

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



Université 08 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR

Utilisation des plans d'expériences en TD pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage

Filière : Génie Mécanique

Option : Productique

Présenté par : AZIZI Mohamed Walid

Devant le jury :

Pr BOULANOUAR L.	Professeur	Université d'Annaba	Président
Pr YALLESE M. A.	Professeur	Université de Guelma	Rapporteur
Pr LABAIZ M.	Professeur	Université d'Annaba	Examineur
Pr DARSOUNI A.	Professeur	Université d'Annaba	Examineur
Dr BELBAH A.	M.C.A	Université de Guelma	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mon très cher père et à ma très chère mère;

Ma femme et à mon petit Ange 'Mohamed Islam' ;

Mes sœurs et mon frère ;

Toute ma famille ;

Mes amis.

REMERCIEMENTS

*Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur **YALLESE 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 **BOULANOUAR Lakhdar**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar-Annaba d'avoir accepté de présider le jury.*

*J'exprime aussi ma gratitude à Messieurs: **LABAIZ Mohamed**, Professeur au département de Métallurgie et Génie des Matériaux, Université Badji Mokhtar-Annaba; **DARSOUNI Abderrezak**, Professeur au département de Métallurgie et Génie des Matériaux, Université Badji Mokhtar-Annaba et **BELBAH Ahmed**, 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 mes remerciements à tous les membres, les thésards et les techniciens du Laboratoire de Mécanique et Structure (**LMS**).*

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE.....16

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.	Généralités sur la coupe des métaux	20
I.1	Usinage.....	20
	I.1.1 Définition de l'usinage	20
	I.1.2 La coupe orthogonale	20
	I.1.3 Le chariotage paraxial	20
I.2	Le tournage	21
I.3	Les paramètres de coupe en tournage	21
	I.3.1 Vitesse de coupe	21
	I.3.2 L'avance par tour	22
	I.3.3. La profondeur de passe	22
I.4	Géométrie des outils de coupe et les zones de cisaillement	22
	I.4.1 Zones de coupe	23
	I.4.2 Les angles de coupe	23
I.5.	Tournage dur	24
	I.5.1 Définition du tournage dur	24
	I.5.2 Avantage du tournage dur par rapport à la rectification	25
I.6	Etat de l'art sur le tournage des matériaux durcis	26
I.7	Matériaux des outils de coupe et revêtement.....	37
	I.7.1. Matériaux des outils de coupe	37
	I.7. 2. Les revêtements.....	40
I.8	Morphologie des copeaux	41
I.9	Mécanismes d'usure	43
	I.9.1. Les phénomènes d'usure	43
	I.9.2 Formes d'usure	44
I.10	Définition de l'état de surface	48
	I.10.1 Défauts de surface	48
	I.10.2 Rugosité de la surface	49
	I.10.3 Profil de rugosité	49
I.11	Effort de coupe	50
	I.11.1 Définition l'effort de coupe	50
	I.11.2 Intérêt de mesure des efforts de coupe	52
I.12	Conclusion	52

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES

II.1	Introduction	54
II.2	Méthodologie des plans d'expériences	54
II.2.1	Historique	54
II.2.2	Principe	55
II.2.3	Expérimentations	56
II.2.4	Modélisation de la réponse	57
II.2.5	Intérêt du codage des variables	58
II.2.6	Principales composantes de la méthodologie des plans d'expériences.....	59
II.2.7	Méthode Taguchi	60
II.2.7.1	La démarche de la méthode Taguchi	60
II.2.7.2	Le choix d'une table de Taguchi	61
II.2.8	Technique du screening	61
II.2.9	Méthodologie des Surfaces de Réponse	63
II.2.9.1	Régression multilinéaire	64
II.2.9.2	Recherche globale de l'ajustement du modèle	65
II.2.9.3	Le R^2 ajusté	66
II.2.9.4	Stratégie de sélection du meilleur sous-modèle	66
II.2.9.5	Plans Composite Centraux	67
II.2.9.6	Propriétés des plans composites centrés	68
II.2.9.7	Utilité des points au centre du domaine d'étude.....	69
II.3	L'optimisation multicritères	70
II.3.1	Introduction	70
II.3.2	Méthode de désirabilité	70
II.4	Conclusion	74

CHAPITRE III : PROCEDURE EXPERIMENTALE

III.1	Introduction	76
III.2	Banc d'essais et équipement de mesure	76
III.2.1	Machine outil	76
III.2.2	Le matériau utilisé pour les essais d'usinage	77
III.2.3	Traitement thermique des éprouvettes	79
III.2.4	Microstructure	83
III.2.5	Plaquettes de coupe utilisée	84
III.2.6	Porte outil.....	85
III.2.7	Appareillage de mesures utilisées	86
III.2.7.1	Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	86
III.2.7.2	Duromètre	87
III.2.7.3	Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	88

III.2.7.4	Microscope pour mesure de l'usure (VB)	89
III.2.7.5	Autres moyens utilisé	89
III.3	Planification des expériences	89
III.3.1	Introduction	89
III.3.2	Méthode de variation d'un facteur à la fois	90
III.3.3	Les plans d'expériences	90
III.4	Conditions de coupe	92
III.5	Conclusion	94

CHAPITRE IV : ETUDE DE L'EFFET DES PARAMETRES DE COUPE (V_c, f, ap, H et r) SUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE D'USINAGE

IV.1	Introduction.....	96
IV.2	Influence de la dureté de la pièce sur les efforts de coupe	96
IV.2.1	Effet de la vitesse de coupe.....	96
IV.2.2	Effet de l'avance.....	98
IV.2.3	Effet de la profondeur de passe.....	99
IV.3	Influence de la dureté de la pièce sur les critères de rugosité.....	100
IV.3.1	Effet de la vitesse de coupe.....	100
IV.3.2	Effet de l'avance.....	102
IV.3.3	Effet de la profondeur de passe.....	103
IV.4	Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté de la pièce et du temps.....	104
IV.5	Evolution des critères de rugosité en fonction de la dureté de la pièce et du temps...	106
IV.6	Evolution de l'usure (VB_c) en fonction de la dureté de la pièce et du temps.....	107
IV.7	Influence du rayon du bec de l'outil sur les efforts de coupe	108
IV.7.1	Effet de la vitesse de coupe.....	108
IV.7.2	Effet de l'avance	110
IV.8	Influence du rayon du bec de l'outil sur les critères de rugosité.....	111
IV.7.1	Effet de la vitesse de coupe.....	111
IV.7.2	Effet de l'avance.....	113
IV.9	Conclusion	114

CHAPITRE V : MODELISATION ET OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE EN TD PAR LA METHODE DE TAGUCHI

V.1	Introduction.....	116
-----	-------------------	-----

V.2	Planification expérimentale	116
V.3	Interprétation des résultats.....	118
	V.3.1 Analyse ANOVA pour Ra	118
	V.3.2 Évolution des efforts de coupe en fonction de de Vc, f, ap et H	119
	V.3.3 Modèles de régressions linéaires multiples de la rugosité de surface et les efforts de coupe.....	122
	V.3.4 Surfaces de réponses.....	123
V.4	Optimisation des paramètres de coupe.....	128
V.5	Validation des résultats.....	133
V.6	Analyse par la methode de taguchi.....	134
	V.6.1 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	136
	V.6.1.1 Analyse des effets principaux sur la rugosité surface (Ra).....	137
	V.6.1.2 Analyse des effets principaux sur l'effort radial (Fr).....	138
	V.6.2 Analyse des interactions sur la rugosite surface (Ra).....	139
	V.6.3 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	140
	V.6.4 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	142
V.7	Conclusion.....	143

**CHAPITRE VI : APPLIQUATION LA METHODOLOGIE DES
SURFACES DE REPONSE POUR L'OPTIMISATION DES
INDICATEURS DE PERFORMANCE D'USINAGE EN UTILISANT LE
PLAN COMPOSITE CENTRE**

VI.1	Introduction.....	146
VI.2	Planification expérimentale	146
VI.3	Interprétation des résultats.....	149
	V.3.1 Sensibilité de la rugosité de surface en fonction de Vc, f, ap et r	149
	V.3.2 Analyse de régression pour Ra en fonction de Vc, f, ap et r	150
	V.3.3 Évolution des efforts de coupe en fonction de Vc, f, ap et r	151
	V.3.4 Analyse de régression des efforts de coupe en fonction de Vc, f, ap et r	155
	V.3.5 Surfaces de réponses	157
VI.4	Optimisation des paramètres de coupe.....	162
VI.5	Validation des résultats.....	164
VI.6	Conclusion.....	165
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....		167
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		171
ANNEXES.....		179

NOMENCLATURE

ANOVA :	Analyse de variance.
a_p :	Profondeur de passe (mm).
f :	Avance par tour (mm/tr).
F :	Effort de coupe résultant (N).
$F_a (F_x)$:	Effort de coupe axial (N).
$F_r (F_y)$:	Effort de coupe radial (N).
$F_t (F_z)$:	Effort de coupe tangentiel (N).
HRC :	Dureté Rockwell.
HV :	Dureté Vickers.
K :	Pression (effort spécifique) de coupe (N/mm ²).
K_a :	Pression (effort spécifique) de coupe axiale (N/mm ²).
K_r :	Pression (effort spécifique) de coupe radiale (N/mm ²).
K_c :	Pression (effort spécifique) de coupe tangentielle (N/mm ²).
P_c :	Puissance de coupe (Watt).
R^2 :	Coefficient de détermination.
R_a :	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
R_t :	Rugosité totale (μm).
MSR :	Méthodologie de surface de réponse.
R_z :	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
r_e :	Rayon de bec de l'outil (mm).
t :	Temps d'usinage (min).
TD	Tournage dur
VB_c :	Usure en dépouille (mm).
V_c :	Vitesse de coupe (m/min).
α :	Angle de dépouille principal (degré).
γ :	Angle d'attaque (degré).
λ :	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).
χ :	Angle de direction principal (degré).

INDEX DES FIGURES

Figure I-1	Le principe du tournage	21
Figure I-2	Représentation et définition des paramètres : vitesse de coupe (V_c), avance (f) et profondeur de passe (ap)	22
Figure I-3	Définition des différentes zones de l'outil, des zones de coupe et des zones de cisaillement de la matière	24
Figure I-4	Angles de coupe d'un outil de coupe.....	24
Figure I-5	Opération de chariotage du tournage dur.....	25
Figure I-6	Comparatif de coûts entre tournage dur et rectification	26
Figure I-7	Effet de la micro géométrie d'arête sur la rugosité de surface pour différents d'avance et dureté	27
Figure I-8	Effet de la micro géométrie d'arête sur l'effort radial équivalent lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 (57HRC) pour différents avance.....	27
Figure I-9	Formation d'une bande blanche dans le 100Cr6 avec carbures	29
Figure I-10	Évolution les efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille.....	29
Figure I-11	L'influence des efforts de coupe, la dureté de la pièce et la vitesse de coupe lors du tournage dur de l'acier 100Cr6.....	31
Figure I-12	L'effet des conditions de coupe sur les facteurs de réponse: (a) la rugosité de surface (R_a) ; (b) la force tangentiel (F_c) et (c) la force radiale(F_r)	32
Figure I-13	Le pourcentage de contribution de chaque facteur (V , f , et d) pour différentes réponses (F_a , F_r , F_t et R_a)	33
Figure I-14	Optimisation multiple facteurs de réponse (R_a et R_t)	34
Figure I-15	Observation sur MEB de l'usure de l'outil (CC6050)	35
Figure I-16	Évolution l'usure de l'outil: (a) usure en dépouille; (b) profondeur de cratère .	35
Figure I-17	Influence des paramètres de coupe sur (R_a) for la fonte blanche (Ni-dur) avec la dureté 62 HRC.....	36
Figure I-18	Influence des paramètres de coupe sur (R_a) for la fonte blanche (Ni-dur) avec la dureté 50 HRC	36
Figure I-19	Microstructure des outils de coupe en céramiques	39
Figure I-20	Différents matériaux et revêtements d'outils	40
Figure I-21	Le revêtement	41
Figure I-22	Procédés de fabrication de CVD et PVD	41
Figure I-23	Morphologie des copeaux	42
Figure I-24	Morphologies de copeaux obtenus à différentes valeurs de dureté Vickers HV lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 (AISI 52100.....	42
Figure I-25	Modes d'usure prédominants selon la température	43
Figure I-26	Usure de l'outil et ses phénomènes	45
Figure I-27	Les différentes formes d'usure	47
Figure I-28	Défauts de surface.....	48
Figure I-29	Définition de la rugosité R_a (norme ISO 428)	49

Figure I-30	Topographie de surface obtenue en tournage dur et son profil	50
Figure I-31	Rôle de l'usure de l'outil sur la hauteur de crête maximale	50
Figure I-32	Composantes de l'effort de coupe	51
Figure II-1	La boîte noire du processus	55
Figure II-2	Plan de régression pour deux variables	58
Figure II-3	Surface de Réponse.....	64
Figure II-4	Plan composite centré pour 3 facteurs.....	67
Figure III-1	Opération de chariotage sur la machine outil utilisée	76
Figure III-2	Micrographies du 100Cr6 (a): brute de coulée ; (b): à l'état recuit après attaque au Nital	77
Figure III-3	Représentation schématique du mode d'usinage des essais des efforts de coupe et rugosité.....	78
Figure III-4	Représentation schématique du mode d'usinage des essais d'usure.....	78
Figure III-5	Éprouvette utilisée pour l'étude de l'influence du rayon bec de l'outil.....	78
Figure III-6	Cycles des traitements thermiques utilisés pour obtenir différentes dureté. ...	80
Figure III-7	Four à chambre électrique pour le traitement thermique des éprouvettes.....	81
Figure III-8	Diagramme (Transformation-Temps-Température) de l'acier 100Cr6	82
Figure III-9	Diagramme de revenu pour l'acier 100Cr6.....	82
Figure III-10	Opérations de traitement thermique.....	83
Figure III-11	Observation MEB de deux états métallurgiques du 100Cr6	83
Figure III-12	Plaquette céramique CC6050.....	84
Figure III-13	Plaquette céramique CC650.....	85
Figure III-14	Porte outil utilisé.....	86
Figure III-15	Plate forme d'effort de coupe.....	86
Figure III-16	Chaîne de mesure des efforts de coupe.....	87
Figure III-17	Duromètre type DM2-D 390.....	88
Figure III-18	(a)Rugosimètre SurfTest 201(Mitutoyo);(b) Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.....	88
Figure III-19	(a) Microscope de mesure de l'usure frontale; (b) Stéréo- microscope pour prendre les photos de l'usure.....	89
Figure IV-1	Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et de la vitesse de coupe pour $f=0.08 \text{ mm/tr}$ et $ap=0.2\text{mm}$	97
Figure IV-2	Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et de l'avance pour $Vc=120 \text{ mm/tr}$ et $ap=0.2\text{mm}$	99
Figure IV-3	Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et de la profondeur de passe pour $Vc=120 \text{ m/min}$ et $f=0.08\text{mm/tr}$	100
Figure IV-4	Impact de la dureté et de la vitesse de coupe sur la rugosité pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $ap=0.2\text{mm}$	101
Figure IV-5	Impact de la dureté et de l'avance sur la rugosité pour $Vc=120\text{m/min}$, $ap=0.2\text{mm}$	103

Figure IV-6	Impact de la dureté et de la profondeur de passe sur la rugosité pour $V_c=120m/min, f=0.08mm/tr$	104
Figure IV-7	Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et du temps d'usinage pour $V_c=170m/min, f=0.08mm/tr$ et $ap=0.2mm$	105
Figure IV-8	Evolution des critères de rugosités en fonction de la dureté et du temps d'usinage pour $V_c=170m/min, f=0.08mm/tr$ et $ap=0.2mm$	107
Figure IV-9	Evolution de l'usure en dépouille (V_{Bc}) en fonction du temps d'usinage et de la dureté de la pièce pour $V_c = 170 m/min, f = 0,08 mm/tr$ et $ap = 0.2mm$	107
Figure IV-10	Valeurs de l'usure en dépouille (V_{Bc}) en fonction du temps et de la dureté de la pièce d'usinage pour $V_c = 170 m/min, f = 0,08 mm/tr$ et $ap = 0.2 mm$	108
Figure IV-11	Evolution des efforts de coupe en fonction du rayon bec de l'outil et de la vitesse de coupe pour $f=0.08 mm/tr$ et $ap = 0.2mm$	110
Figure IV-12	Evolution des efforts de coupe en fonction du rayon bec de l'outil et de l'avance pour $V_c = 180 m/min$ et $ap = 0.2mm$	111
Figure IV-13	Impact du rayon bec de l'outil et de la vitesse de coupe sur la rugosité pour $f=0.08mm/tr, ap=0.2mm$	112
Figure IV-14	Impact du rayon bec de l'outil et de l'avance sur la rugosité pour $V_c = 180 m/min, ap=0.2mm$	114
Figure V-1	Probabilités normales des erreurs pour (a): R_a ; (b): F_a ; (c): F_r et (d): F_t	121
Figure V-2	Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour R_a, F_a, F_r et F_t	123
Figure V-3	Effet de l'avance et de la dureté de la pièce sur la rugosité de surface.....	124
Figure V-4	Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface.....	125
Figure V-5	Effet de la vitesse de coupe et de la dureté de la pièce sur R_a	125
Figure V-6	Effet de la dureté de la pièce et la profondeur de passe sur l'effort axial.....	126
Figure V-7	Effet de la dureté de la pièce et la profondeur de passe sur l'effort radial.....	127
Figure V-8	Effet de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort de coupe tangentiel.....	128
Figure V-9	Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (R_a) et des efforts de coupe (F_a, F_c et F_p	133
Figure V-10	Graphique des effets principaux de V_c, f, ap et H sur ratio S/B (R_a).....	138
Figure V-11	Graphique des effets principaux de V_c, f, ap et H sur l'effort radial (F_r).....	139
Figure V-12	Diagramme des interactions de V_c, f, ap et H sur la rugosité surface (R_a).....	140
Figure V-13	Diagramme des interactions de V_c, f, ap et H sur le ratio S/B (F_r).....	141
Figure V-14	Comparaison entre les valeurs mesurés et estimés par regression des ratios S/B pour R_a et F_r	141
Figure VI-1	Plan composite à faces centrées composé de six points (06) centraux.....	147
Figure VI-2	Probabilités normales des résidus de la rugosité de surface (R_a)	150
Figure VI-3	Comparaison entre les valeurs mesurés et estimés de R_a	151

Figure VI-4	probabilités normales des résidus des efforts de coupe.....	154
Figure VI-5	Comparaison entre les valeurs mesurés et estimés des composantes de l'effort de coupe (a): F_a , (b): F_r et (c): F_t	157
Figure VI-6	Effet de l'avance et rayon du bec de l'outil sur la rugosité de surface (R_a)....	158
Figure VI-7	Effet de l'avance et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface (R_a)	159
Figure VI-8	Effet de la vitesse de coupe et rayon du bec de l'outil sur R_a	160
Figure VI-9	Effet de l'avance et la profondeur de passe sur l'effort axial (F_a)	160
Figure VI-10	Effet de l'avance, la profondeur de passe et la vitesse de coupe sur l'effort radial.....	161
Figure VI-11	Effet de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort de coupe tangentiel.....	161
Figure VI-12	Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (R_a) et des efforts de coupe (F_a , F_c et F_p)	164

INDEX DES TABLEAUX

Tableau I-1	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de la surface (Ra)32
Tableau II-1	Calcul des niveaux des facteurs68
Tableau II-2	Valeurs de δ fonction du nombre de points au centre du domaine.69
Tableau III-1	Composition chimique de l'acier à roulement 100Cr679
Tableau III-2	Propriétés mécaniques et thermiques de l'acier à roulement 100Cr679
Tableau III-3	Conditions de traitement thermique.....81
Tableau III-4	Caractéristiques du four électrique.....81
Tableau III-5	Informations relatives aux plaquettes utilisées84
Tableau III-6	Caractéristiques de la porte plaquette utilisée85
Tableau III-7	Table Orthogonale de Taguchi L27 (3^{13})91
Tableau III-8	Plan composite à face centrée avec six (06) points centré (30 essais).....92
Tableau III-9	Conditions de coupe pour les essais d'usure, l'effort de coupe et de Ra93
Tableau III-10	Conditions de coupe pour les essais d'usure, l'effort de coupe et de Ra93
Tableau III-11	Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe et de rugosité94
Tableau III-12	Paramètres de coupe et leurs niveaux94
Tableau III-13	Paramètres de coupe et leurs niveaux.94
Tableau V-1	Résultats expérimentaux de la rugosité (Ra) et des efforts de coupe...117
Tableau V-2	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra).....119
Tableau V-3	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort de coupe.....120
Tableau V-4	Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usinage.....131
Tableau V-5	Conditions optimales.....132
Tableau V-6	Intervalles de prévision optimale des réponses.....132
Tableau V-7	Validation expérimentale pour la rugosité de surface.....134
Tableau V-8	Validation expérimentale pour les efforts de coupe134
Tableau V-9	Résultats expérimentaux de Ra , Fr et les ratios Signal/Bruit (S/B).....136
Tableau V-10	Moyenne des ratios S/B (Ra) pour chaque niveau des facteurs.....137
Tableau V-11	Moyenne des ratios S/B (Fr) pour chaque niveau des facteurs.....138
Tableau V-12	Validation expérimentale pour Ra142
Tableau V-13	Validation expérimentale pour Fr142
Tableau VI-1	Résultats expérimentaux de la rugosité de surface et des efforts de coupe..148
Tableau VI-2	Analyse de la variance ANOVA pour Ra149
Tableau VI-3	Analyse de la variance ANOVA pour Fa152
Tableau VI-4	Analyse de la variance ANOVA pour Fr152
Tableau VI-5	Analyse de la variance ANOVA pour Ft153
Tableau VI-6	Les contraintes pour l'optimisation des paramètres d'usinage.....162
Tableau VI-7	Conditions optimales pour chaque rayon du bec d'outil.....163
Tableau VI-8	Intervalles de prévision optimale des réponses.....163
Tableau VI-9	Validation expérimentale pour la rugosité de surface.....165
Tableau VI-10	Validation expérimentale pour les forces de coupe165

Résumé

L'impact économique des coûts de fabrication et des exigences techniques sur l'état de surface du produit fini lors du tournage dur impose le choix des conditions de coupe. Ce qui exige la nécessité d'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, ainsi que l'optimisation des conditions de coupe.

L'un des points importants de cette étude est d'entrevoir l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, dureté de la pièce, rayon du bec et le temps d'usinage) sur l'usinabilité de l'acier à roulement (AISI 52100) lors du tournage dur avec des plaquettes céramiques mixte revêtue (CC6050) et non revêtue (CC650). Ainsi que, la mise en évidence de l'évolution des efforts de coupe, des critères de rugosités et d'usure en dépouille.

Les deux dernières parties de cette thèse sont réservée à la modélisation de la rugosité de surface et de l'effort de coupe, en utilisant la méthode de Taguchi (MT) et la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) en tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100). Les modèles mathématiques développés sont couplés avec une technique d'optimisation multi-réponses afin de trouver les conditions de coupe optimales permettant d'obtenir la plus basse rugosité de surface et générer les minimums des efforts de coupe.

Finalement, les tests de validation des résultats expérimentaux ont montré la fiabilité des modèles développés.

Mots clés : Tournage dur ; méthodologie des plans d'expériences; ANOVA ; Céramique mixte; Taguchi.

Summary

The economic impact of manufacturing costs and technical requirements on the surface of the finished product when hard turning requires the choice of cutting conditions. This requires the need for use of experiments to quantify the influence of cutting parameters on machining performance indicators in order to develop predictive models and optimization of cutting conditions.

An important point of this study is to glimpse the influence of cutting parameters (cutting speed, feed, depth of cut, workpiece hardness, nose radius and the machining time) on machinability of bearing steel (AISI 52100) during hard turning with mixed ceramic coated tool (CC6050) and uncoated (CC650). Thus, highlight the evolution of the cutting forces, the criteria of roughness and flank wear.

The last two parts of this thesis are dedicated to the modeling of surface roughness and cutting force, using the Taguchi method (MT) and response surface methodology (RSM) in hard turning of bearing steel (AISI 52100). The developed mathematical models are coupled with a multi-response optimization to find the optimal cutting conditions to obtain good surface finish and minimum cutting force technique.

Finally, the validation tests of the experimental results have shown the reliability of the developed models.

Keywords: Hard turning; designs of experimental; ANOVA; Mixed Ceramic; Taguchi.

ملخص

الأثر الاقتصادي لتكاليف التصنيع والمتطلبات التقنية على سطح المنتج النهائي أثناء عملية الخراطة الصلبة يتطلب اختيار شروط القطع المثلى. وهذا يتطلب الحاجة في استخدام منهجية التصميم هو دراسة وقياس تأثير شروط القطع من أجل تطوير نماذج تنبؤية والاستفادة المثلى من شروط القطع.

نقطة مهمة هذه الأطروحة هو دراسة وقياس تأثير شروط القطع (سرعة القطع، سرعة التقدم، عمق القطع، وصلابة سطح القطعة المشغلة، نصف قطر أنف أداة القطع ووقت القطع) أثناء التشغيل الفولاذ الصلب (AISI 52100) خلال عملية الخراطة الصلبة بأداة القطع السيراميك المختلطة (CC6050) و (CC650) وبالتالي، تسليط الضوء على تطور قوى القطع، خشونة السطح و تآكل أداة القطع.

عمل هذه الأطروحة تنسجم في استخدام منهجية التصميم وتطوير المعادلات المتوقعة لخفض قوى القطع وخشونة السطح استنادا لشروط القطع، وذلك باستخدام طريقة Taguchi (MT) واستخدام منهجية السطح (RSM) أثناء التشغيل الفولاذ الصلب (AISI 52100) من ناحية أخرى نحن مهتمون في تحسين العوامل التكنولوجية متعددة من أجل العثور على القيم المثلى لخفض شروط القطع فيما يتعلق بأهداف الحد.

أخيرا، فإن أهمية هذه النماذج المطورة يكون فعالة للغاية بالمقارنة مع القياسات التجريبية.

الكلمات الرئيسية: الخراطة الصلبة، ANOVA، منهجية التصميم، سيراميك مختلط، Taguchi

INTRODUCTION GENERALE

L'usinage des aciers traités avec des duretés élevées supérieures à 45 HRC est un des procédés de mise en forme des pièces mécaniques les plus utilisés dans l'industrie automobile, le tournage dur est tout particulièrement compétitif. Ce procédé a été développé pour remplacer des opérations très coûteuses, telles que la finition par abrasion, et pour protéger l'environnement en supprimant la lubrification (recours à l'usinage à sec). Malgré les avancées dont a bénéficié ce procédé, notamment la mise en œuvre des matériaux de coupe extra durs comme les nitrures de bore cubique et les céramiques, il ne s'est encore pas répandu dans l'industrie. Ainsi, le grand nombre des facteurs qui influent sur le tournage dur et dont le fabricant doit tenir compte, rendent plus difficile le choix de ces conditions. Parmi ces facteurs, on peut mentionner: la dureté du matériau, la géométrie de l'outil de coupe, les conditions de coupe, l'interaction entre l'outil de coupe et la pièce. 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 pour l'optimisation des conditions de coupe.

Ces constatations nous ont conduits à développer des travaux de recherche ayant pour objectifs :

- L'étude de l'influence des paramètres de coupe, soit, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, la dureté de la pièce et le rayon du bec de l'outil sur les indicateurs de performance d'usinage (l'usure d'outil, les efforts de coupe et la rugosité de surface) lors du tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100) avec des plaquettes céramiques mixte revêtue (CC6050) et non revêtue (CC650).
- La modélisation pour l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage (efforts de coupe et la rugosité de surface) en fonction des paramètres de coupe qui ont un effet significatif on utilisant la méthodologie des plans d'expériences.

Ainsi, cette thèse s'articule autour de six grands chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le tournage dur des matériaux métalliques en général. Ce dernier représente une nouvelle technique d'usinage. Nous montrons l'intérêt économique qu'il peut apporter et les limites actuelles pour son développement à l'échelle industrielle, ces avantages par rapport à la rectification. Ensuite

nous examinons les phénomènes régissant le processus de coupe en particulier, l'usure des outils, les efforts de coupe, la rugosité de surface et la morphologie du copeau. Une autre partie très importante est réalisée dans ce chapitre, ayant pour but de présenter des travaux de recherche relatifs au tournage dur des aciers durcis et l'utilisation des plans d'expérience.

Le second chapitre s'intéresse aux concepts théoriques de la méthodologie des plans d'expériences (MPE). Après avoir expliqué la démarche à suivre pour générer cette méthodologie, nous décrivons les plans d'expériences que nous avons utilisés (le plan de Taguchi et le plan composite centré). Nous présentons ensuite les analyses nécessaires pour valider les modèles polynomiaux utilisés, ainsi que l'optimisation multicritère qui consiste à transformer toutes les réponses en fonctions de la désirabilité individuelle dont la nature dépend des objectifs de l'étude.

Dans **le troisième 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 du traitement thermique des éprouvettes et les conditions de coupe et aussi les plans d'expériences utilisés.

Le quatrième chapitre s'articule en deux grandes parties. La première partie est particulièrement destinée à l'étude de l'influence de la dureté de la pièce en fonction les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et temps d'usinage) sur les efforts de coupe, les critères de rugosité et l'usure en dépouille (VB_c) en fonction de la dureté de la pièce et le temps lors de l'usinage avec l'outil céramique mixte revêtue (CC6050). Nous présentons aussi quelques formes d'usure en fonction du temps d'usinage et cela pour différentes duretés de la pièce. La seconde partie du chapitre traite l'influence du rayon bec de l'outil en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) sur les efforts de coupe et les critères de rugosité lors de l'usinage avec l'outil céramique mixte (CC650).

Ainsi, **le cinquième chapitre** présente l'étude et l'analyse statistique de la variance (ANOVA) des résultats afin de développer les modèles mathématiques des facteurs de réponse (efforts de coupe et rugosité de surface) en fonction des paramètres de coupe (dureté de la pièce, vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) lors du tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100) avec l'outil céramique mixte revêtue. La planification d'expériences basée sur le plan de Taguchi (L_{27}) et les valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ont été calculés à l'aide du logiciel (*Design Expert version 8*). Dans ce chapitre nous présentons

l'approche de la fonction désirabilité pour la détermination des conditions de coupe optimales. Finalement, une comparaison entre les résultats obtenus par les équations de prédictions et les mesures expérimentale.

Le dernier chapitre est consacré à la modélisation polynomiale de second ordre et l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage (efforts de coupe et rugosité de surface) en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de coupe et rayon du bec de l'outil) on utilisant le plan composite à face centré de (30 essais) lors du tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100) avec l'outil céramique mixte (CC650). Ainsi, les modèles mathématiques développés par la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) sont couplés à une technique d'optimisation simultanée de plusieurs réponses afin de déterminer les conditions de coupe optimales.

Des perspectives sont regroupées en fin de cette thèse pour proposer des voies d'amélioration du tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100) étudiés.

CHAPITRE

I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

*Dans cette étude bibliographique nous présentons une synthèse des travaux relatifs à la coupe des métaux. Dans un premier temps nous présentons brièvement les principaux paramètres associés au tournage, nous dresserons un bilan des différents travaux expérimentaux sur le tournage des aciers durcis et les phénomènes physiques liés au le processus de coupe. La description du nouveau procédé d'usinage, appelé « **tournage dur** » a pris à son tour une part non négligeable dans cette étude. Nous nous intéresserons ensuite sur les nouvelles perspectives de développement des matériaux à outils, tout en analysant profondément les mécanismes d'usure des outils de coupe.*

I. GENERALITES SUR LA COUPE DES METAUX

I.1. USINAGE

I.1.1 Définition de l'usinage

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière, destinée à conférer une forme, des dimensions et un état de surface adaptés à l'utilisation finale d'une pièce, tout en respectant les tolérances préconisées [FEL 97]. Les paramètres influençant la coupe sont relativement nombreux. Ils peuvent se regrouper en trois grandes familles suivant ce sur quoi ils agissent :

- Les paramètres liés au procédé : vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe, type d'opération...etc.
- Les paramètres liés à l'outil : géométrie, forme, angles de coupe, nuance du substrat, revêtement, fixation de l'outil...etc.
- Les paramètres liés à la pièce usinée qui se composent en deux sous -parties :
 - paramètres géométriques : forme, et diamètre du lopin,...etc.
 - paramètres liés au matériau (dureté, composition chimique, état microstructural..) regroupés sous la dénomination d'usinabilité.

Ces paramètres étant relativement nombreux, pour en limiter le nombre, le choix est souvent fait en tournage d'étudier deux configurations : la coupe orthogonale et le chariotage paraxial.

I.1.2 La coupe orthogonale

Cette opération permet de réduire au maximum le nombre de paramètres pour faciliter l'analyse et décrire simplement l'interaction entre l'outil, le copeau et la pièce. La coupe orthogonale implique une arête de coupe rectiligne et perpendiculaire à la fois à la direction donnée par la vitesse de coupe V_c et à celle donnée par la vitesse d'avance.

Cette opération est très intéressante car si l'on se place dans une configuration avec une profondeur de passe faible par rapport à la largeur du palier, il est possible de se ramener à un problème plan, et plus précisément à un état de déformation plane (effets de bords négligés).

I.1.3 Le chariotage paraxial

C'est une opération de coupe permettant d'usiner un cylindre par le déplacement de l'outil. On définit, en premier lieu une profondeur de passe (ap) en déplaçant l'outil perpendiculairement à l'axe, puis l'outil suit son mouvement d'avance parallèlement à l'axe de rotation du cylindre.

Le chariotage paraxial comporte plus de paramètres ce qui rend la compréhension des phénomènes plus difficile comparativement à la coupe orthogonale. Mais son étude est importante car cette opération reste très utilisée industriellement [BAL 01].

I.2 LE TOURNAGE

Le tournage est un procédé de mise en forme par enlèvement de matière. Il fait intervenir un outil de coupe à arête unique qui enlève de la matière sur une pièce mise en rotation. La matière enlevée est évacuée sous forme de copeau.

Les paramètres de coupe sont les grandeurs que l'on peut contrôler lors d'une opération. Ils conditionnent les phénomènes mécaniques mis en jeu au cours de la coupe et sont à l'origine des puissances mécaniques et thermiques dissipées.

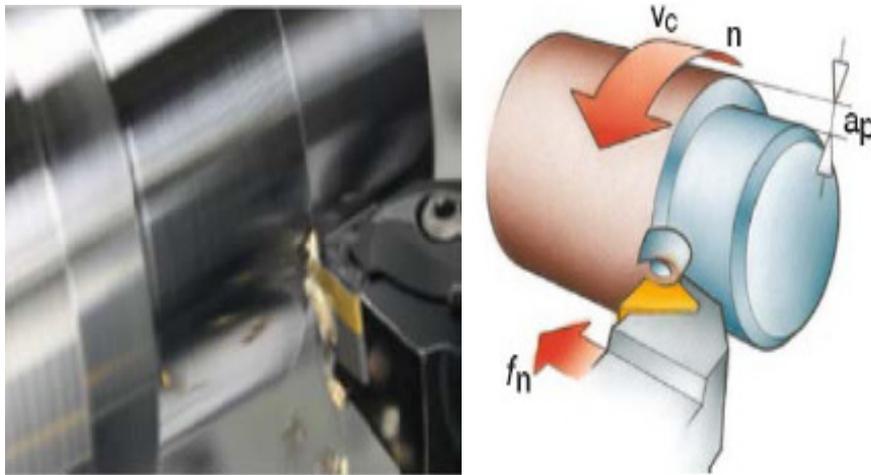


Figure I-1 Le principe du tournage [PAS 10].

En tournage, le chariotage (figure I-1) est une opération consistant à usiner sur un tour un cylindre d'un certain diamètre par déplacement de l'outil de coupe suivant un axe parallèle à l'axe de rotation de la pièce Z . Les paramètres de coupe sont l'avance (f), la profondeur de passe (ap) et la fréquence de rotation (N).

I.3 LES PARAMETRES DE COUPE EN TOURNAGE

Les conditions de coupe mises en jeu pendant le tournage, hormis les caractéristiques de l'outil, sont :

I.3.1 Vitesse de coupe

Le choix de la vitesse de coupe (V_c) dépend de la nature de l'opération effectuée et du couple outil-matière (caractéristiques physiques et mécaniques du matériau usiné et du matériau usinant). En pratique, la vitesse de coupe est réglée par la vitesse de rotation de la pièce. Cette

vitesse dépend de la vitesse de coupe et du diamètre de la pièce à usiner. La relation reliant la vitesse de coupe et la vitesse de rotation est donnée par l'équation (I.1) [HAB 06].

$$N [\text{tour.mn}^{-1}] = \frac{1000 \times V_c [\text{m.mn}^{-1}]}{\pi \times D [\text{mm}]} \quad (\text{I.1})$$

I.3.2 L'avance par tour

L'avance correspond au déplacement de l'outil en fonction de la rotation de la pièce pendant la formation de copeau. L'avance est notée f et est exprimée en mm.tour^{-1} (figure. I-2). Comme pour la vitesse de coupe, en pratique, l'avance s'exprime en vitesse d'avance V_f . Cette dernière représente la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport au bâti de la machine selon les axes longitudinal et transversal et en fonction du nombre de tours effectués par la pièce. Elle est donnée par l'Equation (I.2).

$$V_f = N \cdot f \quad (\text{I.2})$$

I.3.3. La profondeur de passe

La profondeur de coupe est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de passe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance.

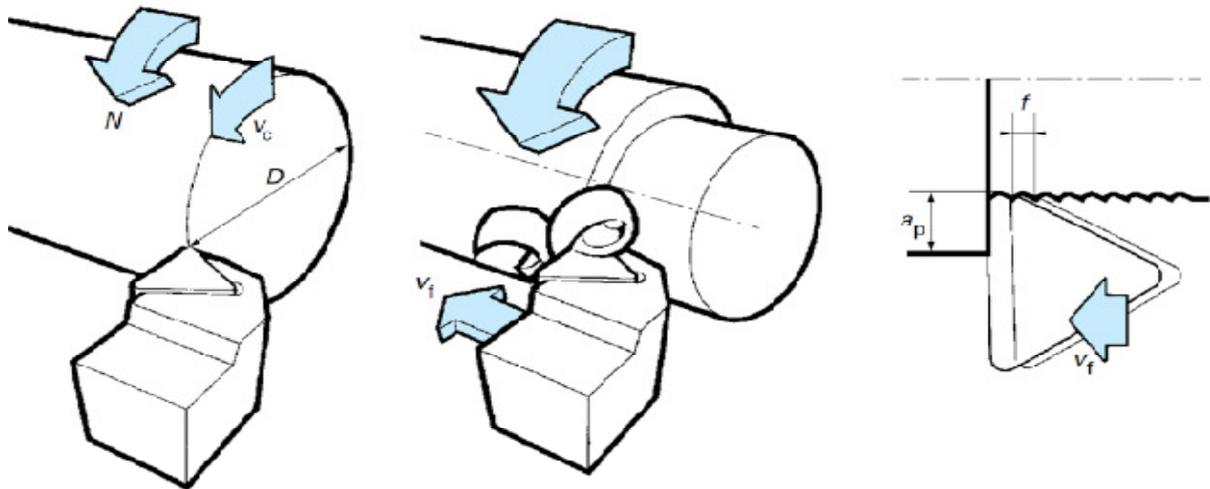


Figure I-2 Représentation et définition des paramètres : vitesse de coupe (V_c), avance (f) et profondeur de passe (a_p) [PAS 10].

I.4 GEOMETRIE DES OUTILS DE COUPE ET LES ZONES DE CISSAILLEMENT

L'outil de coupe peut être défini comme l'élément directement responsable de l'enlèvement de la matière lors de l'usinage. Quatre paramètres principaux déterminent le domaine d'utilisation des outils : la géométrie, le matériau du substrat, le type de revêtement et les conditions de lubrification. Au niveau géométrique, il est important de définir les zones principales de l'outil (figure I-3).

I.4.1 Zones de coupe

Sur la figure I-3, on peut définir également les différentes zones de cisaillement généralement reconnues en usinage.

- **La zone de cisaillement primaire (ZCP)** : où le flux de matière (arrivant à la vitesse de coupe sur l'outil) est fortement cisailé pour changer de direction et se diriger vers le copeau.
- **La zone de cisaillement secondaire (ZCS)** : siège de phénomènes de frottement intenses entre le copeau et la face de coupe de l'outil.
- **La zone de cisaillement tertiaire (ZCT)** : il s'agit du lieu de frottement entre la face de dépouille de l'outil et la surface de la pièce fraîchement usinée. L'usure en dépouille, les contraintes résiduelles et l'intégrité de surface dépendent directement des pressions de contact, des températures et des flux générés à cette interface.

I.4.2 Angles de coupe

Un outil de coupe est défini par deux plans : la face de coupe et la face de dépouille. L'intersection de ces deux plans constitue l'arête de coupe. En réalité ces deux plans sont reliés par le rayon de bec (R_c) de l'arête de coupe, En se plaçant à l'échelle du processus de coupe et de l'écoulement de la matière autour de cette arête, on remarque que cette dernière représente en réalité un rayon appelé rayon d'acuité d'arête (R_β).

Trois angles, dont la somme est égale à 90° , sont nécessaires pour définir les caractéristiques géométriques d'un outil :

- **Angle de coupe (γ)** : c'est l'angle entre la face de coupe et un plan de référence P (perpendiculaire à la direction d'usinage). L'angle de coupe affecte la capacité de l'outil à cisailier le matériau à usiner. Il peut être positif, négatif ou nul (figure I-4). Les angles de coupe positifs réduisent les efforts de coupe, tandis que des angles de coupe négatifs apportent de la robustesse à l'arête de coupe de l'outil [LER 93]. Sa valeur se trouve généralement entre -5° et $+5^\circ$, quelque fois entre -10° et $+10^\circ$ et plus rarement entre -20° et $+20^\circ$.
- **Angle de dépouille (α)** : c'est l'angle entre la face de dépouille et la surface usinée. Sa valeur, nécessairement positive, oscille généralement entre 2° et 10° .
- **Angle de taillant (β)** : Il caractérise la robustesse de l'outil. L'acuité de l'arête de coupe n'est jamais parfaitement aiguë et est définie par le rayon d'arête (R_c) (zone de raccordement entre deux faces de l'outil). La grandeur du rayon d'arête dépend de la technique d'élaboration et du matériau de l'outil (accessoirement du type de traitement superficiel appliqué – revêtements). Plus il est grand, plus l'acuité de l'outil est solide et ce dernier plus résistant à la rupture. Un rayon d'arête plus important dissipe mieux la chaleur mais engendre

en contre partie des efforts de coupe plus importants (travail de la plus grande longueur de l'arête de coupe).

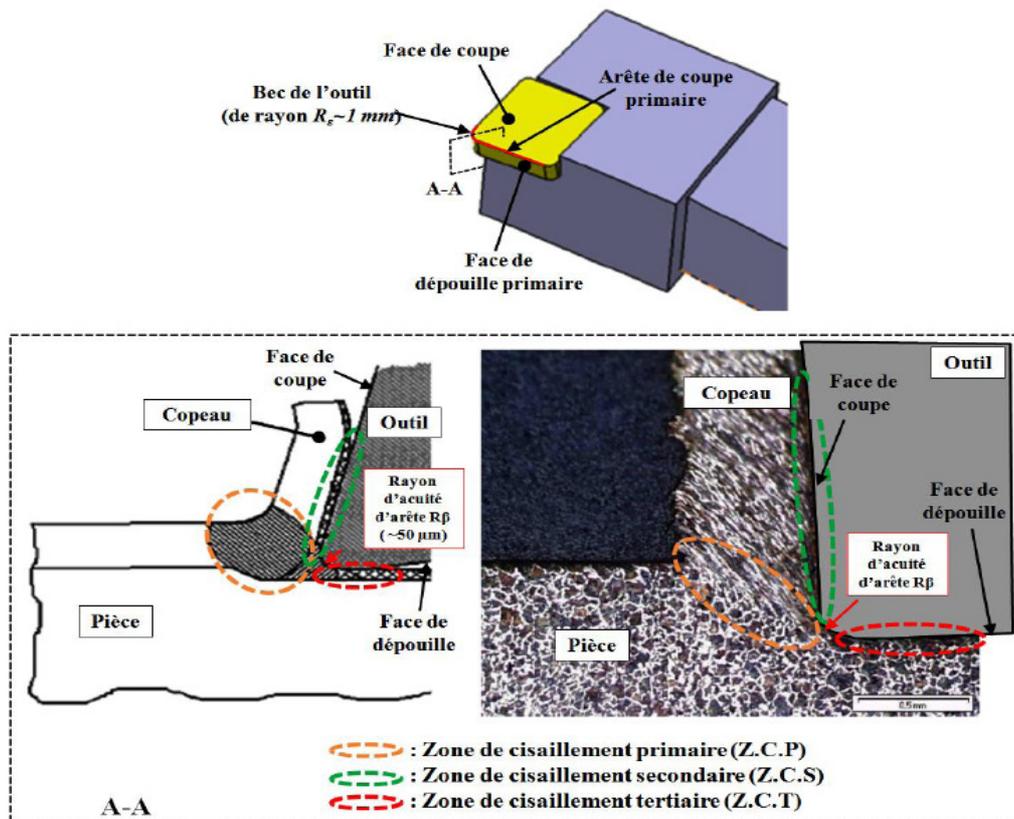


Figure I-3 Définition des différentes zones de l'outil, des zones de coupe et des zones de cisaillement de la matière [REC 04].

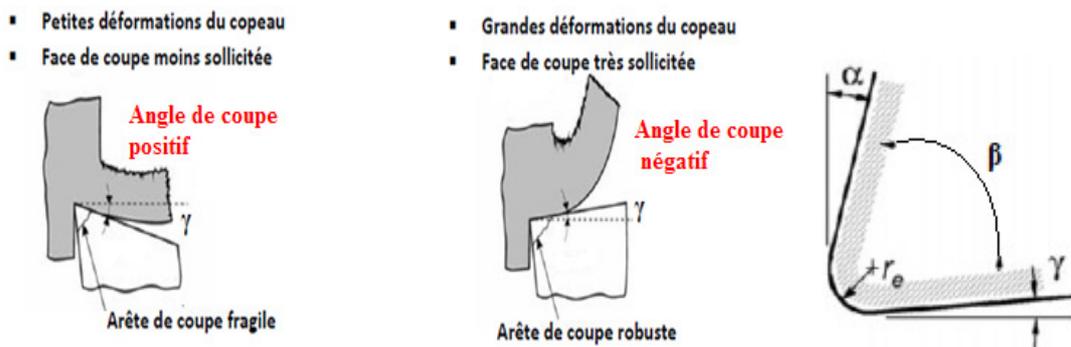


Figure I-4 Angles de coupe d'un outil de coupe simple [BAL 01].

I.5. TOURNAGE DUR

I.5.1 Définition du tournage dur (TD)

Le tournage des aciers d'une dureté supérieure à 45 HRC, de manière typique dans la plage 55 à 68 HRC, s'appelle le **tournage dur** (figure I-5). C'est une alternative économique à la

rectification. Le tournage dur s'est avéré capable de réduire les temps d'usinage et les coûts de plus de 70 % tout en apportant plus de flexibilité, une qualité plus élevée et des temps de production moins longs.

L'arrivée sur le marché de matériaux de coupe super durs tels que le nitrure de bore cubique (CBN) et les céramiques à base d'oxyde d'aluminium, ainsi que de nouvelles machines plus performantes, font du tournage dur un processus de fabrication fiable pour la production en grandes séries. Aujourd'hui, le tournage dur est bien accepté et tout à fait en mesure de répondre aux objectifs de productivité de l'industrie visant à une meilleure qualité de pièces finies et une réduction des temps de cycle.



Figure I-5 Opération de chariotage du tournage dur (**Sandvik Coromant**).

Dans l'industrie automobile, le tournage dur est tout particulièrement compétitif. Les exigences croissantes de productivité et de réduction des coûts ont amené les constructeurs à réaliser le tournage des composants de boîtes de vitesses et de transmissions à l'état trempé. Les pièces couramment usinées par tournage dur sont, par exemple, les pignons de boîtes de vitesses, les rotors de freins, les pignons de transmission, les rotules de direction, les sièges de soupapes, les blocs moteurs, les pistons, les chemises de cylindres et les carters d'embrayage. Les constructeurs conçoivent désormais ces pièces dans l'objectif du tournage dur et non plus de la rectification [ZKE 07].

I.5.2 Avantage du tournage dur par rapport à la rectification

- Le tournage dur est une méthode d'usinage à un seul point de contact qui permet d'usinage des contours complexes sans avoir recours aux meules de forme coûteuses que nécessite la rectification à points de contact multiples.
- Le tournage dur permet en outre de réaliser plusieurs opérations en un seul montage avec une excellente précision de positionnement, moins de manipulations et une baisse des risques d'endommagement des pièces.

- L'environnement est également bénéficiaire puisque cette méthode élimine les boues engendrées par la rectification et ne nécessite pas d'arrosage.
- Finalement, le tournage dur réduit les coûts machine et permet une meilleure maîtrise de la production, des rendements plus élevés et une meilleure qualité de la pièce finie.

Tous ces avantages mis bout à bout, il est évident que les économies engendrées par l'adoption du tournage dur sont considérables (figure I-6).

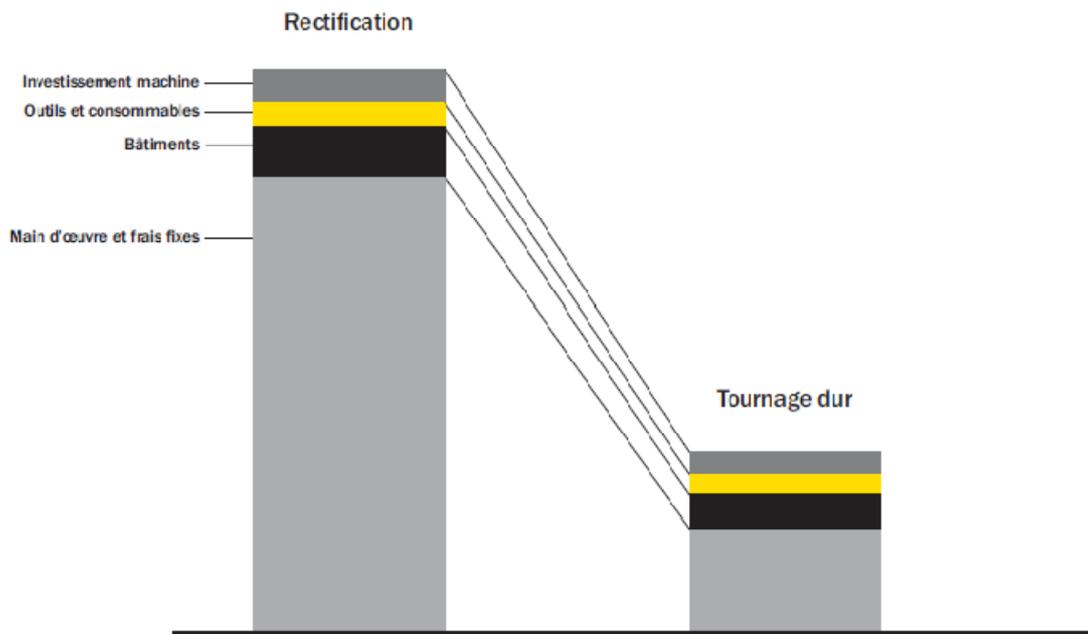


Figure I-6 Comparatif de coûts entre tournage dur et rectification (Sandvik Coromant).

I.6 ETAT DE L'ART SUR LE TOURNAGE DES ACIERS DURCIS

Diverses études ont été entreprises pour étudier et quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les performances d'usinage lors du tournage dur :

[THI 99] et autres ont étudié l'effet de la micro géométrie d'arête sur la rugosité de surface et l'effort de coupe lors du tournage dur de l'acier AISI 52100. Ils ont utilisé trois barres (diamètre de 28.6 mm) à différentes dureté de surface (41, 47 et 57 HRC) et quatre types des plaquettes CBN à différentes micro géométrie d'arête (inferieur à 25 μ m, 76.2 à 127 μ m et 101.6 à 152.4 μ m) et une arête de coupe chanfreinée (114.3 μ m x 17°). Les expériences ont été effectuées en utilisant différentes avances (0.05, 0.10 et 0.15 mm/tr) et une vitesse de coupe et profondeur de passe fixes respectivement de 121.9 m/min et 0.254 mm. Les auteurs ont observé que l'effet de la micro géométrie d'arête sur la rugosité de surface diminue avec l'augmentation la dureté de la pièce (figure I-7). En plus, ils ont conclu que la micro géométrie d'arête a un effet significatif sur les composante axiales et radiales d'effort de coupe (ou l'effort radiale équivalente), comme peuvent être montré sur la figure I-8.

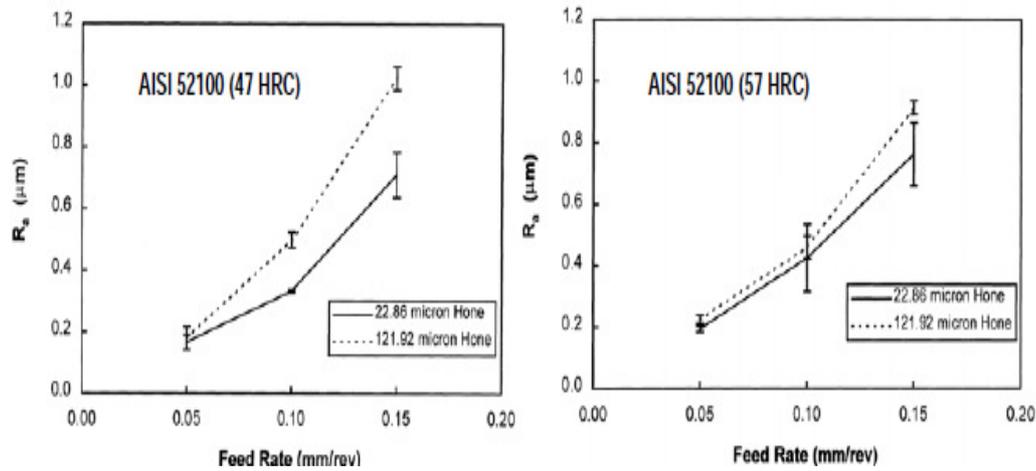


Figure I-7 Effet de la micro géométrie d'arête sur la rugosité de surface pour différents d'avance et dureté [THI 99].

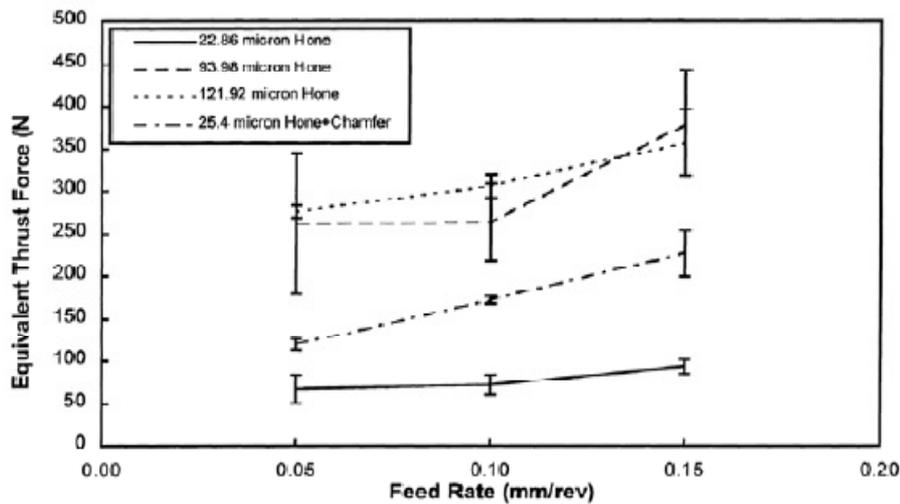


Figure I-8 Effet de la micro géométrie d'arête sur l'effort radial équivalent lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 (57HRC) pour différents avance [THI 99].

[GAI 09] et autres se sont intéressés à l'influence de la profondeur de passe et du temps de coupe sur les performances d'usinage lors du tournage dur de l'acier AISI D2 avec différents plaquettes en céramique (CC650, CC650WG et GC6050WH). Ils ont développé des modèles mathématiques non linéaires. Leurs résultats démontrent que la plaquette CC650WG est mieux performante concernant la rugosité de surface et l'usure de l'outil, alors que la plaquette conventionnelle CC650 est utile en réduisant les efforts de coupe.

[LIM 05] et autres ont étudié l'usinabilité des aciers durcis à différents niveaux de dureté et à l'aide de divers matériaux d'outil de coupe. Leur étude a été concentrée sur l'usinage d'AISI 4340 durci (acier faiblement allié de haute résistance) et d'AISI D2 (acier d'outil travail à

froid). Les résultats ont indiqué que lors du tournage de l'acier AISI 4340, la rugosité de surface des pièces usinées a été améliorée avec l'augmentation de la vitesse de coupe par contre avec l'augmentation de l'avance la rugosité se détériore, tandis que la profondeur de passe présente un effet moins significatif sur l'amélioration de rugosité de surface. L'usinage de l'acier AISI D2 avec les plaquettes mixte à base d'alumine a permis un état de la surface comparable à celui obtenu en rectification cylindrique.

En règle générale, pour l'usinage de matériaux durs (dureté de 45-70 HRC), les procédés de rectification ou de tournage dur peuvent induire un changement de phase en surface [BRO 08], [SMI 07]. Cette épaisseur est classiquement appelée couche blanche s'il y a eu formation de martensite ou couche noire pour une épaisseur ayant subi un revenu. Par contre, [RAM 05] montre lors d'une étude sur un acier 100Cr6 durci (62 HRC) que l'affinage des grains dus à l'intensité de la déformation plastique est la cause de la formation des bandes blanches pour les vitesses de coupe faibles. L'aspect thermique n'est donc pas nécessaire pour obtenir une zone blanche.

Les conditions de coupe ne sont pas les seuls facteurs d'apparition de couches blanches. En effet, plusieurs auteurs ont montré qu'un outil dégradé peut faciliter l'apparition de ces couches ou, au moins, faire évoluer leur épaisseur [CHO 05], [CHE 01].

[HAB 06] montre que la dureté n'est pas le seul facteur d'apparition de couches blanches. La microstructure du matériau joue aussi un rôle primordial, notamment sur leur forme et leur intensité. Il a étudié la morphologie des copeaux lors de l'usinage d'un acier 100Cr6 pour deux microstructures différentes mais ayant la même macro-dureté (52HRC), l'une est martensitique avec une présence homogène de carbures de fer et de chrome non dissous, et l'autre est bainitique avec l'ensemble des carbures dissous par le traitement thermique. Les premières observations montrent que les couches blanches n'ont pas les mêmes aspects morphologiques. La couche blanche est homogène pour le 100Cr6 sans carbure alors qu'elle est discontinue et localisée pour le 100Cr6 avec carbures. Une corrélation (figure I-9) entre des essais de cisaillement à grande vitesse sur des éprouvettes et des essais de coupe est réalisée. Elle permet d'affirmer que la largeur des bandes blanches est d'autant plus grande que la vitesse de déformation augmente. Comme pour les copeaux, les bandes sont plus diffuses lors du cisaillement du 100Cr6 sans carbure. L'auteur conclut que l'apparition des couches blanches est un phénomène thermomécanique gouverné par la vitesse de déformation et la température.

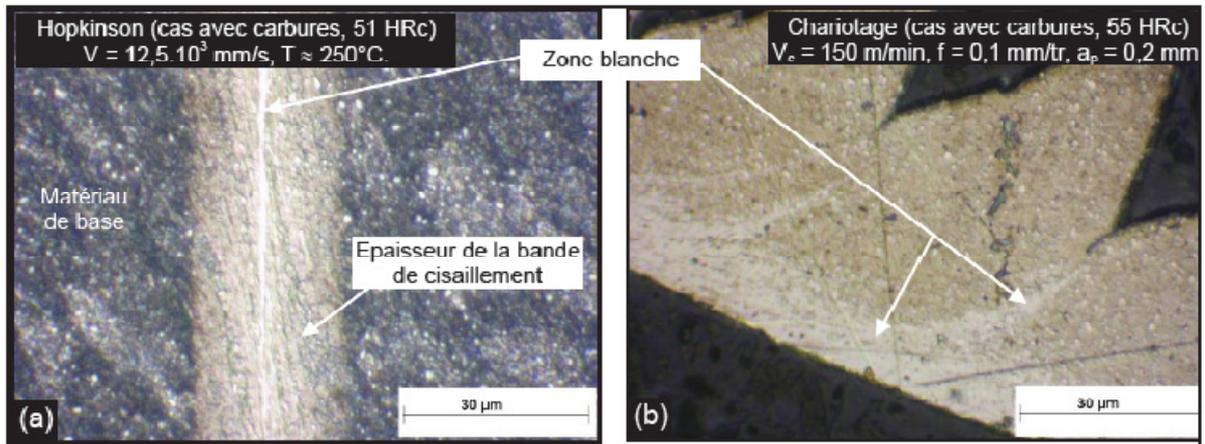


Figure I-9 Formation d'une bande blanche dans le 100Cr6 avec carbures [HAB 06].

[YAL 09] et autres ont étudié l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille pour trois périodes successive (10, 10÷22 et 22÷32 min) lors du tournage dur de l'acier 100Cr6 trempé (60 HRC) avec l'outil CBN. Ils ont remarqué que pour la première période (VB=0.175mm) les efforts de coupe (F_r , F_a et F_c) augmentent avec une valeur respectivement de 33.3%, 25% et 9.5%, et pour la deuxième période (VB=0.175÷0.3mm) les efforts de coupe (F_r , F_a et F_c) augmente avec une valeur respectivement de 11.1% , 16.2% et 16 %. Finalement les efforts de coupe (F_r , F_a et F_c) augmentent avec une valeur respectivement de 50% , 26.3% et 10.3 % quand l'usure en dépouille (VB) augmente de 0.3 à 0.41mm (figure I-10).

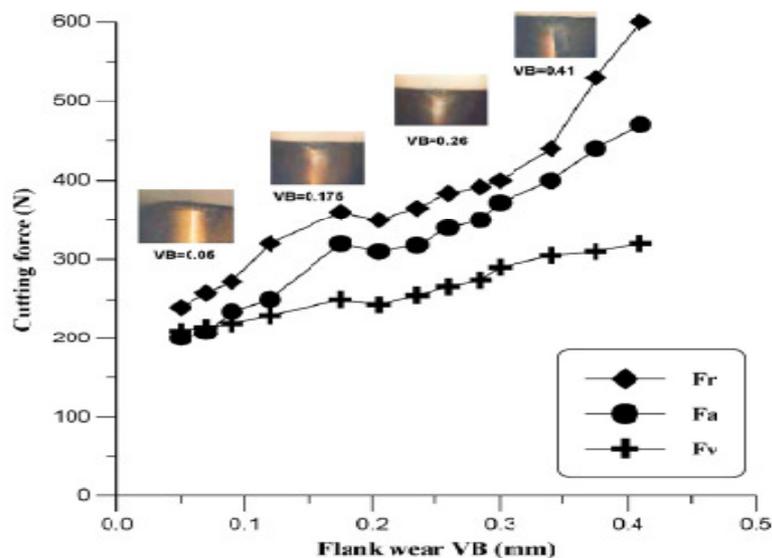


Figure I-10 Évolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille ($V_c = 180$ m/min; $f = 0.08$ mm/rev; $a_p = 0.5$ mm) [YAL 09].

[OZE 05] et autres se sont intéressés à l'influence de la micro-géométrie de l'arête de coupe, la dureté de la pièce, l'avance et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface et les efforts de coupe lors du tournage dur. Ils ont étudié ces variables à travers un plan d'expérience de deux niveaux avec quatre facteurs (dureté, micro-géométrie d'arête, avance et vitesse de coupe). Leur analyse statistique de la variance (ANOVA) démontre que les effets de la dureté de la pièce, la micro-géométrie d'arête de coupe, l'avance et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface sont statistiquement significatifs. Les effets des interactions des facteurs (la micro-géométrie d'arête et de la dureté de la pièce, la micro-géométrie d'arête et de l'avance, la vitesse de coupe et de l'avance) ont également des effets importants. Ils ont conclu que la micro-géométrie d'arête rectifiée et la dureté inférieure de surface de la pièce ont eu comme conséquence une meilleure rugosité de surface. La micro-géométrie d'arête, la dureté de la pièce et la vitesse de coupe de coupe s'avèrent affecter par les composantes de l'effort de coupe. En plus La dureté inférieure de la surface de la pièce et l'arête rectifiée ont eux comme conséquence des efforts tangentiels et radiaux inférieures.

L'étude expérimentale réalisée par [BEN 07] et autres leur a permis d'analyser les performances de l'outil de coupe CBN7020. Ils ont analysé l'influence des éléments du régime de coupe sur sa tenue et sur l'état de surface lors du le tournage dur de l'acier 100Cr6 trempé. La technique utilisée est les plans d'expériences. Ils ont observé qu'avec la vitesse de coupe 120 m/min, le CBN7020 a conduit à un meilleur rendement en termes de durée de vie. En plus, ils ont conclu que l'outil de coupe CBN7020 permet d'obtenir des rugosités de surfaces (0,38 à 1,04 μm), compris dans les limites de la rugosité obtenue par la rectification ($Ra = 0,2$ à $1,1 \mu\text{m}$).

[DAN 08] et autres utilisé la méthodologie de surface de réponse (MSR) afin de développer un modèle empirique pour la prédiction de la rugosité de surface et des conditions de coupe optimales en tournage dur. Les auteurs ont montré que l'avance a un impact très significatif sur la rugosité de surface. L'analyse de variance (ANOVA) a montré que l'effet de l'avance et la vitesse de coupe sont plus significatifs sur la rugosité de surface que la profondeur de passe.

La relation entre les efforts de coupe, la dureté de la pièce et la vitesse de coupe lors du tournage dur de l'acier 100Cr6 à été étudié par [BOU 10] et autres. Ils ont remarqué que les composantes d'effort de coupe diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe et la dureté de la pièce lors du tournage conventionnel (35 à 46 HRC). En plus, ils ont expliqué que cette diminution des efforts de coupe due aux effets de la température sur l'interface outil-

copeau. Ils ont conclu que généralement les composantes d'effort de coupe augmentent avec l'augmentation de la dureté pendant le tournage dur (figure I-11).

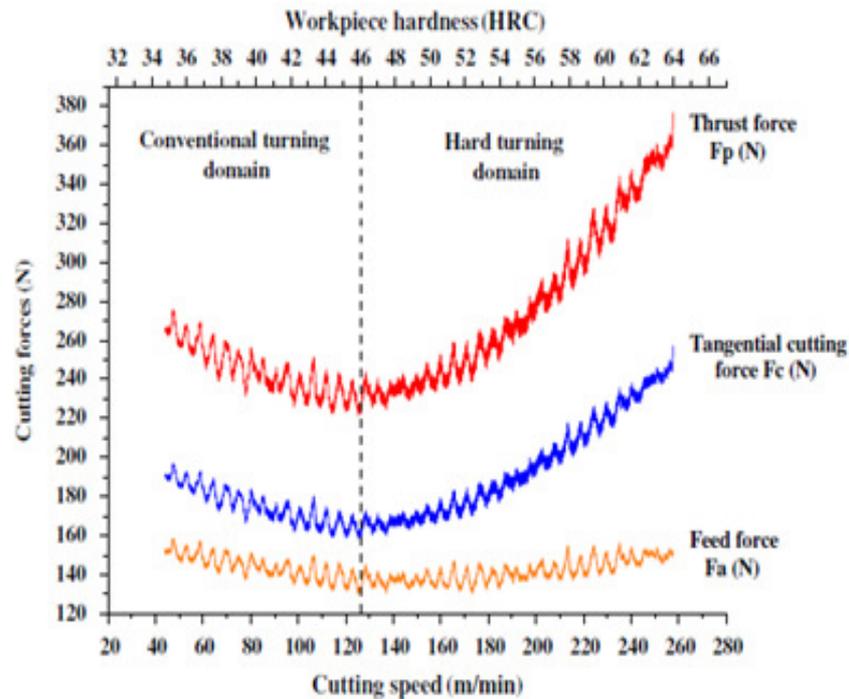


Figure I-11 L'influence des efforts de coupe, la dureté de la pièce et la vitesse de coupe lors du tournage dur de l'acier 100Cr6 [BOU 10].

[NOO 04] et autres ont exploré les performances de l'outil en carbure de tungstène multicouche lors de l'usinage de l'acier AISI 1045 en utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR). Les résultats expérimentaux ont indiqué que l'avance est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface et la force tangentielle. Cependant, il y a d'autres facteurs qui fournissent les contributions secondaires aux indicateurs de performance.

[AOU 11] et autres ont présenté une étude concernant le développement des modèles mathématiques de la rugosité de surface et des efforts de coupe lors du tournage dur de l'acier AISI H11 (figure I-12). Les modèles sont développés en compte de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et la dureté de la pièce. Ils ont utilisé la méthodologie surface de réponse (MSR) pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe en se servant d'un plan Box–Behnken (BBD). Les résultats expérimentaux ont indiqué que l'avance est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de surface avec une contribution de 31%. Cependant, il y a d'autres facteurs qui fournissent les contributions secondaires aux indicateurs de performance (Tableau I-1).

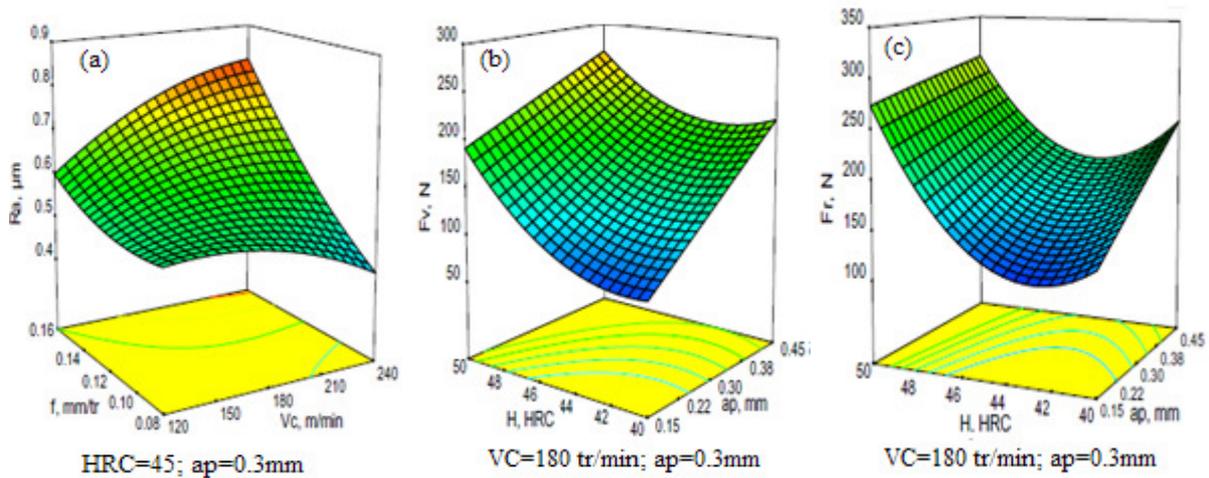


Figure I-12 L'effet des conditions de coupe sur les facteurs de réponse: (a) la rugosité de surface (R_a) ; (b) la force tangentielle (F_c) et (c) la force radiale(F_r) [AOU 11].

Source	Sum of squares	DF	Mean square	F-value	Prob.	Cont. %	Remarks
Model	0.45	14	0.032	10.67	<0.0001		Significant
Vc	0.010	1	0.010	3.39	0.0870	2.058	No significant
f	0.15	1	0.15	51.14	<0.0001	31.08	Significant
ap	1.008E-03	1	1.008E-03	0.33	0.5722	0.203	No significant
H	0.021	1	0.021	6.91	0.0198	4.202	Significant
Vc × f	0.026	1	0.026	8.49	0.0113	5.163	Significant
Vc × ap	4.000E-04	1	4.000E-04	0.13	0.7211	0.080	No significant
Vc × H	0.021	1	0.021	6.98	0.0194	4.240	Significant
f × ap	0.031	1	0.031	10.16	0.0066	6.176	Significant
f × H	0.018	1	0.018	6.05	0.0276	3.675	Significant
ap × H	4.000E-04	1	4.000E-04	0.13	0.7211	0.080	No significant
Vc ²	0.011	1	0.011	3.65	0.0769	2.217	No significant
f ²	6.887E-03	1	6.887E-03	2.28	0.1529	1.388	No significant
ap ²	0.026	1	0.026	8.72	0.0105	5.303	Significant
H ²	0.13	1	0.13	42.13	<0.0001	25.611	Significant
Error	0.042	14	3.014E-03			8.510	
Total	0.495					100	

Tableau I.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de la surface (R_a) [AOU 11].

[CHI 13] autres ont exploré les performances d'un outil en carbure avec un revêtement multicouche ($TiCN/Al_2O_3/TiN$) lors du tournage dur de l'acier AISI 4340 à deux différents niveaux de dureté. Les paramètres considérés sont la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et la dureté de la pièce. Ils ont étudié ces variables à travers les plans d'expériences utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Les tableaux d'analyse statistique de la variance (ANOVA) ont indiqué que l'avance et la profondeur de passe sont le deux facteurs le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface. Ils ont conclu que la profondeur de passe affecté la plupart du temps l'efforts de coupe avec une contribution presque de 60 à 70 % puis l'avance avec une contribution presque de 25 à 30% (figure I-13).

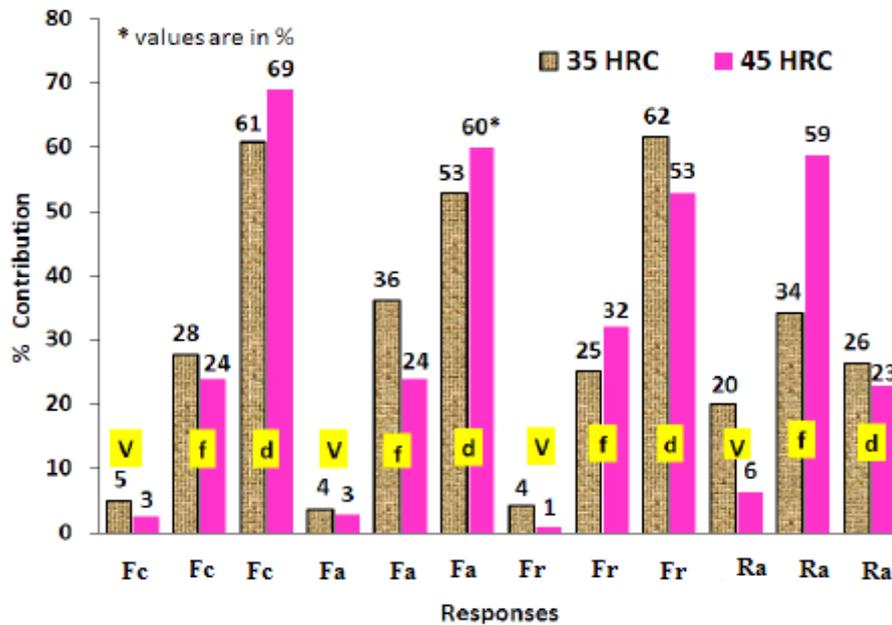


Figure I-13 Le pourcentage de contribution de chaque facteur (V, f, et d) pour différentes réponses (Fa, Fr, Fr et Ra) [CHI 13].

L'effet des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et la profondeur de passe) sur les efforts de coupe (effort axial, effort radial et effort de coupe) et de la rugosité de la surface lors du tournage dur de l'acier MDN250 avec l'outil céramique revêtu a été étudiée par [LAL 08] et autres. Ils ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (MSR) et l'approche séquentielle en utilisant un plan composite centrée (PCC). Leurs résultats montrés que les efforts de coupe et la rugosité de la surface ne changent pas beaucoup avec la vitesse de coupe dans la gamme de 55 à 93 m/min.

La modélisation empiriques de la durée de vie de l'outil, la rugosité de surface et la force de coupe pour les opérations de tournage à été examiné par [AHM 07] et autres. Les paramètres de coupe utilisés dans l'étude étaient la vitesse, l'avance, la profondeur de coupe et le rayon du bec de l'outil. Les méthodes utilisées pour l'élaboration des modèles mathématique est la méthodologie de surface de réponse (MSR) et les réseaux de neurones (RN).

[HES 13] et autres ont présenté une étude de la rugosité de la surface et la vibration d'outil de coupe basée sur la méthodologie de surface de réponse (MSR). Ils ont utilisé cette technique pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe. Les auteurs ont utilisé un plan factoriel complet (27 essais) pour étudier la rugosité de la surface et la vibration d'outil de coupe sous l'influence de trois variables indépendantes, l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de passe. Les tests sont conduits en usinage par tournage dur, le matériau est un acier 42CrMo4 trempé (56 HRC), le matériau de l'outil de coupe utilisé est la céramique

mixte (Al_2O_3/TiC). Ils ont eu une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et prédits obtenus à partir de la méthodologie de surfaces de réponses. La fonction de désirabilité a été employée pour l'optimisation des facteurs de réponse multiple (Ra et Rt) (figure I-14).

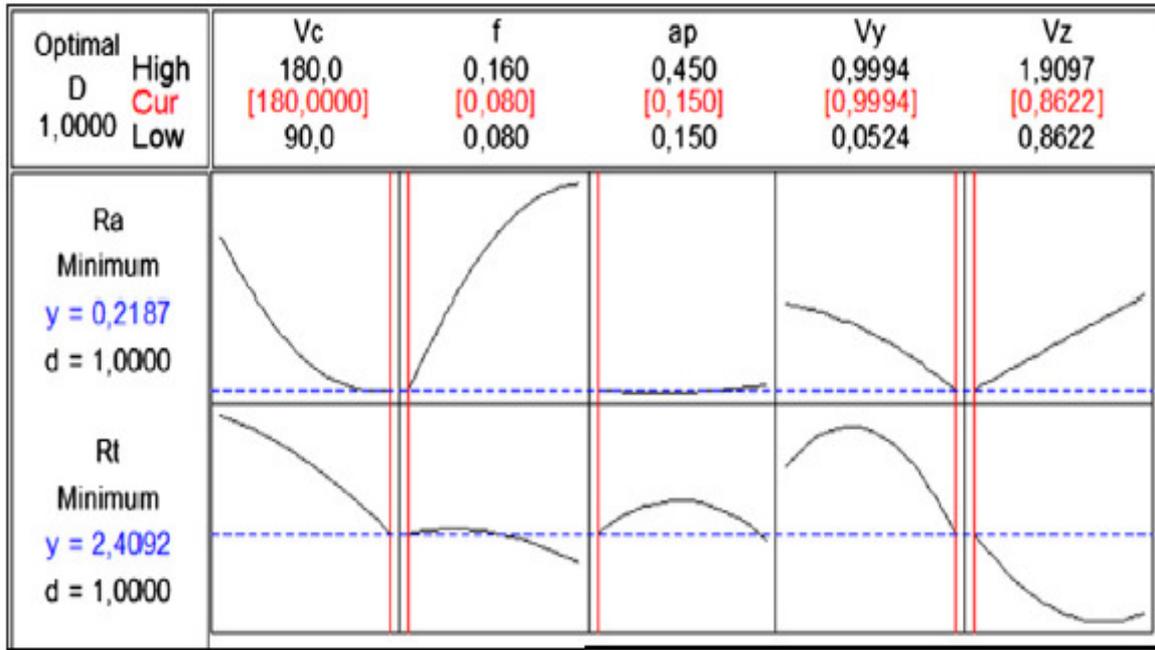


Figure I-14 Optimisation facteurs de réponse multiple (Ra et Rt) [HES 13].

L'étude de [DUR 09] et autres concerne la modélisation mathématique non linéaire de l'usure de l'outil et la rugosité de la surface lors du tournage dur de l'acier AISI H11 avec des plaquettes en céramique mixte revêtue. L'effet des paramètres de coupe, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce sur les facteurs de réponse, tels que : l'usure en dépouille et la rugosité de surface, et cela en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA). La fonction de désirabilité a été employée pour l'optimisation multiple des facteurs de réponse. Les expériences de confirmation effectuées pour vérifier la validité des modèles développés ont prévu des facteurs de réponse dans les limites d'erreur de 5 %. Ils ont observé que l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce ont un impact statistiquement significatif sur l'usure en dépouille, mais l'avance et la dureté de la pièce sont les facteurs significatifs affectant la rugosité de surface. L'usure de l'outil a été observée par un microscope, et la caractérisation d'usure de certaines des plaquettes représentatives a été effectuée par un microscope électronique à balayage (figure I-15). Les auteurs affirment que l'outil semble être usé par l'abrasion, l'usure en entaille, et l'écaillage de la surface d'outil dû au frittage.

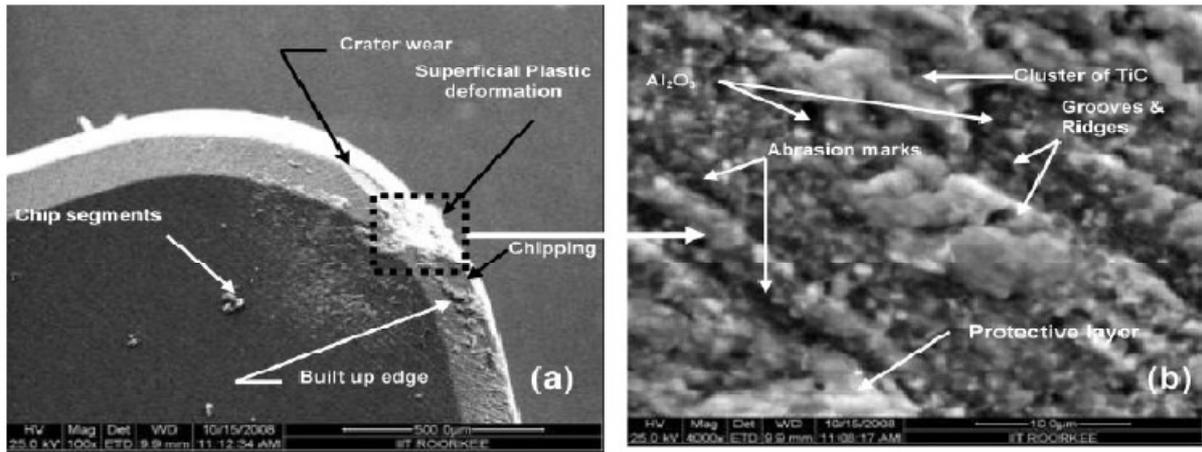


Figure I-15 Observation sur MEB de l'usure de l'outil (CC6050)

($V_c = 120$ m/min; $f = 0.05$ mm/rev; $a_p = 0.07$ mm et $H = 47$ HRC) [DUR 09].

[ATT 12] et autres ont fait une étude sur l'effet des paramètres de coupe (la vitesse de coupe et l'avance) sur le taux d'usure de l'outil PCBN lors du tournage orthogonale sur des disques en acier AISI 52100 durci (57 HRC) avec une épaisseur de 1.2 mm et de diamètre 150 mm. Les tests sont réalisés avec une profondeur de passe constant (1.2 mm). Ils ont constaté que le taux d'usure en dépouille est principalement due aux phénomènes abrasifs qui est fortement influencé par la vitesse de coupe, tandis que la vitesse de coupe et l'avance sont les deux facteurs qui influent le taux d'usure en cratère (KT) (figure I-16).

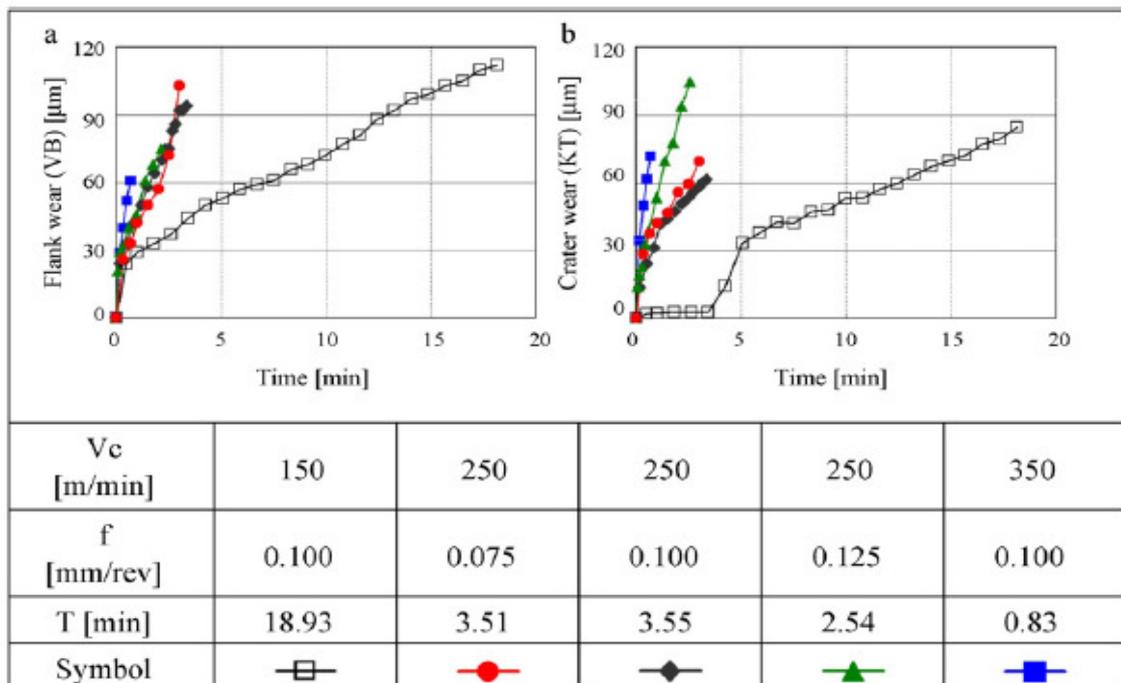


Figure I-16 Évolution l'usure de l'outil: (a) usure en dépouille (VB);

(b) profondeur de cratère (KT) [ATT 12].

[GUN 13] et autres ont concentré leur étude sur l'optimisation des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et la dureté) par la méthode de Taguchi pour déterminer la rugosité de la surface (Ra) optimale lors du tournage dur de la fonte blanche martensitique (Ni-Dur) à deux différents niveaux de dureté (50 et 62 HRC) avec l'outil CBN et céramique revêtu. Ils ont constaté que l'avance est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface pour la fonte (Ni-Dur) avec la dureté 62 HRC (Figure I-17), tandis que la vitesse de coupe est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface pour la même matière avec la dureté 50 HRC (Figure I-18).

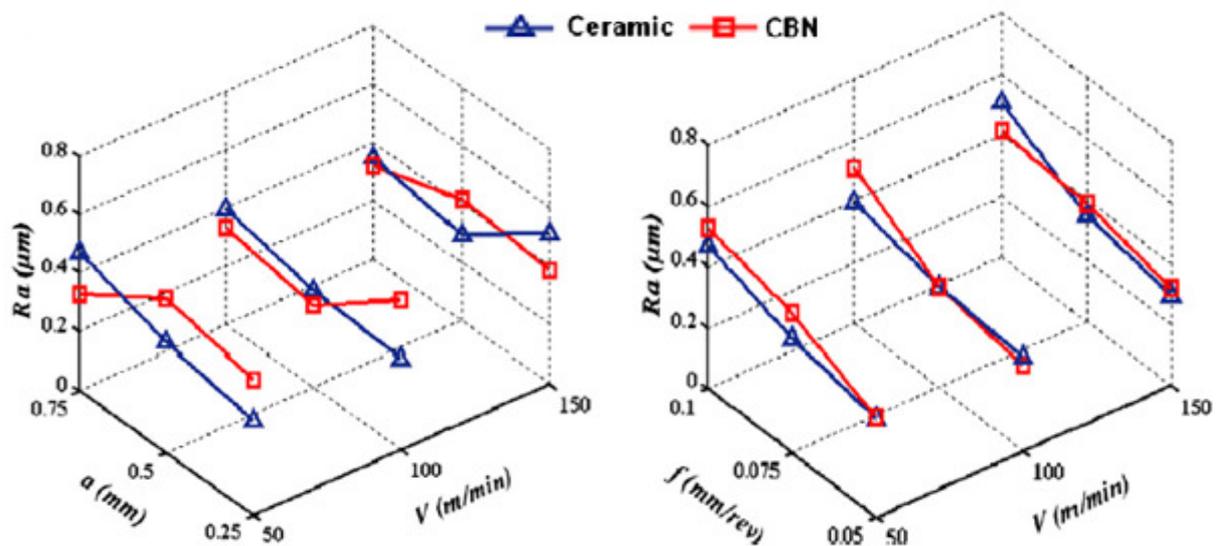


Figure I-17 Influence des paramètres de coupe sur (Ra) for la fonte blanche (Ni-dur) avec la dureté 62 HRC [GUN 13].

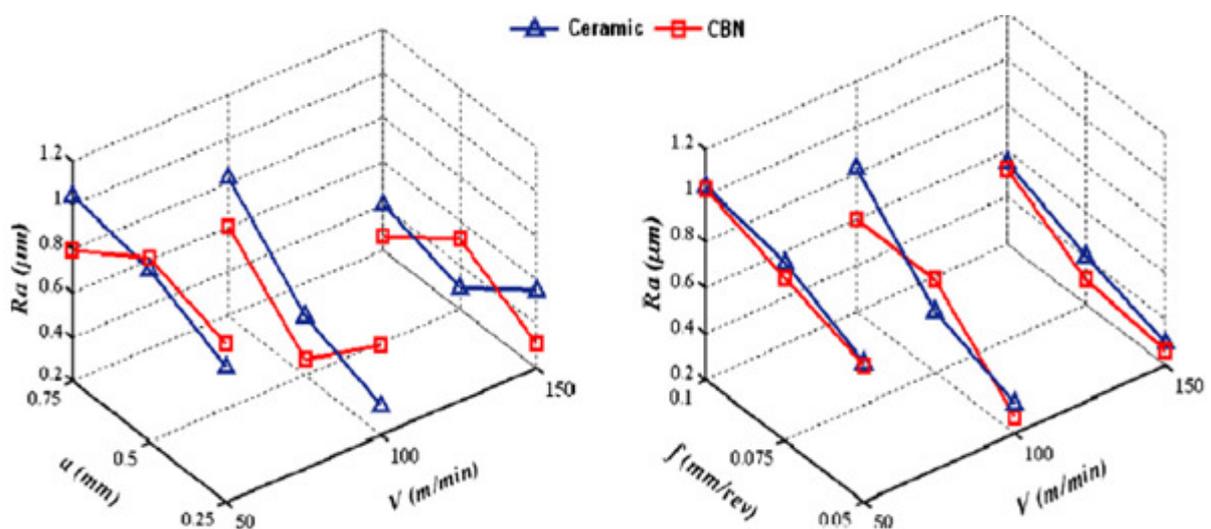


Figure I-18 Influence des paramètres de coupe sur (Ra) for la fonte blanche (Ni-dur) avec la dureté 50 HRC [GUN 13].

I.7 MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE ET REVETEMENT

I.7.1 Matériaux des outils de coupe

Il existe six grandes classes de matériaux utilisés comme outil de coupe soit:

– Les aciers rapides

Ce sont des aciers fortement alliés contenant 0.7 à 1.6 % de carbone et tungstène ou molybdène qui caractérisent des familles différentes. D'autres éléments additifs viennent renforcer les propriétés de ces matériaux (Chrome (Cr), Vanadium ou cobalt (Co) par exemple). Avec ces matériaux on obtient des duretés de l'ordre de 700 à 1000 HV. Ils sont beaucoup utilisés pour le perçage (80 % du marché), mais de moins en moins pour la production industrielle de pièces en tournage.

– Les carbures cémentés

Sont des substrats obtenus par frittage de poudres métalliques sans fer. Ces matériaux sont souvent formés de carbure de tungstène (WC), de titane (TiN) ou de silicium (Si) pour les plus utilisés. Afin de lier les grains de carbure entre eux, nous utilisons des éléments métalliques comme le cobalt, qui allie sa ductilité à la dureté des carbures. Nous obtenons avec ces matériaux des outils présentant des duretés variables comprises entre 1250 et 1800 HV. Il existe un grand nombre de possibilité d'usinage avec ces matériaux. Ce sont les plaquettes proposées par les principaux fabricants des outils de coupe.

– Les cermets

Sont des carbures, des nitrures, des carbonitrures ou des borures liés par un métal ou un alliage ferreux. Les liants sont donc de plusieurs types (cobalt, nickel, nickel - fer, nickel – chrome, etc...). La dénomination « cermet » est peu utilisée dans l'industrie car souvent ils sont assimilés à des carbures cémentés. Nous obtenons avec ces matériaux des outils pouvant avoir des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Leur dureté à chaud permet de faire des opérations d'usinage dans des conditions extrêmes (jusqu'à 1000°C), les cermets ont des applications très diverses (Tournage, Fraisage, etc.) et ont une très bonne résistance mécanique, une faible conductivité thermique et une bonne résistance à la diffusion et à l'usure. Ils sont donc souvent utilisés en tournage de semi-finition ou de finition des aciers.

– Les Céramiques

Il existe deux grandes familles de céramiques : les céramiques à base d'alumine et celles à bases de nitrure de silicium (figure I-19). Les céramiques se déclinent essentiellement sous quatre formes :

a) Les céramiques pures ou céramiques blanches contenant un pourcentage élevé d'alumine Al_2O_3 et une quantité faible de ZrO_2 pour augmenter la ténacité. Elles présentent une haute stabilité chimique comparée aux carbures et nitrures. En revanche, leur ténacité est moindre. Leur faible résistance aux chocs thermique et mécanique les ont confiné aux opérations d'usinage sans chocs des aciers et fontes grises à haute vitesse de coupe sans lubrification. A faibles vitesses de coupe, elles peuvent usiner des aciers de construction, des aciers rapides ou des aciers cémentés ou nitrurés ;

b) Les céramiques mixtes ou céramiques noires contenant un pourcentage élevé d'alumine et au moins 30% de carbure et/ou de nitrure de titane. Ces derniers favorisent la résistance aux chocs thermiques en accroissant la conductibilité du matériau de coupe. Les gradients et donc les contraintes thermiques diminuent au sein de l'outil favorisant ainsi l'emploi de lubrifiants et ainsi de plus hautes vitesses de coupe. La dureté à chaud des céramiques mixtes est supérieure à celle des céramiques pures (à 1000°C , 800 HV10 pour une céramique mixte composée de 60% de Al_2O_3 , 30% de TiC et 10 % de ZrO_2 contre 650 HV10 pour céramique pure composée de 90% de Al_2O_3 et 10 % de ZrO_2). Le domaine d'emploi de ces céramiques est l'usinage des fontes dures, des alliages réfractaires à base nickel ou cobalt et des aciers rapides ;

c) Les céramiques renforcées ou whiskers se composent d'une matrice d'alumine et de 25% de carbure de silicium (SiC) sous la forme de bâtonnets ou trichites de $2\ \mu\text{m}$ de diamètre et de $20\ \mu\text{m}$ de long. Le carbure de silicium augmente la ténacité (dans un rapport de 2 à 3 par référence à la céramique pure), la dureté à l'ambiante (2000 HV) et la résistance aux chocs thermiques. L'accroissement de la ténacité est notamment dû à la nécessité de déchausser les fibres afin de rompre le matériau. L'adhésion fibre / matrice est ainsi le paramètre critique. Le domaine d'emploi de ces céramiques couvre le tournage à vitesse élevée des superalliages à base nickel ou cobalt (ex : Inconel 718 à 500 m/min) ainsi que l'usinage des aciers et fontes traitées. La meilleure ténacité autorise la coupe intermittente ;

d) Les céramiques à base de nitrure de silicium Si_3N_4 elles se composent de nitrure de silicium et d'additifs destinés à améliorer le frittage (ex : Al_2O_3 , Y_2O_3 , MgO, BeO) et de TiC destiné à accroître la dureté et donc la résistance à l'usure. Sa conductivité thermique élevée lui confère une meilleure résistance aux chocs. Sa dureté à chaud est supérieure à celle des carbures et autres céramiques à base d'oxydes (900 HV à 1000°C). Sa résistance à l'usure et sa stabilité chimique sont légèrement moindres que celle des céramiques à base d'oxydes. Elle convient à l'usinage des superalliages à base nickel et des fontes malléables.

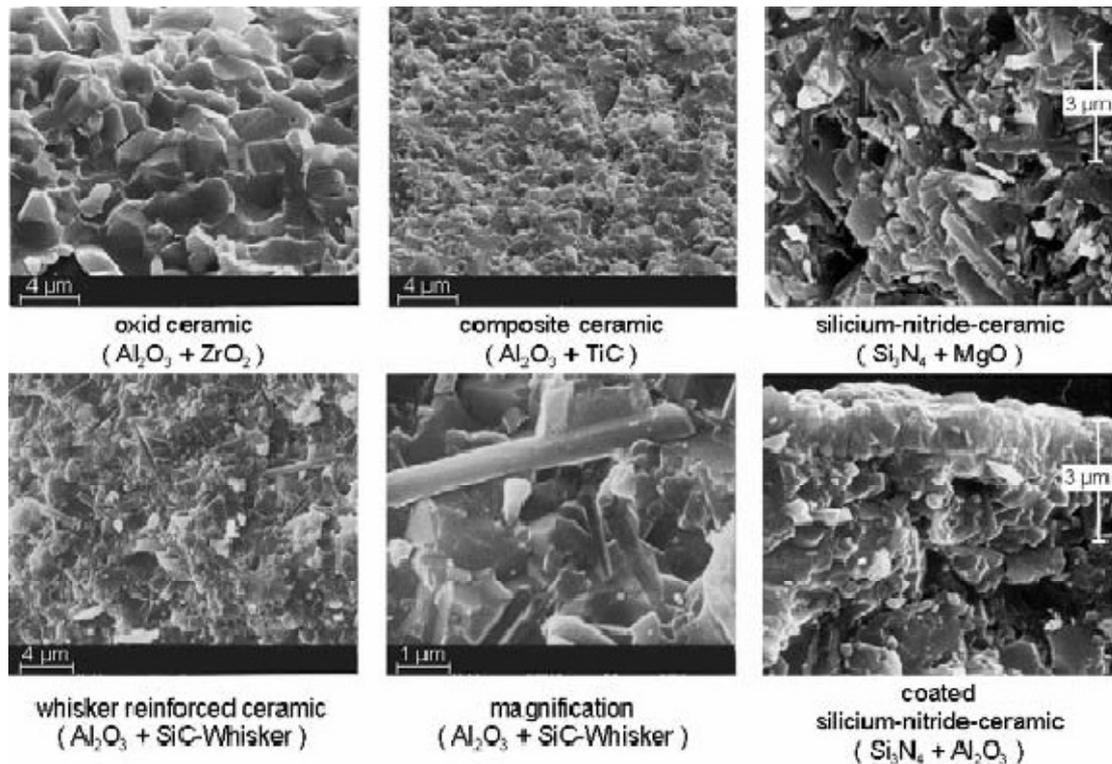


Figure I-19 Microstructure des outils de coupe en céramiques [KLO 06].

– Nitrures de Bore Cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique est le matériau le plus dur après le diamant. Le Pc-BN (le nitrure de bore polycristallin) est 50 fois plus résistant à l'abrasion que le carbure de tungstène et 5 fois plus que l'oxyde d'alumine et le nitrure de silicium. Il conserve sa résistance et n'a pas tendance à réagir avec le fer ou l'air aux hautes températures de coupe qui sont caractéristiques de l'usinage des aciers durs. Sa température d'utilisation en atmosphère oxydante atteinte 1400°C. En atmosphère inerte ou réductrice, il résiste à des températures allant jusqu'à 2000°C.

– Le diamant

Le diamant naturel monocristallin est le matériau le plus dur connu à l'heure actuelle (figure I-20). Cependant, le diamant s'oxyde dans l'air et réagit chimiquement avec des métaux ferreux. Pour cette raison, il est utilisé pour l'usinage des métaux non ferreux comme les alliages d'aluminium, les composites à matrice de métal, les alliages de cuivre, les métaux précieux (or, platine), les plastiques abrasifs, les verres, les composites à fibre de carbone, les céramiques vertes, les carbures de tungstène, le bois et les pierres naturelles. En usinage, les diamants sont utilisés sous trois formes : le diamant naturel monocristallin, le diamant synthétique polycristallin et comme un revêtement des carbures.

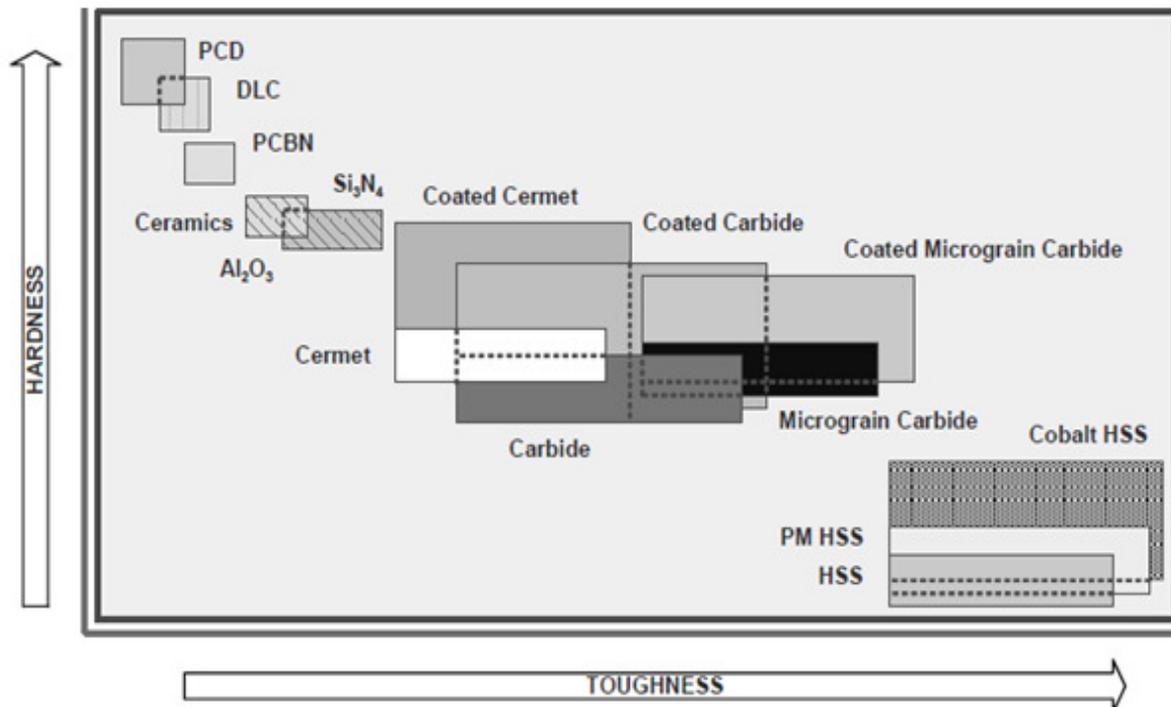


Figure I-20 Différents matériaux et revêtements d'outils [JRA 07].

I.7. 2 Les revêtements

Les revêtements permettent d'améliorer les conditions de coupe et la productivité. Le principe du revêtement (figure I-21) consiste à recouvrir d'un film mince (jusqu'à 10 µm d'épaisseur) les outils de coupe pour leur donner des propriétés particulières comme la grande dureté. Selon [GRZ 03] les revêtements peuvent être classés en 4 groupes.

- Les revêtements à base de titane (TiC, TiN, TiB₂, TiCN).
- Les revêtements céramiques.
- Les revêtements de diamant (PCBN).
- Les revêtements autolubrifiants avec MoS₂ ou WC.

Le revêtement de diamant PCBN augmente la dureté de surface et crée une barrière thermique entre la pièce et le substrat de l'outil dont la température est abaissée [COE 07]. Le rôle recherché du revêtement est de :

- Protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation diffusion).
- Faire office de barrière thermique.
- Résister à la fissuration [TON 01].

Le choix du revêtement dépend de but recherché : résistance à l'usure et / ou à l'oxydation, tenue à la température, réduction du frottement etc. Il y a deux types de dépôt de revêtement CVD et PVD, la figure (figure I-22) montre les procédés de fabrication de CVD et PVD.

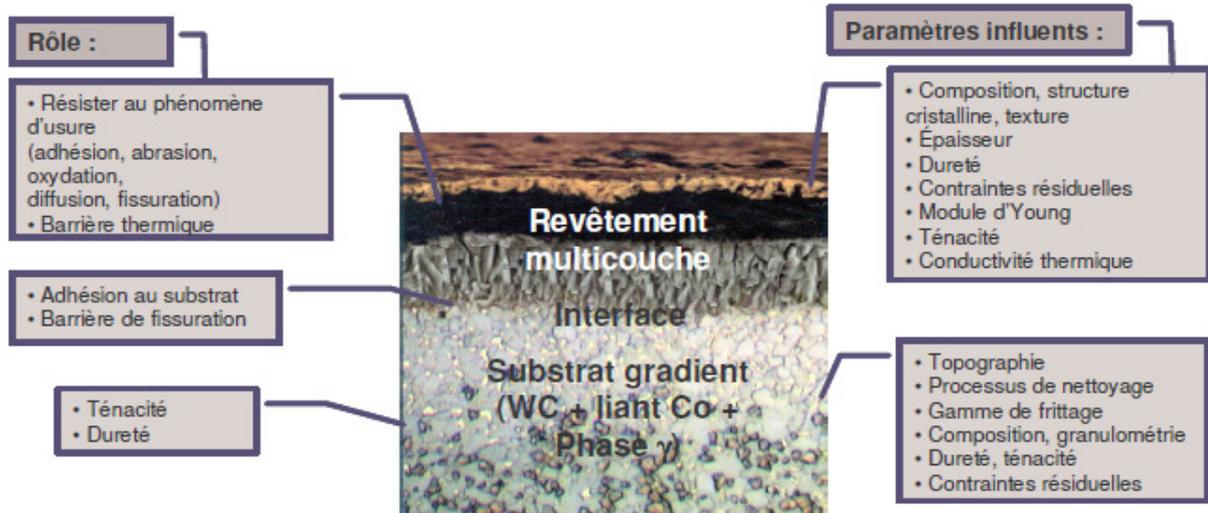


Figure I-21 Le revêtement [VAS 08].

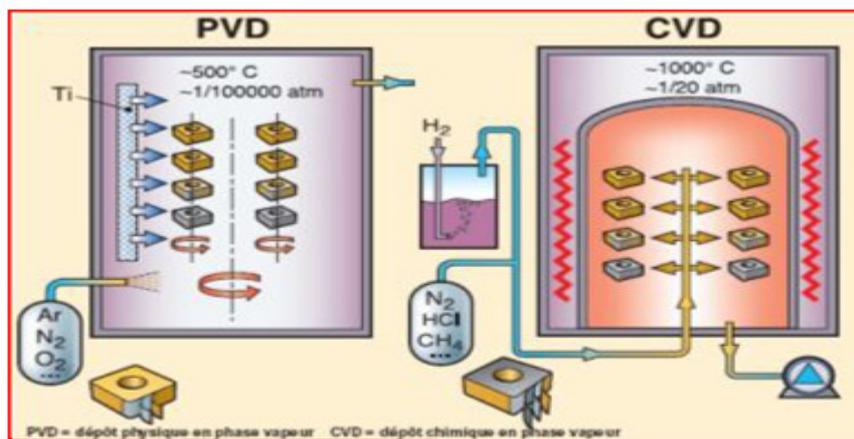


Figure I-22 Procédés de fabrication de CVD et PVD [RAM 11].

I.8 MORPHOLOGIE DES COPEAUX

Dans les travaux de la littérature ([CHI 02], [ATL 11] et [KOM 81]), les différentes observations réalisées lors des essais d'usinage montrent des copeaux de natures diverses et variées. En fonction du type d'usinage et du matériau utilisés, les copeaux ont une forme continue, discontinue, segmentée, ou fragmentée (voir figure I-23).

La morphologie du copeau dépend en fait des caractéristiques thermiques et mécaniques du matériau et de la réponse de celui-ci face au chargement thermomécanique qu'il subit lors de l'usinage, [ATL 11]. Elle dépend aussi des conditions d'usinage et de la nature du frottement au niveau de l'interface outil-copeau. La figure I-23 montre quelques exemples de morphologies de copeaux pour différents alliages métalliques et sous différentes conditions de coupe. On peut ainsi passer d'une forme continue à une forme discontinue ou segmentée en modifiant la vitesse de coupe, l'avance, la géométrie de l'outil ou la nature du matériau.

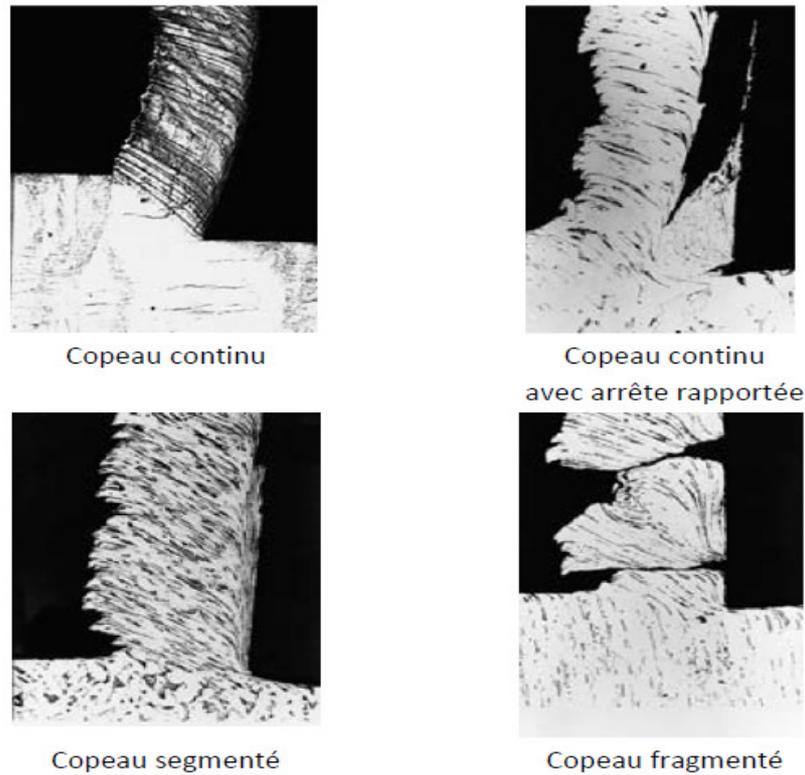


Figure I-23 Morphologie des copeaux [CHI 02].

Les propriétés thermomécaniques des matériaux usinés ont un effet sur la morphologie des copeaux et cet effet a été étudié par [POU 02] et autre, figure I-24.

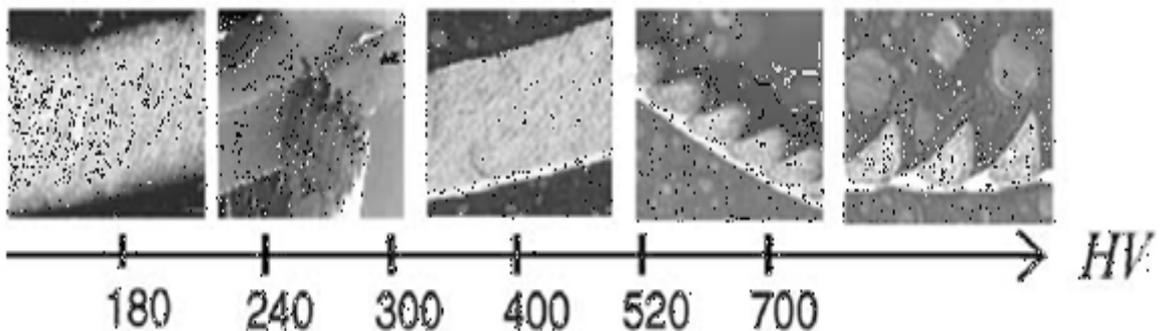


Figure I-24 Morphologies de copeaux obtenus à différentes valeurs de dureté Vickers HV lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 (AISI 52100) : vitesse de coupe $V_c = 100$ m/min, avance $f = 0.1$ mm/tr, profondeur de passe $a_p = 1$ mm [POU 02].

La figure I-24 présente différentes morphologies de copeaux obtenus lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 (AISI 52100) ayant subi différents traitements thermiques, menant à une modification de sa dureté de Vickers. L'équilibre entre les effets d'écrouissage et d'adoucissement thermique semble être obtenu pour une valeur de dureté de 400 HV car jusqu'à cette valeur, l'épaisseur du copeau est constante.

I.9 MECANISMES D'USURE

L'usure de l'outil est due aux contraintes thermomécaniques qu'on lui fait subir lors de l'usinage. Cette usure est provoquée par la concentration des contraintes de coupe de l'usinage, elle est fonction :

1. De la géométrie de l'outil, angle de coupe, présence du brise – copeaux.
2. Du revêtement et son comportement mécanique et thermique. Différents mécanismes sont responsables de la dégradation de l'outil de coupe et différents modes d'usure coexistent. Leur importance dépend de la température mise en jeu dans la zone de coupe [CAR 02] (figure I-25) et de la vitesse de défilement du copeau sur la plaquette.

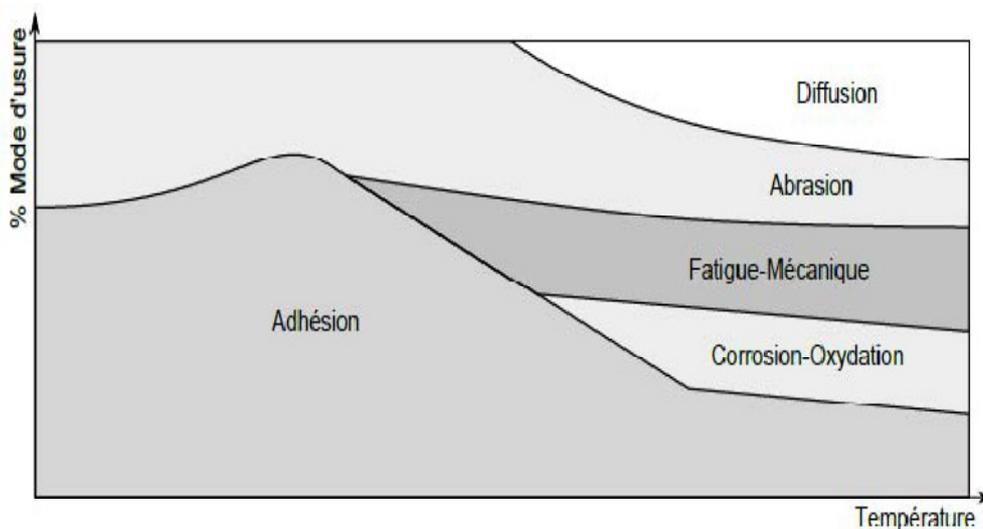


Figure I-25 Modes d'usure prédominants selon la température [CAR 02].

I.9.1. Les phénomènes d'usure

Tous les outils tendent à être mis hors d'usage selon un certain nombre de mécanismes fondamentalement différents comme l'abrasion, la diffusion, l'oxydation, la fatigue et l'adhésion.

- **Usure par abrasion:** L'usure abrasive des outils de coupe résulte de l'arrachement sur leurs surfaces de micro copeaux produits par des constituants (alumine, nitrure, carbure, oxyde) et de grandes duretés qui peuvent être contenues dans le matériau usiné [POU 01] [POU 03]. L'existence des impuretés et des inclusions dans le matériau à usiner lors de son élaboration, introduit une augmentation locale des contraintes mécaniques sur l'outil, ce qui entraîne une usure par abrasion.

- **Usure par adhésion:** L'usure adhésive est liée à l'arrachement mécanique de particules après le développement de micro-soudures. Ces micro-soudures sont assistées par des forces locales entre les surfaces rugueuses du copeau et de l'outil. [M'SA 05] et autres ont étudié

l'usure par adhésion de l'acier austénitique 316L avec des outils en carbures revêtus avec trois couches de revêtement (TiN, Al₂O₃ et Ti(C,N)).

- **Usure par diffusion:** Pour des grandes vitesses, la température à l'interface copeau/outil est très importante. Elle peut atteindre des valeurs suffisamment importantes pour déclencher les phénomènes de diffusion [ATT 08] et [GEK 02]. Toutefois, la présence de revêtement réduit ce type d'usure [POU 01].

- **Usure par fluage et oxydation:** Pour des vitesses qui dépassent les limites d'emploi de l'outil, sa géométrie peut s'endommager par fluage et oxydation. Concernant le fluage, la face d'attaque de l'outil est soumise à des contraintes normales de compression qui sont maximale sur l'arête de coupe. Alors que, l'outil peut s'oxyder à l'air ambiant au voisinage de la zone de coupe.

- **Usure par fatigue:** Deux types d'usure par fatigue peuvent être rencontrés pendant une opération d'usinage à coupe interrompue (fraisage). L'usure par fatigue mécanique est liée à l'apparition de phénomènes vibratoires de natures diverses : élimination partielle d'arête rapportée sur l'outil, apparition d'instabilités dans la formation du copeau en passant du copeau continu au copeau segmenté. L'usure par fatigue thermique dans le cas d'outils de très faibles conductivités thermiques (notamment les céramiques) avec de très grandes vitesses de coupe (UGV par exemple) aura lieu.

Au cours d'une opération d'usinage, l'ensemble de tous ces mécanismes se produit, (figure I-25). Les mécanismes d'usure des outils sont contrôlés par les propriétés mécaniques et physico-chimiques des matériaux coupé et coupant et des conditions de coupe (la vitesse de coupe, vitesse d'avance, etc.). En fonction des conditions d'usinage, plusieurs causes fondamentales de l'usure des outils ont été étudiées [ARS 06]; l'abrasion, l'adhésion, la diffusion. Ainsi, l'usure par abrasion est la plus forte à basse vitesse, alors que, l'usure adhésive devient de plus en plus dominante à haute vitesse. Pour des paramètres de coupe très élevés, qui provoquent une élévation de température entre l'outil et copeau, l'usure par diffusion s'accélère.

I.9.2 Formes d'usure

La géométrie de l'outil évolue au cours de son utilisation. Au delà de certaines modifications, la géométrie ne permet plus de produire des pièces conformes. Des paramètres de quantification de l'usure de l'outil sont donc nécessaires afin de connaître son état et pour prévenir son changement.

– **L'usure en dépouille (VBB)**: Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe. Elle est caractérisée par une valeur VBB admissible, la valeur de VBB max est mesurée dans la zone B (figure I-26). La valeur admissible est $VBB = 0.6 \text{ mm}$ dans l'ébauche, $VBB = 0.3 \text{ mm}$ en finition [SIK 02]. Pour les petites profondeurs de passe ($ap < r$) l'usure de l'outil se fait dans la zone C (zone de rayon du bec de l'outil) ; cette usure se caractérise par VBC [SHA 09], [GRZ 08]. L'usure de l'outil VBB dépend de différents paramètres comme la dureté de matériau à usiner et la dureté de l'outil de coupe. Plus le matériau à usiner est dur, plus l'usure en dépouille augmente, et plus le matériau d'outil de coupe est dur, plus cette usure diminue [KUM 03]. L'augmentation des paramètres de coupe comme l'avance f , la vitesse de coupe V_c , et du temps d'usinage T_c conduisent à augmenter l'usure de dépouille [GIL 09]. L'usinage à sec conduit à augmenter l'usure de dépouille VBB plus que l'usinage cryogénique [DHA 07].

– Pour diminuer l'usure de dépouille il faut :

- a) Choisir une nuance présentant une meilleure résistance à l'usure.
- b) Réduire la vitesse de coupe.

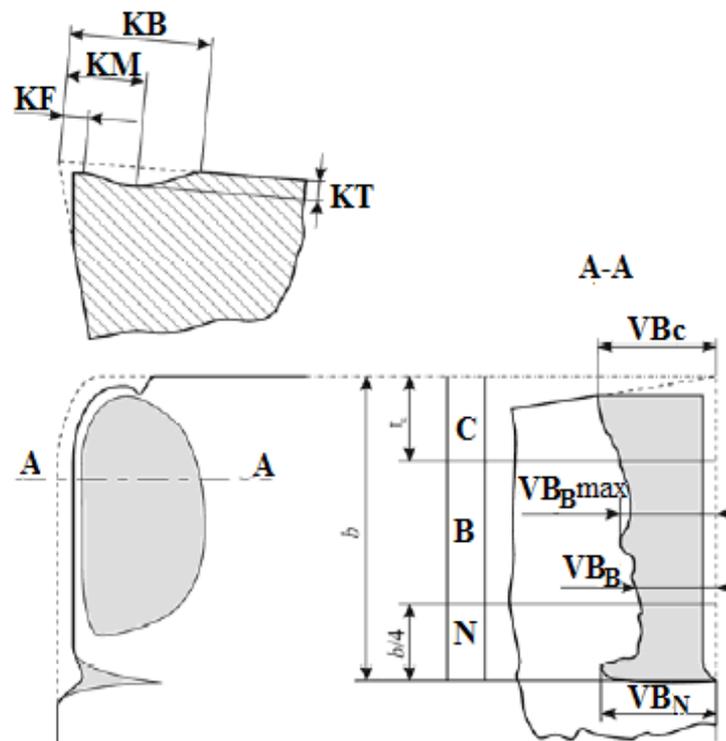


Figure I-26 Zones d'usure selon ISO3685 [ISO 93].

– **L'usure en entaille (VB_N)**: Elle est une forme spéciale d'usure combinée de la face de dépouille et de la face de coupe. Ce genre d'usure est due à des phénomènes métalliques (calamines des pièces forgées, oxydation des aciers). Elle est caractérisée par VB_N et formée

dans la zone N (figure I-26), la valeur de VB_N peut être un indicateur de critère de durée de vie. La zone d'entaille se retrouve juste à la fin de la longueur en contact entre l'outil et la pièce, cette longueur ne dépend que de la profondeur de passe ap et de l'angle de coupe principal Kr [COH 09]. Dans certains cas, l'entaille peut être provoquée par la présence d'une couche superficielle dure sur une pièce coulée, forgée, traitée thermiquement ou ayant subi un usinage préalable. La présence de l'usure en entaille est l'une des causes principales d'augmentation de la rugosité de la pièce usinée [PAV 05]. La dureté du matériau à usiner joue un rôle important sur l'usure en entaille, plus la dureté du matériau est grande, plus l'usure VB_N augmente [KUM 06]. L'augmentation de vitesse de coupe provoque une augmentation de l'usure VB_N [ALT 07]. Pour éviter la formation de VB_N il faut:

- a) Accroître la rigidité de l'arête de coupe.
- b) Réduire l'avance.
- c) Réduire la vitesse de coupe.

– **L'usure en cratère (KT)** : C'est la forme la plus courante d'usure de la face de coupe. Elle est caractérisée par la profondeur du cratère KT , une valeur prédominante de KT peut être choisie comme critère de durée de vie de l'outil. L'usure du cratère la plus sévère est atteinte quand l'épaisseur du copeau non déformé atteint une valeur maximale t_{max} (équation I.3) [HUA 05]. Le mouvement du copeau sur la face de coupe de l'outil résulte en un frottement sévère entre le matériau usiné et la face de coupe ce qui conduit à l'usure en cratère [KUM 07]. La profondeur maximale du cratère KT est établie par l'équation (I.4) qui donne directement la profondeur du cratère KT à partir de l'avance f [ISO 93].

$$t_{max} = \sqrt{r^2 + f^2 - 2.f\sqrt{2r.ap - ap^2}} \quad (I.3)$$

$$KT = 0.06 + 0.3 * f \quad (I.4)$$

Plusieurs facteurs affectent l'usure en cratère, ces facteurs sont :

- Le matériau à usiner : Plus le matériau à usiner est dur plus l'usure en cratère est grande [EBR 09]. L'usinage du matériau dur provoque une température élevée sur la face de coupe ce qui accélère l'usure en cratère par le phénomène de diffusion chimique des éléments de l'outil vers le copeau.
- Les paramètres de coupe : L'usinage à grande vitesse de coupe augmente également la température sur la face de coupe ce qui accélère l'usure en cratère [REM 06]. Aussi, plus le temps d'usinage augmente plus l'usure en cratère augmente [ATT 08].

– Le fluide de coupe : L'usinage à sec provoque une grande usure en cratère à cause de la haute température générée par le frottement copeau / outil. L'utilisation d'une huile soluble ou une lubrification cryogénique durant l'usinage diminue cette usure [KHA 08].

Cette lubrification diminue la température sur la face de coupe et en conséquence elle diminue la diffusion chimique des éléments de l'outil vers le copeau.

– La dureté du matériau des outils de coupe : Plus le matériau de l'outil de coupe utilisé pour l'usinage est dur plus la résistance à l'usure en cratère augmente [KUM 07].



– **Fissuration thermique** : Lorsque le liquide recouvre l'arête de coupe de manière non homogène, la température de cette arête peut fluctuer, ce qui provoque des dilatations et des contractions alternées aboutissant à sa rupture. La fissuration thermique peut aussi avoir lieu sans arrosage. Par exemple, le fraisage à sec peut générer des fluctuations de température suffisantes pour provoquer des fissurations par fatigue sous l'effet d'un mouvement de va-et-vient de la matière.

– **Ecaillage et fracturation** : Cette forme d'usure se traduit par la rupture de morceaux de l'arête de coupe, qui est trop fragile pour supporter le choc auquel elle est soumise.

– **Formation d'arête rapportée** : Une arête rapportée se forme par soudure de la matière de la pièce sur l'outil. Le copeau atteint une température permettant de le rendre "collant" mais, à ce stade, il se refroidit suffisamment vite pour s'adhérer à la plaquette (figure I-27).

I.10 DEFINITION DE L'ETAT DE SURFACE

La notion d'état de surface comprend :

- l'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles) ;
- l'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale).

I.10.1 Défauts de surface

Le terme défaut de surface englobe un certain nombre de forme d'altérations de la surface produite suite à l'usinage de la matière [ULU 11] : marques d'avance, traînées, déchirures, arrachements de matière, micro et macro fissures, particules collées, zones de glissement, débris de microcopeaux, grains déformés, cavités, texturation de la surface....etc. Il est classé suivant 4 ordres (figure I-28) :

- **Ordre 1**: écarts de forme et de profil (rectitude, circularité, profil, ...) généralement mesurés sur l'étendue globale de la pièce inspectée.

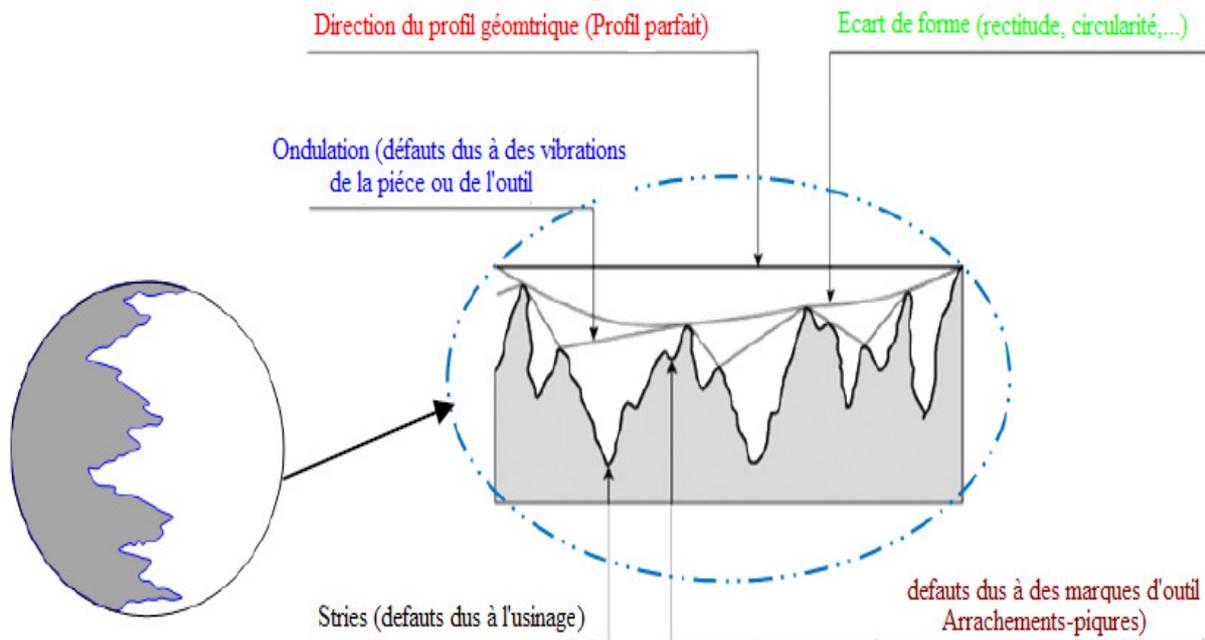


Figure I-28 Défauts de surface.

- **Ordre 2**: erreur d'ondulation, généralement mesurée sur une longueur pré déterminée.
- **Ordre 3**: stries, sillons périodiques ou pseudopériodiques.
- **Ordre 4**: arrachement, marque de l'outil, fente, pique.

Ces altérations générées par l'opération d'usinage peuvent être minimisées par l'optimisation des conditions de coupe [CHO 99] même si leur élimination totale semble être impossible [ULU 11].

I.10.2 Rugosité de la surface

La rugosité est le paramètre mesurable le plus utilisé afin de définir un état de surface et est considérée comme la première approche de qualification. La surface générée en chariotage est constituée de sillons tracés avec régularité et dont les crêtes sont séparées de la valeur d'avance choisie et dont dépend principalement la valeur Ra . Dans les sillons, il apparaît des défauts irréguliers et dont l'amplitude est moindre.

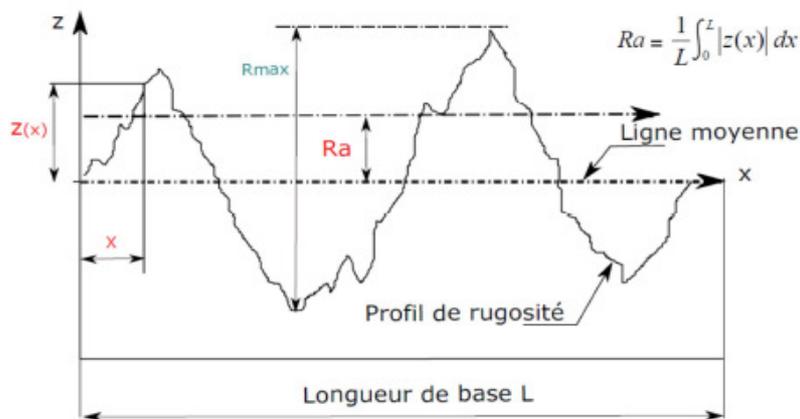


Figure I-29 Définition de la rugosité Ra (norme ISO 428)

I.10.3 Profil de rugosité

La modélisation du profil de rugosité en tournage se fait par une succession d'arcs de cercles ayant pour rayon le rayon de bec de l'outil et dont le pas correspond à l'avance par tour de l'outil (figure I-30). Ceci dit, la rugosité dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Cela a amené à définir une relation entre ces facteurs et les paramètres de la rugosité. On définit alors la hauteur maximale du profil de rugosité Rt et la rugosité arithmétique moyenne Ra par :

$$Ra = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r} \quad (I.5)$$

$$Rt = 125 \frac{f^2}{r} \quad (I.6)$$

Le paramètre avance est considéré comme étant dominant sur l'état de rugosité : augmenter l'avance par tour conduit à une augmentation de la hauteur R_{max} et à la rugosité Ra (obtenue après filtrage), figure I-31. L'usure de l'outil joue un rôle important sur la rugosité de la pièce usinée puisque l'outil imprime sa forme à la surface usinée (figure I-31). Un bec d'outil altéré

limitera la valeur de R_{max} (et de Ra) mais son arête sera détériorée et conduira à des altérations dans le sillon.

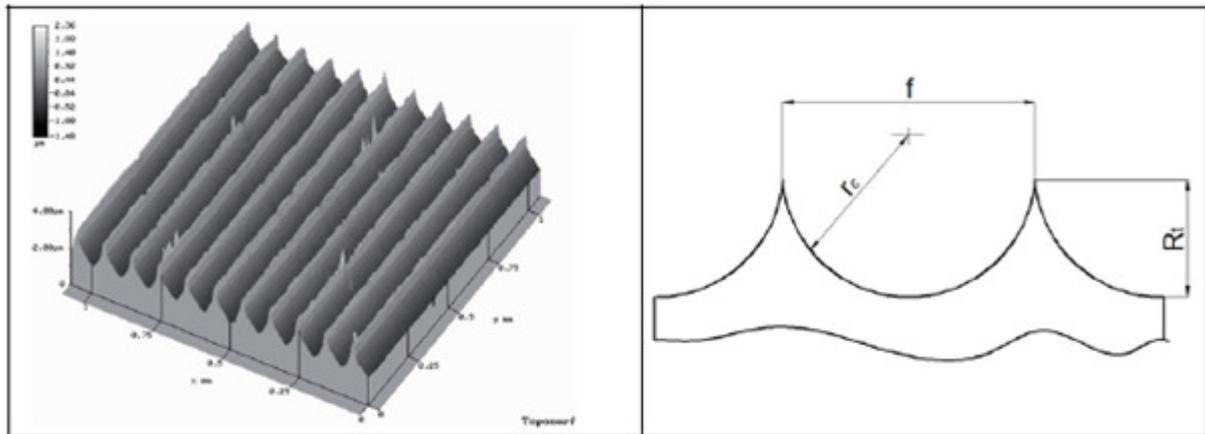


Figure I-30 Topographie de surface obtenue en tournage dur et son profil [GRZ 12].

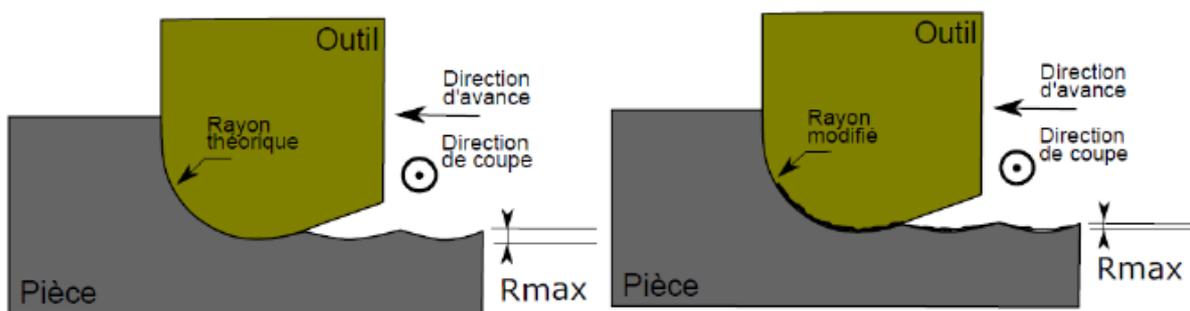


Figure I-31 Rôle de l'usure de l'outil sur la hauteur de crête maximale [LEC 12].

L'optimisation des paramètres de coupe peut cependant permettre des améliorations. [ARU 04] et Autres montrent ainsi que la rugosité est améliorée en utilisant un angle de coupe négatif, un grand rayon de bec et le recours à la lubrification. [COE 04] et Autres observent également une réduction de la rugosité par l'utilisation de plaquettes rondes. Ils atteignent même une rugosité de 500 nm par la création d'un chanfrein, modifiant le rayon d'arête. De plus, ils observent qu'une arête usée minimise la rugosité de la pièce finie.

I.11 EFFORT DE COUPE

I.11.1 Définition l'effort de coupe

Les déformations et les frottements engendrés lors de la formation du copeau à l'interface outil-copeau se traduisent par l'apparition de différentes contraintes de coupe. En prenant le copeau comme référence du système, il exécute une action sur l'outil. Cette action, définie en

tant que l'effort de coupe F , se décompose en trois forces élémentaires, normales entre elles, selon la nomenclature liée au processus d'usinage (figure I-32).

La mesure des efforts de coupe se fait à l'aide d'une table dynamométrique de marque Kistler. Pour se faire, on mesure les déformations imposées par les efforts de coupe sur la table à l'aide de capteurs piézoélectriques précontraints dans les trois directions de l'espace. Les tables dynamométriques présentent des qualités appréciées en usinage à cause de leur sensibilité, leur précision et surtout leur grande rigidité qui leur permet de les utiliser sans perturber l'opération d'usinage [BIS 05].

Grâce à la platine Kistler, on peut obtenir les différentes composantes (F_a , F_r et F_t) de l'effort global de coupe (F) :

F_c – effort de coupe (ou tangentiel F_t) qui est tangent à la pièce usinée et dirigé dans le sens contraire au mouvement de coupe ; il reflète une partie majeure de la puissance consommée,

F_f – effort d'avance (ou axial F_a) qui est tangent à la pièce usinée et dirigé dans le sens contraire à l'avancement de l'outil ; il ne constitue qu'une partie de la puissance consommée parce que le déplacement dans le sens d'avance est relativement faible,

F_p – effort de pénétration (ou radial F_r) qui est perpendiculaire au plan de deux autres efforts orienté dans la direction de l'axe de l'outil ; il ne participe à aucun déplacement donc il ne consomme aucune puissance.

L'effort global de coupe F peut donc être défini par l'équation suivante :

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \quad (I.7)$$

Où F_c , F_p et F_f sont les trois composantes de la force.

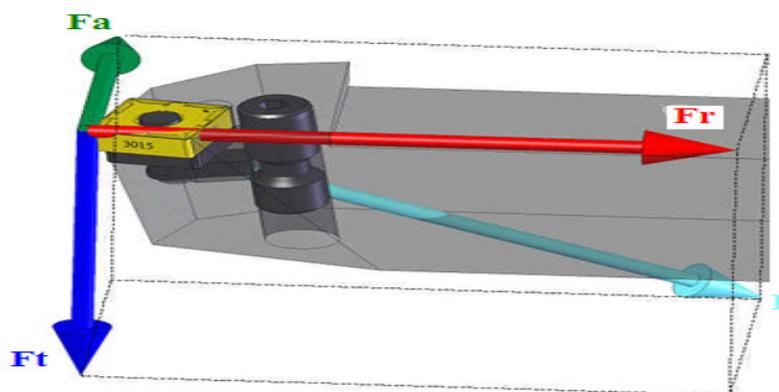


Figure I-32 Composantes de l'effort de coupe [FNI 08].

Afin d'établir l'énergie consommée lors de l'opération d'usinage, **la puissance de coupe P_c (W)** liée à l'effort de coupe F_c est souvent mesurée. Une autre grandeur courante employée pour quantifier le travail fourni est de calculer **l'effort spécifique de coupe (ou la pression de coupe) en tournage (MPa)**. Ces grandeurs peuvent être définies comme l'énergie nécessaire à enlever une certaine quantité de la matière sous forme de copeaux.

I.11.2 Intérêt de mesure des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir qu'elle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines, et à prévoir les déformations de pièces. Elle intervient également dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau.

I.12 CONCLUSION

Nous avons présenté dans cette étude bibliographique les bases nécessaires à la compréhension de cette étude. La définition de l'usinage, l'avantage du tournage dur, la recherche en tournage dur, les matériaux usinant, les efforts de coupes, la rugosité de surface et l'usure ont été définis.

CHAPITRE II

METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES

Dans ce chapitre nous présentons la Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE) qui est un outil d'analyse privilégié pour les ingénieurs du fait qu'on réalise d'abord un minimum d'expériences afin d'obtenir les facteurs influents d'un procédé de fabrication et par la suite la modélisation de surface des réponses nous permet d'atteindre l'optimum avec le moindre coût. Dans un contexte d'optimisation globale, l'optimisation multicritères est une approche de plus en plus utilisée. Afin de s'inscrire dans cette voie, qui répond notamment à un besoin économique, nous avons utilisé l'approche de la fonction désirabilité.

II.1 INTRODUCTION

Lors d'études multiparamétriques, les stratégies pour mener des expérimentations sont souvent informelles et peu performantes. Elles conduisent en général à de nombreux essais inutiles et à un volume de résultats difficile à exploiter. La méthodologie des plans d'expériences permet de tirer d'un nombre d'essais donné, le maximum d'informations pertinentes concernant l'influence des facteurs. La méthodologie des plans d'expériences sera présentée dans ce chapitre. La technique de screening est traitée ici par l'introduction aux plans factoriels, complets et fractionnaires. A l'aide de cette technique le nombre de facteurs supposés influents pour un procédé sera fortement diminué et les facteurs ayant peu d'influence seront éliminés. Par la suite, est présentée La démarche de la méthode Taguchi. La méthodologie de la surface de réponse, avec les plans composites centrés qui sont largement utilisés dans le processus d'optimisation des phénomènes complexes et non-linéaires. La modélisation par surface de réponse des paramètres de performance (réponses) d'un système nous aidera à diminuer le temps du calcul nécessaire au processus d'optimisation sans avoir à faire appel à cette méthode. Cette approche nous permet de définir la fonction objective nécessaire au processus d'optimisation. L'optimisation globale étant une manière plus efficace pour les entreprises d'optimiser plusieurs réponses simultanément, nous avons utilisé la technique de désirabilité. Les bases théoriques de cette approche seront également présentées. La validation de ces méthodes sera faite aux cinquièmes et sixièmes chapitres de cette thèse par des applications à l'optimisation des conditions de coupes lors du tournage dur (TD) de l'acier AISI 52100.

II.2 LA METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES

II.2.1 Historique

Les plans d'expériences sont issus de méthodes mathématiques et statistiques appliquées à l'expérimentation. Les premiers scientifiques à s'être posé le problème de l'organisation des essais sont des agronomes. Ils avaient en effet beaucoup de paramètres à étudier et n'avaient pas la possibilité de multiplier le nombre d'expériences. De plus, la durée des expériences constituait une contrainte supplémentaire forte. C'est Fisher qui pour la première fois en 1925, proposa une méthode avec laquelle on étudiait plusieurs facteurs à la fois. Cette méthode fut reprise puis développée par des statisticiens et des mathématiciens qui définirent des tables d'expériences permettant de réduire considérablement le nombre d'expériences à effectuer sans diminuer la pertinence de la campagne d'essais. Les grandes entreprises se sont ensuite intéressées à cette méthodologie dans le cadre de l'approche qualité à la suite des travaux du

Docteur Taguchi, [TAG 85]. Ce dernier a fortement contribué à l'expansion de l'utilisation des plans d'expériences en milieu industriel au Japon dans les années 1960. Au cours de ces dernières années, cette méthodologie, du fait de la pertinence des informations apportées, s'est développée dans la plupart des secteurs d'activités.

La Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE) peut s'appliquer à tous les phénomènes type **boîte noire** (Figure II-1) où l'on cherche à optimiser les données de sortie (les réponses) en réglant les données d'entrée (les facteurs). Les données d'entrée sont connues dans la littérature comme étant des facteurs qui peuvent être contrôlés, mais il existe parfois des facteurs qui ne peuvent pas l'être, par conséquent ils ont reçu l'appellation de **facteurs bruits**.

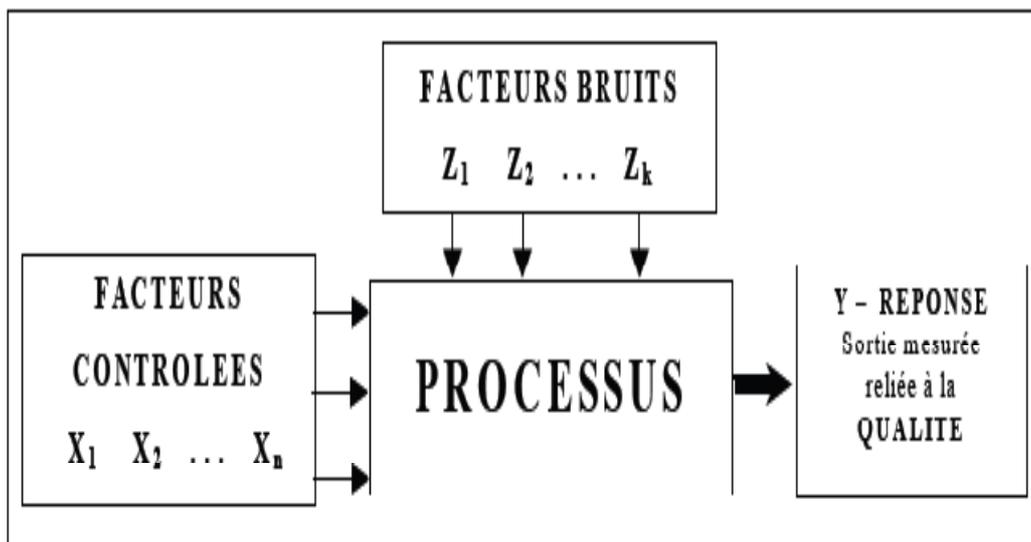


Figure II.1 La boîte noire du processus.

II.2.2 Principe

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est à dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats. De nombreux ouvrages traitent des plans d'expériences. Celui publié par l'association Expérimentique [LOU 05] présente de façon claire les plans d'expériences et propose une bibliographie commentée très riche permettant à l'expérimentateur de trouver les informations qui lui sont nécessaires. Il existe actuellement un nombre important de plans différents.

Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. On peut cependant diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres,
- les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

L'idée essentielle qui doit mener la démarche expérimentale de l'expérimentateur est que l'on met en œuvre un plan d'expériences afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées. On ne pourra donc pas utiliser le même plan pour étudier efficacement les effets des paramètres tout en cherchant un optimum. Afin d'obtenir des informations pertinentes, une démarche méthodologique doit être suivie :

- définitions des objectifs et critères,
- définition des facteurs étudiés et du domaine expérimental,
- construction du plan d'expériences,
- expérimentation,
- analyse des résultats,
- conduite éventuelle d'essais supplémentaires,
- validation des résultats,
- conclusion de l'étude.

II.2.3 Expérimentations

Une expérimentation est une évaluation ou une série d'évaluations permettant d'explorer, de définir et de construire des données (résultats d'essais) pour modéliser ou prévoir le comportement d'un système ou d'un procédé [FOW 98]. Classiquement, les expériences dans la MPE sont des expériences réelles pour lesquelles la modification des conditions expérimentales correspond à des variations plus ou moins importantes sur la réponse à étudier. Les réponses expérimentales sont soumises à des erreurs expérimentales et aux erreurs de mesure. Les simulations numériques permettent de modéliser des phénomènes complexes, de mieux les comprendre et de procéder à des expérimentations par voie numérique en modifiant certains de leurs paramètres. Cette technique met en œuvre des modèles théoriques qui sont les clones de phénomènes réels, souvent très difficiles à modéliser. Si leur utilisation est généralement plus économique et plus souple que les expériences réelles, des validations expérimentales sont toujours nécessaires pour garantir leur pertinence. Malgré cet avantage économique, les simulations numériques sont des essais qui ne peuvent pas être répétés, parce que la variabilité naturelle des réponses n'est plus présente.

Chaque réponse correspondant à un essai, est obtenue à partir d'une seule simulation numérique.

Par contre il existe aussi de nombreuses sources de variations présentes lors de l'initialisation et du déroulement des processus d'expérimentation numérique. Indépendamment de la MPE, parmi les sources de variations on peut citer :

- précision des données d'entrée, compréhension du phénomène à modéliser,
- les possibilités réelles des logiciels utilisés pour la modélisation,
- degré de simplification adopté pour le modèle proposé,
- caractéristiques du maillage du modèle,
- capacité de l'ordinateur, etc.

De plus il faut tenir compte aussi des inconvénients liés à la MPE :

- type de plan utilisé,
- type de modélisation utilisée, etc.

II.2.4 Modélisation de la réponse

Lorsqu'on réalise une étude expérimentale (ou des simulations numériques), d'un phénomène ou d'un procédé, on la caractérise par des réponses dont on suit les variations de en fonction divers paramètres (facteurs) influents. Généralement, l'illustration des résultats est donnée par la représentation graphique de la réponse (surface de réponse) en fonction de deux paramètres (on est limité à l'espace en trois dimensions). Si on considère une réponse théorique Y_{th} , dépendant de n paramètres (facteurs) x_1, x_2, \dots, x_n on peut écrire :

$$Y_{th} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{II.1})$$

Mais la réponse théorique est différente de la réponse obtenue par voie expérimentale ou numérique Y_{exp} à cause des erreurs expérimentales (ou numériques) inhérentes. L'expression précédente devient :

$$Y_{exp} = Y_{th} + \varepsilon = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (\text{II.2})$$

D'une manière générale pour la modélisation d'un système n'ayant que deux variables, on peut écrire le modèle comme suit :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 \quad (\text{II.3})$$

Ce modèle explique la variation de la réponse Y en fonction des deux variables considérées x_1, x_2 , en supposant que la relation est linéaire. Cette hypothèse nous amène à utiliser la régression linéaire [DEA 00, MON 01] pour obtenir les coefficients du modèle dont la représentation géométrique est un plan de régression (figure II-2).

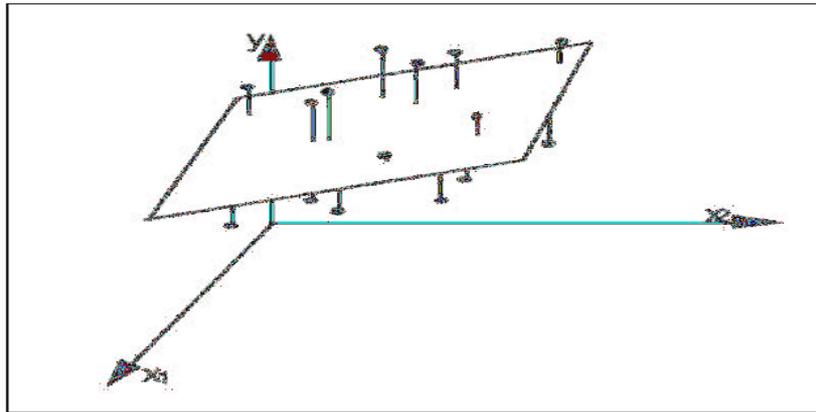


Figure II.2 Plan de régression pour deux variables.

Le plan est ajusté selon le principe des moindres carrés où les sommes des carrés des erreurs d'estimation de la variable dépendante sont minimisées (figure II-2). S'il y a plus de deux variables, on peut étendre la méthode en ajoutant les variables et leurs paramètres :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_p \cdot x_p \quad (\text{II.4})$$

Cette équation est celle d'un hyperplan à p dimensions. Les paramètres β_i sont *les pentes* de l'hyperplan dans les dimensions considérées, et sont appelés *coefficients de régression*.

II.2.5 Intérêt du codage des variables

L'intérêt du codage de variables, tient à l'homogénéité de l'équation polynomiale (modèle) que l'on établit pour la représentation mathématique de la réponse. D'une manière générale on peut affirmer que les paramètres ou les variables d'origine pour un modèle donné, notés P_k , n'ont pas nécessairement les mêmes dimensions ce qui rend difficile la comparaison de leurs coefficients. Dans le cas où les variables sont codées, toutes varient entre les mêmes valeurs minimales et maximales (respectivement -1 et $+1$ notation largement acceptée quand il y a deux niveaux par facteur) elles n'ont plus de dimension, et les coefficients β_i ont tous alors la dimension de la réponse.

D'après [GOU 99], lorsque l'on attribue la valeur -1 au niveau bas et la valeur $+1$ au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- on change l'unité de mesure,
- on déplace l'origine des mesures.

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables que l'on appelle variables centrées réduites ou variables codées (centrées pour indiquer le changement d'origine et réduites pour signaler la nouvelle unité).

Le passage des variables d'origine P_k aux variables centrées réduites x_k et inversement, est donné par la relation suivante [DRO 97]:

$$x_k = \frac{P_k - P_k^0}{\Delta P_k} \quad (\text{II.5})$$

avec :

- x_k : la valeur de la variable codée k ;
- P_k : la valeur de la variable naturelle k ;
- P_k^0 : la valeur de la variable naturelle k au centre du domaine d'étude.
- ΔP_k : est appelé pas de variation et il mesure la variation de la variable réelle k associée à une variation d'une unité de la variable codée correspondante.

Les variables x_k sont appelées variables centrées réduites et elles sont utilisées pour faciliter les comparaisons et l'étude des variations. En travaillant avec ces variables codées, nous pouvons comparer directement leurs différents effets sans tenir compte de leurs unités.

II.2.6 Principales composantes de la méthodologie des plans d'expériences

La MPE est une approche visant tous les phénomènes de type *boîte noire* pour lesquelles on cherche les valeurs optimales des données d'entrée - *les facteurs*, qui permettent une meilleure maîtrise des données de sortie - *les réponses*. Les trois principales composantes de la MPE qui nous intéressent dans cette étude sont :

- la *Méthode Taguchi*
- la *technique de criblage* (ou de *screening* - appellation anglo-saxonne): L'analyse d'un système ou d'un processus commence toujours par une identification de toutes les causes susceptibles d'influencer d'une manière significative le bon déroulement du processus. Parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, la technique de criblage permet de déterminer ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur la variation de la réponse. Cet outil nous permet aussi une simplification du problème (appelée aussi débroussaillage). La question pour laquelle il faut trouver une réponse en utilisant cette technique est :

Pourquoi la réponse varie et surtout en fonction de quels facteurs ?

- la *méthodologie des surfaces de réponse* : Dans le processus d'optimisation on cherche à améliorer le comportement d'un système ou d'un processus, dans un domaine expérimental bien défini, influencé par une ou plusieurs variables. La méthodologie de surface de réponse permet de trouver d'une façon empirique mais économique le lien qui existe entre les paramètres (les facteurs) d'un processus ou d'un système et les caractéristiques de qualité (les réponses) recherchées par l'expérimentateur.

D'une manière générale on peut rappeler que les objectifs de la MPE sont multiples, en présente ici quelques uns ainsi que les plans d'expériences concernés :

- diminuer le nombre d'essais (réels ou simulations numériques)
- étudier un nombre très grand de facteurs (plans fractionnaires)
- détecter les facteurs influents (plans de criblage)
- détecter les interactions entre les facteurs (confusion ou alias)
- rechercher l'optimum (nominal ou extrémum)
- réduire la variabilité ou d'étudier la robustesse d'un processus (plans produits)
- obtenir la meilleure précision sur le résultat (réponse)
- modéliser et optimiser les résultats ou les réponses (plans pour surface de réponse).

II.2.7 Méthode 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 [TAG 93]. Ces tables standards de Taguchi considèrent que les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées. Les interactions d'ordre supérieur à deux seront toujours considérées comme négligeables [PIL 02].

II.2.7.1 La démarche de la méthode Taguchi

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

Phase 1: décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.

Phase 2: sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif. Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.

Phase 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.

Phase 4: réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignnant les réponses dans un tableau.

Phase 5: analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).

Phase 6: conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.).

II.2.7.2 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 L8 (2^7) comporte 8 essais pour étudier un problème possédant au maximum 7 facteurs avec deux niveaux chacun. La table L36 ($2^{11} \times 3^{12}$) comporte 36 essais pour étudier 11 facteurs à deux niveaux et 12 autres facteurs à trois niveaux.

II.2.8 Technique du screening

La technique du screening [SEO 03] permet de déterminer, parmi un ensemble initial de facteurs, les éléments influents d'un processus. Il s'agit donc d'un procédé de sélection ou de criblage [BEN 94, SCH 98]. A l'aide de cette technique, on réalise la comparaison entre les variations de la réponse engendrées par deux sources différentes :

1. les variations des facteurs étudiés ;
2. les variations de grandeurs considérées comme n'ayant pas d'effet sur la réponse (facteurs bruit).

Un facteur est jugé influent (ou déterminant) si son action sur la réponse étudiée est statistiquement supérieure à un certain niveau, fixé par l'expérimentateur. Il s'agit en fait de l'analyse de la variance, présentée plus précisément au cours de ce chapitre. D'une façon plus large, cette analyse permet de détecter et de hiérarchiser les influences des paramètres d'un modèle [BEN 94].

La technique du screening permet d'avancer dans la compréhension de tout procédé parce qu'elle nous permet la détection des facteurs qui ont ou non, une influence significative pour le procédé étudié. Elle constitue une étape importante avant toute analyse plus fine, pouvant être notamment assurée par la *Méthodologie des Surfaces de Réponses* (MSR - Voir

paragraphe II.2.9). Durant cette analyse, l'expérimentateur a tout intérêt à tester l'influence d'un grand nombre de facteurs, même s'il suppose la présence de paramètres non influents.

Inconvénient :

– dans cette approche, les facteurs qui, séparément, n'ont aucun effet, sont éliminés à l'étape du criblage. Or ils peuvent avoir un effet lorsqu'ils sont couplés.

La technique de screening ou criblage est une étape décisive dans le déroulement de l'étude d'un système et elle doit répondre aux exigences suivantes:

- être la plus rapide possible ;
- mettre en évidence le sous-ensemble de facteurs qui semblent avoir une influence prépondérante sur les propriétés **recherchées** (réponses) ;
- permettre de choisir le ou les niveaux les plus favorables de certains facteurs, ou d'éliminer du domaine d'étude les niveaux sans intérêt, etc...

Le modèle mathématique utilisé dans toute étude de criblage est donc un modèle polynomial du premier degré et il peut être représenté par l'équation (II.6) :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon \quad (\text{II.6})$$

Généralement pour l'étude de screening on utilise des plans factoriels complets tant que le nombre de facteurs n'est pas très grand, mais il est toujours possible d'utiliser le plan le mieux adapté à la problématique étudiée. Ces plans ont été largement exploités [DEA 00, MON 01, PIL 97] et sont très faciles à utiliser. Parce qu'on a rarement les moyens de réaliser des plans complets (coût élevé des essais et aussi du temps de réalisation), on peut utiliser des fractions des plans complets appelés aussi plans fractionnaires. Mais le fractionnement d'un plan complet entraîne une confusion des effets ou alias entre les facteurs qui n'est pas identifiable, leurs effets étant soit estimables indépendamment soit complètement confondus [DRO 97]. L'orthogonalité est une propriété qui confère aux plans d'expériences des propriétés remarquables (un meilleur modèle de régression, une meilleure précision sur les coefficients, etc.). On considère qu'une matrice d'expérience X est dite orthogonale si sa matrice de dispersion $(X^T X)^{-1}$ est diagonale. Il existe aussi le critère d'orthogonalité d'Hadamard pour les matrices qui satisfont la relation (II.7) et qui portent son nom. Dans cette équation I_n représente la matrice identité d'ordre n . Ces matrices sont très populaires dans le milieu de l'expérimentation et elles peuvent être reconnues aussi sous l'appellation des matrices de Plackett et Burman ou tables de Taguchi [GOU 99].

$$X^T \cdot X = I_n \quad (\text{II.7})$$

Fisher et Yates ont montré qu'une matrice orthogonale conduit à l'indépendance des estimations des coefficients du modèle. Hadamard a démontré que pour obtenir en n expériences une variance minimale, les matrices d'informations devront satisfaire à la relation (II.7) [DRO 97]. Pour calculer les effets d'un facteur indépendamment des autres facteurs la propriété d'orthogonalité est une condition nécessaire [ALE 95].

II.2.9 Méthodologie des Surfaces de Réponse

L'optimisation de procédé cherche à trouver l'ensemble des conditions de fonctionnement pour les variables du procédé qui ont comme conséquence la meilleure performance du processus. La Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR) [BYE 03, GUA 01, NOO 04, ONU 03] est une collection de stratégies expérimentales de méthodes mathématiques et statistiques qui permet à un expérimentateur de choisir la meilleure des combinaisons des niveaux des paramètres qui optimise un processus. La MSR est une approche d'optimisation développée au début des années 50 par Box et Wilson [BOX 51]. De nombreux chercheurs ont contribué à enrichir cette méthode [QUE 04, MON 01] et elle a été introduite en Europe vers les années 1988 - 1990.

L'objectif d'une telle méthodologie est de :

- déterminer les conditions de fonctionnement optimales pour un système ou un processus,
- déterminer une région de l'espace des facteurs dans laquelle des caractéristiques de fonctionnement (les réponses) sont satisfaites,
- modéliser et analyser un processus pour lequel la réponse est influencée par plusieurs variables,
- établir un rapport (équation de la surface de réponse) entre la réponse et les variables indépendantes qui est dans la plupart des cas inconnu.

Cette technique, issue des techniques de plans d'expériences, vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis à vis des facteurs d'influence significative d'un certain processus ou système. À l'origine, la MSR a été développée pour modéliser des réponses expérimentales [GOU 99], puis, pour modéliser des expériences numériques (peu développé) vers les années 1995. Mais à cause d'un développement rapide du marché et d'une concurrence importante, ces dernières années les chercheurs ont commencé à utiliser de plus en plus les expériences numériques [ALL 00, BUR 04, TRO 03] pour une bonne et simple raison: c'est bien moins cher par rapport aux expérimentations réelles.

La MSR est basée sur une relation d'approximation entre la réponse mesurée y et n variables aléatoires (les facteurs étudiés) en utilisant les données observées d'un processus ou d'un système. La réponse est généralement obtenue par des essais réels ou des simulations numériques. Dans la plupart des cas, la fonction Y qui est une approximation de la réponse mesurée y , est un modèle polynomial du premier ou deuxième degré. Généralement le modèle est donné par :

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_j + \sum_{j=1}^p \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j \quad (\text{II.8})$$

Ce modèle est appelé surface de réponse (Figure II.3) et il est très classique pour décrire des phénomènes physiques. Afin de prévoir plus exactement la réponse, un modèle de second ordre est utilisé pour chercher le caractère non linéaire du phénomène étudié.

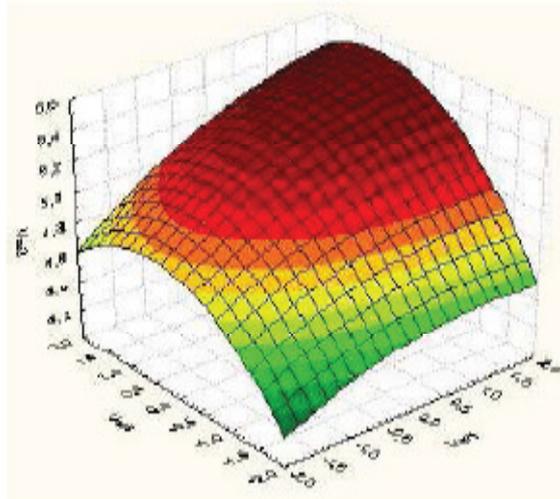


Figure II.3 Surface de Réponse.

De même la fonction Y d'approximation, peut être écrite sous la forme matricielle comme suit

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (\text{II.9})$$

Dans la relation ci dessus X est la matrice de calcul des effets ou la matrice d'expériences, le vecteur β est le vecteur des coefficients du modèle qui contient seulement les coefficients du modèle qui ne sont pas connus, mais qui sont déterminés généralement en minimisant la somme des carrés des résidus ε .

II.2.9.1 Régression multilinéaire

L'objectif de la régression multilinéaire est de trouver un ensemble de coefficients qui résout le mieux possible le système d'équations ci-dessus (équation II.9). Si on fait l'hypothèse de

moindres carrés [DEA 00, MON 01], on cherche le jeu de coefficients qui minimise la somme des carrés des écarts. Sous la forme matricielle on peut écrire :

$$\varepsilon^t \cdot \varepsilon \quad (\text{II.10})$$

La somme sera minimale, par rapport aux coefficients si :

$$\frac{\partial \varepsilon^t \cdot \varepsilon}{\partial \beta} = 0 \quad (\text{II.11})$$

En utilisant la méthode de moindres carrés la solution est donnée par :

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^t \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^t \cdot \mathbf{Y} \quad (\text{II.12})$$

Cette relation est fondamentale pour la compréhension de l'hypothèse des moindres carrés. Le jeu de coefficients ainsi obtenu, appelé aussi coefficients de régression, est utilisé par la suite pour obtenir les réponses dans tout le domaine d'étude.

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{X} \cdot \hat{\beta} \quad (\text{II.13})$$

II.2.9.2 Recherche globale de l'ajustement du modèle

Si on reprend l'équation (II.9) on peut écrire que

$$\mathbf{Y} = \hat{\mathbf{Y}} + \varepsilon = \mathbf{X} \cdot \hat{\beta} + \varepsilon \quad (\text{II.14})$$

On peut démontrer aussi que la somme des carrés des réponses mesurées est égale à la somme des carrés de réponses prédites augmentée de la somme des carrés des résidus, soit

$$\mathbf{Y}^t \cdot \mathbf{Y} = \hat{\beta}^t \cdot \mathbf{X}^t \cdot \mathbf{X} \cdot \hat{\beta} + \varepsilon^t \cdot \varepsilon \quad (\text{II.15})$$

L'équation (II.15) s'appelle l'équation de l'analyse de la variance et elle représente la synthèse de l'analyse statistique.

- la somme des carrés des réponses mesurées ou la Somme des Carrés Totaux (*SCT*)
- la somme des carrés de réponses prédites ou la Somme des Carrés due à la régression (*SCR*).
- la Somme des Carrés des résidus ou due à l'Erreur (*SCE*).

Pour évaluer le degré d'explication du modèle par rapport aux réponses mesurées, on établit le rapport R^2 .

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} \quad (\text{II.16})$$

Ce rapport s'appelle **coefficient de corrélation multiple**, ou coefficient de **détermination**, il nous donne une indication sur la qualité de l'ajustement. En fait, il représente le rapport entre la variance expliquée par le modèle ou due à la régression (*SCR*) et la variance totale (*SCT*). Il

nous donne des informations sur l'existence d'une relation linéaire entre les variables considérées.

Le rapport R^2 (équation II.16) varie entre 0 et 1. S'il vaut zéro c'est que le modèle n'explique rien. S'il vaut 1 c'est que le modèle explique toutes les réponses mesurées. Ce rapport (R^2) n'est pas une garantie absolue de la qualité du modèle. Un coefficient de corrélations nul ne signifie pas l'absence de toute relation entre les variables considérées. Il peut exister une relation non-linéaire. Cependant dans le contexte de la régression multiple, cela pose le problème de la sur-paramétrisation du modèle. Plus on ajoute de variables explicatives (les facteurs), plus le R^2 augmente, même si les nouvelles variables explicatives sont très reliées à la variable dépendante (la réponse). Tout dépend du nombre de résultats et du modèle choisi. Pour éviter ce phénomène, on calcule le coefficient R^2 ajusté.

II.2.9.3 Le R^2 ajusté

Par définition, ce coefficient R^2 ajusté - R^2_A est donné par la relation [GOU 99] :

$$R^2_A = 1 - \frac{SCE / (N - p - 1)}{SCT / (N - 1)} \quad (\text{II.17})$$

Où :

- p est le nombre de facteurs
- N correspond au nombre total de simulations du plan d'expériences.

II.2.9.4 Stratégie de sélection du meilleur sous-modèle

Lorsque le nombre de facteurs est grand, il n'est pas raisonnable d'explorer tous les modèles possibles afin de sélectionner le *meilleur*. Différentes stratégies sont donc proposées qui doivent être choisies en fonction de l'objectif recherché et des moyens de calcul disponibles. Trois types d'algorithmes utilisés souvent dans la littérature [BES 03, GOU 99] sont résumés ci-dessous :

1. Pas à pas pour lequel il y a trois modalités :
 - Sélection (forward)
 - Elimination (backward)
 - Mixte (stepwise)
2. Par échange pour lequel il y a deux modalités :
 - Maximisation de R^2
 - Minimisation de R^2

3. Global

– L'algorithme de Furnival et Wilson

II.2.9.5 Plans Composite Centraux

Les Plans Composites Centraux sont un bon complément des plans orthogonaux, de par leurs propriétés statistiques, mais aussi parce qu'ils sont meilleurs que les plans orthogonaux pour certains problèmes [DEA 00, GOU 99, MON 01]. Ils sont développés, en particulier, dans la Méthodologie des Surfaces de Réponse, et ils permettent l'étude d'un modèle quadratique, dans la plupart des cas des phénomènes non linéaires. Tous les facteurs pour lesquels on souhaite tester l'influence quadratique auront 5 niveaux. Les plans composites centraux sont constitués de trois parties, ce qui permet une démarche séquentielle [BEN 94] :

1. Le point au centre du domaine expérimental (Figure II.4), usuellement noté par 0 répété plusieurs (n_0) fois pour estimer la variance de répétabilité.
2. Un plan orthogonal en NF essais, qui est le plus souvent un plan factoriel ou un plan de Box-Hunter, et qui combine des facteurs à 2 niveaux usuellement notés +1 et -1.
3. Les points en étoile (Figure II.4). Ces points représentent 2 essais par facteur, usuellement notés + δ et - δ .

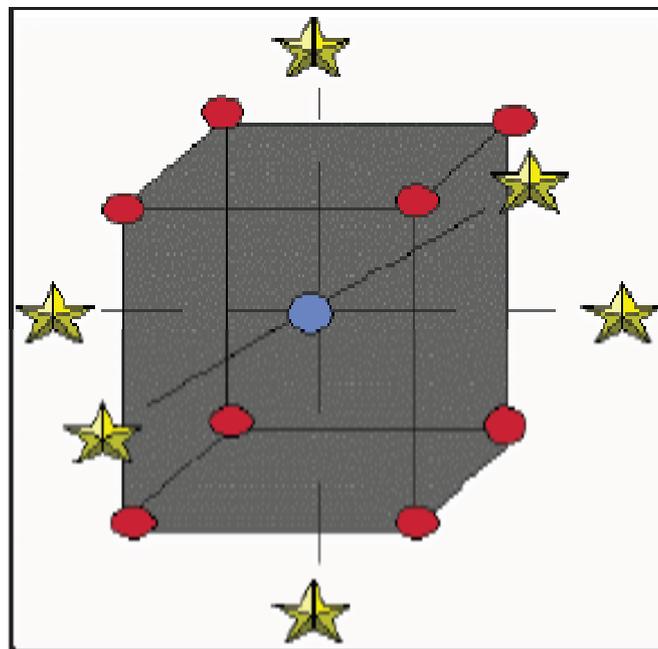


Figure II.4 Plan composite centré pour 3 facteurs.

Le domaine de variation des facteurs est ramené à $[-\delta; +\delta]$. Ainsi, un facteur variant dans l'intervalle [Min ; Max] sera découpé en 5 niveaux : - δ , -1, 0, +1, + δ calculés selon le tableau II.1.

Niveau	Valeurs réelles
$-\delta$	Min
-1	$\frac{Min + Max}{2} - \frac{1}{\delta} \left(Max - \frac{Min + Max}{2} \right)$
0	$\frac{Min + Max}{2}$
+1	$\frac{Min + Max}{2} + \frac{1}{\delta} \left(Max - \frac{Min + Max}{2} \right)$
$+\delta$	Max

Tableau II.1 Calcul des niveaux des facteurs

Le paramètre δ est supérieur à 1 et est calculé grâce à la formule :

$$\delta = \sqrt[4]{N_F} \quad (\text{II.18})$$

Où :

– N_F est le nombre d'essais du plan orthogonal

Le nombre total des essais N peut être calculé grâce à la formule :

$$N = N_F + N_\delta + n_0 = 2^k + 2 \cdot k + n_0 \quad (\text{II.19})$$

Où :

– $N_F = 2^k$ est le nombre des essais pour le plan factoriel $2k$ (figure II.4 – les points en rouge).

– $N_\delta = 2k$ est le nombre des essais appelé en étoile (figure II.4).

– n_0 est le nombre des essais au centre du domaine pour estimer la variance de répétabilité. (figure II.4 - le point en bleu ou le point central).

II.2.9.6 Propriétés des plans composites centrés

La qualité d'un modèle dépend de la matrice de dispersion $(X^T X)^{-1}$, donc des éléments de la matrice d'information $(X^T X)$, et par conséquent de la structure de la matrice d'expériences et de la forme analytique du modèle. Il est donc nécessaire de classer les matrices d'expériences de bonne qualité, qui, si le modèle postulé représente bien le phénomène étudié, nous permettra de connaître en n'importe quel point du domaine expérimental d'intérêt la valeur de la réponse. Il existe plusieurs critères de qualité mais dans ce rapport on ne présente que les propriétés d'isovariance par rotation et presque orthogonalité qui confèrent aux plans d'expériences par surfaces de réponse une meilleure qualité de la modélisation.

Un plan d'expériences remplit la propriété d'isovariance par rotation si la variance des réponses prédites est la même en tous les points du domaine d'étude [DEA 00]. La propriété d'isovariance par rotation est une condition nécessaire à l'obtention d'une précision uniforme. La propriété d'isovariance par rotation pour un plan composite centré est remplie si la distance entre les points en étoile (Figure II.4) satisfait la condition :

$$\delta = (2^k)^{1/4} \quad \text{(II.20)}$$

Où : k est le nombre de facteurs étudiés.

A la place de l'isovariance par rotation, on peut respecter le critère d'orthogonalité. Pour cela il faudrait une disposition des points qui entraîne une matrice d'information ($X^T X$) diagonale. Mais cela n'est pas possible car on ne peut pas annuler les éléments correspondant aux termes constants et aux termes carrés qui sont différents de zéro et ne se retrouvent pas sur la diagonale de la matrice d'information. Pour cela il faut donc envisager un autre critère, celui de la presque orthogonalité. Pour aboutir à ce critère il faut que la sous-matrice, obtenue en éliminant la première ligne et la première colonne de l'inverse de la matrice d'information ($X^T X$), soit diagonale. On peut démontrer [GOU 99] que cela est possible si :

$$\delta = \left(\frac{N_F (\sqrt{N} - \sqrt{N_F})^2}{4} \right)^{1/4} \quad \text{(II.21)}$$

Le nombre de points des plans factoriels et de points en étoile est, en général défini par l'expérimentateur avant les essais. La valeur de δ est donc fonction du nombre des points au centre n_0 . Le tableau II.2 permet de choisir ce nombre et la valeur de δ pour respecter le critère de presque orthogonalité [DRO 97].

Valeur de n_0	Nombre de facteurs						
	1	2	3	4	5	6	7
$n_0 = 1$	1	1,215	1,414	1,547	1,596	1,724	1,761
$n_0 = 2$	1,078	1,287	1,483	1,607	1,662	1,784	1,824
$n_0 = 3$	1,147	1,353	1,547	1,664	1,724	1,841	1,885
$n_0 = 4$	1,21	1,414	1,607	1,719	1,784	1,896	1,943

Tableau II.2 Valeurs de δ fonction du nombre de points au centre du domaine.

II.2.9.7 Utilité des points au centre du domaine d'étude

Parce qu'un plan composite centré n'est pas orthogonal (l'inverse de la matrice d'information ou matrice de dispersion n'est pas diagonale - voir la propriété d'orthogonalité) et ne peut

jamais l'être [BEN 94], en augmentant le nombre de répétitions des essais au centre du domaine on tend vers l'orthogonalité. Les points au centre du domaine d'étude changent les propriétés des plans utilisés et nous apportent aussi des informations supplémentaires sur le modèle utilisé. Lorsque le nombre de points centraux augmente, on obtient une zone dans laquelle l'erreur de prédiction est uniforme [GOU 99] et par conséquent la qualité de la modélisation croît. Les essais au centre du domaine d'étude sont des essais répétés plusieurs fois dans les mêmes conditions afin d'estimer la variance de répétabilité. Les points au centre du domaine d'étude sont un outil nécessaire pour obtenir une information sur la présence ou non d'un effet quadratique pour un modèle postulé. Ces points sont utilisés aussi pour estimer l'erreur expérimentale et particulièrement pour chercher si le modèle proposé est adéquat. Par exemple pour un plan composite centré afin d'obtenir une variance uniforme sur la modélisation il faut ajouter 3 à 5 points centraux [MON 01].

II.3 L'OPTIMISATION MULTICRITERES

II.3.1 introduction

Typiquement, dans l'analyse des données industrielles il y a beaucoup de réponses (variables) qui devront être étudiées en même temps. En plus, pour optimiser ces réponses individuellement on peut rencontrer des contradictions pour les différents niveaux de facteurs acceptables pour une réponse et non pour les autres. Le but de l'optimisation multicritères est de minimiser au mieux les différents objectifs [YAN 02]. En effet, la solution que l'on obtient est une solution de compromis. Elle minimise un certain nombre d'objectifs tout en dégradant les performances sur d'autres objectifs. Mais finalement la solution acceptée va assurer une satisfaction globale sur le processus parce qu'elle répondra à plusieurs objectifs en même temps. Le but de ce paragraphe est de vous présenter une méthode d'optimisation multicritères, qui sera appliquée afin d'améliorer les performances d'usinage lors du tournage dur (Voir Chapitre V).

II.3.2 Méthode de désirabilité

D'une façon générale, le coût de production est exprimé comme une somme du non qualité et du coût de fabrication. L'optimisation multicritères mesure la sensibilité des réponses pour la qualité finale des produits. Cette méthode propose pour chaque réponse $Y_j(x)$, $j = 1, 2, \dots, p$, une fonction $d_j(Y_j(x))$ qui peut prendre des valeurs entre 0 et 1, valeurs qui mesurent la sensibilité de la réponse et qui s'appelle fonction de désirabilité. Ici x signifie le vecteur des facteurs ou des variables indépendantes $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Après avoir défini les fonctions

pour chaque réponse individuellement, une fonction objective globale est définie comme une moyenne géométrique des différentes désirabilités.

$$D(x) = \left[d_1(Y_1(x)) \cdot d_2(Y_2(x)) \cdot \dots \cdot d_p(Y_p(x)) \right]^{\frac{1}{p}} \quad (\text{II.22})$$

La fonction de désirabilité $d_j(Y_j(x))$ a été proposée originalement par [HAR 65] de deux façons :

$$d_j(Y_j(x)) = e^{-\frac{Y_j(x)}{Y_{j \max}}}$$
(II.23)

$$d_j(Y_j(x)) = e^{-\left| \frac{Y_j(x) - Y_{j \min}}{Y_{j \max} - Y_{j \min}} \right|}$$
(II.24)

Puisque les transformations (II.23 ou II.24) ne sont pas très flexibles dans le sens où ces fonctions ne peuvent pas assumer une variété de formes, [DER 80] et autres ont proposé deux autres fonctions :

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_j(x) \leq Y_{\min j} \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_{\min j}} \right)^r & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 1 & \text{si } Y_j(x) \geq Y_{\max j} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{T_j - Y_{\min j}} \right)^s & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq T_j \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\max j}}{T_j - Y_{\max j}} \right)^t & \text{si } T_j \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 0 & \text{si } Y_j(x) \notin [Y_{\min j}; Y_{\max j}] \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Dans les équations (II.25) et (II.26), r , s et t sont des variables définies par l'utilisateur fonction de leur expérience permettant à celui-ci d'indiquer les limites de la fonction de désirabilité autour de la valeur cible (T_j) pour une réponse j .

Les quantités $Y_{min j}$ et $Y_{max j}$ représentent les limites de désirabilité pour la réponse j . L'approche de la fonction de désirabilité repose en effet sur l'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse pour la modélisation polynomiale de chaque réponse $Y_j(x)$, par une substitution des polynômes dans les équations (II.25), (II.26), afin de faire encore une substitution par les désirabilités individuelles dans l'équation (II.22). Finalement, il reste une seule fonction objective pour chercher la solution x , tout en maximisant la désirabilité totale $D(x)$.

Comme il a été indiqué par [CAS 96] et autres, l'existence de points de discontinuité dans la fonction de désirabilité ne permet pas l'utilisation des algorithmes à base de gradient pour l'optimisation. Ainsi, [CAS 96] et autres ont proposé une fonction de désirabilité modifiée pour résoudre ce problème, de telle sorte que l'algorithme généralisé du gradient réduit (Generalized Reduced Gradient GRG) puisse être appliqué. Ils ont utilisé une fonction de désirabilité continue par intervalles pour laquelle le point de discontinuité a été corrigé en utilisant un polynôme quadratique de la forme :

$$f(Y) = A + BY + CY^2 + DY^3 + EY^4 \quad \text{(II.27)}$$

Pour laquelle A, B, C, D et E sont des paramètres. Ils ont proposé cinq conditions à satisfaire par l'équation (II.27). Plus de détails au sujet de cette méthode peuvent être trouvés dans [CAS 96].

L'approche proposée par [CH'N 05] n'a aucun point de discontinuité dans la fonction de désirabilité. Par ailleurs, cette approche permet l'utilisation de l'algorithme GRG qui trouve les configurations optimales pour les p réponses.

Pour la méthodologie de la surface de réponse l'utilisation des variables codées (ou des variables centrées réduites) pour trouver le modèle de régression pour p variables est une pratique courante. La relation la plus répandue pour la transformation des variables réelles en variable codées a été proposée par [KHU 87] :

$$x = \frac{2 \cdot t - (u + l)}{u - l} \quad \text{(II.28)}$$

Pour laquelle :

- u est la valeur supérieure pour t
- l est la valeur inférieure pour t

– t est la valeur cible étudiée avec $l \leq t \leq u$

– x est la valeur codée qui correspond à t .

L'approche par la fonction de désirabilité est l'une des méthodes les plus utilisées dans l'industrie, pour traiter l'optimisation des procédés à réponses multiples. Dans une démarche d'optimisation globale, nous proposons dans ce rapport l'application la technique de la désirabilité afin d'optimiser plusieurs réponses simultanément. La clef de la méthode consiste en l'addition de **1** dans la relation du changement de variables réelles en variables codées. Cette modification donne la nouvelle forme de la fonction de désirabilité :

$$d^*(Y) = \frac{2 \cdot Y - (USL + LSL)}{USL - LSL} + 1 = \left(\frac{2}{USL - LSL} \right) \cdot Y + \left(\frac{-2LSL}{USL - LSL} \right) \quad (\text{II.29})$$

Pour laquelle :

– USL est la valeur limite supérieure pour la réponse Y

– LSL est la valeur limite inférieure pour la réponse Y

– Y est la réponse ou une caractéristique de qualité avec $LSL \leq Y \leq USL$

– $d^*(Y)$ est la désirabilité proposée pour la fonction objectif avec $0 \leq d^*(Y) \leq USL$

La motivation de l'auteur [CH'N 05] pour l'addition de **1** est de convertir la fonction de désirabilité ou de s'assurer qu'elle n'est pas négative.

La fonction de désirabilité $d^*(Y)$ proposée par cette méthode est utilisée pour transformer la qualité de la réponse par une valeur de désirabilité souhaitée.

$$0 \leq d^*(Y) \leq 2 \quad (\text{II.30})$$

La désirabilité totale proposée par [CH'N 05] est obtenue par une somme pondérée avec les poids e_i (degré d'importance) de chaque réponse individuelle.

$$Desirabilite\ Totale = \frac{\sum_{i=1}^p e_i \cdot |d_i(Y_i) - d_i(T_i)|}{p} \quad (\text{II.31})$$

Pour laquelle :

– $d_i(Y_i)$ est la désirabilité individuelle pour la réponse Y_i

– $d_i(T_i)$ est la désirabilité individuelle ciblée T_i pour chaque réponse

– e_i est le degré d'importance pour chaque réponse individuelle, avec la relation :

$$\sum_{i=1}^p e_i = 1 \quad (\text{II.32})$$

L'utilisation de cette approche d'optimisation est conseillée pour des phénomènes à caractère fortement non linéaire comme les procédés de fabrication. Son efficacité sera prouvée dans

les deux chapitres d'applications (Chapitres V et VI) afin d'optimiser plusieurs réponses simultanément durant le processus du tournage dur.

Les avantages de l'utilisation la technique de la désirabilité sont :

- par cette approximation la fonction de désirabilité n'a pas des points de discontinuité. Cette fonction est continue, donc différentiable.
- l'approximation polynomiale n'est pas exigée.
- de plus la méthode proposée permet l'utilisation de l'algorithme GRG pour trouver l'optimum.

II.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, un rappel théorique détaillé sur les plans d'expériences a été présenté. Les plans constituent une méthodologie efficace pour mener une étude paramétrique avec un nombre réduit d'expériences.

La méthodologie des plans d'expériences a été présentée dans ce chapitre en mettant l'accent sur les plans plus spécifiques qui ont été utilisés pendant ces travaux de doctorat (le plan de Taguchi et le plan composite centré).

Une étude détaillée sur l'analyse des modèles mathématiques est abordée ensuite afin de lancer l'optimisation multicritère. Pour les rendre comparables, les réponses sont transformées en fonctions de désirabilités individuelles qui nous servent à calculer la fonction de désirabilité globale que l'on cherche à maximiser. Ces différents éléments seront utilisés dans les deux derniers chapitres afin de mettre en oeuvre la méthode des plans d'expériences et son application pour l'optimisation des conditions de coupes lors du tournage dur (TD) de l'acier AISI 52100.

Le chapitre suivant porte sur la description: des caractéristiques du matériau testé dans cette étude, ainsi que celle des plaquettes de coupe utilisées, des différents équipements, les plans d'expériences utilisés et méthodes de mesure mise en oeuvre permettant d'aboutir à une caractérisation scientifique.

CHAPITRE III

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Dans ce 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 et les conditions de traitement thermique des éprouvettes et aussi les plans d'expériences utilisés.

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des moyens exploités pour la réalisation des expériences, afin de caractériser le comportement du couple (outil-matière) lors du tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6 (AISI 52100) avec des outils en céramique mixte revêtue (CC6050) et non revêtue (CC650). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés et qui servent au suivi de l'évolution de l'usure, de l'effort de coupe générée et de la rugosité des surfaces obtenues. Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS), département de Génie Mécanique (Université 08 Mai 1945 – Guelma).

III.2 BANC D'ESSAIS ET EQUIPEMENT DE MESURE

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences. Un banc d'essais comportant un tour à charioter et à fileter, une plate forme Kistler pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée, un microscope pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe.

III.2.1 Machine outil

Les essais de chariotage ont été réalisés sur un tour conventionnel de la société chèque « **TOS TRENCIN** » modèle **SN40** avec les caractéristiques suivantes (figure III-1):

- Puissance du moteur électrique: 6.6 kW
- Les fréquences de rotation disponibles sur le tour sont : (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400 et 2000) tr/min.
- Les avances disponibles sur la machine sont : (0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24;...0,8) mm/tr.

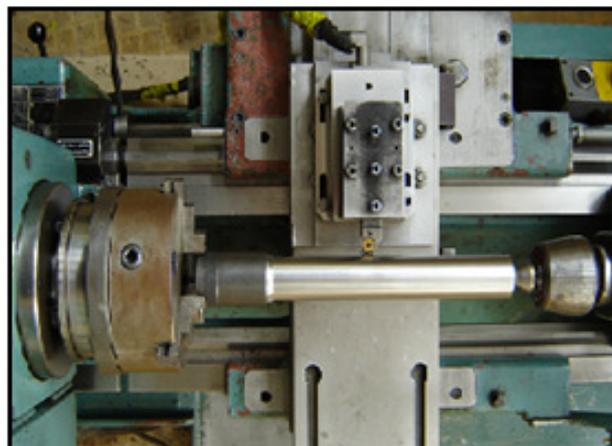


Figure III-1 Opération de chariotage sur la machine outil utilisée

III.2.2 Matériau utilisé pour les essais d'usinage

L'acier à roulement le plus souvent utilisé dans l'industrie du roulement est un acier hypereutectoïde allié (acier 100Cr6). Cet acier est connu sous d'autres noms à l'étranger, selon la norme en vigueur. Aussi entendra-t-on parler du 100Cr6 sous les différentes appellations SAE 52100 (Etats-Unis), GCr15 (Russie, Chine), JIS SUJ 2 (Japon), AISI 52100 (Europe)...etc.

Lors de la solidification la coulée de l'acier 100Cr6, la structure de grain obtenu est celle d'un acier à haut carbone non-corroyé (ferrite et large plages de perlite en grains de grande dimension (figure III-2(a)). L'acier est le plus souvent livré sous forme de longues barres ou en tubes à l'état recuit. Sa composition chimique est donnée dans le tableau III-1. Le traitement thermique de recuit avant livraison consiste de façon schématique en un palier de 2 heures à 800-810°C, un refroidissement relativement rapide jusqu'à 750°C, un refroidissement lent à 6°C. h⁻¹ de 750 °C à 680°C, puis un refroidissement à l'air. Le cycle complet prend près de 24h. L'acier présente alors une microstructure perlitique globulisée: de la ferrite et des carbures globulaires (figure III-2(b)).

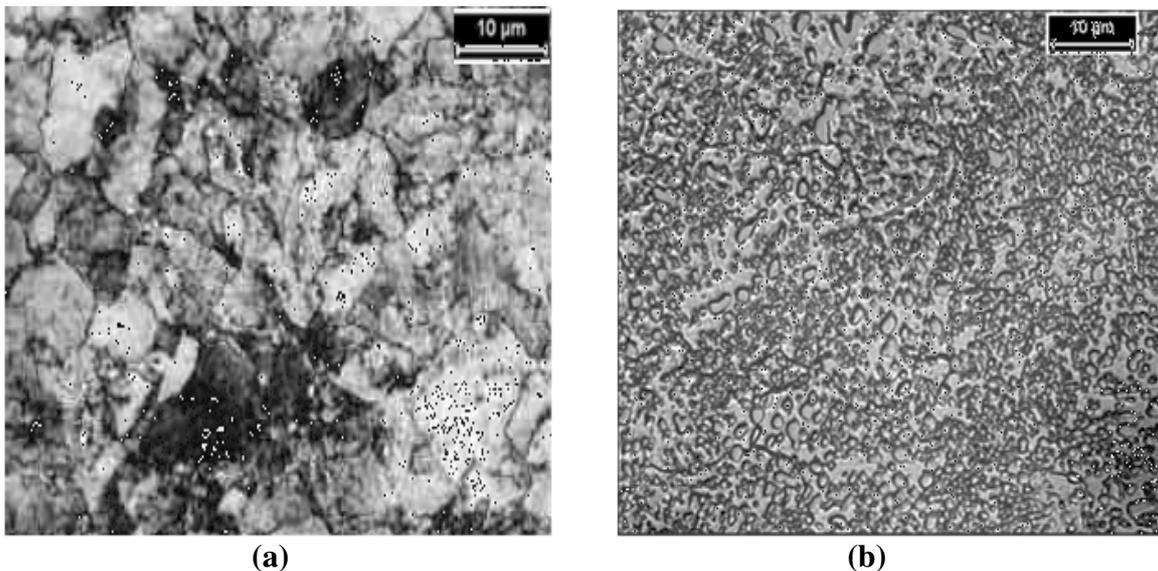


Figure III-2 Micrographies du 100Cr6 (a): brute de coulée ; (b): à l'état recuit après attaque au Nital [**BRO 09**].

Pour quantifier l'influence de la dureté de la pièce et des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) sur les performances d'usinage (l'effort de coupe, usure de l'outil et la rugosité des surfaces usinées) nous avons usiné des barres de diamètre $\Phi = 54$ mm et de longueur $L = 400$ mm. Ces barres sont divisées en neuf sections de 30 mm de longueur chacune (figure III-3 et III-4). L'éprouvettes utilisées pour quantifier l'effet du

rayon bec de l'outil et des conditions de coupe sur les performances d'usinage (l'effort de coupe et la rugosité des surfaces usinées) sont de diamètre 80 mm, de longueur L= 400 mm et avec une dureté 62 HRC (figure III-5).

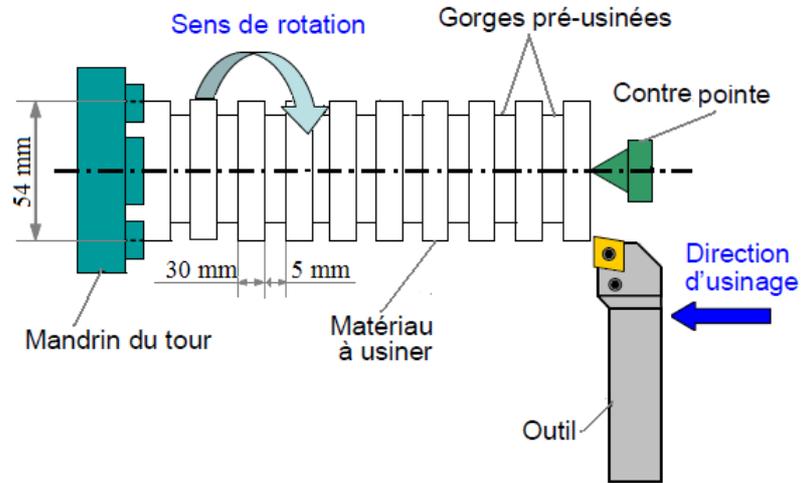


Figure III-3 Représentation schématique du mode d'usinage des essais des efforts de coupe et rugosité.

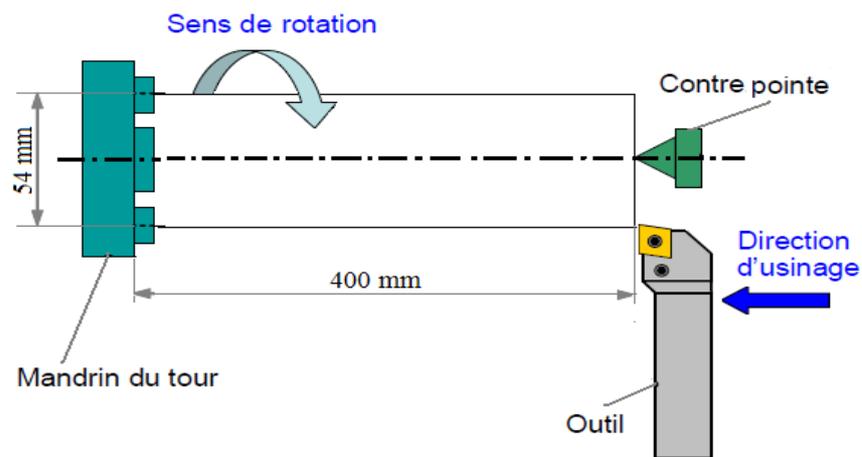


Figure III- 4 Représentation schématique du mode d'usinage des essais d'usure.

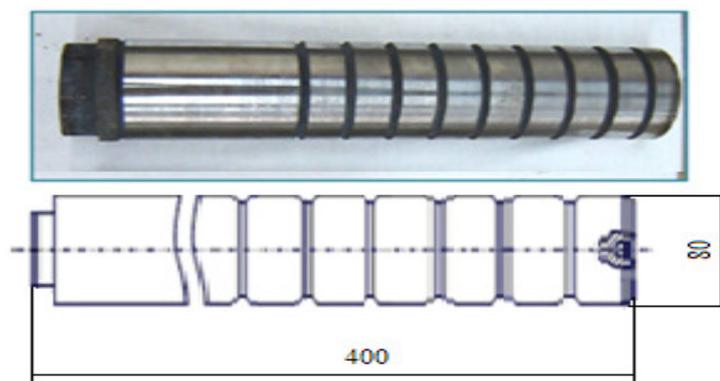


Figure III-5 Éprouvette utilisée pour l'étude de l'influence du rayon bec de l'outil.

L'analyse de la composition chimique du matériau étudié a été faite au laboratoire du Complexe Sidérurgique ArcelorMittal-Annaba (ex El- Hadjar).

Éléments	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	P	Cu
(%) en Masse Selon AFNOR	0.95-1.10	0.15-0.35	0.2-0.4	≤0.025	1.35-1.60	≤0.1	≤0.03	≤0.35
Valeur Mesurée	1.03	0.23	0.35	0.028	1.40	0.04	0.01	0.28

Tableau III -1 Composition chimique de l'acier à roulement 100Cr6.

L'acier 100Cr6 est un matériau dont les caractéristiques ont été étudiées par plusieurs auteurs [POU 99], [GUO 02], [COS 04] et [HAB 06]. Parmi, ces caractéristiques mécaniques principales, on peut relever une limite d'élasticité σ_0 de 2360 MPa à 20 °C. Les principales propriétés mécaniques et thermiques de cet acier à température ambiante sont données dans le tableau III-2.

Grandeur	Symbole	Valeur	Unité
Module d'élasticité	E	210	GPa
Coefficient de Poisson	ν	0.3	-
Masse volumique	ρ	7827	Kg.cm ⁻³
Capacité thermique massique	C_p	458	J.kg ⁻¹ . °C ⁻¹
Conductivité thermique	σ_{th}	43	W.m ⁻¹ . °C ⁻¹

Tableau III -2 Propriétés mécaniques et thermiques de l'acier à roulement 100Cr6.

III.2.3 Traitement thermique des éprouvettes

Pour le traitement thermique des éprouvettes, nous avons réalisé une trempe suivie d'un revenu à différentes températures 480°C, 380°C et 170°C (voir figure III-6), ce qui a augmenté la dureté des éprouvettes du 46 à 62 HRC (tableau III-3). Lors de la trempe, un réchauffage des éprouvettes ramène une dernière fois le métal en phase austénitique (compte tenu de la concentration en carbone et en chrome, la température est de 840°C). Le carbone et le chrome de la cémentite sont remis en solution solide dans le fer gamma. Puis le métal subit un refroidissement rapide, qui a pour effet de provoquer la formation d'une martensite.

Le revenu à 170°C assure la précipitation du carbone, et donne au métal son faciès métallographique final, une martensite fine parsemée de fins carbures de type cémentite (Fe Cr)₃C et libérée des contraintes internes [BIS 01].

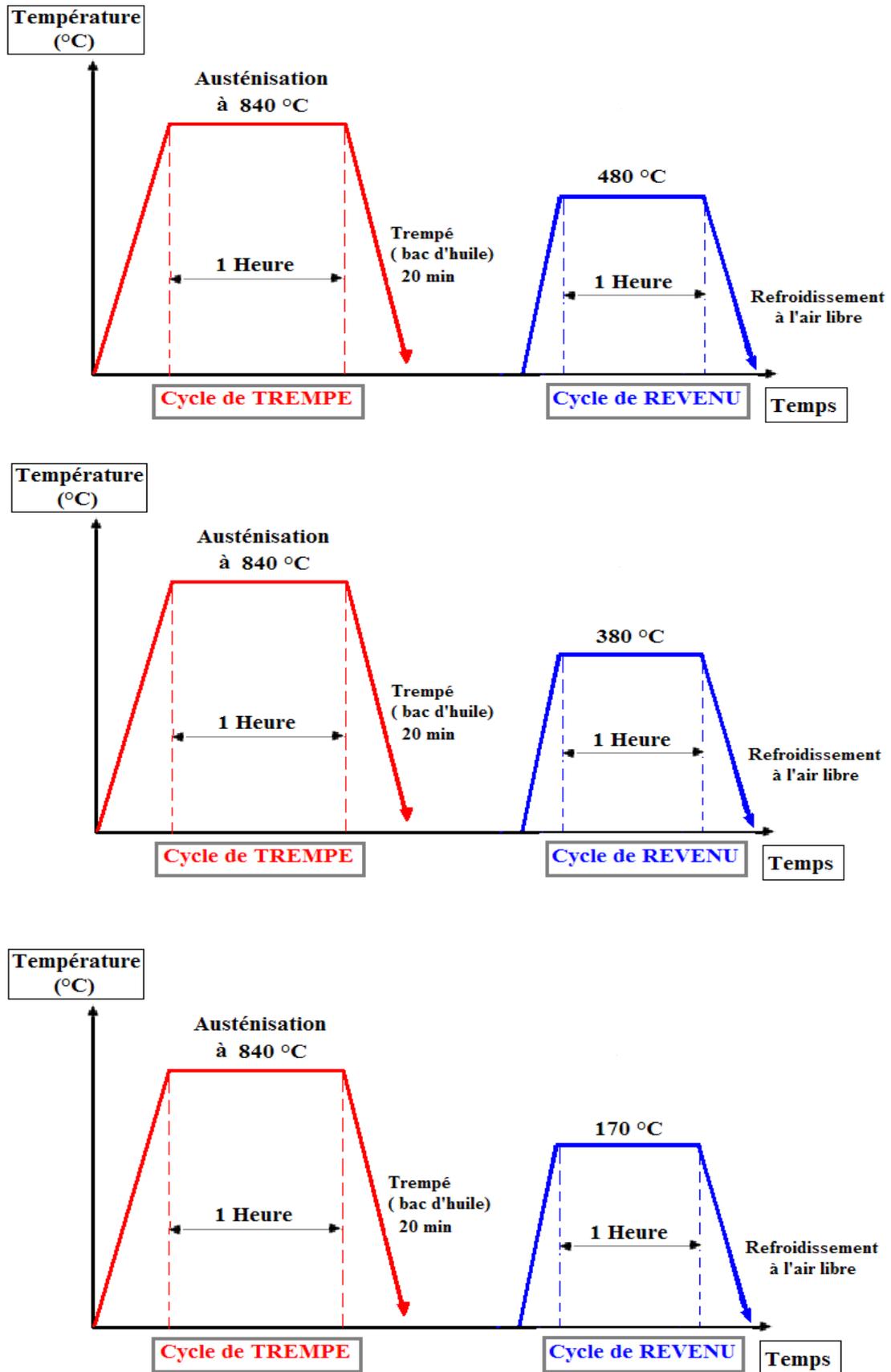


Figure III-6 Cycles des traitements thermiques utilisés pour obtenir différentes duretés.

Acier	Dureté avant traitement	Traitement thermique			Dureté moyenne après traitement
		Austénisation	Trempe	Revenu	
100Cr6	22 HRC	Maintien à 840°C	Refroidissement Rapide/ Bac d'huile	480°C	46HRC
				380°C	52HRC
				170°C	62HRC

Tableau III-3 Conditions de traitement thermique

Les traitements thermiques des éprouvettes ont été réalisés dans un four électrique pour atelier de production (figure III-7). Les caractéristiques de ce four sont citées dans le tableau III-4.

Marque	Dimensions (mm)			Puissance (KW)	T° max
	Largeur (b)	Longueur (L)	Hauteur (H)		
C100S	400	600	430	14	1200 °C

Tableau III-4 Caractéristiques du four électrique.



Figure III-7 Four à chambre électrique pour le traitement thermique des éprouvettes.

La figure III-8 représente la cinétique de transformation de l'acier 100Cr6 après une remise en solution à 840°C.

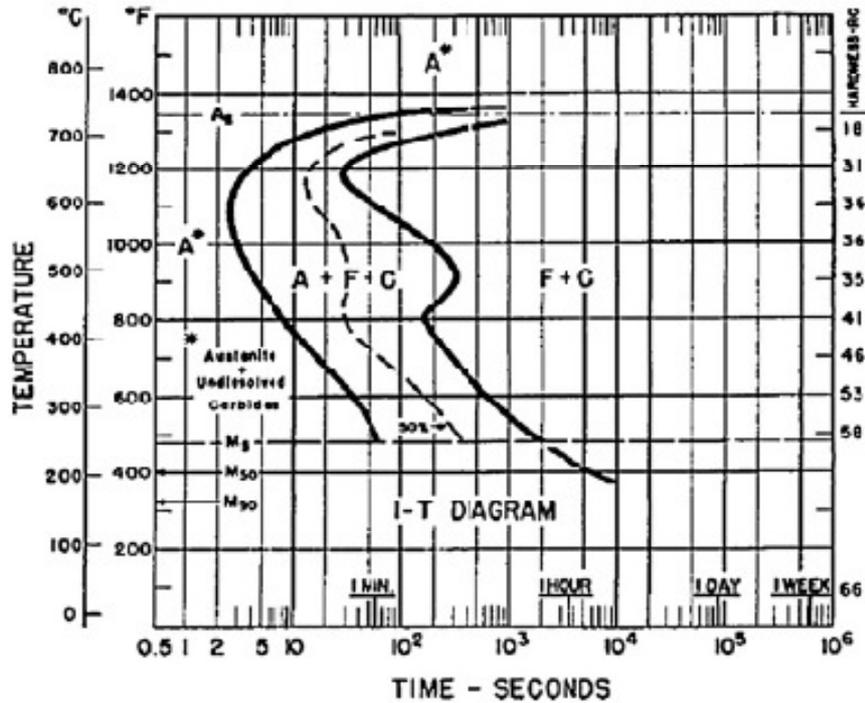


Figure III-8 Diagramme (Transformation-Temps-Température) de l'acier 100Cr6 [VOO 91].

La courbe de revenu pour l'acier 100Cr6 est indiquée sur la figure III-9. Les valeurs de la dureté peuvent atteindre à l'état trempé ~ 64 HRC.

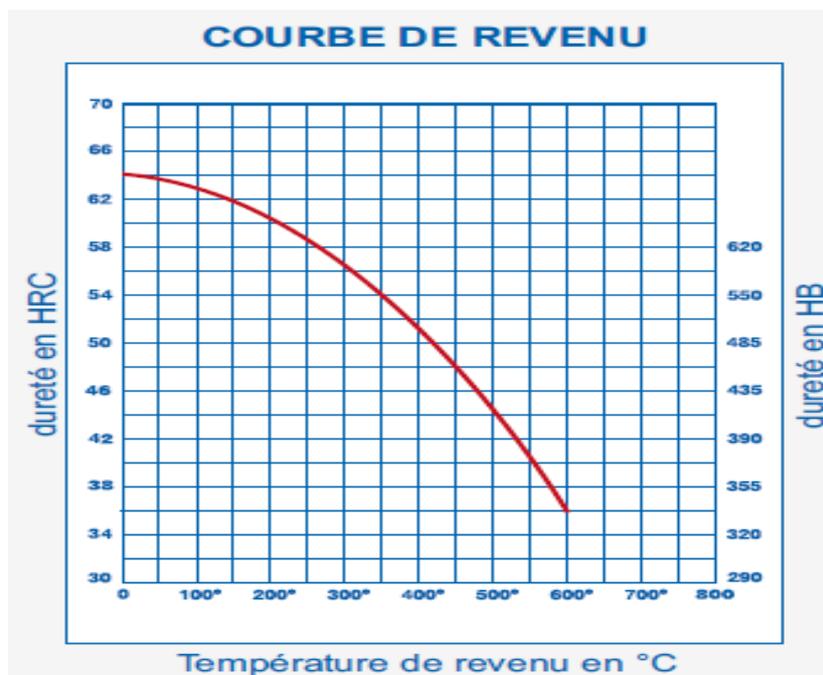


Figure III-9 Diagramme de revenu pour l'acier 100Cr6.

Les opérations de traitement thermique des éprouvettes sont représentées dans la figure III-10 (a, b et c).



(a) Chauffage des éprouvettes (b) Transport de la pièce (c) Trempe à l'huile

Figure III-10 Opérations de traitement thermique.

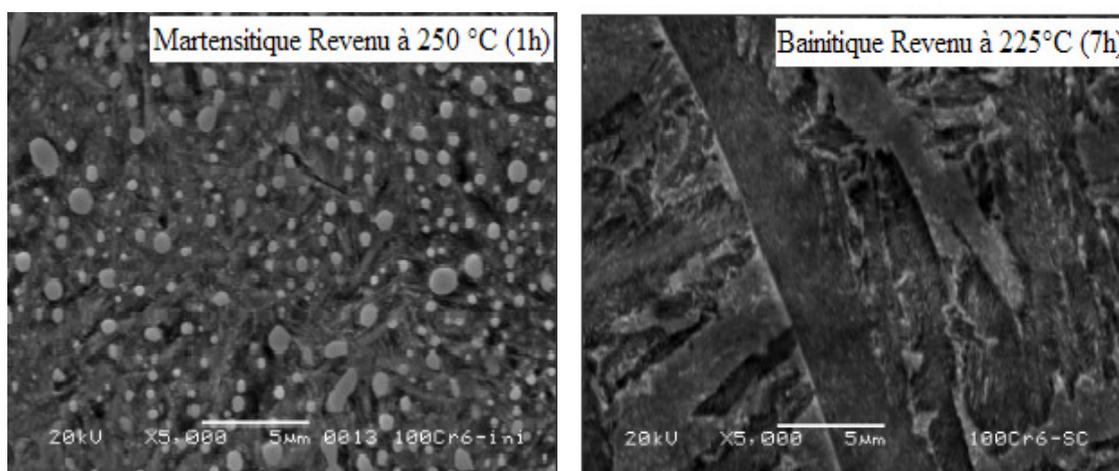
III.2.4 Microstructure

Les microstructures de l'acier 100Cr6 trempé et revenu à différentes températures est donc obtenu à l'issue de plusieurs traitements thermiques sont étroitement liée à ces derniers.

La taille du grain joue un rôle important [TRO 98] :

- Un grain grossier limite l'usure de l'outil.
- Un grain fin permet d'obtenir un meilleur état de surface sur la pièce usinée.

[HAB 06] a étudié l'influence de la microstructure sur l'usinabilité de l'acier 100Cr6 trempé. Pour une même dureté, deux états métallurgiques sont considérés: une microstructure bainitique sans carbures visibles et une microstructure martensitique avec présence de carbures (figure III-11). L'auteur constate que les efforts de coupe varient peu avec la microstructure, mais qu'un meilleur état de surface est observé pour une structure avec carbures.



(a) avec carbure (55 HRC)

(b) sans carbure (55 HRC)

Figure III-11 Observation MEB de deux états métallurgiques du 100Cr6 [HAB 06].

Une comparaison entre les deux microstructures montre que la présence de carbures fait augmenter la température d'interface copeau/outil alors qu'elle fait chuter celle générée lors de la formation de zone de cisaillement primaire. Une différence d'usinabilité est donc constatée en fonction des états métallurgiques choisis.

III.2.5 Plaquettes de coupe utilisée

Les plaquettes utilisées pour les essais d'usinage, sont amovibles de forme carrée (figure III-12 et III-13) à fixation par trou central, toutes les informations relatives aux plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau III-5 :

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Rayon du bec	Marque	Composition
Céramique mixte revêtue	CC6050	SNGA 1204 S01525	0.8	Sandvik	70% Al ₂ O ₃ + 30% TiC (revêtue en TiN)
Céramique mixte	CC650	SNGA 1204 T01020	0.8 1.2 1.6	Sandvik	70% Al ₂ O ₃ + 30% TiC

Tableau III-5 Informations relatives aux plaquettes utilisées

➤ Céramique CC6050

La céramique CC6050 (figure III-12) est une alternative économique au CBN quand les exigences de surface sont moins élevées, ou pour l'usinage du dur (65 HRC) au plus tendre (jusqu'à 40-50 HRC) de matières de dureté variable, dans lesquelles la céramique CC6050 offre des performances plus constantes qu'un CBN.

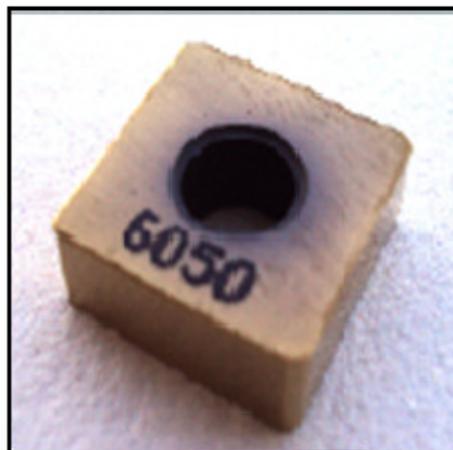


Figure III-12 Plaquette céramique CC6050.

➤ **Plaquette en céramique noire CC650**

La plaquette CC650 (figure III-13) est une nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnée de carbure de titane (70% Al_2O_3 + 30% TiC). Principalement recommandée pour l'usinage de finition des aciers trempés et des superalliages réfractaires, requérant une bonne résistance à l'usure associée à de bonnes propriétés thermiques.



Figure III-13 Plaquette céramique CC650.

➤ **Descriptif des plaquettes SNGA 12-04-08**

S : Indique la forme de la plaquette (ici carré) ;

N: Valeur de l'angle de dépouille ;

G: Tolérances dimensionnelles ;

A: Type de fixation de la plaquette sur le corps d'outil ;

12: Indication de la longueur d'arête de coupe

04: Indication de l'épaisseur de la plaquette

08: Rayon du bec de l'outil ici égal à 0.8 mm.

III.2.6 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil sur lequel se fixe la plaquette mécaniquement par trou central (figure III-14). La géométrie du porte outil est donnée au tableau III-6.

Désignation	Marque	α	γ	χ	λ
PSBNR 2525 M12	SANDVIK	6°	-6°	75°	-6°

Tableau III-6 Caractéristiques du porte plaquette utilisé.



Figure III-14 Porte outil utilisé.

III.2.7 Appareillage de mesures utilisées

III.2.7.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

La mesure des efforts de coupe en cours d'usinage consiste en une chaîne d'acquisition composée d'un dynamomètre Kistler 9257 B et d'un amplificateur de charge à trois canaux. 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 de la plaque de fixation (figure III-15). La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz.



Figure III-15 Plate forme 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 exprimé en trois composantes.

➤ Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre (9257 B) à 3 composantes: la porte outil type 9403 est employée pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26.

- Grande rigidité, fréquence propre très élevée;
- Large gamme de mesure ;
- Bonne linéarité, sans hystérésis;
- Faible interaction (<1%) ;
- Utilisation simple (prêt à l'emploi);
- Construction compacte ;
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- Amplificateur multicanaux, destiné à la mesure des efforts de coupe et Ordinateur (figure III-16).

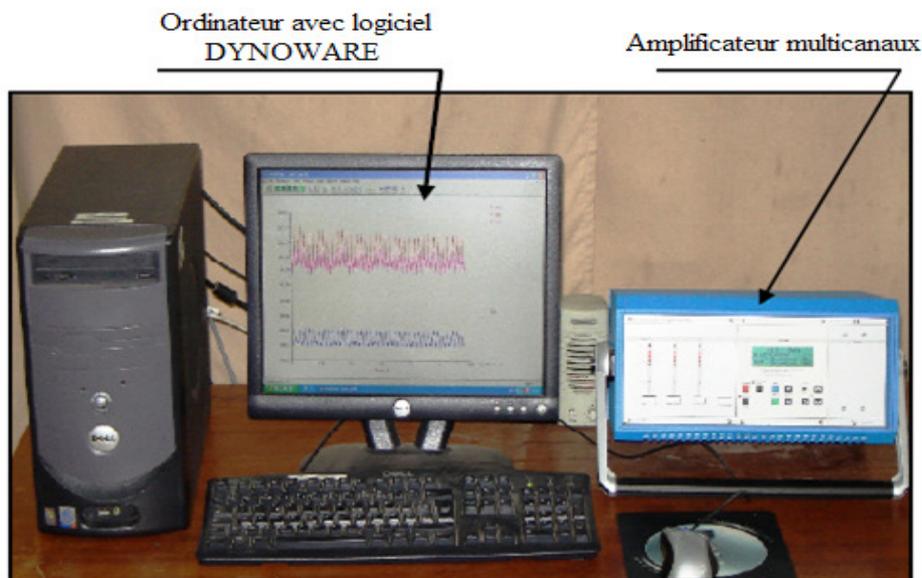


Figure III-16 Chaîne de mesure des efforts de coupe.

III.2.7.2 Duromètre

Les diverses mesures de la dureté des échantillons ont été prises sur l'appareil digital de contrôle de dureté type DM2-D 390 (figure III-17) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- son poids = 40 Kgf, (H= 490 mm, L = 250 mm et P = 395 mm) ;
- l'intervalle de la dureté est de 17 à 70 HRC ;
- une table carrée pour l'échantillon testé;
- hauteur maximale de l'échantillon égale à 90 mm ;
- le temps de chargement est environ 1.5 min ;
- les charges pour les essais (10 ; 25 ; 50 ; 100 ; 200 ; 300 ; 500 et 1000 gf).

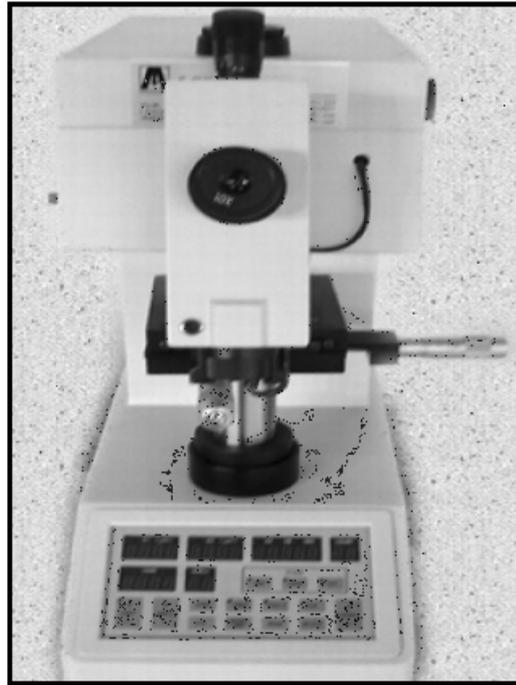


Figure III-17 Duromètre type DM2-D 390.

III.2.7.3 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo) pour les mesures des différents critères de rugosité (Ra , Rt et Rz), (figure III-18 a). Il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\ \mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (figure III-18 b).

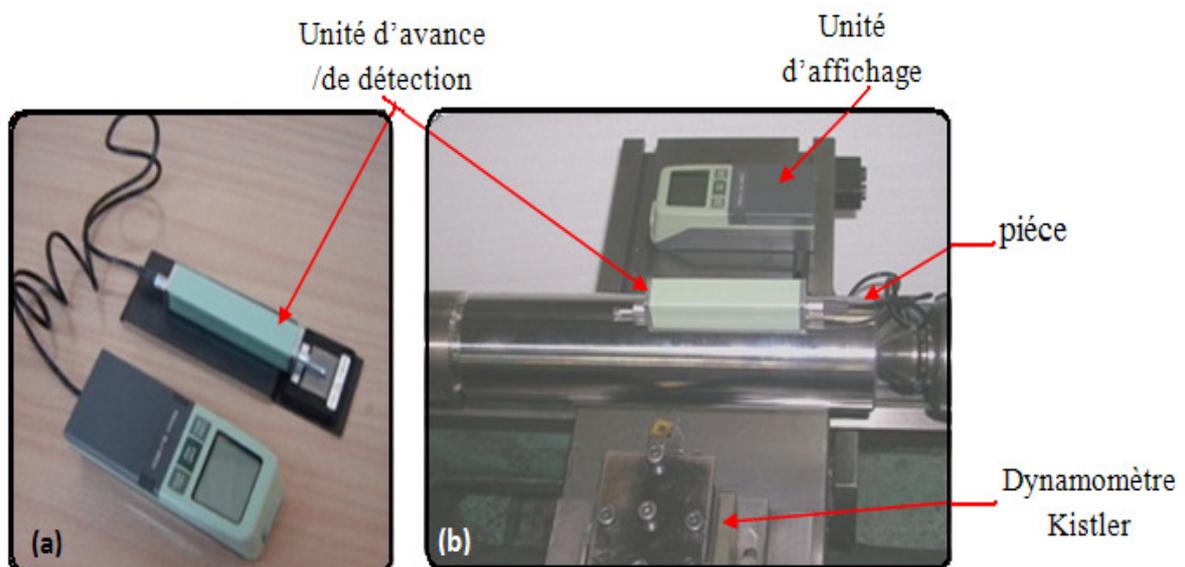


Figure III-18 (a) Rugosimètre SurfTest 201 (Mitutoyo) ; (b) Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.

III.2.7.4 Microscope pour mesure de l'usure (VB)

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VBc) est du type HUND (WAD). La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0.001mm. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure VB_B , VB_{max} et VB_C . 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 III-19).

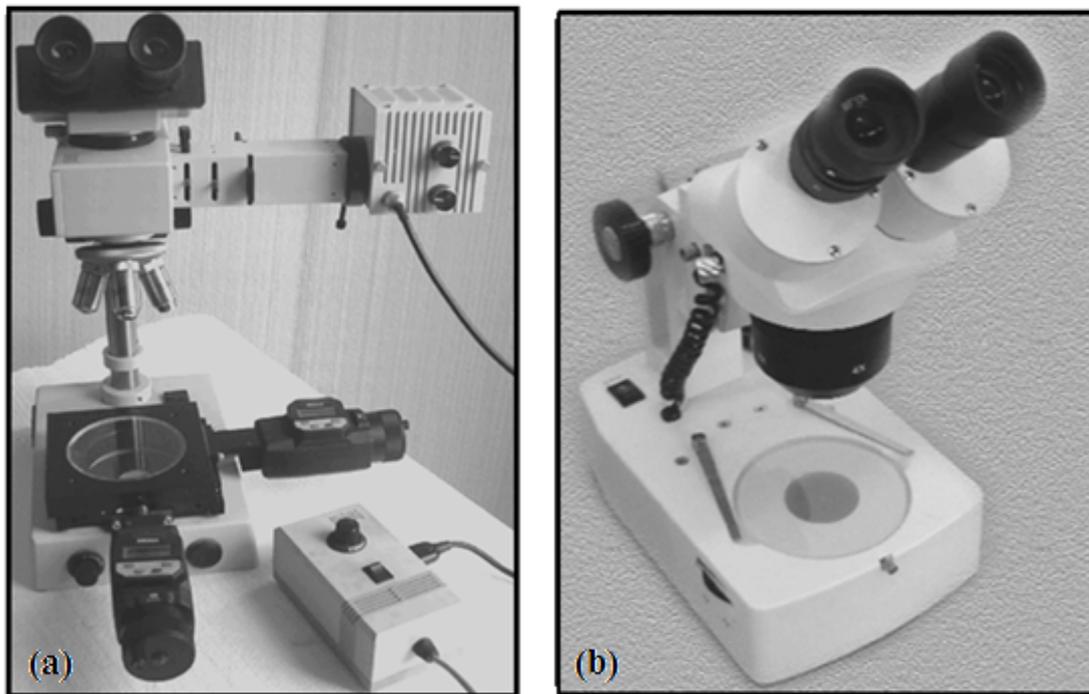


Figure III-19 (a) Microscope de mesure de l'usure frontale; (b) Stéréo- microscope pour prendre les photos de l'usure.

III.2.7.5 Autres moyens utilisé

- un chronomètre;
- un pied à coulisse;
- un appareil photo numérique.

III.3 PLANIFICATION DES EXPERIENCES

III.3.1 Introduction

Il existe plusieurs éléments intervenant sur le processus de coupe. Parmi ces derniers on peut citer: les éléments du régime de coupe (V_c , f , ap), la géométrie de la partie active de l'outil

couplant, la dureté de la pièce ainsi que les conditions de coupe (rigidité de la machine, lubrification). On peut dire que tous ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre, les efforts de coupe, l'usure et la rugosité de surface représentent eux les paramètres de sortie. Il est sûr qu'en ce qui concerne notre étude, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution des paramètres suivants :

- Les efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , ap , r et H) et la dureté de la pièce (H).
- Les différents critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction des paramètres (V_c , f , ap , r et H) et l'usure de l'outil céramique mixte revêtue en TiN.
- l'usure de l'outil céramique mixte revêtue en TiN en fonction la dureté de la pièce (H) et le temps d'usinage.

III.3.2 Méthode de variation d'un facteur à la fois

La méthode de variation d'un facteur à la fois consiste à étudier un phénomène en variant un seul facteur à la fois. On fixe le niveau de toutes les variables sauf une et l'on mesure la repense en fonction de plusieurs valeurs de la variable non fixée. À la fin de l'expérimentation, sur cette première variable, on sélectionne une autre variable à étudier et on recommence le processus. Des exemples de cette méthode se trouvent au chapitre IV.

Quelque soit la méthode utilisée, lors de chaque d'essai, nous analyserons la performance d'usinage en nous basant sur :

- l'usure d'outil ;
- les forces de coupe ;
- les états de surface des pièces ;

Selon l'objectif de chaque série d'essai, les variables seront:

- les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, la profondeur de passe, le temps d'usinage, la dureté de la pièce et le rayon du bec de l'outil).

III.3.3 Les plans d'expériences

Nous nous servons des deux plans d'expérience; le plan de Taguchi L27, tableau (III-7) et le plan composite à face centré, tableau (III-8) pour quantifier les influences des paramètres de coupe (vitesse de coupe (V_C), avance (f), profondeur de passe (ap), la dureté de la pièce (H) et le rayon du bec de l'outil (r)) sur les indicateurs de performance d'usinage (F_a , F_r , F_t , R_a , R_t et R_z). Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites

à l'aide du logiciel Design-Expert. C'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse statistique des expériences. Pour chaque étude, nous adopterons la démarche suivante :

- établissement du but et des objectifs des essais ;
- sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses) ;
- choix du type de plan d'expérience ;
- conduite des essais ;
- détermination des facteurs influents ;
- modélisation des réponses ;
- optimisation des conditions de coupe ;
- confirmation des résultats.

L27 (3 ¹³)	1 Vc	2 f	3	4	5 ap	6	7	8	9 H	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Tableau III-7 Table Orthogonale de Taguchi L27 (3¹³).

Plan Composite à face centré				
N°	Facteurs			
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	r (mm)
1	1	0	0	0
2	0	1	-1	1
3	-1	-1	-1	1
4	-1	-1	-1	-1
5	1	1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	0	0	0	0
8	-1	1	1	-1
9	1	-1	1	1
10	1	1	-1	-1
11	0	0	1	0
12	0	0	0	1
13	1	1	-1	1
14	-1	-1	1	1
15	0	0	0	0
16	-1	0	0	0
17	-1	1	1	-1
18	1	-1	-1	1
19	1	-1	-1	-1
20	1	1	1	1
21	-1	1	1	1
22	0	0	-1	0
23	0	1	0	0
24	0	0	0	0
25	0	0	0	0
26	0	0	0	-1
27	0	0	0	0
28	0	-1	0	0
29	-1	-1	1	-1
30	0	0	0	0

Tableau III-8 Plan composite à face centrée avec six (06) points centré (30 essais).

III.4 CONDITIONS DE COUPE

Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage), la pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification et les conditions de coupe adoptées sont comme suit:

- Pour étudier l'effet de la dureté de la pièce sur les efforts de coupe et la rugosité de surface avec l'outil céramique mixte revêtue en TiN (tableau III-9).
- Pour étudier l'effet de la dureté de la pièce sur les indicateurs de performance d'usinage avec l'outil céramique mixte revêtue en fonction du temps (t) (tableau III-10).
- Pour étudier l'effet des conditions de coupe et du rayon bec de l'outil avec l'outil céramique sur les efforts de coupe et la rugosité avec l'outil CC650 (tableau III-11).
- Pour le plan de Taguchi L27 nous avons adopté les niveaux indiqués au tableau (III-12).
- Pour le plan composite centré nous avons adopté les niveaux indiqués au tableau (III-13).

Les paramètres constats	Valeurs	Les paramètres variables	valeurs
f (mm/tr)	0.08	H (HRC)	0.8
ap (mm)	0.2		1.2
			1.6
V_c (m/min)	85	f (mm/tr)	0.08 – 0.12 – 0.14 0.16 – 0.20
ap (mm)	0.2	V_c (m/min)	60 – 85 – 120 170 – 230
V_c (m/min)	85	ap (mm)	0.1 – 0.15 – 0.20 0.3 – 0.4
f (mm/tr)	0.8		

Tableau III-9 Conditions de coupe pour les essais d'usure, l'effort de coupe et de rugosité

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
V_c (m/min)	170	H (HRC)	46
			52
			62
f (mm/tr)	0.08	t (min)	5
			10
			15
ap (mm)	0.2		20

Tableau III-10 Conditions de coupe pour les essais d'usure, l'effort de coupe et de rugosité

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
f (mm/tr)	0.08	r (mm)	0.8
ap (mm)	0.2		1.2
			1.6
V_c (m/min)	250	f (mm/tr)	0.08 – 0.10 – 0.12 0.16 – 0.20
ap (mm)	0.2	V_c (m/min)	65 – 90 – 135 180 – 250

Tableau III-11 Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe et de rugosité

Symbole	Conditions de coupe	Unité	Niveaux		
			Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
V_c	Vitesse de coupe	m/min	85	120	170
f	Avance	mm/tr	0.08	0.12	0.16
ap	Profondeur de passe	mm	0.1	0.2	0.3
H	Dureté de la pièce	HRC	46	52	62

Tableau III-12 Paramètres de coupe et leurs niveaux.

Symbole	Conditions de coupe	Unité	Niveaux		
			Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
V_c	Vitesse de coupe	m/min	90	135	180
f	Avance	mm/tr	0.08	0.12	0.16
ap	Profondeur de passe	mm	0.1	0.2	0.3
r	Rayon du bec	mm	0.8	1.2	1.6

Tableau III-13 Paramètres de coupe et leurs niveaux.

III.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques physique et métallurgique de l'acier étudié, ainsi les conditions de traitement thermique des éprouvettes et les différents équipements utilisés (machine-outil, four à chambre électrique, plaquette de coupe, porte-outil, dynamomètre, microscope optique, rugosimètre et duromètre). La planification des expériences et les conditions de coupe ont été aussi indiquées dans ce chapitre.

CHAPITRE IV

ETUDE DE L'EFFET DES PARAMETRES DE COUPE (V_c, f, a_p, H et r) SUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE D'USINAGE

Dans ce chapitre des essais sont conduits pour l'étude de l'effet de la dureté de la pièce en fonction des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe) sur les efforts de coupe, les critères de rugosité et l'usure en dépouille (VBc) en fonction du temps lors de l'usinage avec l'outil céramique mixte revêtu (CC6050). La seconde partie du chapitre traite l'effet du rayon du bec de l'outil en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe) sur les efforts de coupe et les critères de rugosité lors de l'usinage avec l'outil céramique mixte (CC650).

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre des essais sont conduits pour l'étude de l'influence de la dureté de la pièce en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe) sur les efforts de coupe, les critères de rugosité et l'usure en dépouille (VB_c) lors de l'usinage de l'acier à roulement AISI 52100 avec l'outil céramique mixte revêtue (CC6050). Nous présentons aussi l'évolution de l'usure en fonction du temps d'usinage et cela pour différentes duretés de la pièce. La seconde partie du chapitre traite l'influence du rayon bec de l'outil en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe) sur les efforts de coupe et les critères de rugosité lors de l'usinage avec l'outil céramique mixte (CC650).

IV.2 INFLUENCE DE LA DURETE DE LA PIECE SUR LES EFFORTS DE COUPE

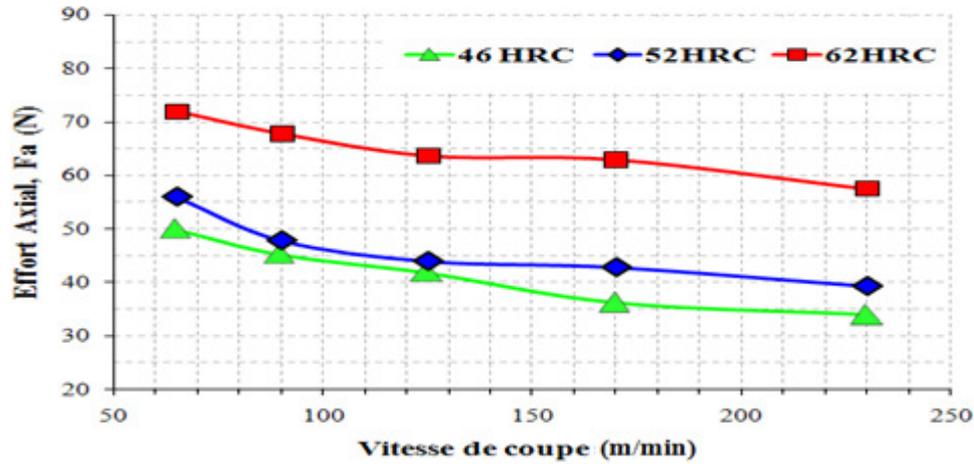
IV.2.1 Effet de la vitesse de coupe

Les figures IV.1 (a, b, c) montrent les résultats de l'effet de la dureté de la pièce usinée pour les différentes vitesses de coupe sur les efforts de coupe. L'analyse des résultats montre qu'avec l'augmentation de la dureté de la pièce usinée de 46 à 62 HRC, les trois composantes de l'effort (F_a , F_r et F_t) de coupe augmentent. Par contre l'augmentation de la vitesse de coupe induit une diminution des trois composantes de l'effort de coupe et cela pour les trois duretés testées. Cette diminution des forces de coupe est expliquée par une baisse de la résistance de cisaillement dans la zone d'écoulement pendant l'élévation de la température avec l'augmentation de la vitesse. En effet, en augmentant la vitesse de coupe la vitesse de déformation dans les différentes zones de cisaillement augmente. Cette augmentation de la vitesse de déformation, conformément à la loi de comportement du matériau, fait augmenter la contrainte d'écoulement ce qui conduit à des efforts plus importants. Or, l'augmentation de la vitesse de déformation (et de la vitesse de glissement copeau/outil) conduit à une élévation de la température au niveau des zones de déformation ce qui, conformément à la loi de comportement du matériau, fait diminuer la contrainte d'écoulement et donc les efforts de coupe. Ces deux mécanismes sont présents en permanence lors de l'usinage et, en fonction des conditions de coupe.

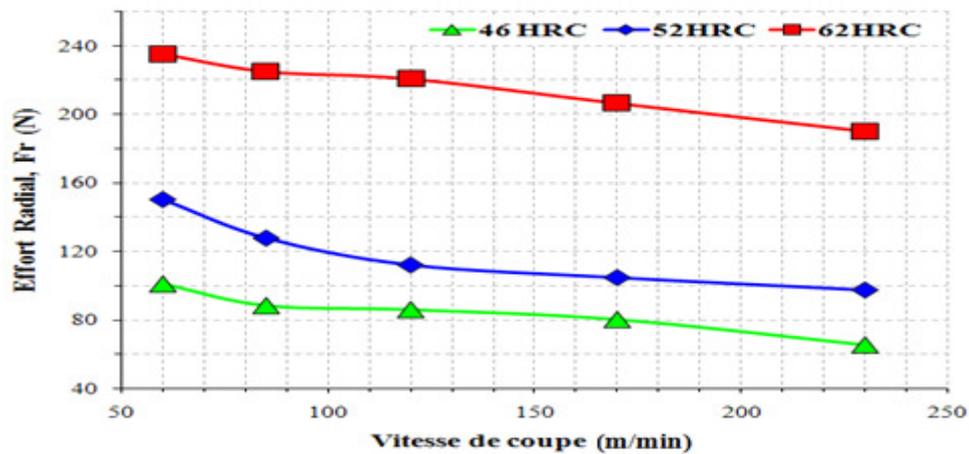
On note d'abord qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe les efforts radiaux sont toujours plus importants que les efforts tangentiels. Pour l'effort axial F_a à $V_c = 170$ m/min, l'augmentation de la dureté de 46 à 62 HRC induit une élévation de F_a de 80.05%. De la même manière, pour l'effort radial (F_r) à $V_c=170$ m/min, l'augmentation de la dureté de 46 à

62 HRC conduit une élévation de Fr de 150 %. En dernier lieu, pour l'effort tangentiel F_t à $V_c=170$ m/min, l'augmentation de la dureté de 46 à 62 HRC induit une élévation de F_t de 32.35%.

a)



b)



c)

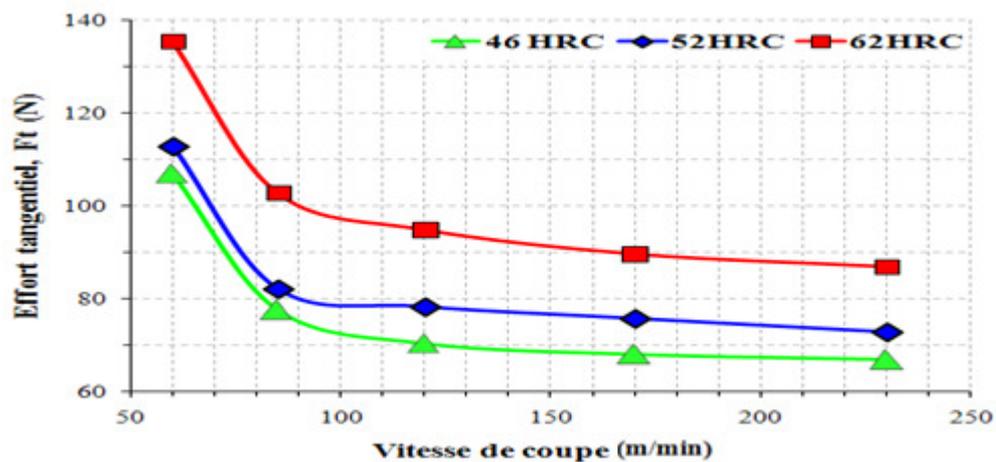
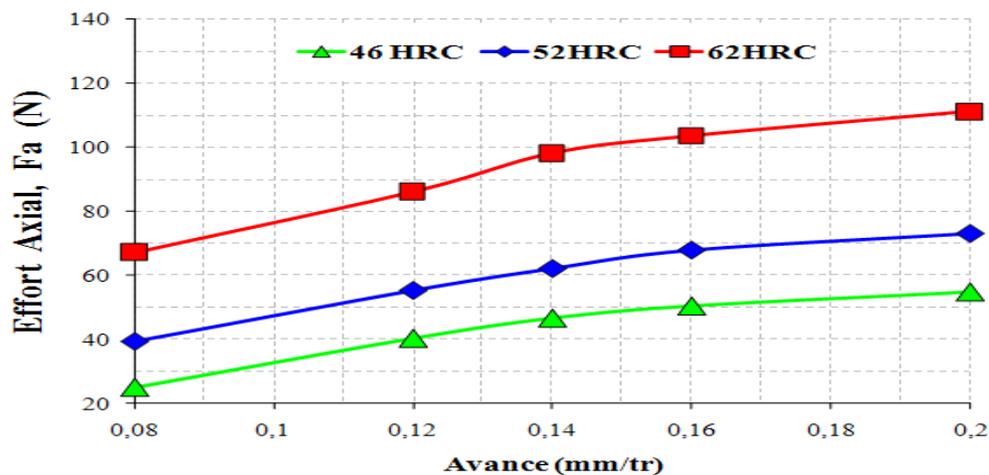


Figure IV-1 Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et de la vitesse de coupe pour $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.2$ mm.

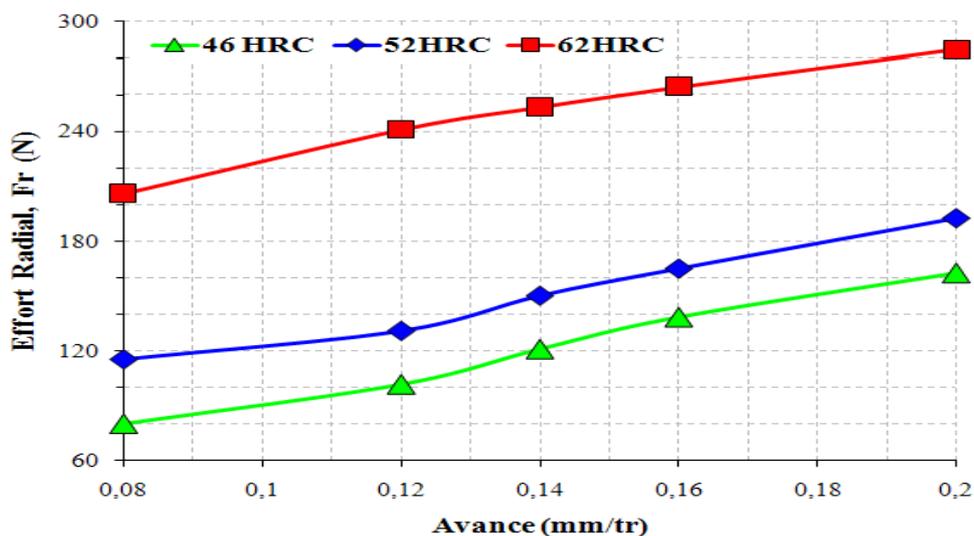
IV.2.2 Effet de l'avance

Les figures IV.2 (a, b, c) exposent les résultats de l'effet de la dureté de la pièce usinée sur les composantes de l'effort de coupe pour différents avances. Avec l'augmentation de la dureté de la pièce usinée de 46 à 62 HRC et de l'avance de 0.08 à 0.2 mm/tr, les composantes de l'effort de coupe, principalement l'effort de pénétration, augmentent. Cette forte augmentation est due au fait que la quantité de matière à enlever est plus importante lorsque l'avance augmente. On peut aussi noter que les efforts radiaux sont plus sensibles à l'avance que les efforts tangentiels pendant le tournage dur de l'acier AISI 52100. Pour une avance de 0.08 mm/tr et lorsque la dureté passe de 46 à 62 HRC, cela induit une augmentation des composantes (F_a , F_r , F_t) successivement de (160.23%, 175.23%, 72.41%). Pour l'avance $f=0.2$ mm/tr et l'augmentation de la dureté de 46 à 62 HRC, cela entraîne une augmentation des trois composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r , F_t) successivement de (92.98%, 76.25%, 26.76%).

a)



b)



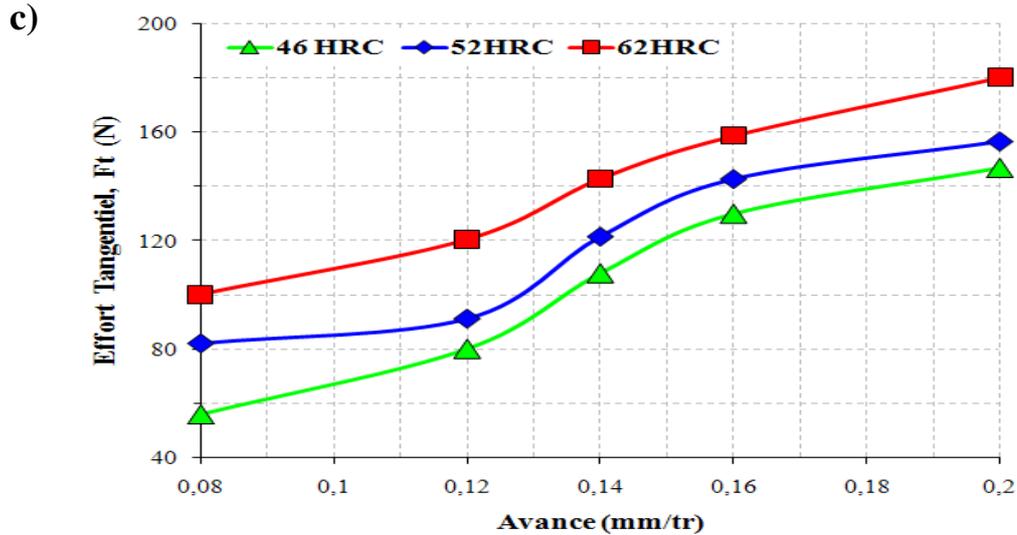
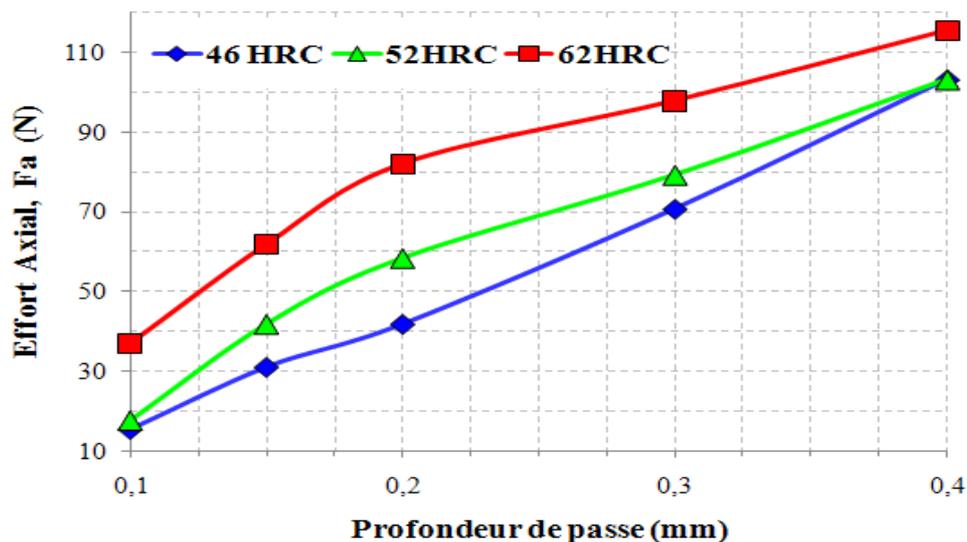


Figure IV-2 Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et de l'avance pour $V_c = 120 \text{ m/min}$ et $a_p = 0.2 \text{ mm}$.

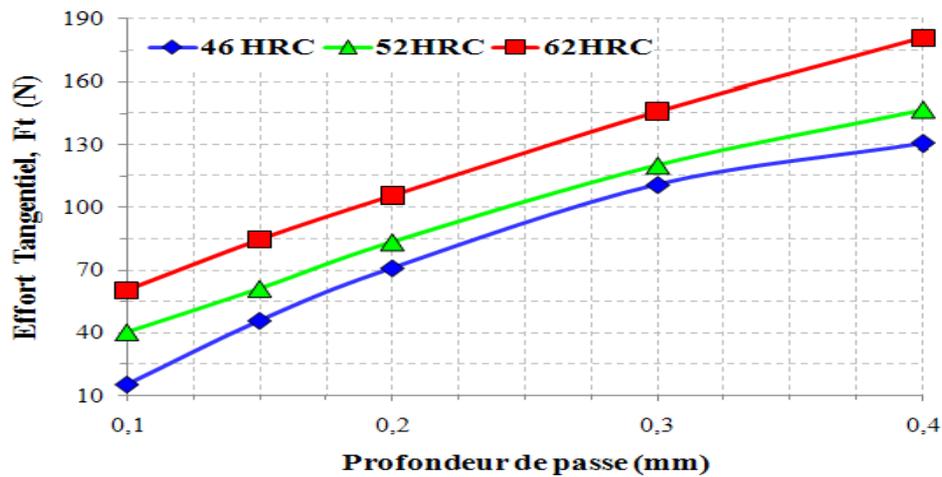
IV.2.3 Effet de la profondeur de passe

Les figures IV.3 (a, b, c) montrent l'effet de la dureté de la pièce usinée pour différents profondeurs de passe sur les composantes de l'effort de coupe. L'analyse des résultats montre qu'avec l'augmentation de la dureté de la pièce usinée et de la profondeur de coupe, les trois composantes de l'effort de coupe augmentent. Une élévation de la dureté de 46 à 62 HRC conduit à une augmentation des trois composantes (F_a , F_r , F_t) respectivement de (153.84%, 333.33% et 286.66 %) pour une profondeur de passe $a_p = 0.1 \text{ mm}$, de (130.76% ; 144.56% et 76.19 %) pour une profondeur de passe $a_p = 0.4 \text{ mm}$.

a)



b)



c)

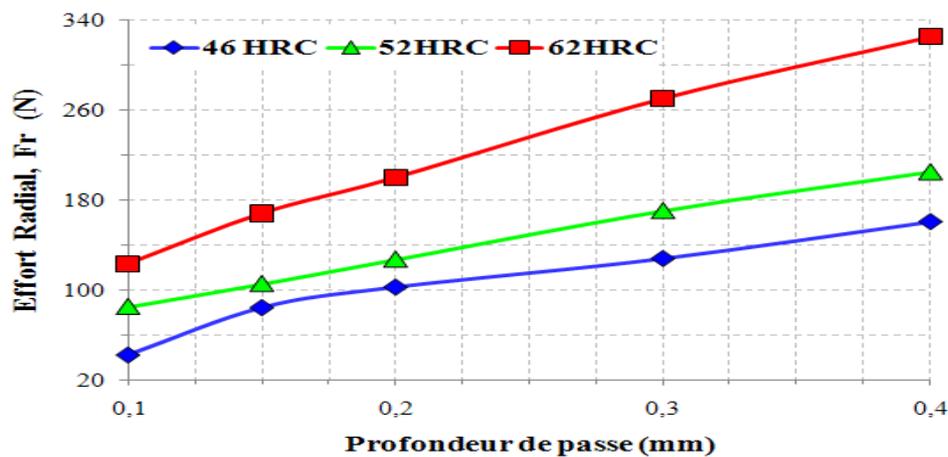


Figure IV-3 Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et de la profondeur de passe pour $V_c = 120 \text{ m/min}$ et $f = 0.08 \text{ mm/tr}$.

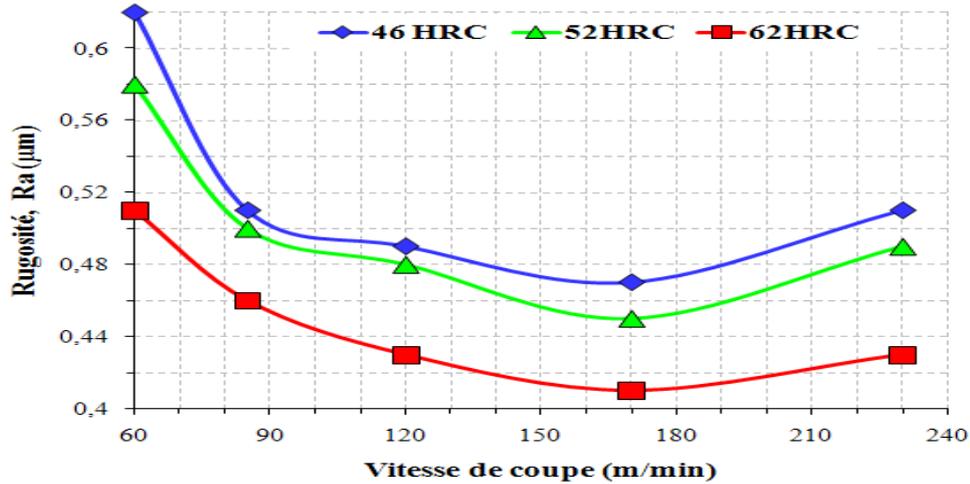
IV.3 INFLUENCE DE LA DURETE DE LA PIECE SUR LES CRITERES DE RUGOSITE

IV.3.1 Effet de la vitesse de coupe

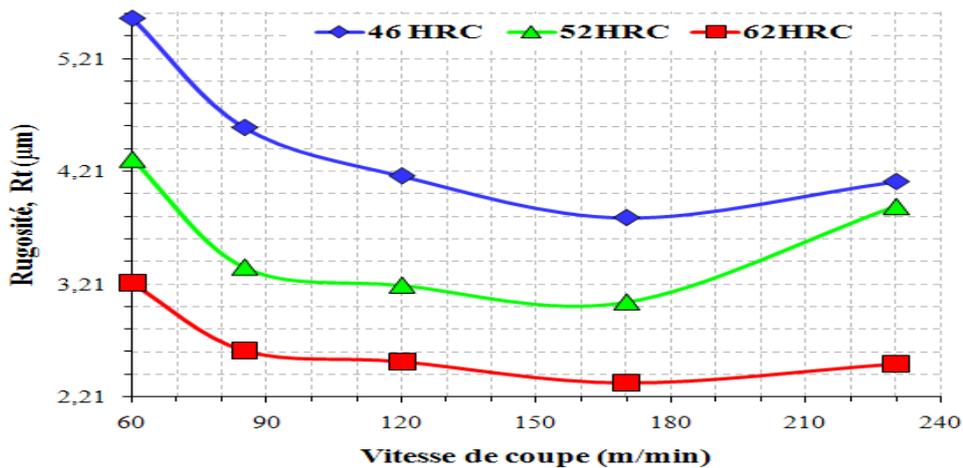
Les figures IV.4 (a, b, c) présentent l'effet simultané de la dureté et de la vitesse de coupe sur la rugosité. L'analyse des résultats montre que les valeurs des trois critères de la rugosité diminuent avec l'augmentation de la dureté. D'après ces figures on remarque que l'effet de la vitesse de coupe est significatif. En effet, une augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de la surface, les valeurs des trois critères de la rugosité augmentent très légèrement lorsque la vitesse de coupe (V_c) passe de 170 à 230 m/min, ceci est expliqué par la vibration du système usinant pour les vitesses de coupe élevée. A la vitesse de 85 m/min le ratio ($Ra_{46 \text{ HRC}}/Ra_{52 \text{ HRC}}$) est de 1.02, avec l'augmentation de la dureté le ratio ($Ra_{46 \text{ HRC}}/$

Ra 62 HRC) passe à 1.21. De la même manière à la vitesse 170 m/min avec l'augmentation de la dureté le ratio (Ra 46 HRC/ Ra 52 HRC) est égale à 1.04 avec l'augmentation de la dureté le ratio (Ra 46 HRC/ Ra 62 HRC) passe à 1.36.

a)



b)



c)

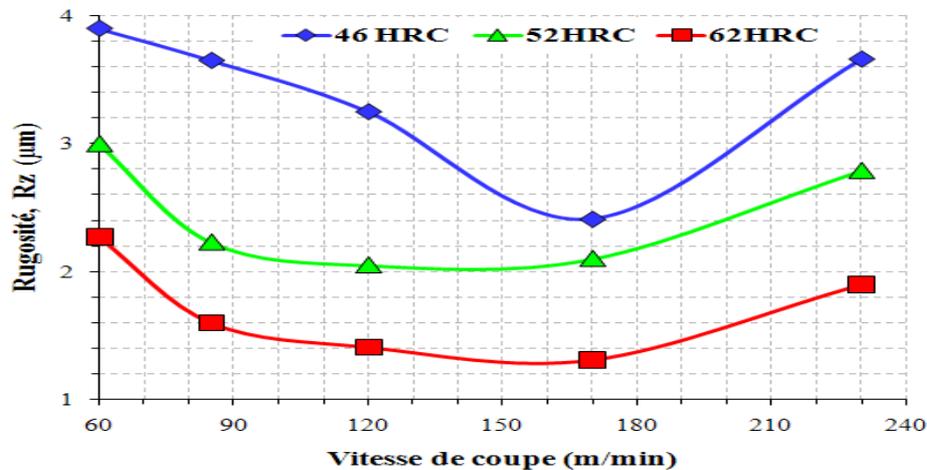
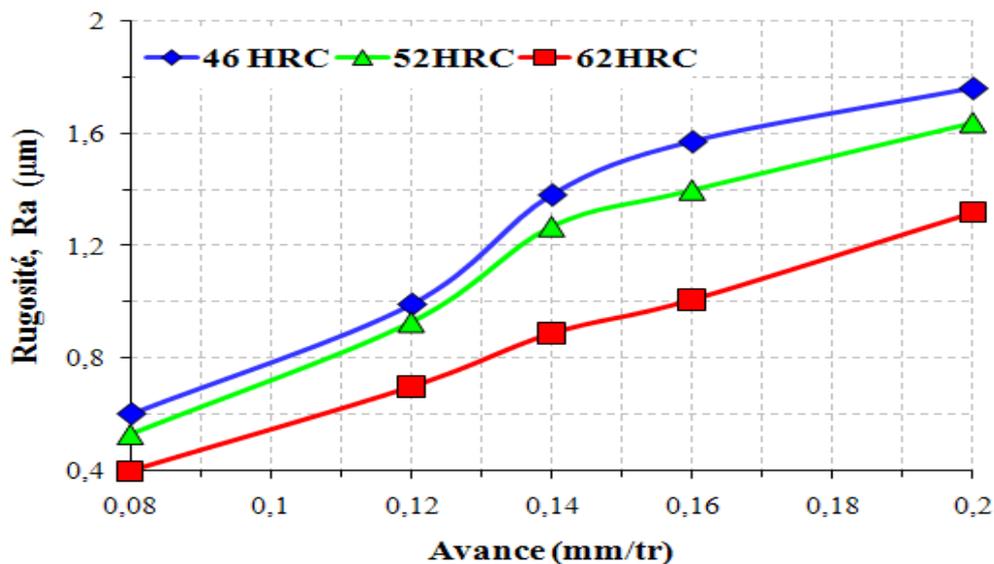


Figure IV-4 Impact de la dureté et de la vitesse de coupe sur la rugosité pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$.

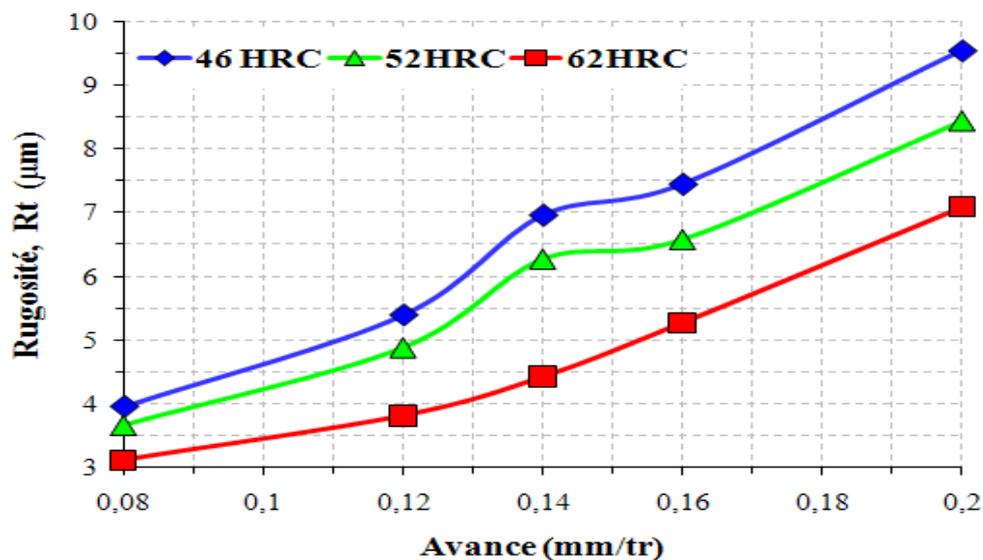
IV.3.2 Effet de l'avance

Les figures IV.5 (a, b, c) présentent l'effet de la dureté de la pièce sur les différents critères de rugosité et cela pour différents avances choisies. L'analyse des résultats montre que la rugosité augmente avec l'augmentation de l'avance mais avec l'augmentation de la dureté les valeurs des trois critères (R_a , R_t , R_z) de la rugosité diminuent. Pour une valeur de l'avance $f=0.14$ mm/tr, l'augmentation de la dureté de 46 à 62 HRC entraîne une diminution de (35.50 %, 36.49 % et 31.23 %) respectivement pour (R_a , R_t , R_z). Avec une avance de 0,08 mm/tr, la rugosité est de (0.51 ; 3.46 ; 2.98) μm pour (R_a , R_t , R_z), mais avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0,2 mm/tr, la rugosité augmente successivement de (33.33 % ; 34.69 % et 25.69 %).

a)



b)



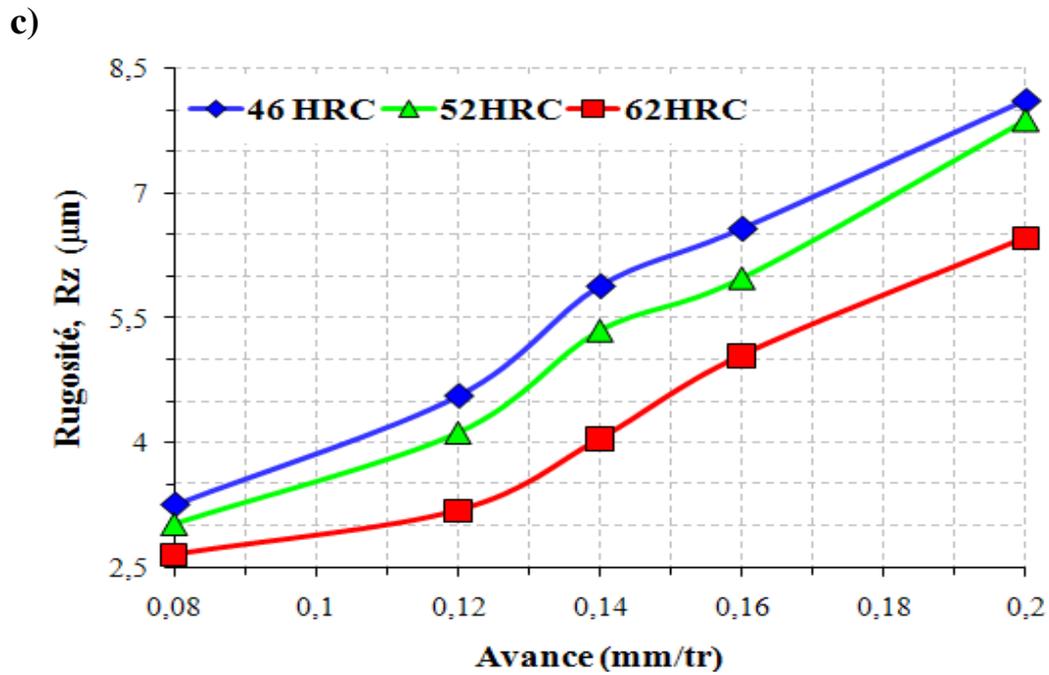
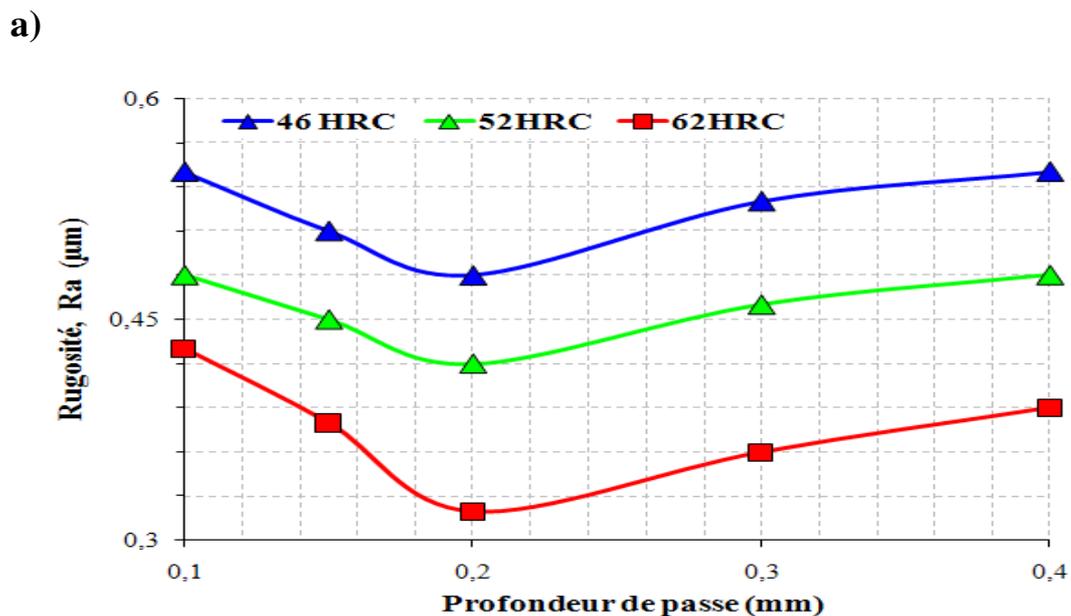


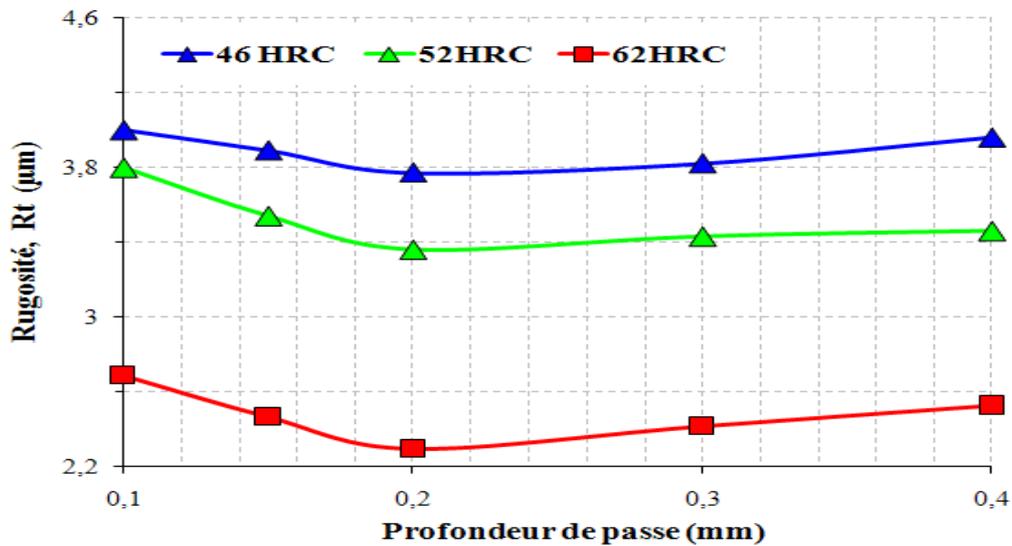
Figure IV-5 Impact de la dureté et de l'avance sur la rugosité pour $V_c=120m/min$, $a_p=0.2mm$

IV.3.3 Effet de la profondeur de passe

Les figures IV-6 (a, b, c) présentent l'évolution de la rugosité en fonction de la dureté de la pièce pour différents profondeurs de passe. D'après ces figures on remarque que la rugosité amélioré avec l'augmentation de la dureté de la pièce et qu'avec l'augmentation de la profondeur de passe la rugosité se dégrade légèrement à partir de $a_p = 2$ mm. Dans cette configuration, le matériau atteint des températures importantes qui favorisent les arrachements en surface et les refus de coupe du fait de l'augmentation de sa ductilité.



b)



c)

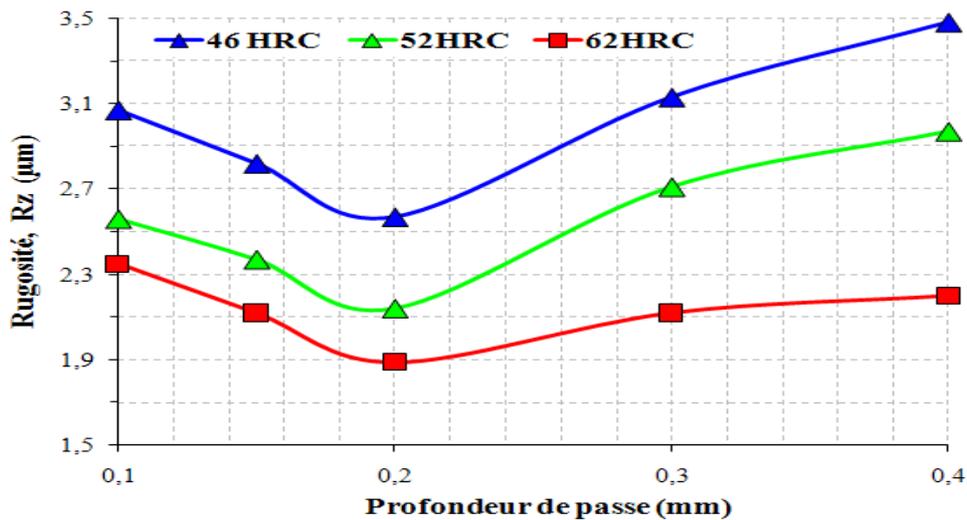


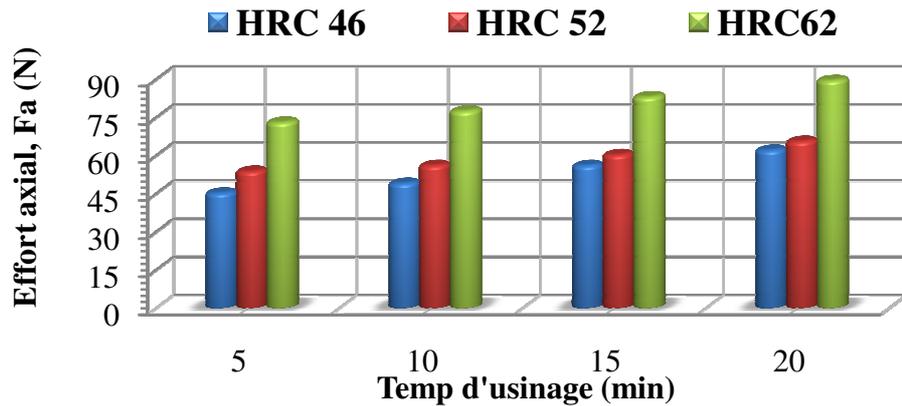
Figure IV-6 Impact de la dureté et de la profondeur de passe sur la rugosité pour $V_c=120m/min$, $f=0.08mm/tr$.

IV.4 EVOLUTION DES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DE LA DURETE DE LA PIECE ET DU TEMPS D'USINAGE

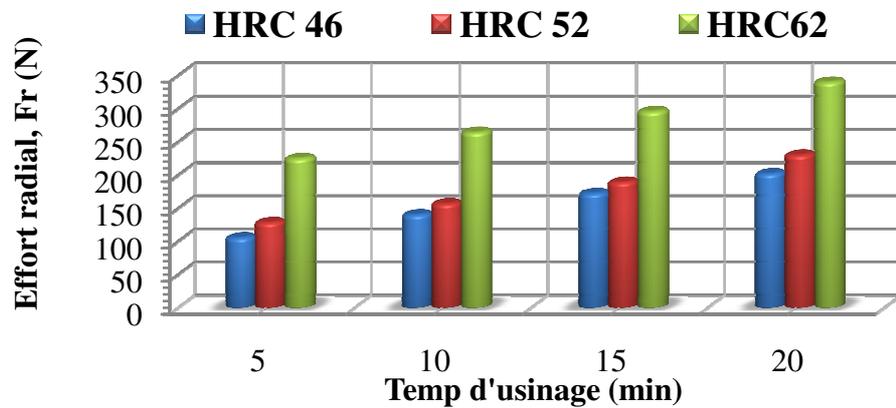
Les figures IV-7 (a, b, c) montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et la dureté de la pièce lors du tournage dur de l'acier AISI 52100. L'analyse des résultats montre que l'augmentation du temps d'usinage conduit à une augmentation des trois composantes de l'effort de coupe, ceci est dû à l'évolution de l'usure VB_C sur l'arête de coupe de l'outil. On observe que l'effort radial est très sensible avec l'augmentation du temps d'usinage pour les différentes duretés des pièces. En examinant l'allure des courbes on

remarque que dans l'intervalle du temps de 5 à 20 minutes, les composantes (F_a , F_r , F_t) augmente respectivement de (8.87 % ; 16.90 % ; 23.36 %) pour la dureté 46 HRC, de (47.05 % ; 24.42 % ; 6.78 %) pour la dureté 52 HRC et de (12.15 % ; 57.05 % ; 8.46 %) pour la dureté 62 HRC. A la fin d'usinage la valeur maximale de l'usure en dépouille (VB_c) enregistrée est de 0.215 mm pour la dureté 46 HRC, 0.241 mm pour la dureté 52 HRC et 0.352 mm pour la dureté 62 HRC.

a)



b)



c)

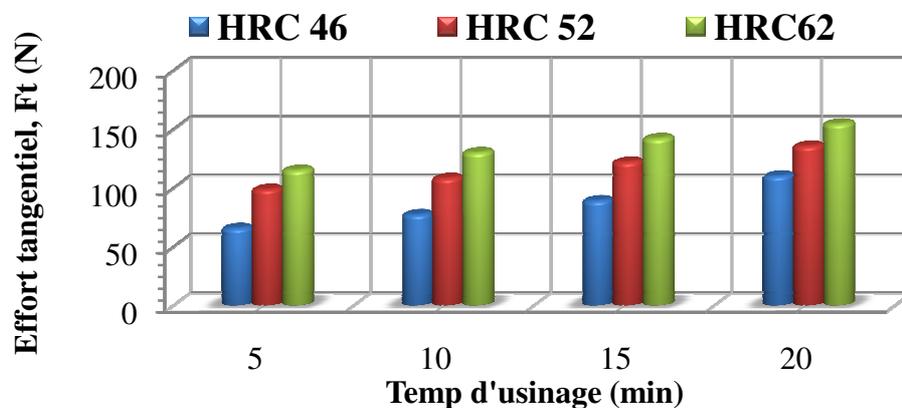
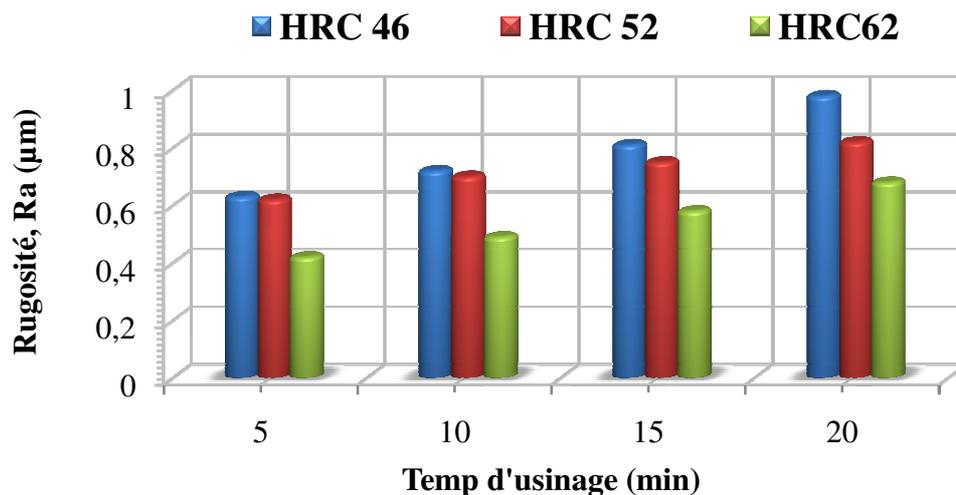


Figure IV-7 Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et du temps d'usinage pour $V_c=170m/min$, $f=0.08mm/tr$ et $a_p=0.2mm$.

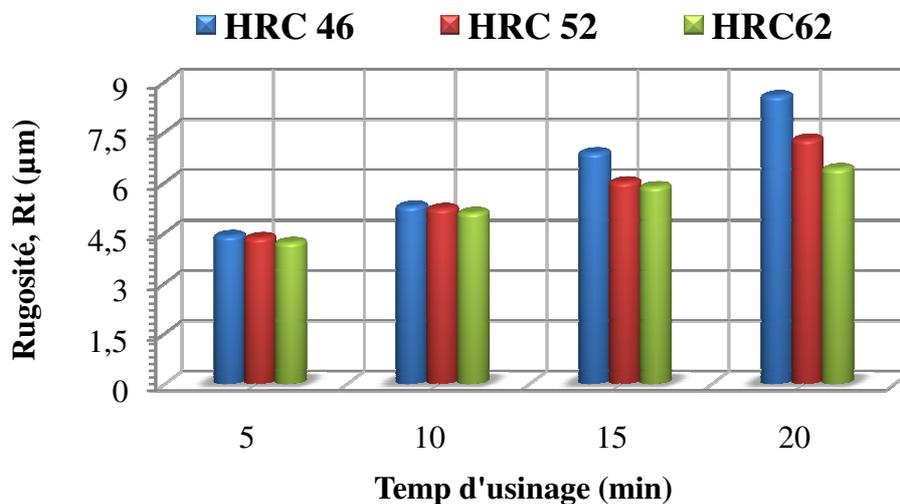
IV.5 EVOLUTION DES CRITERES DE RUGOSITE EN FONCTION DE LA DURETE DE LA PIECE ET DU TEMPS D'USINAGE

Les figures IV-8 (a, b et c) présentent respectivement l'évolution des critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction du temps d'usinage et de la dureté de la pièce lors du tournage dur de l'acier AISI 52100. L'analyse des résultats montre que la valeur pour les critères (R_a , R_t , R_z) n'est pas stable et uniforme pendant la coupe, mais elle subit une évolution en fonction du temps d'usinage. Ce dernier est étroitement lié avec l'usure. Alors on peut dire que l'endommagement superficiel des facettes et des arêtes tranchantes de la partie active de l'outil conduit à la dégradation de l'état de surface du matériau usiné. Les conséquences sur le plan pratique sont comme suit: pour une élévation du temps d'usinage de 5 à 20 minutes, on a une augmentation des trois critères de la rugosité (R_a , R_t , R_z) successivement de (55.55; 94.34; 98.19) % pour la dureté 46 HRC, de (32.25 ; 67.20; 67.10) % pour la dureté 52 HRC et de (61.90 ; 52.13 ; 50.56) % pour la dureté 62 HRC.

a)



b)



c)

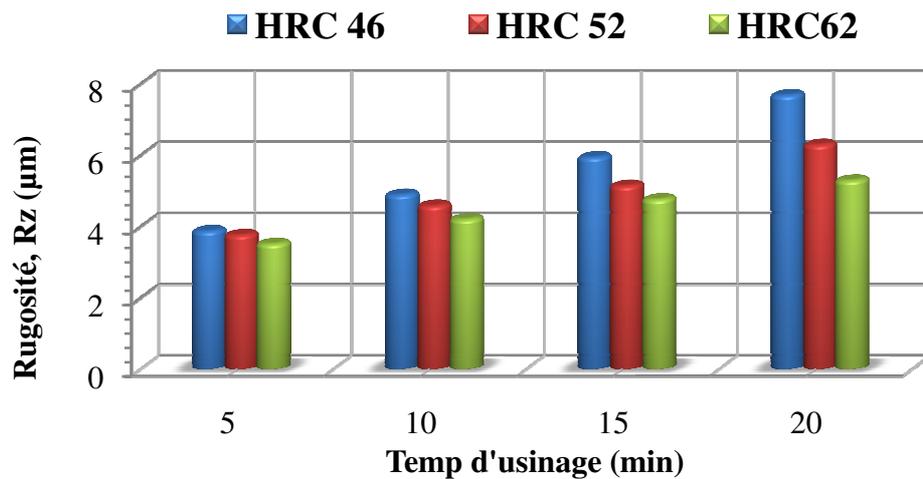


Figure IV-8 Evolution des critères de rugosités en fonction de la dureté et du temps pour $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.

IV.6 EVOLUTION DE L'USURE (VB_c) EN FONCTION DE LA DURETE DE LA PIECE ET DU TEMPS D'USINAGE

La figure IV-9 montre l'évolution de l'usure en dépouille de la céramique (CC6050) en fonction de différentes duretés de la pièce (46, 52 et 62 HRC) et du temps d'usinage. L'analyse des résultats montre que plus le matériau à usiner est dur, plus l'usure en dépouille augmente (figure IV-10). Pour une élévation du temps d'usinage de 5 à 10 min, on a une augmentation de l'usure en dépouille (VB_c) de 86.11 % pour la dureté 46 HRC, de 97.77 % pour la dureté 52 HRC et de 86.58 % pour la dureté 62 HRC. Pour une augmentation du temps d'usinage de 10 à 20 minutes la surface de contact entre la pièce et outil augmente à cause de l'augmentation de l'usure en dépouille, et par conséquent il en résulte des frottements et une élévation de la chaleur qui altère les arêtes de coupe par des phénomènes physico-chimiques.

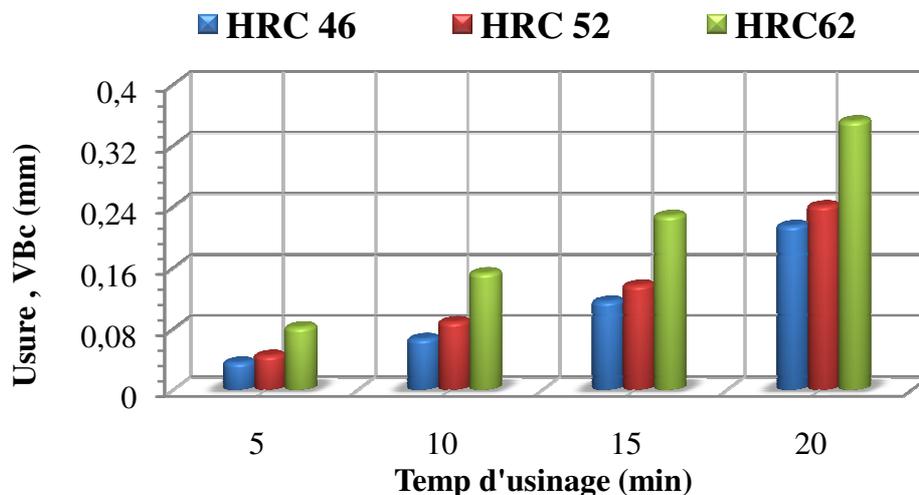


Figure IV-9 Evolution de l'usure en dépouille (VB_c) en fonction du temps d'usinage et de la dureté de la pièce pour $V_c = 170 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.2\text{mm}$.

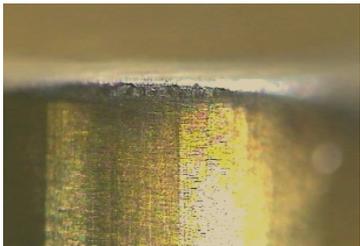
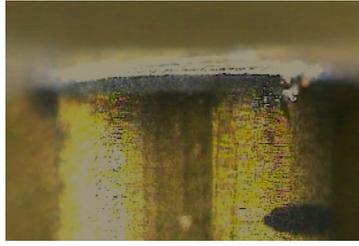
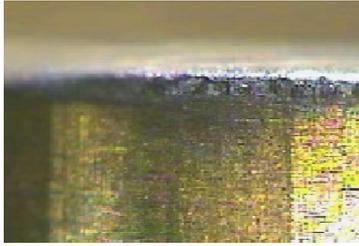
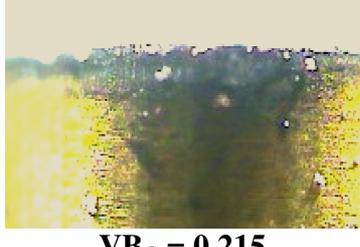
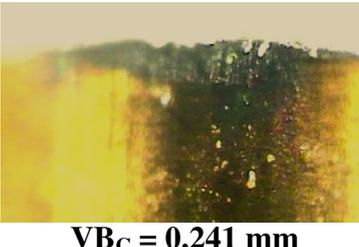
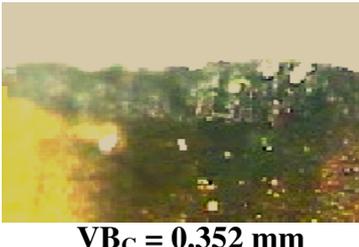
		
$VB_C = 0.036$ mm	$VB_C = 0.045$ mm	$VB_C = 0.082$ mm
Dureté de la pièce (HRC = 46)	Dureté de la pièce (HRC = 52)	Dureté de la pièce (HRC = 62)
Temps d'usinage (t= 5 min)		
		
$VB_C = 0.067$ mm	$VB_C = 0.089$ mm	$VB_C = 0.153$ mm
Dureté de la pièce (HRC = 46)	Dureté de la pièce (HRC = 52)	Dureté de la pièce (HRC = 62)
Temps d'usinage (t= 10 min)		
		
$VB_C = 0.215$ mm	$VB_C = 0.241$ mm	$VB_C = 0.352$ mm
Dureté de la pièce (HRC = 46)	Dureté de la pièce (HRC = 52)	Dureté de la pièce (HRC = 62)
Temps d'usinage (t= 20 min)		

Figure IV-10 Valeurs de l'usure en dépouille (VB_C) en fonction du temps et de la dureté de la pièce d'usinage pour $V_c = 170$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr et $a_p = 0.2$ mm.

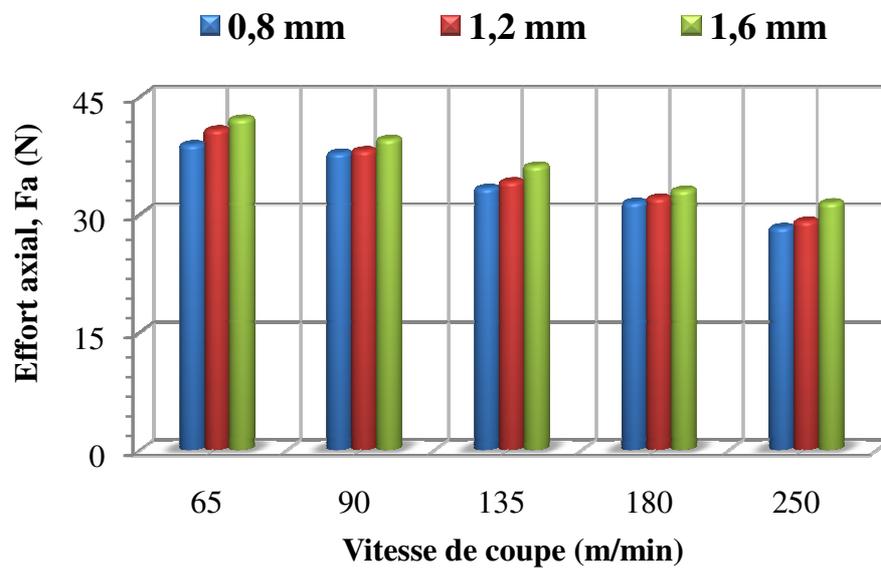
IV.7 INFLUENCE DU RAYON BEC DE L'OUTIL SUR LES EFFORTS DE COUPE

IV.7.1 Effet de la vitesse de coupe

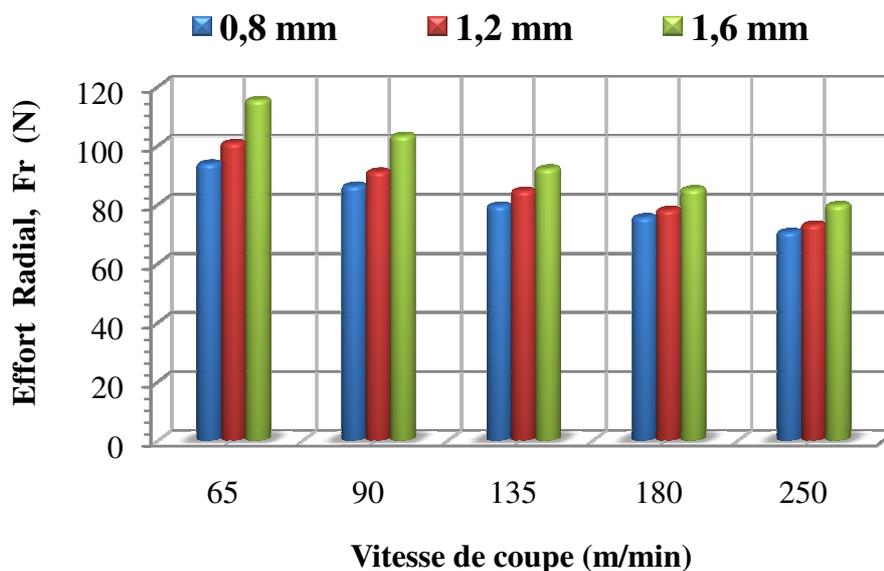
Les figures IV.11 (a, b, c) montrent les résultats de l'effet du rayon bec de l'outil pour différents vitesses de coupe sur les efforts de coupe. Avec l'augmentation du rayon bec de l'outil de 0.8 à 1.6 mm, les trois composantes de l'effort (F_a , F_r et F_t) de coupe augmentent. Par contre l'augmentation de la vitesse de coupe induit une diminution des trois composantes de l'effort de coupe et cela pour les trois rayons du bec de l'outil testés. Cette diminution est expliquée par les effets de la température générée à l'interface outil-copeau et la longueur de

la courbure du rayon du bec avec la surface de la pièce usinée. L'élévation de la vitesse coupe à $V_c= 250$ m/min augmente la température d'interface outil –copeau ce qui adoucit le matériau usiné et réduit par conséquent les efforts de coupe. Pour l'effort axial F_a à $V_c = 135$ m/min, l'augmentation du rayon bec de l'outil de 0.8 à 1.6 mm induit une élévation de F_a de 8.51 %. De la même manière, pour l'effort radial (F_r) à $V_c=135$ m/min, l'augmentation du rayon bec de l'outil de 0.8 à 1.6 mm conduit une élévation de F_r de 15.76 %. En dernier lieu, pour l'effort tangentiel F_t à $V_c= 135$ m/min, l'augmentation du rayon bec de l'outil de 0.8 à 1.6 mm induit une élévation de F_t de 11.65 %.

a)



b)



c)

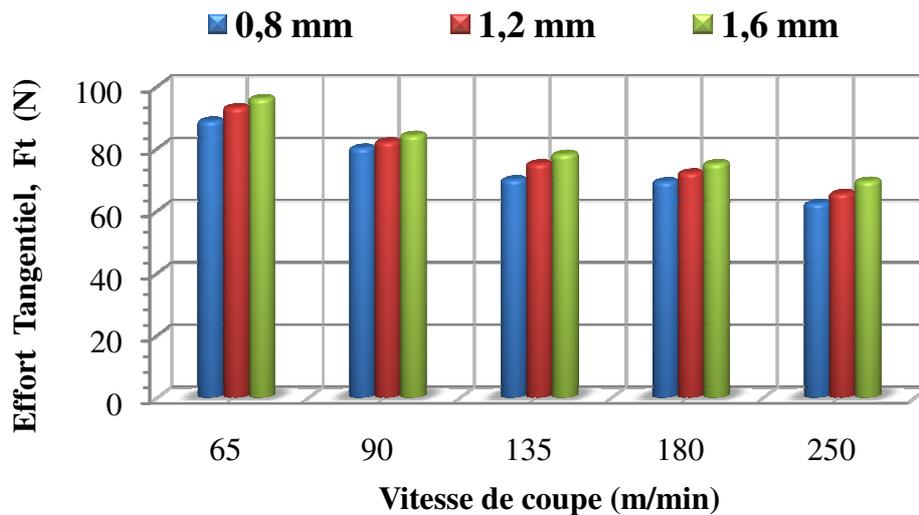
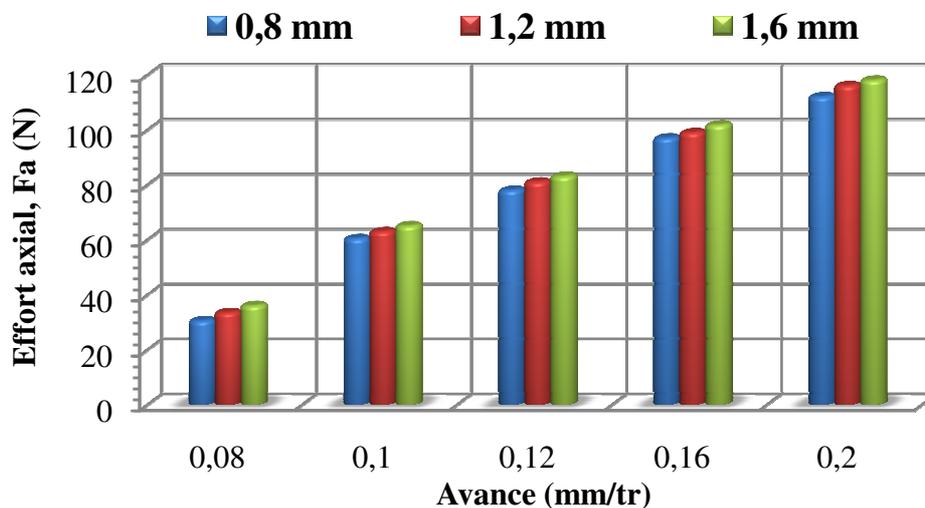


Figure IV-11 Evolution des efforts de coupe en fonction du rayon bec de l'outil et de la vitesse de coupe pour $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.2$ mm.

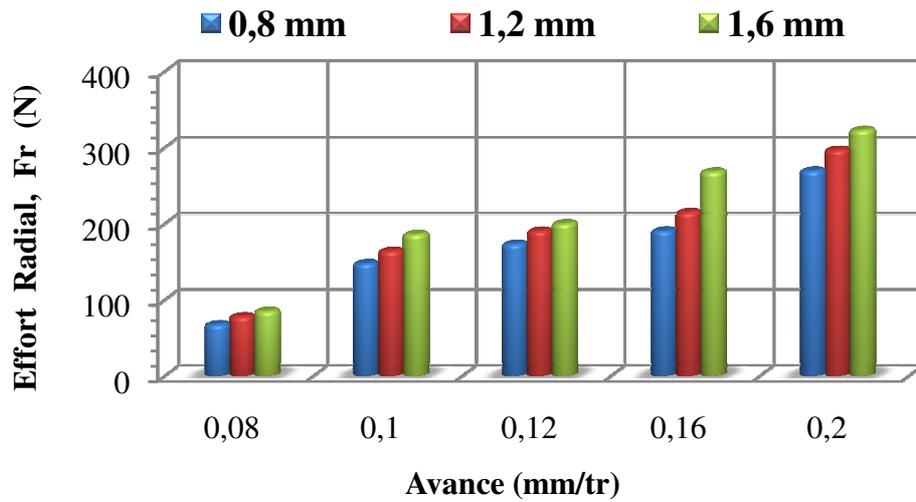
IV.7.2 Effet de l'avance

Les figures IV.12 (a, b et c) montrent l'influence de l'avance sur les trois composantes de l'effort de coupe et cela pour les différents rayons du bec de l'outil testés. Avec l'augmentation de l'avance, la section du copeau cisailé accroît et par conséquent la force demandée pour l'enlèvement de la matière s'accroît. Pour une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.2 mm/tr, on enregistre une élévation de (266.53; 245.92 et 227.15) % de l'effort axial, (298.49 ; 279.74 et 278.99) % de l'effort radial et (124.95 ; 125.07 et 111.58) % de l'effort tangentiel respectivement aux différents rayons du bec de l'outil (0.8, 1.2 et 1.6) mm. L'analyse des résultats montre aussi que l'effort radial est prépondérant par rapport à l'effort tangentiel et axial.

a)



b)



c)

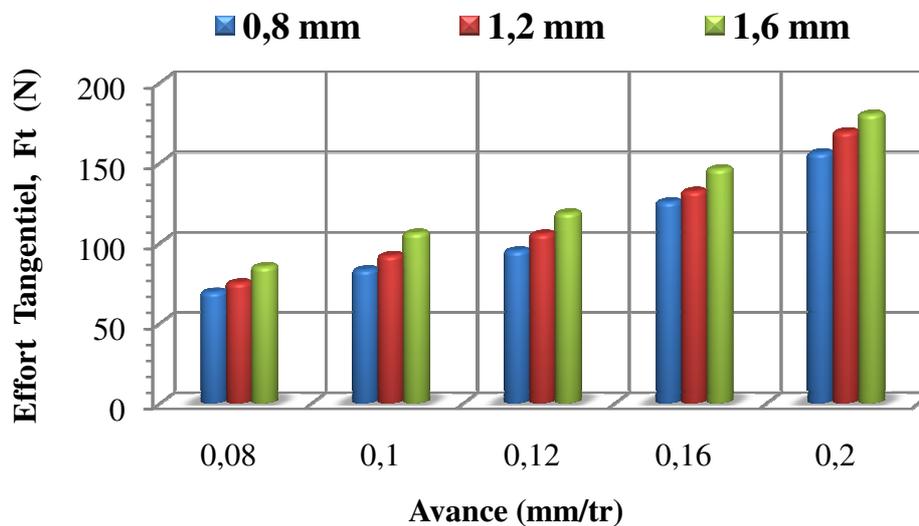


Figure IV-12 Evolution des efforts de coupe en fonction du rayon bec de l'outil et de l'avance pour $V_c = 180 \text{ m/min}$ et $a_p = 0.2 \text{ mm}$.

IV.8 INFLUENCE DU RAYON BEC DE L'OUTIL SUR LES CRITERES DE RUGOSITE

IV.8.1 Effet de la vitesse de coupe

Les figures IV.13 (a, b et c) représentent l'influence de la vitesse de coupe sur les différents critères de la rugosité et cela pour différents rayons du bec de l'outil testés lors du tournage dur de l'acier AISI 52100. L'analyse de ces courbes montre que pendant l'usinage, la rugosité de cet acier diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe et du rayon de l'outil. Pour une valeur de la vitesse de coupe $V_c = 90 \text{ m/min}$, l'augmentation du rayon de

l'outil de 0.8 à 1.6 mm entraîne une diminution de (37.50 %, 31.22 % et 33.06 %) respectivement pour (R_a , R_t , R_z).

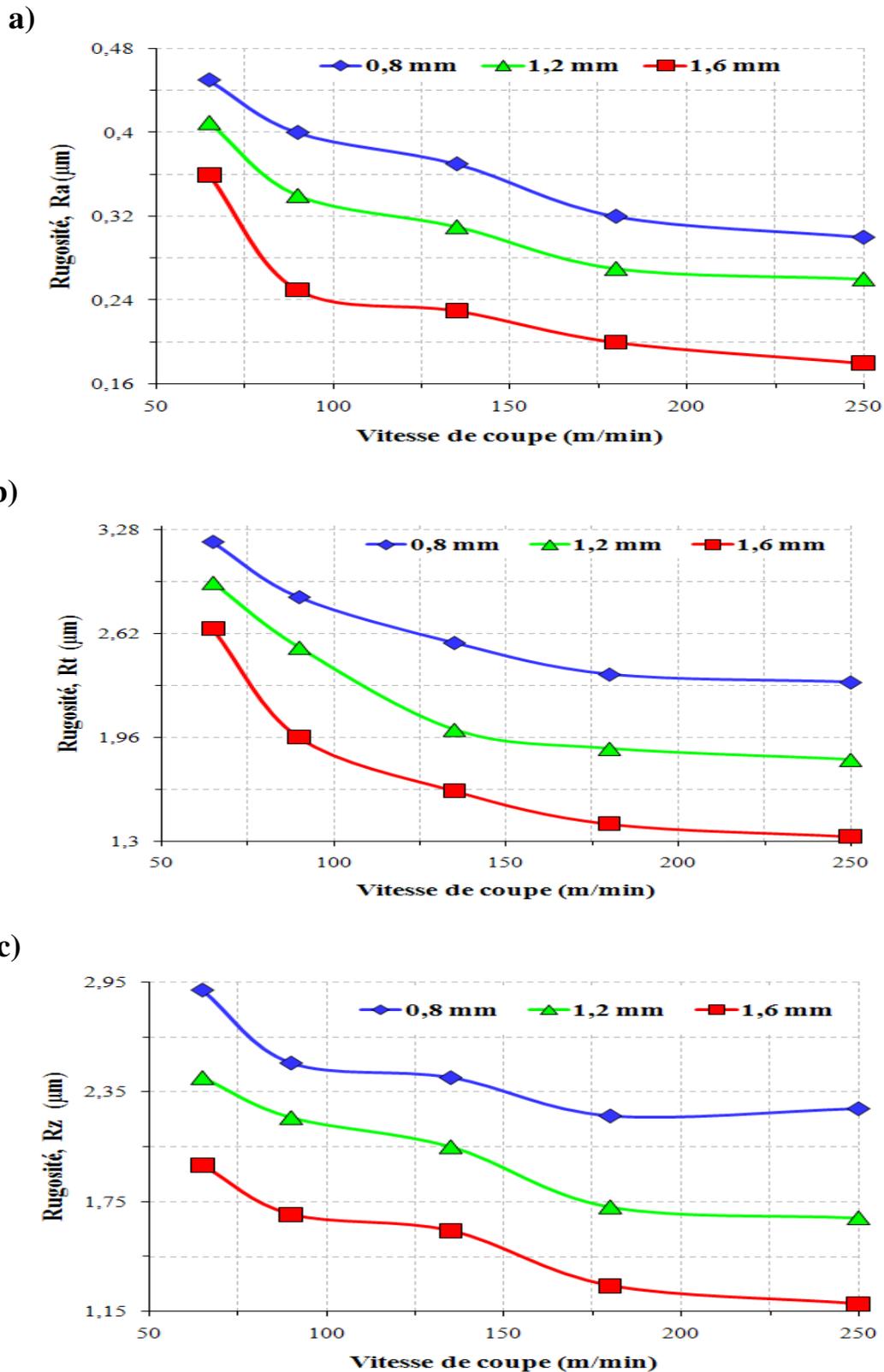
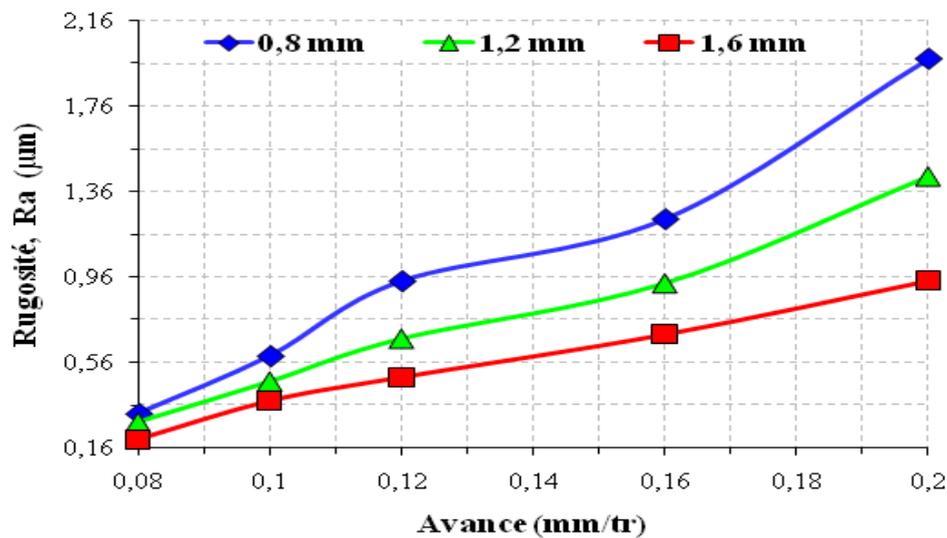


Figure IV-13 Impact du rayon bec de l'outil et de la vitesse de coupe sur la rugosité pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$.

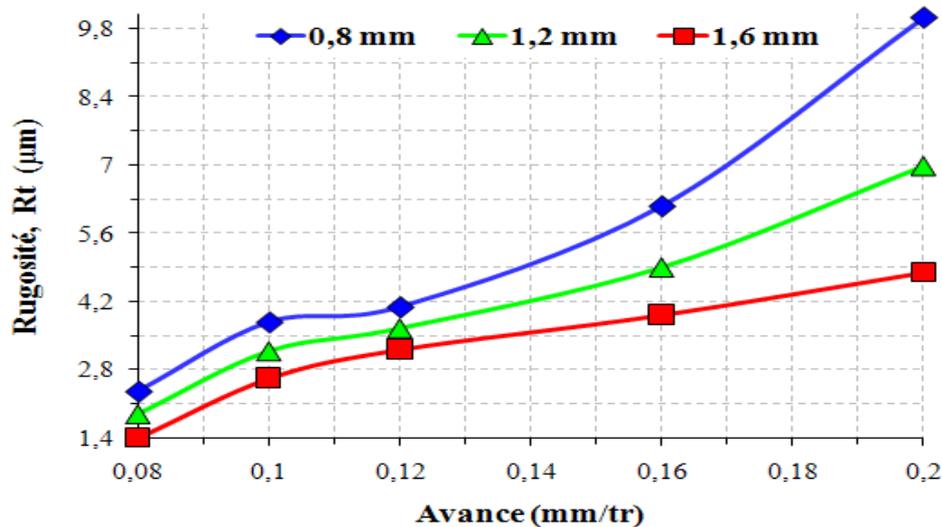
IV.8.2 Effet de l'avance

Les figures IV.5 (a, b, c) présentent l'effet du rayon du bec de l'outil sur les différents critères de rugosité et cela pour différents avances choisies. L'analyse des résultats montre que la rugosité augmente avec l'augmentation de l'avance mais avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil les valeurs des trois critères (R_a , R_t , R_z) de la rugosité diminuent. Pour une valeur de l'avance $f=0.08$ mm/tr, l'augmentation rayon du bec de l'outil de 0.8 à 1.6 mm entraîne une diminution de (37.5 % ; 40.25 % et 41.89 %) respectivement pour (R_a , R_t , R_z). Avec une avance de 0,16 mm/tr, la rugosité est de (0.91 ; 4.78 ; 3.98) μm pour (R_a , R_t , R_z), mais avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0,2 mm/tr, la rugosité augmente successivement de (110.63 % ; 149.50 % et 169.02 %).

a)



b)



c)

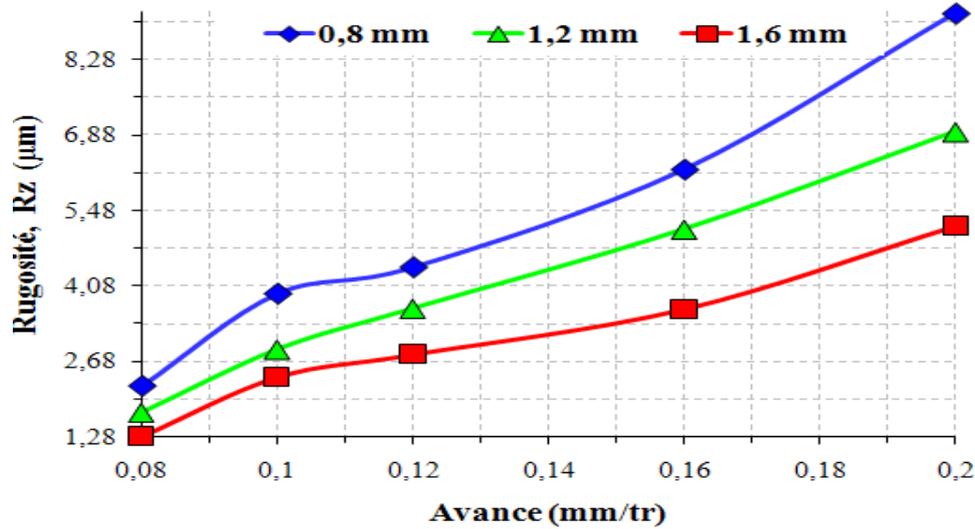


Figure IV-14 Impact du rayon bec de l'outil et de l'avance sur la rugosité pour $V_c = 180$ m/min, $a_p = 0.2$ mm.

IV.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté et analysé chaque résultat de mesure en fonction des paramètres de coupe étudiés. Nous allons ici essayer de confronter les observations entre elles afin de faire apparaître des relations entre les grandeurs technologiques et physiques analysées.

Le chapitre qui suit, expose l'analyse des résultats selon la méthode de Taguchi afin de déterminer l'effet de la dureté de la pièce et des paramètres de coupe sur indicateurs de performance d'usinage étudiés.

CHAPITRE

V

MODELISATION ET OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE EN TD PAR LA METHODE DE TAGUCHI

Ce chapitre, propose une étude statistique qui repose sur l'analyse ANOVA et la régression linéaire multiple afin de modéliser les indicateurs de performance d'usinage étudiés ainsi qu'une optimisation des paramètres de coupe et de la dureté de la pièce. Les expériences ont été exécuté ont se basant sur le tableau orthogonal de Taguchi (L₂₇). Ainsi les valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ont été calculées à l'aide du logiciel Design-Expert 8.

V.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à présenter les résultats de la détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les conditions de coupe (V_c , f , ap et H) et les indicateurs de performance d'usinage étudiés (rugosité de surface et effort de coupe). Ils permettent aussi d'optimiser le processus de coupe. Pour faire une analyse de la variance (ANOVA) et pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation tridimensionnelle des surfaces de réponse, nous avons utilisé un logiciel « *Design-Expert* » pour le traitement statistique des résultats. L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs ayant un effet statistiquement significatif sur les indicateurs de performance d'usinage étudiés. D'autre part, elle s'intéresse à la détermination des conditions de coupe optimales permettant d'obtenir la meilleure rugosité de surface et générer les minimums des efforts de coupe.

V.2 PLANIFICATION EXPERIMENTALE

La planification de l'expérience joue un rôle très important en exécutant les expériences avec la ressource disponible. Le tableau orthogonal de Taguchi a été choisi en raison du nombre minimum des essais expérimentaux exigés, il est plus efficace lors de l'emploi d'un grand nombre des facteurs variables que les plans factoriels complets. En plus, le tableau orthogonal L_{27} permet de déterminer la contribution de chaque facteur qui influe sur la qualité. Cette planification indique quatre principaux paramètres d'usinage, la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), la profondeur de passe (ap) et la dureté de la pièce (H). Tous les degrés de liberté ont été calculés en fonction des principaux paramètres d'usinage sans aucune interaction. Par conséquent, le degré de liberté (ddl) pour ce plan d'expérience est calculé selon l'équation (V.1) [TAG 93]:

$$ddl = (\text{Nombre des Niveaux} - 1) \times (\text{Nombre des Facteurs}) \quad (\text{V.1})$$
$$ddl = (3 - 1) \times 4 \quad ; \quad ddl = 8$$

Selon la méthode de Taguchi, tous les ddl du tableau orthogonal choisi doivent être supérieurs ou égal à tous les ddl exigé pour les expériences. Ainsi, le tableau L_{27} a été choisi pour augmenter la précision de l'expérimentation [TAG 93]. Le tableau L_{27} se compose de 27 rangées (nombre des essais expérimentales) et de 13 colonnes (nombre des facteurs) comme montré dans le tableau III-7 (chapitre III). Les paramètres de coupe ont été assignés dans les colonnes: 1, 2, 5, et 9 selon les trois niveaux pour chaque facteur dans tableau orthogonal. Les paramètres de coupe (V_c , f , ap et H) et les paramètres technologiques étudiés Ra (μm), Fa

Chapitre V: Modélisation et optimisation des conditions de coupe en TD par la méthode de Taguchi

(N), Fr (N) et Ft (N) sont mentionnés dans le tableau V-1. Les valeurs mesurées de la rugosité de surface et des efforts de coupe ont été employées pour déterminer les facteurs qui ont un impact significatifs sur les indicateurs de performance d'usinage.

Essai N°	Facteurs				Rugosité de Surface (μm)	Forces de Coupe (N)		
	Vc	f	ap	H	Ra	Fa	Fr	Ft
1	85	0.08	0.1	46	0.58	10.05	40.26	28.02
2	85	0.08	0.2	52	0.53	39.26	127.39	82.54
3	85	0.08	0.3	62	0.42	95.89	275.33	145.22
4	85	0.12	0.1	52	1.02	18.65	92.36	59.54
5	85	0.12	0.2	62	0.88	75.12	241.11	120.05
6	85	0.12	0.3	46	1.16	76.55	152.79	143.29
7	85	0.16	0.1	62	1.02	56.02	192.31	85.09
8	85	0.16	0.2	46	1.52	52.72	121.08	108.15
9	85	0.16	0.3	52	1.36	82.78	211.52	158.41
10	120	0.08	0.1	52	0.51	15.08	77.61	42.05
11	120	0.08	0.2	62	0.43	72.82	230.04	94.91
12	120	0.08	0.3	46	0.55	70.07	142.43	115.51
13	120	0.12	0.1	62	0.73	42.09	199.07	74.06
14	120	0.12	0.2	46	0.99	38.53	112.98	96.18
15	120	0.12	0.3	52	0.82	79.11	211.64	154.76
16	120	0.16	0.1	46	1.32	23.98	87.13	70.28
17	120	0.16	0.2	52	1.26	61.63	162.67	125.53
18	120	0.16	0.3	62	1.08	118.57	298.23	172.30
19	170	0.08	0.1	62	0.31	36.07	172.63	65.76
20	170	0.08	0.2	46	0.46	40.81	104.21	90.43
21	170	0.08	0.3	52	0.41	68.01	185.86	123.86
22	170	0.12	0.1	46	0.83	17.88	73.92	64.08
23	170	0.12	0.2	52	0.77	58.12	158.02	102.18
24	170	0.12	0.3	62	0.56	97.98	280.99	165.51
25	170	0.16	0.1	52	1.15	28.65	128.17	81.76
26	170	0.16	0.2	62	0.95	87.09	273.16	137.51
27	170	0.16	0.3	46	1.28	85.26	190.26	162.88

Tableau V-1 Résultats expérimentaux de la rugosité de surface et des efforts de coupe selon plan Taguchi L_{27}

L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer les facteurs qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés. Cette analyse a été exécutée pour un niveau de confiance égale à 95%. Le but de cette analyse est d'une part, les estimations des effets de chaque paramètre de coupe permettant de déterminer les facteurs qui ont des effets significatifs sur chaque réponse, la rugosité de surface (Ra) et les composantes d'effort de coupe (Fa , Fr et Ft). D'autre part on s'intéresse à l'interprétation des résultats en fonction du pourcentage de contribution calculé pour chaque facteur étudié. Les modèles empiriques sont développés afin de déterminer la corrélation entre les paramètres de coupe et les indicateurs de performance d'usinage. En plus, les surfaces de réponse des facteurs qui ont un impact significatifs ont été présentés. Ces surfaces de réponse permettent d'apprécier l'influence des facteurs étudiés. Ils nous permettent aussi de faire le choix des paramètres de coupe en fonction de la réponse désirée.

V.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

V.3.1 Analyse ANOVA pour Ra

L'analyse des résultats du tableau V-1, montre que la meilleure rugosité de surface (Ra) est réalisée avec la combinaison de la plus basse avance, 0.08 mm/tr, la plus grande vitesse de coupe, 170 m/min et à grande dureté de la pièce, 62 HRC. La rugosité de surface (Ra) diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce en termes des conditions d'essais, comme rapporté par d'autres chercheurs [THI 99], [ÖZE 05], [DUR 09] et [AOU 12]. La méthode des moindres carrés est employée pour l'analyse de la variance (ANOVA) à l'aide du logiciel « Design-Expert ». Les résultats de cette technique statistique sont présentés dans le tableau V-2. Le tableau de l'analyse ANOVA est généralement effectué sur les paramètres mesurés en vue d'évaluer les effets principaux des facteurs sur les réponses étudiées. Le "**F-valeur**" du modèle est calculé à partir de la moyenne de la somme des carrés du modèle divisée par la moyenne de la somme des carrés des résidus. En outre, si "**P-valeur**" du modèle est très petit (inférieur à 0.05) alors les limites dans le modèle ont un effet significatif sur la réponse. Les résultats du "**F-valeur**" indiquent clairement que l'avance est le facteur le plus significatif comparé aux autres paramètres de coupe, et que la dureté de la pièce est le deuxième facteur significatif puis la vitesse de coupe. Habituellement, l'analyse ANOVA est appliquée aux résultats de l'expérience afin de déterminer le pourcentage de contribution de chaque facteur [ROY 90]. Ce pourcentage est utilisé pour évaluer l'importance relative de chaque facteur. Les résultats de l'analyse ANOVA ont indiqué clairement que l'effet de la profondeur de passe sur la rugosité de la surface (Ra) n'est pas statistiquement significatif avec une contribution de

0.19 %. Par ordre d'importance, on constate donc que l'avance est le facteur le plus significatif qui affecte la rugosité de la surface (Ra) avec une contribution de 83.93 % suivi par la dureté de la pièce avec une contribution de 10.07 % puis la vitesse de coupe avec une contribution de 5.81 %. Le graphique de probabilité normale des résidus de la rugosité de surface (Ra) illustré dans la figure V-1(a), montre clairement qu'il y a une tendance linéaire car toutes les valeurs des résidus se trouvent très proche par rapport la ligne droite de la normalité. La normalité semble acceptable en plus des coefficients de corrélation assez élevés.

Source	Somme des Carré	DDL	Moyen Carré	F-value	p-value	Contribution (%)
Modèle	3.010	8	0.37625	78.555	< 0.0001	100 %
V_c	0.1746	2	0.0873	18.229	< 0.0001	5.81
f	2.526	2	1.263	263.72	< 0.0001	83.93
ap	0.005696	2	0.002848	0.5947	0.5622	0.19
H	0.3029	2	0.15145	31.624	< 0.0001	10.07
Residus	0.08620	18	0.004789	-	-	-

Tableau V-2 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra)

V.3.2 Évolution des efforts de coupe en fonction de V_c, f, ap et H

L'anayse des résultats du tableau V-1, montre que l'effort axial, l'effort radial et l'effort de coupe tangentiel ont été obtenus dans la gamme respectivement de 10.05-118.57 N, 40.26-298.23 N et 28.02-172.30 N. Chacune des trois composantes de force (F_a, F_r et F_t) est influencée principalement par la profondeur de passe, la dureté de la pièce, l'avance et en dernier lieu par la vitesse de coupe. L'effort radial est au moins 1.06 fois plus grand que l'effort de coupe tangentiel, alors que le maximum est 2.62 fois plus grand dans la gamme de 46 -62 HRC. [KÖN 80] et autres ont conclu que l'effort radial est presque deux fois plus grand que l'effort tangentiel en tournage dur. Cette constatation est également rapporté par [BOU 10], [CHE 02] et [KIS 99]. [YAL 09] et autres ont indiqué que l'effort radial est toujours prépondérant mais proche à l'effort de coupe tangentiel pendant l'usinage dans la limite du rayon bec de l'outil. [LIN 95] et autres ont remarqué qu'avec l'augmentation de la profondeur de passe l'effort radial (F_r) est l'effort le plus important en tournage dur. Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial (F_a), l'effort radial (F_r) et l'effort de coupe tangentiel (F_t) sont illustrés dans le tableau V-3. On observe que la vitesse de coupe n'a aucun effet significatif sur l'effort axial (F_a). Les résultats du "**F-valeur**" indiquent clairement que la profondeur de passe est le facteur le plus significatif qui affecte l'effort axial

Chapitre V: Modélisation et optimisation des conditions de coupe en TD par la méthode de Taguchi

(*F_a*) avec une contribution de 72.28%, et que la dureté de la pièce est le second facteur significatif avec une contribution de 21.76% puis l'avance avec une contribution de 5.89%. Mais pour l'effort radial (*F_r*), la dureté de la pièce est le facteur le plus significatif avec une contribution de 60.53%, le second facteur significatif c'est la profondeur de passe avec une contribution de 34.67 % suivi par l'avance avec une contribution de 4.23%. Pour l'effort de coupe tangentiel (*F_t*), la profondeur de passe, l'avance et la dureté de la pièce ont une contribution de 81.02 %, 13.62 % et 4.76 % respectivement.

Source	Somme des Carré	ddl	Moyen Carré	F-value	p-value	Contribution (%)
(a) Analyse de la variance pour <i>F_a</i>						
Modèle	21267.76	8	2658.47	160.187	< 0.0001	100 %
<i>V_c</i>	14.40	2	7.20	0.433	0.6546	0.07
<i>f</i>	1252.38	2	626.19	37.731	< 0.0001	5.89
<i>ap</i>	15372.41	2	7686.205	463.135	< 0.0001	72.28
<i>H</i>	4628.57	2	2314.285	139.448	< 0.0001	21.76
Residual	298.74	18	16.596	–	–	–
(b) Analyse de la variance pour <i>F_r</i>						
Model	1.258E+005	8	15725.00	270.17	< 0.0001	100 %
<i>V_c</i>	719.42	2	359.71	6.18	0.0091	0.57
<i>f</i>	5308.62	2	2654.31	45.605	< 0.0001	4.23
<i>ap</i>	43614.65	2	21807.325	374.683	< 0.0001	34.67
<i>H</i>	76144.32	2	38072.16	654.138	< 0.0001	60.53
Residual	1047.65	18	58.202	–	–	–
(c) Analyse de la variance pour <i>F_t</i>						
Model	40775.52	8	5096.94	188.489	< 0.0001	100 %
<i>V_c</i>	245.46	2	122.73	4.538	0.0254	0.60
<i>f</i>	5552.35	2	2776.175	102.057	< 0.0001	13.62
<i>ap</i>	33033.19	2	16516.595	610.798	< 0.0001	81.02
<i>H</i>	1944.52	2	972.26	35.955	< 0.0001	4.76
Residual	486.75	18	27.041	–	–	–

Tableau V-3 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort de coupe (*F_a*, *F_r* et *F_t*).

Les graphiques de probabilités normales des résidus de l'effort axial (F_a), l'effort radial (F_r) et l'effort tangentiel (F_t) sont respectivement illustrés dans les figures V-1: (b), (c) et (d). Ces figures montrent clairement qu'il y a une tendance linéaire car toutes les valeurs des résidus se trouvent très proche par rapport à la ligne droite de la normalité. Les tests de normalités semblent acceptables en plus des coefficients de corrélation assez élevés.

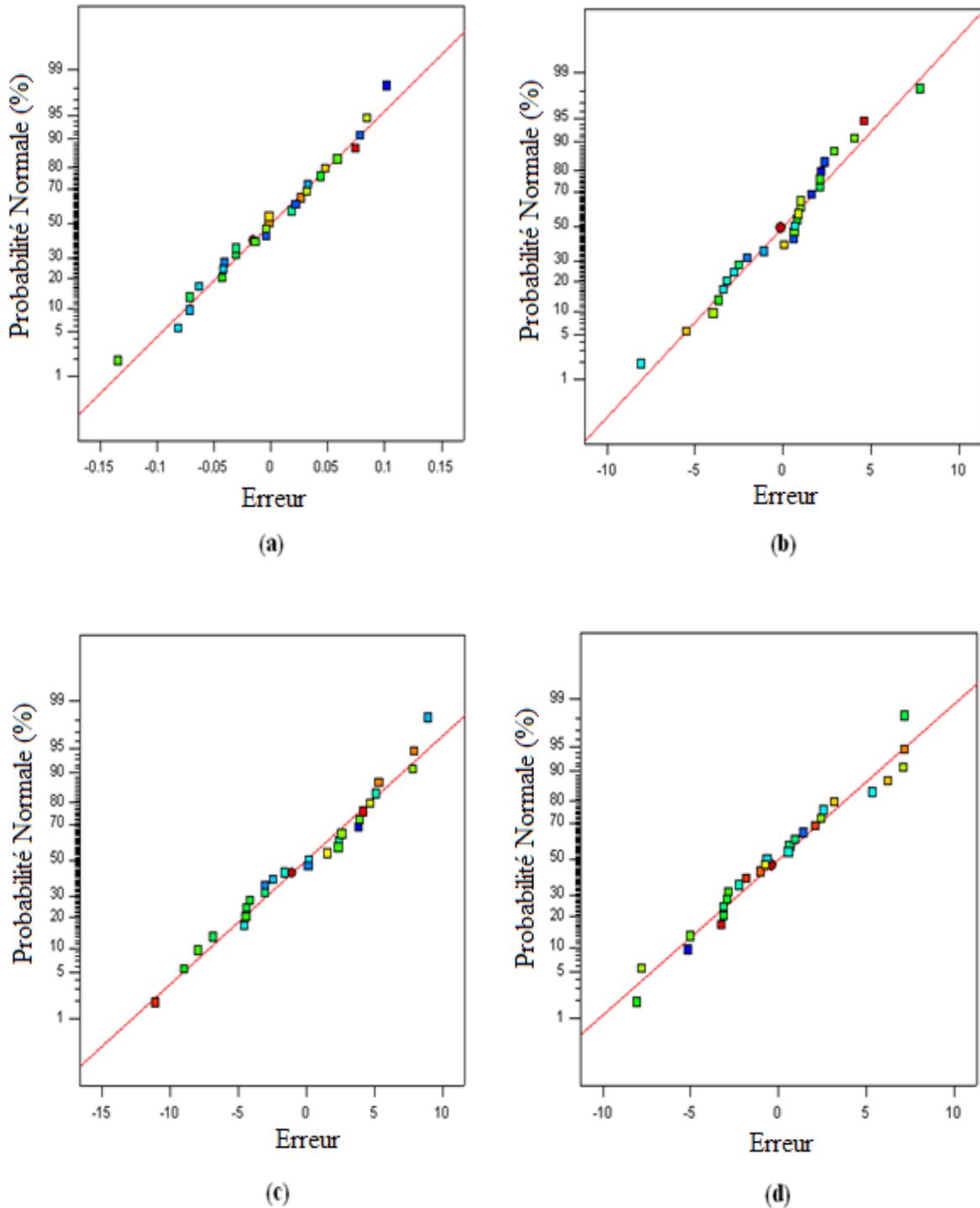


Figure V-1 Probabilités normales des erreurs pour (a): R_a ; (b): F_a ; (c): F_r et (d): F_t .

V.3.3 Modèles de régression linéaire multiples de la rugosité de surface et des efforts de coupe

Les modèles linéaire de régression multiple ont été développés pour la rugosité de surface (Ra) et les composante de l'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction des paramètres de coupe principaux qui sont, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et la dureté de la pièce. En conséquence, les modèles adaptés en termes de facteurs réels pour la rugosité de la surface et les efforts de coupe sont données par les équations (V.2) à (V.5).

$$Ra = 0.85 - 2.303 \times 10^{-3} Vc + 9.36f + 0.094ap - 0.016H \quad (V.2)$$
$$(R^2 = 0.9722; R^2(\text{aju}) = 0.9598; R^2(\text{préd}) = 0.9374)$$

$$Fa = -130.07 + 1.531 \times 10^{-2} Vc + 206.444f + 292.083ap + 1.918H \quad (V.3)$$
$$(R^2 = 98.61\%; R^2(\text{aju}) = 98.00\%; R^2(\text{préd}) = 96.88\%)$$

$$Fr = -444.789 + 0.183Vc + 428.847f + 507.55ap + 8.217H \quad (V.4)$$
$$(R^2 = 99.43\%; R^2(\text{aju}) = 99.18\%; R^2(\text{préd}) = 98.72\%)$$

$$Ft = -110.505 + 8.488 \times 10^{-2} Vc + 435.569f + 428.388ap + 1.279H \quad (V.5)$$
$$(R^2 = 98.82\%; R^2(\text{aju}) = 98.30\%; R^2(\text{préd}) = 97.35\%)$$

La valeur de $R^2 = 0.9722$ (coefficient de corrélation multiple) pour l'équation (V.2) du modèle indique que 97.22 % de toutes les variations sont expliqués par le modèle. Le R^2 ajusté est une statistique qui est ajustée à la "taille" du modèle; c'est-à-dire, le nombre de facteurs (limites). La valeur du R^2 ajusté = 0.9598 indique que 95.98% de toute la variabilité sont expliqués par le modèle après avoir considéré les facteurs significatifs. R^2 prédit = 0.9374 est en bon accord avec le R^2 ajusté et prouve que le modèle serait prévu 93.74% de la variabilité dans les nouvelles données. Ces coefficients de corrélation montrent une très bonne corrélation entre ces modèles et les données expérimentales. Les valeurs prévues et ajustées de R^2 pour les composantes d'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) sont en bon accord, qui valide encore la forme physique des modèles développés. Les figures V-2 (a), (b), (c) et (d) montrent également les valeurs prévues de la rugosité de la surface (Ra) et des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) par les équations des modèles développés et les valeurs observées (expérimentales). L'analyse des courbes montre que les valeurs prévues et les valeurs expérimentales sont en bonne

concordance et que l'erreur pour Ra varie entre -0.09 et 0.08, et pour Fa , Fr et Ft varie entre -7 et 8.03 ; -11 et 7.89 ; -6.49 et 9.57 respectivement.

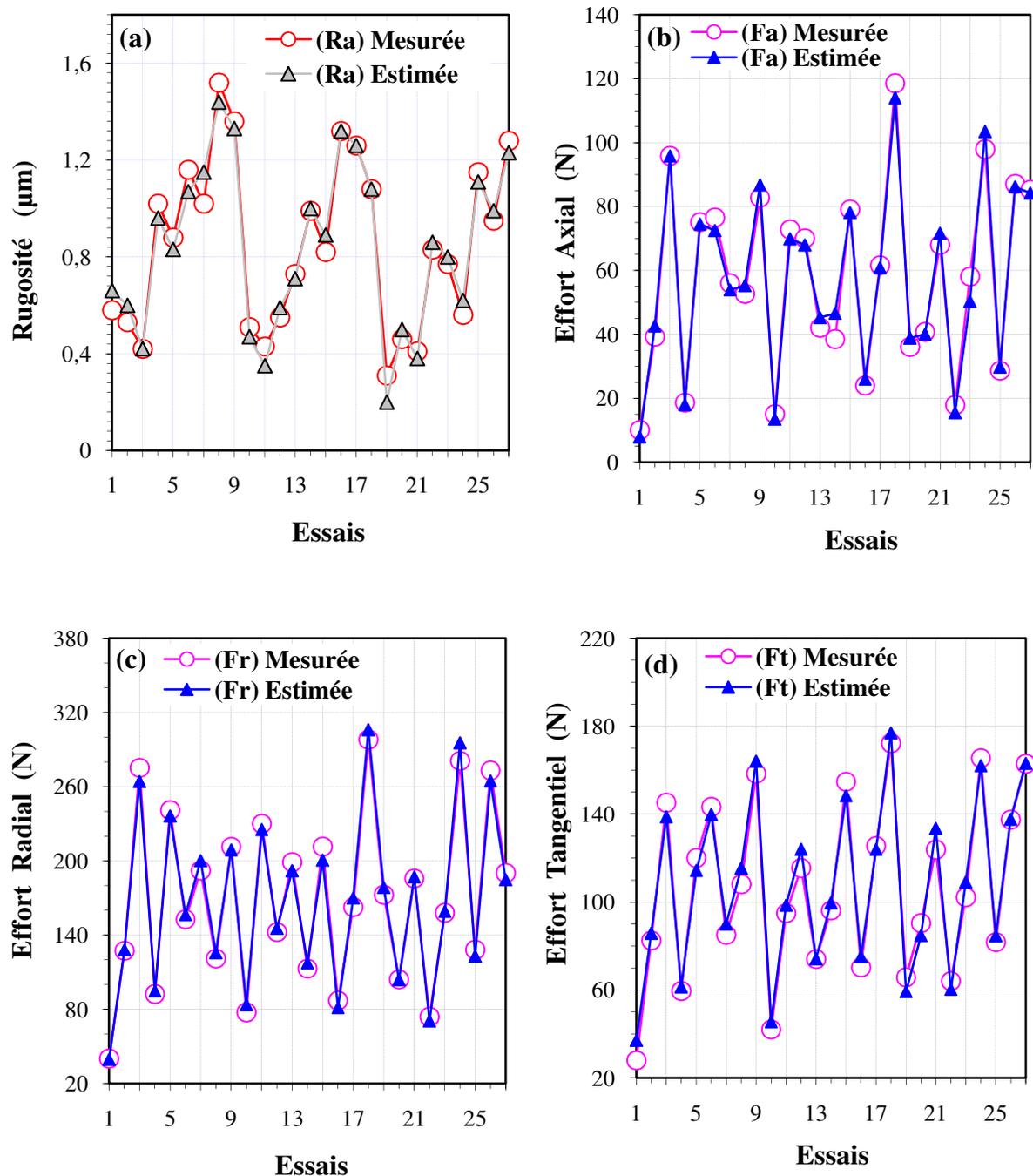


Figure V-2 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour Ra , Fa , Fr et Ft .

V.3.4 Surfaces de réponses

Les surfaces de réponses obtenues pour les paramètres de coupe les plus significatifs en fonction de la rugosité de la surface (Ra) et les composantes de l'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) lors du tournage dur sont présentés dans les figures V.3 –V.8. L'analyse des résultats montre

la variation de la rugosité de surface et les efforts de coupe avec les paramètres de coupe notamment la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et la dureté de la pièce. La figure V-3 présente la variation de la rugosité de la surface avec la dureté de la pièce et l'avance pour deux vitesses de coupe (85 et 170 m/min). Dans cette figure, on observe que l'avance a un effet significatif sur la rugosité de la surface et sa pente est très élevée. On remarque aussi que la valeur de la rugosité de surface (R_a) diminue avec l'augmentation de dureté de la pièce. La figure V-4 montre la variation de la rugosité de la surface avec la vitesse de coupe et l'avance pour deux duretés de la pièce différentes (46 et 62 HRC). On remarque que l'avance a un impact plus significatif sur la rugosité de surface car sa pente est élevée. La rugosité de surface diminue légèrement avec la vitesse de coupe pour la gamme très élevée de l'avance. Comme il a été précédemment précisé, cette figure indique clairement qu'une meilleure rugosité de surface peut être réalisée à n'importe quelle vitesse de coupe (85-170 m/min) et à très basse avance (0.08 mm/tr) et aussi une dureté de la pièce élevée.

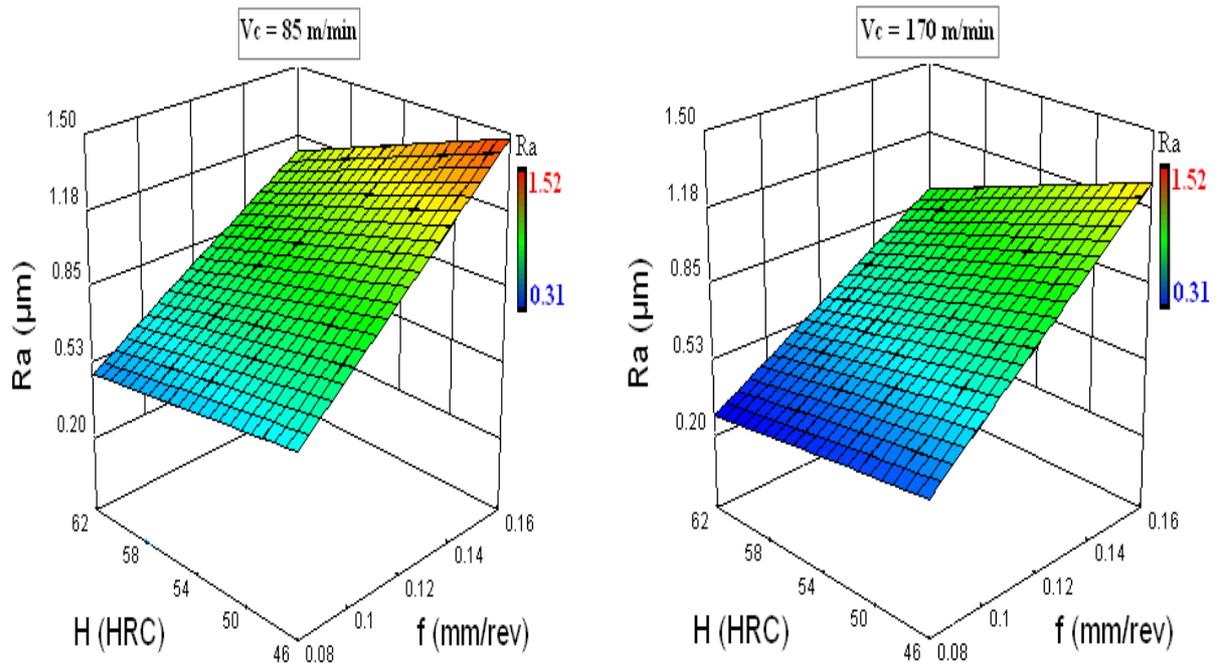


Figure V-3 Effet de l'avance et de la dureté de la pièce sur la rugosité de surface ($a_p = 0.1\text{mm}$).

La figure V-5 montre la variation de la rugosité de la surface avec la dureté de surface de la pièce et la vitesse de coupe pour deux avances différentes (0.08 et 0.16 mm/tr). On observe que la dureté de la pièce a un effet significatif sur la rugosité de la surface. Comme il a été précédemment précisé, l'augmentation de la dureté de la pièce à (62 HRC), cela donne un meilleur état de la surface quand l'avance prend la valeur la plus basse (0.08 mm/tr) et la

vitesse de coupe la plus élevée (170 m/min). L'analyse de la figure montre aussi que la rugosité de la surface (R_a) diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et cela pour les deux avances testés.

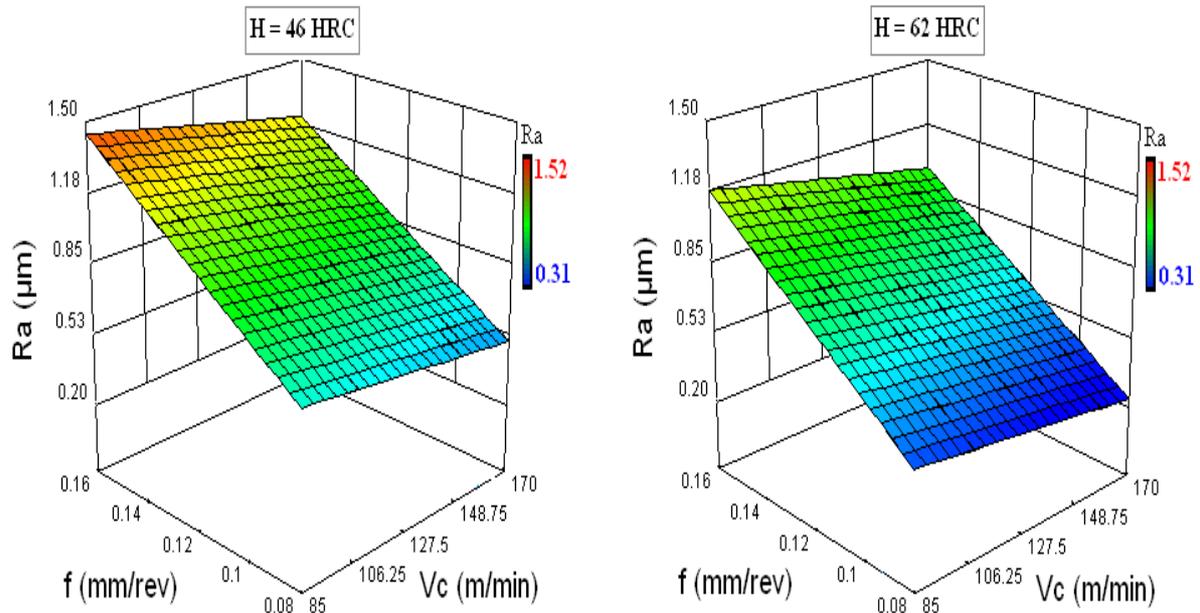


Figure V-4 Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface ($a_p = 0.1\text{mm}$).

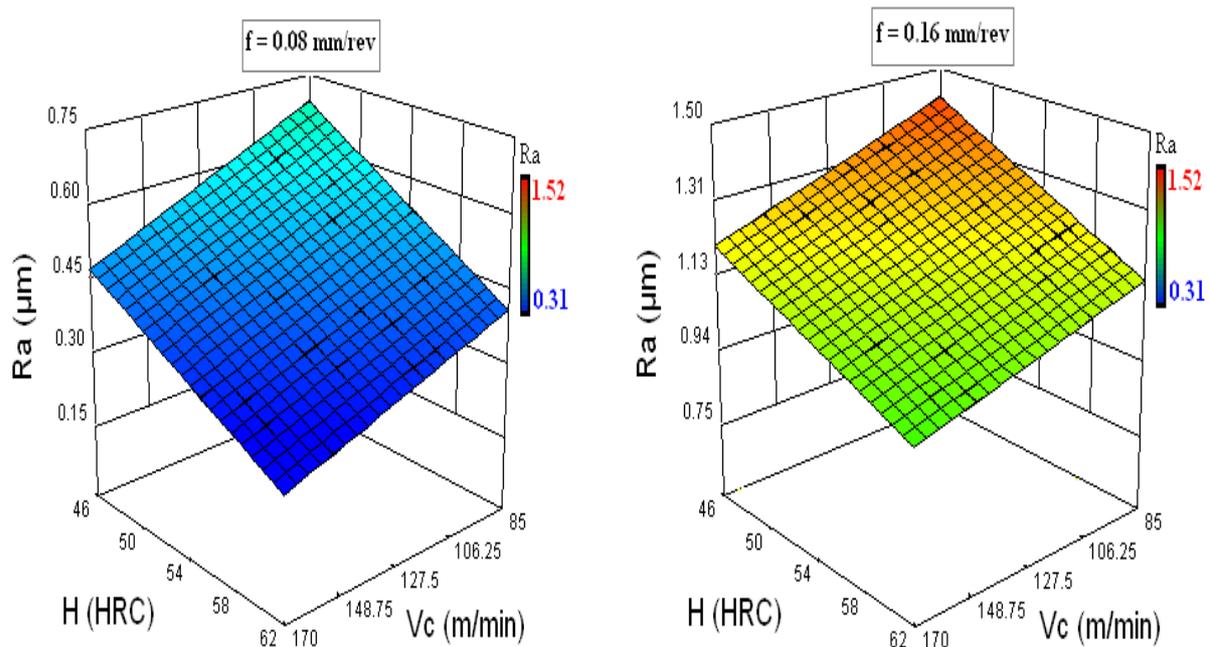


Figure V-5 Effet de la vitesse de coupe et de la dureté de la pièce sur la rugosité de surface ($a_p = 0.1\text{mm}$).

La variation de l'effort axial (F_a) avec la profondeur de passe et la dureté de la pièce est montrée dans la figure V-6. L'analyse des courbes montre que la profondeur de passe a un

effet significatif très important sur l'effort axial (F_a). Cette tendance est observée pour les trois avances testées. On remarque que l'effort axial (F_a) augmente aussi avec l'augmentation de la dureté de la pièce. La valeur minimale de l'effort axial (F_a) est observé avec la profondeur de passe la plus basse (0.1mm) et la dureté de la pièce la plus faible.

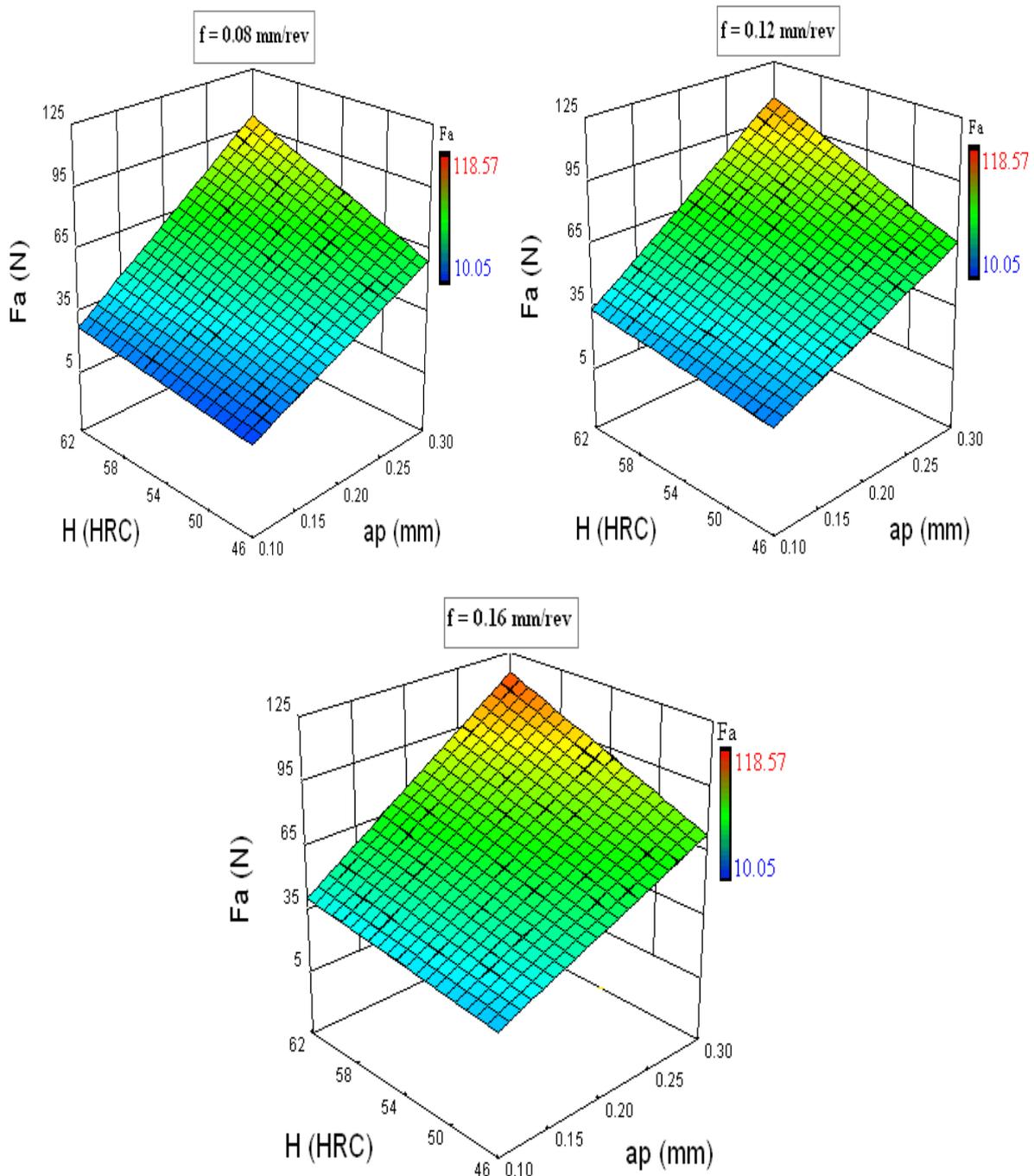


Figure V-6 Effet de la dureté de la pièce et la profondeur de passe sur l'effort axial (Vitesse de coupe = 170 m/min).

La figure V-7 présente la réponse estimée de l'effort radial (F_r) en fonction la dureté de la pièce et la profondeur de passe. L'analyse des courbes montre que la dureté de la pièce à un

effet le plus significatif sur l'effort radial (F_r). Cette tendance est observée pour les trois avances testées. La valeur minimale de l'effort radial (F_r) est observé avec la profondeur de passe la plus basse (0.1mm) et la dureté de la pièce la plus faible.

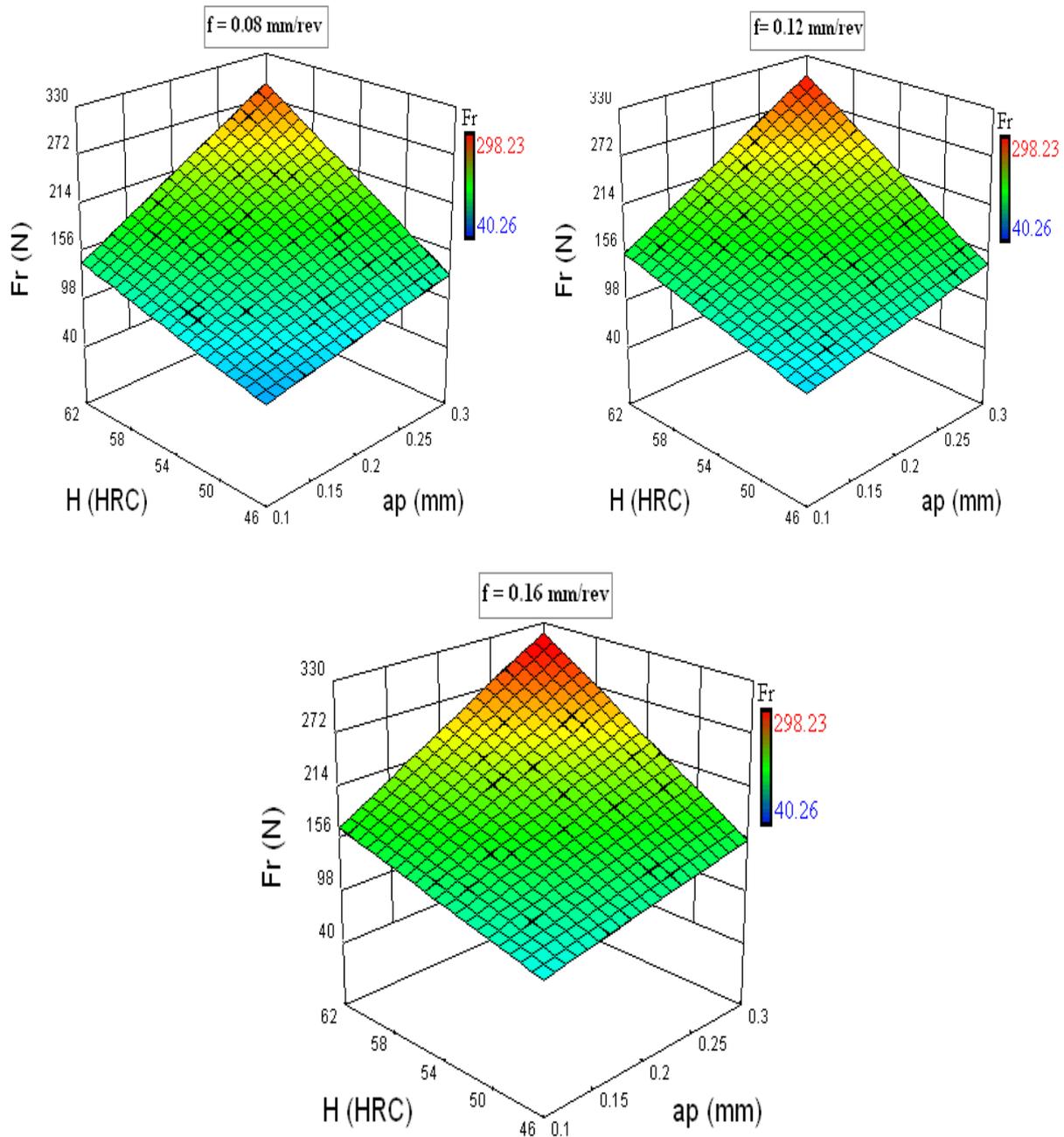


Figure V-7 Effet de la dureté de la pièce et la profondeur de passe sur l'effort radial ($V_c = 170$ m/min).

La figure V-8 nous permet d'apprécier l'influence la profondeur de passe et l'avance sur l'effort de tangentiel (F_t). L'analyse des courbes montre que la profondeur de passe a un effet significatif très important sur l'effort de tangentiel (F_t). Cette tendance est observée pour les trois duretés de la pièce testées. On remarque que l'effort de tangentiel (F_t) augmente avec

l'augmentation de la profondeur de passe et l'avance. La valeur minimale de l'effort de tangential (F_t) est observé avec la profondeur de passe la plus basse (0.1mm) et l'avance la plus faible.

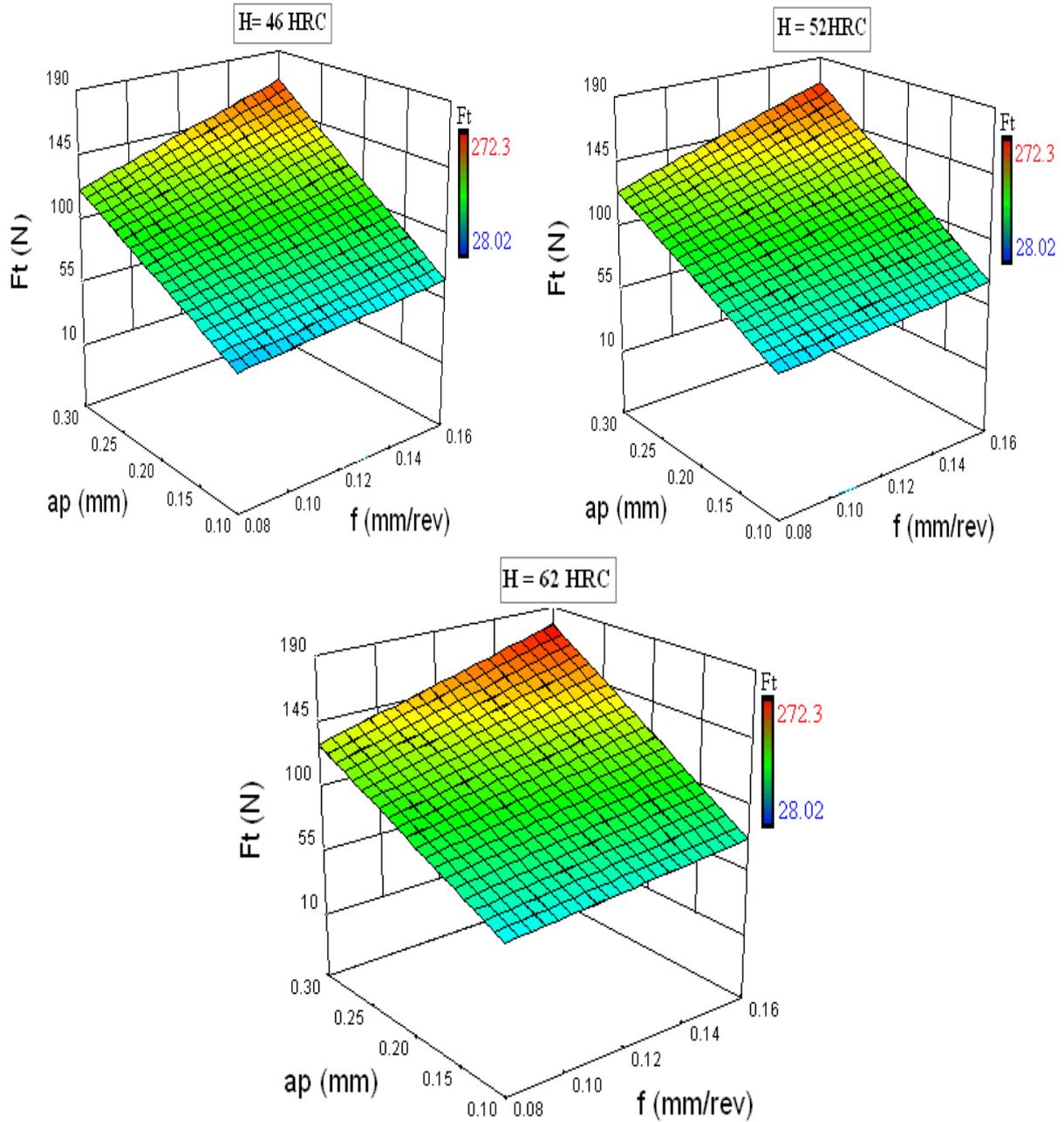


Figure V-8 Effet de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort de coupe tangential ($V_c = 170$ m/min).

V.4 OPTIMISATION DES PARAMETRES DE COUPE

La dernière technique d'optimisation simultanée de plusieurs réponses d'un système est la fonction de désirabilité. Cette fonction permet d'imposer des critères supplémentaires tels que les limites inacceptables et la sévérité avec laquelle la réponse doit rester près de la zone

désirée. A partir de plusieurs équations exprimant des réponses différentes et ayant des facteurs communs, il s'agit de synthétiser ces fonctions en une seule, nommée la réponse composite ou désirabilité. Par la suite, il suffit de l'optimiser par les techniques habituelles de surface de réponse. Cette méthode devient pratiquement nécessaire lorsque l'analyse comporte plus de trois facteurs selon [MON 01]. Notre objectif est de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe (Vc , f , ap et H) en produisant la plus basse rugosité de la surface (Ra) et en générant les minimums des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) afin d'améliorer la qualité des pièces usinées en tournage dur. Cette technique permettra de dégager des stratégies permettant le meilleur compromis des conditions de coupe afin d'améliorer les indicateurs de performance d'usinage en tournage dur, notamment la qualité des surfaces usinées. Compte tenu de la planification du plan d'expérience, nous déterminerons des équations de prédiction, qui permettent de prédire les résultats pour un ensemble des conditions de coupe choisi. De même, il est possible de trouver les conditions d'usinage correspondant aux réponses optimales.

Dans notre travail, ceci revient à la minimisation simultanée des réponses (Ra , Fa , Fr et Ft) calculé par l'équation (V.6) :

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right) \frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (\text{V.6})$$

$$F(x) = -DF$$

Dans l'équation (V.6) w_i , d_i et i sont des variables ciblés par l'utilisateur en fonction de leur expérience permettant à celui-ci d'indiquer les limites de la fonction de désirabilité autour de la valeur cible (T_i) pour une réponse i .

- Pour atteindre une valeur spécifique de T_i , la fonction élémentaire de désirabilité d_i est calculée par l'équation (V.7) :

$$\begin{aligned}
 d_i &= 0 & \text{Si} & \quad Y_i \leq \text{Min}_i \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - \text{Min}_i}{T_i - \text{Min}_i} \right] & \text{Si} & \quad \text{Min}_i \leq Y_i \leq T_i \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - \text{Max}_i}{T_i - \text{Max}_i} \right] & \text{Si} & \quad T_i \leq Y_i \leq \text{Max}_i \\
 d_i &= 0 & \text{Si} & \quad Y_i \geq \text{Max}_i
 \end{aligned} \quad (\text{V.7})$$

Les quantités Min_i et Max_i représentent les limites de désirabilité pour la réponse i . L'approche de la fonction de désirabilité repose en effet sur l'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse pour la modélisation polynomiale de chaque réponse $Y_i(x)$, par une substitution des polynômes dans les équations (V.7) et (V.8), afin de faire encore une substitution par les désirabilités individuelles dans l'équation (V.6). Finalement, il reste une seule fonction objective pour chercher la solution x , tout en maximisant la désirabilité totale $F(x)$.

- Pour une maximisation, la fonction élémentaire de désirabilité pour la réponse Y_i est calculée par l'équation (V.8):

$$\begin{aligned}
 di &= 0 \quad \text{Si} \quad Y_i \leq Min_i \\
 di &= \left[\frac{Y_i - Min_i}{Max_i - Min_i} \right] \quad \text{Si} \quad Min_i \leq Y_i \leq Max_i \quad \text{(V.8)} \\
 di &= 1 \quad \text{Si} \quad Y_i \geq Max_i
 \end{aligned}$$

- Pour une minimisation, la fonction élémentaire de désirabilité pour la réponse Y_i est calculée par l'équation (V.9) :

$$\begin{aligned}
 di &= 1 \quad \text{Si} \quad Y_i \leq Min_i \\
 di &= \left[\frac{Y_i - Max_i}{Max_i - Min_i} \right] \quad \text{Si} \quad Min_i \leq Y_i \leq Max_i \quad \text{(V.9)} \\
 di &= 0 \quad \text{Si} \quad Y_i \geq Max_i
 \end{aligned}$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^p w_i \cdot |d_i(Y_i) - d_i(T_i)|}{p} \quad \text{(V.10)}$$

Avec :

- $d_i(Y_i)$ est la désirabilité individuelle pour la réponse Y_i
- $d_i(T_i)$ est la désirabilité individuelle ciblée T_i pour chaque réponse

Pour refléter la différence possible dans l'importance des différentes réponses, la dernière innovation consiste à peser les réponses, et donc donner les degrés d'importance correspondants à chaque réponse selon l'importance d'une réponse par rapport aux autres. Ainsi, dans notre étude la fonction de désirabilité globale sera évaluée par l'entremise de l'équation (V.10), où le degré d'importance W_i sont tels que:

$$\sum_{i=1}^p w_i = 1 \quad (\text{V.11})$$

Où :

W_i est le degré d'importance pour chaque réponse individuelle.

Voici une synthèse de cette technique d'optimisation simultanée de plusieurs réponses employée dans cette étude:

- À partir des estimations Y_i , déterminer les fonctions élémentaires de désirabilité d_i pour chaque réponse, selon l'équation (V.9).
- Évaluer la fonction de désirabilité globale pour chaque réponse à l'aide de l'équation (V.10).

Les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrés dans le tableau V-4. Les solutions optimales sont illustrées dans le tableau (V-5) par ordre de niveau décroissant de désirabilité. La valeur de désirabilité 0.98293 correspond à la meilleure valeur de la rugosité de surface et les minimums des efforts de coupe dans la gamme des paramètres indiquée.

Condition	Objectif	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe (m/min)	Intervalle	85	170
Avance (mm/tr)	Intervalle	0.08	0.16
Profondeur de passe (mm)	Intervalle	0.1	0.3
dureté de la pièce (HRC)	Intervalle	46	62
Rugosité de surface (μm)	Minimisé	0.31	1.52
Effort axial (N)	Minimisé	10.05	118.57
Effort radial (N)	Minimisé	40.26	298.23
Effort tangentiel (N)	Minimisé	28.02	172.30

Tableau V-4 Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usinage

Le problème revient à maximiser la fonction de désirabilité (D) qui est la fonction objective sous les contraintes des variables. Le tableau V-5 illustre les valeurs optimales des conditions d'usinage.

Solution N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	H (HRC)	Ra (µm)	Fa (N)	Fr (N)	Ft (N)	Désirabilité
1	170	0.08	0.1	56.51	0.309	26.72	134.01	53.92	0.98266
2	165.45	0.08	0.1	57.14	0.325	27.82	138.29	54.34	0.98177
3	157.65	0.08	0.1	58.26	0.310	29.85	146.11	55.11	0.98011
4	170	0.08	0.1	55.51	0.325	24.83	125.99	52.73	0.97972
5	170	0.08	0.1	57.95	0.309	29.97	146.53	56.86	0.97971
6	151.71	0.08	0.1	59.11	0.309	31.40	152.10	55.69	0.97879
7	170	0.08	0.1	59.05	0.272	31.64	154.39	57.34	0.97810
8	169.97	0.08	0.1	54.51	0.341	22.85	117.86	51.36	0.97662
9	143.01	0.08	0.1	60.46	0.308	33.86	161.65	56.70	0.97659
10	170	0.08	0.12	56.69	0.309	35.34	149.32	66.33	0.97621

Tableau V-5 Conditions optimales

Le tableau V-6 montre les intervalles de prévision optimale des réponses correspondant aux conditions optimales des paramètres de coupe dans le tableau V-5. Le graphique de la solution optimale désirée est donné dans la figure V-9. Cette figure montre la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f , a_p et H) pour obtenir la plus basse valeur de la rugosité de surface et les minimums des efforts de coupe.

Réponse	Prédiction	95% IC min	95% IC max	95% IP min	95% IP max
Rugosité de surface (R_a)	0.309	0.25	0.37	0.16	0.46
Effort axial (F_a)	26.72	21.43	31.93	14.28	39.08
Effort radial (F_r)	134.01	127.13	144.31	115.42	156.06
Effort tangentiel (F_t)	53.92	48.85	59.02	41.94	65.91

Tableau V-6 Intervalles de prévision optimale des réponses

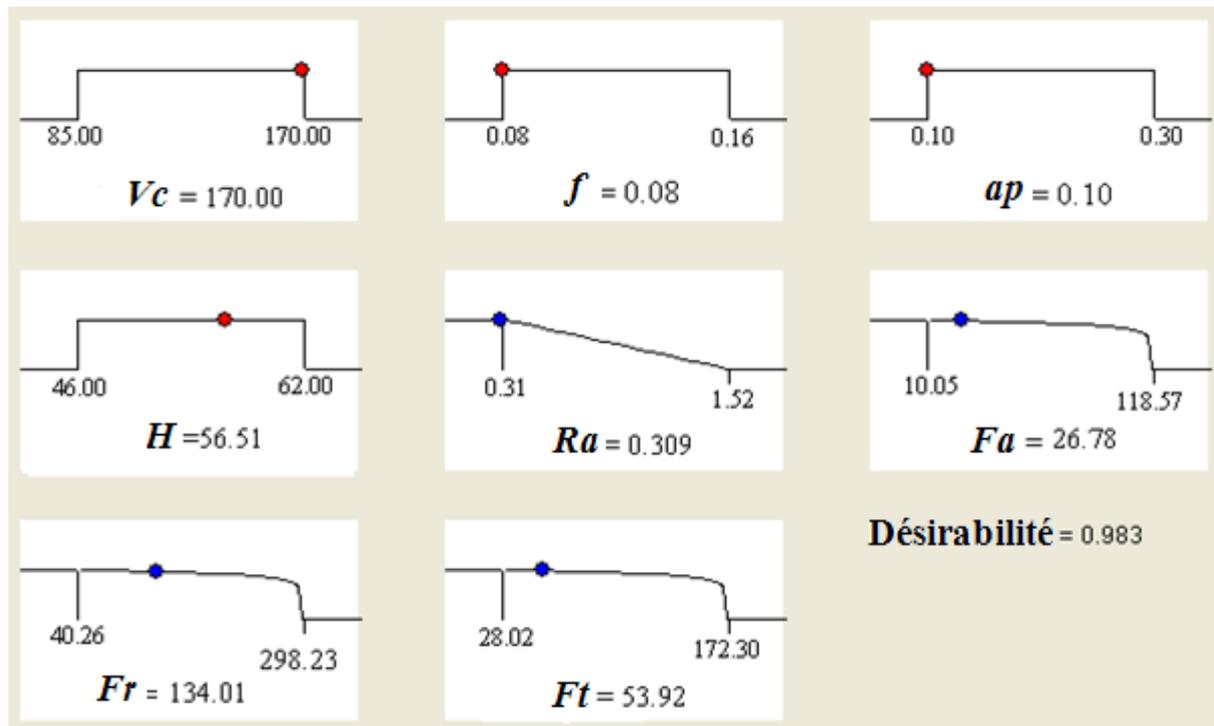


Figure V-9 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et des efforts de coupe (Fa , Fc et Fp).

V.5 VALIDATION DES RÉSULTATS

Afin de vérifier l'adéquation des modèles mathématiques développés, six expériences de confirmation ont été exécutées. Les conditions des essais pour les trois premiers tests de confirmation étaient parmi les conditions de coupe qui ont été exécutées précédemment, correspondantes aux essais 10, 14 et 26, tandis que les trois autres tests de confirmation étaient des conditions qui n'ont pas été utilisées précédemment mais sont dans l'intervalle des niveaux des conditions de coupe optimales, proviennent des résultats d'optimisation simultanée de plusieurs réponses par la fonction de désirabilité. Les expériences choisies ont été prédites dans l'intervalle de confiance égale à 95%. Les valeurs prévues et l'intervalle de prévision associé sont basés sur les modèles développés précédemment. Les valeurs prévues et les valeurs expérimentales sont comparées et les pourcentages de l'erreur calculé. Les valeurs de la rugosité de la surface (Ra) et les composantes d'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) obtenues par les tests de confirmation et prévues par les modèles sont montrées respectivement dans les tableaux (V.7) et (V.8). Les mesures de la rugosité de la surface (Ra), sont prises à l'aide d'un rugosimètre et sont la moyenne de 3 mesures répétées trois (03) fois pour chaque essai. La gamme de pourcentage d'erreur entre les valeurs mesurées

Chapitre V: Modélisation et optimisation des conditions de coupe en TD par la méthode de Taguchi

expérimentalement et prévues pour les facteurs de réponse (Ra , Fa , Fr et Ft) sont comme suit: $Ra = -11.68$ à 2.19% , $Fa = -6.30$ à 6.95% , $Fr = -3.16$ à 9.46% et $Ft = -1.68$ à 2.29% . On peut dire que les modèles empiriques développés étaient raisonnablement assez bon.

Essai n°	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	H (HRC)	Rugosité de surface (μm)		
					Prévu	Actuel	Erreur (%)
1	120	0.12	0.2	46	0.977	0.996	-1.90
2	120	0.08	0.1	52	0.497	0.521	-4.60
3	170	0.16	0.2	62	0.979	0.958	2.19
4	170	0.08	0.1	56.5	0.310	0.351	-11.68
5	165	0.08	0.1	57	0.316	0.347	-8.93
6	160	0.08	0.1	58	0.311	0.331	-6.04

Tableau V-7 Validation expérimentale pour la rugosité de surface

Test n°	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	H (HRC)	Effort axial (N)			Effort radial (N)			Effort tangentiel (N)		
					Prévu	Actuel	Erreur (%)	Prévu	Actuel	Erreur (%)	Prévu	Actuel	Erreur (%)
1	120	0.12	0.2	46	43.22	40.41	6.95	108.13	111.66	-3.16	96.48	94.86	1.70
2	120	0.08	0.1	52	17.26	16.92	2.01	89.52	81.78	9.46	43.89	44.36	-1.05
3	170	0.16	0.2	62	82.94	86.12	-3.69	265.91	272.54	-2.43	138.62	136.45	1.59
4	170	0.08	0.1	56.5	26.62	27.42	-2.91	135.64	137.25	-1.17	53.87	52.66	2.29
5	165	0.08	0.1	57	27.50	29.35	-6.30	138.83	141.66	-1.99	54.08	53.75	0.61
6	160	0.08	0.1	58	29.34	30.92	-5.10	146.14	147.83	-1.14	54.94	55.88	-1.68

Tableau V-8 Validation expérimentale pour les forces de coupe

V.6 ANALYSE PAR LA METHODE DE TAGUCHI

Dans l'analyse des résultats selon la méthode de Taguchi, on cherche à identifier les facteurs qui contribuent à la réduction de la variation dans la réponse. La variation peut être analysée en observant les effets dans la réponse moyenne ou dans la dispersion. Pour mesurer les effets

dans la variation, Taguchi a développé une transformation des données, désignée par la relation Signal/Bruit (S/B), qui représente la mesure de la variation existante. Selon le critère de performance de la réponse, le ratio signal/bruit (S/B) prend les formes suivantes :

a) Optimum est une valeur minimale: la valeur cible (m) est égale à zéro (plus petit c'est meilleur), la caractéristique de performance Y a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec (y). Soient $y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj}$ les résultats expérimentaux obtenus au point j , Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (V.12) :

$$\frac{S}{B_{Min}} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij}^2 \right] \quad (\text{V.12})$$

b) Optimum est une valeur maximale: la valeur cible (m) est égale à l'infini (plus grand c'est meilleur), on vise la maximisation de la caractéristique de performance. Maximiser Y revient à minimiser $1/Y$ et, Taguchi recommande d'utiliser la formule (V.13) suivante :

$$\frac{S}{B_{Max}} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right] \quad (\text{V.13})$$

c) Optimum est une valeur ciblé : la valeur cible (m) est égale à une valeur nominale m_0 (nominal c'est meilleur), la fonction de perte augmente quand (Y) s'éloigne de la valeur nominale m_0 , Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (V.14) :

$$\frac{S}{B_N} = 10 \log \left[\frac{\bar{y}_j^2}{s_j^2} \right] \quad (\text{V.14})$$

Avec :

$$s^2 = \sum \frac{(y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{N_i - 1} \quad (\text{V.15})$$

$$\bar{y}_j = \sum \frac{y_{ij}}{N_j} \quad (\text{V.16})$$

Y_j : représente les valeurs individuelles de la réponse (résultats expérimentaux).

N : représente le n° de répétitions dans un essai.

s^2 : représente la variance de l'erreur.

Dans cette étude, l'objectif est de minimiser le critère étudié, c'est-à-dire qu'il faut minimiser la rugosité de surface (Ra) et l'effort radial (Fr). L'objectif est donc d'obtenir le plus petit ratio Signal/Bruit (S/B) possible (plus petit c'est meilleur). Les ratios Signal/Bruit (S/B) sont donc calculés selon l'équation (V.12). Ces valeurs sont illustrées dans le tableau V-9.

Essai N°	Facteurs				Rugosité de Surface	Effort radial	Ratio Signal/Bruit	
	<i>Vc</i>	<i>f</i>	<i>ap</i>	<i>H</i>	<i>Ra</i>	<i>Fr</i>	<i>S/B (Ra)</i>	<i>S/B (Fr)</i>
1	85	0.08	0.1	46	0.58	40.26	4,704	-35,307
2	85	0.08	0.2	52	0.53	127.39	5,245	-41,676
3	85	0.08	0.3	62	0.42	275.33	7,366	-48,378
4	85	0.12	0.1	52	1.02	92.36	0,309	-39,44
5	85	0.12	0.2	62	0.88	241.11	1,777	-47,479
6	85	0.12	0.3	46	1.16	152.79	-0,67	-42,75
7	85	0.16	0.1	62	1.02	192.31	-0,924	-44,733
8	85	0.16	0.2	46	1.52	121.08	-4,025	-41,341
9	85	0.16	0.3	52	1.36	211.52	-2,831	-46,373
10	120	0.08	0.1	52	0.51	77.61	6,373	-38,748
11	120	0.08	0.2	62	0.43	230.04	7,841	-46,788
12	120	0.08	0.3	46	0.55	142.43	5,393	-42,058
13	120	0.12	0.1	62	0.73	199.07	2,905	-44,551
14	120	0.12	0.2	46	0.99	112.98	-0,194	-41,159
15	120	0.12	0.3	52	0.82	211.64	0,998	-46,191
16	120	0.16	0.1	46	1.32	87.13	-2,897	-38,413
17	120	0.16	0.2	52	1.26	162.67	-2,356	-44,782
18	120	0.16	0.3	62	1.08	298.23	-0,235	-51,484
19	170	0.08	0.1	62	0.31	172.63	9,632	-43,46
20	170	0.08	0.2	46	0.46	104.21	6,531	-40,068
21	170	0.08	0.3	52	0.41	185.86	7,725	-45,11
22	170	0.12	0.1	46	0.83	73.92	1,596	-37,832
23	170	0.12	0.2	52	0.77	158.02	2,137	-44,201
24	170	0.12	0.3	62	0.56	280.99	4,257	-50,903
25	170	0.16	0.1	52	1.15	128.17	-0,565	-41,454
26	170	0.16	0.2	62	0.95	273.16	0,902	-49,493
27	170	0.16	0.3	46	1.28	190.26	-1,545	-44,764

Tableau V-9 Résultats expérimentaux de *Ra*, *Fr* et les ratios Signal/Bruit (S/B)

V.6.1 ANALYSE DES EFFETS MOYENS DES NIVEAUX DES FACTEURS

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios S/B des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des quatre principaux paramètres d'usinage (*Vc*, *f*, *ap* et *H*). La

moyenne des ratios S/B pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios S/B pour le même niveau du facteur divisée par le nombre des ratios pour le niveau du facteur. On peut voir dans le tableau V-9, que le niveau 1 du facteur (V_c) se produit dans les essais 1-9, le niveau 2 dans les essais 10-18 et le niveau 3 dans les essais 19-27. Pour le facteur (V_c) par exemple, la moyenne des ratios S/B des niveaux 1, 2 et 3 est obtenue en divisant par neuf les réponses (ratios S/B) des essais N° 1-9, 10-18 et 19-27 respectivement. La moyenne des ratios S/B pour chaque niveau des autres paramètres d'usinage est calculée de la même manière.

V.6.1.1 Analyse des effets principaux sur la rugosité surface (R_a)

Du tableau V-10 et de la figure V-10, il apparaît que les paramètres d'usinage (V_c , f , ap et H) présentent des effets différents sur la rugosité surface (R_a). La plus importante influence correspond à l'avance par tour avec un effet de 8.365, et que la dureté de la pièce (H) est la moindre importance avec un effet de 2.736 puis la vitesse de coupe (V_c) avec un effet de 2.192. La plus faible influence est celle du facteur relatif à la profondeur de passe, avec un effet de 0.364.

Symbole	Conditions de coupe	Moyenne Ratio S/B (R_a)			Max-Min (Δ)	Rang
		Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3		
V_c	Vitesse de coupe	1.216	1.981	3.408	2.192	3
f	Avance	6.757	1.457	-1.608	8.365	1
ap	Profondeur de passe	2.348	1.984	2.273	0.364	4
H	Dureté de la pièce	0.988	1.893	3.724	2.736	2

Tableau V-10 Moyenne des ratios S/B (R_a) pour chaque niveau des facteurs.

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/ Bruit (S/B) représente la meilleure performance de la réponse (R_a) correspond aux niveaux $V_{c3}f_1ap_1H_3$ (les lettres représentent les paramètres d'usinage et les indices représentent les niveaux). Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité surface (R_a) sont donc la plus grande vitesse de coupe, 170 m/min, la plus basse avance, 0.08 mm/tr, minimum profondeur de passe, 0.1 mm et à grande dureté de la pièce, 62 HRC.

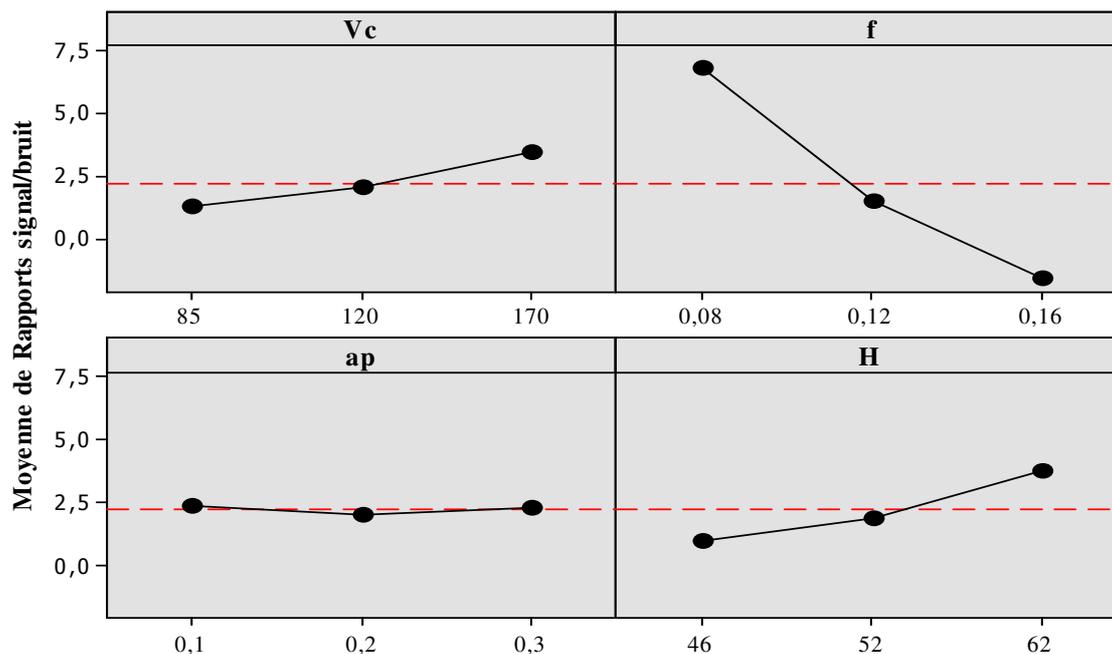


Figure V-10 Graphique des effets principaux de V_c, f, ap et H sur ratio S/B (R_a).

V.6.1.2 Analyse des effets principaux sur l'effort radial (Fr)

Du tableau V-11 et de la figure V-11, en remarque que les paramètres d'usinage (V_c, f, ap et H) présentent des effets différents sur l'effort radial (Fr). La plus importante influence correspond à la dureté de la pièce (H) avec un effet de 7.06, puis la profondeur de passe avec un effet de 6.01. Les faibles influences sont celles des facteurs relatifs à l'avance par tour (f) et la vitesse de coupe (V_c) avec des effets de 2.36 et 1.09 respectivement.

Symbole	Conditions de coupe	Moyenne Ratio S/B (Fr)			Max-Min (Δ)	Rang
		Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3		
V_c	Vitesse de coupe	-43.05	-43.80	-44.14	1.09	4
f	Avance	-42.40	-43.83	-44.76	2.36	3
ap	Profondeur de passe	-40.44	-44.11	-46.45	6.01	2
H	Dureté de la pièce	-40.41	-43.11	-47.47	7.06	1

Tableau V-11 Moyenne des ratios S/B (Fr) pour chaque niveau des facteurs.

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fr) correspond aux niveaux $V_{c1}f_1ap_1H_1$. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de l'effort

radial (Fr) sont donc la plus petite vitesse de coupe 85 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr, la petite profondeur de passe, 0.1 mm et la petite dureté de la pièce, 46HRC.

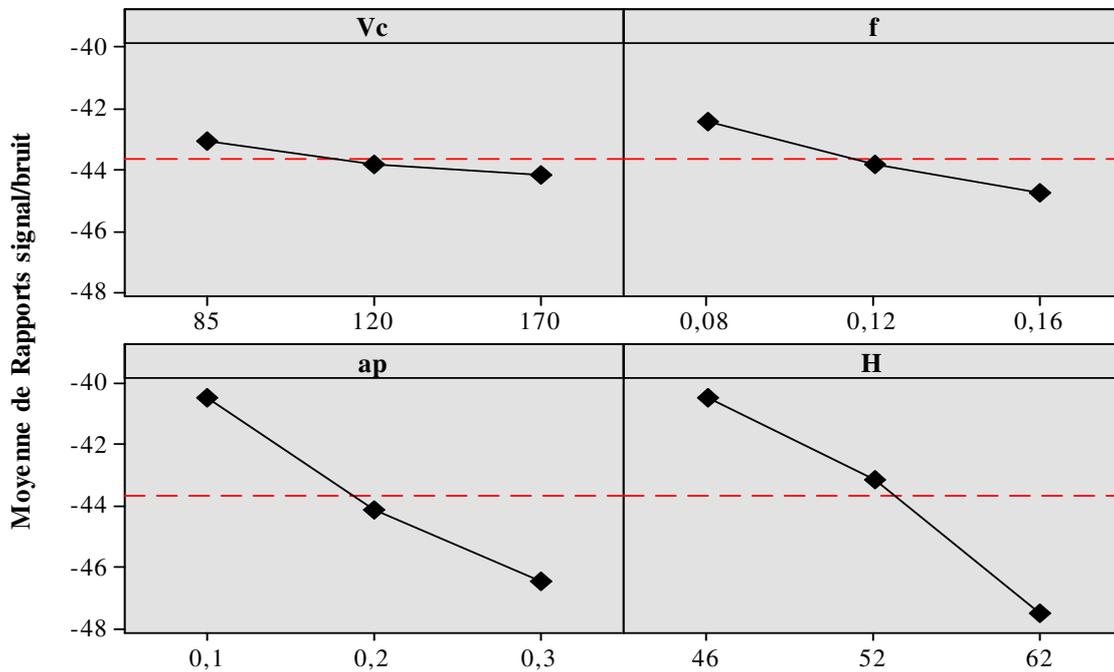


Figure V-11 Graphique des effets principaux de V_c, f, ap et H sur l'effort radial (Fr).

V.6.2 ANALYSE DES INTERACTIONS SUR LA RUGOSITE SURFACE (Ra)

Dans un diagramme des interactions, les droites parallèles indiquent l'absence d'interaction. Plus les droites s'écartent de la parallèle, plus le degré d'interaction est élevé. Pour qu'il soit possible d'utiliser un diagramme des interactions, il faut que les données pour toutes les combinaisons de niveaux existent. Les diagrammes des interactions à quatre facteurs affichent des diagrammes d'interactions à trois facteurs combinés pour toutes les combinaisons de deux facteurs. Dans la figure V-12 l'interaction entre la vitesse de coupe et l'avance est la plus significative sur la rugosité de surface (Ra). La présence d'une interaction entre la vitesse de coupe et l'avance n'est pas facile à évaluer. L'effet antagoniste de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface (Ra) est invisible sur les diagrammes des interactions. La valeur optimale de la rugosité de surface (Ra) correspond au point le plus bas de la courbe ($V_c= 170$ m/min et $f= 0.08$ mm/tr). Les interactions entre la vitesse de coupe (V_c) et la dureté de la pièce (H) ainsi que la profondeur de passe (ap) et la dureté de la pièce (H) présentent des lignes non parallèles, ce qui met en évidence une interaction mais faible. L'interaction entre l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) présente des lignes quasiment horizontales et parallèles, ce qui met en évidence l'absence d'une interaction entre ces paramètres. Donc on peut conclure que

la rugosité de surface (Ra) est plus sensible à la variation de l'avance, la dureté de la pièce (H) et la vitesse de coupe (Vc).

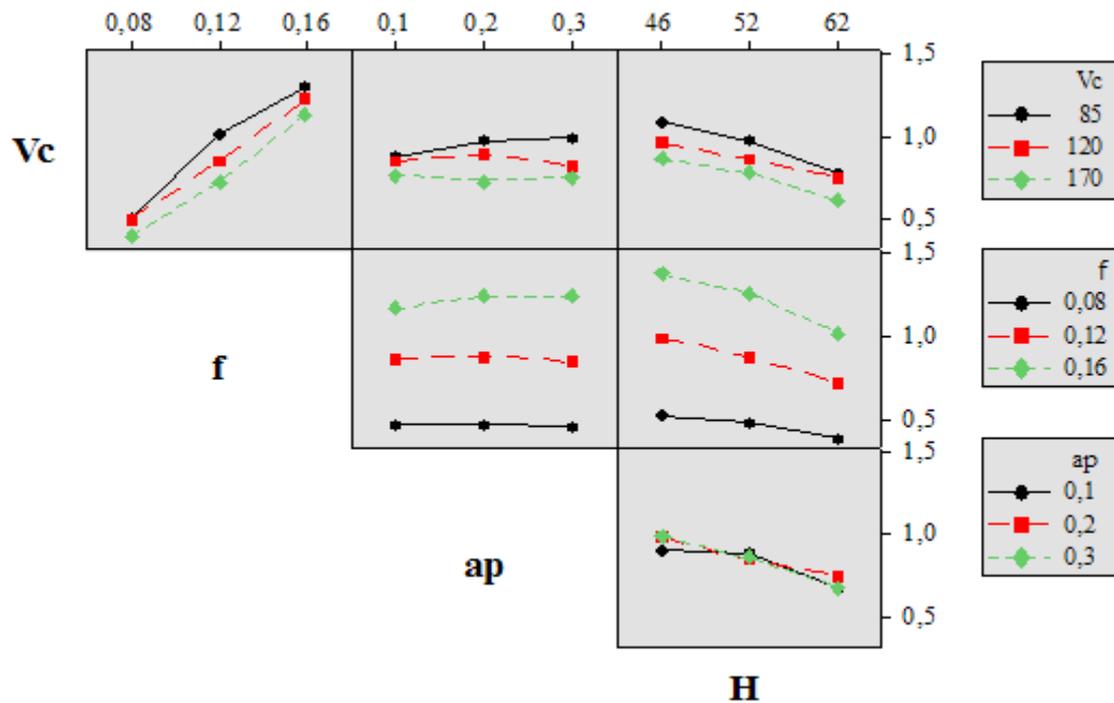


Figure V-12 Diagramme des interactions de Vc , f , ap et H sur la rugosité surface (Ra).

V.6.3 ANALYSE DES INTERACTIONS SUR L'EFFORT RADIAL (Fr)

Dans la figure V-13 la variation l'effort radial (Fr) en fonction la profondeur de passe (ap) et la dureté de la pièce (H) est importante. Pour des valeurs de la profondeur de passe et de la dureté de la pièce (H) inférieures à 0.2 mm et 52 HRC respectivement, l'effort radial (Fr) augmentent légèrement. Au-delà de ces valeurs l'effort radial (Fr) marquent une croissance plus forte. En effet, la section du copeau devienne plus grande et la chaleur générée au cours d'usinage n'est pas assez élevée pour adoucir suffisamment la zone de coupe. L'effort radial (Fr) plus important à grande dureté de la pièce (H) est dû à la résistance mécanique du matériau qui se traduit par la nécessité d'avoir une contrainte plus importante pour la formation de la bande de cisaillement. L'interaction entre la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (f) présente des lignes non parallèles, ce qui met en évidence une interaction mais faible. L'interaction entre l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) présente des lignes parallèles, ce qui met en évidence l'absence d'une interaction entre ces paramètres. De cette discussion, il ressort que l'effort radial (Fr) est plus sensible à la variation de la profondeur de passe (ap) et la dureté de la pièce (H) qu'à celle de l'avance et de la vitesse de coupe.

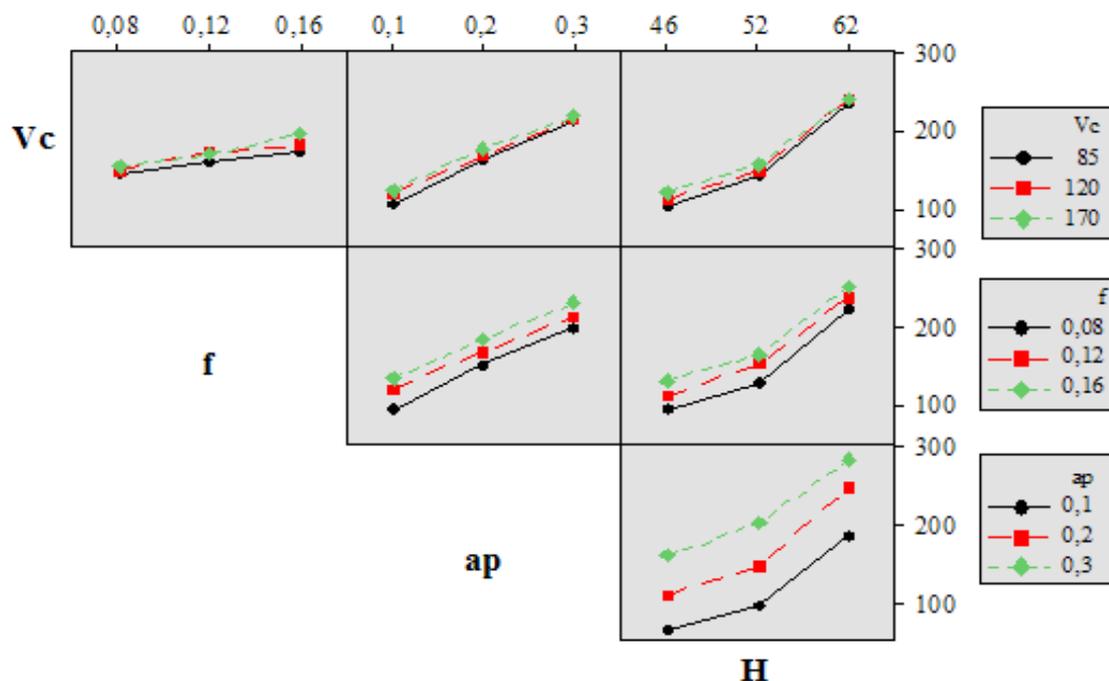


Figure V-13 Diagramme des interactions de V_c , f , a_p et H sur le ratio S/B (Fr).

L'analyse des résidus de la figure V-14 montre clairement qu'il y a une tendance linéaire pour les ratios S/B (Ra) et S/B (Fr) car toutes les valeurs sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

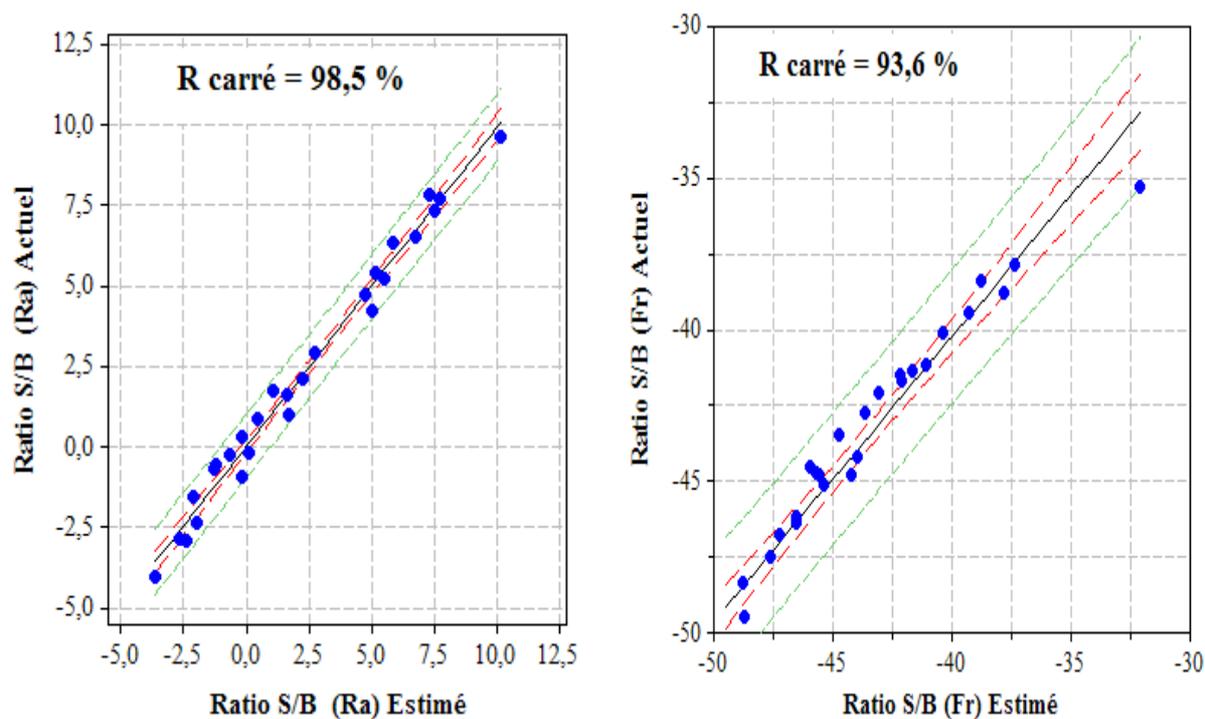


Figure V-14 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées par regression des ratios S/B pour Ra et Fr .

V.6.4 VALIDATION DES RÉSULTATS

L'équation de prédiction du ratio signal-bruit (S/B) prévu pour la condition optimale est obtenue en fonction des niveaux optimums des facteurs les plus significatifs. Le test de confirmation consiste à réaliser une expérience avec la condition optimale estimée, puis on calcule le ratio S/B du test de confirmation. Les résultats obtenus doivent être comparés à ceux prédits par l'équation (V.16) :

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (\text{V.16})$$

Où :

$\hat{\eta}$: Valeur attendue de la réponse dans les conditions optimales

$\bar{\eta}_i$: Moyennes des observations quand les facteurs se trouvent dans les niveaux optimaux.

η_m : Moyenne de la somme de toutes les réponses des essais.

q: Nombre des facteurs significatifs.

Les valeurs des ratios signal-bruit (S/B) de la rugosité de surface (*Ra*) et l'effort radial (*Fr*) obtenues par les tests de confirmation et prévues par l'équation (V.16) sont montrées respectivement dans les tableaux V.12 et V.13.

Paramètres	Essai Initiale	Conditions Optimales	
		Estimé	Expérimentale
Niveau	Vc ₂ f ₂ ap ₂ H ₂	Vc ₃ f ₁ ap ₁ H ₃	Vc ₃ f ₁ ap ₁ H ₃
Rugosité de surface	0.95	-	0.31
Ratio S/B	1.211	9.486	9.632
Amélioration du Ratio S/B		8.275	

Tableau V-12 Validation expérimentale pour *Ra*

Paramètres	Essai Initiale	Conditions Optimales	
		Estimé	Expérimentale
Niveau	Vc ₂ f ₂ ap ₂ H ₂	Vc ₁ f ₁ ap ₁ H ₁	Vc ₁ f ₁ ap ₁ H ₁
Effort radial	154.54	-	40.26
Ratio S/B	-43.941	-41.98	-35.307
Amélioration du Ratio S/B		1.961	

Tableau V-13 Validation expérimentale pour *Fr*

L'erreur entre les valeurs des ratios signal-bruit (S/B) expérimentales et prévues pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort radial (Fr) égale à 0.146 et 6.673 respectivement. L'amélioration des rapports signal-bruit (S/B) des conditions de coupes optimales prévues pour Ra et Fr sont de 8.275 et 1.961.

V.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, l'application de l'analyse statistique de la variance (ANOVA) en tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100) avec l'outil de céramique mixte revêtue (CC6050) a permis d'obtenir des modèles mathématiques de la rugosité de surface et des efforts de coupe, ainsi que l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Le but de cette étude est de trouver les conditions de coupe optimales permettant d'obtenir la plus basse rugosité de surface (Ra) et générer les minimums des efforts de coupe.

Les conclusions principales tirées de ce chapitre sont les suivantes :

- la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de l'avance et diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce.
- Les résultats de l'analyse ANOVA montrent que l'avance, la dureté de la pièce et la vitesse de coupe sont les facteurs significatifs pour la rugosité de surface (Ra) avec des contributions égale à 83.93 %, 10.07 % et 5.81 % respectivement.
- D'une manière générale, la profondeur de passe, la dureté de la pièce et l'avance sont les trois paramètres d'usinage prépondérants qui affectent les efforts de coupe. En outre, on constate que l'effort radial (Fr) est habituellement le plus grand et l'effort axial (Fa) est le plus petit effort dans le tournage dur.
- Les essais de normalité sur les résidus des modèles de régression linéaire multiples s'assurent que les modèles ont extrait toute l'information applicable à partir des mesures expérimentales, et ces essais valident également l'adéquation des modèles développés.
- Les valeurs optimales des conditions de coupe pour obtenir la plus basse rugosité de surface et génère les minimums des efforts de coupe sont: la vitesse de coupe, 170 m/min; avance, 0.08 mm/tr; la profondeur de passe, 0.1 mm; et la dureté de la pièce, 56.5 HRC; avec la rugosité de la surface estimée à 0.309 μm et l'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) estimés à (26.72 N, 134.01 N et 53.92 N) respectivement.

- les erreurs moyennes obtenues pendant les expériences de confirmation pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) sont 5.89 % et 3.06% respectivement; ce qui prouve la fiabilité des modèles développés.
- Les résultats de la moyenne des ratios S/B (Ra) montrent que l'avance, la dureté de la pièce et la vitesse de coupe sont les facteurs significatifs pour la rugosité de surface (Ra) avec des effets égaux à 8.365, 2.736 et 2.192 respectivement.
- L'analyse de Taguchi montre que la dureté de la pièce et la profondeur de passe sont les deux paramètres d'usinage prépondérants qui affectent l'effort de radial (Fr) avec un effet égal à 7.06 et 6.01 respectivement.
- Le pourcentage d'erreur entre les valeurs des ratios signal-bruit (S/B) expérimentales et prévues pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort radial (Fr) sont de 1.53 % et 15.89 % respectivement.

CHAPITRE VI

APPLIQUATION LA METHODOLOGIE DES SURFACES DE REPONSE POUR L'OPTIMISATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE D'USINAGE EN UTILISANT LE PLAN COMPOSITE CENTRE

*Ce chapitre, propose une étude statistique qui repose sur la **méthodologie des surfaces de réponse**, la régression multiple afin de modéliser les phénomènes étudiés ainsi qu'une optimisation de réponses multiples, la rugosité de surface et les efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de coupe et rayon du bec de l'outil). Le plan d'expérience utilisé est le plan composite à face centré avec un nombre de 30 essais. Ainsi les valeurs des coefficients de corrélation et les constantes des modèles ont été calculées en utilisant logiciel Design-Expert 8.*

VI.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons une étude de l'analyse statistique de la variance (ANOVA) des résultats expérimentales afin de développer les modèles polynomiales du second degré en fonction des quatre principaux paramètres d'usinage (Vc , f , ap et r) et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les indicateurs de performance d'usinage étudiés (Ra , Fa , Fr et Ft). Les essais sont réalisés en tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100) avec l'outil céramique mixte (CC650) on utilisant le plan composite à face centré de (30 essais). Ensuite, les modèles mathématiques développés par la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) sont couplés à une technique d'optimisation simultanée de plusieurs réponses afin de déterminer les conditions de coupe optimales.

VI.2 PLANIFICATION EXPERIMENTALE

Afin d'étudier l'influence des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface (Ra) et les composantes de l'effort de coupe (Fa , Fr et Ft), quatre principaux paramètres d'usinage, qui sont: la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f), la profondeur de passe (ap) et le rayon du bec de l'outil (r), ont été adoptés comme paramètres d'usinage. La **méthodologie des surfaces de réponse** (MSR) a été utilisée pour modéliser et analyser les paramètres d'usinage lors de tournage dur de l'acier AISI 52100. Dans la MSR, la forme quantitative du rapport d'entrée entre la réponse observée et les variables indépendantes peut être représentée comme suit :

$$Y = f(Vc, f, ap, r) + \varepsilon \quad (\text{VI.1})$$

Où Y est la réponse observée, f est la fonction de réponse (ou surface de réponse) et ε est l'erreur du modèle. Dans la procédure de l'analyse, on a proposé l'approximation de Y en utilisant le modèle polynomiale de second ordre adapté pour la régression qui s'appelle le modèle quadratique. Le modèle quadratique de Y peut être écrit comme suit :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i X_i + \sum_{i=1}^4 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^4 a_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (\text{VI.2})$$

Où Y est la réponse observée, a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} représentent respectivement le terme constant, 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 paramètres de coupe étudiés.

$$X_1 = \frac{Vc - Vc_0}{\Delta Vc} \quad (\text{VI.3})$$

$$X_2 = \frac{f - f_0}{\Delta f} \quad \text{(VI.4)}$$

$$X_3 = \frac{ap - ap_0}{\Delta ap} \quad \text{(VI.5)}$$

$$X_4 = \frac{r - r_0}{\Delta r} \quad \text{(VI.6)}$$

Où X_1, X_2, X_3 et X_4 sont les variables codées des paramètres respectivement de Vc, f, ap et r . Vc_0, f_0, ap_0 et r_0 sont les valeurs de Vc, f, ap et r au niveau zéro. $\Delta Vc, \Delta f, \Delta ap$ et Δr sont les intervalles de la variation respectivement de Vc, f, ap et r .

L'utilisation du modèle quadratique dans ce chapitre devait non seulement étudier au-dessus de l'espace entier de facteur, mais localiser également la région d'être observée où la réponse s'approche de la valeur optimale. Les données nécessaires pour établir les modèles de réponse sont généralement rassemblées par la planification expérimentale. Le nombre total des essais dans un plan composite centré est donné par la relation (VI.7):

$$N = N_F + N_\delta + n_0 = 2^k + 2k + n_0 \quad \text{(VI.7)}$$

$$N = 16 + 8 + 6 = 30$$

Où :

- k : le nombre de facteurs étudiés (dans notre étude $k = 4$).
- $N_F = 2^k$ est le nombre des essais pour le plan factoriel $2k$.
- $N_\delta = 2k$ est le nombre des essais appelé en étoile.
- n_0 est le nombre des essais au centre du domaine ($n_0 > 5$ pour un plan à 4 facteurs).

Dans cette étude on a adopté le plan composite centré (PCC) avec 30 essais et composé de huit points d'étoile (les faces du cube), et de six points (06) centraux (niveau codés égale à 0) qui est le point médian entre les niveaux Max et Min. Ce type de planification s'appelle généralement le plan composite à faces centrées (figure VI-1).

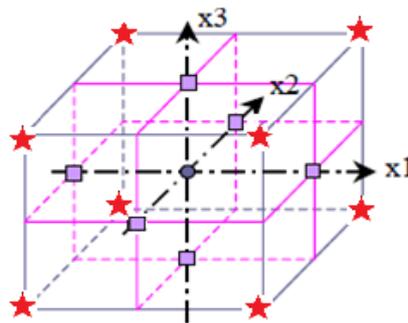


Figure VI-1 Plan composite à faces centrées composé de six points (06) centraux.

Chapitre VI: Application la methodologie des surfaces de reponse pour l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage en utilisant le plan composite centré

Pour déterminer les facteurs qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, on utilise l'analyse de la variance (ANOVA). Cette analyse nous permet de ressortir les paramètres et les interactions ayant un effet significatif sur la réponse. Le niveau critique étant de 5%, ce qui signifie que notre niveau de confiance est de 95%, tous les paramètres et les interactions ayant un niveau inférieur à cette limite seront négligeables et ne seront pas pris en compte. Les paramètres de coupe (V_c , f , ap et r) et les paramètres technologiques étudiés Ra (μm), Fa (N), Fr (N) et Ft (N) sont mentionnés dans le tableau VI-1.

n°	Facteurs				Rugosité (μm)	Forces de Coupe (N)		
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	r (mm)	Ra	Fa	Fr	Ft
1	180	0,12	0,2	1,2	0,566	91,16	190,32	105,59
2	90	0,16	0,1	1,6	0,67	33,49	115,97	87,15
3	90	0,08	0,1	1,6	0,303	23,83	76,83	51,3
4	90	0,08	0,1	0,8	0,503	19,81	60,09	48,52
5	180	0,16	0,3	0,8	1,436	122,82	255,33	190,69
6	180	0,08	0,3	0,8	0,453	92,96	176,12	118,31
7	135	0,12	0,2	1,2	0,583	79,62	180,61	123,92
8	90	0,16	0,1	0,8	1,579	25,07	92,57	81,78
9	180	0,08	0,3	1,6	0,23	37,64	112,4	93,13
10	180	0,16	0,1	0,8	1,22	55,01	169,72	78,55
11	135	0,12	0,3	1,2	0,513	107,78	220,42	163,54
12	135	0,12	0,2	1,6	0,48	46,08	154,1	121,97
13	180	0,16	0,1	1,6	0,583	25,44	106,32	74,2
14	90	0,08	0,3	1,6	0,273	44,31	120,9	115,11
15	135	0,12	0,2	1,2	0,636	63,39	174,74	109,16
16	90	0,12	0,2	1,2	0,596	65,93	168,78	132,07
17	90	0,16	0,3	0,8	1,383	126,65	263,34	201,31
18	180	0,08	0,1	1,6	0,2	34,81	89,23	49,42
19	180	0,08	0,1	0,8	0,376	12,37	58,89	27,12
20	180	0,16	0,3	1,6	0,673	81,81	210,5	174,14
21	90	0,16	0,3	1,6	0,523	86,15	214,86	190,5
22	135	0,12	0,1	1,2	0,503	26,59	91,97	64,33
23	135	0,16	0,2	1,2	0,863	80,59	183,58	129,65
24	135	0,12	0,2	1,2	0,576	61,11	164,38	116,52
25	135	0,12	0,2	1,2	0,536	76,49	163,55	119,46
26	135	0,12	0,2	0,8	0,903	86,7	183,29	119,77
27	135	0,12	0,2	1,2	0,583	72,71	177,16	120,4
28	135	0,08	0,2	1,2	0,37	25,7	78,75	61,17
29	90	0,08	0,3	0,8	0,433	59,32	126,42	103,85
30	135	0,12	0,2	1,2	0,581	74,82	162,43	117,59

Tableau VI-1 Résultats expérimentaux de la rugosité de surface et des efforts de coupe pour un plan composite à faces centrées

Les valeurs observées de la rugosité de surface et des efforts de coupe ont été utilisées pour déterminer les facteurs et les interactions significatifs. Les modèles empiriques sont développés afin de déterminé la corrélation entre les paramètres de coupe et les performances d'usinage, la rugosité de surface et les efforts de coupe. En plus, les surfaces de réponse des facteurs significatifs correspondant à chaque analyse (ANOVA) sont présentés. Ces surfaces de réponse permettent aussi de faire le choix des paramètres d'usinage en fonction de la réponse désirée (la rugosité de surface et les efforts de coupe) lors du tournage dur de l'acier à roulement avec l'outil céramique mixte (CC650).

VI.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

VI.3.1 Sensibilité de la rugosité de surface en fonction de V_c , f , ap et r

Le tableau IV-7 présente une analyse de la variance (ANOVA) afin de connaître les facteurs et les interactions qui ont un effet significatif. L'analyse des résultats montre que la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), le rayon du bec de l'outil (r) et l'interaction entre la vitesse de coupe et la profondeur de passe ($V_c \times ap$), l'avance et le rayon du bec de l'outil ($f \times r$) et le produits r^2 ont tous un effet significatif sur la rugosité de surface (Ra). L'avance est le facteur le plus influant avec une contribution de 54,07 %, suivie par le rayon du bec de l'outil avec une contribution de 30.53 %.

Source	ddl	SCE	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
Modèle	14	3.44	0.25	76.25	< 0,001	-	Significatif
V_c	1	0.015	0.015	4.78	0.0451	0.44	Significatif
f	1	1.86	1.86	578.56	< 0,001	54.07	Significatif
ap	1	2.22E-05	2.22E-05	6.90E-03	0.9349	6.45E-04	Non signifi.
r	1	1.05	1.05	326.83	< 0.001	30.53	Significatif
$V_c \times f$	1	6.25E-06	6.25E-06	1.94E-03	0.9654	1.81E-04	Non signifi.
$V_c \times ap$	1	0.046	0.046	14.23	0.0018	1.34	Significatif
$V_c \times r$	1	6.81E-03	6.81E-03	2.12	0.1665	0.21	Non signifi.
$f \times ap$	1	1.21E-04	1.21E-04	0.038	0.8488	3.51E-03	Non signifi.
$f \times r$	1	0.381	0.381	126.83	< 0.001	11.07	Significatif
$ap \times r$	1	4.41E-04	4.41E-04	0.14	0.7164	0.02	Non signifi.
V_c^2	1	1.04E-04	1.04E-04	0.032	0.8600	3.02E-03	Non signifi.
f^2	1	4.53E-03	4.53E-03	1.41	0.2538	0.14	Non signifi.
ap^2	1	0.012	0.012	3.58	0.0780	0.35	Non signifi.
r^2	1	0.035	0.035	10.99	0.0047	1.02	Significatif
Erreur	15	0.048	3.22E-003				
Total	29	3.488				100 %	

Tableau VI-2 Analyse de la variance ANOVA pour Ra

Le graphique de probabilité normale des résidus de la rugosité de surface illustré dans la figure (VI-2), indique que les résidus se trouvent très proche par rapport la ligne droite de la normalité. Cela prouve que les limites mentionnées dans le modèle du polynomiale de second ordre sont les seuls facteurs significatifs d'après [MON 01]. La normalité semble acceptable en plus les coefficients de corrélation sont très élevés.

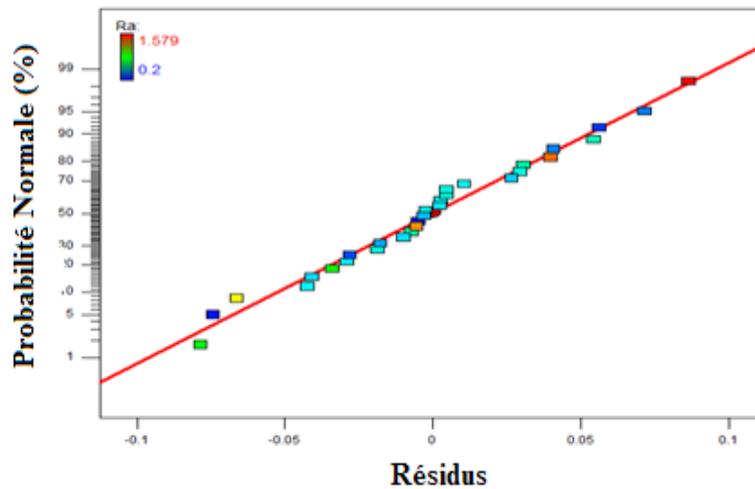


Figure VI-2 Probabilités normales des résidus de la rugosité de surface (Ra).

VI.3.2 Analyse de régression pour Ra en fonction de Vc , f , ap et r

L'analyse de régressions linéaires multiples de la rugosité Ra en fonction des conditions de coupes (Vc , f , ap et r) et leurs interactions qui ont un effet significatif donne le modèle de second ordre (équation VI.8) en terme des **facteurs codés** avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 98,04\%$).

$$Ra = +0.58 - 0.03X_1 + 0,32X_2 - 1,111 \times 10^{-3} X_3 - 0,24X_4 + 0,054X_1X_3 - 0,15X_2X_4 + 0,10X_4^2 \quad (VI.8)$$

Pour déterminer les modèles de prédiction, un décodage est nécessaire. Ce décodage consiste à transformer les variables codées X_i en variables naturelles et il se fait par l'intermédiaire des équations (VI.3), (VI.4), (VI.5) et (VI.6).

Finalement, après le décodage, le modèle de prédiction de la rugosité de surface (Ra) en fonction des **facteurs réels** et leurs interactions qui ont un effet significatif, est donné par l'équation (VI.9):

$$Ra = +0.325 - 3.035 \times 10^{-3} Vc + 19,337 f - 1,616 ap - 1,03r + 0,0119Vc \times ap - 9,414 f \times r + 0,648r^2 \quad (VI.9)$$

La valeur du coefficient de détermination R^2 pour le modèle de la rugosité de surface (Ra) égale à 0.9804. Cela signifie que 98,04% des variations du niveau de la rugosité de surface sont expliquées par ce modèle et que 0,0196% restent par conséquent inexpliquées. La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle de la rugosité de surface est R^2 ajusté=97,2%. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent une très bonne corrélation entre ce modèle et les données expérimentales. La figure VI-3 montre une comparaison entre les valeurs estimée de la rugosité de surface (Ra) par les équations des modèles développés et les valeurs mesurées expérimentales.

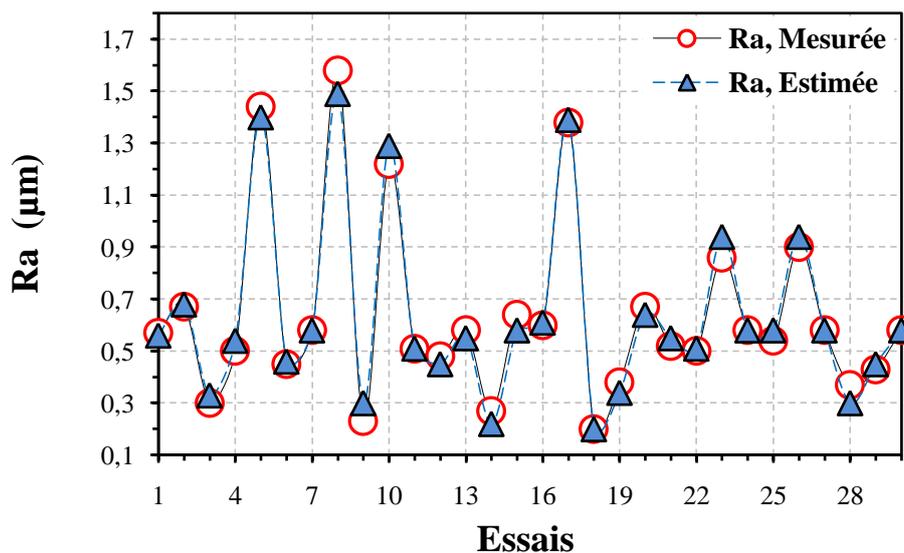


Figure VI-3 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées de la rugosité (Ra).

VI.3.3 Évolution des efforts de coupe en fonction de V_c , f , ap et r

Le tableau VI-3 expose les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour déterminer l'influence des différents facteurs sur l'effort axial (Fa). D'après l'analyse ANOVA le test du 'F valeur' montre que la probabilité associée au F est inférieur à 0,0001 (Prob>F) pour le modèle, cela signifie que l'on prend un risque de 0,01 %, en concluant que la variable explicative apporte une quantité d'information significative au modèle. F vaut 19.92, cela signifie que la part de la variance de la variable dépendante expliquée par le modèle est 19.92 fois plus importante que la part de la variance de la variable dépendante qui reste inexpliquée, ce qui est très important. L'analyse des résultats montre que la profondeur de passe influe énormément sur l'effort axial avec une contribution de 54,08%. L'avance et le rayon du bec de l'outil présentent une contribution de (16,37 et 12,95 %) successivement. L'interaction

Chapitre VI: Application la methodologie des surfaces de reponse pour l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage en utilisant le plan composite centré

entre la profondeur de passe et l'avance ($ap \times f$), la profondeur de passe et le rayon du bec de l'outil ($ap \times r$) et le produit f^2 ont tous un effet significatif sur l'effort axial (F_a).

Source	ddl	SCE	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
Modèle	14	28157.71	2011.27	19.92	< 0,0001	-	Significatif
<i>Vc</i>	1	434.73	434.73	4.31	0.0556	1.86	Non signifi.
<i>f</i>	1	4521.37	4521.37	44.78	< 0,0001	16.37	Significatif
<i>ap</i>	1	15139.16	15139.16	149.93	< 0,0001	54.08	Significatif
<i>r</i>	1	3556.90	3556.90	35.23	< 0.0001	12.95	Significatif
<i>Vc × f</i>	1	15.58	15.58	0.15	0.7000	0.45	Non signifi.
<i>Vc × ap</i>	1	41.06	41.06	0.41	0.5333	0.47	Non signifi.
<i>Vc × r</i>	1	443.84	443.84	4.40	0.0534	1.89	Non signifi.
<i>f × ap</i>	1	1156.17	1156.17	11.45	0.0041	4.49	Significatif
<i>f × r</i>	1	10.42	10.42	0.10	0.7525	0.35	Non signifi.
<i>ap × r</i>	1	520.64	520.64	5.16	0.0383	2.16	Significatif
<i>Vc²</i>	1	163.72	163.72	1.62	0.2223	0.90	Non signifi.
<i>f²</i>	1	789.01	789.01	7.81	0.0136	3.12	Significatif
<i>ap²</i>	1	30.14	30.14	0.30	0.5929	0.42	Non signifi.
<i>r²</i>	1	45.83	45.83	0.45	0.5107	0.49	Non signifi.
Erreur	15	1514.59	100.97				
Total	29	29672.30				100 %	

Tableau VI-3 Analyse de la variance ANOVA pour F_a

Source	ddl	SCE	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
Modèle	14	85545.01	6110.36	28.42	< 0,001	-	Significatif
<i>Vc</i>	1	1013.55	1013.55	4.71	0.0464	1.66	Significatif
<i>f</i>	1	28684.92	28684.92	133.43	< 0,001	33.53	Significatif
<i>ap</i>	1	39639.89	39639.89	184.39	< 0,001	46.33	Significatif
<i>r</i>	1	3736.51	3736.51	17.38	0.0008	4.46	Significatif
<i>Vc × f</i>	1	0.67	0.67	3.109E-003	0.9563	7.83E-04	Non signifi.
<i>Vc × ap</i>	1	195.09	195.09	0.91	0.3559	0.11	Non signifi.
<i>Vc × r</i>	1	1901.61	1901.61	8.85	0.0095	2.70	Significatif
<i>f × ap</i>	1	2566.69	2566.69	11.94	0.0035	3.47	Significatif
<i>f × r</i>	1	83.13	83.13	0.39	0.5434	0.15	Non signifi.
<i>ap × r</i>	1	563.47	563.47	2.62	0.1263	1.03	Non signifi.
<i>Vc²</i>	1	477.55	477.55	2.22	0.1568	0.90	Non signifi.
<i>f²</i>	1	3139.24	3139.24	14.60	0.0017	4.15	Significatif
<i>ap²</i>	1	247.75	247.75	1.15	0.3000	0.64	Non signifi.
<i>r²</i>	1	19.19	19.19	0.089	0.7692	0.87	Non signifi.
Erreur	15	3224.74	214.98				
Total	29	88769.75				100 %	

Tableau VI-4 Analyse de la variance ANOVA pour F_r

Chapitre VI: Application la methodologie des surfaces de reponse pour l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage en utilisant le plan composite centré

Les résultats d'ANOVA pour l'effort radial sont indiqués dans le tableau VI-4. Pour l'effort radial (Fr), la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus significatif avec une contribution de 46.33. %, le second facteur significatif c'est l'avance (f) avec une contribution de 33.53 %, suivi par le rayon du bec de l'outil (r) et le produit f^2 avec des contributions respectivement de 4.46 % et 4.15 %. Les interactions entre la profondeur de passe et l'avance ($ap \times f$), la vitesse de coupe et le rayon du bec de l'outil ($Vc \times r$) avec des contributions respectivement de 3.47 % et 2.70 % tandis que, la vitesse de coupe et le rayon du bec de l'outil contribues seulement avec 1.10 % et 0.38 %. Le tableau VI-5 présente les résultats d'ANOVA sur la force tangentielle (Ft). On peut voir que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important affectant la force tangentielle. Sa contribution est de 62,17%. Le second facteur qui a la plus grande influence sur l'effort tangentiel (Ft) est l'avance par tour (f), sa contribution est de 29,05 %. Les interactions entre la profondeur de passe et l'avance ($ap \times f$), la vitesse de coupe et le rayon du bec de l'outil ($Vc \times r$) et le produit f^2 ont tous un effet significatif sur l'effort axial (Ft).

Source	ddl	SCE	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
Modèle	14	54957.81	3925.56	79.63	< 0,001	-	Significatif
Vc	1	605.98	605.98	12.29	0.0032	1.10	Significatif
f	1	15963.27	15963.27	323.83	< 0,001	29.05	Significatif
ap	1	34165.85	34165.85	693.08	< 0,001	62.17	Significatif
r	1	210.67	210.67	4.27	0.0564	0.38	Significatif
$Vc \times f$	1	4.37	4.37	0.089	0.7700	7.95E-03	Non signifi.
$Vc \times ap$	1	5.02	5.02	0.10	0.7541	9.13E-03	Non signifi.
$Vc \times r$	1	332.88	332.88	6.75	0.0202	0.61	Significatif
$f \times ap$	1	2137.21	2137.21	43.36	< 0,001	3.89	Significatif
$f \times r$	1	7.70	7.70	0.16	0.6982	0.014	Non signifi.
$ap \times r$	1	22.04	22.04	0.45	0.5138	0.027	Non signifi.
Vc^2	1	37.58	37.58	0.76	0.3963	0.057	Non signifi.
f^2	1	996.47	996.47	20.21	0.0004	1.82	Significatif
ap^2	1	3.06	3.06	0.062	0.8067	5.57E-03	Non signifi.
r^2	1	88.63	88.63	1.80	0.1999	0.16	Non signifi.
Erreur	15	739.43	49.30				
Total	29	55697.24				100 %	

Tableau VI-5 Analyse de la variance ANOVA pour Ft

Les graphiques de probabilités normales des résidus de l'effort axial (Fa), la force (Fr) radial et l'effort tangentiel (Ft) sont respectivement illustrés dans les figures VI-4: (a), (b) et (c). Ils

Chapitre VI: Application la methodologie des surfaces de reponse pour l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage en utilisant le plan composite centré

indiquent que les résidus se trouvent très proche par rapport la ligne droite de la normalité, et prouve que les limites mentionnées dans le modèle du premier degré sont les seuls facteurs significatifs. La normalité semble acceptable en plus des coefficients de corrélation très élevés.

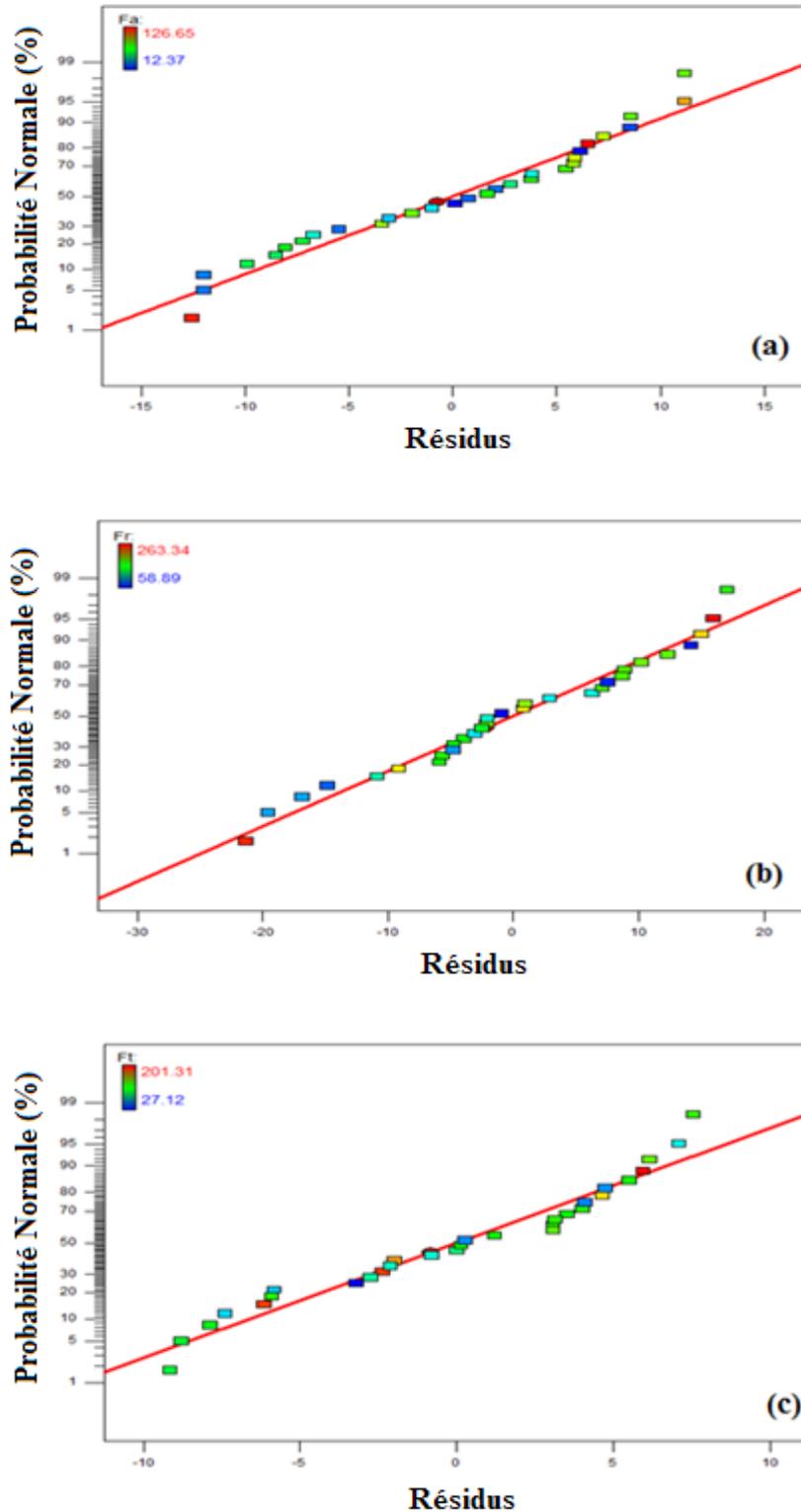


Figure VI-4 Probabilités normales des résidus des efforts de coupe (a): *Fa*, (b): *Fr* et (c): *Ft*.

VI.3.4 Analyse de régression des efforts de coupes en fonction de V_c, f, ap et r

Les efforts de coupe en tournage dur dépendent de plusieurs facteurs tels que, la profondeur de passe (ap) et l'avance (f), la vitesse de coupe, la géométrie de l'outil de coupe,...etc. Dans notre étude, la modélisation des efforts de coupe par la régression linéaire multiple prend en compte l'influence des quatre principaux paramètres d'usinage, qui sont: la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe, le rayon du bec de l'outil et leurs interactions.

a) Analyse de régression linéaire multiples pour l'effort axial (F_a)

L'analyse de régression linéaire de l'effort axial (F_a) en fonction des conditions de coupes (V_c, f, ap et r) et leurs interactions qui ont un effet significatif donne le modèle polynomiale de second ordre (équation VI.10) en terme des **facteurs codés** avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 94.07 \%$).

$$F_a = +71.08 - 4.96X_1 + 15,85X_2 - 29,01X_3 - 14,06X_4 \\ - 5,27X_1X_4 + 8,50X_2X_3 - 5,70X_3X_4 - 17,26X_2^2 \quad (\text{VI.10})$$

Après le décodage, le modèle de prédiction de l'effort axial (F_a) en fonction des **facteurs réels** et leurs interactions qui ont un effet significatif, est donné par l'équation (VI.11):

$$F_a = -193.107 - 0.461V_c + 2559,66f + 206,12ap + 32,88r \\ - 0,293V_c \times r + 2125,156f \times ap - 142,61ap \times r - 1785,29f^2 \quad (\text{VI.11})$$

b) Analyse de régression linéaires multiples pour l'effort radial (F_r)

L'analyse de régression linéaire de l'effort radial (F_r) en fonction des conditions de coupes (V_c, f, ap et r) et leurs interactions qui ont un effet significatif donne le modèle de second ordre (équation VI.12) en terme des **facteurs codés** avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 98,06 \%$).

$$F_r = +169.38 + 7.47X_1 + 39.92X_2 + 46.93X_3 - 14,41X_4 \\ - 10.90X_1X_4 + 12.67X_2X_3 - 30,17X_2^2 \quad (\text{VI.12})$$

Après le décodage, le modèle de prédiction de l'effort radial (F_r) en fonction des **facteurs réels** et leurs interactions qui ont un effet significatif, est donné par l'équation (VI.13):

$$F_r = -317.055 + 0.893V_c + 4890.129f + 89.309ap + 45.745r \\ - 0.605V_c \times r + 3166.406f \times ap - 18855.878f^2 \quad (\text{VI.13})$$

c) Analyse de régression linéaires multiples pour l'effort tangentiel (F_t)

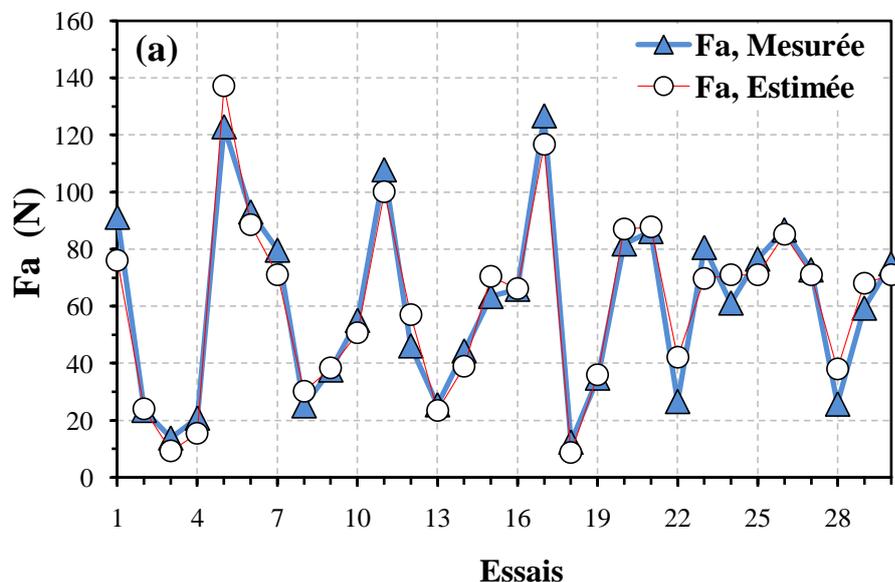
L'analyse de régression linéaire de l'effort tangentiel (F_t) en fonction des conditions de coupes (V_c , f , ap et r) et leurs interactions qui ont un effet significatif donne le modèle de second ordre (équation VI.14) en terme des **facteurs codés** avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 98.21\%$).

$$F_t = +117.81 - 5.74X_1 + 29.78X_2 + 43.57X_3 - 3.42X_4 - 4.56X_1X_4 + 11.56X_2X_3 - 13.37X_2^2 \quad (VI.14)$$

Après le décodage, le modèle de prédiction de l'effort tangentiel (F_t) en fonction des **facteurs réels** et leurs interactions qui ont un effet significatif, est donné par l'équation (VI.15):

$$F_t = -123.187 + 0.176V_c + 2171.812f + 88.947ap + 25.656r - 0.253V_c \times r + 2889.375f \times ap - 8354.948f^2 \quad (VI.15)$$

Les valeurs des coefficients de détermination R^2 pour les modèles des composantes de l'effort de coupe F_a , F_r et F_t sont respectivement $R^2 = 0.9407$, $R^2 = 0.9469$ et $R^2 = 0.9821$. Ces valeurs indiquent que 94.07%, 94.69% et 98.21% des variations du niveau des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) sont expliquées par ces modèles développés. Les valeurs des coefficients de détermination sont élevées suggérant une haute signification des modèles et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales. Les figures VI-5 (a), (b) et (c) montrent une comparaison entre les valeurs estimées des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) par les modèles développés et les valeurs expérimentales.



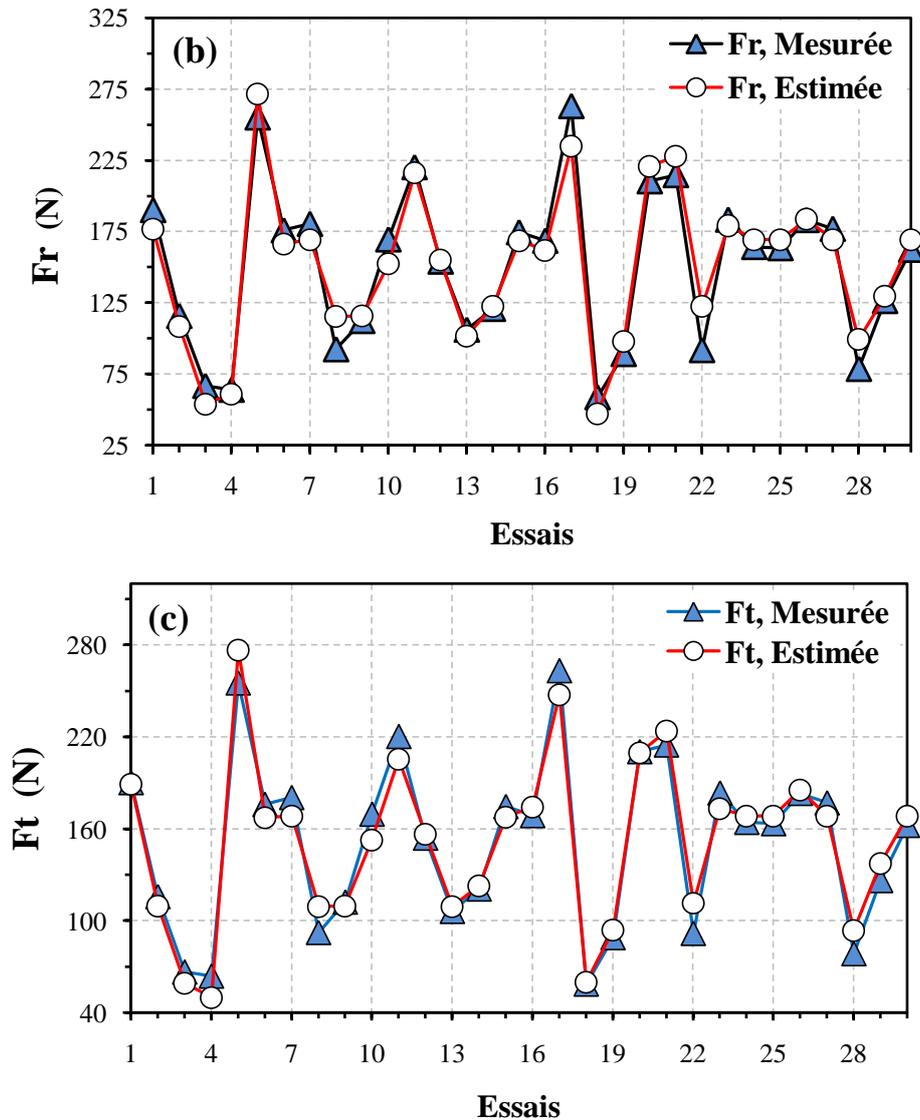


Figure VI-5 Comparaison entre les valeurs mesurés et estimés des composantes de l'effort de coupe (a): F_a , (b): F_r et (c): F_t .

VI.3.5 Surfaces de réponses

Les graphiques des surfaces de réponses obtenues pour les paramètres de coupe les plus significatifs en fonction les performances d'usinage, la rugosité de la surface (R_a) et les composantes d'efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) lors du tournage dur avec l'outil céramique mixte (CC650) sont exposés aux figures VI.6 –VI.11. La figure VI-6 présente la variation de la rugosité de la surface avec le rayon du bec de l'outil et l'avance. Dans cette figure, on observe que l'avance est le paramètre le plus significatif sur la rugosité de la surface et sa variation est très élevée, comparée avec celle du rayon du bec de l'outil (r). La valeur de la rugosité de surface (R_a) diminue avec l'augmentation du rayon de l'outil (r). Le graphe de contour montre la relation entre la rugosité (R_a) et les facteurs variables r et f lorsqu'on fixe la vitesse (VC) à 135 m/min et la profondeur de passe (ap) à 0.2 mm.

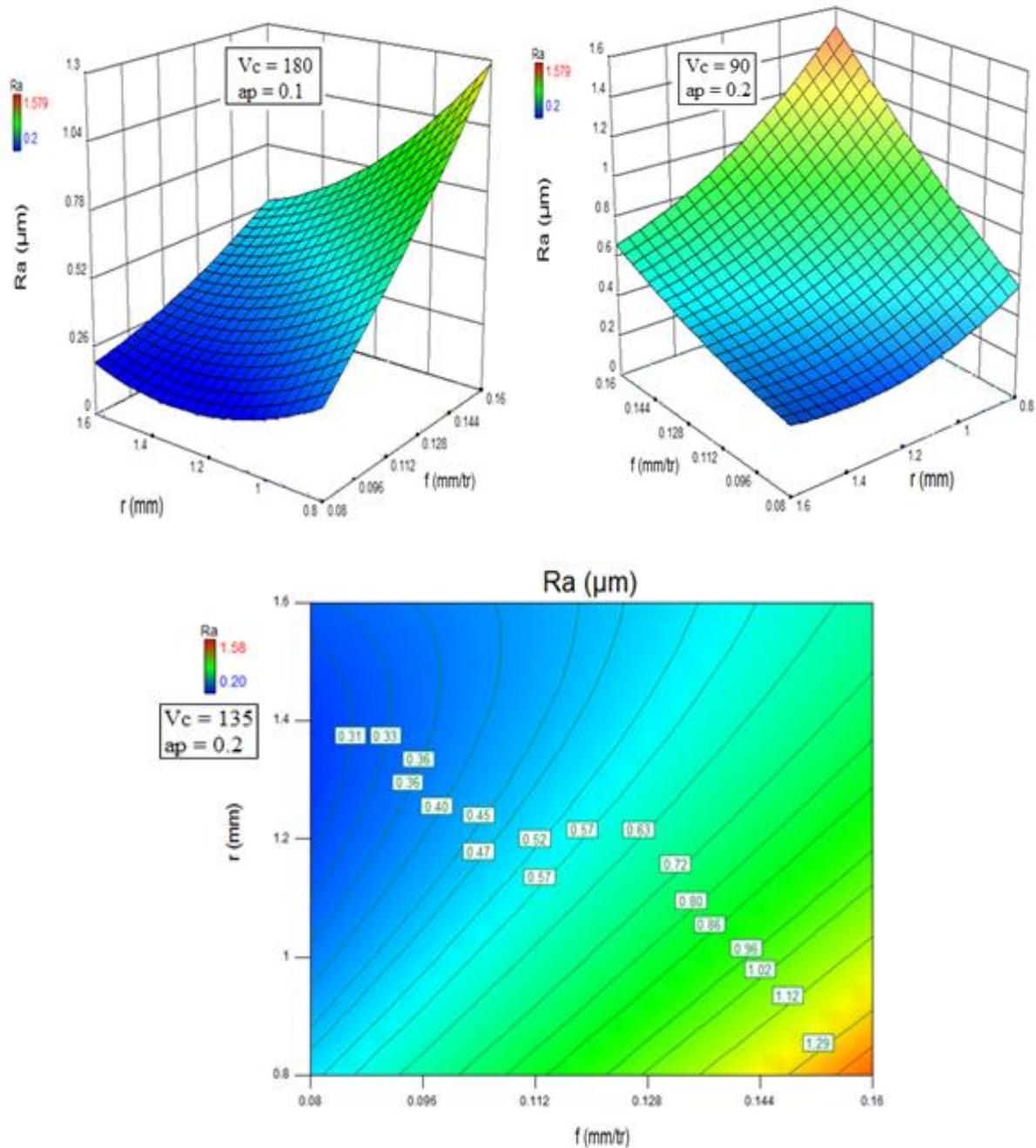


Figure VI-6 Effet de l'avance et rayon du bec de l'outil sur la rugosité de surface (R_a).

La figure VI.7 montre la variation de la rugosité de surface (R_a) avec l'avance et la vitesse de coupe. L'analyse montre que l'avance a une influence plus significative sur la rugosité de surface. On remarque que la rugosité de surface (R_a) diminue aussi avec l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c). La valeur minimale de la rugosité de surface (R_a) est observée avec la plus basse avance (0.08 mm/tr) et la plus grande vitesse de coupe (170 m/min). Le graphe de contour montre la relation entre la rugosité (R_a) et les facteurs variables V_c et f lorsqu'on fixe le rayon de l'outil (r) à 0.8 mm et la profondeur de passe (a_p) à 0.1 mm.

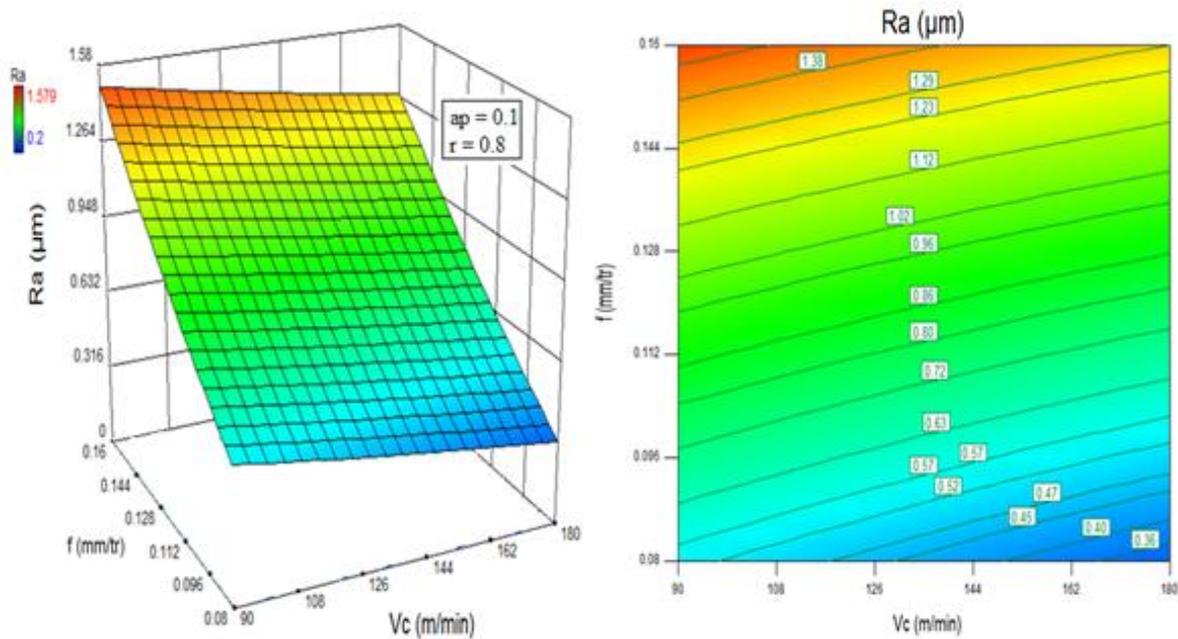


Figure VI-7 Effet de l'avance et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface (Ra).

La figure VI.8 montre la variation de la rugosité de la surface avec la vitesse de coupe et rayon du bec de l'outil. L'analyse des résultats montre que le rayon du bec de l'outil a un effet significatif sur la rugosité de la surface. Comme il a été précédemment précisé, avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil proche de 1.6 mm, On observe un meilleur état de la surface pour une avance basse ainsi et une vitesse de coupe très élevée. Les valeurs des rugosités de surface (Ra) diminuent légèrement avec l'effet de la vitesse de coupe quand le rayon du bec de l'outil varie 1.2 à 1.6 mm. Le graphe de contour montre la relation entre la rugosité (Ra) et les facteurs variables (r et Vc) lorsqu'on fixe l'avance à 0.16 mm/tr et la profondeur de passe (ap) à 0.1 mm. En générale l'état de surface s'améliore avec une augmentation de la vitesse de coupe. Ces baisses des rugosités de surface sont dues aux propriétés physiques et mécaniques du matériau, conductivité thermique, chaleur d'une part liées à la vitesse de déformation qui influence le comportement du couple outil-matière dans la zone de coupe. Plus cette vitesse est élevée plus la déformation plastique est moins important. En effet, l'écoulement plastique latérale de la matière de la pièce sur les cotés du bec d'outil le long de la direction de coupe augmente les hauteurs maximales des irrégularités de la surface de la pièce usinée. Quand le matériau a moins de plasticité (dureté élevée) et avec la vitesse de coupe plus importants, cela entraîne une élévation de la vitesse de déformation (et de la vitesse de glissement copeau/outil), l'état de surface peut être amélioré suite à la réduction de la déformation plastique latéral et ainsi fait diminuer des hauteurs maximales des irrégularités de la rugosité de la surface usinée.

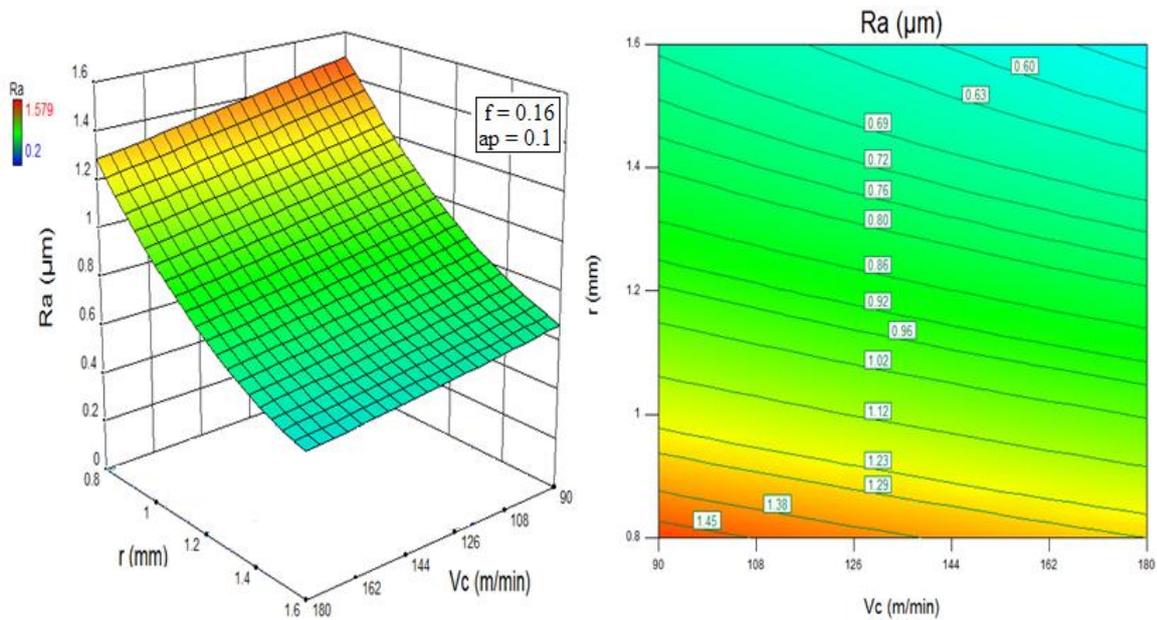


Figure VI-8 Effet de la vitesse de coupe et rayon du bec de l'outil sur la rugosité de surface.

La variation de l'effort axial (Fa) avec la profondeur de passe et l'avance est illustrée sur la figure VI.9. L'analyse de la courbe montre que la profondeur de passe à un effet significatif très important sur l'effort axial (Fa). On remarque que l'effort axial (Fa) diminue aussi avec la diminution de l'avance. La valeur minimale de l'effort axial (Fa) est observée avec la plus basse avance (0.08 mm/tr) et la plus faible profondeur de passe (0.1mm).

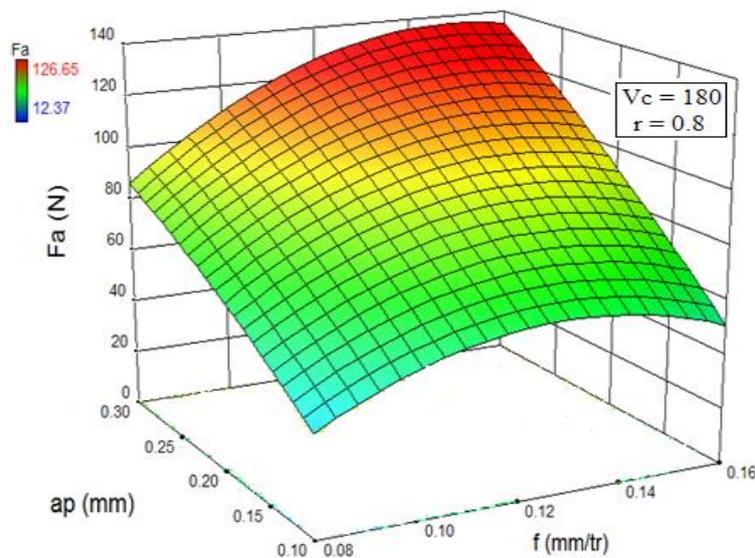


Figure VI-9 Effet de l'avance et la profondeur de passe sur l'effort axial (Fa).

La figure VI.7 montre les variations de l'effort radial (Fr) en fonction de l'avance et la profondeur de passe et aussi en fonction de l'avance et la vitesse de coupe. L'analyse des

Chapitre VI: Application la methodologie des surfaces de reponse pour l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage en utilisant le plan composite centré

courbes montre que la profondeur de passe et l'avance ont un effet significatif très important par rapport à la vitesse de coupe. On remarque que l'effort radial (Fr) diminue aussi avec la diminution de la profondeur de passe et l'avance. La valeur minimale de l'effort radial (Fr) est observée avec la plus basse avance (0.08 mm/tr) et la plus faible profondeur de passe (0.1mm).

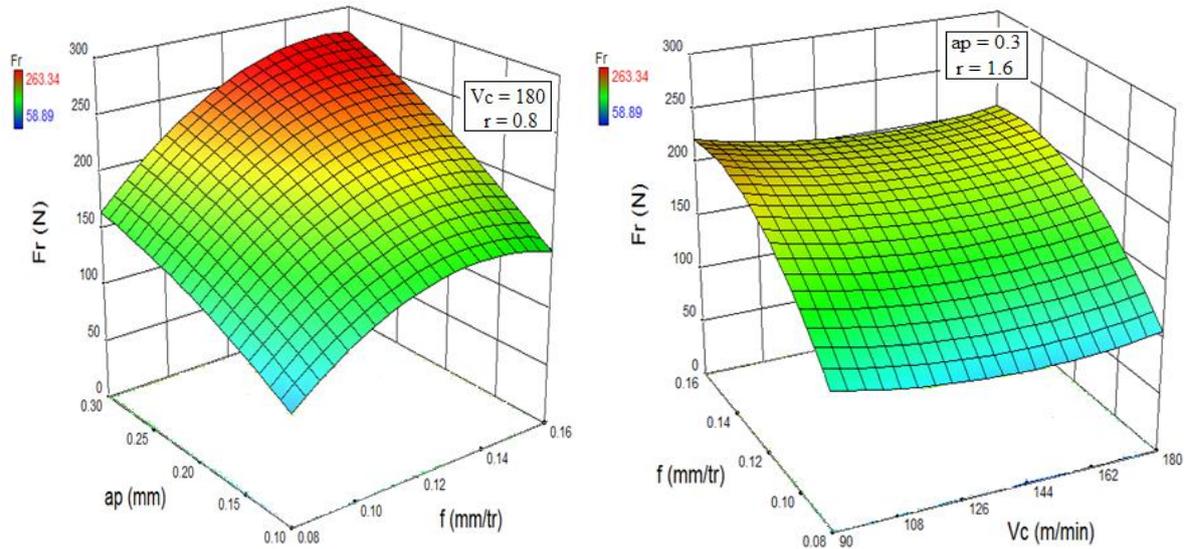


Figure VI-10 Effet de l'avance, la profondeur de passe et la vitesse de coupe sur l'effort radial

La figure VI.11 présente la variation de l'effort de coupe tangentiel (Ft) avec la profondeur de passe et l'avance.

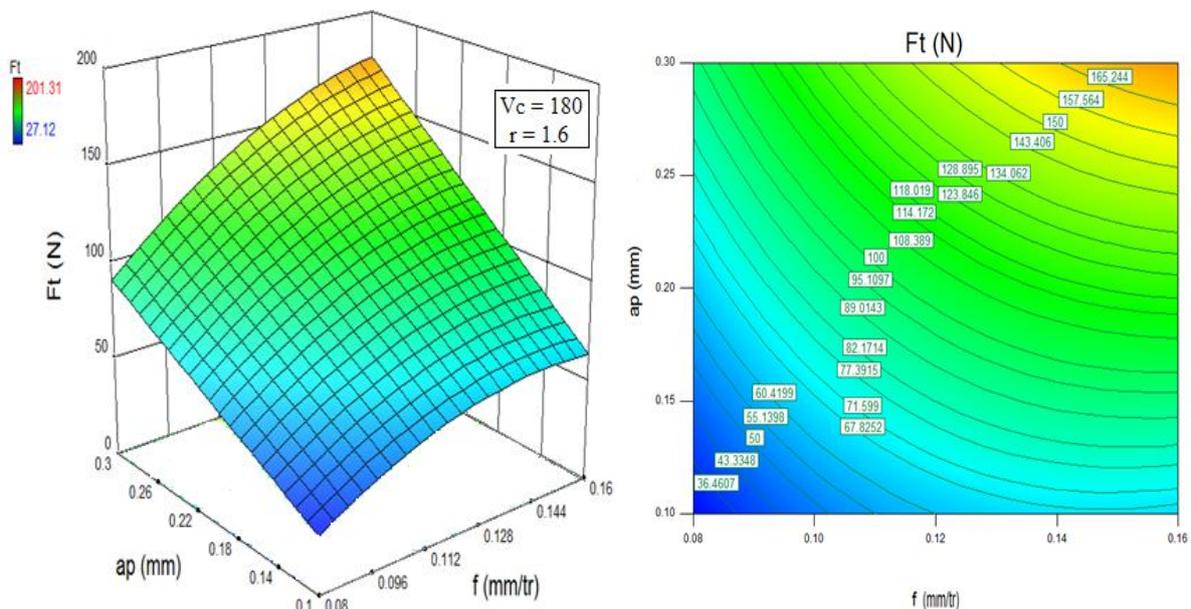


Figure VI-11 Effet de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort de coupe tangentiel ($V_c = 180$ m/min, $r = 1.6$ mm).

Chapitre VI: Application la methodologie des surfaces de reponse pour l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage en utilisant le plan composite centré

Pour des valeurs très élevées d'avance et profondeur de passe, l'effort tangentiel (F_t) est considérablement élevé. En plus, la profondeur de passe est le facteur le plus significatif sur l'effort tangentiel (F_t). La valeur minimale de l'effort tangentiel (F_t) est observée avec la plus basse avance (0.08 mm/tr) et la plus faible profondeur de passe (0.1mm). Le graphe de contour montre la relation entre l'effort tangentiel (F_t) et les facteurs variables (ap et f) lorsqu'on fixe le rayon du bec de l'outil (r) à 0.8 mm et la vitesse de coupe (V_c) à 180 m/min.

VI.4 OPTIMISATION DES PARAMETRES DE COUPE

Dans cette étape de notre étude le but est de maximiser la fonction de désirabilité globale, autrement dit de rechercher l'optimum qui consiste à déterminer les valeurs des facteurs dans le domaine expérimental étudié. Au cours de ce travail, nous avons utilisé le logiciel de plans d'expériences "Design Expert" pour rechercher le maximum de la fonction de désirabilité globale. La fonction objective de cette optimisation est à la minimisation simultanée des plusieurs réponses (R_a , F_a , F_r et F_t) détaillé dans la quatrième section du chapitre V. Cette étude va ainsi permettre de déterminer les conditions de coupe optimales en fonction de l'importance des critères de sélection définis par l'utilisateur entre la rugosité de surface et les efforts de coupe afin d'améliorer la qualité des pièces usinées en tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100) avec l'outil céramique mixte (CC650).

Les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrés dans le tableau (VI -6).

Condition	Objectif	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe (m/min)	Intervalle	90	180
Avance (mm/tr)	Intervalle	0.08	0.16
Profondeur de passe (mm)	Intervalle	0.1	0.3
Rayon du bec (mm)	Intervalle	0.8	1.6
Rugosité de surface (μm)	Minimisé	0.2	1.579
Effort axial (N)	Minimisé	12.37	126.65
Effort radial (N)	Minimisé	58.89	263.34
Effort tangentiel (N)	Minimisé	27.12	201.31

Tableau VI-6 Les contraintes pour l'optimisation des paramètres d'usinage

Chapitre VI: Application la methodologie des surfaces de reponse pour l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage en utilisant le plan composite centré

Les solutions optimales étudiées sont rapportées dans le tableau (VI-7) par ordre de niveau décroissant de désirabilité. La valeur de désirabilité 0.9999 correspond à la meilleure valeur de la rugosité de surface et les minimums des efforts de coupe dans la gamme des paramètres indiqués.

Solution N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	r (mm)	Ra (µm)	Fa (N)	Fr (N)	Ft (N)	Désirabilité
1	180	0.08	0.1	1.54	0.204	15.60	59.81	30.31	0.9999
2	175.56	0.08	0.1	1.48	0.205	17.85	62.60	32.35	0.9998
3	160.62	0.08	0.1	1.32	0.210	20.78	63.77	33.55	0.9998
4	151.81	0.08	0.1	1.26	0.209	17.70	55.49	32.31	0.9997
5	148.15	0.08	0.1	1.22	0.215	19.91	57.86	34.42	0.9997
6	145.88	0.08	0.1	1.2	0.223	23.42	59.04	38.37	0.9997
7	170.22	0.08	0.1	0.88	0.353	20.90	56.75	33.09	0.9699
8	157.63	0.08	0.1	0.83	0.361	22.85	58.86	36.36	0.9698
9	143.23	0.08	0.1	0.8	0.365	25.86	60.65	38.70	0.9697

Tableau VI-7 Conditions optimales pour chaque rayon du bec d'outil

Réponse	Prédiction	95% IC min	95% IC max	95% IP min	95% IP max
Rugosité de surface (Ra)	0.204	0.106	0.302	0.058	0.350
Effort axial (Fa)	15.60	5.67	25.53	2.28	38.95
Effort radial (Fr)	59.81	34.41	85.20	19.50	100.11
Effort tangentiel (Ft)	30.31	20.83	39.77	12.39	45.44

Tableau VI-8 Intervalles de prévision optimale des réponses

Le tableau (VI-8) montre les intervalles de prévision des réponses correspondant aux conditions optimales des paramètres de coupe indiquées dans le tableau (VI-7). Le graphique de la solution optimale désirée est donné dans la figure VI-12. Cette figure montre la valeur

maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f , ap et r) pour obtenir la plus basse valeur de la rugosité de surface et les minimums des efforts de coupe.

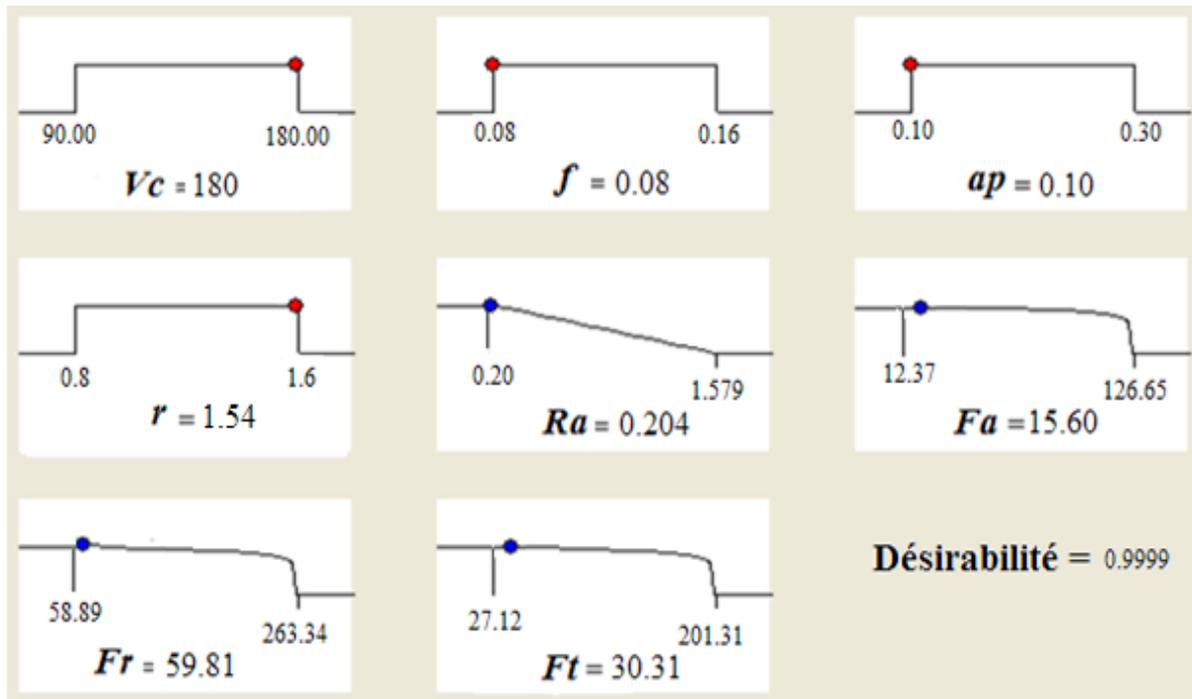


Figure VI-12 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et des efforts de coupe (Fa , Fc et Fp).

V.5 VALIDATION DES RÉSULTATS

Les conditions des essais pour les trois premiers tests de validation étaient parmi les conditions de coupe qui ont été exécutées précédemment, correspondantes aux essais 10, 14 et 26, tandis que les trois autres tests de confirmation étaient des conditions qui n'ont pas été utilisées précédemment mais sont dans la gamme des niveaux des conditions de coupe étudiées. Les expériences choisies ont été prédites dans l'intervalle de confiance égale à 95%. Les valeurs de la rugosité de la surface (Ra) et les composantes d'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) obtenues par les tests de validation et prédites par les modèles de régression développés sont montrées respectivement dans les tableaux (VI-9) et (VI-10). Les résultats des mesures expérimentales des rugosités de surface sont la moyenne de trois (03) mesures répétées trois (03) fois pour chaque test. La gamme de pourcentage d'erreur entre les valeurs des mesures expérimentales et prévues pour les facteurs de réponse (Ra , Fa , Fr et Ft) sont comme suit: $Ra = -7.60$ à 9.23% , $Fa = -10.37$ à 8.61% , $Fr = -3.20$ à 3.89% et $Ft = -5.38$ à 4.36% .

Essai n°	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	r (mm)	Rugosité de surface (µm)		
					Prévu	Actuel	Erreur (%)
1	90	0.08	0.1	0.8	0.501	0.504	-2.59
2	135	0.12	0.3	1.2	0.574	0.521	9.23
3	180	0.16	0.1	1.6	0.526	0.566	-7.60
4	90	0.10	0.15	0.8	0.528	0.543	-2.84
5	135	0.14	0.25	1.2	0.886	0.872	1.58
6	180	0.11	0.15	1.6	0.430	0.441	-2.55

Tableau VI-9 Validation expérimentale pour la rugosité de surface

Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	r (mm)	Effort axial (N)			Effort radial (N)			Effort tangentiel (N)		
				Prévu	Actuel	Erreur (%)	Prévu	Actuel	Erreur (%)	Prévu	Actuel	Erreur (%)
90	0.08	0.1	0.8	13.69	15.02	-9.71	62.10	64.09	-3.20	46.99	49.52	-5.38
135	0.12	0.3	1.2	125.60	114.78	8.61	210.66	215.42	-2.25	157.33	158.54	-0.76
180	0.16	0.1	1.6	24.86	27.44	-10.37	108.74	111.32	-2.37	76.88	78.21	-1.72
90	0.10	0.15	0.8	40.22	42.58	-5.86	111.46	107.12	3.89	69.80	66.75	4.36
135	0.14	0.25	1.2	104.74	98.33	6.11	199.11	201.46	-1.18	160.51	162.54	-1.26
180	0.11	0.15	1.6	32.82	35.55	-8.31	138.35	133.20	3.72	104.90	100.41	4.28

Tableau VI-10 Validation expérimentale pour les efforts de coupe

V.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) a été utilisée pour étudier et analyser les paramètres d'usinage et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif, lors du tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100) avec l'outil de céramique mixte (CC650). L'objectif principal de cette étude est de déterminer les conditions de coupe optimales permettant d'obtenir la meilleure rugosité de surface et générer les minimums des

Chapitre VI: Application la methodologie des surfaces de reponse pour l'optimisation des indicateurs de performance d'usinage en utilisant le plan composite centré

efforts de coupe afin de diminuer l'usure de l'outil. Les conclusions tirées de ce chapitre sont les suivantes :

- la rugosité de surface (Ra) augmente avec l'augmentation de l'avance (f) et diminue avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil (r).
- Les résultats de l'analyse ANOVA montrent que l'avance par tour et le rayon du bec de l'outil ont une grande influence sur la rugosité de surface avec des contributions égales à 50.07 % et 30.53 % respectivement. Les contributions des interactions $Vc \times ap$, $f \times r$ et le terme quadratique (r^2) qui ont un effet significatif sur la rugosité (Ra) sont de 1.34 %, 11.07% et 1.02 % respectivement.
- Les différents modèles des efforts de coupe indiquent que la profondeur de passe reste le facteur qui influe énormément sur les différentes composantes de l'effort de coupe (Fa , Fr et Ft), sa contribution dépasse 54% pour Fa , 46% pour Fr et 62% pour Ft .
- Les valeurs optimales des conditions de coupe pour obtenir la plus basse rugosité de surface et générer les minimums des efforts de coupe sont: la vitesse de coupe, 180 m/min; avance, 0.08 mm/tr; la profondeur de passe, 0.1 mm; et le rayon du bec de l'outil (r), 1.54 mm; avec la rugosité de la surface estimée à 0.204 μm et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) estimés à (15.60 N, 59.81 N et 30.31 N) respectivement.
- les erreurs moyennes obtenues pendant les expériences de confirmation pour la rugosité de surface et les efforts de coupe sont 4.39 % et 4.62% respectivement; ce qui prouve la fiabilité des modèles développés.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ces travaux de recherche ont été consacrés à l'étude et l'application de la méthodologie des plans d'expériences en tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100) pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. L'objectif de cette étude est de trouver les conditions de coupe optimales permettant d'obtenir la meilleure rugosité de surface et générer les minimums des efforts de coupe afin de diminuer l'usure de l'outil et augmenter sa durée de vie.

Dans le premier chapitre, tous nos efforts ont été consacrés à l'étude bibliographique qui concerne le tournage dur, les phénomènes physiques régissant le processus de coupe et l'état d'art sur les différents travaux de recherche réalisés en tournage dur.

Dans le second chapitre, nous nous sommes intéressés à décrire la méthodologie des plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses. Ensuite, nous avons détaillé les analyses des modèles polynomiaux utilisés pour but d'estimer, grâce à la méthode des moindres carrés, les coefficients des modèles utilisés, et les surfaces de réponses qui permettent d'étudier les comportements des indicateurs de performance d'usinage en fonction des paramètres de coupe. Enfin, la méthode de désirabilité a été présentée, outil qui permet de rassembler plusieurs critères de natures différentes en un objectif composite unique permettant de traiter des problématiques d'optimisation multicritères.

Dans le troisième chapitre, nous avons présentés équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe et les conditions de traitement thermique des éprouvettes et aussi les plans d'expériences utilisés.

Dans le quatrième chapitre, nous avons contribué à apporter des éclaircissements sur le rôle du couple outil-matière lors de tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100). Nous avons présenté et analysé chaque résultat (effort de coupe, usure en dépouille, rugosité de surface) en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, dureté de la pièce, rayon du bec de l'outil et temps d'usinage). Une confrontation des observations a été réalisée afin de faire apparaître des relations entre les grandeurs technologiques et physiques analysées.

Dans les deux derniers chapitres nous avons présenté une étude statistique des résultats obtenus en utilisant la méthode de Taguchi (MT) et la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) en tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100). Afin de déterminer les modèles mathématiques des différents indicateurs de performance d'usinage en fonction des

paramètres de coupe étudiés, nous avons appliqué l'analyse de la variance (ANOVA). Ces modèles mathématiques sont couplés avec une technique d'optimisation multi-réponses afin de trouver les conditions de coupe optimales permettant d'obtenir la meilleure rugosité de surface et générer les minimums des efforts de coupe.

L'étude et l'application de la méthodologie des plans d'expériences en tournage dur de l'acier à roulement (AISI 52100), nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- L'étude des efforts de coupe réalisée nous a permis de mieux comprendre ce phénomène en tournage dur et cela dans le but d'avoir une meilleure stabilité du système usinant. L'effort de coupe le plus important est l'effort radial (F_r) en raison de la géométrie négative de la plaquette et l'effort axial (F_a) est le plus petit.
- La qualité des surfaces obtenues lors de l'usinage avec l'outil en céramique mixte ($Al_2O_3 + TiC$) est comparable à celle obtenue en rectification. Cet avantage présente un atout économique, puisqu'il nous permet de réduire les phases de fabrication des pièces et sans lubrification. Il est clair que le tournage dur est un procédé d'usinage qui réduit considérablement le prix de revient en ayant une bonne précision d'usinage.
- Les résultats de l'effet de la dureté de la pièce montrent que les trois composantes de l'effort de coupe augmentent avec l'augmentation de la dureté, mais les trois critères de la rugosité diminuent.
- L'étude de l'influence des conditions de coupe en fonction de la dureté de la pièce sur la rugosité de surface confirme que le facteur le plus intervenant sur l'état de surface est l'avance puis la vitesse de coupe et suivie par la profondeur de passe.
- L'usure en dépouille de l'outil céramique mixte ($Al_2O_3 + TiC$) revêtue en TiN est principalement due à l'abrasion. Elle est attribuée aux rapports entre la dureté des composants de l'acier AISI 52100 et les constituants (Al_2O_3 , TiC et TiN) de la céramique mixte revêtue.
- Les résultats de l'effet du rayon du bec de l'outil montrent que les trois composantes de l'effort de coupe augmentent avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil, mais les trois critères de la rugosité diminuent.
- l'étude de l'influence des conditions de coupe en fonction du rayon du bec de l'outil sur la rugosité de surface montre que le facteur le plus intervenant sur l'état de surface est l'avance suivie par la vitesse de coupe.

- le modèle de la rugosité de surface (Ra) en fonction la dureté de la pièce indiquent que l'avance, la dureté de la pièce et la vitesse de coupe sont les facteurs significatifs pour la rugosité de surface (Ra) avec des contributions respectivement égale à 83.93 %, 10.07 % et 5.81 % lors du tournage dur.
- Les différents modèles des efforts de coupe développés en fonction la dureté de la pièce indiquent que la profondeur de passe reste le facteur qui influe énormément sur les deux efforts de coupe (Fa et Ft), sa contribution dépasse 72 % pour Fa , et 81% pour Ft . Mais pour l'effort radial (Fr), la dureté de la pièce est le facteur le plus significatif avec une contribution de 60.53%, suivie par la profondeur de passe avec une contribution de 34.67 %.
- Les conditions de coupe optimales permettant d'obtenir la meilleure valeur de rugosité de surface et générer les minimums des efforts de coupe en fonction de la dureté de la pièce sont: la vitesse de coupe, 170 m/min; avance, 0.08 mm/tr; la profondeur de passe, 0.1 mm; et la dureté de la pièce, 56.5 HRC; avec la rugosité de la surface estimée à 0.309 μm et l'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) estimés à (26.72 N, 134.01 N et 53.92 N) respectivement.
- Les résultats de la moyenne des ratios S/B (Ra) montrent que l'avance, la dureté de la pièce et la vitesse de coupe sont les facteurs significatifs pour la rugosité de surface (Ra) avec des effets égale à 8.365, 2.736 et 2.192 respectivement.
- L'analyse de Taguchi montre que la dureté de la pièce et la profondeur de passe sont les deux paramètres d'usinage prépondérants qui affectent l'effort de radial (Fr) avec un effet égal à 7.06 et 6.01 respectivement.
- Le modèle de la rugosité de surface (Ra) en fonction du rayon du bec de l'outil indique que l'avance par tour et le rayon du bec de l'outil ont une grande influence sur la rugosité de surface avec des contributions égale à 50.07 % et 30.53 % respectivement. Les contributions des interactions $Vc \times ap$, $f \times r$ et le terme quadratique (r^2) qui ont un effet significatif sur la rugosité (Ra) sont de 1.34 %, 11.07% et 1.02 % respectivement.
- Les différents modèles des efforts de coupe développés en fonction du rayon du bec de l'outil indiquent que la profondeur de passe reste le facteur qui influe énormément sur les différentes composantes de l'effort de coupe (Fa , Fr , Ft), sa contribution dépasse 54 % pour Fa , 46 % pour Fr et 62 % pour Ft .
- Les conditions de coupe optimales permettant d'obtenir la plus basse rugosité de surface et les minimums des efforts de coupe en fonction du rayon du bec de l'outil sont: la vitesse de

coupe, 180 m/min; avance, 0.08 mm/tr; la profondeur de passe, 0.1 mm; et le rayon du bec de l'outil, 1.54 mm; avec la rugosité de la surface estimée à 0.204 μm et l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) estimés à (15.60 N, 59.81 N et 30.31 N) respectivement.

- La détermination des modèles mathématiques concernant, les efforts de coupe et la rugosité de surface nous a permis d'en déduire le degré d'influence de chaque paramètre coupe. Ces modèles représentent aussi un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent la détermination des conditions de coupe optimales et l'élaboration des abaques.

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

- De nouveaux tests d'usinage peuvent être réalisés, afin de vérifier la validité des observations effectuées dans d'autres conditions expérimentales. La modification des paramètres tels que la vitesse de coupe, la profondeur de passe, l'utilisation d'autres types d'outils (géométries d'outils, différents revêtements, ...etc).
- Etude de l'influence de la microstructure de l'acier AISI 52100 lors du tournage dur à son état de départ pourrait également faire l'objet de recherches lors de nouvelles campagnes d'usinage.
- Etude de l'effet de la dureté de la pièce et du rayon du bec de l'outil sur d'autres grandeurs technologiques et physiques (vibration, température de coupe, rugosité, ...etc).
- Développement d'autres modèles mathématiques sur les indicateurs de performance d'usinage en tenant compte d'un grand nombre de paramètres de coupe, tel que (temps d'usinage, géométries d'outils, dureté de la pièce, ...etc).

Références Bibliographiques

- [AHM 07] **A.M.A. Al-Ahmari**. Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, vol.1-3, pp. 305-311 (2007).
- [ALE 95] **J. Alexis**, *Pratique industrielle de la méthode Taguchi. Les plans d'expériences* (1995).
- [ALT 07] **A. Altin, M. Nalbant and A. Taskesen**, The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining inconel 718 with ceramic tools. *Materials&Design*, 28(9): pp. 2518–2522 (2007).
- [AOU 12] **H. Aouici, M.A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki, J.F. Rigal**, 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).
- [ARS 06] **J.A. Arsecularatne, L.C. Zhang, C. Montross**, Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, pp. 482–491(2006).
- [ARU 04] **R.M. Arunachalam, M.A. Mannan, A.C. Spowage**. Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated cutting tools, *International Journal of Machine tools and Manufacture*, 44: pp. 1481–1491(2004).
- [ALL 00] **T. Allen**, Low-cost response surface methods applied to the design of plastic fasteners, *Quality Engineering*, Volume 12, tome 12, N° 4: pp. 583–591(2000).
- [ATL 11] **S. Atlati, B. Haddag, M. Nouari and M. Zenasni**, Analysis of a new Segmentation Intensity Ratio “SIR” to characterize the chip segmentation process in machining ductile metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51, pp. 687–700 (2011).
- [ATT 12] **A. Attanasio, D. Umbrello, C. Cappellini, G. Rotella, R. M'Saoubi**, Tool wear effects on white and dark layer formation in hard turning of AISI 52100 steel, *Wear*, 286– 287, pp. 98– 107 (2012).
- [ATT 08] **A. Attanasio, E. Ceretti, S. Rizzuti, D. Umbrello, F. Micari**, 3D finite element analysis of tool wear in machining, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, pp. 61–64 (2008).
- [BAL 01] **M. Balazinski**, *Fabrication mécanique avancée, Cours à l'Ecole Polytechnique de Montréal* (2001).
- [BEN 07] **S. Benchiheb, L. Boulanouar**, Influence des Paramètres de Coupe sur la Tenue du CBN 7020 Lors du Tournage Dur. 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP' (2007).

- [BES 03] **P. Besse**, Pratique de la modélisation Statistique (2003).
- [BEN 01] **I. Bending**, <http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/BendingOverview/html/>.
- [BEN 94] **D. Benoist, Y. Tourbier**, Plans d'expériences: construction et analyse (1994).
- [BIS 05] **S. Bissey**, Développement d'un modèle d'effort de coupe applicable à des familles d'outils: cas du fraisage des aciers traités. Thèse de doctorat en procédé de fabrication, ENSAM (2005).
- [BOU 10] **K. Bouacha, M. A. Yallese, T. Mabrouki, J-F. Rigal**, Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, vol.28, pp. 349–361 (2010).
- [BOX 51] **G.E.P. Box and K.B. Wilson**, on the experimental design for attainment of optimum conditions, Journal of the Royal Statistical Society, tome Series B 13, pp. 1–45 (1951).
- [BRO 08] **A. Brosse, H. Hamdi, J.M. Bergheau**, A numerical study of phase transformation during grinding. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 4, pp. 148-157 (2008).
- [BUR 04] **D. Bursztyna**, Comparison of designs for computer experiments. Journal of Statistical Planning and Inference, In press, (2004).
- [BYE 03] **D. Byeng and K.A.K Youn**, A new response surface methodology for reliability-based design optimization, Computers and Structures (2003).
- [CAR 02] **M.S. Carrilero, R. Bienvenido, J. M. Sánchez, M. Álvarez, A. González and M. Marcos**, A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al-Cu alloy. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(2), pp. 215–220 (2002).
- [CAS 96] **E.D. Castillo**, Modified desirability function for multiple response optimizations, JQT, tome 28 (1996).
- [CHE 02] **W. Chen**, Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools. Int J Mach Tools Manuf; 40:455–466 (2000).
- [CHE 01] **Z. Che-Haron**, Tool Life and surface integrity in turning titanium alloy Journal of Materials Processing Technology. Vol. 118. - pp. 231-237 (2001).
- [CHI 02] **T.H.C. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa and Y. Yamane**, Metal Machining: theory and applications, Arnold. (2002).
- [CHI 13] **S. Chinchankar, S. K. Choudhury**, Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach, Measurement, 46, pp. 913–919 (2013).

- [CH'N 05] **C. Ch'ng**, A new approach for multiple response optimizations, *Quality Engineering* (2005).
- [CHO 05] **Y. K. Chou, H. Song**, Thermal modelling for white layer predictions in finish hard turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 45, pp. 481-495 (2005).
- [CHO 99] **I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie**, Machinability assessment of inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, 95, pp. 30 – 39 (1999).
- [COE 04] **R.T. Coelho, L.R. Silva, A. Braghini, A.A. Bezerra**, Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when turning Inconel 718TM at high cutting speeds, *Journal of Materials Processing Technology*, 148: pp. 147–153(2004).
- [COE 07] **R.T. Coelho, E.G. Ng and M.A. Elbestawi**, Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2): pp. 263–272 (2007).
- [COH 09] **G. Cohen**, Étude des effets thermiques et mécaniques en usinage à sec. Thèse de doctorat, Paul Sabatier TOULOUSE (2009).
- [DAN 08] **A. Doniavi, M. Eskanderzade, M. Tahmsebian**, Empirical modeling of surface roughness in turning process of 1060 steel using factorial design methodology. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7 (17), pp. 2509-2513 (2008).
- [DEA 00] **A. Dean**, *Design and Analysis of Experiments* (2000).
- [DER 80] **G. Derringer**, Simultaneous optimization of several response variables, *JQT*, tome 12 (1980).
- [DHA 07] **N.R. Dhar and M. Kamruzzaman**, Cutting temperature, tool wear, surface and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5): pp. 754–759 (2007).
- [DUR 09] **J.S. Dureja, V.K. Gupta, M. Dogra**. Design optimization of cutting conditions and analysis of their effect on tool wear and surface roughness during hard turning of AISI-H11 steel with a coated-mixed ceramic tool. *Journal Engineering Manufacture*, Vol. 223(B), pp. 1441-1453 (2009).
- [DRO 97] **J.J. Droesbeke, J. Fine**, Plans d'expériences. Applications à l'entreprise (1997).
- [EBR 09] **A. Ebrahimi et M.M. Moshksar**, Evaluation of machinability in turning of microalloyed and quenched-tempered steels : Tool wear, statistical analysis, chip morphology. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2): pp. 910–921 (2009).

- [FEL 97] **E. Felder**, Procédés d'usinage. Techniques de l'ingénieur, B 7000 (1997).
- [FIS 01] **I. Fissure**, Disponible à l'adresse. Http : //www.efunda.com, 01.
- [FIS 95] **F. Fischer O. Kolednik**, A note on calibration of ductile failure damage indicators. Int. J. Fracture, tome 73: pp. 345 – 357 (1995).
- [FIS 97] **G.S. Fishman**, Monte-Carlo Concepts, Algorithms and applications (1997).
- [FNI 08] **B. Fnides**. Evaluation des performances des matériaux de coupe lors de l'usinage de l'acier X38CrMoV5-1, Mémoire de magistère de Mécanique Productive. Université 08 mai 1945 de Guelma (2008).
- [FOW 98] **W.Y. Fowlkes and C.M. Creveling**, Ingenerate robust (1998).
- [GAI 09] **V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, L. Figueira and J. Paulo Davim**, Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 27, pp. 754–763(2009).
- [GEK 02] **H.O. Gekonde, S. V. Subramanian**, Tribology of tool–chip interface and tool wear mechanisms, Surface and Coatings Technology, 149, pp. 151–160 (2002).
- [GIL 09] **S.S. Gill, R. Singh, H.Singh and J. Singh**, Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(3-4): pp. 256–260 (2009).
- [GOU 99] **J. Goupy**, Plans d'expériences pour surface de réponse (1999).
- [GUA 01] **X. Guan and R. Melchers**, Effect of response surface parameter variation on structural reliability estimates. Structural Safety, tome 23: pp. 429 – 444 (2001).
- [GUN 13] **M. Gunay, E. Yucel**, Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron, Measurement, 46, pp. 913–919 (2013).
- [GRZ 03] **W. Grzesik**, Friction behaviour of heat isolating coating in machining: mechanical thermal and energy-based considerations, International Journal Of Machine Tools and Manufacture, pp. 145 – 150 (2003).
- [GRZ 08] **W. Grzesik and Z. Zalisz**, Wear phenomenon in the hard steel machining using ceramic tools. Tribology International, 41(8), pp. 802–812 (2008).
- [GRZ 12] **W. Grzesik and K. Zak**, Modification of surface finish produced by hard turning using superfinishing and burnishing operations. Journal of Materials Processing Technology, vol. 212(1): pp. 315-322 (2012).

- [HAB 06] **M. Habak**, Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6. Thèse de doctorat de Mécanique - Matériaux – Procédés. ENAM (2006).
- [HAR 65] **E.C. Harrington**, The desirability function, IQC 21 (1965).
- [HES 13] **Z. Hessainia, A. Belbah, M.A. Yallese, T. Mabrouki, J.F. Rigal**, On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations, *Measurement*, 46, pp. 1671–1681 (2013).
- [HUA 05] **Y. Huang and T. G. Dawson**, Tool crater wear depth modeling in CBN hard. *Wear*, 258(9): pp.1455–1461(2005).
- [ISO 93] ISO3685, Tool life testing with single point turning tools. pp. 48 (1993).
- [JRA 07] **M. Jrad**, Modélisation du perçage à grande vitesse: Approches analytique, numérique et expérimentale. Thèse de doctorat de Mécanique, Université de Metz, LPMM (2007).
- [KHA 08] **A.A. Khan and M.I. Ahmed**, Improving tool life using cryogenic cooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1-3): pp.149–154 (2008).
- [KHU 87] **A.I. Khuri and J. Cornell**, Response Surface Design and Analysis, Marcel Dekker, New York (1987).
- [KIS 99] **H.A. Kishawy, M.A. Elbestawi**. Effects of process parameters on material side flow during hard turning. *Int J Mach Tools Manuf*; 39:1017–1030 (1999).
- [KLO 06] **F. Klocke**, Cutting materials, tools and coolants for machining with geometrically defined cutting edges, part 2, *Journal of Manufacturing Technology*, 62, pp. 278-285 (2006).
- [KOM 81] **R. Komanduri and Z. B. Hou**, Thermal modelling of the metal cutting process Part II: temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool-chip interface. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, pp. 57-88 (2001).
- [KÖN 80] **W. König, R. Komanduri, H. Tönshoff, G. Ackershott**. Machining of hard materials. *Ann CIRP*; 33 (2): 417–428 (1984).
- [KUM 07] **B.V.M. Kumar, J.R. Kumar and B. Basu**, Crater wear mechanisms of TiCN-Ni-WC cermets during dry machining. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 25(5-6): pp. 392–399(2007).
- [KUM 06] **A. Senthil Kumar, A. Raja Durai and T. Sornakumar**, Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. *Tribology International*, 39(3), pp.191–197 (2006).

- [KUM 03] **A. Senthil Kumar, A. Raja Durai and T. Sornakumar**, Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 21(3-4): pp.109–117(2003).
- [LAL 08] **D.I. Lalwani, N.K. Mehta, P.K. Jain**. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 206, pp. 167–179 (2008).
- [LEC 12] **G. LeCoz**, Usinage de l'inconel 718: Integrite de surface, mesure de Temperature et modele analytique du fraisage peripherique Thèse de doctorat de Mécanique des matériaux, Université de Lorraine (2012).
- [LIM 05] **J.G. Lima, R. F. Avila, A. M. Abrão, M. Faustino, J. P. Davim**. Hard turning: AISI 4340 high strength low steel and AISI D2 cold work tool steel, *Journal Materials Processing Technology*, Vol. 169: pp. 388-395 (2005).
- [LIN 95] **Z.C. Lin, D.Y. Chen**, A study of cutting with CBN tool. *J Mater Process Technol.* 49:149–164 (1995).
- [LOU 05] **F. Louvet, L. Delplanque**, Les Plans d'Expériences par la méthode Taguchi, Expérimentique, (2005).
- [MON 01] **D.C. Montgomery**, Design and analysis of experiments, 5thed: Wiley & Sons Inc; New York (2001).
- [M'SA 05] **R. M'Saoubi, H. Chandrasekaran**, Innovative Methods for the Investigation of Tool-Chip Adhesion and Layer Formation during Machining, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54(1), pp. 59-62 (2005).
- [NOO 04] **M.Y. Noordin, V.C. Venkatesh, S. Sharif, S. Elting, A. Abdullah**. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. *Journal Materials Processes Technology*, Vol. 46, pp. 58-145 (2004).
- [ONU 03] **K. Onur and D. Necip**, Joint optimization of mean and standard deviation using response surface methods, *Journal of Quality Technology*, tome 35, n°3 (2003).
- [ÖZE 05] **T. Özel, T-K. Hsu, E. Zeren**. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 Steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 25(3–4), pp. 262–269 (2005).
- [PAS 10] **A. Passeron**, Tournage, Techniques de l'ingénieur, Référence BM 7086 (2010).
- [PAV 05] **R. Pavel, I. Marinescu, M. Deis and J. Pillar**, Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning. *Journal of Materials Processing Technology* 170, pp. 341–349 (2005).

- [PIL 02] **M. Pillet**, Avant les plans d'expériences, l'entonnoir à x!, 6eme Colloque Expérimentique Orleans 13 juin, (2002).
- [PIL 05] **M. Pillet**, Les plans d'expériences par la méthode Taguchi, 3^{ème} édition, Paris, France, (2005).
- [POU 02] **G. Poulachon, A.L. Moisan, M. Dessoly**, A contribution to the study of the cutting mechanisms in hard turning *Mécanique & Industries* 3, pp. 291–299, (2002).
- [POU 03] **G. Poulachon, B. P. Bandyopadhyay, I. S. Jawahir, S. Pheulpin, E. Seguin**, The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43 pp. 139–144 (2003).
- [POU 01] **G. Poulachon, A. Moisan, I. S. Jawahir**, Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools, *Wear*, 250, pp. 576–586 (2001).
- [QUE 04] **M. Quesada, E. Del-Castillo**, A bayesian approach for multiple response surface optimization in the presence of noise variables. *Journal of applied statistics*, tome 31, no 3: pp. 251–270, (2004).
- [RAM 05] **A. Ramesh, S.N. Melkote, L.F. Allard, L. Riester and T.R. Watkins**, Analysis of white layers formed in hard turning of AISI 52100 steel. *Materials Science and Engineering A*, Volume 390, pp. 88-97 (2005).
- [RAM 11] **M. Rami**, Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage. Thèse de doctorat de Génie Mécanique, Université Toulouse III - Paul Sabatier (2011).
- [REC 04] **J. Rech, J. Battaglia and A. Moisan**, Thermal influence of cutting tool coatings. *Journal de physique*, Volume 120, pp. 743-750 (2004).
- [REM 06] **M. Remadna and J.F. Rigal**, Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3): pp. 67–75 (2006).
- [SCH 98] **P. Schimmerling, J.C. Sisson**, *Pratique des plans d'expériences* (1998).
- [SEO 03] **J.K. Seong, K. Kwang Seok**, Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, tome 136: pp. 202 – 208 (2003).
- [SIK 02] **S.K. Sikdar and M. Chen**, Relationship between tool flank wear area and component forces in single point turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 128 (1-3), pp.210–215(2002).

- [SHA 09] **H.H. Shahabi and M.M. Ratnam**, Assesment of flank wear and nose wear from worhpiece roughness in turning operation using machine vision. *Int J Adv Manuf Technol* 43, pp. 11–21 (2009).
- [Site-Web] www.trametal.com/outils-coupants/9-Plaquettes.
- [SMI 07] **S. Smith, S.N. Melkote, E. Lara-Curzio, T.R. Watkins, L. Allard and L. Riestler**, Effect of surface integrity of hard turned AISI 52100 steel on fatigue performance. *Material Science Engineering A*, 459, pp. 337-346 (2007).
- [TAG 85] **G. Taguchi and Y. Wu**, Introduction to off-line quality control, Central Japan Quality Control Association (1985).
- [TAG 87] **G. Taguchi**, System of Experimental Design, Unipub/Kraus, International Publication (1987).
- [TAG 93] **G. Taguchi**, Taguchi on Robust technology development methods. ASME Press, New York, pp. 1– 40 (1993).
- [THI 99] **D. Thiele, N. Melkote**, Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Material Processing Technology*, 94, pp. 216-226 (1999).
- [TON 01] **H. K. Tonshoff, A. Mohfeld and C. Spengler**, The coating in manufacturing engineering (2001).
- [TRO 03] **M. Trosset, N. Alexandrov**, New methods for robust design using computer simulation, Proceedings of the Section on Physical and Engineering Sciences, American Statistical Association (2003).
- [ULU 11] **D. Ulutan, T. Ozel**, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review, *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 51, pp. 250 – 280 (2011).
- [VAS 08] **B. Vasques**. Etude du comportement du rayon d’arête et de son influence sur l’intégrité de surface en tournage à sec. Thèse de doctorat de Mécanique et Productique. Université de Tours (2008).
- [YAL 09] **M. A. Yallese, K. Chaoui, N. Zeghib, L. Boulanouar, J. F. Rigal**. Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Journal Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 1092-1104 (2009).
- [YAN 02] **C. Yann and P. Siarry**, Optimisation multiobjectif, Editions Eyrolles paris, (2002).

ANNEXE I

ANALYSE DE LA VARIANCE (ANOVA)

L'objectif de l'analyse globale des résultats est de définir la qualité descriptive du modèle au moyen d'un tableau d'analyse de la variance (ANOVA : ANalysis Of VAriance). Pour cela, nous allons définir plusieurs grandeurs.

Soit SCT la somme des carrés totale, c'est-à-dire la somme des carrés des écarts entre les résultats d'essais (expériences) et leur moyenne :

$$SCT = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (1)$$

Cette quantité est indépendante du modèle utilisé. On décompose ensuite cette somme de carrés en une somme de deux termes SCM et SCE. Le premier terme traduit la variation des réponses calculées autour de leur moyenne, soit encore :

$$SCM = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

On rappelle que l'application de la méthode des moindres carrés utilisée pour l'estimation des coefficients du modèle, induit la relation suivante [GOU 99]:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{y}_i \quad (3)$$

Le second terme traduit la somme des carrés des résidus :

$$SCE = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

La somme des carrés totale (SCT) peut être donnée par la relation suivante, encore appelée équation d'analyse de variance ou équation d'analyse de régression :

$$SCT = SCM + SCE \quad (5)$$

Un test statistique visant à rejeter l'hypothèse (H_0) selon laquelle le modèle ne permet pas de décrire la variation des essais va maintenant être réalisé. Lorsque cette hypothèse est vérifiée, il est possible de montrer [GOU 99] que la statistique F suit une loi de Fisher avec respectivement $(p-1)$ et $(N-p)$ degrés de liberté.

$$F = \frac{SCM/(p-1)}{SCE/(N-p)} \quad (6)$$

Ainsi, l'hypothèse (H_0) est rejetée avec une probabilité α si :

$$F > F_{(\alpha, p-1, N-p)} \quad (7)$$

Dans cette équation, $F_{(\alpha, p-1, N-p)}$ est le $(1-\alpha)$ quantile d'une loi de Fisher avec $(p-1)$ et $(N-p)$ degrés de liberté.

Le modèle permet de décrire la variation des résultats d'essais si la probabilité $\text{Prob } F$ est faible ($< 5\%$) (Probabilité de rejeter l'hypothèse nulle « le modèle ne permet pas de décrire la variation des résultats d'essais »).

Ces données conduisent à la construction du tableau ANOVA (tableau 1), récapitulant les différents résultats.

Pour qu'il existe le moins de résidus possible, il faut que le rapport F de deux variances (cinquième colonne dans le tableau de régression) soit le plus grand possible. On pourra alors dire que le modèle "apporte de l'information".

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F	Probabilité
Régression	SCM	p-1	SCM/ (p-1)	[SCM/(p-1)] / [SCE/(N-p)]	Prob F
Résidus	SCE	N-p	SCE/ (N-p)		
Total	SCT	N-1			

Tableau 1- Tableau ANOVA (analyse de régression).

Le tableau d'analyse de régression permet d'établir le coefficient de détermination R^2 à partir de la relation suivante :

$$R^2 = \frac{SCM}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT} \quad (8)$$

Ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination appartient à l'intervalle $[0, 1]$.

En présence de plusieurs variables explicatives, ce qui est généralement le cas dans l'analyse des résultats d'essais, il faut impérativement éviter d'utiliser le coefficient de détermination R^2 pour estimer la qualité descriptive du modèle. Il faut recourir à l'utilisation du coefficient de détermination ajusté $R^2_{\text{ajusté}}$:

$$R^2_{\text{ajusté}} = \frac{\frac{SCE}{N-p}}{\frac{SCT}{N-1}} \quad (9)$$

Si le nombre d'expériences est égal au nombre d'inconnues du système, le coefficient R^2 sera toujours égal à 1. C'est pour éviter cela que le coefficient de détermination $R^2_{\text{ajusté}}$ a été introduit. Ce coefficient est défini comme la différence à 1 du rapport entre le carré moyen des écarts des résidus et le carré moyen des écarts expérimentaux.

Plus les valeurs de R^2 et $R^2_{\text{ajusté}}$ sont proches de 100%, plus la qualité descriptive du modèle est satisfaisante.

Un autre coefficient permet de décrire la capacité prédictive du modèle, appelé R^2_{pred} donné par la formule suivante :

$$R^2_{\text{pred}} = 1 - \frac{PRESS}{SCT} \quad (9)$$

Où PRESS (Prediction Residual Error Sum of Squares [GOU 99]), la somme des carrés des résidus, est donnée par la formule suivante :

$$PRESS = \sum_{i=1}^N e(i)^2 \quad (10)$$

La régression est faite sans l'expérience i et en chacun des (N-1) points on calcule \hat{y}_i au point i : $e(i) = y_i - \hat{y}_i$, la procédure est répétée pour chaque point ($i = 1, 2, \dots, N$).

La valeur de R^2_{pred} est toujours comprise entre 0 et 1, plus cette valeur est proche de 1, plus la capacité prédictive du modèle est bonne.

ANNEXE II

SURFACES DE REPONSES ET GRAPHE DE CONTOUR

1. Rugosité de la surface (R_a)

R_a estimé par le modèle de second ordre (équation VI.9), Chapitre VI

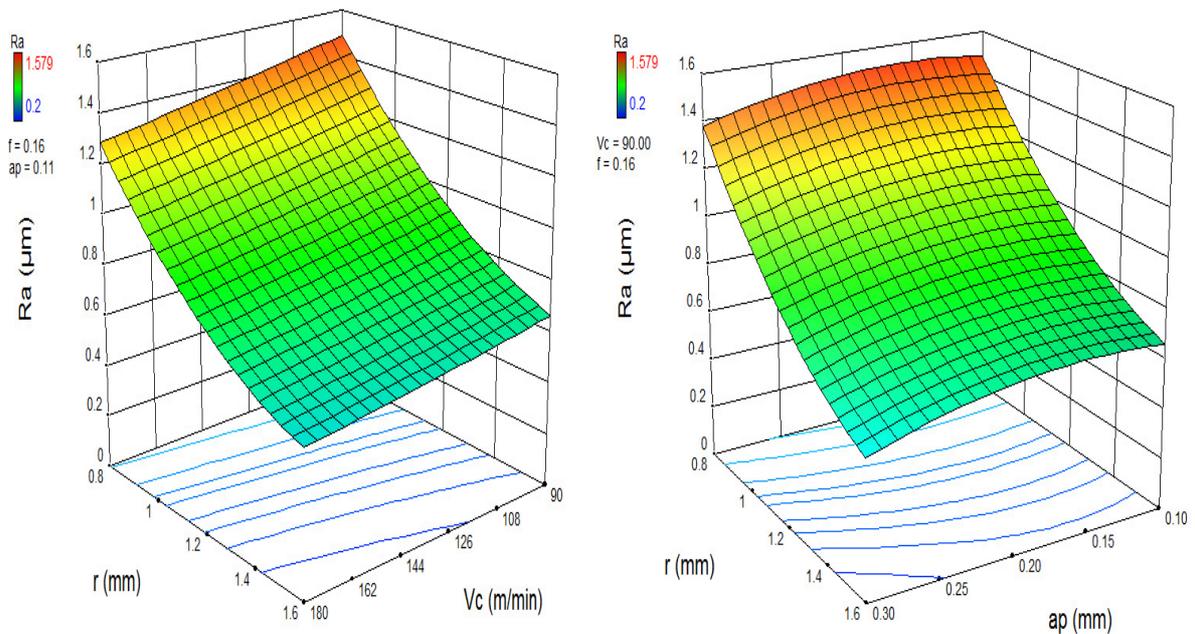


Figure 1 Effet de la vitesse de coupe, rayon du bec de l'outil et la profondeur de coupe sur la rugosité de surface (R_a).

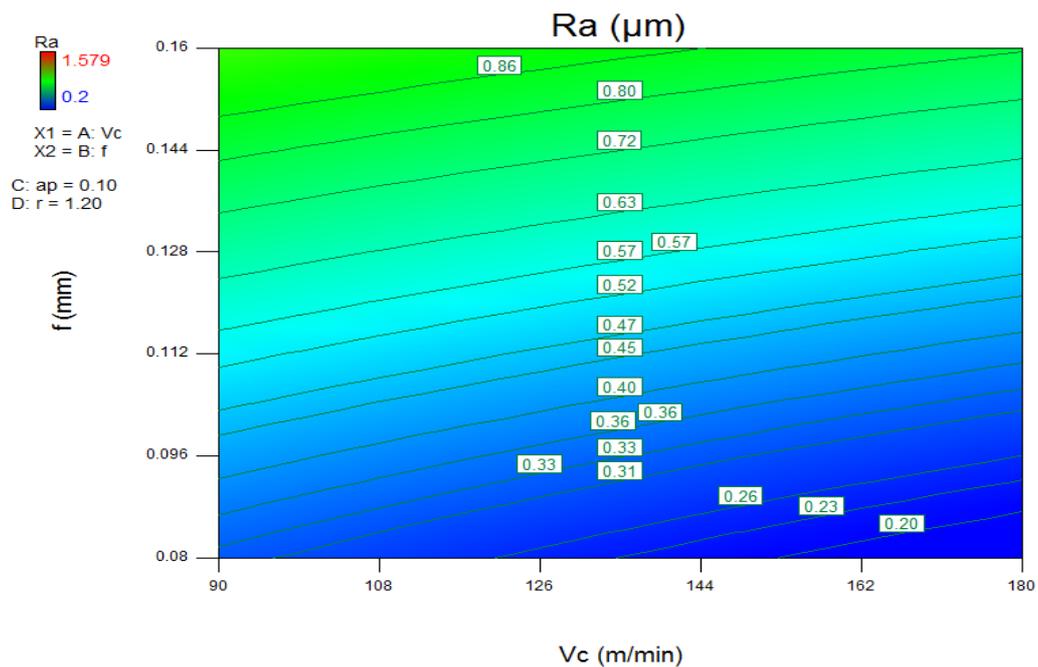


Figure 2 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité de surface (R_a).

2. Effort axial (F_a)

F_a estimé par le modèle de second ordre (équation VI.10), Chapitre VI

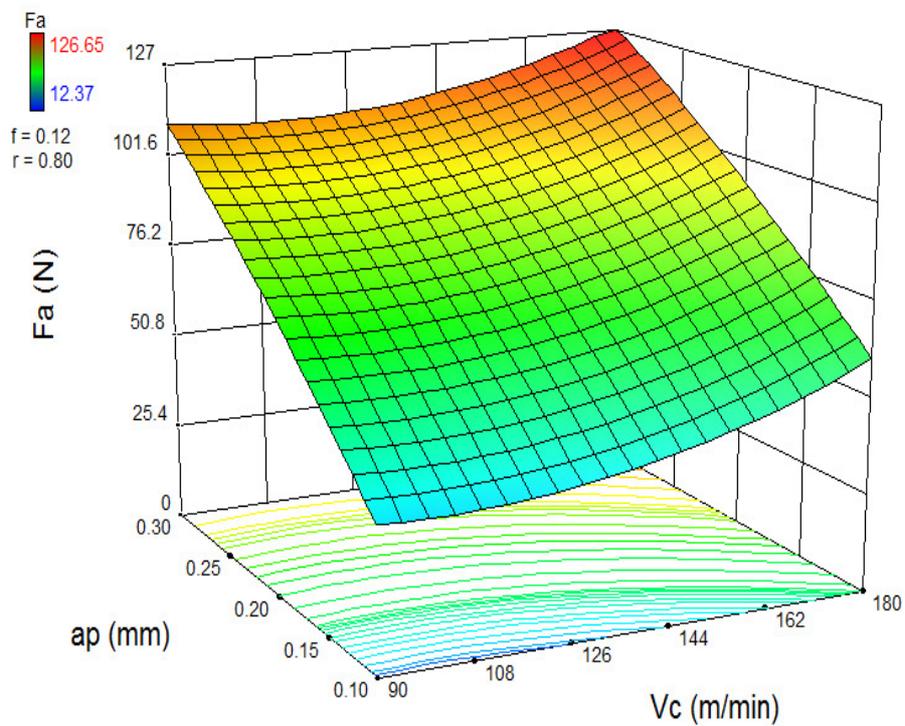


Figure 3 Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de coupe sur l'effort axial (F_a).

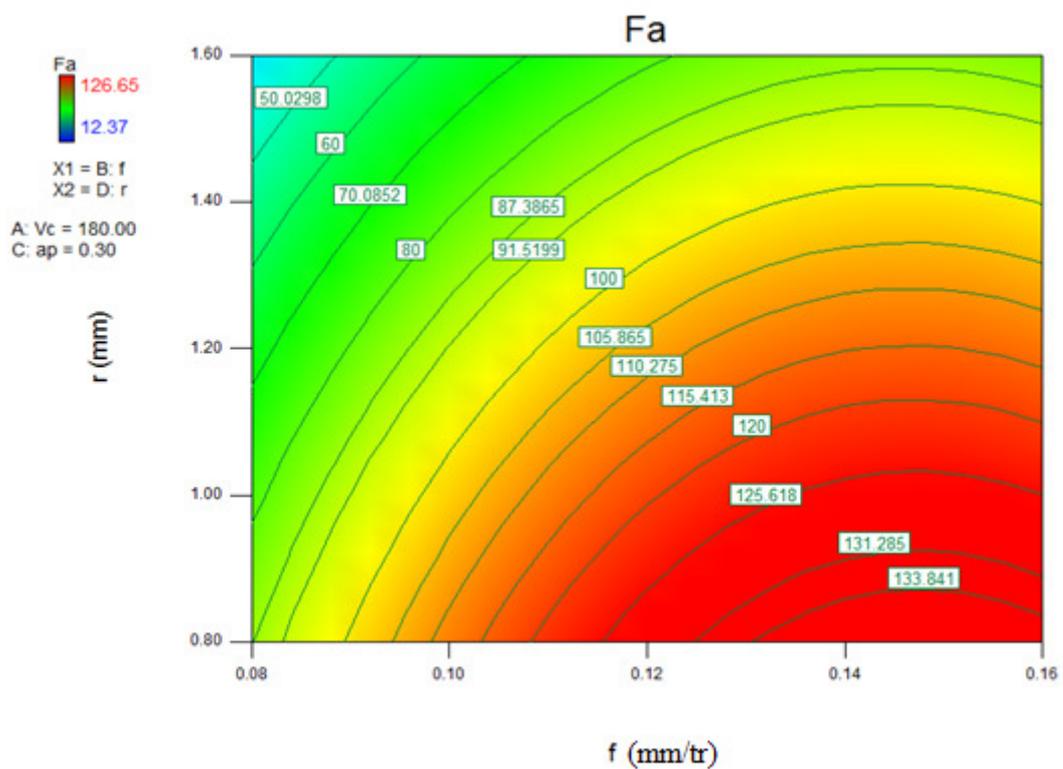


Figure 4 Effet de rayon du bec de l'outil et l'avance sur l'effort axial (F_a).

3. Effort radial (Fr)

Fr estimé par le modèle de second ordre (équation VI.11), Chapitre VI

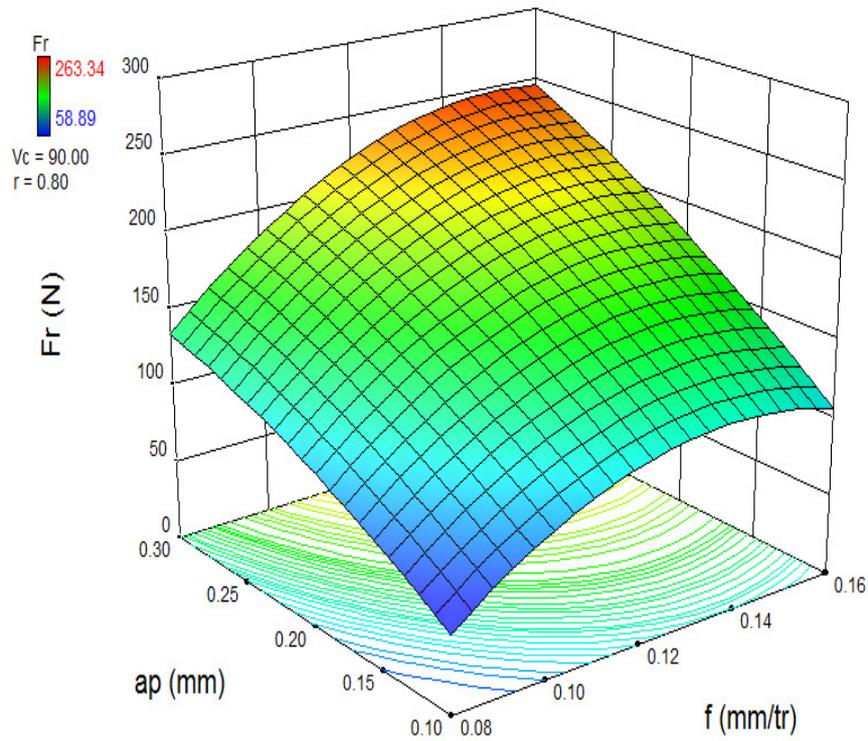


Figure 5 Effet de la profondeur de coupe et l'avance sur l'effort radial (Fr).

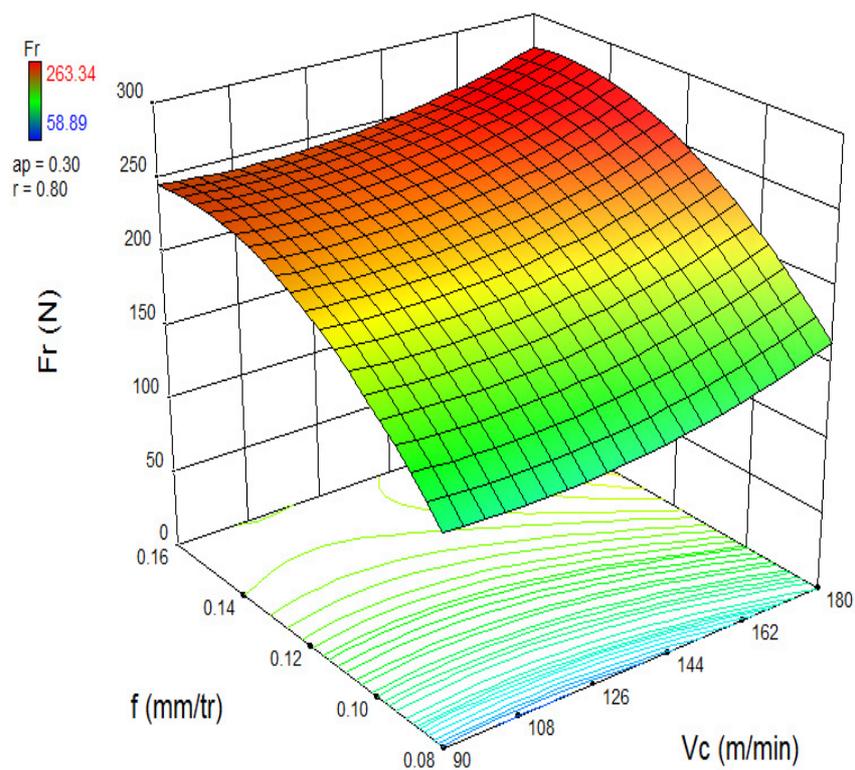


Figure 6 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur l'effort radial (Fr).

4. Effort tangentiel (F_t)

F_t estimé par le modèle de second ordre (équation VI.12), Chapitre VI

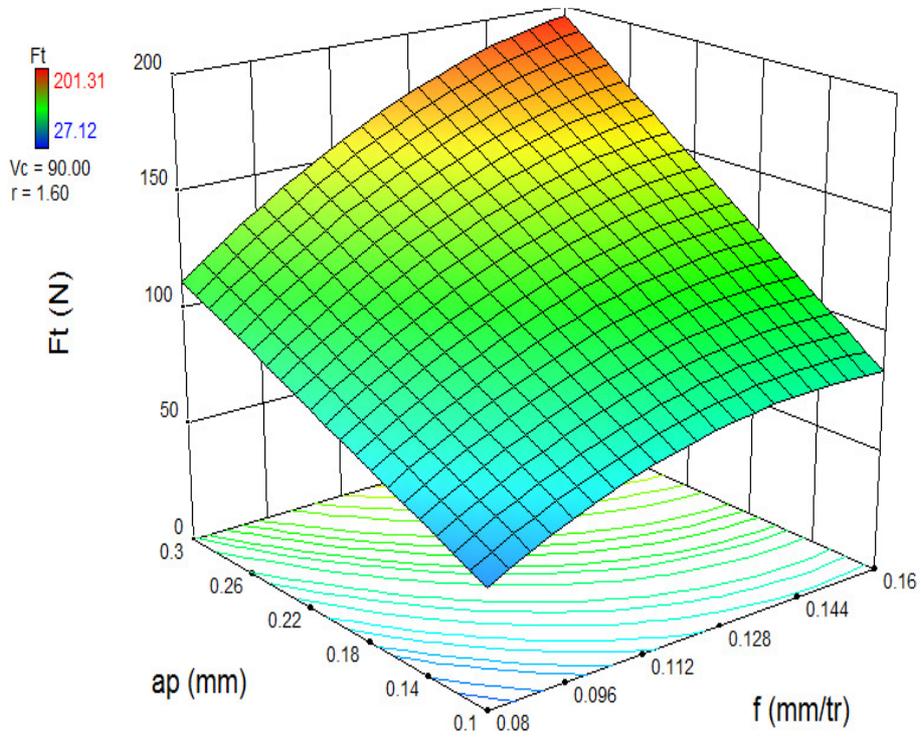


Figure 7 Effet de la profondeur de coupe et l'avance sur l'effort tangentiel (F_t).

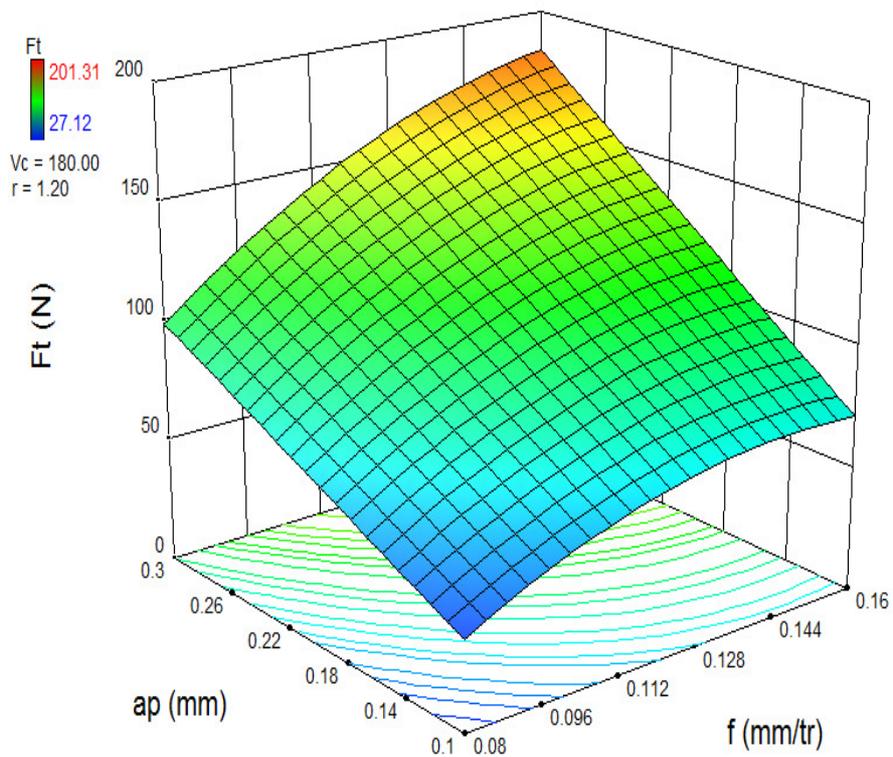


Figure 8 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur l'effort tangentiel (F_t).