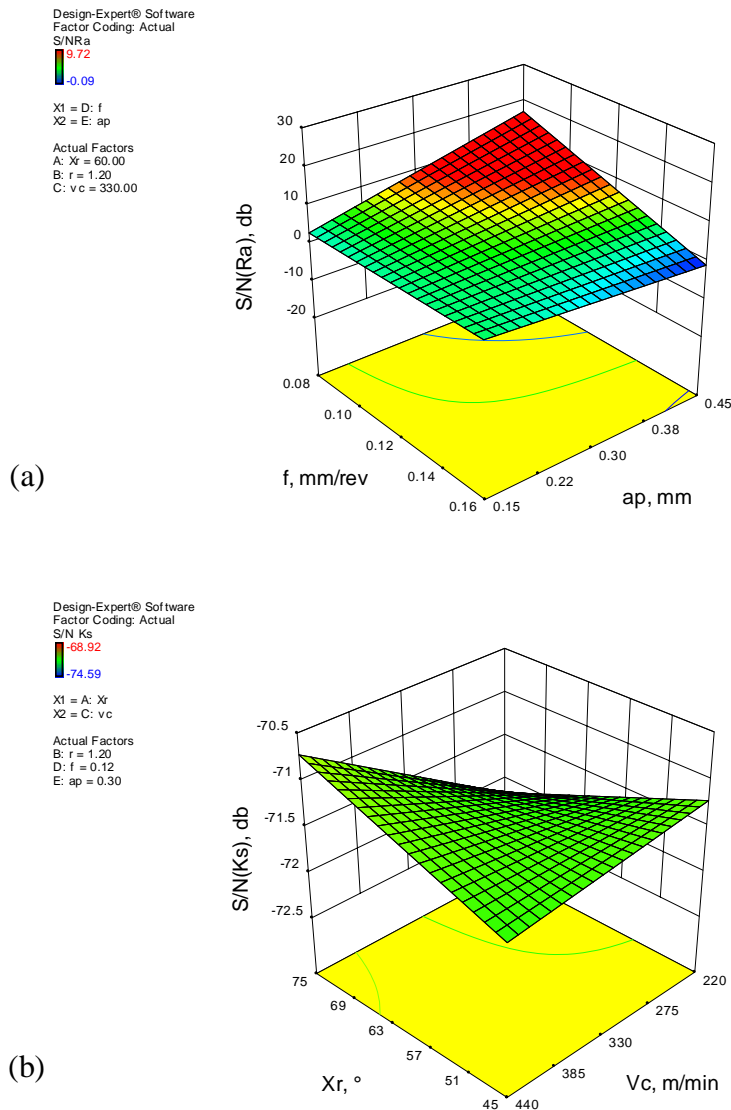


Figure V.5: Tracé 3D pour: (a) Effet du ($f \times ap$) sur $S/N_{(Ra)}$, (b) Effet du ($\chi_r \times V_c$) sur $S/N_{(K_s)}$.

Le contour de la surface de réponse pour $S/N_{(Ra)}$ est représenté sur la **figure V.6.a**. Il ressort de cette figure que, à n'importe quelle profondeur de coupe particulière, la meilleure qualité de surface peut être obtenue lorsque la vitesse d'avance est quelque part inférieure dans la gamme des vitesses d'avance choisies. En outre, à des profondeurs de coupe plus élevées, une meilleure qualité de surface peut être obtenue de 0.3 mm à 0.45 mm.

La **figure V.6.b** représente le contour pour la surface de réponse pour $S/N_{(Ks)}$. Indépendamment de la catégorie de la caractéristique de qualité dans la méthode de Taguchi, un rapport S/N plus élevé correspond à des caractéristiques de meilleure qualité. Par conséquent, l'effort spécifique le plus faible qui correspond à un rapport $S/N_{(Ks)}$ supérieur est obtenu lorsque la vitesse de coupe et l'angle de direction principale sont élevés.

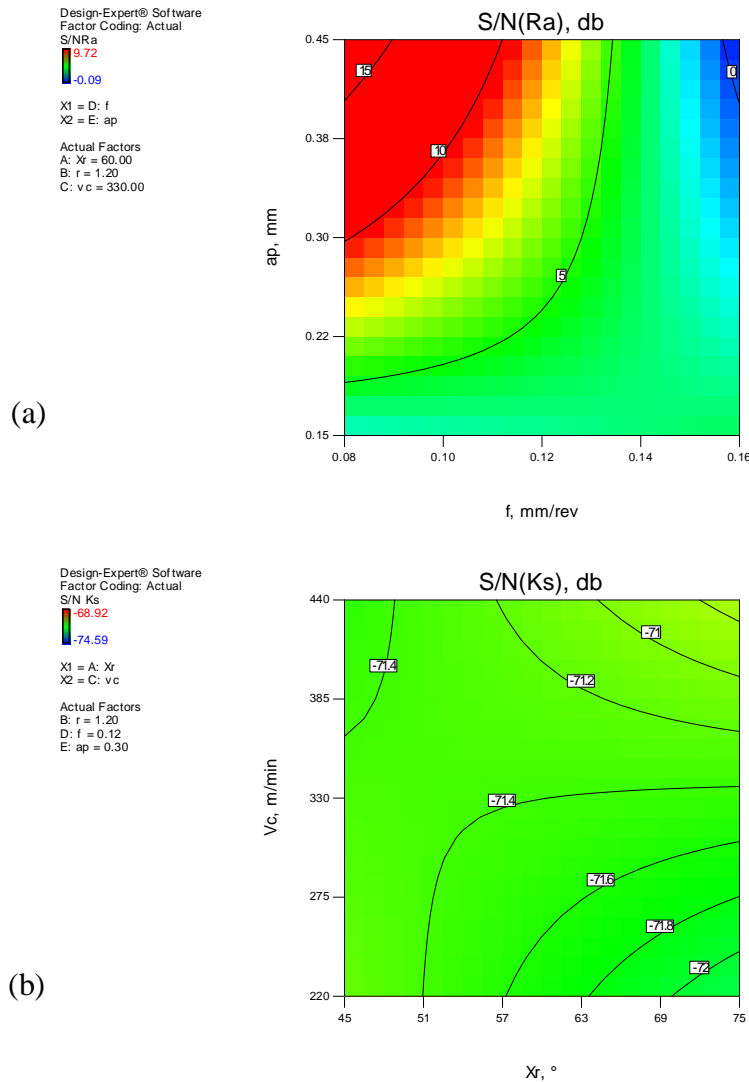


Figure V.6 : Contours des surfaces de réponses pour: (a) Effet du $(f \times ap)$ sur $S/N_{(Ra)}$,
 (b) Effet du $(\chi r \times Vc)$ sur $S/N_{(Ks)}$.

V.9 Analyse de régression

L'analyse de régression est une technique pour étudier la relation fonctionnelle entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes. Dans cette étude, les variables dépendantes sont $(Ra, Fz, Ks, Pc, Va, Vt$ et $MRR)$, tandis que les variables indépendantes sont $(\chi r, r, Vc, f, ap)$. Les équations prédictives pour les paramètres

technologiques ont été formulées par un modèle de régression linéaire avec des interactions données par l'équation (V.18).

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij}^k b_{ij} X_i X_j + \varepsilon_i \quad (\text{V.18})$$

Ou b_0 est le terme constant de l'équation de régression, les coefficients $b_1, b_2 \dots b_k$ et b_{12}, b_{13}, b_{k-1} sont respectivement les termes linéaire et interactif. X_i représentent les paramètres d'entrée ($\chi r, r, Vc, f, ap$), et Y représentent les paramètres de sorties (rugosité de surface, effort tangentiel, effort spécifique, puissance de coupe, vibration axiale, vibration tangentielle et volume de copeau enlevé).

Les équations prédictives de Ra, Fz, Ks, Pc, Va, Vt et MRR en fonction des paramètres de coupe (Vc, f, ap) et la géométrie de l'outil ($\chi r, r$) obtenus par le modèle de régression linéaire avec des interactions sont données ci-dessous par les équations (V.19), (V.20), (V.21), (V.22), (V.23), (V.24) et (V.25) avec les coefficients de détermination respectifs R^2 de 99.72%, 99.81%, 98.67%, 99.82%, 99.41%, 99.91% et 99.77%. Ces modèles de régression sont utiles pour la prédiction des réponses par rapport aux paramètres de contrôle d'entrée.

$$\begin{aligned} Ra = & -0.751523 - 0.0390656 \chi r + 2.11283 r + 0.00839753 Vc + 20.5609 f - 9.98742 ap - \\ & 0.00225299 \chi r \times r + 5.98103e-005 \chi r \times Vc + 0.116648 \chi r \times f + 0.00051299 \chi r \times ap - \\ & 0.00318008 r \times Vc - 23.6922 r \times f + 6.56501 r \times ap - 0.0255462 Vc \times f - 0.0163664 Vc \times ap \\ & + 53.2321 f \times ap \end{aligned} \quad (\text{V.19})$$

$$\begin{aligned} Fz = & -47.4569 + 0.634052 \chi r - 32.4047 r + 0.299883 Vc + 452.092 f - 5.93513 ap + 1.0859 \\ & \chi r \times r - 0.00269694 \chi r \times Vc - 2.79961 \chi r \times f - 2.6456 \chi r \times ap - 0.0698555 r \times Vc - 189.798 \\ & r \times f + 98.2247 r \times ap - 0.439946 Vc \times f - 0.038708 Vc \times ap + 2983.77 f \times ap \end{aligned} \quad (\text{V.20})$$

$$\begin{aligned} Ks = & 1521.5 + 82.6988 \chi r + 648.574 r + 6.74166 Vc + 14572.6 f - 11469.8 ap + 17.3155 \\ & \chi r \times r - 0.114641 \chi r \times Vc - 196.365 \chi r \times f - 134.196 \chi r \times ap + 0.794421 r \times Vc - 26415.7 r \times f \\ & + 6571.84 r \times ap + 3.69599 Vc \times f - 8.36022 Vc \times ap + 72926.3 f \times ap \end{aligned} \quad (\text{V.21})$$

$$\begin{aligned} Pc = & 98.25 + 8.51575 \chi r - 193.257 r - 1.14402 Vc - 1740.52 f - 1007.09 ap + 5.70617 \chi r \times r \\ & - 0.0157304 \chi r \times Vc - 37.1442 \chi r \times f - 18.1753 \chi r \times ap + 0.134651 r \times Vc - 776.369 r \times f - \\ & 40.8738 r \times ap + 15.3665 Vc \times f + 6.68678 Vc \times ap + 13983.2 f \times ap \end{aligned} \quad (\text{V.22})$$

$$\begin{aligned} Va = & -1.74151 - 0.170979 \chi r + 7.44524 r + 0.0406537 Vc + 36.1658 f - 31.7166 ap - \\ & 0.0076509 \chi r \times r + 0.000140966 \chi r \times Vc + 0.79167 \chi r \times f + 0.148262 \chi r \times ap - \\ & 0.0118793 r \times Vc - 67.3697 r \times f + 16.3714 r \times ap - 0.142996 Vc \times f - 0.0633289 Vc \times ap + \\ & 206.805 f \times ap \end{aligned} \quad (\text{V.23})$$

$$Vt = 10.0925 - 0.153855 \chi r + 4.65272 r + 0.0108943 Vc - 70.4685 f - 4.63233 ap - 0.0395426 \chi r \times r + 5.52203e-005 \chi r \times Vc + 0.759561 \chi r \times f + 0.151208 \chi r \times ap - 0.00561722 r \times Vc + 4.30507 r \times f - 2.92981 r \times ap - 0.0237008 Vc \times f - 0.0340181 Vc \times ap + 143.139 f \times ap \quad (\text{V.24})$$

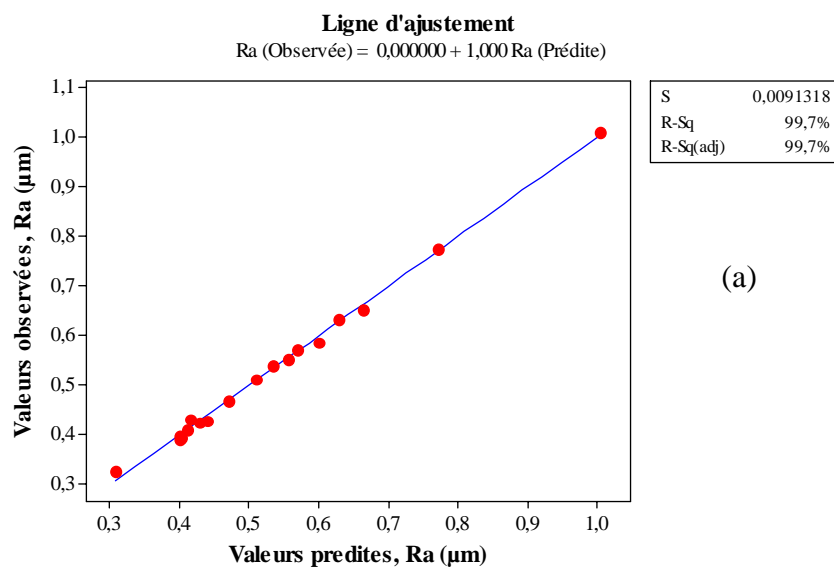
$$MRR = 12835.2 - 40.4339 Vc - 105222 f - 41353.3 ap + 324.193 Vc \times f + 126.452 Vc \times ap + 332351 f \times ap \quad (\text{V.25})$$

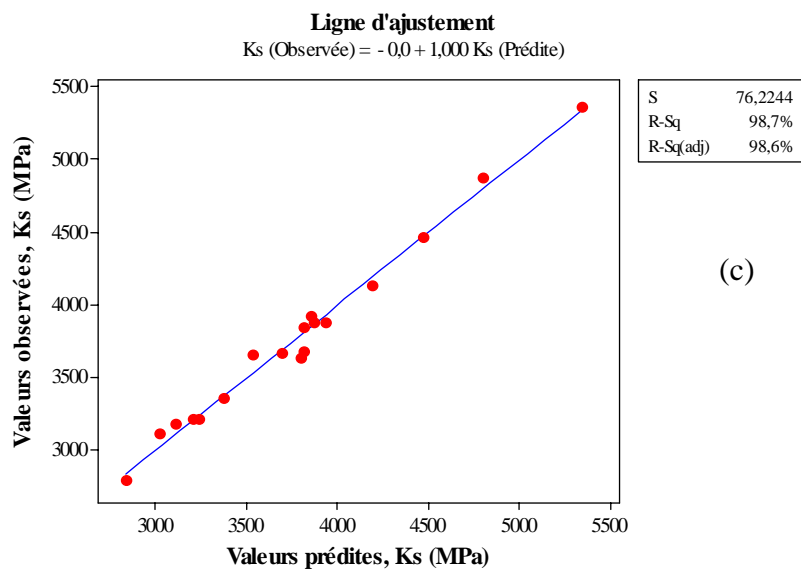
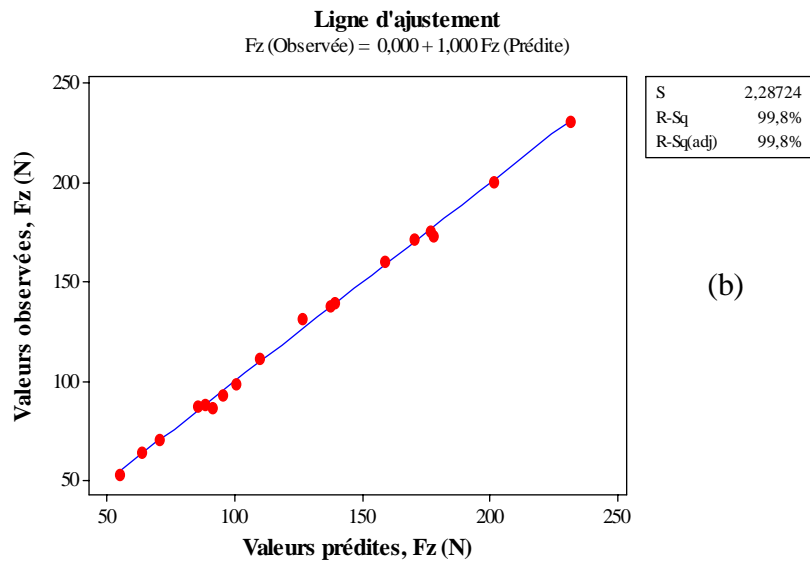
Le critère qui consiste à ajuster la meilleure ligne à travers les données de régression linéaire simple, repose sur la minimisation de la somme des carrés des résidus entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées des réponses avec le modèle de régression. La fonction linéaire est exprimée comme suit:

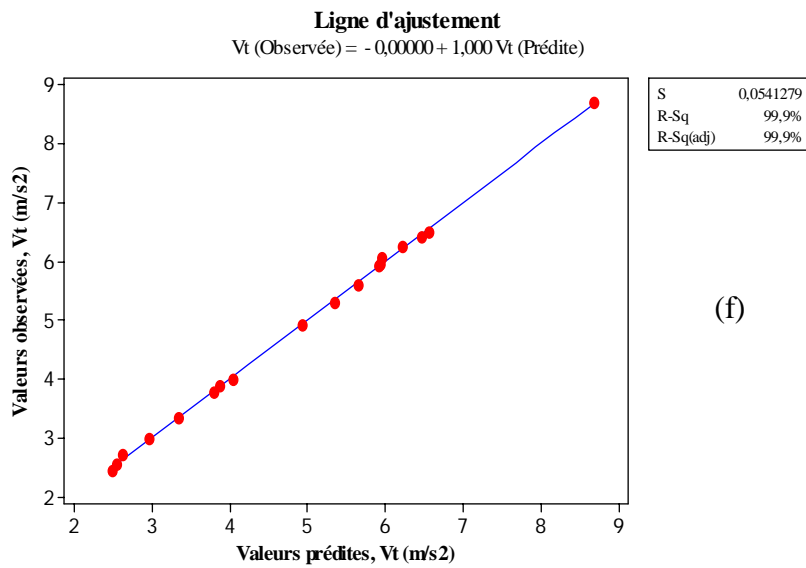
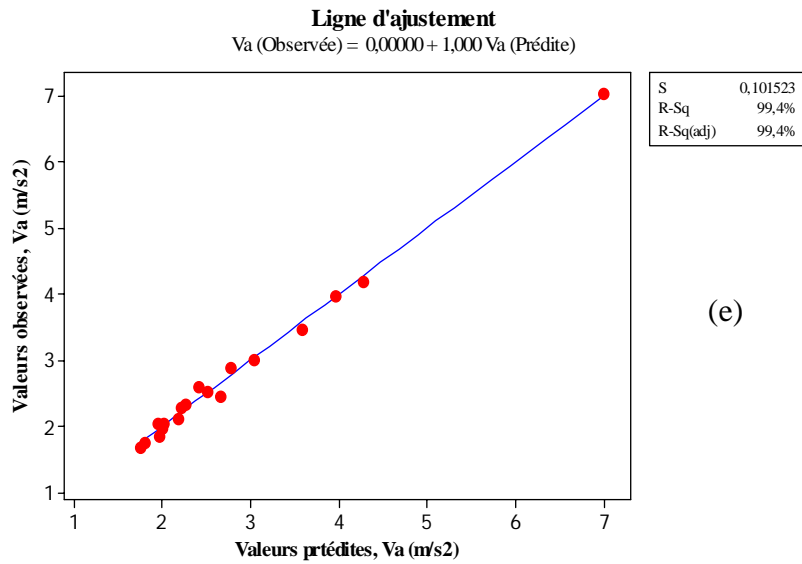
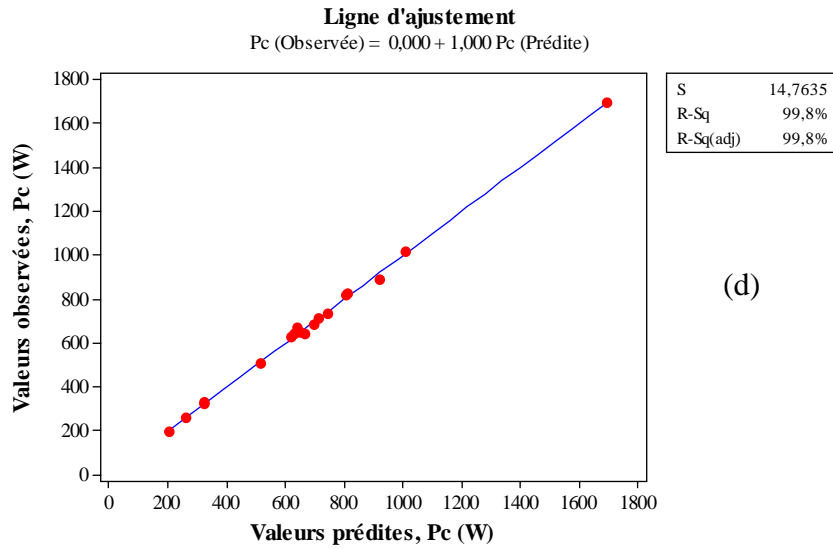
$$y = a_0 + a_1 x \quad (\text{V.26})$$

Où y est la valeur de la réponse et x est la valeur de la variable.

Pour vérifier la fiabilité des modèles mathématiques obtenus, les lignes droites d'ajustement (*figure V.7*) ont été tracées. Il est notable qu'il existe une relation linéaire croissante entre les valeurs prédites et observées des paramètres technologiques. Il est remarquable également qu'il n'y a pas des points de données inhabituelles dans l'ensemble des données. On note aussi que la variation des points des données autour de la ligne de régression estimée est constante suggérant que l'hypothèse de l'égalité des variances d'erreur est raisonnable.







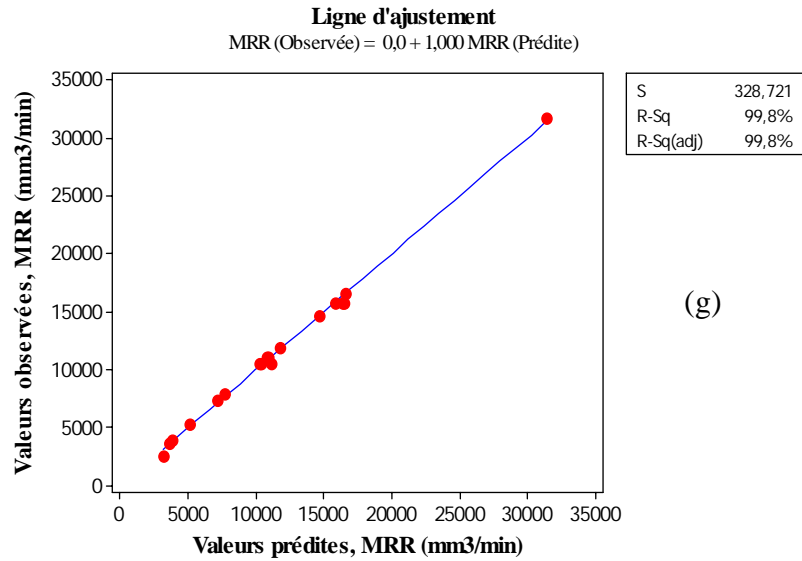
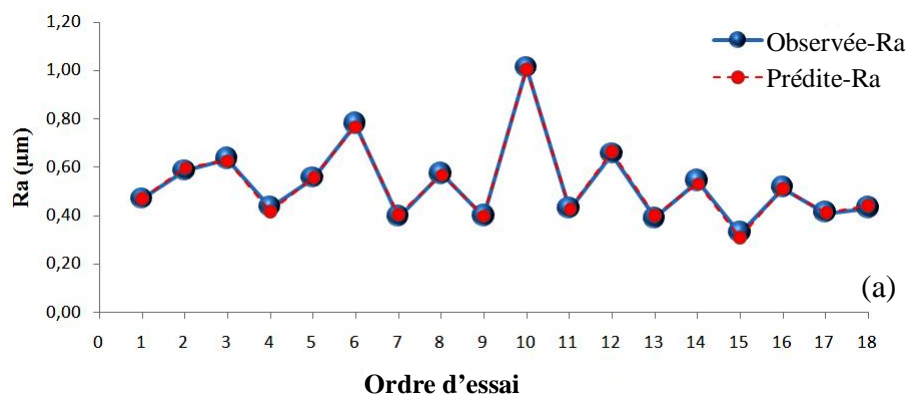
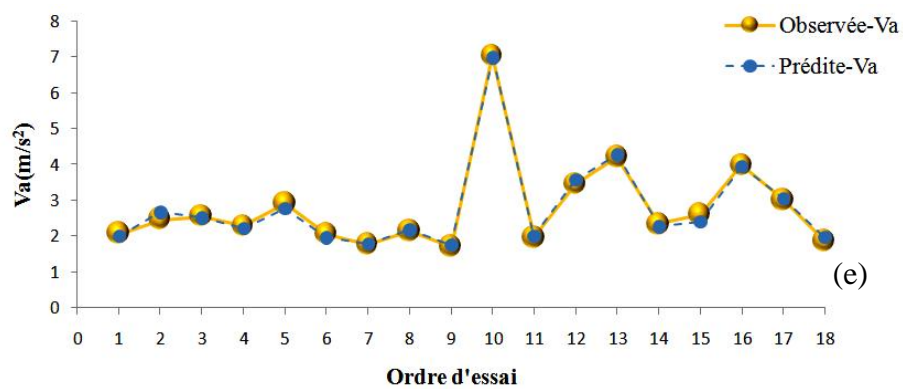
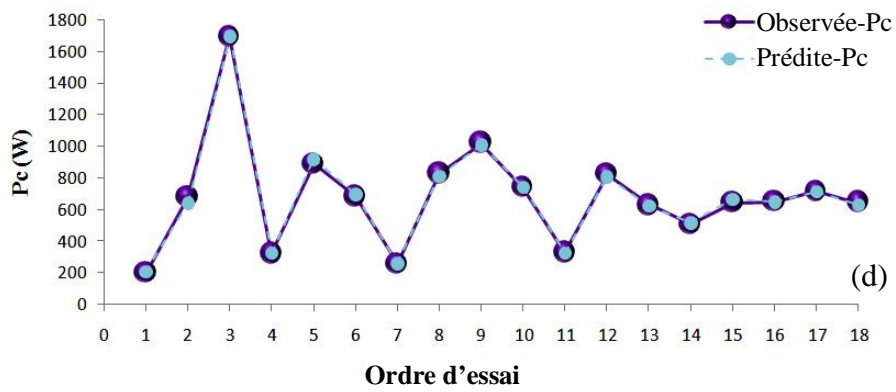
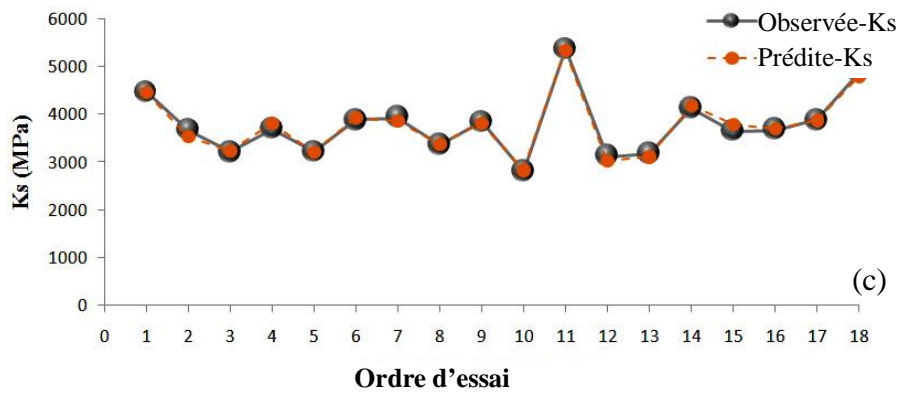
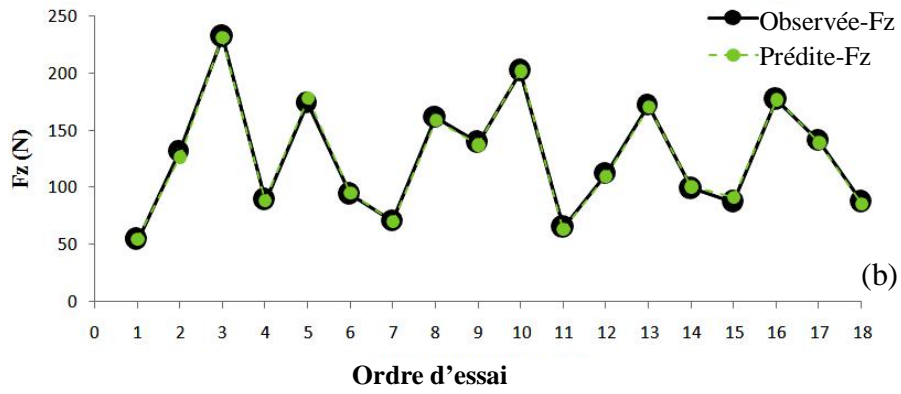


Figure V.7: Relation entre les valeurs des réponses observées et prédites: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.

Les figures V.8 (a, b, c, d, e, f et g) montrent également une comparaison entre les valeurs prédites des paramètres technologiques obtenues à partir des modèles de régression linéaire et celles observées. Les résultats de la comparaison prouvent que les valeurs prédites des paramètres technologiques sont très proches aux valeurs expérimentalement (bon accord entre valeurs prédites et observées). Les figures V.8 (a, b, c, d, e, f et g) indiquent que les modèles de régression linéaire sont capables de représenter le système sous le domaine expérimental donné.





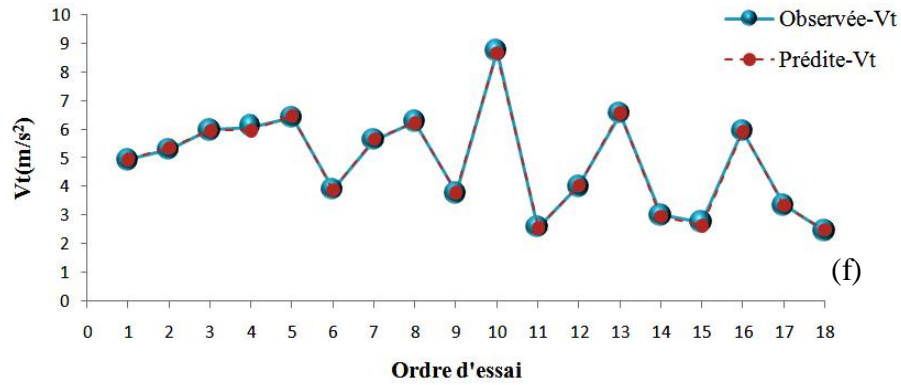


Figure V.8: Valeurs Observées vs. Prédites des paramètres technologiques: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.

V.10 Optimisation des paramètres d'usinage

V.10.1 Optimisation mono-objective des paramètres technologiques en utilisant la méthode de Taguchi

Le facteur de contrôle qui a la plus grande influence est déterminé en fonction de la valeur du delta comme indiqué dans le **tableau V.9** (a, b, c, d, e, f et g). Delta est égal à la différence entre le maximum et minimum de la moyenne des rapports S/N pour un facteur de contrôle particulier. Plus la valeur de delta est élevée, plus le facteur de contrôle est important. D'après l'analyse du **tableau V.9** (a, b, c, d, e, f et g), on observe clairement que le même classement par ordre décroissant d'influence de tous les facteurs principaux (χr , r , V_c , f , ap) sur les réponses (R_a , F_z , K_s , P_c , V_a , V_t et MRR) est obtenu par l'analyse de la variance et confirmé par le graphique de Pareto.

Les graphiques des rapports S/N pour les réponses sont présentés dans la **figure V.9**. Ces graphiques montrent la variation du rapport S/N en fonction du changement des niveaux des facteurs de contrôle d'un niveau à un autre. Quelle que soit la catégorie de caractéristique de performance, la valeur maximale du rapport S/N correspondante à une meilleure performance selon la méthode de Taguchi. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres de processus de coupe est le niveau avec le plus grand rapport S/N qui apparaît dans le **tableau V.9** (a, b, c, d, e, f et g) en rouge avec un style gras.

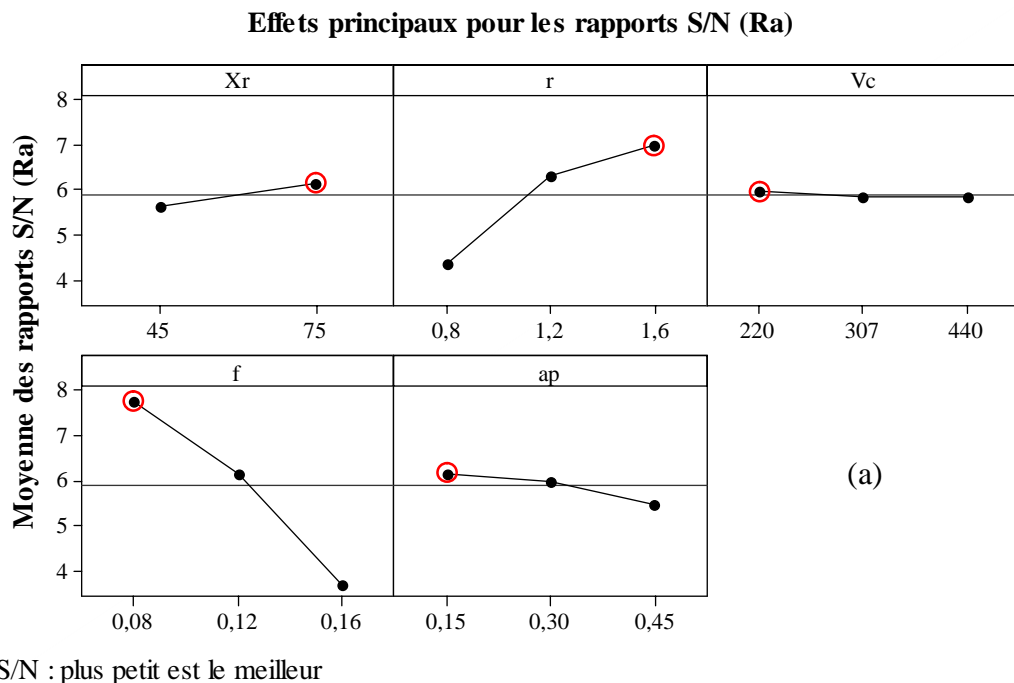
Les niveaux optimaux pour chaque facteur de contrôle peuvent être facilement déterminés à partir des graphiques de la **figure V.9**. Tous les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence en cercles rouge sur la **figure V.9**. D'après la **figure V.9.a**, les conditions optimales pour une rugosité de surface minimale sont la combinaison des niveaux ($\chi r2$, $r3$, $Vc1$, $f1$, $ap1$) : l'angle de direction principale de 75° , rayon du bec de 1.6 mm, vitesse de coupe de 220 m/min, vitesse d'avance de 0.08 mm/tr et profondeur de coupe de 0.15 mm. Cela implique que, pour réduire la rugosité de la surface, il est recommandé d'utiliser un rayon du bec plus grand et de réduire la vitesse d'avance et la profondeur de coupe, comme l'indiquent également **Meddour et al. [98]**. Ils ont recommandé un rayon du bec plus grand avec une faible vitesse d'avance pour obtenir une meilleure finition de surface lors d'un tournage dur à sec de l'acier AISI 52100 avec des plaquettes en céramique mixte.

Les **figures V.9** (b et d) montrent que les niveaux optimaux des paramètres de coupe afin de minimiser l'effort tangentiel (Fz) et la puissance de coupe (Pc) ont été spécifiés comme suit: $\chi r1$, $r2$, $Vc1$, $f1$, $ap1$, en d'autres termes, une valeur optimale de Fz et Pc est obtenu à un angle de direction principale de 45° , rayon du bec de 1.2 mm, vitesse de coupe de 220 m/min, vitesse d'avance de 0.08 mm/tr et profondeur de coupe de 0.15 mm. Dans le travail de **Hanafi et al. [60]**, il est indiqué que la puissance de coupe est minimisée lorsque les plus petites valeurs de profondeur de coupe, de vitesse d'avance et de vitesse de coupe sont sélectionnées. Les mêmes niveaux ont été choisis par **Bouزيد et al [97]** et **Hessainia et al. [99]** pour minimiser l'effort tangentiel.

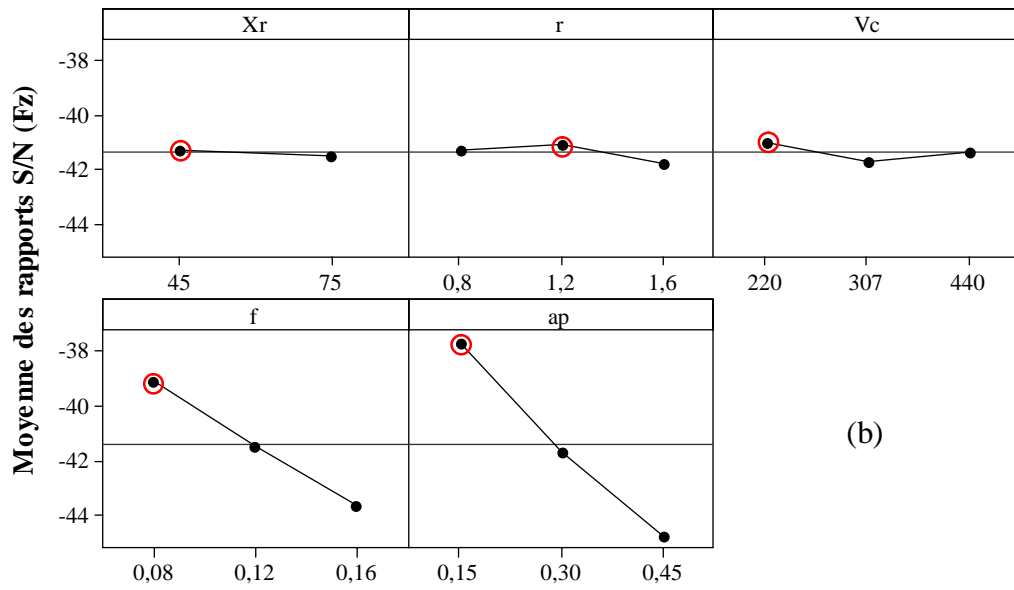
La **figure V.9** (c) montre que la valeur $S/N_{(Ks)}$ a augmenté lorsque la vitesse d'avance et la profondeur de coupe sont passées de 0.08 mm/tr à 0.16 mm/tr et de 0.15 mm à 0.45 mm respectivement. Ce résultat montre que la nécessité de choisir une vitesse d'avance et une profondeur de coupe plus élevées est révélée pour obtenir de petites valeurs de l'effort spécifique (Ks) car la vitesse d'avance et la profondeur de coupe sont trouvées dans le dénominateur de la formule de l'effort spécifique. Alors, le niveau optimal choisi pour les paramètres de coupe afin de réduire l'effort spécifique (Ks) est déterminé comme suit ($\chi r1, r2, Vc1, f3, ap3$): angle de direction principale de 45° , rayon du bec de 1.2 mm, vitesse de coupe de 220 m/min, vitesse d'avance de 0.16 mm/tr et profondeur de coupe de 0.45 mm.

Les régimes optimaux sélectionnés (**figure V.9** (e) et (f)) pour minimiser les vibrations de l'outil (Va, Vt) sont donnés comme suit : ($\chi r1, r3, Vc3, f1, ap1$) pour Va et ($\chi r2, r3, Vc3, f1, ap1$) pour Vt . On remarque que les régimes optimaux sont les mêmes pour : $r = 1.6\text{ mm}$, $Vc = 440\text{ m/min}$, $f = 0.08\text{ mm/tr}$, $ap = 0.15\text{ mm}$ mais ils sont différents seulement pour l'angle de direction principale : $\chi r = 45^\circ$ pour Va , $\chi r = 75^\circ$ pour Vt .

D'après la **figure V.9** (g) le régime optimal sélectionné par la méthode de Taguchi afin de maximiser le volume de copeau enlevé est donné comme suit ($Vc3, f3, ap3$): vitesse de coupe de 440 m/min, vitesse d'avance de 0.16 mm/tr et profondeur de coupe de 0.45 mm.



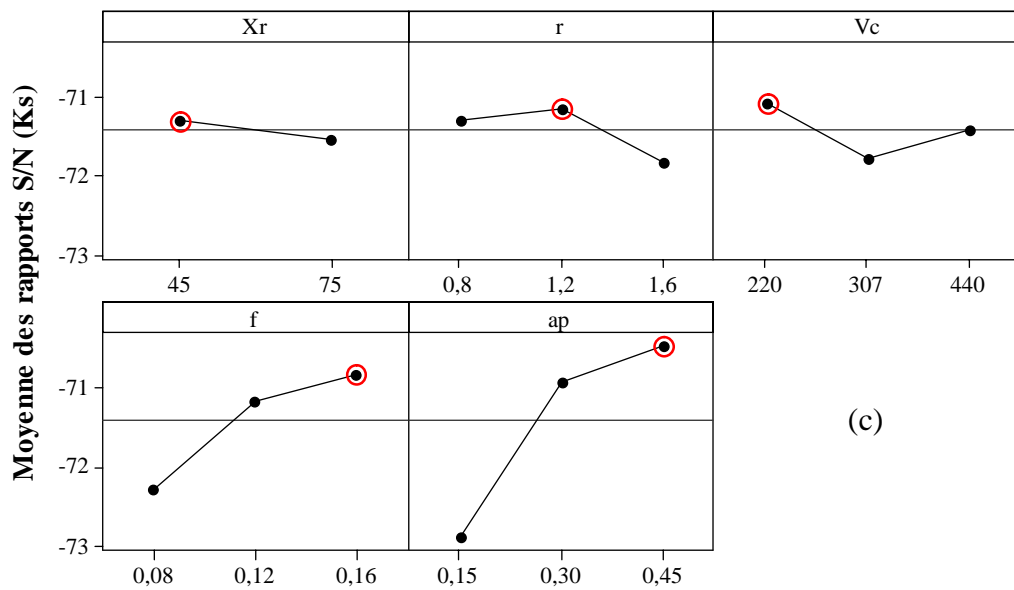
Effets principaux pour les rapports S/N (Fz)



(b)

S/N : plus petit est le meilleur

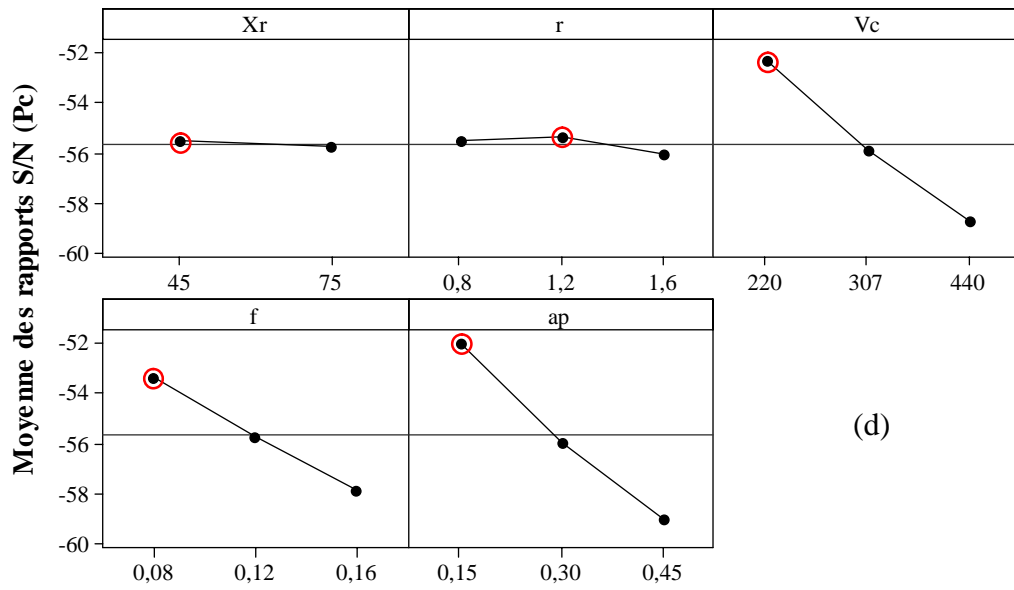
Effets principaux pour les rapports S/N (Ks)



(c)

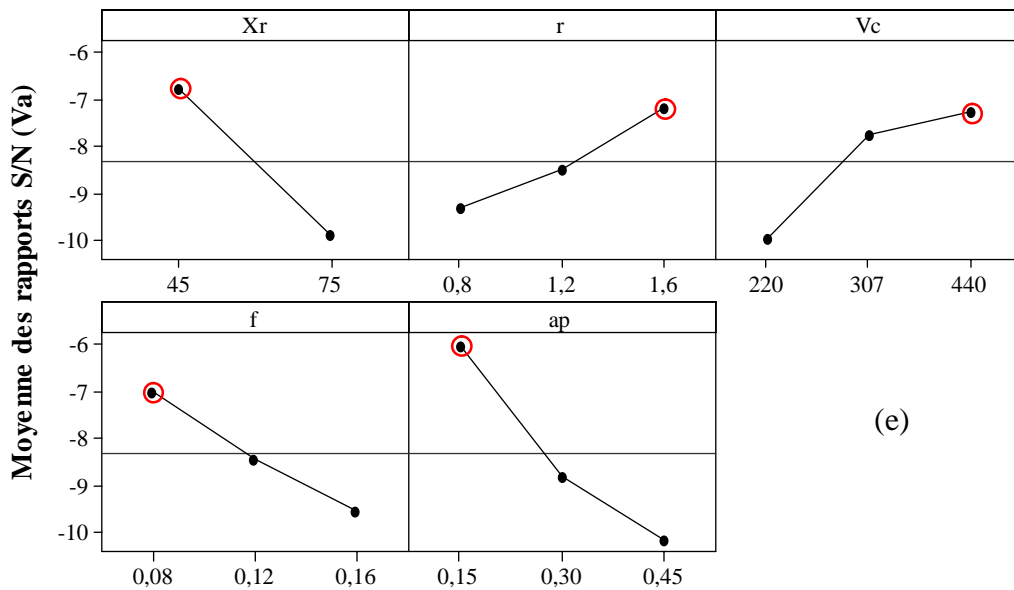
S/N : plus petit est le meilleur

Effets principaux pour les rapports S/N (Pc)

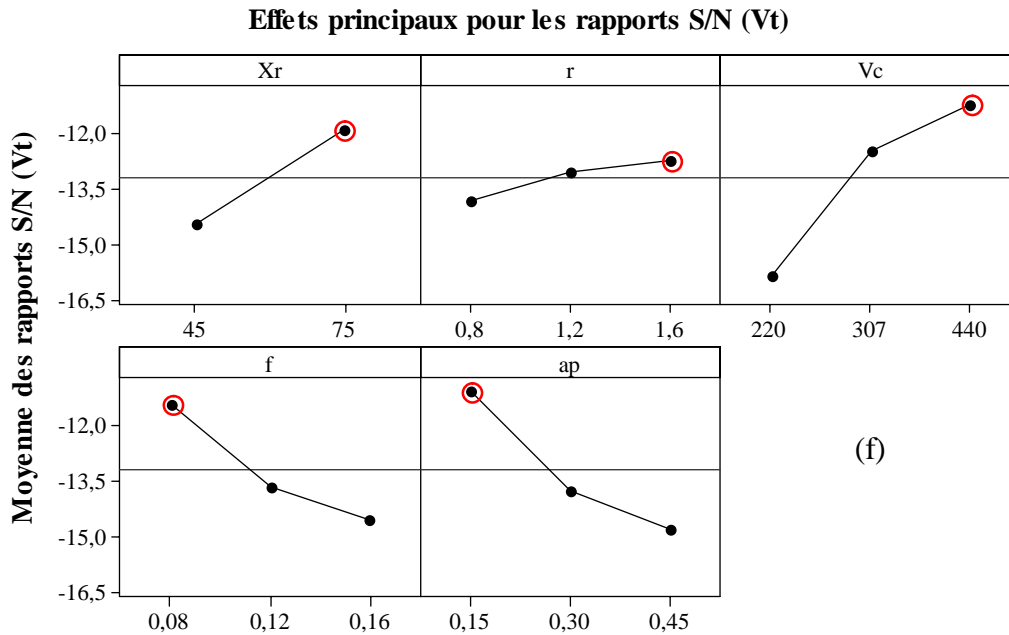


S/N : plus petit est le meilleur

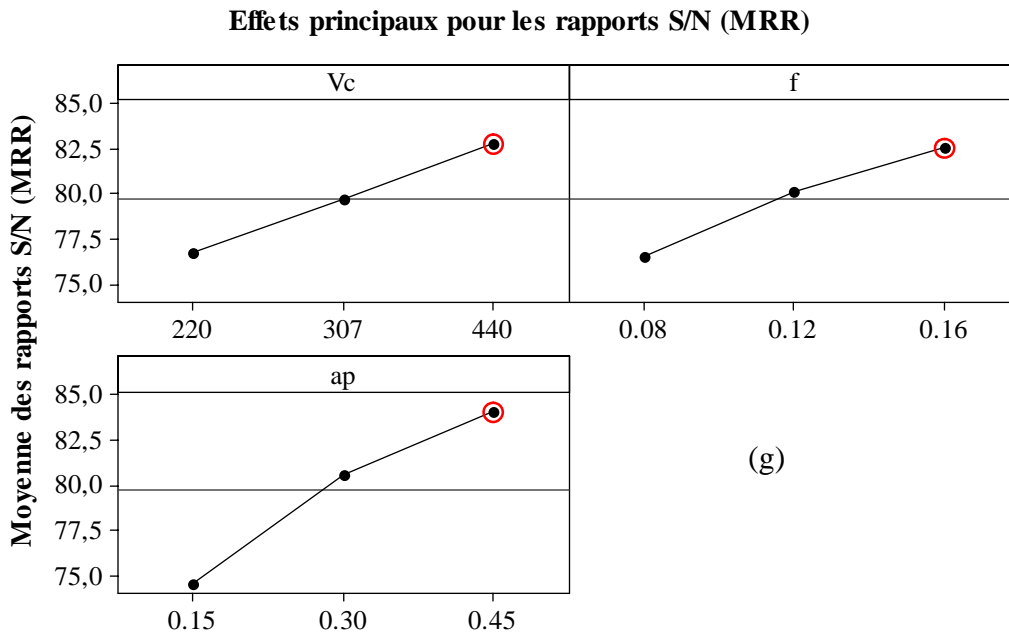
Effets principaux pour les rapports S/N (Va)



S/N : plus petit est le meilleur



S/N : plus petit est le meilleur



S/N : plus grand est le meilleur

Figure V.9: Effets principaux de S/N pour: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.

Tableau V.9: tableau de réponse des S/N pour: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.

(a)

Niveau	χr	r	Vc	f	ap
1	5.636	4.361	5.968	7.786	6.157
2	6.125	6.308	5.85	6.181	5.989
3	-	6.973	5.823	3.675	5.496
Delta	0.489	2.611	0.145	4.11	0.661
Rang	4	2	5	1	3

(b)

Niveau	χr	r	Vc	f	ap
1	-41.26	-41.24	-41.03	-39.04	-37.65
2	-41.49	-41.09	-41.72	-41.45	-41.69
3	-	-41.77	-41.36	-43.62	-44.77
Delta	0.23	0.68	0.69	4.58	7.11
Rang	5	4	3	2	1

(c)

Niveau	χr	r	Vc	f	ap
1	-71.3	-71.29	-71.08	-72.27	-72.89
2	-71.53	-71.14	-71.77	-71.16	-70.91
3	-	-71.82	-71.41	-70.83	-70.46
Delta	0.23	0.68	0.69	1.44	2.43
Rang	5	4	3	2	1

(d)

Niveau	χr	r	Vc	f	ap
1	-55.51	-55.5	-52.32	-53.3	-51.91
2	-55.74	-55.35	-55.9	-55.71	-55.95
3	-	-56.03	-58.67	-57.88	-59.02
Delta	0.23	0.68	6.35	4.58	7.11
Rang	5	4	2	3	1

(e)

Niveau	χr	r	Vc	f	ap
1	-6.749	-9.287	-9.948	-6.973	-5.997
2	-9.865	-8.463	-7.739	-8.427	-8.776
3	-	-7.171	-7.234	-9.522	-10.148
Delta	3.116	2.117	2.715	2.549	4.15
Rang	2	5	3	4	1

(f)

Niveau	χr	r	Vc	f	ap
1	-14.44	-13.8	-15.84	-11.4	-11.02
2	-11.92	-13.03	-12.46	-13.62	-13.72
3	-	-12.7	-11.24	-14.52	-14.8
Delta	2.52	1.1	4.6	3.12	3.78
Rang	4	5	1	3	2

(g)

Niveau	Vc	f	ap
1	76.8	76.59	74.58
2	79.69	80.11	80.61
3	82.82	82.61	84.13
Delta	6.02	6.02	9.54
Rang	3	2	1

V.10.2 Optimisation multi-objective en utilisant l'Analyse Relationnelle

Grise (GRA)

L'identification de la combinaison optimale des niveaux des paramètres d'usinage en utilisant l'Analyse Relationnelle Grise (GRA) a été effectuée sur la base du rapport S/N des réponses mesurées et calculées ; rugosité de surface (Ra) et volume de copeau enlevé (MRR), respectivement. L'amélioration simultanée en termes de maximisation de la qualité de surface et de la productivité est proposée comme une fonction objective. L'utilisation de cette technique d'optimisation comprend les étapes suivantes :

- ✓ **Étape 1:** La normalisation des rapports S/N pour Ra et MRR dans l'intervalle entre zéro et un en utilisant *l'équation V.5* (Le plus grand-le-meilleur) a été effectué pour la génération relationnelle grise. Les données normalisées sont données dans le **tableau V.10**.
- ✓ **Étape 2:** Calcul de $\Delta_{0i}(k)$ pour les valeurs normalisées du rapport S/N (Ra , MRR) en utilisant *l'équation V.7* est nécessaire pour le calcul des coefficients relationnels gris (GRC). Les coefficients relationnels gris (GRC) ont été calculés en utilisant *l'équation V.6* pour la détermination du grade relationnel gris (GRG). $\Delta_{0i}(k)$ et les valeurs du grade relationnel gris (GRC) sont données dans le **tableau V.10**.

Tableau V.10: Résultats de la génération relationnelle grise, calcul de $\Delta_{0i}(k)$, coefficient relationnel gris (GRC) et grade relationnel gris (GRG).

Essai N°.	Génération Relationnelle Grise		Calcul de $\Delta_{0i}(k)$		Coefficients Relationnels Gris		Grade Relationnel Gris
	S/N (Ra)	S/N (MRR)	S/N (Ra)	S/N (MRR)	S/N (Ra)	S/N (MRR)	GRG
	plus grand-le-meilleur						
Séquence idéale	1	1	1	1	1	1	
1	0,708	0,000	0,292	1,00	0,632	0,333	0,483
2	0,531	0,576	0,469	0,42	0,516	0,541	0,529
3	0,470	1,000	0,530	0,00	0,485	1,000	0,743
4	0,774	0,279	0,226	0,72	0,689	0,409	0,549
5	0,578	0,739	0,422	0,26	0,543	0,657	0,600
6	0,306	0,558	0,694	0,44	0,419	0,531	0,475
7	0,851	0,163	0,149	0,84	0,771	0,374	0,572
8	0,550	0,692	0,450	0,31	0,526	0,619	0,573
9	0,845	0,721	0,155	0,28	0,763	0,642	0,703
10	0,000	0,721	1,000	0,28	0,333	0,642	0,488
11	0,786	0,134	0,214	0,87	0,700	0,366	0,533
12	0,445	0,721	0,555	0,28	0,474	0,642	0,558
13	0,858	0,605	0,142	0,39	0,779	0,559	0,669
14	0,598	0,413	0,402	0,59	0,554	0,460	0,507
15	1,000	0,558	0,000	0,44	1,000	0,531	0,765
16	0,638	0,558	0,362	0,44	0,580	0,531	0,555
17	0,818	0,576	0,182	0,42	0,733	0,541	0,637
18	0,780	0,442	0,220	0,56	0,695	0,473	0,584

- ✓ **Étape 3:** le grade relationnel gris (GRG) a été calculé par l'équation V.10. Les résultats calculés de GRG sont présentés dans le *tableau V.10*. Le calcul de (GRG) implique que l'optimisation multi-objective est convertie en un seul objectif d'optimisation équivalent.
- ✓ **Étape 4:** le tracé des effets principaux pour (GRG) a été tracé afin de sélectionner la combinaison des niveaux optimaux (*figure V.10*). La moyenne du rapport (GRG) pour chaque niveau des paramètres d'usinage est présentée dans le *tableau V.11*. Dans l'analyse relationnelle grise, la valeur la plus élevée de (GRG) correspond à la meilleure combinaison des paramètres d'usinage. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres d'usinage est le niveau avec la plus grande valeur (GRG). Ainsi, on peut conclure que le meilleur niveau pour chaque paramètre d'usinage a été trouvé

comme suit (**figure V.10**): ($\chi r2$, $r3$, $Vc3$, $f1$, $ap3$), en d'autres termes, la combinaison des niveaux optimaux pour (Ra et MRR) a été obtenue à un angle de direction principale de 75° , rayon du bec de 1.6 mm, vitesse de coupe de 440 m/min, vitesse d'avance de 0.08 mm/tr et profondeur de coupe de 0.45 mm. Les résultats de l'utilisation de cette combinaison de niveaux optimaux sont: $Ra = 0,41 \mu\text{m}$ et $MRR = 15840 \text{ mm}^3/\text{min}$.

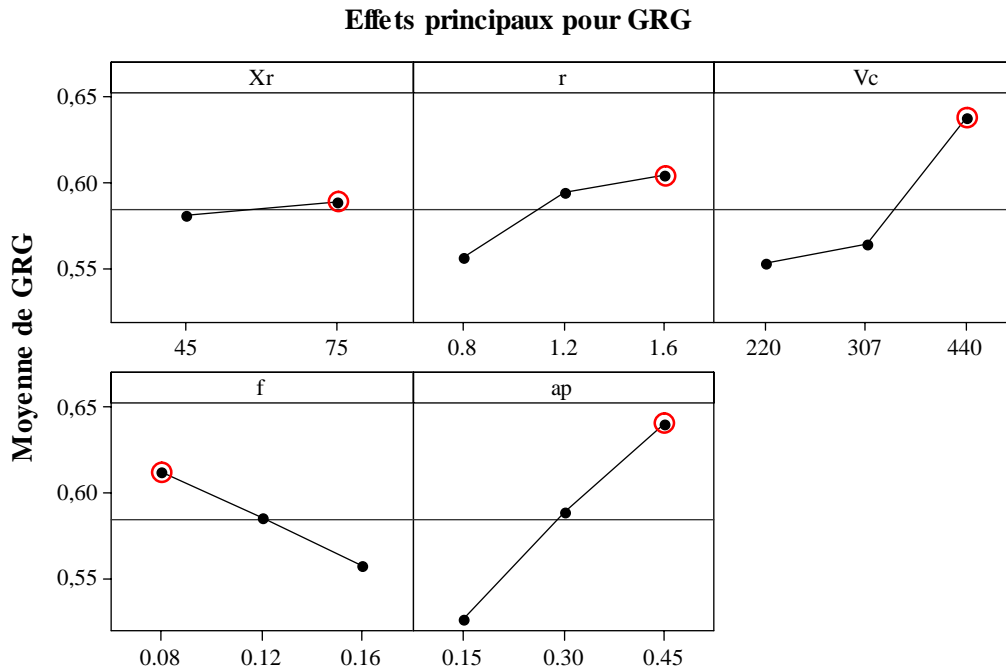


Figure V.10 : Effets principaux pour GRG.

Tableau V.11: Moyenne du rapport GRG pour chaque niveau des paramètres d'usinage.

Niveau	χr	r	Vc	f	ap
1	0.580	0.555	0.552	0.611	0.525
2	0.589	0.594	0.563	0.585	0.588
3	-	0.604	0.637	0.556	0.639
Delta	0.009	0.049	0.085	0.055	0.114
Rang	5	4	2	3	1

V.11 Tests de confirmation

V.11.1 Tests de confirmation du régime optimale pour l'optimisation mono-objective

Une fois que le niveau optimal des paramètres d'usinage est sélectionné, l'étape finale est très essentielle et qui consiste à réaliser une expérience de confirmation pour le régime optimal des paramètres d'usinage. Le but de cette expérience de confirmation est de prévoir et de vérifier l'amélioration des caractéristiques de qualité. Le test de confirmation a été effectué en utilisant le niveau optimal des paramètres d'usinage. La valeur estimée $\hat{\eta}$ du rapport S/N des réponses en utilisant le niveau optimal des paramètres d'usinage peut être calculé par l'équation (V.25) [88]:

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (\text{V.25})$$

Où :

$\hat{\eta}$: Valeur attendue de la réponse dans les conditions optimales.

$\bar{\eta}_i$: Moyennes des rapports S/N au niveau optimal des facteurs.

η_m : Moyenne de la somme de toutes les réponses des essais.

q: Nombre des facteurs significatifs.

Les résultats du test de validation des niveaux des paramètres de coupe optimaux sélectionnés pour minimiser les réponses, tels que la rugosité de surface, l'effort tangentiel, l'effort spécifique, la puissance de coupe, la vibration axiale et la vibration tangentielle sont illustrés dans le **tableau V.12** (a, b, c, d, e et f), respectivement. Sur la base de ces résultats, un accord remarquable est remarqué entre les valeurs trouvées expérimentalement et calculé par la formule d'estimation, alors que le rapport S/N des résultats obtenus expérimentalement lors de l'utilisation des niveaux optimaux par rapport aux tests initiaux a été améliorés avec 2.15 dB pour (Ra), 7.55 dB pour (Fz), 1.56 dB pour (Ks), 10.44 dB pour (Pc), 3.72 dB pour (Va) et 1.85 dB pour (Vt). Selon les tests de confirmation, Les réponses de sortie telles que (Ra , Fz , Ks , Pc , Va et Vt) sont améliorées approximativement de 1.28, 2.38, 1.19, 3.32, 1.53 et 1.23 fois, respectivement.

Un bon accord entre valeurs trouvées expérimentalement et la valeur prédite du volume de copeau enlevé, sont illustrés dans le **tableau V.12** (g). L'amélioration du rapport S/N du niveau de paramètre initial au niveau du paramètre optimal est de 9.15 dB. Selon l'essai de confirmation, le volume de copeau enlevé augmente 2.86 fois.

Tableau V.12: Résultats des tests de confirmation pour: (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) effort spécifique, (d) puissance de coupe, (e) Vibration axiale, (f) vibration tangentielle et (g) volume de copeau enlevé.

(a)			
	Paramètres de coupe	Paramètres de coupe optimaux	
	initiaux	Prédit	Expérimental
Niveau	$\chi r_2 r_2 Vc_2 f_2 ap_2$	$\chi r_2 r_3 Vc_1 f_1 ap_1$	$\chi r_2 r_3 Vc_1 f_1 ap_1$
Rugosité de surface (μm)	0.50	-	0.39
Rapport S/N (dB)	6.02	8.88	8.17
Amélioration du rapport S/N		2.15	

(b)			
	Paramètres de coupe	Paramètres de coupe optimaux	
	initiaux	Prédit	Expérimental
Niveau	$\chi r_2 r_2 Vc_2 f_2 ap_2$	$\chi r_1 r_2 Vc_1 f_1 ap_1$	$\chi r_1 r_2 Vc_1 f_1 ap_1$
Effort tangentiel (N)	131.6	-	55.16
Rapport S/N (dB)	-42.38	-34.59	-34.83
Amélioration du rapport S/N		7.55	

(c)			
	Paramètres de coupe	Paramètres de coupe optimaux	
	initiaux	Prédit	Expérimental
Niveau	$\chi r_2 r_2 Vc_2 f_2 ap_2$	$\chi r_1 r_2 Vc_1 f_3 ap_3$	$\chi r_1 r_2 Vc_1 f_3 ap_3$
Effort spécifique (MPa)	3655.55	-	3049.63
Rapport S/N (dB)	-71.25	-69.17	-69.68
Amélioration du rapport S/N		1.56	

(d)			
	Paramètres de coupe	Paramètres de coupe optimaux	
	initiaux	Prédit	Expérimental
Niveau	$\chi r_2 r_2 Vc_2 f_2 ap_2$	$\chi r_1 r_2 Vc_1 f_1 ap_1$	$\chi r_1 r_2 Vc_1 f_1 ap_1$
Puissance de coupe (W)	673.35	-	202.25
Rapport S/N (dB)	-56.56	-45.91	-46.11
Amélioration du rapport S/N		10.44	

(e)

	Paramètres de coupe	Paramètres de coupe optimaux	
	initiaux	Prédit	Expérimental
Niveau	$\chi r_2 r_2 Vc_2 f_2 ap_2$	$\chi r_1 r_3 Vc_3 f_1 ap_1$	$\chi r_1 r_3 Vc_3 f_1 ap_1$
Vibration axiale (m/s ²)	2.44	-	1.59
Rapport S/N (dB)	-7.74	-4.43	-4.02
Amélioration du rapport S/N		3.72	

(f)

	Paramètres de coupe	Paramètres de coupe optimaux	
	initiaux	Prédit	Expérimental
Niveau	$\chi r_2 r_2 Vc_2 f_2 ap_2$	$\chi r_2 r_3 Vc_3 f_1 ap_1$	$\chi r_2 r_3 Vc_3 f_1 ap_1$
Vibration tangentielle (m/s ²)	2.56	-	2.07
Rapport S/N (dB)	-8.16	-6.03	-6.31
Amélioration du rapport S/N		1.85	

(g)

	Paramètres de coupe	Paramètres de coupe optimaux	
	initiaux	Prédit	Expérimental
Niveau	$Vc_2 f_2 ap_2$	$Vc_3 f_3 ap_3$	$Vc_3 f_3 ap_3$
MRR (mm ³ /min)	11052	-	31680
Rapport S/N (dB)	80.87	89.82	90.02
Amélioration du rapport S/N		9.15	

V.11.2 Tests de confirmation du régime optimale pour l'optimisation multi-objective

Afin de confirmer le régime optimal des paramètres de coupe sélectionnés par l'analyse relationnelle grise (GRA) pour l'amélioration simultanée de la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé, une comparaison a été réalisée entre les valeurs de GRG obtenues à partir de l'expérience réalisée avec le régime optimal avec celle prédite ($\hat{\eta}$) en utilisant l'équation (V.25). Sur la base des résultats du **tableau V.13**, un accord notable a été noté entre la valeur trouvée expérimentalement (0.69) avec celle calculée (0.74) par l'équation (V.25). Alors que le grade relationnel gris (GRG) a été amélioré lors de l'utilisation des niveaux optimaux par rapport aux tests initiaux par 0.13. Selon les essais de confirmation, la rugosité de la surface et le volume de copeau enlevé ont été améliorés environ 1.21, 0.69 fois, respectivement.

Tableau V.13: Résultats des expériences de confirmation de GRG.

	Paramètres de coupe	Paramètres de coupe optimaux	
	initiaux	Prédit	Expérimental
Niveau	$\chi r_2 r_3 V c_2 f_2 a p_2$	$\chi r_2 r_3 V c_3 f_1 a p_3$	$\chi r_2 r_3 V c_3 f_1 a p_3$
Ra (μm)	0.50	-	0.41
MRR (mm^3/min)	11052	-	15840
GRG	0.56	0.74	0.69
Amélioration du GRG		0.13	

V.12 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté l'application de deux méthodes d'optimisation mono et multi-objective en utilisant la méthode de Taguchi et l'analyse relationnelle grise (GRA) respectivement pour optimiser les paramètres de coupe. Les conclusions importantes sont mentionnées dans les points spécifiques suivants:

- L'utilisation d'un plan réduit mixte orthogonal de Taguchi pour réduire le nombre des expériences afin de déterminer les paramètres de coupe optimale est rapportée.
- Sur la base de l'analyse d'ANOVA du rapport $S/N_{(Ra)}$, on constate que la vitesse d'avance est le paramètre le plus influençant sur la rugosité de la surface suivie par le rayon du bec de l'outil et de l'interaction ($f \times ap$) avec des contributions de 50.21%, 20.27 % et 12.69%, respectivement.
- L'effort tangentiel est fortement affecté par la profondeur de coupe. Sa contribution est d'environ 60.9%, suivie par la vitesse d'avance avec une contribution de 19.5%.
- La profondeur de coupe a le plus grand effet sur l'effort spécifique avec une contribution de 51.91% suivie par la vitesse d'avance avec un impact de 18.27% et d'une contribution de 10.3% pour l'interaction ($\chi r \times Vc$).
- Les paramètres de coupe (profondeur de coupe et vitesse de coupe) sont les plus significatifs avec la contribution respective de (44.22, 34.14)% sur la puissance de coupe. La vitesse d'avance présente une signification statistique avec une contribution de 18.33%.
- La profondeur de coupe et l'angle de direction principale sont les paramètres qui viennent en première position d'influence sur la vibration axiale avec une contribution de 30.74% et 25.99% respectivement. Les facteurs (Vc, f, r) viennent en deuxième position d'influence avec un impact de 11.85%, 11.59%, 8% respectivement.

- La vitesse de coupe et la profondeur de coupe sont les paramètres qui viennent en première position d'influence sur la vibration tangentielle avec une contribution de 32.42% et 23.79% respectivement. L'avance vient en deuxième position d'influence avec une contribution de 16.14%. Le facteur (χr) vient en troisième position d'influence avec un impact de 15.78%.
- La profondeur de coupe est le facteur le plus significatif sur le volume de copeaux enlevé avec la contribution respective de 54.85%. La vitesse d'avance suivie par la vitesse de coupe présente une signification statistique avec une contribution de 21.84% et 21.64%, respectivement.
- Les résultats obtenus par l'analyse d'ANOVA pour le rapport S/N des paramètres technologiques ont été confirmés par un graphique de Pareto et une analyse du rapport S/N des réponses, l'effet des interactions sur les réponses a été vérifié par des tracés des surfaces de réponse en 3D et des contours.
- Les cartes topographiques tridimensionnelles de la surface usinée obtenue par plateforme optique de métrologie modulaire à une grande importance dans l'étude de la rugosité de surface.
- Les modèles mathématiques élaborés pour les réponses (Ra , Fz , Ks , Pc , Va , Vt et MRR) sont très fiables et représentent un intérêt industriel important, car ils contribuent à faire des prédictions dans la gamme des niveaux des paramètres choisie dans cette étude.
- La méthode d'optimisation mono-objective de Taguchi a été exploitée avec succès pour identifier les paramètres de coupe optimale. De plus, le rapport S/N est le critère important dans cette méthode.
- Sur la base de l'approche d'optimisation de Taguchi, les paramètres de coupe optimale lors du tournage de l'acier AISI D3 avec des plaquettes en céramique mixtes CC650 pour minimiser la rugosité de surface sont comme suit: $\chi r = 75^\circ$, $r = 1.6$ mm, $Vc = 220$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm.
- De même, en minimisant l'effort tangentielle et la puissance de coupe pour un régime optimal de : $\chi r = 45^\circ$, $r = 1.2$ mm, $Vc = 220$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm.
- Le régime optimal pour réduire l'effort spécifique est donné comme suit: $\chi r = 45^\circ$, $r = 1.2$ mm, $Vc = 220$ m/min, $f = 0.16$ mm/tr et $ap = 0.45$ mm.

- Les régimes optimaux sélectionnés pour minimiser les vibrations de l'outil (V_a , V_t) sont donnés comme suit : (χr_1 , r_3 , V_{c3} , f_1 , ap_1) pour V_a et (χr_2 , r_3 , V_{c3} , f_1 , ap_1) pour V_t . On remarque que les régimes optimaux sont les mêmes pour : $r = 1.6$ mm, $V_c = 440$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr, $ap = 0.15$ mm mais ils sont différents seulement pour l'angle de direction principale : $\chi r = 45^\circ$ pour V_a , $\chi r = 75^\circ$ pour V_t .
- Le régime optimale sélectionné pour maximiser le volume de copeau enlevé est donné comme suit : $V_c = 440$ m/min, $f = 0.16$ mm/tr et $ap = 0.45$ mm.
- Les réponses optimisées trouvées par l'utilisation de niveaux optimaux pour chaque réponse sont: $R_a = 0.39$ μm , $F_z = 55.16$ N, $K_s = 3049.63$ MPa, $P_c = 202.25$ W, $V_a = 1.59$ m/s², $V_t = 2.07$ m/s² et $MRR = 31680$ mm³/min.
- L'analyse relationnelle grise (GRA) a été utilisée pour résoudre le problème complexe d'optimisation simultanée de plusieurs réponses en convertissant l'optimisation multi-objective en un seul objectif d'optimisation équivalent.
- L'optimisation équivalente d'un objectif unique dans cette analyse s'appelle le grade relationnel gris (GRG). La valeur la plus élevée de ce dernier correspond à la combinaison des niveaux optimaux des paramètres d'usinage. Par conséquent, la combinaison des niveaux optimaux pour une amélioration simultanée de R_a et MRR a été obtenue à: (χr_2 , r_3 , V_{c3} , f_1 , ap_3); $\chi r = 75^\circ$, $r = 1.6$ mm, $V_c = 440$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.45$ mm.
- Les réponses optimisées trouvées par l'utilisation de niveaux optimaux sélectionnés par analyse relationnelle grise sont ($R_a = 0.41$ μm et $MRR = 15840$ mm³/min).
- Un accord notable est remarqué entre les valeurs trouvées expérimentalement et calculé par la formule d'estimation, alors que le rapport S/N des résultats obtenus expérimentalement lors de l'utilisation des niveaux optimaux par rapport aux tests initiaux a été améliorés avec 2.15 dB pour (R_a), 7.55 dB pour (F_z), 1.56 dB pour (K_s), 10.44 dB pour (P_c), 3.72 dB pour (V_a), 1.85 dB pour (V_t) et 9.15 dB pour (MRR). Selon les tests de confirmation, Les réponses de sortie telles que (R_a , F_z , K_s , P_c , V_a , V_t et MRR) sont améliorées approximativement de 1.28, 2.38, 1.19, 3.32, 1.53, 1.23 et 2.86 fois, respectivement.
- Le grade relationnel gris (GRG) a été amélioré lors de l'utilisation des niveaux optimaux par rapport aux tests initiaux par 0.13. Selon les essais de confirmation, la rugosité de la surface et le volume de copeau enlevé ont été améliorés environ 1.21, 0.69 fois, respectivement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le choix des conditions de coupe les plus convenables nécessite une étude approfondie des effets gouvernant le processus de coupe et de l'analyse des phénomènes qui trouvent naissance au cours de l'usinage orienté vers la modélisation des paramètres technologiques et l'optimisation des conditions de coupe. La recherche de l'optimisation ne peut se passer de la connaissance des contraintes de production inhérentes à la nature du procédé, celles-ci dépendent des performances propres aux moyens mis en œuvre et en particulier de l'état du couple outil-matière. C'est dans ce contexte que nous avons exploré, modéliser et optimiser un certain nombre de phénomènes qui interviennent lors de l'usinage de l'acier AISI D3 avec des outils de coupe en carbure métallique revêtus en CVD et la céramique mixte.

Les résultats trouvés dans le cadre de ce travail relèvent à la fois de perspectives d'applications industrielles ainsi synthétisées ci-dessous :

- D'après les essais préliminaire du couple d'usinage (l'acier AISI D3/carbure métallique revêtu en CVD), on a trouvé que la vitesse de coupe possède une influence significative sur la rugosité de surface, car l'état de surface s'améliore lorsque la vitesse de coupe augmente, par contre l'élévation de l'avance d'outil engendre des mauvais états de surface.
- L'évolution des composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) et l'effort résultant (F_r) en fonction des paramètres de coupe est presque la même. La hausse de l'avance conduit à une augmentation des efforts de coupe. Cependant, l'augmentation de la profondeur de passe mène à une élévation plus importante de (F_x , F_y , F_z et $F_{rés}$) comparant à l'effet de l'avance.
- La vitesse de coupe de 200 m/min correspond à une valeur minimale de 4788.75 MPa de l'effort spécifique (K_s). Par contre, pour des faibles valeurs d'avance et profondeur de passe on enregistre des pressions extrêmement élevées. Par conséquent, il est déconseillé de travailler avec des faibles valeurs d'avance et profondeur de passe, et il est recommandé de chercher un compromis entre la diminution de la pression de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance et aussi entre l'effort spécifique, la profondeur de passe et l'usure de l'outil.
- L'augmentation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe mène à l'élévation de la puissance de coupe et le volume de copeau enlevé avec une influence majeure de ap et V_c par rapport à f .
- la tenue de la plaquette en carbure métallique avec un revêtement en CVD (GC4215) lors du tournage à sec de l'acier AISI D3 est de 24min pour $VB_{adm}=0.3$ mm.
- Le temps d'usinage à un effet important sur la rugosité de surface. Car avec son élévation, la qualité de surface se dégrade. Cette dégradation est étroitement liée avec l'usure.

- L'étude de l'évolution de la rugosité de surface en fonction de l'usure en dépouille montre que l'augmentation de l'usure engendre une dégradation de l'état de surface. Malgré la valeur de l'usure dépasse 0,35mm, la rugosité de surface ne dépasse pas le un micron ($<1\mu\text{m}$). Ce qui nous pousse à adopter un autre critère d'usure $VB = [0.4]$ mm pour les travaux d'ébauchage. Cela a pour effet d'augmenter la durée de vie de l'outil.
- L'usure de l'outil de coupe et le temps d'usinage ont un impact significatif sur les composantes de l'effort de coupe, en particulier l'effort radial. On note que l'effort radial (F_y) est le plus sensible à l'usure de l'outil par rapport à l'effort axial et tangentiel.
- Basant sur le plan factoriel complet de 64 essais, l'analyse de la variance (ANOVA) montre que l'avance est le facteur le plus dominant sur la rugosité de surface et elle représente une contribution de 59.496% suivie de la profondeur de coupe de 16.226% et de la vitesse de coupe avec une contribution de 11.749%.
- L'effort de coupe tangentiel est fortement affecté par la profondeur de coupe et représente une contribution de 62.613%, respectivement.
- L'analyse de la variance (ANOVA) montre que la profondeur de passe (ap) a un grand effet significatif sur le volume de copeau enlevé, sa contribution est de 43.57%, suivi par la vitesse de coupe (V_c) puis par la vitesse d'avance (f) avec une contribution 31.74% et 13.34%,
- Les régressions quadratiques ont un grand intérêt industriel car ils ont été utilisés pour prédire la rugosité de surface, l'effort de coupe tangentiel et le volume de copeau enlevé dans les intervalles du domaine d'étude.
- Les valeurs des coefficients de détermination trouvés sont élevées suggérant une haute signification des modèles et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.
- Les paramètres de coupe optimaux sont : vitesse de coupe (V_c) de 400 m/min, une vitesse d'avance (f) de 0.08 mm/tr, une profondeur de coupe (ap) de 0.4 mm. La rugosité de surface et le volume de copeau enlevé obtenus par l'utilisation du régime de coupe optimal sélectionné par la fonction de désirabilité sont: $Ra = 1.06 \mu\text{m}$, $MRR = 13720 \text{ mm}^3/\text{min}$, avec une désirabilité composite = 0.98.
- L'application de la technique (ANN) sur un plan factoriel complet d'expériences est capable de donner des résultats très satisfaisants. Les modèles obtenus ont été testés par une partie du plan expérimental qui n'a été pas introduite lors de l'apprentissage du réseau.
- La comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimés par les modèles (RSM et ANN) montre clairement que, les modèles issus de la méthode des réseaux de neurones donnent des résultats excellents ($R^2_{(Ra)} = 98.82\%$ et $R^2_{(MRR)} = 99.98\%$) par rapport aux

modèles issus par la méthodologie de surface de réponse ($R^2_{(Ra)} = 89.08\%$ et $R^2_{(MRR)} = 99.61\%$).

- La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par (RSM et ANN) nous a conduits à conclure que la méthode (ANN) est plus robuste et plus fiable par rapport à la méthodologie de la surface de réponse.
- L'utilisation d'un plan réduit mixte orthogonal de Taguchi pour réduire le nombre des expériences afin de déterminer les paramètres de coupe optimale est rapportée.
- Sur la base de l'analyse d'ANOVA du rapport $S/N_{(Ra)}$, on constate que la vitesse d'avance est le paramètre le plus influençant sur la rugosité de la surface suivie par le rayon du bec de l'outil et de l'interaction ($f \times ap$) avec des contributions de 50.21%, 20.27 % et 12.69%, respectivement.
- L'effort tangentiel est fortement affecté par la profondeur de coupe. Sa contribution est d'environ 60.9%, suivie par la vitesse d'avance avec une contribution de 19.5%.
- La profondeur de coupe a le plus grand effet sur l'effort spécifique avec une contribution de 51.91% suivie par la vitesse d'avance avec un impact de 18.27% et d'une contribution de 10.3% pour l'interaction ($\chi r \times Vc$).
- Les paramètres de coupe (profondeur de coupe et vitesse de coupe) sont les plus significatifs avec la contribution respective de (44.22, 34.14)% sur la puissance de coupe. La vitesse d'avance présente une signification statistique avec une contribution de 18.33%.
- La profondeur de coupe et l'angle de direction principale sont les paramètres qui viennent en première position d'influence sur la vibration axiale avec une contribution de 30.74% et 25.99% respectivement. Les facteurs (Vc, f, r) viennent en deuxième position d'influence avec un impact de 11.85%, 11.59%, 8% respectivement.
- La vitesse de coupe et la profondeur de coupe sont les paramètres qui viennent en première position d'influence sur la vibration tangentielle avec une contribution de 32.42% et 23.79% respectivement. L'avance vient en deuxième position d'influence avec une contribution de 16.14%. Le facteur (χr) vient en troisième position d'influence avec un impact de 15.78%.
- La profondeur de coupe est le facteur le plus significatif sur le volume de copeaux enlevé avec la contribution respective de 54.85%. La vitesse d'avance suivie par la vitesse de coupe présente une signification statistique avec une contribution de 21.84% et 21.64%, respectivement.
- Les résultats obtenus par l'analyse d'ANOVA pour le rapport S/N des paramètres technologiques ont été confirmés par un graphique de Pareto et une analyse du rapport S/N des réponses, l'effet des interactions sur les réponses a été vérifié par des tracés des surfaces de réponse en 3D et des contours.

- Les cartes topographiques tridimensionnelles de la surface usinée obtenue par plate-forme optique de métrologie modulaire à une grande importance dans l'étude de la rugosité de surface.
- Les modèles mathématiques élaborés pour les réponses (Ra , Fz , Ks , Pc , Va , Vt et MRR) sont très fiables et représentent un intérêt industriel important, car ils contribuent à faire des prédictions dans la gamme des niveaux des paramètres choisie dans cette étude.
- La méthode d'optimisation mono-objective de Taguchi a été exploitée avec succès pour identifier les paramètres de coupe optimale. De plus, le rapport S/N est le critère important dans cette méthode.
- Sur la base de l'approche d'optimisation de Taguchi, les paramètres de coupe optimale lors du tournage de l'acier AISI D3 avec des plaquettes en céramique mixtes CC650 pour minimiser la rugosité de surface sont comme suit: $\chi r = 75^\circ$, $r = 1.6$ mm, $Vc = 220$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm.
- De même, en minimisant l'effort tangentielle et la puissance de coupe pour un régime optimal de : $\chi r = 45^\circ$, $r = 1.2$ mm, $Vc = 220$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm.
- Le régime optimal pour réduire l'effort spécifique est donné comme suit: $\chi r = 45^\circ$, $r = 1.2$ mm, $Vc = 220$ m/min, $f = 0.16$ mm/tr et $ap = 0.45$ mm.
- Les régimes optimaux sélectionnés pour minimiser les vibrations de l'outil (Va , Vt) sont donnés comme suit : ($\chi r1$, $r3$, $Vc3$, $f1$, $ap1$) pour Va et ($\chi r2$, $r3$, $Vc3$, $f1$, $ap1$) pour Vt . On remarque que les régimes optimaux sont les mêmes pour : $r = 1.6$ mm, $Vc = 440$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr, $ap = 0.15$ mm mais ils sont différents seulement pour l'angle de direction principale : $\chi r = 45^\circ$ pour Va , $\chi r = 75^\circ$ pour Vt .
- Le régime optimale sélectionné pour maximiser le volume de copeau enlevé est donné comme suit : $Vc = 440$ m/min, $f = 0.16$ mm/tr et $ap = 0.45$ mm.
- Les réponses optimisées trouvées par l'utilisation de niveaux optimaux pour chaque réponse sont: $Ra = 0.39$ μ m, $Fz = 55.16$ N, $Ks = 3049.63$ MPa, $Pc = 202.25$ W, $Va = 1.59$ m/s², $Vt = 2.07$ m/s² et $MRR = 31680$ mm³/min.
- L'analyse relationnelle grise (GRA) a été utilisée pour résoudre le problème complexe d'optimisation simultanée de plusieurs réponses en convertissant l'optimisation multi-objective en un seul objectif d'optimisation équivalent.
- L'optimisation équivalente d'un objectif unique dans cette analyse s'appelle le grade relationnel gris (GRG). La valeur la plus élevée de ce dernier correspond à la combinaison des niveaux optimaux des paramètres d'usinage. Par conséquent, la combinaison des niveaux optimaux pour une amélioration simultanée de Ra et MRR a été obtenue à: ($\chi r2$, $r3$, $Vc3$, $f1$, $ap3$); $\chi r = 75^\circ$, $r = 1.6$ mm, $Vc = 440$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.45$ mm.

- Les réponses optimisées trouvées par l'utilisation de niveaux optimaux sélectionnés par analyse relationnelle grise sont ($Ra = 0.41 \mu\text{m}$ et $MRR = 15840 \text{ mm}^3/\text{min}$).
- Un accord notable est remarqué entre les valeurs trouvées expérimentalement et calculé par la formule d'estimation, alors que le rapport S/N des résultats obtenus expérimentalement lors de l'utilisation des niveaux optimaux par rapport aux tests initiaux a été améliorés avec 2.15 dB pour (Ra), 7.55 dB pour (Fz), 1.56 dB pour (Ks), 10.44 dB pour (Pc), 3.72 dB pour (Va), 1.85 dB pour (Vt) et 9.15 dB pour (MRR). Selon les tests de confirmation, Les réponses de sortie telles que (Ra , Fz , Ks , Pc , Va , Vt et MRR) sont améliorées approximativement de 1.28, 2.38, 1.19, 3.32, 1.53, 1.23 et 2.86 fois, respectivement.
- Le grade relationnel gris (GRG) a été amélioré lors de l'utilisation des niveaux optimaux par rapport aux tests initiaux par 0.13. Selon les essais de confirmation, la rugosité de la surface et le volume de copeau enlevé ont été améliorés environ 1.21, 0.69 fois, respectivement.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

- Etude de l'évolution de la température de coupe et des contraintes résiduelles en fonction des conditions de coupe.
- L'application des autres méthodes d'optimisation telle que (La logique flou et les algorithmes génétiques ...etc).

Références bibliographiques

- [1] **BOUYEDDA M**, Etude de performances des matériaux de coupe – Application aux plaquettes de l’E.P.E, Projet de fin d’étude Master II Conception et production industrielle, Université 08 Mai 1945 Guelma, 2012.
- [2] **AOUICI H**, Etude de l’usinabilité de l’acier AISI H11 à l’état traité par le CBN 7020, Thèse de doctorat de Productique, Université 08 Mai 1945 Guelma, 2012.
- [3] **MORARU G F**, Etude du comportement du système « pièce – outil – machine » en régime de coupe vibratoire, Thèse de doctorat de Génie industriel, l’Université «Politehnica» de Bucarest, 2002.
- [4] **AURELIEN M P**, Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : Applications à l’identification paramétrique des lois de comportement, Thèse de doctorat pour l’Ingénieur et Microtechniques, Université de Franche-Comté, 2009.
- [5] **ALAIN P**, Tournage, Technique de l’ingénieur, BM7086, Traité génie mécanique, Paris, 2000.
- [6] **CZAPLICKI A**, L’usinabilité et la coupe des métaux, Revue de la société royale belge des ingénieurs et des industries, n°12. pp. 708 – 736, 1962.
- [7] **GRUBER B**, Outillage et mesure, dunod 2^{ème} édition, Lausanne, pp. 51-63, 1981.
- [8] **POULACHON G**, Aspects phenomenologiques, mecaniques et metallurgiques en tournage c-bn des aciers durcis. Application: usinabilite de l'acier 100cr6 (Doctoral dissertation, Paris. ENSAM), 1999.
- [9] **MATHON P**, Usinabilité et lois générales de l’usinage des aciers et des fontes, mécanique, matériaux, électricité (f), n° 246-247, pp. 23-36, 1970.
- [10] **ROBELET M, ODIN G**, Etude comparée de deux tests rapides d’usinabilité, corrélation avec les résultats d’essais de longue durée, Revue de met, pp. 1021-1032, 1973.
- [11] **BELHADI S**, Etude de l’usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau, Thèse de doctorat de Productique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2009.
- [12] **BUTIN R & PINOT M**, Fabrications mécaniques technologie, tome III, Fouchier, juillet 1988.
- [13] **BAGUR F**, *Matériaux pour outils de coupe*, Techniques de l’Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 7080.
- [14] **Sandvik Coromant**.
http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H..PDF
- [15] **CHANCEL P**, les nouveaux outils coupants, CETIM information N° 147, Février, 1996.
- [16] **AOUICI H**, Production Mécanique II, Ecole nationale supérieure de technologie, 2013.

- [17] **PASTOR H**, The evolution of cutting tool materials, Bulletin du Cercle d'Etudes des Métaux N°13, Novembre, 1996.
- [18] **LEROY F**, Endommagement des outils de coupe, Techniques de l'ingénieur, B7042.
- [19] **LEPADATU D**, Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse, pp : 35-36, 2006.
- [20] **BOUACHA K**, Comportement du couple outil-matière lors de l'usinage des matériaux durs, Thèse de doctorat de Productique, Université 08 mai 1945 de Guelma, 2010.
- [21] <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [22] Etats de sur face des pièces mécaniques Sciences industrielles pour l'ingénieur PT – Lycée Lislet Geoffroy: <http://pt.llg.free.fr/13/S2I/etats%20de%20surface.pdf>
- [23] **CLAUDE B, LIONEL G**, Memotech productique matériaux et usinage, Editions casteilla, PARIS, Septembre 1999.
- [24] Archive multilingue, Actionnées par WorldLingo.
http://www.multilingualarchive.com/ma/frwiki/fr/Etat_de_surface#Rugosit.C3.A9
- [25] **HUGHES L**, Etude de l'influence de la rugosité sur l'écoulement de fluide dans les fissures rocheuses, Thèse acceptée par la Faculté Polytechnique de Mons, L'obtention du grade de docteur en Sciences Appliquées, 2006.
- [26] **Weil R**, Données de base et mise en œuvre pratique. Technique d'usinage. DUNOD, pp. 87-134, 1971.
- [27] **Alfredo A, AGUILERA L**, Optimisation des conditions de coupe pour l'usinage du bois. Application de la méthode Couple Outil Matière au défonçage des panneaux de fibres de densité moyenne, Thèse de doctorat en Sciences du Bois, l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2000.
- [28] **Rigal J**, Usinage des composants mécaniques, application aux pièces frittées, Technique de l'ingénieur, BM5018.
- [29] **Martin P**, Commande adaptative de machines-outils. Etude d'un système d'optimisation de l'opération de tournage avec mesure de l'usure de l'outil, Thèse Docteur en Sciences, Université de Nancy I, 1980.
- [30] **Baléo JN, Bourges B, Courcoux Ph, faur-Brasquet C, Le Cloirec P**, Méthodologie expérimentale : Méthodes et outils pour les expérimentations scientifiques, Paris : Editions THC et DOC, 2003.
- [31] **ETSINDA MF**, Nouvelle approche hybride d'optimisation multi-objective basée sur la méthode des surfaces de réponse et le système de colonies de fourmis, Comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie de la production automatisée M. Ing, Université du QUÉBEC, 2008.

- [32] **Aouici H, Bouchelaghem H, Yallese MA, Elbah M, Fnides B**, 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*, Springer-Verlag London, 2014.
- [33] **Bouchelaghem H, Yallese MA, Amirat A, Mabrouki T, Rigal JF**, Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3), *Machining Science and Technology*, Vol. 14: 4, pp. 471-501, 2010.
- [34] **Rupinder S, Dureja JS**, Comparing Taguchi Method and RSM for Optimizing Flank Wear and Surface Roughness During Hard Turning of AISI D3 Steel, *Proceedings of the International Conference on Research and Innovations in Mechanical Engineering*, pp 139–152, 2014.
- [35] **Varaprasad B, Srinivasa RC, Vinay PV**, Effect of Machining Parameters on Tool Wear in Hard Turning of AISI D3 Steel, *Procedia Engineering*, pp 338–345, Elsevier, 2014.
- [36] **Fnides B, Boutabba S, Fnides M, Aouici H, Yallese MA**, Tool life evaluation of cutting materials in hard turning of AISI H11, *Estonian Journal of Engineering*, pp 143–151, 2013.
- [37] **Doniavi A, Eskanderzade M, Tahmsebian M**, Empirical modeling of surface roughness in turning process of 1060 steel using factorial design methodology. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7(17), pp. 2509-2513.
- [38] **Asiltürk I, Süleyman N**, Multi response optimisation of CNC turning parameters via taguchi method-based response surface analysis. *Measurement*, 45, pp. 785–794, 2012.
- [39] **Gaitonde VN, Karnik SR, Figueira L, Davim JP**, Analysis of machinability during hard turning of cold work tool steel (type: AISI D2). *Mater. Manuf. Process. Taylor Francis* 24 (12): 1373 – 1382, 2009.
- [40] **Davim JP, Figueira L**, Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel. *J. Eng. Manuf.* 221: 625 – 633, 2007a.
- [41] **Davim JP, Figueira L**, Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Materials and Design* 28: 1186 – 1191, 2007b.
- [42] **Neseli S, Yıldız S, Türkes E**, Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology. *Measurement*, 44(3):580 – 587, 2011.
- [43] **Asiltürk I, Neseli S**, Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis. *Measurement* 45: 785-794, 2011.
- [44] **Bhushan RK**, 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: 242-254, 2013.

- [45] **Dureja JS, Gupta VK, Dogra M**, Design optimization of cutting conditions and analysis of their effect on tool wear and surface roughness during hard turning of AISI-H11 steel with a coated-mixed ceramic tool. *Journal Engineering Manufacture*, Vol. 223(B), pp. 1441-1453, 2009.
- [46] **Al-Ahmari AMA**, Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 1-3, pp. 305-311, 2007.
- [47] **Ranganathan S, Senthilvelan T, & Sriram G**, Evaluation of machining parameters of hot turning of stainless steel (Type 316) by applying ANN and RSM. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(10), 1131-1141, 2010.
- [48] **Kara F, Aslantas K, & Çiçek A**, ANN and multiple regression method-based modelling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel. *Neural Computing and Applications*, 26(1), 237-250, 2015.
- [49] **Das B et al**, Studies on Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness of Al-Cu-TiC MMCs: An Artificial Neural Network Approach, *Procedia Computer Science*, Vol. 45: 745-752, 2015.
- [50] **Bachy B and Franke J**, Modeling and optimization of laser direct structuring process using artificial neural network and response surface methodology, *Laser*, 2015.
- [51] **Yang WH, Tarng YS**, Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *J. Mater. Process. Technol.* 84: 122–129, 1998.
- [52] **Yücel E, Günay M**, Modelling and optimization of the cutting conditions in hard turning of high-alloy white cast iron (Ni-Hard). *J. Mechanical Engineering Science*, p. 0(0) 1-11, 2012.
- [53] **Thamizhmanii S, Saparudin S, Hasan S**, Analysis of surface roughness by turning process using Taguchi method. *Ach. Mater. Manuf. Eng.* 20 (1–20): 503–505, 2007.
- [54] **Selvaraj DP, Chandramohanb P, Mohanraj M**, Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method, *Measurement* 49: 205–215, 2014.
- [55] **Bhattacharya A, Das S, Majumder P, Batish A**, Estimating the effect of cutting parameters on surface finish and power consumption during high speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA. *Prod. Eng. Res. Dev.* 3: 31–40, 2009.
- [56] **Fratila D, Caizar C**, Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. *J. Clean. Prod.* 19: 640-645, 2011.

- [57] **Aslan E, Camuscu N, Birgoren B**, Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with $Al_2O_3 + TiCN$ mixed ceramic tool. *Mater Design*; 28: 1618 – 1622, 2007.
- [58] **Bouzid L, Boutabba S, Yaltese MA, Belhadi S, Girardin F**, Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 73, Springer-Verlag London, 2014.
- [59] **Sahoo AK, Sahoo BD**, Mathematical modeling and multi-response optimization using response surface methodology and grey based Taguchi method: an experimental investigation, *Int. Exp. Des. Process Optimis*, Vol. 2 (3), pp. 221-242, 2011.
- [60] **Hanafi I, Khamlichi A, Francisco MC, Emiliano A, Abdallah J**, Optimization of cutting conditions for sustainable machining of peek-cf30 using tin tools. *Journal of Cleaner Production*, 33, pp. 1-9, 2012.
- [61] **Kacal A, Yildirim F**, Application of grey relational analysis in high-speed machining of hardened AISI D6 steel. *Proc IMechE partC: J Mec Eng Sci*; 227 (7): 1566-1576, 2013.
- [62] **WU DW, LIU CR**, An analytical model of cutting dynamics, Part1: Model Building, *Trans. ASME, Journal of engineering for industry*, Vol. 107, pp. 107-111, 1985.
- [63] **ARFAOUI A, FEDOTOV AI, CHOUCANE M**, Modélisation des vibrations de l'outil de coupe en tournage. *Premier congrès de mécanique ENIM, Rabat*, pp.331-342, 1993.
- [64] **Thomas M, Beauchamp Y, Youssef AY, Masounave J**, Effect of tool vibration on surface roughness during lathe dry turning process, *Comput. Ind. Eng*, Vol, 31 (3-4) pp. 637-644, 1996.
- [65] **Cheung CF, Lee WB**, Multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra-precision machining. *Precis Eng*, Vol 24 (1), pp. 77-87, 2000.
- [66] **Arizmendi M, Campa Fj, Fernandez J, Lopes de Lacalle LN, Gil A, Bilbao E, Veiga F, Lamikiz A**, Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 58/1, pp 93-96, 2009.
- [67] **Vikas Upadhyay PK, Jain NK**, In-process prediction of surface roughness in turning of Ti-6Al-4 V alloy using cutting parameters and vibration signals *Mehta Measurement*, Vol. 46, Issue 10, pp. 4005-4022, 2013.
- [68] **Venkata Rao K**, Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring, *Measurement*, Vol. 46, pp. 4075-4084, 2013.
- [69] **SCHMOLZ+BICKENBACH**, *Acier à outils*.

- [70] **Boulenger A, Pachaud C**, Diagnostic vibratoire en maintenance préventive, Dunod, Novembre 1998.
- [71] **Fnides B, Aouici H, Yallese M.A.** Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic. ISSN 1392-1207. Mechanika. Nr.2 (70), 2008.
- [72] **Afnor : NF E 66-520-1** : Norme Française, couple outil matière “domaine de fonctionnement des outils coupants : présentation générale”
- [73] **Afnor : NF E 66-520-2** : Norme française couple outil matière “domaine de fonctionnement des outils coupants : description générale”
- [74] **Afnor : NF E 66-520-2** : norme française couple outil matière “domaine de fonctionnement des outils coupants : application à la technologie de tournage”
- [75] **Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery**, Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments, 1995.
- [76] **Myers RH, Montgomery DC**, Response Surface Methodology, 2nd Ed., WILEY C SONS (Éditeurs), New York, NY, USA, 2002.
- [77] **Gained VN, Karnik SR, Faustino M, Davim JP**, Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in EDM electrodes, Int J Refract Metals hard Mater, Vol. 27, pp. 754-63, 2009.
- [78] **Davim JP, (Ed.)**, Machining of hard Materials, Springer, 2011.
- [79] **Douglas Montgomery C, George Runger C**, Applied Statistics and Probability for Engineers 3rd edition, John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [80] **Dreyfus G**, Les réseaux de neurones. Mécanique industrielle et matériaux, n°51, 1998.
- [81] **Dipanda A**, Cours réseaux de neurones.
- [82] **Gerstner W, Beaulieu BL, Souksavanh S et Beuchat JL**, Réseaux de neurone artificiels, une introduction à l'apprentissage automatique. Laboratory of computational neuroscience, 2006.
- [83] **Taguchi G**, Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organisation, Tokyo 1986.
- [84] **Zhang JZ, Chen JC, Kirby ED**, Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method, J Mater Process Technol 184 233 – 239, 2007.
- [85] **Günay M, Kaçal A, Turgut Y**, Optimization of machining parameters in milling of Ti – 6Al – 4 V alloy using Taguchi method, E-J New World Sci Acad Eng Sci 6 (1) 428 – 440, 2011.

- [86] **Bendell A, Disney J, Pridmore WA**, Taguchi methods: applications in world industry, IFS Publications, Bedford 1989
- [87] **Rowlands H, Antony J, Knowles G**, An application of experimental design for process optimization. TQM Mag 12(2):78 – 83, 2000
- [88] **Nalbant M, Gökkaya H, Sur G**, Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. Mater Des 28:1379 – 1385, 2007
- [89] **Dabade UA**, Multi-objective Process Optimization to Improve Surface Integrity on Turned Surface of Al/SiCp Metal Matrix Composites Using Grey Relational Analysis, Procedia CIRP, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 7 299 – 304, 2013
- [90] **Lindman HR**, Analysis of variance in experimental design. Springer-Verlag, New York, 1992
- [91] **Ross PJ**, Taguchi techniques for quality engineering. McGraw-Hill International Editions, Singapore 1996.
- [92] **Dilbag SP, Venkateswara RA**, Surface roughness prediction model for hard turning process. J Adv Manuf Technol 32:1115-1124, 2007
- [93] **Makadia AJ, Nanavati JL**, Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology. Measurement 46:1521-1529, 2013
- [94] **Aslan E, Camuscu N, Birgoren B**, Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃ + TiCN mixed ceramic tool. Mater Design 28:1618-1622, 2007
- [95] **Boothroyd G, Knight WA**, Fundamentals of Machining and Machine Tools. Third Ed, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 192-196, 2006
- [96] **Karuppusami G, Gandhinathan R**, Pareto analysis of critical success factors of total quality management: A literature review and analysis. The TQM Magazine, Vol 18 Iss: 4:372-385, 2006
- [97] **Bouزيد L, Yaltese MA, Chaoui K, Mabrouki T, Boulanouar L**, Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture Vol. 229(1):45-61, 2015
- [98] **Meddour I, Yaltese MA, Khattabi R, Elbah M, Boulanour L**, Investigating and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization. Int J Adv Manuf Technol 77(5): 1387 – 1399, 2015
- [99] **Hessainia Z, Yaltese MA, Bouزيد L, Mabrouki T**, On the application of response surface methodology for predicting and optimizing surface roughness and cutting forces in hard turning by PVD coated insert. Int J Ind Eng Comput 6:267 – 284, 2015

Communications et publications

A. Communications

- 1- Participation: 6th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics ICAMEM2015, 20-22 December, 2015, Hammamet, Tunisia. **MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION AND PREDICTIVE MODELING OF SURFACE ROUGHNESS AND MATERIAL REMOVAL RATE IN TURNING USING RSM METHOD.**

Auteurs: O. Zerti, M. A. Yallese, A. Zerti, S. Belhadi, I. Meddour, H. Bensouilah

- 2- Participation : au 5^{ème} Congrès Algérien de Mécanique CAM2015, 25 au 29 octobre 2015 à El-Oued. **Taguchi Design of Experiments for Optimization and Modeling of Surface Roughness when Dry Turning X210Cr12 Steel.**

Auteurs: O. ZERTI, M. A. YALLESE, S. BELHADI, L. BOUZID

- 3- Participation 2^{ème} Conférence Internationale de Mécanique ICM, organisée à Constantine les 25 et 26 Novembre. **Application de la méthode de régression linéaire multiple pour la détermination des modèles des efforts de coupe en tournage dur.**

Auteurs: Z. Hessainia, O. Zerti, M. A. Yallese.

- 4- Participation au 3^{ème} Séminaire International sur les Technologies Mécaniques Avancées (STEMA2014), 08 et 09 Novembre 2014, TLEMCEN. **Modélisation et Optimisation de la Rugosité de Surface et les Efforts de Coupe lors d'Usinage d'un Acier Fortement Allié : Méthode de Taguchi.**

Auteurs: O. ZERTI, M. A. YALLESE, S. BELHADI.

- 5- Participation au Conférence International de Mécanique et Matériaux (ICMM2014), 16-17 Novembre 2014, Sétif. **Étude expérimentale de l'influence des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface et des vibrations d'outil basée sur la méthode de Taguchi.**

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

- 6- Participation au Deuxième Journée d'Étude sur la Mécanique et l'Electromécanique, JEMEM II, Jeudi 24 avril 2014, ELOUED. **Prédiction de la rugosité de surface et les vibrations de la pièce lors du fraisage de face de l'acier XC42 en utilisant la méthode de Taguchi.**

Auteurs: **O. ZERTI**, M. A. YALLESE, M. FNIDES, S. BELHADI.

B. Publications

- 1- L'article intitulé: **Design optimization for minimum technological parameters when dry turning of AISI D3 steel using Taguchi method**, a été publié dans la revue: **Springer-Verlag London**, Int J Adv Manuf Technol (2017), 89:1915 – 1934

Auteurs: **Oussama Zerti**, Mohamed Athmane Yallese, Riad Khettabi, Kamel Chaoui & Tarek Mabrouki.

- 2- L'article intitulé: **Simultaneous improvement of surface quality and productivity using grey relational analysis based Taguchi design for turning couple (AISI D3 steel/ mixed ceramic tool (Al₂O₃ + TiC))**, a été publié dans la revue: **growingscience**, International Journal of Industrial Engineering Computations (2018), 9 (2), 173-194

Auteurs: **O Zerti**, M Yallese, A Zerti, S Belhadi, F Girardin

- 3- L'article intitulé: **Taguchi design of experiments for optimization and modeling of surface roughness when dry turning X210Cr12 steel**, a été publié dans **Springer International Publishing Switzerland**, Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering Systems (2017), 275-288, DOI 10.1007/978-3-319-41468-3_22

Auteurs: **O Zerti**, MA Yallese, S Belhadi, L Bouzid