

**Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique**



**Mémoire de fin d'étude présenté en
vue de l'obtention d'un diplôme de
Master**

Présenté par : ALLAL Mohammed

Option : Conception et Production Industrielle

***Optimisation des conditions de coupe
lors de l'usinage de deux aciers
inoxydables***

Sous la direction de : Dr. Belhadi. S

Année universitaire 2015/2016

Remerciement

*Je remercie dieu de ma avoir donné la force et le courageAinsi
que la volonté d'effectuer mon projet de fin cycle.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à docteur
BELHADI SALIM qui a su diriger ce mémoire avec intérêt et
compétences, et qui a su me conseiller tout au long de cette
période.*

*J'adresse aussi enseignantes à notre département de Génie
mécanique d'avoir m'apportéleur soutien pour réaliser se
travaille.*

*J'exprime mes gratitudes et mes remerciements à mes parents et
toute ma famille pour leurs encouragements.*

Résumé

Dans notre sujet, nous avons présenté une étude expérimentale des effets des matériaux (X2CrNi18-9 et X20Cr13), le rayon de bec (r), la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p) sur les critères de rugosité de la surface usinée et les composantes de l'effort de coupe en tournage. L'usinage est réalisé avec un outil de coupe carbure GC2015. Un plan de Taguchi L_{18} est adopté pour la réalisation des expériences, ce qui a permis de faire une analyse statistique de la variance (ANOVA). Les résultats montrent que les composantes de l'effort de coupe sont influencées principalement par la profondeur de passe. L'avance par tour est le facteur le plus significatif sur la rugosité de surface de la pièce usinée. Des modèles mathématiques pour les critères de rugosité de la surface et les composantes de l'effort de coupe sont déduits. Ces modèles sont exploités pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe. Trois méthodes d'optimisation ont été utilisées, satisfaisant des objectifs technologiques divers, à savoir une rugosité (R_a) minimale, un effort de coupe (F_z) minimal et débit de copeau (MRR) maximal.

Mots clés : Tournage, Optimisation, Plan d'expérience, Rugosité, Débit copeau, Effort de coupe.

Nomenclature

ANOVA : Analyse de variance.
RSM : Méthodologie de surface de réponse.
CBN : Nitrure de bore cubique.
DC : Usinage à sec.
CC : Lubrification classique.
MQL : Quantité minimale de lubrification.
Vc : Vitesse de coupe (m/min).
ap: Profondeur de passe (mm).
f : Avance par tour (mm/tr).
F : Effort de coupe résultant (N).
Fa (Fx) : Effort de coupe axial (N).
Fr (Fy) : Effort de coupe radial (N).
Ft (Fz) : Effort de coupe tangentiel (N).
R² : Coefficient de détermination.
Ra : Rugosité moyenne arithmétique (μm).
Rt : Rugosité totale (μm).
Rz : Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
r_ε : Rayon de bec de l'outil (mm).
TD : Tournage dur
VB : Usure en dépouille (mm).
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).

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I Etude et analyse Bibliographique

Partie 1 : Généralités sur l'usinage par enlèvement de matière	1
I.1 Introduction :	1
I.2 Principaux paramètres de coupe :	1
I.3 Matériaux de l'outil :	2
I.4 Paramètres technologiques de l'usinage :	5
I.5 Usinabilité.....	12
I.6 Le Tournage Dur (TD)	14
I.7 les plans d'expériences	15
Partie 2 : Etat de l'art	17
I.8 Étude de l'usinabilité en tournage de finition de l'acier à outil AISI H13 avec un outil de coupe CBN en utilisant la méthodologie RSM.....	17
I.9 Evaluation des efforts de coupe dans le tournage dur de l'acier AISI 52100 en utilisant la méthode Taguchi.....	18
I.10 Analyse de la rugosité de surface et des efforts de coupe dans le tournage dur avec un outil de CBN : Modélisation et l'optimisation des conditions de coupe.....	20
I.11 Analyse des paramètres d'usinage, en tournage sous lubrification MQL, basée sur un plan de Taguchi et la Méthodologie de Surface de Réponse.....	24
I.12 Optimisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI D3 par des méthodes Taguchi et RSM.....	27
I.13 Optimisation multi objectif des paramètres de tournage a CNC par l'approche de Taguchi et la Méthodologie RSM.....	30
I.14. Conclusion.....	32

Chapitre II procédure et équipement d'expérience

II.1 Introduction	33
II.2 Matériels utilisés	33
II.2.1 Les matériaux utilisés pour les essais d'usinage :	33
II.2.2 Machine-outil.....	34
II.2.3 Plaquette de coupe	35
II.2.4 Porte outil	36
II.2.5 Appareillages de mesure utilisés	36
II.3 planification des expériences	39
II.3.1 Introduction	39
II.3.2. Conditions de coupe	39
II.3.3 Le plan d'expériences	39
II-4 Conclusion	40

Chapitre III Etude de l'influence des paramètres de coupe

III.1 Introduction.....	41
III.2 Résultats des expériences.....	41
III.3 Analyse des résultats expérimentaux des critères de rugosité	41
III.3.1 Critère de rugosité Ra.....	42
III.3.2 Critère de rugosité Rz.....	44
III.3.3 Critère de rugosité Rt	45
III.3.4 Les modèles mathématiques pour les critères de la rugosité de surface	47
III.3.5 Testes de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	47
III.3.6 Validation des modèles mathématiques	48
III.4 Analyse des résultats expérimentaux de l'effort de coupe.....	49
III.4.1 Composante de l'effort de coupe (Fx)	49
III.4.2 Composante de l'effort de coupe (Fy)	50
III.4.3 Composante de l'effort de coupe (Fz).....	52
III.4.4 Les modèles mathématiques pour les composants des efforts de coupe.....	54
III.4.5 Testes de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	55
III.4.6 Validation des modèles mathématiques	56
III.5 Conclusion	57

Chapitre IV Optimisation des conditions de coupe

IV.1. Introduction.....	58
IV.2. Optimisation des conditions de coupe par la méthode de Taguchi.....	58
IV.3 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	60
IV.3.1 Analyse des effets principaux sur (Ra)	60
IV.3.2 Analyse des effets principaux sur (Rz)	61
IV.3.3 Analyse des effets principaux sur (Rt).....	61
IV.3.4 Analyse des effets principaux sur (Fx)	62
IV.3.5 Analyse des effets principaux sur (Fy)	62
IV.3.6 Analyse des effets principaux sur (Fz).....	62
IV.3.7 Analyse des effets principaux sur (MRR).....	63
IV.4. Optimisation par L'Analyse Relationnelle Grise (Grey Relational Analysis)	64
IV.4.1 Étape 1: La normalisation	64
IV.4.2 Étape 2: Calcul des coefficients du Relationnel Gris.....	65
IV.4.3 Etape 3 : Calcul du GRG (Grey relational grade)	65
IV.4.4 Prédiction de la combinaison optimale du processus:	65
IV.4.5 Optimisation des conditions de coupe pour Ra, Fz.....	67
IV.4.6 Optimisation des conditions de coupe pour Ra, Fz et MRR	69
IV.5 optimisation des paramètres de coupe par la fonction de désirabilité :	70
IV.5.1 Désirabilité individuelle	70
IV.5.2 Désirabilité globale	72
IV.5.3 Optimisation des conditions de coupe pour : Ra et Fz.....	73
IV.5.4 Optimisation des conditions de coupe pour : Ra, Fz et MRR.....	74
IV.6. Conclusion	77

CONCLUSIONS GENERALE

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 Tournage longitudinale.....	2
Figure I.2 Disposition les matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté.....	2
Figure I.3 Céramiques	4
Figure I.4 Formes d'usure sur les outils de coupe.....	6
Figure I.5 Relation Usure – Temps.....	6
Figure I.6 Représentation graphique du modèle de Taylor.....	7
Figure I.7 Représentation graphique du modèle de Kronenberg.....	8
Figure I.8 Représentation graphique du modèle de König – Dépiereux.....	8
Figure I.9 Décomposition d'une surface mesurée.....	9
Figure I.10 Rugosité moyenne arithmétique Ra.....	10
Figure I.11 Rugosité théorique.....	10
Figure I.12 Composantes de l'effort de coupe.....	11
Figure I.13 Section droite d'un copeau.....	12
Figure I.14 Influence de la vitesse sur l'effort de coupe lors de l'usinage des matériaux ductiles.....	12
Figure I.15 Paramètres influents sur l'usinabilité.....	13
Figure I.16 Opération de chariotage du tournage dur (Sandvik Coromant).....	14
Figure I.17 Surface de réponse formée par les réponses aux points du domaine d'étude	16
Figure I.18 Courbe de surface de réponse 3D pour la fonction globale de désirabilité...	17
Figure I.19 Graphe des effets principaux Fx.....	19
Figure I.20 Graphe des effets principaux Fy	20
Figure I.21 Graphe des effets principaux Fz	20
Figure I.22 Effet de la vitesse de coupe et l'avance par tour sur la rugosité de surface ($a_p = 0.30$ mm, H = 45 HRC).....	22
Figure I.23 Effet de dureté de la pièce et la profondeur de passe sur l'effort tangentielle ($V_c = 180$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr.....	22
Figure I.24 Les courbes de surface de réponse 3D de Ra en fonction de la vitesse de coupe, le mode de lubrification, l'avance et la profondeur de coupe.....	25
Figure I.25 Effets des paramètres principaux a) Moyenne de S / N ratio pour Ra b) Effets des facteurs de contrôle sur Ra.....	28
Figure I.27 Rapport signal / bruit et de l'analyse ANOVA à l'usure en dépouille (VB)....	28
Figure I.28 Rapport signal / bruit et de l'analyse ANOVA à la rugosité de surface (Ra)...	31
Figure I.29 graphe des effets principaux pour Ra	31
Figure I.30 graphe des effets principaux pour Rz.....	31
Figure I.31 Les courbes de surface de réponse montrant l'effet de deux variables sur le Ra	32

Chapitre II

Figure II.1 Eprouvettes pour différents essais.....	34
Figure II.2 Tour parallèle modèle SN 40 C.....	34
Figure II.3 Photo de plaquette de coupe utilisée.	35
Figure II.4 Porte outil utilisé.	36
Figure II.5 mesure de la rugosité sans démontage de la pièce	36
Figure II.6 Montage du dynamomètre sur la table de la machine.....	37
Figure II.7 Chaîne de mesure des efforts de coupe	38
Figure II.8 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE »	38

Chapitre III

Figure III.1 Graphe des effets principaux sur la rugosité Ra	42
Figure III.2 Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (Vc, f, ap et r).....	43
Figure III.3 Graphe des effets principaux sur la rugosité Rz	44
Figure III.4 Diagrammes de surface 3D de Rz en fonction de (Vc, f, ap et r).....	45
Figure III.5 Graphe des effets principaux sur la rugosité Rt.....	46
Figure III.6 Diagrammes de surface 3D de Rt en fonction de (Vc, f, ap et r).....	47
Figure III.7 Normalité de distribution de l'erreur pour (a): Ra; (b): Rz; (c): Rt.	47
Figure III.8 Comparaison entre les valeurs mesurés et estimés des critères de rugosité (a): Ra, (b): Rz et (c): Rt.	48
Figure III.9 Graphe des effets principaux sur Fx	49
Figure III.10 Diagrammes de surface 3D de Fx en fonction de (Vc, f, ap et r)	50
Figure III.11 Graphe des effets principaux sur Fy	51
Figure III.12 Diagrammes de surface 3D de Fy en fonction de (Vc, f, ap et r)	52
Figure III.13 Graphe des effets principaux sur Fz	53
Figure III.14 Diagrammes de surface 3D de Fy en fonction de (Vc, f, ap et r)	54
Figure III.15 Normalité de distribution de l'erreur pour (a): Fx; (b): Fy; (c): Fz.	55
Figure III.16 Comparaison entre les valeurs mesurés et estimés des composantes de l'effort de coupe (a): Fx, (b): Fy et (c): Fz.	56

Chapitre IV

Figure IV.1 Graphique des effets principaux de Matériau, r, Vc, f et ap sur ratio S/N (Grey) de Ra, Fz.	68
Figure IV.2 Graphique des effets principaux de Matériau, r, Vc, f et ap sur ratio S/N (Grey) de Ra, Fz et MRR.	69
Figure IV.3 désirabilité individuelle di d'une réponse Yi.....	70
Figure IV.4 fonction de désirabilité d'une réponse à minimiser.....	71
Figure IV.5 fonction de désirabilité d'une réponse à cibler.....	72
Figure IV.6 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (Ra) et (Fz).	74
Figure IV.7 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (Ra) et (Fz) et MRR.	75

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 Combinaisons différentes de paramètres avec la fonction de désirabilité....	18
Tableau I.3 résultat d'ANOVA pour la force radiale (Fy).....	20
Tableau I.4 résultat d'ANOVA pour la Force tangentielle (Fz).....	20
Tableau I.5 Résultat d'ANOVA pour la rugosité de la surface(Ra).....	21
Tableau I.6 Les résultats d'ANOVA de l'effort tangentiel (Fv).....	22
Tableau I.7 Optimisation de RSM pour les paramètres et les composantes d'efforts de coupe.....	23
Tableau I.8 Le plan expérimental, les résultats mesurés et leurs ratios de S/N calculées	24
Tableau I.9 Comparaisons entre les résultats des expériences de confirmation et valeurs prévues par la méthode de Taguchi	26
Tableau I.10 Résultats de l'analyse ANOVA pour les réponses.....	26
Tableau I.11 RSM Résultats d'optimisation pour les réponses.....	26
Tableau I.12 Les résultats des expériences de confirmation et les valeurs prédites par les modèles RSM	27
Tableau I.13 Contraintes utilisées pour l'optimisation RSM.....	29

Tableau I.14 Résultats d'optimisation RSM.....	29
Tableau I.15 ANOVA de conception quadratique de La méthodologie RSM pour le Ra	31

Chapitre II

Tableau II.1 Composition chimique des aciers.....	33
Tableau II.2 caractéristiques physico-mécanique des aciers	34
Tableau II.3 Informations relatives à la plaquette de coupe.	35
Tableau II.4 Caractéristiques de porte plaquette utilisé.....	36
Tableau II.5 les paramètres de coupe et paramètre de sortie	39
Tableau II.6 Tableau orthogonale de Taguchi L18 (22x33).....	40

Chapitre III

Tableau III.1 Résultats expérimentaux des critères de rugosité et les composantes de l'effort de coupe selon plan Taguchi L18.....	41
Tableau III.2 Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra	42
Tableau III.3 Analyse de la variance (ANOVA) pour Rz	44
Tableau III.4 Analyse de la variance (ANOVA) pour Rt.....	45
Tableau III.5 Analyse de la variance (ANOVA) pour Fx.....	49
Tableau III.6 Analyse de la variance (ANOVA) pour Fy.....	51
Tableau III.7 Analyse de la variance (ANOVA) pour Fz.....	53

Chapitre IV

Tableau IV.1 Les ratios Signal/Bruit (S/N) de (Ra, Rz et Rt) et (Fx, Fy et Fz) et MRR	60
Tableau IV.2 Moyenne des ratios S/N (Ra) pour chaque niveau des facteurs.....	60
Tableau IV.3 Moyenne des ratios S/N (Rz) pour chaque niveau des facteurs.....	61
Tableau IV.4 : Moyenne des ratios S/N (Rt) pour chaque niveau des facteurs.	61
Tableau IV.5 : Moyenne des ratios S/N (Fx) pour chaque niveau des facteurs.	62
Tableau IV.6 : Moyenne des ratios S/N (Fy) pour chaque niveau des facteurs.	62
Tableau IV.7 : Moyenne des ratios S/N (Fz) pour chaque niveau des facteurs.	63
Tableau IV.8 : Moyenne des ratios S/N (MRR) pour chaque niveau des facteurs.	63
Tableau IV.9 résultats d'optimisation selon l'approche de Taguchi pour les différents critères.	36
Tableau IV.10 : Valeurs des S/N ratio normalisé.....	66
Tableau IV.11 : Coefficients GRC (Grey Relational Coefficients).	66
Tableau IV.12 : Qualité Grise (Grey Grade).....	67
Tableau IV.13 : Effets principaux de la qualité grise de Ra et Fz.....	68
Tableau IV.14 : ANOVA de la qualité grise (Grey Grade) de Ra et Fz	68
Tableau IV.15 : Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade) de Ra, Fz et MRR	69
Tableau IV.16 ANOVA de la qualité grise de Ra, Fz et MRR	69
Tableau IV.17 Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usinage	73
Tableau IV.18 Conditions optimales de la rugosité de surface Ra et l'effort de coupe Fz....	73
Tableau IV.19 Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usinage.	74
Tableau IV.20 Conditions optimales de Ra, Fz et MRR.....	75
Tableau IV.21 Récapitulatif des résultats d'optimisation obtenus par les différentes méthodes multi-objectifs.....	76

Introduction générale:

Dans le domaine de la fabrication et l'usinage des matériaux l'objectif principal c'est la recherche d'une relation entre l'amélioration de l'état de surface, le coût et les conditions de travail rigide, les meilleurs outils de coupe les plus répandus dans le domaine de la fabrication caractérisés par une grande dureté, durée de vie importante et bonne résistance aux chocs, les outils modernes dans le monde industriel (CBN, céramique, carbure revêtu) utilisent beaucoup plus pour la technique de tournage dure (acier durci).

Le premier chapitre de mon travail qui concerne une recherche bibliographique, sur le thème de mon projet de fin d'études, est présentée en deux parties. La première est consacrée aux définitions et concepts de base de l'usinage par la présentation des différents paramètres technologiques d'usinage. Dans la deuxième partie est présenté un état de l'art des recherches dans le domaine de l'usinage dur et l'optimisation des paramètres de coupes à l'aide de l'approche de Taguchi et la méthodologie de surface de réponse.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les équipements utilisés et les conditions expérimentales utilisés pour mener cette recherche. Les dispositifs de mesure et le couple outil - matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe.

Le troisième chapitre concerne une étude statistique, analyse de la variance ANOVA des résultats expérimentaux à l'aide d'un logiciel Design-Expert et l'analyse des effets principaux à l'aide d'un logiciel Minitab-16. Le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur les critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) et les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z), puis de déterminer des modèles mathématiques qui permettent la prédiction de ces paramètres.

Dans le quatrième chapitre, l'étude d'analyse a permis de voir le degré d'influence des paramètres de coupe sur le critère de rugosité R_a , la composante de l'effort de coupe F_z et le paramètre technologiques calculés en fonction des résultats expérimentaux, le taux d'enlèvement de matière (MRR). L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation des différentes méthodes d'optimisations telles que la méthode de Taguchi, l'Analyse Relationnelle Grise et la fonction de désirabilité. L'utilisation des logiciels Design-Expert et Minitab a permis d'obtenir, pour différents cas, le régime de coupe optimal des paramètres technologiques, permettant d'une part de minimiser le critère de rugosité R_a , la composante de l'effort de coupe F_z et d'autre part de maximiser le taux d'enlèvement de matière MRR .

En fin, nous avons fait une conclusion générale sur cette étude.

CHAPITRE : I

*Etude est analyse
Bibliographique*

Partie 1 : Généralités sur l'usinage par enlèvement de matière

I.1 Introduction :

Par «technique d'usinage» on désigne les procédés de travail des métaux qui permettent la mise en forme des pièces mécaniques grâce à une action d'enlèvement de matière. Que cet enlèvement se fasse par la formation d'un copeau ou par la production de micro copeaux comme en rectification, ou encore par fusion ou par évaporation, comme en électroérosion. On dira dans tous les cas qu'il s'agit d'une opération d'usinage. Les méthodes d'usinage appartiennent à la famille des procédés de façonnage, définis comme procédés de mise en forme des pièces à partir de l'état solide. Il existe des procédés de mise en forme à partir de l'état gazeux, à partir de l'état liquide (moulage) ; ou à partir de pulvérulent (Frittage). Lors de l'usinage, la coupe s'opère par le déplacement d'un outil de coupe en interférence avec la pièce. La dimension de cette interférence est définie par l'avance en mm. Lors de la coupe, la matière en interférence avec la trajectoire de l'outil est détachée par déformation plastique du reste de la pièce et se transforme en copeaux. L'usinage requiert l'usage d'une machine-outil qui génère de façon autonome les mouvements relatifs pièce-outil en garantissant leur précision ainsi que la puissance mécanique nécessaire à la coupe. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance). La vitesse de coupe est la vitesse de déplacement de l'arête tranchante de l'outil par rapport à la pièce. Etant donnée la forte puissance requise pour la coupe, l'avance qui définit la quantité de matière enlevée est limitée. L'usinage peut être fait soit avec une machine conventionnelle ou une machine à commande numérique (CN). Il peut être fait soit en usinage classique, usinage ou encore en grande vitesse (UGV).

I.2 Principaux paramètres de coupe :[1]

Les deux mouvements fondamentaux qui contribuent à l'enlèvement de la matière pour former le copeau sont : Le mouvement de coupe (MC) et le mouvement d'avance (MA).

En tournage, le mouvement de coupe est donné par la rotation de la pièce usinée autour de son axe (N , tr/min), qui donne naissance à la vitesse de coupe (V_c , m/min) au niveau du bec de l'outil, le mouvement d'avance (f , mm/tr) est donné par le déplacement de l'outil parallèlement à l'axe de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements produit une hélice à la pointe de l'outil, si cette pointe possède un rayant suffisamment grand par rapport au pas de l'hélice, elle engendre un cylindre. Pour enlever le copeau il faut ajouter aux deux mouvements précédents un troisième mouvement qui consiste à faire entrer l'outil à chaque passe d'usinage d'une certaine profondeur dans la matière. C'est La profondeur de passe (a_p , mm).

a-Limite maximum: Puissance de la machine, rigidité de la pièce et de l'outil, nature du matériau à usiner.

b-Taille de copeau minimum: Finesse de l'arête tranchante, forme du bec de l'outil, nature matériau à usiner.

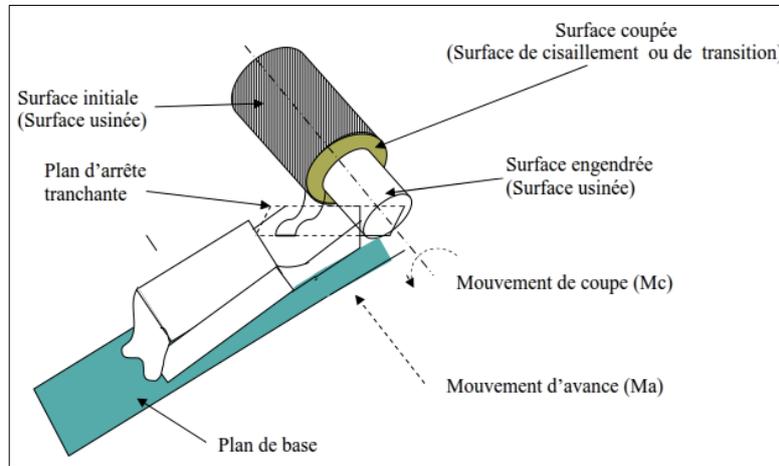


Figure I. 1: Tournage longitudinale.

I.3 Matériaux de l'outil :[2]

Le tournage des aciers durcis par trempe (tournage dur) nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro Grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie. Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont illustré en figure I.2.

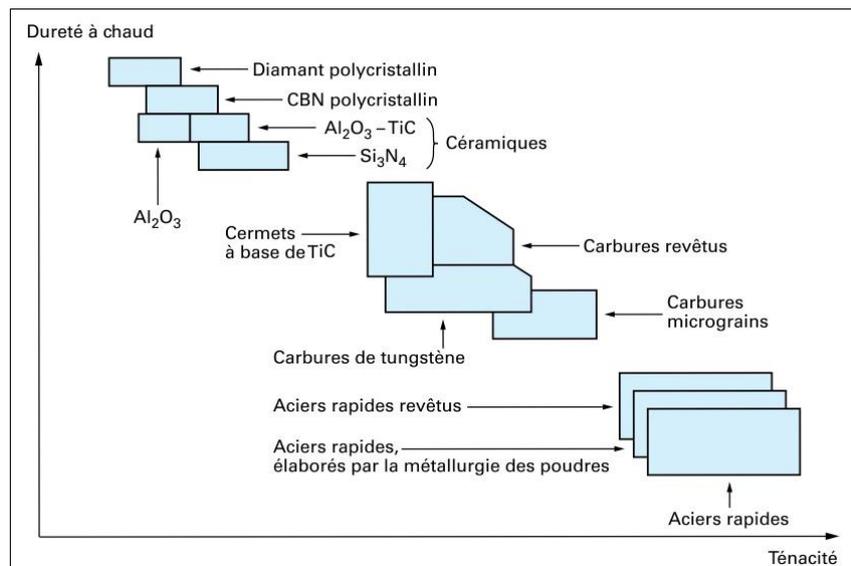


Figure I. 2: Disposition les matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté.[3]

I.3.1 Acier rapides supérieurs ARS :

Les outils ARS (acier rapides supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier fortement allié subissant un traitement thermique, il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forets, où les outils possèdent un faible angle du tranchant. On les utilise avec de faibles vitesses de coupe pour éviter l'échauffement trop important et par conséquent une usure excessive, généralement ils sont des outils monobloc. En générale la composition chimique est présentée comme suit : 0,7 à 1,6% de carbone, 12 à 20 % tungstène, 3,5 à 10% molybdène, vanadium et cobalt, leur fabrication est réalisée par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres.

I.3.2 Carbure :

Les outils en carbures sont les plus utilisés grâce à leur intérêt économique. Ils sont en général utilisés sous forme de plaquettes de différentes formes. Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en aciers ordinaire, la partie active de ces outils étant réaffûtée au fur et à mesure de son usure. Il y a deux types d'outil en carbure :

- Les carbures non revêtus : sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène de titane ...) et de substance liante (cobalt) qui confère sa ténacité à la plaquette.
- Les carbures revêtus : sont des plaquettes de carbure recouvertes d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium.

I.3.3 Cermets :

Cermet, un terme formé de deux syllabes : « cer » vient de céramique et « met » de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de Composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co. Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN, et TiCN et du rapport N/(C+N) qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des Cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques. Les cermets présentent, en outre, une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Les Cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige.

I.3.4 Céramiques :

Les céramiques (figure I.3) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques.

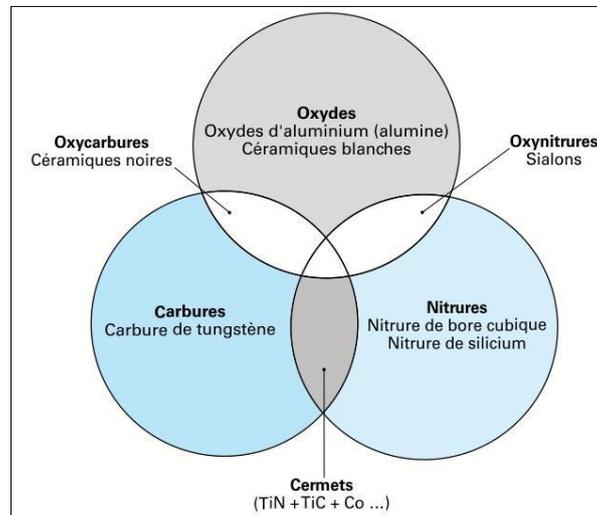


Figure I. 3: Céramiques [3]

La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al_2O_3 . Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à 60HRC (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation.

D'autres céramiques sont également employées. Les céramiques noires qui sont des mélanges d' Al_2O_3 et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircon (ZrO₂), sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al_2O_3 aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe. Le nitrure de silicium Si_3N_4 permet, lors de l'usinage de certains matériaux, des vitesses de coupe une fois et demie à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides ...) il s'emploie à sec. Les céramiques renforcées par des whiskers (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leurs confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires.

Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes et un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe).

I.3.5 Nitrure de bore cubique :

Le CBN est une matière très dure adaptée au tournage de l'acier trempé, de la fonte en coquille et d'alliages à base de nickel ou cobalt. Les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions coupe et de l'arête de coupe. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes céramiques ou en carbure. Les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition.

I.3.6 Diamant :

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffutage des meules, il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650° se transforme en un morceau de graphite. On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Mais, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : Alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables....etc.

I.4 Paramètres technologiques de l'usinage :

I.4.1 Usure des outils de coupe :[4]

a) Principaux types d'usure des outils :

En fonction des conditions d'usinage (la nature de l'outil, du matériau usiné, du type d'usinage et des conditions de coupe) nous pouvons avoir les types d'usures suivantes:

- Usure en dépouille : Ou usure frontale due aux frottements de la surface de coupe de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête tranchante de l'outil (figure I.4 (a)).
- Usure suivant la surface d'attaque : elle se caractérise par une cuvette dite "cratère " formée sur la surface d'attaque de l'outil suite au frottement du copeau sur celle-ci (figure I.4 (b)). Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important quand à l'enroulement et la fragmentation du copeau.
- Fissuration de l'arête : On observe l'apparition de fissures sur l'arête coupante dans le cas des usinages avec des chocs mécaniques ou thermiques, ou avec des vibrations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue. Elle est propre aux outils en carbure métalliques (figure I.4 (c)).
- Rupture (cassure) de la pointe : c'est la destruction totale du bec de l'outil (Observée dans le cas des outils en acier rapide), (figure I.4 (d)).
- Déformation plastique : la pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe. Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée, (figure I.4 (e)).
- Entaille : Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use et il y a un effondrement à cet endroit. L'entaille est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dure, (figure I.4 (f)).

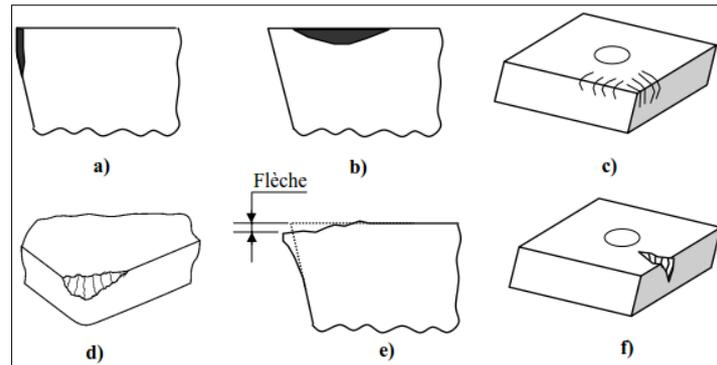


Figure I. 4: Formes d'usure sur les outils de coupe.[20]

b) Evolution de l'usure en fonction du temps d'usinage : [19]

La relation entre la valeur de l'usure et le temps d'usinage est représentée par la courbe illustrée sur la figure I.5 ; que l'on peut scinder en trois parties A, B et C.

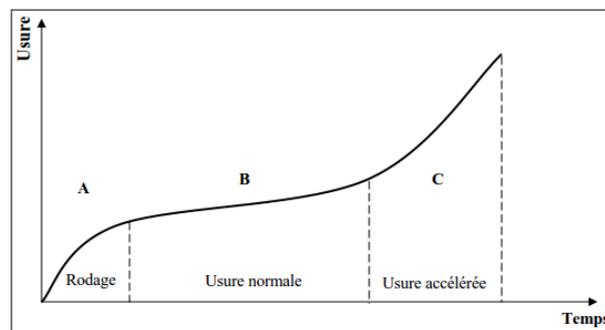


Figure I. 5: Relation Usure - Temps

- La partie A : Représente la période d'usure initiale, on la désigne aussi par la période de rodage. Cette usure est provoquée par l'élimination des aspérités laissées après le réaffûtage de l'outil.

- La partie B : Représente la période d'usure normale. Durant cette période l'usure évolue lentement et est influencée par les conditions de coupe. C'est la période principale qui caractérise la vie d'un outil.

- La partie C : on assiste à l'usure catastrophique de l'outil. L'union de l'usure sur la face en dépouille et celle sur la face d'attaque provoque l'érouissage de l'arête tranchante, et par conséquent l'outil perd ces capacités de coupe.

c) Critères de durées d'outils recommandés par les normes ISO :

Les critères de durée de vie recommandés par les normes I.S.O pour les outils en carbure métallique et céramiques, sont basés sur l'évolution de l'usure frontale ou de la cratérisation

- La destruction de l'arête pour les outils en acier rapide,

- Une largeur moyenne de la bande d'usure $VB = 0,3$ mm si elle est uniforme, sinon la largeur maximale de cette bande $VB_{\max} = 0,5$ mm.
- Une profondeur KT du cratère égale à : $KT = 0,1 + 0,3 f$ (mm) où f est l'avance en mm/tr.

La tenue d'un outil ou sa durée de vie correspond à la valeur du temps de coupe effectif en partant d'un outil neuf jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur fixée du critère de l'usure. Cette durée est limitée et impose un arrêt régulier pour le changement de l'outil.

I.4.2 Modèles de durée de vie et modèles d'usure [18]:

La durée de vie d'un outil est le temps de coupe nécessaire pour attendre un critère de durée de vie spécifique. Pour évaluer la durée de vie, on se réfère à une valeur limite d'un critère direct (VB , KT , ...). A partir des critères d'usure, on établit des modèles de durée de vie. De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour représenter la loi d'usure des outils de coupe, parmi lesquels on donne :

a)- Le modèle de Taylor généralisé :

Taylor en 1907 a essayé de résoudre de façon rationnelle les problèmes qui se posent aux ateliers de fabrication mécanique. Il a dénombré plusieurs facteurs pouvant agir sur la coupe des métaux et a étudié systématiquement leur influence sur la tenue des outils. Il a considéré notamment les rôles de la vitesse de coupe, la pénétration, l'avance et la durée de coupe. Parmi les résultats de ses travaux, le modèle mathématique qui relie la durée effective de coupe T d'une arête à la vitesse de coupe :

$$T = C_v \cdot V^n \quad (I.1)$$

V : Vitesse de coupe

T : Durée de Vie

n : Exposant de TAYLOR

C_v : Constante dépendant des conditions de coupe.

Ce modèle est représenté par une droite dans un graphe à coordonnées logarithmiques

$$\log T = n \cdot \log V + \log C_v \quad (I.2)$$

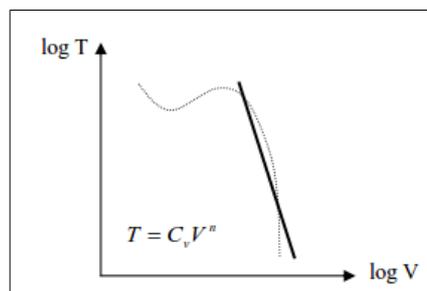


Figure I. 6: Représentation graphique du modèle de Taylor

b)- Le modèle de Kronenberg : [18]

En 1968 a proposé un modèle dérivé de celui de Taylor qui s'écrit sous la forme :

$$T = C (V+K)^n \tag{I.3}$$

Ou encore :

$$T + K = CV^n \tag{I.4}$$

En prenant le logarithme des deux parties de la relation (I.4), on aura :

$$\text{Log } (T+K) = n \text{ log } (V) + \text{log } (C) \tag{I.5}$$

Posant : $x = \text{log } (V)$; $y = \text{log } (T+K)$, on obtient :

$$Y = nx + \text{log } (C) \tag{I.6}$$

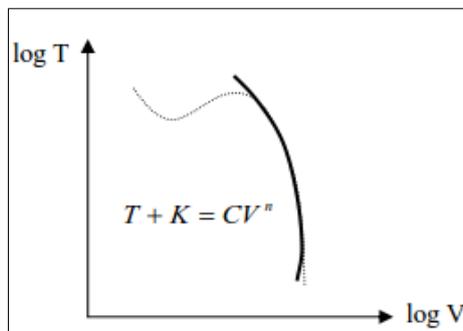


Figure I. 7: Représentation graphique du modèle de Kronenberg

c)- Le modèle de König – Dépiereux :

Ont tenu compte des phénomènes physico-chimiques à l'interface et le mécanisme de diffusion de la matière qui en résulte. Ils ont proposé un modèle de type exponentiel qui est en accord avec les lois expérimentales qui déterminent l'usure des outils (figure I.20). Ce modèle est de la forme :

$$T = \exp(-\alpha_0 V^v - \gamma f^\mu - \delta a^\lambda) \tag{I.7}$$

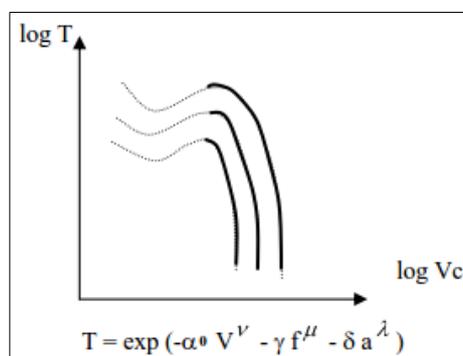


Figure I. 8: Représentation graphique du modèle de König – Dépiereux

Compte tenu des dispersions liées aux essais d'usure, le modèle simple de Taylor est suffisamment représentatif, il est couramment utilisé aujourd'hui pour tous les matériaux d'outils.

I.4.3 État de surface : [5]

a) Définition :

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce. Les mesures de rugosité peuvent s'effectuer à l'aide d'un rugosimètre 2D ou 3D. Les résultats de mesures sont alors un profil (mesure 2D) ou une surface reconstruite à partir de plusieurs profils (mesure 3D, exemple figure 1.10). Le relief d'une surface mesuré en 2D peut-être représenté sous la forme d'une fonction $z(x) = h$ où x est la position du point courant sur la longueur d'évaluation de la surface et h la mesure de la hauteur du défaut à cette position.

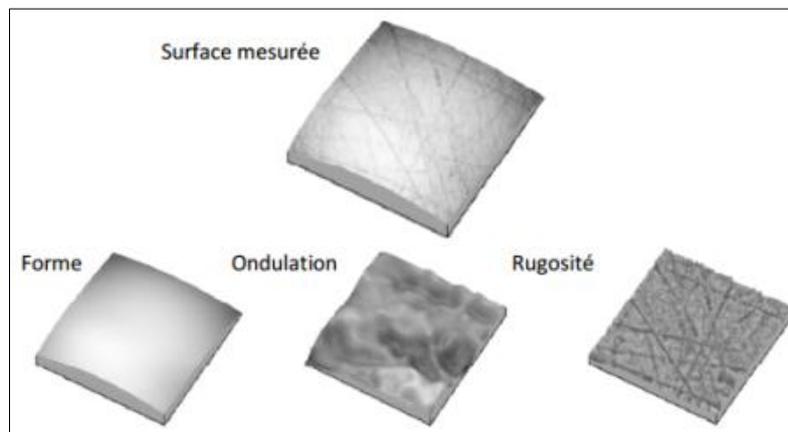


Figure I. 9 Décomposition d'une surface mesurée.

Des méthodes distinctes sont utilisées en fonction du type d'irrégularité à isoler. Ainsi, un filtrage par approximation polynomiale permet de supprimer les défauts du premier ordre. Le profil filtré peut être alors séparé en deux profils à l'aide d'un filtre gaussien : ondulation d'une part, rugosité d'autre part. Toutes ces étapes sont normalisées [ISO 4288 96]. Ainsi, la fréquence de coupure du filtre est normalisée en fonction de la rugosité arithmétique du profil (R_a). Il existe de nombreux indicateurs mais la pratique montre qu'un nombre restreint (R_a , $R_t...$) d'entre eux est utilisé. Le paramètre de rugosité le plus fréquemment utilisé est (R_a). Il correspond à la rugosité arithmétique et représente la moyenne arithmétique des pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesurée sur une longueur d'évaluation l . Son expression est la suivante :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (I.8)$$

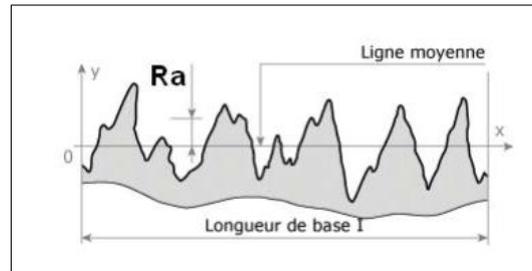


Figure I. 10 Rugosité moyenne arithmétique Ra

D'autres paramètres classiques sont définis comme suit : Rp : la hauteur maximale du pic le plus élevé observé par rapport à la ligne moyenne sur la longueur analysée Rt : rugosité totale, la hauteur entre le pic le plus élevé et la vallée la plus profonde sur la longueur analysée Rq : écart moyen quadratique

b) Rugosité des surfaces en usinage

Les procédés courants d'usinage permettent d'obtenir un Ra compris entre 1,6 et 6,3 μm . En tournage et en fraisage, un certain nombre de facteurs agissent particulièrement sur la rugosité. L'état de surface en tournage de finition dépend principalement de l'avance f et du rayon de bec r_ϵ . Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit tenir compte de ces influences. La rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal : Si le rayon de plaquette est grand par rapport à l'avance, la hauteur maximale du profil (Rt) est donnée par :

$$Rt = 125 \cdot \frac{f^2}{r_\epsilon} \quad (1.9)$$

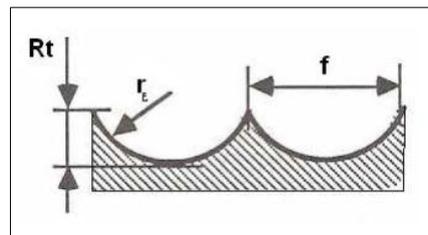


Figure I. 11 Rugosité théorique

I.4.4 Efforts de coupe [6]

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

a) Définition et intérêt de leur mesure :

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe F_t , peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes (Figure I.12).

- F_c : composante dans le sens de V_c , appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

- F_a : composante dans le sens de V_a , appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.

- F_f : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.

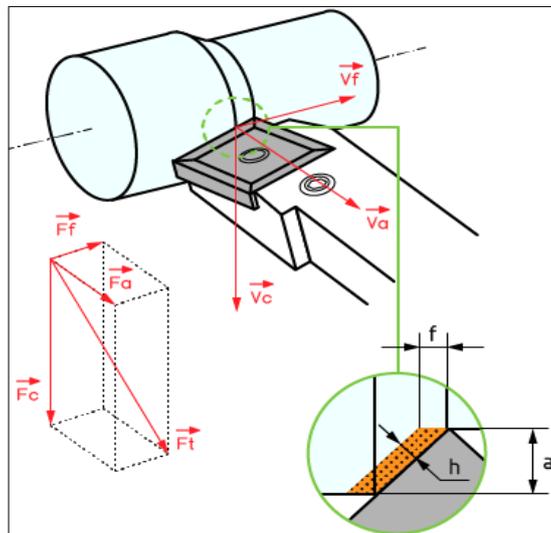


Figure I. 12 Composantes de l'effort de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe, aussi elle est nécessaire pour l'évaluation du rendement mécanique d'une machine-outil. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machine et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau.

D'après la figure I.12, la force de coupe résultante F_t , étant une diagonale du parallélépipède elle sera donnée par l'expression.

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_a^2 + F_f^2} \quad (I.10)$$

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

b) Influence de la profondeur de passe et de l'avance. [21]

Avec l'augmentation de ces deux facteurs, la section droite du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus fort à la formation du copeau et la valeur des composantes F_V , F_a et F_p nécessaire pour assurer la coupe est plus importante. En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance.

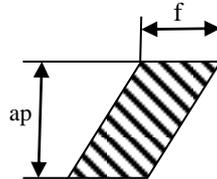


Figure I. 13 Section droite d'un copeau

c) Influence de la vitesse de coupe

Pour des vitesses de coupe situées dans la plage de formation de l'arête rapportée, l'effort de coupe accuse un maximum, puis diminue à nouveau (Figure I.14).

- Zone1** : À faible vitesse, le frottement outil copeau est faible, F_c est faible.
- Zone2** : L'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation des frottements et par suite de l'effort tangentiel de coupe.
- Zone3** : L'arête rapportée diminue quand V augmente, F_c diminue également et se stabilise vers 200m/min.

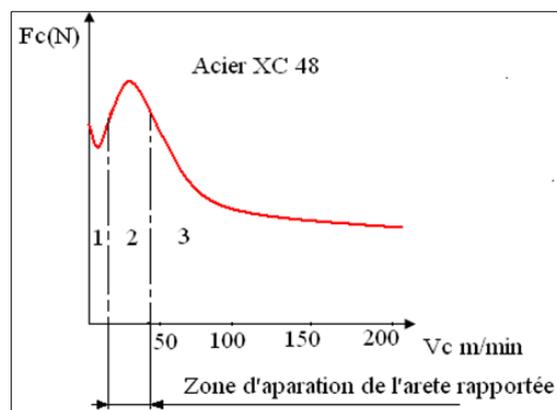


Figure I. 14 Influence de la vitesse sur l'effort de coupe lors de l'usinage des matériaux ductiles [7]

I.5 Usinabilité [8]

L'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité plus ou moins grande d'un matériau à être amené par enlèvement de copeau, à une forme et à des côtes fixées. Cette faculté étant caractérisée par la vie de l'outil, définie par les critères d'usure dans les conditions d'un type d'usinage. L'aptitude à l'usinage dépend des caractéristiques mécaniques du matériau mis en œuvre, de sa structure micrographique et des phases dispersées dans la matrice dont l'action peut être bénéfique ou néfaste. Ces caractéristiques sont déterminées, dès l'état liquide au cours de l'élaboration du métal de compositions données, des conditions de sa solidification,

de sa forme sous des efforts mécaniques et des cycles thermiques subis. On distingue aujourd'hui les aciers de décolletage pour lesquels l'usinabilité maximale est recherchée même au détriment des caractéristiques mécaniques (pièce peut sollicitées) et les aciers à usinabilités améliorés qui doivent avoir de hautes caractéristiques après traitement (pièce fortement sollicitées). Les inclusions qui jouent un très grand rôle dans l'usinabilité peuvent être présentes involontairement ou provoqués. Leur morphologie et localisation ont une grande importance. Il semble que l'on puisse dire que toutes choses étant égales par ailleurs, la meilleure usinabilité est obtenue par la combinaison des éléments présents conduisant à la fois des niveaux de dureté et fragilité convenable. Dans le domaine des aciers spéciaux il y a lieu de distinguer les éléments formant des carbures (vanadium, tungstène...), ceux entrant en solution solide dans la matière (nickel, silicium...) et ceux présentant les des caractéristiques (manganèse, chrome...).

L'aptitude d'usinage du matériau se réfère principalement à :

- l'état de surface usinée.
- L'effort spécifique de coupe.
- La durée de vie de l'outil.

De façon générale les paramètres influant sur l'usinabilité et les conséquences requises sont résumés dans la figure I.15:

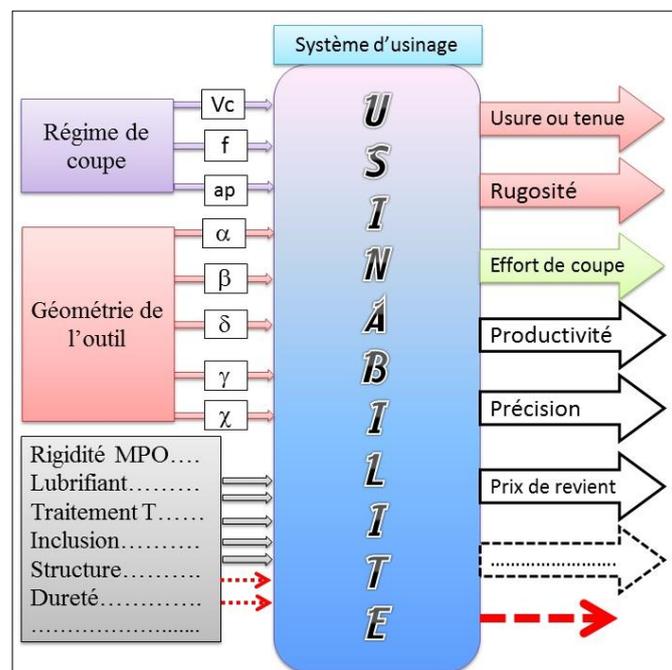


Figure I. 15 : Paramètres influents sur l'usinabilité.

I.6 Le Tournage Dur (TD) : [9]

I.6.1 Définition du tournage dur :

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.16). 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. 16 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.

I.6.2 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'usiner 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.

I.7 les plans d'expériences :

I.7.1. introduction : [10]

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles .Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type : $y = f(x_i)$ Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

I.7.2 Méthode de Taguchi : [11]

Les méthodes de plans de Taguchi se distinguent des procédures de contrôle qualité traditionnelles et des expérimentations industrielles à différents égards. Parmi les plus importants :

a) Le concept de fonctions de perte de qualité :

La perte de qualité est une fonction quadratique d'écart à une valeur nominale, vous devez vous attacher, pour accroître la qualité, à minimiser les écarts au carré ou la variance du produit autour des spécifications nominales (idéales), plutôt qu'à maximiser le nombre d'unités à l'intérieur des limites de spécification.

b) L'utilisation de ratios signal/bruit (S/N)

La qualité peut être quantifiée en termes de réponse du produit respectif aux facteurs de bruit et de signal. Le produit idéal ne répondra qu'aux signaux du technicien et ne sera pas perturbé par les facteurs de bruit aléatoire (conditions climatiques, température, humidité, etc...). Par conséquent, le but des efforts d'amélioration de la qualité peut se résumer à maximiser le ratio signal/bruit (S/B) du produit respectif.

L'optimum est un minimum (smaller-the-better). Lorsque vous souhaitez minimiser les occurrences de certaines caractéristiques indésirables du produit, vous pouvez calculer le ratio S/B suivant :

$$\text{Eta} = -10 * \log_{10} [(1/n) * \sum (y_i^2)] \quad \text{pour } i = 1 \text{ au nombre de vars} \quad (\text{I.11})$$

Ici, Eta représente le ratio S/B obtenu ; n est le nombre d'observations pour le produit particulier et y est la caractéristique respective.

L'optimum est le nominal (nominal-the-better). Ici, vous avez une valeur de signal fixée (valeur nominale) et la variance autour de cette valeur peut être considérée comme le résultat des facteurs de bruit :

$$Eta = 10 * \log_{10} (\text{Moyenne}^2 / \text{Variance}) \quad (\text{I.12})$$

L'optimum est un maximum (larger-the-better).

$$Eta = -10 * \log_{10} [(1/n) * \sum (1/y_i^2)] \quad \text{pour } i = 1 \text{ au nombre de vars} \quad (\text{I.13})$$

c) L'utilisation de matrices orthogonales.

Le troisième aspect des méthodes de plans robustes de Taguchi est sans conteste le plus proche des techniques traditionnelles. Taguchi a développé un système de plans (matrices) permettant d'estimer le maximum d'effets principaux, sans biais (de manière orthogonale), avec un nombre minimum d'essais dans l'expérience.

I.7.3 Notion de surface de réponse : [10]

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs. A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure I.16). Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

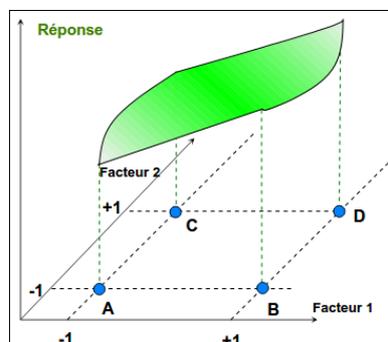


Figure I. 17: surface de réponse formée par les réponses aux points du domaine d'étude.

Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.

Partie 2 : Etat de l'art

Cette partie présente des travaux intéressants qui ont pour objectif final la détermination des conditions de coupe optimaux c'est-à-dire qui permettent l'amélioration de certains paramètres technologiques. Les principales méthodes utilisées sont l'analyse de Taguchi et la maximisation de la fonction de désirabilité dans la méthodologie de surface de réponse.

I.8 Étude de l'usinabilité en tournage de finition de l'acier à outil AISI H13 avec un outil de coupe CBN en utilisant la méthodologie RSM.

Dans leur étude Kumar, P et autres [12], ont examiné les effets des paramètres d'usinage comprenant la dureté de la pièce dans une gamme de 45-55 HRC sur les efforts de coupe (F_c et F_t), la rugosité de surface et la température de coupe (T) lors du tournage de finition de l'acier AISI H13 avec un outil CBN. Un plan RSM composite centré a été utilisé pour la planification des expériences. Cette étude a indiqué que les efforts de coupe sont principalement influencés par la dureté du matériau de la pièce, ainsi que par l'avance par tour et la profondeur de passe. Par contre l'augmentation de la dureté du matériau de travail a permis une meilleure rugosité de la surface ainsi que l'augmentation de la température de coupe. Les paramètres optimaux sont obtenus grâce à la technique d'optimisation multi-objective en utilisant l'approche de la fonction de désirabilité.

I.8.1 Procédure expérimentale :

Les expériences ont été effectuées sur une

Machine-outil : tour CNC SPRINT 16 TC (Batliboi).

Mesure de la rugosité : Mitotoyo marque (SJ-301).

Mesure des efforts de coupe : dynamomètre en liaison avec le logiciel de XKM avec un ordinateur personnel (PC) utilisé pour l'acquisition de données.

Matière usinée: Acier à outil AISI H13 (AFNOR Z40CDV5).

Outils de coupe : SUMITOMO CCMT 09T3 (nitrure de bore cubique (CBN), angle de dépouille = 7° , le rayon du bec 0,8mm.

I.8.2 Optimisations multi-réponse par l'approche de désirabilité :

La Figure I.18 montre La courbe de surface de réponse 3D pour la fonction de désirabilité globale en fonction de l'avance par tour et de la vitesse de coupe.

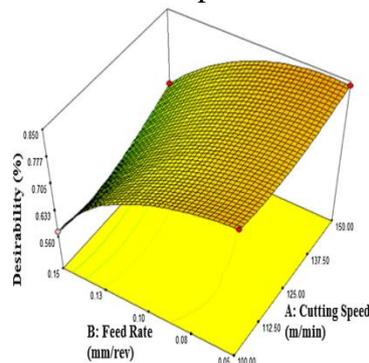


Figure I.18 Courbe de surface de réponse 3D pour la fonction globale de désirabilité.

La courbe de surface pour la fonction globale de désirabilité indique que la valeur élevée de la désirabilité correspond à une faible avance et une vitesse de coupe élevée. Le Tableau I.1 montre les résultats optimaux, où la meilleure solution correspond à la plus grande valeur de la désirabilité.

Tableau I.1 Combinaisons différentes de paramètres avec la fonction de désirabilité:

Sol. No.	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Workpiece hardness	Surface roughness	Tangential force (F_c)	Thrust force (F_t)	Tool tip temp.	Desirability	
1	149.99	0.06	0.05	45.07	0.405112	29.2154	44.0002	463.018	0.841	Selected
2	150	0.06	0.05	45	0.407962	28.7991	43.4551	463.143	0.841	
3	150	0.07	0.05	45	0.418456	30.4036	44.6821	459.665	0.839	
4	150	0.07	0.05	45	0.419289	30.4682	44.7469	459.549	0.838	
5	150	0.05	0.05	45.01	0.408088	27.8667	43.0862	465.869	0.838	

D'où, la solution optimale pour l'usinage de l'acier à outils AISI H13 permettant l'obtention d'une rugosité minimale (R_a), de faibles efforts (F_c) et (F_t) et une température de coupe. (T) minimale est donnée par $V_c = 149,99$ m/min, $f = 0,06$ mm/tr, $a_p = 0,05$ mm et une dureté 45HRC, ce qui correspond à $R_a = 0,405$ μ m, $F_c = 29.21$ N, $F_t = 44.00$ N et $T = 463$ °C.

I.8.3 Conclusions :

On peut conclure les résultats suivants de l'étude expérimentale ci-dessus :

1. l'étude a montré que la dureté de la pièce est le paramètre le plus influent sur toutes les réponses. Les résultats ont indiqué qu'il y a une diminution de rugosité de la surface avec l'augmentation de la dureté de la pièce et la vitesse de coupe. A la faible dureté de la pièce (45 HRC), la rugosité de surface est de 2 à 3 fois supérieure à la rugosité de surface correspondant à la plus grande dureté (55 HRC). Il peut également être observé l'effet négatif de l'avance par tour et les profondeurs de passe.
2. La profondeur de passe et la dureté de la pièce sont les paramètres les plus dominants de l'effort tangentiel et de l'effort radial, suivi par l'avance par tour, la vitesse de coupe à moins d'effets significatifs sur l'effort de coupe.
3. La dureté de la pièce, l'avance par tour et la vitesse de coupe sont rapportées comme paramètres les plus dominants pour la température de coupe, alors que la profondeur de passe possède un moindre effet.
4. L'application de la fonction globale de désirabilité montre que les conditions de coupe optimales pour la rugosité de surface, l'effort tangentielle, les efforts radiaux et de la température à la pointe de l'outil sont $V_c = 149,9$ (m / min), $a_p = 0,05$ (mm), $f = 0,06$ (mm/tr) et la dureté 45 (HRC).

I.9 Evaluation des efforts de coupe dans le tournage dur de l'acier AISI 52100 en utilisant la méthode Taguchi.

Bagawade, A et autres [13] ont étudié l'usinabilité de l'acier durci AISI 52100 et ont exprimé en termes de variables de performance tels que le débit de copeau par unité de temps, les efforts de coupe, l'usure de l'outil, l'état de la surface ... etc. Dans cette analyse statistique du processus a été effectuée afin d'étudier l'effet des facteurs

d'entrée sur les variables de sortie, c.-à-d. les efforts de coupe (mesures de performance). Le document donne premier fond de cette étude, l'installation et la conception expérimentale sont ensuite discutées, avec les observations expérimentales sur les forces de coupe.

I.9.1 Procédure expérimentale :

Dans cette étude les conditions expérimentales sont les suivantes :

Matière usinée : Acier AISI 1050 (AFNOR XC48TS). Avec une dureté de 48 ~ 50 HRC,

Machine-outil utilisée : Tour CNC Mod. ACE.

Outil de coupe :

Plaquette NPCNMA120408G (CBN non revêtues - Mitsubishi).

Porte plaquette PCLNR 2525M (Make- WIDIA) avec la géométrie $\gamma=-5^\circ$, $r_\epsilon=0,8$ mm.

I.9.2 Résultats expérimentaux et discussions :

a) Analyse statistique de la force axiale (Fx) :

Le Tableau I.2 de l'analyse ANOVA de l'effort axial montre que la profondeur de passe est le paramètre de coupe principal qui affecte (Fx).

Le deuxième facteur influent sur Fx est la vitesse de coupe. L'avance par tour a un effet négligeable sur l'effort axial.

Tableau I. 2 Résultat d'ANOVA pour la force axiale (Fx)

Source	Sum of Squares (SS)	Degrees of Freedom (DOF)	Mean Sq. (MS)	F-Val. $\alpha=5\%$	P-Val.
V	1698.6	2	849.3	0.90	0.527
f	193.5	2	96.7	0.10	0.907
d	2198.0	2	1099.0	1.16	0.462
Error	1888.8	2	944.4	--	--
Total	5978.9	8	849.3	--	--

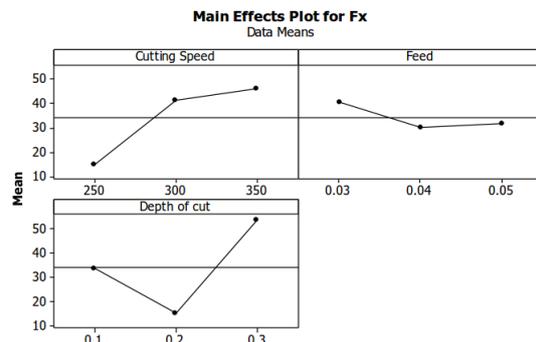


Figure I.19 Graphe des effets principaux Fx.

Sur la base du rapport S/N et l'analyse ANOVA, les paramètres de coupe permettant de minimiser l'effort axial sont la vitesse de coupe à 250 m / min, l'avance par tour à 0,04 mm/tr, et la profondeur de passe a 0.2mm.

b) Analyse statistique des forces radiales (Fy) :

L'avance par tour a un effet négligeable sur la force radiale. Par conséquent, sur la base du rapport signal / bruit et de l'analyse ANOVA, les paramètres de coupe optimaux sont la vitesse de coupe de 250 m/min, l'avance par tour à 0,04 mm/tr., Et la profondeur de passe de 0,2 mm.

Tableau I. 3 résultat d’ANOVA pour la force radiale (Fy)

Source	Sum of Squares (SS)	Degrees of Freedom (DOF)	Mean Sq. (MS)	F-Val. $\alpha=5\%$	P-Val.
V	2794	2	1397	1.39	0.418
f	230	2	115	0.11	0.897
d	3113	2	1557	1.55	0.392
Error	2005	2	1003	--	--
Total	8142	8		--	--

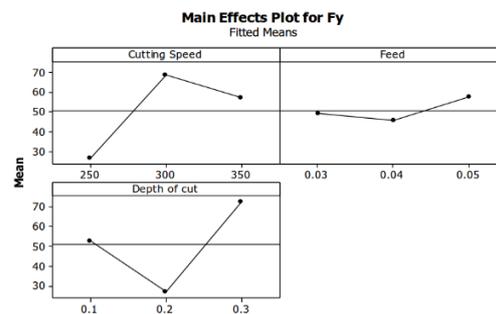


Figure I.20 graphe des effets principaux Fy.

c) **Analyse de la Force tangentielle (Fz) :**

L'ANOVA (Tableau I.4) montre que la vitesse de coupe et le facteur principal affectant l'effort de coupe tangentiels Fz. L'avance par tour a un effet négligeable sur l'effort tangentiels.

Tableau I. 4 résultat d’ANOVA pour la Force tangentielle (Fz)

Source	Sum of Squares (SS)	Degrees of Freedom (DOF)	Mean Sq. (MS)	F-Val. $\alpha=5\%$	P-Val.
V	1984.4	2	992.2	1.25	0.444
f	375.0	2	187.5	0.24	0.809
d	1729.0	2	864.5	1.09	0.479
Error	1586.5	2	793.3	--	--
Total	5674.8	8	992.2	--	--

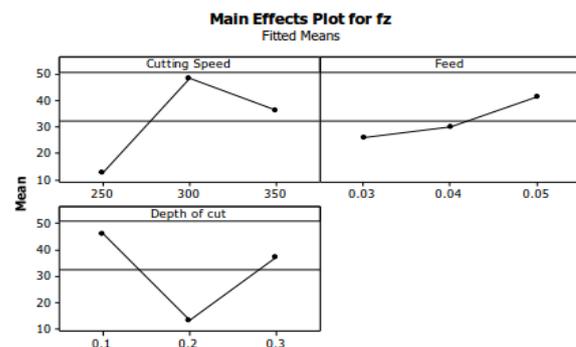


Figure I.21 Graphe des effets principaux Fz

Sur la base du rapport S/N et l'analyse ANOVA, les paramètres de coupe optimaux pour les forces sont la vitesse de coupe de 250 m / min, l'avance par tour à 0,03 mm / tr, et la profondeur de passe à 0.2mm.

I.9.3 conclusions :

- La composante de force radiale est la plus élevée comparée aux deux autres composantes de l'effort de coupe.
- La vitesse de coupe et la profondeur de passe étaient les facteurs les plus influents sur la force radiale. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, les forces diminuent en raison de la température élevée dans la zone de coupe.

I.10 Analyse de la rugosité de surface et des efforts de coupe dans le tournage dur avec un outil de CBN : Modélisation et l'optimisation des conditions de coupe.

Aouici H, et autres [14] ont mené une étude expérimentale des effets de la vitesse de coupe, l'avance par tour, la dureté de la pièce et les profondeurs de passe sur la rugosité de surface et les composantes de l'effort de coupe lors du tournage dur de l'acier AISI H11 durci, usiné à l'aide d'un outil CBN. Les quatre-facteur (Vc, f, ap et la dureté) à trois niveaux servent à la mise en œuvre d'un plan d'expérience. Les

modèles mathématiques de la rugosité de surface et des efforts de coupe ont été déduits en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). Les résultats montrent que les efforts de coupe sont influencés principalement par les profondeurs de passe et la dureté de la pièce ; d'autre part, l'avance par tour et la dureté de la pièce a une signification statistique sur la rugosité de surface. Enfin, un régime de coupe optimale est proposé pour la production industrielle de série.

I.10.1 Procédure expérimentale :

Dans cette étude les conditions expérimentales sont les suivantes :

Matière usinée : Acier AISI H11 (X38CrMoV51), la composition chimique: 0.35 %C; 5.26%Cr ; 1.19%Mo ; 0.50% V ; 1.01%Si ; 0.32%Mn ; 0.002%S ; 0.016%P ; 90.31%Fe, autres éléments 1.042%.

Machine-outil utilisée : tour universel Modèle SN 40C (P =6.6 kW).

Outil de coupe :

Plaquette SNGA12 04 08 S01020 (CBN7020 de SANDVIK).

Porte plaquette PSBNR 25 25 K12 avec la géométrie $\gamma=-6^\circ$; $\chi_r=+75^\circ$; $\lambda=+6^\circ$.

Mesure de la rugosité : profilomètre (Kistler 9257B).

I.10.2 Analyse statistique :

Le Tableau II.5 de l'ANOVA de Ra montre que l'avance par tour (f) est le facteur le plus significatif avec 31,08% de contribution, parce que son augmentation produit des sillons d'hélicoïdaux le résultat de l'interaction pièce-outil. Ces sillons sont plus profonds et plus large avec l'augmentation de l'avance par tour. L'interaction (Vc* f), (Vc* H), (f* ap), (f* H) et les termes carrés ap^2 et H^2 ont tous un effet significatif sur la rugosité de la surface.

Experimental results for surface roughness parameters and cutting force components
Résultats expérimentaux pour des paramètres de rugosité de la surface et des composantes d'efforts de coupe

Tableau I. 5 Résultat d'ANOVA pour la rugosité de la surface(Ra).

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	

Le modèle de rugosité Ra est donné ci-dessous.

$$Ra = -9.872 - 0.0106Vc + 2.758f + 0.4905ap + 0.496H + 0.0334Vc \cdot f + 1.111 \cdot 10^{-3} Vc \cdot ap + 2.416 \cdot 10^{-4}$$

$$Vc \cdot H + 14.583f \cdot ap - 0.337f \cdot H - 0.01334ap \cdot H - 1.143 \cdot 10^{-5} Vc^2 + 20.346f^2 - 2.829ap^2 - 5.596H^2 \dots \text{(I.14)}$$

Son coefficient de détermination R^2 est 91.43%.

Tableau I.6 montre les résultats d'ANOVA pour la composante tangentielle Fv de l'effort de coupe. Cette analyse est réalisée pour une signification ajustée de 5%, c.-à-d., pour un niveau de confiance de 95%. Sur toutes les variations indiquant le degré d'influence sur le résultat, la profondeur de passe (ap) est le facteur de plus grand influence sur l'effort de coupe Fv avec une contribution de 31,498%.

Tableau I. 6 Les résultats d'ANOVA de l'effort tangentiel (Fv).

Source	Sum of square	DF	Mean square	F-value	Prob.	Cont. %	Remarks
Model	90402.85	14	6457.35	6.35	0.0007		Signifiant
Vc	146.09	1	146.09	0.14	0.7103	0.139	No signifiant
f	13960.54	1	13960.54	13.73	0.0023	13.366	Signifiant
ap	32898.84	1	32898.84	32.37	<0.0001	31.498	Signifiant
H	20947.66	1	20947.66	20.61	0.0005	20.055	Signifiant
Vc × f	156.88	1	156.88	0.15	0.7003	0.150	No signifiant
Vc × ap	8481.49	1	8481.49	8.34	0.0119	8.120	Signifiant
Vc × H	220.08	1	220.08	0.22	0.6489	0.210	No signifiant
f × ap	390.06	1	390.06	0.38	0.5456	0.373	No signifiant
f × H	139.12	1	139.12	0.14	0.7170	0.133	No signifiant
ap × H	844.19	1	844.19	0.83	0.3775	0.808	No signifiant
Vc2	3976.70	1	3976.70	3.91	0.0680	3.807	No signifiant
f2	308.90	1	308.90	0.30	0.5901	0.295	No signifiant
ap2	0.68	1	0.68	6.6E-04	0.9798	0.00065	No signifiant
H2	7744.21	1	7744.21	7.62	0.0153	7.414	Signifiant
Error	14230.46	14	1016.46			13.624	
Total	1.046E + 05	28					

Les résultats prouvent que les composantes d'effort de coupe sont influencées principalement par la profondeur de passe et la dureté de la pièce ;

Le modèle de l'effort tangentiel (Fv) est donné par l'équation suivante son coefficient de détermination est 86.40%.

$$F_v = 1963.62 + 0.426V_c + 1952.79f + 1952.79ap - 109.311H - 2.609V_c * f - 5.116V_c * ap - 0.0247V_c * H + 1645.833f * ap + 29.487f * H - 19.37ap * H + 6.877 * 10^{-3}V_c^2 - 4313.07f^2 - 14.374ap^2 + 1.382H^2 \dots (I.15)$$

Son coefficient de détermination R² est 86.40%.

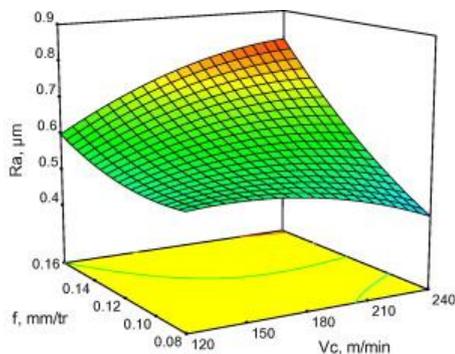


Figure I.22 Effet de la vitesse de coupe et l'avance par tour sur la rugosité de surface (ap = 0.30 mm, H = 45 HRC).

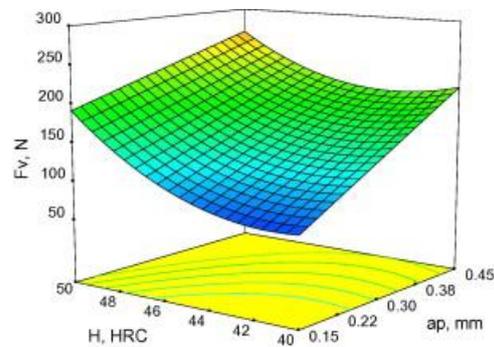


Figure I.23 Effet de dureté de la pièce et la profondeur de passe sur l'effort tangentielle (Vc = 180 m/min, f = 0.12 mm/tr).

Afin d'étudier les influences des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface (R_a), Figure I.22 représente l'influence de la vitesse de coupe (V_c) et l'avance par tour (f) de la rugosité de surface (R_a). La meilleure rugosité de surface est réalisée avec la combinaison de la plus basse de (f) et la plus élevée de (V_c).

Figure I.23 montre la variation de l'effort tangentiel (F_v) avec la dureté de la pièce (H) et la profondeur de passe (a_p). L'effort tangentiel minimal est réalisé avec la dureté plus petite de la pièce et la profondeur de coupe minimale.

I.10.3 L'optimisation des conditions de coupe :

Nous considérons que les conditions de fabrication optimales pour l'acier (AISI H11) sont ceux qui minimisent les valeurs de coupe composantes de force (F_a , F_r et F_v) et la rugosité de surface (R_a) pendant le processus de tournage dur. Le Tableau I.7 montre les résultats de l'optimisation de RSM (composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_v) et la rugosité de surface (R_a) par ordre décroissant de niveau de désirabilité. Les composantes optimisées de la rugosité de surface (R_a) et (F_a , F_r et F_v) sont (0,327 à 0,340) μm , [(33,91 à 38,78); (90,12 à 102,38) et (63,85 à 77,57)] N, respectivement.

Tableau I. 7 Optimisation de RSM pour les paramètres et les composantes d'efforts de coupe.

Test N°	V_c m/min	f mm/rev	a_p mm	H HRC	Forces			Surface roughness	Desirability
					F_a , N	F_r , N	F_v , N	R_a , μm	
1	189.53	0.08	0.15	42.00	33.91	91.29	63.85	0.339	0.999
2	191.05	0.08	0.15	42.05	34.46	91.29	65.62	0.339	0.999
3	191.30	0.08	0.15	42.04	34.97	92.85	67.03	0.339	0.999
4	193.69	0.08	0.15	42.16	35.14	90.12	67.85	0.340	0.998
5	191.05	0.08	0.16	42.00	36.87	95.76	68.72	0.339	0.998
6	192.28	0.09	0.15	42.00	36.40	97.08	70.96	0.340	0.998
7	197.76	0.08	0.15	42.12	36.51	91.53	72.58	0.327	0.998
8	195.31	0.09	0.15	42.00	38.78	102.3	77.57	0.340	0.997

I.10.4 Conclusions :

Les conclusions les plus importantes qui peuvent être tirées sont les suivantes :

- Cette étude montre que l'avance par tour et la dureté de la pièce ont une influence statistique significative sur la rugosité de surface. Les effets d'interactions de l'avance par tour et la profondeur de coupe, vitesse de coupe et dureté, vitesse de coupe et l'avance par tour, dureté et avance par tour, ainsi que les termes (H^2 et a_p^2) ont également une influence non négligeable.
- l'effort axial (F_a) et l'effort de coupe tangentiel (F_v) sont fortement influencés par la profondeur de passe, (56.77%) et (31.50%) respectivement. Par contre, la vitesse de coupe a une très faible influence (0.14%).
- la meilleure rugosité de la surface a été obtenue avec l'avance par tour minimale et à la vitesse de coupe la plus élevée.

I.11 Analyse des paramètres d'usinage, en tournage sous lubrification MQL, basée sur un plan de Taguchi et la Méthodologie de Surface de Réponse.

Sarikaya, et autres [15] ont utilisé la méthodologie des plans d'expériences pour étudier l'effet des principaux paramètres de tournage tels que la lubrification et les paramètres de coupe sur la rugosité lors du tournage de l'acier AISI 1050. Des essais ont été réalisés à sec (DC), avec refroidissement par lubrification classique (CC) et MQL. Ces essais sont planifiés selon la table L_{16} ($4^3 \times 2^1$) de Taguchi. L'analyse ANOVA a été réalisée pour évaluer l'influence des paramètres d'usinage sur Ra et Rz. Les paramètres d'usinage optimaux ont été déterminés à l'aide du rapport signal/bruit et de la fonction de désirabilité. Les modèles mathématiques ont été déduits pour les deux critères de rugosité de surface, (Ra et Rz), grâce à la méthodologie de surface de réponse (RSM).

I.11.1 Procédure expérimentale :

Les conditions expérimentales de l'étude sont:

Matière usinée : Acier AISI 1050 (AFNOR XC48TS).

Machine-outil utilisée : Tour CNC Mod. Falco FI-8 (P = 15 kW).

Outil de coupe :

Plaquette SNMG 120408-QM GC1125 (carbure revêtu PVD TiAlN)

Porte plaquette PSBNR 2020 K12 avec la géométrie $\gamma = -6^\circ$; $\chi_r = 75^\circ$; $\lambda = 6^\circ$.

Mesure de la rugosité : profilomètre TIME TESTER TR100 à trois emplacements différents pour réduire au minimum les erreurs.

Tableau I. 8 Le plan expérimental, les résultats mesurés et leurs ratios de S/N calculées.

Exp. No.	Actual values				Experimental results and their S/N ratios			
	C-cooling	Vc (m/min)	f (mm/rev)	a (mm)	Ra (μm)	S/N (dB)	Rz (μm)	S/N (dB)
1	DC	80	0.07	1.2	1.10	-0.827	11.25	-21.023
2	DC	120	0.1	1.2	1.01	-0.086	10.00	-20.000
3	DC	160	0.14	1.8	1.20	-1.583	13.10	-22.345
4	DC	200	0.18	1.8	1.22	-1.727	14.20	-23.045
5	CC	80	0.1	1.8	1.02	-0.172	9.50	-19.554
6	CC	120	0.07	1.8	1.07	-0.587	10.03	-20.026
7	CC	160	0.18	1.2	1.29	-2.211	14.20	-23.045
8	CC	200	0.14	1.2	1.09	-0.748	11.10	-20.906
9	MQL (60 mL/h)	80	0.14	1.2	1.12	-0.984	11.70	-21.363
10	MQL (60 mL/h)	120	0.18	1.2	1.15	-1.213	11.90	-21.510
11	MQL (60 mL/h)	160	0.07	1.8	0.93	0.630	8.65	-18.740
12	MQL (60 mL/h)	200	0.1	1.8	0.90	0.915	8.79	-18.879
13	MQL (120 mL/h)	80	0.18	1.8	1.21	-1.655	13.30	-22.477
14	MQL (120 mL/h)	120	0.14	1.8	1.13	-1.061	11.40	-21.138
15	MQL (120 mL/h)	160	0.1	1.2	0.90	0.915	8.50	-18.588
16	MQL (120 mL/h)	200	0.07	1.2	0.80	1.938	7.85	-17.897

(DC : Usinage à sec, CC : lubrification classique, MQL : quantité minimale de lubrification)

I.11.2 Effet des facteurs sur la rugosité :

L'arrosage et Vc (Figure I.24 a) ont une influence pas très importante sur Ra, la meilleure rugosité est obtenue par la lubrification MQL (120 ml/min). La Figure I.24 b montre que l'augmentation de l'avance conduit a une augmentation importante de Ra. En fin la Figure I.24 c montre que la profondeur de passe n'a pas influence sur Ra.

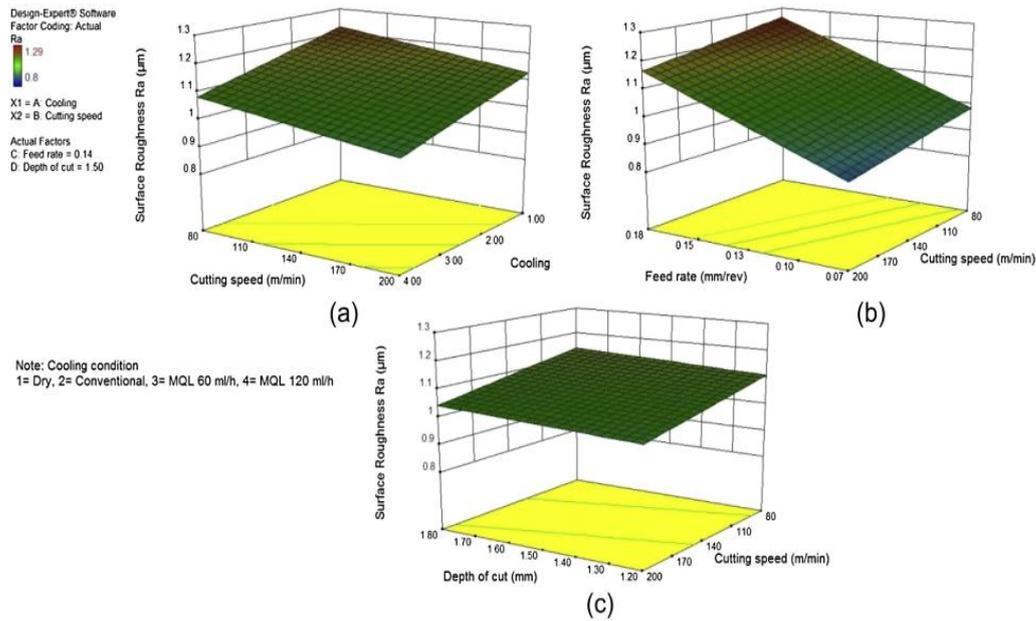


Figure I.24 Les courbes de surface de réponse 3D de Ra en fonction de la vitesse de coupe, le mode de lubrification, l’avance et la profondeur de coupe.

I.11.3 Sélection des conditions de coupe optimales selon l’approche de Taguchi:

Le régime de coupe optimal donnant la meilleure rugosité est déduit des droites des effets des facteurs sur le rapport S/N de Ra. En effet le meilleur niveau de chaque facteur correspond à la plus grande valeur du rapport S/N de Ra, qui correspond à la valeur minimale de Ra.

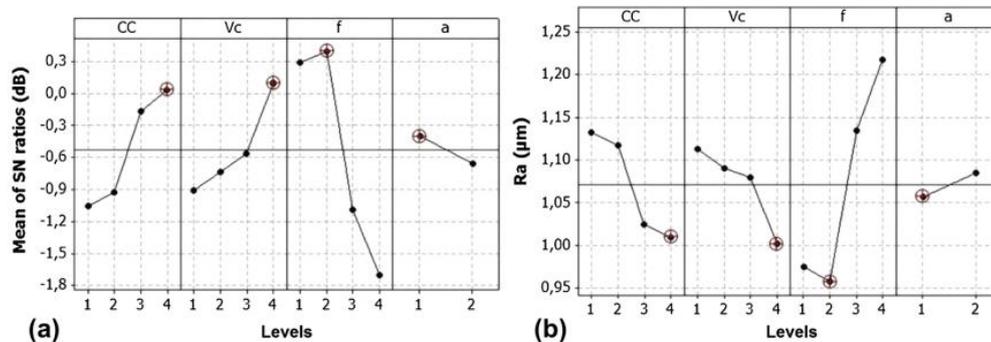


Figure I.25 Effets des paramètres principaux a) Moyenne de S / N ratio pour Ra b) Effets des facteurs de contrôle sur Ra

D’après la Figure I.25, la combinaison optimale du régime de coupe est donnée par (Lub MQL = 120 mL/h ; Vc = 200 m/min ; f = 0.1 mm/tr ; a = 1.2 mm).

Dans l’étape finale du procédé Taguchi, le régime de coupe optimal est vérifié par des expériences de confirmation. Comme déterminé dans Figure I.25, A4B4C2D1 et leurs niveaux ont été employés pour le calcul du Ra optimal prévu de rugosité de la surface.

Le Tableau I.9 donne une comparaison des résultats de l’expérience de confirmation qui ont été conduits selon les niveaux optimaux des variables, et les valeurs prédites. Ce tableau montre que les valeurs des résultats du test de confirmation pour Ra et Rz sont obtenues avec un niveau de confiance de 95%.

Tableau I. 9 Comparaisons entre les résultats des expériences de confirmation et valeurs prévues par la méthode de Taguchi.

Response	Confirmatory experiment results	Calculated values	Confidence interval (CI)	Differences	Optimization
Ra (µm)	Raexp = 0.90	Racal = 0.814	RaCI = 0.11	Ra-Ra = 0.066	0.066 < 0.11 = Successful
Rz (µm)	Rzexp = 8.2	Rzcal = 7.857	RzCI = 1.64	Rz-Rz = 0.343	0.343 < 1.64 = Successful

Tableau I. 10 Résultats de l'analyse ANOVA pour les réponses.

Variation of source	Degree of freedom (DF)	Sum of squares (SS)	Mean of squares (MS)	F ratio	P value	Contribution (%)
Surface roughness (Ra)						
C	3	0.047125	0.015708	8.38	0.021	16.98
Vc	3	0.027425	0.009142	4.88	0.060	9.88
F	3	0.190625	0.063542	33.89	0.001	68.68
A	1	0.003025	0.003025	1.61	0.260	1.09
Error (e)	5	0.009375	0.001875			3.37
Total	15	0.277575				100
Surface roughness (Rz)						
C	3	9.6963	3.2321	8.07	0.023	15.52
Vc	3	1.9718	0.6573	1.64	0.293	3.16
F	3	48.4131	16.1377	40.30	0.001	77.50
A	1	0.3813	0.3813	0.95	0.374	0.61
Error (e)	5	2.024	0.4005			3.21
Total	15	62.4649				100

Selon le Tableau I.10, l'avance par tour et le mode de lubrification possèdent une influence significative sur la rugosité de surface (Ra, Rz) à un niveau de de fiabilité de 95%.En outre, la vitesse de coupe et la profondeur de passe n'ont aucun effet sur la rugosité de surface.

Un modèle mathématique a été établie entre la rugosité de surface Ra et les paramètres de tournage en utilisant l'RSM :

$$Ra=1.057-0.043*C-0.038*Vc+0.109*f+0.004*a-0.045*C*Vc+0.016*C*f+0.008*C*a+0.05*Vc*f+0.031*Vc^2+0.056*f^2 \dots\dots\dots(I.16)$$

Avec R² = 91.36%

$$Rz=10.113-0.739*C-0.382*Vc+1.804*f+0.017*a-0.617*C*Vc+0.082*C*f+0.135*C*a+0.372*Vc*f+0.059*Vc*a+0.523*C^2-0.013Vc^2+1.025*f^2 \dots\dots(I.17)$$

Avec R²= 91.69%

I.11.4 Optimisation en utilisant une analyse de fonction de désirabilité :

L'application de l'approche de la fonction de désirabilité a permis d'obtenir les résultats d'optimisation suivants :

Tableau I. 11 RSM Résultats d'optimisation pour les réponses.

Response	Goal	Optimum conditions				Predicted	Desirability
		MQL ml/h	Vc m/min	f mm/rev	a mm		
Ra	Min.	120	200	0.07	1.2	0.7795	0.97959
Rz	Min.	120	200	0.07	1.2	7.6072	0.98788

À partir des résultats d'analyse, les valeurs optimales sont Ra=0.7795 µm et Rz=7.6072 µm.

Les comparaisons des résultats prédits par les valeurs expérimentales de la méthode RSM sont présentées dans le Tableau I.11. Le pourcentage de l'erreur est dans les

limites admissibles. Ainsi, les modèles mathématiques peuvent être utilisés avec succès pour prédire le Ra et Rz évalués pour toute combinaison du régime de coupe dans les marges de l'expérimentation.

Tableau I. 12 Les résultats des expériences de confirmation et les valeurs prédites par les modèles RSM

Trial no.	Cooling	C. Speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Experimental result	RSM predicted	Error (%)
Surface roughness (Ra)							
1	Dry	80	0.07	1.2	1.1	1.07	2.72
2	MQL-60 mL/h	120	0.18	1.2	1.15	1.20	3.62
3	MQL-120 mL/h	120	0.14	1.8	1.13	1.10	2.65
Surface roughness (Rz)							
1	Dry	120	0.1	1.2	11.25	10.82	3.82
2	MQL-60 mL/h	120	0.18	1.2	11.90	12.75	7.14
3	MQL-120 mL/h	120	0.14	1.8	11.40	11.01	3.42

I.11.5 Conclusions :

Les résultats indiquent que les paramètres les plus influents sur la rugosité de la surface sont l'avance par tour et les conditions de lubrification. Le système de lubrification MQL permet d'améliorer la qualité de la surface usinée.

-L'analyse de la variance (ANOVA) démontre que l'avance par tour et l'état d'arrosage ont l'influence la plus élevée sur la rugosité de la surface usinée.

-Les tests de confirmation des résultats optimaux obtenus par l'approche Taguchi indiquent des résultats fiables, puisque ils sont obtenus dans l'intervalle de confiance.

-Les tests de confirmation montrent que les modèles mathématiques déduits par RSM peuvent être employés. L'écart maximal entre les données expérimentales et les données prédites est de 7.14%.

-La fonction de désirabilité dans la méthode de RSM pour l'optimisation des problèmes multi-objectifs est un outil très utile pour prévoir la rugosité de la surface. En effet, les valeurs de désirabilité composite sont très proches de 1.

-Dans cette étude, ces méthodes peuvent être considérées expérimentalement et statistiquement comme une méthode pour l'analyse, la modélisation et l'optimisation des opérations de tournage et peuvent également être appliquées sans risque dans des processus de fabrication.

I.12 Optimisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI D3 par des méthodes Taguchi et RSM.

L'étude de Dureja, J et autres [16] concerne l'étude de l'évolution de l'usure de l'outil (usure en dépouille) et de la rugosité de surface pendant le tournage dur de l'acier AISI D3 (58HRC) avec outil de coupe du carbure revêtu (TiSiN-TiAlN revêtu). La table L9 (3)³ de Taguchi a été appliquée pour la planification des expériences. Les résultats montrent que la vitesse coupe et l'avance sont les facteurs les plus influents sur l'usure de l'outil, et l'avance est le facteur le plus significatif qui influence la rugosité de surface (Ra). Les modèles mathématiques pour les deux paramètres l'usure de l'outil et la rugosité de surface ont été obtenus par l'analyse de régression. En outre, la méthodologie RSM et la fonction de désirabilité sont appliquées pour arriver à un réglage optimal des paramètres d'entrée pour réduire au minimum l'usure de l'outil et la rugosité de la surface. Les résultats d'optimisation fournis par les deux techniques sont très proches.

I.12.1 Procédure expérimentale :

Dans cette étude les conditions expérimentales sont les suivantes :

Matière usinée : Acier AISI D3

Machine-outil utilisée : Tour CNC Marque:Batliboi, Sprint 16 TC, India, la vitesse maximum de broche = 5000 t/mn.

Outil de coupe :

Plaquette SECOTH1000(carbure revêtu PVD TiSiN-TiAlN)

Porte-outil ISO DDJNL2525M15-M

Mesure de la rugosité : MitutoyoSurftest SJ-301.

I.12.2 Analyse des résultats (méthode Taguchi).

Les principaux effets peuvent être évalués par l'analyse des données brutes ou des rapports S/B de l'usure en dépouille et la rugosité de surface (Figure I.26 et I.27).

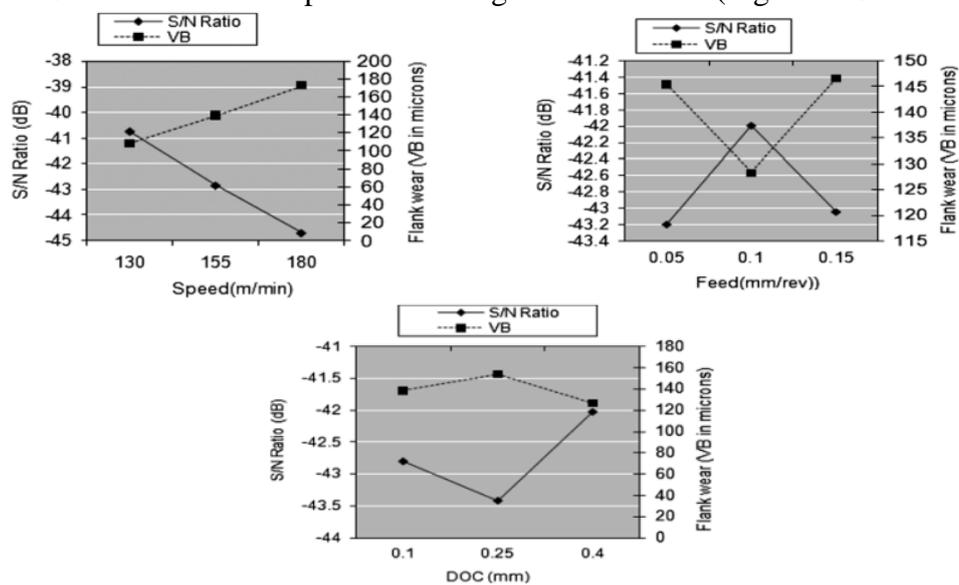


Figure I.26 Rapport signal / bruit et de l'analyse ANOVA à l'usure en dépouille (VB).

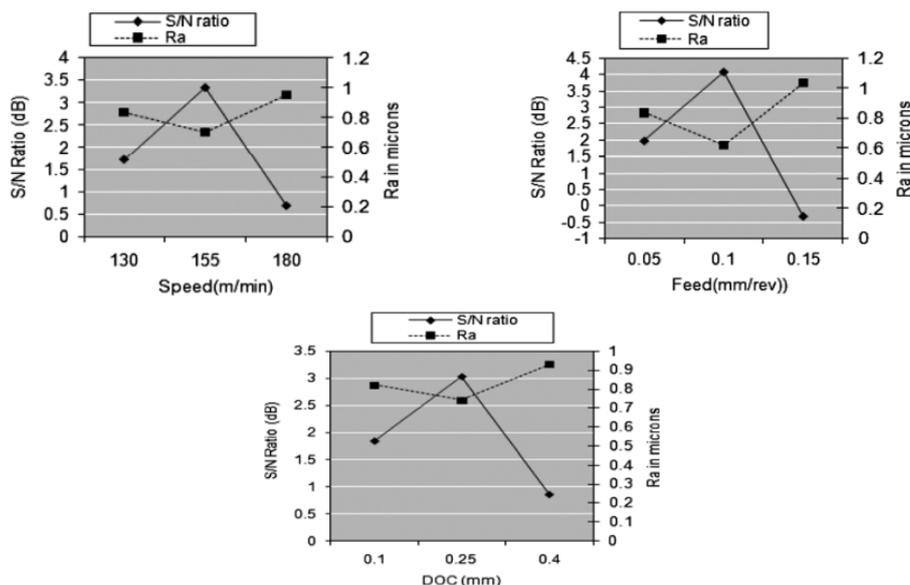


Figure I.27 Rapport signal / bruit et de l'analyse ANOVA à la rugosité de surface (Ra).

La combinaison des paramètres de niveau optimal obtenu par l'analyse Taguchi pour minimiser l'usure en dépouille (VB) est 1-2-3, c-à-dire $V_c=130$ m/min ; $f=0.10$ mm/tr ; $a_p=0.4$ mm. Afin de valider cette solution optimale fournie par l'analyse Taguchi, l'expérience de confirmation a été effectuée. L'erreur relative correspondant à l'usure est de 2,33%, qui se situe dans l'intervalle de confiance de 95%.

De même, la combinaison optimale des niveaux de paramètres pour obtenir une rugosité de surface minimale est $V_c= 155$ m/min ; $f=0.1$ mm/tr ; $a_p= 0.25$ mm. D'après le test de confirmation l'erreur sur la rugosité optimale est de 3.4%, qui est toujours dans l'intervalle de confiance de 95%.

I.12.3 Modélisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface :

La méthodologie de surface de réponse (RSM) et la régression linéaire multiple ont été appliquées pour générer des modèles de VB et Ra.

$$VB=+69.56+0.75233*A-1814.83*B-205.91*C+8.90*A*B-0.080*A*C+2013.65*B*C \dots\dots (I.18)$$

$$R^2=.8587$$

$$Ra=+0.73+0.12*A+0.55*B-0.38*C-0.18*A*B+0.27*A*C+0.34*B*C \dots\dots(I.19)$$

$$R^2=.9630$$

I.12.4 L'optimisation des conditions de coupe (RSM) :

L'optimisation de la fonction de désirabilité a été utilisée pour l'optimisation simultanée de VB et Ra. L'objectif d'optimisation consiste à trouver les valeurs optimales de paramètres d'entrée afin de minimiser la valeur de l'usure en dépouille (VB) et la rugosité de surface (Ra) pendant l'usinage de l'acier AISI-D3 avec outil en carbure revêtu.

Les contraintes utilisées pour l'optimisation sont donnés dans le Tableau I.13.

Tableau I. 13 Contraintes utilisées pour l'optimisation RSM.

Name	Goal	Lowerlimit	Upperlimit
Speed (m/min)	Is in range	130	180
Feed (mm/rev.)	Is in range	.05	.15
DOC (mm)	Is in range	.1	.4
VB (µm)	Minimize	90	200
Ra (µm)	In range	.47	1.18

Les solutions optimales obtenues sont rapportés dans le Tableau I.14.

Tableau I. 14 Résultats d'optimisation RSM.

S. no.	Speed m/min	Feed mm/rev	DOC mm	Avg. (VB) µm	Avg. (Ra) µm	Desirability
1	130.00	.13	.21	93.3545	1.18	.888
2	130.01	.13	.21	93.3634	1.18	.888
3	130.00	.13	.20	93.3855	1.18	.887
4	130.13	.13	.22	93.7018	1.18	.877
5	130.46	.14	.23	94.5213	1.18	.849
6	130.00	.14	.27	95.4585	1.18	.818
7	130.00	.11	.30	99.5981	.60	.680

Il est évident à partir du Tableau I.14 que pour optimiser simultanément VB et Ra, la solution optimale est : $V_c= 130$ m/min, $f= 0,13$ mm/tr. et $a_p= 0,21$ mm

Cette solution fournie par optimisation de la fonction de Désirabilité est complètement près des solutions optimales fournies par analyse Taguchi bien que pour un paramètre de la réponse (VB ou Ra) à la fois.

I.12.5 Conclusions :

- L'analyse Taguchi a montré que la vitesse de coupe est l'élément le plus influent sur l'usure en dépouille (VB) à 73,65%.
- Le pourcentage de contribution des paramètres d'entrée influant sur la rugosité de surface (Ra) sont pour l'avance par tour 52,98%, la vitesse 19,47%, et la profondeur de passe 12,98%, signifiant que l'avance par tour est l'élément le plus influant sur la rugosité de la surface.
- La recherche de la combinaison optimale des paramètres suggérés par les deux techniques à savoir, la Méthode Taguchi ainsi que RSM est en accord étroit, validant l'utilisation de ces deux techniques dans l'optimisation des facteurs de réponse.

I.13 Optimisation multi objectif des paramètres de tournage a CNC par l'approche de Taguchi et la Méthodologie RSM.

Asiltürk, et autres [17] ont présenté deux méthodes pour déterminer les conditions de coupe optimales satisfaisant différents objectifs, ainsi que la détermination des modèles mathématiques pour la rugosité de la surface (Ra et Rz) lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable austénitique l'AISI 304 par une plaquette en carbure revêtu. Des essais sont réalisés suivant un plan de taguchi, ayant comme facteurs variables la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance par tour. Le modèle pour la rugosité de la surface, en fonction des paramètres de coupe, est obtenu à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (RSM). Les résultats indiquent que l'avance par tour est le facteur dominant affectant la rugosité de la surface. En effet la rugosité minimale est atteinte quand l'avance par tour et les profondeurs de passe sont a leur niveau le plus bas, alors que la vitesse de coupe est fixée à son niveau élevée.

I.13.1 Procédure expérimentale :

Les expériences ont été effectuées sur une :

Machine-outil : tour CNC Taksan (O-I-TC-TTC 630).

Mesure de la rugosité : Mitutoyo marque (SJ-201).

Matière usinée: Acier inoxydable austénitique d'AISI 304.

Outils de coupe : MULNR 2525 M-12 MW

Plaquettes de carbure de nuance (SNMG 120408-PP)

I.13.2 Analyse et discussion

a) Analyse du signal/bruit (S/N) rapport :

Le tracé des droites des effets principaux des différents facteurs montre que le facteur qui affecte le plus la rugosité est l'avance par tour. D'autre part une faible influence de la profondeur de passe est observée, alors que cette figure montre que la vitesse de coupe n'a pas d'influence sur la rugosité. Par le choix d'un rapport S/N maximal nous pouvons choisir la combinaison des paramètres d'usinage permettant de minimiser les critères de rugosité considérés.

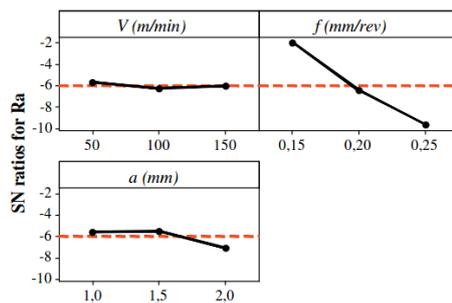


Figure I.28 graphe des effets principaux pour Ra.

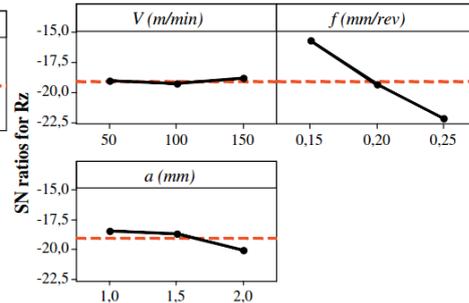


Figure I.29 graphe des effets principaux pour Rz.

b) Analyse de surface de réponse :

L'adéquation du modèle quadratique de surface de réponse a été justifiée par ANOVA et les résultats sont présentés dans le Tableau I.15. Ces résultats confirment que l'avance est l'élément le plus important avec 85% de contribution, suivi par la profondeur de passe avec 2.63%. Les autres termes ne sont pas significatifs.

Tableau I. 15 ANOVA de conception quadratique de La méthodologie RSM pour le Ra.

Symbol	DOF	SS	Variance	F	p	% Contr	R2
V	1	0.056	0.056	0.675	0.423	0,34	91.39%
V2	1	0.114	0.114	1.365	0.259	0,69	
f	1	14.086	14.086	168.848	0.000	85,44	
f2	1	0.007	0.007	0.077	0.784	0,04	
a	1	0.434	0.434	5.196	0.036	2,63	
a2	1	0.127	0.127	1.524	0.234	0,77	
V × f	1	0.0913	0.091	1.094	0.310	0,55	
V × a	1	0.122	0.122	1.463	0.243	0,74	
f × a	1	0.032	0.032	0.384	0.544	0,19	
Error	17	1.418	0.083			8,60	
Total SS	26	16.48707					

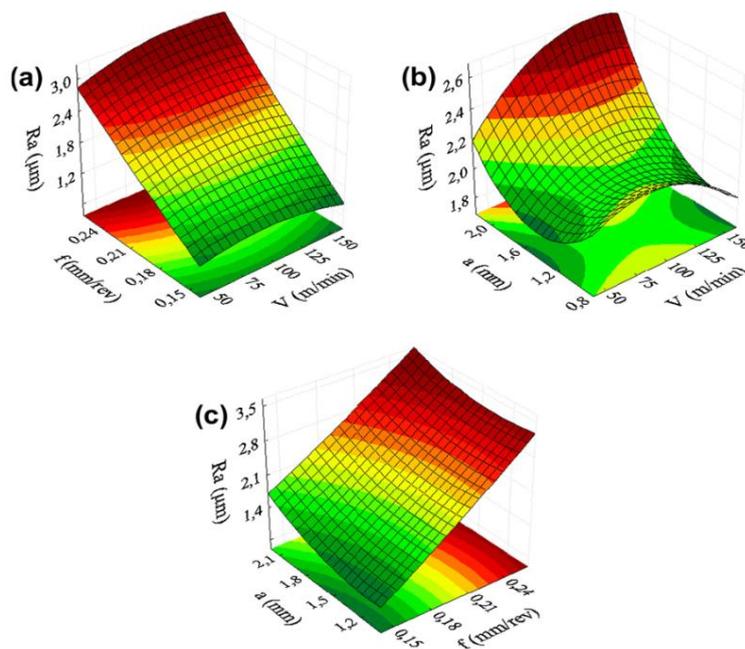


Figure I.30 : Les courbes de surface de réponse montrant l'effet de deux variables sur le Ra (l'autre variable est tenue au niveau central). -Vitesse de Coupe ; - Avance par tour f; -Profondeur de coupe a.

La Figure I.30 présente les surfaces de réponse pour le Ra montre que la rugosité augmente principalement avec l'augmentation de l'avance par tour. L'influence de la vitesse de coupe est négligeable sauf pour le cas où la profondeur de passe est à son niveau le plus haut.

I.13.3 Conclusions

-Les facteurs de contrôle optimisés pour le Ra sont : $V_1 = 50$ m/min, $f_1 = 0.15$ mm/tr, $a_2 = 1.5$ mm. Et pour Rz sont : $V_3 = 150$ m/min, $f_1 = 0.15$ mm/tr, $a_1 = 1$ mm.

-L'analyse de Taguchi et de la méthodologie RSM ont indiqué que l'avance par tour est le facteur le plus significatif sur la rugosité de la surface (Ra et Rz) avec une contribution de 85.5%.

-La méthodologie RSM s'est avérée efficace pour l'identification et le développement des rapports significatifs entre les paramètres de coupe.

-La technique de RSM peut modéliser la réponse en termes de tous les paramètres, leurs interactions. Ce qui n'est pas possible avec la technique de Taguchi.

Cette étude montre que cette méthode d'optimisation est efficace. Les modèles de prévision peuvent être appliqués pour déterminer les conditions de coupe appropriées, afin de réaliser la rugosité de la surface désirée (Ra et Rz). Les futures investigations empiriques examineront l'impact de différents paramètres de coupe sur la rugosité de la surface.

I.14. Conclusion Générale :

Le but des procédés d'usinage, par enlèvement de la matière et particulièrement dans le domaine du tournage dur, est l'obtention d'un bon état de surface, en minimisant les efforts de coupe pour une durée de vie d'outil raisonnable. L'étude bibliographique présentée permet de conclure que la méthode de planification des expériences permet l'étude de l'influence et l'impact de différents paramètres de coupe sur les paramètres technologiques d'une opération d'usinage. La connaissance de ces influences est primordiale dans la recherche d'une combinaison optimale des paramètres de coupe. Ceci est rendu possible par l'élaboration de modèles mathématiques qui expriment la relation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques considérés.

CHAPITRE : II

*Procédure et équipement
d'expérience*

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, un banc d'essais comportant un tour universel SN40C, un rugosimètre pour la mesure des critères de rugosité de la surface usinée, une plate-forme de mesure des composantes de l'effort de coupe.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique à l'Université de 08 Mai 1945.

II.2 Matériels utilisés

II.2.1 Les matériaux utilisés pour les essais d'usinage :

On fait notre étude sur deux différents aciers inoxydables :

- L'acier X2CrNi18-9 (AISI 304) c'est un acier inoxydable austénitique fortement allié. Cet acier offre une bonne combinaison de résistance à la corrosion et d'aptitude au formage et à la fabrication, ainsi qu'une résistance à l'usure avec une très bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contraintes.

- L'acier X20Cr13 (AISI 420) c'est un acier inoxydable martensitique, il est utilisé lorsque les caractéristiques mécaniques sont importantes parce que cette nuance accepte la trempe, sa dureté atteint jusqu'à 55 HRC après trempe.

a) Composition chimique des aciers

La composition chimique des aciers : **X2CrNi18-9** et **X20Cr13** sont représentés dans le tableau II.1.

Tableau II.1 Composition chimique des aciers : **X2CrNi18-9** et **X20Cr13**

élément	X2CrNi18-9	X20Cr13
	Pourcentage (%)	
Carbone	0.02	0.2
Manganèse	1.44	0.9
Silicium	0.33	0.8
Phosphore	0.02	0.04
Soufre	0.016	0.03
Titane	0.005	0.005
Niobium	0.013	0.013
Nickel	7.69	7.69
Chrome	16.91	13.0
Fer	72.10	72.10

Cette analyse a été faite au laboratoire du Complexe Sidérurgique d'El HADJAR. [22]

b) Les caractéristiques physico-mécanique

Les caractéristiques physico-mécanique des aciers : **X2CrNi18-9** et **X20Cr13** sont présentés dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : caractéristiques physico-mécanique des aciers : **X2CrNi18-9** et **X20Cr13**

	Conductivité thermique, λ	Coefficient de dilatation à 100 °C, α	Module d'élasticité à 20 °C, E	Allongement de rupture	Dureté vickers
	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	[10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	[GPa]	[%]	[HV]
X2CrNi18-9	15	16	200	45	160-200
X20Cr13	30	10.5	220	15	175-240

On a utilisé deux éprouvettes de diamètre $\Phi=90$ mm pour **X2CrNi18-9** et de diamètre $\Phi=70$ mm pour **X20Cr13**, sur lesquelles sont réalisés des paliers de 30 mm de longueur chacune (figure II.1), pour les essais des efforts de coupe et rugosité de la surface en fonction des paramètres du régime de coupe : r, Vc, f et ap.



Figure II.1 Eprouvettes pour différents essais.

II.2.2 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN40C, La puissance sur la broche égale à 6.6KW (figure II.2). Les fréquences de rotation disponibles sur le tour entre (22.5 à 2000) tr/min. Les avances disponibles pour c'et tour (0.08 à 0.8) mm/tr.



Figure II.2 Tour parallèle modèle SN 40 C.

II.2.3 Plaquette de coupe

Les plaquettes sont amovibles de forme carrée (figure II.3), à fixation par trou central. Toutes les informations qui concernent les plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau II.3. Cette dernière est en carbure GC2015 à triple revêtement sur un substrat tenace enrichi en cobalt. Excellente adhérence du revêtement au substrat, une bonne résistance à l'usure surtout l'usure par diffusion et à la déformation plastique aux températures élevées, un coefficient du frottement réduit, donc elle empêche la formation de l'arête rapportée.

Tableau II.3 Informations relatives à la plaquette de coupe.

Matériaux de coupe	Désignation	Type de revêtement	Couches	Géométrie
Carbure revêtu	GC 2015	CVD	Ti(C,N)/Al ₂ O ₃ /TiN	SNMG 12-04-08-MF

Carbure 2015 : triple revêtement sur un substrat tenace enrichi en cobalt. Excellente adhérence du revêtement au substrat, une bonne résistance à l'usure surtout l'usure par diffusion et à la déformation plastique aux températures élevées, un coefficient du frottement réduit, donc elle empêche la formation de l'arête rapportée.

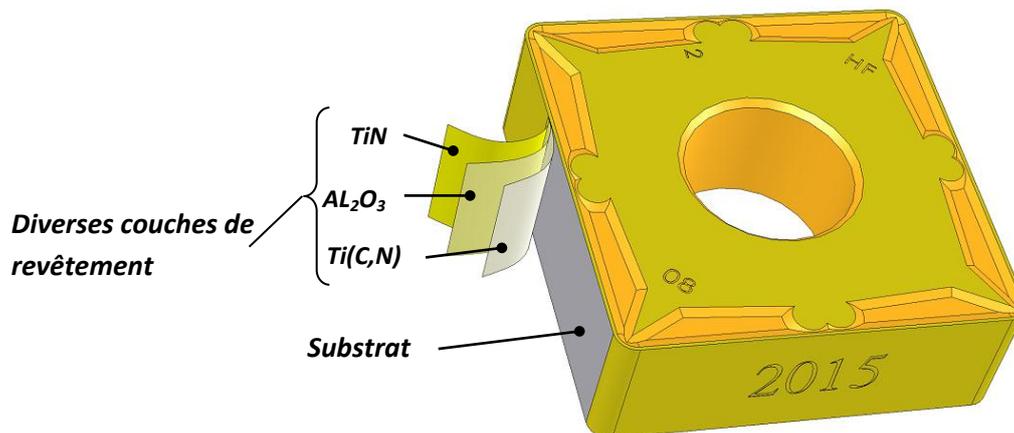


Figure II.3 Photo de plaquette de coupe utilisée.

II.2.4 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil sur lequel se fixe la plaquette mécaniquement par trou central (figure II.4). La géométrie du porte outil est donnée au tableau II.4.

Tableau II.4 Caractéristiques de porte plaquette utilisé.

Désignation	Marque	χ	α	γ	λ	χ_r
PSBNR25x25M12	SANDVIK coromant	75°	6°	-6°	-6°	15°



Figure II.4 Porte outil utilisé.

II.2.5 Appareillages de mesure utilisés

a) Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t , R_z), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo), la plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à 40 μm) pour R_a et (0.3 à 160 μm) pour R_z et R_t , la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (Figure II.5).



Figure II.5 mesure de la rugosité sans démontage de la pièce

b) Mesure des efforts de coupe

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

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 animé du mouvement d'avance. 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. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (Figure II.6).

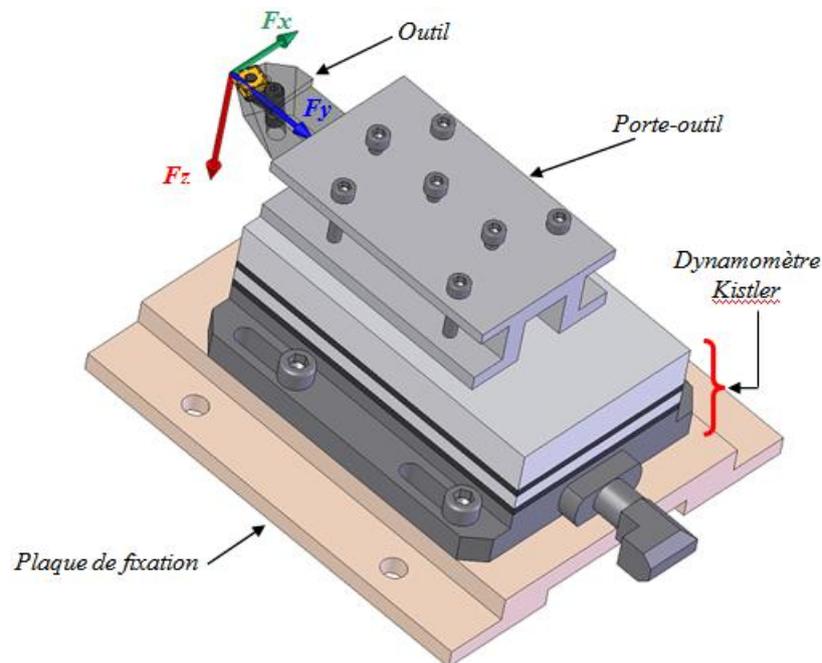


Figure II.6 Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties par les capteurs piézo-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 (figure II.7, figure II.8).

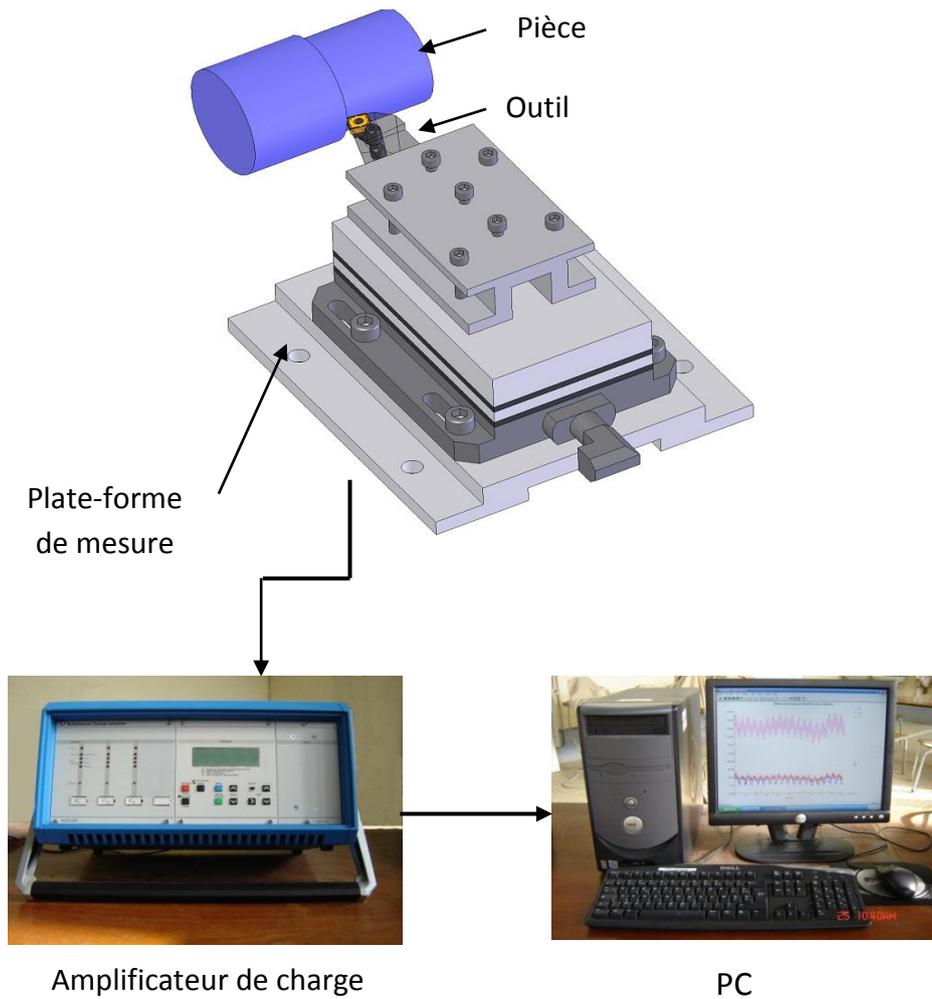


Figure II.7 Chaîne de mesure des efforts de coupe

La (figure II.8) présente un exemple d'acquisition qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (*Effort axiale: F_x, Effort radial: F_y et Effort tangentiel: F_z*).

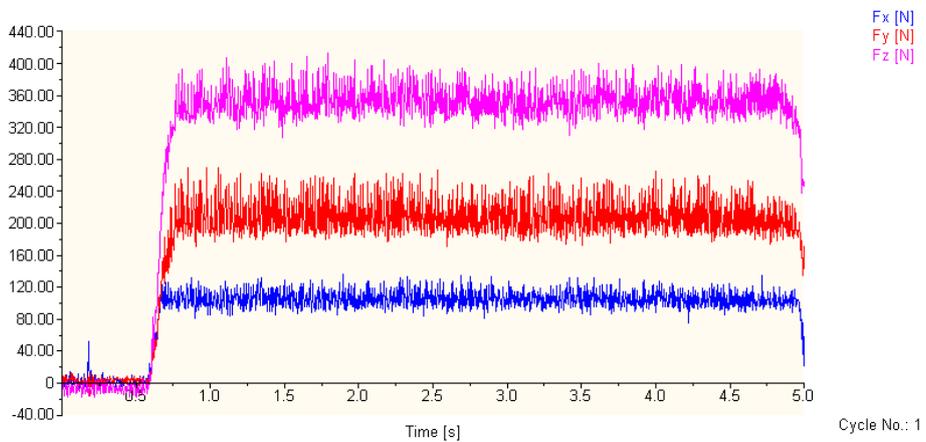


Figure II.8 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE »
 Essai 7 : matériau= martens, $r=0.8\text{mm}$ $V_c = 170\text{m/min}$, $f = 0.36\text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.45\text{ mm}$

c) Autres équipements utilisés

- un appareil photo numérique pour prendre les photos.
- un pied à coulisse pour mesurer les dimensions de la pièce

II.3 planification des expériences

II.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 , a_p), la géométrie de la partie active de l'outil coupant, ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). On peut dire que tous ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre, les efforts de coupe et la rugosité de surface représentent eux les paramètres de sortie.

II.3.2. Conditions de coupe

Les essais sont effectués en tournage, la pièce maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification et dans les conditions de coupe qui sont présentées dans le tableau suivant (Tableau II.5) :

Tableau II.5 : les paramètres de coupe et paramètre de sortie

Les paramètres d'entrée	Paramètres de sortie
Materiau {Martens, Austen}	<ul style="list-style-type: none"> - Critères de rugosité R_a, R_z et R_t (μm) - Efforts de coupe F_x, F_y et F_z (N) - taux d'enlèvement de matière MRR (mm^3/min)
r (mm) = {0.4, 0.8}	
V_c (m/min) = {170, 240, 340}	
f (mm/tr) = {0.2, 0.28, 0.36}	
a_p (mm) = {0.15, 0.30, 0.45}	

II.3.3 Le plan d'expériences

La table L18 ($2^2 \times 3^6$) comporte 18 essais pour étudier deux facteurs à deux niveaux et 3 autres facteurs à trois niveaux (tableau II.6).

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 ;

Tableau II.6. Table orthogonale de Taguchi L18 ($2^2 \times 3^3$)

N° Essai	Facteurs				
	1 (matériau)	2 (r)	3 (Vc)	4 (f)	5 (ap)
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	3
3	1	1	3	3	2
4	1	2	1	2	2
5	1	2	2	3	1
6	1	2	3	1	3
7	1	2	1	3	3
8	1	2	2	1	2
9	1	2	3	2	1
10	2	1	1	3	2
11	2	1	2	1	1
12	2	1	3	2	3
13	2	2	1	1	3
14	2	2	2	2	2
15	2	2	3	3	1
16	2	2	1	2	1
17	2	2	2	3	3
18	2	2	3	1	2

II-4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. La composition chimique des éprouvettes et les caractéristiques des matériaux de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

CHAPITRE : III

*Etude de l'influence des
paramètres de coupe*

III.1 Introduction

Dans ce chapitre il s'agit, en premier lieu, de présenter les résultats expérimentaux obtenus. Ensuite nous allons évaluer l'influence des conditions de coupe considérées (matériau usiné, rayon du bec d'outil (r), vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f) et profondeur de passe (ap)) sur les différents paramètres technologiques étudiés, à savoir les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z) et les critères de la rugosité de surface (R_a , R_t , R_z) en utilisant une analyse de variance ANOVA avec le logiciel « Design-Expert 9 ». Finalement, afin de déterminer le meilleur régime satisfaisant certains critères d'optimisation, des modèles mathématiques exprimant la relation entre les facteurs d'entrées et différents paramètres technologiques sont déduits.

III.2 Résultats des expériences

Les valeurs des paramètres de réponse considérés sont présentées dans le tableau III.1. Ces résultats sont obtenus suivant le plan d'expérience de Taguchi à 18 essais avec 2 facteurs à 2 niveaux et 3 facteurs à 3 niveaux L_{18} .

Tableau III.1 Résultats expérimentaux des critères de rugosité et les composantes de l'effort de coupe selon plan Taguchi L_{18}

N°	Matériaux	Les valeurs d'entrée				Les valeurs de sorties					
		r , (mm)	V_c , (mm/min)	f , (mm/tr)	ap , (mm)	F_x , (N)	F_y , (N)	F_z , (N)	R_a , (μ m)	R_z , (μ m)	R_t , (μ m)
01	Martens	0,4	170	0,20	0,15	23,92	62,94	74,31	3,95	16,35	17,10
02	Martens	0,4	240	0,28	0,45	89,82	141,80	277,17	6,82	27,25	28,31
03	Martens	0,4	340	0,36	0,30	47,27	120,33	246,90	10,53	41,09	41,56
04	Martens	0,8	170	0,28	0,30	55,89	139,61	195,23	3,69	16,36	16,98
05	Martens	0,8	240	0,36	0,15	28,02	120,94	144,15	5,81	24,74	26,18
06	Martens	0,8	340	0,20	0,45	91,71	154,62	208,22	2,05	9,08	9,57
07	Martens	0,8	170	0,36	0,45	105,23	207,66	352,28	5,64	24,52	25,44
08	Martens	0,8	240	0,20	0,30	31,18	110,63	140,71	2,09	9,00	9,83
09	Martens	0,8	340	0,28	0,15	23,85	93,25	106,63	3,63	16,12	17,36
10	Austen	0,4	170	0,36	0,30	64,23	131,35	240,46	10,73	41,85	43,21
11	Austen	0,4	240	0,20	0,15	41,36	81,39	89,07	4,08	16,35	16,59
12	Austen	0,4	340	0,28	0,45	103,01	125,94	288,59	7,51	29,16	29,97
13	Austen	0,8	170	0,20	0,45	97,29	153,68	242,87	1,57	8,92	9,77
14	Austen	0,8	240	0,28	0,30	60,67	136,14	205,14	3,60	16,36	16,96
15	Austen	0,8	340	0,36	0,15	11,73	104,10	151,55	6,53	26,07	26,53
16	Austen	0,8	170	0,28	0,15	16,95	99,62	111,59	3,97	18,18	18,56
17	Austen	0,8	240	0,36	0,45	94,81	190,96	359,39	6,17	26,58	26,80
18	Austen	0,8	340	0,20	0,30	48,96	124,28	157,42	2,03	10,50	10,64

III.3 Analyse des résultats expérimentaux des critères de rugosité

Les résultats des critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) présentés dans le tableau III.1 sont analysés à l'aide du logiciel Design-Expert 9. En appliquant l'analyse de la variance ANOVA pour les critères de rugosité étudiée. Cette analyse est réalisée pour une signification ajustée de 5%, c.-à-d., pour un niveau de confiance de 95%.

III.3.1 Critère de rugosité Ra

a) Analyse de la variance ANOVA

Le tableau III.2 qui concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de rugosité Ra montre que l'avance par tour (f) est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 58.98%, suivi par le rayon de bec (r) avec une contribution de 36.63%, l'analyse indique que la vitesse de coupe (Vc), la profondeur de passe (ap) et le matériau n'ont pas d'influence significative sur Ra ($P > 0.05$).

Tableau III.2 Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra

	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont%	Remarque
Model	119.91	5	23.98	68.54	< 0.0001	96,61	Significant
A-Matériau	0.22	1	0.22	0.62	0.4454	0,17	non significant
B-r	45.47	1	45.47	129.96	< 0.0001	36,63	significatif
C-Vc	0.75	1	0.75	2.13	0.1701	0,60	non significant
D-f	73.21	1	73.21	209.24	< 0.0001	58,98	significatif
E-ap	0.27	1	0.27	0.76	0.3995	0,21	non significant
Residual	4.20	12	0.35			3,38	
Cor Total	124.11	17				100	

b) Analyse des effets principaux sur (Ra)

Du la figure III.1, il apparaît que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur la rugosité surface (Ra). La plus importante influence correspond à l'avance par tour et le rayon du bec, ce qui est confirmé par l'analyse ANOVA tableau III.2.

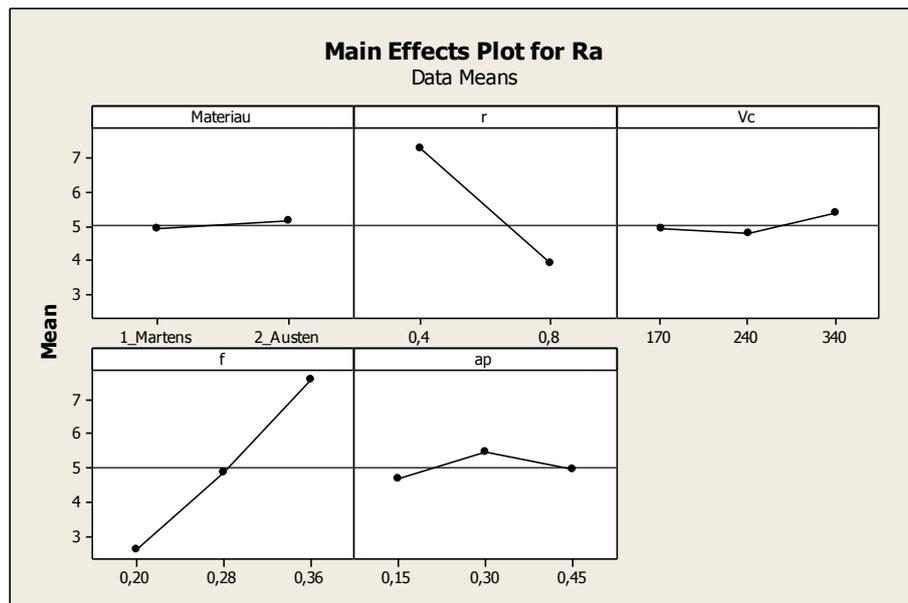


Figure III.1 Graphe des effets principaux sur la rugosité Ra

En outre le graphe des effets principaux permet de constater que la rugosité est meilleure pour un grand rayon du bec, alors que l'augmentation de l'avance par tour cause une augmentation du critère de rugosité Ra.

c) Diagrammes de surface 3D de Ra

La figure III.2 permet d'évaluer l'influence simultanée de (V_c ; f), (r ; f), (r ; V_c) et (a_p ; V_c) sur le critère de rugosité de surface (R_a). La figure indique que la pente de l'avance (f) est la plus importante suivie par le rayon de bec (r).

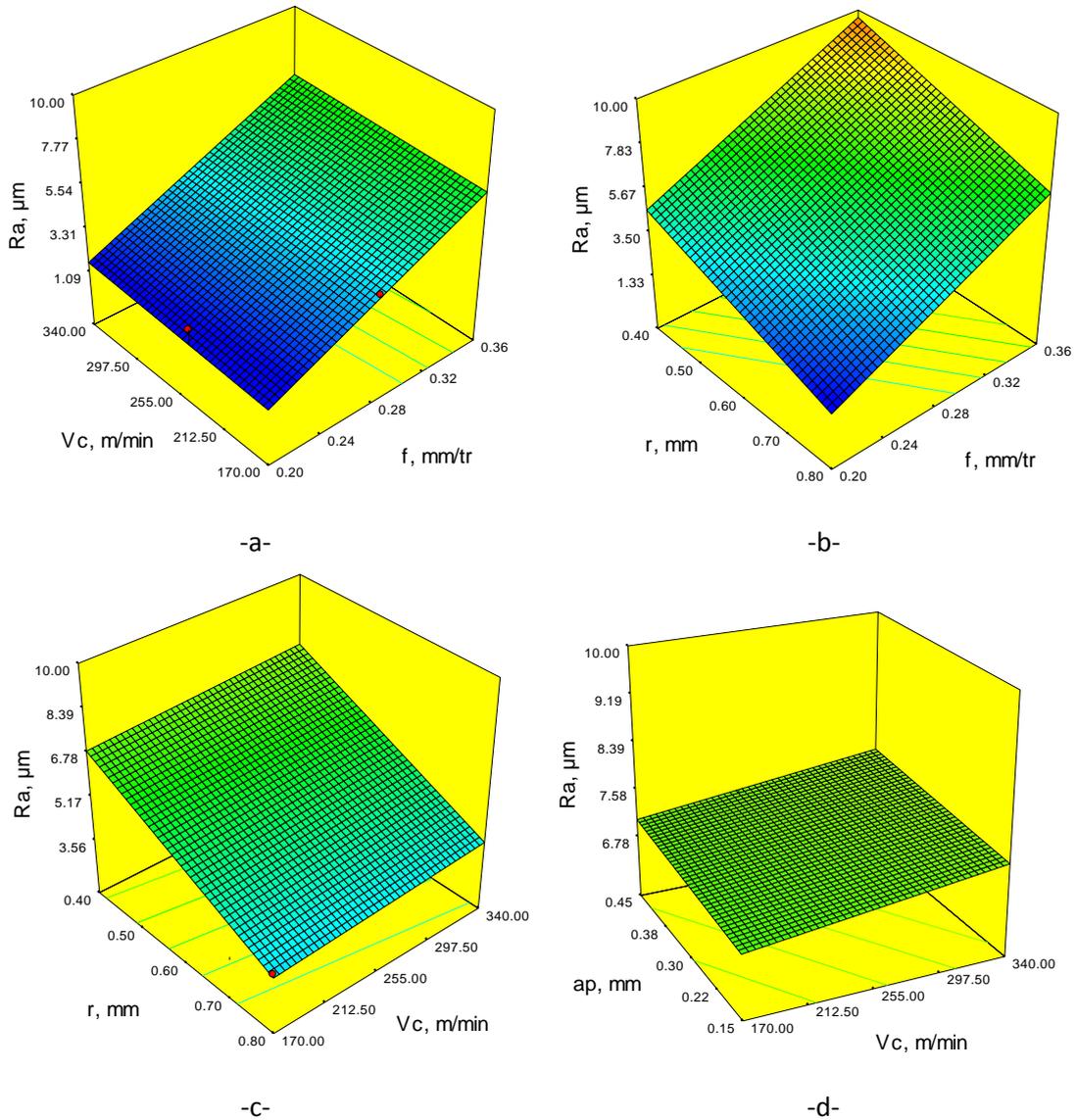


Figure III.2 Diagrammes de surface 3D de R_a en fonction de (V_c , f , a_p et r)

Du la figure III.2 (a et b) influence important de f par rapport ou autre facteurs (V_c , r). Les figures (a-c-d) montre que le facteur de V_c sans influence sur le critère de rugosité R_a . La figure III.3 c- montre une influence de le rayon de bec r mais la figure b- montre cette influence est inférieure à celle de f .

III.3.2 Critère de rugosité Rz

a) Analyse de la variance ANOVA

Les résultats de l'analyse ANOVA ont indiqué clairement que l'effet du matériau, la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité de la surface (Ra) ne sont pas statistiquement significatif ($P > 0.05$). Par ordre d'importance, on constate donc que l'avance est le facteur le plus significatif qui affecte la rugosité de la surface (Rz) avec une contribution de 64.91% suivi par le rayon de bec avec une contribution de 31.19 %.

Tableau III.3 Analyse de la variance (ANOVA) pour Rz

	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont%	Remarque
Model	1635.67	5	327.13	75.72	< 0.0001	96,92	significatif
A-Matériau	4.97	1	4.97	1.15	0.3045	0,29	non significatif
B-r	526.47	1	526.47	121.85	< 0.0001	31,19	significatif
C-Vc	3.90	1	3.90	0.90	0.3607	0,23	non significatif
D-f	1095.39	1	1095.39	253.53	< 0.0001	64,91	significatif
E-ap	4.94	1	4.94	1.14	0.3059	0,29	non significatif
Residual	51.85	12	4.32			3,07	
Cor Total	1687.52	17				100	

b) Analyse des effets principaux sur (Rz)

Du la figure III.3, il apparaît que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur la rugosité surface (Rz). La plus importante influence correspond à l'avance par tour, et que le rayon de bec, en effet l'analyse ANOVA tableau III.3, montre que ces deux facteurs possèdent des contributions de 64,91%, et 31,19% respectivement.

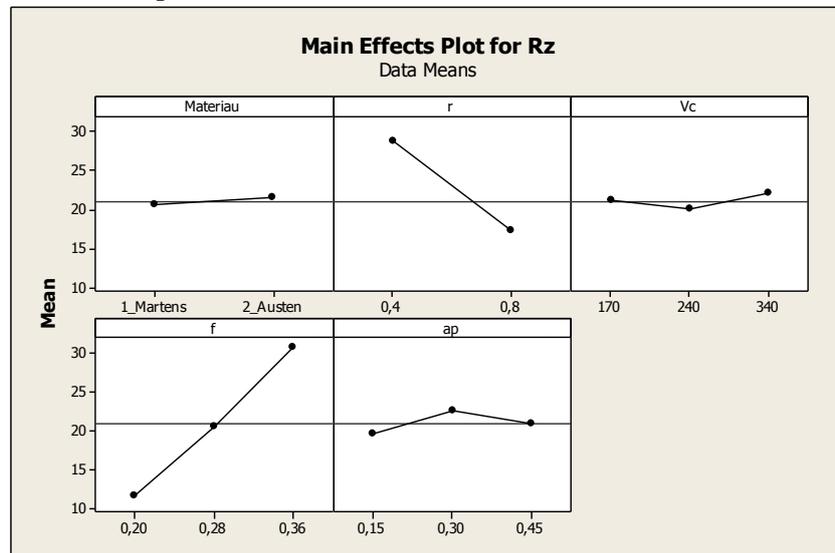


Figure III.3 Graphe des effets principaux sur la rugosité Rz

c) Diagrammes de surface 3D de Rz

La figure III.4 permet d'évaluer l'influence simultanée de (Vc ; f), (r ; f), (r;Vc) et (ap;Vc) sur le critère de rugosité de surface (Rz). La figure indique que la pente de l'avance (f) est la plus importante suivie par le rayon de bec (r).

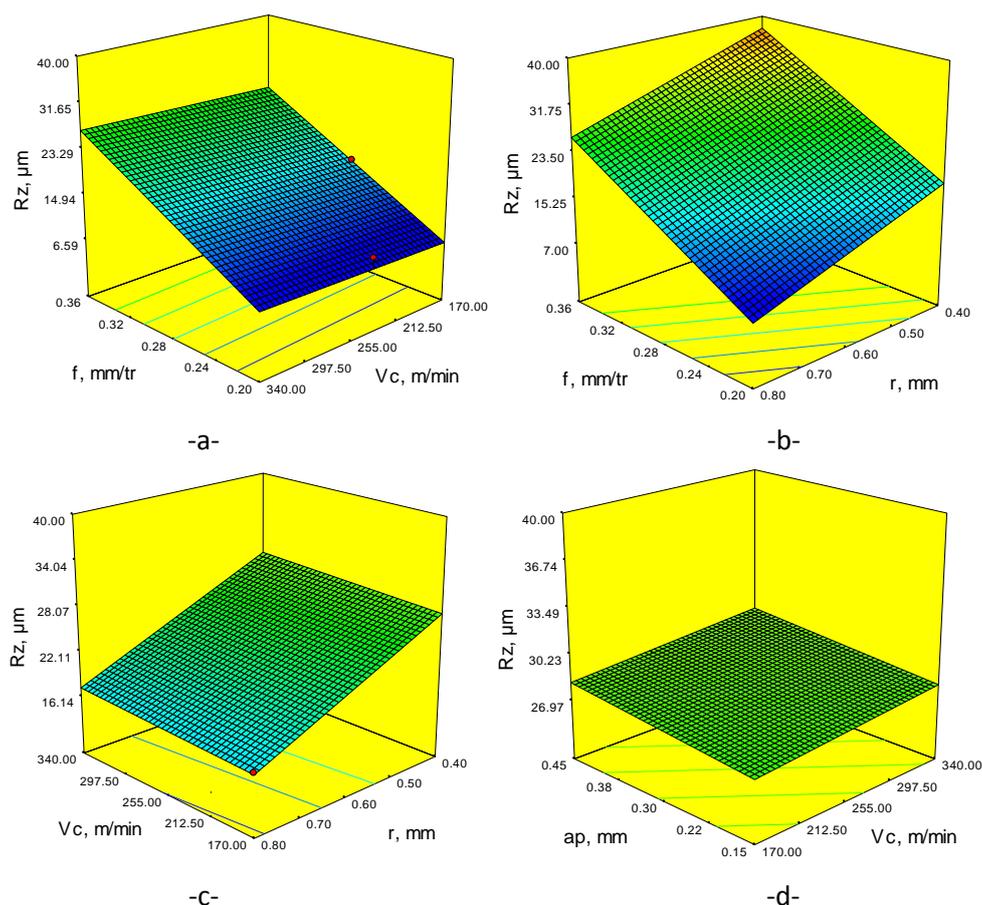


Figure III.4 Diagrammes de surface 3D de Rz en fonction de (Vc, f , ap et r)

III.3.3 Critère de rugosité Rt

a) Analyse de la variance ANOVA

Les valeurs des facteurs influencée sur le critère de rugosité de surface (Rt) sont présentées dans le tableau III.4, l'analyse de la variance ANOVA présenté les différentes paramètres d'influence sur le critère de la rugosité de surface (Rt), le tableau montre que l'avance par tour (f) la plus significatif a valeur de contribution de 65.21% suivi par le rayon de bec (r) à 31.03%, les autres paramètres n'ont pas statistiquement significatif .

Tableau III.4 Analyse de la variance (ANOVA) pour Rt

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont%	Remarque
Model	1671.01	5	334.20	73.01	< 0.0001	96,81	significant
A-Matériau	2.49	1	2.49	0.54	0.4746	0,14	non significant
B-r	535.61	1	535.61	117.01	< 0.0001	31,03	significant
C-Vc	2.58	1	2.58	0.56	0.4675	0,14	non significant
D-f	1125.59	1	1125.59	245.89	< 0.0001	65,21	significant
E-ap	4.74	1	4.74	1.03	0.3291	0,27	non significant
Residual	54.93	12	4.58			3,18	
Cor Total	1725.95	17				100	

b) Analyse des effets principaux sur (Rt)

Du la figure III.5, il apparait que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur la rugosité surface (Rt). La plus importante

influence correspond à l'avance par tour, et que le rayon de bec, en effet l'analyse ANOVA tableau III.4, montre que ces deux facteurs possèdent des contributions de 65,21%, et 31,03% respectivement.

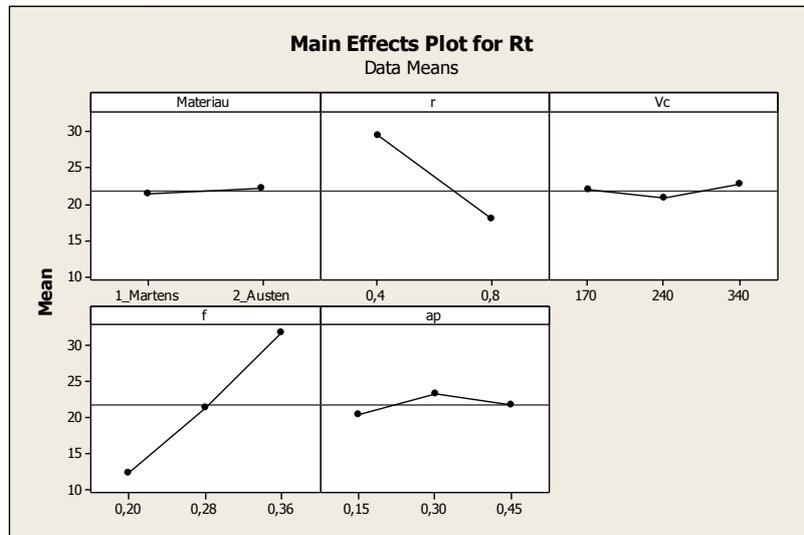


Figure III.5 Graphe des effets principaux sur la rugosité Rt

c) Diagrammes de surface 3D de Rt

La figure III.6 permet d'évaluer l'influence simultanée de (Vc ; f), (r ; f), (r;Vc) et (ap;Vc) sur le critère de rugosité de surface (Rt). La figure indique que la pente de l'avance (f) est la plus importante suivie par le rayon de bec (r).

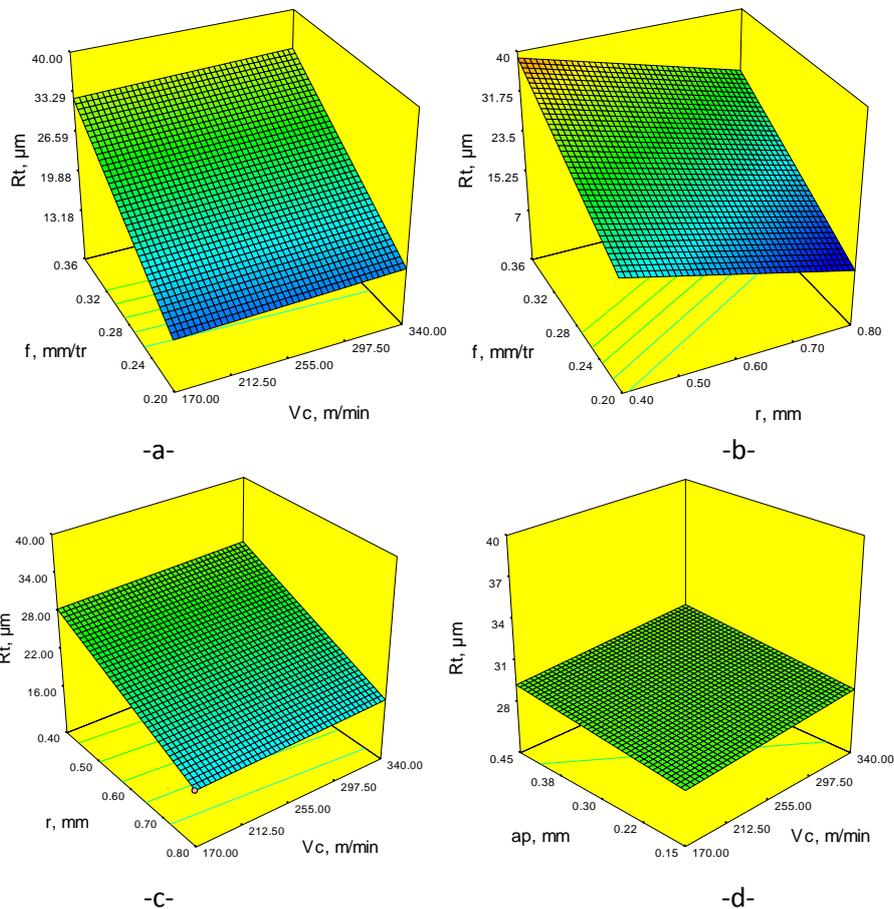


Figure III.6 Diagrammes de surface 3D de Rt en fonction de (Vc, f, ap et r)

III.3.4 Les modèles mathématiques pour les critères de la rugosité de surface

Des modèles mathématiques sont nécessaires pour décrire la relation entre chacun des critères de rugosité et les éléments du régime de coupe. Comme le variable « matériau » est une variable discrète non numérique, nous avons déduit un modèle à part pour chaque matériau de la pièce usinée.

Ra	Matériau : Martens $Ra = +0.85 - 8.42 * r + 2.91E-003 * Vc + 30.87 * f + 0.99 * ap$ Matériau : Austen $Ra = +1.07 - 8.42 * r + 2.91E-003 * Vc + 30.87 * f + 0.99 * ap$	R ² = 0.96 Adj R ² =0.95 Pred R ² =0.91
Rz	Matériau Martens $Rz = +3.23 - 28.68 * r + 6.67E-003 * Vc + 119.42 * f + 4.27 * ap$ Matériau Austen $Rz = +4.28 - 28.68 * r + 6.67E-003 * Vc + 119.42 * f + 4.27 * ap$	R ² = 0.96 Adj R ² = 0.95 Pred R ² = 0.92
Rt	Matériau Martens $Rt = +4.14 - 28.92 * r + 5.42E-003 * Vc + 121.06 * f + 4.18 * ap$ Matériau Austen $Rt = +4.89 - 28.92 * r + 5.42E-003 * Vc + 121.06 * f + 4.18 * ap$	R ² = 0.96 Adj R ² = 0.95 Pred R ² = 0.92

Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

III.3.5 Testes de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

La figure III.7, montre bien la normalité de la distribution de l'erreur.

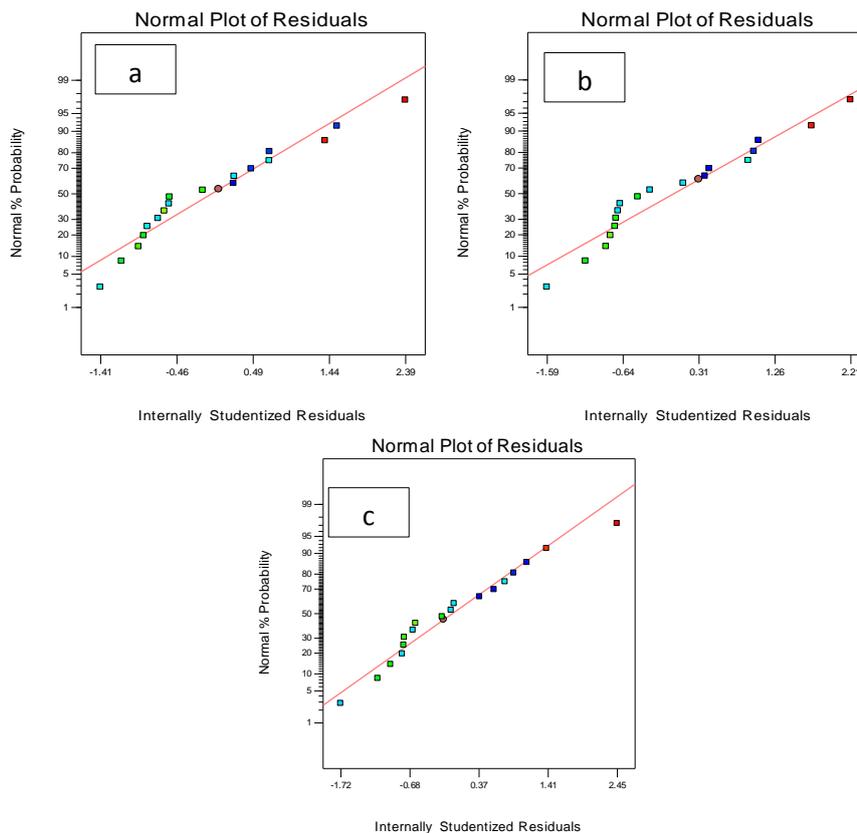


Figure III.7 Normalité de distribution de l'erreur pour (a): Ra; (b): Rz; (c): Rt.

III.3.6 Validation des modèles mathématiques

Bien que les modèles obtenus possèdent des coefficients de corrélation assez élevés, il est nécessaire de tester ces modèles par la comparaison des valeurs prédites par les modèles et celles obtenues expérimentalement, ainsi que par la vérification de la normalité de distribution de l'erreur.

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites présentée dans la figure III.8 montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision et la robustesse des modèles trouvés.

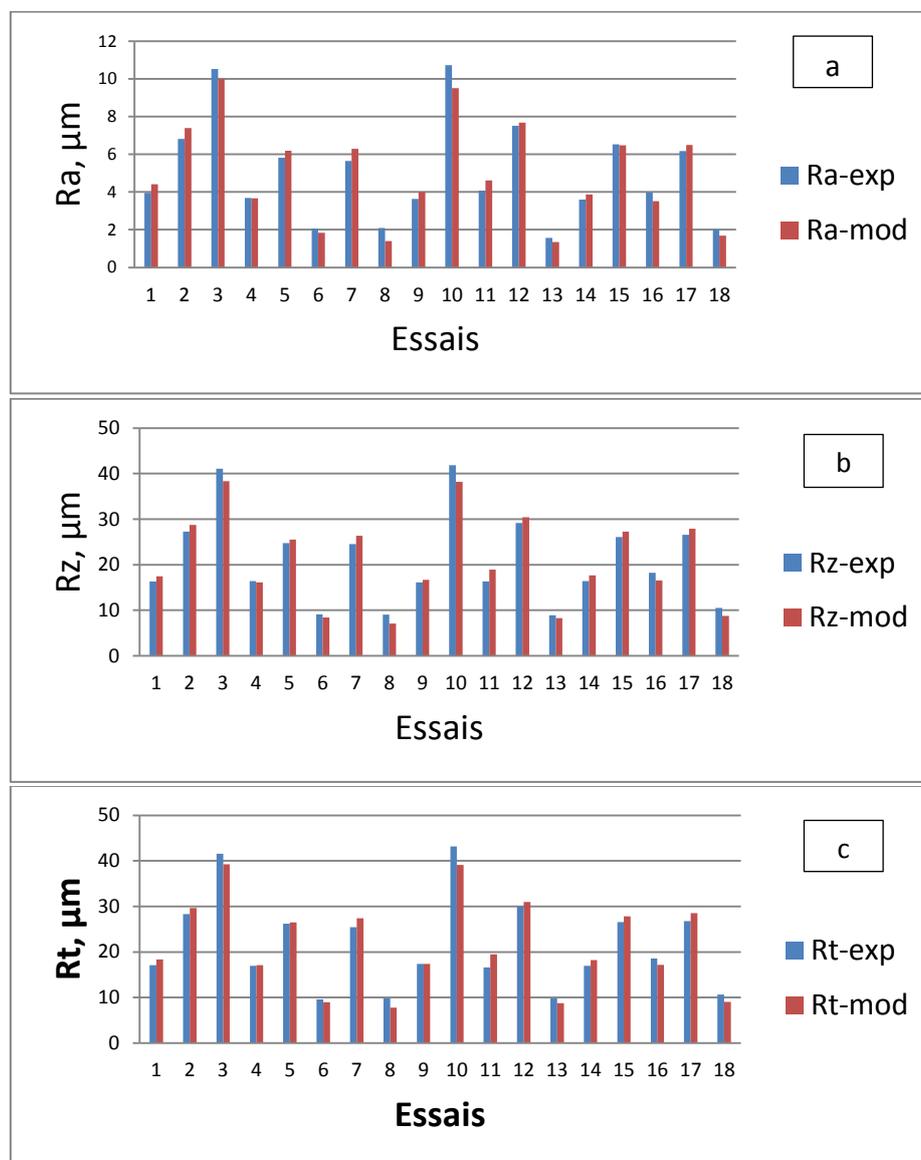


Figure III.8 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées des critères de rugosité (a): Ra, (b): Rz et (c): Rt.

III.4 Analyse des résultats expérimentaux de l'effort de coupe

Les valeurs des résultats expérimentaux des composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z) sont présentées dans le tableau III.1. Ces résultats sont analysés à l'aide d'un logiciel d'analyse Design-Expert. En appliquant l'analyse de la variance ANOVA pour les composantes de l'effort étudiées. Cette analyse est réalisée pour une signification ajustée de 5%, c.-à-d., pour un niveau de confiance de 95%.

III.4.1 Composante de l'effort de coupe (F_x)

a) Analyse de la variance ANOVA

Les résultats de l'ANOVA de la composante F_x sont présentés dans le tableau III.5. Cette analyse montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur de plus grande influence avec une valeur de contribution à 90.04%, le tableau montre que les autres paramètres n'ont pas statistiquement significatif sur la composante de l'effort de coupe F_x .

Tableau III.5 Analyse de la variance (ANOVA) pour F_x

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont%	Remarque
Model	16227.65	5	3245.53	28.45	< 0.0001	92,22	significatif
A-Matériau	98.56	1	98.56	0.86	0.3709	0,56	non significatif
B-r	147.74	1	147.74	1.30	0.2773	0,83	non significatif
C-Vc	113.39	1	113.39	0.99	0.3384	0,64	non significatif
D-f	23.72	1	23.72	0.21	0.6565	0,13	non significatif
E-ap	15844.24	1	15844.24	138.91	< 0.0001	90,04	significatif
Residual	1368.77	12	114.06			7,77	
Cor Total	17596.42	17				100	

b) Analyse des effets principaux sur (F_x)

Du la figure III.9, en remarque que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur (F_x). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe avec un effet de 90.04%.

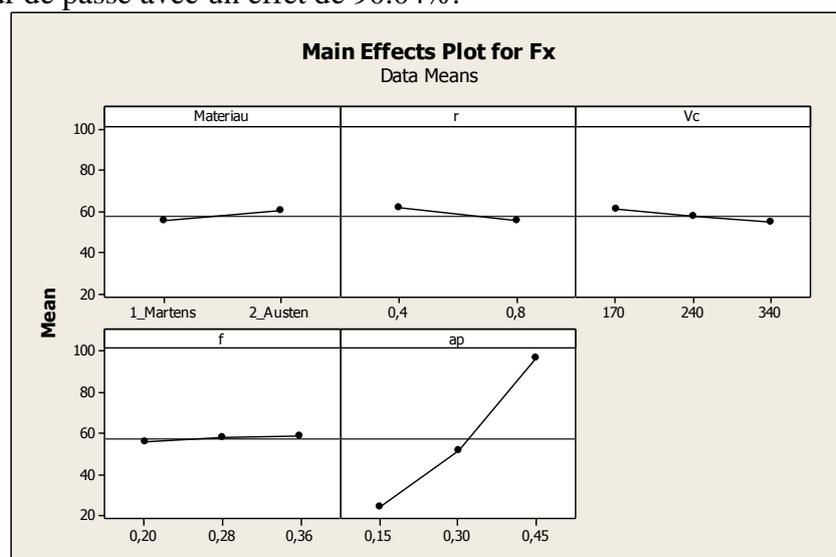


Figure III.9 Graphe des effets principaux sur F_x

c) Diagrammes de surface 3D

La figure III.10 permet d'évaluer les diagrammes d'influence des $(V_c ; a_p)$, $(r ; a_p)$, $(r;V_c)$ et $(f;V_c)$ sur le composante de l'effort de coupe (F_x). La figure montre que la pente de la profondeur de passe (a_p) est importante, donc ce facteur (a_p) possède l'effet le plus significatif sur la composante (F_x).

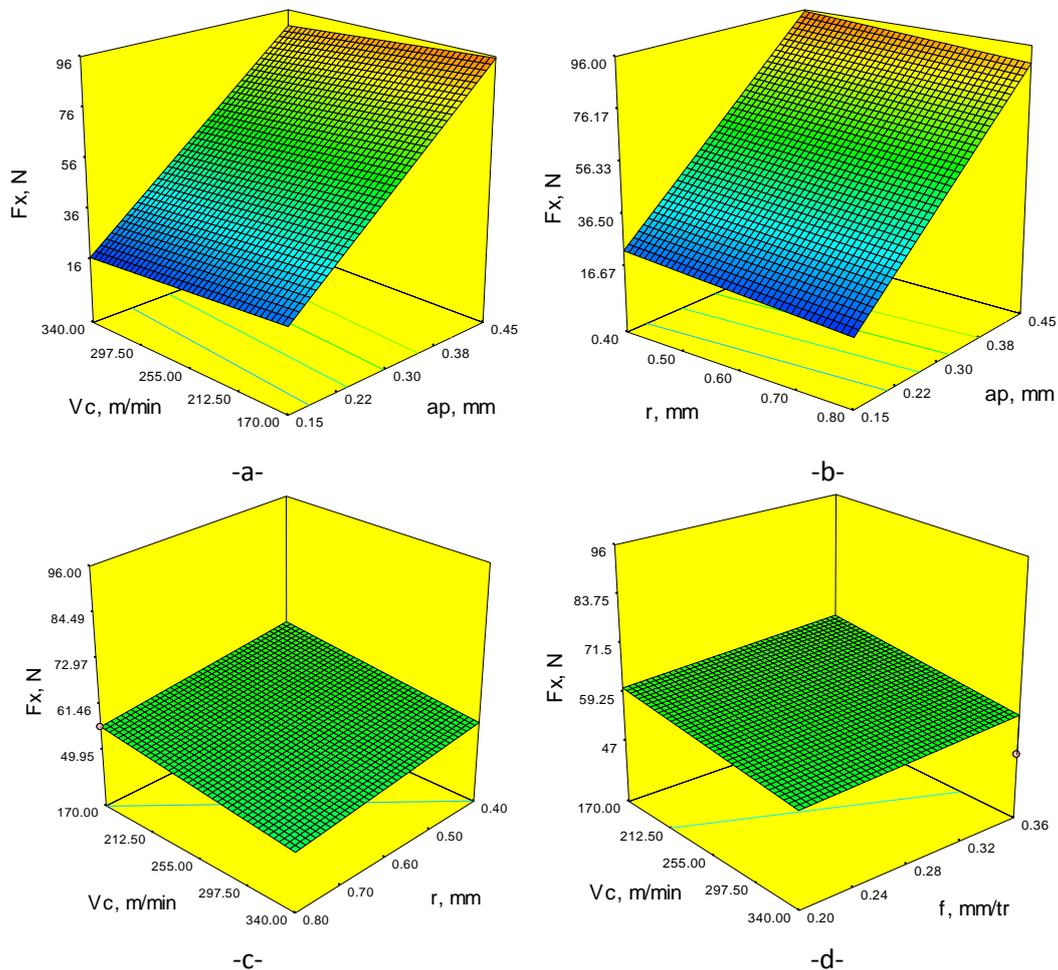


Figure III.10 Diagrammes de surface 3D de F_x en fonction de $(V_c, f, a_p$ et $r)$

III.4.2 Composante de l'effort de coupe (F_y)

a) Analyse de la variance ANOVA

L'analyse de la variance ANOVA de la variation de la composante de l'effort de coupe F_y est représentée dans le tableau III.6. Le tableau montre que la profondeur de passe (a_p) est le facteur qui a l'influence la plus significative sur la composante (F_y) de l'effort de coupe avec une contribution de 65.93%, suivi par l'avance par tour (f) avec une contribution de 13.67% et le rayon de bec (r) 12.25%, l'analyse indique que la vitesse de coupe (V_c) et le matériau n'ont pas d'influence significative sur F_y ($P > 0.05$).

Tableau III.6 Analyse de la variance (ANOVA) pour F_y

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont%	Remarque
Model	20213.98	5	4042.80	37.81	< 0.0001	94,03	significant
A-Matériau	1.04	1	1.04	9.696E-003	0.9232	0,004	non significant
B-r	2634.94	1	2634.94	24.64	0.0003	12,25	significant
C-Vc	464.75	1	464.75	4.35	0.0591	2,16	non significant
D-f	2939.07	1	2939.07	27.49	0.0002	13,67	significant
E-ap	14174.19	1	14174.19	132.55	< 0.0001	65,93	significant
Residual	1283.20	12	106.93			5,96	
Cor Total	21497.18	17				100	

b) Analyse des effets principaux sur (F_y)

Du la figure III.11, en remarque que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur (F_y). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe puis l'avance (f), en effet l'analyse ANOVA tableau III.6, montre que ces deux facteurs possèdent des contributions de 65,93%, et 13,67% respectivement.

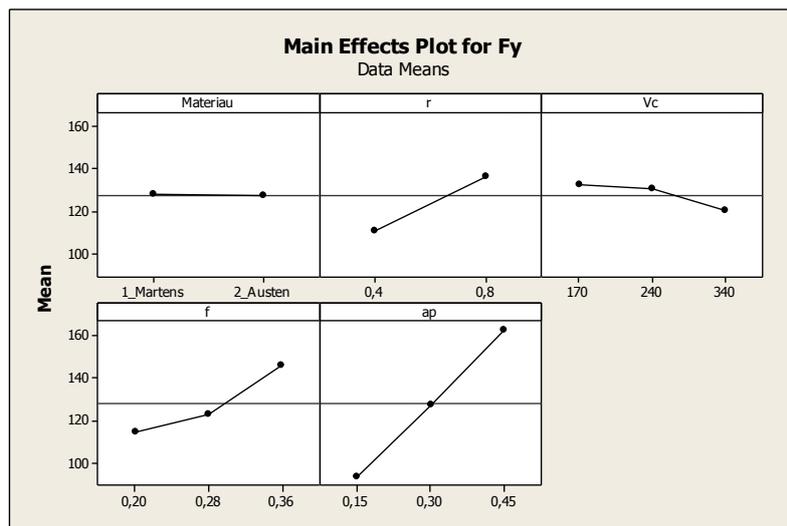


Figure III.11 Graphe des effets principaux sur F_y

c) Les diagrammes de surface 3D

La figure III.12 présente la réponse de la composante radiale de l'effort de coupe (F_y) en (3D) en fonction des facteurs d'expérimentation. La figure montre que la pente de la profondeur de passe (ap) est supérieure aux autres facteurs ce que implique que ce facteur a l'influence la plus significative suivi par l'avance par tour (f) et le rayon de bec (r).

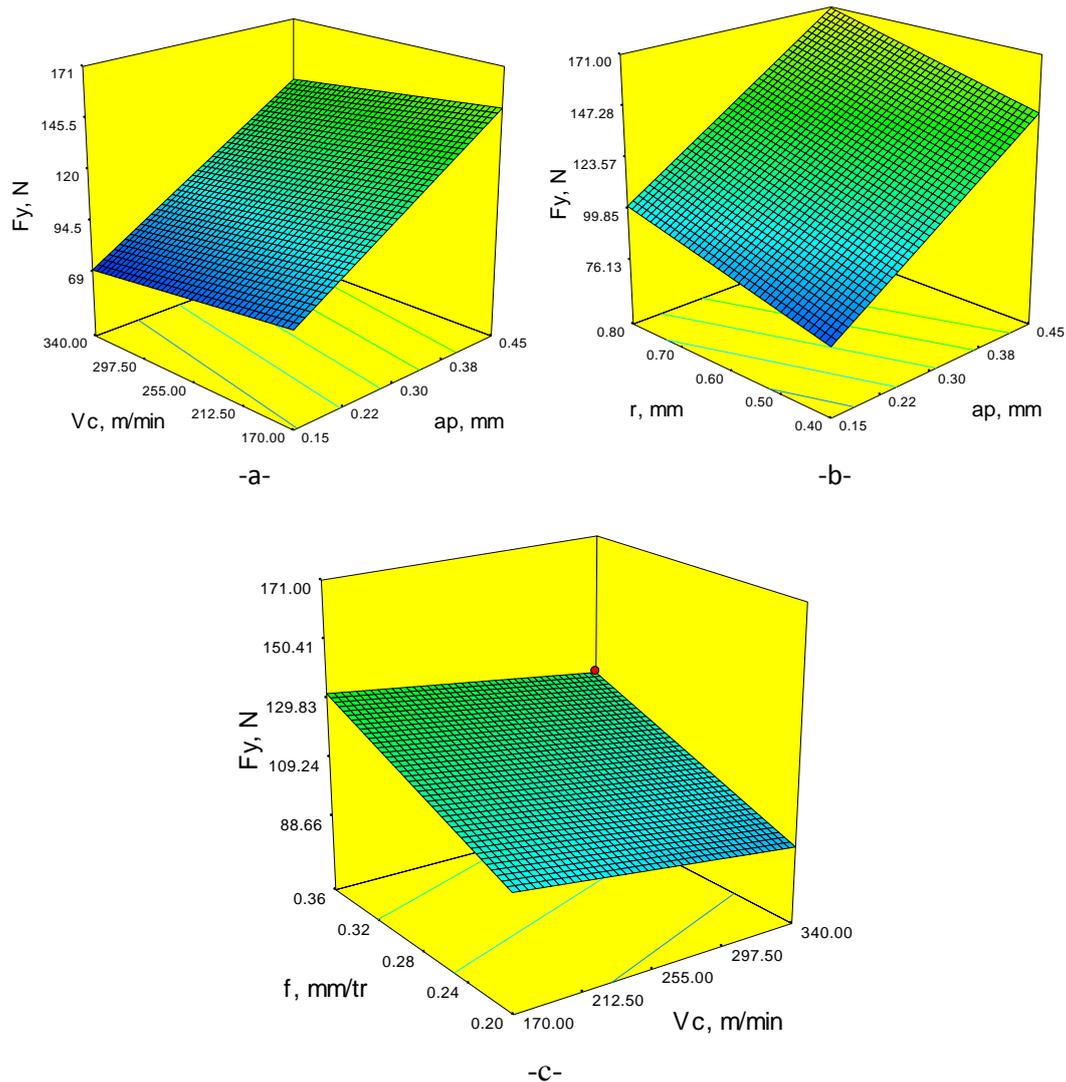


Figure III.12 Diagrammes de surface 3D de F_y en fonction de (V_c , f , ap et r)

Du la figure III.12 (a et b) influence important de ap par rapport ou autre facteurs. Les figures (a-c) montrent que le facteur de V_c sons influence sur F_y . La figure III.12 c- montre une influence de f mais cette influence est inférieure à celle de ap .

III.4.3 Composante de l'effort de coupe (F_z)

a) L'analyse de la variance ANOVA

Le tableau III.7 qui concerne l'analyse de la variance ANOVA de la composante tangentielle de l'effort (F_z) montre que la profondeur de passe (ap) le facteur de plus grande influence avec une contribution de 74,49% suivi par l'avance par tour (f) à 22,84%.

Tableau III.7 Analyse de la variance (ANOVA) pour Fz

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont%	Remarque
Model	1.213E+005	5	24257.13	124.81	< 0.0001	98,11	significant
A-Matériau	560.90	1	560.90	2.89	0.1151	0,45	non significant
B-r	92.87	1	92.87	0.48	0.5026	0,07	non significant
C-Vc	303.66	1	303.66	1.56	0.2351	0,24	non significant
D-f	28239.61	1	28239.61	145.30	< 0.0001	22,84	significant
E-ap	92088.62	1	92088.62	473.84	< 0.0001	74,49	significant
Residual	2332.17	12	194.35			1,88	
Cor Total	1.236E+005	17				100	

b) Analyse des effets principaux sur (Fz)

Du la figure III.13, en remarque que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur (Fz). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe puis l'avance, en effet l'analyse ANOVA tableau III.7, montre que ces deux facteurs possèdent des contributions de 74,49%, et 22,84% respectivement.

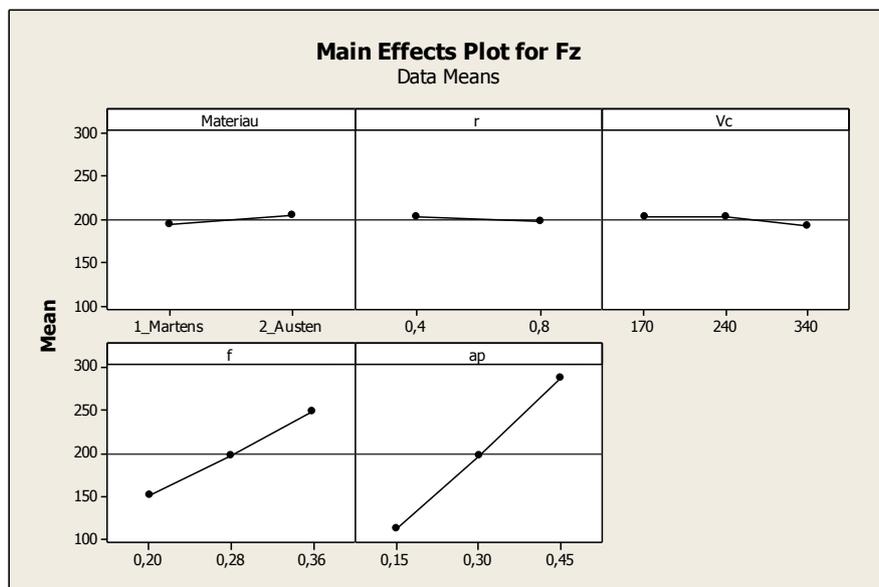


Figure III.13 Graphe des effets principaux sur Fz

c) Diagrammes de surfaces 3D de (Fz)

La figure III-14 permet d'évaluer l'influence simultanée de (Vc ; f), (Vc ; ap) et en fin (f ; ap) sur le composante de l'effort de coupe (Fz). La figure indique que la pente de la profondeur de passe (ap) est la plus importante qui implique la plus significatif suivi par l'avance par tour (f) en fin la vitesse de coupe (Vc).

III.4.5 Testes de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

La figure III.15, montre bien la normalité de la distribution de l'erreur.

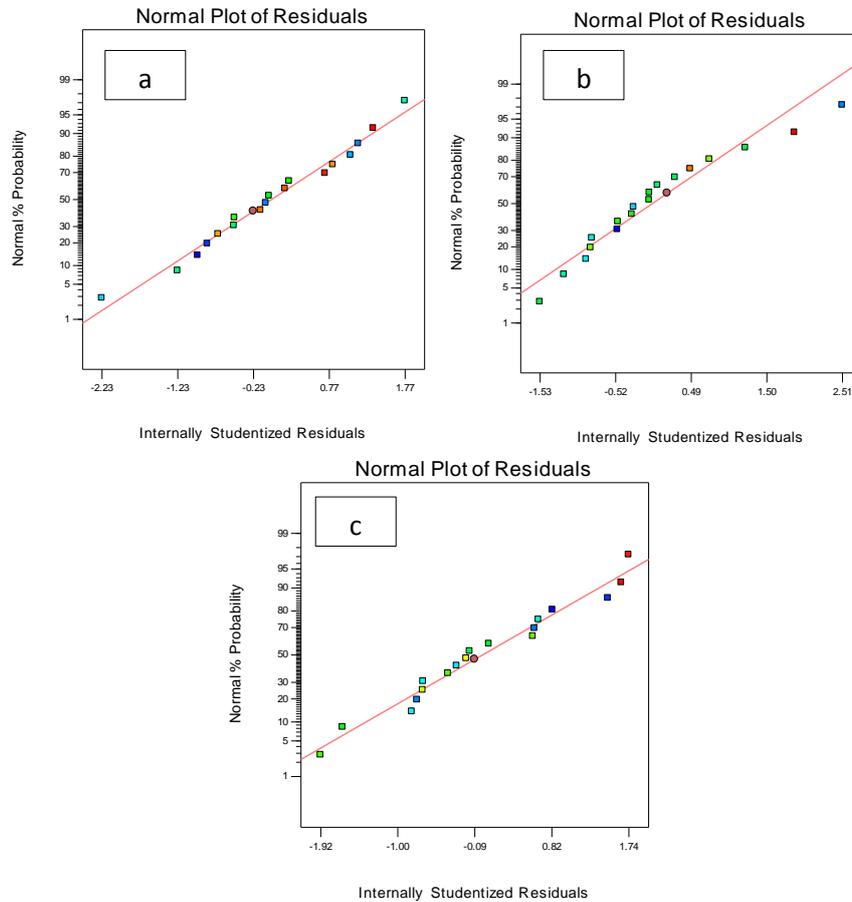


Figure III.15 Normalité de distribution de l'erreur pour (a): F_x ; (b): F_y ; (c): F_z .

III.4.6 Validation des modèles mathématiques

Bien que les modèles obtenus possèdent des coefficients de corrélation assez élevés, il est nécessaire de tester ces modèles par la comparaison des valeurs prédites par les modèles et celles obtenues expérimentalement, ainsi que par la vérification de la normalité de distribution de l'erreur.

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites présentée dans la figure III.16 montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision et la robustesse des modèles trouvés.

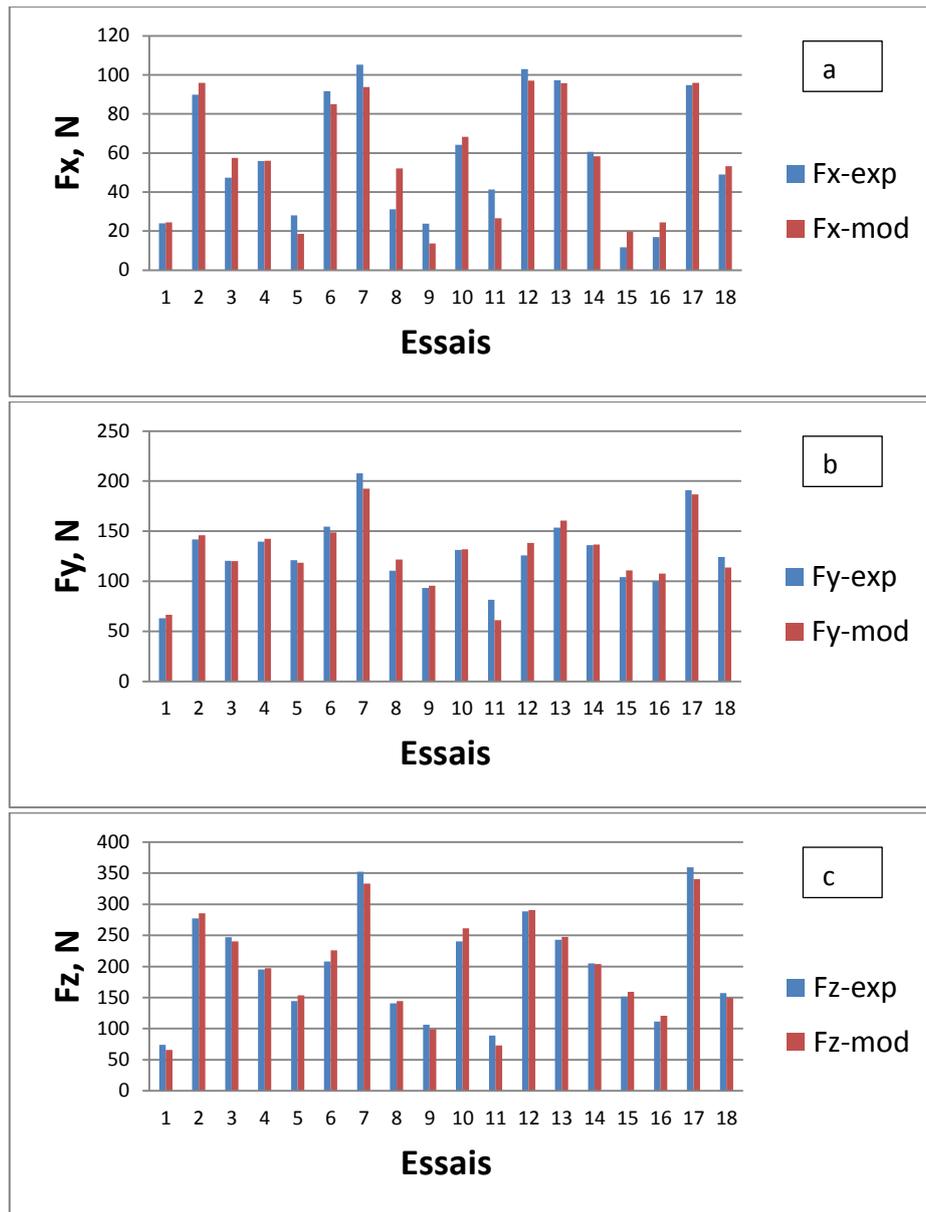


Figure III.16 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées des composantes de l'effort de coupe (a): Fx, (b): Fy et (c): Fz.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale qui est consacré à la détermination du degré d'influence des paramètres de coupe (le matériau, le rayon de bec (r), vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p)) sur les critères de rugosité considérée et les composantes de l'effort de coupe, elle a permis de déterminer les modèles mathématiques et les coefficient de détermination de chacun des paramètres.

L'analyse de la variance ANOVA à l'aide de logiciel Design-Expert, et l'Analyse des effets principaux à l'aide de logiciel Minitab-16 des différents critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) montre que l'avance par tour est le facteur qui a l'influence la plus significative sur ces critères, suivi par le rayon de bec, alors que les autres paramètres de coupe n'ont pas d'influence significative sur les critères de rugosité. Par ailleurs les différents résultats montrent que la profondeur de passe est le facteur la plus significative sur les composantes de l'effort de coupe, suivi par l'avance. Les modèles mathématiques obtenus permettent de donner des prédictions qui sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales.

CHAPITRE : IV

*Optimisation des conditions
de coupe*

IV.1. Introduction

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

Trois méthodes d'optimisation ont été exploitées dans ce chapitre :

- Optimisation des conditions de coupe par la méthode de Taguchi;
- Optimisation par L'Analyse Relationnelle Grise (Grey Relational Analysis: GRA) ;
- Optimisation des paramètres de coupe par la maximisation de la fonction de désirabilité.

IV.2. Optimisation des conditions de coupe par la méthode 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 sur 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/N), qui représente la mesure de la variation existante.

Dans la méthode Taguchi, le terme «signal» représente la valeur souhaitable et le «bruit» représente la valeur indésirable. L'objectif de l'utilisation des S/N ratio est de mesurer les performances pour développer des produits et des processus insensibles aux facteurs de bruit. Le rapport S/N indique le degré de la performance prévisible d'un produit ou d'un procédé, en présence de facteurs de bruit.

Selon le critère de performance de la réponse, le ratio signal/bruit (S/N) prend les formes suivantes :

a) L'optimum est une valeur minimale : la valeur cible 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 (IV.1) : [23]

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

b) L'optimum est une valeur maximale: la valeur cible 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 (IV.2) suivante : [23]

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

c) L'optimum est une valeur ciblée : la valeur cible 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 (IV.3) : [23]

$$S/N = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{\bar{y}_j^2}{s_j^2} \right) \right] \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

$$s^2 = \sum \frac{(y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{N_j - 1} \quad \text{Et} \quad \bar{y}_j = \sum \frac{y_{ij}}{N_j} \quad (\text{IV.4})$$

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.

Pour appliquer l'approche de Taguchi dans notre cas d'étude, nous avons fixé comme objectif d'atteindre l'optimum de chacun des critères étudiés. En d'autres termes, on doit minimiser les critères de rugosité ainsi que les composantes des efforts de coupe. Donc les ratios S/N correspondant seront calculés selon l'équation (IV.1).

En outre, nous avons jugé intéressant d'introduire un critère de productivité, à savoir, le taux d'enlèvement de matière MRR, mm^3/min .

Le taux d'enlèvement de matière (MRR) est calculé on utilisant la formule suivante :

$$MRR = 1000 \times Vc \times f \times ap \quad (\text{IV.5})$$

Ce débit de matière doit être maximisé, d'où l'utilisation de la formule IV.2 pour calculer le ratio S/N correspondant.

Les différentes valeurs du ratio S/N correspondant aux différents critères considérés sont illustrées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 Les ratios Signal/Bruit (S/N) de (Ra, Rz et Rt) et (Fx, Fy et Fz) et MRR

N° Essai	S/N-Ra	S/N-Rz	S/N-Rt	S/N-Fx	S/N-Fy	S/N-Fz	MRR , mm ³ /min	S/N- MRR
1	-11,93	-24,27	-24,66	-27,58	-35,98	-37,42	5100	74,15
2	-16,68	-28,71	-29,04	-39,07	-43,03	-48,85	30240	89,61
3	-20,45	-32,27	-32,37	-33,49	-41,61	-47,85	36720	91,30
4	-11,34	-24,28	-24,60	-34,95	-42,90	-45,81	14280	83,09
5	-15,28	-27,87	-28,36	-28,95	-41,65	-43,18	12960	82,25
6	-6,24	-19,16	-19,62	-39,25	-43,79	-46,37	30600	89,71
7	-15,03	-27,79	-28,11	-40,44	-46,35	-50,94	27540	88,80
8	-6,40	-19,08	-19,85	-29,88	-40,88	-42,97	14400	83,17
9	-11,20	-24,15	-24,79	-27,55	-39,39	-40,56	14280	83,09
10	-20,61	-32,43	-32,71	-36,15	-42,37	-47,62	18360	85,28
11	-12,21	-24,27	-24,40	-32,33	-38,21	-38,99	7200	77,15
12	-17,51	-29,30	-29,53	-40,26	-42,00	-49,21	42840	92,64
13	-3,92	-19,01	-19,80	-39,76	-43,73	-47,71	15300	83,69
14	-11,13	-24,28	-24,59	-35,66	-42,68	-46,24	20160	86,09
15	-16,30	-28,32	-28,47	-21,39	-40,35	-43,61	18360	85,28
16	-11,98	-25,19	-25,37	-24,58	-39,97	-40,95	7140	77,07
17	-15,81	-28,49	-28,56	-39,54	-45,62	-51,11	38880	91,79
18	-6,15	-20,42	-20,54	-33,80	-41,89	-43,94	20400	86,19

IV.3 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios S/N des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des cinq principaux paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap). La moyenne des ratios S/N pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios S/N pour le même niveau du facteur divisée par le nombre des ratios pour le niveau du facteur.

IV.3.1 Analyse des effets principaux sur (Ra)

Du tableau IV.2, il apparaît que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur la rugosité surface (Ra). La plus importante influence correspond à l'avance par tour avec un effet de 9.437, et que le rayon de bec (r) est la moindre importance avec un effet de 5.669. La plus faible influence est la profondeur de passe avec un effet de 0.621, la vitesse de coupe (Vc) et le matériau, avec un effet de 0.506 et 0.119.

Tableau IV.2 Moyenne des ratios S/N (Ra) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Matériau	r	Vc	f	ap
1	-12,727	-16,566	-12,467	-7,809	-13,150
2	-12,846	-10,897	-12,918	-13,305	-12,680
3			-12,974	-17,246	-12,529
Delta	0,119	5,669	0,506	9,437	0,621
Rank	5	2	4	1	3

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/ Bruit (S/N) représente la meilleure performance de la réponse (Ra) correspond aux niveaux **Ma1 r2 Vc1 f1 ap3** (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 (Ra) sont donc : Matériau martensitique, le rayon de bec 0.8 mm, la plus basse vitesse de coupe 170 m/min, la plus basse avance 0.2 mm/tr et maximum profondeur de passe 0.45 mm.

IV.3.2 Analyse des effets principaux sur (Rz)

Du tableau IV.3, Comme pour le cas du critère Ra, on remarque que l'avance possède la plus grande influence, avec un effet de 8.49, et que le rayon de bec (r) est de moindre importance avec un effet de 4.54. La plus faible influence est le matériau avec un effet de 0.46, la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (Vc), avec un effet de 0.27 et 0.15.

Tableau IV.3 Moyenne des ratios S/N (Rz) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Materiau	r	Vc	f	ap
1	-25,29	-28,54	-25,49	-21,04	-25,68
2	-25,75	-24,00	-25,45	-25,98	-25,46
3			-25,60	-29,53	-25,41
Delta	0,46	4,54	0,15	8,49	0,27
Rank	3	2	5	1	4

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Rz) correspond aux niveaux **Ma1 r2 Vc2 f1 ap3**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité surface (Rz) sont donc : Matériau martensitique, le rayon de bec 0.8 mm, la vitesse de coupe 240 m/min, la plus basse avance 0.2 mm/tr et maximum profondeur de passe 0.45 mm.

IV.3.3 Analyse des effets principaux sur (Rt)

Du tableau IV.4, il apparait que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur la rugosité surface (Rt). La plus importante influence correspond à l'avance par tour avec un effet de 8.49, et que le rayon de bec (r) est la moindre importance avec un effet de 4.54. La plus faible influence est le Matériau avec un effet de 0.46, la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (Vc), avec un effet de 0.27 et 0.15.

Tableau IV.4 : Moyenne des ratios S/N (Rt) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Materiau	r	Vc	f	ap
1	-25,71	-28,79	-25,88	-21,48	-26,01
2	-26,00	-24,39	-25,80	-26,32	-25,78
3			-25,89	-29,77	-25,78
Delta	0,29	4,40	0,09	8,29	0,23
Rank	3	2	5	1	4

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Rt) correspond aux niveaux **Ma1 r2 Vc2 f1 ap3**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité surface (Ra) sont donc : Matériau martensitique, le rayon de bec 0.8 mm, la plus basse vitesse de coupe 170 m/min, la plus basse avance 0.2 mm/tr et maximum profondeur de passe 0.45 mm.

IV.3.4 Analyse des effets principaux sur (Fx)

Du tableau IV.5, on remarque que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur (Fx). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe avec un effet de 12.66 puis le rayon de bec (r) avec un effet de 1.83. Les faibles influences sont celles des facteurs relatifs à la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et le matériau avec des effets de 1.62, 0.44 et 0.26 respectivement.

Tableau IV.5 : Moyenne des ratios S/N (Fx) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Materiau	r	Vc	f	ap
1	-33,46	-34,81	-33,91	-33,77	-27,06
2	-33,72	-32,98	-34,24	-33,68	-33,99
3			-32,62	-33,33	-39,72
Delta	0,26	1,83	1,62	0,44	12,66
Rank	5	2	3	4	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fx) correspond aux niveaux **Ma1 r2 Vc3 f3 ap1**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de (Fx) sont donc : Matériau martensitique, le rayon de bec 0.8 mm, la plus grande vitesse de coupe 340 m/min, la plus grande avance 0.36 mm/tr et minimum profondeur de passe 0.15 mm.

IV.3.5 Analyse des effets principaux sur (Fy)

Du tableau IV.6, Comme pour le cas du critère Fx, on remarque que la profondeur de passe possède la plus grande influence, avec un effet de 4.83 puis l'avance (f) avec un effet de 2.24 et le rayon de bec (r) avec un effet de 1.90. Les faibles influences sont celles des facteurs relatifs à la vitesse de coupe (Vc) et le matériau avec des effets de 0.51 et 0.14 respectivement.

Tableau IV.6 : Moyenne des ratios S/N (Fy) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Materiau	r	Vc	f	ap
1	-41,73	-40,53	-41,88	-40,75	-39,26
2	-41,87	-42,43	-42,01	-41,66	-42,05
3			-41,50	-42,99	-44,09
Delta	0,14	1,90	0,51	2,24	4,83
Rank	5	3	4	2	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fy) correspond aux niveaux **Ma1 r1 Vc3 f1 ap1**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de (Fy) sont donc : Matériau martensitique, le rayon de bec 0.4 mm, la plus grande vitesse de coupe 340 m/min, la plus basse avance 0.2 mm/tr et minimum profondeur de passe 0.15 mm.

IV.3.6 Analyse des effets principaux sur (Fz)

Du tableau IV.7, on remarque que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur (Fz). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe avec un effet de 8.25 puis l'avance (f) avec un effet de 4.48. Les faibles influences sont celles des facteurs relatifs à le matériau, le rayon de bec (r) et la vitesse de coupe (Vc) avec des effets de 0.60, 0.29 et 0.18 respectivement.

Tableau IV.7 : Moyenne des ratios S/N (Fz) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Materiau	r	Vc	f	ap
1	-44,88	-44,99	-45,08	-42,90	-40,79
2	-45,49	-45,28	-45,22	-45,27	-45,74
3			-45,26	-47,38	-49,03
Delta	0,60	0,29	0,18	4,48	8,25
Rank	3	4	5	2	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fz) correspond aux niveaux **Ma1 r1 Vc1 f1 ap1**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de (Fy) sont donc : Matériau martensitique, le rayon de bec 0.4 mm, la plus basse vitesse de coupe 170 m/min, la plus basse avance 0.2 mm/tr et minimum profondeur de passe 0.15 mm.

IV.3.7 Analyse des effets principaux sur (MRR)

Du tableau IV.8, on remarque que les paramètres d'usinage (matériau, r, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur (MRR). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe avec un effet de 9.54 puis la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (f) avec un effet de 6.02 et 5.11 respectivement.

Tableau IV.8 : Moyenne des ratios S/N (MRR) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Materiau	r	Vc	f	ap
1	85,02	85,02	82,02	82,34	79,83
2	85,02	85,02	85,01	85,27	85,85
3			88,04	87,45	89,38
Delta	0,00	0,00	6,02	5,11	9,54
Rank	4	5	2	3	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (MRR) correspond aux niveaux **Vc3 f3 ap3**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de (Fy) sont donc : la plus grande vitesse de coupe 340 m/min, la plus grande avance 0.36 mm/tr et maximum profondeur de passe 0.45 mm.

Le tableau IV.9 présente un récapitulatif des résultats d'optimisation de chacun des paramètres considérés, selon l'approche de Taguchi.

Tableau IV.9 résultats d'optimisation selon l'approche de Taguchi pour les différents critères.

Critère d'optimisation	Matériau	r, (mm)	Vc, (m/min)	f, (mm/tr)	ap, (mm)
Ra-min	martensitique	0.8	170	0.20	0.45
Rz-min	martensitique	0.8	240	0.20	0.45
Rt-min	martensitique	0.8	240	0.20	0.45
Fx-min	martensitique	0.8	340	0.36	0.15
Fy-min	martensitique	0.4	340	0.20	0.15
Fz-min	martensitique	0.4	170	0.20	0.15
MRR-max	-	-	340	0.36	0.45

D'après les résultats il n'existe pas de régime optimal qui satisfait tous les paramètres technologiques étudiés, mais il existe différentes combinaisons correspondant chacune aux critères d'optimisation considérés.

D'où la nécessité d'utiliser d'autres méthodes d'optimisation qui permettent de prendre en compte plusieurs objectifs simultanément.

IV.4. Optimisation par L'Analyse Relationnelle Grise (Grey Relational Analysis: GRA):

Les caractéristiques multiples de performance ont été évaluées en utilisant l'Analyse Relationnelle Grise (GRA). Dans cette analyse, l'optimisation des caractéristiques multiples de performance peuvent être convertis à l'optimisation de la Qualité Relationnelle Unique Grise. Les étapes suivantes sont considérées pour l'Analyse Relationnelle Grise (GRA).

IV.4.1 Étape 1: La normalisation [25]

Les rapports S/N obtenus par la méthode de Taguchi sont normalisés dans l'intervalle 0 à 1. Si le but est la minimisation du critère (les critères de rugosité et les efforts de coupe) alors la séquence originale est normalisée comme suit:

- Le plus petit est le meilleur (*The-smaller-the-better*) : [26]

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

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

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

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

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

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

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

IV.4.2 Étape 2: Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational Coefficients) peuvent être calculés comme suit : [26]

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

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

Où :

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

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

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

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

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

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

La valeur de ψ est en générale égale à (0.5).

IV.4.3 Etape 3 : Calcul du GRG (Grey relational grade)

Après avoir calculé la moyenne des coefficients du relationnel gris (Grey Relational Coefficients), les γ_i (Grey Relational Grade) peuvent être obtenu comme suit: [26]

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

Où: n est le nombre des caractéristiques de performance.

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

IV.4.4 Prédiction de la combinaison optimale du processus:

Le tableau IV.10 présente les valeurs normalisées des S/N pour les critères de rugosité de surface (Ra, Rz et Rt), les efforts de coupe (Fx, Fy et Fz) et le taux d'enlèvement de matière MRR.

Tableau IV.10: Valeurs des S/N ratio normalisé

N°	S/N ratios Normalisés						
	Ra-N	Rz-N	Rt-N	Fx-N	Fy-N	Fz-N	MRR-N
1	0,52	0,61	0,61	0,68	1,00	1,00	0
2	0,24	0,28	0,28	0,07	0,32	0,16	0,84
3	0,01	0,01	0,03	0,36	0,46	0,24	0,93
4	0,56	0,61	0,62	0,29	0,33	0,39	0,48
5	0,32	0,34	0,33	0,60	0,45	0,58	0,44
6	0,86	0,99	1,00	0,06	0,25	0,35	0,84
7	0,33	0,35	0,35	0,00	0,00	0,01	0,79
8	0,85	0,99	0,98	0,55	0,53	0,59	0,49
9	0,56	0,62	0,60	0,68	0,67	0,77	0,48
10	0,00	0,00	0,00	0,23	0,38	0,25	0,60
11	0,50	0,61	0,64	0,43	0,78	0,89	0,16
12	0,19	0,23	0,24	0,01	0,42	0,14	1,00
13	1,00	1,00	0,99	0,04	0,25	0,25	0,52
14	0,57	0,61	0,62	0,25	0,35	0,36	0,65
15	0,26	0,31	0,32	1,00	0,58	0,55	0,60
16	0,52	0,54	0,56	0,83	0,62	0,74	0,16
17	0,29	0,29	0,32	0,05	0,07	0,00	0,95
18	0,87	0,89	0,93	0,35	0,43	0,52	0,65

Pour le calcul des coefficients Relationnels gris, la valeur de la constante ψ a été prise (0.5). Les valeurs de ces coefficients sont présentées dans le tableau IV.11.

Tableau IV.11: Coefficients GRC (Grey Relational Coefficients).

N°	Coefficients du GR (Grey Relational Coefficients)						
	ζRa	ζRz	ζRt	ζFx	ζFy	ζFz	ζMRR
1	0,51	0,56	0,56	0,61	1,00	1,00	0,33
2	0,40	0,41	0,41	0,35	0,42	0,37	0,75
3	0,34	0,34	0,34	0,44	0,48	0,40	0,87
4	0,53	0,56	0,57	0,41	0,43	0,45	0,49
5	0,42	0,43	0,43	0,56	0,48	0,54	0,47
6	0,78	0,98	1,00	0,35	0,40	0,43	0,76
7	0,43	0,43	0,44	0,33	0,33	0,34	0,71
8	0,77	0,99	0,97	0,53	0,51	0,55	0,49
9	0,53	0,57	0,56	0,61	0,60	0,69	0,49
10	0,33	0,33	0,33	0,39	0,45	0,40	0,56
11	0,50	0,56	0,58	0,47	0,70	0,81	0,37
12	0,38	0,39	0,40	0,34	0,46	0,37	1,00
13	1,00	1,00	0,97	0,34	0,40	0,40	0,51
14	0,54	0,56	0,57	0,40	0,44	0,44	0,59
15	0,40	0,42	0,43	1,00	0,54	0,53	0,56
16	0,51	0,52	0,53	0,75	0,57	0,66	0,37
17	0,41	0,41	0,42	0,34	0,35	0,33	0,92
18	0,79	0,83	0,88	0,43	0,47	0,51	0,59

La qualité grise (GRG) donnés dans le tableau IV.12. Selon le tableau IV.12, la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 1 pour (Ra et Fz), a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que l'expérience 1 est la combinaison des

paramètres optimaux qui donne simultanément une rugosité de surface et l'effort de coupe minimale.

Et la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 6 pour (Ra, Fz et MRR), a eu la qualité grise la plus élevée et ceci signifie que l'expérience 6 est la combinaison des paramètres optimaux qui donne simultanément une rugosité de surface Ra et l'effort de coupe Fz minimale, et un volume de copeau enlevé MRR maximum.

Tableau IV.12 : Qualité Grise (Grey Grade)

N° Essai	Qualité Grise (Grey Grade)	
	Ra et Fz	Ra, Fz et MRR
1	0,755	0,615
2	0,385	0,508
3	0,366	0,535
4	0,489	0,490
5	0,483	0,479
6	0,608	0,659
7	0,383	0,491
8	0,662	0,606
9	0,610	0,571
10	0,367	0,431
11	0,657	0,563
12	0,374	0,583
13	0,700	0,636
14	0,487	0,520
15	0,464	0,495
16	0,584	0,514
17	0,373	0,554
18	0,651	0,630

IV.4.5 Optimisation des conditions de coupe pour Ra, Fz

Le niveau optimal des paramètres est le niveau correspondant au maximum de la valeur moyenne de " la qualité relationnelle grise ". La combinaison optimale pour Ra et Fz est obtenu à partir de tableau IV.13 : Matériau "niveau 1", rayon de bec "niveau 2", vitesse de coupe optimale: "niveau 1", l'avance optimale: "niveau 1" et pour la profondeur de passe optimale "niveau 1". Donc la combinaison optimale des paramètres est: **Ma1 r2 Vc1 f1 ap1**. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : Matériau austénitique, rayon de bec $r=0.8$, vitesse de coupe $V_c=170\text{m/min}$, avance $f=0.2\text{mm/tr}$ et profondeur de passe $a_p=0.15\text{ mm}$. La différence entre la valeur maximale et la valeur minimale ($\Delta = \text{Max}-\text{Min}$) de la valeur grise relationnelle est également indiqué dans le tableau IV.13.

Tableau IV.13: Effets principaux de la qualité grise de Ra et Fz

Level	Materiau	r	Vc	f	ap
1	-5,837	-6,727	-5,578	-3,470	-4,674
2	-5,987	-5,504	-6,110	-6,377	-6,202
3			-6,048	-7,888	-6,859
Delta	0,150	1,222	0,532	4,418	2,185
Rank	5	3	4	1	2

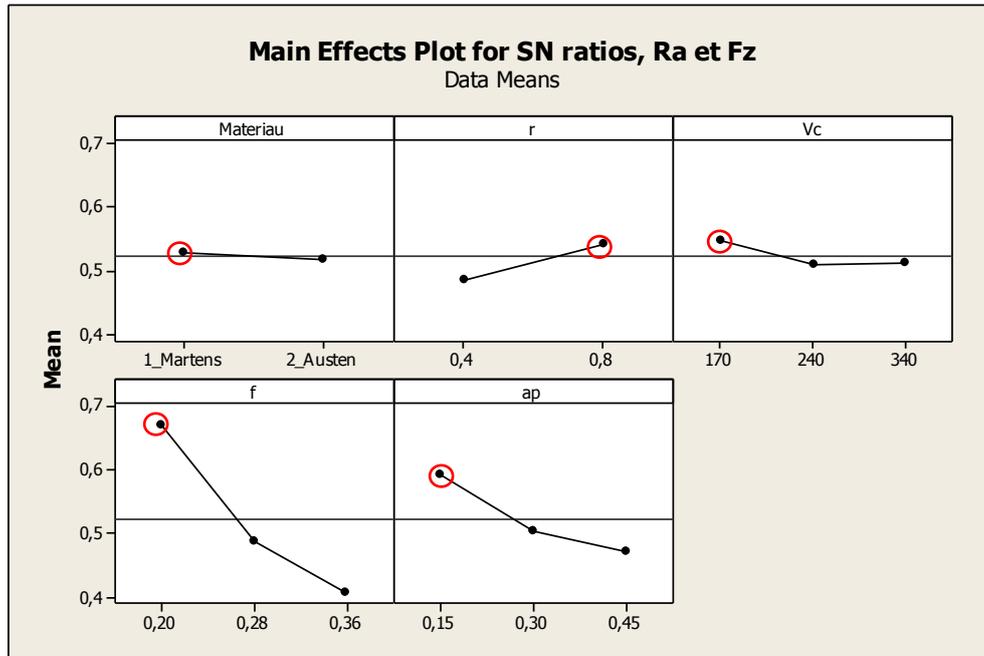


Figure IV.1 Graphique des effets principaux de Matériau, r, Vc, f et ap sur ratio S/N (Grey) de Ra, Fz.

La signification des paramètres du régime de coupe a été testée par une analyse de variance. L'utilisation d'une analyse de la variance de la valeur de la qualité relationnelle grise, a été élaboré pour identifier les facteurs importants. Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le tableau IV.14. On observe que le facteur déterminant, est l'avance (71,51%), suivie par la profondeur de passe (14,94%) et le rayon de bec (4,39%).

Tableau IV.14: ANOVA de la qualité grise (Grey Grade) de Ra et Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	% cont
Regression	5	0,2733	0,2733	0,0546	27,571	0,0000	91,992
Materiau	1	0,0003	0,0003	0,0003	0,198	0,6645	0,132
r	1	0,0130	0,0130	0,0130	6,592	0,0246	4,399
Vc	1	0,0029	0,0029	0,0029	1,500	0,2442	1,001
f	1	0,2125	0,2125	0,2125	107,171	0,0000	71,517
ap	1	0,0444	0,0444	0,0444	22,393	0,0004	14,943
Error	12	0,0237	0,0237	0,0019			8,008
Total	17	0,2971					100

R-Sq = 91,99% R-Sq(adj) = 88,66% R-Sq(pred) = 81,78%

IV.4.6 Optimisation des conditions de coupe pour Ra, Fz et MRR

La combinaison optimale pour Ra, Fz et MRR est obtenu à partir de tableau IV.15: Matériau "niveau 1", rayon de bec "niveau 2", vitesse de coupe optimale: "niveau 3", l'avance optimale: "le niveau 1" et pour la profondeur de passe optimale "niveau 3". Donc la combinaison optimale des paramètres est: **Ma1 r2 Vc3 f1 ap3**. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : Matériau austénitique, rayon de bec $r=0.8$, vitesse de coupe $Vc=340m/min$, avance $f=0.2mm/tr$ et profondeur de passe $ap=0.45 mm$.

Tableau IV.15: Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade) de Ra, Fz et MRR

Level	Materiau	r	Vc	f	ap
1	-5,238	-5,421	-5,603	-4,188	-5,394
2	-5,292	-5,188	-5,404	-5,516	-5,497
3			-4,788	-6,092	-4,905
Delta	0,054	0,233	0,815	1,904	0,592
Rank	5	4	2	1	3

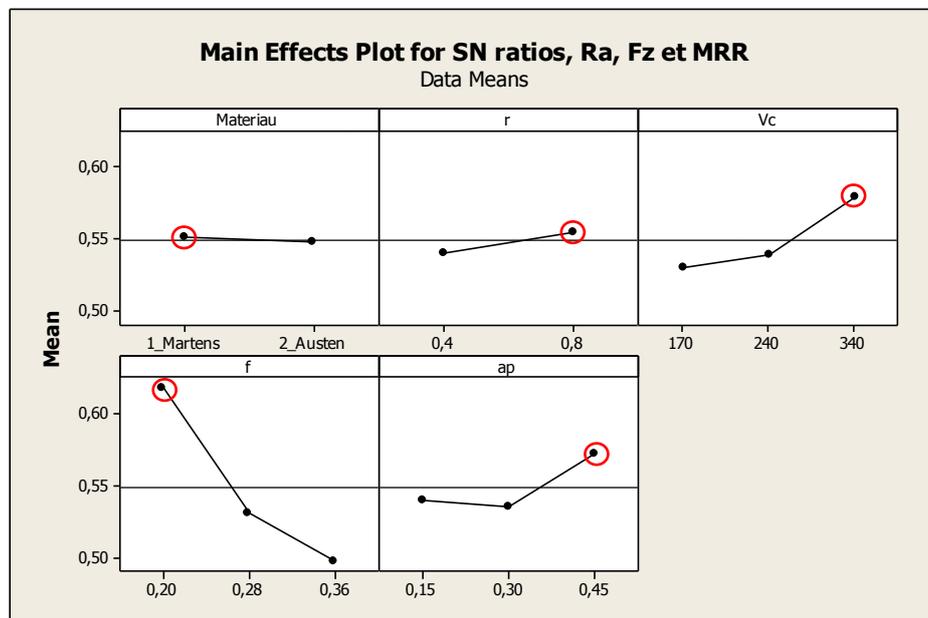


Figure IV.2 Graphique des effets principaux de Matériau, r, Vc, f et ap sur ratio S/N (Grey) de Ra, Fz et MRR.

Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le tableau IV.16. On observe que le facteur déterminant, est l'avance (64,02%), suivie par la vitesse de coupe (11.40%).

Tableau IV.16 ANOVA de la qualité grise de Ra, Fz et MRR

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	% cont
Regression	5	0,05549	0,05549	0,01109	10,462	0,0004	81,34
Materiau	1	0,00004	0,00004	0,00004	0,0411	0,8428	0,06
r	1	0,00085	0,00085	0,00085	0,8019	0,3881	1,24
Vc	1	0,00778	0,00778	0,00778	7,3363	0,0190	11,40
f	1	0,04368	0,04368	0,04368	41,178	0,0000	64,02
ap	1	0,00313	0,00313	0,00313	2,9566	0,1111	4,59
Error	12	0,01272	0,01272	0,00106			18,65
Total	17	0,06822					100

R-Sq = 81,34% R-Sq(adj) = 73,57% R-Sq(pred) = 55,27%

IV.5 optimisation des paramètres de coupe par la fonction de désirabilité :

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. Notre objectif est de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe (Matériau, r , V_c , f et a_p) en produisant la plus basse rugosité de la surface (R_a) et en générant le minimum d'effort de coupe (F_z), et maximiser le débit de copeau (MRR).

IV.5.1 Désirabilité individuelle [24]

a) Désirabilité d'une réponse à maximiser

Un exemple de fonction de désirabilité individuelle (d_i) dans le cas d'une réponse à maximiser, est représenté sur la figure IV.3. La valeur de 0 (une désirabilité individuelle prenant la valeur nulle) est attribuée lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable (non désirée) et celle de 1 lorsque la réponse représente la performance maximale désirée pour les facteurs considérés.

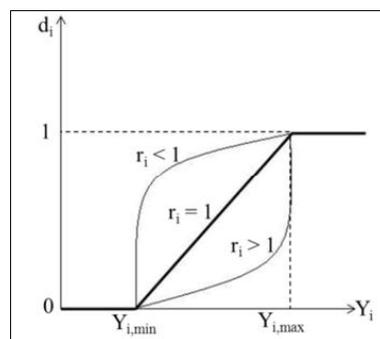


Figure IV.3: désirabilité individuelle d_i d'une réponse Y_i

L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être ainsi présentée [27] :

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \leq Y_{i, \min}$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Y_{i, \min}}{Y_{i, \max} - Y_{i, \min}} \right]^{r_i} \text{ Si } Y_{i, \min} \leq Y_i \leq Y_{i, \max} \quad (\text{IV.13})$$

$$d_i = 1 \text{ Si } Y_i \geq Y_{i, \max}$$

avec :

$Y_{i,\min}$: la valeur en dessous de laquelle la réponse Y_i ne convient pas ($d_i = 0$),

$Y_{i,\max}$: la valeur cible au-dessus de laquelle la réponse Y_i est très satisfaisante ($d_i = 1$),

r_i : le facteur modifiant l'importance d'une augmentation de la réponse Y_i pour la désirabilité individuelle considérée. Cela correspond à la pondération de la réponse dépendant de l'utilisateur en fonction du degré de désirabilité que l'on voudrait avoir pour une réponse donnée entre $Y_{i,\min}$ et $Y_{i,\max}$.

b) Désirabilité d'une réponse à minimiser

Lorsque l'on cherche à minimiser une réponse, la fonction de désirabilité peut être tracée comme le montre la figure IV.4.

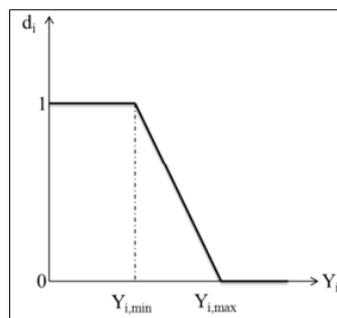


Figure IV.4: fonction de désirabilité d'une réponse à minimiser

Dans ce cas, la fonction de désirabilité est nulle quand la réponse dépasse la valeur limite ($Y_{i,\max}$), elle vaut 1 lorsque la réponse est inférieure ou égale à la valeur cible ($Y_{i,\min}$).

L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être ainsi présentée [27] :

$$d_i = 1 \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min}$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,\min} - Y_{i,\max}} \right]^{r_i} \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \quad (\text{IV.14})$$

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq Y_{i,\max}$$

avec : $Y_{i,\min}$, la valeur cible en dessous de laquelle la réponse Y_i est très satisfaisante ($d_i = 1$), $Y_{i,\max}$: la valeur au-dessus de laquelle la réponse Y_i ne convient pas ($d_i = 0$).

c) Désirabilité d'une réponse à cibler

Dans le cas où l'on souhaite avoir une valeur cible d'une réponse, la fonction de désirabilité individuelle est représentée sur la figure IV.5.

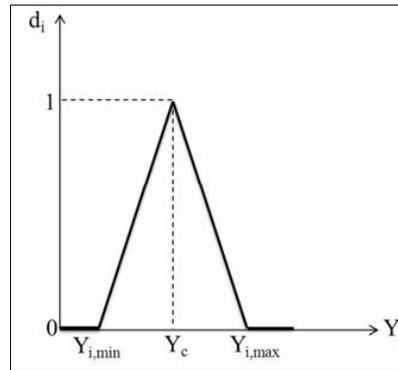


Figure IV.5: fonction de désirabilité d'une réponse à cibler

Si on cherche par exemple une valeur cible Y_c de la réponse Y_i , l'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être présentée de la façon suivante [27] :

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq Y_{i,\min}, Y_i \geq Y_{i,\max}$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Y_{i,\min}}{Y_c - Y_{i,\min}} \right]^{r_i} \quad \text{Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_c \quad (\text{IV.15})$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_c - Y_{i,\max}} \right]^{r_i} \quad \text{Si } Y_c \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \quad (\text{IV.16})$$

$$d_i = 1 \quad \text{Si } Y_i = Y_c$$

La fonction de désirabilité vaut 1 lorsque la réponse est égale à la valeur cible cherchée. Elle vaut zéro si la réponse est en dessous ou au-dessus des valeurs $Y_{i,\min}$ et $Y_{i,\max}$ précisées.

IV.5.2 Désirabilité globale

Après transformation des réponses en fonctions de désirabilité individuelle, l'étape suivante consiste à rassembler ces fonctions en une seule désirabilité globale D obtenue à partir de la moyenne géométrique des fonctions de désirabilité individuelle [27] :

$$D = \left[\prod d_i^{w_i} \right]^{\frac{1}{\sum w_i}} \quad (\text{IV.17})$$

Les paramètres w_i permettent de pondérer l'importance relative des différentes désirabilités élémentaires dans le critère global, c'est-à-dire de moduler l'importance que l'on accorde à chacune des réponses.

IV.5.3 Optimisation des conditions de coupe pour : Ra et Fz.

Les valeurs des paramètres de coupe optimales pour le critère de rugosité (Ra) et la composante d'efforts de coupe (Fz), obtenues en utilisant le logiciel «*Design Expert*», les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrés dans le tableau IV.17.

Tableau IV.17 Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usinage

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Matériau	is in range	Martens	Austen	1	1	3
r	is in range	0.4	0.8	1	1	3
Vc	is in range	170	340	1	1	3
f	is in range	0.2	0.36	1	1	3
ap	is in range	0.15	0.45	1	1	3
Fz	minimize	74.31	359.39	1	1	3
Ra	minimize	1.57	10.73	1	1	3

Le problème revient à maximiser la fonction de désirabilité (D) qui est la fonction objective sous les contraintes des variables. Le tableau IV.18 illustre les valeurs optimales des conditions d'usinage.

Les solutions optimales sont illustrées dans le tableau IV.18 par ordre de niveau décroissant de désirabilité. La valeur de désirabilité 1.000 correspond à la meilleure valeur de la rugosité de surface et le minimum d'effort de coupe dans la gamme des paramètres indiquée.

Le régime de coupe à adopter correspond à un matériau martensitique, le rayon de bec ($r = 0.79$), la vitesse de coupe ($Vc = 189.72$ m/min), l'avance de ($f = 0.21$ mm/tr), la profondeur de passe de ($ap = 0.16$ mm).

Tableau IV.18 Conditions optimales de la rugosité de surface Ra et l'effort de coupe Fz

Number	Matériau	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Fz (N)	Ra (μ m)	Desirability	
1	Martens	0.79	189.72	0.21	0.16	67.11	1.27	1.000	Selected
2	Martens	0.76	207.01	0.20	0.17	72.75	1.39	1.000	
3	Martens	0.79	325.92	0.20	0.18	72.43	1.56	1.000	
4	Martens	0.79	295.93	0.20	0.17	64.45	1.49	1.000	
5	Martens	0.78	222.35	0.20	0.17	74.04	1.34	1.000	
6	Martens	0.79	173.80	0.22	0.15	72.18	1.52	1.000	
7	Martens	0.79	241.19	0.20	0.17	71.72	1.40	1.000	
8	Martens	0.79	340.00	0.20	0.19	74.30	1.57	1.000	
9	Martens	0.79	234.57	0.21	0.17	72.05	1.47	1.000	
.
.
.
57	Austen	0.56	297.32	0.20	0.16	74.31	3.57	0.884	
58	Martens	0.47	340.00	0.20	0.15	54.90	4.19	0.845	
59	Austen	0.80	170.00	0.20	0.30	159.86	1.31	0.837	
60	Austen	0.42	340.00	0.20	0.15	67.30	4.86	0.800	

Le graphique de la solution optimale désirée est donné dans la figure IV.6. Cette figure montre la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (Matériau, r, Vc, f et ap) pour obtenir la plus basse valeur de la rugosité de surface (Ra) et le minimum d'effort de coupe (Fz).

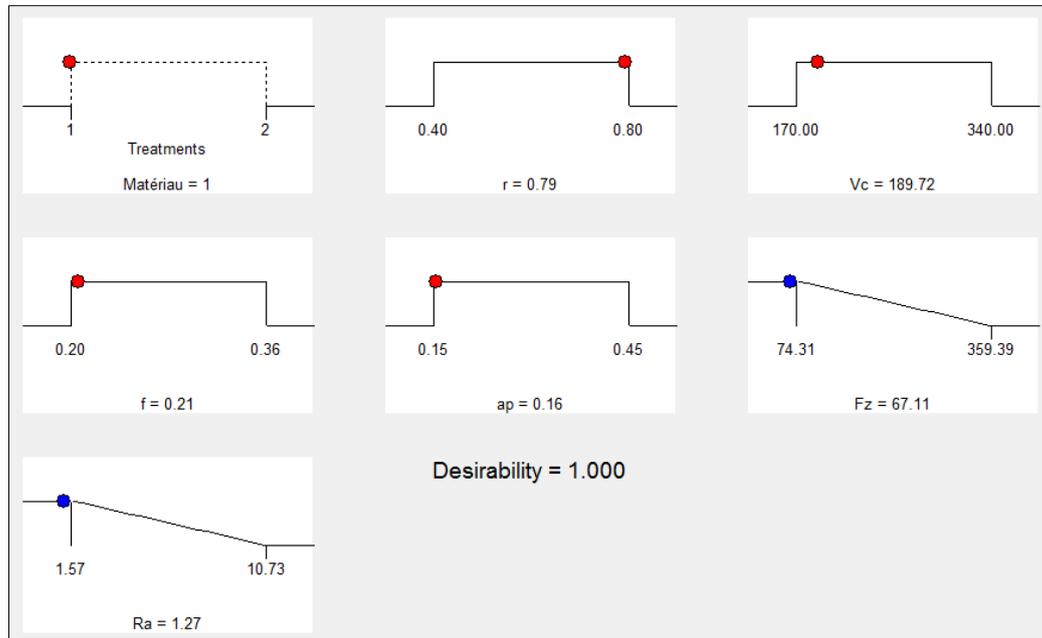


Figure IV.6 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (Ra) et (Fz).

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (1,000). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation (Ra min et Fz min).

IV.5.4 Optimisation des conditions de coupe pour : Ra, Fz et MRR.

Le tableau IV.19 présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe, pour le critère de rugosité (Ra) et la composante d'efforts de coupe (Fz), et le taux d'enlèvement de matière (MRR).

Tableau IV.19 Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usinage.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Matériau	is in range	Martens	Austen	1	1	3
r	is in range	0.4	0.8	1	1	3
Vc	is in range	170	340	1	1	3
f	is in range	0.2	0.36	1	1	3
ap	is in range	0.15	0.45	1	1	3
Fz	minimize	74.31	359.39	1	1	3
Ra	minimize	1.57	10.73	1	1	3
MRR	maximize	5.1	42.84	1	1	3

Les solutions optimales sont illustrées dans le tableau IV.20 par ordre de niveau décroissant de désirabilité. La valeur de désirabilité 0.693 correspond à la meilleure

valeur de la rugosité de surface et le minimum d'effort de coupe et le maximum MRR dans la gamme des paramètres indiquée.

Le régime de coupe à adopter correspond à un matériau martensitique, le rayon de bec ($r = 0.8$), la vitesse de coupe ($Vc = 340$ m/min), l'avance de ($f = 0.20$ mm/tr), la profondeur de passe de ($ap = 0.36$ mm).

Tableau IV.20 Conditions optimales de Ra, Fz et MRR

Number	Matériau	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Fz (N)	Ra (µm)	MRR mm³/min	Desirability	
1	Martens	0.80	340.00	0.20	0.36	176.04	1.64	25301.3	0.699	Selected
2	Martens	0.80	340.00	0.20	0.36	174.46	1.64	25120.5	0.699	
3	Martens	0.80	339.82	0.20	0.37	177.17	1.65	25417.3	0.699	
4	Martens	0.80	340.00	0.20	0.35	168.44	1.63	24431.5	0.698	
5	Martens	0.80	340.00	0.20	0.36	174.79	1.68	25195.5	0.698	
6	Martens	0.80	340.00	0.20	0.37	179.18	1.69	25701.6	0.698	
7	Martens	0.80	340.00	0.20	0.37	177.25	1.67	25435.3	0.698	
8	Martens	0.80	340.00	0.20	0.35	166.72	1.63	24235	0.698	
9	Martens	0.80	340.00	0.20	0.37	181.70	1.69	25989.5	0.698	
.
.
53	Austen	0.51	340.00	0.20	0.32	162.72	4.26	25193.4	0.638	53
54	Martens	0.80	255.11	0.20	0.42	215.75	1.46	23043	0.621	54
55	Austen	0.80	340.00	0.27	0.20	134.42	4.01	19005.2	0.598	55
56	Austen	0.42	266.35	0.20	0.41	224.01	4.93	27091.6	0.559	56

Le graphique de la solution optimale désirée est donné dans la figure IV.7. Cette figure montre la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (Matériau, r, Vc, f et ap) pour obtenir la plus basse valeur de la rugosité de surface (Ra) et le minimum d'effort de coupe (Fz) et maximum de MRR.

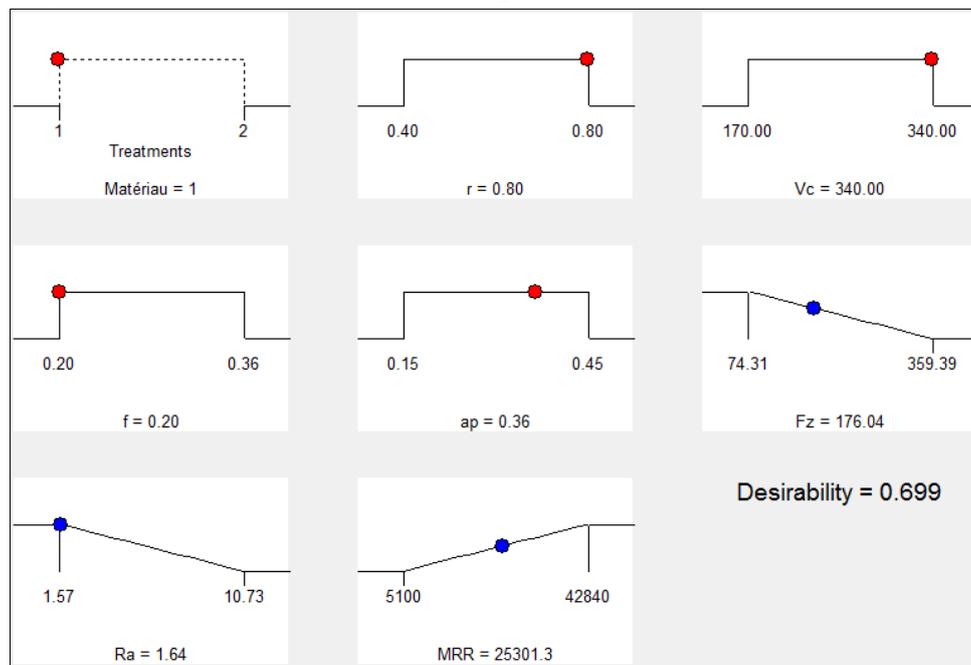


Figure IV.7 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (Ra) et (Fz) et MRR.

Tableau IV.21 Récapitulatif des résultats d'optimisation obtenus par les différentes méthodes multi-objectifs.

Critère d'optimisation	Méthode d'optimisation	Facteur d'entrée					Facteur de sortie		
		Matériau	r, mm	Vc, m/min	f, mm/tr	ap, mm	Ra, μm	Fz, N	MMR, mm^3/min
Ra, min Fz, min	Grey Grad	martensitique	0.8	170	0.2	0.15	1.16	72.1	5100
	Fonction de désirabilité	martensitique	0.79	189.72	0.21	0.16	1.27	67.11	6374.6
Ra, min Fz, min MRR, max	Grey Grad	martensitique	0.8	340	0.2	0.45	1.95	337.3	31318.2
	Fonction de désirabilité	martensitique	0.8	340	0.20	0.36	1.64	176.04	25301.3

Le tableau récapitulatif ci-dessus (Tableau IV.21) montre qu'en générale les deux méthodes multi-objectives choisies donnent des résultats similaires, surtout lorsque l'objectif est (Ra-min et Rz-min)

Pour le deuxième cas (Ra-min Fz-min et MRR-max) il est difficile de comparer les deux méthodes d'optimisation utilisées, en effet en utilisant la méthode GRA on obtient un meilleur débit de copeaux, alors que la maximisation de la fonction de désirabilité on obtient un meilleur état de surface et un effort de coupe moindre.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué trois types d'optimisation à savoir : l'optimisation par la méthode de Taguchi, l'optimisation par la méthode Grise (Grey Relationnel Analysis) et l'optimisation par la fonction de désirabilité pour optimiser le critère de rugosité (Ra), la composante de l'effort de coupe (Fz) et le volume de copeau enlevé (MRR). L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- L'analyse par la méthode de Taguchi montre qu'il n'existe pas de régime optimal qui satisfait tous les paramètres technologiques étudiés, mais il existe différentes combinaisons correspondant chacune aux critères d'optimisation considérés. Par contre les méthodes (Grise et la fonction de désirabilité) sont les meilleurs pour l'optimisation multi-objectif.

La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de :

- Méthode de Taguchi est : matériau austénitique, le rayon de bec $r=0.8$ mm, une vitesse de coupe de $Vc=170$ m/min, une avance de $f= 0,20$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap=0.45$ mm pour une rugosité optimale Ra -min, et pour Fz -min est : matériau austénitique, $r=0.8$ mm, $Vc=170$ m/min, $f=0,20$ mm/tr, et $ap=0.15$ mm, et pour MRR -max : $Vc=340$ m/min, $f= 0,36$ mm/tr, $ap=0.45$ mm
- L'Analyse Relationnelle Grise est : pour (Ra -min et Fz -min) matériau austénitique, le rayon de bec $r=0.8$ mm, une vitesse de coupe de $Vc=170$ m/min, une avance de $f= 0.2$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap=0.15$ mm, et pour (Ra -min, Fz -min et MRR -max) matériau austénitique, $r=0.8$ mm, $Vc=340$ m/min, $f= 0,2$ mm/tr, et $ap=0.45$ mm.
- L'optimisation par la fonction de désirabilité des conditions de coupe les mieux adaptées pour de rugosité ($Ra = 1.27\mu\text{m}$), et pour l'effort de coupe ($Fz = 67.11\text{N}$) nous a donné : matériau martensitique, le rayon de bec $r=0.79$ mm, une vitesse de coupe de $Vc= 189.72$ m/min, une avance de $f= 0,2$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap=0.16$ mm pour (Ra -min et Fz -min), et pour (Ra -min, Fz -min et MRR -max), $Ra = 1.64\mu\text{m}$, $Fz=176.04\text{N}$ et $MRR=25301.3$ mm³/min nous a donné : matériau martensitique $r=0.8$ mm, $Vc=340$ m/min, $f= 0,20$ mm/tr, et $ap= 0.36$ mm.

Conclusion générale

L'étude expérimentale de l'usinage des aciers **X2CrNi18-9** et **X20Cr13**, avec un outil de coupe en carbure GC2015 nous a permis d'étudier l'évolution des principaux paramètres technologiques dans le domaine de la fabrication par usinage, à savoir les critères de rugosité de surface usinée (R_a , R_z et R_t), les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) et le paramètre calculés en fonction des résultats expérimentaux qui est le débit de copeau (MRR).

Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- ❖ L'adoption d'un plan de taguchi, associée à une analyse ANOVA à permis d'une part l'étude de l'influence de chacun des paramètres de coupe sur les paramètres de sortie considérés du processus de coupe, d'autre part la déduction de modèles mathématiques permettant une éventuelle étude d'optimisation.

- ❖ Cette étude montre que l'avance par tour (f) a une influence statistique significative sur les critère de rugosité (R_a , R_z et R_t) avec (58,98%), (64,91%), (65.21%) respectivement suivi par le rayon de bec avec (36,63%), (31.19%) et 31.03% respectivement. La vitesse de coupe, la profondeur de passe et le matériau ne présentent pas une influence significative.

- ❖ L'effort axial (F_x), l'effort radial (F_y) et l'effort de coupe tangentiel (F_z) sont principalement influencés par la profondeur de passe, (90,04%), (65.93%) et (74,49%) respectivement. Alors que l'avance par tour n'influence que l'effort Radial et tangentiel avec (13,67%) et (22,84%) respectivement.

- ❖ Les modèles proposés permettent d'obtenir des approximations des différents paramètres de sortie étudiés qui sont en bonne concordance avec les valeurs obtenues expérimentalement.

❖ L'optimisation par la méthode de Taguchi a permis l'obtention d'un régime optimal pour chaque critère d'optimisation.

❖ La méthode du Grey Grad a permis une optimisation multi-objective, dans un premier cas si l'objectif est d'avoir comme objectif (Ra -min et Fz -min), on aboutit à la combinaison suivante : matériau austénitique, $r=0.8$ mm, $V_c=170$ m/min, $f= 0.2$ mm/tr, et $a_p=0.15$ mm. Dans un second cas si l'objectif est d'avoir (Ra -min, Fz -min et MRR-max), la combinaison optimale est : matériau austénitique, $r=0.8$ mm, $V_c=340$ m/min, $f= 0,2$ mm/tr, et $a_p=0.45$ mm.

❖ L'optimisation par la fonction de désirabilité des conditions de coupe les mieux adaptées pour de rugosité ($Ra = 1.27\mu\text{m}$), et pour l'effort de coupe ($F_z = 67.11\text{N}$) nous a donné : matériau martensitique, $r=0.8$ mm, $V_c\approx 170$ (189.72) m/min, $f= 0,2$ mm/tr, et $a_p=0.16$ mm pour (Ra -min et Fz -min), et pour (Ra -min, Fz -min et MRR-max), $Ra = 1.65\mu\text{m}$, $F_z=181.23$ N et MRR=25349 mm³/min nous a donné : matériau martensitique $r=0.4$ mm, $V_c\approx 340$ (339.98) m/min, $f= 0,20$ mm/tr, et $a_p=0.37$ mm.

❖ Malgré que l'augmentation de la vitesse de coupe, de la profondeur de passe et de l'avance par tour permet d'augmenter le débit de copeau, l'introduction de la maximisation du MRR conduit à une augmentation de la profondeur de passe et de vitesse de coupe, alors que l'avance par tour n'a pas été augmentée pour préserver un bon état de surface.

Références Bibliographique

[1] Mokas N, Usinabilité de l'acier c18 lors des opérations de perçage, Mémoire de Magister, Université de Annaba, 2011.

[2] Berro A, Optimisation multi-objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2001.

[3] Bagur F, Matériaux pour outils de coupe, technique de l'ingénieur BM 7 080, 2002.

[4] Mahfoudi F, Etude de l'influence de la machine-outil sur les paramètres technologiques en particulier lors de, l'usinage des matériaux durs, Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2010.

[5] Chibane H, Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire, Thèse de Doctorat, Université de Tours, 2013.

[6] Belhadi S, Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie, Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2009.

[7] Butin R & Pinot M, Fabrications mécaniques technologie, tome3, Edition Foucher, 1988.

[8] Poulachon G, Usinabilité des matériaux difficiles - Application aux aciers durcis, BM7048, 2004.

[9] Azizi M W, Utilisation des plans d'expériences en TD pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage, Thèse Doctorat, Université de Guelma, 2014.

[10] Jacques G, Les plans d'expériences, Edition Dunod, 2006.

[11] Website, <http://www.statsoft.fr/concepts-statistiques/plans-experiences/methode-taguchi.php>, consulté 01/02/2016.

[12] Kumar P, & Chauhan, S. R. Machinability Study on Finish Turning of AISI H13 Hot Working Die Tool Steel With Cubic Boron Nitride (CBN) Cutting Tool Inserts Using Response Surface Methodology (RSM). Arabian Journal for Science and Engineering, 40(5), 2015.

[13] Bagawade A D, et al. "Evaluation of cutting forces in hard turning of AISI 52100 steel by using Taguchi method." International Journal of Engineering Research and Technology. Vol. 1. No. 6 (August-2012). ESRSA Publications, 2012.

- [14] Aouici H, et al. "Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization." *Measurement* 45.3, 2012.
- [15] Sarıkaya M, and Abdulkadir G. "Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL." *Journal of Cleaner Production* 65, 2014.
- [16] Dureja J. S, Rupinder S, and Manpreet S. Bhatti. "Optimizing flank wear and surface roughness during hard turning of AISI D3 steel by Taguchi and RSM methods." *Production & Manufacturing Research* 2.1, 2014
- [17] Asiltürk I, and Süleyman N. "Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis." *Measurement* 45.4, 2012.
- [18] Gelin D M, Vincent, *Éléments de fabrication*, Edition Ellipses, 1995.
- [19] Barlier C, *Mémoires de la production*, A. Casteila, Paris, 1986.
- [20] Remadna M, *Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN*, Thèse de Doctorat, Laboratoire de Conception et Analyse de Systèmes Mécaniques (C.A.S.M) de l'INSA de Lyon, 2001.
- [21] Yallese M A, *Étude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur*, Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2005.
- [22] S. BERKANI, *Comportement des carbures métalliques lors de l'usinage des aciers inoxydables : Application aux austénitiques et martensitiques*, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2015.
- [23] Taguchi G, *System of Experimental Design*, Unipub/Kraus, International Publication, 1987.
- [24] Khoder K, *Optimisation de composants hyperfréquences par la technique des plans à surfaces de réponses*, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2011.
- [25] Kaddeche M, *Étude de la rupture du polyéthylène sous charge constante*, Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, 2014.
- [26] Lin C L, *Use of the Taguchi method and grey relational analysis turning operations with multiple performance characteristics*, *Materials and manufacturing processes*, Vol. 19, No. 2 209-220, 2004.
- [27] Derringer G, and Suich R. *Simultaneous optimization of several response variables*, *Journal of Quality Technology*, vol. 12, 214 - 219, 1980.