

République Algérienne Démocratique & Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

De

L'université de 08 Mai 1945 Guelma

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Mécanique Appliquée

Présentée par

Lakhdar BOUZID

Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les
paramètres technologiques d'usinage
-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13-

Directeur de thèse : Pr. YALLESE Mohamed Athmane

Devant le jury d'examen composé de :

Pr. CHAOUI. K	Professeur, Université d'Annaba	Président
Pr. AMARA. I	Professeur, Université de Constantine	Examinateur
M/C. KHETTABI. R	Maître de conférences / A, Université de Guelma	Examinateur
Pr. YALLESE. M.A	Professeur, Université de Guelma	Rapporteur
Dr. BELHADI. S	Maître de conférences / B, Université de Guelma	Invité

Dédicaces

Je tiens à dédier cette thèse :

*A ma très chère **Mère** et à mon cher **Père**, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur 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

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 effectué sous la direction de Monsieur **Yaltese Mohamed Athmane**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, à qui je tiens à exprimer m'a profonde gratitude pour toute la confiance qu'il m'a témoignée, les encouragements, les conseils et l'aide qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de cette période.*

*Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail. Ainsi, Je remercie Monsieur **CHAOUI Kamel**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar-Annaba d'avoir accepté de présider le jury.*

*J'exprime aussi ma gratitude à Messieurs : **AMARA Idris**, Professeur à l'Université de Constantine et **KHATTABI Riad**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, qui ont accepté d'examiner mon travail et participer au jury de thèse.*

*J'adresse également mes chaleureux remerciements et ma gratitude à Monsieur : **BELHADI Salim**, Docteur au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, pour m'avoir aidé, encouragé et accepté d'examiner mon travail et participer au jury de thèse.*

*J'adresse mes remerciements à tous les membres, les thésards et les techniciens du Laboratoire de Mécanique et Structure (**LMS**).*

Résumé

L'impact économique des coûts de fabrication et des exigences techniques sur l'état de surface du produit fini impose l'optimisation des paramètres de coupe. L'optimisation est donc une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de recherche. Il consiste à investiguer le comportement des outils en carbure métallique (GC2015) et (GC1015) avec revêtements CVD et PVD, face à l'acier inoxydable martensitique (*X20Cr13*). La présente recherche commence par l'étude de l'influence des paramètres de coupe, soit, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le temps d'usinage sur les paramètres technologiques d'usinage (l'usure de l'outil, les efforts de coupe et la rugosité de surface). Nous exposons également les résultats de l'évolution des efforts de coupe et la rugosité de surface sous l'effet de l'usure de ces deux matériaux d'outils. Ensuite, on s'intéresse à la modélisation des efforts de coupe, des critères de la rugosité de surface et de l'usure de l'outil en fonction des paramètres de régime de coupe, en utilisant la méthodologie des plans d'expériences (modélisation par la méthodologie de surface de réponse RSM et les réseaux de neurones artificiels ANN). La dernière partie du travail est réservée à l'optimisation mono et multi objectif afin de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs de l'optimisation. Les résultats trouvés prouvent que la méthode ANN donne des résultats excellents par rapport à la méthode RSM. La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse. Par contre les méthodes Grey et RSM sont les meilleurs pour l'optimisation multi-objectif.

Mots clés : plans d'expérience ; usure ; ANOVA ; optimisation ; Taguchi ; RSM ; ANN ; GRA

Abstract

The economic impact of manufacturing costs and technical requirements on the surface quality of the finished product requires the optimization of cutting parameters. Therefore, the optimization is an important task in the machining process; it allows the choice of the most suitable cutting conditions. It is within this context that this study is based on. It consists to investigate the CVD and PVD coated carbide tools behavior, compared to X20Cr13 martensitic stainless steel. This research has been started by the study of the influence of cutting parameters, i.e., the cutting speed, feed rate, depth of cut and the machining time on technological machining parameters (tool wear, cutting forces and surface roughness). We also expose the results of cutting forces and surface roughness evolution, under the wear effect of these two tool materials. Afterwards, we focus on the modeling of cutting forces, surface roughness criteria and tool wear using experiment design methodology (modeling, using surface roughness methodology RSM and artificial neural-networks ANN). The last part of this work is interested on mono and multi objectif optimization to find the optimal values of cutting parameters with respect to the optimization objectifs. The found results prove that ANN method gives excellent results compared to RSM method. Taguchi method can be more effective in the case of only one answer. On the other hand the Grey and RSM methods are the better for multi-objectif optimization.

Keywords: experiment designs; wear; ANOVA; optimization; Taguchi; RSM; ANN; GRA

ملخص

الأثر الاقتصادي لتكاليف التصنيع والمتطلبات التقنية على نوعية سطح المنتج النهائي يتطلب إيجاد شروط القطع المثلى. وبالتالي فإن العملية التحسينية تمثل خطوة هامة في عملية التصنيع، والسماح باختيار شروط القطع الأكثر ملاءمة.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة وتحديد تأثير شروط قطع، أي سرعة القطع، سرعة التغذية، عمق التمريرة وزمن القطع على المعايير التكنولوجية للتصنيع (تآكل أداة القطع، قوى القطع وخشونة السطح) أثناء تشغيل الفولاذ المقاوم للصدأ (X20Cr13) باستعمال لقم من الكربيد المعدني (GC2015) و (GC1015).

في جزء اخر من هذه الأطروحة ركزنا على استخراج نماذج رياضية لكل من قوى القطع، معايير الخشونة وتآكل الأداة بدلالة شروط القطع، وذلك باستخدام منهجية تصميم التجارب (نمذجة باستعمال: منهجية استجابة السطح RSM والشبكات العصبية الاصطناعية ANN). من ناحية أخرى كان اهتمامنا في استعمال الطريقة التحسينية في حالة وجود هدف وحيد وفي حالة تعدد الأهداف للعثور على القيم المثلى لشروط القطع.

الكلمات المفتاحية: تصميم التجارب، تآكل، العملية التحسينية، GRA، Taguchi، ANOVA، ANN، RMS

Index des figures

Figure I.1	Usinage par enlèvement de matière.....	5
Figure I.2	Processus de coupe et critères d'usinabilité.....	6
Figure I.3	Date d'apparition des matériaux à outil sur le marché Européen.....	9
Figure I.4	Comparaison de matériaux de coupe.....	10
Figure I.5	Structure de différents aciers rapides	10
Figure I.6	Micrographie d'une nuance de cermet.....	11
Figure I.7	Microstructure du nitrure de bore cubique (CBN).....	12
Figure I.8	Revêtement d'une plaquette de coupe.....	12
Figure I.9	Principaux modes de déposition de revêtement pour outils-coupants.....	13
Figure I.10	Mécanismes d'usure.....	15
Figure I.11	Différents formes d'usure.....	15
Figure I.12	Usure en cratère de la surface d'attaque.....	16
Figure I.13	Usure en débouille.....	16
Figure I.14	Usure en entaille.....	16
Figure I.15	Usure par déformation plastique.....	17
Figure I.16	Usure par écaillage et fissuration thermique d'arête tranchante.....	17
Figure I.17	Rupture par cassure en pointe.....	17
Figure I.18	Arête rapportée ou copeau adhérent.....	18
Figure I.19	Couche de surface auto-régénérante (couche passive).....	18
Figure I.20	Exemples des conceptions factorielles :.....	22
Figure I.21	Etapas d'optimisation par la méthode de Taguchi.....	23
Figure I.22	Schéma algorithmique : Schématisation globale d'un A.G.....	24
Figure I.23.	Schéma d'un neurone unique.....	25
Figure I.24	Itération pour l'algorithme de Newton-Raphson.....	26
Figure I.25	Evolution de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304.....	27
Figure I.26	Graphiques des effets principaux et d'interaction pour la rugosité de surface Ra.....	28

Figure I.27	Evolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe lors du tournage des aciers inoxydables (a) AISI 304 et (b) AISI 316 en utilisant des outils en carbure revêtu.....	29
Figure I.28	Evolution de l'usure des outils revêtu avec TiCN/TiC/Al ₂ O ₃ lors de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304 à $V_c = 120$ m/min	29
Figure I.29	Evolution de la durée de vie des outils de coupe en céramique à base d'alumine en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique SS 410.....	30
Figure I.30	Usure en dépouille et rugosité de surface en fonction de volume de copeau enlevé.....	31
Figure I.31	Influence de la géométrie de l'outil de coupe sur la rugosité de surface : a) géométrie conventionnelle et b) wiper.....	31
Figure I.32	Durée de vie de l'outil en carbure revêtu en fonction de diverses vitesses de coupe et d'avances.....	32
Figure I.33	Comparaison de l'évolution de l'usure entre KT 315 et KC 9110 en utilisant SCEA = -5° à 130 m/min et $f = 0,16$ mm/tr	32
Figure I.34	Effet de la vitesse de coupe sur : a) pression spécifique de coupe et b) effort de coupe tangentielle pour différents angles d'attaque.....	33
Figure I.35	Evolution de l'usure en dépouille des outils en carbure : a) avec revêtement et b) sans revêtement à $V_c = 25$ et 50 m/min	34
Figure I.36	Usure en dépouille de (a) outil en carbure avec revêtement CVD, (b) outil en carbure avec revêtement PVD, lors de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 420.....	35
Figure I.37	Effet de la dureté de la pièce sur les composantes de l'effort de coupe pour $f = 0,08$ mm/tr, $ap = 0,15$ mm et $V_c = 130$ m/min.....	36
Figure I.38	Graphiques de surface de réponse : a) contours et b) surface 3D pour la durée de vie d'outil.....	37
Figure I.39	Effets principaux pour la durée de vie d'outil en carbure.....	37
Figure I.40	Valeurs mesurées vs prédites de la rugosité de surface et surface de réponse de la rugosité de surface vs r et γ	38

Figure I.41	Evolution de : a) Usure en dépouille et b) température de coupe des outils en carbure en fonction de la vitesse de coupe.....	39
Figure I.42	(a) Photo de ZTA, (b) microstructure de ZTA.....	39
Figure I.43	a) comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites pour les composantes de l'effort de coupe et b) effet de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sur la rugosité de surface ($ap=0,3$ mm, H=45 HRC).....	40
Figure I.44	Algorithme MHS basé sur les réseaux de neurone.....	41
Figure II.1	Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.....	44
Figure II.2	Éprouvettes utilisées.....	45
Figure II.3	Porte outil utilisé.....	46
Figure II.4	Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC2015).....	47
Figure II.5	Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement PVD (GC1015).....	47
Figure II.6	Plateforme d'effort de coupe KISTLER.....	48
Figure II.7	Chaîne de mesure des efforts de coupe.....	49
Figure II.8	Rugosimètre 2D (Surftest 201, Mitutoyo).....	50
Figure II.9	Rugosimètre 3D (AltiSurf® 500).....	51
Figure II.10	Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).....	52
Figure II.11	Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.....	55
Figure II.12	Définition du domaine expérimental.....	55
Figure II.13	Définition de la surface de réponse.....	56
Figure III.1	Composantes d'efforts de coupe.....	64
Figure III.2	Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0,08$ mm/tr ; $ap = 0,15$ mm pour les outils : GC2015 et GC1015.....	65
Figure III.3	Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance à $Vc = 170$ m/min ; $ap = 0,15$ mm pour les outils : GC2015, GC1015.....	66
Figure III.4	Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe à $f = 0,08$ mm/tr ; $Vc = 170$ m/min pour les outils : GC2015 et GC1015.....	68
Figure III.5	Force de coupe spécifique.....	69

Figure III.6	Evolution de la pression de coupe en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0,08$ mm/tr ; $ap = 0,15$ mm pour les outils : GC2015 et GC1015.....	70
Figure III.7	Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance à $V_c = 170$ m/min ; $ap = 0,15$ mm pour les outils : GC2015 et GC1015.....	71
Figure III.8.	Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe à $V_c = 170$ m/min ; $f = 0,08$ mm/tr pour les outils : GC2015 et GC1015.....	71
Figure III.9	Définition de l'angle de direction d'arête équivalent.....	72
Figure III.10	Effort résultant.....	72
Figure III.11	Evolution des efforts résultant en fonction de : a) vitesse de coupe, b) vitesse d'avance et c) profondeur de passe pour les outils : GC2015 et GC1015.....	74
Figure III.12	Représentation des irrégularités sur un profil d'état de surface.....	75
Figure III.13	Evolution des rugosités en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0,08$ mm/tr ; $ap = 0,15$ mm pour les outils : GC2015 et GC1015.....	77
Figure III.14	Evolution des rugosités en fonction de l'avance à $V_c = 170$ m/min ; $ap = 0,15$ mm pour les outils : GC2015 et GC1015.....	78
Figure III.15	Evolution des rugosités en fonction de la profondeur de passe à $f = 0,08$ mm/tr ; $V_c = 180$ m/min pour les outils : CC650, CBN7050, GC4015 et CBN7020.....	79
Figure III.16	Usure en dépouille VB	80
Figure III.17	Progression de l'usure en dépouille VB en fonction du temps ($V_c = 280$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr $ap = 0,2$ mm).....	81
Figure III.18	Valeurs de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage pour $V_c = 280$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr et $ap = 0,2$ mm.....	82
Figure III.19	Evolution des efforts de coupe en fonction du temps à $V_c = 280$ m/min ; $f = 0,08$ mm/tr ; $ap = 0,2$ mm pour : a) GC2015 et b) GC1015.....	83
Figure III.20	Evolution de la rugosité en fonction du temps à $V_c = 280$ m/min ; $f = 0,08$ mm/tr ; $ap = 0,2$ mm pour : a) GC2015 et b) GC1015.....	85
Figure IV.1	Topographié d'une surface usinée : $V_c = 120$ m/min, $f = 0,2$ mm/tr, $ap =$	93

	0,15 mm.....	
Figure IV.2	Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) Ra ; (b) Rt et (c) Rz	96
Figure IV.3	Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité de surface : (a) Ra ; (b) Rt et (c) Rz	98
Figure IV.4	Comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour Ra , Rt et Rz	98
Figure IV.5	Probabilités normales des résidus pour (a) : Ra ; (b) : Rt et (c): Rz	99
Figure IV.6	Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour : (a) Rz , (b) Rt et (c) Rz	100
Figure IV.7	Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) Fx ; (b) Fy et (c) Fz	105
Figure IV.8	Effet des paramètres de régime de coupe sur les efforts de coupe : (a) Fx ; (b) Fy et (c) Fz	107
Figure IV.9	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées des efforts de coupe.....	107
Figure IV.10	Probabilités normales des résidus pour (a) Fx , (b) Fy et (c) Fz	108
Figure IV.11	Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour : (a) Fx , (b) Fy et (c) Fz	109
Figure IV.12	Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) VB et (b) VN	111
Figure IV.13	Effet des paramètres de régime de coupe sur l'usure de l'outil : (a) VB et (b) VN	112
Figure IV.14	Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de l'usure VB	113
Figure IV.15	Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de l'usure VN	113
Figure IV.16	Probabilités normales des résidus pour : (a) VB et (b) VN	114
Figure IV.17	Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour : (a) VB , (b) VN	115
Figure IV.18	Composition d'un neurone artificiel.....	118
Figure IV.19	Arrangement logique d'un neurone.....	118
Figure IV.20	Schéma d'une couche de neurones.....	119

Figure IV.21	Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones (a) : fonction seuil, (b) tangente sigmoïde, (c) tangente hyperbolique.....	120
Figure IV.22	Schéma de principe du perceptron simple.....	121
Figure IV.23	Structure ANN pour Ra	125
Figure IV.24	Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Ra	126
Figure IV.25	Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de la rugosité Ra	127
Figure IV.26	Structure ANN pour Fy	128
Figure IV.27	Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Fy .	130
Figure IV.28	Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de l'effort radial.....	130
Figure V.1	Effet des paramètres de régime de coupe sur : (a) $S/N_{(Ra)}$; (b) $S/N_{(MRR)}$	141
Figure V.2	Graphique des effets principaux pour $S/N_{(Ra)}$	142
Figure V.3	Graphique des effets principaux pour $S/N_{(MRR)}$	143
Figure V.4	Qualité Relationnelle Grise (GRG).....	147
Figure V.5	Graphique de contour de désirabilité pour Ra , Rt , Rz , Fx , Fy et Fz	155
Figure V.6	Graphique de contour de désirabilité pour VB et VN	156

Index des tableaux

Tableau I.1	Propriétés des outils spéciaux revêtus.....	14
Tableau II.1	Composition chimique de l'acier inoxydable X20Cr13.....	45
Tableau II.2	Équivalence de X20Cr13 en fonction des normes et des pays.....	46
Tableau II.3	Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.....	47
Tableau II.4	Réalisation d'essais d'après la méthode unifactorielle.....	53
Tableau II.5	Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe et de rugosité.....	53
Tableau II.6	Conditions de coupe pour les essais d'usure à la fin de la passe.....	54
Tableau II.7	Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 64 essais.....	58
Tableau II.8	Matrice de planification pour un plan de 64 essais.....	58
Tableau II.9	Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 9 essais.....	60
Tableau II.10	Matrice de planification pour un plan de 9 essais.....	60
Tableau II.11	Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 16 essais.....	60
Tableau II.12	Matrice de planification pour un plan de Taguchi 16 essais.....	61
Tableau IV.1	Résultats expérimentaux de la rugosité de surface.....	91
Tableau IV.2	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Ra	93
Tableau IV.3	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Rt	94
Tableau IV.4	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Rz	94
Tableau IV.5	Résultats expérimentaux des efforts de coupe.....	100
Tableau IV.6	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial F_x	102
Tableau IV.7	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort radial F_y	103
Tableau IV.8	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel F_z	103
Tableau IV.9	Résultats expérimentaux de l'usure de l'outil.....	109
Tableau IV.10	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure VB	110
Tableau IV.11	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure VN	111
Tableau IV.12	Analyse de la variance ANOVA pour $Ra, Rt, Rz, F_x, F_y, F_z, VB$ et VN	116
Tableau IV.13	Pourcentages de prédiction des erreurs et les coefficients de corrélations R^2	117
Tableau IV.14	Résultats expérimentaux pour Ra et F_y	123
Tableau IV.15	Performance des structures ANN du modèle de Ra	124
Tableau IV.16	R^2 et RMSE du modèle de la rugosité de surface Ra	126

Tableau IV.17	Performance des structures ANN du modèle de F_y	128
Tableau IV.18	R^2 et RMSE du modèle de l'effort radial F_y	129
Tableau IV.19	Comparaison des résultats expérimentaux et estimées par RSM et ANN...	130
Tableau V.1	Table orthogonale de Taguchi L9 (3^4)	137
Tableau V.2	Table orthogonale de Taguchi L18 ($2^1 \times 3^7$)	137
Tableau V.3	Résultats expérimentaux et S/N pour R_a et MRR	138
Tableau V.4	Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(R_a)}$	139
Tableau V.5	Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(MRR)}$	139
Tableau V.6	Comparaison entre les valeurs prédites et expérimentales.....	143
Tableau V.7	Résultats expérimentale normalisé ($x_i(k)$).....	144
Tableau V.8	Coefficients du GR ($\xi_i(k)$).....	145
Tableau V.9	Qualité Grise GRG et son ordre.....	146
Tableau V.10	Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade)	148
Tableau V.11	Analyse de la variance (ANOVA) pour la qualité relationnelle grise (GRG).....	148
Tableau V.12	Conditions d'optimisation pour R_a , R_t , R_z , F_x , F_y et F_z	154
Tableau V.13	Optimisation par MSR de la rugosité de surface et des efforts de coupe....	154
Tableau V.14	Conditions d'optimisation pour VB et VN	155
Tableau V.15	Optimisation par MSR de l'usure (VB et VN).....	156

Nomenclature

V_c :	<i>Vitesse de coupe (m/min).</i>
a_p :	<i>Profondeur de passe (mm).</i>
f :	<i>Avance par tour (mm/tr).</i>
t :	<i>Temps d'usinage (min).</i>
r_ϵ :	<i>Rayon de bec de l'outil (mm).</i>
F_x :	<i>Effort de coupe axial (N).</i>
F_y :	<i>Effort de coupe radial (N).</i>
F_z :	<i>Effort de coupe tangentiel (N).</i>
$F_{rés}$:	<i>Effort de coupe résultant (N).</i>
K_c :	<i>Pression (effort spécifique) de coupe (N/mm²).</i>
K_x :	<i>Pression (effort spécifique) de coupe axiale (N/mm²).</i>
K_y :	<i>Pression (effort spécifique) de coupe radiale (N/mm²).</i>
R_a :	<i>Rugosité moyenne arithmétique (μm).</i>
R_t :	<i>Rugosité totale (μm).</i>
R_z :	<i>Profondeur moyenne de la rugosité (μm).</i>
VB :	<i>Usure en dépouille (mm).</i>
VN :	<i>Usure en entaille</i>
$ANOVA$:	<i>Analyse de variance.</i>
MSR :	<i>Méthodologie de surface de réponse.</i>
ANN :	<i>Réseaux de neurones artificiels</i>
GRA :	<i>Analyse Relationnelle Grise</i>
HB :	<i>Dureté Brunel.</i>
R^2 :	<i>Coefficient de détermination.</i>
α :	<i>Angle de dépouille principal (degré).</i>
γ :	<i>Angle d'attaque (degré).</i>
λ :	<i>Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).</i>
χ_r :	<i>Angle de direction principal (degré).</i>

Table des matières

Introduction générale.....	1
<u>Chapitre I : Généralités sur la coupe des métaux</u>	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition de la coupe des métaux.....	5
I.3. Définitions de l'aptitude à l'usinage.....	5
I.4. L'Usinabilité.....	6
I.4.1. Définitions de l'usinabilité.....	7
I.4.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité.....	7
I.5. Outil de coupe.....	8
I.5.1. Évolution des outils de coupe.....	9
I.5.2. Matériaux pour plaquette de coupe.....	9
a) L'acier rapide (AR)	10
b) Le carbure de tungstène cémenté.....	10
c) Les outils en céramique.....	11
d) Le CBN (nitrure de bore cubique)	11
e) Le PCD (Diamant polycristallin)	12
I.6. Les revêtements.....	12
I.6.1. Procédés de revêtement.....	13
I.7. Endommagement des outils de coupe.....	14
I.7.1. Introduction.....	14
I.7.2. Formes d'usures.....	14
a) Usure en cratère.....	16
b) Usure en dépouille.....	16
c) Usure en entaille.....	16
d) Usure par déformation plastique.....	17
e) Usure par écaillage et fissuration d'arête.....	17
f) Rupture brutale de la pointe d'outil.....	17
g) Usure par arête rapportée ou copeau adhérente.....	18
I.8. Les aciers inoxydables.....	18
I.8.1. Introduction.....	18
I.8.2. Définition.....	19
I.8.3. Classification des aciers inoxydables.....	19
I.8.4. Structure métallurgique et rôle des éléments d'addition.....	19
I.9. Méthodes d'optimisations.....	20
I.9.1. Méthodologie de surface de réponse (RSM)	21
I.9.2. Méthode de taguchi.....	22
I.9.3. Algorithmes Génétiques.....	23
I.9.4. Les réseaux de neurones artificiels (RNA)	24
I.9.5. Méthodes classiques.....	25
I.9.5.1. Méthode de Newton.....	25
I.9.5.2. Méthode de Newton-Raphson.....	26
I.10. Etat de l'art.....	27

I.11. Conclusion.....	42
-----------------------	----

Chapitre II : Procédures expérimentales

II.1. Introduction.....	44
II.2. Matériels utilisé.....	44
II.2.1. Machine-outil.....	44
II.2.2. Matériau à usiné.....	45
II.2.3. Outils de coupe utilisés.....	46
II.2.3.1. Porte plaquette.....	46
II.2.3.2. Plaquettes de coupe.....	46
II.2.4. Instruments de mesure utilisés.....	48
II.2.4.1. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	48
II.2.4.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	49
II.2.4.3. Microscope pour la mesure de l'usure.....	51
II.3. Planification des expériences.....	52
II.3.1. Méthode unifactorielle.....	53
II.3.2. Méthode multifactorielle (les plans d'expériences)	54
II.3.2.1. Définition.....	54
II.3.2.2. Terminologie.....	54
II.3.2.3. Méthodologie des plans d'expériences.....	56
II.3.2.4. Choix du type de plan.....	57
II.4 Conclusion.....	61

Chapitre III : Usinabilité de l'acier inoxydable X20Cr13

III.1. Introduction.....	63
III.2. Evolution des efforts de coupe, des efforts spécifiques de coupe et l'effort.....	63
résultant en fonction des paramètres du régime de coupe	
III.2.1. Effort de coupe.....	63
a) Influence de la vitesse de coupe.....	64
b) Influence de la vitesse d'avance.....	65
c) Influence de la profondeur de passe.....	67
III.1.2. Efforts spécifiques (pression de coupe)	68
a) Influence de la vitesse de coupe.....	69
b) Influence de la vitesse d'avance.....	70
c) Influence de la profondeur de passe.....	71
III.2.3. Effort résultant.....	72
III.3. Evolution de la rugosité de surface en fonction des paramètres du régime.....	74
de coupe	
a) Influence de la vitesse de coupe.....	75
b) Influence de la vitesse d'avance.....	77
c) Influence de la profondeur de passe.....	78
III.4. Evolution de l'usure en dépouille des outils en fonction du temps de coupe.....	80
III.4.1. Mode et progression de l'usure en dépouille des outils.....	80
III.4.2. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure.....	82

III.4.3. Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure.....	84
III.5. Conclusion.....	85

Chapitre IV : Modélisation des paramètres technologiques d'usinage

IV.1. Introduction.....	88
IV.2. Modélisation des différents phénomènes de processus de coupe.....	88
IV.2.1. Analyse de variance ANOVA.....	88
IV.2.2. Analyse de régression.....	89
IV.3. Modélisation des différents critères de rugosité en fonction de V_c , f et ap	90
IV.3.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les rugosités R_a , R_t et R_z	92
IV.3.2. Analyse de régression : R_a , R_t et R_z en fonction de V_c , f et ap	96
IV.3.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	98
IV.4. Modélisation des efforts de coupe en fonction de V_c , f et ap	100
IV.4.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les efforts de coupe.....	102
F_x , F_y et F_z	
IV.4.2. Analyse de régression : F_x , F_y et F_z en fonction de V_c , f et ap	105
IV.4.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	107
IV.5. Modélisation de l'usure en dépouille VB et l'usure en entaille VN en fonction.....	109
de V_c , et t	
IV.5.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure VB et VN	110
IV.5.3. Analyse de régression : VB et VN en fonction de V_c et t	112
IV.5.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	113
IV.6. Validation des modèles mathématiques.....	116
IV.7. Modélisation par la méthode des réseaux de neurones artificiels RNA.....	117
IV.7.1. Introduction.....	117
IV.7.2. Les composants d'un RNA.....	117
IV.7.3. L'apprentissage.....	120
IV.7.4. Le perceptron.....	120
IV.7.5. La rétropropagation.....	121
IV.7.6. Le taux d'apprentissage adaptatif.....	122
IV.7.7. Modélisation de la rugosité de surface R_a et de l'effort radial F_y basée.....	122
sur les réseaux de neurones	
IV.7.7.1. Modélisation de la rugosité de surface R_a	124
IV.7.7.1.1. Comparaison entre les valeurs expérimentales et..	127
prédites	
IV.7.7.2. Modélisation de l'effort radial F_y	127
IV.7.7.2.1. Comparaison entre les valeurs expérimentales et..	130
prédites	
IV.7.7.3. Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimées.....	131
par les modèles RSM et ANN pour la rugosité de surface et	
l'effort radial	
IV.8. Conclusion.....	132

Chapitre V : Optimisation des conditions de coupe

V.1.	Introduction.....	135
V.2.	Optimisation mono-objectif.....	135
V.2.1.	Méthode de Taguchi.....	135
V.2.2.	La démarche de la méthode de Taguchi.....	135
V.2.3.	Le choix d'une table de Taguchi.....	136
V.2.4.	Optimisation des conditions de coupe pour Ra et MRR	138
V.2.4.1.	Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(Ra)}$ et $S/N_{(MRR)}$	138
V.2.4.2.	Analyse de régression : $S/N_{(Ra)}$ et $S/N_{(MRR)}$ en fonction de..... V_c, f et a_p	140
V.2.4.3.	Optimisation mono-objectif utilisant la méthode de Taguchi..... (S/N ratio)	141
V.3.	Optimisation multi-objectif.....	143
V.3.1.	Méthode d'Analyse Relationnelle Grise (Grey method)	143
Étape 1 :	La normalisation.....	144
Étape 2 :	Calcul des coefficients du Relationnel Gris.....	145
Étape 3 :	Calcul du GRG (Grey relational grade)	146
V.3.2.	Méthodologie des surfaces de réponse (MSR)	148
V.3.2.1.	Teste de validité des modèles.....	150
V.3.2.2.	Optimisation.....	152
V.3.3.	Optimisation des conditions de coupe pour Ra, Rt, Rz, Fx, Fy et Fz	154
V.3.4.	Optimisation des conditions de coupe pour l'usure (VB et VN)	155
V.4.	Conclusion.....	156
	Conclusion générale.....	157
	Références bibliographiques.....	160

Introduction générale

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération.

L'impact économique des coûts de fabrication et des exigences techniques sur l'état de surface du produit fini impose l'optimisation des paramètres de coupe. Pour cette raison, il est nécessaire de s'orienter vers l'utilisation des plans d'expériences pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage afin de développer des modèles de prédiction et d'optimisation de processus de coupe.

L'optimisation de processus d'usinage est habituellement difficile, où les aspects suivants sont exigés :

- La connaissance du processus de coupe ;
- Les équations empiriques reliant la vie d'outil, les forces, la puissance, etc., pour développer des contraintes réalistes ;
- Les spécifications des possibilités d'usinage ;
- Le développement d'un critère efficace d'optimisation ; et
- La connaissance des techniques mathématiques et numériques d'optimisation.

En usinage, les tâches d'optimisation sont critiques, parce qu'il comporte beaucoup de processus complexes. Habituellement, la petite variation d'un paramètre cause les changements notables des autres. D'ailleurs, quelques variables, telles que l'effort de coupe ou l'usure de l'outil, dépendent fortement des conditions de coupe.

L'étude réalisée dans le cadre de cette thèse permet d'atteindre les objectifs suivants :

- L'étude de l'influence des paramètres de coupe, soit, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le temps d'usinage sur les performances de l'usinage (l'usure d'outil, les efforts de coupe et la rugosité de surface) de l'acier inoxydable martensitique (*X20Cr13*) lors du tournage à sec, avec des plaquettes en carbure métallique avec revêtement CVD et PVD.

- La modélisation pour l'optimisation des conditions de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe et le temps d'usinage) en utilisant la méthodologie des plans d'expériences et les méthodes d'optimisation.

La présente thèse est structurée en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse des travaux relatifs à la coupe des métaux. Dans un premier temps nous donnons des généralités sur la coupe des métaux à savoir, la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité et les nouvelles perspectives de développement des matériaux à outils, tout en analysant profondément les mécanismes d'usure des outils de coupe. Une autre partie très importante est réalisée dans ce chapitre, ayant pour but de présenter des travaux de recherche relatifs au tournage des aciers inoxydable, l'utilisation des plans d'expérience et les méthodes d'optimisation utilisées.

Dans **le second chapitre**, nous présentons une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe utilisées.

Dans **le troisième chapitre**, nous étudions l'usinabilité de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13. Pour atteindre cet objectif, nous analysons les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe, l'effort spécifique, l'effort résultant et la rugosité de surface. L'usinage est réalisé à sec par deux matériaux de coupe, le carbure métallique avec revêtement PVD (GC 1015) et le carbure métallique avec revêtement CVD (GC2015). Nous présentons également les résultats de l'évolution de l'usure des outils en fonction du temps et aussi son impact sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe et sur la rugosité de surface. Les résultats obtenus permettent de définir les performances des matériaux de coupe utilisés et les conditions de coupe adéquates pour optimiser le processus de coupe relatif à cet acier.

Dans le quatrième chapitre, nous déterminons les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés, en utilisant la méthodologie de surface de réponse RSM et les réseaux de neurones artificiels ANN. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe (V_c , f , ap et t) et les paramètres technologiques d'usinage étudiés (effort de coupe, rugosité de surface et usure). L'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse ont été réalisés par l'utilisation des logiciels de statistique «Minitab

16 et Design-Expert 8 ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés, et de proposer des modèles mathématiques pour chaque phénomène étudié.

Dans **le dernier chapitre**, nous appliquons deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objectif, en utilisant la méthode de Taguchi et l'optimisation multi-objectif, en utilisant les deux méthodes : la méthodologie de surface de réponse (MSR) et l'analyse relationnelle grise (Grey methode). Ainsi, les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs d'optimisation ont été calculées pour chacun des paramètres technologiques d'usinage (volume de copeau enlevé, rugosité de surface, efforts de coupe et usure).

La dernière partie présente les conclusions de ce travail et les perspectives ouvertes par cette étude.

CHAPITRE

I

GENERALITES SUR LA COUPE DES METAUX

Dans ce chapitre nous présentons une synthèse des travaux relatifs à la coupe des métaux. Dans un premier temps nous donnons des généralités sur la coupe des métaux (la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité et les nouvelles perspectives de développement des matériaux à outils, tout en analysant profondément les mécanismes d'usure des outils de coupe). Les travaux de recherche sur l'usinage des aciers inoxydables et les méthodes d'optimisation dans le processus de coupe ont été définis.

I.1. Introduction

Parmi les principaux procédés de fabrication mécanique, il est indispensable d'en citer l'usinage des métaux qui a contribué le plus dans la fabrication et la finition des pièces de précision. Il représente 5% du produit brut, ce qui est énorme pour une seule technique [1] [2]. Dans ce chapitre nous présenterons des notions de base sur la coupe des métaux à savoir, la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité des matériaux et les nouvelles perspectives de développement des matériaux à outils, tout en analysant profondément les mécanismes d'usure des outils de coupe. Les travaux de recherche sur l'usinage des aciers inoxydables et les méthodes d'optimisation dans le processus de coupe ont été définis.

I.2. Définition de la coupe des métaux

Afin de mieux placer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux consiste à façonner et finir une surface de pièce de configuration donnée par un ensemble d'opérations à effectuer à l'aide de machines-outils (*figure I.1*). Cette technique ancienne est souvent appelée coupe onéreuse, dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux). Dans la mise en forme des métaux par la coupe, le procédé de tournage, objet de notre étude, représente à lui seul 33% du domaine de l'usinage par enlèvement de copeaux [3].

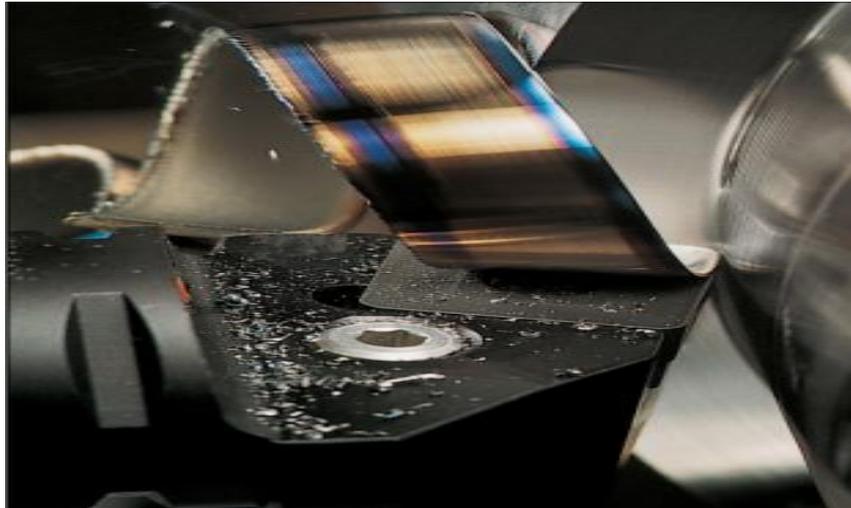


Figure I.1. *Usinage par enlèvement de matière* [4].

I.3. Définitions de l'aptitude à l'usinage

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les

dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Il a pour but de fabriquer des pièces avec une précision macro et micro géométrique imposée pour un prix de revient minimal. La solution adoptée en pratique, sera toujours une affaire de compromis car en dehors des progrès techniques, toute précision n'est accrue qu'en augmentant le prix de revient.

1.4. L'Usinabilité

L'usinabilité, en tant que propriété très complexe du matériau usiné, représente une fonction de plusieurs variables, sur laquelle, influe un grand nombre de paramètres. La *figure 1.2* nous montre une présentation générale de cette notion.

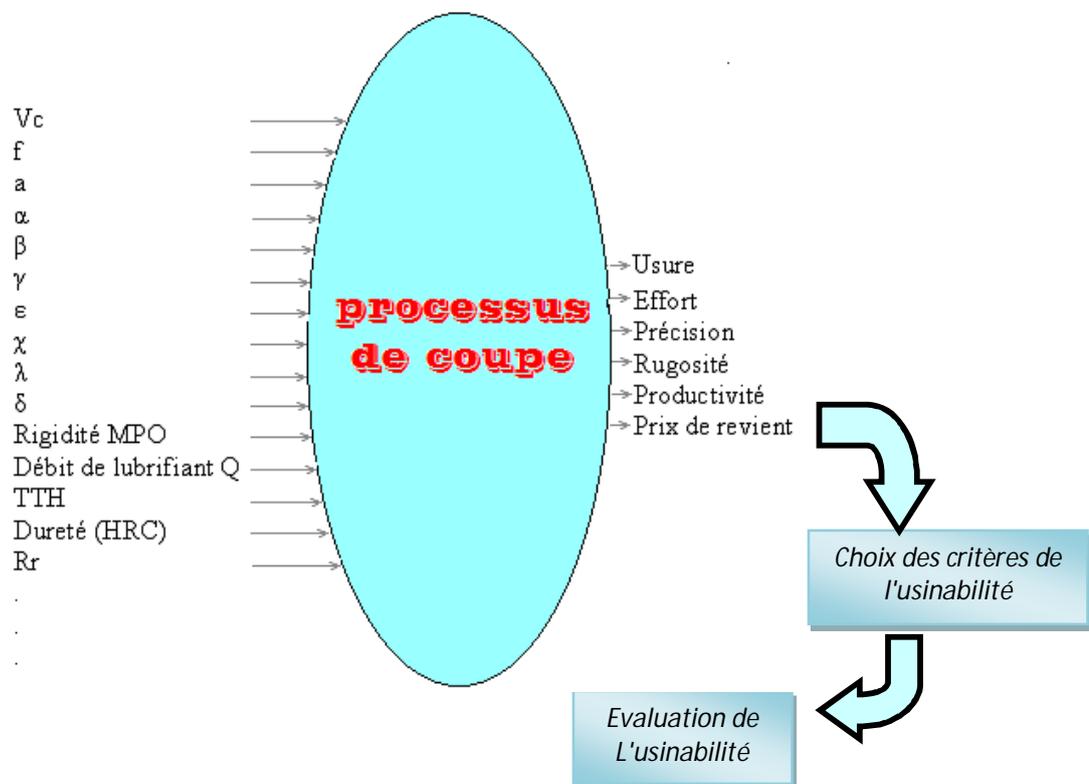


Figure 1.2. Processus de coupe et critères d'usinabilité [5].

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), dans des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide d'outils toujours identiques tant au point de vue de la composition chimique et du traitement thermique qu'au point de vue de leur forme et de leur affûtage [6].

1.4.1. Définitions de l'usinabilité

L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème, qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre, d'autre part l'aspect mécanique du problème, comprenant les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée. [6]. Selon les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux l'usinabilité est définie aussi sous différentes formes :

- D'après A .CZAPLICKI [6] : 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.
- D'après BERARD GRUBER [7] : 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.
- D'après une personnalité notoire d'un centre universitaire renommé dans le monde de la coupe des métaux [8] : La notion d'usinabilité décrit l'aptitude d'un matériau, compte tenu de toutes ses propriétés, à être mis en forme par outil coupant.

1.4.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité

Selon les chercheurs qui ont travaillé dans le domaine de l'usinabilité, on trouve une variété des critères de son évaluation.

- D'après A .CZAPLICKI [6] : les critères de l'usinabilité sont :
 - ✓ La vie d'outil 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.
- D'après P. MATHON [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.
- D'après M. ROBELET [10] : Les principaux critères sont classés de la manière suivante :
 - ✓ 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 , KT , V_{60}) ;
 - ✓ 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.

1.5. Outils de coupe

Les outils en métal dur, essentiellement destinés à l'usinage des métaux, sont également utilisés dans d'autres secteurs comme l'industrie minière, celle du bois ou celle du papier. Le marché mondial de l'outil en métal dur est ainsi immense. L'usinage des métaux concerne de nombreux secteurs comme l'industrie automobile, l'airo-spatial ou l'aéronautique. Pour économiser du temps et donc de l'argent, on cherche à augmenter les vitesses de coupe et les épaisseurs enlevées à chaque passage, sans pour autant nuire à la précision ou à l'état de surface. Les enjeux financiers considérables guident ainsi la recherche vers de nouveaux outils de coupe plus performants afin de supporter des conditions de coupe plus sévères.

En vue de satisfaire ces exigences, un outil de coupe doit être tenace pour résister aux chocs rencontrés lors de l'usinage, il ne doit pas se déformer plastiquement et sa déformation élastique doit être minimale afin de garantir une bonne précision de coupe, il doit être dur pour résister à l'usure et doit supporter les hautes températures atteintes durant les opérations de coupe.

I.5.1. Évolution des outils de coupe

Plusieurs matériaux ont été successivement introduits depuis 1890 permettant des machines-outils plus rapides et plus puissantes [11], [12]. Historiquement, l'évolution est représentée sur le graphe ci-dessous (*figure.1.3*).

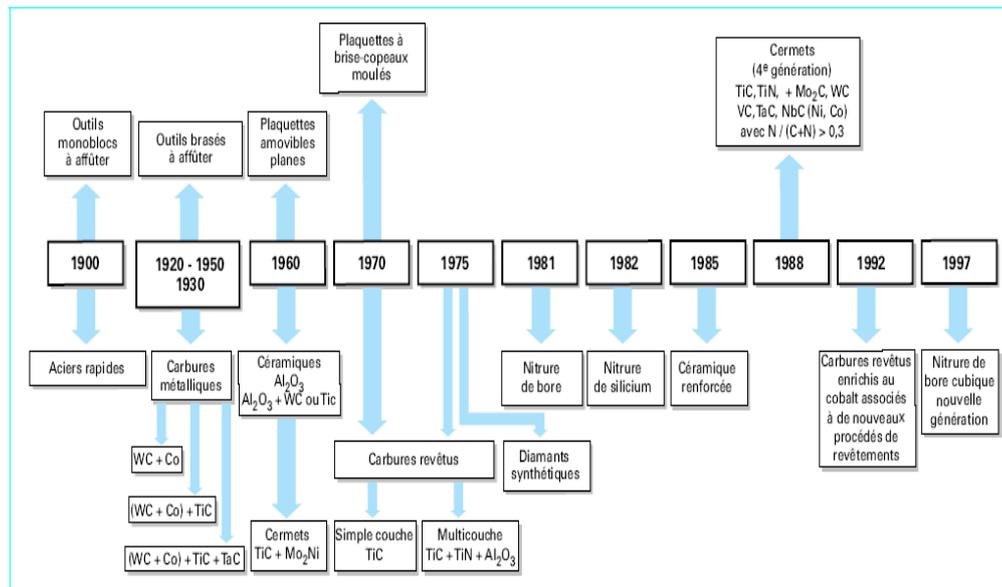


Figure I.3. Date d'apparition des matériaux à outil sur le marché Européen [13].

I.5.2. Matériaux pour plaquette de coupe

Le choix d'un matériau pour un outil est le résultat d'un certain nombre de compromis. La modification des conditions de coupe, du procédé d'usinage ou du matériau de la pièce suffit à bouleverser ce compromis. C'est pourquoi il existe une grande variété de matériau de coupe. Les différents matériaux pour outils de coupe peuvent être regroupés selon différentes catégories :

- les aciers rapides (HSS),
- les carbures,
- Les cermets,
- les céramiques,
- les matériaux ultra-durs (Nitrure de bore cubique CBN, diamant polycristallin PCD).

La *figure.1.4* schématise la position des classes de matériaux utilisés dans un diagramme (dureté-température, dureté-ténacité) et permet d'entrevoir que les domaines d'applications de chaque classe doivent être spécifiques.

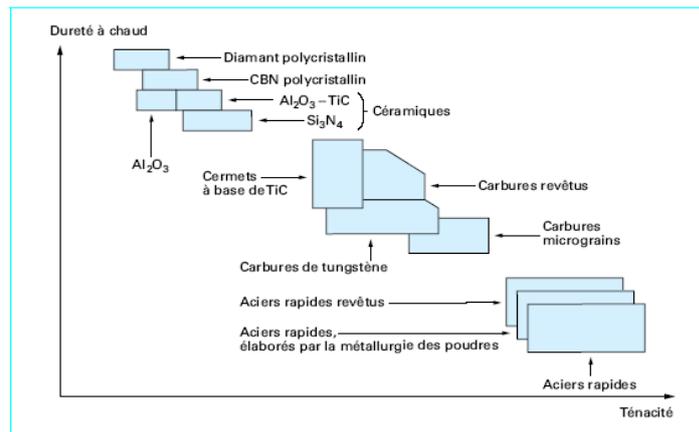
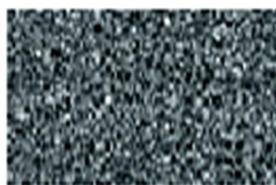


Figure I.4. Comparaison de matériaux de coupe [13].

a) L'acier rapide (AR) est utilisé depuis le début du siècle et il constitue encore aujourd'hui un matériau très utilisé. Il possède la ténacité la plus élevée et demeure donc un choix privilégié pour les opérations instables et à coupe interrompue. De plus, il permet des arêtes très tranchantes, qui permettent la réalisation d'usinage sans bavures, à cet égard il est particulièrement intéressant pour l'usinage des polymères. (figure.I.5).



a



b

Figure I.5. Structure de différents aciers rapides : (a) Structure-métallurgie des poudres (carbures fins et homogènes), (b) Structure-procédé traditionnel (carbures gros et alignés) [14].

b) Le carbure de tungstène cémenté est devenu le matériau le plus utilisé. Ce substrat cémenté est obtenu par frittage de poudres métalliques constituées d'une « matière » dure (à base de carbure de tungstène WC) et d'un liant fusible lors du frittage (cobalt). Il présente un bon compromis dureté-ténacité et peut être utilisée à des températures supérieures à celles de l'acier rapide. En plus du carbure de tungstène (WC) et du Co, le carbure peut contenir dans des proportions variables des carbures additifs : souvent du carbure de titane (TiC), du carbure de tantale (TaC), du carbure de Niobium (NbC) pour les plus utilisés. Ces carbures

additionnels permettent de diminuer l'usure en cratère qui survient lors de l'usinage de l'acier. Le cobalt confère au substrat sa ténacité.

Le mot cermet provient de la contraction des mots céramique et métal CERamique / METal. Dans l'application qui nous intéresse ici, **cermets**, est le nom générique utilisé pour les carbures à base de titane, parmi lesquelles figurent le carbure de titane TiC, le carbonitride de titane TiCN et le nitrure de titane TiN. Comparé aux carbures cémentés, les cermets possèdent une meilleur thermiques mais au détriment de la ténacité [15]. (figure I.6).

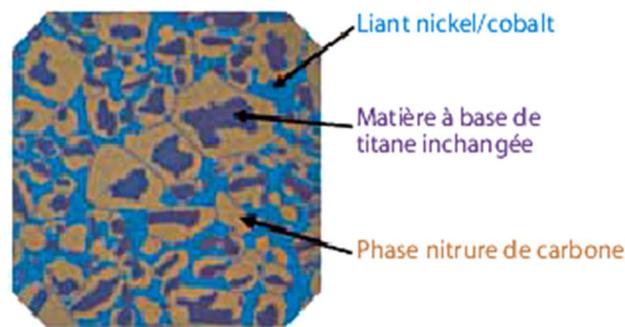


Figure I.6. Micrographie d'une nuance de cermet [14].

c) Les outils en céramique sont chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevée. Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 ou de nitrure de silicium (Si_3N_4). Leur application est principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage [16].

d) Le CBN (nitrure de bore cubique) possède une dureté extrêmement élevée, devancée seulement par le diamant. A chaud, cette dureté demeure excellente et il peut être utilisé jusqu'à $2000^{\circ}C$. Moins fragile que la céramique, il possède une excellente résistance à l'usure par abrasion. Son coût élevé le limite principalement à la production en série. Les cristaux de CBN, similaires à ceux du diamant synthétique, sont maintenus par un liant céramique ou métallique. Un liant céramique offre une ténacité faible mais une meilleure stabilité chimique et une excellente résistance à l'usure. Le liant métallique offre les caractéristiques inverses (bonne ténacité et moins résistant à l'usure). On recommande le CBN pour l'usinage de pièces dont la dureté est supérieure à 48HRC. (figure I.7)

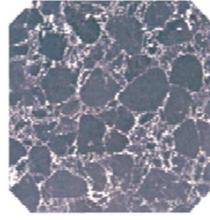


Figure I.7. Microstructure du nitrure de bore cubique (CBN) [14].

e) Le PCD (Diamant polycristallin) est un diamant synthétique qui possède une dureté proche de celle du diamant naturel (dureté 10 dans l'échelle de Mohs). Ce matériau est très onéreux et ses applications sont limitées à l'usinage des matériaux non-ferreux. La haute résistance à l'usure par abrasion les rend économiquement viables pour l'usinage des matériaux hautement abrasifs tels que les composites et le graphite [17], [18], [15].

I.6. Les revêtements

Les revêtements influencent sensiblement le processus d'usinage. Un choix minutieux et adapté à la tâche d'usinage, du revêtement des tranchants de l'outil permet de bénéficier des avantages suivants :

- Augmentation de la durée de vie ;
- Efforts de coupe réduits ;
- Vitesses de coupe et d'avance supérieures ;
- Meilleure qualité de surface ;
- Usinage à sec amélioré ;
- Usinage dur amélioré jusqu'à 68 HRC.

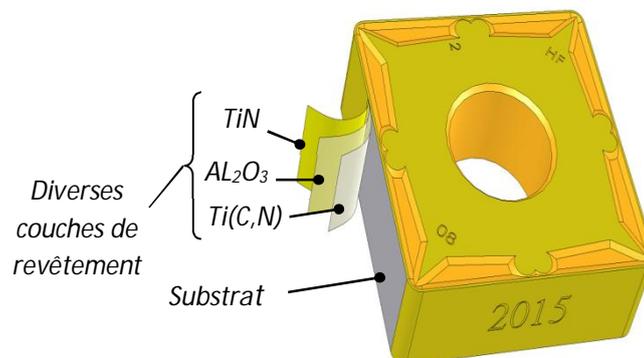
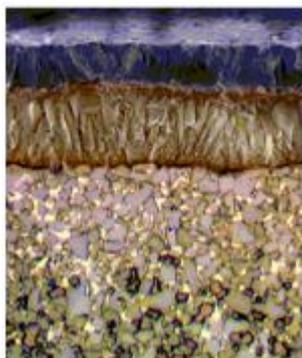


Figure I.8. Revêtement d'une plaquette de coupe [4].

I.6.1. Procédés de revêtement

Des couches de matière dure peuvent être appliquées tant chimiquement que physiquement. Variantes :

- Procédé CVD (Chemical Vapor Deposition), et
- Procédé PVD (Physical Vapor Deposition).

Le procédé CVD (dépôt chimique en phase gazeuse) est largement utilisé pour le revêtement, par exemple, de carbures. Il est particulièrement adapté à la fabrication de couches multiples, dans la mesure où les différentes compositions de couches peuvent aisément être mises en œuvre via la phase gazeuse. Elles sont appliquées sur la surface en diverses épaisseurs, combinaisons et séquences. L'avantage du procédé PVD (dépôt physique en phase vapeur) par rapport au procédé CVD réside dans la séparation de matières à point de fusion élevé à basses températures et la préservation associée du substrat. La réduction de l'épaisseur de la couche constitue un autre avantage, auquel est associé le maintien d'une arête de coupe relativement affûtée (rayon d'arête réduit), comme il est souvent exigé lors de la finition et de l'usinage de précision. (figure.1.9).

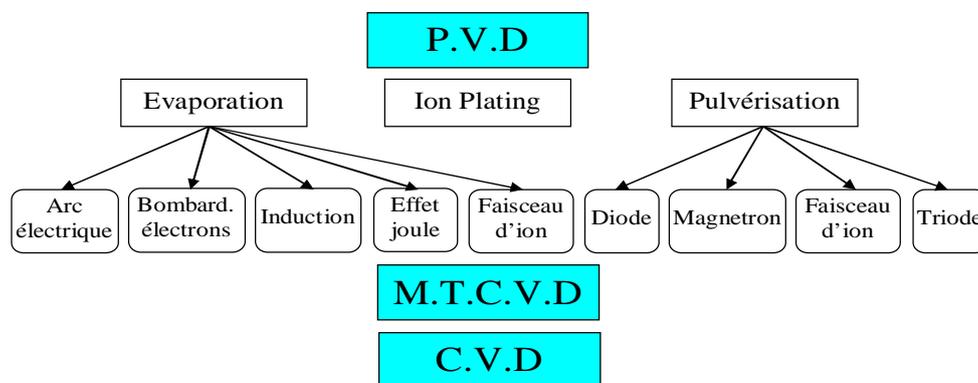


Figure I.9. Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils-coupants [19].

Les revêtements permettent par conséquent d'obtenir des durées de vie nettement supérieures et de remplacer des matières fortement traitées par des matériaux moins durs, mais revêtus (p. ex. les couches DLC appliquées sur des aciers à outils tenaces remplacent des carbures cassants). Le *tableau 1.1* met en parallèle différentes propriétés de couches de matière dure. Le choix de la couche correspondante doit toujours être adapté à la tâche d'usinage concernée.

Tableau.I.1. Propriétés des outils spéciaux revêtus [14].

Type de revêtement	Dureté [HV]	Coefficient de conductibilité thermique [kW/mK]	Température d'utilisation maximale [°C]
TiN	2200	0,07	600
TiCN	3000	0,1	450
TiALN	3300	0,05	800
Diamant	10000	2,0	600

I.7. Endommagement des outils de coupe

I.7.1. Introduction

L'usure est définie par la matière qui sort définitivement du contact outil – pièce. L'usure de l'outil est la conséquence directe des sollicitations très sévères que subissent les faces de coupe et de dépouille. Ces sollicitations sont d'abord de nature mécanique (contraintes permanentes ou cycliques, actions de frottement ...), ce qui exige pour, les outils des qualités de dureté et de ténacité remarquables. La sévérité de ces sollicitations se trouve accentuée par les effets thermiques qui tendent à dégrader les qualités de résistances du matériau coupant [20]. Par ailleurs, ces effets peuvent donner naissance à des réactions physico-chimiques inter – faciales qui peuvent aggraver l'usure de l'outil :

- Inter diffusion entre les éléments de l'outil et du copeau ;
- Phénomènes thermoélectriques pouvant donner lieu à des transferts ioniques.

I.7.2. Formes d'usures

L'étude détaillée du phénomène d'usure révèle différentes formes : L'usure par effets mécaniques et l'usure par effets physico-chimiques. Le frottement copeau-outil donne lieu à des phénomènes de grippage et d'arrachement, ce qui correspond à l'usure adhésive (*figure I.10*).

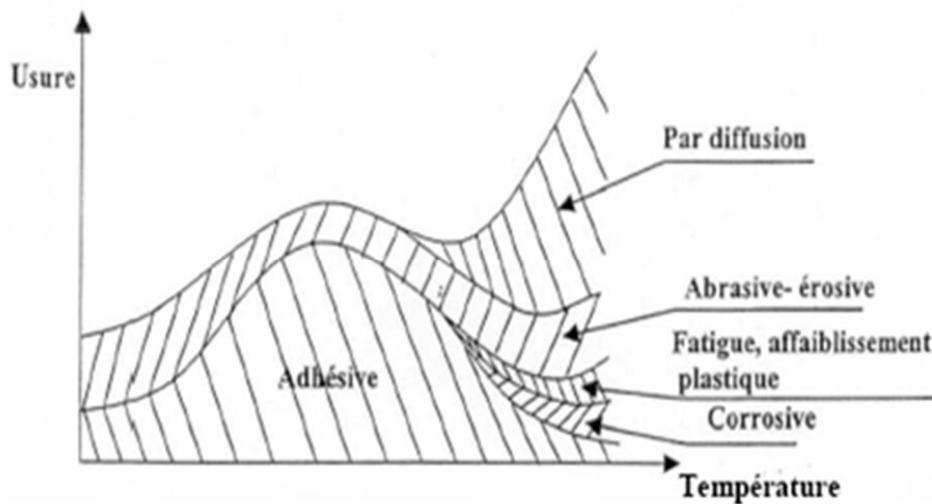


Figure I.10. Mécanismes d'usure [3].

A partir d'une certaine vitesse, donc d'une certaine température correspondant à l'apparition d'une couche de glissement facile et d'une arête rapportée, l'usure adhésive devient moins importante et se traduit par un changement de pente sur la courbe. Si l'on augmente la vitesse de coupe, le mécanisme d'usure par diffusion entre alors en jeu. Avec l'intensification des effets thermiques, il peut apparaître une usure par effet d'oxydation, l'amélioration relative apportée par l'apparition de la couche de glissement facile se trouve alors neutralisée. Si l'on augmente encore la vitesse, l'usure par diffusion croît de façon très importante.

Les formes d'usure d'outils de coupe dépendent des paramètres essentiels (couple outil-matière, conditions d'usinage) on répertorie globalement quatre zone principales d'usure (figure I.11).

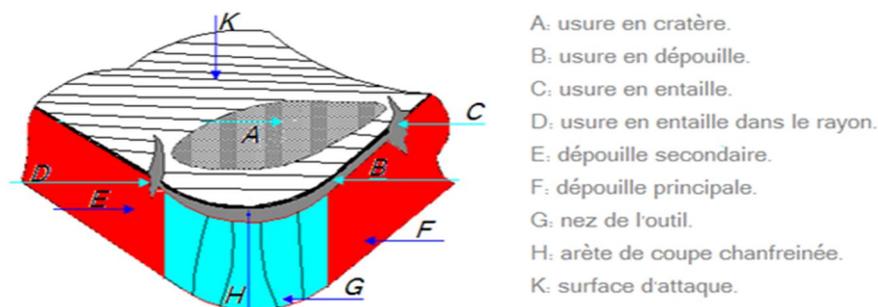


Figure I.11. Différents formes d'usure [5].

Nous pouvons distinguer les formes suivantes :

a) 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. Elle est définie par sa profondeur maximale KT , ou par son rapport de caractérisation :

$$\gamma_r = \frac{KT}{KM} \quad (I.1)$$



Figure I.12. Usure en cratère de la surface d'attaque [4].

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

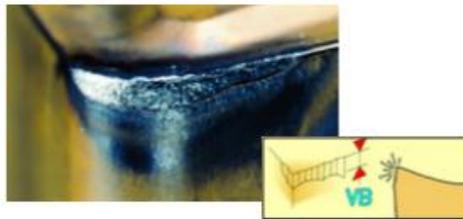


Figure I.13. Usure en débouille [4].

c) 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.14).



Figure I.14. Usure en entaille [4].

d) Usure par 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.15*).

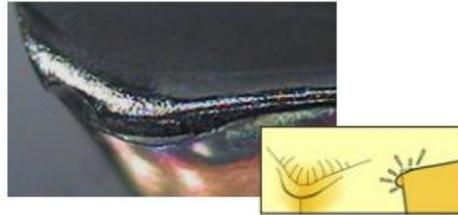


Figure I.15. Usure par déformation plastique [4].

e) Usure par écaillage et fissuration d'arête : Dans le cas d'un usinage avec des efforts cycliques ou des chocs thermiques provoqués par une coupe discontinue ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures ou d'ébréchantures sur l'arête ou sur la face de coupe, celles-ci diminuent considérablement la durée de vie de l'outil (*figure.I.16*).



(a) Usure par écaillage



(b) Usure par fissuration thermique

Figure I.16. Usure par écaillage et fissuration thermique d'arête tranchante [21] [4].

f) Rupture brutale de la pointe d'outil : Ce type de défaillance d'outil est rencontré dans le cas d'usinage des matériaux très durs et hétérogènes avec l'outil en matériau fragile, les outils céramiques y sont très sensibles lors des conditions de coupe mal définies dans les matériaux comportant des inclusions (*figure.I.17*).

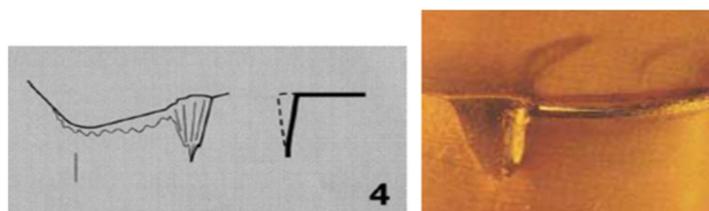


Figure I.17. Rupture par cassure en pointe. [4]

g) Usure par arête rapportée ou copeau adhérente : 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.18*).

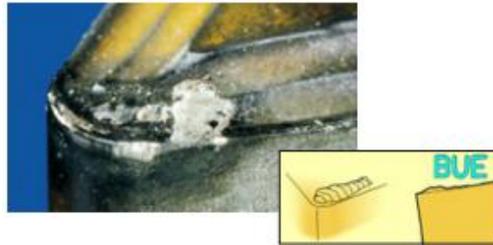


Figure I.18. Arête rapportée ou copeau adhérent [4].

I.8. Les aciers inoxydables

I.8.1. Introduction

L'acier inoxydable (inox), est un matériau relativement récent dont l'usage ne s'est développé qu'à partir des années 1920. Le principe d'allier fer et chrome remonte à 1821, mais ce n'est qu'en 1904 que l'on s'aperçoit que la présence de carbone inhibe la résistance à la corrosion. L'inox, jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc. Ce sont des aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome (couche passive) qui confère à ces aciers leur inoxydabilité (*figure I.19*)

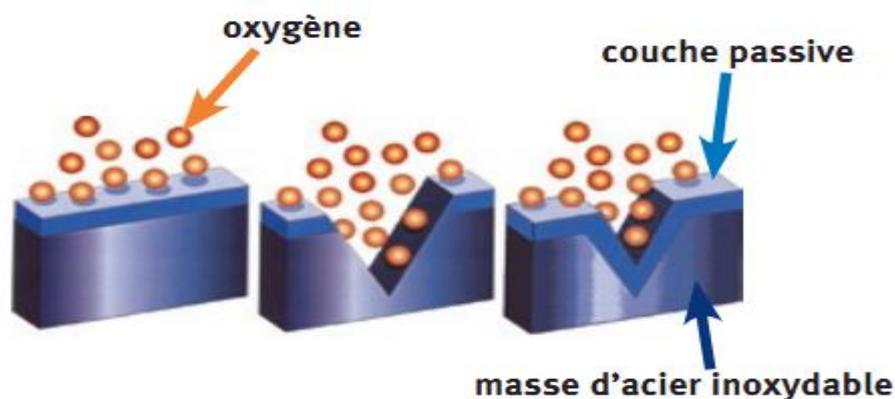


Figure I.19. Couche de surface auto-régénérante (couche passive) [22].

1.8.2. Définition

Un acier inoxydable est un acier fortement allié dont la teneur en chrome doit être supérieure à 10% ce qui lui assure une résistance aux agents oxydants (résistance à la corrosion) [23].

1.8.3. Classification des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables peuvent être classés en trois familles :

- Les aciers martensitiques : Ils sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13 % de chrome avec au moins 0,08 % de carbone. D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel.
- Les aciers ferritiques : Ils ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 27 %), particulièrement intéressants en présence de soufre. Les aciers ferritiques sont parfois utilisés comme barrière de résistance à la corrosion (tôles plaquées, tôle revêtues, protégées (dites « claddées », de « cladding »)) des parois d'équipements sous pression en acier utilisés dans les industries pétrochimique et chimique. Ces aciers sont souvent utilisés en lieu et place des aciers austénitiques pour la réalisation d'ustensiles de cuisine bon marché et de qualité médiocre (plats et couteaux par exemple).
- Les aciers austénitiques : Ce sont de loin les plus nombreux, en raison de leur résistance chimique très élevée, de leur ductilité comparable à celle du cuivre, et leurs caractéristiques mécaniques élevées. Les teneurs en éléments d'addition sont d'environ 18 % de chrome et 10 % de nickel. La teneur en carbone est très basse et leur stabilité peut être améliorée par des éléments tels que le titane ou le niobium. De par leur excellente ductilité, ces aciers ont aussi un domaine d'utilisation aux basses températures (jusqu'à moins 200 °C) et sont en compétition avec les alliages légers et l'acier à 9 % de nickel pour la réalisation d'équipements destinés à la cryogénie.

1.8.4. Structure métallurgique et rôle des éléments d'addition

- Le chrome : Les aciers inoxydables sont des alliages fer-chrome ou plus exactement acier-chrome c'est-à-dire fer-carbone-chrome. Conformément à la norme européenne EN 10088-1[24], un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5 %

en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone. C'est le chrome qui donne aux aciers inoxydables leur résistance à la corrosion.

- Le carbone : La teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 % en masse afin d'éviter la formation de carbures [25] (notamment de carbures de chrome qui est un composé chimique très stable avide de chrome) qui sont préjudiciables au matériau. Par exemple, le carbure Cr_23C_6 qui peut apparaître dans l'austénite 18-9 a un effet négatif vis-à-vis de la corrosion intergranulaire (appauvrissement très important en chrome aux abords des carbures formés provoquant la perte du caractère d'inoxidabilité par captation du chrome) [26].
- Le nickel : Favorise la formation de structures homogènes de type austénitique. Il apporte les propriétés de ductilité, de malléabilité et de résilience. A éviter soigneusement dans le domaine du frottement.
- Le manganèse : Est un substitut du nickel. Certaines séries d'alliages austénitiques ont été développées permettant de faire face aux incertitudes d'approvisionnement du nickel [27].
- Le molybdène et le cuivre : améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation.
- Le tungstène : améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques. Le titane doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) avant que ne se forme le carbure de chrome préservant de ce fait le caractère inoxydable de l'acier en évitant l'appauvrissement en chrome de la matrice aux abords des zones carburées.

1.9. Méthodes d'optimisations

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération.

L'optimisation de processus d'usinage est habituellement difficile, où les aspects suivants sont exigés :

- La connaissance du processus de coupe ;
- Les équations empiriques reliant la vie d'outil, les forces, la puissance, etc., pour développer des contraintes réalistes ;
- Spécifications des possibilités d'usinage ;
- Développement d'un critère efficace d'optimisation ;
- La connaissance des techniques mathématiques et numériques d'optimisation.

En usinage, les tâches d'optimisation sont critiques, parce qu'il comporte beaucoup de processus complexes. Habituellement, la petite variation d'un paramètre cause les changements notables des autres. D'ailleurs, quelques variables, telles que l'effort de coupe ou l'usure d'outil, dépendent fortement des conditions de coupe [28].

Dans ce qui suit nous allons présenter les méthodes d'optimisation les plus utilisées dans les publications les plus récentes dans ce domaine, plus quelques méthodes classiques.

1.9.1. Méthodologie de surface de réponse (RSM)

La méthodologie de surface de réponse est une approche générale pour obtenir la valeur maximale d'une variable dépendante (de réponse) qui dépend de plusieurs variables (explicatives) indépendantes. Cette technique combine la conception des expériences (CdE) et la régression multiple.

La CdE est une approche générale pour concevoir n'importe quelle information recueillant des exercices où la variation est présentée. En modélisation de processus d'usinage, la CdE traite principalement les expériences commandées, où les variations des variables indépendantes sont sous la commande du chercheur.

Les techniques courantes de CdE sont basées sur les principaux suivants :

- **Comparaison** : aides détectant la variation indésirable des résultats mesurés.
- **Randomisation** : diminuer l'influence des facteurs non contrôlés sur les résultats mesurés.
- **Réplication** : laisse estimer la variation des résultats mesurés.
- **Blocage** : réduit les sources connues mais non pertinentes de variation entre les unités et augmente, en conséquence, la précision dans l'évaluation de la source de variation.
- **Orthogonalité** : s'assure que le contraste sera effectué de telle manière que toute l'information puisse être saisie.

L'approche la plus commune dans la CdE est les expériences factorielles, qui fournissent une distribution appropriée des points expérimentaux, selon les principes mentionnés. Dans la *figure.1.20* quelques échantillons de CdE sont montrés [28].

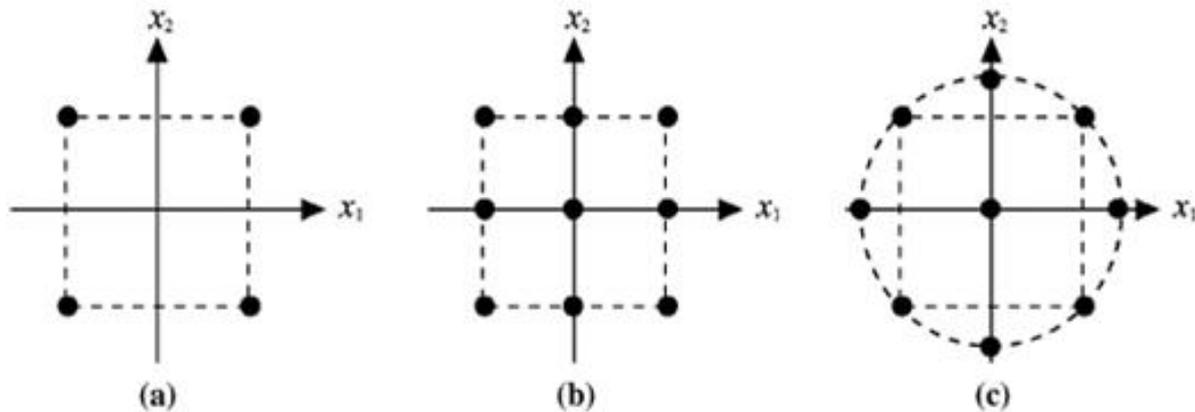


Figure I.20. Exemples des conceptions factorielles : (a) factoriel complet 2^2 , (b) factoriel complet 3^2 et (c) étoile-cubique [28].

1.9.2. Méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi, également connue sous le nom de conception robuste de Taguchi, est une méthodologie pour concevoir les produits qui ont la sensibilité minima à la variation dans des facteurs incontrôlables. Cette méthode est basée sur des techniques conventionnelles, avec quelques directives pour des expériences de présentation et l'analyse de conception des résultats de ces expériences. La méthode de Taguchi utilise une conception spéciale des plans orthogonaux pour étudier l'espace entier de paramètre avec un nombre minimum d'expériences [29]. La méthode de Taguchi (plan orthogonale) est largement utilisée dans l'analyse d'ingénierie et se compose d'un plan d'expérience avec un objectif d'acquérir les données d'une manière commandée, afin d'obtenir des informations sur le comportement d'un processus donné. Le plus grand avantage de cette méthode est de gagner l'effort de réalisation des expériences : gagner le temps de réalisation des expériences et économiser le coût. La méthode de Taguchi est un outil puissant pour la conception d'un système de haute qualité. Taguchi a considéré trois étapes pour le développement des processus et des produits : conception de système, conception de paramètre, et conception de tolérance. Dans la conception de système, l'ingénieur utilise les principes scientifiques et technologiques pour déterminer la configuration fondamentale. Dans l'étape de conception de paramètre, les valeurs spécifiques des paramètres de système sont déterminées. La conception de tolérance est employée pour déterminer les meilleures tolérances pour les paramètres [30]. En plus, le rapport S/N et l'analyse de la variance (ANOVA) peut être utilisé pour indiquer l'impact des paramètres de processus sur les paramètres technologiques d'usinage. La figure 1.21 montre un exemple d'optimisation par la méthode de Taguchi.

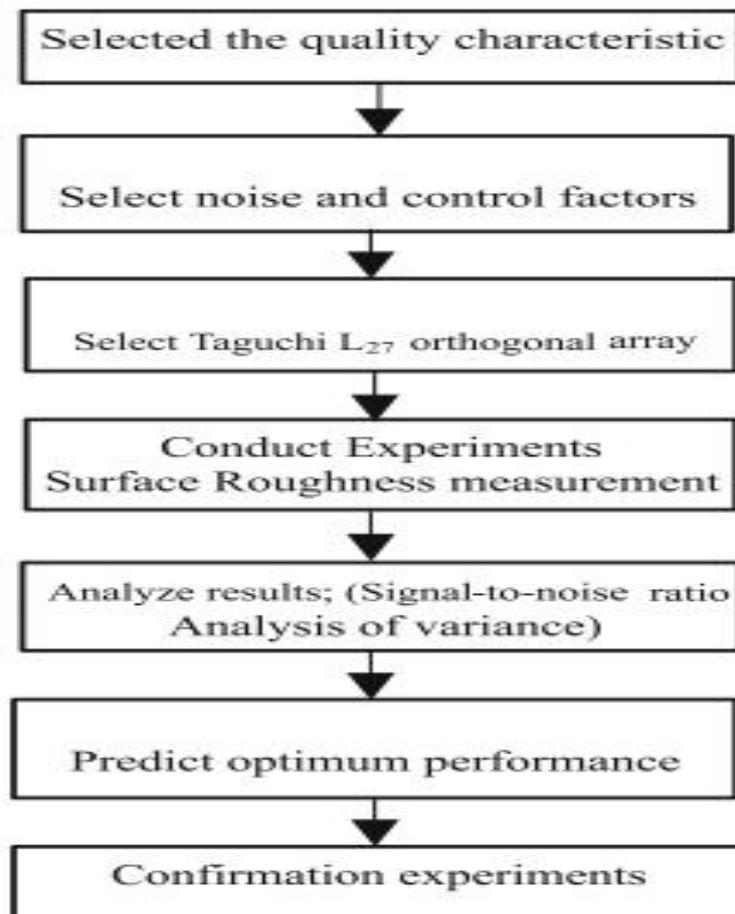


Figure I.21. *Étapes d'optimisation par la méthode de Taguchi* [36]

I.9.3. Algorithmes Génétiques

Dans l'algorithme génétique, un point dans l'espace de recherche est représenté par des nombres binaires ou décimaux, connus sous le nom de corde ou chromosome. Chaque chromosome est assigné une valeur de forme physique qui indique comment étroitement il satisfait l'objectif désiré. Un ensemble de chromosomes s'appelle la population. Une population est actionnée par trois opérations fondamentales, à savoir, reproduction (pour remplacer la population avec le grand nombre de bonnes cordes ayant des valeurs élevées de forme physique), croisement (pour produire de nouveaux chromosomes en combinant les diverses paires de chromosomes dans la population), et mutation (pour la légère modification aléatoire des chromosomes). Un ordre de ces opérations constitue une génération. Les répétitions de processus jusqu'au système converge à l'exactitude exigée après beaucoup de générations. Les algorithmes génétiques ont été trouvés très puissants en découvrant le minimum global [31]. (figure.I.22)

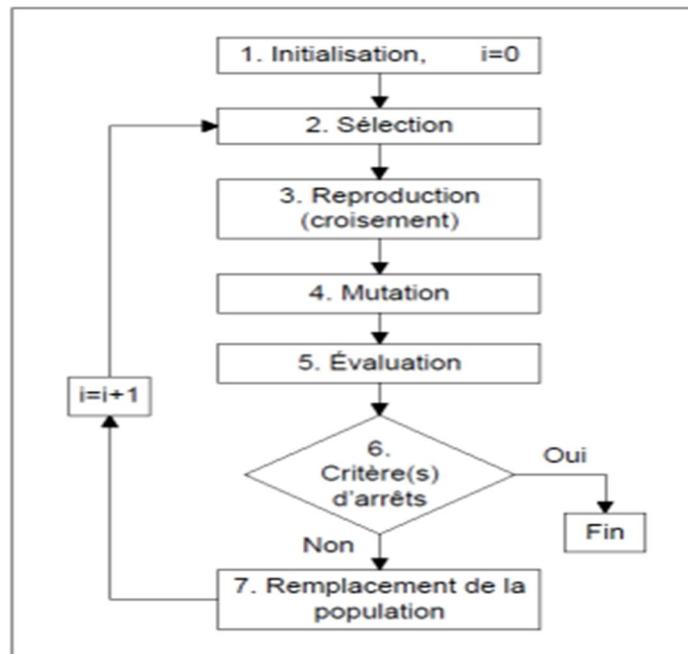


Figure I.22. Schéma algorithmique : Schématisation globale d'un A.G [32].

Il y a plusieurs raisons pour choisir l'algorithme génétique. Premièrement, quand la conception de l'algorithme est faite, on a la possibilité d'utiliser n'importe quel langage informatique ou mathématique pour l'implantation. Un logiciel d'optimisation spécifique n'est pas nécessaire. Ensuite, ce type d'algorithme est reconnu pour être très robuste à l'utilisation. Cette robustesse se traduit principalement par deux caractéristiques intéressantes: il n'est pas nécessaire de fournir un point de départ pour démarrer l'optimisation et l'algorithme résiste assez bien au blocage dans des extremums locaux. Une autre caractéristique intéressante de l'AG est qu'il améliore les solutions en cours d'optimisation. Plus on lui donne du temps, plus il s'approche de l'optimum. Mais si on a besoin d'une réponse, même s'il n'a pas eu le temps de converger, il est généralement capable de nous fournir une solution valide, même si elle n'est pas optimale, ce qui vaut toujours mieux que ne pas avoir de réponse du tout.

I.10.4. Les réseaux de neurones artificiels (RNA)

Les réseaux de neurones se composent de neurones fonctionnant en parallèle. Ces neurones sont inspirés du système nerveux biologique. Comme dans la nature, le fonctionnement du réseau est fortement influencé par la connexion des neurones entre eux. Il est possible d'entraîner un réseau de neurones pour une tâche spécifique (reconnaissance de caractères par exemple) en ajustant les valeurs des connexions (ou poids) entre les éléments

(neurones). La *figure.1.23* représente un neurone simple avec le vecteur des entrées \mathbf{p} , le vecteur des poids \mathbf{W} , le biais associé au neurone b , la fonction de transfert f et enfin la sortie a .

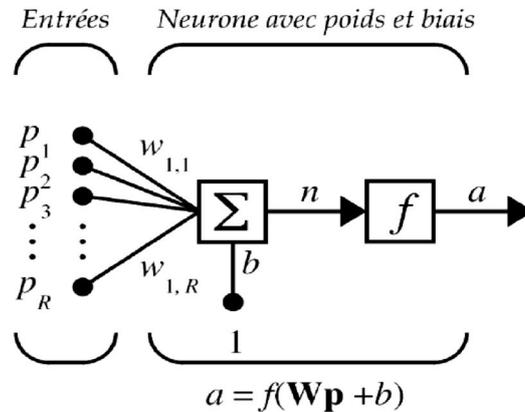


Figure I.23. Schéma d'un neurone unique [33].

1.10.5. Méthodes classiques

Les méthodes les plus fréquemment rencontrées dans les domaines de l'optimisation et de la mise en forme utilisent une fonction à minimiser (ou à maximiser), appelée fonction coût ou "fonction objectif" qui peut dépendre d'un plus ou moins grand nombre de paramètres et de contraintes. L'augmentation du nombre de paramètres influencera le nombre de calculs indispensables à l'estimation des dérivées premières et secondes de la fonction, ainsi que le nombre d'itérations nécessaire pour obtenir la convergence de l'algorithme vers une solution qui vérifie les critères du problème.

1.10.5.1. Méthode de Newton

La méthode de Newton est la généralisation à n dimensions de la méthode de Newton-Raphson [34]. Autour du point \mathbf{x}_k , on considère une approximation quadratique de f telle que :

$$\phi(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}_k) + \nabla f(\mathbf{x}_k)^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_k) + \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_k)^T \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) (\mathbf{x} - \mathbf{x}_k) \quad (\text{I.2})$$

Où $\nabla^2 f(\mathbf{x}_k) = \mathbf{H}(\mathbf{x}_k)$ est la matrice Hessienne de f au point \mathbf{x} .

Si $\mathbf{H}(\mathbf{x}_k)$ est strictement positive, alors $\phi(\mathbf{x})$ est strictement convexe. Son minimum sera donc atteint pour $\nabla \phi(\mathbf{x}) = 0$:

$$\nabla f(\mathbf{x}_k) + \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) (\mathbf{x} - \mathbf{x}_k) = 0 \quad (\text{I.3})$$

Ou encore :

$$x_{k+1} = x_k - [H(x_k)]^{-1} \nabla f(x_k) \quad (I.4)$$

L'algorithme de Newton revient donc à itérer sur cette dernière équation. Cette méthode présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, si la matrice Hessienne n'est pas définie positive, il peut être observé soit une divergence de l'algorithme, soit une convergence vers un point qui ne sera pas un minimum mais un maximum local. Il est possible de remédier à ce problème en introduisant une étape de minimisation unidirectionnelle qui donnera :

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k [H(x_k)]^{-1} \nabla f(x_k) \quad (I.5)$$

Dans laquelle le coefficient α est calculé comme il a été vu précédemment.

Un autre inconvénient de cette méthode, qui lui est commun avec la méthode précédente, est qu'il est nécessaire de calculer les dérivées secondes et d'inverser la matrice Hessienne.

1.10.5.2. Méthode de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson est une méthode fréquemment utilisée pour la résolution d'équations non linéaires. Cette méthode consiste à résoudre l'équation $f'(x^*) = 0$ par le biais d'une linéarisation de f' .

Au point x_k , on considère l'approximation suivante [34]:

$$f'(x) \cong f'(x_k) + (x_{k+1} - x_k) f''(x_k) = f_1(x) \quad (I.6)$$

On prend comme prochain point l'intersection de f_1 avec l'axe des x , soit $f_1(x)=0$. Ce qui donne :

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)} \quad (I.7)$$

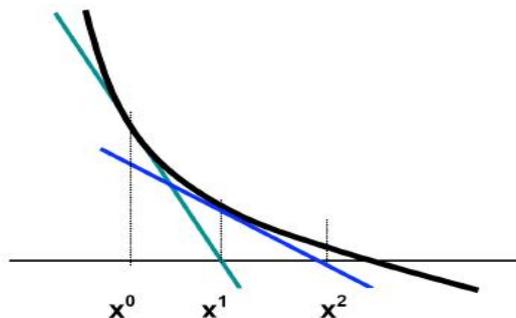


Figure I.24. Itération pour l'algorithme de Newton-Raphson [34].

La convergence se fait en un seul pas si la fonction est quadratique. Les inconvénients de cette méthode résident dans le fait qu'il soit nécessaire de calculer la dérivée première et la dérivée seconde de la fonction.

I.10. Etat de l'art

Diverses études ont été entreprises pour étudier l'optimisation des conditions de coupe et l'usinage des aciers inoxydables :

Les principaux paramètres qui rendent l'usinabilité des aciers inoxydables austénitiques très difficile sont la haute résistance, faibles conductivités thermique et la ductilité élevée. Korkut et autres [35] ont conduit une étude expérimentale pour déterminer la vitesse de coupe optimale lors de l'usinage d'un acier inoxydable austénitique AISI 304 avec des outils en carbure cémenté. L'influence de la vitesse de coupe sur l'usure des outils et la rugosité de surface a été étudiée. Une diminution de l'usure d'outil avec l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à 180 m/min a été observée, la rugosité de surface a été également diminuée avec l'augmentation de la vitesse de coupe. La corrélation a été faite entre usure/rugosité de surface et le copeau obtenu aux trois vitesses de coupe 120, 150, 180 m/min. Les auteurs trouvent comme résultat que l'usure en dépouille diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe au-dessus de 180 m/min (figure I.25).

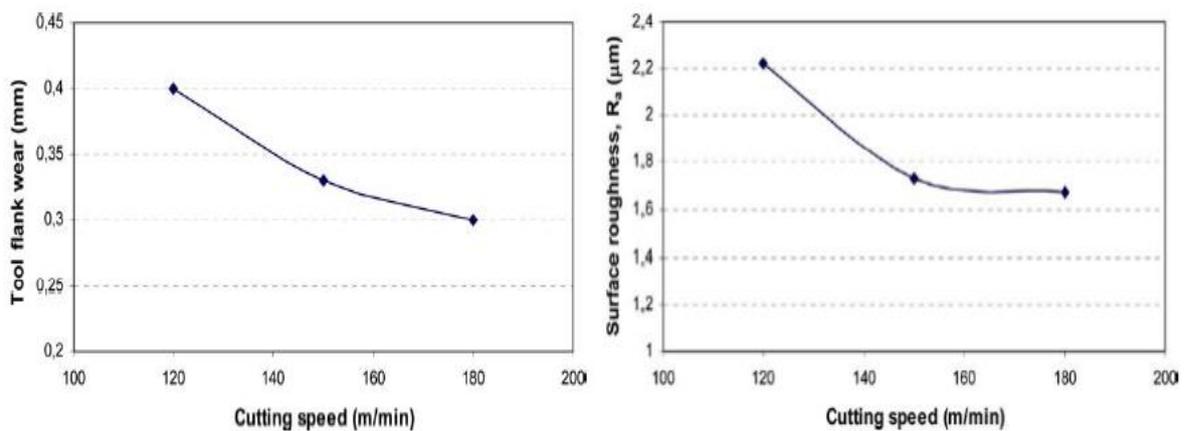


Figure I.25. Evolution de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 [35].

Eyup Bagci et autres [36] ont présenté un développement de la méthode d'optimisation de Taguchi pour minimiser la rugosité de surface, lors du fraisage de face d'un alliage à base de cobalt (Stellite 6). Les paramètres de coupe utilisés en fraisage sont : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe. Une série d'expériences de fraisage a été effectuée

pour mesurer les valeurs de la rugosité de surface. Les plans orthogonaux de Taguchi, le rapport signal/bruit (S/N) et l'analyse de variance (ANOVA) sont utilisés pour trouver les niveaux optimaux et d'analyser l'effet des paramètres de fraisage sur la rugosité de surface. Des tests de confirmation des niveaux optimaux trouvés sont effectués afin d'illustrer l'efficacité de la méthode d'optimisation de Taguchi. Il est ainsi démontré que la méthode de Taguchi est très appropriée pour résoudre le problème de qualité de surface se produisant lors du surfacage de la matière Stellite 6. Les auteurs ont conclu que les tests de confirmation expérimentale de régime optimal trouvés ont prouvé l'efficacité de la méthode d'optimisation de Taguchi (figure I.26).

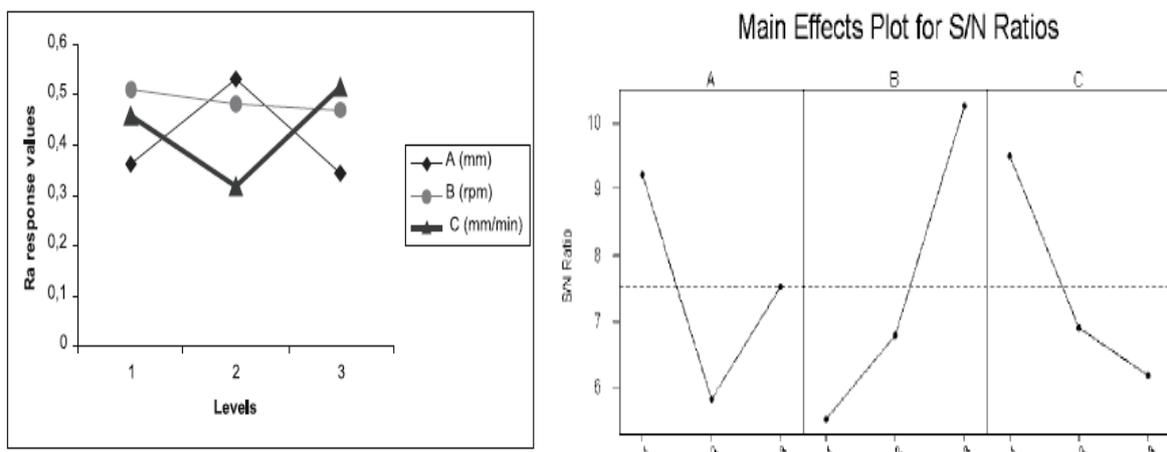


Figure I.26. Graphiques des effets principaux et d'interaction pour la rugosité de surface Ra [36].

Ciftci [37] a présenté dans une recherche les résultats expérimentaux lors du tournage à sec des aciers inoxydables austénitiques (AISI 304 et AISI 316) à l'aide des outils en carbure cémentés avec un revêtement CVD. Les essais de tournage ont été effectués à quatre vitesses de coupe différentes (120, 150, 180 et 210 m/min) tandis que la vitesse d'avance et la profondeur de passe étaient maintenues constantes à 0.16 mm/tr et à 1 mm, respectivement. Les influences de la vitesse de coupe, l'outil de coupe revêtu et le matériau de la pièce sur la rugosité de surface usinée et les efforts de coupe ont été étudiés. Les parties usées des outils de coupe ont été également examinées sous le microscope à balayage électronique (MEB). Les résultats ont prouvé que la vitesse de coupe a affecté de manière significative les valeurs de rugosité de surface usinées. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, les valeurs de la rugosité de surface diminuent jusqu'à atteindre une valeur minimum d'au-delà elles augmentent (figure I.27, I.28).

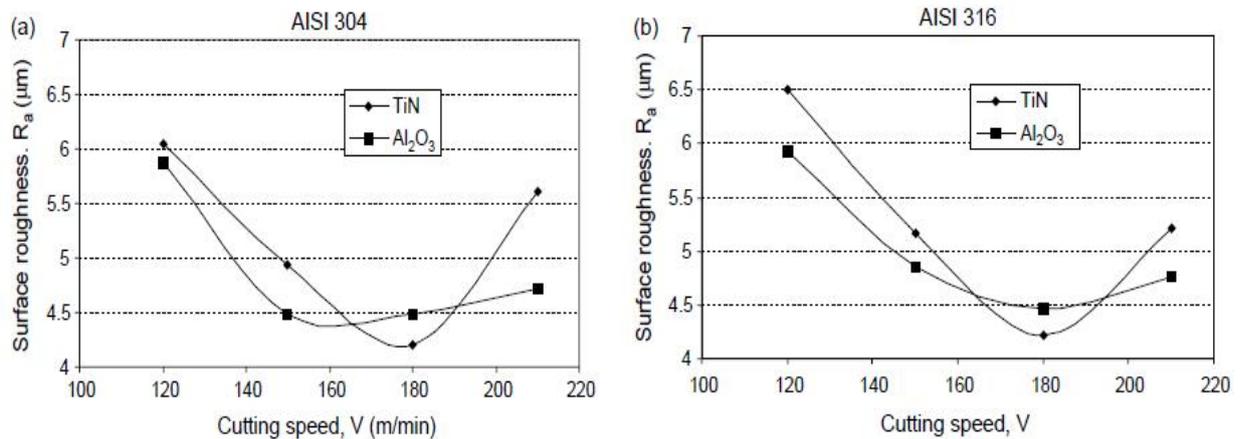


Figure I.27. Evolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe lors du tournage des aciers inoxydables (a) AISI 304 et (b) AISI 316 en utilisant des outils en carbure revêtue [37].

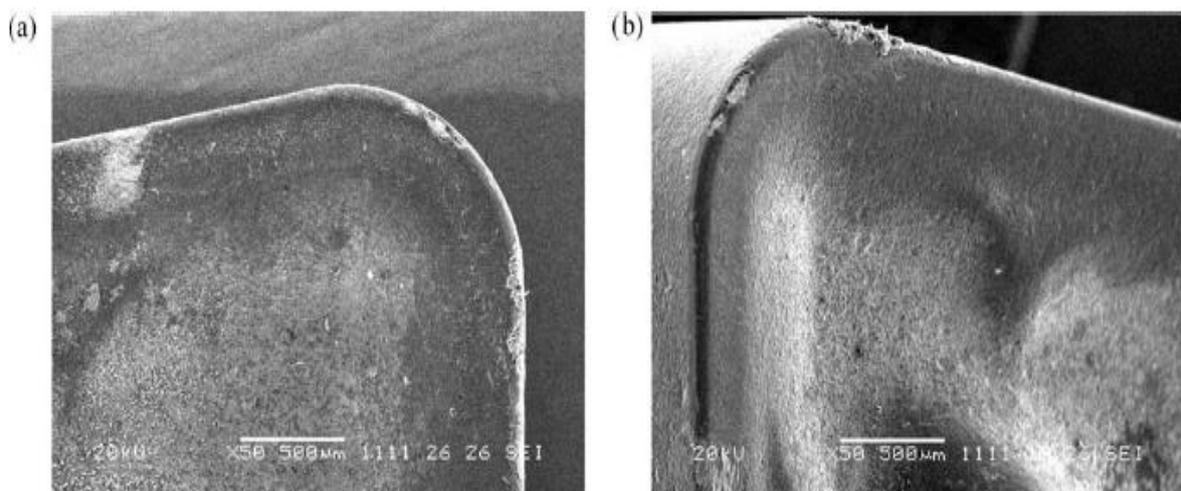


Figure I.28. Evolution de l'usure des outils revêtue avec $\text{TiCN/TiC/Al}_2\text{O}_3$ lors de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304 à $V_c = 120$ m/min [37].

L'usure des outils affecte les dimensions et la qualité de surface de la pièce et il est également l'un des critères importants dans la détermination de la durée de vie de l'outil. Quand l'outil atteint le critère d'usure admissible, l'arrête de coupe s'use et ne peut pas être employé plus loin. Des études d'usinage ont été entreprises par Kumar et autres [38] sur un acier inoxydable martensitique durci (60 HRC) pour analyser l'effet de l'usure des outils sur la durée de vie des outils de coupe en céramique d'alumine. L'usure d'outil telle que l'usure en dépouille, l'usure en cratère et l'usure en entaille sont notées. Ces données d'usure sont employées pour développer des modèles mathématiques d'usure d'outil en utilisant l'analyse de régression

multiple. La durée de vie des outils de coupe en céramique d'alumine est évaluée à partir de ces derniers modèles d'usure et l'effet de divers types d'usure sur la durée de vie d'outil est analysé. Les auteurs ont conclu que, l'usure en dépouille affecte la durée de vie d'outil à la vitesse basse, cependant, l'usure en cratère et l'usure en entaille affecte la durée de vie d'outil à la vitesse haute, c.-à-d. au-dessus de 200 m/min. La durée de vie des outils de coupe en céramique d'alumine renforcés par SiC est affectée par l'usure en dépouille à la vitesse basse, mais elle est affectée par l'usure en cratère à une vitesse plus élevée. Les outils de coupe en céramique à base d'alumine Ti [C, N] présentent une durée de vie plus élevée que l'autre outil de coupe, (figure I.29).

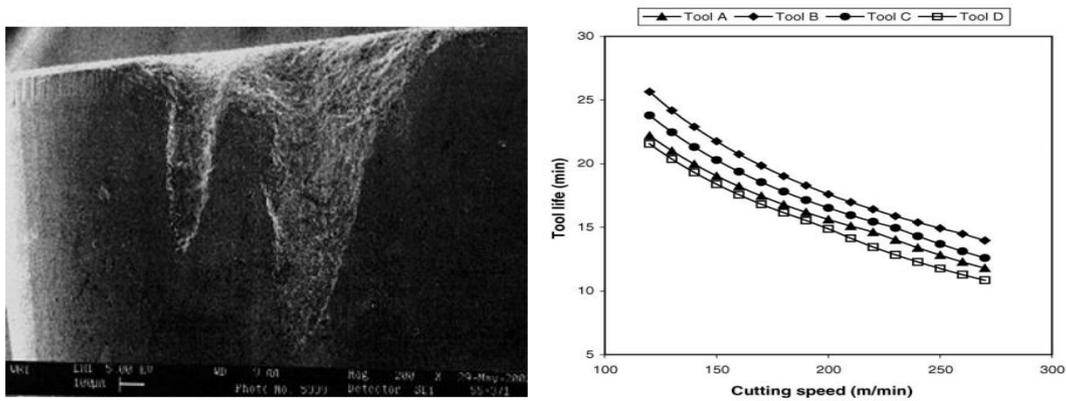


Figure I.29. Evolution de la durée de vie des outils de coupe en céramique à base d'alumine en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique SS 410 [38].

Bruni et autres [39] ont investigué les effets produits par les opérations de coupe sur la rugosité de surface de la pièce et l'usure de l'outil. À cette fin, le tournage de l'acier inoxydable AISI 420B a été réalisée sous : lubrifié, quantité minimum de lubrifiant (MQL) et des conditions de coupe à sec, en utilisant à la fois l'outil avec plaquette conventionnelle et avec plaquette à géométrie wiper, au centres de tournage équipés avec un bâti en polymère et en fonte. La rugosité de surface de la pièce et l'usure de l'outil ont été mesurés, et les résultats analysés et discutés. Les auteurs ont trouvé comme résultat que, la technique MQL ne procure pas d'avantages par rapport à la coupe sec en termes des valeurs VB et Ra . Les plaquettes avec géométrie wiper, donnent une rugosité de surface meilleure à celle obtenue en utilisant les plaquettes conventionnelles. Le tournage effectué sur une machine à outil équipée d'un bâti en polymère permet l'obtention des valeurs de VB et Ra meilleure à ceux fournis par les mêmes opérations effectuées sur le centre de tournage équipés avec un bâti en fonte (figure I.30).

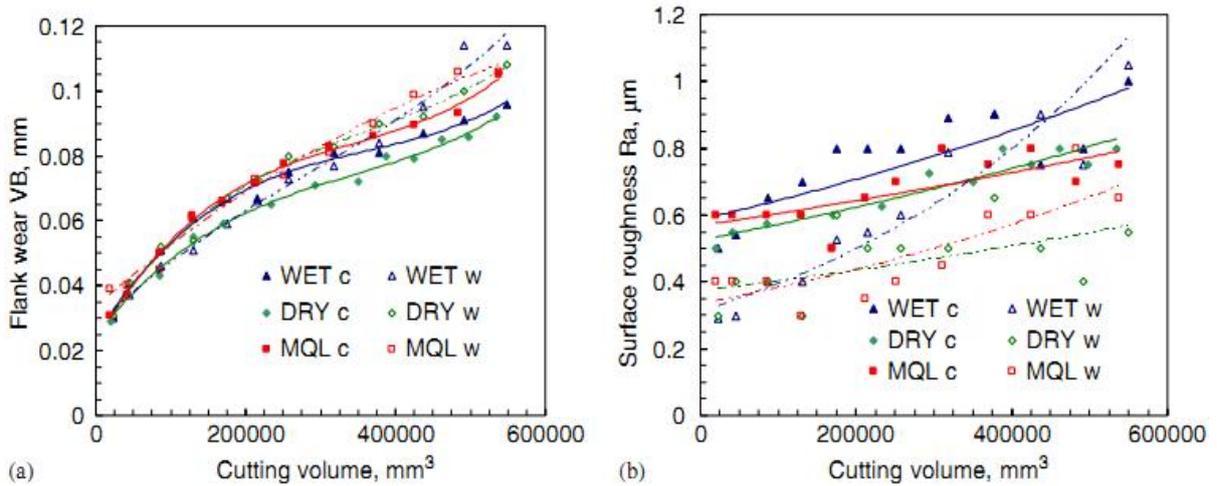


Figure I.30. Usure en dépouille et rugosité de surface en fonction de volume de copeau enlevé [39].

Noordin et autres [40] ont conduit une étude sur les performances de la géométrie wiper du plaquette en carbure revêtue utilisé dans le tournage avec le respect de la durée de vie d'outil et la rugosité de surface. L'acier inoxydable AISI 420 durci à 47 – 48 HRC a été tourné à des diverses vitesses de coupe et d'avance. Les résultats ont prouvé que la durée de vie maximum d'outil de 18 minutes a été réalisée et elle a diminué dans les vitesses de coupe et d'avance plus élevées. L'outil en carbure revêtu avec une géométrie wiper a comme conséquence une surface très fine, mieux que les valeurs théoriques. L'utilisation de la haute vitesse de coupe et d'avance est avérée défavorable pour le tournage de l'acier inoxydable AISI420. La déformation plastique de substrat et la déformation plastique discrète (de revêtement) ont été démontrées, (figure.I.31 et I.32).

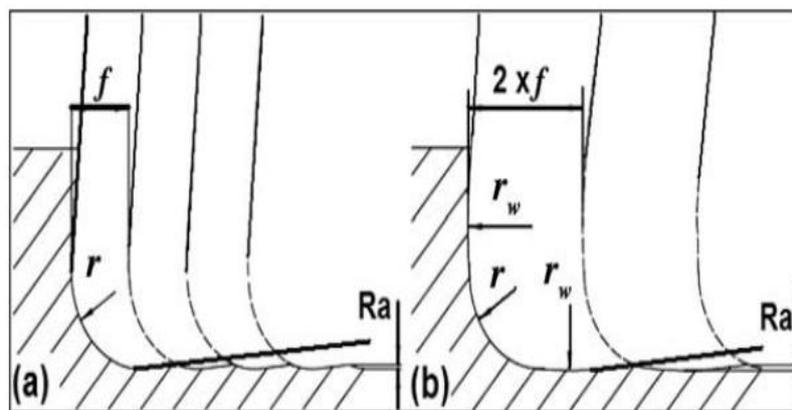


Figure I.31. Influence de la géométrie de l'outil de coupe sur la rugosité de surface : a) géométrie conventionnelle et b) wiper [40].

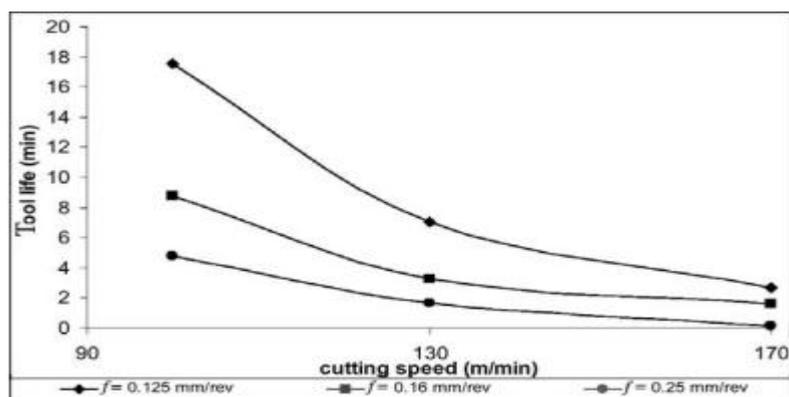


Figure I.32. Duré de vie de l'outil en carbure revêtu en fonction de diverses vitesses de coupe et d'avances [40].

Noordin et autres [41] ont exécuté des essais de tournage à sec avec une profondeur de passe constante afin d'étudier l'utilisabilité des outils de coupe en cermet (KT 315) avec revêtement TiCN et en carbure (KC 9110) revêtu lors du tournage d'un acier inoxydable martensitique trempé (43-45 HRC). La vitesse de coupe, l'avance et l'angle de l'arrête de coupe (SCEA) étaient les variables indépendantes considérées. Le SCEA influence la durée de vie d'outil où le changement de SCEA de 0 à -5° augmente la durée de vie de l'outil. La plus longue durée de vie d'outil était pour l'outil KT 315 à basse vitesse de coupe, basse avance et SCEA = -5° . L'usure en dépouille et la rupture catastrophique du bec de l'outil sont les types principaux de mode de défaillance d'outil déterminant la durée de vie d'outil. Les résultats suggèrent que le tournage à sec de l'acier inoxydable durci pourrait être effectué en utilisant les outils de coupe en cermet revêtu par TiCN, en carbure revêtu et un SCEA = -5° , avec le choix convenable de la vitesse de coupe et de l'avance, (figure I.33).

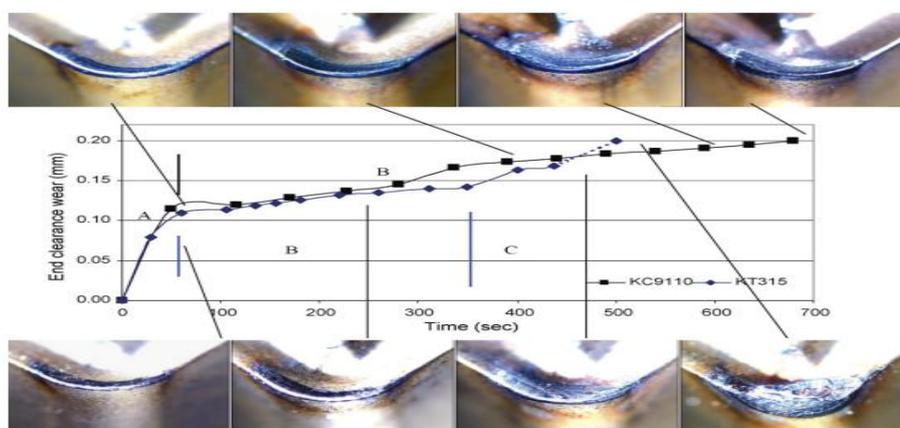


Figure I.33. Comparaison de l'évolution de l'usure entre KT 315 et KC 9110 en utilisant SCEA = -5° à 130 m/min et $f = 0,16$ mm/tr [41].

El-Tamimi et autres [42] ont étudié les caractéristiques d'usinage des matériaux à haute résistance en utilisant des outils de coupe en carbure à différentes conditions de coupe. Des essais d'usinage ont été effectués en utilisant la coupe orthogonale pour étudier les caractéristiques d'usinage de l'acier inoxydable à haute résistance AISI 420 dans différentes conditions de coupe et angles d'attaque d'outil. Cette évaluation est réalisée en étudiant l'effet des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, et géométrie d'outil) sur les efforts de coupe, la pression spécifique de coupe, l'angle de cisaillement, coefficient de frottement, contrainte de cisaillement et la déformation en cisaillement. Des équations empiriques et des corrélations de comportement de chacune des réponses ont été étudiées en fonction des variables indépendantes. Les résultats trouvés par les auteurs montrent, quand la vitesse de coupe est augmentée jusqu'à 60 m/min, les composantes de l'effort de coupe et la pression spécifique de coupe augmentent pour atteindre les valeurs critiques maximum. D'autre côté l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à 100 m/min réduit les composantes de l'effort de coupe et la pression spécifique de coupe graduellement. Un accroissement plus ultérieur de vitesse de coupe (au-dessus de 100m/min) garde la pression spécifique de coupe et les composantes de l'effort de coupe presque constante. Il est clair également que les composantes de l'effort de coupe diminuent à mesure que la valeur de l'angle d'attaque augmente, (figure I.34).

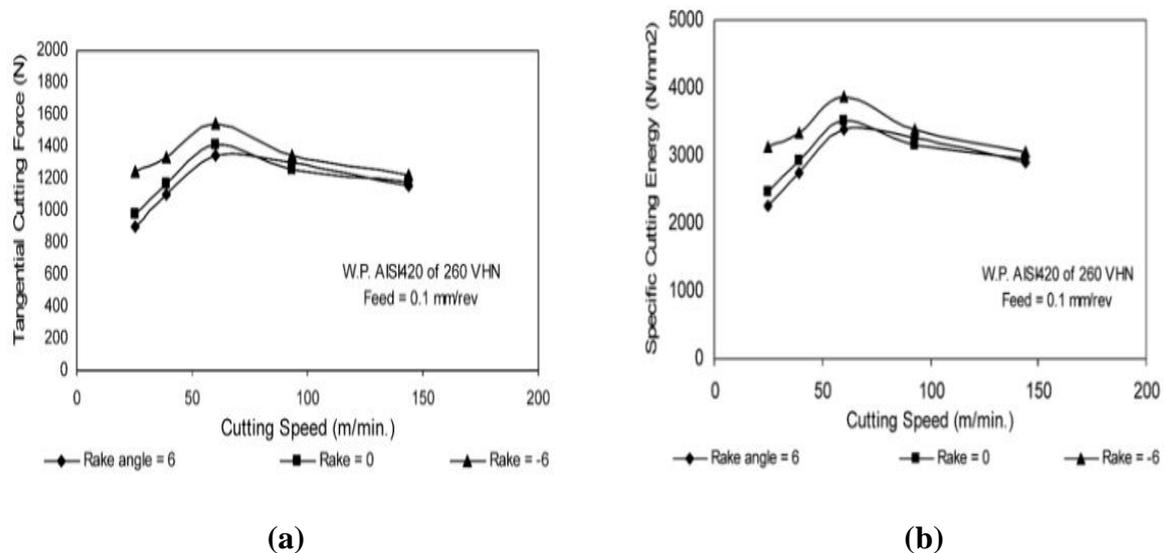


Figure I.34. Effet de la vitesse de coupe sur : a) pression spécifique de coupe et b) effort de coupe tangentielle pour différents angles d'attaque [42].

H.Liew et autres [43] ont étudié l'usure des outils en carbure avec un revêtement PVD et sans revêtement, pendant le fraisage de STAVAX (acier inoxydable AISI 420 modifié) à des

basses vitesses. Ils n'ont observé aucun changement significatif de l'usure d'outil quand la vitesse de coupe a été augmentée de 25 à 50 m/min. Ils ont trouvé que l'augmentation de la dureté de la pièce de 35 à 55 HRC a causés une augmentation remarquable de l'usure en dépouille. En usinant le STAVAX avec une dureté de 35 et 40 HRC, l'outil revêtu a été principalement soumis à l'usure abrasive durant toute la durée de l'essai. Pendant l'usinage du STAVAX avec une dureté de 55 HRC avec l'outil revêtu, trois étapes distinctes de l'usure d'outil se sont produites, (i) usure initiale par abrasion, suivie par (ii) de fissure et de détérioration, et (iii) de la formation de la rupture individuelle de surface aux fissures qui alors agrandiraient et fusionneraient pour former une grande surface de rupture. L'outil revêtu a montré une résistance de rupture beaucoup plus élevée que l'outil non revêtu. La résistance élevée de rupture montrée par l'outil revêtu pourrait être attribuée à l'efficacité de revêtement en empêchant la formation des fissures qui agiraient en tant qu'emplacements préférentiels pour que la rupture ait lieu. Les résultats expérimentaux prouvent également que le revêtement empêche la détérioration de l'arrête et augmentent la résistance à l'usure abrasive de l'outil. La ductilité de la pièce et l'usure d'outil ont semblé avoir des influences sur l'état de surface de la pièce. Ils ont constaté que le fluide de coupe était efficace en empêchant la rupture catastrophique de l'outil, (figure I.35).

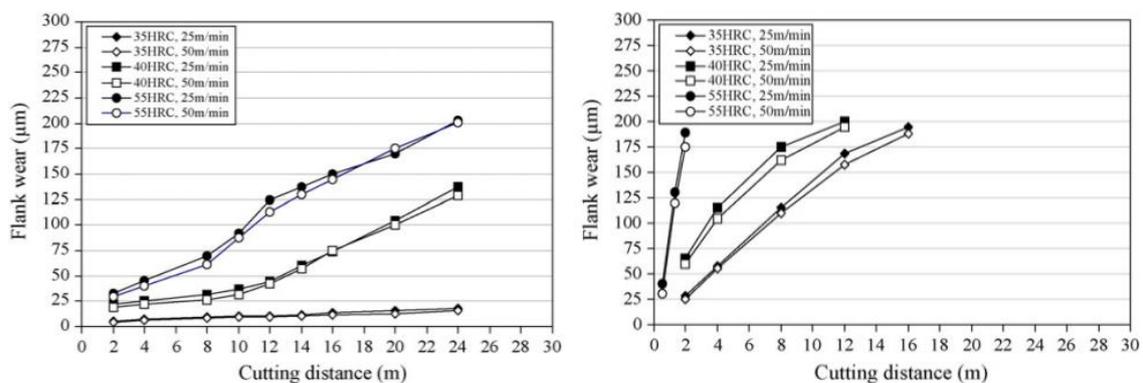


Figure I.35. Evolution de l'usure en dépouille des outils en carbure : a) avec revêtement et b) sans revêtement à $V_c = 25$ et 50 m/min [43].

H. Liew et autres [44] ont effectué des expériences pour étudier l'usure des outils en carbure, avec revêtement (PVD), (CVD) et sans revêtement dans l'usinage d'ultra-précision de STAVAX (l'acier inoxydable AISI 420 modifié) dans les basses vitesses avec et sans lubrifiant. Un pulvérisé de mélange d'air comprimé, l'huile de paraffine liquide, et de cyclométhicone a été employé comme lubrifiant. Lors de l'usinage à 44 m/min dans des conditions à sec, la surface d'attaque de l'arête d'outil a été principalement soumise à l'usure

abrasive. Le ramène de la vitesse à 10 m/min a augmenté l'usure en dépouille et la sévérité de l'usure abrasive et a causé la rupture de bord d'outil, menant à une détérioration de l'état de surface. Le lubrifiant était efficace en évitant la rupture de surface, en réduisant l'usure en dépouille, et en améliorant la rugosité de surface. Parmi les outils de revêtement PVD et de revêtement CVD, le premier type d'outil est plus approprié pour être employé dans l'usinage d'ultra-précision. L'outil avec revêtement CVD a vibré rapidement, entraînant la rupture étendue sur la surface en dépouille et la surface finale à être ondulé, (figure I.36).

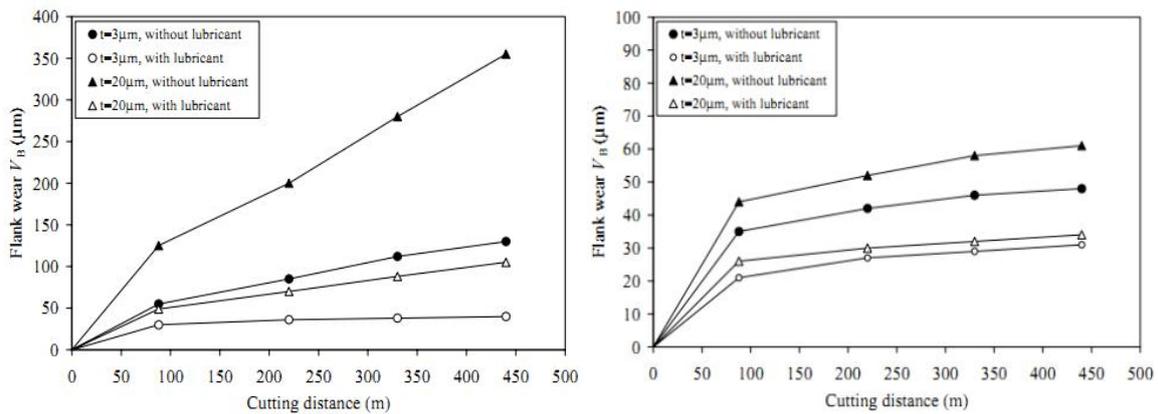


Figure I.36. Usure en dépouille de (a) outil en carbure avec revêtement CVD, (b) outil en carbure avec revêtement PVD, lors de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 420 [44].

Bouacha et autres [45] ont réalisé une étude expérimentale en tournage dur avec l'outil de CBN de l'acier à roulement AISI 52100, durci à 64 HRC. Les effets combinés des paramètres de coupe sur les variables de sortie d'usinage sont étudiés en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA). Les modèles quadratiques de RSM lié à la technique d'optimisation ont été employés pour trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe avec le respect aux objectifs (efforts de coupe et rugosité de surface). Les résultats montrent que la rugosité de surface est influencée principalement par la vitesse d'avance et la vitesse de coupe. En outre, les auteurs soulignent que l'effort radial est la plus haute des composantes de l'effort de coupe, et elle est extrêmement sensible à la dureté de la pièce, à l'angle d'attaque négatif et à l'évolution d'usure d'outil. En conclusion, la profondeur de passe montre l'influence maximale sur les efforts de coupe par rapport à la vitesse d'avance et la vitesse de coupe. Les résultats d'ANOVA et les expériences de validation ont montré que les modèles mathématiques élaborés permet de prévoir les valeurs de rugosité de surface et de l'effort de coupe avec un intervalle de confiance de 95%, et un coefficient de détermination élevé (plus grand que 96%), (figure I.37).

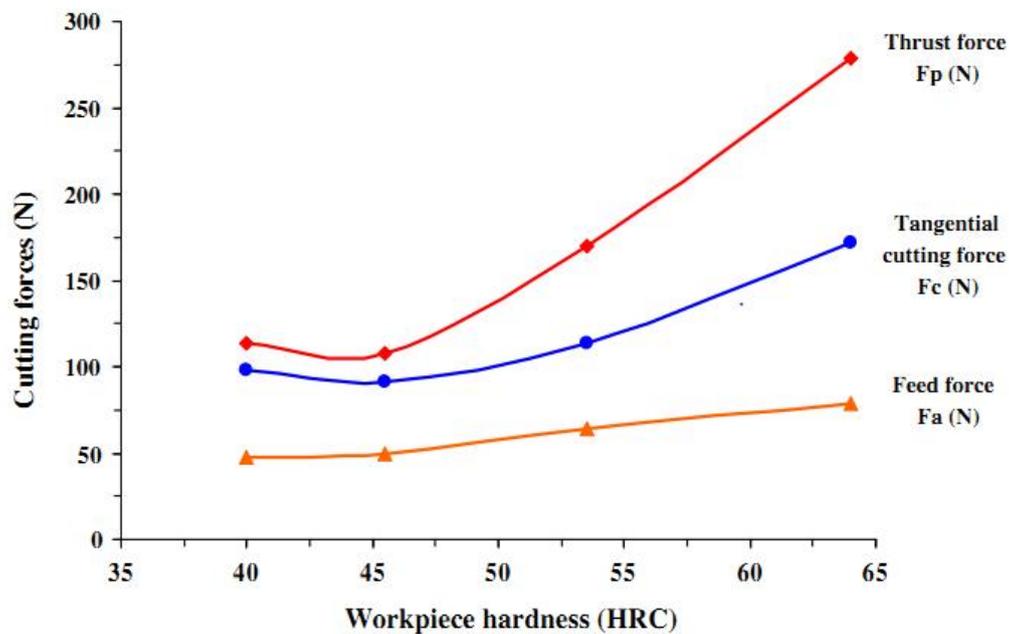


Figure I.37. Effet de la dureté de la pièce sur les composantes de l'effort de coupe pour $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,15$ mm et $V_c = 130$ m/min [45].

Kurniawan et autres [46] ont proposé une étude sur un outil en carbure revêtu par TiAlN avec une géométrie wiper lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique AISI 420 (48HRC). La performance de l'outil a été évaluée en fonction de sa durée de vie et la surface résultante lors de l'usinage à diverses vitesses de coupe et d'avances et une profondeur de passe constante sans l'utilisation d'un fluide de coupe (usinage à sec). La méthodologie de surface de réponse a été utilisée pour quantifier l'effet de la vitesse de coupe et d'avance sur la durée de vie de l'outil et de proposer des paramètres de coupe optimales. Les résultats montrent que, L'outil en carbure revêtu avec une géométrie wiper est capable d'effectuer l'usinage à sec de l'acier inoxydable AISI420 durci jusqu'à 48HRC. Le modèle de durée de vie de l'outil a été développé, et les paramètres de coupe optimale sont la combinaison de la basse vitesse de coupe et d'avance. De plus, les paramètres optimale de coupe ont produit de l'intégrité de surface préférable, sous forme de rugosité lisse, du changement microstructural mineur, et avec l'effort résiduel compressif, aussi bien que produire du copeau continu régulier (figure I.38).

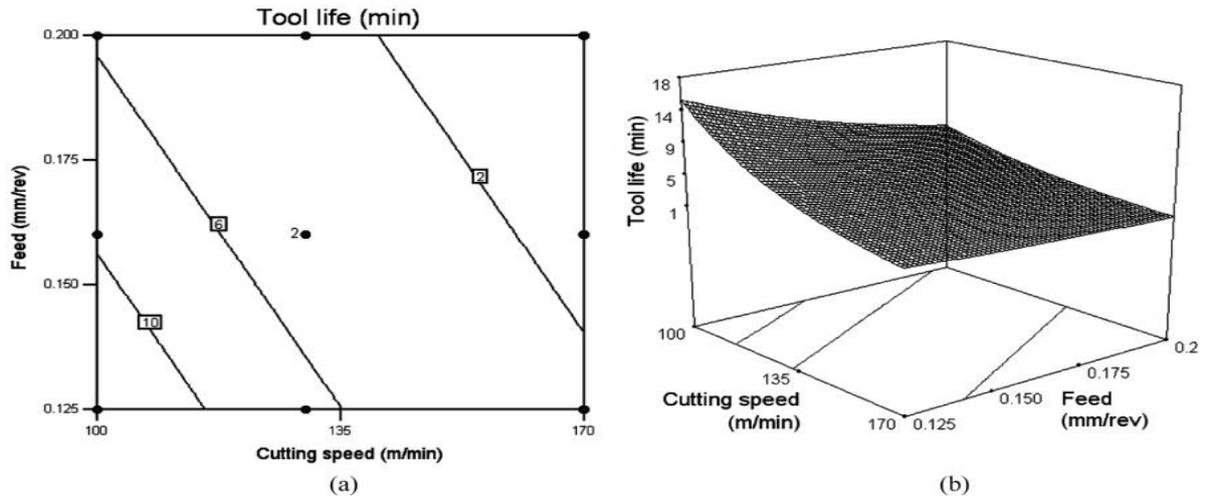


Figure I.38. Graphiques de surface de réponse : a) contours et b) surface 3D pour la durée de vie d'outil [46].

El-Tamimi et autres [47] ont réalisé un travail expérimental en utilisant la planification d'expérience pour développer des modèles d'usinage pour les variables dépendantes, durée de vie d'outil, effort de coupe et la rugosité de surface, lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique durci AISI 420 sous la coupe oblique. Des plaquettes en carbure ont été utilisées comme outils de coupe. L'effet des variables indépendantes, y compris les conditions de coupe, géométrie de l'outil et les niveaux de dureté a été étudiée. La validité des modèles développés a été testée. Les auteurs ont conclu que, les relations entre les variables dépendantes et indépendantes montrent que l'avance f , a la plus grande influence sur la force de coupe, suivie par la profondeur de passe et la dureté du matériau. Également, f a la plus grande influence sur la rugosité de surface, suivi par le rayon de bec de l'outil. La vitesse de coupe, V_c , a une influence plus élevée sur la durée de vie de l'outil, suivie par la dureté du matériau, l'avance, et la profondeur de passe (figure 1.39).

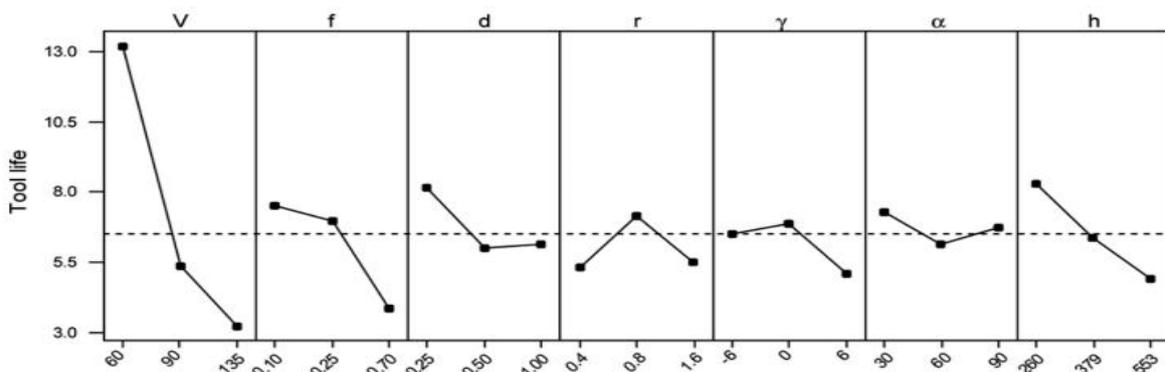


Figure I.39. Effets principaux pour la durée de vie d'outil en carbure [47].

Razfar et autres [48] ont présenté une approche à la détermination des paramètres de coupe optimum pour obtenir une rugosité de surface minimum lors le fraisage de l'acier inoxydable X20Cr13. L'approche proposée est d'employer une méthode d'optimisation d'essaim de particules (PSO) basé sur les réseaux de neurone, pour créer un modèle prédictif de rugosité de surface basé sur les données expérimentales. Les auteurs ont observé une bonne concordance entre les valeurs prévues de rugosité et ceux obtenues en mesures expérimentales effectuées en utilisant les arrangements optimum prévus de machine.

Süleyman et autres [49] ont concentré sur l'influence de la géométrie d'outil sur la surface finale obtenu en tournage de l'acier AISI 1040. Pour trouver l'effet des paramètres de la géométrie d'outil sur la rugosité de surface pendant le tournage, la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été employée et un modèle de prédiction a été développé pour la rugosité de surface moyenne (Ra). Les résultats ont indiqué que le rayon de bec d'outil est le facteur dominant sur la rugosité de surface. En plus, une bonne concordance entre la rugosité de surface prévue et mesurée était observée. En outre, l'angle de direction et l'angle d'attaque sont des facteurs significatifs sur la rugosité de surface avec une contribution de 18,24% et 17,74% respectivement, (figure I.40).

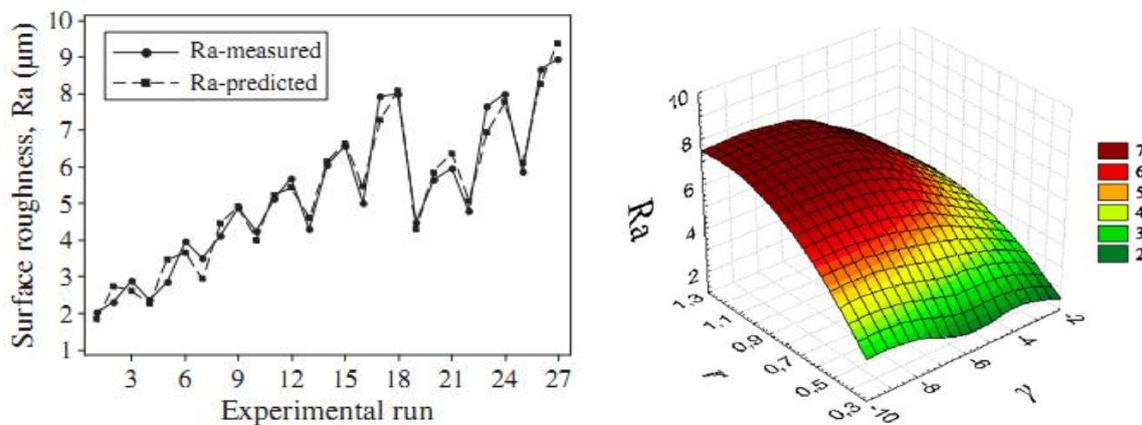


Figure I.40. Valeurs mesurées vs prédites de la rugosité de surface et surface de réponse de la rugosité de surface vs r et γ [49].

Jianxin et autres [50] ont effectués des essais de tournage à sec sur la précipitation de durcissant des aciers inoxydables semi-austénitiques Cr12Mn5Ni4Mo3Al avec deux types d'outils en carbure (WC/Co et WC/TiC/Co). L'usure d'outil, l'effort de coupe, et la température de coupe ont été mesurées. La diffusion d'élément de l'acier inoxydable Cr12Mn5Ni4Mo3Al aux outils de carbure (vice versa) dans les températures jusqu'au 600°C a été examinée. Les résultats ont prouvé que les outils en carbure de WC/TiC/Co sont plus

appropriés à l'usinage de l'acier inoxydable Cr12Mn5Ni4Mo3Al. L'usure en débouille, l'effort de coupe, et la température de coupe de l'outil de WC/TiC/Co sont plus petits que celui de WC/Co dans les mêmes conditions d'essai, (figure I.41).

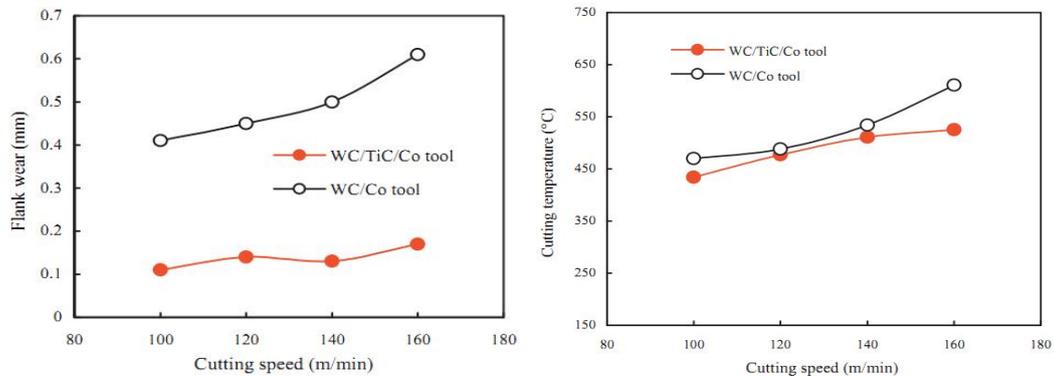


Figure I.41. Evolution de : a) Usure en débouille et b) température de coupe des outils en carbure en fonction de la vitesse de coupe [50].

Mandal et autres [51] ont appliqué la méthode de Taguchi et l'analyse de régression pour évaluer l'usinabilité de l'acier AISI 4340 avec une nouvelle céramique d'alumine durci par la zircone (ZTA) en terme d'usure. Plusieurs expériences ont été effectuées sur la base d'un plan orthogonale L9 avec trois paramètres (profondeur de passe, vitesse de coupe, vitesse d'avance) à trois niveaux (bas, moyen et haut). L'Analyse de la variance (ANOVA) est appliquée pour trouver la signification et le pourcentage de contribution de chaque paramètre. Le modèle mathématique de l'usure en débouille a été développé en utilisant l'analyse de régression en fonction des variables indépendantes. Le facteur principal qui affecte l'usure en débouille de ce nouvel outil est la profondeur de passe qui a eu une contribution presque 46% suivi par la vitesse de coupe avec une contribution de 34%, (figure I.42).

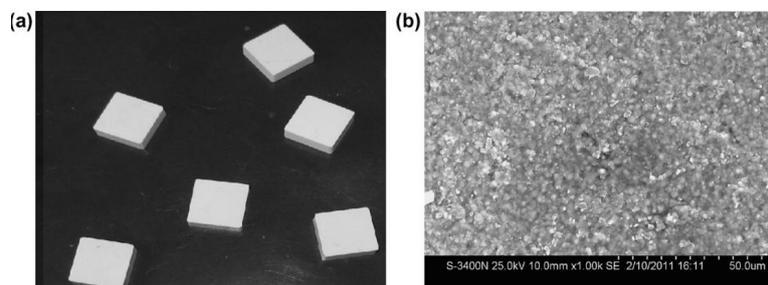


Figure I.42. (a) Photo de ZTA, (b) microstructure de ZTA [51].

Aouici et autre [52] ont fait une étude expérimentale pour évaluer les effets de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la dureté de la pièce et la profondeur de passe sur la rugosité de

surface et les composantes de l'effort de coupe, lors le tournage dure de l'acier AISI H11. L'acier AISI H11 a été durci de (40, 45 et 50) HRC, usiné en utilisant le nitrure de bore cubique (CBN 7020). Un plan d'expérience de quater facteurs et trois niveaux complété par l'analyse statistique de variance (ANOVA) ont été utilisé. Des modèles mathématiques ont été développés pour la surface de rugosité et les composants d'efforts de coupe en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). Les résultats montrent que les composantes de l'effort de coupe sont principalement influencées par la profondeur de passe et la dureté de la pièce. D'autre part, la vitesse d'avance et la dureté de la pièce ont un effet statistiquement significatif sur la rugosité de surface. Finalement les auteurs proposent une gamme pour les meilleures conditions de coupe. Ils ont conclu que l'analyse des paramètres d'usinage employant la technique de RSM permet l'investigation de l'influence de chacun des paramètres d'usinage sur la progression des facteurs de sortie tell que la rugosité et l'effort de coupe. L'effort axial (F_a) et l'effort tangentielle (F_v) sont fortement influencés par la profondeur de passe (56,77%) et (31,5%) respectivement, sur l'opposé la vitesse de coupe a une très petite influence (0,14%), (figure I.43).

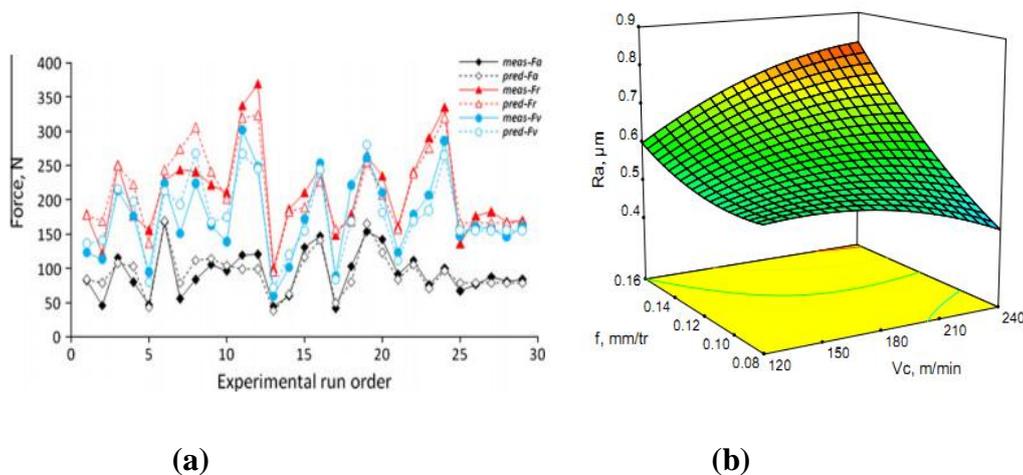


Figure I.43. a) comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites pour les composantes de l'effort de coupe et b) effet de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sur la rugosité de surface ($ap=0,3$ mm, $H=45$ HRC) [52].

Zinati et autres [53] ont développé un algorithme d'optimisation (MHS) basée sur les réseaux de neurones (MHSNN) pour prédire les conditions de coupe en tournage de l'acier $X20Cr13$ conduisant à une rugosité de surface optimale. À cette fin, plusieurs expériences ont été effectuées sur l'acier inoxydable $X20Cr13$ pour atteindre les données requises pour la formation des MHSNN. Le réseau de neurone artificiel a été utilisé pour créer des modèles

prédictifs de la rugosité de surface et les efforts de coupe exploitant les données expérimentales, et l'algorithme MHS a été utilisé pour déterminer la rugosité de surface optimum. En outre, un simple algorithme HS a été utilisé pour résoudre le même problème d'optimisation pour illustrer les capacités de l'algorithme de MHS. Les résultats obtenus montrent que l'algorithme de MHS est plus efficace et faisant autorité dans l'approche de la solution globale par rapport à l'algorithme de HS, (figure I.44).

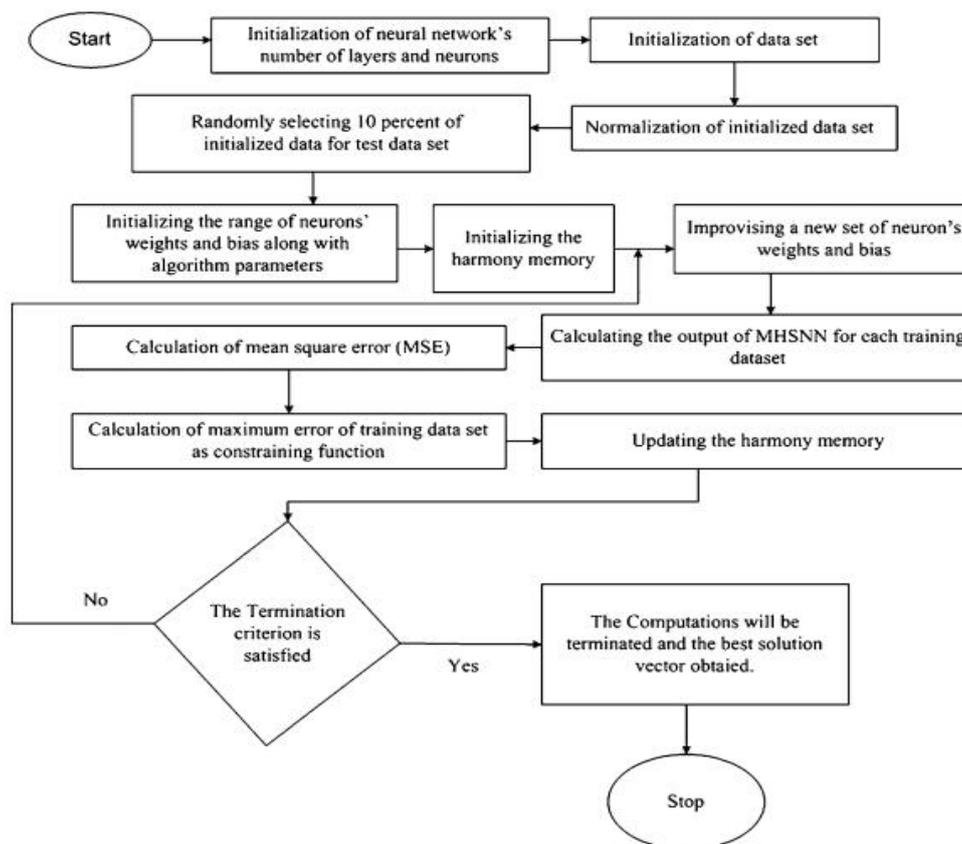


Figure I.44. Algorithme MHS basé sur les réseaux de neurone [53].

Hanafi et autres [54] 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 0,25 mm.

Asiltürk et autres [55] 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 (Ra et Rz) 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'analyse statistique de surface de réponse ont indiqué que la vitesse d'avance est un facteur significatif sur la rugosité de surface de la pièce (Ra et Rz) avec une contribution de 85,5%.

1.11. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases nécessaires à la compréhension de cette étude. Ce chapitre est divisé en trois parties, la première expose un rappel des bases scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux tels que: la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité des matériaux, l'évolution des matériaux à outils, l'usure et la défaillance des outils de coupe. La seconde partie expose les méthodes d'optimisation les plus utilisées dans les publications les plus récentes dans ce domaine, en plus de quelques méthodes classiques. La troisième partie traite l'état de l'art sur l'usinabilité des aciers inoxydables et les méthodes d'optimisation des conditions de coupe.

Le prochain chapitre présente l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

CHAPITRE II

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble du matériel mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique, ainsi que la méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences. Les conditions de coupe ont été définies.

II.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre l'ensemble du matériel mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique, qui a servi à l'étude de l'évolution des différents paramètres technologiques d'usinage, tel que la rugosité de surface, les efforts de coupe et de l'usure, afin de caractériser le comportement des outils en carbure métallique revêtu lors de l'usinage d'un acier inoxydable martensitique à différentes conditions de travail. Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences.

II.2. Matériels utilisés

II.2.1. Machine-outil

L'usinage a été réalisé sur un tour conventionnel SN 40C d'une puissance de 6,6 kW sur la broche, ayant une gamme de vitesses de 45 à 2000 tr/mn et d'avances de 0,08 à 6,4 mm/tr (figure II.1).



Figure II.1. Tour à charioter et à fileter modèle SN40C

II.2.2. Matériau à usiné

Le matériau sur lequel ont été testées nos plaquettes, est l'acier inoxydable martensitique *X20Cr13* (AISI420).

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans les différents domaines à cause de leur résistance à la corrosion. Ils jouent un rôle très important dans l'industrie aéronautique, la fabrication des pièces médicales et dans l'agroalimentaire. Les aciers inoxydables peuvent contenir environ 13 à 30% de chrome [56]. Les éprouvettes utilisées pour les essais de rugosité, d'effort de coupe et d'usure, sont coupées sur des barres plaines en acier *X20Cr13* (AISI420) laminées à chaud avec une dureté de 180 HB et qui possèdent un diamètre $D = 70$ mm et une longueur $L = 330$ mm (figure II.2).

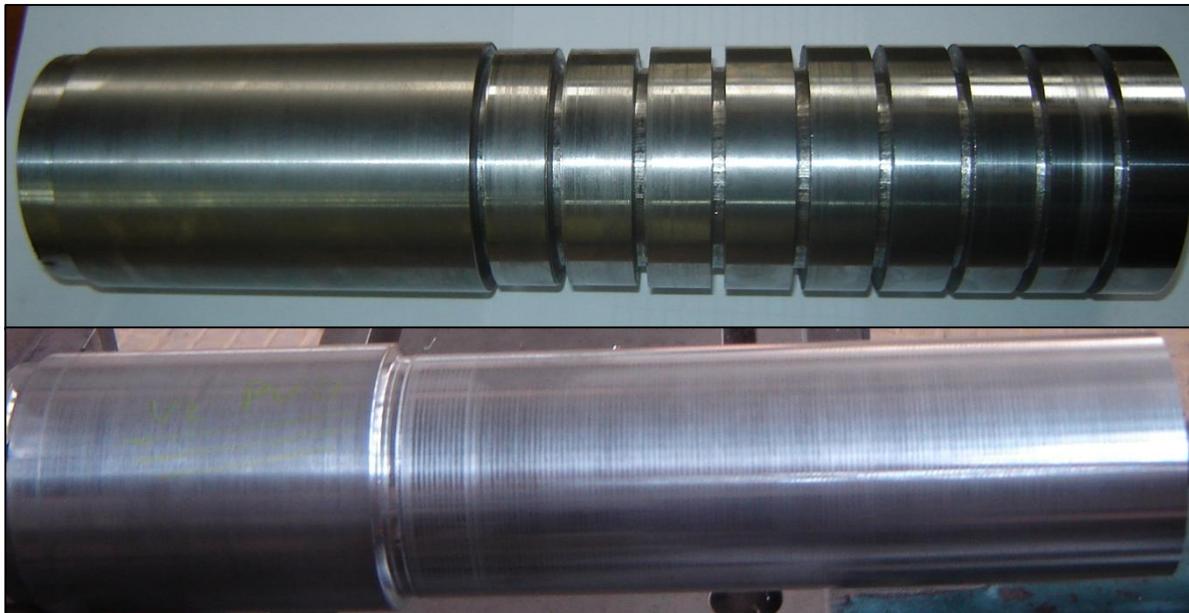


Figure II.2. Éprouvettes utilisées.

La composition chimique de la nuance d'acier utilisé est donnée dans le *tableau II.1*.

Tableau II.1. *Composition chimique de l'acier inoxydable X20Cr13*

<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>S</i>
0,36	13,87	0,19	0,28	0,005	0,018
<i>Mo</i>	<i>Mn</i>	<i>Sn</i>	<i>Cu</i>	<i>P</i>	<i>Fe</i>
0,04	0,52	0,005	0,04	0,019	rest

Le *tableau II.2* donne les équivalences des standards internationaux pour la désignation de cet acier.

Tableau II.2. Équivalence de X20Cr13 en fonction des normes et des pays [57]

France [AFNOR]	Allemagne [DIN]	Suède [SS]	USA [AISI]	Italie [UNI]	Grande- Bretagne [BS]
Z20Cr13	X20Cr13	2303	420	X20Cr13	420S37

II.2.3. Outils de coupe utilisés

II.2.3.1. Porte plaquette

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte-outil (SANDVIK) sur lequel sont fixées les plaquettes mécaniquement par trou central (*figure II.3*). La désignation du porte-outil selon la norme ISO est PSB NR2525K12 avec une géométrie de la partie active de l'outil matérialisée par les angles suivants : $\chi_r = +75^\circ$, $\alpha = +6^\circ$, $\gamma = -6^\circ$ et $\lambda = -6^\circ$. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette.



Figure II.3. Porte outil utilisé.

II.2.3.2. Plaquettes de coupe

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée (*figure II.4 et II.5*) à fixation par bride et trou central. Toutes les informations relatives aux plaquettes de coupe sont regroupées dans le *tableau II.3* :

Tableau II.3. Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Marque
Carbure Métallique avec Revêtement CVD	GC2015	SNMG120408MF	Sandvik
Carbure Métallique avec Revêtement PVD	GC1015	SNMG120408QM	Sandvik

➤ Plaquette en carbure revêtu GC2015

Triple revêtement *CVD* ($TiN/TiCN/Al_2O_3$) sur un substrat de carbure cémenté. Le revêtement *CVD* est composé d'une déposition en phase vapeur de la température épaisse et modérée (*MTCVD*) de TiN , pour une résistance élevée avec un coefficient du frottement réduit. $TiCN$ pour la résistance à l'usure et la stabilité thermique. Al_2O_3 pour la haute température et la résistance de l'usure en cratère [58].

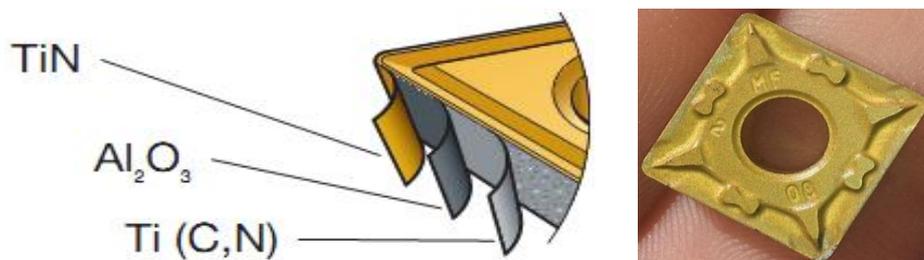


Figure II.4. Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC2015).

➤ Plaquette en carbure revêtu GC1015

C'est une nuance à grain très fin, avec le tout nouveau revêtement PVD de $TiAlN-TiN$ tenace et résistant à l'usure. Présente les qualités requises pour des arêtes de coupe vives et une sécurité élevée contre le martelage des copeaux. Pour tolérance serrées et excellent état de surface en finition des aciers inoxydables.

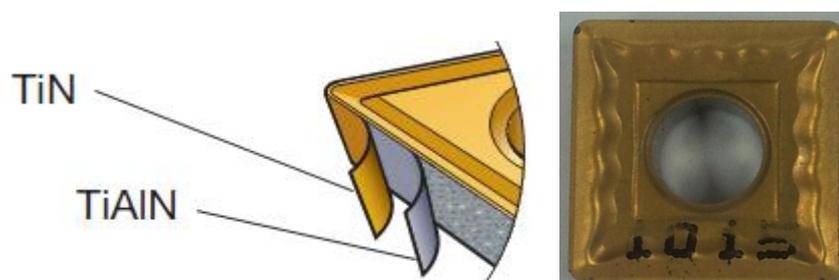


Figure II.5. Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement PVD (GC1015).

II.2.4. Instruments de mesure utilisés

Lors de nos expériences nous avons utilisé plusieurs instruments de mesure. Un dynamomètre KISTLER 9257B pour la mesure des efforts de coupe, un rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface, un rugosimètre 3D pour voir la topographie de la surface et un microscope optique pour la mesure de l'usure.

II.2.4.1. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

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

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est 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 à l'aide d'une plaque de fixation. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (*figure II.6*).

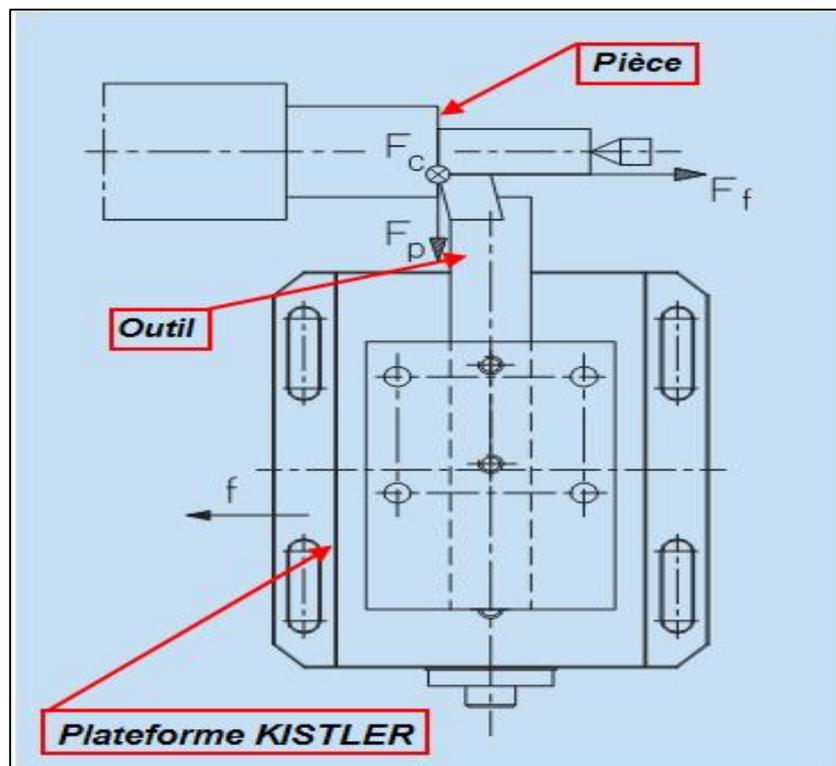


Figure II.6. Plateforme d'effort de coupe KISTLER.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (*DYNOWARE*) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes. La *figure II.7* présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (Force axiale: F_x , Force radiale: F_y et Force tangentielle: F_z).

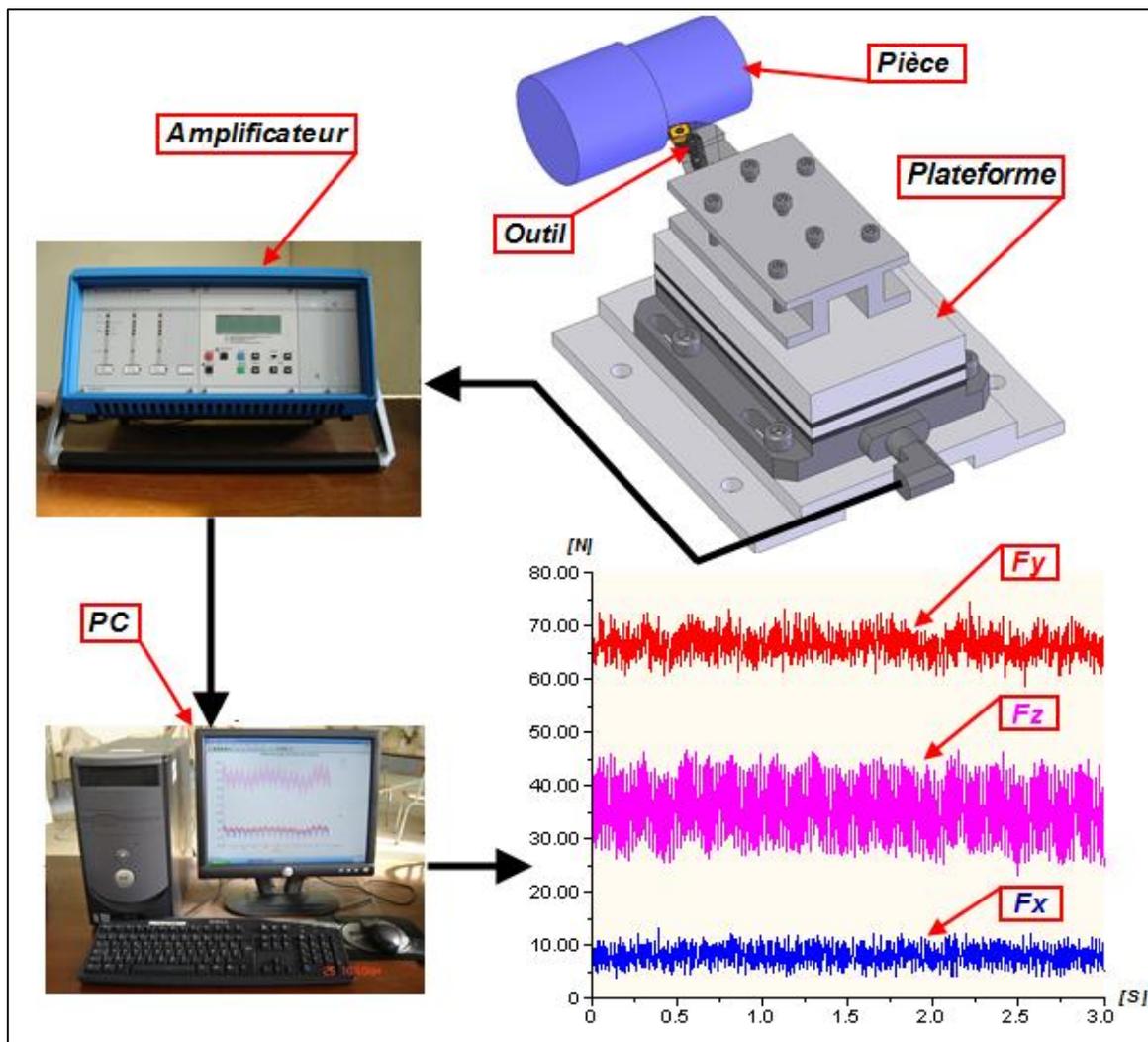


Figure II.7. Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II.2.4.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

➤ Rugosimètre 2D

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 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 pièce et sans la démonter du tour. 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 (*figure II.8*).

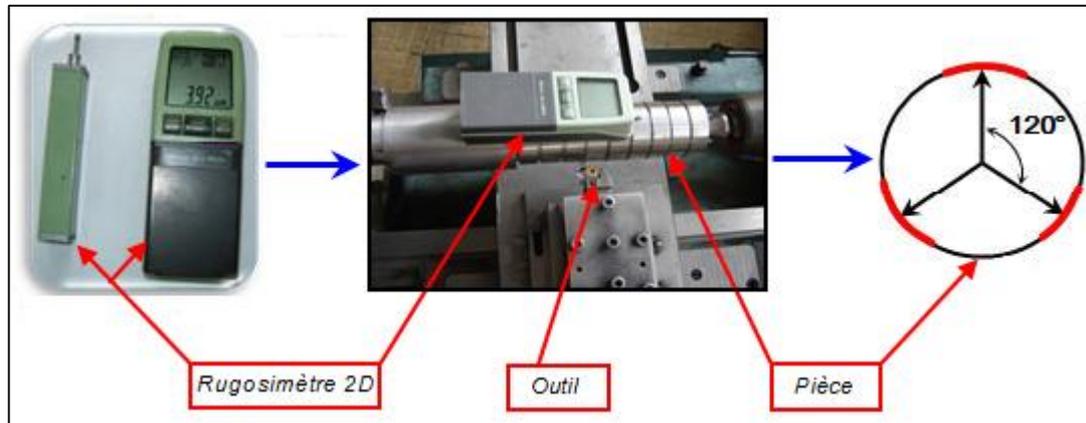


Figure II.8. *Rugosimètre 2D (Surftest 201, Mitutoyo)*

➤ Rugosimètre 3D

Pour mieux visionner 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 (*figure II.9*).

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).

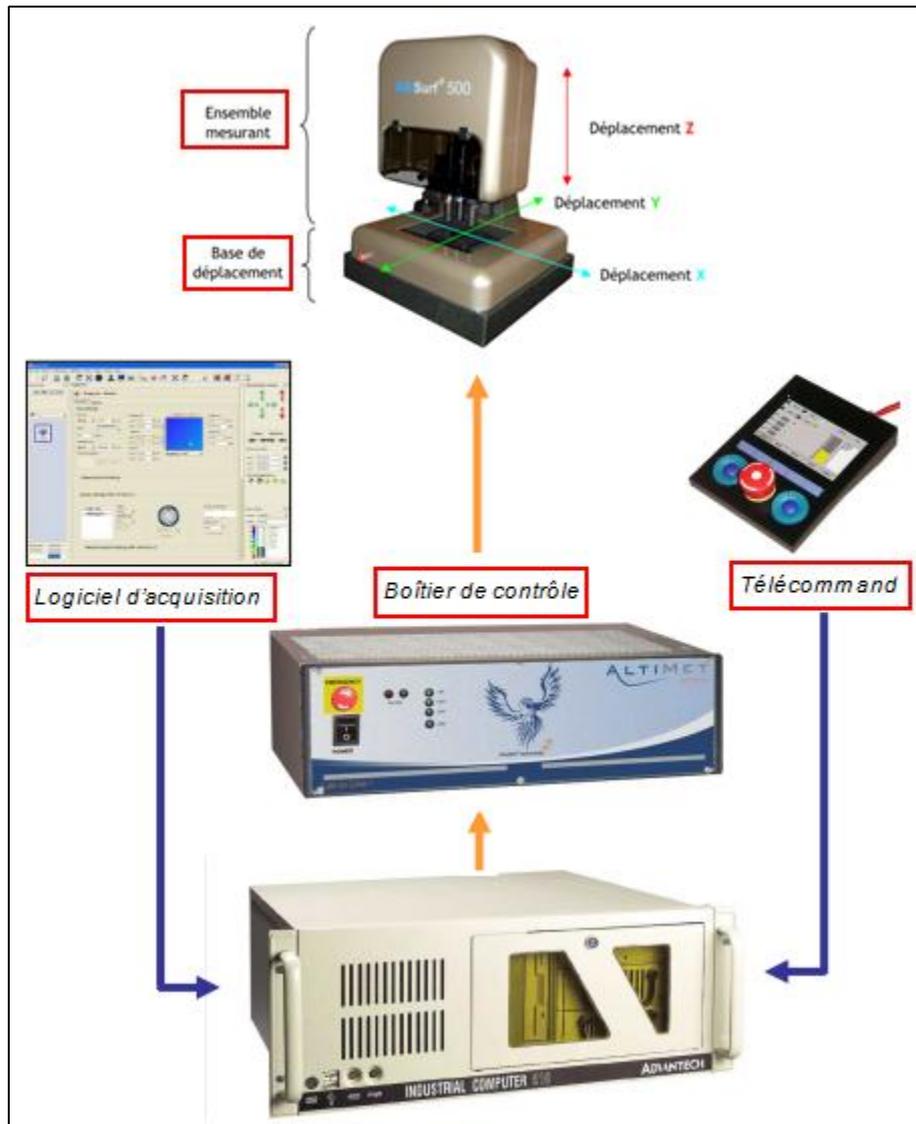


Figure II.9. Rugosimètre 3D (AltiSurf® 500).

II.2.4.3. 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 (*Visuel 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 (figure II.10).

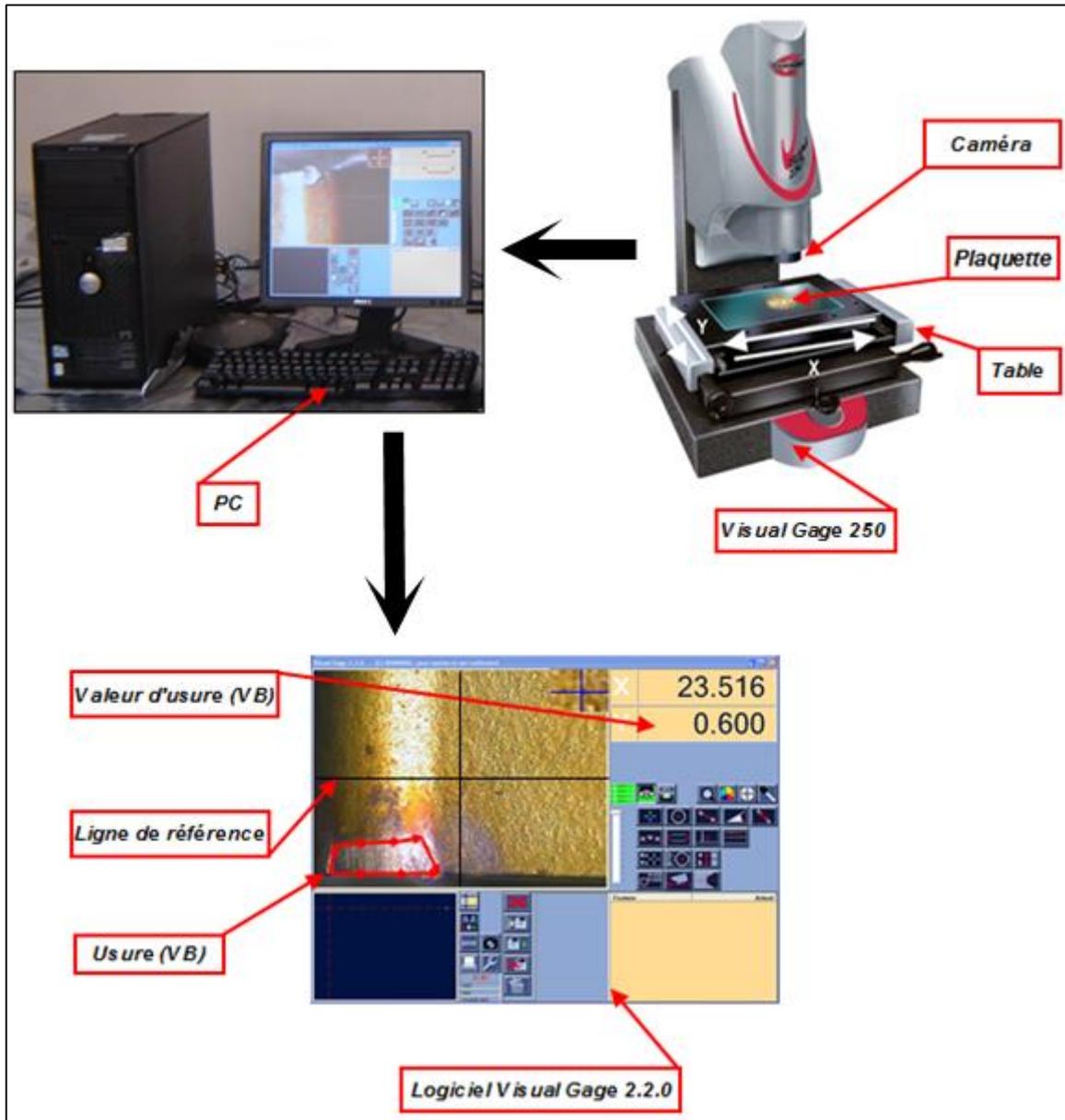


Figure II.10. Microscope pour la mesure de l'usure (*Visual Gage 250*).

II.3. Planification des expériences

Tous nos essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences. Lorsque nous voulons savoir l'action d'un ou de plusieurs facteurs $X_1, X_2, X_i, \dots, X_n$ sur un paramètre Y_j , nous nous servons en pratique des méthodes suivantes [59], [60] :

- Méthode unifactorielle
- Méthode multifactorielle (les plans d'expériences)

II.3.1. Méthode unifactorielle

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_j , ($i = 1 \div N$ et $j = 1 \div n$). 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 unifactorielle

N°	Facteur variable	Paramètre de sortie						
	X	Y_1	Y_2	-	Y_j	-	Y_n	Y_{moy}
1	X_1	Y_{11}	Y_{21}	-	Y_{j1}	-	Y_{n1}	Y_{moy1}
2	X_2	Y_{12}	Y_{22}	-	Y_{j2}	-	Y_{n2}	Y_{moy2}
3	X_3	Y_{13}	Y_{23}	-	Y_{j3}	-	Y_{n3}	Y_{moy3}
i	X_i	Y_{1i}	Y_{2i}	-	Y_{ji}	-	Y_{ni}	Y_{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X_N	Y_{1N}	Y_{2N}	-	Y_{jN}	-	Y_{nN}	Y_{moyN}

Dans notre cas les conditions de coupe utilisées pour les différents essais d'usinage de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13 par deux nuances de carbure métallique, sont indiquées dans les *tableaux II.5* et *II.6*. Tous les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification.

Tableau II.5. Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe et de rugosité

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	valeurs
V_c (m/min)	170	f (mm/tr)	0,08 ; 0,12 ; 0,16 ; 0,2 ; 0,24
a_p (mm)	0,15		
V_c (m/min)	170	a_p (mm)	0,15 ; 0,30 ; 0,45 ; 0,60 ; 0,75
f (mm/tr)	0,08		
a_p (mm)	0,15	V_c (m/min)	80 ; 120 ; 170 ; 235 ; 330
f (mm/tr)	0,08		

Tableau II.6. Conditions de coupe pour les essais d'usure à la fin de la passe

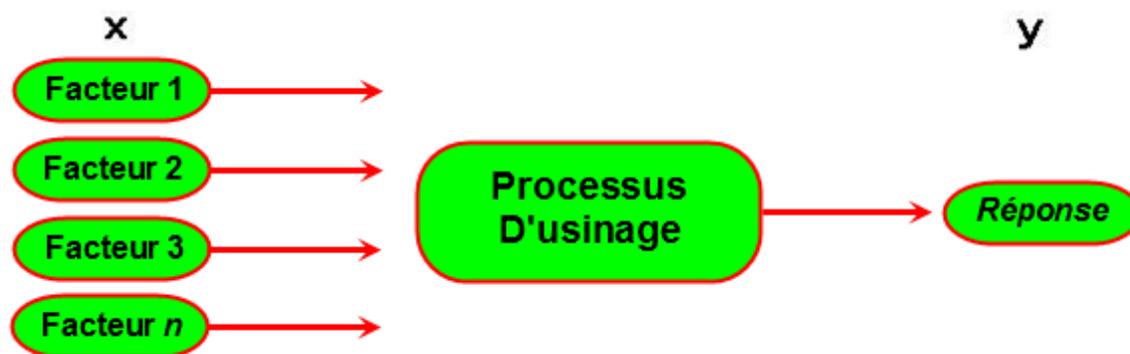
Conditions de coupe	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)
	280	0,08	0,2

II.3.2. Méthode multifactorielle (les plans d'expériences)

Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le temps et le coût de réalisation des essais, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et de son mode de fonctionnement. Pour cela et avant d'entamer la procédure expérimentale, nous rappelons ci-après la définition des plans d'expériences, leurs domaines d'utilisation ainsi que leur démarche.

II.3.2.1. Définition

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit effectuer. Il a pour but de minimiser le nombre d'essais pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié en fonction de ses diverses caractéristiques. Le diagramme ci-dessous résume de manière plus simple cette définition :



L'Output (aussi appelée Réponse, ou Y) d'un processus est dépendant d'un ou plusieurs facteurs (les variables X), d'où la relation :

$$Y = f(X) \quad (\text{II.1})$$

II.3.2.2. Terminologie

Avant d'entamer l'élaboration du plan d'expérience, la connaissance d'une certaine terminologie qui lui est associée revêt une importance primordiale [61].

- ✓ *Facteurs* : Un facteur est un paramètre que l'on peut varier d'une expérience à une autre, et qui influence le résultat final (réponse). Le nombre de facteurs entrant en jeu est, couramment, supérieur à celui des réponses. Deux types de facteurs sont distingués :
 - *Facteur quantitatif* : tout facteur mesurable, lorsqu'ils sont naturellement exprimés à l'aide de valeurs numériques (pression, température, durée, etc...)
 - *Facteur qualitatif* : tout facteur non mesurable tel que (couleur, type de matériau, sexe, etc...).
- ✓ *Niveau des facteurs* : C'est la délimitation du domaine de variation d'un facteur donné. En général, la variation de chaque facteur est délimitée par deux niveaux : supérieur et inférieur.

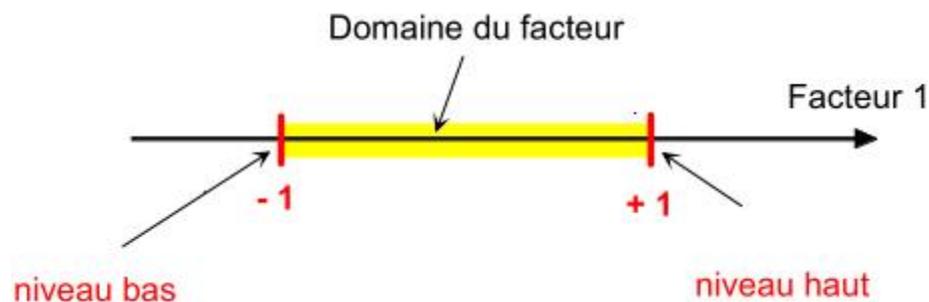


Figure II.11. *Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.*

- ✓ *Domaine expérimental* : Le domaine expérimental est schématisé par un polyèdre à k dimensions, où k est le nombre de facteurs considérés. Chaque côté de ce polyèdre, est défini par les deux niveaux extrêmes caractérisant le facteur correspondant à ce côté.

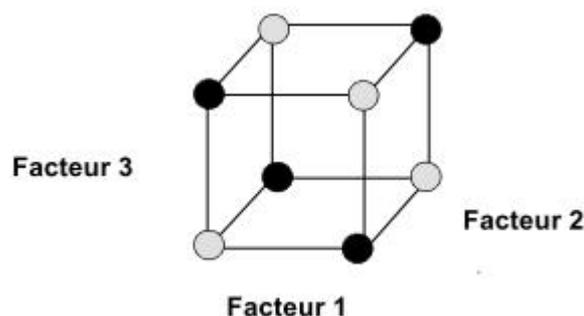


Figure II.12. *Définition du domaine expérimental*

- ✓ *Réponses* : Les réponses sont les propriétés à mesurer pour la variation d'un facteur.

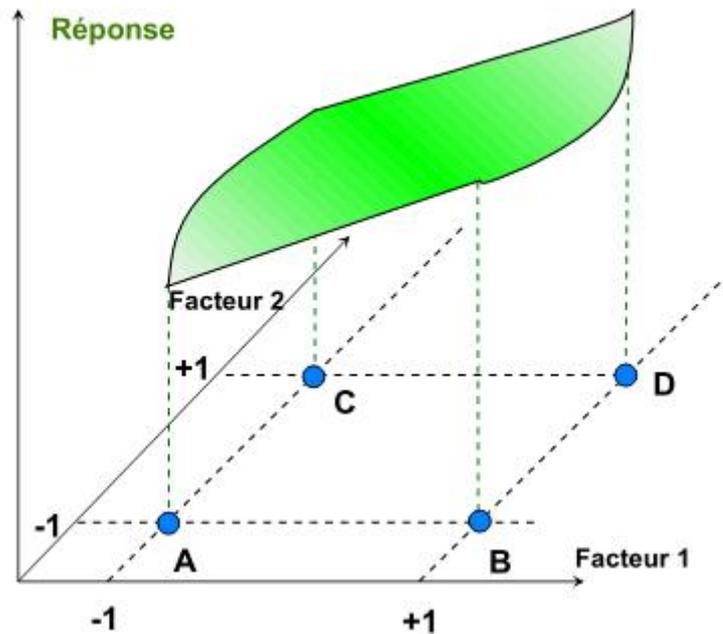


Figure II.13. Définition de la surface de réponse

- ✓ *Effet* : L'effet d'un facteur X sur une réponse Y est obtenu en étudiant les variations des valeurs de Y en fonction de celles de X . Si le facteur X a une interaction avec lui-même, on parle d'un effet quadratique. Un effet peut être positif, nul ou négatif. Il est exprimé par le coefficient multiplicatif de X dans un modèle mathématique de la réponse. La signification de l'effet de X sur Y est donnée par des tests statistiques.
- ✓ *Interaction* : On dit qu'il y a interaction entre deux facteurs X et X' si l'effet de X dépend du niveau de X' et inversement. Cette interaction est notée interaction XX' ou interaction $X'X$.

II.3.2.3. Méthodologie des plans d'expériences

Pour l'élaboration d'un plan d'expériences, on passe généralement par les trois étapes suivantes :

- ✓ *La recherche des facteurs influents* : Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié : parmi tous les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse, lesquels ont une influence significative ? Que vaut cette influence ? et y a-t-il des interactions entre ces facteurs ?

Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences est quantifiées, on passe au second stade :

- ✓ *La modélisation* : Dans cette phase, on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe... et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de n lignes et k colonnes, où n est le nombre d'expériences et k est le nombre des effets.
- ✓ *L'optimisation* : Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié.

II.3.2.4. Choix du type de plan

Dans notre cas, nous avons choisi deux types des plans : (le plan factoriel complet et le plan de Taguchi), son intérêt dans le cadre de notre étude est de pouvoir :

- ✓ dans un premier temps évoluer, vers deux plans factoriels complets de 64 essais et de 9 essais permettant de caractériser les influences des paramètres par un modèle quadratique et de trouver les conditions de coupe optimales ; on utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR) et les réseaux de neurones (ANN).
- ✓ dans un second temps, utilisation de l'Analyse Relationnelle Grise (***Grey Relational Analysis : GRA***) basée sur la méthode de ***Taguchi***, on utilisant un plan réduit de 16 essais de Taguchi.

❖ Les plans factoriels complets

Un plan factoriel complet est un plan pour lequel toutes les combinaisons possibles aux limites du domaine d'étude auront été réalisées : c'est le nombre maximal d'essais pour un plan d'expériences factoriel [62]. Le nombre d'essais N se calcule d'après la formule suivante : $N = P^k$ où k est le nombre de facteurs. Ces plans permettent l'étude de k facteurs à raison de P niveaux par facteur. Ils renferment toutes les combinaisons possibles des k facteurs à leurs P niveaux. Dans notre cas nous avons utilisé un plan factoriel complet de 64 essais ($N = 4^3$).

❖ Les tables de Taguchi

La méthode de Taguchi vient pour enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires [63]. Elle a pour but de simplifier le protocole expérimental afin de mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. Elle permet d'obtenir des résultats en utilisant moins essais

expérimentaux que les autres méthodes. Taguchi a montré que si ces essais expérimentaux sont choisis de manière appropriée, il n'est pas nécessaire de réaliser des expériences factorielles complètes. La base de la méthode de Taguchi est les tableaux orthogonaux, qui montrent que les niveaux de facteur doivent être choisis chaque fois pour faire le moins de passages possibles. L'idée principale est de se concentrer uniquement sur les quelques expériences qui sont essentielles pour l'analyse. Les résultats obtenus ne peuvent pas être optimale, mais lorsque ces résultats sont mis en œuvre, le procédé est amélioré. Par conséquent, moins d'argent et de temps sont dépensés lorsque la méthode de Taguchi est employée.

Comme tout plan d'expérience, le plan adopté implique le choix des **paramètres d'entrée** et l'identification des **variables de sortie**. Les paramètres d'entrée sont ceux qui changent suivant les essais. Leur nombre définit le nombre total d'essais du plan d'expériences. Les variables de sortie constituent l'ensemble des réponses.

Dans cette étude, les plans factoriels complets (4^3), (3^2) et la table orthogonale standard L_{16} (4^3) de Taguchi [64] sont adoptée comme plan expérimentale. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company) et à partir des essais préliminaires (*Chapitre III*). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans les *tableaux II.7, II.8, II.9, II.10, II.11 et II.12*.

Tableau II.7. Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 64 essais

Niveau	Vitesse de coupe V_c (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de coupe ap (mm)
1	120	0,08	0,15
2	170	0,12	0,30
3	200	0,16	0,45
4	280	0,2	0,6

Tableau II.8. Matrice de planification pour un plan de 64 essais

N° Essai	Valeurs codées			Valeurs réelles		
	X_1	X_2	X_3	V_c , (m/min)	f , (mm/tr)	ap , (mm)
1	1	1	1	120	0,08	0,15
2	1	1	2	120	0,08	0,3
3	1	1	3	120	0,08	0,45
4	1	1	4	120	0,08	0,6
5	1	2	1	120	0,12	0,15
6	1	2	2	120	0,12	0,3
7	1	2	3	120	0,12	0,45

8	1	2	4	120	0,12	0,6
9	1	3	1	120	0,16	0,15
10	1	3	2	120	0,16	0,3
11	1	3	3	120	0,16	0,45
12	1	3	4	120	0,16	0,6
13	1	4	1	120	0,2	0,15
14	1	4	2	120	0,2	0,3
15	1	4	3	120	0,2	0,45
16	1	4	4	120	0,2	0,6
17	2	1	1	170	0,08	0,15
18	2	1	2	170	0,08	0,3
19	2	1	3	170	0,08	0,45
20	2	1	4	170	0,08	0,6
21	2	2	1	170	0,12	0,15
22	2	2	2	170	0,12	0,3
23	2	2	3	170	0,12	0,45
24	2	2	4	170	0,12	0,6
25	2	3	1	170	0,16	0,15
26	2	3	2	170	0,16	0,3
27	2	3	3	170	0,16	0,45
28	2	3	4	170	0,16	0,6
29	2	4	1	170	0,2	0,15
30	2	4	2	170	0,2	0,3
31	2	4	3	170	0,2	0,45
32	2	4	4	170	0,2	0,6
33	3	1	1	200	0,08	0,15
34	3	1	2	200	0,08	0,3
35	3	1	3	200	0,08	0,45
36	3	1	4	200	0,08	0,6
37	3	2	1	200	0,12	0,15
38	3	2	2	200	0,12	0,3
39	3	2	3	200	0,12	0,45
40	3	2	4	200	0,12	0,6
41	3	3	1	200	0,16	0,15
42	3	3	2	200	0,16	0,3
43	3	3	3	200	0,16	0,45
44	3	3	4	200	0,16	0,6
45	3	4	1	200	0,2	0,15
46	3	4	2	200	0,2	0,3
47	3	4	3	200	0,2	0,45
48	3	4	4	200	0,2	0,6
49	4	1	1	280	0,08	0,15
50	4	1	2	280	0,08	0,3
51	4	1	3	280	0,08	0,45
52	4	1	4	280	0,08	0,6
53	4	2	1	280	0,12	0,15

54	4	2	2	280	0,12	0,3
55	4	2	3	280	0,12	0,45
56	4	2	4	280	0,12	0,6
57	4	3	1	280	0,16	0,15
58	4	3	2	280	0,16	0,3
59	4	3	3	280	0,16	0,45
60	4	3	4	280	0,16	0,6
61	4	4	1	280	0,2	0,15
62	4	4	2	280	0,2	0,3
63	4	4	3	280	0,2	0,45
64	4	4	4	280	0,2	0,6

Tableau II.9. Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 9 essais

Niveau	Vitesse de coupe V_c (m/min)	Temps d'usinage t (min)
1	160	4
2	280	7
3	400	11

Tableau II.10. Matrice de planification pour un plan de 9 essais

N° Essai	Valeurs codées		Valeurs réelles	
	X_1	X_2	V_c , (m/min)	t , (min)
1	1	1	160	4
2	1	2	160	7
3	1	3	160	11
4	2	1	280	4
5	2	2	280	7
6	2	3	280	11
7	3	1	400	4
8	3	2	400	7
9	3	3	400	11

Tableau II.11. Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 16 essais

Niveau	Vitesse de coupe V_c (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de passe a_p (mm)
1	120	0,08	0,15
2	170	0,12	0,30
3	200	0,16	0,45
4	280	0,2	0,6

Tableau II.12. Matrice de planification pour un plan de Taguchi 16 essais

N° Essai	Valeurs codées			Valeurs réelles		
	X_1	X_2	X_3	$V_c, (m/min)$	$f, (mm/rev)$	$ap, (mm)$
1	1	1	1	120	0,08	0,15
2	1	2	2	120	0,12	0,3
3	1	3	3	120	0,16	0,45
4	1	4	4	120	0,2	0,6
5	2	1	2	170	0,08	0,3
6	2	2	1	170	0,12	0,15
7	2	3	4	170	0,16	0,6
8	2	4	3	170	0,2	0,45
9	3	1	3	200	0,08	0,45
10	3	2	4	200	0,12	0,6
11	3	3	1	200	0,16	0,15
12	3	4	2	200	0,2	0,3
13	4	1	4	280	0,08	0,6
14	4	2	3	280	0,12	0,45
15	4	3	2	280	0,16	0,3
16	4	4	1	280	0,2	0,15

II.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos travaux. Les caractéristiques des matériaux de coupe, la composition chimique du matériau usiné, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées. Dans le chapitre III qui suit, nous présenterons une étude sur l'usinabilité de l'acier inoxydable martensitique usiné par deux carbure (revêtement CVD et PVD) en termes d'effort de coupe, rugosité de surface et usure.

CHAPITRE III

USINABILITE DE L'ACIER INOXYDABLE X20Cr13

Dans ce troisième chapitre, nous étudions l'usinabilité de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13. Les performances des outils en carbure métallique revêtues (GC2015 et GC1015) ont été traitées en termes d'usure, d'effort de coupe, de pression de coupe, de rugosité de surface usinée et leurs évolutions en fonction des éléments du régime de coupe (avance par tour, vitesse de coupe, profondeur de passe et temps d'usinage).

III.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'usinabilité de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13. Pour atteindre cet objectif, nous présentons les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe, l'effort spécifique, l'effort résultant et la rugosité de surface lors de l'usinage à sec de l'acier X20Cr13 par deux matériaux de coupe, le carbure métallique avec revêtement PVD (GC1015) et le carbure métallique avec revêtement CVD (GC2015). Nous présentons également les résultats de l'évolution de l'usure des outils en fonction du temps et aussi son impact sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe et sur la rugosité de surface. Les résultats obtenus permettent de définir les performances des matériaux de coupe utilisés et les conditions de coupe adéquates pour optimiser le processus de coupe relatif à cet acier.

III.2. Evolution des efforts de coupe, des efforts spécifiques de coupe et les efforts résultants en fonction des paramètres du régime de coupe

III.2.1. Effort de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de 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 la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur l'usinabilité du matériau coupé [65].

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 (*figure III.1*).

F_x : 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 : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.

F_z : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

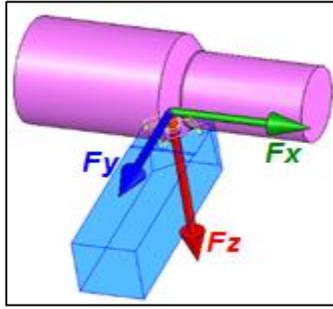
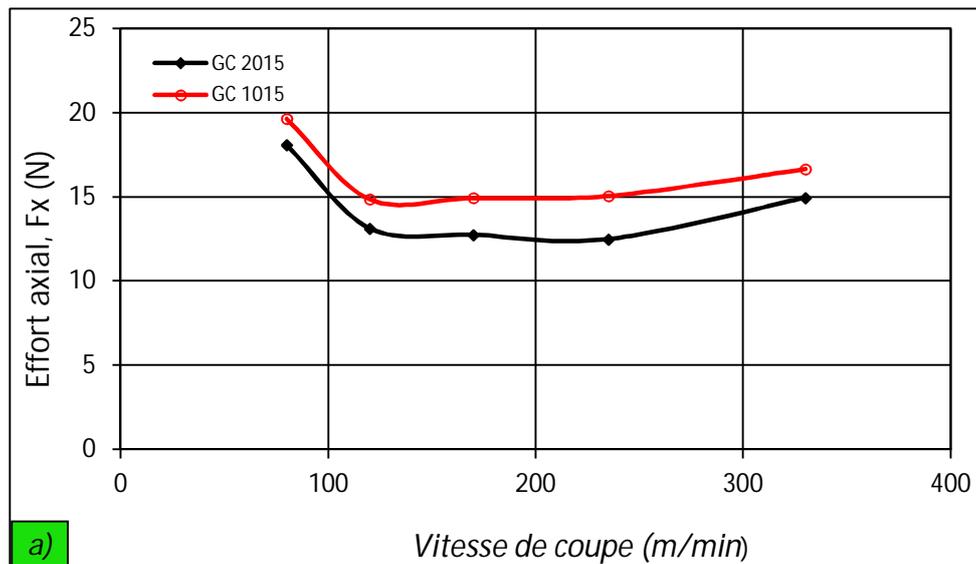


Figure III.1. Composantes d'efforts de coupe.

A) Influence de la vitesse de coupe

La figure III.2 expose les résultats de l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe, pour les deux matériaux de coupe utilisés (GC2015 et GC1015). L'analyse des résultats montre une diminution des 3 composantes en fonction de l'augmentation de la vitesse de coupe. Ceci est expliqué par 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 [66]. En examinant l'allure des trois courbes, on observe que les deux nuances de coupe présentent presque le même comportement en termes d'efforts de coupe. On enregistre une stabilisation de l'effort de coupe entre 120 et 230 m/min. Au-delà de cette limite, les courbes présentent une croissance avec une pente légèrement différente d'une composante à une autre, et cela pour les deux nuances de coupe utilisées. Une augmentation de la vitesse de coupe de 80 à 230 m/min conduit à une diminution des 3 composantes (F_x , F_y et F_z) de (30,86% ; 28,82% ; 18,88%) et (23,3% ; 20,07% ; 7,13%) successivement pour les carbures GC2015 et GC1015.



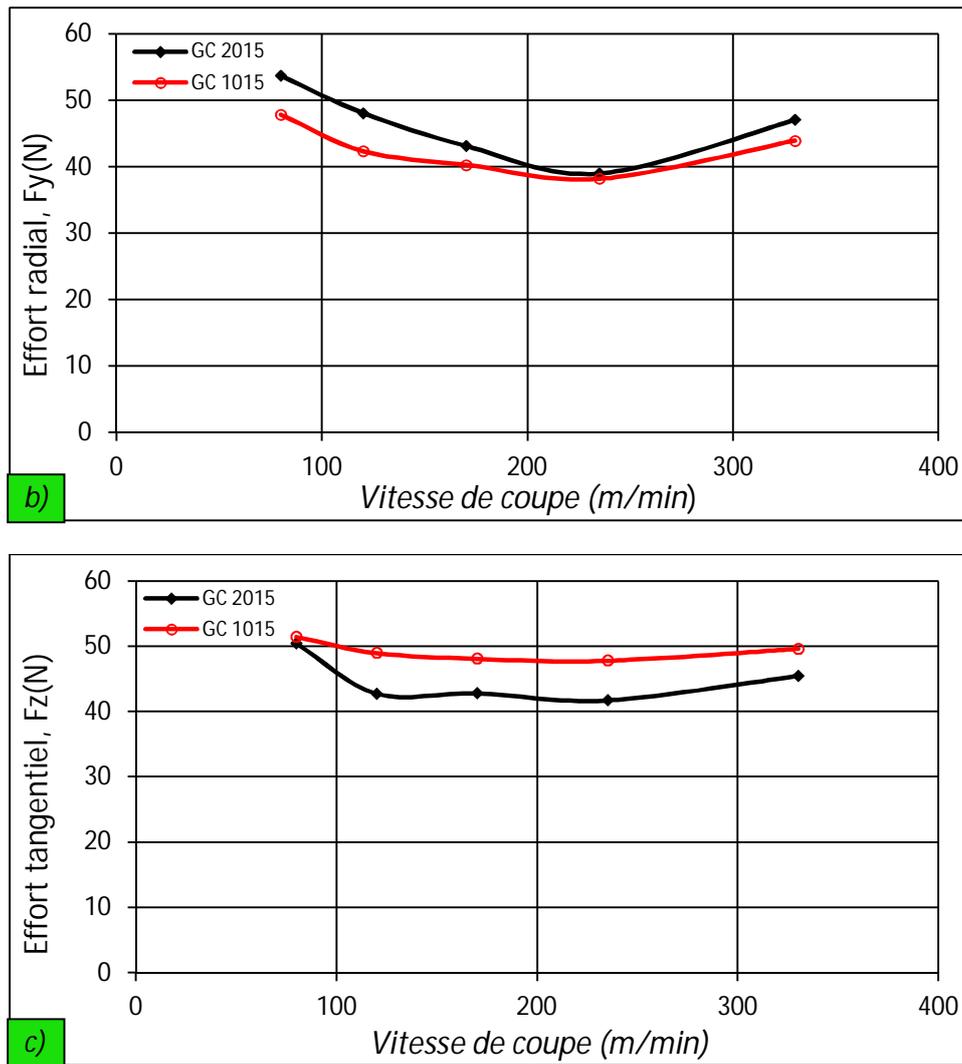


Figure III-2 Evolution des efforts de coupe : a) F_x , b) F_y et c) F_z en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $a_p = 0,15 \text{ mm}$ pour les outils : GC2015 et GC1015.

B) Influence de la vitesse d'avance

La figure III.3 illustre l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe en fonction de l'avance par tour. L'analyse des résultats montrent que cette dernière a une influence importante sur l'effort tangentiel (effort de coupe), radial (effort de pénétration) et en dernier lieu l'effort axial. Pour les deux nuances de coupe utilisées on remarque que toutes les courbes prennent une allure ascendante ce qui signifie qu'avec l'augmentation de l'avance la section du copeau cisailé accroît, d'où le métal résiste plus à la rupture et nécessite des efforts plus grands pour l'enlèvement du copeau. Pour une augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 mm/tr, on enregistre une élévation de (40,39 et 30,33) % de l'effort axial, (63,59 et 109,88) % de l'effort radial (146,26 et 102,12) % de l'effort tangentiel respectivement aux deux matériaux de coupe utilisés (GC2015 et GC1015).

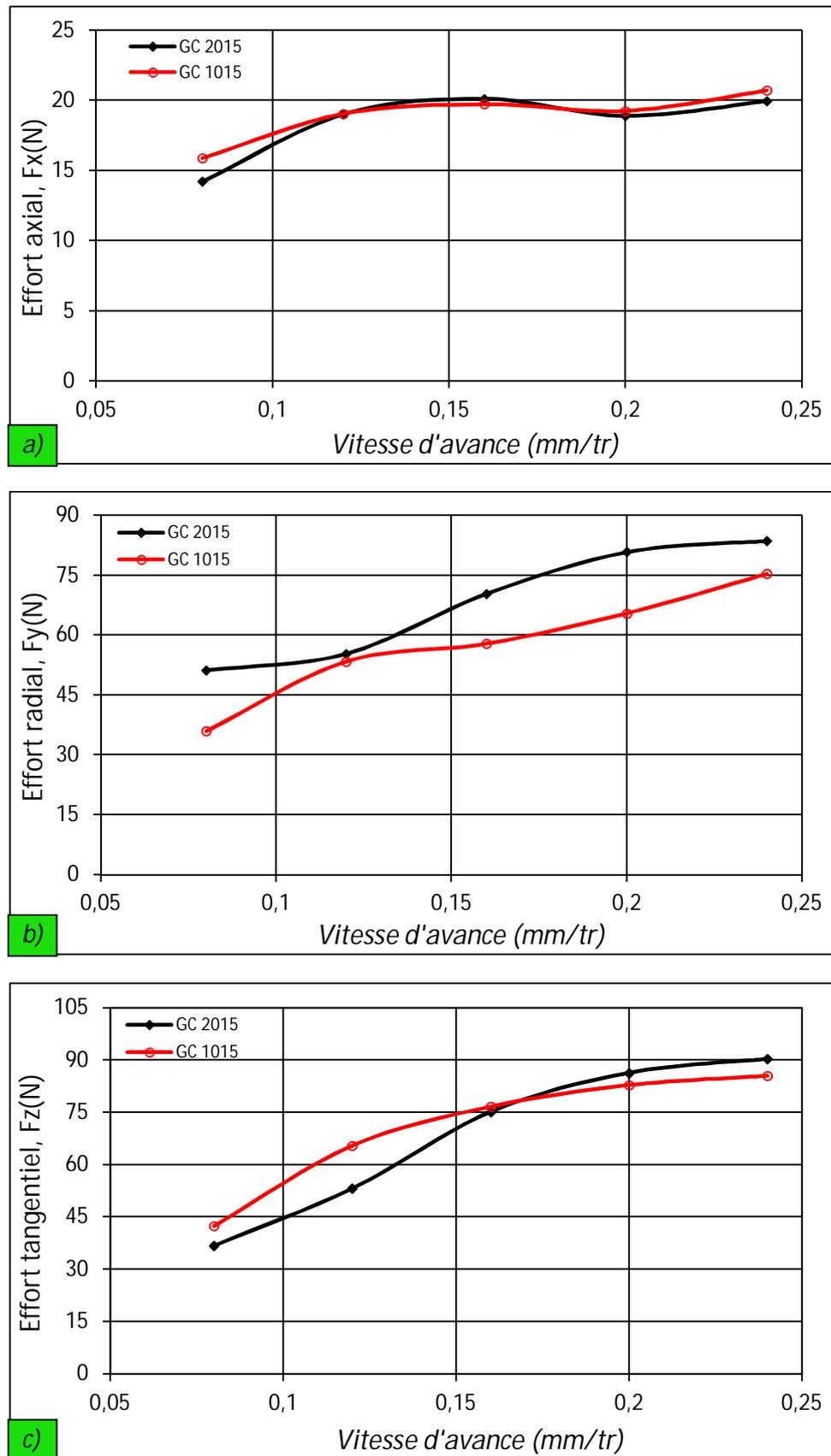
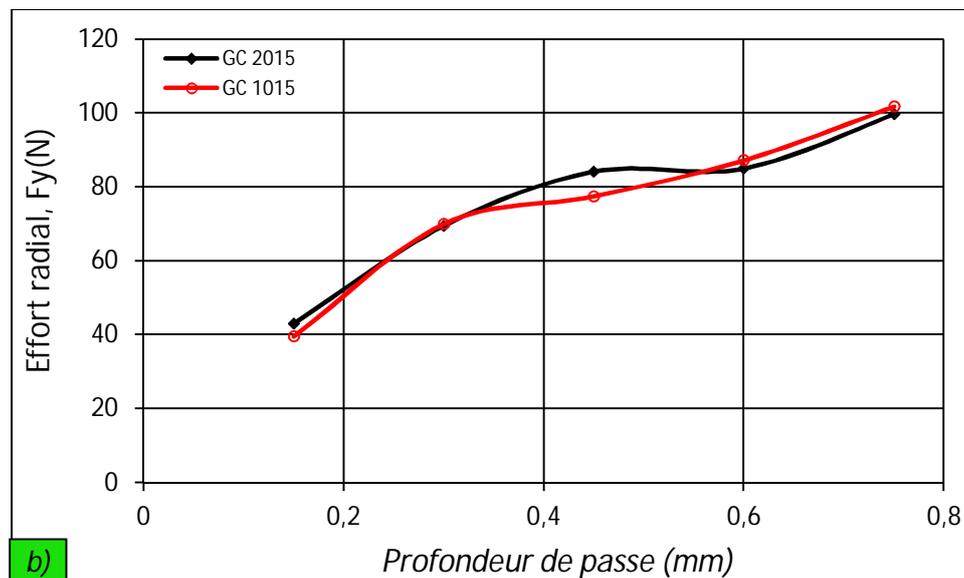
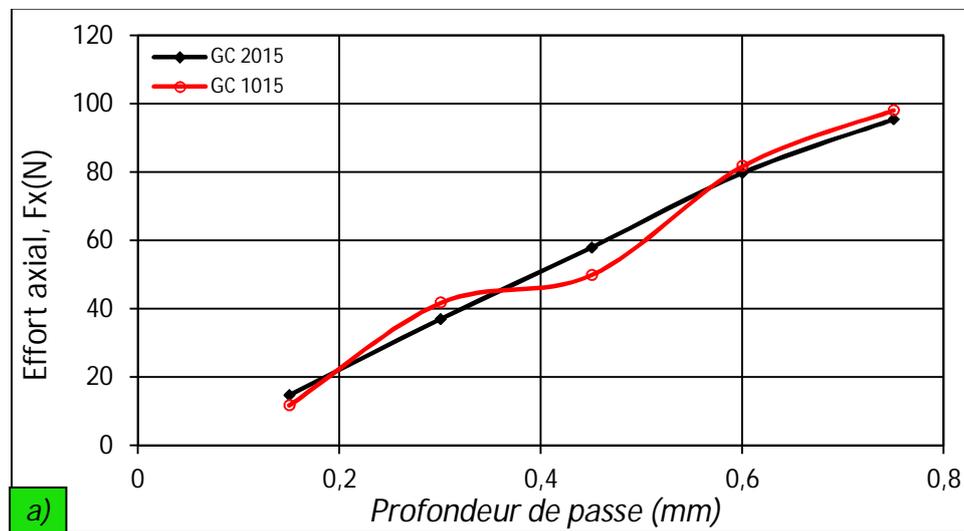


Figure III.3. Evolution des efforts de coupe: a) F_x , b) F_y et c) F_z en fonction de l'avance à $V_c = 170$ m/min ; $a_p = 0,15$ mm pour les outils : GC2015, GC1015

C) Influence de la profondeur de passe

La figure III.4 présente l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe. Avec l'élévation de ap , les conditions de coupe deviennent sévères avec l'augmentation de la section du copeau. L'accroissement des efforts de coupe est causé par l'augmentation de la quantité de matière à enlever. Sur le plan pratique les deux nuances de coupe utilisées présentent presque le même comportement. Avec l'augmentation de la profondeur de passe de (0,15 à 0,75) mm, cela induit un taux d'élévation pour les trois composantes d'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) successivement de (546,65 ; 132,20 et 314,27) % pour le carbure GC2015 et (727,18 ; 157,76 et 346,55) % pour le carbure GC1015. D'après ces résultats, l'effort axial est le plus sensible à l'augmentation de la profondeur de passe.



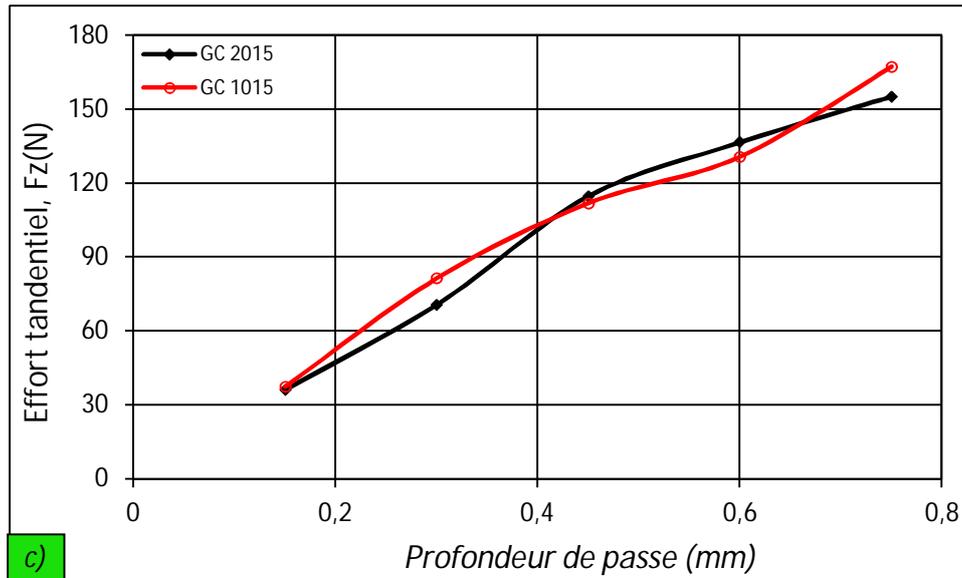


Figure III.4. Evolution des efforts de coupe : a) F_x , b) F_y et c) F_z en fonction de la profondeur de passe à $f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $V_c = 170 \text{ m/min}$ pour les outils : GC2015 et GC1015.

III.2.2. Efforts spécifiques (pression de coupe)

Pour définir l'énergie spécifique de coupe (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 :

$$K_i = \frac{F_i}{f \times ap} \quad (\text{III.1})$$

Avec K_i pression de coupe (MPa), avec $i = (x, y \text{ et } z)$;
 F_i $\begin{cases} F_x & \text{effort axial (N)} ; \\ F_y & \text{effort radial (N)} ; \\ F_z & \text{effort tangentiel (N)} ; \end{cases}$
 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 la pression 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 [67, 68 et 69], dans lequel on ne conçoit pas séparément l'outil et la matière pour adopter des conditions de coupe (figure III.5).

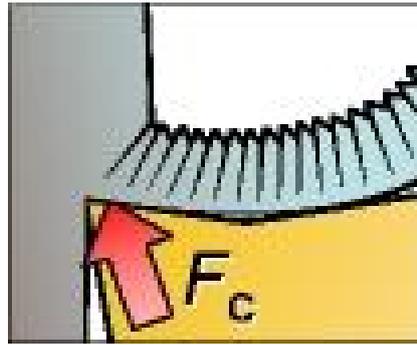


Figure III.5. Force de coupe spécifique.

A) Influence de la vitesse de coupe

La figure III.6 présente l'évolution de la pression de coupe en fonction de la vitesse de coupe. On peut remarquer sur cette figure que la pression de coupe diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Pour de faibles vitesses de coupe, la pointe des outils de carbure subit des pressions de coupe très élevées. Pour une vitesse de coupe 80 m/min, la pression de coupe K_c est de l'ordre de 4207 MPa pour le GC2015 et 4288 MPa pour le GC1015. La pression spécifique de coupe K_c passe d'environ 4207 MPa pour le GC2015 et 4288 MPa pour le GC1015 à 3478 MPa pour le GC2015 et 3982 MPa, lorsque la vitesse de coupe passe de 80 m/min à 280 m/min. Ceci signifie une diminution d'environ 18,10% pour le GC2015 et 7,13% pour le GC1015. Cette réduction peut s'expliquer par les hautes températures générées pendant la coupe, 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 la pression spécifique. Au-dessus de la vitesse de 280 m/min, la pression de coupe a tendance à augmenter légèrement. Cette augmentation est aussi observée par [8]. Il 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. Cette explication semble raisonnable. A cet effet, on distingue deux périodes d'évolution différentes.

- La première période [$V_c = 80$ à 120] m/min est caractérisée par une diminution importante de pression spécifique qui correspond à un chargement important de l'arête de coupe. La fin de cette période conduit à la détermination de la vitesse minimale ($V_{c_{min}}$) du domaine d'utilisation du Couple-Outil-Matière.

- La deuxième période [$V_c = 120$ à 280] m/min est caractérisée par une plage où la pression de coupe se stabilise un peu (chute moins importante). En pratique, cette zone constitue la

plage optimale d'utilisation de l'arête de coupe pour les deux nuances utilisées, qui se termine par la détermination de la vitesse de coupe maximale ($V_{C_{max}}$).

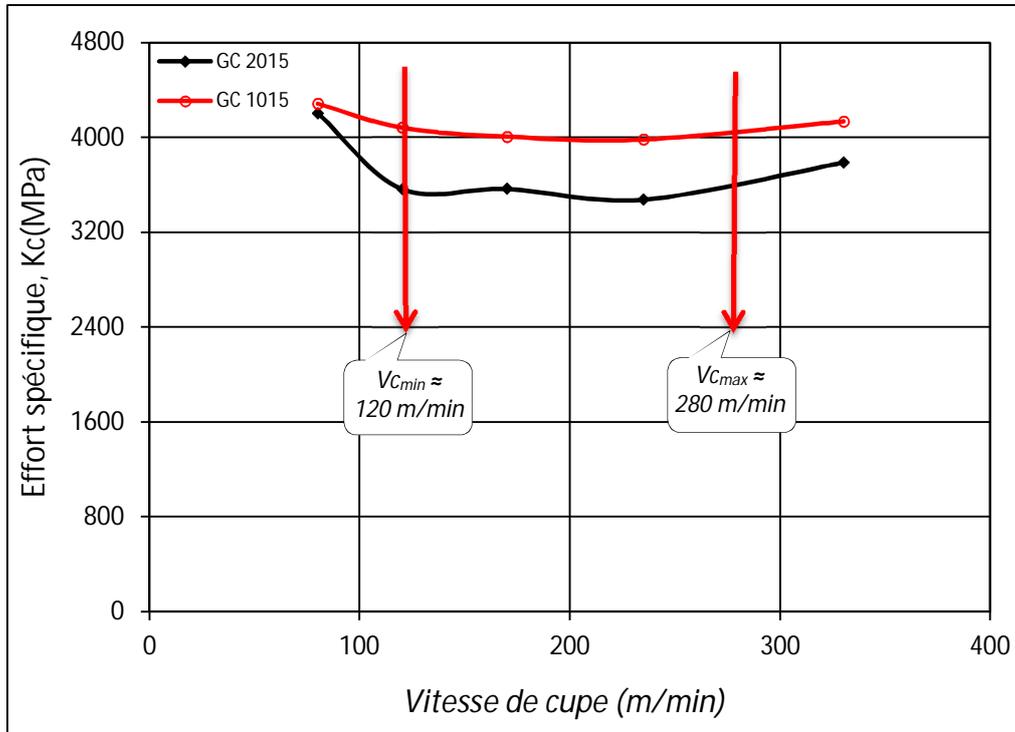


Figure III.6. Evolution de la pression de coupe (K_c) en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $a_p = 0,15 \text{ mm}$ pour les outils : GC2015 et GC1015.

B) Influence de la vitesse d'avance

La figure III.7 montre que la pression de coupe diminue avec l'augmentation de l'avance par tour de l'outil de coupe. Pour une avance de $0,08 \text{ mm/tr}$, la pression exercée sur la pointe de l'outil est importante. Elle est de l'ordre de 3056 MPa pour le GC2015 et 3527 MPa pour GC1015. Une diminution de $17,89\%$ pour le GC2015 et $32,66\%$ pour le GC1015, est observée lorsque (f) passe de $0,08 \text{ mm/tr}$ à $0,24 \text{ mm/tr}$. La pression de coupe est faible pour l'avance la plus élevée, l'usinage semble alors meilleur dans ces conditions. Par contre, il faut faire attention à ne pas aller trop loin dans les valeurs de l'avance car (f) conditionne l'état de surface de la pièce usinée. Il est nécessaire que la valeur de (f) soit supérieure au rayon d'acuité d'arête ; dans le cas contraire, la coupe se fait dans de mauvaises conditions.

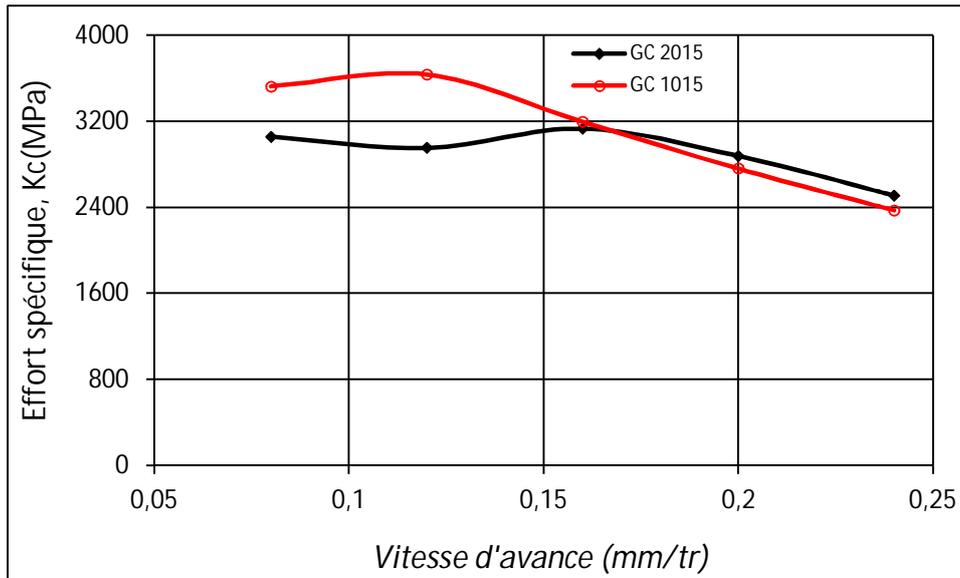


Figure III.7. Evolution des pressions de coupe (K_c) en fonction de l'avance à $V_c = 170$ m/min ; $a_p = 0,15$ mm pour les outils : GC2015 et GC1015.

C) Influence de la profondeur de passe

La figure III.8 montre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe. Les résultats montrent une décroissance qui vaut 18,82% pour le GC2015 et 17,8% pour le GC1015, lorsque la profondeur de passe varie de 0,15 à 0,75 mm. La décroissance de K_c lorsque la profondeur de passe augmente s'explique par l'évolution de l'angle de direction d'arrêt χ_r au fur et à mesure que le rayon de bec rentre dans la matière (figure III.9) [8].

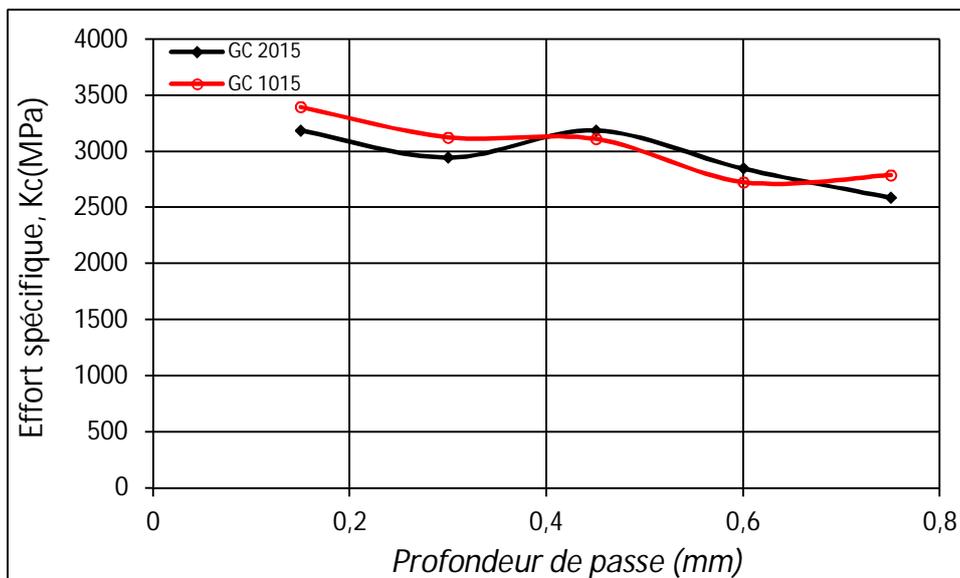


Figure III.8. Evolution des pressions de coupe (K_c) en fonction de la profondeur de passe à $V_c = 170$ m/min ; $f = 0,08$ mm/tr pour les outils : GC2015 et GC1015.

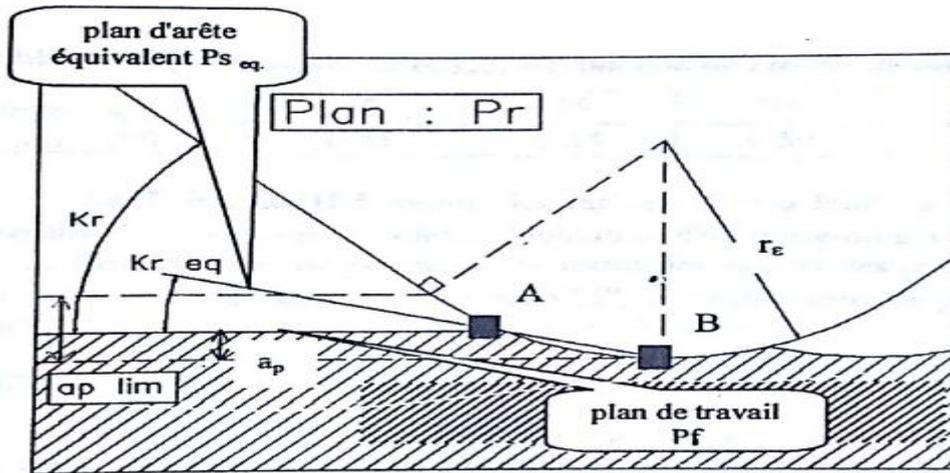


Figure III.9. Définition de l'angle de direction d'arête équivalent [8].

Le calcul de l'angle de direction d'arête $\chi_{r,eq}$ est donné par la formule suivante :

$$\chi_{r,eq} = \frac{1}{2} \text{Arc cos} \left(1 - \frac{ap}{r} \right) \quad \text{(III.2)}$$

Avec : $\chi_{r,eq}$ angle de direction équivalent, ap : profondeur de passe, r : rayon de bec.

Cependant, ici encore, un compromis reste à faire entre l'usure de l'outil due à un chargement plus élevé et le débit de copeau souhaité. De plus l'augmentation de la profondeur de passe induit des conditions de coupe plus sévères du point de vue section du copeau, entraînant de ce fait une élévation de température qui adoucit le matériau.

III.2.3. Effort résultant

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

$$F_{résu} = \sqrt{(Fx)^2 + (Fy)^2 + (Fz)^2} \quad \text{(III.3)}$$

Où : Fx , Fy et Fz sont les trois composantes des efforts de coupe.

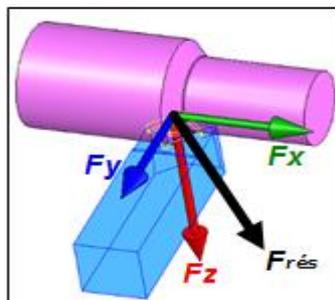
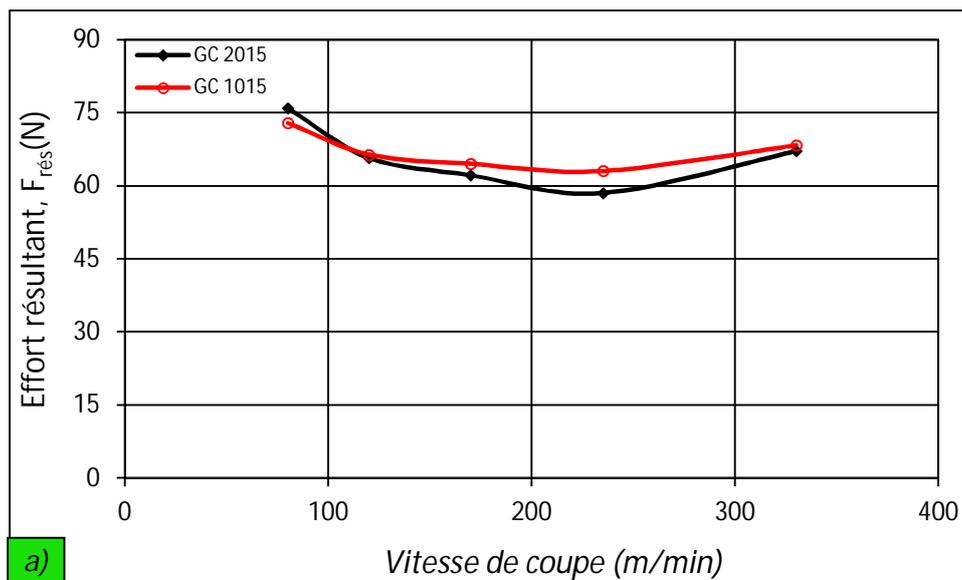


Figure III.10. Effort résultant.

La figure III.11(a) présente l'évolution de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe. L'analyse des résultats montre une décroissance de l'effort résultant avec l'augmentation de la vitesse de coupe. A la vitesse $V_c = 80$ m/min l'effort résultant est à son maximum et prend les valeurs (72,97 ; 75,97) N respectivement aux différentes nuances de coupe (GC2015 et GC1015). A la vitesse de coupe $V_c \approx 280$ m/min, l'effort résultant est à leur bas niveaux prenant ainsi les valeurs (60,22 ; 62,35) N.

Les résultats présentés sur la figure III.11(b) illustre l'évolution de l'effort résultant en fonction de l'avance. 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, les efforts résultants sont de (64,5 ; 57,73) N respectivement pour (GC2015 et GC1015). L'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.28mm/tr, conduit à une élévation de l'effort résultant de (124,7 ; 115,87)% respectivement pour (GC2015 et GC1015).

La figure III.11(c) présente l'évolution de l'effort résultant ($F_{rés}$) en fonction de la profondeur de passe ap . L'analyse des résultats montre une croissance de l'effort résultant pour les deux nuances testées. Pour une augmentation de la profondeur de passe de 0,05 à 0,75mm, on enregistre une élévation de l'effort résultant de 273,02% pour le GC2015, et de 293,3% pour le GC1015. Cette augmentation est presque linéaire à partir de 0,15 à 0,75 mm.



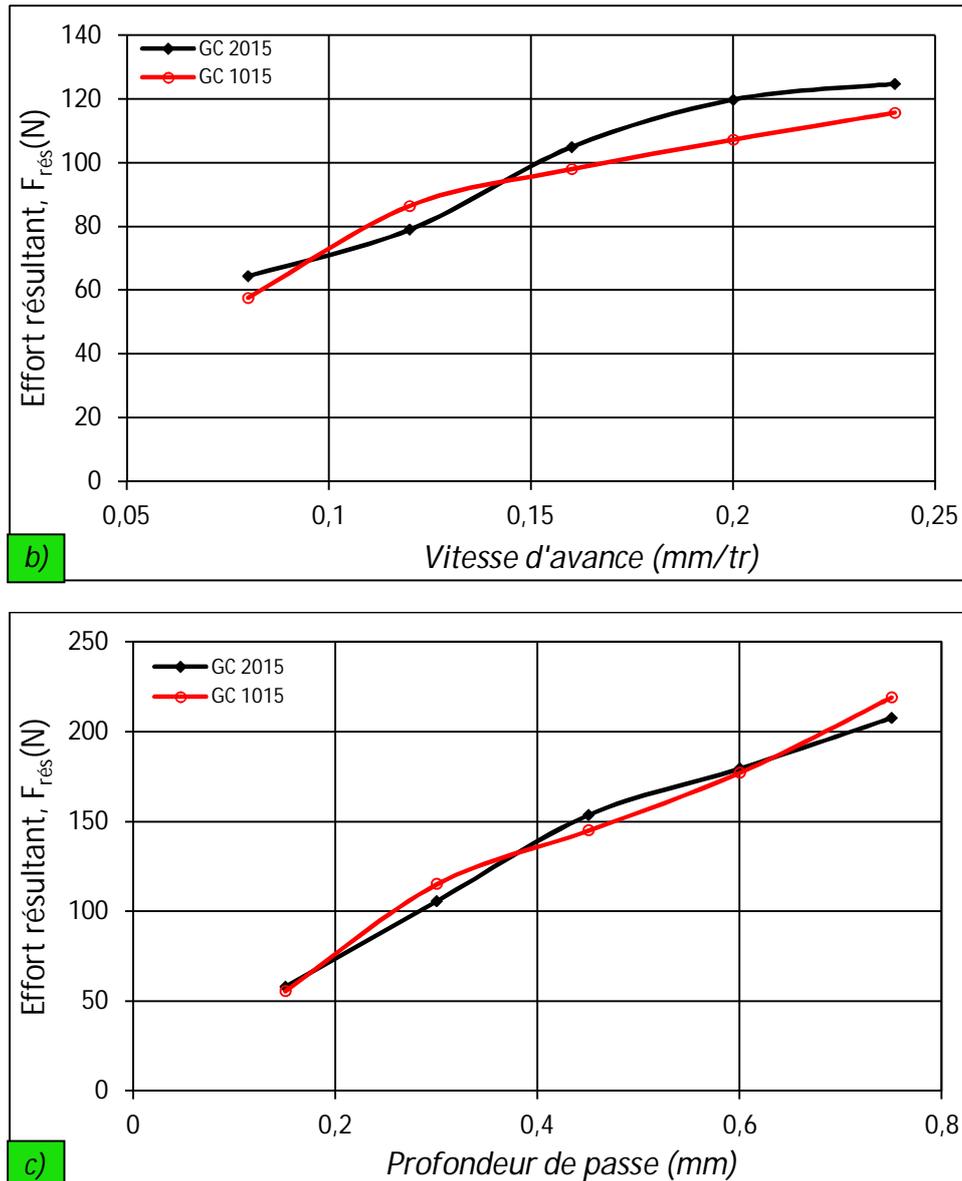


Figure III.11. Evolution des efforts résultant en fonction de : a) vitesse de coupe, b) vitesse d'avance et c) profondeur de passe pour les outils : GC2015 et GC1015.

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

On appelle « état de surface » les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profilomètres, qui relèvent le profil de la surface. Un profil de surface est la courbe résultant de l'intersection de la surface réelle et d'un plan spécifié P [70] (figure III.12). Ce plan est perpendiculaire à la surface de l'échantillon et orienté généralement perpendiculairement au sens des stries d'usinage.

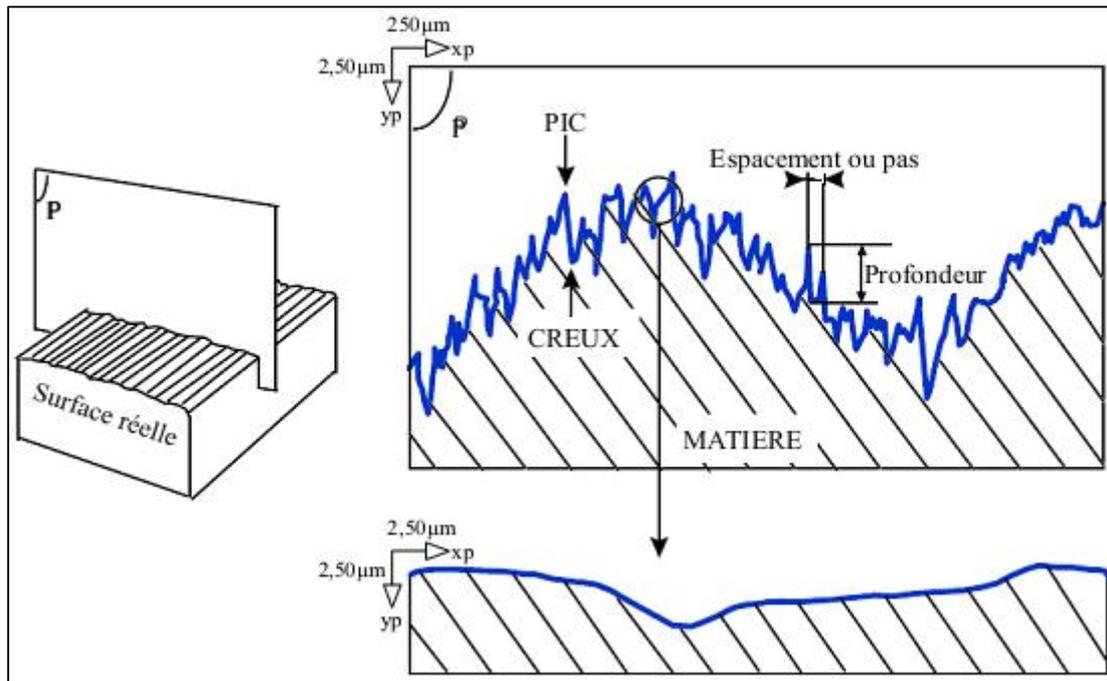


Figure III.12. Représentation des irrégularités sur un profil d'état de surface [71].

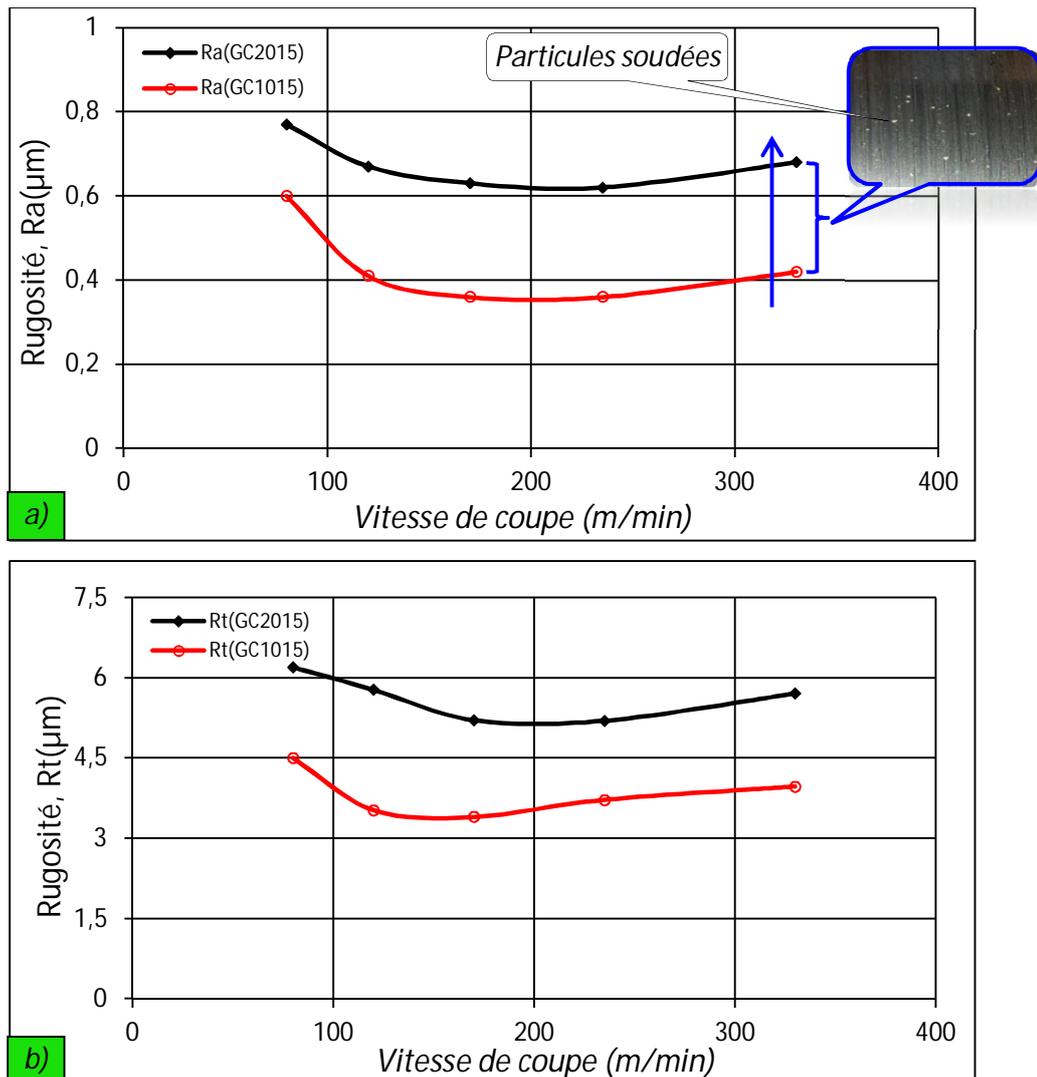
A la fin de chaque essai, des mesures de rugosité ont été réalisées sur les surfaces usinées afin d'analyser l'effet des différents paramètres de coupe. Les valeurs de rugosité indiquées dans cette étude sont une moyenne de trois mesures effectuées sur la surface usinée en trois endroits différents (120°). La mesure est effectuée à l'aide d'un rugosimètre de marque "Mitutoyo SJ-201". La caractérisation de la qualité de la surface usinée a été limitée aux trois critères de rugosité (Ra), (Rt) et (Rz) [5].

- **Ra** : représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue)
- **Rt** : représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.
- **Rz** : représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

A) Influence de la vitesse de coupe

Pour observer la variation de l'état de surface des pièces usinées (décrites dans notre cas par Ra , Rt et Rz) en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13, des essais ont été effectués en chariotage tout en gardant l'avance et la profondeur de passe constantes ($f=0,08$ mm/tr et $ap=0,15$ mm). Les courbes obtenues sont représentées sur la figure III.13. Dans les deux cas (GC2015 et GC1015), il est montré qu'à la vitesse de 80 m/min la rugosité de surface est à son maximum. En revanche au-delà de cette valeur, l'état de surface devient meilleur, lorsque la vitesse de coupe passe de 80 m/min à 330 m/min, pour les deux matériaux de coupe utilisés. Dans le

cas du carbure GC2015, la rugosité Ra chute de $0,77 \mu\text{m}$ à $0,64 \mu\text{m}$, la rugosité Rt chute de $6,2 \mu\text{m}$ à $5,61 \mu\text{m}$ et la rugosité Rz chute de $4,91 \mu\text{m}$ à $4,37 \mu\text{m}$. La diminution est plus significative dans le cas du carbure GC1015, la rugosité Ra chute de $0,6 \mu\text{m}$ à $0,38 \mu\text{m}$, la rugosité Rt chute de $4,5 \mu\text{m}$ à $3,72 \mu\text{m}$ et la rugosité Rz chute de $3,71 \mu\text{m}$ à $2,87 \mu\text{m}$. Cela donne une diminution de l'ordre de (36,66 ; 17,33 ; 22,64)% pour (Ra , Rt et Rz). Contrairement au cas avec le carbure GC2015 où la diminution varie de (16,88 ; 9,51 ; 10,99)% pour (Ra , Rt et Rz). Lorsque la vitesse de coupe dépasse 300 m/min, la détérioration de la rugosité de surface peut être expliquée par la présence des microsoudures sur la surface usinée due à la température élevée dans la zone de coupe. En comparant les valeurs des rugosités obtenues par les deux matériaux de coupe utilisés, on remarque clairement que l'outil GC1015 donne des rugosités plus faible comparativement au carbure GC2015 et cela pour toutes les conditions testées. En effet, aux mêmes conditions de coupe (V_{c_i} , $f = 0,08$ mm/tr et $a_p = 0,15$ mm) le ratio moyen des deux essais: $Ra_{GC2015} / Ra_{GC1015}$ est 1,55.



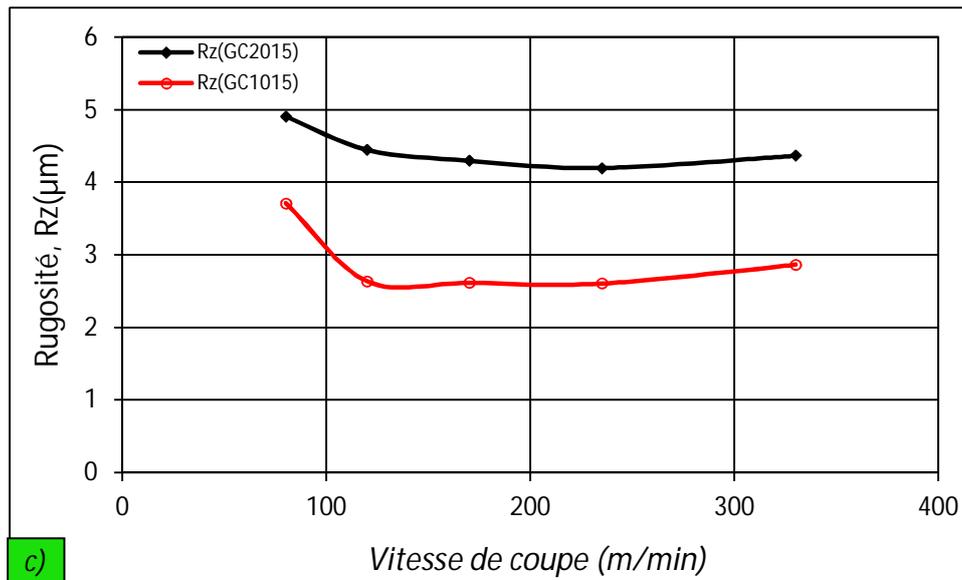
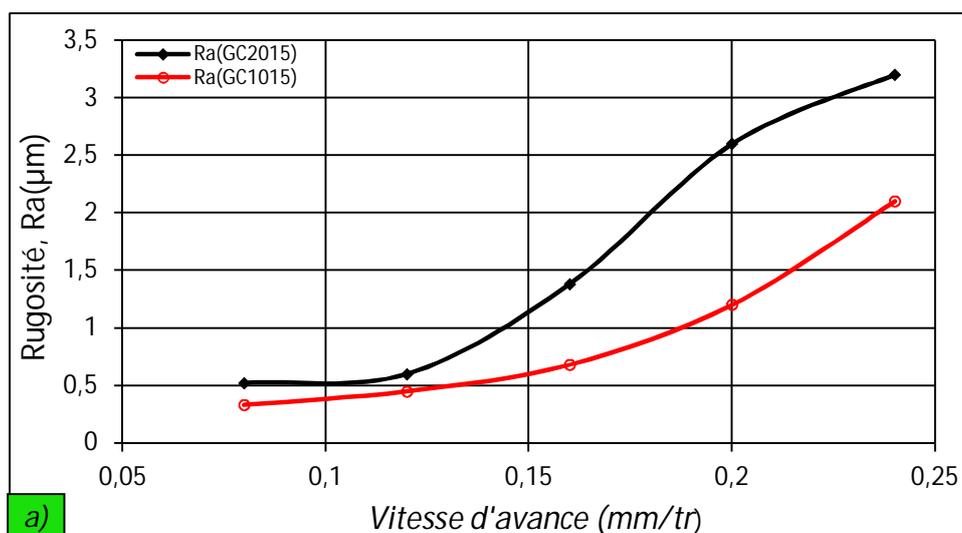


Figure III.13. Evolution des rugosités: a) R_a , b) R_t et c) R_z en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0,08$ mm/tr ; $a_p = 0,15$ mm pour les outils : GC2015 et GC1015.

B) Influence de la vitesse d'avance

La figure III.14 expose les résultats de l'évolution des trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction de l'avance. L'analyse des résultats montrent que les rugosités R_a , R_t et R_z sont minimales pour la plus faible avance. Elles augmentent avec l'élévation de celle-ci. On note une augmentation d'environ 6,23 fois de R_a , 3,54 fois de R_t et 3,85 fois de R_z pour le (GC2015) et 6,36 fois de R_a , 3,28 fois de R_t et 4,84 fois de R_z pour le (GC1015), lorsque la valeur de l'avance passe de 0,08 à 0,24 mm/tr.



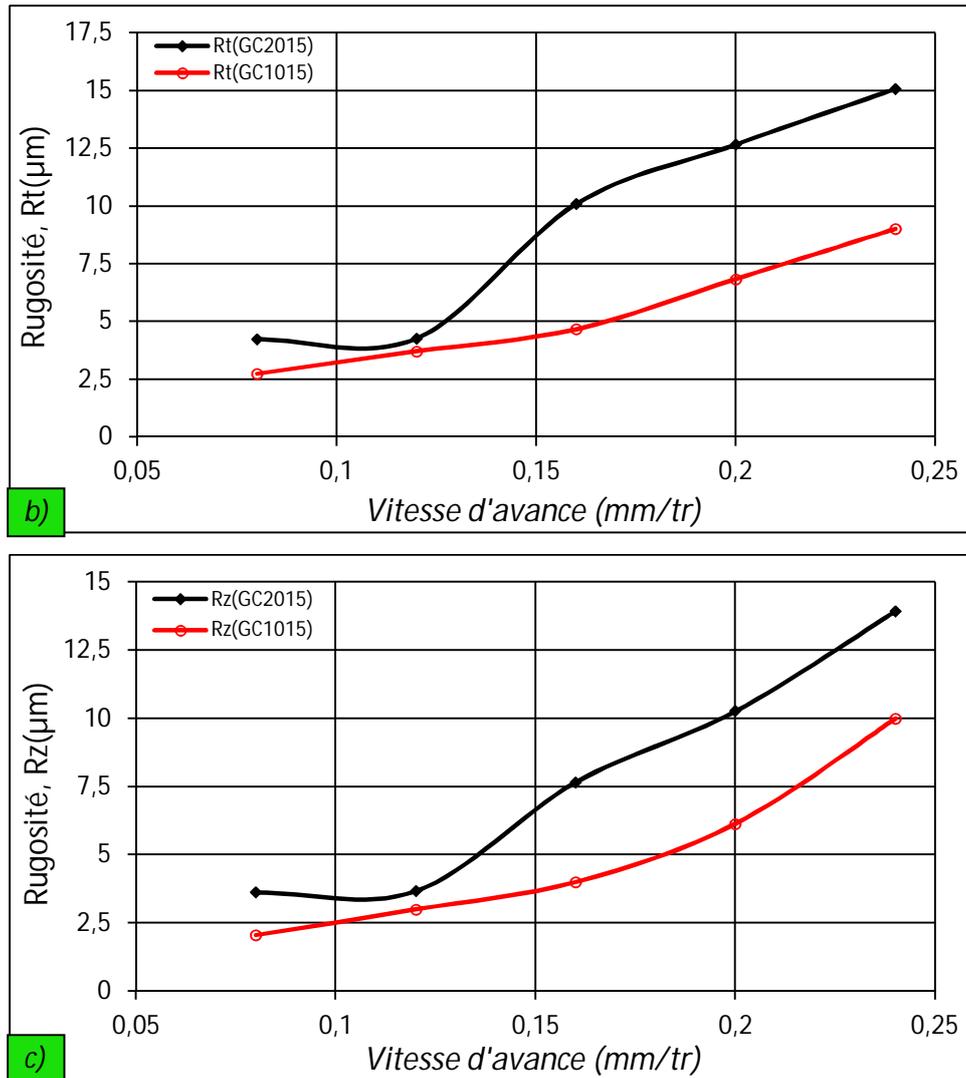


Figure III.14. Evolution des rugosités: a) R_a , b) R_t et c) R_z en fonction de l'avance à $V_c = 170 \text{ m/min}$; $a_p = 0,15 \text{ mm}$ pour les outils : GC2015 et GC1015

C) Influence de la profondeur de passe

La figure III.15 présente les évolutions de R_a , R_t et R_z en fonction de la profondeur de passe. L'analyse des résultats montre que l'influence de ce paramètre est moins importante que l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce [66]. Ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe. On constate que les valeurs de rugosité sont respectivement de : $R_a = 0,56 \mu\text{m}$, $R_t = 4,57 \mu\text{m}$ et $R_z = 3,51 \mu\text{m}$ pour le carbure (GC2015) et de : $R_a = 0,44 \mu\text{m}$, $R_t = 3,86 \mu\text{m}$ et $R_z = 2,9 \mu\text{m}$ pour le carbure (GC1015) lorsque la profondeur de passe $a_p = 0,15 \text{ mm}$. Une augmentation des critères de rugosité de : $R_a = 32,14\%$; $R_t = 29,54\%$ et $R_z = 37,77\%$ pour le GC2015 et $R_a = 56,81\%$; $R_t = 65,02\%$ et $R_z = 69,31\%$ pour le GC1015 a été enregistré lorsque la profondeur de passe atteint leur valeur maximale (0,75 mm).

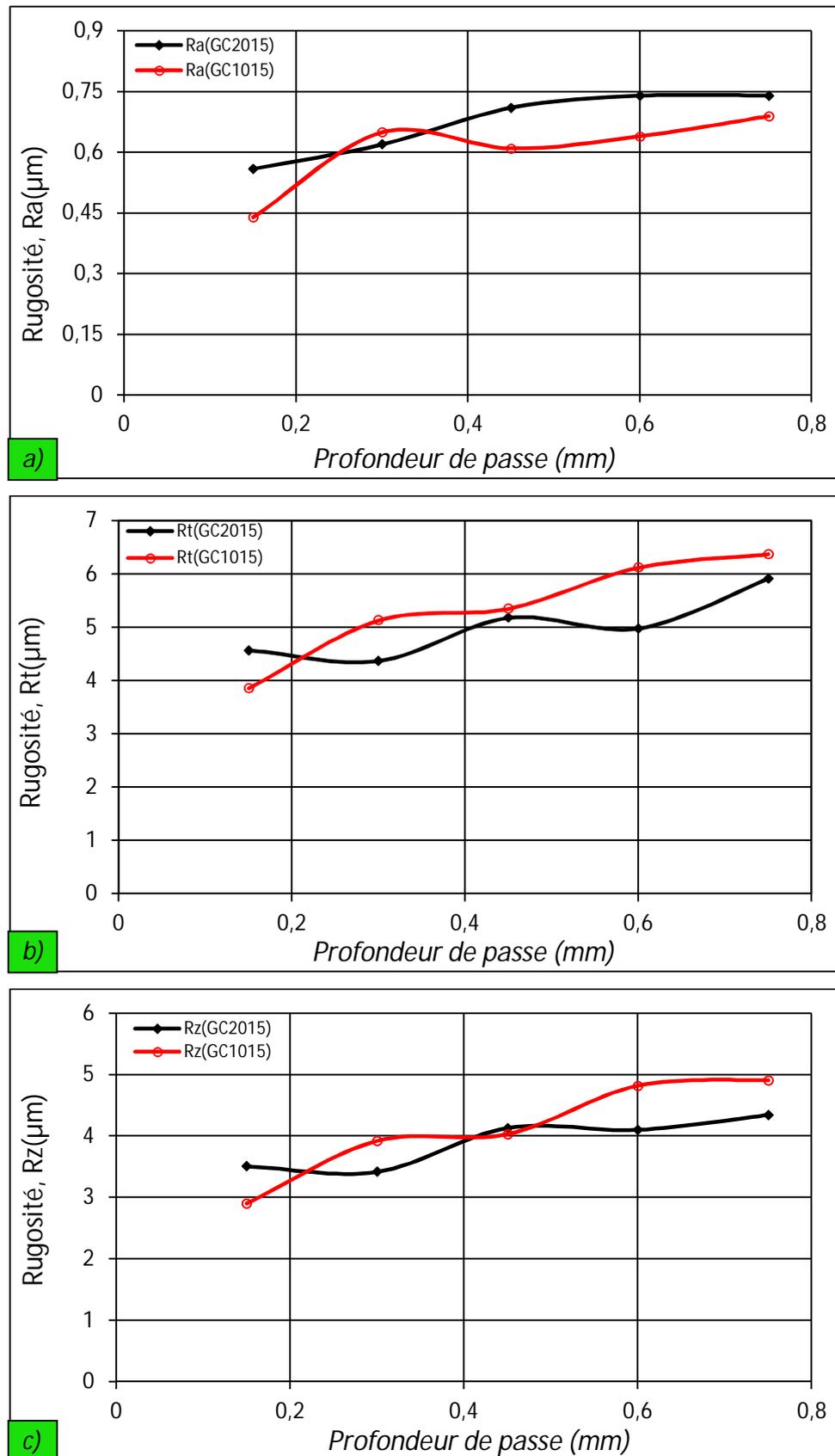


Figure III.15. Evolution des rugosités : a) Ra, b) Rt et c) Rz en fonction de la profondeur de passe à $f = 0,08$ mm/tr ; $V_c = 170$ m/min pour les outils : GC2015 et GC1015.

III.4. Evolution de l'usure en dépouille des outils en fonction du temps de coupe

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 [Norme ISO 3685] et cela pour évaluer la tenue des différents matériaux de coupe utilisés. Lors des essais réalisés, le suivi 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 (figure III.16)

- La largeur moyenne de cette bande est notée : VB
- La norme fixe comme critère de durée de vie : $VB = 0,3 \text{ mm}$

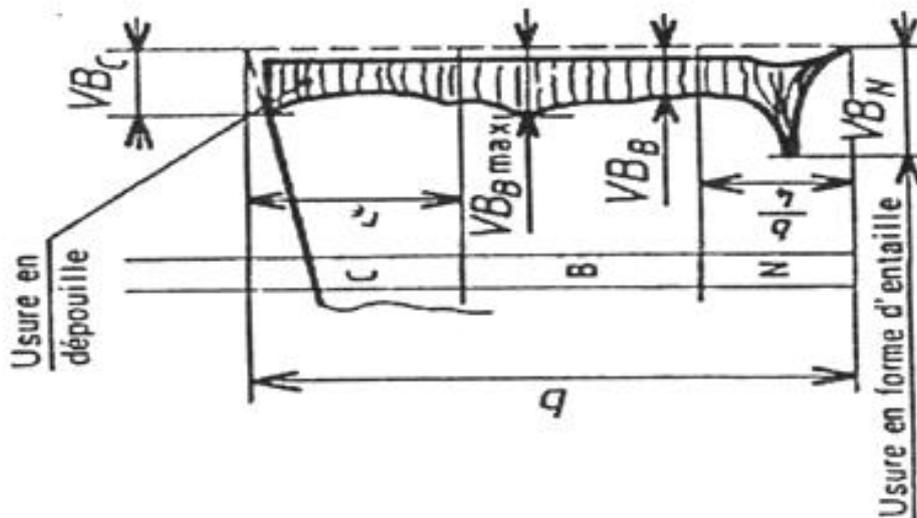


Figure III.16. Usure en dépouille VB

III.4.1. Mode et progression de l'usure en dépouille des outils

La définition de la durée de vie (T) d'un outil selon la norme ISO 3685 : « C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique » [66]. Dans notre cas les tenues des différents matériaux sont déterminées graphiquement sur la figure III.17.

Sur le graphe $VB = f(\text{temps})$ (figure III.17), les évolutions observées sur les courbes d'usure sont continuées. Après une usure rapide au début de l'essai, l'évolution de VB devient pratiquement linéaire. En début d'essai, dès la première mesure et à la fin de la 1^{er} passe, on note qu'au bout de 2 min d'usinage la plaquette GC2015 atteint 0,038 mm d'usure contre 0,06

mm pour la plaquette GC1015. Une différence de comportement est déjà très sensible. On note en suite que pour une usure de 0,3 mm, la durée de vie de la plaquette GC2015 est de 65 min, et celle de la plaquette GC1015 est de 13 min.

Dans les conditions de ces essais, la plaquette GC2015 s'use beaucoup moins vite que la GC1015. La durée de vie selon le critère de $VB = 0,3 \text{ mm}$ du carbure GC2015 est 5 fois supérieure à celle du carbure GC1015. Cette grande différence est essentiellement due au type du revêtement entre les deux plaquettes utilisé (CVD et PVD). Le manque de l'oxyde d'alumine (Al_2O_3) dans la composition du revêtement PVD rend la plaquette GC1015 moins résistante à l'usure, et par conséquent elle s'use plus rapidement.

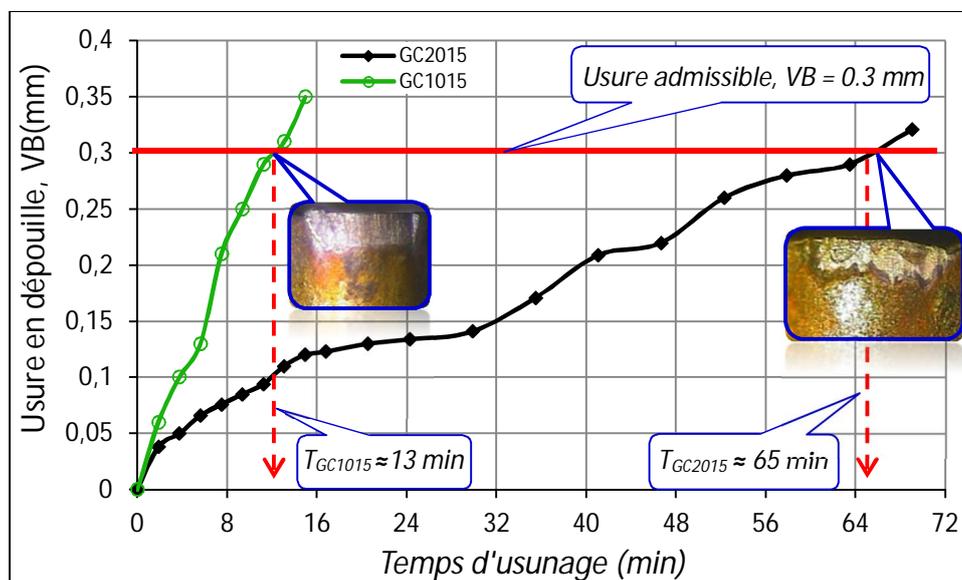


Figure III.17. Progression de l'usure en dépouille VB en fonction du temps ($V_c = 280 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ $a_p = 0,2 \text{ mm}$).

La figure III.18 (a, b) expose la morphologie de l'usure en dépouille VB du carbure GC2015 et du carbure GC1015 à $V_c = 280 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,2 \text{ mm}$. Initialement, l'usure en dépouille des deux carbures se développe suivant une bande régulière qui s'élargit avec le temps. On remarque que, pour le carbure GC2015 et après 65 minutes de travail l'usure VB se manifeste à la fin de l'usinage par une usure régulière (figure III.18a). Ce qui nous a conduits à dire que ce matériau est bien adapté à l'usinage de l'acier X20Cr13. Pour le carbure GC1015 (figure III-18b) et après 13 minutes d'usinage, on remarque une usure accélérée sur la surface de dépouille, ce qui nous conduit à dire que le carbure GC1015 n'est pas conseillé pour l'usinage de l'acier X20Cr13 dans ces conditions de coupe.

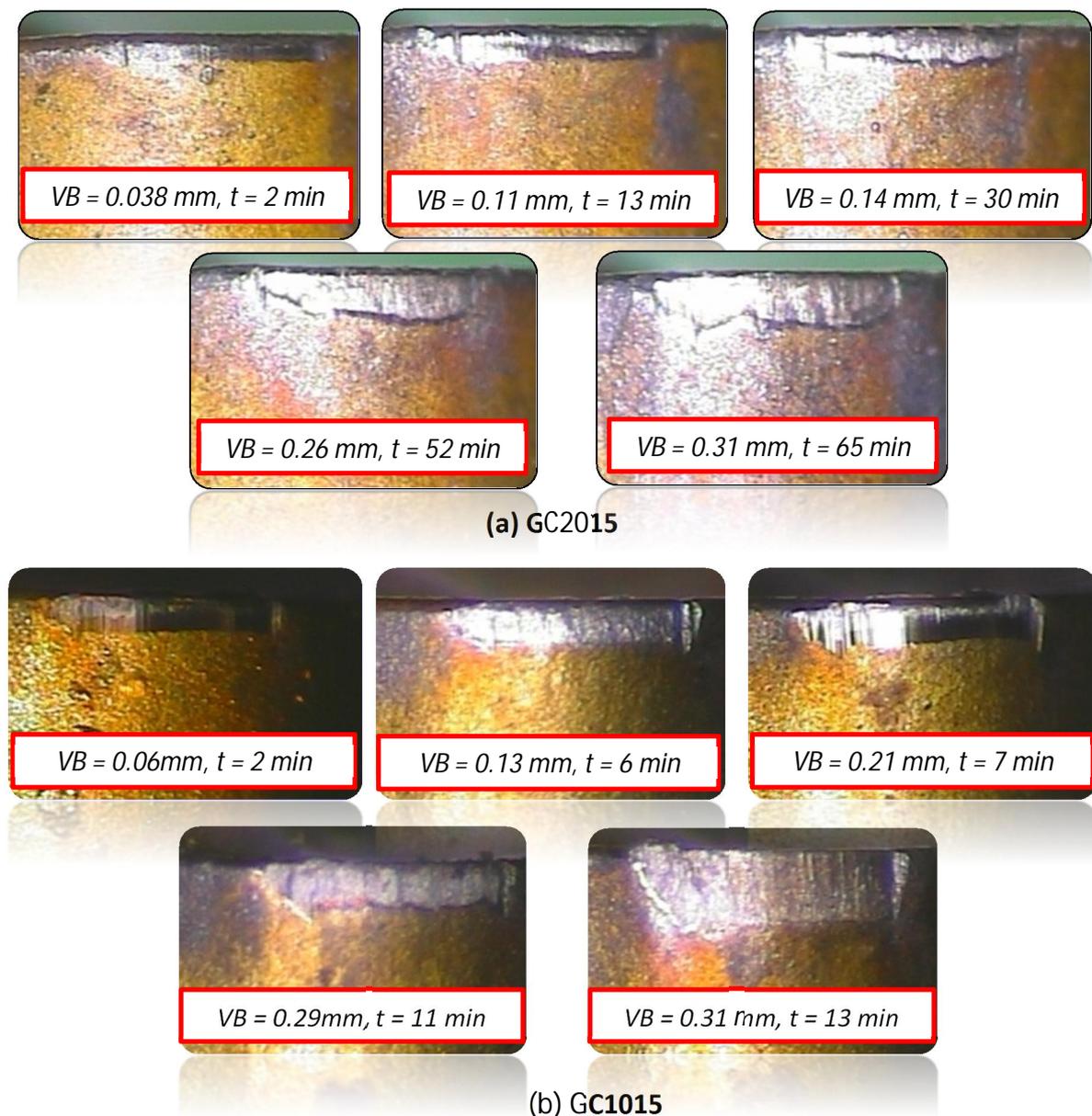


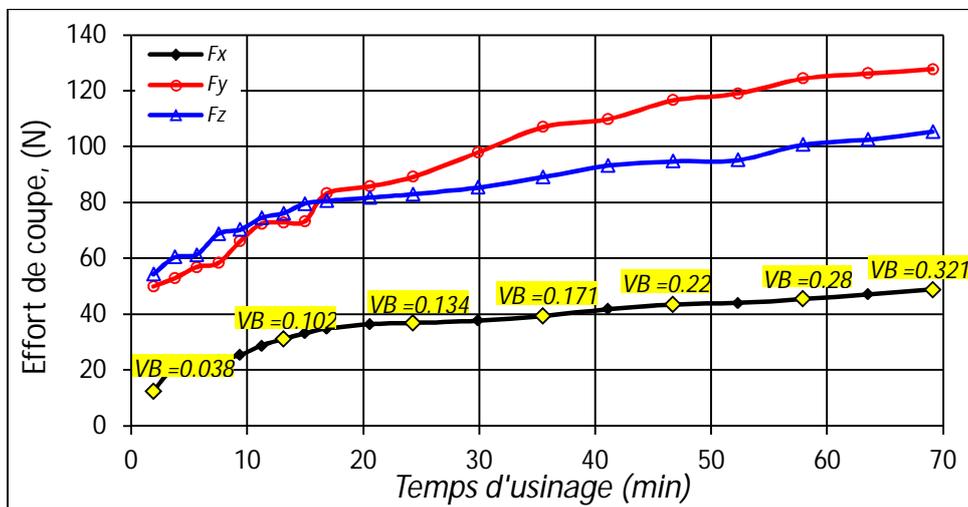
Figure III.18 Valeurs de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage pour $V_c = 280 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,2 \text{ mm}$

III.4.2. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure

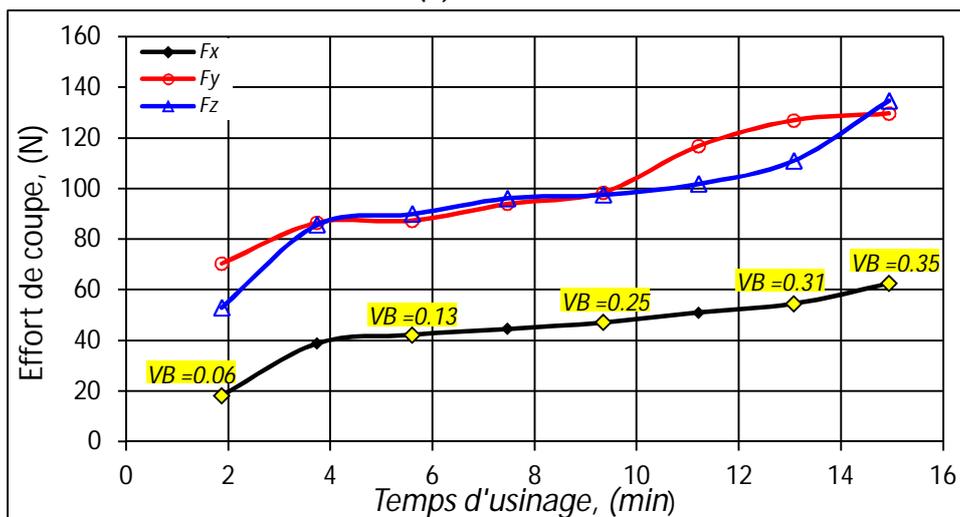
La figure III.19 (a, b) présente l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps de coupe et de l'usure pour les deux matériaux de coupe utilisés.

Il en ressort que les trois composantes de l'effort de coupe augmentent en fonction du temps d'usinage pour les deux matériaux testés. Ceci est une conséquence de l'évolution de l'usure sur les surfaces en dépouille des outils, puisque dans ce cas, la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente aussi bien que les forces de frottement et par conséquent, les trois composantes de l'effort de coupe augmentent. L'analyse des résultats de

la figure(III.19a) montre que pour un temps d'usinage qui varie de 2 à 65 minutes, l'usure de l'outil GC2015 varie de 0,038 à 0,3 mm et, par conséquent, les trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) augmentent aussi successivement aux valeurs de 47,25 N pour F_x ; de 102,53 N pour F_y et de 126,3 N pour F_z ce qui indique une augmentation des trois composantes de 277,69% ; 105,06% et 132,51%. Pour le carbure GC1015, l'outil s'use rapidement à cause des frottements intenses et des températures élevées, ce qui augmente les efforts de coupe (figure III.19b). Après 2 minutes de travail, l'usure atteint la valeur 0,06 mm, faisant enregistrer des efforts (F_x , F_y , F_z) de 18,16 ; 70,5 et 53,1 N. Après 13 min d'usinage, les composantes de l'effort de coupe atteignent les valeurs (54,63 ; 127,02 ; 111,08) N. Ce qui correspond à une augmentation des 3 composantes de (74,45%, 57,51% et 52,51%) et (71,04%, 45,64% et 60,6%) respectivement pour GC2015 et GC1015.



(a) GC2015

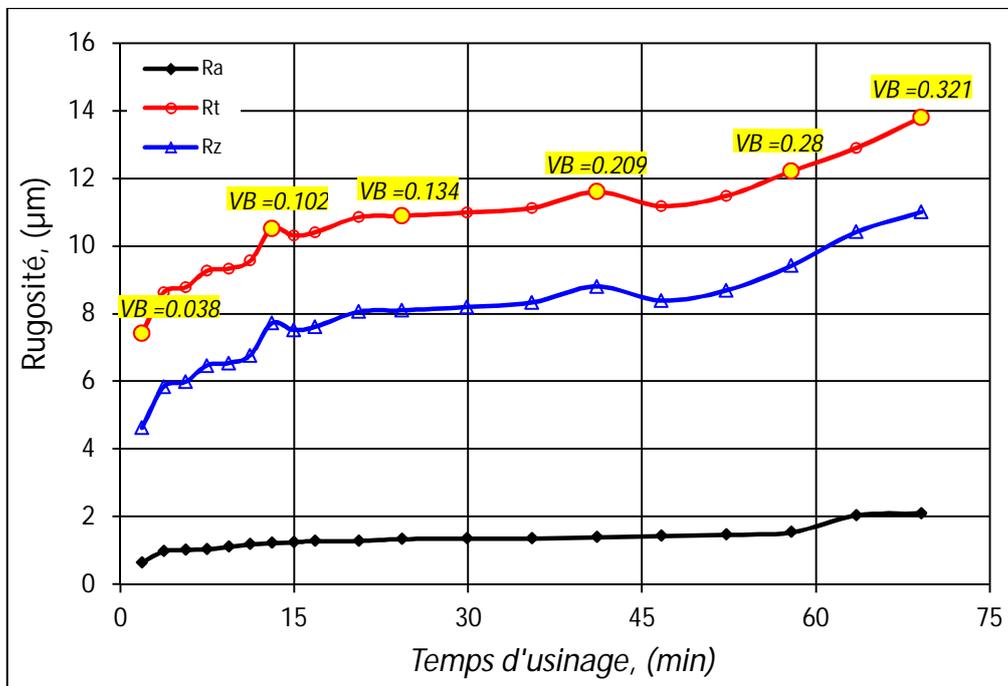


(b) GC1015

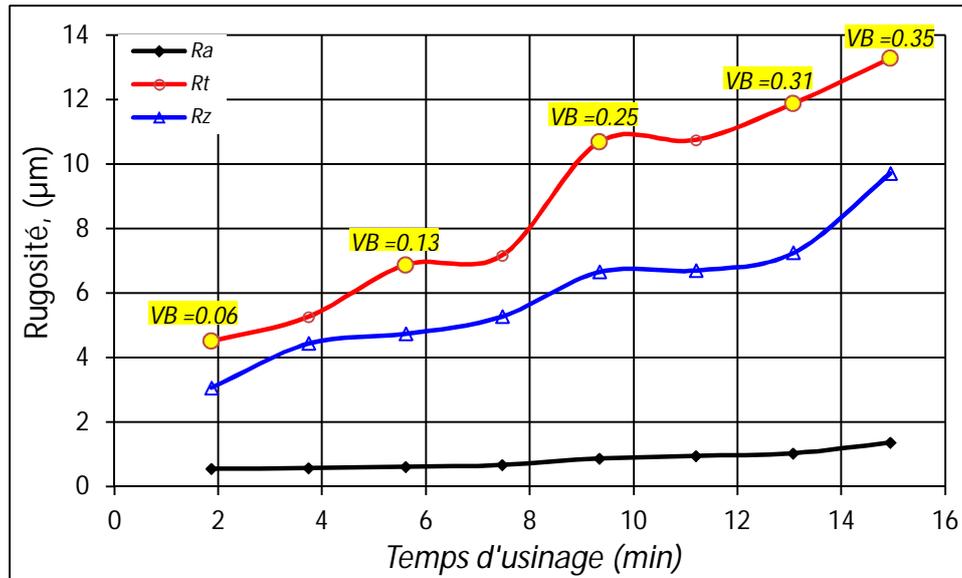
Figure III.19 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps à $V_c= 280$ m/min ; $f=0,08$ mm/tr ; $a_p=0,2$ mm pour : a) GC2015 et b) GC1015

III.4.3. Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure

La figure III.20 (a, b) présente l'évolution des trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction du temps d'usinage pour les deux outils : (a) GC2015 et (b) GC1015 à $f = 0,08\text{mm/tr}$; $a_p = 0,2\text{mm}$ et $V_c = 280\text{m/min}$. 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. Les courbes des trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction du temps d'usinage pour le carbure GC2015 sont exposées dans la figure (III.20a). Pour un temps d'usinage qui varie de 2 à 65 minutes, les critères de rugosité (R_a , R_t , R_z) passent de (0,65 ; 7,42 et 4,62) μm à (2,04 ; 12,91 et 10,42) μm , soit une variation qui correspond à une augmentation de (213,84 ; 73,98 et 125,54) %. Pour le carbure GC1015 (figure III.20b) et pour une usure admissible $[VB] = 0,3\text{mm}$ et après un temps d'usinage $t = 2$ min, les trois critères de rugosité (R_a , R_t , R_z) atteignent respectivement les valeurs de (0,56; 4,51; 3,08) μm . A la fin de l'usinage ($t = 13$ min), les critères de rugosité augmentent jusqu'à les valeurs de 1,04 μm pour R_a , de 11,89 μm pour R_t et de 7,26 μm pour R_z . Ce qui correspond à une augmentation de (69,04% ; 58,03% et 46,27%) et (58,82% ; 68,34 et 66,06%).



(a) GC2015



(b) GC1015

Figure III.20. Evolution de la rugosité en fonction du temps à $V_c = 280$ m/min ; $f = 0,08$ mm/tr ; $a_p = 0,2$ mm pour : a) GC2015 et b) GC1015.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a été construit en réalisant la démarche du Couple-Outil-Matière avec l'acier inoxydable martensitique X20Cr13 et deux outils en carbure métallique GC2015 et GC1015 avec revêtement CVD et PVD. Les nombreuses expérimentations nécessaires à cette étude nous ont permis d'évaluer les performances de ces outils de coupe en termes d'effort et pression de coupe, de rugosité des surfaces usinées et d'usure en dépouille. Ainsi, les plages des conditions de coupe liées au fonctionnement correct des outils, les mieux adaptées et les durées de vie ont été déterminées.

- En termes d'effort de coupe, les deux carbures utilisés présentent presque le même comportement. L'effort de coupe le plus important est l'effort de coupe (tangential). Le choix d'une profondeur passe ou (et) d'une avance trop faible amène des pressions de coupe énormes.
- En termes de rugosité de surface ; la comparaison entre les deux nuances de coupe utilisées montre que le carbure GC1015 donne le meilleur état de surface.
- Le comportement à l'usure varie très largement en fonction de la composition chimique du revêtement (CVD et PVD) et aux caractéristiques physiques et mécaniques du Couple-Outil-Matière. En effet, la comparaison en termes d'usure montre que le carbure GC2015 est le matériau le plus résistant à l'usure avec une durée de vie de 65 min contre 13 min pour le carbure GC1015.

- Une étude des efforts suivant l'évolution de l'usure indique que c'est l'effort de poussée (radial) qui se distingue par sa forte sensibilité à l'usure de l'outil.
- 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.

La majorité des spécialistes de l'usinabilité des matériaux n'admettent que seuls les essais d'usure de longue durée (conduisant au tracé de la droite de Taylor), fournissant les données fondamentales permettant d'apprécier le comportement d'un matériau face à un certain outil de coupe. A cet effet, le carbure GC2015 est considéré comme l'outil le plus performant pour l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13. Donc tous les essais du chapitre qui suit (*Chapitre IV*) sont réalisés avec l'outil GC2015.

CHAPITRE IV

MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUE D'USINAGE

Ce chapitre, présente une étude statistique qui repose sur l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression, afin de déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés tels que : les efforts de coupe, la rugosité de surface et l'usure des outils. Les plans d'expérience utilisés sont les plans factoriel complet 4^3 avec un nombre de 64 essais et 3^2 avec un nombre de 9 essais. Ainsi les valeurs des coefficients de corrélations et les constantes associées ont été calculées. Une comparaison entre les modèles mathématiques obtenus par la méthode de régression et la méthode des réseaux de neurones a été faite.

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous déterminons les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe (V_c , f , ap et t) et les paramètres technologiques d'usinage étudiés (effort de coupe, rugosité de surface et usure), lors de l'usinage de l'acier inoxydable *X20Cr13* avec un outil en carbure métallique (GC2015). L'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse ont été réalisés par l'utilisation des trois logiciels statistiques «*Minitab 16, Design-Expert 8 et JMP 10*». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés, et de proposer des modèles mathématiques pour chaque phénomène étudié. Ces modèles permettent de faire des prédictions.

IV.2. Modélisation des différents phénomènes de processus de coupe

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe (V_c , f , ap et t) sur les différents paramètres technologiques d'usinage étudiés (effort de coupe, rugosité et usure), nous avons dressé deux plans factoriels complets : (4^3) pour les efforts de coupe et la rugosité, ce qui nous donne 64 essais et un plan factoriel (3^2) pour l'usure, ce qui nous donne 9 essais. Le traitement des résultats expérimentaux obtenus, nous permet de déterminer des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre (les différents paramètres étudiés) et les paramètres du régime de coupe (V_c , f , ap et t).

IV.2.1. Analyse de variance ANOVA

L'analyse de variance ANOVA est utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le processus d'usinage, et elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie [58]. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par *P-value* et *F-value* d'ANOVA.

Dans le tableau d'ANOVA, *P-value* est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

- Si $P > 0,05$, le paramètre est insignifiant
- Si $P < 0,05$, le paramètre est significatif

La somme des carrés (SC) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale.

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (IV.1)$$

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

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté.

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (IV.2)$$

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

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (IV.3)$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA ($Cont. \%$), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$Cont.\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (IV.4)$$

IV.2.2. Analyse de régression

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre l'entrée, appelé les conditions de coupe (vitesse de coupe (Vc), la vitesse d'avance (f), la profondeur de passe (ap) et le temps d'usinage (t)) et la sortie (Y), défini comme un des aspects d'usinabilité (paramètres technologiques d'usinage) est donnée par :

$$Y = \varphi(Vc.f.ap.t) \quad (IV.5)$$

Où : φ est la fonction de réponse,

L'approximation des Y est proposé au moyen d'un modèle mathématique non-linéaire (quadratique), qui est approprié pour l'étude des effets d'interaction des paramètres de coupe.

Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale est donné par :

$$Y = b_o + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \varepsilon_{ij} \quad (\text{IV.6})$$

$$(\varepsilon_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij}) \quad (\text{IV.7})$$

Où : b_o est le terme constant de l'équation de régression, les coefficients $b_1, b_2 \dots b_k$ et b_{11}, b_{22}, b_{kk} sont les termes linéaires et quadratiques respectivement, tandis que b_{12}, b_{13}, b_{k-1} sont les termes d'interaction. X_i représente les paramètres d'entrée (Vc, f, ap et t), ε_{ij} présente l'erreur d'ajustement pour le modèle de régression. y_{ij} est l'observation correspondante des essais, et \bar{y}_{ij} est la valeur ajusté.

Le coefficient de détermination R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{IV.8})$$

avec y_i valeur de la réponse calculée à la i^{eme} expérience ;

\bar{y}_i valeur mesurée à la i^{eme} expérience ;

\bar{y} valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%, à chaque fois que la valeur de F -calculée est supérieure à la valeur de F -table. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérées statistiquement significatives. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réel (expérimentaux). [49]

IV.3. Modélisation des différents critères de rugosité en fonction de Vc, f et ap

Les résultats expérimentaux correspondants aux critères de rugosité présentés dans le tableau IV.1, ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe, vitesse de coupe (Vc), avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap), lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique $X20Cr13$ par un outil en carbure métallique avec un revêtement CVD (GC2015).

Tableau IV.1. Résultats expérimentaux de la rugosité de surface

Essais N°=	Facteurs			Réponses		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)
1	120	0,08	0,15	0,51	4,44	3
2	120	0,08	0,3	0,55	4,52	3,6
3	120	0,08	0,45	0,58	5,24	4,2
4	120	0,08	0,6	0,60	4,86	4,1
5	120	0,12	0,15	0,65	4,66	3,9
6	120	0,12	0,3	0,72	4,50	3,9
7	120	0,12	0,45	0,77	4,80	4,1
8	120	0,12	0,6	0,80	5,18	4,2
9	120	0,16	0,15	1,03	5,93	5,1
10	120	0,16	0,3	1,14	6,87	5,8
11	120	0,16	0,45	1,21	7,71	6,1
12	120	0,16	0,6	1,23	7,62	6,4
13	120	0,2	0,15	1,54	9,13	7,4
14	120	0,2	0,3	1,58	8,94	7,7
15	120	0,2	0,45	1,65	10,15	8,5
16	120	0,2	0,6	1,61	9,48	8,1
17	170	0,08	0,15	0,65	5,72	4,1
18	170	0,08	0,3	0,65	4,70	3,9
19	170	0,08	0,45	0,66	4,78	3,8
20	170	0,08	0,6	0,79	5,00	4,0
21	170	0,12	0,15	0,85	5,96	5,5
22	170	0,12	0,3	0,88	6,04	5,6
23	170	0,12	0,45	0,90	6,20	5,3
24	170	0,12	0,6	0,99	5,49	4,9
25	170	0,16	0,15	1,10	6,63	5,7
26	170	0,16	0,3	1,15	6,64	5,9
27	170	0,16	0,45	1,16	6,67	6,2
28	170	0,16	0,6	1,22	7,48	6,5
29	170	0,2	0,15	1,68	9,05	8,2
30	170	0,2	0,3	1,72	9,23	8,4
31	170	0,2	0,45	1,83	10,70	9,3
32	170	0,2	0,6	1,85	10,63	9,5
33	200	0,08	0,15	0,93	6,00	5,2
34	200	0,08	0,3	1,01	5,94	5,3
35	200	0,08	0,45	1,04	6,20	5,6
36	200	0,08	0,6	1,09	6,90	6,0
37	200	0,12	0,15	1,10	6,02	5,6
38	200	0,12	0,3	1,10	6,64	5,7
39	200	0,12	0,45	1,10	6,95	6,0
40	200	0,12	0,6	1,14	7,09	6,3

41	200	0,16	0,15	1,18	8,88	6,9
42	200	0,16	0,3	1,15	6,67	6,0
43	200	0,16	0,45	1,22	7,39	6,5
44	200	0,16	0,6	1,17	6,86	6,3
45	200	0,2	0,15	1,90	10,40	8,9
46	200	0,2	0,3	1,92	9,82	8,9
47	200	0,2	0,45	1,93	10,82	9,6
48	200	0,2	0,6	1,88	9,50	8,7
49	280	0,08	0,15	0,52	3,93	3,1
50	280	0,08	0,3	0,53	4,11	3,2
51	280	0,08	0,45	0,57	4,84	3,4
52	280	0,08	0,6	0,58	4,74	3,5
53	280	0,12	0,15	0,76	4,40	3,7
54	280	0,12	0,3	0,75	4,03	3,7
55	280	0,12	0,45	0,80	5,26	4,2
56	280	0,12	0,6	0,79	4,51	4,0
57	280	0,16	0,15	1,12	6,65	6,4
58	280	0,16	0,3	1,14	6,64	6,0
59	280	0,16	0,45	1,13	7,03	6,1
60	280	0,16	0,6	1,14	6,81	6,1
61	280	0,2	0,15	1,69	8,88	7,9
62	280	0,2	0,3	1,70	8,67	8,1
63	280	0,2	0,45	1,72	9,16	8,3
64	280	0,2	0,6	1,72	8,84	6,2

IV.3.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les rugosités Ra , Rt et Rz

Les *tableaux IV.2 à IV.4* montrent les résultats d'analyse de la variance, respectivement, pour Ra , Rt et Rz . Cette analyse était faite pour les valeurs de P inférieure à 0,05 (ou 95% de confiance).

Le *tableau IV.2* résume les résultats d'analyse de la variance ANOVA pour la rugosité Ra . Le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface Ra est l'avance par tour (f) avec une contribution de (82,51 %), des résultats similaires ont été trouvés par [45, 52, 72 et 73]. L'augmentation de l'avance génère des rainures résultant de la cinétique d'usinage qui sont parallèles à la direction de la vitesse de coupe. Ces rainures sont plus profondes et plus larges lorsque l'avance (f) augmente. Pour mieux visualiser ces rainures, un exemple représentatif d'une image 3D d'une surface tournée est représenté dans la *figure IV.1*. Les effets des produits (Vc^2 , f^2) sont significatifs avec des contributions de (6,03 % de 6,04%) respectivement. la vitesse de coupe (Vc) n'a pas d'effet significatif, ceci est en désaccord avec les résultats de [37]. la profondeur de passe (ap) et les interactions ($Vc \times f$ et $Vc \times ap$) restent insignifiantes.

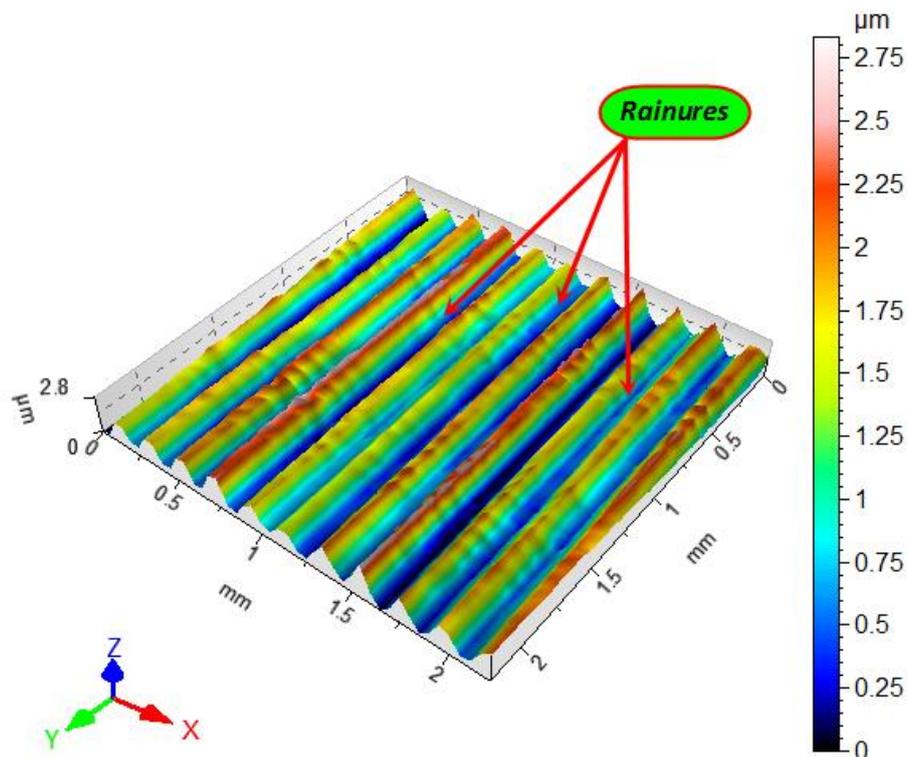


Figure IV.1. Topographie d'une surface usinée : $V_c = 120 \text{ m/min}$, $f = 0,2 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,15 \text{ mm}$

Tableau IV.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_a

Source	df	SC	MC	F	P	Cont, %	Remarques
Régression	9	10,6927	1,18807	126,3	0,00000	95,4679	signifiant
V_c	1	0,0064	0,55203	58,72	0,00000	0,05714	signifiant
f	1	9,2423	0,16384	17,42	0,00010	82,5183	signifiant
a_p	1	0,0695	0,01442	1,534	0,22087	0,62051	non
$V_c \times f$	1	0,0067	0,00670	0,713	0,40231	0,05982	non
$V_c \times a_p$	1	0,0124	0,01239	1,319	0,25591	0,11071	non
$f \times a_p$	1	0,0017	0,00166	0,177	0,67593	0,01517	non
V_c^2	1	0,6761	0,67606	71,92	0,00000	6,03644	signifiant
f^2	1	0,6772	0,67719	72,04	0,00000	6,04626	signifiant
a_p^2	1	0,0004	0,00042	0,044	0,83400	0,00357	non
Erreur	54	0,5076	0,00940				
Totale	63	11,2003					

Dans le *tableau IV.3*, on peut voir les résultats de l'analyse de la variance pour R_t . Il semble que l'avance par tour (f) affecte R_t , avec un pourcentage de contribution de 75,50%. Les autres facteurs influençant R_t sont les produits (V_c^2 , f^2) avec des pourcentages de contribution

(6,42 ; 8,14)% respectivement. La profondeur de passe (ap) et les interactions ($Vc \times f$, $Vc \times p$, et $f \times ap$) n'ont pas d'effet significatif.

Tableau IV.3. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_t

Source	dl	SC	MC	F	P	Cont, %	Remarques
Régression	9	216,268	24,0298	63,5809	0,000000	91,37686	signifiant
Vc	1	1,174	12,6707	33,5256	0,000000	0,496035	signifiant
f	1	178,707	5,2728	13,9515	0,000454	75,5067	signifiant
ap	1	1,637	0,1524	0,4031	0,528169	0,69166	non
$Vc \times f$	1	0,054	0,0537	0,1422	0,707607	0,022816	non
$Vc \times ap$	1	0,211	0,2108	0,5578	0,458380	0,089151	non
$f \times ap$	1	0,001	0,0014	0,0036	0,952338	0,000423	non
Vc^2	1	15,200	15,1997	40,2171	0,000000	6,422255	signifiant
f^2	1	19,283	19,2831	51,0215	0,000000	8,147391	signifiant
ap^2	1	0,001	0,0008	0,0021	0,963948	0,000423	non
Erreur	54	20,409	0,3779				
Totale	63	236,677					

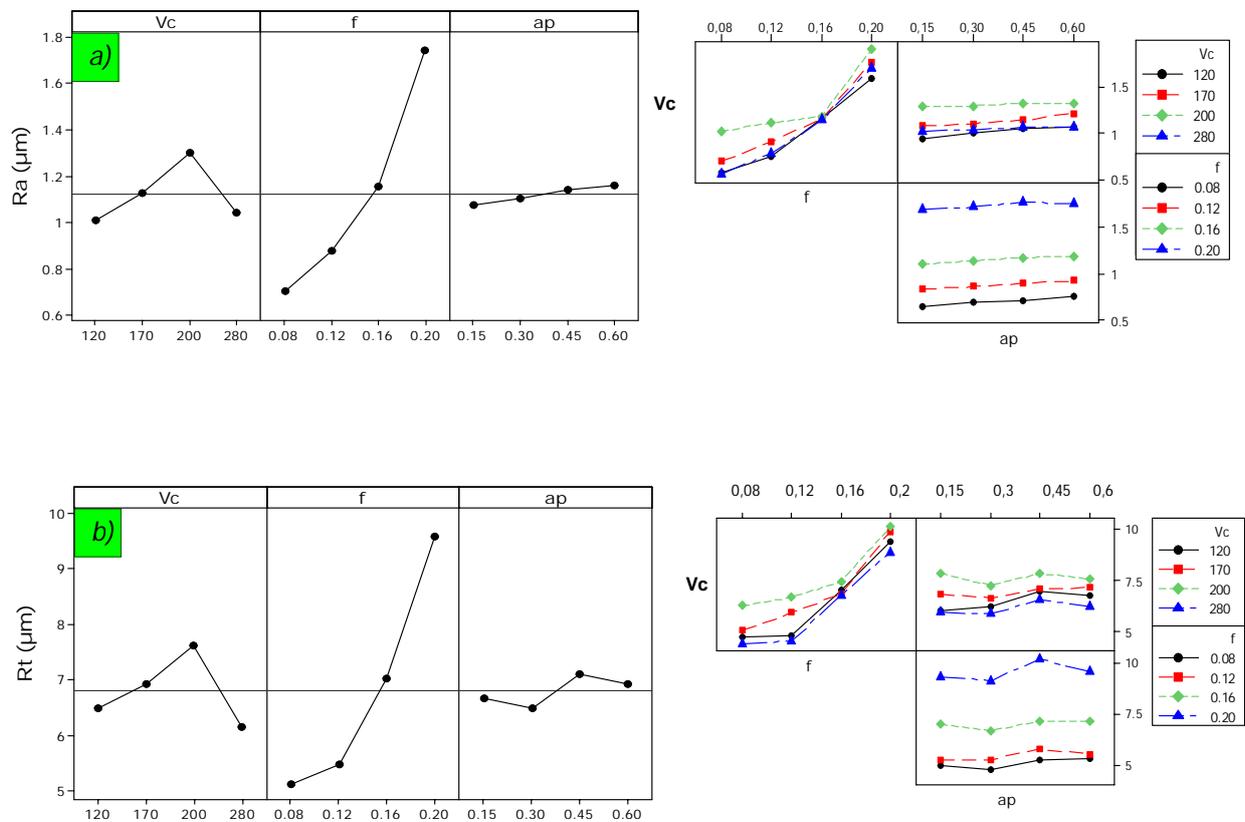
D'après le *tableau IV.4*, on peut voir qu'apparemment la vitesse d'avance (f) est le facteur le plus important qui affecte R_z . Sa contribution est 76,57% ; suivi par les produits (Vc^2 , f^2) et la profondeur de passe (ap) avec un pourcentage de contribution de (9,33 ; 5,08 et 0,31)% respectivement. Les interactions ($Vc \times f$, $Vc \times ap$ et $f \times ap$) et le produit (ap^2) n'ont pas d'influence significative.

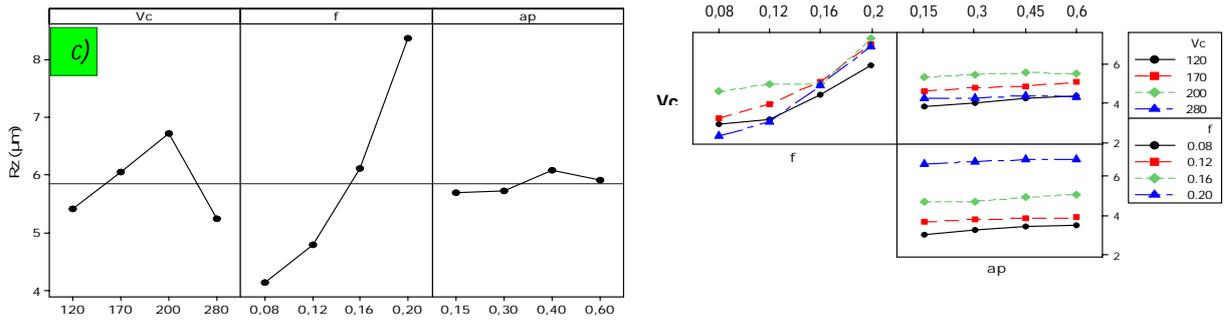
Tableau IV.4. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_z

Source	dl	SC	MC	F	P	Cont. %	Remarques
Régression	9	188,096	20,9	71,57	0,00000	92,27	signifiant
Vc	1	0,458	0,458	1,57	0,00000	0,22	signifiant
f	1	156,105	156,105	534,61	0,01007	76,57	signifiant
ap	1	0,64	0,64	2,19	0,04141	0,31	signifiant
$Vc \times f$	1	0,034	0,034	0,12	0,73596	0,02	non
$Vc \times ap$	1	1,14	1,14	3,9	0,05326	0,56	non
$f \times ap$	1	0,061	0,061	0,21	0,64972	0,03	non
Vc^2	1	19,021	19,021	65,14	0,00000	9,33	signifiant
f^2	1	10,35	10,35	35,45	0,00000	5,08	signifiant
ap^2	1	0,286	0,286	0,98	0,32675	0,14	non
Erreur	54	15,768	0,292				
Totale	63	203,864					

Avec l'augmentation de la vitesse d'avance (f), l'outil de coupe doit enlever plus de volume de matière usiné, ce qui augmente la quantité de chaleur générée. La déformation plastique de la pièce usinée est généralement proportionnelle à la quantité de chaleur produite et favorise la dégradation de la rugosité de surface [74, 75]. En raison de l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce à usiner, la profondeur de passe (ap) a un effet beaucoup plus faible par rapport à celui de la vitesse d'avance (f). Basé sur les résultats obtenus, l'avance par tour (f) est le facteur le plus influent sur l'évolution de la rugosité de surface. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux des chercheurs [76, 58].

Les graphiques des effets principaux et des interactions sont présentés dans la figure IV.2 (a, b et c), à partir de cette figure, il apparaît clairement que l'avance par tour (f) affecte fortement les rugosités Ra , Rt et Rz , la vitesse de coupe a un faible effet sur l'évolution des rugosités Ra , Rt et Rz . En outre, aucune variation significative n'a été observée sur les trois critères de rugosité en raison de la variation de la profondeur de passe (ap). Les interactions ($Vc \times ap$, $Vc \times f$ et $f \times ap$) n'ont pas d'effet significatif. Cela a été confirmé par les résultats de l'analyse statistique ANOVA.





IV.3.2. Analyse de régression : Ra, Rt et Rz en fonction de Vc, f et ap

La relation entre les entrées (*facteurs*) et les sorties (*critères de rugosité*) a été modélisée par des équations quadratiques de régression. Les équations de régressions obtenues sont les suivantes.

Le modèle de la rugosité moyenne arithmétique (Ra) est donné par l'équation. (IV.9). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 95,47\%$).

$$Ra = 0,39 + 0,014Vc - 10f + 0,51ap - 3,45 \cdot 10^{-5}Vc^2 + 3,94 \cdot 10^{-3}Vc \times f - 1,42 \cdot 10^{-3}Vc \times ap + 64,3f^2 - 0,67f \times ap - 0,11ap^2 \quad (IV.9)$$

Le modèle de la hauteur maximale du profil (Rt) est donné par l'équation. (IV.10). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 91,38\%$).

$$Rt = 0,82 + 0,06Vc - 56,77f + 2,11ap - 1,63 \cdot 10^{-4}Vc^2 - 0,01Vc \times f - 5,89 \cdot 10^{-3}Vc \times ap + 343f^2 + 0,61f \times ap - 0,15ap^2 \quad (IV.10)$$

Le modèle de la rugosité (Rz) est donné par l'équation. (IV.11). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 92,27\%$).

$$Rz = 2,73 + 0,076Vc - 35,61f + 6,04ap - 1,83 \cdot 10^{-4}Vc^2 + 0,008Vc \times f - 0,014Vc \times ap + 251,33f^2 + 4,22f \times ap - 2,81ap^2 \quad (IV.11)$$

Afin d'alléger les modèles, les termes qui n'ont pas un effet significatif sur les réponses sont éliminés et ils sont donnés par les équations (IV.12 à IV.14).

$$Ra = 0,34 + 0,01Vc - 9,5f + 0,19ap - 3,45 \cdot 10^{-5}Vc^2 + 64,29f^2 \quad (IV.12)$$

($R^2 = 95,28\%$)

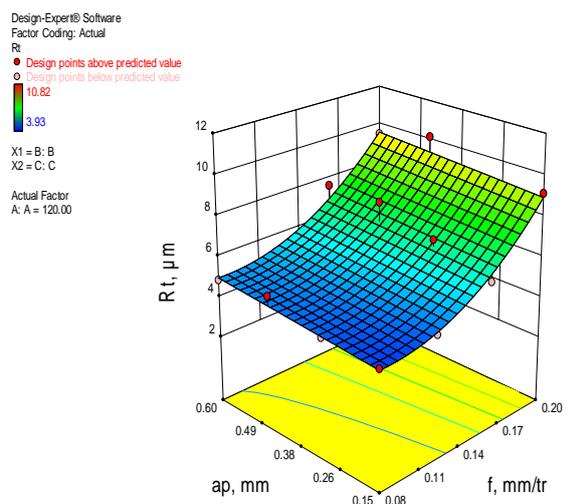
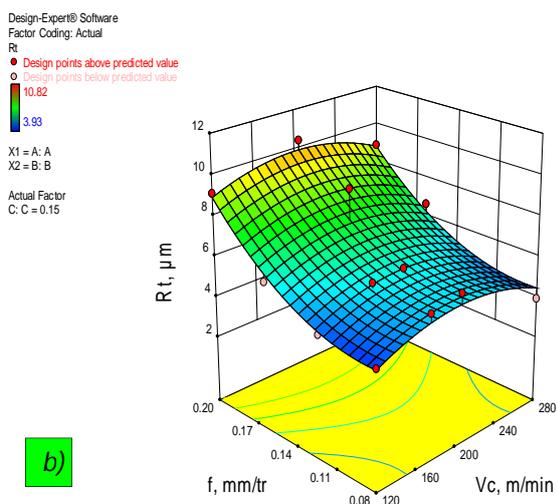
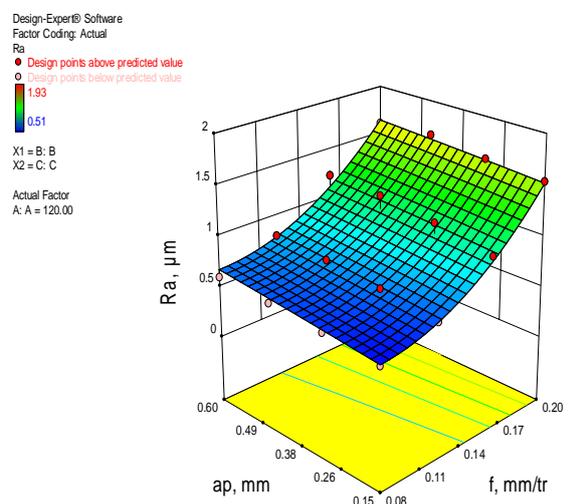
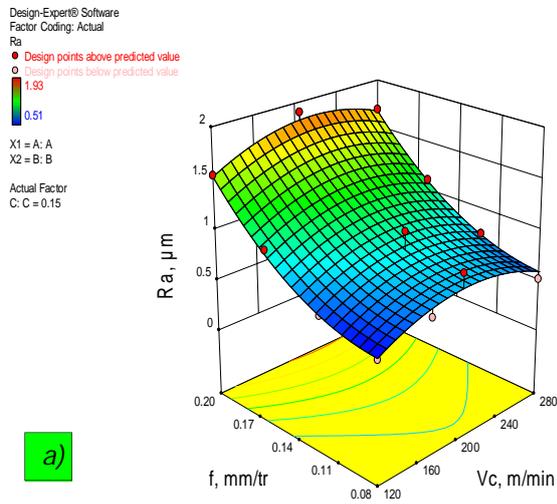
$$Rt = 1,89 + 0,06Vc - 58,69f - 1,63 \cdot 10^{-4}Vc^2 + 343,06f^2 \quad (IV.13)$$

($R^2 = 90,57\%$)

$$Rz = 1,45 + 0,072Vc - 35,45f + 0,61ap - 1,83 \cdot 10^{-4}Vc^2 + 251,33f^2 \quad (IV.14)$$

($R^2 = 91,52\%$)

Pour étudier l'influence des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe) sur les critères de rugosité Ra , Rt et Rz , les surfaces de réponse (3D) sont tracés dans la *figure IV.3 (a, b et c)*. Les résultats d'ANOVA montrent que l'avance par tour (f) est le facteur le plus influent sur l'évolution de la rugosité de surface. À partir du tracé des interactions (*figure IV.3*), on peut observer que, les rugosités de surface (Ra , Rt et Rz) augmentent rapidement avec l'augmentation de l'avance par tour. Cependant, la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont une faible influence sur les trois critères de rugosité de la surface. Il convient de noter que la rugosité de surface minimale est survenue pour la combinaison des trois valeurs faibles des paramètres (f , ap et Vc).



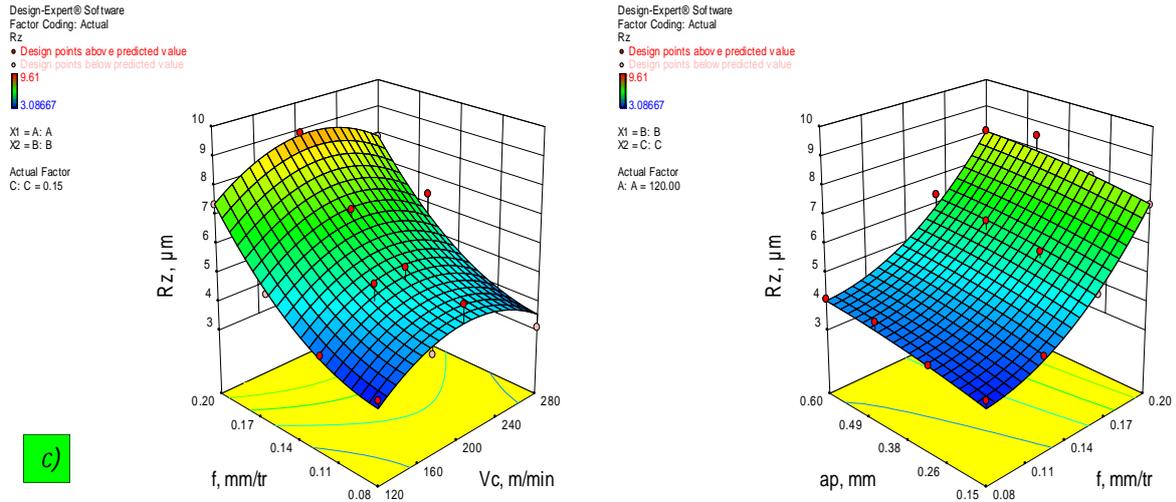


Figure IV.3. Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité de surface : (a) Ra ; (b) Rt et (c) Rz .

IV.3.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La figure IV.4 montre la comparaison entre les valeurs prédites et mesurées des critères de rugosité de surface Ra , Rt et Rz . Les valeurs prédites des critères de rugosité de surface sont plus proches de ceux enregistrés expérimentalement. Par conséquent, les modèles quadratiques obtenus par l'analyse de régression peuvent être utilisés pour prévoir les valeurs de rugosité de surface pour toute combinaison de la vitesse de coupe (Vc), la vitesse d'avance (f), et la profondeur de coupe (ap) dans la plage de l'expérimentation effectuée.

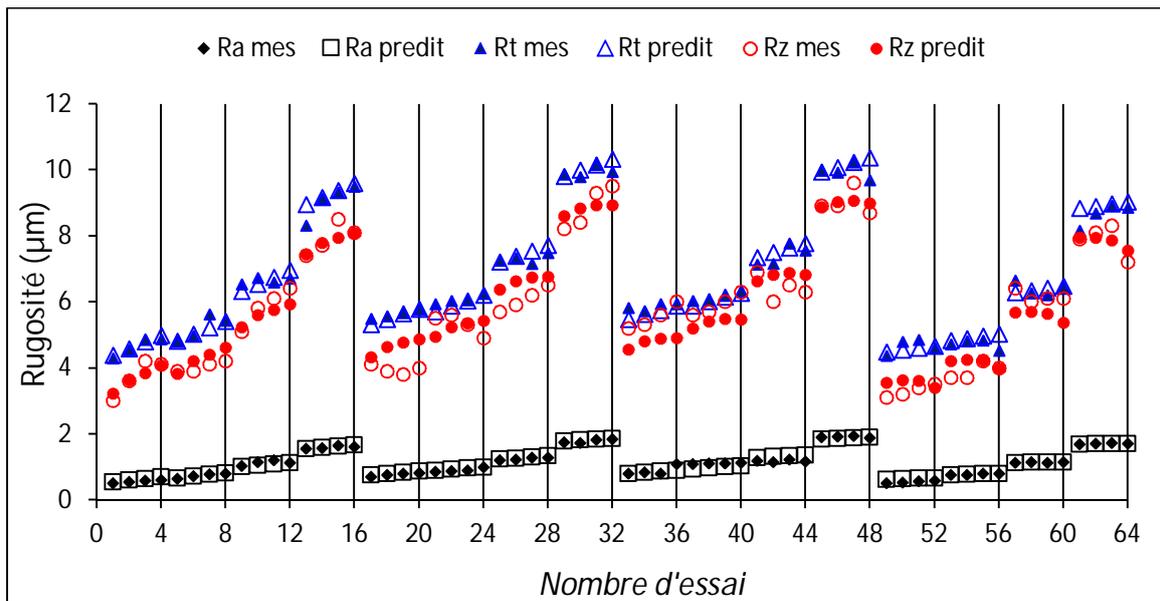


Figure IV.4. Comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour Ra , Rt et Rz .

La vérification des modèles a été effectuée en utilisant une analyse résiduelle. Les résultats sont présentés dans les figures IV.5 et IV.6. Sur les figures, les points en couleur indiquent la valeur de la rugosité de surface. Les courbes de la probabilité normale de Ra (a), Rt (b), et Rz (c) sont présentée dans la figure IV.5. Il est clair que les résidus se trouvent très proche par rapport à la ligne droite de la normalité, ce qui implique que les erreurs sont distribuées normalement. La figure IV.6 montre les résidus par rapport aux soixante-quatre (64) essais expérimentaux de Ra (a), Rt (b), et Rz (c). Les résidus ne présentent pas de tendance évidente et sont distribués dans les directions positives et négatives. Cela implique que la normalité semble être acceptable en plus de cela les coefficients de corrélation assez élevés.

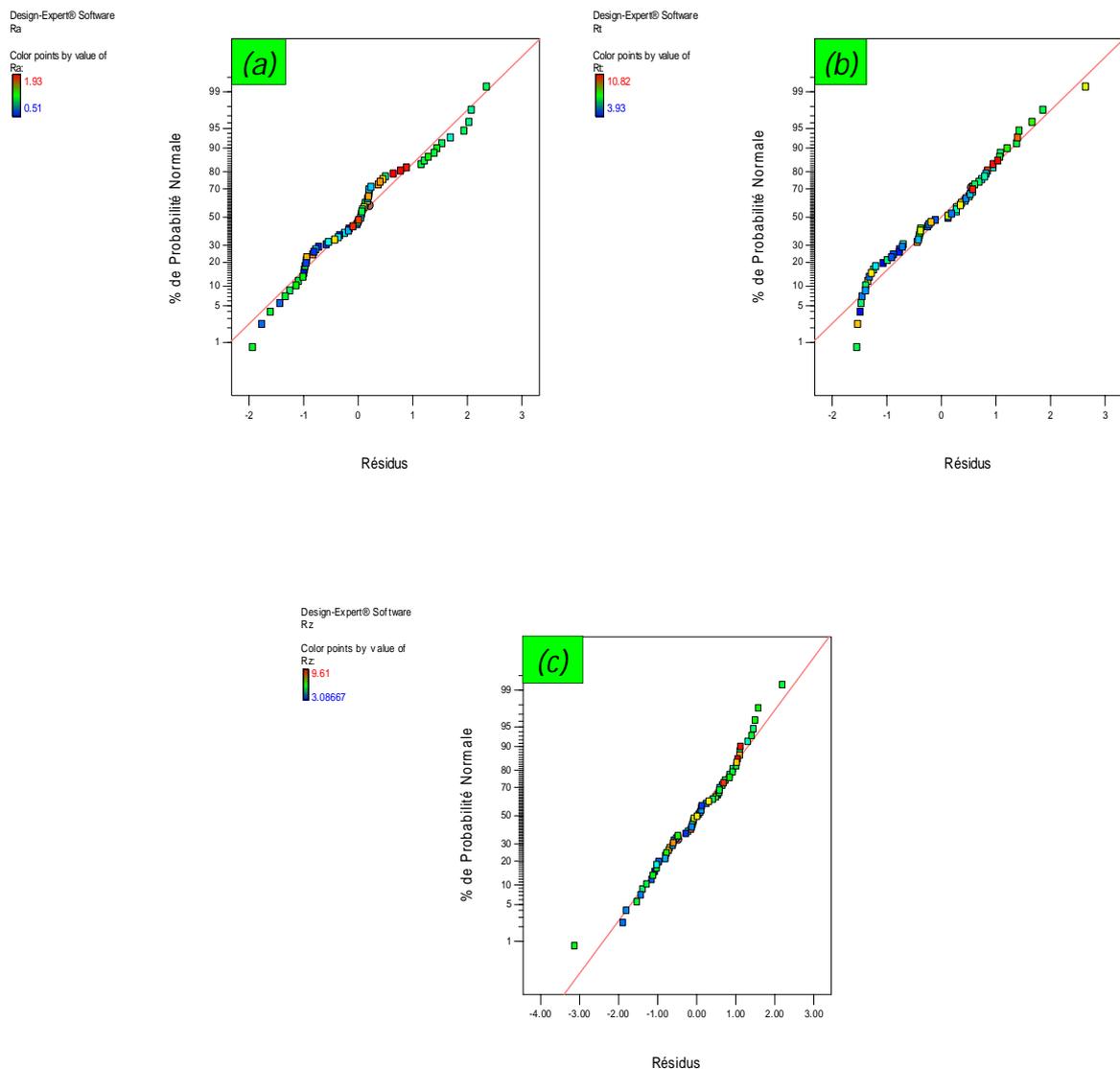


Figure IV.5. Probabilités normales des résidus pour (a) Ra ; (b) Rt et (c) Rz .

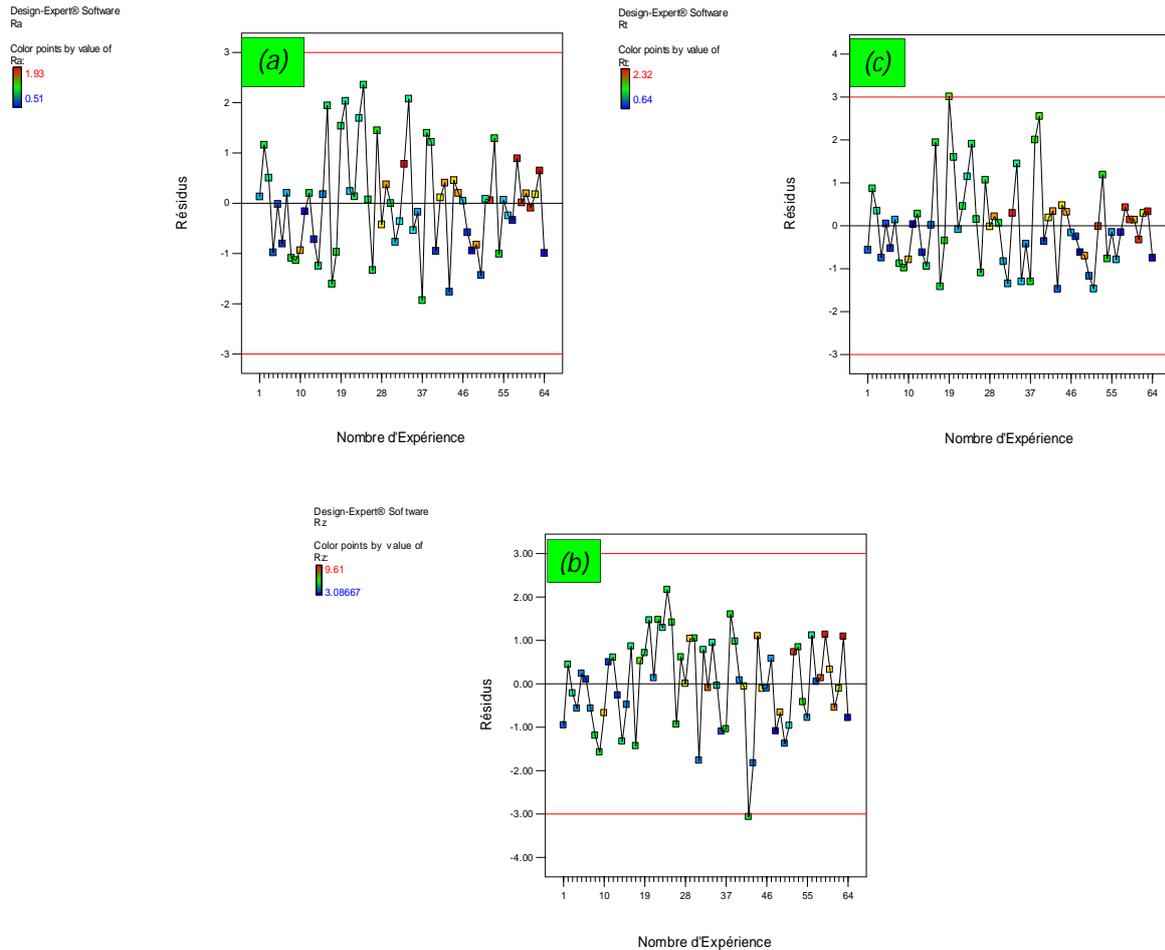


Figure IV.6. Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour : (a) R_z , (b) R_t et (c) R_z .

IV.4. Modélisation des efforts de coupe en fonction de V_c , f et ap

Le tableau IV.5 présente les résultats expérimentaux correspondants aux trois efforts de coupe F_x , F_y et F_z , lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13 par un carbure métallique avec un revêtement CVD (GC2015).

Tableau IV.5. Résultats expérimentaux des efforts de coupe

Essais $N^\circ=$	Facteurs			Réponses		
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	120	0,08	0,15	19,62	57,76	48,26
2	120	0,08	0,3	32,45	60,71	85,05
3	120	0,08	0,45	62,91	89,49	117,60
4	120	0,08	0,6	84,96	103,02	138,79
5	120	0,12	0,15	17,05	64,57	60,95
6	120	0,12	0,3	47,90	96,52	104,02

7	120	0,12	0,45	89,26	136,49	168,04
8	120	0,12	0,6	121,33	144,15	203,31
9	120	0,16	0,15	25,35	79,14	70,83
10	120	0,16	0,3	41,91	107,76	123,86
11	120	0,16	0,45	87,35	141,11	201,79
12	120	0,16	0,6	124,75	153,92	259,04
13	120	0,2	0,15	23,80	78,02	85,61
14	120	0,2	0,3	61,60	136,25	170,22
15	120	0,2	0,45	93,32	153,15	224,46
16	120	0,2	0,6	120,57	163,20	294,17
17	170	0,08	0,15	20,33	47,32	42,90
18	170	0,08	0,3	44,28	74,51	80,13
19	170	0,08	0,45	62,35	96,95	112,84
20	170	0,08	0,6	87,93	110,09	145,64
21	170	0,12	0,15	18,99	64,13	53,03
22	170	0,12	0,3	55,20	103,64	104,75
23	170	0,12	0,45	83,24	126,96	154,74
24	170	0,12	0,6	106,81	145,77	199,46
25	170	0,16	0,15	21,42	77,44	68,01
26	170	0,16	0,3	47,85	104,93	134,98
27	170	0,16	0,45	88,98	150,39	189,97
28	170	0,16	0,6	119,51	156,78	252,71
29	170	0,2	0,15	25,52	75,97	85,35
30	170	0,2	0,3	58,61	125,56	160,32
31	170	0,2	0,45	110,33	166,44	228,00
32	170	0,2	0,6	134,44	179,16	298,10
33	200	0,08	0,15	21,32	48,46	40,94
34	200	0,08	0,3	45,13	73,49	77,32
35	200	0,08	0,45	54,88	94,51	99,49
36	200	0,08	0,6	90,66	99,72	135,20
37	200	0,12	0,15	23,95	64,47	56,82
38	200	0,12	0,3	59,07	96,92	110,77
39	200	0,12	0,45	81,74	117,79	143,18
40	200	0,12	0,6	96,10	128,74	181,21
41	200	0,16	0,15	24,55	71,95	81,97
42	200	0,16	0,3	58,37	109,42	135,85
43	200	0,16	0,45	87,19	150,04	203,12
44	200	0,16	0,6	117,86	160,58	256,28
45	200	0,2	0,15	13,26	69,70	83,21
46	200	0,2	0,3	56,27	121,80	144,60
47	200	0,2	0,45	87,54	158,67	229,89
48	200	0,2	0,6	121,36	164,43	297,97
49	280	0,08	0,15	12,52	49,31	37,00
50	280	0,08	0,3	43,24	73,79	84,16
51	280	0,08	0,45	61,50	91,31	102,47

52	280	0,08	0,6	90,05	101,30	130,30
53	280	0,12	0,15	22,60	65,08	65,38
54	280	0,12	0,3	31,30	102,21	96,49
55	280	0,12	0,45	81,82	107,72	159,05
56	280	0,12	0,6	92,83	113,58	190,57
57	280	0,16	0,15	29,40	79,87	71,39
58	280	0,16	0,3	50,89	111,10	117,97
59	280	0,16	0,45	78,72	133,64	182,37
60	280	0,16	0,6	110,43	154,75	244,12
61	280	0,2	0,15	20,43	87,74	92,00
62	280	0,2	0,3	46,64	116,87	152,01
63	280	0,2	0,45	93,18	146,55	219,70
64	280	0,2	0,6	115,75	166,60	277,67

IV.4.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les efforts de coupe F_x , F_y et F_z

Le *tableau IV.6* expose les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour déterminer l'influence des différents facteurs sur l'effort axial (F_x). La profondeur de passe et le facteur qui influe énormément sur l'effort axial avec une contribution de (86,6%). Suivie par l'avance par tour (4,92%), alors que la vitesse de coupe (0,26%) a été trouvée moins influente sur l'effort axial (F_x). L'interaction de l'avance et celui de la profondeur de passe ($f \times ap$) est la seule interaction qui a un effet significatif et cela pour un intervalle de confiance de 95% ; le produit (f^2) a eu moins de signification où les interactions ($V_c \times f$, et $V_c \times ap$) n'ont pas un effet significatif.

Tableau IV.6. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial F_x

Source	dl	SC	MC	F	P	Cont, %	Remarques
Régression	9	75504,74	8389,42	195,51	0,0001	97,02	signifiant
V_c	1	209,27	209,27	4,88	0,0315	0,268	signifiant
f	1	3829,26	3829,26	89,24	0,0001	4,920	signifiant
ap	1	67398,98	67398,98	1570,73	0,0001	86,60	signifiant
$V_c \times f$	1	40,14	40,14	0,94	0,3377	0,051	non
$V_c \times ap$	1	132,19	132,19	3,08	0,0849	0,169	non
$f \times ap$	1	1464,04	1464,04	34,12	0,0001	1,881	signifiant
V_c^2	1	74,37	74,37	1,73	0,1936	0,095	non
f^2	1	251,90	251,90	5,87	0,0188	0,323	signifiant
ap^2	1	1,43	1,43	0,033	0,8558	0,001	non
Erreur	54	2317,11	42,91				
Totale	63	77821,85					

Le *tableau IV.7* présente les résultats d'analyse de la variance pour l'effort radial (F_y). L'analyse des résultats montre que la profondeur de coupe a une influence statistiquement

significative avec une contribution de (58,5%). La contribution de l'avance par tour est de (29,57%). Les interactions ($Vc \times ap$, $f \times ap$) et les produits (f^2 , ap^2) sont jugés moins importants, tandis que ceux de la vitesse de coupe et ($Vc \times f$) sont insignifiants.

Tableau IV.7. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort radial F_y

Source	dl	SC	MC	F	P	Cont, %	Remarques
Régression	9	77599,79	8622,20	177,84	0,0001	96,73	signifiant
Vc	1	191,89	191,89	3,96	0,0517	0,239	non
f	1	23723,78	23723,78	489,32	0,0001	29,57	signifiant
ap	1	46934,09	46934,09	968,05	0,0001	58,50	signifiant
Vc×f	1	0,19	0,19	3,817E-3	0,9510	0,0002	non
Vc×ap	1	199,69	199,69	4,12	0,0473	0,248	signifiant
f×ap	1	1687,26	1687,26	34,80	0,0001	2,103	signifiant
Vc ²	1	32,90	32,90	0,68	0,4137	0,041	non
f ²	1	897,83	897,83	18,52	0,0001	1,119	signifiant
ap ²	1	1913,73	1913,73	39,47	0,0001	2,385	signifiant
Erreur	54	2618,08	48,48				
Totale	63	80217,88					

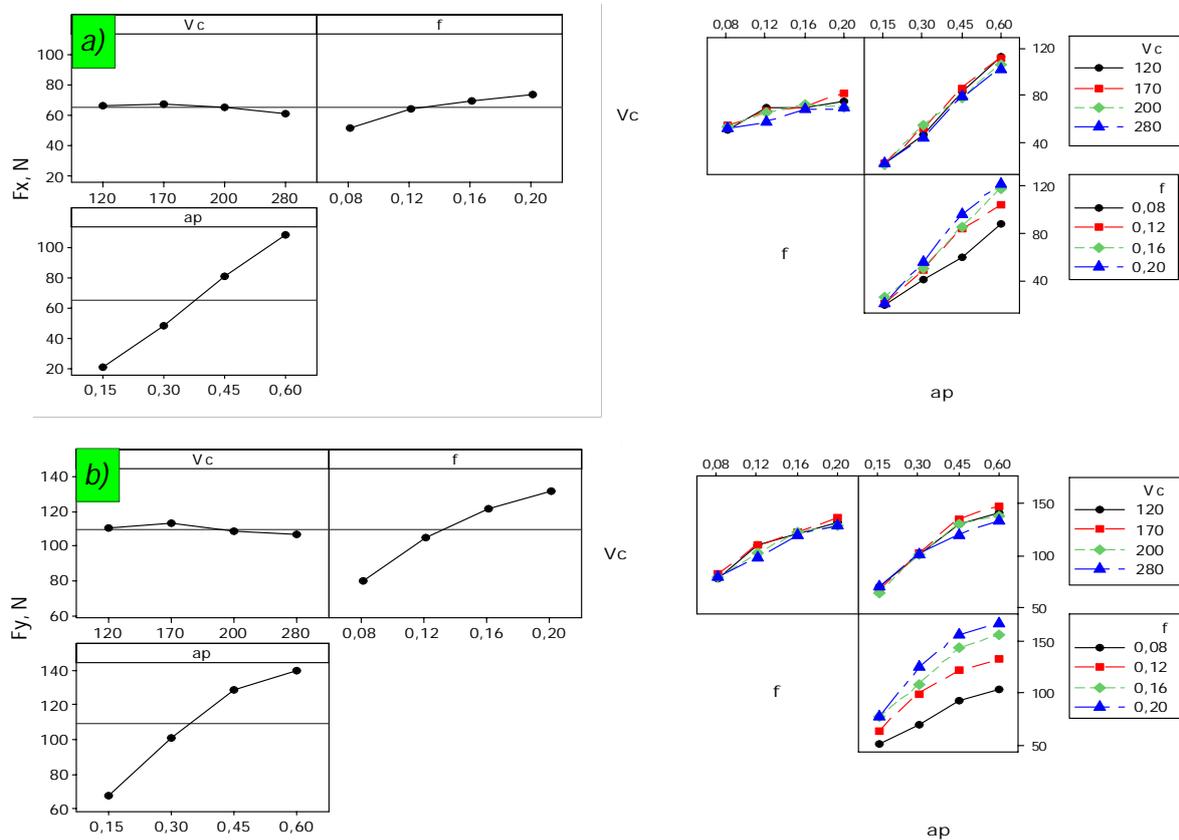
Lorsque l'on considère l'effort tangentiel (F_z), les résultats du (tableau IV.8) indiquent que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important affectant l'effort tangentiel (F_z). Sa contribution est de (65,2%). Le second facteur qui a une influence sur l'effort tangentiel (F_z) est l'avance par tour (24,6%). D'un autre côté ; l'interaction ($f \times ap$) est moins importante alors que les interactions impliquant la vitesse de coupe (c-à-d. $Vc \times f$ et $Vc \times ap$) et les produits (Vc^2 , f^2 , ap^2) ne sont pas significatifs, leurs contributions sont (0,009 ; 0,062 ; 0,039 ; 0,231 et 0,001) % respectivement.

Tableau IV.8. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel F_z

Source	dl	SC	MC	F	P	Cont, %	Remarques
Régression	9	3,005E+5	33391,67	185,12	0,0001	96,80	signifiant
Vc	1	439,21	439,21	2,43	0,1245	0,142	non
f	1	76295,73	76295,73	422,99	0,0001	24,60	signifiant
ap	1	2,024E+5	2,024E+5	1122,21	0,0001	65,20	signifiant
Vc×f	1	29,61	29,61	0,16	0,6870	0,009	non
Vc×ap	1	194,88	194,88	1,08	0,3032	0,062	non
f×ap	1	14445,52	14445,52	80,09	0,0001	4,660	signifiant
Vc ²	1	121,87	121,87	0,68	0,4147	0,039	non
f ²	1	716,50	716,50	3,97	0,0513	0,231	non
ap ²	1	5,32	5,32	0,030	0,8642	0,001	non
Erreur	54	9740,21	180,37				
Totale	63	3,103E+5					

On observe que chaque hausse des composantes des efforts de coupe est le résultat de l'augmentation de la profondeur de passe (ap) et/ou l'avance par tour (f). Ceci est en bon accord avec [52] lors du tournage de l'acier AISI H11. Quand on augmente l'avance par tour (f), la section du copeau cisailé augmente aussi, par conséquent, la force nécessaire pour l'enlèvement de matière augmente. En outre, l'augmentation de la profondeur de passe conduit à un copeau métallique très épais (c-à-d. plus grand volume de matière déformé) qui nécessite de plus grandes forces de coupe. Il est à noter que lors de l'augmentation de la profondeur de passe (ap), la coupe se fait à l'extérieur de la limite de rayon de bec de l'outil et la pièce exerce une résistance à la pénétration de l'outil dans les deux directions axiales et tangentielles. Cette situation implique que la longueur de contact entre l'outil et la pièce est devenue suffisamment élevée et l'outil ne coupe plus avec son rayon de bec comme il se doit.

Les graphiques des effets principaux et des interactions sont représentés dans la figure IV.7 (a, b et c). On peut conclure que la profondeur de passe (ap) affecte fortement les composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z), suivie par la vitesse d'avance (f). Comme prévu, la profondeur de passe (ap) a un effet très important alors que la vitesse de coupe a un faible effet sur les composantes des efforts de coupe. L'interaction ($f \times ap$) a un effet significative sur les trois efforts de coupe, d'autre part les interactions ($V_c \times f$ et $V_c \times ap$) n'ont pas d'effet significatif.



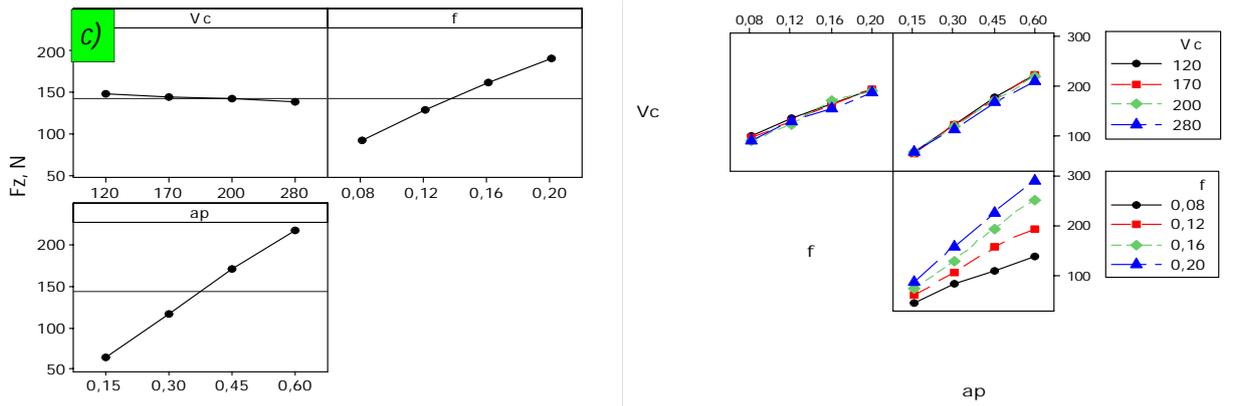


Figure IV.7. Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) F_x ; (b) F_y et (c) F_z

IV.4.2. Analyse de régression : F_x , F_y et F_z en fonction de V_c , f et ap

L'analyse de régression de F_x en fonction de V_c , f et ap donne l'équation du modèle complet (IV.15) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 97,02\%$).

$$F_x = 48,50 + 0,21V_c + 343,46f + 14034,34ap - 0,30V_c \times f - 0,14V_c \times ap + 637,71f \times ap - 3,62 \cdot 10^4 V_c^2 - 1239,94f^2 - 6,64ap^2 \quad (IV.15)$$

Le modèle de l'effort radial (F_y) est donnée par l'équation (IV.16) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 96,74\%$).

$$F_y = 62,23 + 0,13V_c + 836,96f + 285,54ap - 0,02V_c \times f - 0,18V_c \times ap - 684,60f \times ap - 2,41 \cdot 10^4 V_c^2 - 2340,91f^2 - 243,03ap^2 \quad (IV.16)$$

Le modèle de l'effort tangentielle (F_z) est donnée par l'équation (IV.17) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 99,21\%$).

$$F_z = -18,06 - 6,22 \cdot 10^3 V_c + 368,45f + 123,64ap - 0,01V_c \times f - 0,20V_c \times ap - 2115,72f \times ap + 8,24 \cdot 10^5 V_c^2 - 1211,81f^2 - 49,71ap^2 \quad (IV.17)$$

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, les modèles réduits des efforts de coupe en fonction de V_c , f et ap sont écrit par les équations (IV.18 à IV.20).

$$F_x = -15,22 - 0,03V_c + 284,73f + 106,94ap + 637,71f \times ap - 1239,94f^2 \quad (IV.18)$$

($R^2 = 96,7\%$).

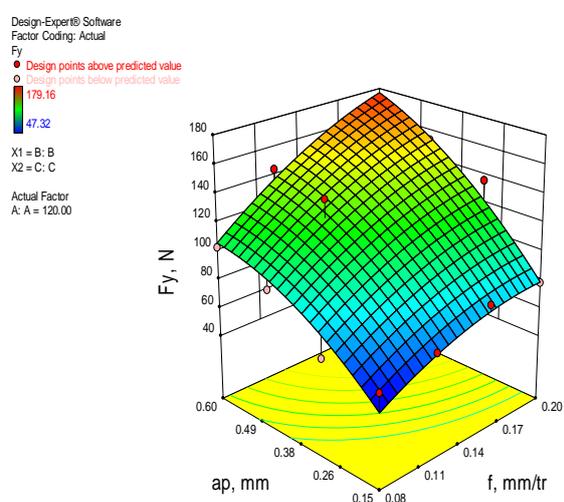
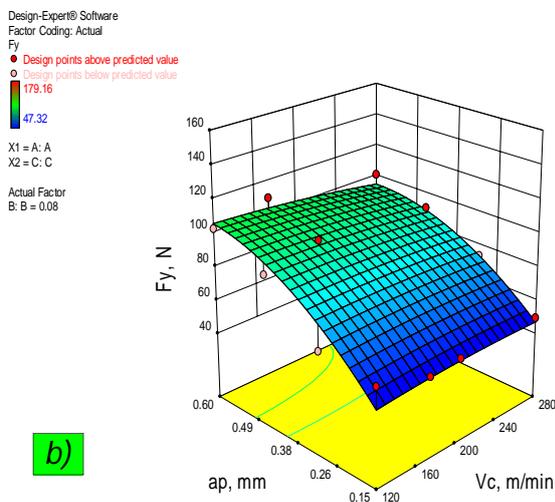
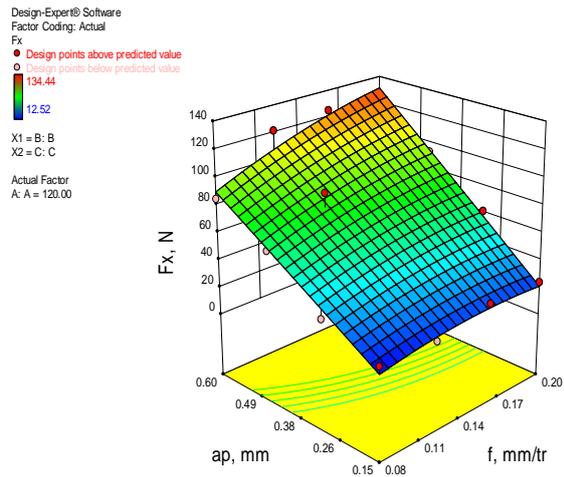
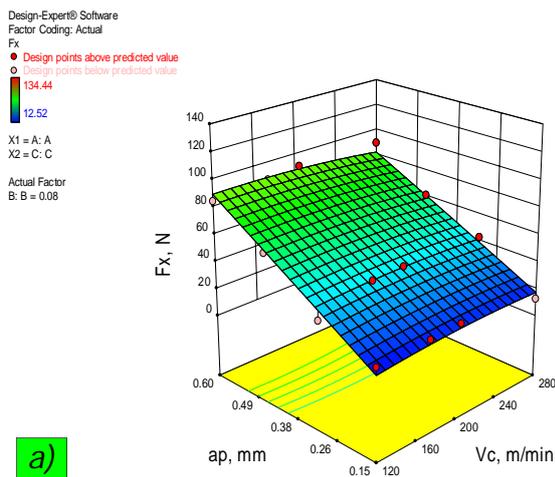
$$F_y = -52,6 + 0,03V_c + 832,97f + 285,54ap - 0,18V_c \times ap + 684,6f \times ap - 2340,91f^2 - 243,03ap^2 \quad (IV.19)$$

($R^2 = 96\%$).

$$F_z = 21 - 0,05V_c + 25,31f + 47,1ap + 2115f \times ap \quad (IV.20)$$

($R^2 = 99,02\%$).

Les surfaces de réponses 3D (figure IV.8 a, b et c) montre la variation des efforts de coupe avec la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap). Comme observé sur la figure, la vitesse de coupe a un effet négligeable sur les trois composantes de l'effort de coupe, des résultats similaires ont été rapportés par [58] lors de l'usinage de l'acier AISI 4340, avec un outil en carbure revêtu. Alors que, pour une avance (f) donnée, les composantes de la force de coupe augmentent fortement avec l'augmentation de la profondeur de passe. Pour des avances faibles, les composantes de la force de coupe sont très sensibles à la profondeur de passe et pour toute augmentation de cette dernière ; elle augmente brusquement les composantes de la force de coupe. En conséquence, il est clair que la profondeur de passe est le facteur le plus influent sur les composantes des efforts de coupe. En d'autres termes, la force de coupe peut être minimisée en utilisant des valeurs plus faibles de la vitesse d'avance, la profondeur de passe et la vitesse de coupe, tandis que les valeurs les plus élevées se trouvent à la vitesse d'avance et la profondeur de passe maximale.



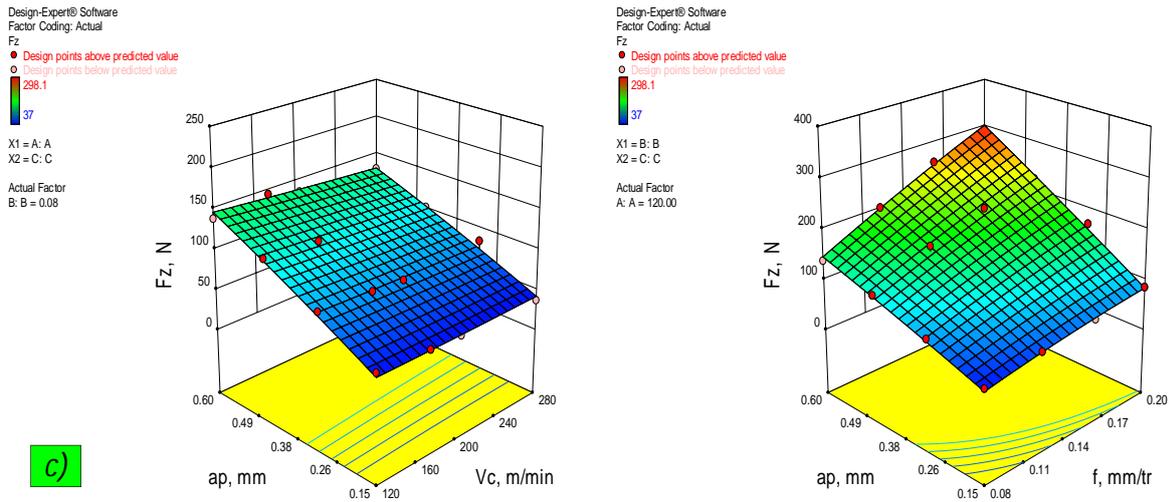


Figure IV.8. Effet des paramètres de régime de coupe sur les efforts de coupe : (a) F_x ; (b) F_y et (c) F_z .

IV.4.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) et celles estimées par les modèles mathématiques (quadratique) obtenus par l'analyse de régression est présentée graphiquement sur la figures IV.9. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

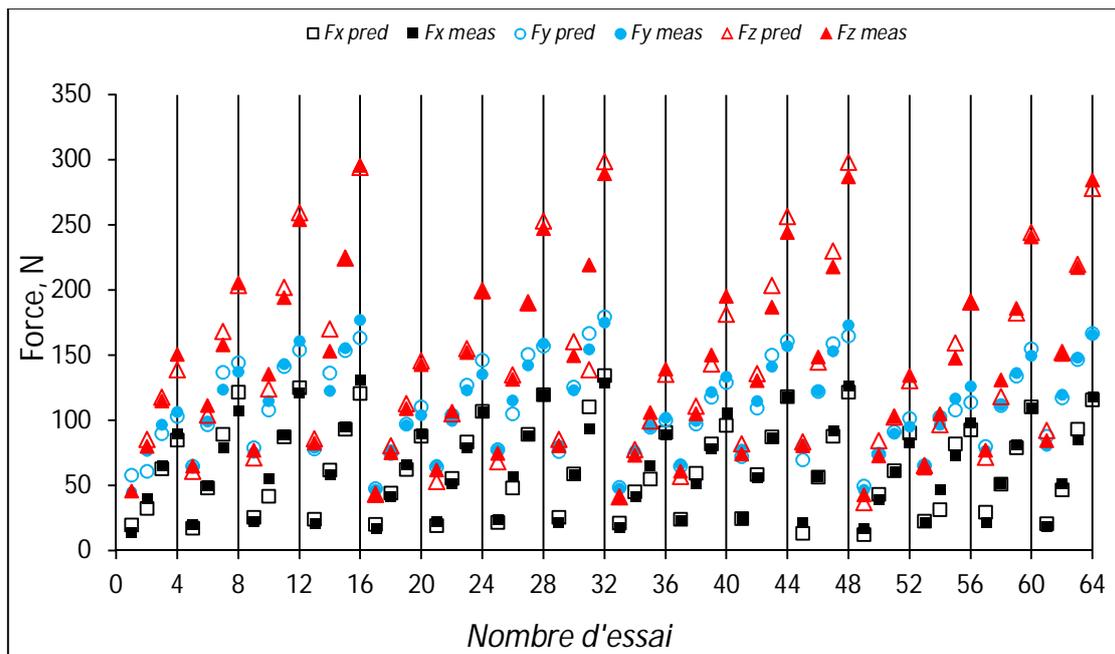


Figure IV.9. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées des efforts de coupe.

L'adéquation des modèles élaborés ont été vérifiées par l'analyse de la variance (ANOVA). Les modèles sont adéquats comme les valeurs de F -calculée (195,51 ; 177,84 ; 185,12 et 126,39) respectivement à F_x , F_y et F_z sont supérieures à la valeur de F -table (intervalle de confiance de 95%). R^2 est un coefficient de détermination multiple, qui mesure la variation de la proportion de l'ensemble des points donnés [77]. Dans la présente étude, les valeurs de R^2 sont très proches de 1, ce qui suggère une qualité raisonnable du modèle qui peut être utilisé pour la prédiction dans les limites des facteurs étudiés. Les modèles ont été vérifiés aussi par l'examen des résidus. Ils représentent la différence entre les réponses observées et prédites. L'analyse des résidus de données est présentée dans les figures IV.10 et IV.11. Les tracés de la probabilité normale de F_x , F_y et F_z , sont représentés dans la figure IV.10 (a, b et c). Les figures ont révélé que les résidus s'alignent sur une droite ce qui implique que les erreurs sont distribuées normalement. La figure IV.11 (a, b et c) montre les résidus en ce qui concerne les 64 essais expérimentaux de F_x , F_y et F_z . Les résidus ne présentent pas de tendance évidente et sont distribués dans les deux directions positives et négatives, ce qui implique que les modèles sont adéquats.

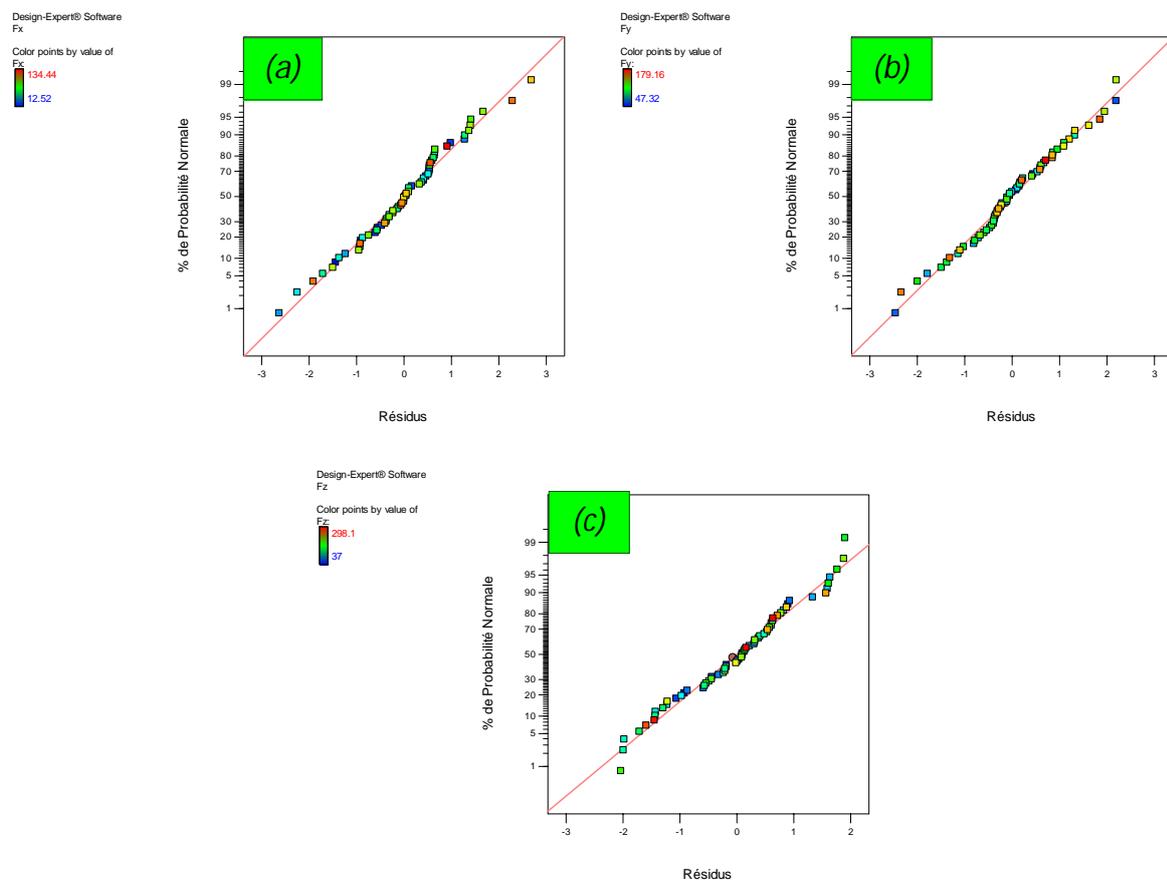


Figure. IV.10. Probabilités normales des résidus pour (a) F_x , (b) F_y et (c) F_z .

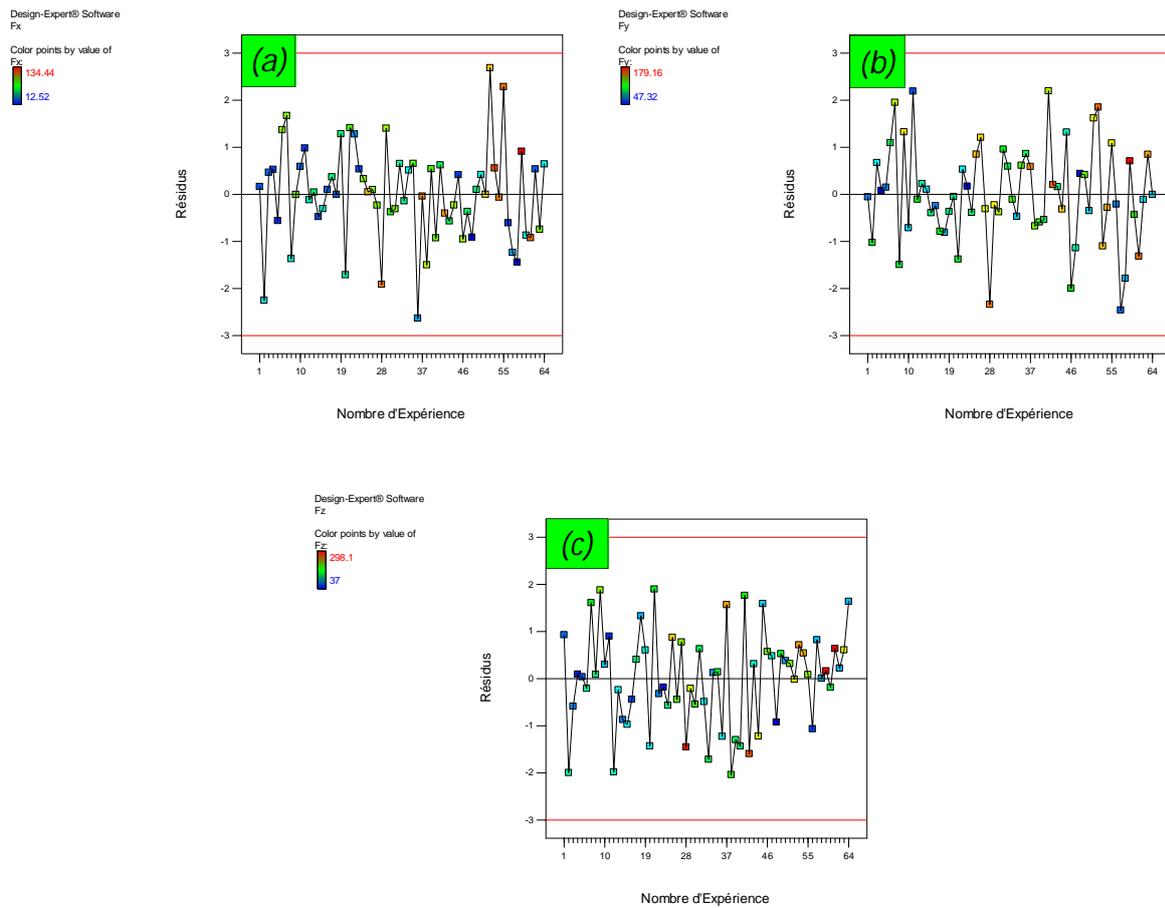


Figure IV.11. Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour : (a) Fx, (b) Fy et (c) Fz.

IV.5. Modélisation de l'usure en dépouille VB et l'usure en entaille VN en fonction de Vc , et t :

Les essais effectués ont permis de modéliser l'usure en dépouille (VB) et en entaille (VN) en fonction de la vitesse de coupe et le temps d'usinage. Les résultats sont présentés numériquement sur le *tableau IV.9*. Les essais sont réalisés sur l'acier inoxydable martensitique $X20Cr13$, avec un outil en carbure métallique avec revêtement CVD (GC2015).

Tableau IV.9. Résultats expérimentaux de l'usure de l'outil

Essai $N^{\circ}=$	Facteurs		Réponses	
	Vc (m/min)	t (min)	VB (mm)	VN (mm)
1	160	4	0,043	0,05
2	160	7	0,06	0,066

3	160	11	0,072	0,092
4	280	4	0,056	0,066
5	280	7	0,083	0,107
6	280	11	0,092	0,11
7	400	4	0,088	0,108
8	400	7	0,12	0,136
9	400	11	0,142	0,153

IV.5.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure VB et VN

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'usure en dépouille (VB) et l'usure en entaille (VN) sont exposés dans les *tableaux IV.10* et *IV.11*. L'analyse est effectuée pour un niveau de signification $\alpha = 0,05$ (c.-à-d. pour un niveau de confiance de 95%).

L'analyse détaillée des valeurs de l'usure en dépouille VB présentées dans le *tableau IV.10*, permet de classer les deux éléments du régime de coupe (Vc , et t) et leurs interactions par ordre d'influence sur l'usure en dépouille VB . La vitesse de coupe vient en première position avec une contribution de 65,48% suivi par le temps d'usinage avec 29,78% et le produit (Vc^2) par 2,78%. L'interaction ($Vc \times t$) et le produit (t^2) ont un effet significatif sur VB avec un impact de 1,92% et 1,74%.

Tableau IV.10. *Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure VB*

Source	dl	SC	MC	F	P	Cont,%	Remarques
Régression	5	0,0079	0,001580	166,766	0,0007	99,64	signifiant
Vc	1	0,0052	0,005190	547,922	0,0002	65,48	signifiant
t	1	0,0024	0,002360	249,187	0,0006	29,78	signifiant
$Vc \times t$	1	0,0002	0,000152	16,075	0,0278	1,92	signifiant
Vc^2	1	0,0002	0,000221	23,280	0,0170	2,78	signifiant
t^2	1	0,0001	0,000138	14,565	0,0317	1,74	signifiant
Erreur	3	0,0000	0,000009				
Totale	8	0,0079					

Le *tableau IV.11* présente l'analyse de variance ANOVA pour l'usure en entaille VN . L'analyse des résultats du *tableau IV.11* montre que la vitesse de coupe (Vc) et le temps d'usinage (t) ont un impact significatif. On enregistre des contributions successivement de (64,75 et 31,16) %. Par contre l'interaction ($Vc \times t$) et les produits (Vc^2 et t^2) n'ont pas un effet significatif puisque la valeur de probabilité (P) est supérieure à 0,05. On note que la vitesse de coupe est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est 64,75%.

Tableau IV.11. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure VN

Source	dl	SC	MC	F	P	Cont,%	Remarques
Régression	5	0,00898	0,00180	27,7359	0.0103	97,88	signifiant
Vc	1	0,00594	0,00594	91,7315	0.0024	64,75	signifiant
t	1	0,00286	0,00286	44,1520	0.0069	31,16	signifiant
Vc×t	1	0,00000	0,00000	0,0153	0.9093	0,01	non
Vc ²	1	0,00008	0,00008	1,3044	0.3363	0,92	non
t ²	1	0,00018	0,00018	2,8373	0.1907	2,00	non
Erreur	3	0,00019	0,00006				
Totale	8	0,00918					

La figure IV.12 (a et b) présente les effets principaux des facteurs considérés (la vitesse de coupe et le temps d'usinage) sur l'usure en dépouille VB et en entaille VN. On remarque que la vitesse de coupe et le temps d'usinage ont une influence significative sur l'usure en dépouille VB et en entaille VN, puisque les pontes des deux facteurs sont élevés.

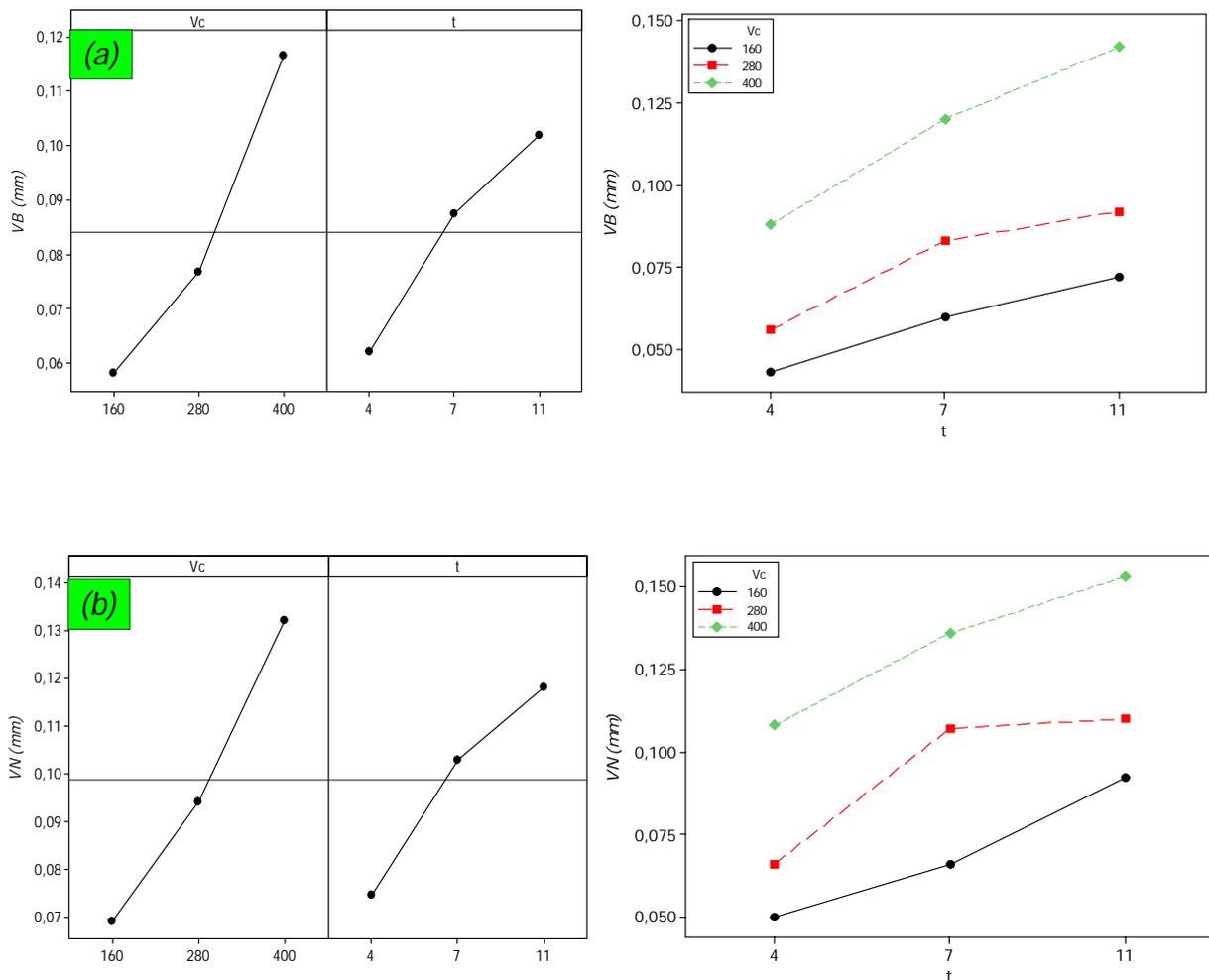


Figure IV.12. Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) VB et (b) VN.

IV.5.3. Analyse de régression : VB et VN en fonction de Vc et t

L'analyse de régression de VB en fonction de Vc et t donne l'équation du modèle complet (IV.21) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 99,64\%$).

$$VB = 0,0212 - 0,000272Vc + 0,011984t + 1,464 \cdot 10^{-5}Vc \times t + 7,2917 \cdot 10^{-7}Vc^2 - 0,000694t^2 \tag{IV.21}$$

L'analyse de régression de VN en fonction de Vc et t donne l'équation du modèle complet (IV.22) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 97,88\%$).

$$VN = -0,02557 + 1,0511 \cdot 10^{-6}Vc + 0,01793t + 1,1824 \cdot 10^{-6}Vc \times t + 4,5139 \cdot 10^{-7}Vc^2 + 0,000801t^2 \tag{IV.22}$$

Dans l'ordre, pour étudier l'influence des paramètres de coupe (la vitesse de coupe et le temps d'usinage) sur l'usure en dépouille (VB) et l'usure en entaille (VN), les surfaces de réponse (3D) sont tracées dans la figure IV.13 (a et b). Les résultats d'ANOVA montrent que l'effet de la vitesse de coupe et le temps d'usinage sur l'usure en dépouille est statistiquement significatif (tableau IV.11). Il est clair que l'augmentation de l'usure en dépouille (VB) et en entaille (VN) est liée avec l'augmentation du temps d'usinage (t) et de la vitesse de coupe (Vc). L'augmentation de la vitesse de coupe conduit généralement à une augmentation de l'usure en dépouille et en entaille, ces phénomènes sont attribués à l'augmentation de frottement du copeau qui mène aux résultats de l'augmentation de la température et de la pression locale sur les arêtes de l'outil [78].

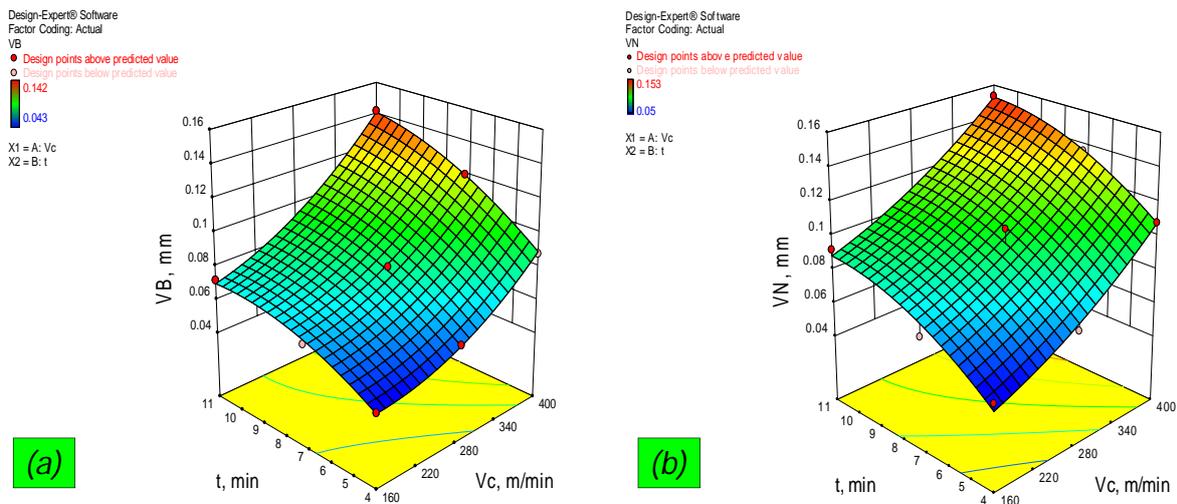


Figure IV.13. Effet des paramètres de régime de coupe sur l'usure de l'outil : (a) VB et (b) VN.

IV.5.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'usure en dépouille (VB) et l'usure en entaille (VC) et celles estimées par les modèles mathématiques (quadratique) obtenus par la régression générale, est présentée graphiquement sur les figures IV.14 et IV.15. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

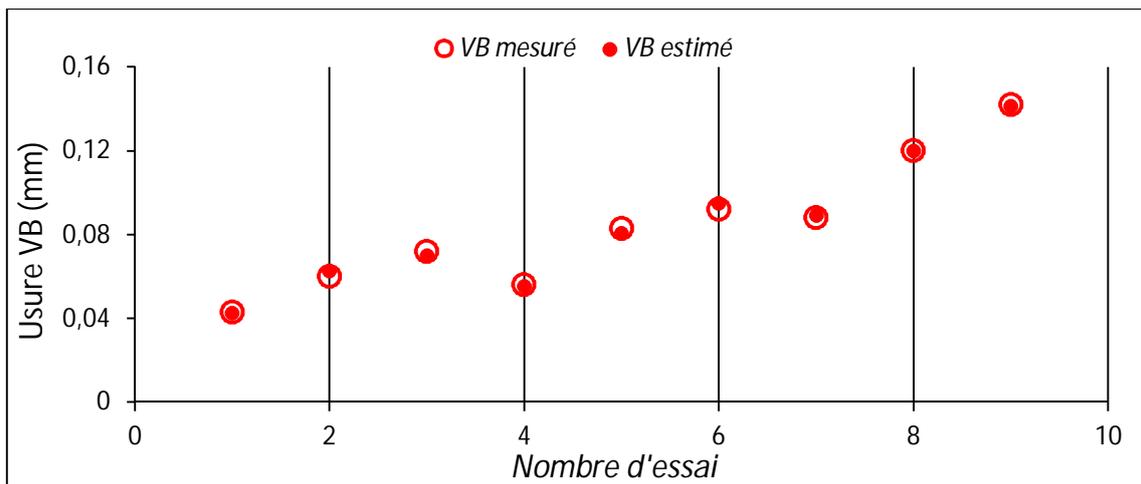


Figure IV.14. Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de l'usure VB

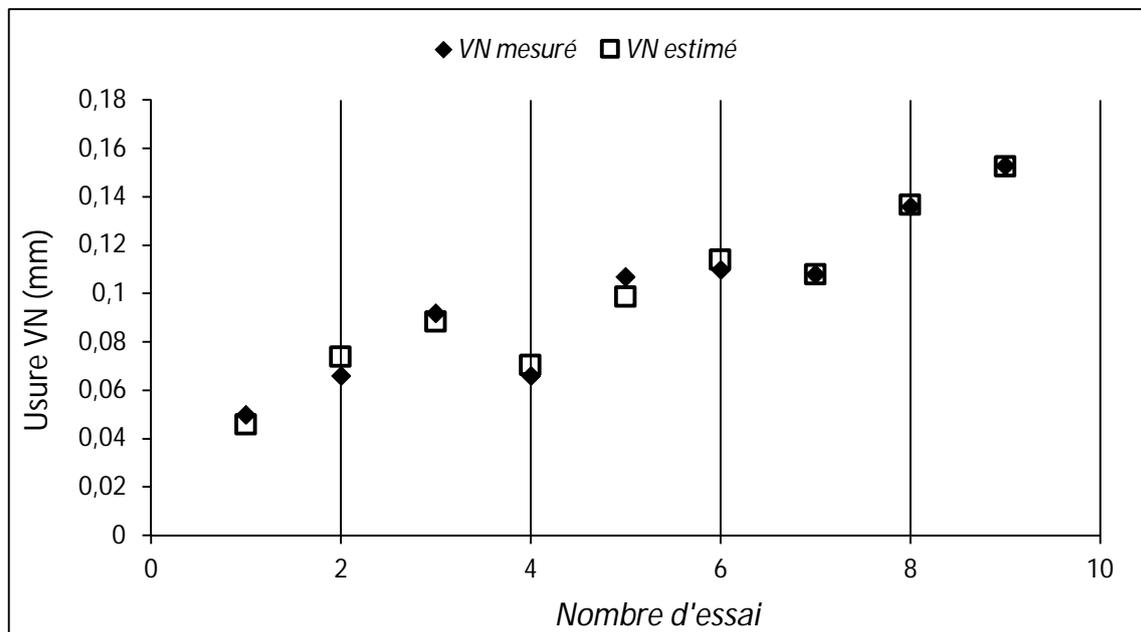


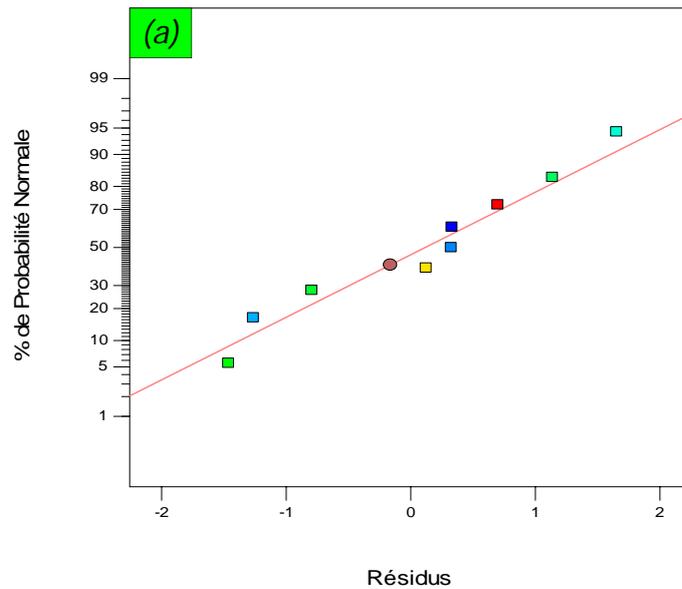
Figure IV.15. Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de l'usure VN.

La validité des modèles élaborés a été vérifiée par l'analyse de la variance (ANOVA). Les modèles sont adéquats comme les valeurs de F -calculée (166,76 ; 27,73) respectivement à VB et VN sont supérieures à la valeur de F -table (intervalle de confiance de 95%). L'analyse

des résidus de données est présentée dans les figures IV.16 et IV.17. Les tracés de la probabilité normale de VB et VN , sont représentés dans la figure IV.16 (a et b). La figure a montré que les résidus suivent une ligne droite ce qui implique que les erreurs sont distribuées normalement. La figure IV.17 (a et b) montre les résidus en ce qui concerne les 9 essais expérimentaux de VB et VN . Les résidus ne présentent pas de tendance évidente et sont distribués dans les deux directions positives et négatives. Cela implique que les modèles sont adéquats.

Design-Expert® Software
VB

Color points by value of
VB:
0.142
0.043



Design-Expert® Software
VN

Color points by value of
VN:
0.153
0.05

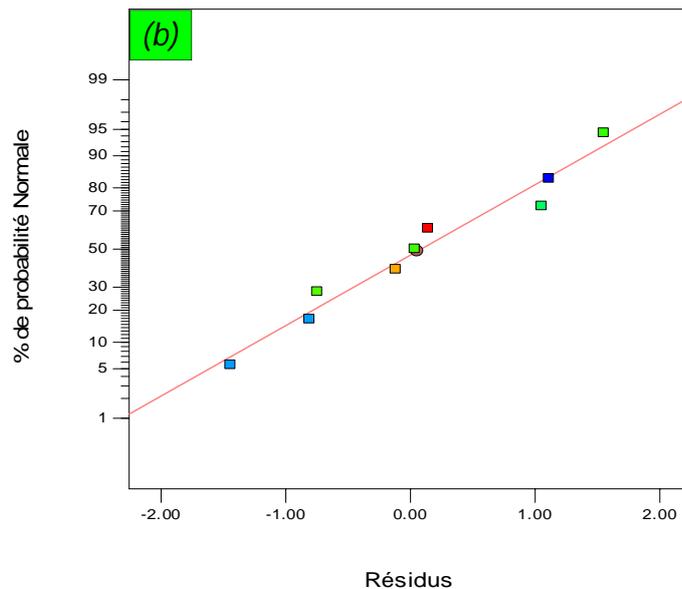
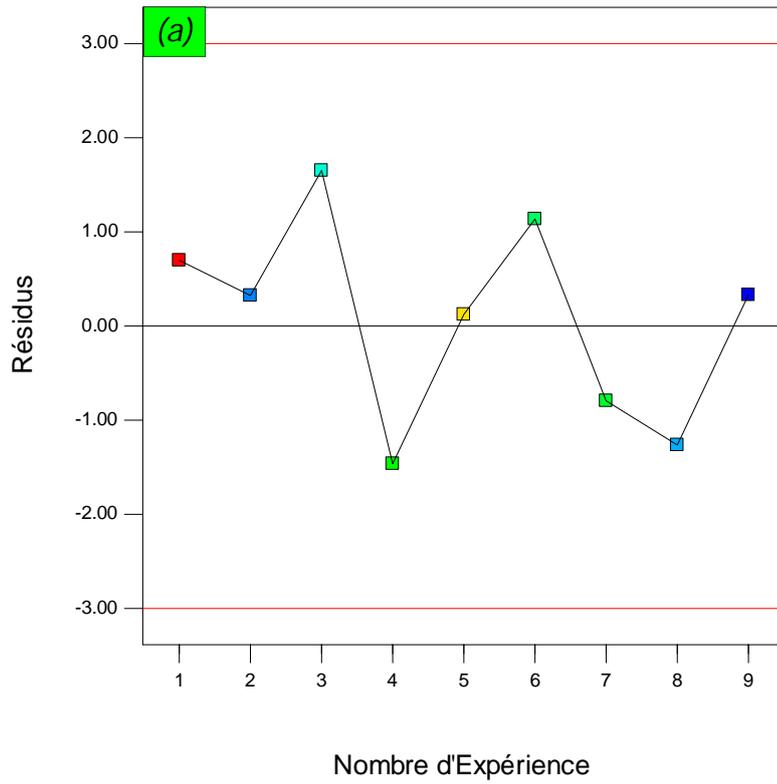


Figure IV.16. Probabilités normales des résidus pour : (a) VB et (b) VN .

Design-Expert® Software
VB

Color points by value of
VB:
0.142
0.043



Design-Expert® Software
VN

Color points by value of
VN:
0.153
0.05

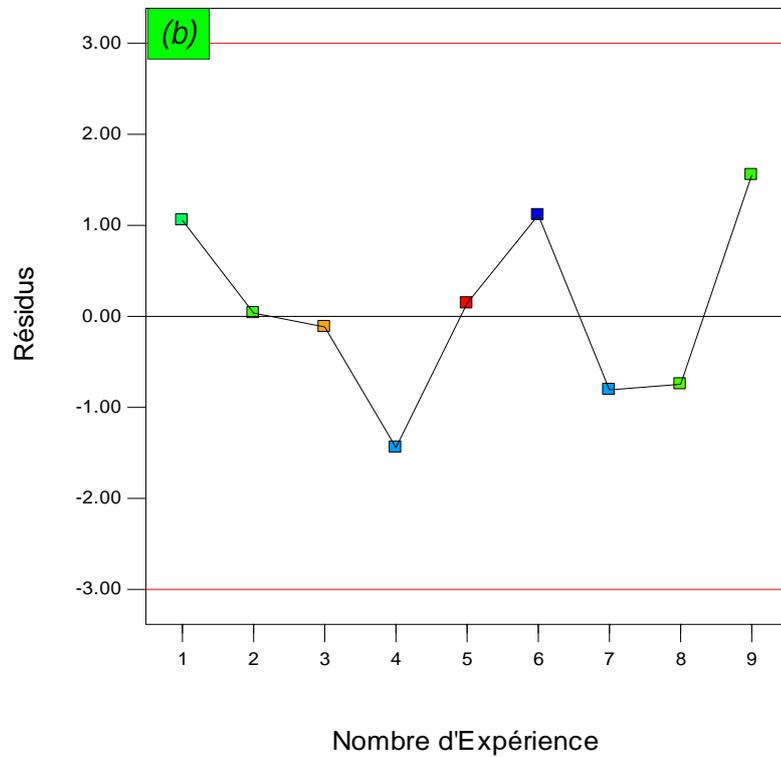


Figure IV.17. Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour : (a) VB, (b) VN.

IV.6. Validation des modèles mathématiques

L'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour la validation des modèles développés pour un intervalle de confiance donné. Le tableau ANOVA se compose de la somme des carrés et des degrés de liberté. Afin d'effectuer une analyse de la variance, la somme des carrés est généralement complétée par des modèles de régression et les erreurs résiduelles. Selon cette technique, si la valeur calculée de F -calculé du modèle est supérieure à la valeur standard du tableau de Fisher (F -table) pour un intervalle de confiance donné, alors le modèle est adéquat dans la limite de la confiance [79, 80, 81].

La validation des modèles mathématiques développés est présentée dans le *tableau IV.12*. La précision du modèle (Δ) est généralement donnée par l'équation suivante (IV.23) :

$$\Delta = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{i,exp} - y_{i,pred}}{y_{i,pred}} \right| \quad (IV.23)$$

Où : $y_{i,exp}$ est la valeur mesurée de la réponse correspondant à l'essai (i) ;

$y_{i,pred}$ est la valeur prédite de la réponse correspondant à l'essai (i) ;

n est le nombre d'essai.

Les équations (IV.12) à (IV.14) et (IV.18) à (IV.22) sont utilisées pour tester la précision des modèles en utilisant les données expérimentales. Les erreurs de prédiction de ces modèles sont illustrées dans le *tableau IV.13* ainsi que les coefficients de détermination. Il est conclu que les corrélations sont valides et peuvent être utilisés pour les prédictions lors du tournage de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13 avec des outils en carbure métallique.

Tableau IV.12 Analyse de la variance ANOVA pour R_a , R_t , R_z , F_x , F_y , F_z , VB et VN

Réponses	SC		D, L		MC		F-test	F-table	P-value
	R	E	R	E	R	E			
R_a	10,69	0,5	9	54	1,18	0,009	126,3	2,06	0,0000
R_z	216,26	20,4	9	54	24,02	0,37	63,58	2,06	0,0000
R_t	188,08	15,76	9	54	20,9	0,29	71,57	2,06	0,0000
F_x	75504	2317,1	9	54	8389	42,91	195,51	2,06	0,0000
F_y	77599	2618	9	54	8622	48,48	177,84	2,06	0,0001
F_z	300500	9740,2	9	54	33391	180,3	185,12	2,06	0,0001
VB	0,0079	0000	5	3	0,001	0,000	166,7	9,01	0,0007
VN	0,0089	0,00019	5	3	0,0018	0,000	27,73	9,01	0,0103

SC : Somme des carrés ; D.L. : degré de liberté ; MC : Moyenne des carrés ;

R : régression ; E : Erreur.

Tableau IV.13 Pourcentages de prédiction des erreurs et les coefficients de corrélations R^2 .

Réponses	% Pourcentages de prédiction des erreurs	R^2 (%) des modèles
Ra	7,38	95,28
Rz	7,26	90,57
Rt	8	91,52
Fx	10	96,7
Fy	7,55	96
Fz	4,77	99,02
VB	0,27	99,64
VN	0,66	97,88

IV.7. Modélisation par la méthode des réseaux de neurone artificiels RNA

IV.7.1. Introduction

Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspiré du fonctionnement de vrais neurones (humains ou animal). Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type statistique, si bien qu'ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes permettant de générer de vastes espaces fonctionnels souples et partiellement structurés, et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle qu'ils enrichissent en permettant de prendre des décisions s'appuyant davantage sur la perception que sur le raisonnement logique formel [82].

IV.7.2. Les composants d'un RNA

Un réseau de neurones artificiels est composé d'un ensemble des neurones. Un neurone artificiel est une unité de calcul qui reçoit un certain nombre d'entrées en provenance directe de l'environnement ou de neurones amont. Lorsque l'information est issue d'un neurone, on lui associe un poids W (abréviation de weight, poids en anglais) qui représente la capacité du neurone amont à exciter ou inhiber le neurone aval. Chaque neurone est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. Ils sont arrangés par couche et sont connectés avec ceux de la couche suivante. Pour résumer, chaque neurone calcule une sortie unique en se basant sur les informations qui lui sont données. La *figure IV.18* montre la composition d'un neurone artificiel.

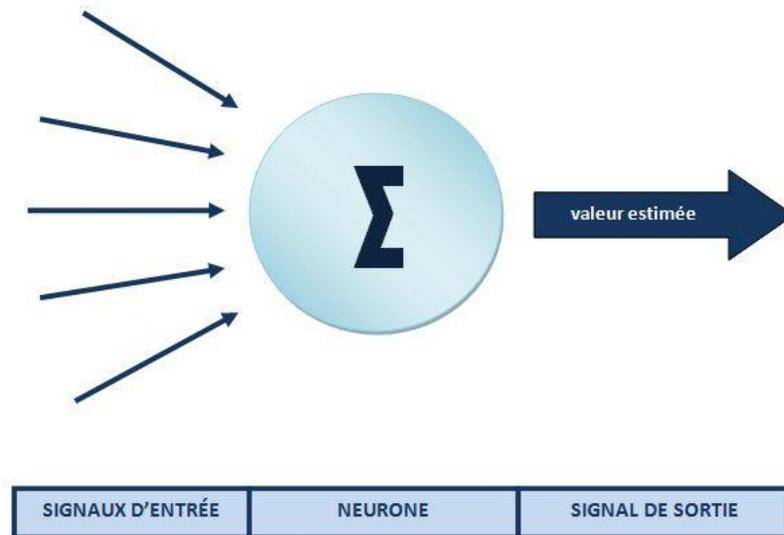


Figure IV.18. Composition d'un neurone artificiel.

Un neurone artificiel est donc composé de (figure IV.19) :

- Un ensemble de **valeurs d'entrée** $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ discrètes $\{0, 1\}$ ou réelles $[-1, 1]$.
- Un ensemble de **poids** réels $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ entre les neurones.
- Une fonction de sommation Σ qui calcule la **somme pondérée** (sous-entendu pondérée par les poids) des entrées :

$$(X_1 \times W_1) + (X_2 \times W_2) + \dots + (X_n \times W_n) \quad (\text{IV.24})$$

- Un biais b associé au neurone.
- Une **fonction d'activation** f qui calcule l'activité / l'état du neurone à partir de cette somme : $f(x)$
- et enfin une sortie Y .

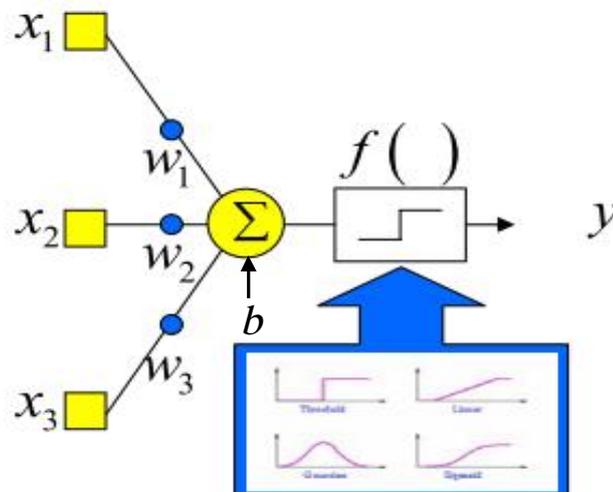


Figure IV.19. Arrangement logique d'un neurone [83].

Pour le neurone de la *figure IV.19*, nous avons :

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_R]^T \text{ et } \mathbf{W} = [w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}]$$

$$w_{1,1} x_1 + w_{1,2} x_2 + \dots + w_{1,j} x_R + b = \mathbf{Wx} + \mathbf{b}$$

La sortie Y est alors de la forme :

$$Y = f(\mathbf{Wx} + \mathbf{b}) \quad (\text{IV.25})$$

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

- **1^{ère} phase** : Le neurone fait le calcul de la somme pondérée des entrées (en fonction de la force des connexions). L'apprentissage ayant été réalisé auparavant, le poids des connexions est ici déjà déterminé et fixe.
- **2^{ème} phase** : À partir de la valeur obtenue, une fonction d'activation ou de transfert va calculer la valeur de l'état du neurone. Le neurone compare la somme pondérée des entrées à une valeur de seuil et fournit alors une réponse en sortie.

Une couche de neurones peut être représentée par le schéma et la relation de la *figure IV.20* ci-dessous :

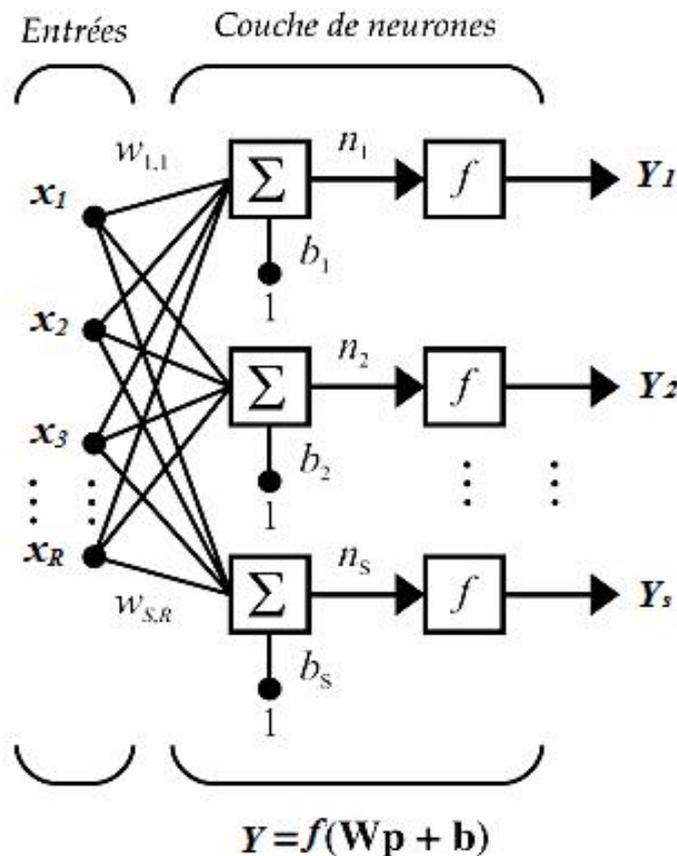


Figure IV.20. Schéma d'une couche de neurones [33].

Les fonctions de transfert (fonction d'activation) déterminent la valeur de l'état du neurone qui sera transmise aux neurones avants. Il existe de nombreuses fonctions de transfert possibles [28], les plus utilisées sont présentées sur la figure IV.21. Elles peuvent prendre une infinité de valeurs comprises dans l'intervalle $[-1 ; +1]$.

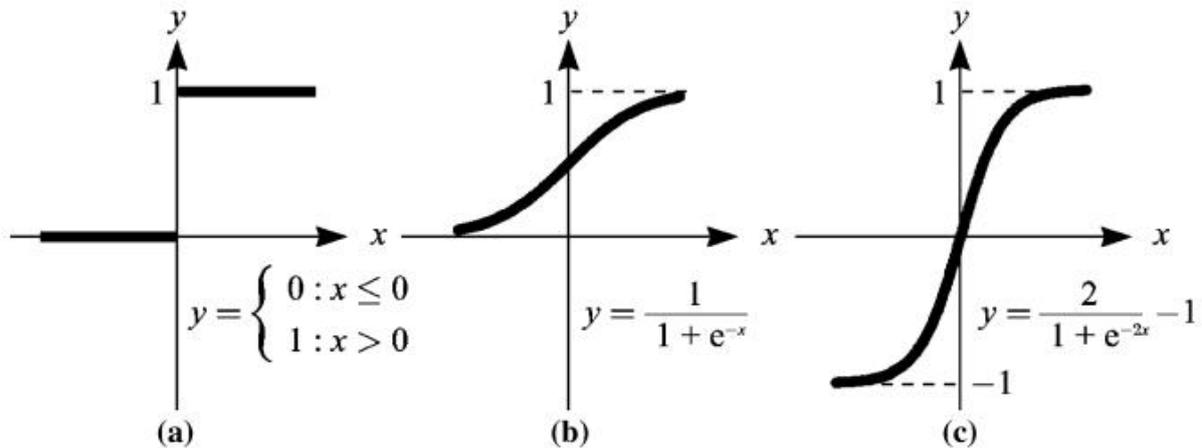


Figure IV.21. Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones (a) : fonction seuil, (b) tangente sigmoïde, (c) tangente hyperbolique [28].

IV.7.3. L'apprentissage

L'apprentissage est la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux, elle est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées durant l'apprentissage sont les poids des connexions \mathbf{W}_i . C'est cette modification qui permet d'accorder la réponse du réseau aux exemples qu'on lui soumet (par exemple reconnaître une croix). Il adapte la force de ses connexions soit en comparant le résultat qu'il a calculé et la réponse qu'on attend de lui (**apprentissage supervisé**), soit en détectant les régularités statistiques des entrées (**apprentissage non-supervisé**). A l'issue de l'apprentissage, les poids sont fixés : c'est alors la phase d'utilisation (le réseau sait reconnaître une croix même si elle est bruitée ou détériorée). La méthode la plus utilisée lors de l'apprentissage est la *rétropropagation* : on entre des valeurs dans les cellules d'entrée et en fonction de l'erreur obtenue en sortie (le *delta*), on corrige les poids accordés aux pondérations. C'est un cycle qui est répété jusqu'à ce que la courbe d'erreurs du réseau ne soit croissante.

IV.7.4. Le perceptron

Un réseau de neurones monocouche, aussi appelé perceptron, est caractérisé de la manière suivante [84].

- Il possède n informations en entrée ;
- Il est composé de p neurones, que l'on représente généralement alignés verticalement. Chacun peut en théorie avoir une fonction d'activation différente.
- Chacun des p neurones est connecté aux n informations d'entrée.

Le réseau de neurones possède ainsi n informations en entrée et p sorties, chaque neurone renvoyant sa sortie (figure IV.22).

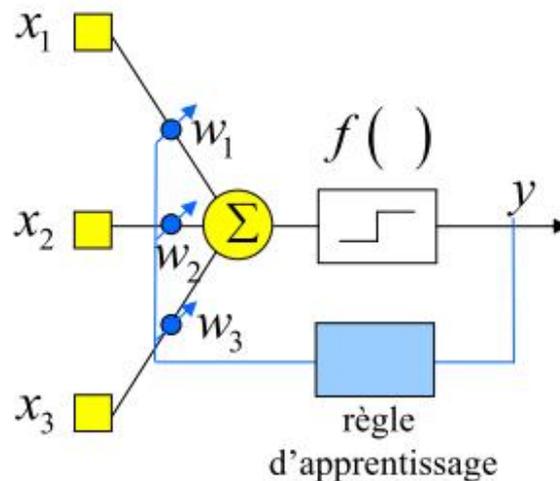


Figure IV.22. Schéma de principe du perceptron simple [83].

On notera :

- $\mathbf{X} = (x_i) \ i = 1 \dots n$, les n informations d'entrée ;
- $\mathbf{W}_{i,j}$: pour $i = 1 \dots n$ et $j = 1 \dots p$, le poids reliant l'information x_i et le neurone j puis f_j l'**activation** du j -ème neurone ;
- b_j : le **coefficient de biais**, également appelé **seuil**, du j -ème neurone ;
- in_j : la donnée d'entrée (somme pondérée) du j -ème neurone.

On a donc l'équation suivante :

$$\forall j \in p, f_j = g(in_j) = g\left(\sum_{i=0}^n w_{i,j} \times x_i\right) = g\left(\left(\sum_{i=1}^n w_{i,j} \times x_i\right) - b_j\right) \quad (\text{IV.26})$$

IV.7.5. La rétropropagation

La rétropropagation consiste à rétropropager l'erreur commise par un neurone à ses synapses et aux neurones qui y sont reliés. Pour les réseaux de neurones, on utilise habituellement la *rétropropagation du gradient de l'erreur* (ou back-propagation en anglais) [28], qui consiste à corriger les erreurs selon l'importance des éléments qui ont justement participé à la réalisation de ces erreurs : les poids synaptiques qui contribuent à engendrer une

erreur importante se verront modifiés de manière plus significative que les poids qui ont engendré une erreur marginale.

Pour comprendre cette méthode d'apprentissage, il faut définir l'erreur quadratique E . Si l'on est en présence de N exemples, alors pour $1 \leq k \leq N$, notons (\mathbf{X}_k, Y_k) le couple *exemple - sortie attendue*, où $\mathbf{X}_k = (x_i)_{1 \leq i \leq n}$ est le vecteur dont les coordonnées sont les n informations d'entrée de l'exemple et Y_k est la sortie attendue. Enfin, on note S_k la sortie obtenue pour le k -ème exemple avec les poids actuels. Alors, l'erreur quadratique est définie comme suit.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (Y_k - S_k)^2 \quad (\text{IV.27})$$

IV.7.6. Le taux d'apprentissage adaptatif

Le taux d'apprentissage dans les réseaux de neurones est un paramètre de contrôle de certains algorithmes d'apprentissage, contrôlant la vitesse à laquelle les pondérations sont ajustées.

IV.7.7. Modélisation de la rugosité de surface Ra et de l'effort radial Fy basée sur les réseaux de neurones

Le modèle neuronal adopté dans la démarche de modélisation de la rugosité de surface (Ra) et l'effort radial (Fy), est le perceptron multicouche de type Feed-forward avec l'algorithme de rétropropagation. Chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante et il n'y a pas de connexions entre les neurones d'une même couche. L'information se propage couche en couche sans que le retour en arrière soit possible. Les données expérimentales présentées dans le *tableau IV.14* ont été utilisées pour établir les modèles. Le plan expérimental se compose de 64 essais, dont 51 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 13 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. Le problème qui reste est l'obtention de l'architecture adéquate du réseau, en d'autres mots le problème est de trouver les nombres optimaux de couches cachées et de neurones dans chaque couche. Pour cela 13 structures ont été testées pour chaque sortie (Ra et Fy), les résultats des tests sont présentés dans les *tableaux IV.15* et *IV.17* et la meilleure structure est : **3-14-1** (**3 paramètres de coupe, une couche cachée avec 14 neurones et 1 paramètre de sortie**) pour Ra et Fy . La fonction de transfert (fonction d'activation) utilisée pour la couche cachée est une tangente hyperbolique et celle utilisée pour le nœud de sortie (Ra ou Fy) est une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul *JMP 10* a été utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau. Les paramètres d'apprentissage ont été établis tels que le taux d'apprentissage $\eta = 0,1$ avec un nombre d'itération maximum de 50.

Tableau IV.14. Résultats expérimentaux pour R_a et F_y

Essais N°=	Paramètres d'entrées			Paramètres de sorties	
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	R_a (μm)	F_y (N)
1	120	0,08	0,15	0,51	57,76
2	120	0,08	0,3	0,55	60,71
3	120	0,08	0,45	0,58	89,49
4	120	0,08	0,6	0,60	103,02
5	120	0,12	0,15	0,65	64,57
6	120	0,12	0,3	0,72	96,52
7	120	0,12	0,45	0,77	136,49
8	120	0,12	0,6	0,80	144,15
9	120	0,16	0,15	1,03	79,14
10	120	0,16	0,3	1,14	107,76
11	120	0,16	0,45	1,21	141,11
12	120	0,16	0,6	1,23	153,92
13	120	0,2	0,15	1,54	78,02
14	120	0,2	0,3	1,58	136,25
15	120	0,2	0,45	1,65	153,15
16	120	0,2	0,6	1,61	163,20
17	170	0,08	0,15	0,65	47,32
18	170	0,08	0,3	0,65	74,51
19	170	0,08	0,45	0,66	96,95
20	170	0,08	0,6	0,79	110,09
21	170	0,12	0,15	0,85	64,13
22	170	0,12	0,3	0,88	103,64
23	170	0,12	0,45	0,90	126,96
24	170	0,12	0,6	0,99	145,77
25	170	0,16	0,15	1,10	77,44
26	170	0,16	0,3	1,15	104,93
27	170	0,16	0,45	1,16	150,39
28	170	0,16	0,6	1,22	156,78
29	170	0,2	0,15	1,68	75,97
30	170	0,2	0,3	1,72	125,56
31	170	0,2	0,45	1,83	166,44
32	170	0,2	0,6	1,85	179,16
33	200	0,08	0,15	0,93	48,46
34	200	0,08	0,3	1,01	73,49
35	200	0,08	0,45	1,04	94,51
36	200	0,08	0,6	1,09	99,72
37	200	0,12	0,15	1,10	64,47
38	200	0,12	0,3	1,10	96,92
39	200	0,12	0,45	1,10	117,79
40	200	0,12	0,6	1,14	128,74
41	200	0,16	0,15	1,18	71,95
42	200	0,16	0,3	1,15	109,42
43	200	0,16	0,45	1,22	150,04
44	200	0,16	0,6	1,17	160,58

45	200	0,2	0,15	1,90	69,70
46	200	0,2	0,3	1,92	121,80
47	200	0,2	0,45	1,93	158,67
48	200	0,2	0,6	1,88	164,43
49	280	0,08	0,15	0,52	49,31
50	280	0,08	0,3	0,53	73,79
51	280	0,08	0,45	0,57	91,31
52	280	0,08	0,6	0,58	101,30
53	280	0,12	0,15	0,76	65,08
54	280	0,12	0,3	0,75	102,21
55	280	0,12	0,45	0,80	107,72
56	280	0,12	0,6	0,79	113,58
57	280	0,16	0,15	1,12	79,87
58	280	0,16	0,3	1,14	111,10
59	280	0,16	0,45	1,13	133,64
60	280	0,16	0,6	1,14	154,75
61	280	0,2	0,15	1,69	87,74
62	280	0,2	0,3	1,70	116,87
63	280	0,2	0,45	1,72	146,55
64	280	0,2	0,6	1,72	166,60

IV.7.7.1. Modélisation de la rugosité de surface Ra

L'architecture adéquate pour modéliser la rugosité de surface Ra est 3-14-1 (*figure IV.23*), c.-à-d. 3 nœuds d'entrées (paramètres de coupe), 14 nœuds pour la couche cachée et 1 nœud pour la sortie (rugosité de surface). Le *tableau IV.15* présente les erreurs pour les 13 tests, le choix de la structure optimale est basé sur la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le RMSE le plus petit correspond à la structure optimale.

Tableau IV.15. Performance des structures ANN du modèle de Ra

Ent_Cach_Sort	N° d'Essai	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	RMSE	R ²
3_5_1	1	120	0,08	0,15	0,0155	99,8
3_6_1	2	120	0,08	0,3	0,0138	99,84
3_7_1	5	120	0,12	0,15	0,0204	99,66
3_8_1	8	120	0,12	0,6	0,0098	99,92
3_9_1	27	170	0,16	0,45	0,0126	99,87
3_10_1	33	200	0,08	0,15	0,0119	99,88
3_11_1	35	200	0,08	0,45	0,0118	99,88
3_12_1	38	200	0,12	0,3	0,0075	99,95
3_13_1	39	200	0,12	0,45	0,0113	99,89
3_14_1	43	200	0,16	0,45	0,0006	99,99
3_15_1	46	200	0,2	0,3	0,0101	99,91
3_16_1	56	280	0,12	0,6	0,0088	99,96
3_17_1	60	280	0,16	0,6	0,01	99,91

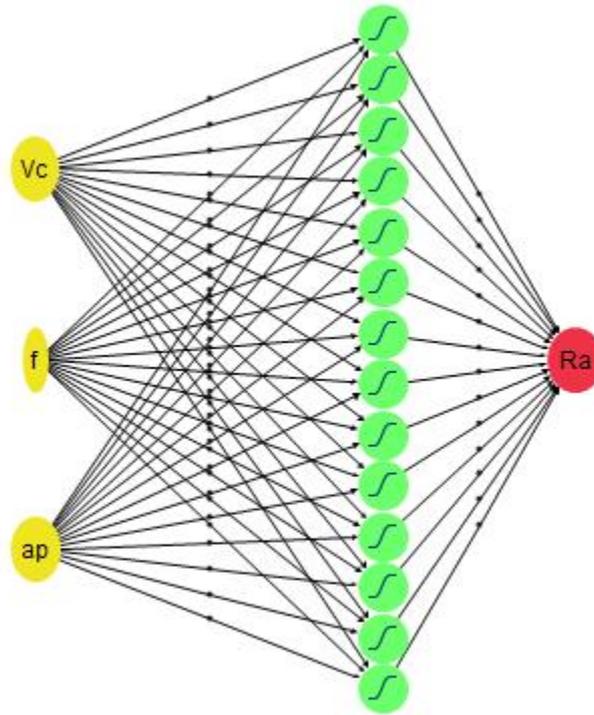


Figure IV.23. Structure ANN pour Ra.

L'équation (IV.28) présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour la rugosité de surface Ra . H_1 à H_{14} présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 14 neurones) de la couche cachée.

$$H_1 = \tanh (0,5 \times (-0,031Vc - 27,769f - 6,427ap + 13,603))$$

$$H_2 = \tanh (0,5 \times (0,031Vc + 0,526f + 0,114ap + -7,217))$$

$$H_3 = \tanh (0,5 \times (-0,010Vc + 24,2f -5,579ap + 1,559))$$

$$H_4 = \tanh (0,5 \times (-0,028Vc + -27,689f -1,660ap + 10,463))$$

$$H_5 = \tanh (0,5 \times (-0,045Vc + -19,358f -6,726ap + 13,379))$$

$$H_6 = \tanh (0,5 \times (-0,008Vc + 65,856f -0,242ap -10,024))$$

$$H_7 = \tanh (0,5 \times (0,021Vc + 6,345f -4,989ap -2,890))$$

$$H_8 = \tanh (0,5 \times (-0,024Vc -34,196f -8,444ap + 13,091))$$

$$H_9 = \tanh (0,5 \times (0,0265Vc + 31,314f + 2,432ap -10,332))$$

$$H_{10} = \tanh (0,5 \times (-0,003Vc -0,69f -0,404ap + 0,617))$$

$$H_{11} = \tanh (0,5 \times (-0,065Vc + -22,247f + -21,086ap + 20,86))$$

$$H_{12} = \tanh (0,5 \times (-0,065Vc -43,285f -12,814ap + 22,619))$$

$$H_{13} = \tanh (0,5 \times (0,048Vc + 57,221f + 1,255ap -18,345))$$

$$H_{14} = \tanh (0,5 \times (0,058Vc -5,350f -0,047ap -11,91))$$

La somme des sorties des 14 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de la rugosité de surface Ra .

$$Ra = 0,882 H_1 - 3,023 H_2 + 0,112 H_3 - 2,359 H_4 - 0,720 H_5 + 0,401 H_6 + 0,094 H_7 - 0,457 H_8 - 0,843 H_9 - 3,173 H_{10} + 0,128 H_{11} + 0,347 H_{12} - 0,634 H_{13} + 1,544 H_{14} + 0,301 \quad (IV.28)$$

Le tableau IV.16 présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) :

Tableau IV.16. R^2 et RMSE du modèle de la rugosité de surface Ra

Apprentissage		Validation	
Ra	Mesures	Ra	Mesures
R^2	0,9938462	R^2	0,9999968
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0335323	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0006302
Somme fréquences	51	Somme fréquences	13

La figure IV.24 présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs de la rugosité de surface Ra s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de la rugosité de surface est adéquat. Les coefficients de corrélations $R^2 = 0,9938$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9999$ pour la validation présentent 99,38% et 99,99% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

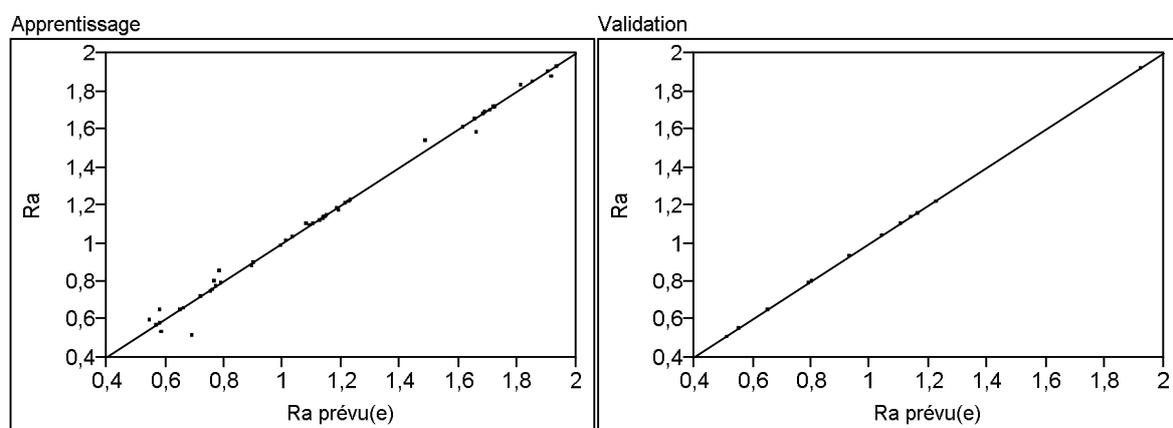


Figure IV.24. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Ra

IV.7.7.1.1. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de la rugosité de surface (Ra) et celles estimées par le modèle mathématique obtenu par la méthode des réseaux de neurones, est présentée graphiquement sur les figures IV.25. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

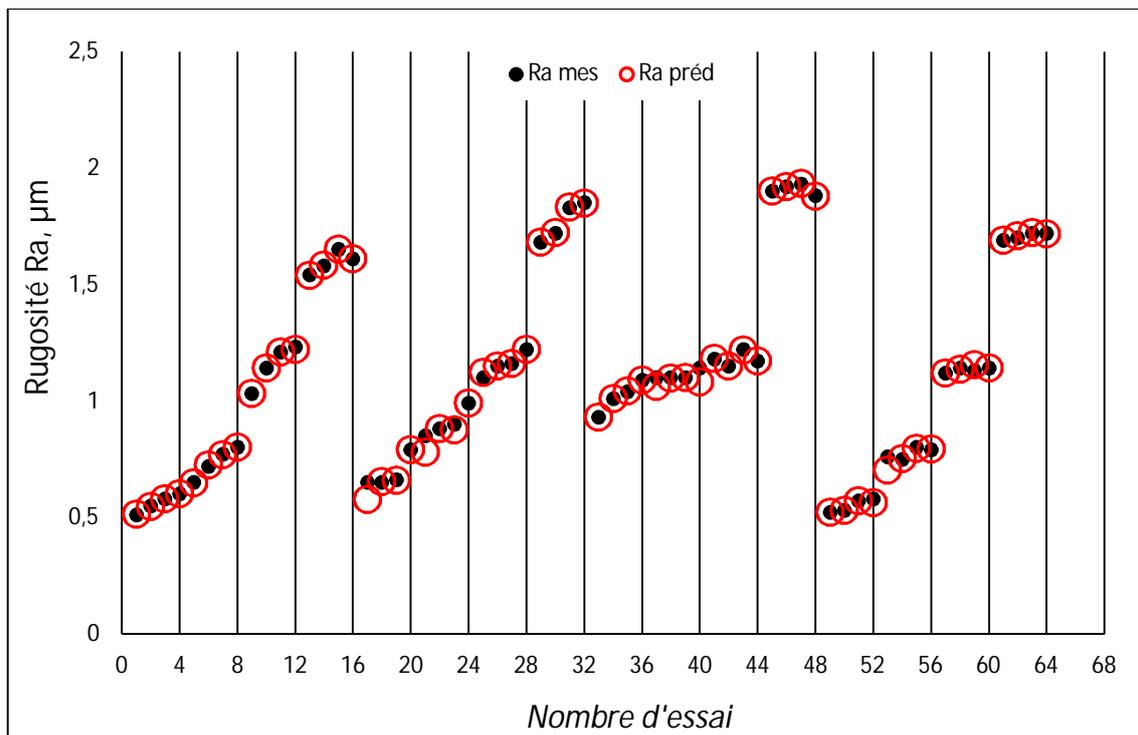


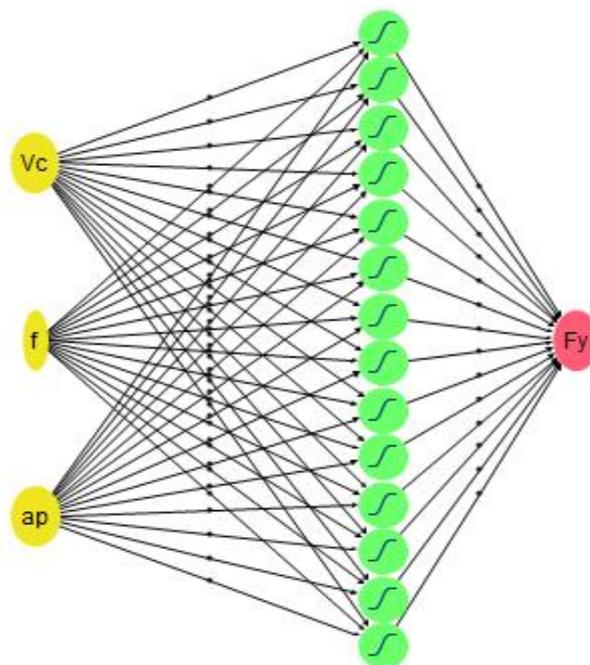
Figure IV.25. Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de la rugosité Ra

IV.7.7.2. Modélisation de l'effort radial F_y

La figure IV.26 expose l'architecture adéquate pour modéliser l'effort radial F_y , la structure choisie est 3-14-1, c.-à-d. 3 nœuds d'entrées (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), 14 nœuds pour la couche cachée et 1 nœud pour la sortie (effort radial). Le tableau IV.17 présente les erreurs pour les 13 tests, la structure optimale a été choisie basé sur le plus petit RMSE.

Tableau IV.17. Performance des structures ANN du modèle de F_y

Ent_Cach_Sort	N° d'Essai	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	RMSE	R ²
3_5_1	1	120	0,08	0,15	3,6177	98,92
3_6_1	2	120	0,08	0,3	4,1637	98,56
3_7_1	3	120	0,08	0,45	4,3662	98,42
3_8_1	8	120	0,12	0,6	3,8436	98,78
3_9_1	17	170	0,08	0,15	2,0305	99,65
3_10_1	27	170	0,16	0,45	3,3849	99,16
3_11_1	36	200	0,08	0,6	3,061	99,22
3_12_1	39	200	0,12	0,45	3,7786	98,92
3_13_1	48	200	0,2	0,6	4,8568	98,05
3_14_1	51	280	0,08	0,45	1,8956	99,7
3_15_1	52	280	0,08	0,6	2,6224	99,49
3_16_1	57	280	0,16	0,15	1,9916	99,67
3_17_1	58	280	0,16	0,3	3,0674	99,22

Figure IV.26. Structure ANN pour F_y .

L'équation (IV.29) présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour l'effort radial F_y . H_1 à H_{14} présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 14 neurones) de la couche cachée.

$$H_1 = \tanh(0,5 \times (-0,018Vc - 30,394f + 2,767ap + 7,41))$$

$$H_2 = \tanh(0,5 \times (0,009Vc + 10,875f + 2,162ap - 3,635))$$

$$H_3 = \tanh(0,5 \times (-0,021Vc + 78,422f - 4,134ap - 6,298))$$

$$H_4 = \tanh(0,5 \times (0,006Vc - 8,356f + 3,959ap - 2,125))$$

$$H_5 = \tanh(0,5 \times (0,038Vc - 28,869f - 23,533ap + 6,198))$$

$$H_6 = \tanh(0,5 \times (-0,032Vc + 21,928f + 6,594ap + 0,035))$$

$$H_7 = \tanh(0,5 \times (0,016Vc - 13,572f - 4,769ap + 0,63))$$

$$H_8 = \tanh(0,5 \times (0,011Vc - 48,338f - 1,414ap + 4,774))$$

$$H_9 = \tanh(0,5 \times (0,03Vc - 31,735f + 8,913ap - 6,71))$$

$$H_{10} = \tanh(0,5 \times (0,020Vc - 21,250f - 11,615ap + 4,142))$$

$$H_{11} = \tanh(0,5 \times (0,009Vc + 2,568f - 4,849ap - 2,355))$$

$$H_{12} = \tanh(0,5 \times (-0,032Vc + 4,759f + 2,067ap + 4,242))$$

$$H_{13} = \tanh(0,5 \times (0,030Vc - 15,278f + 9,131ap - 5,822))$$

$$H_{14} = \tanh(0,5 \times (0,005Vc + 46,549f + 3,389ap - 8,766))$$

La somme des sorties des 14 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de l'effort radial F_y .

$$F_y = -21,793 H_1 + 100,092 H_2 - 19,145 H_3 - 84,283 H_4 - 3,189 H_5 - 10,319 H_6 + 147,086 H_7 - 61,547 H_8 + 8,291 H_9 - 63,094 H_{10} - 153,468 H_{11} + 69,862 H_{12} + 27,582 H_{13} - 35,479 H_{14} - 31,969 \quad (\text{IV.29})$$

Les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) sont présentés dans le *tableau IV.18* :

Tableau IV.18. R^2 et RMSE du modèle de l'effort radial F_y

Apprentissage		Validation	
F_y	Mesures	F_y	Mesures
R^2	0,990388	R^2	0,9970352
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	3,4695953	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	1,8956874
Somme fréquences	51	Somme fréquences	13

La *figure IV.27* présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation) pour l'effort radial (F_y). Les valeurs de l'effort radial s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique est adéquat.

Les coefficients de corrélations $R^2 = 0,9903$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9970$ pour la validation présentent 99,03% et 99,7% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

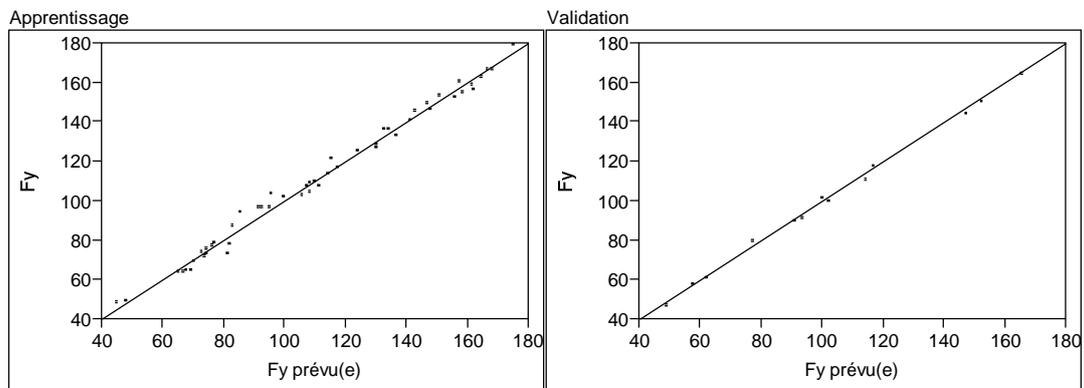


Figure IV.27. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour F_y .

IV.7.7.2.1. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'effort radial (F_y) et celles estimées par le modèle mathématique obtenu par la méthode des réseaux de neurones, est présentée graphiquement sur la figures IV.28. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

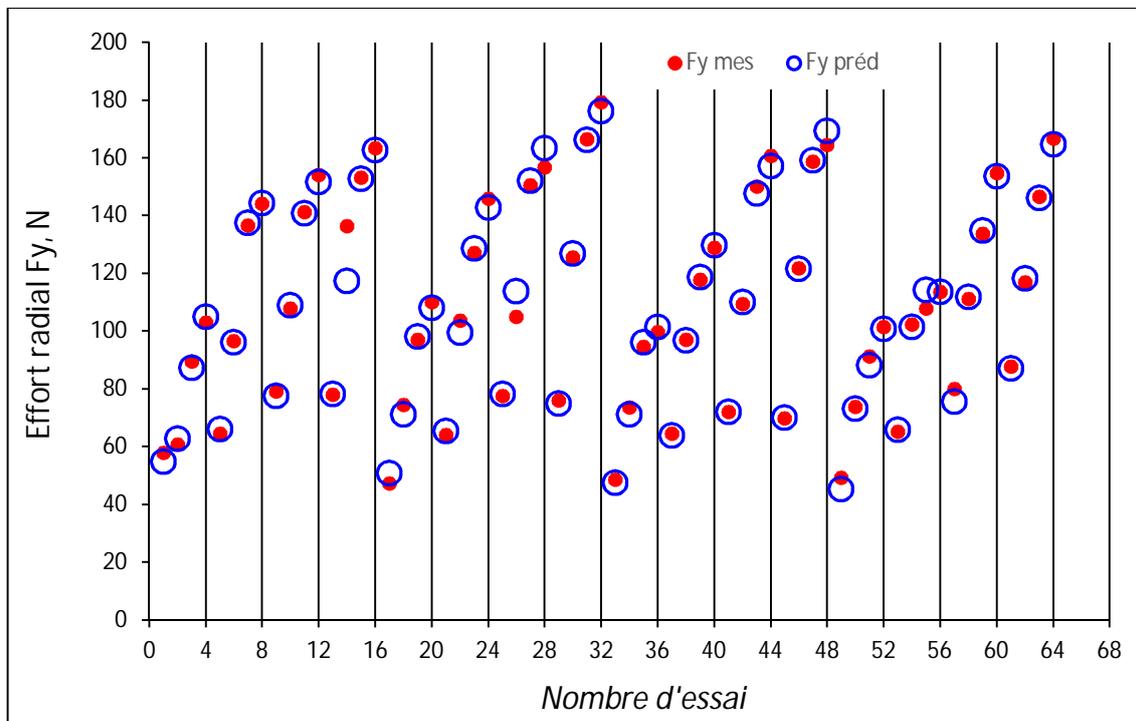


Figure IV.28. Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de l'effort radial.

IV.7.7.3. Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimées par les modèles RSM et ANN pour la rugosité de surface et l'effort radial

Le *tableau IV.19* présente une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux estimés par les modèles RSM et ANN pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort radial (Fy). On constate que l'erreur entre le modèle ANN et les résultats expérimentaux est entre 0 à 11,28% pour Ra , et 0,03 à 13,82% pour Fy , ce qui est nettement moins que les erreurs données par le modèle RSM. Néanmoins, cette erreur peut être encore réduite si le nombre d'itération est augmenté. De ce fait, le modèle ANN peut être utilisée pour la prédiction de la rugosité de la surface à usiner et l'effort radial. Le pourcentage d'erreur pour le modèle RSM se trouve entre 0,12 à 24,51% pour la rugosité de surface, et 0,04 à 25,59% pour l'effort radial. Par conséquent, le modèle de prédiction ANN est jugée le meilleure par rapport au modèle RSM.

Tableau IV.19. Comparaison des résultats expérimentaux et estimées par RSM et ANN

N° Essai	Rugosité de surface (Ra)					Effort radial (Fy)				
	Ra (μm) Expér	Préd (RSM)	Préd (ANN)	% erreur (RSM)	% erreur (ANN)	Fy (N) Expér	Préd (RSM)	Préd (ANN)	% erreur (RSM)	% erreur (ANN)
1	0,51	0,52	0,513	2,58	0,52	57,76	44,87	54,654	22,32	5,38
2	0,55	0,58	0,547	5,35	0,49	60,71	76,245	62,760	25,59 (Erreur max)	3,38
3	0,58	0,63	0,58	8,71	0,08	89,49	96,684	87,277	8,04	2,47
4	0,6	0,68	0,601	12,76	0,1	103,02	106,187	104,895	3,07	1,82
5	0,65	0,65	0,647	0,31	0,42	64,57	63,629	65,901	1,46	2,06
6	0,72	0,7	0,723	2,2	0,47	96,52	99,112	96,011	2,69	0,53
7	0,77	0,75	0,769	2,44	0,09	136,49	123,659	137,373	9,40	0,65
8	0,8	0,79	0,8	0,85	0,01	144,15	137,269	144,306	4,77	0,11
9	1,03	0,99	1,03	4,21	0,05	79,14	74,898	77,499	5,36	2,07
10	1,14	1,03	1,14	9,24	0,04	107,76	114,489	108,940	6,24	1,10
11	1,21	1,08	1,21	10,94	0,04	141,11	143,143	140,817	1,44	0,21
12	1,23	1,12	1,221	9,3	0,73	153,92	160,861	151,508	4,51	1,57
13	1,54	1,53	1,539	0,85	0,04	78,02	78,675	78,135	0,84	0,15
14	1,58	1,57	1,581	0,58	0,06	136,25	122,374	117,416	10,18	13,82 (Erreur max)
15	1,65	1,61	1,65	2,43	0,02	153,15	155,136	152,750	1,30	0,26
16	1,61	1,64	1,61	2,09	0,01	163,2	176,961	162,720	8,43	0,29
17	0,65	0,74	0,577	13,2	11,28 (Erreur max)	47,32	46,799	50,824	1,10	7,41
18	0,65	0,78	0,652	20,2	0,28	74,51	76,813	71,057	3,09	4,63
19	0,66	0,82	0,659	24,51 (Erreur max)	0,09	96,95	95,891	97,973	1,09	1,06
20	0,79	0,86	0,789	8,49	0,13	110,09	104,033	108,042	5,50	1,86
21	0,85	0,87	0,778	2,65	8,5	64,13	65,517	65,432	2,16	2,03
22	0,88	0,91	0,879	3,86	0,09	103,64	99,639	99,376	3,86	4,11
23	0,9	0,95	0,874	5,59	2,93	126,96	122,825	128,649	3,26	1,33
24	0,99	0,98	0,991	0,85	0,05	145,77	135,074	142,725	7,34	2,09
25	1,1	1,21	1,121	10,45	1,95	77,44	76,744	78,266	0,90	1,07
26	1,15	1,25	1,149	8,9	0,05	104,93	114,974	113,708	9,57	8,37

27	1,16	1,28	1,159	10,74	0,05	150,39	142,267	152,110	5,40	1,14
28	1,22	1,31	1,222	7,52	0,13	156,78	158,624	163,200	1,18	4,09
29	1,68	1,76	1,679	4,95	0,04	75,97	80,48	74,792	5,94	1,55
30	1,72	1,8	1,721	4,45	0,03	125,56	122,818	126,904	2,18	1,07
31	1,83	1,82	1,831	0,29	0,08	166,44	154,218	166,087	7,34	0,21
32	1,85	1,85	1,848	0,12 (Erreur min)	0,08	179,16	174,683	176,202	2,50	1,65
33	0,93	0,78	0,93	16,08	0 (Erreur min)	48,46	47,378	47,514	2,23	1,95
34	1,01	0,82	1,009	18,86	0,13	73,49	76,575	71,194	4,20	3,12
35	1,04	0,85	1,041	17,93	0,1	94,51	94,837	96,153	0,35	1,74
36	1,09	0,88	1,09	19,05	0,04	99,72	102,162	101,422	2,45	1,71
37	1,1	0,92	1,061	16,19	3,52	64,47	66,071	63,888	2,48	0,90
38	1,1	0,96	1,097	13,01	0,31	96,92	99,376	96,730	2,53	0,20
39	1,1	0,99	1,1	10,29	0,03	117,79	121,745	118,696	3,36	0,77
40	1,14	1,01	1,081	11,26	5,18	128,74	133,178	129,645	3,45	0,70
41	1,18	1,27	1,181	7,55	0,08	71,95	77,273	71,876	7,40	0,10
42	1,15	1,3	1,15	13,05	0,02	109,42	114,686	109,989	4,81	0,52
43	1,22	1,33	1,217	8,68	0,21	150,04	141,163	147,664	5,92	1,58
44	1,17	1,35	1,171	15,09	0,12	160,58	156,703	157,090	2,41	2,17
45	1,9	1,82	1,9	4,1	0	69,7	80,984	70,019	16,19	0,46
46	1,92	1,85	1,919	3,7	0,08	121,8	122,505	121,516	0,58	0,23
47	1,93	1,87	1,932	3,08	0,13	158,67	153,089	159,025	3,52	0,22
48	1,88	1,89	1,879	0,39	0,04	164,43	172,737	169,376	5,05	3,01
49	0,52	0,6	0,52	14,5	0,06	49,31	46,8	45,215	5,09	8,30
50	0,53	0,62	0,531	16,48	0,1	73,79	73,82	73,008	0,04 (Erreur min)	1,06
51	0,57	0,63	0,569	11,25	0,1	91,31	89,904	88,094	1,54	3,52
52	0,58	0,65	0,563	11,36	2,89	101,3	95,051	100,776	6,17	0,52
53	0,76	0,75	0,701	1,39	7,76	65,08	65,427	65,749	0,53	1,03
54	0,75	0,77	0,752	2,31	0,29	102,21	96,554	101,437	5,53	0,76
55	0,8	0,78	0,795	2,49	0,61	107,72	116,746	114,243	8,38	6,06
56	0,79	0,79	0,793	0,29	0,37	113,58	126	113,618	10,94	0,03 (Erreur min)
57	1,12	1,11	1,12	0,96	0,04	79,87	76,563	75,443	4,14	5,54
58	1,14	1,12	1,136	1,49	0,32	111,1	111,798	111,767	0,63	0,60
59	1,13	1,13	1,154	0,15	2,11	133,64	136,097	134,856	1,84	0,91
60	1,14	1,14	1,14	0,41	0,03	154,75	149,459	153,522	3,42	0,79
61	1,69	1,67	1,689	0,9	0,04	87,74	80,208	86,941	8,58	0,91
62	1,7	1,68	1,707	0,91	0,43	116,87	119,551	118,144	2,29	1,09
63	1,72	1,69	1,722	1,8	0,14	146,55	147,957	146,080	0,96	0,32
64	1,72	1,69	1,718	1,83	0,14	166,6	165,427	164,641	0,70	1,18

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de l'analyse de la variance ANOVA, l'analyse de régression et les réseaux de neurones en tournage conventionnel de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13 avec le carbure métallique GC2015 a permis d'obtenir des modèles mathématiques à la fois pour les critères de la rugosité de surface (Ra , Rt et Rz), pour les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) et pour l'usure en dépouille (VB) et en entaille

(VN) ; en fonction des paramètres d'usinage. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- L'analyse statistique de la variance ANOVA a confirmé que la vitesse d'avance (f) a la plus forte influence sur les critères de rugosité de surface. Les influences sont (82,51%, 75,50%, 76,57%), sur Ra , Rt et $R3z$, respectivement. Suivi par les produits Vc^2 et f^2 avec (6,03% ; 6,04%), (6,42% ; 8,14%), (9,33% ; 5,08%) pour Ra , Rt , et Rz , respectivement.
- L'analyse de la variance des données d'usinage a confirmé que la profondeur de passe (ap) possède l'influence la plus élevée sur les efforts de coupe avec des contributions (F_x : 86,6% ; F_y : 58,5% et F_z : 65,2%). Une influence moindre est obtenue pour l'avance par tour (f), sa contribution est de (4,92% de 29,57%, et 24,60%) respectivement pour (F_x , F_y et F_z).
- L'usure en dépouille (VB) et en entaille (VN) sont influencées principalement par la vitesse de coupe (65,48 ; 64.75)% suivie par le temps d'usinage (29,78 ; 31,16)%.
- En comparant les valeurs expérimentales et prédites des critères de rugosité, des composantes de l'effort de coupe et de l'usure, on remarque qu'ils sont en bonne corrélation.
- 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 ($R^2_{(Ra)} = 99,99\%$ et $R^2_{(Fy)} = 99,7\%$) par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse ($R^2_{(Ra)} = 95,28\%$ et $R^2_{(Fy)} = 96,7\%$).
- Les modèles mathématiques trouvés représentent un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent de faire des prédictions.

CHAPITRE V

OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE

Dans ce chapitre, nous appliquons deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objectif, en utilisant la méthode de Taguchi et l'optimisation multi-objectif, en utilisant les deux méthodes, la méthodologie de surface de réponse (MSR) et l'analyse relationnelle grise (Grey methode). Le régime optimal a été déterminé pour chacun des paramètres technologiques d'usinage (volume de copeau enlevé, rugosité de surface, efforts de coupe et usure).

V.1. Introduction

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération. Donc, l'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation des différentes méthodes d'optimisation.

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

- Optimisation mono-objectif : En utilisant la méthode de Taguchi ;
- Optimisation multi-objectif : En utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR) et l'analyse relationnel gris (Grey).

V.2. Optimisation mono-objectif

V.2.1. Méthode de Taguchi

Le docteur Genichi Taguchi a travaillé dans le domaine de la qualité, il a notamment mis au point une méthode nommée méthode Taguchi qui permet de maîtriser la qualité dès la conception des produits. L'utilisation du plan fractionnaire permet de diminuer considérablement le nombre d'expériences à réaliser pour identifier les coefficients d'un modèle. La mise au point de plans fractionnaires adaptés à un modèle est une procédure longue et peut s'avérer complexe. Taguchi a mis au point une méthode originale permettant, à partir de quelques tables standard, de résoudre facilement la plupart des problèmes industriels en matière de plan d'expériences [85]. Ces tables standards de Taguchi considèrent que les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées. Et les interactions d'ordre supérieur à deux seront toujours considérées comme négligeables [86].

V.2.2. La démarche de la méthode de Taguchi

La démarche de Taguchi se présente en six étapes [87] :

- Etape 1 : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.
- Etape 2 : sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif. Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.
- Etape 3 : construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité

permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans que l'effet influe sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais.

- Etape 4 : réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignant les réponses dans un tableau.
- Etape 5 : Calculer le rapport S/N et analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).
- Etape 6 : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus, sélectionnez les niveaux optimaux des paramètres du procédé et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.)

V.2.3. Le choix d'une table de Taguchi

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

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

Il s'agit alors de choisir la plus petite matrice d'expériences compatible avec le modèle choisi, c'est-à-dire le nombre de ddl du plan doit être supérieur ou égal à celui du modèle. Les tableaux de Taguchi sont désignés par trois symboles. Par exemple, la table L9 (3^4) comporte 9 essais pour étudier un problème possédant au maximum 4 facteurs avec trois niveaux pour chacun (*tableau V.1*). La table L18 ($2^1 \times 3^7$) comporte 18 essais pour étudier un facteur à deux niveaux et 7 autres facteurs à trois niveaux (*tableau V.2*).

Tableau V.1. Table orthogonale de Taguchi L9 (3^4) [63]

N° essai	Facteur			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tableau V.2. Table orthogonale de Taguchi L18 ($2^1 \times 3^7$) [63]

N° d'essai	Facteur							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	2	2	2	3	3
5	1	2	2	3	3	3	1	1
6	1	2	3	1	1	1	2	2
7	1	3	1	1	1	3	2	3
8	1	3	2	2	2	1	3	1
9	1	3	3	3	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	3	3	1	3	2
14	2	2	2	1	1	2	1	3
15	2	2	3	2	2	3	2	1
16	2	3	1	2	2	3	1	2
17	2	3	2	3	3	1	2	3
18	2	3	3	1	1	2	3	1

V.2.4. Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé

Afin de fabriquer des pièces avec une haute qualité, une productivité maximale, un coût minimum et dans un temps court ; les paramètres de coupe devraient être correctement choisis. Le but de notre travail est : l'optimisation de la rugosité de surface (Ra) et le volume de copeau enlevé (MRR), qui résultent lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable $X20Cr13$ avec des plaquettes en carbure métallique GC2015, en fonction de la variation des paramètres de régime de coupe (Vc : vitesse de coupe, f : l'avance par tour et ap : profondeur de coupe). La table orthogonale de Taguchi L16 (4^3) a été utilisée (tableau V.3). Le volume de copeau (MRR) est calculé en utilisant la formule suivante :

$$MRR = 1000 \times Vc \times f \times ap \quad (V.1)$$

Tableau V.3. Résultats expérimentaux et S/N pour Ra et MRR

Essai N°=	Facteurs			Réponses			
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	$S/N_{(Ra)}$ (dB)	MRR (mm^3/min)	$S/N_{(MRR)}$ (dB)
1	120	0,08	0,15	0,51	5,91	1440	10,01
2	120	0,12	0,3	0,72	2,85	4320	22,08
3	120	0,16	0,45	1,21	-1,63	8640	25,45
4	120	0,2	0,6	1,61	-4,14	14400	27,30
5	170	0,08	0,3	0,65	3,70	4080	21,74
6	170	0,12	0,15	0,85	1,41	3060	19,75
7	170	0,16	0,6	1,22	-1,70	16320	27,70
8	170	0,2	0,45	1,83	-5,23	15300	27,49
9	200	0,08	0,45	1,04	-0,34	7200	24,68
10	200	0,12	0,6	1,14	-1,11	14400	27,30
11	200	0,16	0,15	1,18	-1,46	4800	22,69
12	200	0,2	0,3	1,92	-5,65	12000	26,68
13	280	0,08	0,6	0,58	4,68	13440	27,07
14	280	0,12	0,45	0,8	1,90	15120	27,45
15	280	0,16	0,3	1,14	-1,14	13440	27,07
16	280	0,2	0,15	1,69	-4,54	8400	25,34

V.2.4.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(Ra)}$ et $S/N_{(MRR)}$

Les tableaux V.4 et V.5 montrent les résultats d'analyse de la variance, respectivement, pour le $S/N_{(Ra)}$ et $S/N_{(MRR)}$. Cette analyse était faite pour les valeurs de P inférieure à 0,05 (ou 95% de confiance).

Le tableau V.4 résume les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour $S/N_{(Ra)}$. L'analyse montre que la vitesse d'avance f est le facteur dominant sur la qualité de surface. Leur contribution est (82,24%). Le produit (Vc^2) est statistiquement significatif avec une contribution de (6,82%).

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

Source	dl	SC	MC	F	P	Cont. %	Remarques
Régression	9	182,70	20,30	19,42	0,0009	96,68	signifiant
Vc	1	0,48	0,48	0,46	0,8510	0,25	non
f	1	155,42	155,42	148,65	0,0012	82,24	signifiant
ap	1	3,13	3,13	2,99	0,3851	1,66	non
$Vc \times f$	1	0,99	0,99	0,94	0,8432	0,52	non
$Vc \times ap$	1	3,38	3,38	3,24	0,1221	1,79	non
$f \times ap$	1	3,70	3,70	3,54	0,2997	1,96	non
Vc^2	1	12,89	12,89	12,33	0,0127	6,82	signifiant
f^2	1	1,40	1,40	1,34	0,2909	0,74	non
ap^2	1	1,31	1,31	1,26	0,3051	0,70	non
Erreur	6	6,27	1,05				
Totale	15	188,98					

Le tableau V.5 présente les résultats d'analyse de variance pour le $S/N_{(MRR)}$. Il est clair que la profondeur de coupe est le facteur qui a l'influence la plus élevée (41,87%) suivi par la vitesse d'avance (23,28%) et la vitesse de coupe (19,05% de). Les interactions ($Vc \times f$, $Vc \times ap$ et $f \times ap$) et les produits (f^2 et ap^2) ont été jugés moins importants.

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

Source	dll	SC	MC	F	P	Cont. %	Remarques
Régression	9	306,82	34,09	39,00	0,000122	98,32	signifiant
Vc	1	59,46	59,46	68,02	0,005455	19,05	signifiant
f	1	72,65	72,65	83,11	0,002899	23,28	signifiant
ap	1	130,65	130,65	149,46	0,000482	41,87	signifiant
$Vc \times f$	1	2,25	2,25	2,57	0,037133	0,72	signifiant
$Vc \times ap$	1	8,38	8,38	9,59	0,021221	2,69	signifiant
$f \times ap$	1	9,06	9,06	10,36	0,034798	2,90	signifiant
Vc^2	1	4,08	4,08	4,67	0,074056	1,31	non
f^2	1	5,26	5,26	6,02	0,049593	1,69	signifiant
ap^2	1	15,03	15,03	17,19	0,006034	4,82	signifiant
Erreur	6	5,25	0,87				
Totale	15	312,06					

V.2.4.2. Analyse de régression : $S/N_{(Ra)}$ et $S/N_{(MRR)}$ en fonction de V_c , f et ap

Le modèle de $S/N_{(Ra)}$ est donné par l'équation. (V.2). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 96,68\%$).

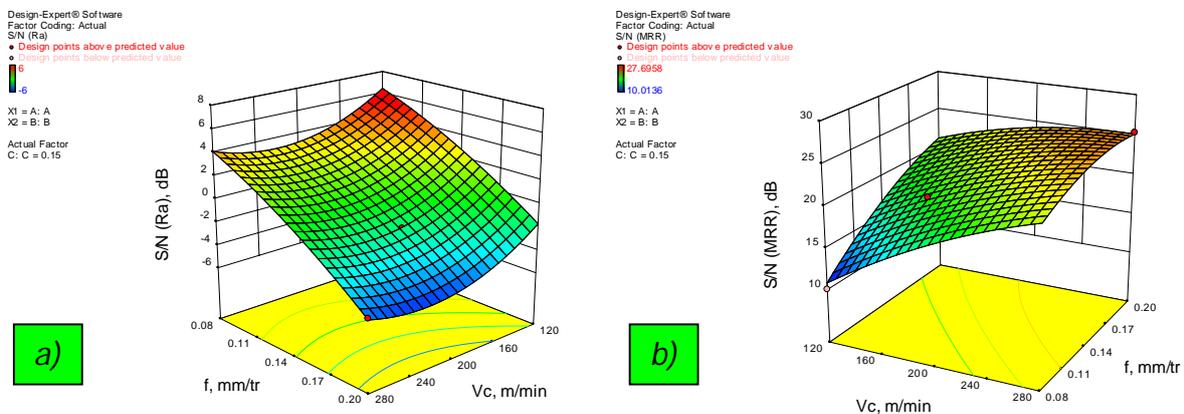
$$S/N_{(Ra)} = 25,86 - 0,14V_c - 21,05f - 36,54ap - 0,034V_c \times f + 0,079V_c \times ap + 61,5f \times ap + 3,08.10^{-4}V_c^2 - 185,01f^2 + 12,73ap^2 \quad (V.2)$$

Le modèle de $S/N_{(MRR)}$ est donné par l'équation. (3). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 98,32\%$).

$$S/N_{(MRR)} = -32,51 + 0,19V_c + 255,5f + 87,52ap - 0,40V_c \times f - 0,125V_c \times ap - 134,64f \times ap - 1,73.10^{-4}V_c^2 - 358,34f^2 - 43,07ap^2 \quad (V.3)$$

R^2 est un coefficient de déterminations multiples, qui mesure la variation de proportion dans un ensemble des points données [77]. Dans la présente étude, les valeurs de ($R^2 = 96,68\%$) pour $S/N_{(Ra)}$ et ($R^2 = 98,32\%$) pour $S/N_{(MRR)}$ sont très proches de 1, suggérant une bonté raisonnable du modèle qui peut être utilisé pour la prédiction dans les limites des facteurs étudiés. Les adéquations des modèles développées ont également été vérifiées par la technique ANOVA. Les modèles sont adéquates comme les valeurs de F -calculées (19,42 et 39) respectivement pour $S/N_{(Ra)}$ et $S/N_{(MRR)}$ sont supérieures à la valeur F -table au niveau de confiance de 95%.

A partir du tracé d'interaction (3D) (figure V.1 a), Il convient de noter que, la plus grande valeur du $S/N_{(Ra)}$ est produite pour la combinaison des faibles valeurs de trois paramètres (f , ap et V_c). Par contre, pour la valeur maximale de $S/N_{(MRR)}$ est produit pour la combinaison des trois valeurs les plus élevées des paramètres (V_c , f et ap) (figure V.1 b).



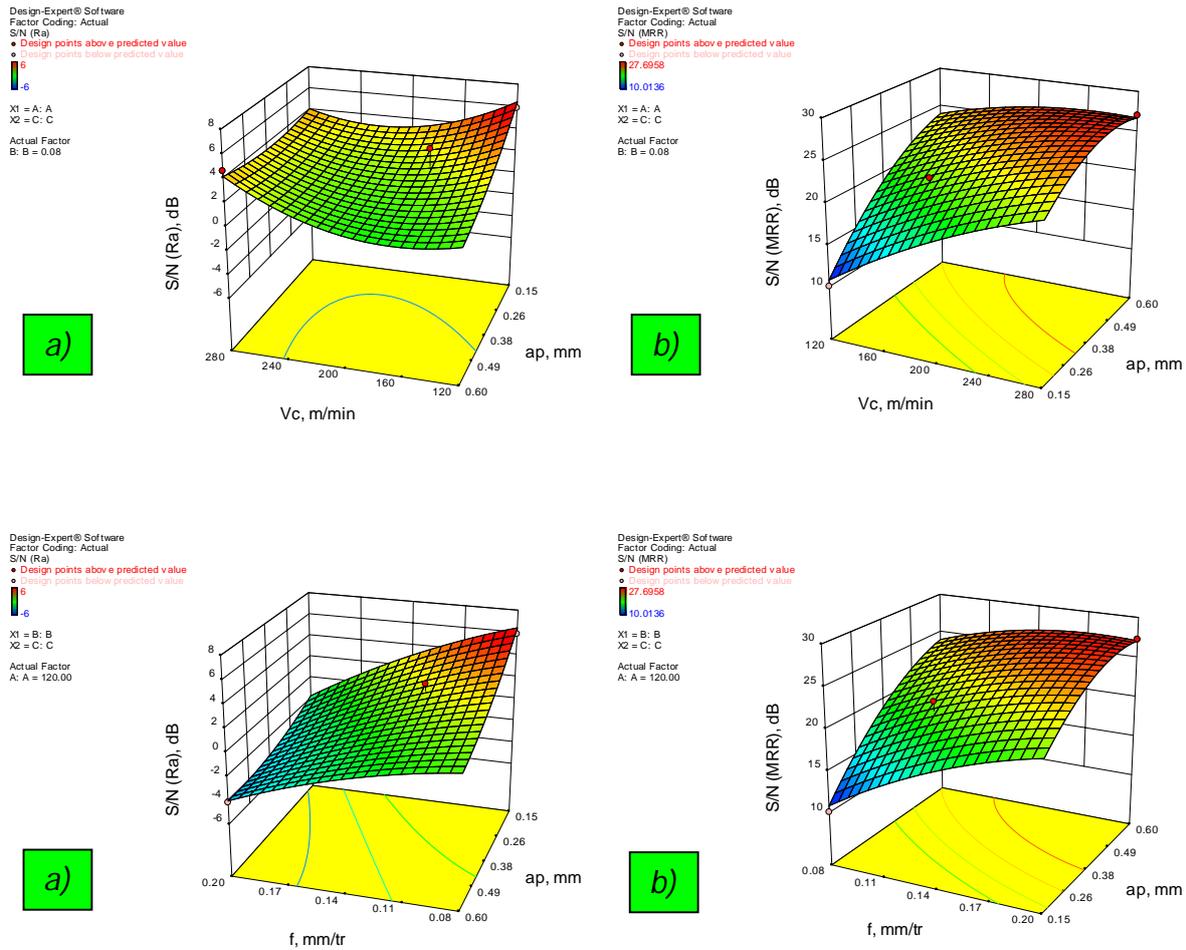


Figure V.1. Effet des paramètres de régime de coupe sur : (a) $S/N_{(Ra)}$; (b) $S/N_{(MRR)}$.

V.2.4.3. Optimisation mono-objectif utilisant la méthode de Taguchi (S/N ratio)

Le terme signal représente l'effet souhaitable de la caractéristique de sortie et le terme bruit représente l'effet indésirable de la caractéristique de sortie [88]. Le rapport S/N mesure les caractéristiques de qualité déviant des valeurs désirées. Le rapport S/N le plus élevé signifie le niveau optimal des paramètres de processus de coupe. La faible rugosité de surface et le volume de copeau enlevé le plus haut sont souhaitables dans cette étude. La caractéristique S/N la plus petite est la meilleur (*Smaller-the-better*) a été utilisé pour la rugosité de surface et la caractéristique S/N la plus grande est la meilleur (*Larger-the-better*) a été utilisé pour le volume de copeau enlevé. Les caractéristiques de qualité S/N , la plus petite est mieux et la plus grande est mieux sont calculées avec les équations suivantes [89, 90] :

➤ Le plus petit est le meilleur (*Smaller-the-better*) :

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \right] \tag{V.4}$$

Où : n = nombre de répétitions

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

Il est appliqué dans le cas où la minimisation des critères est demandée.

➤ Le plus grand est le meilleur (*Larger-the-better*) :

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (\text{V.5})$$

Ce type est appliqué dans le cas où la maximisation des critères est demandée.

Le niveau d'un paramètre avec le plus grand rapport S/N donne le niveau optimal. Les paramètres d'usinage optimal ont été mis en évidence dans des cercles en (figure V.2 et V.3). Ainsi, le régime optimal pour Ra est : une vitesse de coupe de 120 m/min, une avance de 0,08 mm/tr et une profondeur de passe de 0,15 mm (figure V.2). Pour le MRR , les paramètres optimaux sont les suivants : une vitesse de coupe de 280 m/min, une avance de 0,2 mm/tr et une profondeur de passe de 0,6 mm (figure V.3).

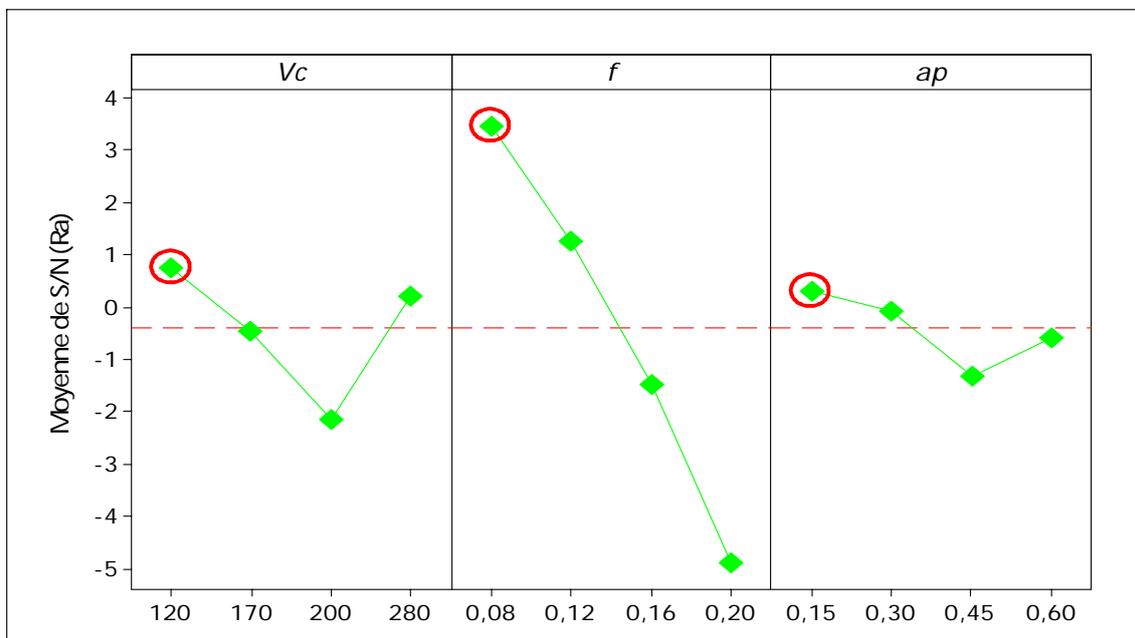


Figure V.2. Graphique des effets principaux pour $S/N_{(Ra)}$

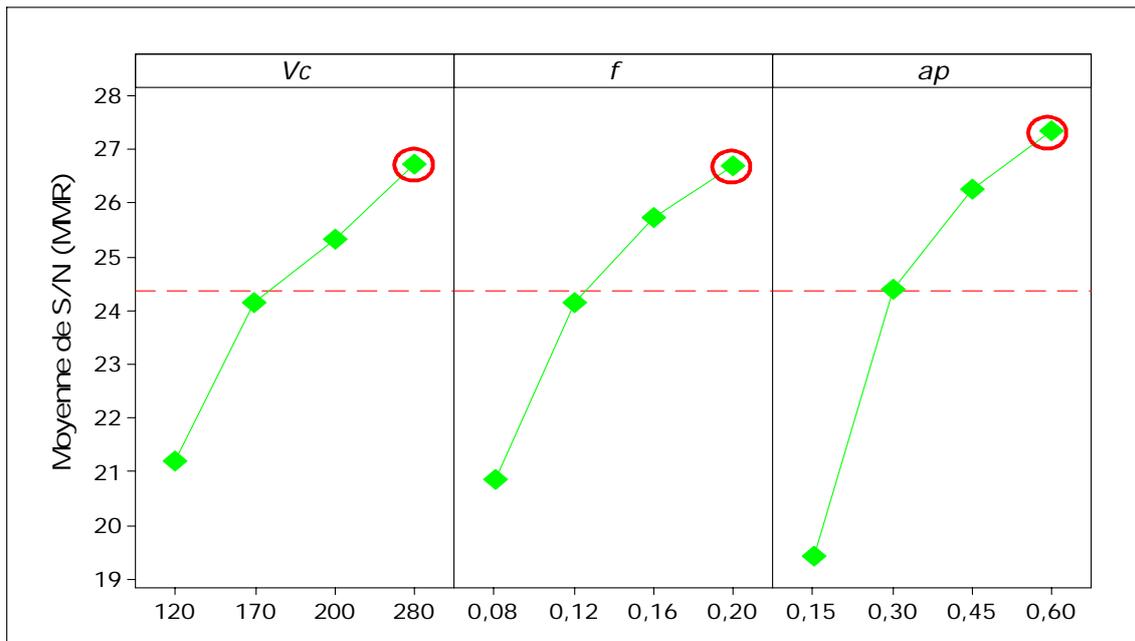


Figure V.3. Graphique des effets principaux pour $S/N_{(MRR)}$

Le pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites pour Ra et MRR utilisant S/N sont 2,27% et 3,55%, respectivement. Le tableau V.6 donne les résultats prédits et expérimentaux pour Ra et MRR utilisant l'optimisation mono-objectif.

Tableau V.6. Comparaison entre les valeurs prédites et expérimentales

Réponses	Régime optimal	Valeur optimale prédite	Valeur expérimentale	% d'erreur
Ra	120; 0,08; 0,15	0,45	0,44	2,27
MRR	280; 0,2; 0,6	32406,109	33600	3,55

V.3. Optimisation multi-objectif

V.3.1. Méthode d'Analyse Relationnelle Grise (Grey method)

L'analyse relationnelle grise (GRA) est utilisée pour convertir un problème d'optimisation d'un multi-objectif en un seul objectif [88]. Le but de cette étude est de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui nous permet de minimiser la rugosité de surface et maximiser le volume de copeau enlevé simultanément. Les étapes suivantes sont considérées pour l'Analyse Relationnelle Gris (GRA) basé sur la méthode de Taguchi.

Étape 1 : La normalisation

La première étape de l'analyse relationnelle grise est de normaliser (dans l'intervalle 0 et 1) les données expérimentales selon le but d'optimisation [91]. Si le but est la minimisation du critère (rugosité de surface) alors la séquence originale est normalisée comme suit:

- Le plus petit est le meilleur (*The-smaller-the-better*) :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{V.6})$$

Si le but est la maximisation du critère (volume de copeau enlevé) alors la séquence originale est normalisée comme suit:

- Le plus grand est le meilleur (*The-larger-the better*) :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{V.7})$$

Où : $x_i(k)$ valeur normalisée de la séquence

$\max(x_i^0(k))$ la plus grande valeur de $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse

$\min(x_i^0(k))$ la plus petite valeur de $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse

La normalisation sert à éliminer les unités et rendre toutes les réponses en même grondeur, le *tableau V.7* résume les données traitées après la normalisation. Les valeurs normalisée ont été arrangés entre zéro et un.

Tableau V.7. Résultats expérimentale normalisé ($x_i(k)$)

<i>N° Essai. (i)</i>	<i>Ra</i>	<i>MRR</i>
Valeur Idéal	1,00	1,00
1	1,00	0,00
2	0,85	0,19
3	0,50	0,48
4	0,22	0,87
5	0,90	0,18
6	0,76	0,11
7	0,50	1,00
8	0,06	0,93
9	0,62	0,39

10	0,55	0,87
11	0,52	0,23
12	0,00	0,71
13	0,95	0,81
14	0,79	0,92
15	0,55	0,81
16	0,16	0,47

Étape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational) ($\xi_i(k)$) peuvent être calculés comme suit [90] :

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi\Delta_{\max}} \quad (\text{V.8})$$

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

Où :

$\Delta_{0i}(k)$ est la différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$,

Δ_{\min} est la plus petite valeur de $\Delta_{0i}(k)$

Δ_{\max} est la plus grande valeur de $\Delta_{0i}(k)$ coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{V.9})$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{V.10})$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{V.11})$$

La valeur de ψ est en générale égale à (0,5) [92].

La valeur du coefficient ψ a été prise (0,5). Les valeurs des coefficients "Gris Rationnelle Coefficients" est présentés dans le *tableau V.8*.

Tableau V.8. Coefficients du GR ($\xi_i(k)$)

$N = \text{° Essai. (i)}$	Ra	MRR
1	1,00	0,33
2	0,77	0,38
3	0,50	0,49
4	0,39	0,79

5	0,83	0,38
6	0,67	0,36
7	0,50	1,00
8	0,35	0,88
9	0,57	0,45
10	0,53	0,79
11	0,51	0,39
12	0,33	0,63
13	0,90	0,72
14	0,70	0,86
15	0,53	0,72
16	0,37	0,48

Etape 3 : Calcul du GRG (*Grey relational grade*)

Après avoir calculé la moyenne des coefficients du relationnel gris (Grey Relational Coefficients), les γ_i (Grey Relational Grade) peuvent être obtenu comme suit :

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (\text{V.12})$$

Où : n est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas $n=2$).

La plus grande valeur de (Grey Relational Grade) est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale ($x_0(k)$) et la séquence donnée ($x_i(k)$). La séquence idéale ($x_0(k)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel (Relational Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale [89, 93].

La qualité grise (GRG) et son ordre sont donnés dans le *tableau V.9*. Selon le *tableau V.9* et la *figure V.4*, la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 13 a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que l'expérience 13 est la combinaison des paramètres optimaux qui donne simultanément une rugosité de surface minimale, et un volume de copeau enlevé maximum.

Tableau V.9. *Qualité Grise GRG et son ordre*

<i>N=° Essai. (i)</i>	<i>GRG (α_i)</i>	<i>Order</i>
1	0,667	4
2	0,575	10
3	0,497	13
4	0,592	9

5	0,603	8
6	0,516	11
7	0,749	3
8	0,614	7
9	0,509	12
10	0,661	5
11	0,451	15
12	0,483	14
13	0,811	1
14	0,782	2
15	0,624	6
16	0,429	16

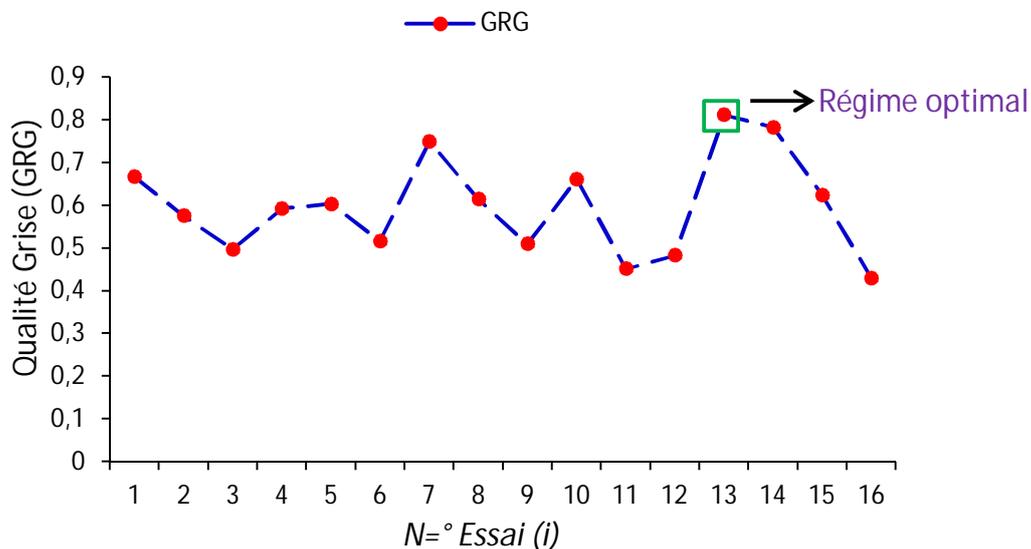


Figure V.4. Qualité Relationnelle Grise (GRG).

Le niveau optimal des paramètres est le niveau correspondant au maximum de la valeur moyenne de "la qualité relationnelle grise" [94, 95]. La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage de l'acier X20Cr13 est obtenu à partir de *tableau V.10* : vitesse de coupe optimale: "niveau 4", l'avance optimale: "le niveau 1" et pour la profondeur de passe optimale "niveau 4". Donc la combinaison optimale (pour les deux réponses) des paramètres est : $Vc4 f1 ap4$. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : vitesse de coupe $Vc = 280\text{m/min}$, avance $f = 0,08\text{mm/tr}$ et profondeur de passe $ap = 0,6\text{ mm}$. La différence entre la valeur maximale et la valeur minimale ($\Delta = \text{Max-Min}$) de la valeur grise relationnelle est également indiqué dans le *tableau V.10*.

Le facteur ayant la valeur maximale de delta est celui qui affecte le plus les réponses. Le maximum de la valeur de delta dans le *tableau V.10* est égal à 0,188; et le facteur correspondant, à savoir la profondeur de passe, a le plus grand effet sur la réduction de la rugosité de surface et sur l'augmentation de volume de copeau enlevé de l'acier X20Cr13 simultanément.

Tableau V.10. Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade)

Niveau	Vc	f	ap
1	0,583	0,648	0,516
2	0,621	0,634	0,571
3	0,526	0,580	0,601
4	0,662	0,530	0,703
Delta	0,136	0,118	0,188

La signification des paramètres du régime de coupe a été testée par une analyse de variance. L'utilisation d'une analyse de la variance de la valeur de la qualité relationnelle grise, a été élaboré pour identifier les facteurs importants. Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le *tableau V.11*. On observe que le facteur déterminant est la profondeur de passe (35,02%), suivie par la vitesse d'avance (16,54%) et la vitesse de coupe (4,7%).

Tableau V.11. Analyse de la variance (ANOVA) pour la qualité relationnelle grise (GRG)

Source	dII	SC	MC	F	P	Cont.%
Régression	3	0,113	0,0376	5,145	0,0162	56,26
Vc	1	0,009	0,0094	1,289	0,2784	4,70
f	1	0,033	0,0332	4,539	0,0545	16,54
ap	1	0,070	0,0703	9,608	0,0092	35,02
Erreur	12	0,088	0,0073			
Total	15	0,201				

V.3.2. Méthodologie des surfaces de réponse (MSR)

La méthodologie des surfaces de réponse (MSR) appliquée dans cette étude est une technique statistique empirique utilisée pour l'analyse de régression multiple des données quantitatives obtenues à partir des expériences statistiquement conçues en résolvant les équations multi variables simultanément. La représentation graphique de ces équations s'appelle surfaces de réponse, et permet de décrire l'effet individuel et cumulatif des variables

d'essai sur la réponse et de déterminer l'interaction mutuelle entre les variables d'essai et leur effet sur la réponse [96, 97].

La méthodologie de surface de réponse est une procédure visant à déterminer une relation entre les paramètres indépendants du processus d'entrée et les données de sortie (réponse du procédé). Cette procédure comprend 6 étapes [98] :

- ✓ définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées,
- ✓ adopter un plan de conception expérimentale,
- ✓ effectuer une analyse statistique de la variance (ANOVA) des variables d'entrées indépendantes afin de trouver les paramètres les plus significatifs qui affectent la réponse,
- ✓ effectuer une analyse de régression avec le modèle quadratique de (*MSR*),
- ✓ déterminer la situation du modèle quadratique de (*MSR*) et enfin,
- ✓ Optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédites.

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. Dans la présente étude, la relation entre les paramètres d'entrées (conditions de coupe) à savoir la vitesse de coupe (Vc), la vitesse d'avance (f), la profondeur de coupe (ap) et le temps de coupe (t) et les paramètres de sorties (efforts de coupe, rugosité et usure) sont donnés par l'équation notée ci-dessous :

$$Y = f(Vc, f, ap, t) + e_{ij} \quad (\text{V.13})$$

On peut ainsi écrire le modèle mathématique du second ordre, basé sur la méthodologie de surface de réponse (*MSR*) pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

$$Y = a_o + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^3 a_{ij} X_i X_j \quad (\text{V.14})$$

Où Y est la réponse observée (efforts de coupe, rugosité de surface et usure), a_o, a_i, a_{ij}, a_{ii} représentent respectivement les termes constants, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Les X_i représentent les variables indépendantes, ou bien variables codées qui correspondent à des paramètres de coupe étudiés.

Les variables codées X_i , $i = 1, 2, 3$ sont obtenues à partir des équations de transformation suivantes :

$$X_1 = \frac{Vc - Vc_o}{\Delta Vc} \quad (\text{V.15})$$

$$X_2 = \frac{f - f_o}{\Delta f} \quad (\text{V.16})$$

$$X_3 = \frac{ap - ap_o}{\Delta ap} \quad (\text{V.17})$$

Où : X_1 , X_2 et X_3 sont les valeurs codées des paramètres Vc , f et ap respectivement. Vc_o , f_o et ap_o au niveau zéro. ΔVc , Δf et Δap sont les valeurs de Vc , f , et ap , respectivement.

V.3.2.1. Teste de validité des modèles

Afin de tester la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance (ANOVA) : Est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la réponse (rugosité de surface, efforts de coupe et usure). Comme les facteurs sont en général exprimés dans des unités différentes, leurs effets ne soient comparables que s'ils sont codés.
- Coefficients de corrélation des modèles : Le coefficient de corrélation R^2 est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression. Le coefficient R^2 peut s'interpréter comme le quotient des variances expliqué par la variance des réponses mesurées, d'où R^2 varie entre 0 et 1. Une valeur de R^2 proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif. Le coefficient de détermination de la régression R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (V.18).

$$R^2 = 1 - \frac{SSErreur}{SStotal} \quad (\text{IV.18})$$

- Graphiques des valeurs résiduelles : Les graphiques des valeurs résiduelles sont 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 (V.19) [99].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (\text{V.19})$$

Où :

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

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

- 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 :

$$A^2 = -N - S \quad (\text{V. 20})$$

Où : N est la taille de l'échantillon.

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\log F(Y_i) + \log(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad (\text{V. 21})$$

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 $P = 0,05$ 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 .

V.3.2.2. Optimisation

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 conception (*MSR*) a été étudié à quatre niveaux différents (*Chapitre II, tableau II.7*). L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (*MSR*) 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 de 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, Rt et Rz*), les composantes de la force de coupe (*Fx, Fy et Fz*) et l'usure (*VB et VN*) souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (*MSR*) pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (*Ra, Rt et Rz*), les efforts de coupe (*Fx, Fy et Fz*) et l'usure (*VB et VN*) pour le carbure revêtu GC2015.

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, $F(x)$, est définie comme suit [100] :

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (V.22)$$

$$F(x) = -DF$$

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 :

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$di = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{T_i - Inf_i} \right] \quad \text{Si } Inf_i \leq Y_i \leq T_i \quad (\text{V.23})$$

$$di = \left[\frac{Y_i - Sup_i}{T_i - Sup_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (\text{V.24})$$

$$di = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq Sup_i$$

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

$$di = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad \text{Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (\text{V.25})$$

$$di = 1 \quad \text{Si } Y_i \geq Sup_i$$

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

$$di = 1 \quad \text{Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[\frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad \text{Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (\text{V.26})$$

$$di = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq Sup_i$$

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).

NB: les étapes 1 à 5 de la méthodologie de surface de réponse(MSR) pour les différents paramètres étudié ont été exposées dans le chapitre IV. Dans ce chapitre on s'intéresse seulement à l'étape 6 (Optimisation).

V.3.3. Optimisation des conditions de coupe pour : R_a , R_t , R_z , F_x , F_y et F_z .

Le tableau V.12 présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe lors de tournage de l'acier X20Cr13 avec le GC2015, pour les trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) et les composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z).

Tableau V.12. Conditions d'optimisation pour R_a , R_t , R_z , F_x , F_y et F_z

Conditions	Objectifs	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe, V_c (m/min)	Gamme	120	280
Avance, f (mm/tr)	Gamme	0,08	0,2
Profondeur de passe, ap (mm)	Gamme	0,15	0,6
R_a (mm)	Mini	0,506	1,933
R_t (μm)	Mini	3,93	10,82
R_z (μm)	Mini	3,08	9,61
F_x (N)	Mini	12,52	134,44
F_y (N)	Mini	47,32	179,16
F_z (N)	Mini	37	298,1

Le tableau V.13 présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) des critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) et des composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z). Les paramètres de coupe optimaux s'avèrent : la vitesse de coupe (V_c) de 120 m/min, l'avance par tour (f) de (0,08 à 0,09) mm/tr et la profondeur de passe (ap) de 0,15 mm. Les rugosités de surface optimisées sont $R_a = 0,523 \mu\text{m}$, $R_t = 4,373 \mu\text{m}$ et $R_z = 3,08 \mu\text{m}$, les efforts de coupe optimisés sont : $F_x = 14,19 \text{ N}$, $F_y = 44,87 \text{ N}$ et $F_z = 43,07 \text{ N}$. La figure V.5 représente le graphique de contour de désirabilité (97.9%) pour les trois critères de rugosité de surface (R_a , R_t et R_z) et les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z).

Tableau V.13. Optimisation par MSR de la rugosité de surface et des efforts de coupe

N°	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	R_a (μm)	R_t (μm)	R_z (μm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	Désirabilité individuelle
1	120	0,08	0,15	0,52	4,37	3,08	14,19	44,87	43,07	0,979
2	120	0,08	0,15	0,52	4,37	3,09	14,46	45,61	43,71	0,978
3	120	0,08	0,15	0,53	4,37	3,10	14,67	46,20	44,23	0,977
4	121,1	0,08	0,15	0,53	4,40	3,11	14,28	44,93	43,05	0,977
5	120	0,08	0,15	0,53	4,37	3,10	14,85	46,70	44,67	0,977
6	120	0,08	0,15	0,53	4,38	3,09	15,05	46,09	44,33	0,977
7	120,77	0,08	0,15	0,53	4,39	3,14	15,21	47,57	45,39	0,973
8	120	0,09	0,15	0,53	4,37	3,14	15,70	49,09	46,79	0,97

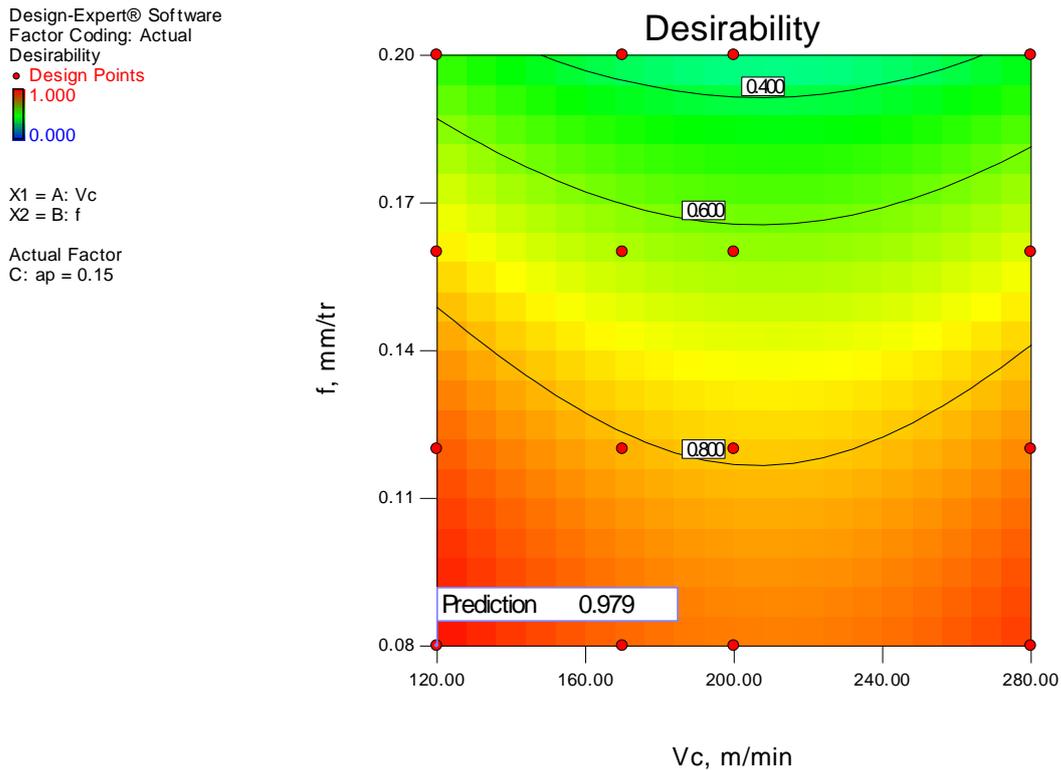


Figure V.5. Graphique de contour de désirabilité pour Ra, Rt, Rz, Fx, Fy et Fz

V.3.4. Optimisation des conditions de coupe pour l'usure (VB et VC)

Le tableau V.14 présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe pour l'usure (VB et VN).

Tableau V.14. Conditions d'optimisation pour VB et VN

Conditions	Objectifs	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe, Vc (m/min)	Gamme	160	400
Temps, t (min)	Gamme	4	11
VB (mm)	Mini	0,043	0,142
VN (mm)	Mini	0,05	0,153

Le tableau V.15 présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) de l'usure (VB et VN). Les paramètres de coupe optimaux s'avèrent : la vitesse de coupe (Vc) de 160 à 170 m/min, et un temps d'usinage (t) de 4 min. Les usures optimisés sont : VB = 0,042 mm et VN = 0,046 mm. Le graphique de contour (figure V.6) présente une désirabilité de 100% pour les usures (VB et VN).

Tableau V.15. Optimisation par MSR de l'usure (VB et VN)

$N=^{\circ}$	V_c (m/min)	t (min)	VB (mm)	VN (mm)	Désirabilité individuelle
1	161,92	4,01	0,0426575	0,0462228	1
2	160,71	4,04	0,0428672	0,0463537	1
3	165,51	4,04	0,0429974	0,0471067	1
4	160,00	4,00	0,0425225	0,0458063	1
5	162,98	4,04	0,0429614	0,0467563	1
6	169,61	4,01	0,0428622	0,0474069	1
7	162,90	4,01	0,0427072	0,0464087	1
8	172,75	4,00	0,0429163	0,0478341	1

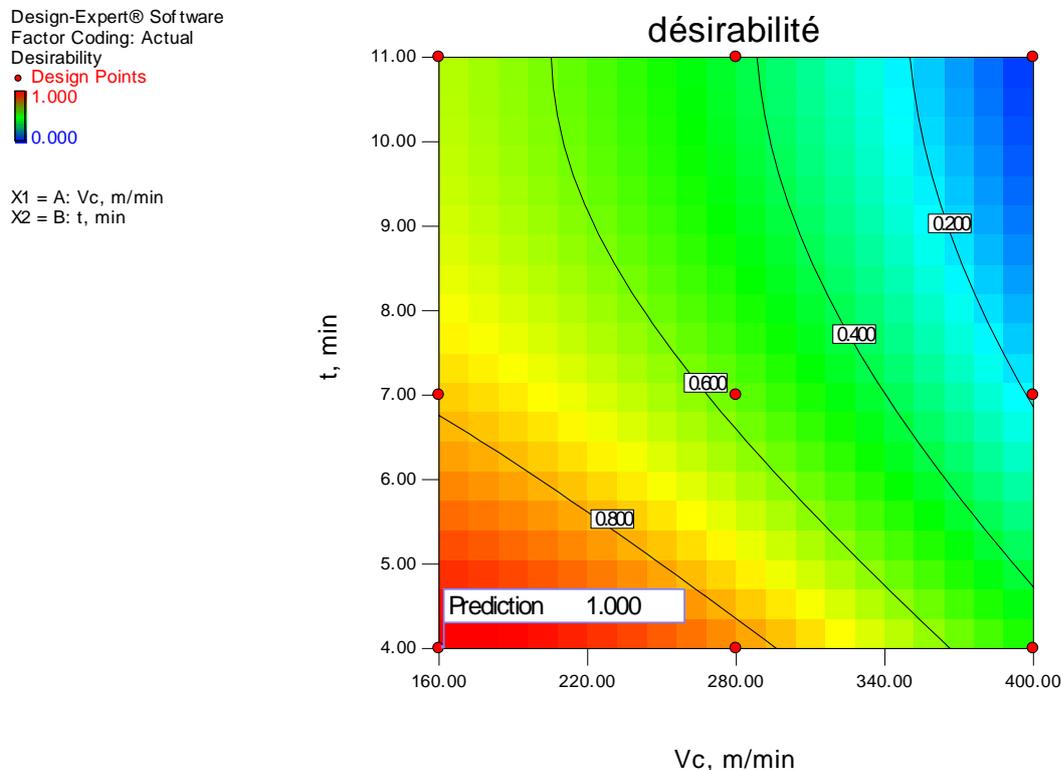


Figure V.6. Graphique de contour de désirabilité pour VB et VN

V.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux types d'optimisation à savoir : l'optimisation mono-objectif, où nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser le volume de copeau enlevé (MRR) et la rugosité arithmétique (Ra), et l'optimisation multi-objectif, où nous avons utilisé la méthode Grise (Grey Relationnel Analysis) pour optimiser le

volume de copeau enlevé (MRR) et la rugosité arithmétique (Ra) simultanément. La méthodologie de surface de réponse (MSR) a été utilisée pour optimiser à la fois les trois critères de rugosité (Ra , Rt et Rz), les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) et l'usure (VB et VN). L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- En règle générale, La vitesse d'avance et la profondeur de coupe ont la plus grande influence sur la rugosité de la surface et le volume de copeau enlevé, respectivement.
- 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 82,24%. Le volume de copeau enlevé est fortement affectés par la profondeur de coupe et représentent une contribution de 41,87% suivi par l'avance avec 23,28% et en dernier lieu la vitesse de coupe avec 19,05%.
- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de :
 - ✓ Méthode de Taguchi est : une vitesse de coupe de $V_c=120$ m/min, une avance de $f = 0,08$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap=0,15$ mm pour une rugosité optimale $Ra = 0,51\mu\text{m}$ ($MRR= 1440$ mm³/min) et $V_c = 280$ m/min, $f = 0,2$ mm/tr et $ap = 0,6$ mm pour MRR ($Ra = 1,22\mu\text{m}$).
 - ✓ L'Analyse Relationnelle Grise est : vitesse de coupe de $V_c = 280$ m/min, avance $f = 0,08$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap = 0,6$ mm, pour une rugosité de surface et un volume de copeau enlevé optimaux ($Ra = 0,58 \mu\text{m}$ et $MRR = 13440$ mm³/min).
- La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse. Par contre la méthode Grise est le meilleur pour l'optimisation multi-objectif.
- L'optimisation par MSR des conditions de coupe les mieux adaptées pour des rugosités ($Ra = 0,523\mu\text{m}$, $Rt = 4,373 \mu\text{m}$ et $Rz = 3,232 \mu\text{m}$) et pour des efforts de coupe ($F_x = 14,19$ N, $F_y = 44,86$ N et $F_z = 43,06$ N) nous a donné : $V_c = 120$ m/min, $f \approx 0,08$ mm/tr et $ap \approx 0,15$ mm et pour l'usure ($VB = 0,042$ mm et $VC = 0,046$ mm), nous a donné : $V_c = (160 \text{ à } 170)$ m/min et $t \approx 4$ minutes.

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 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 inoxydable martensitique *X20Cr13* avec des outils en carbure métallique revêtus.

En se basant sur les résultats trouvés, on peut dégager les principales conclusions suivantes :

- En terme d'effort de coupe, les deux carbures utilisés présentent presque le même comportement. L'effort de coupe le plus important est l'effort de coupe (tangential). Plus l'avance et la profondeur de passe sont élevées, plus les efforts de coupe augmentent, tandis qu'ils amoindrissent avec l'augmentation de la vitesse de coupe.
- La profondeur de passe montre l'influence maximale sur les forces de coupe par rapport à l'avance et à la vitesse de coupe.
- L'étude des pressions spécifiques de coupe a également montré l'existence de deux vitesses pour lesquelles le matériau change de comportement. Ceci a permis de définir exactement le domaine de validité lors de l'usinage de l'acier *X20Cr13* avec des outils en carbure revêtus.
- Conformément aux résultats présentés, la rugosité est fortement affectée par l'avance, tandis que la vitesse de coupe à un effet antagoniste et enfin, la profondeur de passe a une influence négligeable.
- Lorsque la vitesse de coupe dépasse 300 m/min, la détérioration de la rugosité de surface peut être expliquée par la présence des microsoudures sur la surface usinée due à la température élevée dans la zone de coupe. En comparant les valeurs des rugosités obtenues par les deux matériaux de coupe utilisés, on remarque clairement que l'outil

GC1015 donne des rugosités plus faibles par rapport au carbure GC2015 et cela pour toutes les conditions testées.

- L'usure des outils de coupe reste un obstacle majeur. Les effets de l'usure ne sont pas seulement antagonistes à la durée de vie, mais aussi nuisibles à l'état de surface. L'usure des outils en carbure testés est abordée en termes d'usure en dépouille. Principalement, la durée de vie est définie par l'usure en dépouille, ceci est dû à son influence significative sur l'état de la surface finie et la précision dimensionnelle de la pièce usinée. En effet, la comparaison en termes d'usure montre que le carbure GC2015 est le matériau le plus résistant à l'usure avec une durée de vie de 65 min contre 13 min pour le carbure GC1015. Cette grande différence est peut être expliquée par le type de revêtement (CVD/PVD) entre les deux carbures utilisés (manque de Al_2O_3 pour l'outil à revêtement PVD).
- La modélisation du processus de coupe (efforts de coupe, rugosité de surface et usure de l'outil) par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones artificiels a montré une ultime efficacité compte tenu des indicateurs d'adéquation (le coefficient de détermination, la valeur du tableau de Fisher (*F-table*) et le niveau de signification ou la probabilité d'obtenir ce résultat par hasard *P*).
- La comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimés par les modèles RSM et ANN montre clairement que, les modèles issus de la méthode des réseaux de neurones donnent des résultats excellents ($R^2_{(Ra)} = 99,99\%$ et $R^2_{(Fy)} = 99,7\%$) par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse ($R^2_{(Ra)} = 95,28\%$ et $R^2_{(Fy)} = 96,7\%$).
- Les résultats fournis par l'analyse ANOVA ont montré que les modèles issus permettent de prévoir les valeurs des critères de la rugosité, les efforts de coupe et les usures des outils de coupe avec un intervalle de confiance de 95% et un coefficient de détermination élevé (supérieur à 90%).
- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de:
 - ✓ Méthode de Taguchi est : une vitesse de coupe de $V_c = 120$ m/min, une avance de $f = 0,08$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap = 0,15$ mm pour une

rugosité optimale $Ra = 0,51\mu\text{m}$ ($MRR = 1440 \text{ mm}^3/\text{min}$) et $Vc = 280 \text{ m/min}$, $f = 0,2$

mm/tr et $ap = 0,6 \text{ mm}$ pour MRR ($Ra = 1,22\mu\text{m}$).

- ✓ L'Analyse Relationnelle Grise est : vitesse de coupe de $Vc = 280 \text{ m/min}$, avance $f = 0,08 \text{ mm/tr}$, et une profondeur de passe $ap = 0,6 \text{ mm}$, pour une rugosité de surface et un volume de copeau enlevé optimaux ($Ra = 0,58 \mu\text{m}$ et $MRR = 13440 \text{ mm}^3/\text{min}$).
- La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse. Par contre l'Analyse Relationnelle Grise est le meilleur pour l'optimisation multi-objectif.
- L'optimisation par MSR des conditions de coupe les mieux adaptées pour des rugosités ($Ra = 0,523\mu\text{m}$, $Rt = 4,373 \mu\text{m}$ et $Rz = 3,232 \mu\text{m}$) et pour des efforts de coupe ($Fx = 14,19 \text{ N}$, $Fy = 44,86 \text{ N}$ et $Fz = 43,06 \text{ N}$) nous a donné : $Vc = 120 \text{ m/min}$, $f \approx 0,08 \text{ mm/tr}$ et $ap \approx 0,15 \text{ mm}$ et pour l'usure ($VB = 0,042 \text{ mm}$ et $VC = 0,046 \text{ mm}$), nous a donné : $Vc = (160 \text{ à } 170) \text{ m/min}$ et $t \approx 4 \text{ minutes}$.

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 floue et les algorithmes génétiques ...etc).

Références bibliographiques

- [1] **Bedrin C.** Généralités sur la coupe des métaux, lyon, conférences cast, insa de lyon, pp. 5-71 (1971).
- [2] **Documentation CETIM.** Tournage dur et usinage à grande vitesse (ugv), centre technique des industries mécaniques (CETIM), rapport, pp. 86 (2000).
- [3] **Remadna M.** Le comportement du système usinant en tournage dur, application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (nitride de bore cubique), thèse de doctorat, INSA de lyon, pp. 220-243 (2001).
- [4] **Documentation Sandvik Coromant.** Main catalogue, the official website of the sandvik coromant (2006): <http://www.coromant.sandvik.com> (accessed april 10, 2007).
- [5] **Bouchelagheme H.** Etude du comportement des outils CBN lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D3, thèse doctorat (2011).
- [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 phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage cBN des aciers durcis, application : usinabilité de l'acier 100cr6, thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, décembre, pp. 10 -11 (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] **Mayer R.** « Evolution des outils de coupe, acier rapide et métaux durs » aciers spéciaux n°43, (1978).
- [12] **Pierozak J.P.** « Coupe des métaux » office des publications universitaires, 11/88, pp.10- 16.
- [13] **Bagur F.** Matériaux pour outils de coupe, techniques de l'ingénieur, traité de génie mécanique. bm 7080, (1990).
- [14] **Documentations Garant-Tools.** Manuel d'usinage garant, principes de base, pp. 142-152 (2007).

Adresse internet :

www.hoffmann-group.com/download/fr/zhb_fr_2007_2008/links_stichwort_hof/120-159.pdf

- [15] **Brigitte V.** Etude du comportement du rayon d'arête et de son influence sur l'intégrité de surface en tournage à sec. Docteur de l'université François – Rabelais, 17 (juin 2008).
- [16] **Pastor H.** Etat actuel et développement des matériaux durs et super durs, matériaux et techniques, 2^{ème} partie, pp.319-327 (1987).
- [17] **Boutin Y.** L'usinage à grande vitesse (6 de 6), section : les matériaux d'outils de coupe.
Adresse internet :
<http://magazinemci.com/supmetal/articles/2005/08/aout0506.htm> 16/01/2008
- [18] **Mach'pro.** Qui coupe quoi. Edition 15 novembre (2000).
- [19] **RECH J.** Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage, thèse de doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers, pp. 290 (2002).
- [20] **Ber A, Goldblatt M.** The influence of temperature gradient on cutting tools life, annals of the cirp, vol. 38, n°1, pp. 69-73 1989).
- [21] **Documentations.** Mitsubishi : problèmes/solutions, (2002).
Adresse Internet :
www.mitsubishicarbide.com/french/reference/wear.htm
- [22] **Documentations.** Euro inox, qu'est-ce que l'acier inoxydable ?, the european stainless steel. development association.
Adresse internet :
www.euro-inox.org/pdf/map/what_is_stainless_steel_fr.pdf
- [23] **Trombert C, Trombert C.** Usinabilité des aciers inoxydables, techniques de l'ingénieur, m726 (2001).
- [24] **En10088-1 :** aciers inoxydables. - partie 1 : liste des aciers inoxydables
- [25] **Michel D.** Aide-mémoire sciences des matériaux, éditions. Dunod, paris, (ISBN 978-2-10-005458-9), pp. 212 (2004).
- [26] **Baralis J, Barralis J, Maeder G.** Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation, collection « les précis afnor/nathan », (ISBN 978-2-09-179582-9), pp. 102 (2005).
- [27] **Pierre J.** « aciers inoxydables, critères de choix et structures », traité « matériaux métalliques », Techniques de l'ingénieur, m 4540-8 (2000).
- [28] **Davim JP.** Machining of hard materials. Springer, vorlag london limited. ISBN 987-1-84996-449-4 (2011).

- [29] **Yang W, Tang Y.** Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the taguchi method. *J Material Processes Technology* 84(1–3), pp.122–129 (1998).
- [30] **Ross P.J.** Taguchi techniques for quality engineering. McGraw–hill int edn, Singapore (1996).
- [31] **Chandrasekaran M, Muralidhar M, Murali C.K & Dixit U.S.** Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review. *I J Advanced Manufacturing Technology*, 46, pp. 445 – 464 (2010).
- [32] <http://fr.wikipedia.org/wiki/algorithmique>, (2003).
- [33] **Math Works.** Inc, matlab R 2007a, (2007).
- [34] **Vayssade c.** Court d'optimisation en mécanique, minimisation locale sans limite. Université de technologie de compiègne, (2004).
- [35] **Korkut I, Mustafa K, Ibrahim C, Ulvi S.** Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel, *Materials and Design*, 25, pp.303–305 (2004).
- [36] **Eyup B, Eref A.** A study of taguchi optimization method for identifying optimum surface roughness in CNC face milling of cobalt-based alloy (stellite 6), *Int J Advanced manufacture Technology*, 29, pp. 940–947 (2006).
- [37] **Ciftci I.** Machining of austenitic stainless steels using CVD multilayer coated cemented carbide tools, *Tribology International* 39, pp. 565–569 (2006).
- [38] **Senthil k, Raja D, Sornakumar T.** The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 173, pp. 151–156 (2006).
- [39] **Bruni C, Forcellese A, Gabrielli F, Simoncini M.** Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420b, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, pp. 1547–1554 (2006).
- [40] **Noordin M.Y, kurniawan D, sharif S.** Hard turning of stainless steel using wiper coated carbide tool, *Int. J. Precision Technology*, vol. 1, no. 1, (2007).
- [41] **Noordin M.Y, Venkatesh VC, Sharif S.** Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools, *Journal of Materials Processing Technology* 185, pp. 83–90 (2007).
- [42] **El-tamimi, El-hossainy.** Investigating the machinability of AISI 420 stainless steel using factorial design, *Materials and Manufacturing Processes*, 23, pp. 419–426 (2008).

- [43] **Liew H, Ding X.** Wear progression of carbide tool in low-speed end milling of stainless steel. *Wear* 265, pp.155–166 (2008).
- [44] **Liew H.** Experimental study on the performance of coated carbide tools in the ultra-precision machining of stainless steel, *Tribology Transactions*, 52, pp. 293-302 (2009).
- [45] **Bouacha K, Yallese M.A, Mabrouki T, Rigal J.F.** Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 28, pp. 349–361 (2010).
- [46] **Denni K, Mohd N & Sharif S.** Hard machining of stainless steel using wiper-coated carbide: tool life and surface integrity, *materials and manufacturing processes*, 25, pp. 370–377, (2010).
- [47] **El-tamimi M, Soliman M.S, El-hossainy T.M & Muzher J.A.** Developed models for understanding and predicting the machinability of a hardened martensitic stainless steel, *materials and manufacturing processes*, 25, pp. 758–768 (2010).
- [48] **Razfar M.R, Asadnia M, Haghshenas M, Farahnakian M.** Optimum surface roughness prediction in face milling X20Cr13 using particle swarm optimization algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224 no. 11, pp. 1645-1653 (2010).
- [49] **Süleyman N, Süleyman Y, Erol T.** Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology, *Measurement*, 44, pp. 580–587 (2011).
- [50] **Jianxin D, Zhou J, Zhang H, Yan P.** Wear mechanisms of cemented carbide tools in dry cutting of precipitation hardening semi-austenitic stainless steels. *Wear*, 270, pp. 520–527 (2011).
- [51] **Mandal, Doloi B, Mondal B, Reeta D.** Optimization of flank wear using zirconia toughened alumina (zta) cutting tool: Taguchi method and regression analysis. *Measurement*, 44, pp. 2149–2155 (2011).
- [52] **Aouici H, Yallese M.A, Chaoui K, Mabrouki T, rigal J.F.** Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with cbn tool: prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement*, 45, pp. 344–353 (2012).
- [53] **Zinati R & Reza M.** Constrained optimum surface roughness prediction in turning of X20Cr13 by coupling novel modified harmony search-based neural network and modified harmony search algorithm. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, 58, pp. 93–107 (2012).

- [54] **Hanafi I, Khamlichi A, Francisco M.C, 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).
- [55] **Ilhan A, Süleyman N.** Multi response optimisation of CNC turning parameters via taguchi method-based response surface analysis. *Measurement*, 45, pp. 785–794 (2012).
- [56] **El-tamimi A, Soliman M.S, El-hossainy T.M & Muzher, J.A.** Developed models for understanding and predicting the machinability of a hardened martensitic stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 25:8, pp.758-768 (2010).
- [57] **Barrau O.** Etude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. Thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de Toulouse (2004).
- [58] **Suresh R, Basavarajappa S, Samuel G.L.** Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer-coated carbide tool. *Measurement*, 45, pp.1872–1884 (2012).
- [59] **Andonov I, Bekech. Y.** Analyse et synthèse des processus technologiques en construction mécanique, Technica, Sofia (1984).
- [60] **Clément B.** Design and analysis of experiments, Génistat Conseils INC, (2002).
- [61] **Goupy J.** «Introduction aux plans d'expériences». Dunod. Paris. pp. 303 (2001).
- [62] **Technique d'ingénieur f1005.** Planification expérimentale en agroalimentaire (2006).
- [63] **Technique d'ingénieur f1006.** Plans d'expériences méthode de Taguchi (2007).
- [64] **Ross P.** Taguchi techniques for quality engineering loss function. Orthogonal experiments. Parameter and tolerance design, Mcgraw-hill. New York, pp. 10-50 (1988).
- [65] **Weil R.** Techniques d'usinage, Dunod, Paris (1971).
- [66] **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).
- [67] **Afnor : NF E 66-520-1 :** Norme Française, couple outil matière “domaine de fonctionnement des outils coupants : présentation générale”
- [68] **Afnor : NF E 66-520-2 :** Norme française couple outil matière “domaine de fonctionnement des outils coupants : description générale”
- [69] **afnor : NF E 66-520-2 :** norme française couple outil matière “domaine de fonctionnement des outils coupants : application à la technologie de tournage”
- [70] **Raphet B.** Etats de surface - caractérisation, in techniques de l'ingénieur - sciences & techniques, vol. 1230, pp. 22 (2005).

- [71] **Cnomo**. Guide de capitalisation pour la caractérisation et la mesure des états de surface en complément à la normalisation ISO. 2000, Ge40-084n. pp. 27. Available from: <http://www.cnomo.com/fr>.
- [72] **Yusuf S, Riza M.A.** Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool. *Material. Design*, 26, pp. 321-326 (2005).
- [73] **Xavior M.A, Adithan M.** Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel, *J. Materials. Process. Technology*, 209, pp. 900–909 (2009).
- [74] **Davim J.P.** *Machining of hard materials*. Springer, (2011).
- [75] **Arsecularatne J.A, Zang L.C, Montross C, Mathew P.** On machining of hardened AISI d2 steel with PCBN tools. *J. Materials. Processes. Technology*, 171, pp. 244-252 (2006).
- [76] **Bouchelaghem H, Yallese M.A, Mabrouki T, Amirat A, Rigal J.F.** Experimental investigation and performance analysis of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). *Machining. Science and. Technology: an Int. J*, 14, pp. 471-501 (2010).
- [77] **Chinchanikar S, Choudhury S.K.** Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: an optimization approach. *Measurement*, 11, 032 (2012).
- [78] **Fnides B, Aouici H, Yallese M.A.** Rugosité de surface et température en tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 usiné par une céramique mixte (Al_2O_3+TiC). 2^{ème} congrès national de mécanique, CNM2, 07-08. Nr (F37), Avril (2008).
- [79] **Mata F, Gaitonde Y.N, Karnik S.R, Davim J.P.** Influence of cutting conditions on machinability aspects of peek, peek cf 30 and peek gf 30 composites using PCD tools. *Journal of Materials processing Technology*, 209 1980–1987 (2009). [doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.04.060](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.060).
- [80] **Fnides B, Yallese M.A, Mabrouki T, Rigal J.F.** Application of response surface methodology for determining cutting force model in turning hardened AISI H11 hot work tool steel. *Sadhana, J. Indian acad. sci., (springer)* 36(part 1), pp. 109–123 (2011).
- [81] **Muthukrishnan N, Davim J.P.** Optimization of machining parameters of Al/Sic-MMC with anova and ANN analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, pp. 225–232 (2009).
- [82] http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_neurones_artificiels/01/04/2015.

- [83] **Patrice W.** Réseaux de neurones artificiels : architectures et applications, Université de Haute Alsace Laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus, Systèmes) Avril (2009).
- [84] <http://alp.developpez.com/tutoriels/intelligence-artificielle/reseaux-de-neurones> 30/03/2015.
- [85] **Taguchi G.** Taguchi on robust technology development methods. ASME Press, New York, pp. 1–40 (1993).
- [86] **Pillet M.** Avant les plans d'expériences, l'entonnoir à x!, 6eme colloque expérimentique orleans 13 juin, (2002).
- [87] **Taguchi G.** System of experimental design, unipub/kraus, international publication (1987).
- [88] **Emel K, Babur O.** Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro milling of Al 7075 material with ball nose end mill. Measurement, 46, pp. 1849–1864 (2013).
- [89] **Pal S, Sahoo K.** Tribological performance optimization of electroless ni–p coatings using the Taguchi method and grey relational analysis. Tribol let, 28, pp. 191–201 (2007).
- [90] **Noorul H.A, Marimuthu P, Jeyapaul R.** Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the taguchi method. Int J Advanced Manufacturing Technology, 37, pp. 250–255 (2008).
- [91] **Deng J.** Introduction to grey system theory. J Grey System, 1, pp. 1–24 (1989).
- [92] **Tosun.** Determination of optimum parameters for multiperformance characteristics in drilling by using grey relational analysis. Int J Advanced Manufacturing Technology, 28, pp. 450–455 (2006).
- [93] **Lin C.L.** Use of the Taguchi method and grey relational analysis turning operations with multiple performance characteristics, materials and manufacturing processes, 19, No. 2, pp. 209-220 (2004).
- [94] **Mukherjee I, Ray P.K.** A review of optimization techniques in metal cutting processes. Computers & Industrial Engineering, 50, pp. 15–34 (2006).
- [95] **Enache S.** La qualité des surfaces usinées. Dunod, Paris, (1972).
- [96] **Khuri A.I, Cornel J.** Response surfaces : design and analysis, marcel dekker (éditeur), New York, NY, USA, (1987).

- [97] **Myers R.H.** Montgomery D.C. Response surface methodology, 2nd ed. Wiley & Sons (éditeurs), New York, NY, USA, (2002).
- [98] **Gained Y.N, Karnik S.R, Faustino M, Davim J.P.** Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in edm electrodes. *Int J Refract Metals hard Mater*, 27, pp. 754-63 (2009).
- [99] **Zarepour H, Fadaei H, Karimi D, Amini S.** Statistical analysis on surface roughness in edm process of tool steel DIN 1.2714 used in forging dies. In: proceedings of Ampt, Las Vegas, USA, July 30-august 3 (2006).
- [100] **Myers R.S, Montgomery D.C.** Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc.: New York, (2002).

Les travaux de cette thèse ont été présentés via plusieurs articles et communications internationales et nationales qui sont comme suit :

Publications:

Article intitulé: Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel. a été publié dans la revue "**Springer**" **International Journal of Advanced Manufacturing technology**, Vol. 74(2014) 879 – 891.

Auteurs: **Lakhdar Bouzid**, Smail Boutabba, Mohamed Athmane Yallese, Salim Belhadi and Francois Girardin

Article intitulé: Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology, a été publié dans la revue "**IMEchE**" **Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture**, Vol. 229(1) (2015) 45–61.

Auteurs: **Lakhdar Bouzid**, Mohamed Athmane Yallese, Kamel Chaoui, Tarek Mabrouki and Lakhdar Boulanouar

Article intitulé: RMS-based optimisation of surface roughness when turning AISI 420 stainless steel, a été publié dans la revue "**Inderscience**" **Int. J. Materials and Product Technology**, Vol. 49, No. 4 (2014) 224-251.

Auteurs: **Lakhdar Bouzid**, Mohamed Athmane Yallese, Salim Belhadi, Tarek Mabrouki and Lakhdar Boulanouar

Communications internationales :

Bouzid Lakhdar et al. "RSM based modeling when turning AISI 420 stainless steel", **3^{ème} Congrès Tunisien de Mécanique COTUM2014**, Sousse-Tunisie, 24, 25 et 26 Mars 2014.

Bouzid Lakhdar et al. "Modelling and optimization of surface roughness and material removal rate based on grey relational analysis method", **International conference multiphysics modelling and simulation for system design MMSSD'2014**, Sousse-Tunisie, 17 et 19 December 2014.

Bouzid Lakhdar et al. "Modélisation de la rugosité de surface et de l'usure de la céramique revêtue lors de l'usinage d'un acier fortement allié", **8^{ème} journées d'études techniques JET'2014**, Marrakech-Maroc, 28, 29 et 30 avril 2014.

Bouzid Lakhdar et al. "Prédiction de l'usure de la céramique CC6050 lors l'usinage de l'acier X210Cr12", **Conférence Internationale sur la Maintenance et La sécurité Industrielle CIMSI'2013**, Skikda-Algérie, 28-29 Octobre 2013.

Bouzid Lakhdar et al. “Predictive modelling of surface roughness parameters in turning using response surface methodology”, *4^{ème} Congrès Algérien de Mécanique CAM 2013, Mascara-Algérie, 25-28 Novembre 2013.*

Bouzid Lakhdar et al. “Etude de la rugosité de surface de l’inconel 718 usiné par une céramique composite renforcé par des fibres en SiC”, *1er Congrès International des Composites et des Matériaux Avancés, Khenchela-Algérie, 03 et 04 Mars 2014.*

Bouzid Lakhdar et al. “Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel using grey relational analysis based upon Taguchi method”, *Conférence internationale de mécanique et matériaux ICMM14, Sétif-Algérie, 16 et 17 November 2014.*

Communications Nationales :

Bouzid Lakhdar et al. “Comportement des outils de coupe en carbure métallique lors du tournage d’un acier inoxydable martensitique X20C13”, *Workshop de Métallurgie et Matériaux Innovants, Oran, Algérie, 28-30 Avril 2013.*

Bouzid Lakhdar et al. “Modélisation de la rugosité de surface de l’acier inoxydable x20c13 basé sur la méthodologie de surface de réponse”, *Deuxième Journée d’Étude sur la Mécanique et l’Electromécanique, JEMEM II, El Oued-Algérie, Jeudi 24 avril 2014.*