

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique

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



Mémoire de fin d'étude

Présenté par : DJOUIMA Abdennour

Master

Option : Maintenance Industrielle

=====

Modélisation et optimisation de l'usure des outils céramiques et la rugosité de surface de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes MSR, RNA et Taguchi

=====

Sous la Direction de : **Dr. BALHADI. S + Pr. YALLESE.M.A**

2016/2017

Remerciements

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

*Je tien à exprimer toute ma reconnaissance au docteur **BELHADI***

***SALIM** qui a su diriger ce mémoire avec intérêt et compétence, et*

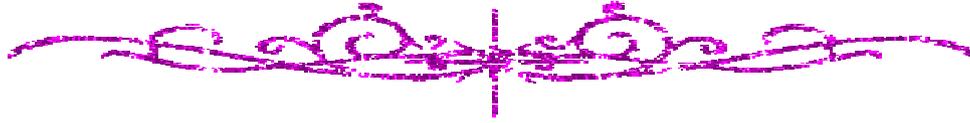
qui a su me conseiller tout au long de cette période.

*J'adresse aussi à tous les enseignants de notre département de Génie
mécanique de m'avoir apporté leur soutien pour réaliser ce travail.*

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



Dedicace



J'ai toujours pensé offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà,

l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

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

- *A mes parents.*
- *Mon encadreur Dr. Belhadi Salim*
- *A Mon frère et Mes sœurs*
- *A toute ma famille : Djouima*
- *A tous mes Amis de Skikda et de Guelma*
- *A tous mes Amis sans exception.*

Djouima Abdennour



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Étude et analyse bibliographique	
I. Introduction	3
II. Généralité sur la coupe des métaux.....	3
II.I. Tournage dur.....	3
II.I.1. Introduction	3
II.I.2 Définition de tournage dur	4
II.II. Les matériaux de coupe.....	5
II.II.1. Introduction.....	5
II.II.2.Classification des matériaux des outils de coupe	6
II.III.Les efforts de la coupe	9
II.III.1.Définition et intérêt de leur mesure	9
II.III.2.Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe.	10
II.IV. Usure des outils de coupe	11
II.IV.1.Définition	11
II.IV.2. Usure visible sur l'outil.....	12
II.V. Rugosité des surfaces	13
II.V.1. Généralités sur les états de surface	13
II.V.2.Définitions Rugosité	13
II.V.3. Paramètres caractéristiques des états de surface	15
II.V.4.Technologie de mesure	15
II.V.5.Caractéristiques de la surface	15
II.V.6.Défauts de rugosité	15
III. Etat de l'art.....	16
III.I. Etude expérimentale du tournage dur de l'acier AISI D3 avec un outil CBN... 16	
III.II. Optimisation par la méthode de Taguchi de l'usinage à sec de l'acier AISI D3	20

III.III. Etude comparative de l'optimisation de l'usure et de la rugosité par la méthode de Taguchi et RSM	23
III.IV. modélisation par régression et ANN pour prédire la rugosité et l'usure	26
III.V. Effet des paramètres de coupe sur l'usure lors du TD de l'acier AISI D3.....	28
IV. Conclusion	31

Chapitre II : Procédure et équipements d'expérience

I. Introduction	32
II. Matériels utilisés	32
II.I. Machine-outil.....	32
II.II. Matériau utilisé.....	32
II.III. Outils de coupe utilisés	34
II.IV. Porte-plaquette	35
II.V. Appareillages de mesure utilisés.....	36
II.V.1. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	36
II.V.2. Mesure des efforts	36
II.V.3. Mesure de l'usure	39
II.V.4. Autres équipements utilisé.....	39
III. Planification des expériences	39
IV. Conditions de coupe	43
V. conclusion	44

Chapitre III : Modélisation MSR et ANN des paramètres de coupe

I. Introduction	45
II. Résultats des expériences	45
III. Modélisation par la Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR).....	46
IV. Teste de validité des modèles	48
V. Analyse de la variance ANOVA.....	50
V.I. ANOVA de l'usure en dépouillé (VB).....	50
V.I.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations.....	51
V.I.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux.....	51
V.I.3. Diagrammes de surface 3D de (VB) et graphique de contour :.....	52

V.II. ANOVA de la rugosité (Ra)	53
V.II.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations	54
V.II.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux.....	54
V.II.3. Diagrammes de surface 3D de (Ra) et graphiques de contours	54
V.III. ANOVA de l'effort de coupe (Fx).....	55
V.III.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations	56
V.III.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	57
V.III.3. Diagrammes de surface 3D de (Fx) et graphique de contour	57
V.IV. ANOVA de l'effort de coupe (Fy)	58
V.IV.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations.....	59
V.IV.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	59
V.IV.3. Diagrammes de surface 3D de (Fy) et graphique de contour	60
V.V. ANOVA de l'effort de coupe (Fz).....	60
V.V.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations	61
V.V.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	62
V.V.3. Diagrammes de surfaces 3D de (Fz) et graphique de contour	62
V.VI. ANOVA de la Puissance de coupe (P).....	63
V.VI.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations.....	64
V.VI.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	64
V.VI.3. Diagrammes de surfaces 3D de (P) et graphique de contour.....	65
VI. Méthodologie de la modélisation par les réseaux de neurones artificiels (ANN)...	65
VI.I Analyse d'un ANN du critère (VB).....	67
VI.II. Comparaison entre l'analyse du (RSM) et (ANN) du (VB).....	68
VI.III. Analyse d'un ANN du critère (Ra)	69
VI.IV. Comparaison entre l'analyse du (RSM) et (ANN) du (Ra)	70
VI.V. Analyse d'un ANN du critère (Fy).....	71
VI.VI. Comparaison entre l'analyse du (RSM) et (ANN) du (Fy).....	72
VI.VII. Analyse d'un ANN du critère (P)	73
VI.VIII. Comparaison entre l'analyse du (RSM) et (ANN) du (P).....	73
VII. Conclusion.....	75

Chapitre IV : *Optimisation des conditions de coupe*

I. Introduction	76
II. Optimisation avec la méthode de Taguchi	76
II.I. l'usure en dépouille (VB minimisée)	78
II.II. rugosité de surface (Ra minimisée).....	79
II.III. composante de l'effort de coupe (Fy minimisée)	79
II.IV. composante de l'effort de coupe (Fz minimisée)	80
II.V. la Puissance de coupe (P minimisée)	81
II.VI. le débit de copeau (Q maximisée)	81
III. Optimisation avec la fonction de désirabilité	83
III.I. La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	86
IV. Conclusion	88
CONCLUSION GENERALE	89

Liste de figures

Chapitre I

Figure. I.1.	Évolution de la micro dureté entre structure pièce et outil	05
Figure. I.2.	Marché du nitrure de bore cubique poly-cristallin (Pc-BN) par type d'industrie utilisant le tournage dur.	05
Figure. I.3.	Matériaux de coupe.	06
Figure. I.4.	Classification Matériaux de coupe.	06
Figure. I.5.	Les Céramiques.	08
Figure. I.6.	Plaquette CBN.	08
Figure. I.7.	Les composantes de l'effort de coupe.	09
Figure. I.8.	Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe.	10
Figure. I.9.	Représentation des différentes zones de l'usure de l'outil durant la phase de la formation de copeau.	12
Figure. I.10.	Manifestation et mesures des usures.	12
Figure. I.11.	Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil.	13
Figure. I.12.	Caractéristiques du profil.	14
Figure. I.13.	Micrographies de l'insert CBN avec l'usure sur la face en dépouille et la face d'attaque.	17
Figure. I.14.	Effet de la vitesse de coupe sur la durée de vie de l'outil CBN.	17
Figure. I.15.	Comparaison des critères de rugosité dans la rectification (Torbaty, 1999) et le tournage dur.	18
Figure. I.16.	Effet moyen des principaux paramètres de coupe V_c , f , a_p , r sur la force de coupe (F_z), et la rugosité de surface (R_a).	18
Figure. I.17.	(a : $VB_{adm}=0.3$ mm, b : $VB_{adm}=0.4$ mm) durée de vie de l'outil (T) en fonction des paramètres de coupe (V_c , f).	19
Figure. I.18.	Exemple de profil 2D et topographie 3D de surface tournée: $\chi_r = 75^\circ$, $r = 1,6$ mm, $V_c = 220$ m / min, $f = 0,16$ mm / t et $a_p = 0,15$ mm.	20
Figure. I.19.	Graphiques 3D pour A- effet de $f \times a_p$ sur S/N (R_a), B- effet de $\chi_r \times V_c$ sur S/N (K_s).	21
Figure. I.20.	Principales courbes d'effet de S/N pour une rugosité de surface(a), (b) force tangentielle.	22
Figure. I.21.	S/N Pour la vitesse.	23
Figure. I.22.	S/N Pour l'avance.	23
Figure. I.23.	S/N Pour le DOC.	24
Figure. I.24.	S/N pour la vitesse.	25
Figure. I.25.	S/N pour l'avance.	25
Figure. I.26.	S/N pour le DOC.	25
Figure. I.27.	comparaison des rugosités déduites des modèles avec celles obtenues expérimentalement.	26
Figure. I.28.	comparaison des valeurs de l'usure déduites des modèles avec celles obtenues expérimentalement.	26
Figure. I.29.	Réseau de neurones utilisé pour l'apprentissage et la prédiction de la rugosité et de l'usure.	27
Figure. I.30.	Valeurs prédites par ANN et expérimentales de la rugosité et de l'usure.	28

Figure. I.31.a.	évolution de l'usure en dépouille en fonction de la Profondeur de coupe et l'avance.	29
Figure. I.31.b.	évolution de l'usure en dépouille en fonction de la Profondeur de coupe et la vitesse.	29
Figure. I.31.c.	évolution de l'usure en dépouille en Fonction de l'avance et la vitesse.	29
Figure. I.32.	effets principaux sur l'usure en dépouille.	30

Chapitre II

Figure.II.1.	tour parallèle modèle SN40.	32
Figure II.2.	Photo d'éprouvette utilisée.	33
Figure II.3.	Plaquette Céramique CC6050.	34
Figure II.4.	Diagramme de revenu.	35
Figure II.5.	le porte plaquette.	35
Figure II.6.	mesure de la rugosité sans démontage de la pièce.	36
Figure II.7.	Montage du dynamomètre sur la table de la machine.	37
Figure II.8.	Chaine de mesure des efforts de coupe.	38
Figure II.9.	Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE » Essai 5 : $V_c = 80\text{m/min}$, $f=0.14\text{ mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{ mm}$.	38
Figure II.10.	<i>VISUAL250</i> pour la mesure de l'usure.	39

Chapitre III

Figure III.1.	Graphe des effets principaux de V_c , f et T_u sur l'usure en dépouille V_B	50
Figure III.2.	courbe de normalité pour V_B .	51
Figure III.3.	courbe des valeurs résiduelles pour V_B .	51
Figure III.4.	courbe de normalité pour V_B .	52
Figure III.5.	courbe des résiduels pour V_B .	52
Figure III.6. a.	Diagrammes de surface 3D de R_a en fonction de (f , V_c) avec $T_u=8\text{ min}$.	52
Figure III.6. b.	Diagrammes de surface 3D de R_a en fonction de (T_u , V_c) avec $f=0,11\text{ mm/tr}$.	52
Figure III.7.	Graphe des effets principaux de V_c , f et T_u sur la rugosité R_a .	53
Figure III.8.	courbe de normalité pour R_a .	54
Figure III.9.	courbe des résiduels pour R_a .	54
Figure III.10.a.	Diagrammes de surface 3D de R_a en fonction de (f , V_c) avec $T_u=8\text{ min}$.	55
Figure III.10.b.	Diagrammes de surface 3D de R_a en fonction de (T_u , V_c) avec $f=0,11\text{ mm/tr}$.	55
Figure III.11.	Graphe des effets principaux de V_c , f et T_u sur l'effort de coupe (F_x).	56
Figure III.12.	courbe de normalité pour F_x .	57
Figure III.13.	courbe des résiduels pour F_x .	57
Figure III.14.a.	Diagrammes de surface 3D de (F_x) en fonction de (T_u , f) avec $V_c=110\text{ m/min}$.	57
Figure III.14.b.	Diagrammes de surface 3D de (F_x) en fonction de (T_u , V_c) avec $f=0,11\text{ mm/tr}$.	57
Figure III.15.	Graphe des effets principaux de V_c , f et T_u sur l'effort de coupe (F_y).	58
Figure III.16.	courbe de normalité pour F_y .	59
Figure III.17.	courbe des résiduels pour F_y .	59
Figure III.18.	Diagrammes de surface 3D de (F_y) en fonction de (T_u , f) avec.	60
Figure III.19.	Graphe des effets principaux de V_c , f et T_u sur l'effort de coupe (F_z).	61
Figure III.20.	courbe de normalité pour F_z .	62

Figure III.21.	courbe des résiduels pour Fz.	62
Figure III.22.	Diagrammes de surface 3D de (Fz) en fonction de (Tu, f) avec Vc=110 m/min.	62
Figure III.23.	Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur la puissance de coupe (P).	63
Figure III.24.	courbe de normalité pour P.	64
Figure III.25.	courbe des résiduels pour P.	64
Figure III.26 a.	Diagrammes de surface 3D de (P) en fonction de (Tu, Vc) avec f=0,11 mm/tr.	65
Figure III.26 b.	Diagrammes de surface 3D de (P) en fonction de (Tu, f) avec Vc=110 m/min.	65
Figure III.27.	neurone naturel [21].	65
Figure III.28.	Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel [23].	66
Figure III.29.	Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel [25].	66
Figure III.30.	Composition d'un neurone artificiel.	67
Figure III.31.	Digramme optimale 3-5-1 pour la modélisation de VB.	67
Figure III.32.	Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales.	68
Figure III.33.	comparaison des résiduels obtenus par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones pour VB.	68
Figure III.34.	Digramme optimale 3-5-1 pour la modélisation de Ra.	69
Figure III.35.	Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales.	70
Figure III.36.	comparaison des résiduels obtenus par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones pour Ra.	70
Figure III.37.	Digramme optimale 3-8-1 pour la modélisation de Fy.	71
Figure III.38.	Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales.	72
Figure III.39.	comparaison des résiduels obtenus par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones pour Fy.	72
Figure III.40.	Digramme optimale 3-5-1 pour la modélisation de P.	73
Figure III.41.	Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales.	74
Figure III.42.	comparaison des résiduels obtenus par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones pour P.	74

Chapitre IV

Figure.IV.1.	Principales courbes d'effet de S/N pour une usure en dépouille.	78
Figure.IV.2.	Principales courbes d'effet de S/N pour une rugosité de surface (Ra).	79
Figure.IV.3.	Principales courbes d'effet de S/N pour l'effort de coupe (Fy).	80
Figure.IV.4.	Principales courbes d'effet de S/N pour l'effort de coupe (Fz).	80
Figure.IV.5.	Principales courbes d'effet de S/N pour la puissance de coupe (P).	81
Figure.IV.6.	Principales courbes d'effet de S/N pour le débit de copeau (Q).	82
Figure.IV.7.	Résultat optimales pour une optimisation combinée.	85
Figure.IV.8.	Valeur de la désirabilité pour une optimisation combinée.	85
Figure.IV.9.	La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe.	86

Liste de tableau

Chapitre I

Tableau. I.1.	Défèrent type de Défauts de rugosité.	16
Tableau. I.2.	Récapitulatif des résultats de l'optimisation.	22
Tableau. I.3.	Paramètres d'usinage pour l'expérimentation.	23
Tableau. I.4.	Experimental factors and levels.	26
Tableau. I.5.	Paramètres du procès et leurs niveaux.	29

Chapitre II

Tableau II.1.	Conditions de traitement thermique.	33
Tableau II.2.	les compositions chimique de l'acier Z200Cr12.	34
Tableau II.3.	Informations relatives à la plaquette de coupe.	34
Tableau II.4.	Caractéristique géométrique du porte outil.	36
Tableau II.5.	Matrice de planification pour un plan 3^3 [14].	41
Tableau II.6.	Plan d'expériences (table orthogonale de Taguchi (L27 (3^3)) [15].	43
Tableau II.7.	les paramètres de coupe et paramètre de sortie.	44

Chapitre III

Tableau III.1.	Résultats expérimentaux des critères de rugosité, L'usure en dépouille de surface et les composantes de l'effort de coupe et la puissance.	46
Tableau III.2.	Analyse de la variance ANOVA pour (VB).	50
Tableau III.3.	Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra.	53
Tableau III.4.	Résultat de la variance de la composante de l'effort de coupe (Fx).	55
Tableau III.5.	Les résultats d'ANOVA pour la composante de l'effort de coupe (Fy).	58
Tableau III.6.	les résultats d'ANOVA de composante de l'effort de coupe (Fz).	60
Tableau III.7.	Résultats d'ANOVA pour la puissance de coupe (P).	63
Tableau III.8.	Performance des structures ANN du modèle de (VB).	67
Tableau III.9.	Performance des structures ANN du modèle de (Ra).	69
Tableau III.10.	Performance des structures ANN du modèle de (Fy).	71
Tableau III.11.	Performance des structures ANN du modèle de (P).	73

Chapitre IV

Tableau IV.1.	Résultats expérimentaux du rapport S/N.	77
Tableau IV.2.	Récapitulatif des résultats de l'optimisation.	82
Tableau IV.3.	Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.	84
Tableau IV.4.	Résultats d'optimisation pour différents objectifs.	87

Introduction Générale

Introduction Générale

La qualité de la surface des pièces usinées, l'augmentation de la productivité par le bon choix des conditions de coupe optimales sont les principaux objectifs des fabricants des pièces mécaniques, l'usinage des matériaux trempés ayant une dureté supérieur à 45HRC, connu comme une nouvelle technique d'usinage est appelé **tournage dur**. Cette technique est réalisée avec une gamme d'outils de coupe caractérisés par une grande dureté, bonne résistance à chaud, aux chocs et à l'usure (Céramiques, CBN, ... etc.). Notre travail s'inscrit dans ce cadre, en effet il consiste à mener une étude expérimentale de l'usinage de l'acier AISI D3 avec un outil de coupe en Céramique. Le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur certains paramètres technologiques tels que l'usure en dépouille, la rugosité de surface, les composantes de l'effort de coupe et certains paramètres calculés en fonction des résultats expérimentaux comme la puissance de coupe et le débit de copeaux. Après modélisation expérimentale des différents paramètres étudiés, nous avons procédé à l'étude de la détermination du régime de coupe optimal, permettant d'obtenir des objectifs précis.

La rédaction de ce mémoire est structurée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique qui concerne le tournage dur, les définitions des paramètres technologiques et un état de l'art sur les différents travaux de recherche en relation avec notre sujet d'étude.

Le deuxième chapitre, présente d'une part, une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences (plan et intervalles de variation des paramètres de coupe) et d'autre part, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences.

Le troisième chapitre concerne une étude statistique, analyse de la variance ANOVA des résultats expérimentaux à l'aide d'un logiciel Design-Expert. Le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur le critère de l'usure en dépouille (VB), la rugosité de surface (Ra) et les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) ainsi que la puissance de coupe (P). Ensuite il est possible de déterminer des modèles mathématiques qui permettent la prédiction de ces paramètres. En plus d'une modélisation par les réseaux de neurones artificiels (ANN) de différents paramètres, à savoir, le critères de l'usure en dépouille (VB), la rugosité de surface (Ra) et l'effort de coupe (F_y) ainsi que la puissance de coupe (P) pour faire enfin une comparaison entre les deux approches de modélisation (RSM) et (ANN).

Dans le quatrième chapitre, une optimisation est présentée. Dans un premier temps nous avons utilisé une méthode mono-objective, à savoir la méthodologie de Taguchi alors que dans un second temps nous avons utilisé une méthode multi-objective qui est basée sur la maximisation de la fonction de désirabilité. Dans ce cas les critères d'optimisation considérés sont : usure en dépouille (VB_{\min}), rugosité de surface (Ra_{\min}), efforts de coupe (Fy_{\min} , Fz_{\min}) ainsi que puissance de coupe (P_{\min}) et débit de copeaux (Q_{\max}), ce qui conduit à l'obtention d'un régime de coupe optimal des paramètres technologiques.

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

Chapitre I

Étude et analyse bibliographique

I. Introduction

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 la surface, le coût et les conditions de travail rigide. Les meilleurs outils de coupe les plus répandu 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) sont utilisés beaucoup plus lors du tournage dur (acier durci)

II. Généralité sur la coupe des métaux

II.I. Tournage dur

II.I.1. Introduction [1]

L'usinage des aciers traités thermiquement dans leur état durci n'est pas nouveau, et existe depuis sans doute que les matériaux à outils durs ont vu le jour. C'est le cas des céramiques, en effet les premiers brevets et publication sur les matériaux de coupe céramique à base d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) datent du début du XX^e siècle. Des résultats, permettant l'exploitation de la céramique, ont été mis au point en particulier aux États-Unis, en URSS et en Allemagne. L'application pratique de la céramique de coupe fut présentée pour la première fois lors des expositions de la machine-outil de Chicago, en 1956, et de Hanovre en 1957. C'est l'oxyde le plus stable, possédant une excellente stabilité chimique jusqu'aux températures avoisinant son point de fusion (2050°C).

Cette céramique oxydée rendait possible l'usinage des fontes et des aciers à des vitesses qui, pour la première fois, excédaient la limite des 1000 m/min. Le terme d'usinage à grande vitesse) était né. Il était donc devenu nécessaire de perfectionner les machines-outils.

Ces produits céramiques offrent de nombreuses possibilités d'applications en raison de leurs propriétés remarquable (non métallique, inorganique, réfractaire), et leur champ d'application s'agrandit de jour en jour, malgré l'image particulière de fragilité, de rupture, ...etc.

Il en est de même pour le nitrure de bore cubique (CBN) qui a été synthétisé pour la première fois en 1957 à la Compagnie General Electric aux États-Unis. Cependant, il n'a été utilisé industriellement pour la coupe des métaux qu'à partir du milieu des années 1970.

La prise de conscience industrielle à propos de la technique du tournage dur n'a été vraiment effective qu'à partir du début des années 1990. Il s'est donc passé une trentaine d'années entre la possibilité d'utiliser la technique et la naissance du besoin. Ce temps de transfert technologique peut paraître long. Mais rétrospectivement on

pouvait bien se demander à quoi cela pouvait être utile d'usiner par un autre procédé des pièces traitées, alors que la rectification était très performante.

En 20 ans, les mentalités ont beaucoup évolué, et les contraintes de fabrication ont été bouleversées, notamment suite aux directives européennes en matière d'environnement. A présent, tout industriel a compris que fabriquer écologique devenait une nécessité, voir une action civique vis-à-vis des générations futures. Ces contraintes environnementales ont amené les entreprises qui génèrent des boues de rectification à réfléchir sur la façon de fabriquer leurs pièces. Effectivement il est préférable de produire des déchets recyclables tels que des copeaux plutôt que des boues de rectification chargées d'hydrocarbures.

II.1.2 Définition de tournage dur [1]

Le tournage dur concerne le tournage de matériaux ferreux durcis entre 45 et 70 HCR par des opérations principalement de finition interne ou externe, et dans certains cas, d'ébauche à l'aide d'outils modernes ayant une géométrie définie.

Ces matériaux durs sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- Une grande dureté (résistance à la pénétration) comme le montre la **figure. I.1** ;
- Un pouvoir abrasif élevé ;
- Une faible ductilité ;
- Un grand rapport dureté (HV)/module de Young (E), impliquant une quantité non négligeable de retour élastique local. L'erreur dimensionnelle devient non négligeable pour la finition des matériaux durs.

Les géométries d'outil utilisées présentent un angle de coupe fortement négatif (de l'ordre de -20°). Ce procédé existe depuis que les matériaux coupants ont été capable de résister à de telles contraintes de dureté (apparition des céramiques en 1960, c-BN).

Cependant, l'industrie ne s'est intéressée réellement à cette technique que trente ans plus tard, pour trois raisons principales :

- Un manque de fiabilité des premiers outils coupants extra-durs ;
- Les faibles gains de productivité qu'elle pouvait offrir ;
- Un manque de moyens de production adaptés.

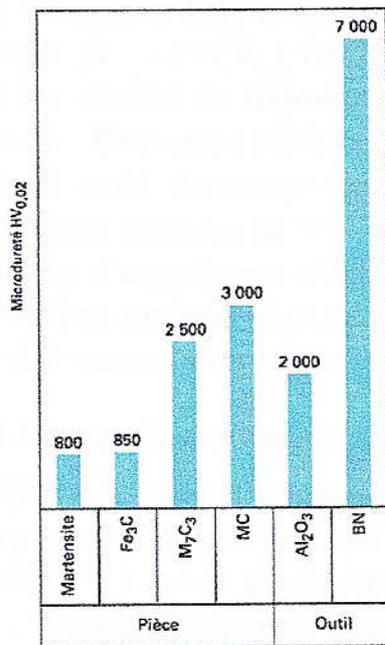


Figure. I.1.Évolution de la micro dureté entre structure pièce et outil

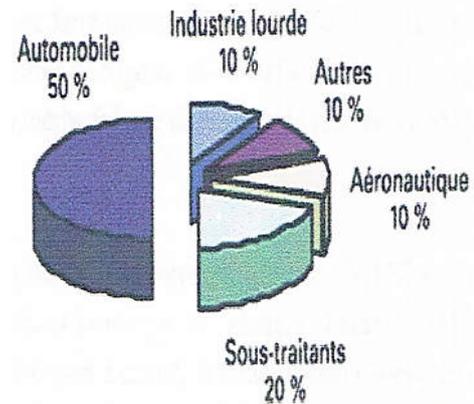


Figure. I.2.Marché du nitrure de bore cubique poly-cristallin (Pc-BN) par type d'industrie utilisant le tournage dur

La **figure. I.2.**montre les principales industries intéressées par ce type de technologie :

- L'industrie automobile (pignons, arbre de boîte) ;
- L'industrie du roulement ;
- La mécanique générale (outillage)...etc.

L'un des objectifs actuels du tournage dur est d'être complémentaire, voire concurrentiel (dans certains cas) de la rectification. Les états de surface obtenus sont remarquables (jusqu'à des rugosités Ra de 0,1 μm), les tolérances dimensionnelles sont de qualité 6 et des tolérances géométriques très précises (circularité inférieure à 1 μm). L'un des facteurs essentiels pour l'obtention de ces critères de qualité étant la machine-outil.

II.II. Les matériaux de coupe

II.II.1. Introduction [2]

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie. Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu.

Dans le courant du XXe siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.)(Fig. I.3) et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces.



Figure. I.3. Matériaux de coupe.

II.II.2. Classification des matériaux des outils de coupe [3]

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure (fig. I.4). Ils sont divisés en un grand nombre de nuances dotées de propriétés spécifiques. De manière générale, les matériaux de coupe doivent posséder les propriétés suivantes :

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

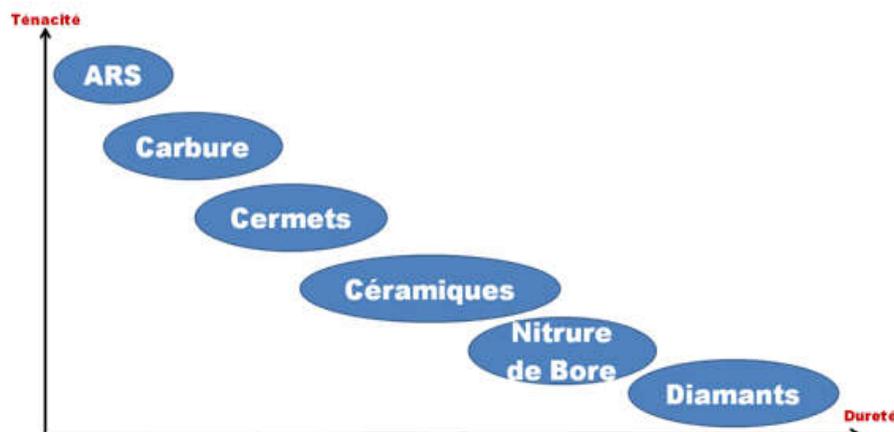


Figure. I.4. Classification Matériaux de coupe.

✓ **Les Aciers Rapides**

Ces sont des aciers fortement alliés qui contiennent plus de 0,7% de carbone et des éléments d'addition susceptibles de former des carbures.

- ✓ Dans tous les cas environ 4 % de chrome (C).
- ✓ Du tungstène (W), du molybdène (D), du vanadium (V), en proportions variables.
- ✓ Eventuellement du cobalt (K) qui a pour rôle d'augmenter la dureté à chaud.

Ils ont la propriété de pouvoir acquérir, après trempe, une dureté très élevée, et de la conserver jusqu'à une température de l'ordre de 600 °C.

Il existe un grand nombre de combinaisons possibles de ces alliages, la norme NFA 35-590 en retient 16, parmi les quelles des aciers sur carburés et des aciers au cobalt.

✓ **Carbures**

Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on fixe sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide.

Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement.

Composition : Noyau en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°).

Ou en carbure de titane (3100°), ou tantale (3780°) ou niobium (3500°).

Liant : cobalt : le plus courant ou nickel.

Revêtement en oxyde d'aluminium (céramique appelée corindon : Al_2O_3).

✓ **Cermets**

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

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...).

✓ **Céramiques**

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium (**fig. I.5**).

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil).

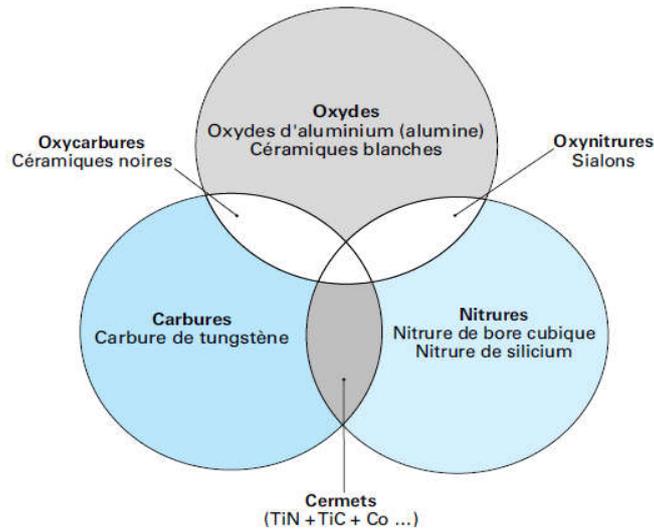


Figure. I.5. Les Céramiques.

✓ **Nitrure de Bore Cubique (CBN)**

Le CBN (**fig. I.6**) offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures...

Son utilisation requiert

- Une machine stable
- Une grande rigidité de la pièce et de la porte pièce
- Un arrosage



Figure. I.6. Plaquette CBN.

✓ **Diamant [4]**

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules.

Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassement). 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.

Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissable.

II.III.Les efforts de la coupe [5]

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).

II.III.1.Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage (**fig. I.7**).

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

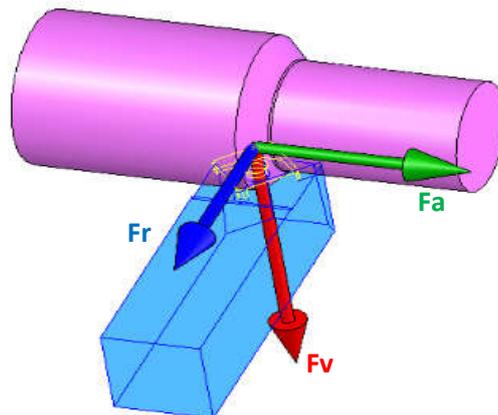


Figure. I.7.Les composantes de l'effort de coupe.

II.III.2. Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe

a) Les propriétés mécaniques du matériau à usiner

La valeur des composantes F_v , F_a et F_r est proportionnelle à la charge rupture à la traction R_t et à la dureté HB du métal à usiner.

b) Influence de la profondeur de passe et l'avance

Avec l'augmentation des ces deux facteur, la section du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus à la formation du copeau et la valeur des composantes F_v , F_a et F_r 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.

c) Influence de la vitesse de coupe :

On peut distinguer 03 zones (fig. I.8)

- ✓ **Zone A** : diminution de F avec les vitesses bases due à une diminution de frottement copeau - outil.
- ✓ **Zone B** : l'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation des frottements et par suite de l'effort tangentiel de coupe et diminution.
- ✓ **Zone C** : La V_C augmente arête rapportée diminue. L'effort tangentiel de coupe F diminue et se stabilise vers 200m/min.

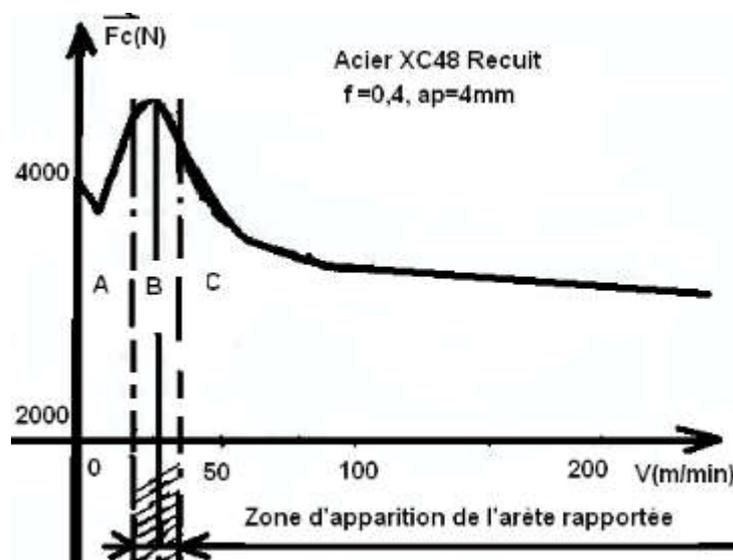


Figure. I.8. Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe.

d) Influence de l'angle d'attaque:

Il s'agit de l'angle entre l'arête de coupe principale des plaquettes et la surface de la pièce. L'épaisseur des copeaux, les forces de coupe et la durée de vie d'outil sont influencées par l'angle d'attaque. Lorsque l'angle d'attaque est négatif, les composantes tangentielle et radiale de l'effort de coupe sont importantes.

e) Influence de l'angle de direction principale :

Avec une avance inchangée, le copeau devient plus fin au fur et à mesure que l'angle diminue. Ceci conduit à une augmentation de l'effort de coupe, la réduction de l'angle de direction est limitée par les dégradations croissantes de la stabilité (forte augmentation des efforts d'avances et de pénétration tendance au broutage).

f) Influence de matériau de coupe:

Les matériaux de coupe revêtus, en particulier ceux avec des revêtements TiN ou Ti (C, N), accusent un frottement moindre et des efforts de coupe plus faible que les matériaux de coupe non revêtus. Les faces d'attaque superfinies (rectifiées, rodées, polies) et dotées d'une arête de coupe dure et tranchante, réduisent les efforts de coupe.

II.IV. Usure des outils de coupe

II.IV.1.Définition

L'usure de l'outil est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique qui doit obtenir la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes. Il s'ensuit une usure de l'outil qui peut être d'origine thermomécanique ou chimique.

Cette usure dépend des paramètres de l'usinage, mais aussi de !

- la géométrie de la plaquette : angle de coupe, présence de brise copeau ;
- revêtement et de son comportement mécanique et thermique.

Il en résulte une usure apparente schématisée par la figure (**fig. I.9**).

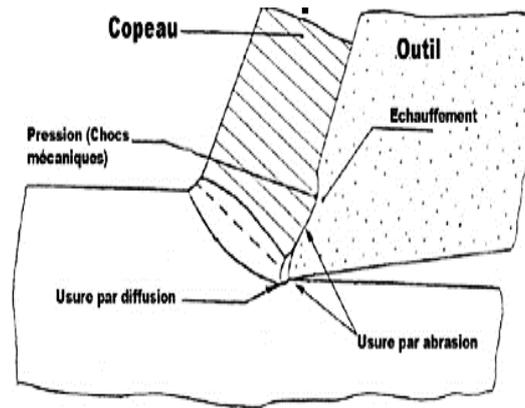


Figure. I.9. Représentation des différentes zones de l'usure de l'outil durant la phase de la formation de copeau.

II.IV.2. Usure visible sur l'outil

L'ensemble des processus décrits dans les deux paragraphes précédents, en se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils.

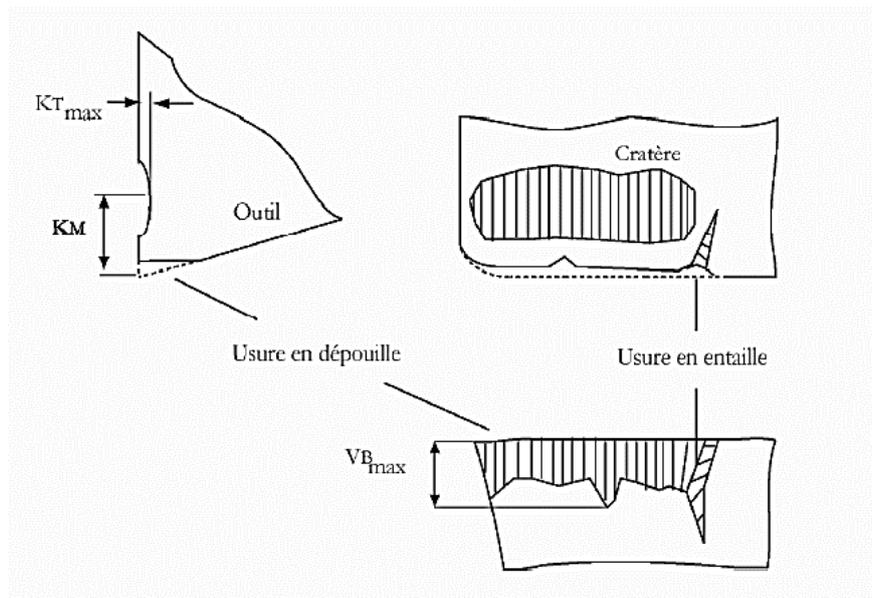


Figure. I.10. Manifestation et mesures des usures.

Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures. Ces dernières sont mesurables (**Fig. I.11**).

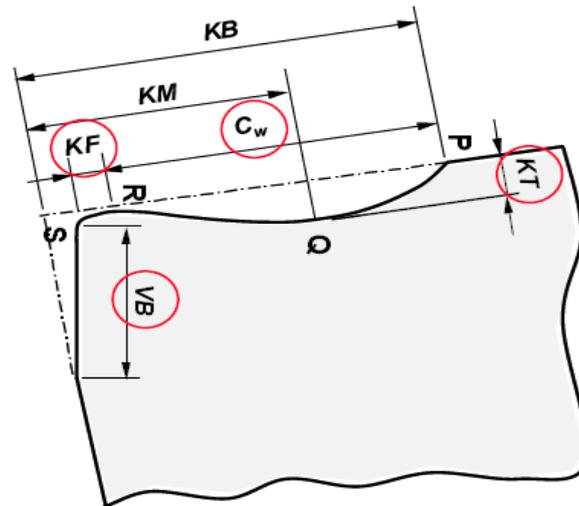


Figure. I.11. Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil.

- KM: Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil.
- KT: Profondeur du cratère.
- KB: Largeur du cratère.
- γ_c : Angle de cratérisation.
- VB: Hauteur de l'usure en dépouille.
- VN: Profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale.
- VBC: Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée.
- SV: Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée.

II.V. Rugosité des surfaces

II.V.1. Généralités sur les états de surface

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

II.V.2. Définitions Rugosité [6]

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique.

Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité

est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication.

➤ **Surface géométrique**

Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

➤ **Surface spécifiée**

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

➤ **Surface mesurée**

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

➤ **Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication (**fig. I.12**).

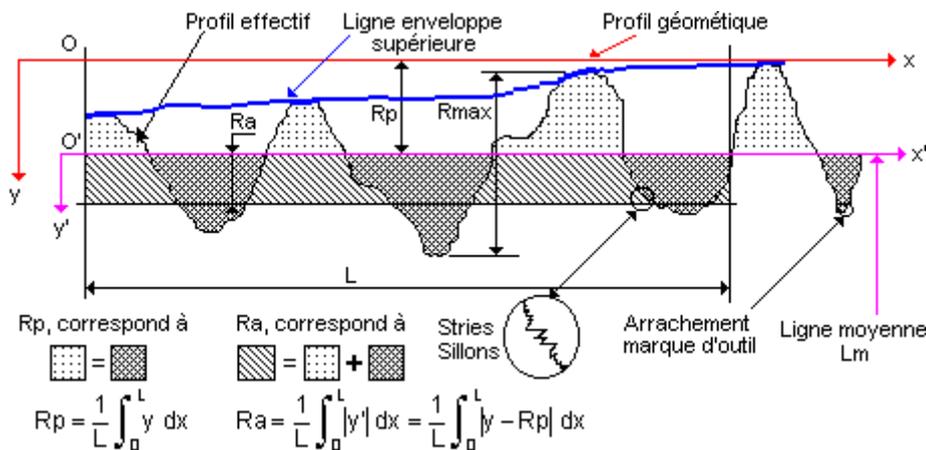


Figure. I.12.Caractéristiques du profil.

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

II.V.3. Paramètres caractéristiques des états de surface

- ❖ **Rugosité moyenne arithmétique R_a** : Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation

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

- ❖ **Rugosité moyenne des profondeurs R_z** : Moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones d'évaluations successives $L_c R_a = \frac{1}{5}(R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4})$ (I.eq.2)

- ❖ **Hauteur maximale des pics R_p** : Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation $L_m R_p = R_{p3}$ (I.eq.3)

II.V.4. Technologie de mesure

La mesure des états de surface peut être réalisée avec un microscope d'état de surface. Cette technologie de mesure présente l'avantage de permettre l'obtention d'un modèle numérique de la surface réelle sans contact. La mesure est réalisée sur un échantillon de surface. Ainsi, la mesure prend en compte la forme et la direction des stries.

II.V.5. Caractéristiques de la surface [7]

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

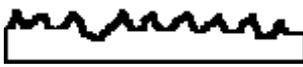
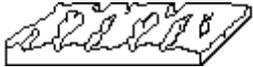
II.V.6. Défauts de rugosité

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces

L'état de rugosité dépend en effet des caractéristiques très diverses telles que :

- le frottement de roulement,
- la résistance au matage,
- l'étanchéité,
- la résistance à l'écoulement des fluides,
- la facilité d'accrochage des revêtements,
- la résistance aux efforts alternés (fatigue).

Tableau. I.1. différents types de Défauts de rugosité

	<i>Types de défauts</i>	<i>Désignation</i>	<i>Causes</i>
<i>Macrographiques</i>		défauts de forme et de position	Pendant l'usinage et après l'usinage etc.
		Ondulation périodique	Fraisage : pas de l'ondulation = avance par tour de fraise, vibrations, pièce et outil, etc.
<i>Macrographiques</i>		strie - sillon, rugosité périodique	Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil : lubrification, vibrations.
		arrachement, fentes, marques d'outil, piqûres, etc.	Qualité de l'affûtage de l'outil. Hétérogénéité du matériau usiné.

III. Etat de l'art

III.1. Etude expérimentale du tournage dur de l'acier AISI D3 avec un outil CBN.

L'étude expérimentale réalisée par BOUCHELAGHEM, Het all [8] a pour but l'analyse des performances de l'insert CBN lors du tournage dur de l'acier à outils pour travail à froid (D3). Les opérations d'usinage ont été réalisées sur un tour TOS TRENCIN modèle SN40 de puissance de 6,6 KW. Un insert de coupe (57% CBN) recouvert d'une couche de TiN, de la désignation standard SNGA120408 T01020. L'usure a été étudiée sans lubrification selon les paramètres de coupe suivants : avance (f) de 0,08 et 0,16 mm/tr, profondeur de coupe (a_p) de 0,5 mm et vitesse de coupe (V_c) de 85 à 310 m/min. Une valeur d'usure admissible [VB] de 0,3 mm est adoptée pour la durée de vie de l'outil CBN. Cependant, des valeurs d'usure ont été obtenues au-delà de cette limite afin d'observer le comportement global de l'outil CBN dans des conditions extrêmes.

L'usure de l'outil a été mesurée à l'aide d'un microscope optique (HUND W-AD) équipé d'une caméra CCD. Toutes les mesures de rugosité ont été obtenues à l'aide d'un rugosimètre (Surftest 301 Mututoyo).

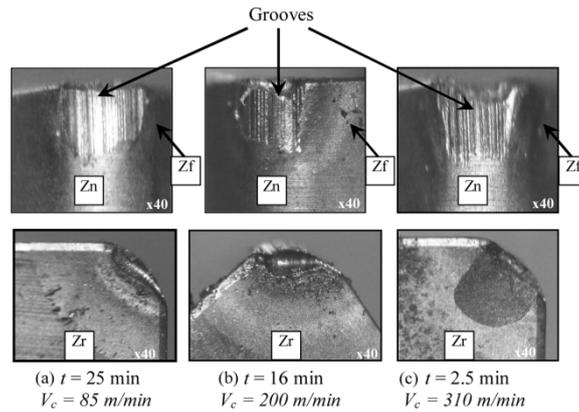


Figure. I.13. Micrographies de l'insert CBN avec l'usure sur la face en dépouille et la face d'attaque.

Lors de l'usinage de l'acier AISI D3 avec outil CBN et pour toutes les conditions testées, on observe des sillons sur la surface en dépouille de l'outil, qui apparaissent généralement au début de l'usinage et ne disparaissent jamais (**fig. I.13**). Ces sillons sont orientés dans le sens de la vitesse de coupe. Cette morphologie d'usure semble être le résultat d'une usure abrasive élevée.

L'analyse des résultats de l'évolution de l'usure en fonction du temps de coupe permet la détermination des différentes tenues de l'outil CBN. Il convient de noter que la durée de vie de l'outil (T) a été obtenue pour l'usure en dépouille car celle-ci est beaucoup plus rapide que l'usure du cratère.

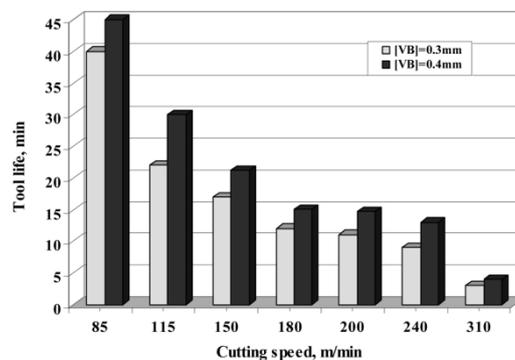


Figure. I.14. Effet de la vitesse de coupe sur la durée de vie de l'outil CBN.

Sur la base de deux critères d'usure admissibles $[VB] = 0,3 \text{ mm}$ et $[VB] = 0,4 \text{ mm}$, les valeurs de durée de vie de l'outil sont résumées dans (**Fig. I.14**). La décision d'augmenter la valeur acceptable de $[VB]$ à $0,4 \text{ mm}$ a été prise en observant que la surface usinée présente un état de surface acceptable défini par $(Ra) < 1 \text{ }\mu\text{m}$.

Une analyse comparative entre les valeurs de rugosité obtenues à partir de la littérature Torbaty (1999) et celles obtenues expérimentalement par l'acier AISI D3 usiné à l'aide d'un insert CBN ont été effectuées (**fig.I.15**).

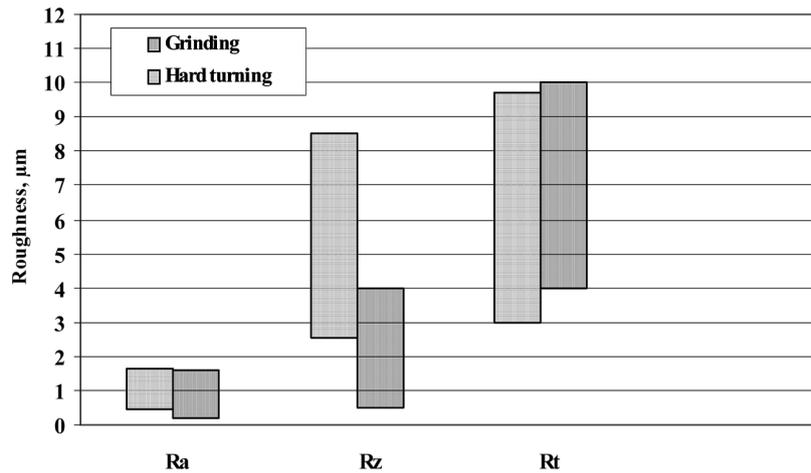


Figure. I.15. Comparaison des critères de rugosité dans la rectification (Torbaty, 1999) et le tournage dur.

On peut voir clairement que la plupart des valeurs de (Ra) obtenues lors du tournage dur sont dans la plage des valeurs obtenues par le procédé de rectification. Selon les valeurs de rugosité obtenues dans le cas du tournage dur, on peut dire que ce dernier procédé peut remplacer ou être complémentaire à la rectification pour la fabrication de précision.

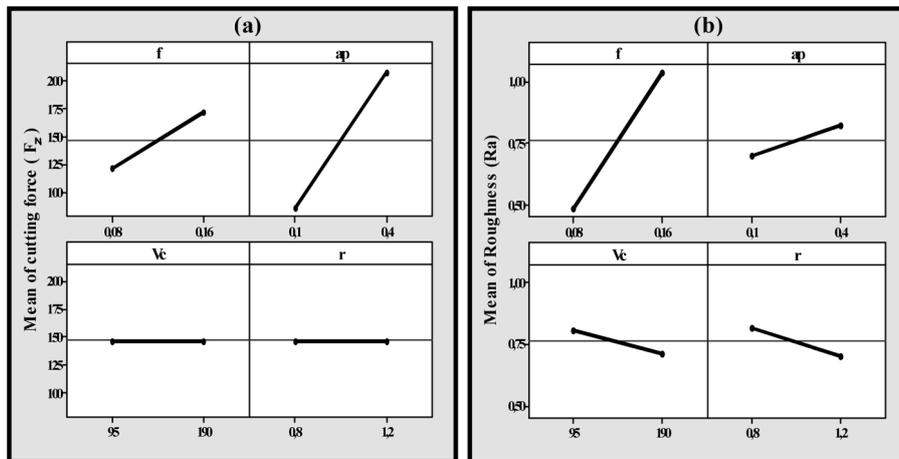


FIGURE. I.16. Effet moyen des principaux paramètres de coupe V_c , f, ap, r sur la force de coupe (F_z), et la rugosité de surface (Ra).

Les deux **figures. I.16a et 16b** représentent la valeur de rugosité de surface de (Ra) et la valeur de force de coupe de (F_z) en fonction des paramètres de coupe (V_c , f, ap et re), respectivement. La rugosité de surface augmente considérablement avec l'augmentation de l'avance. La force de coupe augmente également avec l'augmentation de la profondeur de coupe.

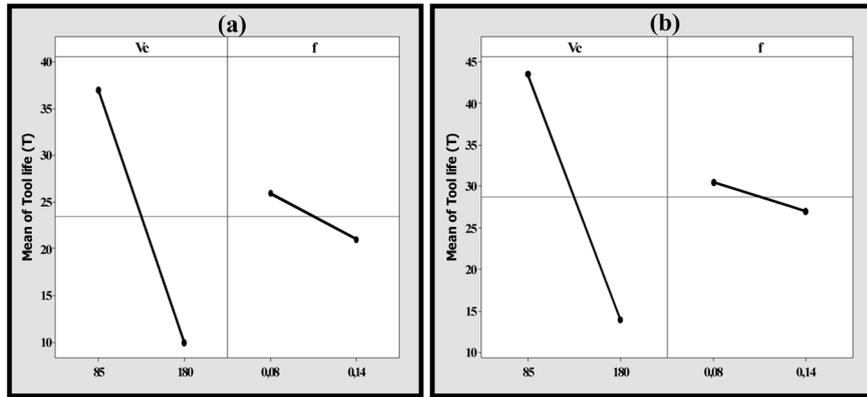


Figure. I.17.(a : $VB_{adm}=0.3$ mm, b : $VB_{adm}=0.4$ mm) durée de vie de l'outil (T) en fonction des paramètres de coupe (V_c , f).

De la figure, il est confirmé que la vitesse de coupe a le plus d'influence sur la vie d'outil pour $VB = 0,3$ mm et $VB = 0,4$ mm.

Conclusions :

Les principales conclusions qui peuvent être déduites de la présente étude sont :

- L'examen des micrographies de l'usure, la présence de rayures (stries) montre que le phénomène d'usure dominant est l'abrasion. Il est dû à l'élimination des particules d'outil CBN par de petits grains durs du matériau usiné. La présence de (Fe) et (Cr) sur la face d'attaque de l'outil implique que l'usure par adhésion peut également participer aux mécanismes d'usure des outils CBN. À des vitesses plus élevées (240-310) m/min, l'effondrement du bec de l'outil se produit dans les premières étapes en quelques minutes.
- Les vitesses de coupe supérieures à 240m/min doivent être évitées car elles donnent une durée d'utilisation très courte. Par contre, pour des applications industrielles, des vitesses de coupe variant entre 80 et 240m/min peuvent être considérées comme une vitesse de coupe intéressante pour le couple CBN/AISI D3 traité thermiquement à 60 HRC.
- L'usure en dépouille est un facteur important à considérer. Son évolution nuit à la finition de la pièce. Même avec $[VB]= 0,3$ mm, les valeurs de (Ra) se situent toujours dans des valeurs acceptables de 1 mm.
- Avec l'augmentation de l'usure, les forces de coupe augmentent. L'usinage à 115 m/min pendant 32,5 min a conduit à $VB = 0,42$ mm et une augmentation des forces de coupe de 126% pour F_y , 66% pour F_x et 84% pour F_z . La composante d'effort la plus dominante est la force radiale, suivie de la force axiale ; La force tangentielle était moins sensible à l'évolution de l'usure.

III.II. Optimisation par la méthode de Taguchi de l'usinage à sec de l'acier AISI D3

ZERTI, Oussama et all [9] a étudié l'optimisation pour améliorer les paramètres technologiques lors du tournage à sec de l'acier AISI D3 en utilisant la méthode Taguchi. L'usinage est réalisé sur un tour "TOS TRENCIN" modèle SN40 avec une puissance de broche de 6,6 kW. Les paramètres de coupe considérés sont l'angle principal de coupe, le rayon du bec, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe. L'outil de coupe est en céramique mixte.

Les mesures de la rugosité de surface (R_a) sont obtenues instantanément après chaque ébauche de passage à l'aide d'un appareil de rugosité Mitutoyo SurfTest SJ-201.

La **figure. I.18** montre un exemple d'image de surface 3D tournée visualisée au moyen de l'Altisurf 500 avec vue isométrique.

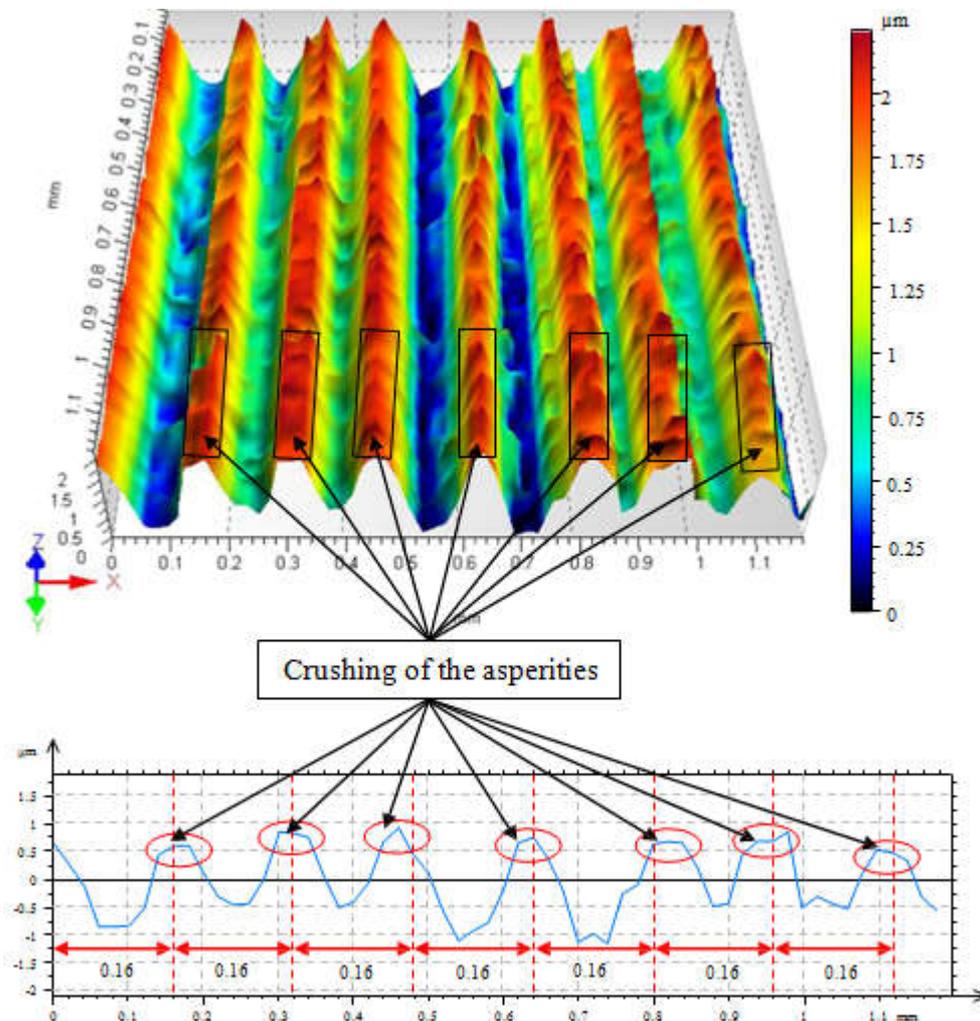


Figure. I.18.Exemple de profil 2D et topographie 3D de surface tournée: $X_r = 75^\circ$, $r = 1,6$ mm, $V_c = 220$ m / min, $f = 0,16$ mm / t et $a_p = 0,15$ mm.

On voit clairement sur la **Figure. I.18** l'influence de l'avance et du rayon de bec sur la rugosité de surface. L'utilisation d'une grande avance donne une mauvaise rugosité de surface, car à grande avance, la distance entre les pics et les creux des marques d'avance est beaucoup plus importante. Alors que l'utilisation d'un grand rayon de bec améliore la rugosité de surface par l'écrasement des aspérités. Lorsque le rayon de bec de l'outil de coupe augmente, à mesure que la longueur de contact entre le bec de l'outil et la surface usinée est augmentée, conduisant à un écrasement des aspérités (**Fig. I.18**).

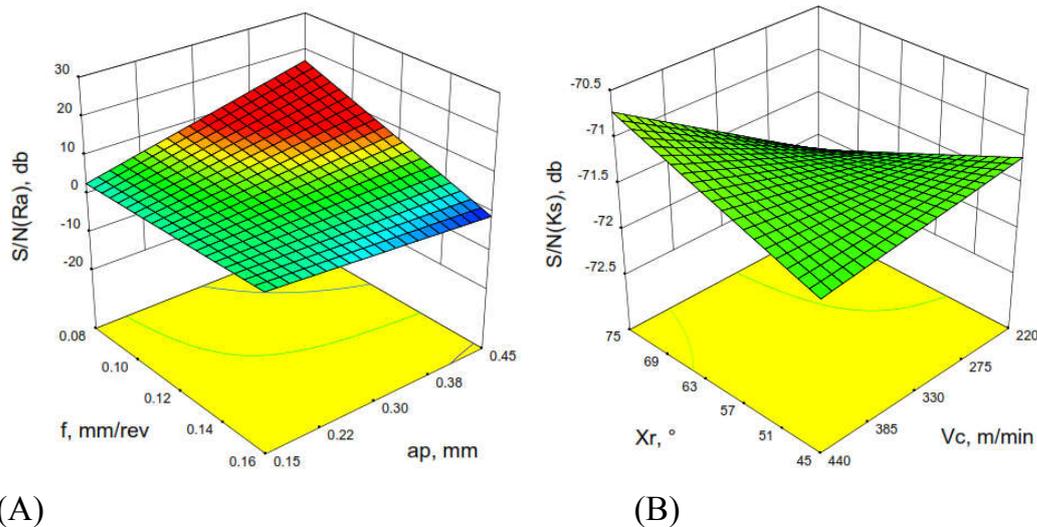


Figure. I.19. Graphiques 3D pour A- effet de $f \times ap$ sur S/N (Ra), B- effet de $\chi_r \times V_c$ sur S/N (Ks).

La **figure. I.19A** montre la surface de réponse 3D pour l'effet de l'interaction de la profondeur de coupe et de l'avance sur la qualité de surface (rapport S/N pour Ra), en conservant l'angle principal de coupe, le rayon de bec de l'outil et Vitesse de coupe au niveau moyen. On peut voir à travers cette figure que la qualité de surface est sensible à l'avance ; Une augmentation de ce dernier diminue la qualité de surface.

La **figure. I.19B** montre l'impact de l'angle principal de coupe et de la vitesse de coupe sur le rapport S/N de l'effort spécifique de coupe tandis que le rayon de bec de l'outil, l'avance et la profondeur de coupe sont maintenus à un niveau moyen. Cette figure indique que pour l'angle de coupe principal ($\chi_r = 75^\circ$), l'augmentation du rapport S/N (Ks) est notable avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Par contre, pour l'angle de coupe le plus important ($\chi_r = 45^\circ$), il y a eu une légère diminution du rapport S/N (Ks) avec une vitesse de coupe croissante. Pour de faibles vitesses de coupe, le rapport S/N (Ks) diminue avec l'augmentation de l'angle de coupe principal. Par contre, pour des vitesses élevées, il est clair que le S/N (Ks) diminue avec la diminution de l'angle du tranchant principal.

Les graphiques des effets moyens pour les rapports S/N de Ra et Fz sont présentés à la **Figure. I.20**. Indépendamment de la catégorie de la caractéristique de qualité, un rapport S/N plus élevé correspond à des caractéristiques de meilleure qualité.

Les niveaux optimaux pour chaque facteur de contrôle peuvent être facilement déterminés à partir de ces graphiques (**figure. I.20**) en considérant les points les plus élevés conformément à la caractéristique de performance «the-smaller-is-the-better» de Taguchi.

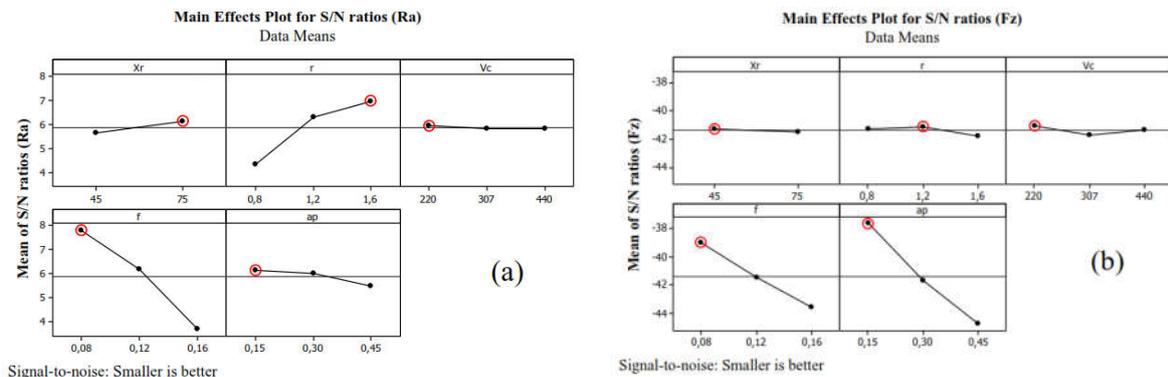


Figure. I.20. Principales courbes d'effet de S/N pour une rugosité de surface(a), (b) force tangentielle.

Tous les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence par un cercle (**Fig. I.20**). D'où les conditions optimales pour une rugosité de surface minimale sont données par la combinaison des niveaux (χr_2 , r_3 , Vc_1 , f_1 , ap_1). Ceci implique que, pour réduire la rugosité de surface, il est recommandé d'utiliser un rayon de bec élevé et une faible avance et profondeur de coupe.

De même, la combinaison optimale pour réduire l'effort Fz est donnée par (χr_1 , r_2 , Vc_1 , f_1 , ap_1).

Tableau. I.2. Récapitulatif des résultats de l'optimisation

	χr (°)	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
Ra=0,39 μ m	75°	1,6	220	0,08	0,15
Fz=55,16 N	45	1,2	220	0,08	0,15
Ks=3049,63 MPa	45	1,2	220	0,16	0,45
Pc=202,25 W	45	1,2	220	0,08	0,15

On remarque que le régime de coupe optimal dépend du critère choisi.

Conclusions :

Les conclusions importantes sont :

Sur la base de l'analyse ANOVA du rapport S/N pour la rugosité de surface, on constate que l'avance est le paramètre le plus influent sur la rugosité de surface suivi du rayon de bec et l'interaction ($f \times ap$).

La force tangentielle est fortement affectée par la profondeur de coupe. Sa contribution est d'environ 60,9%.

La profondeur de coupe a la plus forte influence sur l'effort spécifique de coupe avec une contribution de 51,91% suivie de l'avance de 18,27%.

Les topographies 3D de la surface usinée obtenue par plate-forme optique de métrologie modulaire sont d'une grande importance, en effet elles montrent l'écrasement des aspérités en utilisant un grand rayon de bec ($r = 1,6$ mm).

III.III. Etude comparative de l'optimisation de l'usure et de la rugosité par la méthode de Taguchi et RSM

Dans leur étude DUREJA, J. S et all [10] ont effectué une Optimisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI D3 (58HRC) avec un outil de coupe en carbure revêtu (TiSiN-TiAlN), en utilisant un plan réduit de Taguchi et un traitement des résultats par la méthodologie de surface de réponse (RSM). Le tour utilisé pour les opérations d'usinage est un tour CNC (Marque: Batliboi, Sprint 16 TC) ayant une vitesse de broche maximale de 5000 tr/min. Les paramètres de coupe considérés sont la vitesse de coupe (A), l'avance par tour (B) et la profondeur de coupe (C). Trois niveaux ont été spécifiés pour chacun des paramètres **tableau. I.3.**

Tableau. I.3. Paramètres d'usinage pour l'expérimentation

Niveau	Vitesse (A)(m/min)	Avance(B) (mm/tr.)	DOC(C) (mm)
1	130	155	180
2	0,05	0,10	0,15
3	0,1	0,25	0,4

L'usure moyenne en dépouille a été contrôlée à l'aide d'un microscope (Mitutoyo TM-505R).

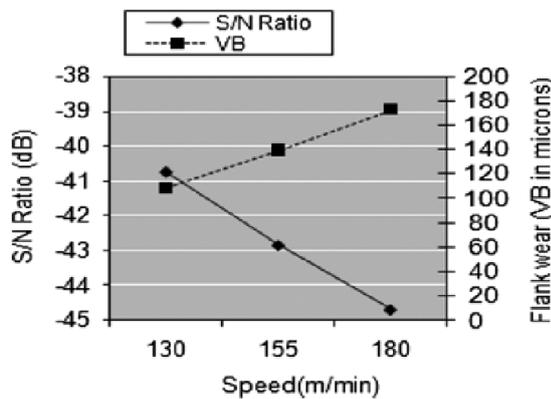


Figure. I.21. S/N Pour la vitesse.

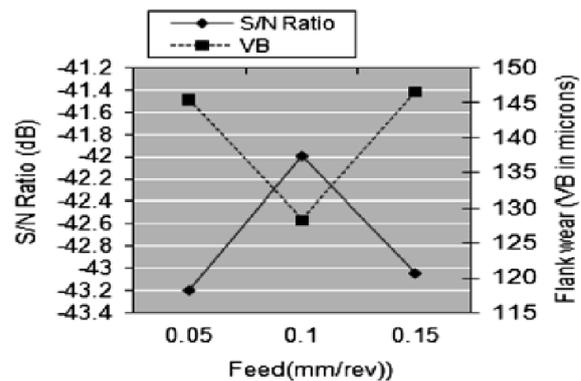


Figure. I.22. S/N Pour l'avance.

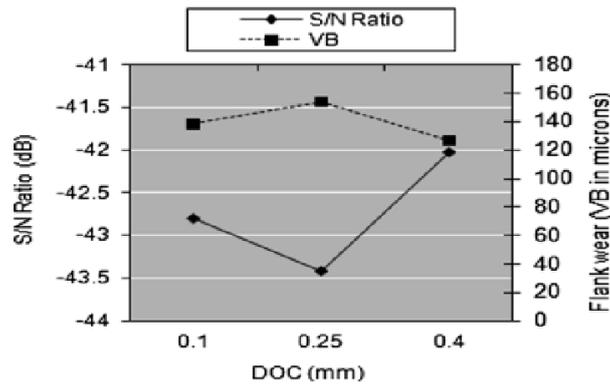


Figure. I.23. S/N Pour le DOC.

La figure. I.21 montre que l'usure en dépouille (VB) augmente avec l'augmentation de la vitesse. Correspondant à la vitesse minimale (130 m/min), l'usure minimale en dépouille et le rapport S/N le plus élevé a été observés.

La figure. I.22 montre la courbe du rapport S/N et (VB) en fonction de l'avance. L'usure en dépouille diminue initialement avec une augmentation de l'avance jusqu'à 0,1 mm/tr, suivie d'une augmentation pour une avance de 0,15 mm/tr. Le rapport S/N est le plus élevé pour une avance de 0,1 mm/tr, ce qui correspond au niveau optimal.

La figure. I.23 représente un graphe du rapport S/N et (VB) en fonction de la profondeur de coupe. L'usure en dépouille augmente initialement avec l'augmentation de la profondeur suivie d'une forte tendance à la baisse jusqu'à une profondeur de coupe de 0,4 mm, où le rapport S/N atteint une valeur maximale, ce qui indique que c'est le niveau optimal.

Les conditions optimales d'usinage pour minimiser l'usure de l'outil (VB) selon l'analyse de Taguchi : vitesse de coupe = 130 m/min, avance = 0,10 mm/tour, profondeur de coupe = 0,40 mm avec une usure en dépouille estimée de 96 μm .

D'après l'analyse ANOVA du rapport S/N, les pourcentages de contributions des paramètres sur l'usure en dépouille (VB) sont : vitesse = 73,65%, avance = 8,18% et DOC = 9,28%, ce qui signifie que la vitesse de coupe est le facteur le plus contribuant à l'usure en dépouille.

L'usure moyenne de la rugosité de surface a été mesurée avec un analyseur de rugosité (Mitutoyo SurfTest SJ-301).

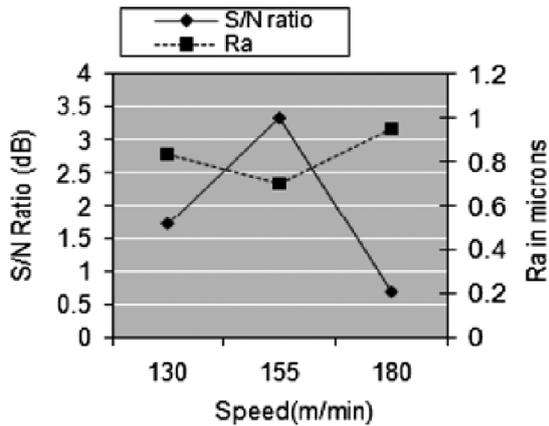


Figure.I.24.S/N pour la vitesse.

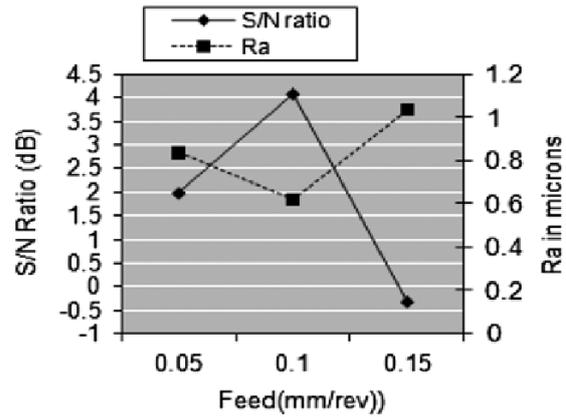


Figure. I.25.S/N pour l'avance.

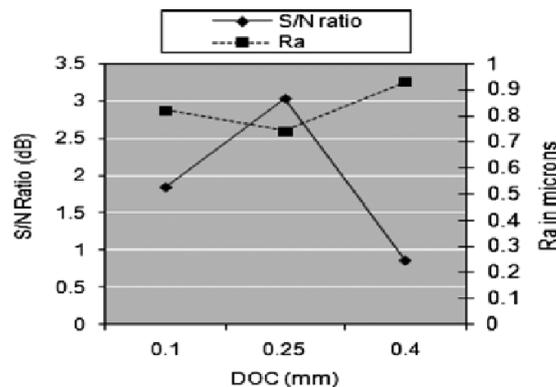


Figure. I.26.S/N pour le DOC.

La contribution en pourcentage des paramètres d'entrée influençant la rugosité de la surface (Ra) est: vitesse = 19,47%, l'avance = 52,98% et DOC = 12,98% signifiant que l'avance est le facteur qui contribue le plus à influencer sur la rugosité de la surface.

Les conditions d'usinage optimisées pour minimiser la rugosité de surface selon l'analyse de Taguchi sont : vitesse de coupe = 155 m/min, avance = 0.10 mm/tr, profondeur de coupe = 0,25 mm ce qui correspond à une rugosité de surface estimée à 0,57 μm .

L'optimisation de la fonction de désirabilité pour optimiser simultanément les deux réponses, c'est-à-dire VB et Ra, donne la solution optimale suivante : vitesse = 130 m/min, avance = 0,13 mm/tr et DOC = 0,21 mm et le VB s'approche de 93,35 μm et Ra s'approche de 1,18 μm . Cette solution fournie par l'optimisation de la fonction Désirabilité est très proche des solutions optimales fournies par l'analyse de Taguchi.

Cette étude a prouvé la viabilité des outils de coupe en carbure revêtu pour une application de tournage dur dans la gamme des paramètres sélectionnés, ce qui constitue une alternative économique aux outils PCBN et céramiques plus coûteux.

III.IV. modélisation par régression et ANN pour prédire la rugosité et l'usure

ÖZEL, Tuğrul et KARPAT, Yiğit [11] ont menés une étude expérimentale ayant pour objectif d'élaborer des modèles basés sur des réseaux neuronaux pour prévoir avec précision la rugosité de surface et l'usure en dépouille de l'outil lors du tournage dur. Dans cette étude, les auteurs étudient expérimentalement les effets de la géométrie de l'arête de coupe, de la dureté de la pièce à usiner, de l'avance et de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface et l'usure des outils, lors du tournage dur de l'acier d'outillage pour travail à chaud AISI H13 (X40CrMoV5-1) durci par TTh. L'usinage est réalisé avec un outil CBN avec deux préparations d'arête distinctes. Pour cela un plan factoriel fractionnaire à quatre facteurs est mis au point. Les facteurs et niveaux des facteurs sont résumés dans le **Tableau.I.4**. Ces niveaux de facteurs donnent un total de 16 combinaisons des facteurs, chaque essai est réalisé 16 fois.

Table.I.4 Experimental factors and levels

Niveau	Dureté HRC	Edge geometry	V (m/min)	f (mm/tr)
+1	51,3	Arrondi, (Honed)	100	0,1
-1	54,7	Chanfrein, (Chamfered)	200	0,2

Après réalisation des essais et analyse des données, deux types de modèle de régression ont été déterminés, à savoir un modèle linéaire et un autre exponentiel.

Les **Fig.I.27** et **28**, présentent une comparaison entre les modèles exponentiels et ceux de régression linéaire générés pour les mêmes ensembles de données expérimentales.

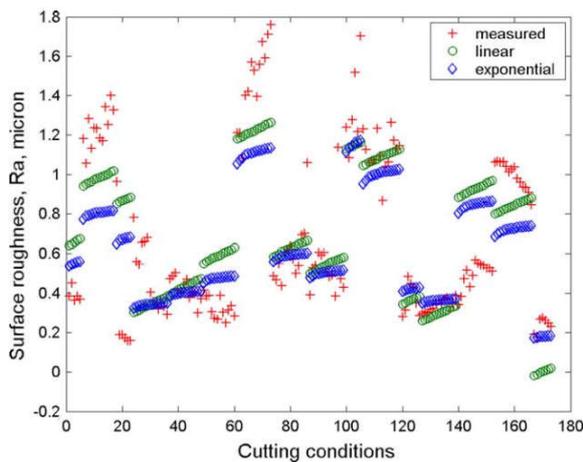


Figure.I.27. comparaison des rugosités déduites des modèles avec celles obtenues expérimentalement.

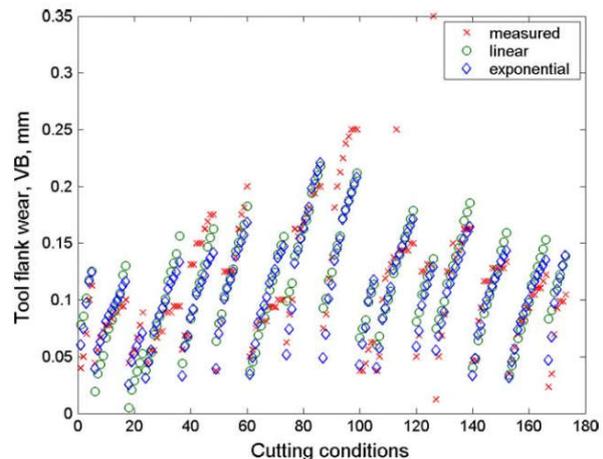


Figure.I.28. comparaison des valeurs de l'usure déduites des modèles avec celles obtenues expérimentalement.

Bien que les modèles de régression exponentielle pour l'usure des outils donnent une bonne performance, les prévisions de rugosité de surface n'ont pas donné de bons résultats.

Dans cette étude, la rugosité de la surface et l'usure de l'outil sont prédites avec un réseau de neurones multicouches avancé comme le montre la Fig. 8a en utilisant des paramètres de processus directs, la géométrie d'arête de l'outil, la dureté Rockwell-C de la pièce à usiner, la vitesse de coupe, l'avance et la longueur de coupe comme entrées pour le réseau neuronal.

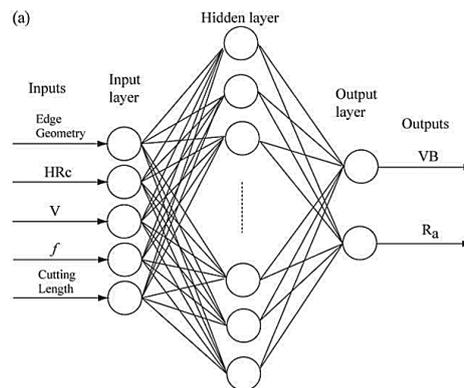


Figure. I.29. Réseau de neurones utilisé pour l'apprentissage et la prédiction de la rugosité et de l'usure.

Ce réseau neuronal est formé avec 173 points de données (conditions de coupe). Il est testé sur 36 points de données (conditions de coupe) qui sont choisis au hasard à partir de différentes conditions de coupe à partir de l'ensemble de données se compose de 209 points de données (conditions de coupe).

Les valeurs La rugosité de surface et d'usure de l'outil mesurées et prédites par un réseau de structure 5-15-2 sont comparées dans la **Fig.I.30**.

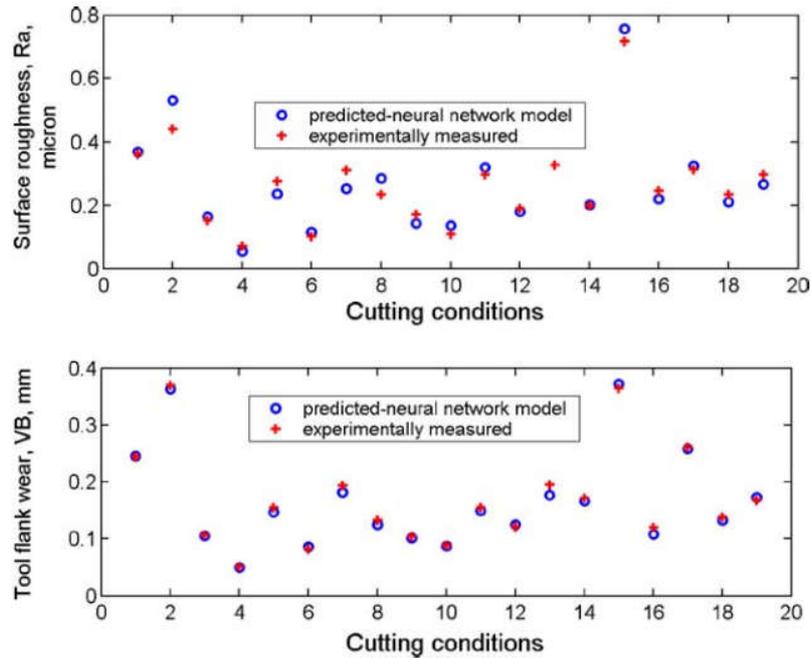


Figure. I.30. Valeurs prédites par ANN et expérimentales de la rugosité et de l'usure.

Comme on peut le voir à partir des figures, le modèle de réseau neuronal a fourni une grande précision lors de la prédiction des deux mesures de performance, à savoir la rugosité de surface (R_a) et l'usure en dépouille d'outil (VB).

Le système de prédiction développé se révèle être capable de prévoir une rugosité de surface précise et une prédiction de l'usure de l'outil pour la plage dans laquelle il a été formé. Les modèles de réseaux neuronaux sont également comparés aux modèles de régression.

Comme c'était prévu, les modèles de réseaux neuronaux ont fourni de meilleures capacités de prédiction car ils offrent généralement la capacité de modéliser des non-linéarités et des interactions plus complexes que les modèles de régression linéaire et exponentielle peuvent offrir.

Toutes les données, obtenues expérimentalement, ont été utilisées pour comparer les modèles en se basant sur la précision des prédictions.

III.V. Effet des paramètres de coupe sur l'usure lors du TD de l'acier AISI D3.

Le travail de recherche élaboré par **Varaprasad.Bh** et all [12] concerne l'étude de l'effet des paramètres d'usinage (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de coupe) sur l'usure des outils en céramique mixte Al_2O_3/TiC , lors du tournage dur de l'acier AISI D3. Le tour utilisé pour les opérations d'usinage est de marque *Kirloskar* dont le modèle est Turn Master-35, Les niveaux des variables sont choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant de l'outil de coupe. Un plan Composite centré est adopté pour la conduite des expériences, Trois variables de coupe à trois niveaux ont conduit à un total de 20 essais.

Tableau. I.5. Paramètres du procès et leurs niveaux

Paramètres	Les niveaux		
	-1	0	+1
Vitesse (m/min)	145	155	165
Avance (mm/tr)	0,05	0,075	0,1
Profondeur de coupe	0,3	0,6	0,9

Au cours de l'expérimentation, l'usure en dépouille des plaquettes a été mesurée à l'aide d'un microscope d'atelier.

Les **figures. I.31.a.b.c.** Présentent l'évolution de l'usure en dépouille en fonction des différentes combinaisons des paramètres de coupe

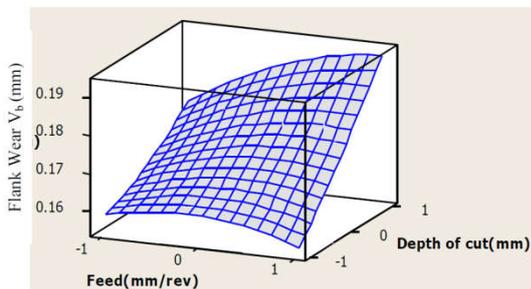


Figure. I.31.a. évolution de l'usure en dépouille en fonction de la Profondeur de coupe et l'avance

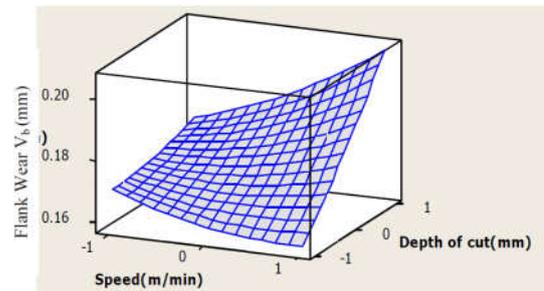


Figure. I.31.b. évolution de l'usure en dépouille en fonction de la Profondeur de coupe et la vitesse

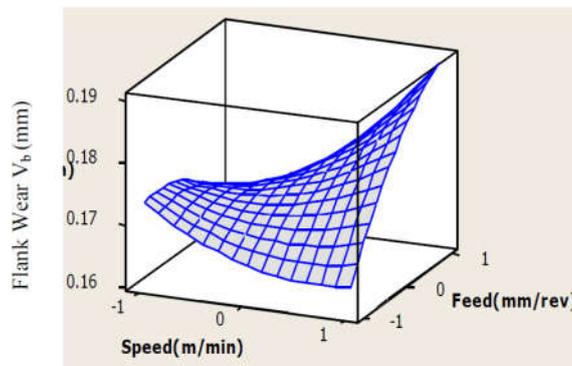


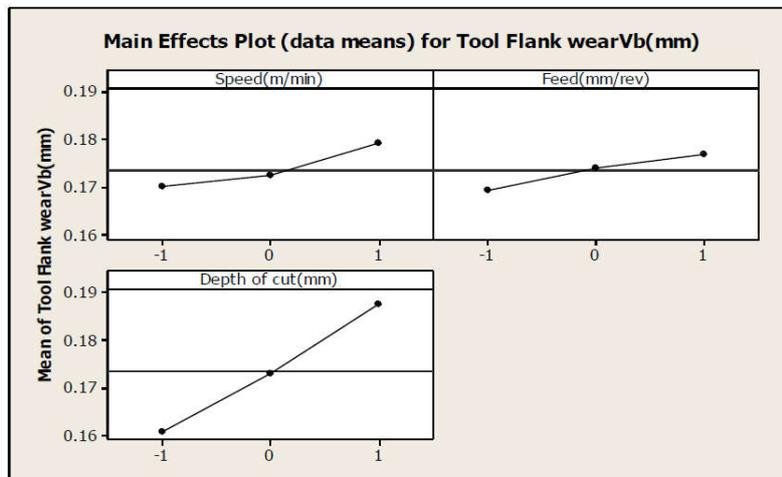
Figure. I.31.c. évolution de l'usure en dépouille en Fonction de l'avance et la vitesse

D'après ces figures, on remarque que la profondeur de passe possède une influence importante sur l'usure (**Fig. I.31.a**). On remarque aussi que pour les grandes valeurs de profondeur de coupe, l'augmentation de l'avance et de la vitesse de coupe conduit à une augmentation de l'usure (**fig. I.31.b**). Au niveau faible de la vitesse on remarque que la profondeur de coupe n'a pas d'influence sur l'usure (**fig. I.31.c**)

La relation mathématique qui exprime la relation être la caractéristique de performance (V_B) et les paramètres de coupe est exprimée par l'équation de régression multiple suivante.

$$V_B = 0,172945 + 0,00455 \times V_c + 0,0037 \times f + 0,0134 \times d + 0,009125 V_c \times f + 0,010125 V_c \times d + 0,005125 f \times d$$

Sur la **figure. I.32.** qui présente les droites des effets principaux des paramètres de coupe sur l'usure, On constate clairement que la profondeur de coupe modifie fortement l'usure en dépouille. La vitesse et l'avance ont également un effet croissant sur V_B .



La **figure. I.32.**effets principaux sur l'usure en dépouille.

Cependant, une faible profondeur de coupe doit être utilisée afin de réduire les vibrations. Par conséquent, si l'outil n'est pas très rigide, comme dans le cas de l'usinage des parties minces, une profondeur de coupe très fine doit être employée pour éviter les vibrations.

Les résultats ont révélés que la planification des expériences basée sur la méthodologie de surface de réponses (RSM) est un moyen efficace qui a permis de déterminer les paramètres de coupe optimaux à savoir une vitesse de 165m/min, une avance de 0,05mm/tr et une profondeur de coupe de 0,3mm pour obtenir une usure minimale de l'outil de 0,148 mm.

Le paramètre significatif pour l'usure en dépouille de l'outil est la profondeur de coupe. La vitesse et l'avance ont peu d'influence sur la variation totale.

IV. Conclusion

L'étude bibliographique sur la coupe des métaux réalisée dans ce chapitre, nous avons présenté aussi quelques travaux de recherche (publication) réalisés sur le tournage dur sur AISI D3, la modélisation et l'impact des paramètres de coupe sur les paramètres technologique d'usinage.

Chapitre II

Procédure et équipements d'expérience

I. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, un banc d'essais comportant un tour, une plate forme pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée et un microscope pour la mesure de l'usure sur les plaquettes 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. Matériels utilisés

II.I. 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.1). Les fréquences de rotation disponibles sur le tour entre (22.5 à 2000) tr/min.



Figure.II.1. tour parallèle modèle SN40

II.II. Matériau utilisé

Les opérations de chariotage relatives aux essais d'usure ont été effectuées sur des éprouvettes rondes en acier traité de nuance Z200Cr12, Grâce à sa résistance élevée à l'usure, l'acier Z200Cr12 connu aussi sous la dénomination d'AISI D3 est un acier à outil à haute teneur en chrome présentant le minimum de risques de déformation et d'altération des dimensions aux traitements thermiques. Il a une excellente tenue à l'usure (haute résistance à l'usure), utilisé pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filière d'étirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois peigne à rouler les filets [13].

Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suit :

1. Densité : 7.7g/cm³
2. Module d'élasticité : 210 GPA.
3. Conductibilité thermique: 20 W/m.C°.
4. Coefficient moyen de dilatation en m/m°C :
 - entre 20°C et 100°C : 10,5x10-6
 - entre 20°C et 300°C : 11,0x10-6
 - entre 20°C et 500°C : 12,0x10-6



Figure II.2. Photo d'éprouvette utilisée

Traitement thermique appliqué

Pour le traitement thermique des éprouvettes, nous avons réalisé une trempe suivie d'un revenu, ce qui a augmenté la dureté des éprouvettes à 54 HRC tableau (II.1)

Tableau II.1: Conditions de traitement thermique

Acier	Dureté avant traitement	Dureté après traitement	Traitement thermique		Temps de maintien
			Trempe	Revenu	
Z200Cr12	27 HRC	54 HRC	960°C	510°C	60 minutes

Tableau II.2 : compositions chimique de l'acier Z200Cr12

Elément	Pourcentage (%)
Carbone(C)	2,00-2,20
Silicium (Si)	0,25-0,45
Manganèse (Mn)	0,25-0,35
Chrome(Cr)	12,00-14,00

La figure (II.4) présente le diagramme de revenu de l'acier Z200Cr12 établi par le fabricant [BÖHLER].

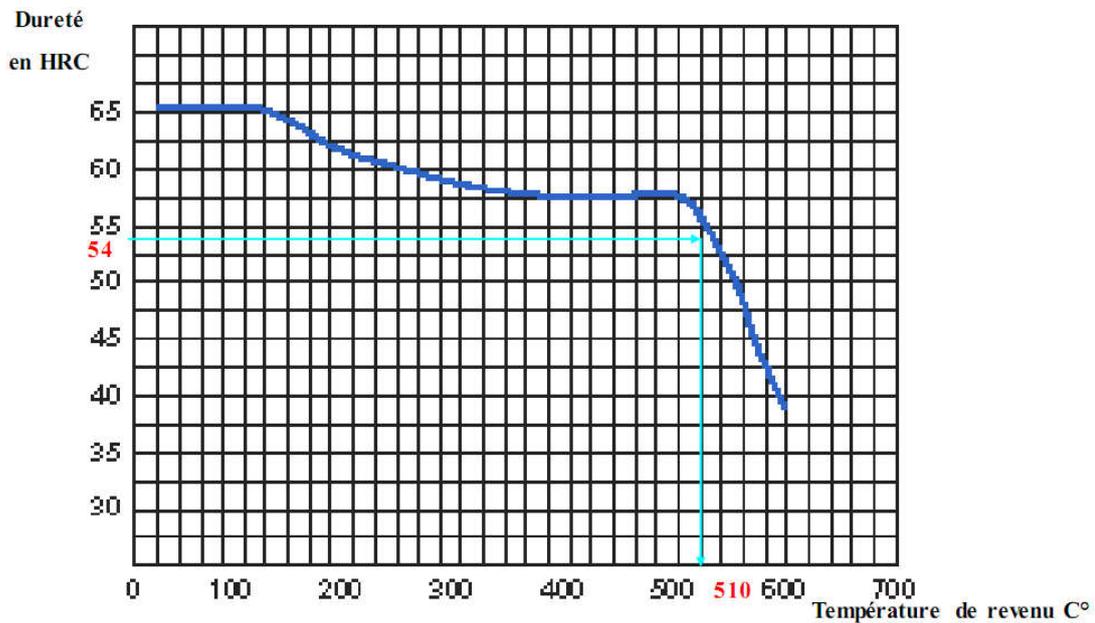


Figure II.4: Diagramme de revenu

II.III. Outils de coupe utilisés

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée à fixation par trou centrale. Elles sont de marque Sandvik et de désignation SNGA120408T01525S avec une composition chimique de : (70% Al_2O_3 + 30% TiC) et avec revêtement en TiN (figure II.3). Ces plaquettes possèdent une meilleure ténacité et une bonne conductivité thermique. Toutes les informations relatives à ces plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau II-3.

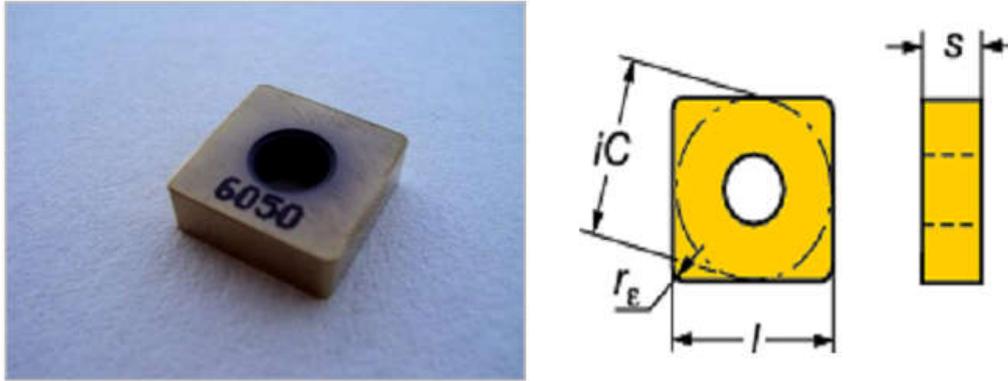


Figure II.3: Plaquette Céramique CC6050

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

Matériau de coupe	Désignation firme	Désignation ISO	Firme	Composition	Epaisseur de revêtement	Rayon r_{ϵ}
Céramique mixte revêtue	CC6050	SNGA1204 08T01525S	Sandvik	70 % Al_2O_3 + 30 % TiC + revêtement enTiN	Fin	0,8mm

II.IV. Porte-plaquette

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé un porte outil sur lesquels on fixe les plaquettes mécaniquement par trou central.



Figure II.5 le porte plaquette.

La géométrie du porte outil est donnée dans le tableau II.4Ce porte-plaquette permet de travailler avec la géométrie suivante :

Tableau II.4: Caractéristique géométrique du porte outil

Porte outil	Section (mm ²)	χ_r°	α°	γ°	λ°
PSBNR2525K12	25*25	75°	6°	-6°	-6°

II.V. Appareillages de mesure utilisés

II.V.1. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (Ra), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo), la plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à 40 μ m) pour Ra, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (**fig II.6**).



Figure II.6 mesure de la rugosité sans démontage de la pièce

II.V.2. Mesure des efforts

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 (**fig. II.7**).

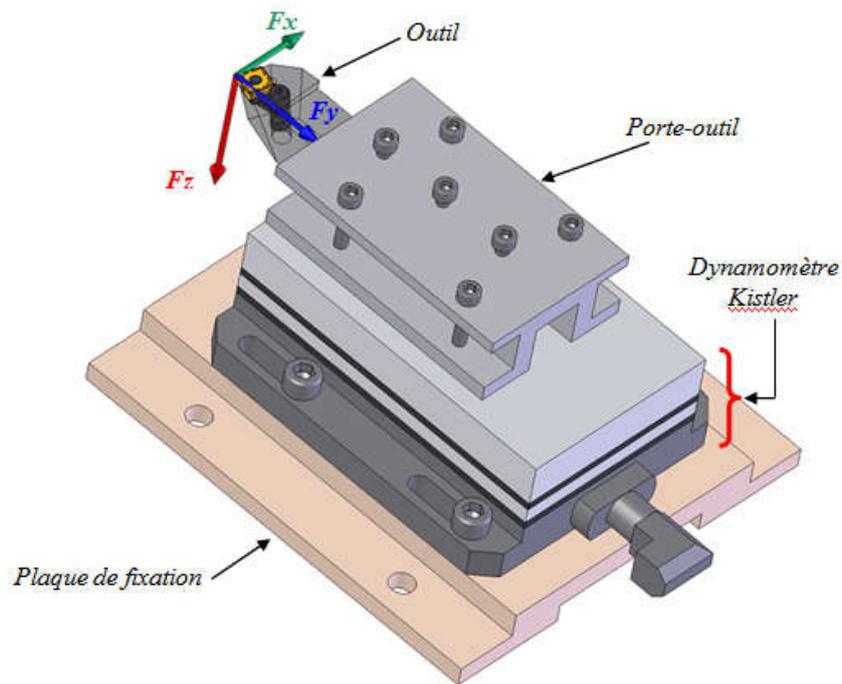


Figure II.7 Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

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 (**fig II.8, fig II.9**).

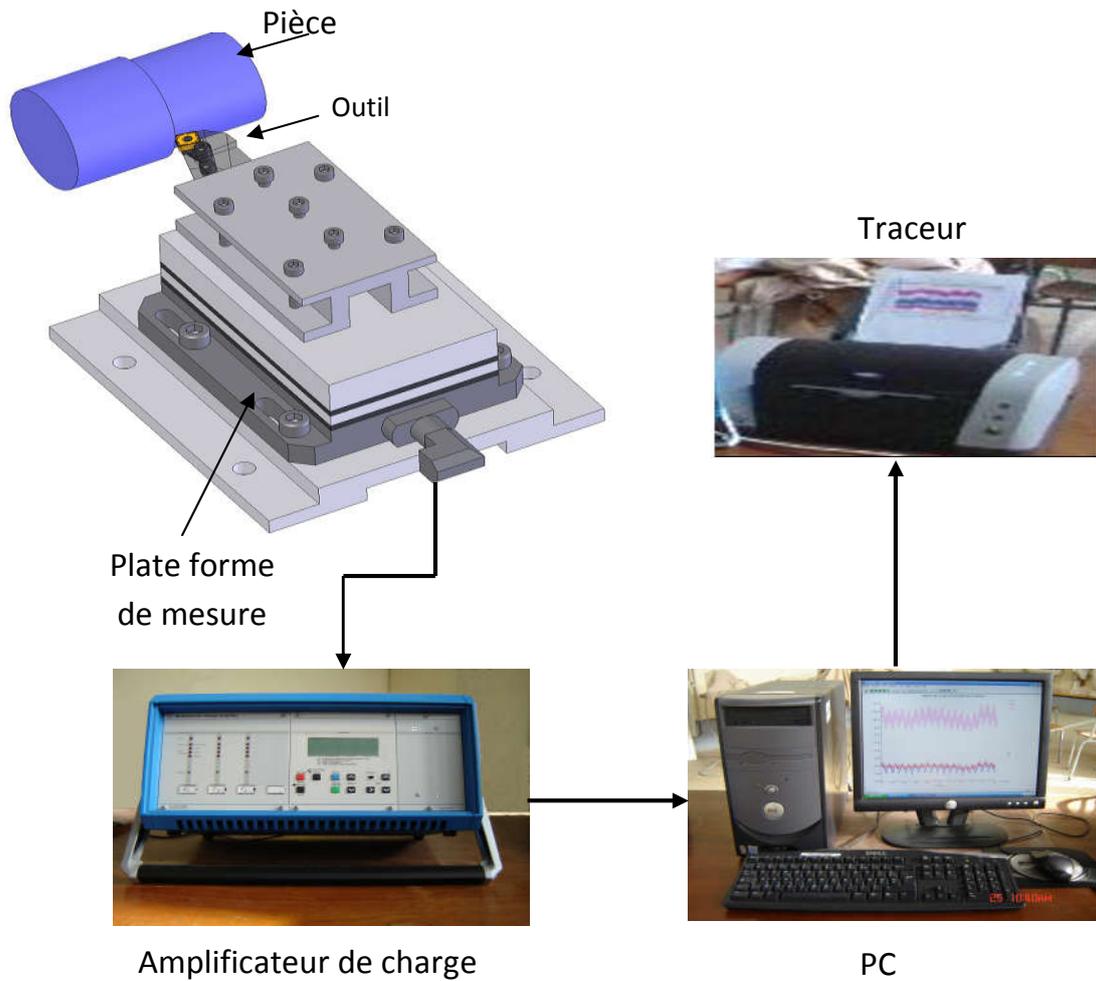


Figure II.8 : Chaîne de mesure des efforts de coupe

La figure (II.9) 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).

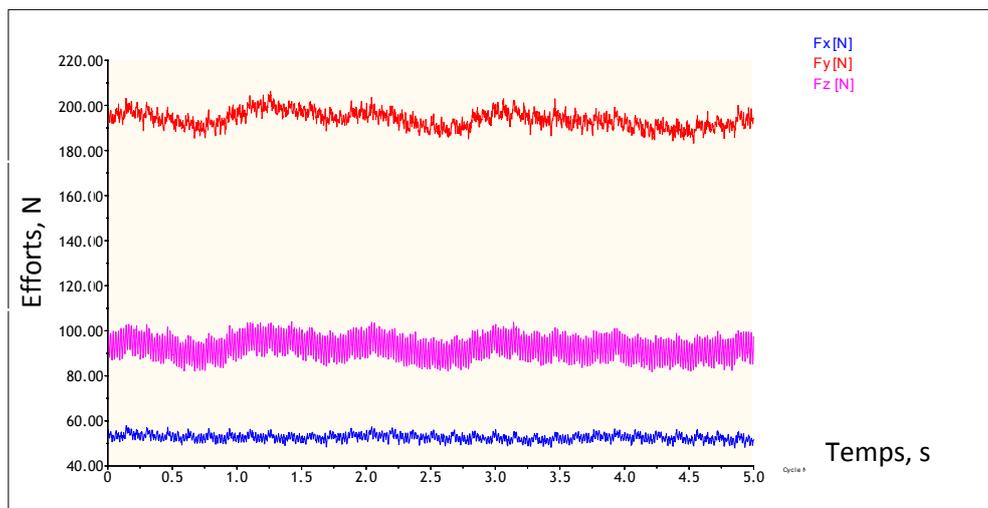


Figure II.9 : Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE »
Essai 5 : $V_c = 80\text{m/min}$, $f=0.14\text{ mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{ mm}$

II.V.3. Mesure de l'usure

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure est du type *VISUAL 250* est la réponse à une demande croissante de l'industrie pour des systèmes capables de mesurer des formes ou des matières hors d'atteinte des moyens tactiles. La nouvelle *VISUAL 250* manuelle, compacte mais sans compromis quant à ses performances métrologiques, est à même de satisfaire la demande du marché dans le domaine de la mesure 2D. Sa conception mécanique est d'une grande robustesse, ce qui permet une utilisation de la machine aussi bien en atelier que dans le laboratoire de mesure. Equipée de Visual Gage – le logiciel qui requiert moins d'un demi-jour de formation la *VISUAL 250* se révèle un moyen multitâche et multiutilisateur parfait pour la mesure sans contact (**Fig II.10**).



Figure II.10 : *VISUAL250* pour la mesure de l'usure

II.V.4. Autres équipements utilisé

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

III. Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c , f , T_u), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ , r_e), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité, représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

✓ **Méthode de planification des expériences**

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs. Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f , T_u) sur les inverses fonctions d'optimisation (Usure, rugosité et efforts de coupe), Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule Suivante:

$$N = q^k \dots\dots\dots(\text{II.eq.1})$$

Où:

- N: nombre d'essais ;
- q: nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;
- k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)).

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

Les essais sont numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau **(II.5)**.

Tableau II.5 : Matrice de planification pour un plan 3³[14]

N° d'essai	Facteurs		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Tu(min)
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

L'expérimentateur, quel que soit son domaine d'étude, est toujours confronté au problème difficile de l'organisation optimale de ses essais. Comment obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ?

L'utilisation des plans d'expériences, et en particulier les tables orthogonales de Taguchi, a permis la détermination de l'influence des effets simultanés et de l'interaction des paramètres opératoires sur l'usure, les efforts de coupe et la rugosité.

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats.

Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats [14].

Dans cette recherche, la table orthogonale standard $L_{27} (3^3)$ de Taguchi est adoptée comme plan expérimentale (**tableau II.5**). Les niveaux de paramètre ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau (**II.6**). La table orthogonale standard $L_{27} (3^3)$ de Taguchi a 27 lignes correspondant au nombre d'essais et 13 colonnes à trois niveaux. Les facteurs et leurs interactions sont assignés aux colonnes. En effet, la première colonne de la table a été assignée à la vitesse de coupe (V_c), la seconde à l'avance (f) et la cinquième au temps d'usinage (T_u).

Tableau II.6 : Plan d'expériences (table orthogonale de Taguchi (L27 (3³))) [15].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
03	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
04	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
05	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
06	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
07	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
08	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
09	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

IV. Conditions de coupe

Les essais de chariotage sont effectués sur un acier traité de nuance Z210Cr12, La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification sous les conditions de coupe indiquées dans le tableau (II.7) :

Tableau II.7 : les paramètres de coupe et paramètre de sortie

Paramètre constant	valeur	Les paramètres variables	Valeurs
		Vc (m/min)	80; 110 ; 140
ap (mm)	0,2	f (mm/tr)	0,08; 0,11; 0,14
		Tu (min)	4 ; 8 ; 12

V. conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les équipements nécessaires pour la réalisation des essais et la composition chimique des éprouvettes. Les caractéristiques du matériau de coupe, les appareils de mesure et la planification des expériences ont été désignées.

Chapitre III

Modélisation MSR et ANN des paramètres de coupe

I. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de la détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent de mettre en évidence la relation entre les éléments du régime de coupe à savoir (la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et le temps d'usinage (T_u) et les réponses étudiées (usure en dépouille VB , Rugosité R_a , Efforts de coupe (F_x , F_y , F_z), la puissance de coupe (P). Les résultats ont été traités statistiquement afin de proposer un régime de coupe optimal. Pour atteindre ces objectifs, on a fait appel à la méthodologie de surface de réponse (MSR). Pour faire une analyse de la variance (ANOVA) et pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (SR), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «**Design Expert 8**». Et aussi avec une méthodologie d'un réseau de neurones artificiels (ANN), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «**JMP Pro 10**».

II. 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 27 essais avec 3 facteurs et 3 niveaux, et aussi les résultats de la puissance de coupe (P), calculés en fonction des résultats expérimentaux de l'effort principale de coupe. Elle est donnée par la relation suivante : [16]

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}, kW \dots\dots\dots(III.eq.1)$$

P_c : puissance de coupe (kW).

F_c : effort principal de coupe (N).

V_c : vitesse de coupe (m/min).

Tableau III.1 : Résultats expérimentaux des critères de rugosité, L'usure en dépouille de surface et les composantes de l'effort de coupe et la puissance

Les valeurs d'entrée			Les valeurs de sorties					
Vc, m/min	f, mm/tr	Tu, min	VB, mm	Ra, µm	Fx, N	Fy, N	Fz, N	P, W
80	0,08	4	0,021	0,32	14,01	65,22	41	54,67
80	0,08	8	0,032	0,36	46,34	100,91	81,19	108,25
80	0,08	12	0,047	0,4	76,09	140	110	146,67
80	0,11	4	0,071	0,44	22,85	66,72	62,26	83,01
80	0,11	8	0,092	0,47	47,17	119,65	97,04	129,39
80	0,11	12	0,126	0,52	92,27	189,1	139,64	186,19
80	0,14	4	0,087	0,66	29,78	100,59	77,78	103,71
80	0,14	8	0,114	0,69	62,02	154,73	127,5	170
80	0,14	12	0,135	0,76	98,04	234,11	160,93	214,57
110	0,08	4	0,08	0,37	14,25	45,16	47,88	87,78
110	0,08	8	0,11	0,68	44,1	99,43	82,88	151,95
110	0,08	12	0,14	0,82	73,48	132,01	114,55	210,01
110	0,11	4	0,152	0,78	25,72	68,71	60,66	111,21
110	0,11	8	0,186	0,91	52,44	138,13	108,4	198,73
110	0,11	12	0,22	1,02	86,93	188,08	131,31	240,74
110	0,14	4	0,155	0,75	27,21	83,06	77,47	142,03
110	0,14	8	0,196	1,1	64,09	149,4	117,2	214,87
110	0,14	12	0,24	1,27	94,14	227,44	151,27	277,33
140	0,08	4	0,088	0,33	18,04	50,2	40,96	95,57
140	0,08	8	0,14	0,58	41	88,3	77,53	180,9
140	0,08	12	0,152	0,88	70,64	129,46	109,73	256,04
140	0,11	4	0,142	0,51	22,23	58,46	66,68	155,59
140	0,11	8	0,175	0,62	50,65	123,47	95,72	223,35
140	0,11	12	0,2	0,85	82,08	174,92	130,7	304,97
140	0,14	4	0,215	0,71	35,34	92,36	79,06	184,47
140	0,14	8	0,25	0,86	54,75	146,02	116,39	271,58
140	0,14	12	0,29	1,01	92,91	236,01	151,23	352,87

III. Modélisation par la Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR)

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

ces équations s'appelle surfaces de réponse, elle permet de décrire l'effet individuel et cumulatif des variables d'essai sur la réponse et de déterminer l'interaction mutuelle entre les variables d'essai et leur effet sur la réponse [17, 18].

La méthodologie de surface de réponse est une procédure visant à déterminer une relation entre les paramètres indépendants du processus d'entrée et les données de sortie (réponse du procédé). Cette procédure comprend six étapes [19] et qui sont citées ci-dessous :

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

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y, dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. Dans la présente étude, la relation entre les paramètres d'entrées (conditions de coupe) à savoir la vitesse de coupe (Vc), la vitesse d'avance (f) et le temps d'usinage (Tu) et les paramètres de sorties (Efforts de coupe (Fc), Rugosité (Ra), puissance de coupe (Pc) et le débit du copeau (MRR), sont donnés par l'équation notée ci-dessous [20]:

$$Y = f(Vc, f, ap) + e_{ij} \dots \dots \dots \text{(III.eq.2)}$$

Où :

Y = paramètres de sortie (Efforts de coupe, Rugosité arithmétique, ...)

On peut ainsi écrire le modèle mathématique du second ordre, basé sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante [19]:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^3 a_{ij} X_i X_j \dots \dots \dots \text{(III.eq.3)}$$

- Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- X_i représente le niveau attribué au facteur i . C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;

Les variables codées X_i , $i = 1, 2, 3$ sont obtenues à partir des équations de transformation suivantes [19]:

$$X_1 = \frac{Vc - Vc_0}{\Delta Vc} \dots\dots\dots \text{(III.eq.4)}$$

$$X_2 = \frac{f - f_0}{\Delta f} \dots\dots\dots \text{(III.eq.5)}$$

$$X_3 = \frac{Tu - Tu_0}{\Delta Tu} \dots\dots\dots \text{(III.eq.6)}$$

Où X_1, X_2 et X_3 sont les valeurs codées des paramètres Vc, f et Tu respectivement. Vc_0, f_0 et Tu_0 au niveau zéro. $\Delta Vc, \Delta f$ et ΔTu sont les valeurs de $Vc, f,$ et $Tu,$ respectivement.

- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

IV. Teste de validité des modèles

Afin de tester la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance (**ANOVA**) : est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et les efforts de coupe. Comme les facteurs sont en général exprimés dans des unités différentes, leurs effets ne soient comparables que s'ils sont codés.
- Coefficients d'ajustement des modèles : Le coefficient de détermination R^2 est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression. Le coefficient R^2 peut s'interpréter comme le quotient des variances expliqué par la variance des réponses mesurées, d'où R^2 varie entre 0 et 1. Une valeur de R^2 proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif. Le coefficient de détermination de la régression R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (eq.7) [18].

$$R^2 = 1 - \frac{SSErreur}{SStotal} \dots\dots\dots(\text{III.eq.7})$$

- Graphiques des valeurs résiduelles : Les graphiques des valeurs résiduelles utiles pour vérifier les hypothèses des modèles et peuvent être affichés pour tous les plans et ils sont déterminées par l'évaluation de l'équation (eq.8) [18].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \dots\dots\dots(\text{III.eq.8})$$

Où :

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

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

- Graphique des valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles
- Test de normalité d'Anderson Darling : le test d'Anderson Darling est utilisé pour tester si un échantillon de données est issu d'une population ayant une distribution spécifique. Ce test est une alternative au test de chi carré ou de Kolmogorov-Smirnov.

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

V. Analyse de la variance ANOVA

V.I. ANOVA de l'usure en dépouillé (VB)

Le tableau (III.2) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de l'usure en dépouille (VB).

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

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont,%	Remarque
Model	0,1156979	9	0,0128553	58,1828243	<0,0001	96,85	Significant
A-Vc	0,0477405	1	0,0477405	216,072016	<0,0001	39,96	Significant
B-f	0,0422435	1	0,0422435	191,193017	<0,0001	35,36	Significant
C-Tu	0,0161400	1	0,0161400	73,0493888	<0,0001	13,51	Significant
AB	0,0016100	1	0,0016100	7,28718702	0,0152	1,34	Significant
A^2	0,0062511	1	0,0062511	28,292418	<0,0001	5,23	Significant
B^2	0,0010314	1	0,0010314	4,6681178	0,0453	0,86	Significant
Residual	0,0037561	17	0,0002209			3,14	
Cor Total	0,1194540	26				100	

La figure (III.1), illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'usure en dépouille VB,

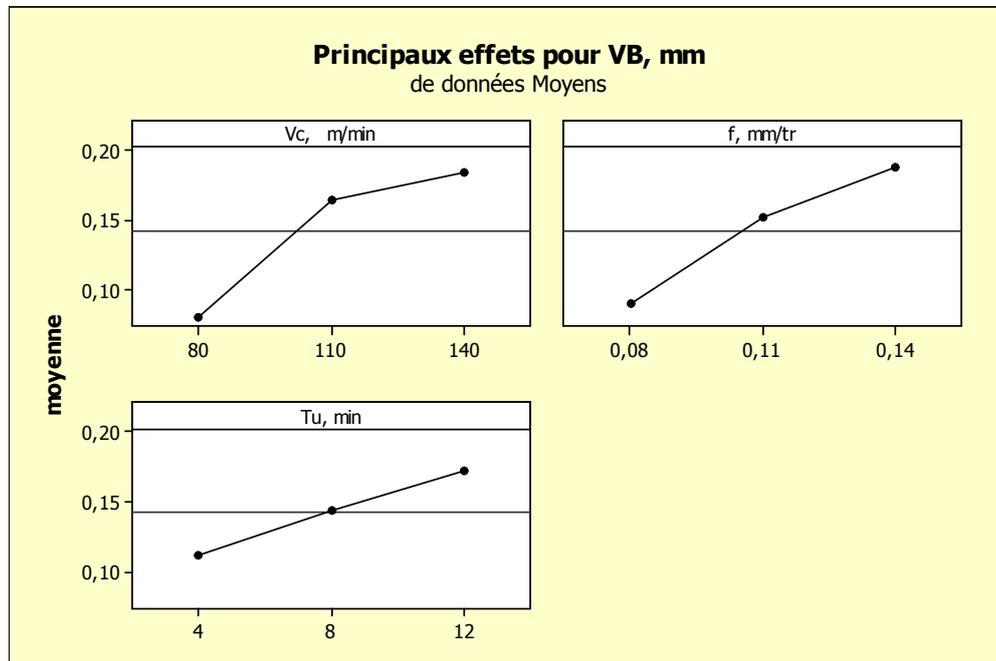


Figure III.1 : Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur l'usure en dépouille VB

On remarque a l'aide du tableau (III.2) et la figure (III.1) que la vitesse (Vc) est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 39,96% suivi par l'avance (f) avec une valeur de 35,36%, en fin le temps d'usinage (Tu) avec 13,51 %.

V.I.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ces modèles permettent de décrire la relation entre chacun des critères de l'usure et les éléments du régime de coupe, Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité

$$VB = -0,63615 + 7,81327E-003 * Vc + 3,08179 * f - 5,27778E-004 * Tu + 0,012870 * Vc * f + 4,72222E-005 * Vc * Tu + 0,040278 * f * Tu - 3,58642E-005 * Vc^2 - 14,56790 * f^2 - 1,00694E-004 * Tu^2$$

$$R^2 = 0,9686, \text{Adj } R^2 = 0,9519, \text{Pred } R^2 = 0,9225$$

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle n'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif,

$$VB = -0,70777 + 8,19105E-003 * Vc + 3,40401 * f + 7,48611E-003 * Tu + 0,012870 * Vc * f - 3,58642E-005 * Vc^2 - 14,56790 * f^2$$

$$R^2 = 0,9629, \text{Adj } R^2 = 0,9517, \text{Pred } R^2 = 0,9316$$

V.I.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

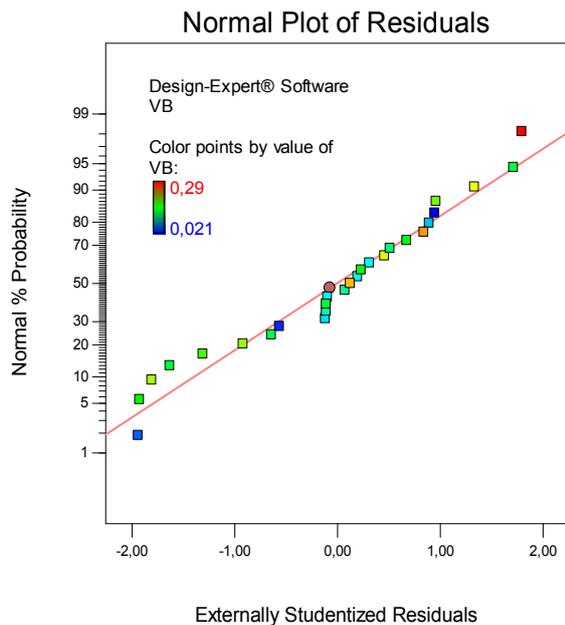


Figure III.2 : courbe de normalité pour VB.

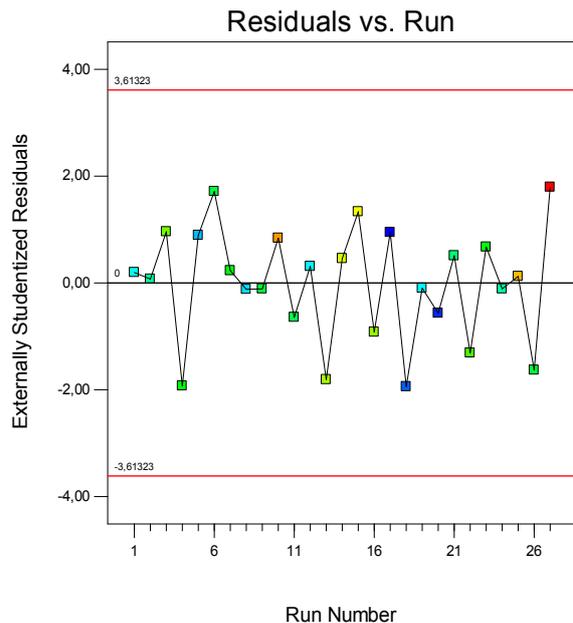


Figure III.3 : courbe des valeurs résiduelles pour VB.

Dans le but d'améliorer la normalité de distribution de l'erreur, une transformation du type box-cox (suar root, lambda=0,5) est recommandée. D'où le modèle prendra la forme suivante :

$$\sqrt{VB} = -1,26076 + 0,015243 * Vc + 9,03107 * f + 0,010250 * Tu - 5,80093E-005 * Vc^2 - 30,62451 * f^2$$

$$R^2 = 0,9688, \text{Adj } R^2 = 0,9614, \text{Pred } R^2 = 0,9484$$

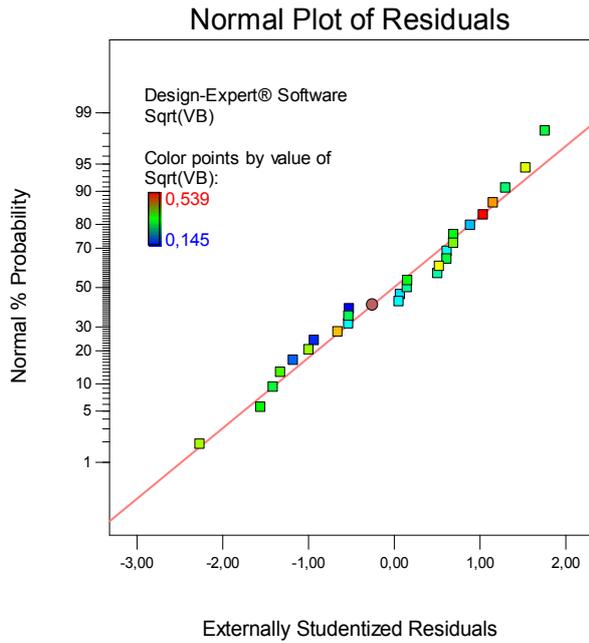


Figure III.4 : courbe de normalité pour VB.

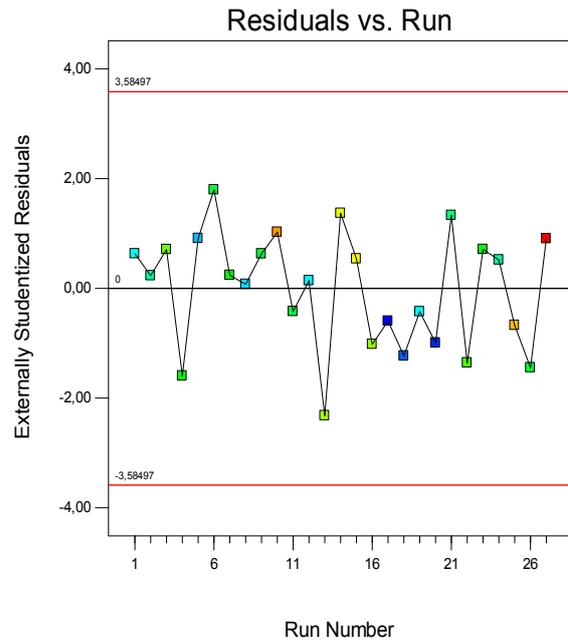


Figure III.5 : courbe des résiduels pour VB.

D'après les graphiques de distribution de l'erreur on remarque que dans le cas de la transformation Box-Cox les points sont plus proches de la droite, ce qui signifie une meilleure normalité de la distribution de l'erreur.

V.I.3. Diagrammes de surface 3D de (VB) et graphique de contour :

La figure (III.6.a) et (III.6.b) permet d'évaluer l'influence simultanée de (V_c ; f), (V_c ; T_u), sur le critère l'usure en dépouille (VB). La figure indique que la pente de la vitesse de coupe (V_c), et l'avance (f) sont plus importantes par contre la pente du temps d'usinage (T_u). La meilleure usure en dépouille (VB) usinée est obtenue avec la plus petite vitesse de coupe (V_c) et une petite avance (f).

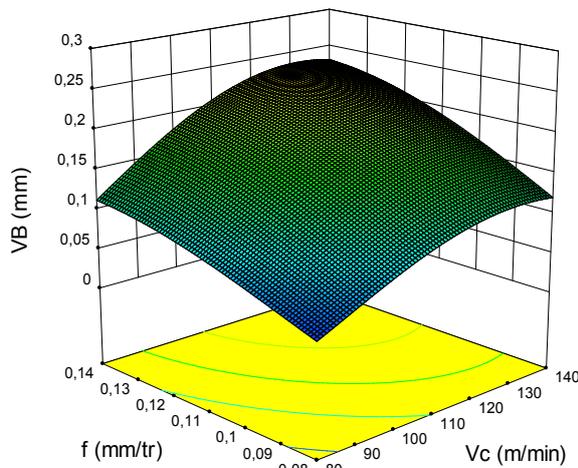


Figure III.6.a. Diagrammes de surface 3D de VB en fonction de (f , V_c) avec $T_u=8$ min

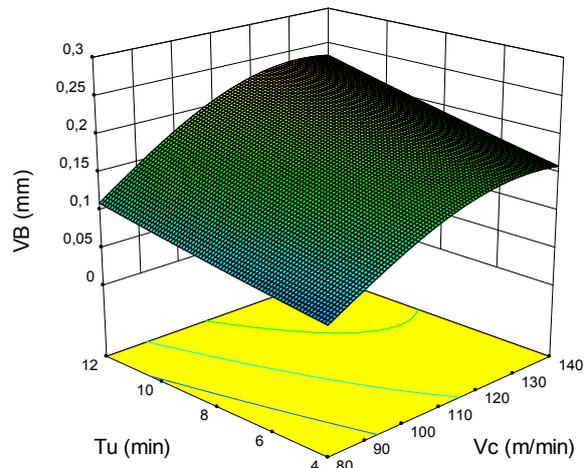


Figure III.6.b. Diagrammes de surface 3D de VB en fonction de (T_u , V_c) avec $f=0,11$ mm/tr

V.II. ANOVA de la rugosité (Ra)

Le tableau (III.3) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de rugosité Ra

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

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont %	Remarque
Model	1,52754167	9	0,16972685	25,4892233	< 0,0001	93,10	Significant
A-Vc	0,16627222	1	0,16627222	24,9704143	0,0001	10,13	Significant
B-f	0,52360556	1	0,52360556	78,6339863	< 0,0001	31,91	Significant
C-Tu	0,39308889	1	0,39308889	59,0332665	< 0,0001	23,95	Significant
AC	0,072075	1	0,072075	10,8240726	0,0043	4,39	Significant
A^2	0,36342407	1	0,36342407	54,5782667	< 0,0001	22,14	Significant
Residual	0,11319907	17	0,00665877			6,89	
Cor Total	1,64074074	26				100	

La figure (III.8) présente les effets principaux des facteurs considérés : la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage sur la rugosité de surface Ra.

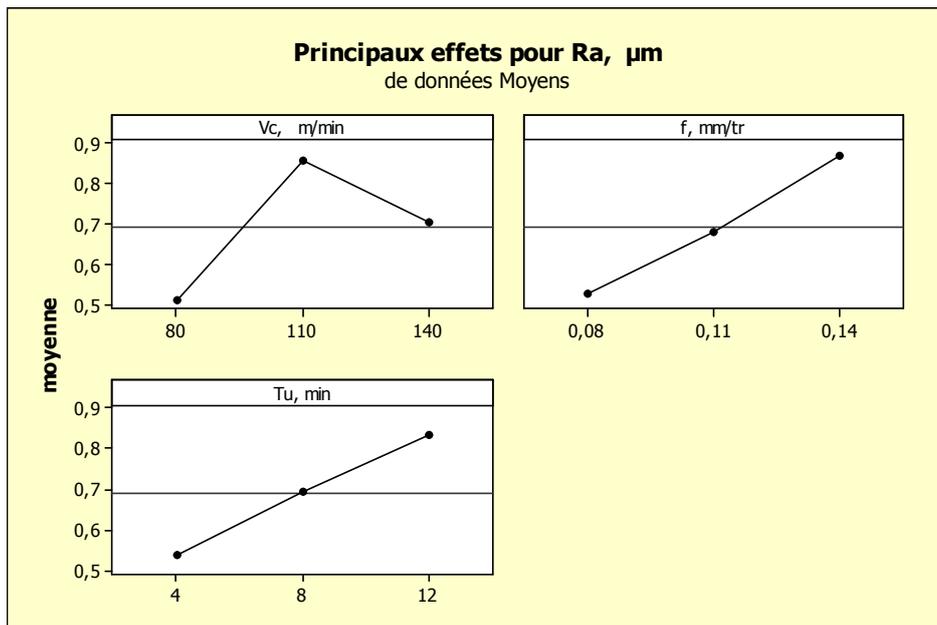


Figure III.7 : Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur la rugosité Ra

Le tableau (III.3) et la figure (III.7) montre que l'avance par tour (f) est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 31,91% suivi par le temps (Tu) a une valeur de 23,95%, l'interaction(Vc²) de 22,14%, la vitesse de coupe (Vc) de 10,13%,l'analyse indique que l'effet la vitesse de coupe (Vc) sur la rugosité Ra est faible.

V.II.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun des critères de rugosité et les éléments du régime de coupe, Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité,

$$Ra = -3,33080 + 0,060642 * Vc + 4,80864 * f - 0,014097 * Tu - 0,022222 * Vc * f + 6,45833E-004 * Vc * Tu - 0,11111 * f * Tu - 2,73457E-004 * Vc^2 + 19,13580 * f^2 - 4,86111E-004 * Tu^2$$

$$R^2 = 0,9310, \text{ Adj } R^2 = 0,8945, \text{ Pred } R^2 = 0,8241$$

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle n'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif,

$$Ra = -3,15827 + 0,058198 * Vc + 5,68519 * f - 0,034097 * Tu + 6,45833E-004 * Vc * Tu - 2,73457E-004 * Vc^2$$

$$R^2 = 0,9255, \text{ Adj } R^2 = 0,9077, \text{ Pred } R^2 = 0,8726$$

V.II.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

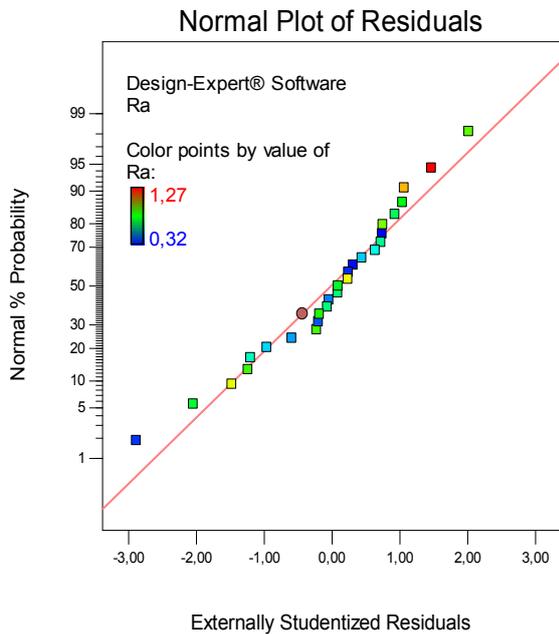


Figure III.8 : courbe de normalité pour Ra.

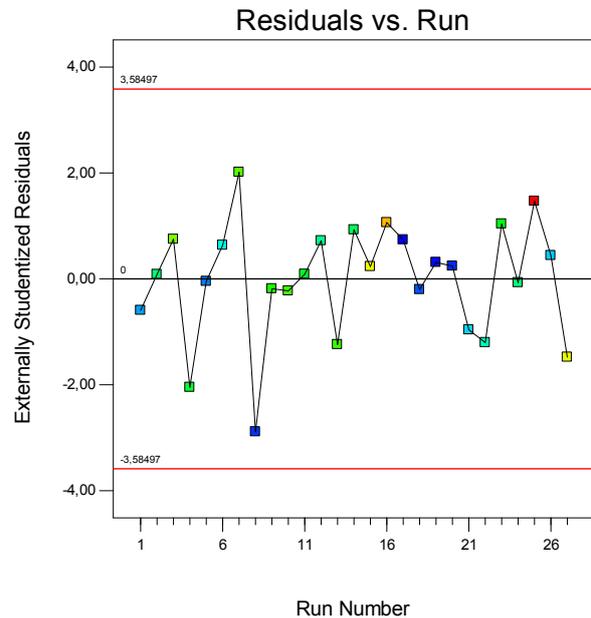


Figure III.9 : courbe des résiduels pour Ra.

V.II.3. Diagrammes de surface 3D de (Ra) et graphiques de contours

La figure (III.10.a) et (III.10.b) permet d'évaluer l'influence simultanée de (Vc ; f), (Vc ; Tu) sur le critère de rugosité de surface (Ra), La figure indique que la pente de l'avance (f) est la plus importante suivie par le temps d'usinage (Tu), La meilleure

rugosité de la surface usinée est obtenue avec la combinaison de la plus petite avance par tour (f) et le petit temps d'usinage (T_u).

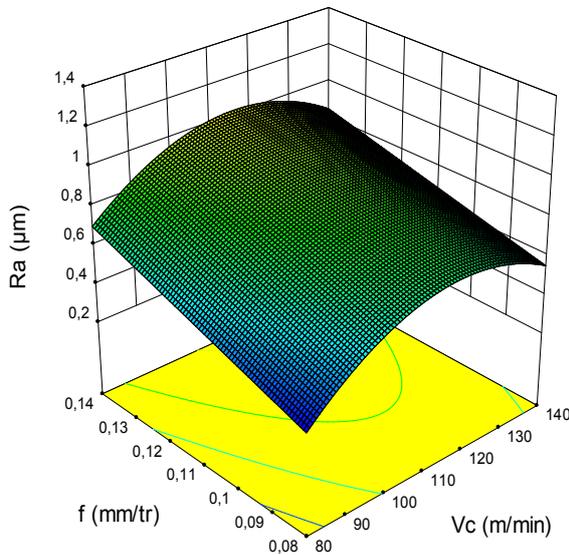


Figure III.10.a : Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (f , V_c) avec $T_u=8$ min.

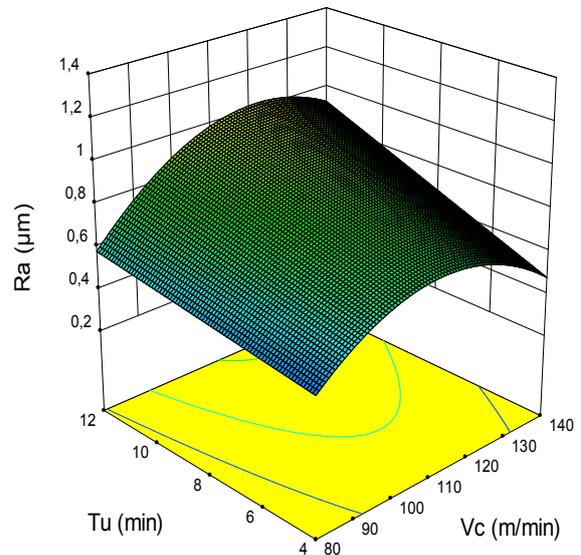


Figure III.10.b : Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (T_u , V_c) avec $f=0,11$ mm/tr.

V.III. ANOVA de l'effort de coupe (F_x)

Les résultats de l'ANOVA de la composante F_x sont présentés dans le tableau (III.4).

Tableau III.4 : Résultat de la variance de la composante de l'effort de coupe (F_x)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Con %	Remarque
Model	18851,7109	9	2094,63454	258,379177	< 0.0001	99.27	significant
A- V_c	24,3369389	1	24,3369389	3,00203119	0.1013	0.21	Non significant
B- f	1428,09494	1	1428,09494	176,159605	< 0.0001	7.52	significant
C- T_u	17245,3401	1	17245,3401	2127,26215	< 0.0001	90.81	significant
AC	73,7056333	1	73,7056333	9,0918012	0.0078	0.38	significant
C^2	47,959113	1	47,959113	5,91589409	0.0263	0.25	significant
Residual	137,81601	17	8,10682413			0.72	
Cor Total	18989,5269	26				100	

La figure (III.11) présente les effets principaux des facteurs considérés : l'avance par tour et le temps d'usinage sur l'effort de coupe (F_x).

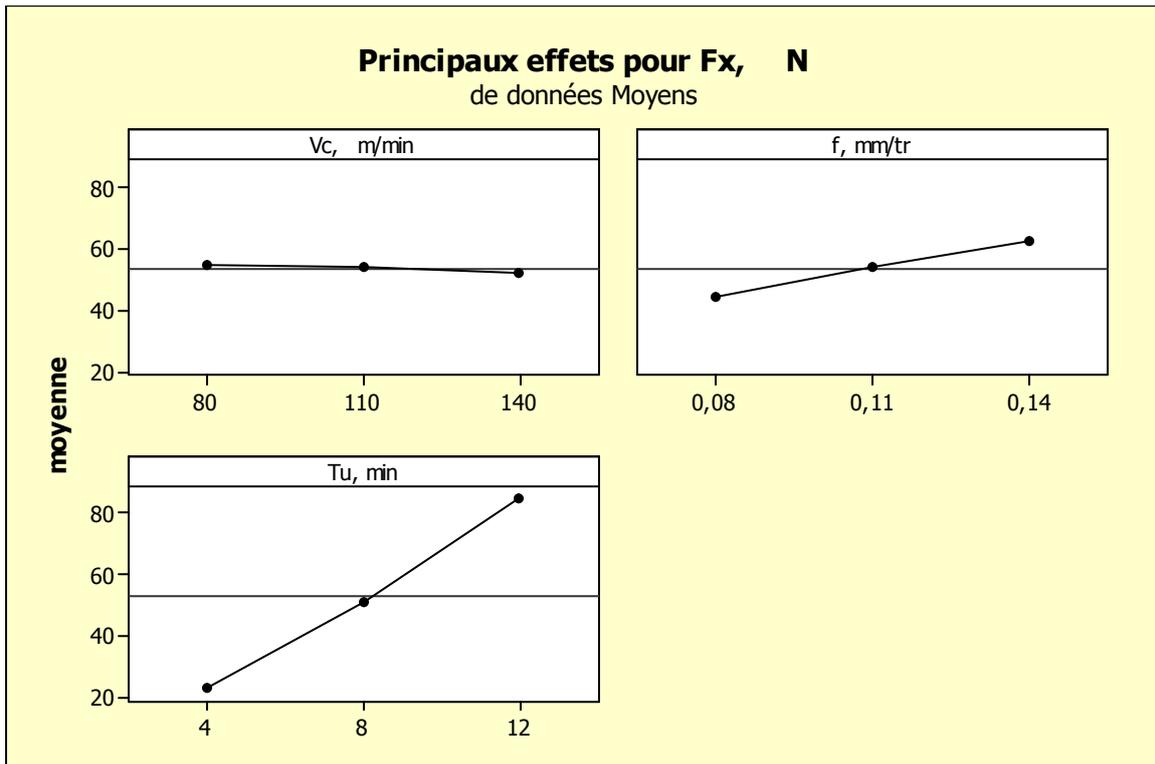


Figure III.11 : Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur l'effort de coupe (Fx).

Cette analyse montre que le temps d'usinage(Tu) est le facteur de plus grande influence avec une valeur de contribution à 90.81% suivi par l'avance (f) avec une contribution de 7.52%.

V.III.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ce modèle permet de décrire la relation entre l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

$$F_x = -46.38154 + 0.24285 * V_c + 307.75309 * f + 5.74285 * T_u - 7.40741E-003 * V_c * f - 0.020653 * V_c * T_u + 13.09028 * f * T_u - 5.25309E-004 * V_c^2 - 521.60494 * f^2 + 0.17670 * T_u^2$$

$$R^2 = 0.9927, \text{ Adj } R^2 = 0.9889, \text{ Pred } R^2 = 0.9824$$

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle N'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$F_x = -45,77185 + 0.12646 * V_c + 296.90741 * f + 7,18278 * T_u - 0,020653 * V_c * T_u + 0,17670 * T_u^2$$

$$R^2 = 0.9910, \text{ Adj } R^2 = 0.9889, \text{ Pred } R^2 = 0.9854$$

V.III.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

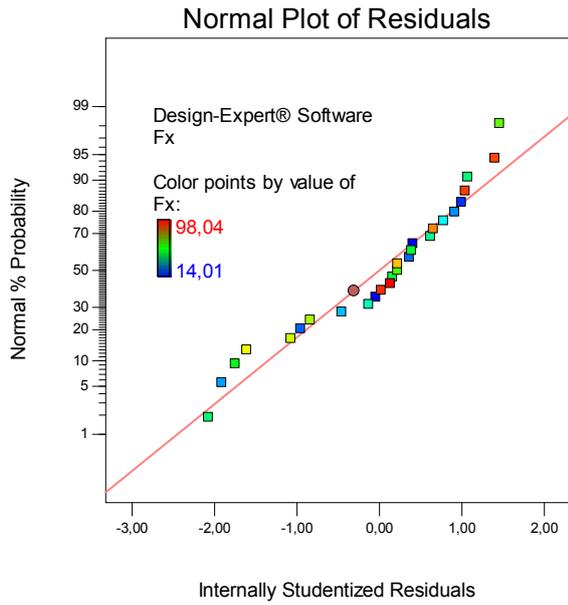


Figure III.12 : courbe de normalité pour Fx.

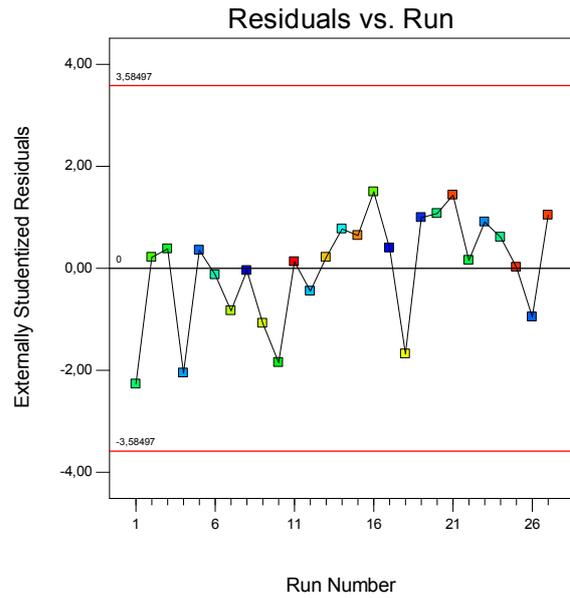


Figure III.13 : courbe des résiduels pour Fx.

V.III.3. Diagrammes de surface 3D de (Fx) et graphique de contour

La figure (III.14.a) et (III.14.b) permet d'évaluer les diagrammes d'influence des (T_u ; f), (T_u ; V_c) sur le composante de l'effort de coupe (F_x). La figure montre que la pente du temps d'usinage (T_u) est importante, donc ce facteur (T_u) possède l'effet le plus significatif sur la composante (F_x).

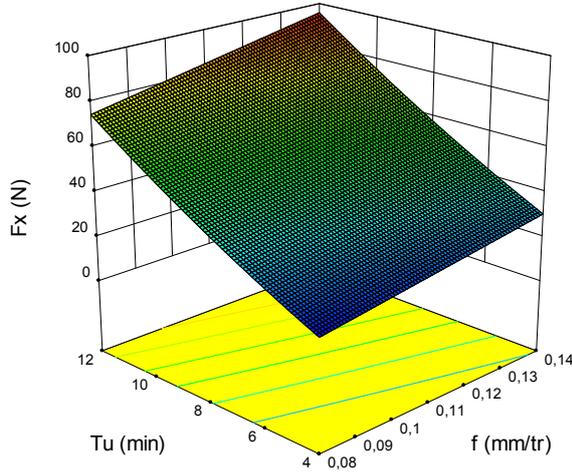


Figure III.14.a : Diagrammes de surface 3D de (F_x) en fonction de (T_u , f) avec $V_c=110$ m/min.

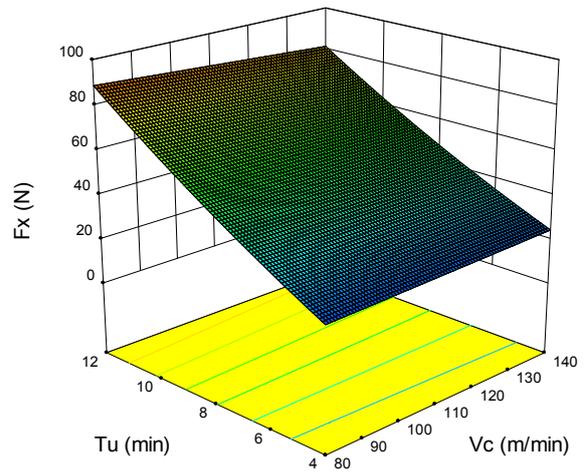


Figure III.14.b : Diagrammes de surface 3D de (F_x) en fonction de (T_u , V_c) avec $f=0,11$ mm/tr.

V.IV. ANOVA de l'effort de coupe (Fy)

L'analyse de la variance ANOVA de la variation de la composante radiale de l'effort de coupe est représentée dans le tableau (III.5).

Tableau III.5 : Les résultats d'ANOVA pour la composante de l'effort de coupe (Fy)

	Sum of		Mean	F	p-value	Cont %	Remarque
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F		
Model	79213,7608	9	8801,52898	147,052434	< 0.0001	98,73	significant
A-Vc	286,641606	1	286,641606	4,78909357	0.0429	0,35	significant
B-f	18242,4101	1	18242,4101	304,786908	< 0.0001	22,73	significant
C-Tu	57873,6901	1	57873,6901	966,930522	< 0.0001	72,13	significant
BC	2719,8363	1	2719,8363	45,4419396	< 0.0001	3,38	significant
Residual	1017,50096	17	59,8529975			1,26	
Cor Total	80231,2618	26				100	

La figure (III.15) présente les effets principaux des facteurs considérés : l'avance par tour et le temps d'usinage sur l'effort de coupe (Fy).

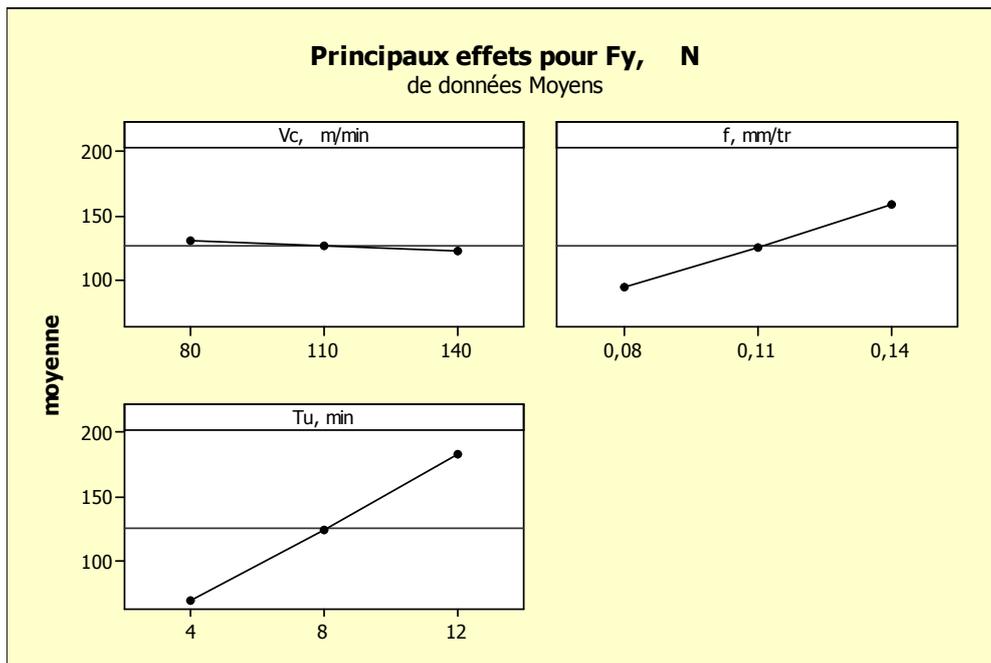


Figure III.15. : Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur l'effort de coupe (Fy).

Le tableau (III.5) et la figure (III.15) montre que l'avance (Tu) est le facteur qui a l'influence la plus significative sur la composante (Fy) de l'effort de coupe avec une contribution d'environ 72.13% suivi par l'avance de coupe (f) à 22.73%.

V.IV.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

$$F_y = +79.19781 - 0.51724 * V_c - 448.73765 * f - 2.59576 * T_u + 2.14167 * V_c * f + 6.03472E-003 * V_c * T_u + 125.45833 * f * T_u + 4.56173E-004 * V_c^2 + 1230.24691 * f^2 + 0.14420 * T_u^2$$

$$R^2 = 0.9873, \text{ Adj } R^2 = 0.9806, \text{ Pred } R^2 = 0.9673$$

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle N'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$F_y = +20.88852 - 0.13302 * V_c + 57.50000 * f + 0.37528 * T_u + 125.45833 * f * T_u$$

$$R^2 = 0.9862, \text{ Adj } R^2 = 0.9837, \text{ Pred } R^2 = 0.9787$$

V.IV.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

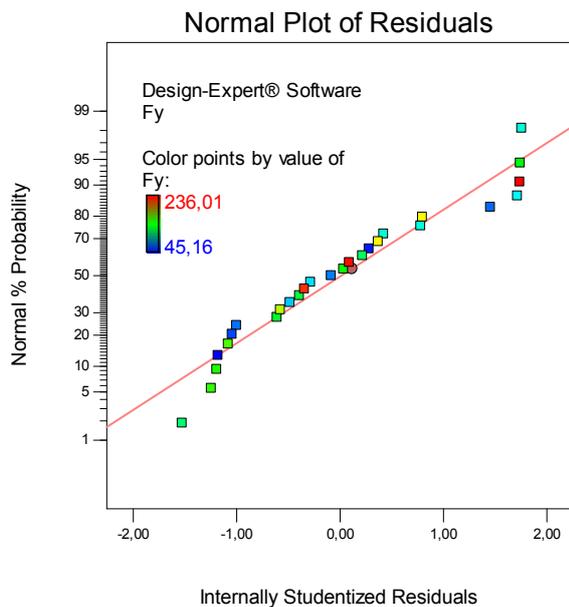


Figure III.16 : courbe de normalité pour Fy.

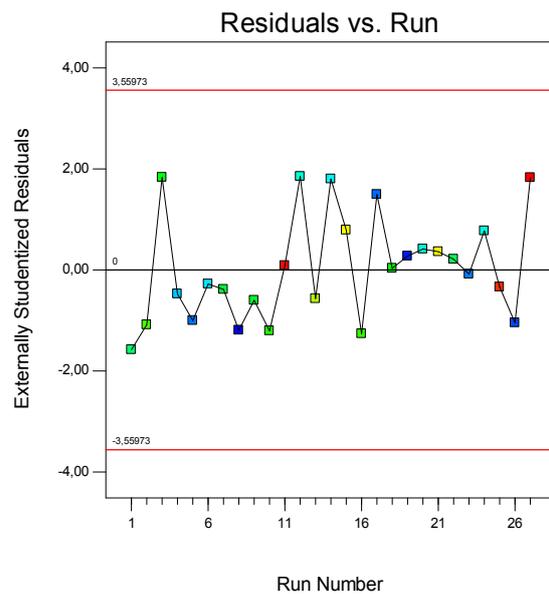


Figure III.17 : courbe des résiduels pour Fy.

V.IV.3. Diagrammes de surface 3D de (Fy) et graphique de contour

La figure (III.18) montre que la pente du temps d'usinage (Tu) est supérieure aux autres facteurs, ce qui implique que ce facteur a l'influence la plus significative suivi par l'avance (f).

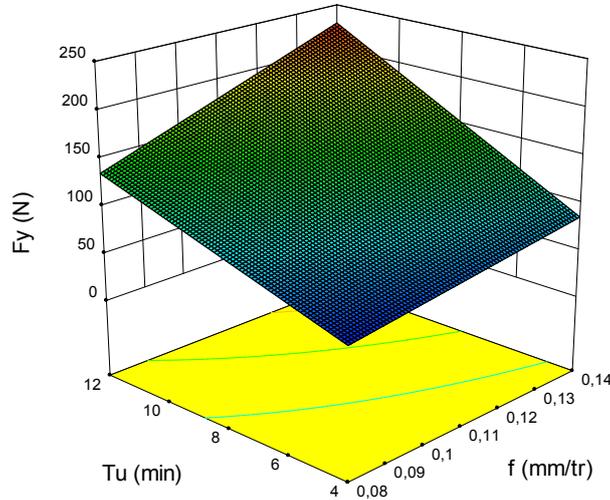


Figure III.18 : Diagrammes de surface 3D de (Fy) en fonction de (Tu, f) avec $V_c=110$ m/min.

V.V. ANOVA de l'effort de coupe (Fz)

Le tableau (III.6) qui concerne l'analyse de la variance ANOVA de la composante tangentielle de l'effort (Fz).

Tableau III.6 : les résultats d'ANOVA de composante de l'effort de coupe (Fz)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont%	Remarque
Model	30321,069	9	3369,0077	227,46251	< 0.0001	99.17	Significant
A-Vc	47,8242	1	47,8242	3,22890712	0.0901	0.15	Non significant
B-f	6927,0373	1	6927,0373	467,68707	< 0.0001	22.65	Significant
C-Tu	23156,237	1	23156,237	1563,4206	< 0.0001	75.74	Significant
Residual	251,79151	17	14,811265			0.82	
Cor Total	30572,860	26				100	

La figure (III.19) présente les effets principaux des facteurs considérés : le temps d'usinage sur l'effort de coupe (Fz).

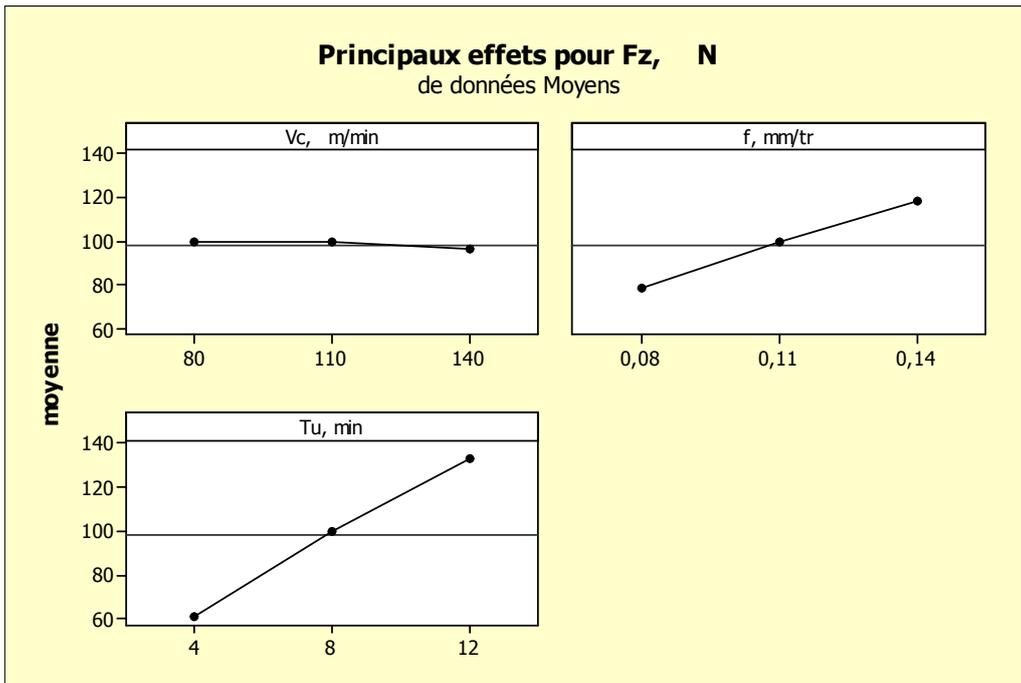


Figure III.19 : Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur l’effort de coupe (Fz).

Le tableau (III.6) et la figure (III.19) montre que le temps d’usinage (Tu) le facteur de plus grande influence avec une contribution de 75.74% suivi par l’avance par tour (f) à 22.65%.

V.V.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun l’effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l’unité.

$$Fz = -93.85265 + 0.48373 * Vc + 950.54938 * f + 11.99118 * Tu - 1.44074 * Vc * f - 0.017063 * Vc * Tu + 17.13889 * f * Tu - 1.10494E-003 * Vc^2 - 1251.23457 * f^2 - 0.18955 * Tu^2$$

$$R^2 = 0.9918, \text{ Adj } R^2 = 0.9874, \text{ Pred } R^2 = 0.9804$$

L’examen de l’analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle N’ont pas une influence significative, d’où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$Fz = -39.28167 - 0.054333 * Vc + 653.90741 * f + 8.96681 * Tu$$

$$R^2 = 0.9856, \text{ Adj } R^2 = 0.9837, \text{ Pred } R^2 = 0.9804$$

V.V.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

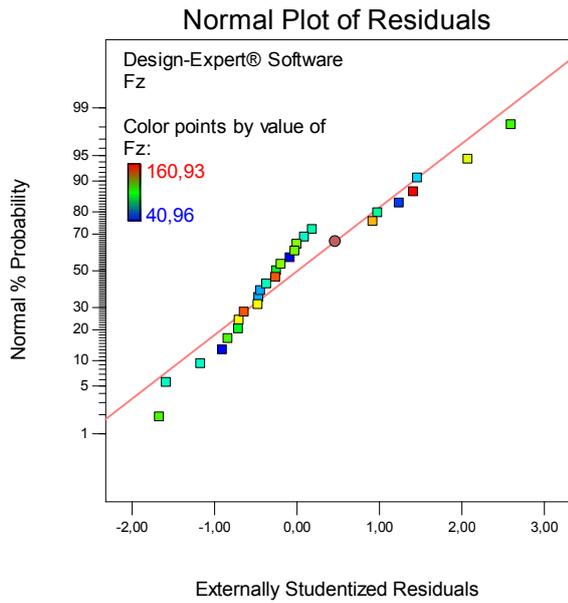


Figure III.20 : courbe de normalité pour Fz.

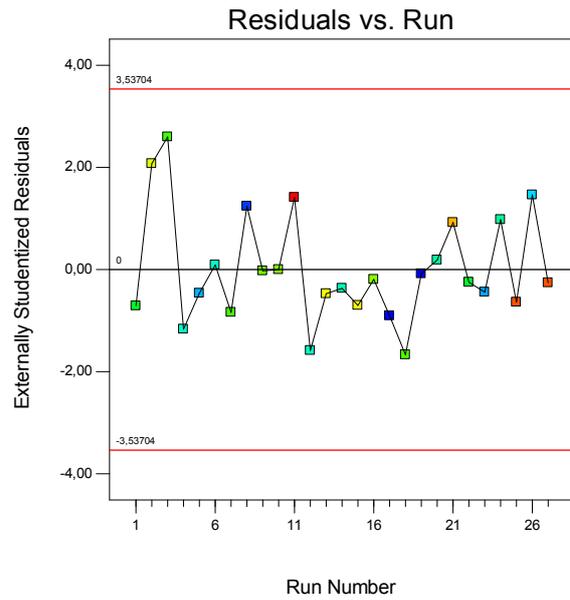


Figure III.21 : courbe des résiduels pour Fz.

V.V.3. Diagrammes de surfaces 3D de (Fz) et graphique de contour

La figure (III.22) indique que la pente du temps d'usinage (T_u) est la plus importante qui implique la plus significatif suivi par l'avance par tour (f).

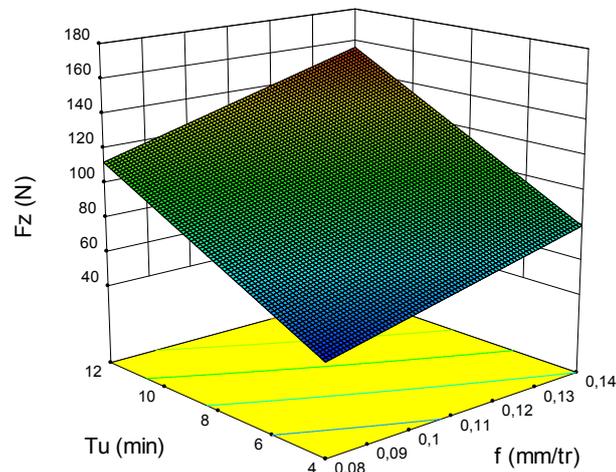


Figure III.22 : Diagrammes de surface 3D de (Fz) en fonction de (T_u , f) avec $V_c=110$ m/min.

V.VI. ANOVA de la Puissance de coupe (P)

Le tableau (III.7) présente l'analyse de la variance ANOVA du critère la puissance de coupe (P).

Tableau III.7 : Résultats d'ANOVA pour la puissance de coupe (P)

	Sum of		Mean	F	p-value	Con%	Remarque
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F		
Model	140400	5	28077,63	541,1	< 0.0001	99,48	significant
A-Vc	38169	1	38169	735,58	< 0.0001	26,97	significant
B-f	22726,41	1	22726,41	437,98	< 0.0001	16,06	significant
C-Tu	76225,6	1	76225,6	1469	< 0.0001	53,86	significant
AB	795,77	1	795,77	15,34	0.0005	0,56	significant
AC	2471,36	1	2471,36	47,63	< 0.0001	1,74	significant
Residual	1089,68	21	51,89			0,77	
Cor Total	141500	26				100	

La figure (III.23) présente les effets principaux des facteurs considérés : le temps d'usinage, la vitesse de coupe et l'avance sur la puissance de coupe (P).

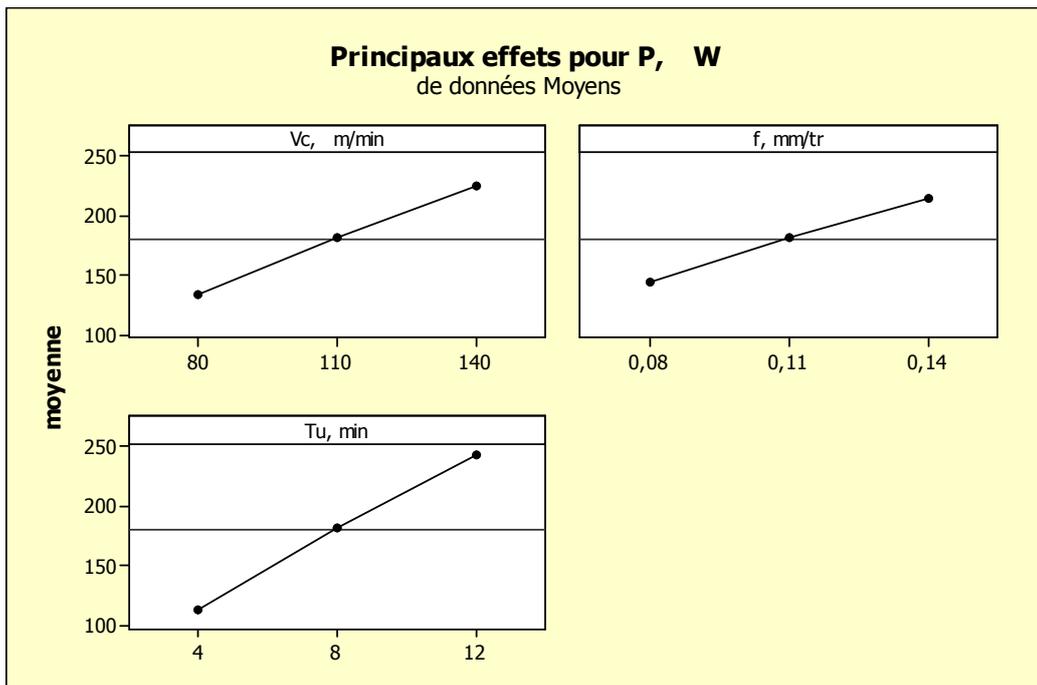


Figure III.23 : Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur la puissance de coupe (P).

D'après les résultats de l'ANOVA on constate que le temps d'usinage (Tu), est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 53,86% suivie par la vitesse de coupe (Vc) avec une valeur de Signifiant 26,97%, en fin l'avance (f), avec 16,06 %.

V.VI.1. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Le modèle quadratique représentant la variation de la puissance de coupe en fonction des éléments du régime de coupe est donné par :

$$P = -91.42068 + 0.22801 * V_c + 552.85802 * f + 5.10285 * T_u + 9.04815 * V_c * f + 0.11959 * V_c * T_u + 27.68056 * f * T_u - 2.93210E-003 * V_c^2 - 2659.87654 * f^2 - 0.31462 * T_u^2$$

$$R^2 = 0.9948, \text{Adj } R^2 = 0.9921, \text{Pred } R^2 = 0.9881$$

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle n'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$P = -34.69222 - 0.41706 * V_c + 189.12963 * f + 3.11382 * T_u + 9.04815 * V_c * f + 0.11959 * V_c * T_u$$

$$R^2 = 0.9923, \text{Adj } R^2 = 0.9905, \text{Pred } R^2 = 0.9875$$

V.VI.2. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

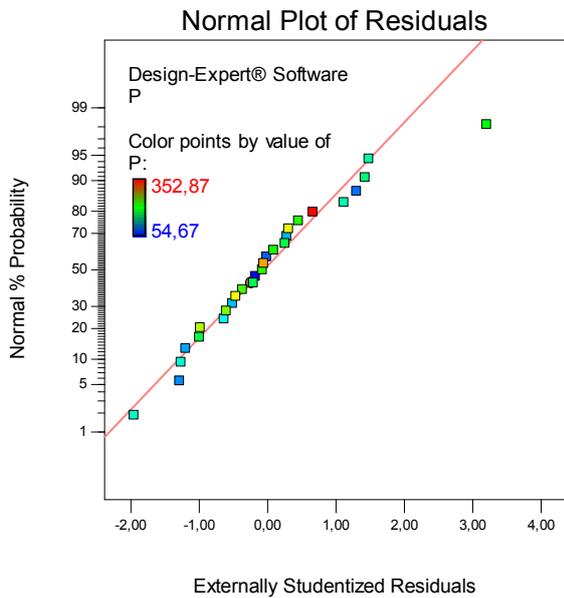


Figure III.24 : courbe de normalité pour P.

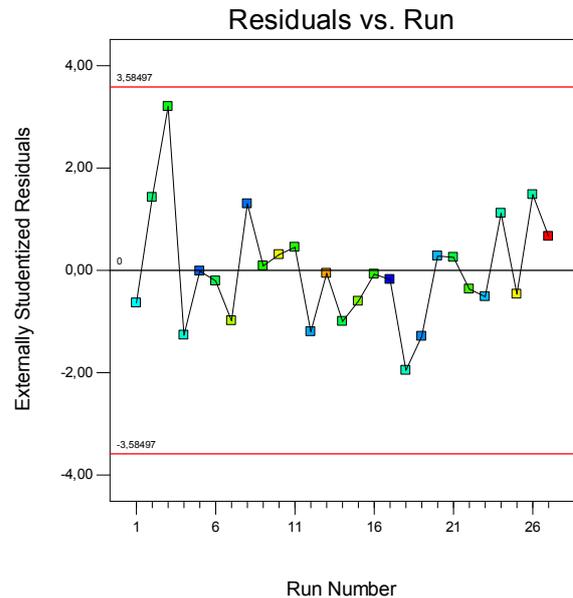


Figure III.25 : courbe des résiduels pour P.

V.VI.3. Diagrammes de surfaces 3D de (P) et graphique de contour

La figure (III.26.a et b) montre que la pente du temps d'usinage (T_u) est importante, donc ce facteur (T_u) possède l'effet le plus significatif sur la puissance (P).

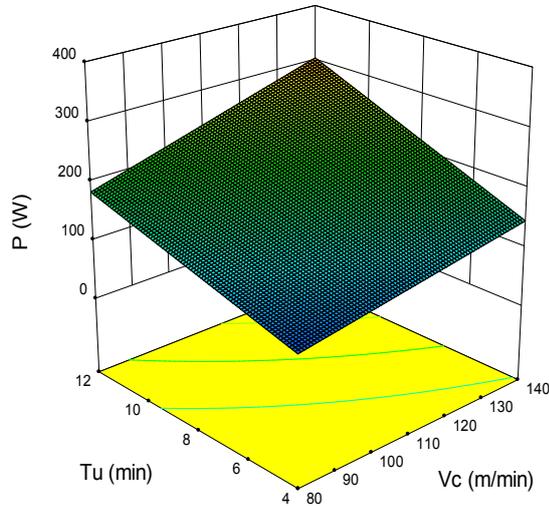


Figure III.26 a : Diagrammes de surface 3D de (P) en fonction de (T_u , V_c) avec $f=0,11$ mm/tr.

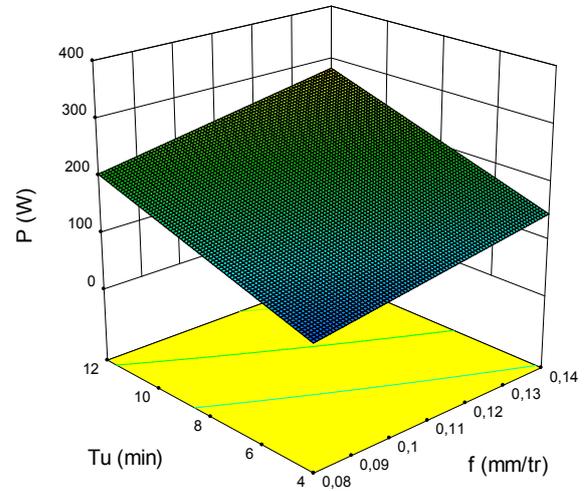


Figure III.26 b : Diagrammes de surface 3D de (P) en fonction de (T_u , f) avec $V_c=110$ m/min.

VI. Méthodologie de la modélisation par les réseaux de neurones artificiels (ANN)

Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones naturels (humains ou animal).



Figure III.27 : neurone naturel [21].

Aujourd'hui, les réseaux de neurones artificiels ont de nombreuses applications dans des secteurs très variés.

Un neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance des neurones amont. A chacune des entrées est associé un poids w (*Wight*) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire comprend une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals [22] (figure III.28).

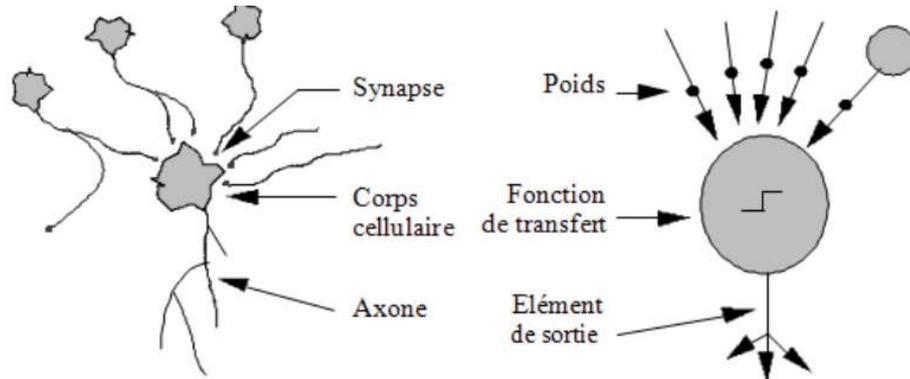


Figure III.28 : Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel [23].

Il existe de nombreuses fonctions de transfert possibles [24], les plus utilisées sont présentées sur la figure (III.29). Elles peuvent prendre une infinité de valeurs comprises dans l'intervalle $[-1 ; +1]$.

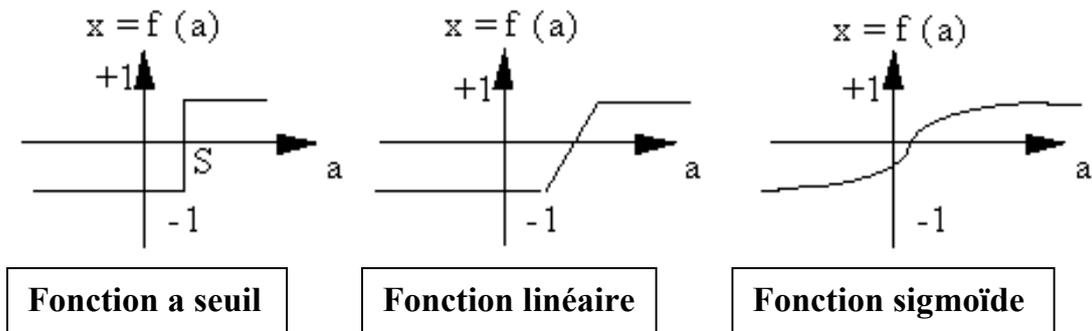


Figure III.29 : Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel [25].

Il existe plusieurs modèles de réseaux de neurones, le perceptron a une couche et le perceptron multicouche. Les réseaux à une couche sont assez limités car ils n'utilisent que des relations linéaires avec une seule couche de transfert des informations. Pour faire des calculs plus complexes, les réseaux les plus utilisés sont les réseaux multicouches (fig III.30). Ce domaine de recherche connaît depuis quelques années un regain d'intérêt, et les réseaux de neurones sont actuellement d'usage courant en plusieurs domaines scientifiques et industriels [26-29].

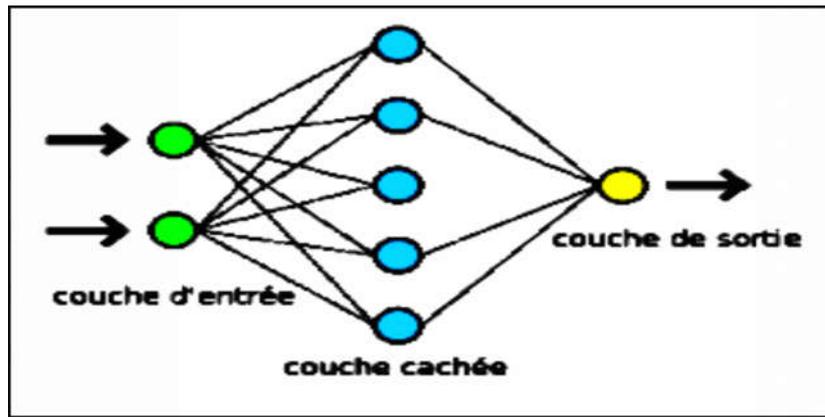


Figure III.30 : Composition d'un neurone artificiel.

VI.I Analyse d'un ANN du critère (VB)

Tableau III.8 : Performance des structures ANN du modèle de (VB).

Apprentissage		Validation	
VB, mm	Mesures	VB, mm	Mesures
R carré	0,9992995	R carré	0,9926534
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0018044	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,005335
écart absolu moyen	0,0013171	écart absolu moyen	0,0050432
-Log-vraisemblance	-88,17429	-Log-vraisemblance	-34,33068
Somme des carrés des écarts (SSE)	0,0000586	Somme des carrés des écarts (SSE)	0,0002562
Somme fréquences	18	Somme fréquences	9

Le tableau (III.8) montre un coefficient de détermination de 0.9992995 pour l'apprentissage et 0.9926534 pour la validation. Par conséquent, l'architecture optimale est 3-5-1 (fig III.31).

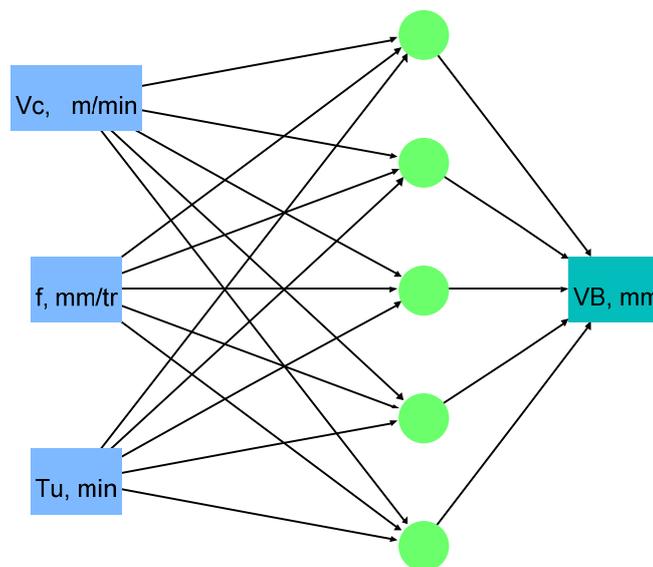


Figure III.31 : Digramme optimale 3-5-1 pour la modélisation de VB.

VI.II. Comparaison entre l'analyse du (RSM) et (ANN) du (VB)

La valeur du coefficient de détermination (R^2) pour le cas du modèle de l'usure en dépouille obtenue par MSR est de 0.9629, sa valeur pour ANN modèle est de 0.9959. Cela peut montrer la précision du modèle obtenu par les réseaux de neurones.

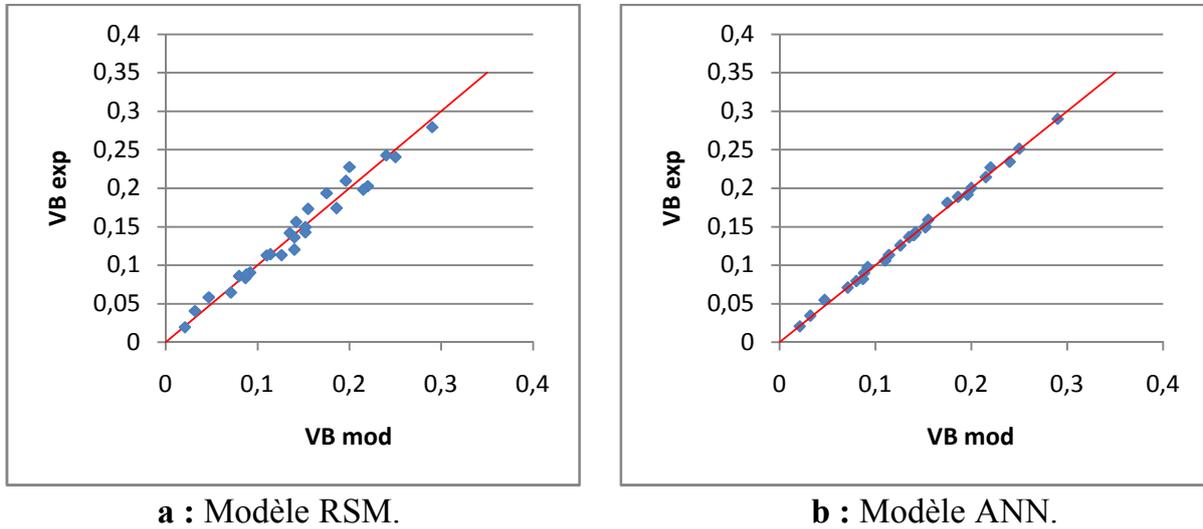


Figure III.32 : Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales.

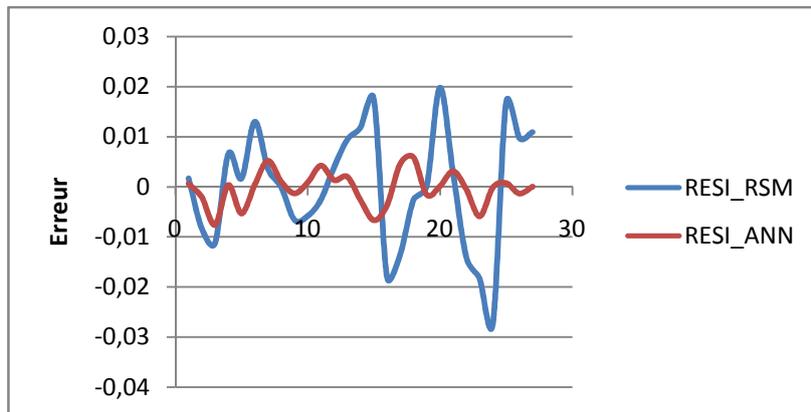


Figure III.33 : comparaison des résiduels obtenus par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones pour VB.

La figure (III.33) montre que les valeurs de l'erreur commise lors de l'approximation par les ANN sont plus faibles que celles obtenus par la méthodologie de surface de réponse pour le cas de l'usure en dépouille.

VI.III. Analyse d'un ANN du critère (Ra)

Tableau III.9 : Performance des structures ANN du modèle de (Ra).

Apprentissage		Validation	
Ra, μm	Mesures	Ra, μm	Mesures
R carré	1	R carré	0,9750943
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	4,72E-08	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,043297
écart absolu moyen	3,57E-08	écart absolu moyen	0,0346835
-Log-vraisemblance	-278,1159	-Log-vraisemblance	-15,4866
Somme des carrés des écarts (SSE)	4,00E-14	Somme des carrés des écarts (SSE)	0,0168717
Somme fréquences	18	Somme fréquences	9

Le tableau (III.9) montre un coefficient de détermination de 1 pour l'apprentissage et 0.9750943 pour la validation. Par conséquent, l'architecture optimale est **3-5-1** (fig III.34).

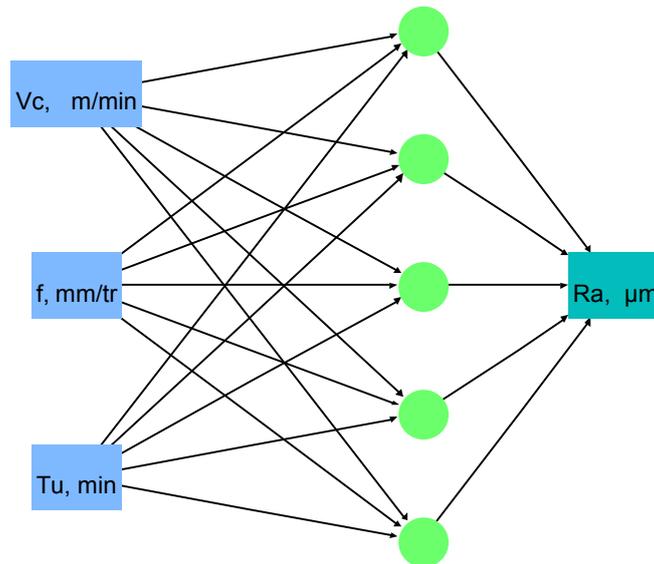
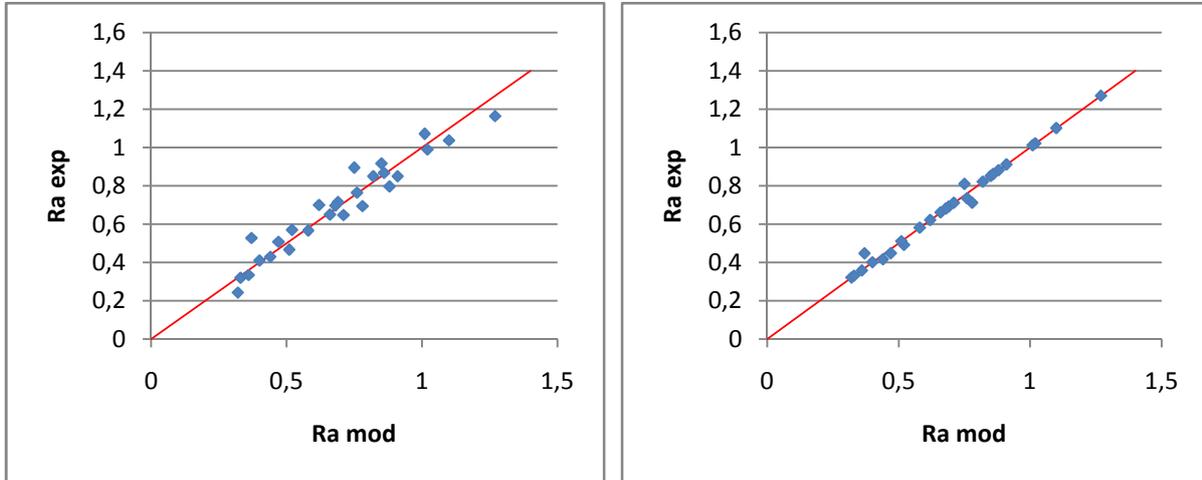


Figure III.34 : Digramme optimale 3-5-1 pour la modélisation de Ra.

VI.IV. Comparaison entre l'analyse du (RSM) et (ANN) du (Ra)

La valeur du coefficient de détermination (R^2) pour le cas du modèle de la rugosité de surface obtenue par MSR est de 0.9255, sa valeur pour ANN modèle est de 0.9875. Cela peut montrer la précision du modèle obtenu par les réseaux de neurones.



a : Modèle RSM.

b : Modèle ANN.

Figure III.35 : Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales.

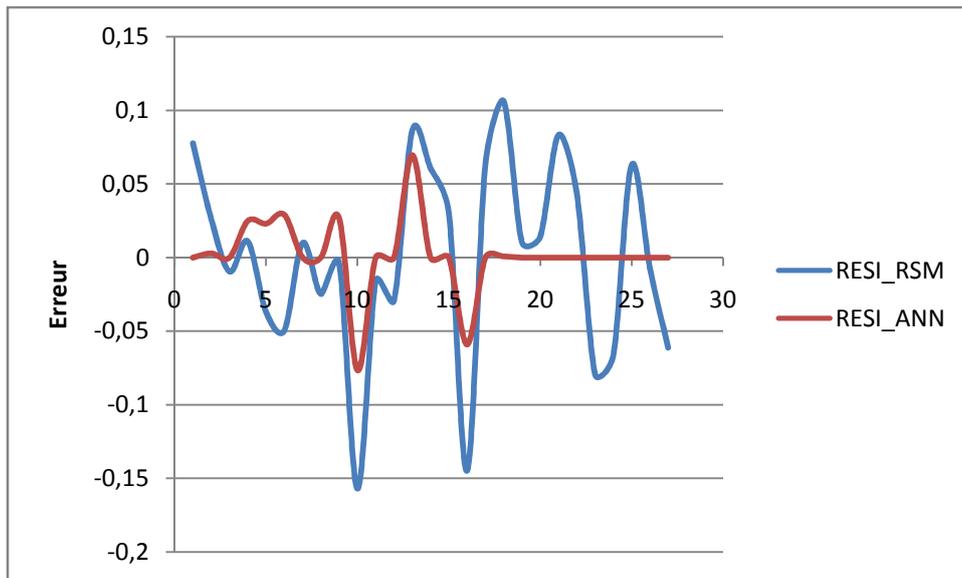


Figure III.36 : comparaison des résiduels obtenus par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones pour **Ra**.

La figure (III.36) montre que les valeurs de l'erreur commise lors de l'approximation par les ANN sont plus faibles que celles obtenus par la méthodologie de surface de réponse pour le cas de la rugosité de surface.

VI.V. Analyse d'un ANN du critère (Fy)

Tableau III.10 : Performance des structures ANN du modèle de (Fy).

Apprentissage		Validation	
Fy, N	Mesures	Fy, N	Mesures
R carré	0,9928078	R carré	0,9958022
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	4,8114119	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	3,2080822
écart absolu moyen	3,9504403	écart absolu moyen	2,5328299
-Log-vraisemblance	53,818724	-Log-vraisemblance	23,261507
Somme des carrés des écarts (SSE)	416,69433	Somme des carrés des écarts (SSE)	92,626122
Somme fréquences	18	Somme fréquences	9

Le tableau (III.10) montre un coefficient de détermination de 0.9928078 pour l'apprentissage et 0.9958022 pour la validation. Par conséquent, l'architecture optimale est 3-8-1 (fig III.37).

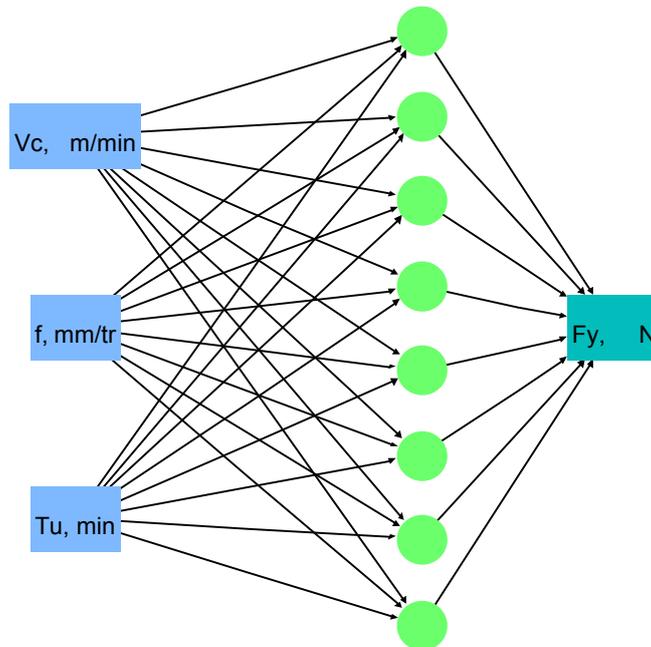


Figure III.37 : Digramme optimale 3-8-1 pour la modélisation de Fy.

VI.VI. Comparaison entre l'analyse du (RSM) et (ANN) du (Fy)

La valeur du coefficient de détermination (R^2) pour le cas du modèle du F_y obtenue par MSR est de 0.9862, sa valeur pour ANN modèle est de 0.9939. Cela peut montrer la précision du modèle obtenu par les réseaux de neurones.

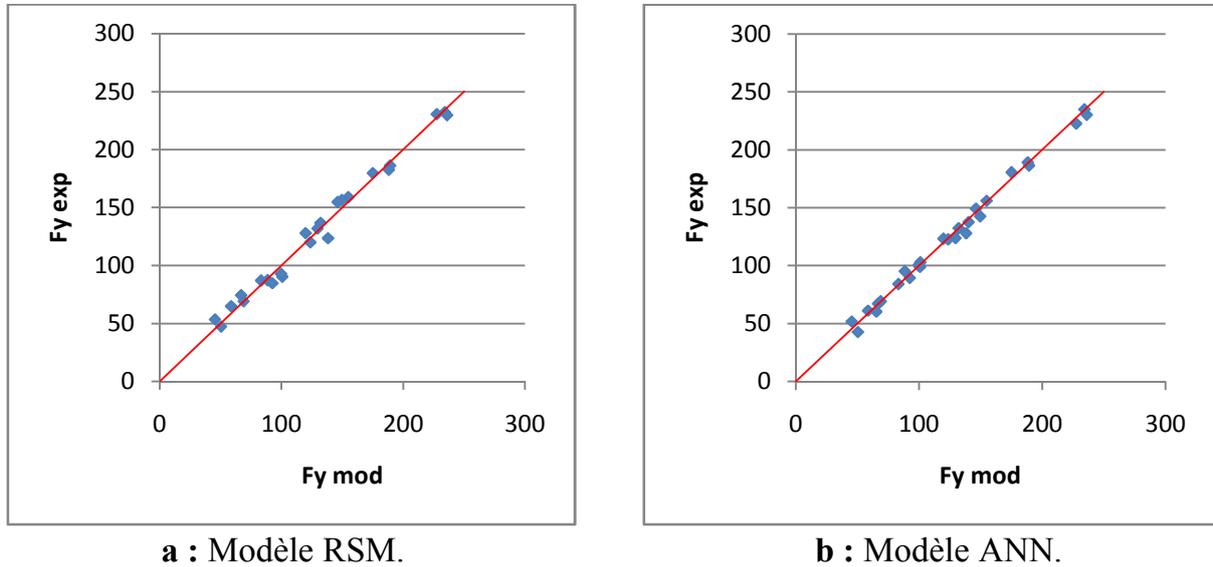


Figure III.38 : Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales.

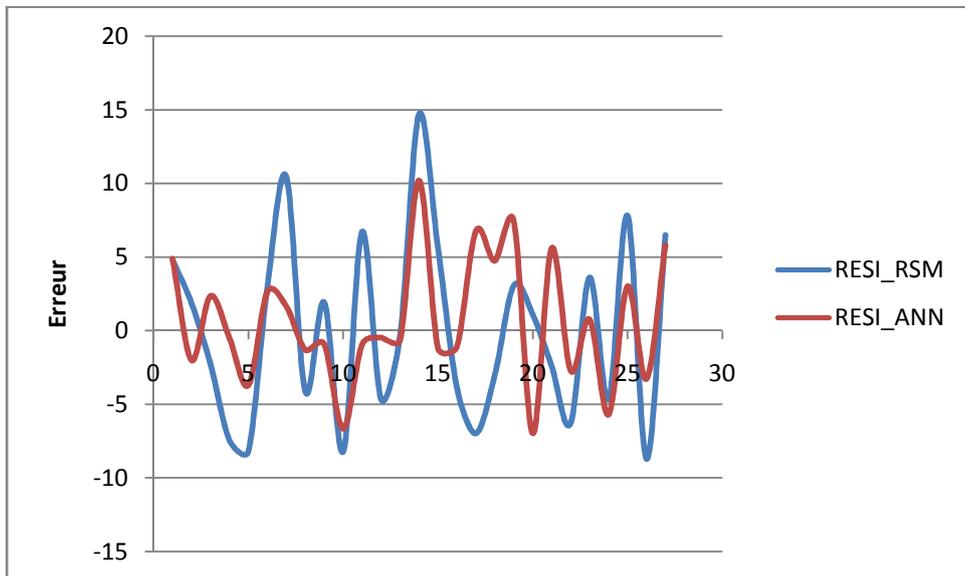


Figure III.39 : comparaison des résiduels obtenus par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones pour F_y .

La figure (III.39) montre que les valeurs de l'erreur commise lors de l'approximation par les ANN sont plus faibles que celles obtenus par la méthodologie de surface de réponse pour le cas du F_y .

VI.VII. Analyse d'un ANN du critère (P)

Tableau III.11 : Performance des structures ANN du modèle de (P).

Apprentissage		Validation	
P, W	Mesures	P, W	Mesures
R carré	0,9950648	R carré	0,998437
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	4,8469056	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	3,0047833
écart absolu moyen	3,9055484	écart absolu moyen	2,5712509
-Log-vraisemblance	53,951022	-Log-vraisemblance	22,672296
Somme des carrés des écarts (SSE)	422,86489	Somme des carrés des écarts (SSE)	81,258505
Somme fréquences	18	Somme fréquences	9

Le tableau (III.11) montre un coefficient de détermination de 0.9950648 pour l'apprentissage et 0.998437 pour la validation. Par conséquent, l'architecture optimale est 3-5-1 (fig III.40).

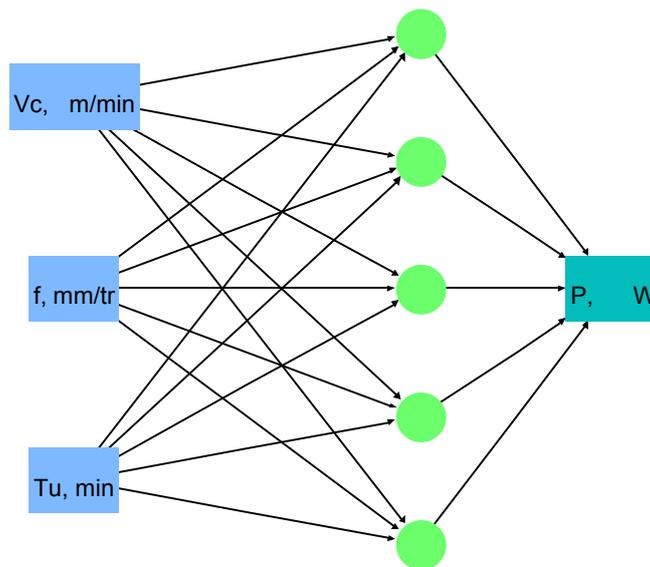
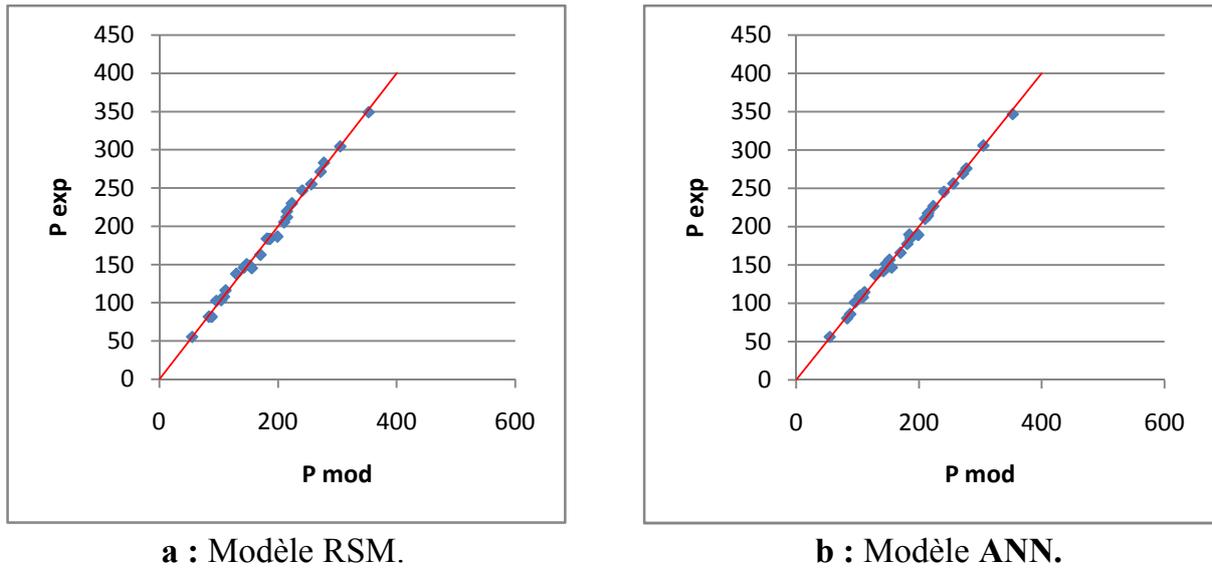


Figure III.40 : Digramme optimale 3-5-1 pour la modélisation de P.

VI.VIII. Comparaison entre l'analyse du (RSM) et (ANN) du (P)

La valeur du coefficient de détermination (R^2) pour le cas du modèle de la puissance de coupe obtenue par MSR est de 0.9923, sa valeur pour ANN modèle est de 0.9967. Cela peut montrer la précision du modèle obtenu par les réseaux de neurones.



a : Modèle RSM. **b** : Modèle ANN.
Figure III.41 : Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales.

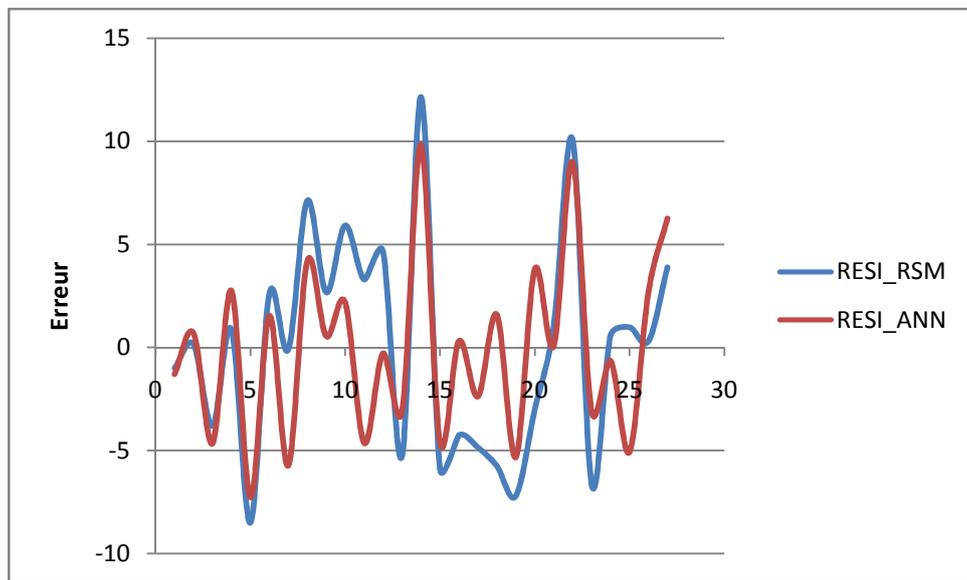


Figure III.42 : comparaison des résiduels obtenus par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones pour **P**.

La figure (III.42) montre que les valeurs de l'erreur commise lors de l'approximation par les ANN sont plus faibles que celles obtenus par la méthodologie de surface de réponse pour le cas de la puissance de coupe.

VII. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter l'application de la méthodologie de surface de réponse (MSR) et l'ANOVA, pour la détermination du degré d'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f) et le temps d'usinage (T_u)) sur les critères de l'usure en dépouille (VB) et la rugosité de surface (R_a) et les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z) ainsi que la puissance de coupe (P). Ce qui a permis de déterminer les modèles mathématiques et les coefficients de détermination de chacun des paramètres à l'aide du logiciel Design-Expert. Les modèles mathématiques obtenus permettent de donner des prédictions qui sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales. Les coefficients de détermination permettent de valider ces modèles ($R^2 = 0,9688$ pour le critère de l'usure en dépouille et $R^2 = 0,9255$ pour le critère de rugosité et $R^2 > 98$ pour les composantes de l'effort et $R^2 = 0.9923$ pour la puissance de coupe).

Dans un second temps, nous avons utilisé la méthode de Réseau de Neurones Artificiels (ANN), pour modéliser divers paramètres déjà traités par MSR. L'approche des ANN montre que les coefficients de corrélation sont très proches de l'unité. La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par RSM et ANN nous a conduits à conclure que la méthode ANN est plus robuste et plus fiable par rapport à la méthodologie de la surface de réponse.

Chapitre IV

Optimisation

I. Introduction

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif des chercheurs en général est de rechercher les conditions optimales d'usinage, qui permettent d'atteindre deux types d'objectifs, soit économiques soit technologiques soit les deux à la fois.

Le débit d'enlèvement de copeaux permet de mesurer la productivité d'une machine-outil d'usinage. L'on applique le principe selon lequel la cadence de base de la machine diminue à mesure de l'augmentation du débit d'enlèvement de copeaux.

Le débit d'enlèvement de copeaux Q désigne la quantité de copeaux enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivante [30].

$$Q = V_c \cdot A \dots \dots \dots (\text{IV.eq.2})$$

Q : Débit d'enlèvement de copeaux [cm^3/min]

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

V_c : Vitesse de coupe [m/min]

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

- 1- usure en dépouille (VB) minimale
- 2- rugosité de surface (R_a) minimale
- 3- L'effort de coupe (F_y) minimale
- 4- Puissance de coupe (P) minimale
- 5- débit de copeau (Q) maximale

Ces critères ont été choisis dans le but d'augmenter la durée de vie de l'outil qui permet de réduire le coût d'usinage et réduire la fréquence de changement d'outils. Une rugosité minimale et un effort de coupe transversal réduit permettent l'amélioration de la qualité de la pièce. Un débit maximal permet d'améliorer la productivité.

II. Optimisation avec la méthode de Taguchi

La méthode de taguchi est une puissante technique de résolution des problèmes pour améliorer les performances et la productivité des processus. Taguchi [31] préconise l'utilisation de modèles orthogonaux pour assigner les facteurs choisis pour l'expérience. Les modèles de matrices orthogonales les plus couramment utilisés sont L8 (c'est-à-dire huit essais expérimentaux), L16 et L18.

Bendell et al. [32] et Rowlands et al. [33] ont signalé des applications réussies de la méthode taguchi dans les industries de l'automobile, des matières plastiques, des semi-conducteurs, de la fabrication de métaux et de la fonderie. La méthode taguchi permet également de contrôler les variations causées par les facteurs incontrôlables qui ne sont pas pris en considération lors de la conception conventionnelle de l'expérience [34,35]. taguchi convertit les valeurs de la fonction objective en rapport S/N pour mesurer les

caractéristiques de performance des facteurs de contrôle. Le rapport S/N est défini comme le rapport de signal désiré pour la valeur de bruit aléatoire indésirable et montre les caractéristiques de qualité des données expérimentales [36,37].

Suivant les objectifs à atteindre, les rapports S/N sont habituellement divisés en trois :

- *Nominal is the best* : $S/N = 10\log\left(\frac{\bar{y}}{s_y^2}\right)$

Quand l'objectif est une valeur cible à atteindre

- *The-larger-is-the better (maximize)* : $S/N = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)$

Lors d'une maximisation de la fonction objective.

- *The-smaller-is-the better (minimize)* : $S/N = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)$

Lors d'une minimisation de la fonction objective.

Tableau.IV.1: résultats expérimentaux du rapport S/N

Vc, m/min	f, mm/tr	Tu, min	S/N -VB	S/N -Ra	S/N -Fx	S/N -Fy	S/N -Fz	S/N -P	S/N -Q
80	0,08	4	33,556	9,897	-2,144	-2,144	-2,144	-2,144	-2,144
80	0,08	8	29,897	8,874	-2,144	-2,144	-2,144	-2,144	-2,144
80	0,08	12	26,558	7,959	-2,144	-2,144	-2,144	-2,144	-2,144
80	0,11	4	22,975	7,131	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910
80	0,11	8	20,724	6,558	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910
80	0,11	12	17,993	5,680	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910
80	0,14	4	21,210	3,609	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005
80	0,14	8	18,862	3,223	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005
80	0,14	12	17,393	2,384	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005
110	0,08	4	21,938	8,636	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910
110	0,08	8	19,172	3,350	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910
110	0,08	12	17,077	1,724	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910	-4,910
110	0,11	4	16,363	2,158	-7,676	-7,676	-7,676	-7,676	-7,676
110	0,11	8	14,610	0,819	-7,676	-7,676	-7,676	-7,676	-7,676
110	0,11	12	13,152	-0,172	-7,676	-7,676	-7,676	-7,676	-7,676
110	0,14	4	16,193	2,499	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771
110	0,14	8	14,155	-0,828	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771
110	0,14	12	12,396	-2,076	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771
140	0,08	4	21,110	9,630	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005
140	0,08	8	17,077	4,731	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005
140	0,08	12	16,363	1,110	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005	-7,005
140	0,11	4	16,954	5,849	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771
140	0,11	8	15,139	4,152	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771
140	0,11	12	13,979	1,412	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771	-9,771
140	0,14	4	13,351	2,975	-11,866	-11,866	-11,866	-11,866	-11,866
140	0,14	8	12,041	1,310	-11,866	-11,866	-11,866	-11,866	-11,866
140	0,14	12	10,752	-0,086	-11,866	-11,866	-11,866	-11,866	-11,866

Les graphiques des effets moyens pour les rapports S/N de VB, Ra, Fy, Fz, P, et Q sont présentés dans les figures (IV.(1.2.3.4.5.6.7)). Indépendamment de la catégorie de la caractéristique de qualité, un rapport S/N plus élevé correspond à des caractéristiques de meilleure qualité.

Les niveaux optimaux pour chaque facteur de contrôle peuvent être facilement déterminés à partir de ces graphiques, en considérant les points les plus élevés conformément à la caractéristique de performance «the-smaller-is-the-better» de Taguchi.

Tous les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence par un cercle.

II.I. l'usure en dépouille (VB minimisée)

Les graphiques des effets moyens pour les rapports S/N de VB sont présentés dans la figure (IV.1)

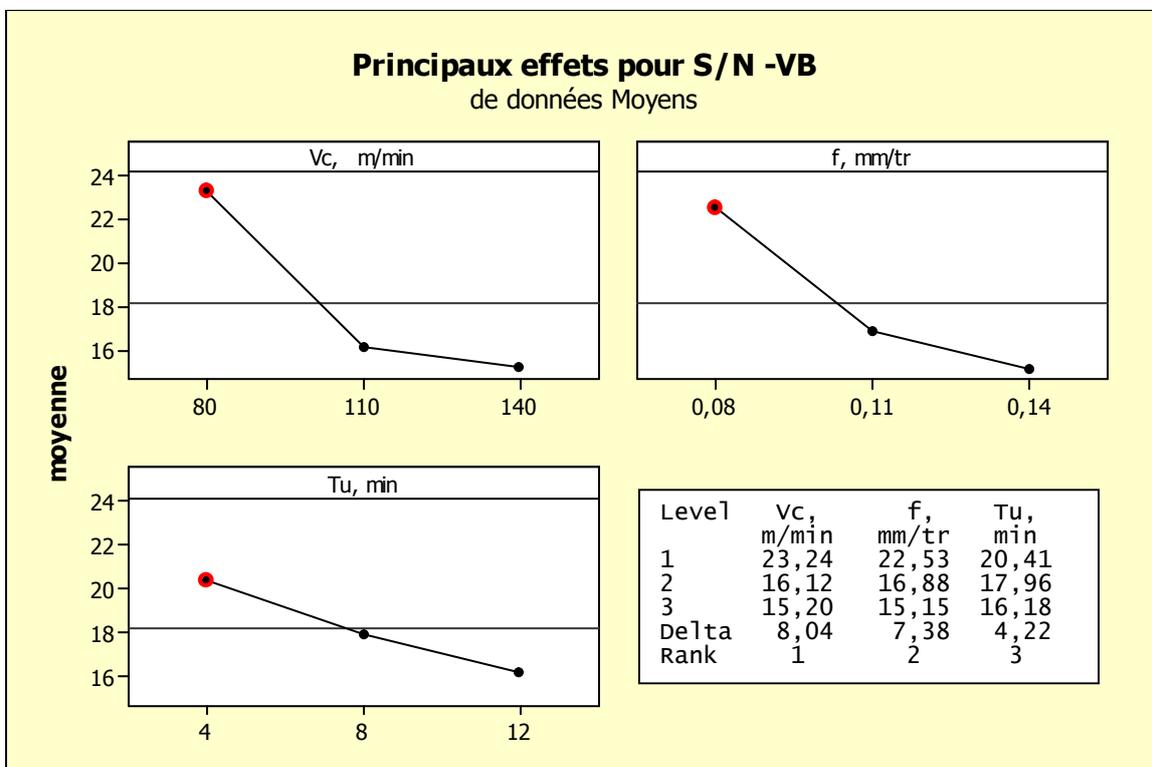


Figure.IV.1 : Principales courbes d'effet de S/N pour une usure en dépouille

Les conditions optimales pour une usure en dépouille (VB) minimale sont données par la combinaison des niveaux (Vc1, f1, Tu1). Ceci implique que, pour réduire l'usure en dépouille, il est recommandé d'utiliser une faible vitesse de coupe et avance et temps d'usinage.

II.II. rugosité de surface (Ra minimisée)

Les graphiques des effets moyens pour les rapports S/N de Ra sont présentés dans la figure (IV.2)

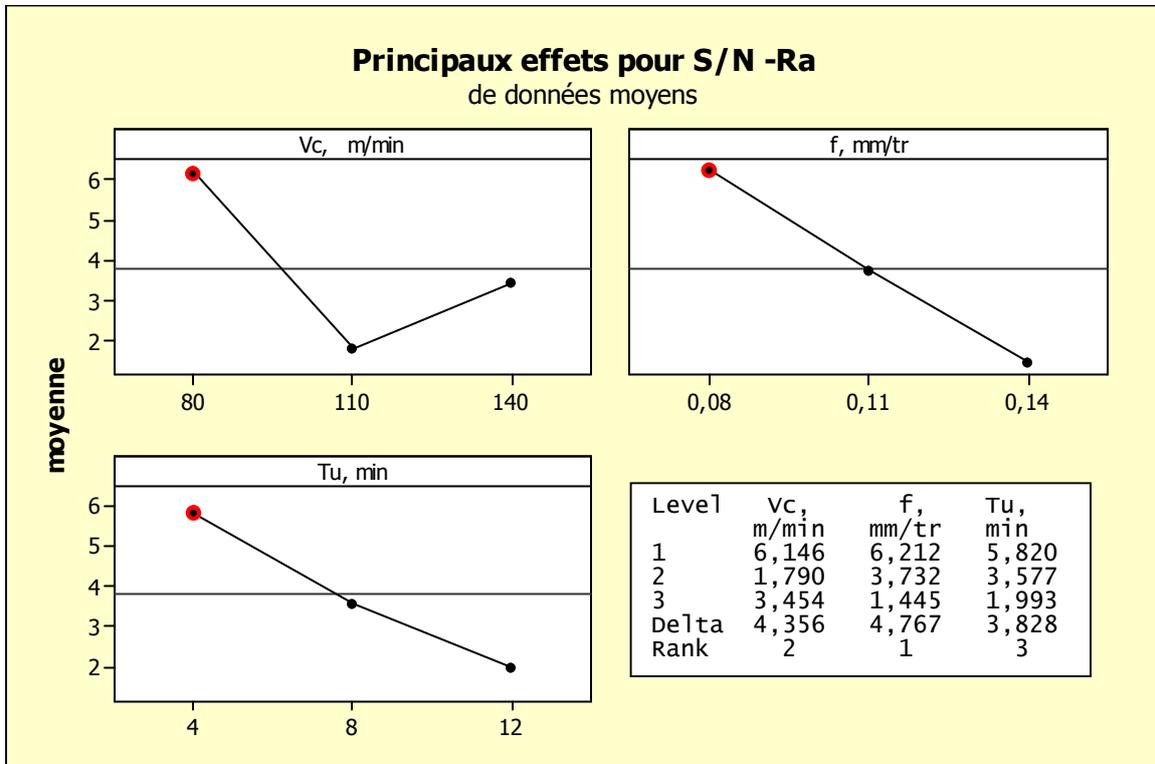


Figure.IV.2 : Principales courbes d'effet de S/N pour une rugosité de surface (Ra)

Les conditions optimales pour une rugosité de surface (Ra) minimale sont données par la combinaison des niveaux (Vc1, f1, Tu1). Ceci implique que, pour réduire la rugosité de surface, il est recommandé d'utiliser une faible vitesse de coupe et avance et temps d'usinage.

II.III. composante de l'effort de coupe (Fy minimisée)

Les graphiques des effets moyens pour les rapports S/N de Fy sont présentés dans la figure (IV.3)

Les conditions optimales pour un effort de coupe (Fy) minimale sont données par la combinaison des niveaux (Vc3, f1, Tu1). Ceci implique que, pour réduire l'effort de coupe (Fy), il est recommandé d'utiliser une grande vitesse de coupe et une faible avance et temps d'usinage.

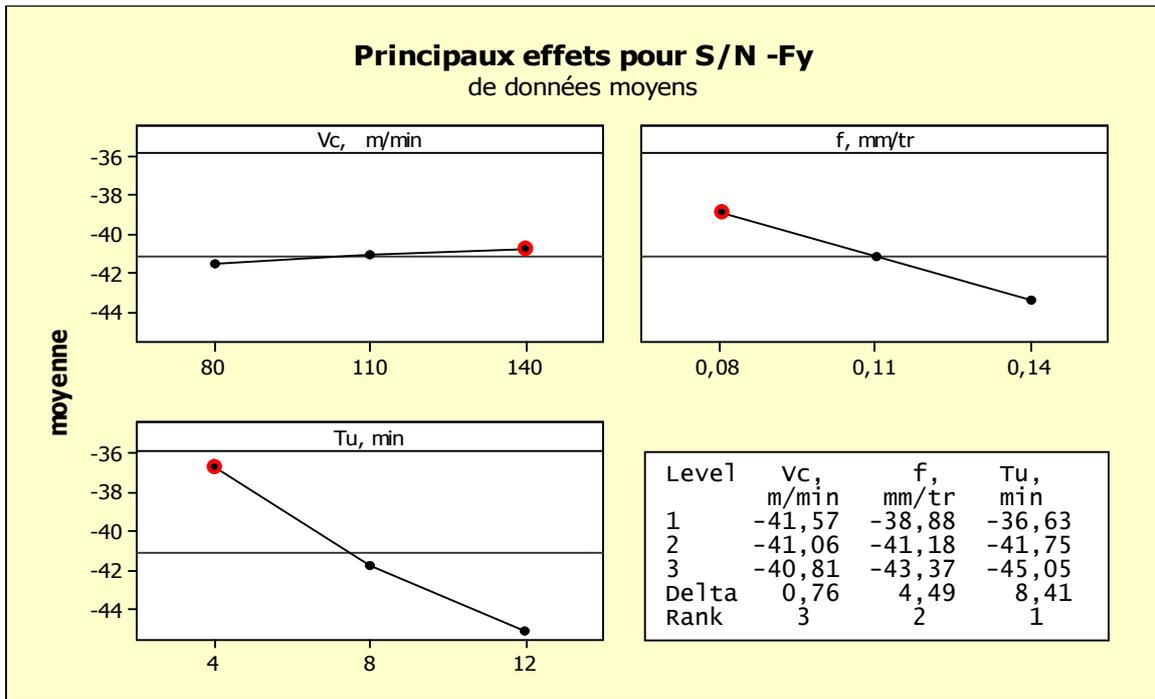


Figure.IV.3 : Principales courbes d'effet de S/N pour l'effort de coupe (Fy)

II.IV. composante de l'effort de coupe (Fz minimisée)

Les graphiques des effets moyens pour les rapports S/N de Fz sont présentés dans la figure (IV.4)

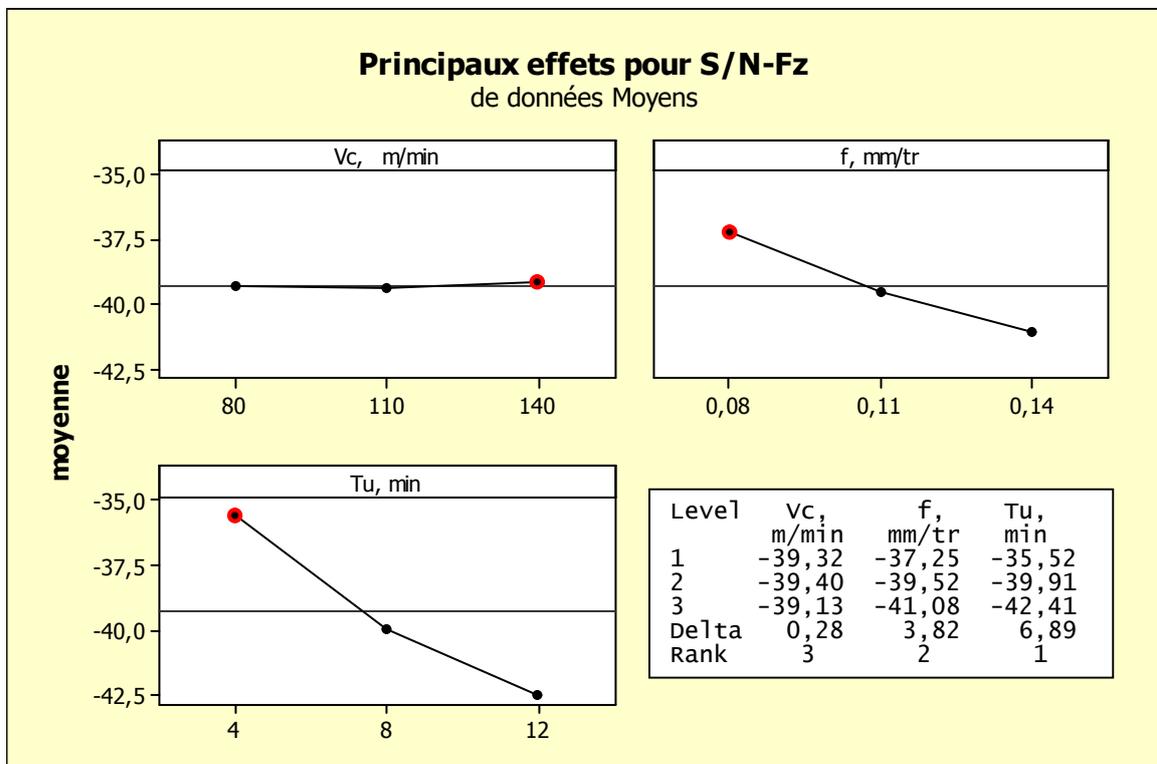


Figure.IV.4 : Principales courbes d'effet de S/N pour l'effort de coupe (Fz)

Les conditions optimales pour un effort de coupe (F_z) minimale sont données par la combinaison des niveaux (V_{c3} , f_1 , T_{u1}). Ceci implique que, pour réduire l'effort de coupe (F_z), il est recommandé d'utiliser une grande vitesse de coupe et une faible avance et temps d'usinage.

II.V. la Puissance de coupe (P minimisée)

Les graphiques des effets moyens pour les rapports S/N de P sont présentés dans la figure (IV.5)

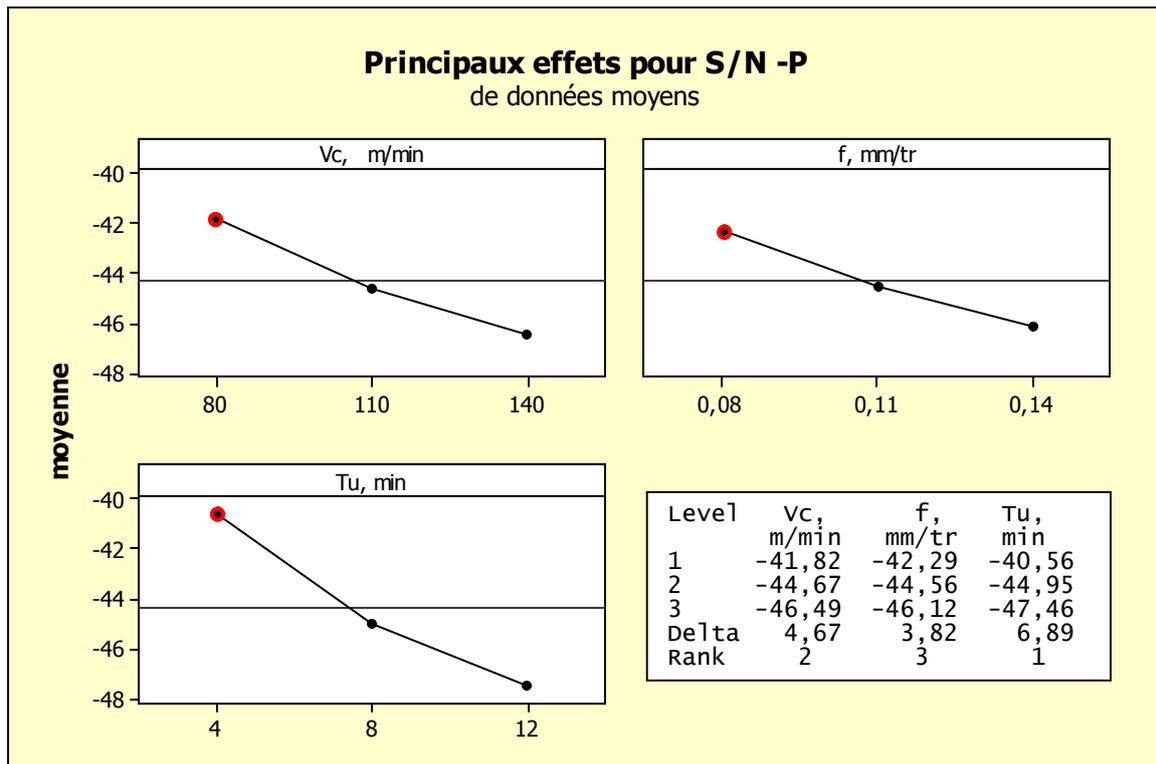


Figure.IV.5 : Principales courbes d'effet de S/N pour la puissance de coupe (P)

Les conditions optimales pour une puissance de coupe (P) minimale sont données par la combinaison des niveaux (V_{c1} , f_1 , T_{u1}). Ceci implique que, pour réduire la puissance de coupe (P), il est recommandé d'utiliser une petite vitesse de coupe et une faible avance et temps d'usinage.

II.VI. le débit de copeau (Q maximisée)

Les graphiques des effets moyens pour les rapports S/N de Q sont présentés dans la Figure (IV.6)

En remarque que la valeur des résultats du S/N pour tous les niveaux de (T_u) est constante (-7.229), donc Le temps d'usinage (T_u) n'a pas d'effet sur le débit de copeau (Q).

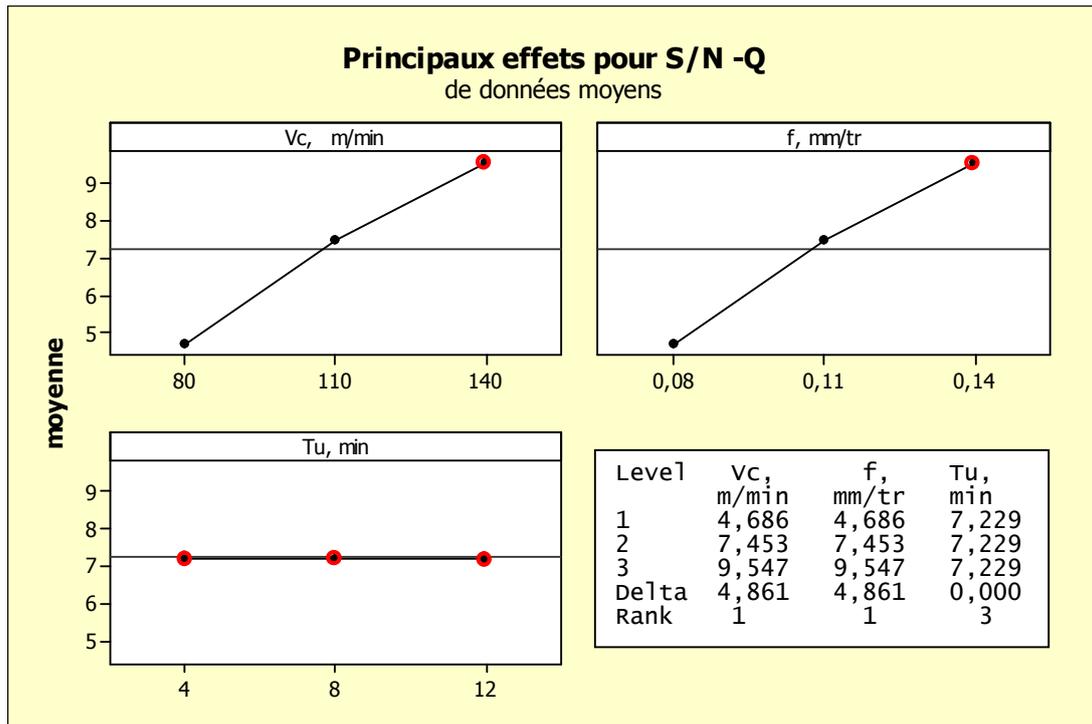


Figure.IV.6 : Principales courbes d'effet de S/N pour le débit de copeau (Q)

Les conditions optimales pour un débit de copeau (Q) maximale sont données par la combinaison des niveaux (Vc1, f1). Ceci implique que, pour augmenter le débit de copeau (Q), il est recommandé d'utiliser une grande vitesse de coupe et une grande avance par tour.

Tableau.IV.2 : Récapitulatif des résultats de l'optimisation

Objectif	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Tu (m/min)
$VB_{min} = 0,021 \text{ mm}$	80	0,08	4
$Ra_{min} = 0,32 \text{ }\mu\text{m}$	80	0,08	4
$Fy_{min} = 18,04 \text{ N}$	140	0,08	4
$Fz_{min} = 50,2 \text{ N}$	140	0,08	4
$P_{min} = 54,67 \text{ W}$	80	0,08	4
$Q_{max} = 3,92 \text{ cm}^3/\text{min}$	140	0,14	-

On remarque qu'il n'existe pas un régime de coupe optimal qui satisfait tous les critères considérés. En effet, plusieurs combinaisons des éléments du régime de coupe sont proposées en fonction du critère choisi. Ce qui constitue un inconvénient de l'optimisation par l'approche de Taguchi.

III. Optimisation avec la fonction de désirabilité

L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponse. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant de faire un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité « DF » qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire « d_i » variant entre 0 et 1. Une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

Une fonction $F(x)$, est définie comme suit [38] :

$$F(x) = -DF \dots \dots \dots \text{(IV.eq.2)}$$

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \dots \dots \dots \text{(IV.eq.3)}$$

Où d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et w_i est la fonction de pondération de d_i . Pour différent objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité d_i est définie dans différentes formes.

Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de T_i , la désirabilité d_i est :

$$d_i = 0 \text{ si } Y_i \leq low_i$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{T_i - Inf_i} \right] \text{ si } Inf_i \leq Y_i \leq T_i \dots \dots \dots \text{(IV.eq.4)}$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Sup_i}{T_i - Sup_i} \right] \text{ si } T_i \leq Y_i \leq Sup_i \dots \dots \dots \text{(IV.eq.5)}$$

$$d_i = 0 \text{ si } Y_i \geq Sup_i$$

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

$$d_i = 0 \text{ si } Y_i \leq Inf_i$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \dots \dots \dots \text{(IV.eq.6)}$$

$$d_i = 1 \text{ si } Y_i \geq Sup_i$$

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

$$d_i = 1 \text{ si } Y_i \leq low_i$$

$$d_i = \left[\frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \dots \dots \dots \text{(IV.eq.7)}$$

$$d_i = 0 \text{ si } Y_i \geq Sup_i$$

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

Optimisation multi objectifs :

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, sont présentées dans le tableau **(IV.3)** et la figure **(IV.7)**.

Ces résultats montrent que pour obtenir une usure en dépouille minimale (VB), une rugosité (Ra) minimale, effort de coupe (Fy) minimale, Puissance de coupe (P) minimale, et débit de copeau (Q) maximale, (optimisation multi objectif), il faut adopter le régime donné par le tableau **(IV.3)** qui est $V_c = 140\text{m/min}$, $f = 0.08\text{mm/tr}$, $T_u = 4\text{min}$, avec une désirabilité de 0.746.

Tableau IV.3 : Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.

N	Vc m/min	f mm/tr	Tu min	VB mm	Ra µm	Fy N	P W	Q cm ³ /min	Desirability
1	140	0,08	4	0,088	0,320	45,862	105,690	2,420	0,746
2	140	0,11	4	0,156	0,466	64,570	148,726	3,080	0,686
3	136,83	0,10	4,66	0,141	0,491	66,414	140,948	2,755	0,673
4	137,10	0,10	4,55	0,151	0,509	68,701	146,899	2,880	0,666
5	137,61	0,11	4,14	0,167	0,535	69,752	154,669	3,125	0,658
6	80	0,14	4	0,083	0,650	88,851	106,716	2,420	0,653
7	126,40	0,10	5,01	0,145	0,617	72,561	133,629	2,519	0,624
8	80	0,11	4	0,064	0,429	73,999	71,922	1,760	0,622
9	110	0,11	4	0,143	0,694	69,284	110,324	2,420	0,615
10	88,49	0,12	4,50	0,104	0,614	83,662	98,610	2,099	0,613
11	99,33	0,12	4,04	0,131	0,703	75,366	106,149	2,341	0,611
12	110	0,08	4	0,086	0,527	52,504	71,409	1,760	0,610
13	84,35	0,13	5,07	0,103	0,642	99,289	113,388	2,233	0,607
14	140	0,14	4	0,198	0,647	83,277	191,762	3,740	0,600

La figure (IV.7) présente le résultat du régime de coupe optimal pour une désirabilité égale à 0.746.

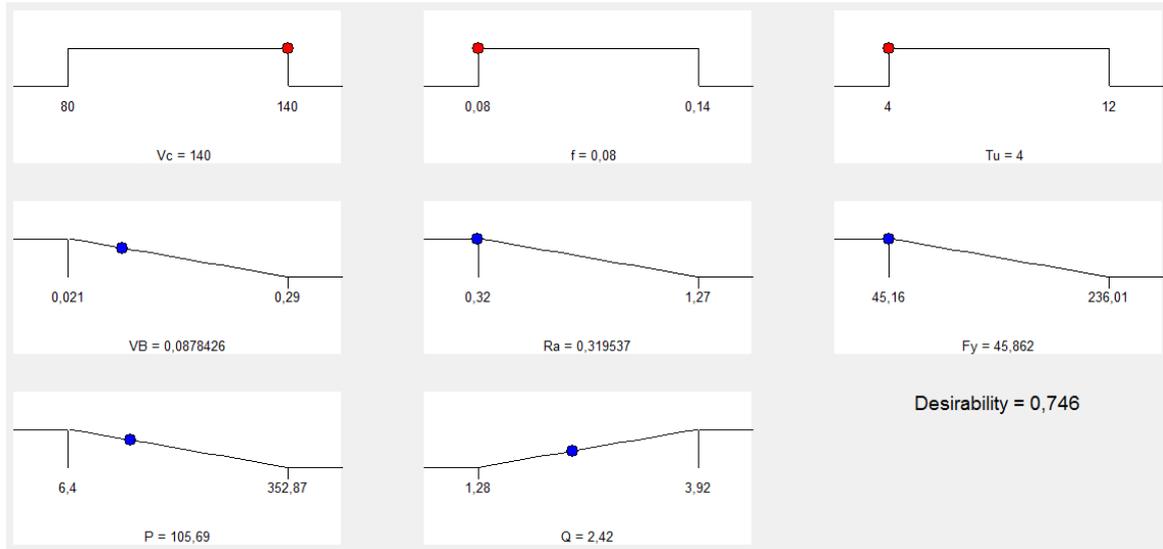


Figure.IV.7 : Résultat optimaux pour une optimisation combinée.

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.746), figure (IV.8). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation (VB, minimisé, Ra, minimisé, Fy, minimisé, P, minimisé, Q, maximisé).

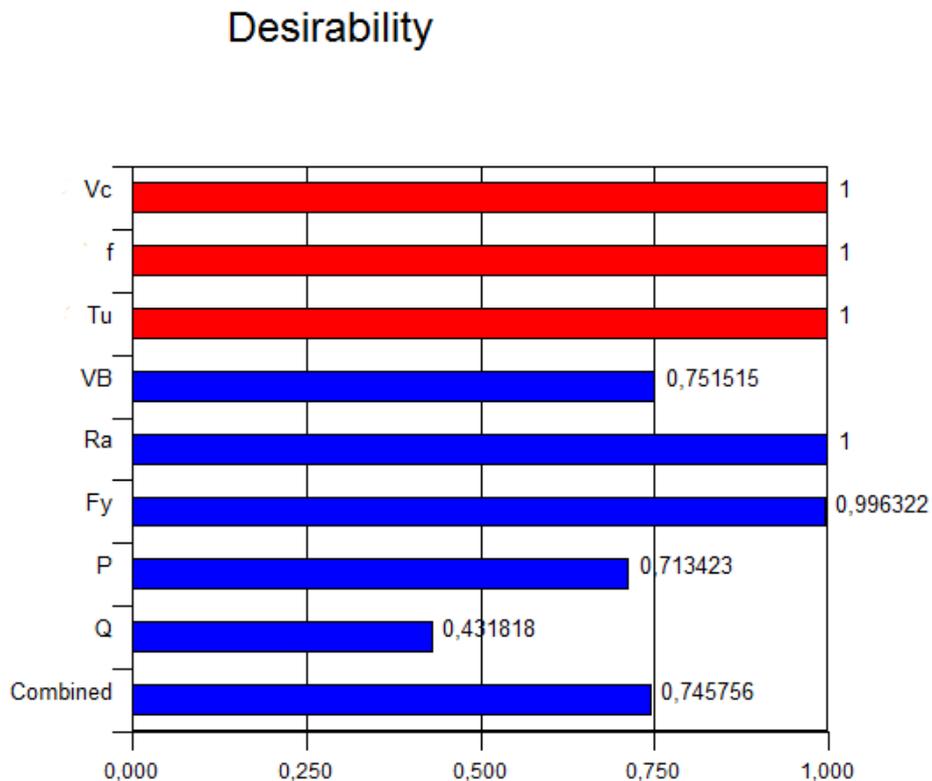


Figure.IV.8 : Valeur de la désirabilité pour une optimisation combinée.

III.I. La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure (IV.9), présente la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe (V_c , f et T_u).

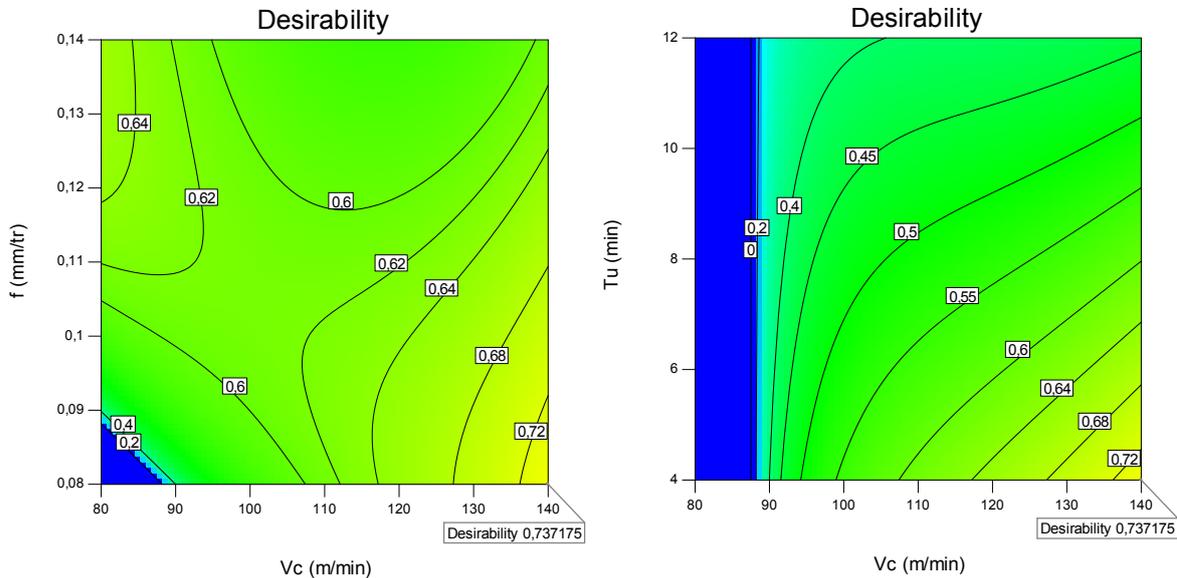


Figure.IV.9 : La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

Afin de se mettre dans un contexte industriel, où différentes combinaisons des critères d'optimisation peuvent être imposées suivant le type d'usinage (exemple : Ebauche, $\frac{1}{2}$ Finition et finition), nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal correspondant à chacune des exigences suivantes :

Cas 01 : bon état de surface (Ra_{\min}), faible usure en dépouille (VB_{\min}).

Cas 02 : rugosité de surface faible (Ra_{\min}), débit de copeau maximal (Q_{\max}).

Cas 03 : Bon état de surface (Ra_{\min}), débit de copeau maximal (Q_{\max}), faible usure en dépouille (VB_{\min}).

Cas 04 : Bon état de surface ($Ra=0,6$), débit de copeau maximal (Q_{\max}), faible usure en dépouille (VB_{\min}).

Cas 05 : faible usure en dépouille (VB_{\min}), Bon état de surface (Ra_{\min}), faible effort de coupe (Fy_{\min}), faible puissance de coupe (P_{\min}), débit de copeau maximal (Q_{\max}).

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, sont présentées dans le tableau (IV.4)

Tableau IV.4 : Résultats d'optimisation pour différents objectifs.

	Vc m/min	F mm/tr	Tu min	VB, mm	Ra μ m	Fy N	P W	Q Cm ³ /min
Cas 01 : Ra _{min} , VB _{min} ,	80	0,08	4	<u>0,024</u>	<u>0,273</u>	56,495	33,707	1,100
Cas 02 : Ra _{min} , Q _{max}	140	0,14	4	0,195	<u>0,642</u>	81,244	185,050	<u>3,707</u>
Cas 03 : Ra _{min} , Q _{max} , VB _{min} ,	140	0,082	4	<u>0,097</u>	<u>0,320</u>	49,529	112,825	<u>2,460</u>
Cas 04 : Ra=0,6 μ m, Q _{max} , VB _{min} ,	80,00	0,14	4	<u>0,086</u>	<u>0,614</u>	90,055	110,136	<u>2,420</u>
Cas 05 : VB _{min} , Ra _{min} , Fy _{min} , P _{min} , Q _{max}	140	0,08	4	<u>0,093</u>	<u>0,31</u>	<u>48,514</u>	<u>110,512</u>	<u>2,420</u>

Les résultats présentés dans ce tableau montrent que le temps d'usinage est constant ($T_u = 4$ min) et prend sa valeur minimale pour toutes les exigences.

Le premier cas (Cas 01) montre que la vitesse de coupe et l'avance prennent la valeur minimale, ce régime donne un meilleur résultat pour l'usure en dépouille (VB), la rugosité de surface (Ra) et la puissance de coupe (P) ainsi que l'effort de coupe (Fy). Par contre ce régime donne un très mauvais résultat pour le débit de copeau (Q).

Dans le second cas (cas 02) on remarque qu'on obtient la plus mauvaise valeur de l'usure en dépouille puisque la vitesse de coupe et l'avance sont élevées, ce qui donne aussi un mauvais résultat pour les paramètres Ra, Fy et P, alors qu'on obtient un très bon résultat pour le débit de copeaux.

Dans une comparaison entre le cas 01 et le cas 03 où on a ajouté un débit de copeau maximal comme exigence, on remarque que la vitesse de coupe prend sa valeur maximale ce qui implique une accélération de l'usure VB, une détérioration de l'état de surface (Ra) et une augmentation de la puissance de coupe (P), par contre une amélioration du débit de copeaux (Q) et une diminution de l'effort (Fy).

La différence entre le cas 03 et le cas 04, c'est qu'on a fixé la rugosité de surface dans notre exigence du cas 04, dans un but de minimiser le coût d'usinage, chose qui a permis une diminution de Vc ainsi qu'une augmentation de l'avance, dans ce cas ce régime donne par rapport au cas 03 une légère amélioration de l'usure VB.

Dans le cas 05, où toutes les exigences ont été prises en compte, donne un régime de coupe avec une vitesse de coupe maximale et une avance minimale, ce qui permet de faire le compromis entre les différents paramètres technologiques considérés.

En résumé, ces résultats montrent qu'il n'existe pas de régime de coupe optimal dans l'absolu, mais il s'agit de rechercher à chaque fois un régime de coupe correspondant à des exigences spécifiques suivant le contexte industriel considéré.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre deux méthodes d'optimisation ont été utilisées. La première mono-objective, basée sur l'approche Taguchi a concerné les critères de l'usure en dépouille (VB_{\min}), la rugosité de surface (Ra_{\min}), les efforts de coupe (Fy_{\min} , Fz_{\min}) ainsi que la puissance de coupe (P_{\min}) et le débit de copeaux (Q_{\max}). Cette approche est basée sur la maximisation du rapport S/N correspondant à des caractéristiques de meilleure qualité. La seconde basée sur la maximisation de la fonction de désirabilité, permet une optimisation multi-objective. D'où l'opportunité d'étudier différents cas d'optimisation selon différents contextes industriels et ainsi voir l'évolution des éléments du régime de coupe en fonction des critères d'optimisation choisis.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'étude expérimentale de l'usinage de l'acier AISI D3 à une dureté supérieure à 45HRC nous a permis d'étudier l'influence de la vitesse, de l'avance sur les principaux paramètres technologiques, à savoir, le critère d'usure en dépouille (VB), la rugosité de surface usinée (Ra), les composantes de l'effort de coupe (Fx, Fy et Fz) ainsi que les paramètres calculés en fonction des résultats expérimentaux tels que la puissance de coupe (P) et le débit de copeau (Q). Le traitement des résultats consiste en une analyse de variance (ANOVA) associée à la méthodologie de la surface de réponse (RSM), les réseaux de neurones artificiels (ANN) ainsi que la méthodologie de Taguchi. Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- ❖ L'analyse des paramètres d'usinage a permis d'étudier l'influence de chacun des paramètres de coupe sur l'amélioration des paramètres de sortie du processus de coupe, tels que le critère de rugosité, l'usure en dépouille et les composantes de l'effort de coupe.
- ❖ Cette étude a montré que la vitesse de coupe a une influence statistiquement significative (40%) sur l'usure en dépouille, suivi par l'avance avec 35.36% et le temps d'usinage avec 13.51%.
- ❖ Cette étude montre que l'avance par tour possède une influence statistiquement significative (31.91%) sur la rugosité de surface, le temps d'usinage avec 23.95% suivi par le terme quadratique (V_c^2) avec 22.14%. Les termes d'interaction et les termes quadratiques (f^2), (T_u^2) ne présentent pas une influence significative.
- ❖ L'effort axial (Fx), l'effort radial (Fy) et l'effort de coupe tangentiel (Fz) sont fortement influencés par le temps d'usinage, (90.81%), (72.13%) et (75.74%) respectivement, suivi par l'avance par tour (f), (7.52%), (22.73%), (22.65%) respectivement, et ensuite la vitesse de coupe avec une faible influence sur les composantes de l'effort (Fx), (Fy) et (Fz), 0.21%, 0.35%, 0.15% respectivement.
- ❖ La puissance de coupe augmente avec l'augmentation des différents paramètres de coupe (T_u , V_c , et f) qui possèdent une influence significative sur la puissance de coupe de (53.86%), (26.97%) et (16.06%) respectivement.
- ❖ Les modèles proposés permettent d'une part d'obtenir des prédictions des différents paramètres de sortie étudiés et d'autre part de mener une étude d'optimisation. Les modèles obtenus sont en bonne concordance avec les valeurs obtenues expérimentalement.
- ❖ La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par les deux approches RSM et ANN, montre que la méthode des réseaux de neurones (ANN) est plus robuste et plus fiable par rapport à la méthodologie de la surface de réponse.
- ❖ L'optimisation des paramètres de coupe par la méthode de Taguchi (mono-objective) à l'aide du logiciel **Minitab 16**, a permis de conclure que chacun des

critères d'optimisation donne un régime de coupe propre à ce critère. D'où la nécessité d'utilisation d'une méthode multi-objective afin de rechercher un compromis entre différents critères, ce qui correspond à un contexte industriel réel.

❖ Le logiciel **Design-expert** a été utilisé pour réaliser une optimisation basée sur la maximisation de la fonction de désirabilité (multi-objective) qui a permis l'obtention d'une combinaison optimale des paramètres de coupe $V_c=140\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $T_u=4\text{min}$. Ce régime de coupe permet de faire le compromis entre différents objectifs, à savoir l'obtention d'un meilleur état de surface, d'un débit de copeaux maximal et d'une puissance de coupe minimale. En outre différentes combinaisons de critères ont été testées afin de voir l'évolution des différents éléments du régime de coupe en fonction des objectifs visés.

Nomenclature

- Vc: Vitesse de coupe (m/min).
- f: Avance par tour (mm/tr).
- ap: Profondeur de passe (mm).
- HRC: Dureté Rockwel Cône.
- VB : usure en dépouille.
- Ra: Rugosité moyenne arithmétique (μm).
- Fx (Fa): Effort de coupe axial (N).
- Fy (Fr): Effort de coupe radial (N).
- Fz (Ft): Effort de coupe tangentiel (N).
- P : puissance de coupe (W).
- Q : débit de copeau (cm^3/min).
- D : diamètre de l'éprouvette (mm).
- L : longueur de l'éprouvette (mm).
- re ou r: Rayon du bec de l'outil (mm).
- α : Angle de dépouille principal (degré).
- γ : Angle d'attaque (degré).
- λ : Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).

Références

Références

- [1] Carsten S., Tool Wear Prediction and Verification in Orthogonal Cutting, Institute of Machine Tools and Production Science University of Karlsruhe (2003), pp. 22.
- [2] Bagur F., Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'ingénieur, BM7 080 – 1
- [3] Sandvik C.,
http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H..PDF
- [4] Fabrication mécanique, licence et technologie et mécanique, Université de la Réunion
<http://tice2.univ-reunion.fr>
- [5] Selaimia M., Etude des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage du PE80
<http://www.memoireonline.com>
- [6] <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [7] Archive multilingue, Actionnées par World Lingo
- [8] Bouchelaghem H., Yallese M. A., Mabrouki T., *et al.* Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). *Machining Science and Technology*, 2010, vol. 14, no 4, p. 471-501.
- [9] Zerti O., Yallese M. A., Khettabi R., *et al.* Design optimization for minimum technological parameters when dry turning of AISI D3 steel using Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, p. 1-20.
- [10] Durja J. S., Singh R., et Bhatti M. S., Optimizing flank wear and surface roughness during hard turning of AISI D3 steel by Taguchi and RSM methods. *Production & Manufacturing Research*, 2014, vol. 2, no 1, p. 767-783.
- [11] Özel T., et Karpaz Y., Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, no 4, p. 467-479.
- [12] Varaprasad B., Srinivasa Rao C., , et Vinay P. V., Effect of machining parameters on tool wear in hard turning of AISI D3 steel. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, p. 338-345.
- [13] Dureja J. S., Gupta V. K., Sharma V. S., Dogra M., Wear mechanisms of coated Mixed-ceramic tool during finish hard turning of hot tool die steel. *Journal Mechanical*

Engineering Science, Proc. IMechE Part C, Vol. 223, pp. 1-11, (2009).

[14] Yallese M. A., Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur. Thèse de doctorat, (2005).

[15] Taguchi G., Konishi S., Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graph, tools for quality engineering. American supplier institute, pp. 35-38, (1987).

[16] Aouici H., Yallese M.A., Fnides B., Mabrouki T., *Machinability investigation in hard turning of AISI H11 hot work stwith CBN tool*, *Mechanika* 6 (86) (2010) 71–77.

[17] Ciftci I., Machining of austenitic stainless steels using CVD multilayer coated cemented carbide tools, *Tribology International* 39, pp. 565–569 (2006).

[18] Senthil k., Raja D., Sornakumar T., The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 173, pp. 151–156(2006).

[19] Bruni C., Forcellese A., Gabrielli F., Simoncini M., Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420b, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, pp. 1547–1554(2006).

[20] Noordin M.Y., kurniawan D., sharif S., Hard turning of stainless steel using wiper coated carbide tool, *Int. J. Precision Technology*, vol. 1, no. 1, (2007).

[21] <http://www.clubic.com/mag/sciences/actualite-794996-mit-concoit-puce-mobile-creant-reseau-neurones-artificiels.html>

[22] Wira P., (2009). Réseaux de neurones artificiels: architectures et applications. Cours en ligne, Université de Haute-Alsace.

[23] <https://fr.slideshare.net/MedZaibi/expos-rseaux-des-neurones>

[24] <http://alp.developpez.com/tutoriels/intelligence-artificielle/reseaux-de-neurones>
30/03/2015.

[25] <http://ljk.imag.fr/membres/Adriana.Climescu/rncours1.htm>

[26] Burel G., & Thomson C. S. F., (1993). Une nouvelle approche pour les réseaux de neurons : la Représentation Scalaire Distribuée. *Traitement du signal*, 10(1).

[27] Bélanger M., El-Jabi N., Caissie D., Ashkar F., & Ribí J. M., (2005). Estimation de la température de l'eau de rivière en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 18(3), 403-421.

[28] Moselhi O., Hegazy T., & Fazio P., (1992). Potential applications of neural networks in construction. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19(3), 521-529.

[29] Schmitt A., Le blanc B., Corsini M. M., Lafond C., & Bruzek J., (2001). Les réseaux de neurones artificiels. Un outil de traitement de données prometteur pour l'anthropologie. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, (13(1-2)).

[30] Heinz T., *Applied Machining Technology*, 2009.

[31] Taguchi G., (1986) Introduction to quality engineering. Asian Productivity Organisation, Tokyo.

[32] Bendell A., Disney J., Pridmore W., (1989) Taguchi methods: applications in world industry, IFS Publications, Bedford.

[33] Rowlands H., Antony J., Knowles G., (2000) An application of experimental design for process optimization. *TQM Mag* 12(2):78–83.

[34] Zhang J., Chen J., Kirby E., (2007) Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. *J Mater Process Technol* 184:233–239

[35] Gologlu C., Sakarya N., (2008) The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method. *J Mater Process Technol* 206:7–15.

[36] Kurt M., Bagci E., Kaynak Y., (2009) Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling progress. *Int J Adv Manuf Technol* 40:458–469.

[37] Günay M., Kaçal A., Turgut Y., (2011) Optimization of machining parameters in milling of Ti–6Al–4 V alloy using Taguchi method. *E-J New World Sci Acad Eng Sci*

6(1): 428–440.

[38] Myers R. H., and Montgomery D. C., Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc.:New York, (2002).