



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Centre Universitaire El-wancharissi de Tissemsilt



Institut de Sciences et de la Technologie
Département de Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Génie mécanique**

Spécialité : **Installation Energétique et Turbomachine**

Présentée par : **MAIZI YASSAMINA**
CHARANE NADJET

Thème

**Modélisation mathématique des paramètres de la
courbe du taux de portance lors du procédé de
tournage dur**

Soutenu le,

Devant le Jury :

ZEBBAR Djallel	Examineur	Prof.	CU-Tissemsilt
HAMDI AMINE	Encadreur	M.C.A.	CU-Tissemsilt
MEHARAR. A	Examineur	M.C.B.	CU-Tissemsilt

Année universitaire : 2019-2020

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon encadreur Dr. HAMDI AMINE

A mes très chers parents, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite. A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

Mes chères sœurs et mes frères

Toute ma famille

Mes chers amis

À ma chère amie **Fatima chahed**

Tous nos collègues de la promotion installation énergétique et turbomachine.

Yassamina /nadjet

Remerciement

Je souhaite d'abord remercier mon encadreur Dr. HAMDI AMINE d'avoir accepté de diriger ce travail ainsi que pour son entière disponibilité et ses précieux conseils et son soutien durant toute la période de l'élaboration de ce travail.

Un grand merci à tous les enseignants de département Génie Mécanique université El-Wancharissi Tissemsilt.

Nos remerciement vont aussi aux :

Les membres de jury pour avoir accepté de participer au jury ainsi l'attention qu'ils ont porté à ce travail.

Je ne saurais oublier tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont prodigué leurs encouragements et m'ont offert leurs soutiens.

Liste des figures

Figure 1.1 Opération du tournage dur.....	16
Figure 1.2 Comparaison de l'état de surface obtenu à différentes vitesses de coupe entre le tournage dur et la rectification.....	19
Figure 1.3 Vitesse de coupe.....	20
Figure 1.4 Vitesse d'avance.....	21
Figure 1.5 Profondeur de passe.....	21
Figure 1.6 Fibres (whiskies) de Sic utilisés pour renforcer l'alumine d'après.....	24
Figure 1.7 Usure en dépouille.....	25
Figure 1.8 Usure en cratère.....	26
Figure 1.9 Usure en entaille.....	26
Figure 1.10 Usure par déformation plastique.....	27
Figure 1.11 L'usure par écaillage.....	27
Figure 1.12 Schéma représentant le mode de calcul du paramètre industriel Ra.....	28
Figure 2.1 Vue du tour utilisé.....	34
Figure 2.2 La profilomètre 2D.....	36
Figure 2.3 Courbe du taux de portance (Courbe d'Abbott Firestone).....	37
Figure 2.4 Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.....	42
Figure 2.5 Définition du domaine expérimental.....	43
Figure 2.6 Paramètres d'entrées/de sorties.....	45
Figure 2.7 Schéma d'une couche de neurones.....	46
Figure 2.8 Les étapes de l'utilisation de la méthode de Taguchi.....	48
Figure 3.1 Graphiques des effets principaux et des interactions pour le paramètre Rpk.....	56
Figure 3.2 Graphiques des effets principaux et des interactions pour le paramètre Rk.....	57
Figure 3.3 Graphiques des effets principaux et des interactions pour le paramètre Rvk.....	57
Figure 3.4 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour les composantes de la courbe du taux de portance.....	59
Figure 3.5 Probabilités normales des résidus pour: (a) Rpk, (b) Rk et (c) Rvk.....	60
Figure 3.6 Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour: (a) Rpk, (b) Rk et (c) Rvk.....	61
Figure 3.7 Graphique des contours et des surfaces de réponses en 3D des trois paramètres de BAC obtenues pour des différentes interactions.....	65
Figure 3.8 Structure du RNA des modèles: (a) paramètre Rpk et Rk, (a) paramètre Rvk.....	66
Figure 3.9 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Rpk.....	68
Figure 3.10 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Rk.....	69
Figure 3.11 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Rvk.....	71
Figure 3.12 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées de trois paramètres de la	

courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}).....	72
Figure 3.13 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées de trois paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}).....	74
Figure 4.1 Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_{pk}	80
Figure 4. 2 Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_k	80
Figure 4.3 Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_{vk}	81
Figure 4.4 Qualité Relationnelle Grise (GRG).....	85
Figure 4.5 Graphique de contour de désirabilité pour le paramètre R_{pk}	87
Figure 4.6 Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de paramètre (R_{pk}) ainsi que les désirabilités combinés = 1.....	87
Figure 4.7 Graphique de la fonction de désirabilité de paramètres de sortie R_{pk}	88
Figure 4.8 Graphique de contour de désirabilité pour le paramètre R_k	89
Figure 4.9 Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de réponse (R_k) ainsi que les désirabilités combinés = 1.....	89
Figure 4.10 Graphique de la fonction de désirabilité de paramètres R_k	90
Figure 4.11 Graphique de contour de désirabilité pour le paramètre R_{vk}	91
Figure 4.12 Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses ainsi que les désirabilités combinés = 1.....	91
Figure 4.13 Graphique de la fonction de désirabilité de paramètre de sortie R_{vk}	92
Figure 4.14 Graphique de contour de désirabilité pour les paramètres de sortie R_{pk} , R_k et R_{vk} ...	93
Figure 4.15 Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses ainsi que les désirabilités combinés=0,551.....	93
Figure 4.16 Graphique de l'optimisation combinée de R_{pk} , R_k et R_{vk}	94

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Comparaison entre tournage dur et rectification.....	19
Tableau 2. 1 Composition chimique d'acier 16MC5.....	35
Tableau 2. 2 Équivalence de la nuance d'acier 16MC5 en fonction des différentes normes et des pays	35
Tableau 2.3 Propriétés mécaniques et physiques de l'acier 16MC5	35
Tableau 2. 4 Conditions de coupe pour les essais et les paramètres de sortie.....	38
Tableau 2.5 Table orthogonale de Taguchi L25	39
Tableau 2. 6 Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 25 essais.....	40
Tableau 2. 7 Conditions de coupe et leurs niveaux.....	45
Tableau 3.1 Analyse de la variance de paramètre R_{pk}	54
Tableau 3.2 Analyse de la variance de paramètre R_k	55
Tableau 3.3 Analyse de la variance de paramètre R_{vk}	56
Tableau 3. 4 Résultats estimées par les trois modèles neuronaux (R_{pk} , R_k et R_{vk}).....	66
Tableau 3.5 R^2 ET RMSE du modèle de paramètre R_{pk}	67
Tableau 3.6 R^2 et RMSE du modèle de paramètre R_k	69
Tableau 3.7 R^2 et RMSE du modèle de paramètre R_{vk}	70
Tableau 3.8 Coefficients de corrélation (R^2) pour les modèles obtenus par RSM et ANN.....	73
Tableau 4.1 Résultats expérimentaux de trois paramètres de sorties (R_{pk} , R_k et R_{vk}) et leurs rapports S/N.....	78
Tableau 4.2 Table de réponse S/N pour (a) paramètre R_{pk} , (b) paramètre R_k , et (c) paramètre R_{vk} ((a) et (b) : le plus petit est le meilleur, (c) le plus grand est le meilleur).....	79
Tableau 4.3 Résultats expérimentale normalisé ($\xi_i(k)$).....	82
Tableau 4.4 Coefficients du GR ($\eta_i(k)$).....	83
Tableau 4.5 Niveau relationnel gris et son ordre (Grey relational grade (GRG)).....	84
Tableau 4.6 Réponses pour la catégorie relationnelle grise (Grey Grade).....	85
Tableau 4.7 Conditions de l'optimisation des paramètres de tournage dur.....	86
Tableau 4.8 Optimisation de la réponse pour le paramètre R_{pk}	86
Tableau 4.9 Optimisation de la réponse pour le paramètre R_k	88
Tableau 4.10 Optimisation de la réponse pour le paramètre R_{vk}	90
Tableau 4.11 Optimisation de la réponse pour les trois paramètres (R_{pk} , R_k et R_{vk}).....	92

Nomenclature

Ra	Rugosité moyenne arithmétique	[μm]
Vc	Vitesse de coupe	[m/min]
N	Vitesses de rotation de la pièce	[tr/min]
f	Vitesse d'avance	[mm/min]
ap	Profondeur de passe	[mm]
R _{pk}	Hauteur des pics saillants	[μm]
R _k	Profondeur de rugosité du cœur	[μm]
R _{vk}	Profondeur des creux profonds	[μm]
DL	Degré de liberté	
SC	Somme des carrés	
MC	Carrés moyens	
F	Valeur de Fisher	
P	Probabilité d'obtenir du résultat par hasard	
Cont%	Taux de contribution[%]	
R ²	Coefficient de corrélation	
S/N	Rapport signal sur bruit	

Abréviations

HRC	Dureté de Rockwell
ANOVA	Analyse de la variance
RSM	Méthodologie de surface de réponse
GRA	Analyse relationnelle grise
GRC	Coefficient relationnel gris
GRG	Grade relationnel gris
DF	Méthode de la fonction de désirabilité
RNA	Réseau de neurones artificiels
RQ	La régression quadratique

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale..... 12

Chapitre 1 Recherche bibliographique sur la coupe de métaux

1.1 Introduction.....	15
1.2 Définition de l'usinage.....	15
1.3 Définition de tournage.....	15
1.4 Définition de tournage dur.....	16
1.5 Définition de l'usinabilité.....	17
1.6 Comparaison entre tournage et tournage dur.....	17
1.7 Comparaison entre tournage dur et rectification.....	18
1.8 Paramètres de coupe.....	20
1.8.1 vitesse de coupe (VC).....	20
1.8.2 Vitesse d'avance V_f et avance par tour f	20
1.8.3 Profondeur de passe (ap).....	21
1.9 Avantages et inconvénients de tournage dur.....	21
1.9.1 Les Avantages.....	21
1.9.2 Les Inconvénients.....	22
1.10 Les outils de coupe.....	22
1.10.1 Les carbures.....	23
1.10.2 Les céramiques.....	23
1.10.3 Les cermets.....	24
1.10.4 Nitrure de Bore Cubique (CBN).....	25
1.11 Usure des outils de coupe en TD.....	25
1.11.1 Usure en dépouille.....	25
1.11.2 Usure en cratère.....	26
1.11.3 Usure en entaille.....	26

1.1.1.4 Usure par déformation plastique.....	26
1.1.1.5 Usure par écaillage et fissuration d'arête.....	27
1.12 Etat de surface générée par TD.....	27
1.13 Formation de copeau par TD.....	29
1.14 Etat de l'art.....	29
1.15 Conclusion.....	32

Chapitre 2 Matériau, appareils et méthodes utilisées

2.1 Introduction.....	34
2.2 Matériels utilisés.....	34
2.2.1 Machine-outil.....	34
2.2.2 Matériau à usiné.....	35
2.2.3 profilomètre 2D utilisé.....	35
2.2.4 Conditions de coupe.....	37
2. 2.5 Plans d'expériences.....	41
2.2.5.1 Définition.....	41
2.2.5.2 Terminologie.....	42
2.2.5.3 Type de facteurs.....	43
2.2.5.4 Type des plans d'expérience.....	44
2.2.6 Méthode de modélisation.....	45
2.2.6.1 Méthodologie de surface de réponse (RSM).....	45
2.2.6.2 Réseau de neurone artificiel (RNA).....	45
2.2.7 Méthode d'optimisation.....	47
2.2.7.1 Méthode mono-objectives.....	47
2.2.7.2 Méthodes multi-objectives.....	48
2.3 Conclusion.....	52

Chapitre 3 Modélisation des paramètres de la courbe du taux de portance

3.1 Introduction.....	54
3.2 Modélisation par la méthodologie de surface de réponse (RSM).....	54
3.2.1 Analyse de la variance (ANOVA).....	54
3.2.2 Analyse de régression.....	57
3.2.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	59
3.2.4 Analyse de surface de réponses.....	61
3.3 Modélisation par le réseau de neurones artificiels (RNA).....	65
3.3.1 Modélisation de paramètre Rpk.....	67

3.3.2 Modélisation de paramètre R_k	68
3.3.3 Modélisation de paramètre R_{vk}	70
3.3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites.....	71
3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites par RSM et ANN.....	72
3.5 Conclusion	74

Chapitre 4 Optimisation mono et multi-objectif des paramètres de coupe

4.1 Introduction.....	77
4.2 Optimisation mono-objectif par la méthode de Taguchi.....	77
4.3 Optimisation multi-objective par l'analyse relationnelle grise (GRA).....	81
4.4 Optimisation multi-objectif par la fonction de désirabilité (DF).....	85
4.4.1 Optimisation des conditions de coupe pour R_{pk}	86
4.4.2- Optimisation des conditions de coupe pour R_k	88
4.4.3- Optimisation des conditions de coupe pour R_{vk}	90
4.4.4 Optimisation combinée (R_{pk} , R_k et R_{vk}).....	92
4.5 Conclusion.....	94
Conclusion générale.....	97
Bibliographie.....	100
Résumé.....	103

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Le processus de coupe par enlèvement de matière ou usinage par enlèvement de copeaux reste une partie de fabrication mécanique importante et très répandue. Le principal but est d'obtenir une texture de surface acceptable à l'aide d'un outil de coupe. Donc, l'usinage est pour but d'augmenter le taux de productivité, sans oublier la diminution du temps et du coût de production. Aujourd'hui, il existe plusieurs configurations utilisables selon le mécanisme de coupe et l'outil utilisé (tournage, fraisage, rectification, tournage dur, toilage...etc.). Bien que le tournage dur (TD) apparaisse comme un procédé intéressant en usinage à sec (sans lubrification), il présente un avantage majeur pour diminuer le coût total de l'usinage des pièces mécaniques de précision.

Le procédé d'enlèvement de matière par une opération de tournage sur des aciers et des fontes de dureté supérieure à 45 HRC est défini comme le tournage dur (TD). Ce dernier est un concurrent important du processus de la rectification traditionnelle. Le développement de ce procédé est réalisé afin de remplacer des opérations très coûteuses du procédé de rectification conventionnelle. Les outils utilisés, dans ce cas, c'est les outils comme les céramiques et les CBN (Nitrure de Bore Cubique) qui ont rendu possible l'utilisation industrielle de cette technologie. En outre, la caractérisation de la texture de surface obtenue par la norme ISO 13565 standard occupe une place importante vis-à-vis des constructeurs automobiles. Cette méthode est basée sur l'analyse des paramètres de la courbe du taux de longueur portante ou courbe d'Abbott-Firestone des profils de rugosité.

Donc, l'objectif de ce mémoire est :

- Analyser statistiquement l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe (V_c), vitesse d'avance (f) et profondeur de coupe (a_p)) et leurs interactions sur les paramètres de la courbe du taux de portance (R_{PK} , R_K , et R_{VK}).
- Modéliser les paramètres de sortie et optimiser les paramètres d'entrée lors de tournage d'acier dur (16MC5) à l'aide d'outil de coupe en céramique. Pour cela, nous utilisons des méthodes de modélisation statistique et d'optimisation mathématique (ANN, MSR, Taguchi, GRA et DF).

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche de ce mémoire qui est répartie en quatre chapitres:

Le premier chapitre présente une synthèse sur le processus de tournage dur des matériaux métalliques en général. Ce dernier représente comme une nouvelle technique d'usinage. Dans un premier temps, nous montrons l'intérêt économique qu'il peut apporter, son développement à l'échelle industrielle, ces avantages par rapport à la rectification, leur usinabilité et les nouvelles perspectives de développement des matériaux à outils. Ensuite, nous examinons les phénomènes régissant le processus de coupe en particulier, l'usure des outils et la morphologie du copeau.

Dans la deuxième chapitre, nous présentons les matériels utilisés (tour, outil de coupe, profilomètre, matériau usiné,...etc) pour mener les expériences, ainsi que les conditions de coupe (vitesse de coupe V_c , vitesse d'avance f et profondeur de passe a_p). Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons un ensemble des méthodes numériques qui permettent d'optimiser les conditions de coupe et modéliser les paramètres technologiques d'usinage.

Dans le chapitre trois, nous exposons les résultats expérimentaux des essais réalisés pour un plan de Taguchi (L_{25}) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiés. Nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse (MSR) et l'analyse statistique de la variance (ANOVA) afin de développer les modèles mathématiques des paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}) en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) lors du tournage dur de l'acier (16MC5). Les logiciels utilisés sont des logiciels de statistique appelée «Minitab 16, Design-Expert 11 et JPM 11» afin de calculer les valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées, ainsi que la présentation sous forme 3D de la surface de réponse. Nous présentons une deuxième méthode de modélisation qui concerne le réseau de neurones artificiels (ANN). La fin de ce chapitre est réservée pour une comparaison entre la modélisation par la méthode de MSR et la méthode ANN, cela dans le but de vérifier l'efficacité et la robustesse des deux méthodes.

Le chapitre quatre, a été dédié à la présentation d'une étude pour optimiser les conditions de coupe (V_c , f et a_p) lors de tournage d'acier 16MC5 de dureté 52 HRC. Dans ce cas, nous utilisons deux techniques : mono-objective et multi-objective. Pour l'optimisation mono-objective, nous avons utilisé l'approche de la technique Taguchi L_{25} basée sur l'analyse du rapport signal/bruit (S/N). Par contre, l'optimisation multi-objective a été réalisée par la méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA) et la méthode de la fonction de désirabilité (DF). Une comparaison entre les trois techniques d'optimisation a été faite.

En dernier lieu, nous avons élaboré une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

CHAPITRE 1

Rechache bibliographique sur la coupe de metaux

1.1 Introduction

L'usinage est un procédé de fabrication qui consiste à réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement de la matière à froid et sans déformation en utilisant un outil de coupe. Aujourd'hui, il existe plusieurs procédés de finition des surfaces, on peut citer comme exemple : (rectification, fraisage, tournage, tournage dur, etc).

Dans ce chapitre, nous introduisons les bases d'une l'opération d'un tournage dur. Tournage dur est un type de processus de tournage dans lequel des matériaux d'une dureté supérieure à 45 HRC sont traités. L'objectif du tournage dur (TD) est que les pièces en acier de dureté élevée soient finies en tournage et sans rectification. En premier lieu, nous avons présenté les avantages et les Inconvénients de ce procédé, les conditions de coupe (vitesse de coupe V_c , avance f , profondeur de coupe a_p) ainsi que les outils de coupe appropriés (les carbures, les céramiques, les cermets, et le CBN). Ce dernier est plus utilisé car il a une bonne ténacité avec une dureté élevée.

1.2 Définition de l'usinage

L'usinage est défini comme un processus de coupe de matériaux d'une dureté à l'aide d'un outil de coupe. L'application de la technologie d'usinage dur a considérablement augmenté ces dernières années dans l'industrie manufacturière. L'usinage dur de précision a le potentiel de remplacer la rectification conventionnelle dans la production de petites et grandes variétés [1].

L'usinage dur signifie l'usinage de pièces dont la dureté est supérieure à 45 HRC, mais le processus d'usinage dur réel implique une dureté de 46 HRC à 68 HRC. Les matériaux utilisés pour l'usinage dur sont les aciers alliés trempés, les aciers à outils, les aciers cémentés, les fers au nitrate, les aciers chromés durs et les pièces métallurgiques en poudre traitées thermiquement [2]. Les paramètres d'usinage tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de coupe, la géométrie de l'outil et la dureté du matériau de la pièce affecteront fortement la rugosité de surface et les forces de coupe [3].

1.3 Définition de tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce [4].

La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) [5].

1.4 Définition de tournage dur

Le tournage dur est un processus moderne dans son utilisation. C'est le tournage des aciers d'une dureté supérieure à 45 HRC, généralement dans la plage de 45 HRC à 68 HRC. Ce processus a été développé comme une alternative au processus de rectification traditionnelle dans le but de réduire le nombre de modifications et de configuration industrielles comme les roulements à billes, les arbres de transmission, les essieux, les composants du moteur et les engrenages à lamelles, etc. où les aciers trempés sont largement utilisés. Le tournage dur s'est avéré capable de réduire les temps d'usinage et les coûts de plus de 70% tout en fournissant plus souplesse, haute qualité et temps de production plus courts [5,6].

La technique du tournage dur est quelquefois classée dans le domaine de l'usinage à grande vitesse, bien que les vitesses de coupe puissent paraître modestes (figure 1.1).

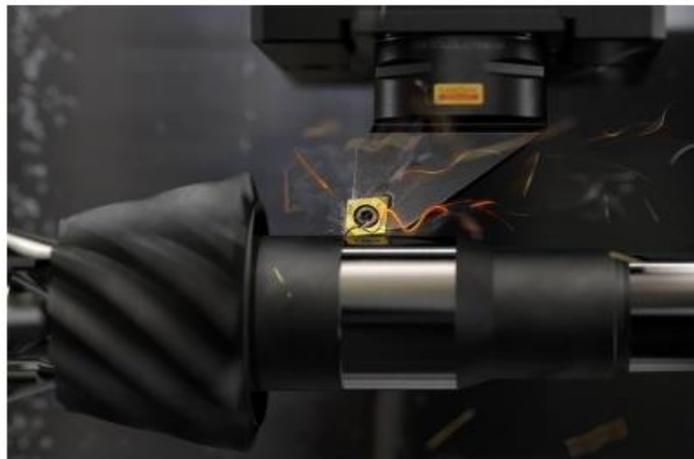


Figure 1.1 - opération du tournage dur [7]

Le procédé de tournage dur (TD) se définit comme une opération de tournage des métaux durs (aciers et fontes) [8]. Ces matériaux sont traités et durcis thermiquement, ayant une dureté entre 45HRC et 68HRC [9]. Les outils utilisés, dans ce cas, ont des propriétés spécifiques comme la résistance à l'usure, la résistance à la température, la bonne stabilité chimique...etc. C'est les outils comme les céramiques et les CBN (Nitrure de Bore Cubique) qui ont rendu possible l'utilisation industrielle de cette technologie. Le développement de ce procédé est réalisé afin de remplacer des opérations très coûteuses du procédé de rectification traditionnelle. Cette dernière demeure souvent longue, coûteuse, non flexible et dégrade l'environnement. Cette dégradation est due aux liquides de refroidissement lors de l'usinage des pièces mécaniques de précision [9.10.11]. Les coûts de fabrication du tournage dur sont plus réduits, le temps de production plus diminué et la qualité des pièces plus améliorée. Le tournage dur des pièces en acier de dureté supérieure à 60HRC avec les outils de coupe mélangés en céramique et PCBN est l'un du processus les plus intéressants pour la finition précise [12.13]. D'après Revel et al, [14] le tournage d'acier à

roulement AISI 52100 de dureté moyenne 61HRC à l'aide d'insert d'outil de coupe CBN permet d'améliorer l'intégrité de la surface. Par conséquent, la rugosité de 0,1 à 0,2 μm est comprise dans les limites de la rugosité obtenue par la rectification. De plus, ce processus produit une couche blanche inférieure à 1 μm au niveau de la couche superficielle de la pièce usinée et des contraintes résiduelles de compression.

a) Signification du terme « dur »

* Dur au sens de la dureté du matériau usiné, du point de vue résistance à la pénétration d'un indenteur. De même, il faudrait discuter sur la correspondance entre dureté et résistance mécanique qui est loin d'être régulière.

* Dur au sens de difficulté à usiner le matériau, conséquence de sa très mauvaise usinabilité, un matériau peut être difficile à usiner sans pour autant être dur ! Peut être cité pour exemple le tournage du cuivre électrolytique qui pose de véritables problèmes de fragmentation du copeau liés à sa très grande ductilité [15].

* Dur au sens de la difficulté de l'opération d'usinage (alésage profond, travail aux chocs...).

1.5 Définition de l'usinabilité

L'usinabilité elle-même est un concept complexe et comprend un large éventail de paramètres et de facteurs. La complexité réside dans le fait que chaque opérateur d'usinage interprète l'usinabilité différemment. De plus, pour un certain nombre d'opérations, un critère d'usinabilité spécifique est utilisé. Les considérations initiales comprennent généralement un type de composant, une taille de composant, le nombre de composants à fabriquer et une opération d'usinage [16]. Cependant, les limitations sont souvent décidées par les exigences des clients sur les propriétés et la qualité de surface du composant, qui à leur tour régissent le processus d'usinage, l'outil de coupe à utiliser et les données de coupe appropriées. Dans une perspective plus large, une mesure d'usinabilité devrait indiquer la capacité d'usinage générale d'un matériau et pas seulement pour un produit ou un processus spécifique. Le concept d'usinabilité peut donc être divisé en cinq paramètres généraux d'usinabilité, à savoir la force de coupe et la consommation d'énergie, la formation de copeaux, l'usure des outils de coupe, les propriétés de surface de la pièce usinée et les facteurs environnementaux [16].

1.6 Comparaison entre tournage et tournage dur

Le tournage dur diffère du tournage classique en raison d'un certain nombre de facteurs, y compris l'outil de coupe, la dureté de la pièce à usiner ou le processus, lui-même qui peuvent tous influencer le résultat de l'usinage [7.10.17].

- Le processus de tournage dur diffère du processus conventionnel de tournage en raison de la dureté de la pièce, l'outil de coupe et les mécanismes impliqués lors de la formation des copeaux
- Tournage dur permet également les opérations de numérotation dans un groupe, contrairement aux tournages traditionnels.
- Tournage dur est le tournage des pièces en acier trempé et pratiqué depuis longtemps pour augmenter leur résistance à l'usure.
- La principale différence entre le tournage dur et le tournage conventionnel est l'absence de l'arrête rapportée à cause de la dureté élevée du matériau à usiner.
- Le tournage à grande vitesse génère un copeau à bande de cisaillement adiabatique en raison du comportement viscoplastique du matériau usiné, associé à des très grandes vitesses de déformations. Alors qu'en tournage dur, la coupe est plutôt générée par fissuration de blocs associée principalement à un comportement fragile (matériau dur). Une telle rupture est accompagnée de faibles déformations plastiques dans le substrat du copeau même si des grandes déformations sont localisées dans les zones de grippage outil/copeau et copeau/pièce ; et les vitesses de déformation n'ont pas le même impact sur le processus de formation de copeau qu'en tournage à grande vitesse. Ceci est confirmé par l'obtention de la même morphologie de copeau même à des vitesses de coupe relativement basse du point de vue de l'usinage à grande vitesse (UGV).

1.7 Comparaison entre tournage dur et rectification

Les résultats expérimentaux ont montré que par intermittence de tournage dur peut produire une assez bonne intégrité de surface pouvant remplacer le processus de rectification [15.18] :

- ✚ Le temps d'usinage est réduit en tournage dur par rapport à la rectification.
- ✚ Le tournage dur génère moins de chaleur dans la pièce que la rectification, en raison de l'évacuation de la chaleur par le copeau. La rectification, en revanche, crée de la chaleur extrême qui exige du refroidissement et peut causer des imperfections de surface. En effet, la surface tournée admet une vie plus longue que celle rectifiée avec une finition de surface équivalente.
- ✚ Réduction du temps de coupe, moins de temps de changement d'outil ce qui rend le processus de tournage dur plus rapide que la rectification.
- ✚ L'environnement est également bénéficiaire puisque cette méthode élimine les boues engendrées par la rectification et ne nécessite pas d'arrosage. Au final, le tournage dur réduit les coûts machine et permet une meilleure maîtrise de la production, des rendements plus élevés et une meilleure qualité de la pièce.

Le tableau 1.1 donne une comparaison entre tournage dur et la rectification cylindrique. Désormais, il est courant de voir des pièces ayant une qualité de surface de $0,15\mu\text{m}$ (R_a) obtenue directement par usinage sans rectification.

Tableau 1.1-Comparaison entre tournage dur et rectification [19]

	TOURNAGE DUR	RECTIFICATION
Gamme d'usinage	Plus courte : suppression de la phase rectification	Plus complexe car changement de prises des pièces
Temps d'usinage	Faible si $L < 40\text{mm}$	Important sauf si L est grand.
Etats de surface [R_a]	$0.15\ \mu\text{m}$	$0.15\ \mu\text{m}$
Défaut de forme	Facilite l'opération de polissage	Evite les problèmes dus aux stries en hélice pour les pièces avec des fonctions d'étanchéité
Précision	Jusqu'à IT-5	Jusqu'à IT-3
Coût Machine	150000 € (1 MF)	380000 € (2,5 MF)
Coût outil	6 à 45 € (40 à 300 F)	45 € (300 F)
Coût main d'œuvre	1€	3,5€
Environnement	Retraitement des copeaux : dépollution (huile de coupe)	Les boues de rectifications sont difficiles et chères à retraiter

Le tournage dur permet d'obtenir un bon état de surface ($R_a = 0,38\ \mu\text{m}$ à $1,04\ \mu\text{m}$) compris dans les limites de la rugosité obtenue par la rectification ($R_a = 0,2\ \mu\text{m}$ à $1,1\ \mu\text{m}$) (voir figure 1.2) [20].

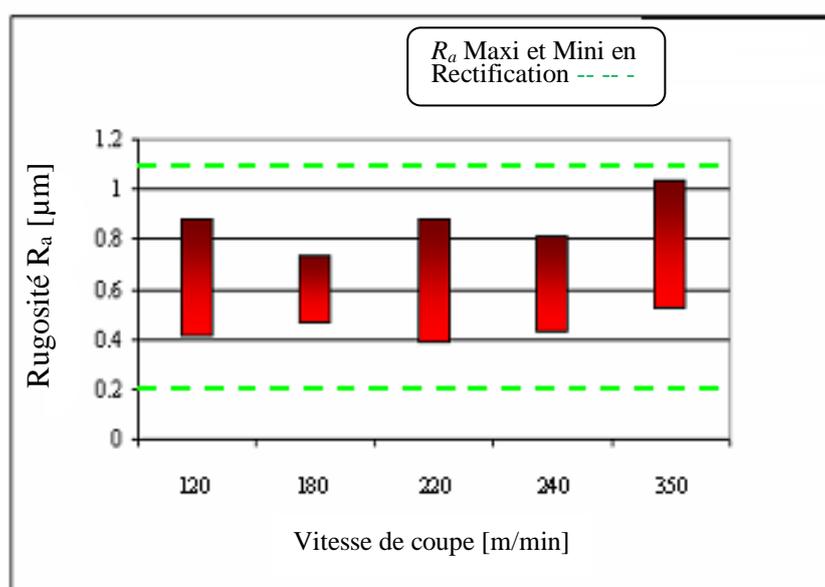


Figure 1.2 - Comparaison de l'état de surface obtenu à différentes vitesses de coupe entre le tournage dur et la rectification [20].

1.8 Paramètres de coupe

1.8.1 Vitesse de coupe (V_C)

La vitesse de coupe est définie comme la vitesse à laquelle le travail se déplace par rapport à l'outil. Elle est généralement mesurée en mètres par minute (m/min) [18]. La vitesse de coupe change avec le changement de diamètre de la pièce même à travers la vitesse de la broche reste la même (voir figure 1.3).

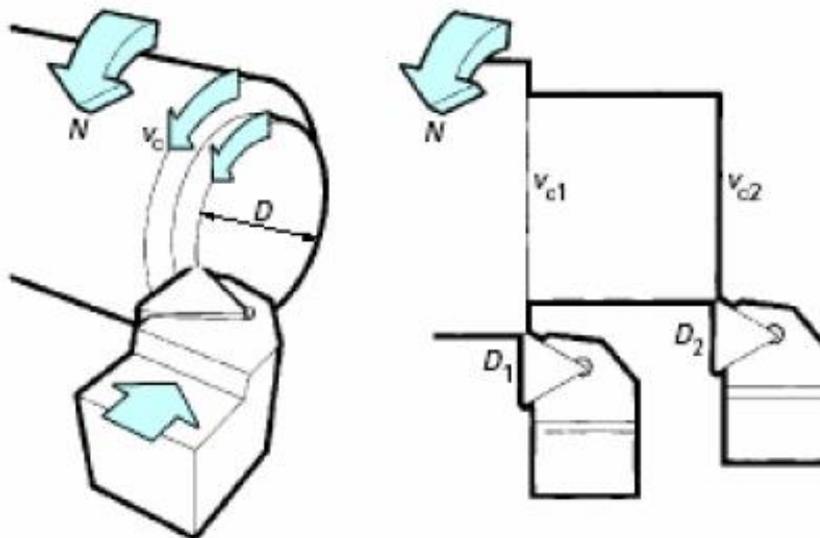


Figure 1.3 - vitesse de coupe [21]

La vitesse de coupe doit être choisie judicieusement car si la vitesse de coupe est trop faible, l'outil s'use rapidement et si la valeur est élevée, certaines vibrations peuvent se produire [18]. La vitesse de coupe est donnée par l'expression (1.1) suivante:

$$V_C = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \text{ [m/min]} \quad (1.1)$$

On en déduit la vitesse de coupe V_C , qui déterminera la vitesse de rotation de la pièce que l'on doit régler sur machine.

$$N = \frac{1000 \times V_C}{\pi \times D} \text{ [tr/min]} \quad (1.2)$$

1.8.2 Vitesse d'avance V_f et avance par tour f

La vitesse d'avance est définie comme la distance parcourue par l'outil lorsque la pièce fait un tour (figure 1.4). Elle est exprimée en distance par l'avance par tour f (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil. La vitesse d'avance de l'outil a un impact important sur la rugosité de surface de la pièce. La faible vitesse d'avance donne une bonne finition de surface mais entraîne

une faible vitesse de traitement et des vitesses d'avance élevées signifie une usure rapide de l'outil de coupe. La vitesse d'avance V_f est donnée par la formule (1.3) suivante [18.21] :

$$V_f = f \times N \quad (1.3)$$

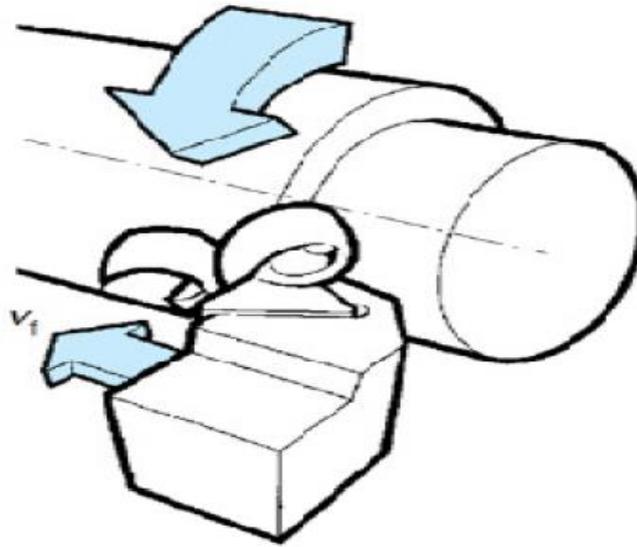


Figure 1.4 -Vitesse d'avance [21]

1.8.3 Profondeur de passe (a_p)

La profondeur de coupe peut être définie comme la quantité de matériau retiré de la surface du matériau en un seul passage. Il est exprimé en millimètres (mm). La profondeur de coupe varie inversement à la vitesse de coupe et une profondeur de coupe élevée entraîne des vibrations, des claquements et une usure élevée de l'outil (voir figure 1.5) [21].

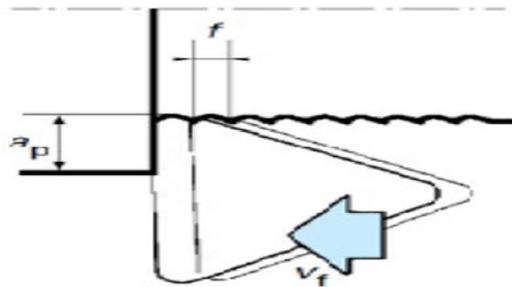


Figure 1.5 -Profondeur de passe [21]

1.9 Avantages et inconvénients de tournage dur

1.9.1 Les Avantages

Parmi les avantages du tournage dur issus de l'expérience des utilisateurs du processus trouvés dans la littérature, [19.22.23] nous citons :

- Le tournage dur est une méthode d'usinage à un seul point de contact qui permet d'usiner des contours complexes sans avoir recours aux meules de forme coûteuses que nécessite la rectification à points de contact multiples.

- Le TD permet également d'effectuer de nombreuses opérations en un seul groupe avec une excellente précision de positionnement, moins de traitement et moins de risques de détérioration des pièces.

- Les constructeurs conçoivent désormais ces pièces dans l'objectif du tournage dur et non plus de rectification.

- Grâce à l'élimination de la lubrification, les déchets sont recyclables tels que les copeaux.

- L'élimination des boues de rectification chargées d'hydrocarbures qui sont nocives à la nature.

- Finalement, le tournage dur réduit les coûts machine et permet une meilleure maîtrise de la production, des rendements plus élevés et une meilleure qualité de la pièce finie.

1.9.2 Les Inconvénients

- Dans certains cas, il n'est pas possible, d'un point de vue technique ou économique de remplacer la rectification cylindrique par le tournage dur. Il se peut par exemple, que la courbure de la pièce soit si importante que les tolérances dimensionnelles ne peuvent être atteintes. Ceci peut se produire dans le cas d'une pièce mince. En effet, dans le cas du tournage dur [17.24].

- Le diamètre des pièces à tourner ne doit pas être trop réduit de sorte que les vitesses de coupe requises puissent continuer à être atteintes.

- Pour certaines applications, la surface ne peut présenter un relief fileté, C'est notamment le cas des composants hydrauliques qui nécessitent des garnitures d'étanchéité.

- Dans certains cas, les opérations de tournage dur ne sont pas réalisables à cause de la géométrie ou la dimension de la pièce qui peut générer le broutement. Pratiquement, pour assurer la stabilité du système.

- L'usure de l'outil de coupe, qui a une durée de vie limitée, détériore la rugosité de surface des pièces usinées.

1.10 Les outils de coupe

La fabrication de matériaux durs nécessite des outils de coupe de plus en plus puissants. Lors du tournage, il est nécessaire de choisir des matériaux de coupe tels que: carbures, céramiques,

cermets et nitrure de bore cubique. Ces derniers sont plus utilisés car ils ont une bonne ténacité avec une dureté élevée.

1.10.1 Les carbures

Pour permettre l'usinage à des vitesses élevées et par conséquent augmenter le taux de production, les carbures ont pris une tournure vertigineuse en termes de développement depuis l'année 1930. Aujourd'hui, ces matériaux dominant 70% du marché. Les outils en carbure sont fabriqués à partir des poudres céramiques liées très souvent avec du cobalt, ils sont parfois appelés carbures cimentés. Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes brasées sur des corps d'outils en acier ordinaire [25].

Il y a deux types d'outil en carbure [26] :

a) Les carbures non revêtus : sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène de titane ...) et de substance liante (cobalt) qui confère sa ténacité à la plaquette.

b) Les carbures revêtus : sont des plaquettes de carbure recouvertes d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium.

1.10.2 Les céramiques

La céramique est un mélange d'éléments inorganiques et métalliques non métalliques et possède de bonnes propriétés minérales atomiques; Ainsi il est obtenu par frittage sans liaison métallique. Les pièces en céramique sont apparues pour la première fois sur le marché dans les années 1960 et ont été introduites pour la première fois pour le traitement à grande vitesse des fontes et pour les applications nécessitant des taux d'enlèvement de matière élevés. La céramique est très résistante à la chaleur (point de fusion supérieur à 1500 ° C), plus résistante à la corrosion et chimiquement plus stable que les carbures cimentés. Les avantages de la céramique sont sa densité inférieure et sa température de fonctionnement nettement plus élevée que les alliages courants. Cependant, sa force, au sens de sa capacité à résister aux microfissures, en fait sa principale faiblesse [25].

Il existe deux grandes familles de céramiques : les céramiques à base d'alumine (Al_2O_3) et celles à bases de nitrure de silicium (Si_3N_4). Les céramiques se déclinent essentiellement sous formes [22.25.27] :

A) Céramique oxydée et céramique renforcée par Whiskers

La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al_2O_3 , c'est un matériau de couleur blanche appelé aussi céramique pure. Il est caractérisé par le faible niveau de ses propriétés telles que : ténacité et résistance aux chocs thermique et mécanique. Une addition d'une petite quantité d'oxyde de zirconium ZrO_2 . Elles présentent une haute stabilité chimique comparée aux carbures et nitrures. En revanche, leur ténacité est moindre. Leur faible résistance aux chocs thermique et mécanique les ont confiné aux opérations d'usinage sans chocs des aciers et fontes

grises à haute vitesse de coupe sans lubrification. A faibles vitesses de coupe, elles peuvent usiner des aciers de construction, des aciers rapides ou des aciers cémentés ou nitrurés.

Le renforcement de l'alumine avec des fibres «Whiskers», est plus efficace que certains additifs comme un mélange d'alumine-zircone et d'alumine-TiC, ce qui permet une meilleure résistance et une plus grande résistance à la rupture ainsi qu'une meilleure résistance. Choc thermique. De plus, le module de Weibull augmente, ce qui entraîne une diminution des variances de résistance.

Les Whiskers sont des fibres monocristallines. Les Whiskers de SiC utilisés pour rigidifier les outils de coupe en alumine ont un diamètre inférieur à 1 [μm] et une longueur comprise entre 5 et 20 [μm] (Fig. 1.6)

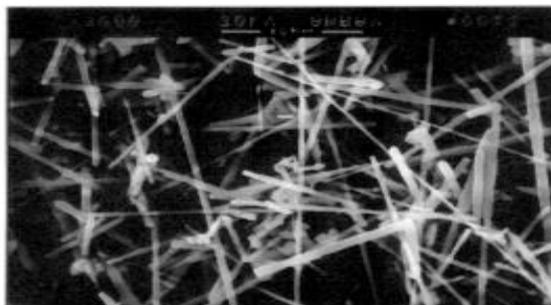


Figure1.6 - Fibres (whiskies) de Sic utilisés pour renforcer l'alumine [27]

B)la céramique non oxydée: Elle est élaborée à base de nitrure de silicium Si_3N_4 . Cette céramique permet dans certains matériaux des vitesses de coupe 1,5 à 2 fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides...). Elle s'emploie à sec.

1.10.3 Les cermets

Le mot cermet désigne une combinaison entre deux matériaux Céramique et Métal (Cer +Met = Cermet). Les cermets sont des matériaux de coupe qui se présentent comme un carbure à base de carbure de titane (TiC) au lieu de carbure de tungstène et avec du nickel ou du cobalt comme liant (agglomérant). Les nouvelles nuances de cermet ne contiennent plus de nickel. Les cermets sont utilisés pour la finition et l'usinage de précision demandant de grandes vitesses de coupe et de faibles avances. Ils se rapprochent ainsi des domaines d'utilisation des céramiques en étant toutefois résistants [25].

On peut retenir les avantages d'utiliser les cermets [27] :

- résistance à la cratérisation et à la formation de l'arête rapportée supérieure à celle de carbures de tungstène et des céramiques.
- résistance à l'usure trois à quatre fois plus grande que celle des carbures non revêtus.
- admettent de faibles avances.

- vitesse de coupe proche de celles des céramiques mais également utilisables aux vitesses supérieures des carbures de tungstène non revêtus.

1.10.4 Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique n'existe pas à l'état naturel. C'est un produit de synthèse issu de la métallurgie des poudres. Il est obtenu, à partir de nitrure de bore de structure hexagonale au naturel, par frittage à haute température (1800°K) et à haute pression (5 GPa). Le nitrure de bore cubique est le second des matériaux les plus durs connus, juste après le diamant, il est donc plus résistant à l'usure que les céramiques ou les carbures métalliques. Le CBN ne réagit pas avec les alliages ferreux et il est thermiquement stable jusqu'à 1400°C. Le CBN peut donc usiner des alliages par contre le diamant ne peut pas, tels que les aciers à outil, les fontes trempées, les superalliages à base de nickel ou de cobalt [28].

Les outils CBN sont largement utilisés dans l'industrie du travail des métaux pour la coupe de divers matériaux durs tels que les aciers à outils rapides, les aciers sous pression, les aciers à roulement, les aciers cémentés, la fonte blanche et les fontes alliées. Dans de nombreuses applications, la découpe de matériaux ferreux dans leur état durci peut remplacer le meulage pour permettre des économies significatives en termes de coût et de productivité [6].

1.11 Usure des outils de coupe en TD

1.11.1 Usure en dépouille

Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête, et elle est caractérisée par la largeur moyenne de cette bande V_B (Figure 1.6). Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer, puisqu'elle détermine la précision dimensionnelle et l'état de surface de la pièce usinée [29].

Plus le matériau à usiner est dur, plus l'usure en dépouille augmente, et plus le matériau d'outil de coupe est dur, plus cette usure diminue. L'augmentation des paramètres de coupe comme l'avance f , la vitesse de coupe V_c , et du temps d'usinage T_c conduisent à augmenter l'usure de dépouille. L'usinage à sec conduit à augmenter l'usure de dépouille plus que l'usinage cryogénique (figure 1.7) [22].



Figure 1.7 -Usure en dépouille [28]

1.11.2 Usure en cratère

Usure du cratère Le copeau coule à travers la face du râteau, ce qui entraîne un frottement important entre le copeau et la face du râteau, et laisse une cicatrice sur la face du râteau qui est généralement parallèle au bord de coupe principal. L'usure du cratère peut augmenter l'angle de coupe de travail et réduire la force de coupe, mais elle affaiblira également la force de l'arête de coupe. Les paramètres utilisés pour mesurer l'usure du cratère peuvent être vus sur la figure 1.8. La profondeur du cratère K_T est le paramètre le plus couramment utilisé pour évaluer l'usure de la face de râteau [30].

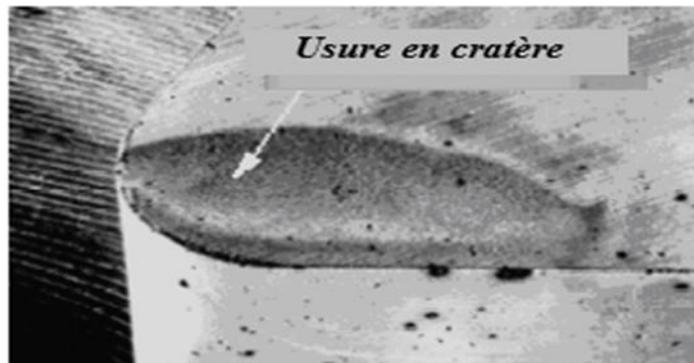


Figure 1.8 - Usure en cratère [31]

1.11.3 Usure en entaille

Ce type d'usure se caractérise par une entaille localisée tant sur la face de coupe que sur la face de dépouille, au niveau de la profondeur de coupe. Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires (figure 1.9) [26].

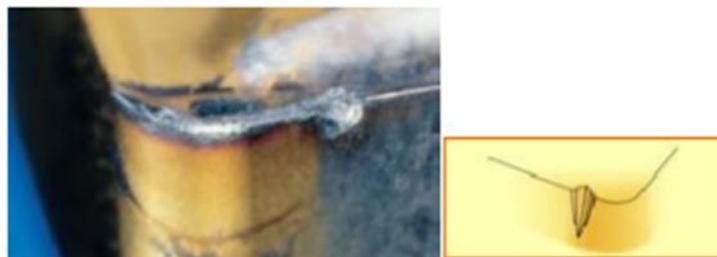


Figure 1.9 - Usure en entaille [28]

1.11.4 Usure par déformation plastique

Elle est occasionnée par une sollicitation trop importante de l'arête de coupe (matériaux usinés trop durs) en combinaison avec des températures d'usinages élevées. La zone de déformation plastique du matériau dépassé, il y aura rupture. On peut trouver cette déformation

plastique en parallèle d'une cratérisation. En effet le cratère affaiblit la section de l'outil (figure 1.10) [27].

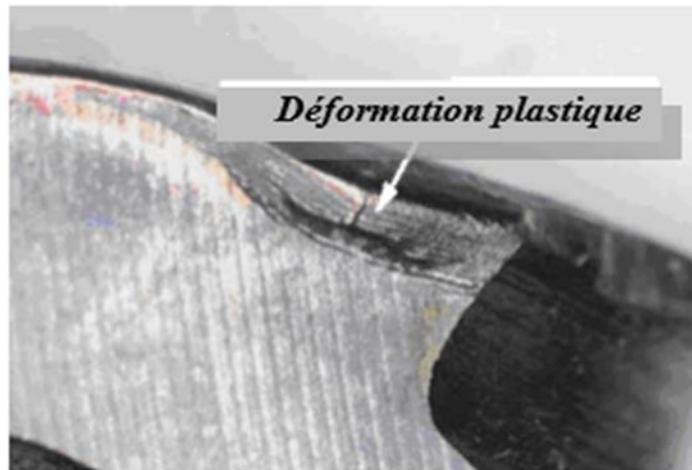


Figure 1.10 -Usure par déformation plastique [31]

1.11.5 Usure par écaillage et fissuration d'arête

C'est une destruction de l'arête de coupe par arrachement de petits fragments d'outil, elle est généralement accompagnée d'une usure de la face de dépouille et de ce fait n'est pas toujours reconnaissable.

Elle est générée par les chocs thermiques et les vibrations. Elle peut générer des ruptures. Les écaillages en dehors de la partie active de l'arête proviennent de l'impact de copeaux par suite d'une mauvaise évacuation. Cette usure est souvent le fait de chocs thermiques ou d'arête trop fragile (figure 1.11) [27].



Figure 1.11 - L'usure par écaillage [24]

1.12 Etat de surface générée par TD

La notion d'état de surface comprend

- L'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles) ;
- L'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale) [22].

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce. Des méthodes distinctes sont utilisées en fonction du type d'irrégularité à isoler. Ainsi, il a fallu définir la qualité de la surface usinée. Outre les aspects dimensionnels, il est aussi nécessaire de définir l'état de rugosité de la surface. Le critère le plus couramment utilisé dans le milieu industriel est le paramètre statistique Ra (figure 1.12) défini par l'expression (1.4) [19].

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |(Yp - Rp)| dxR \quad (1.4)$$

Ra : Rugosité (μm)

L : Longueur de mesure (μm)

YR : Amplitude (μm)

XR : Abscisse (μm)

Rp : Profondeur moyenne de rugosité

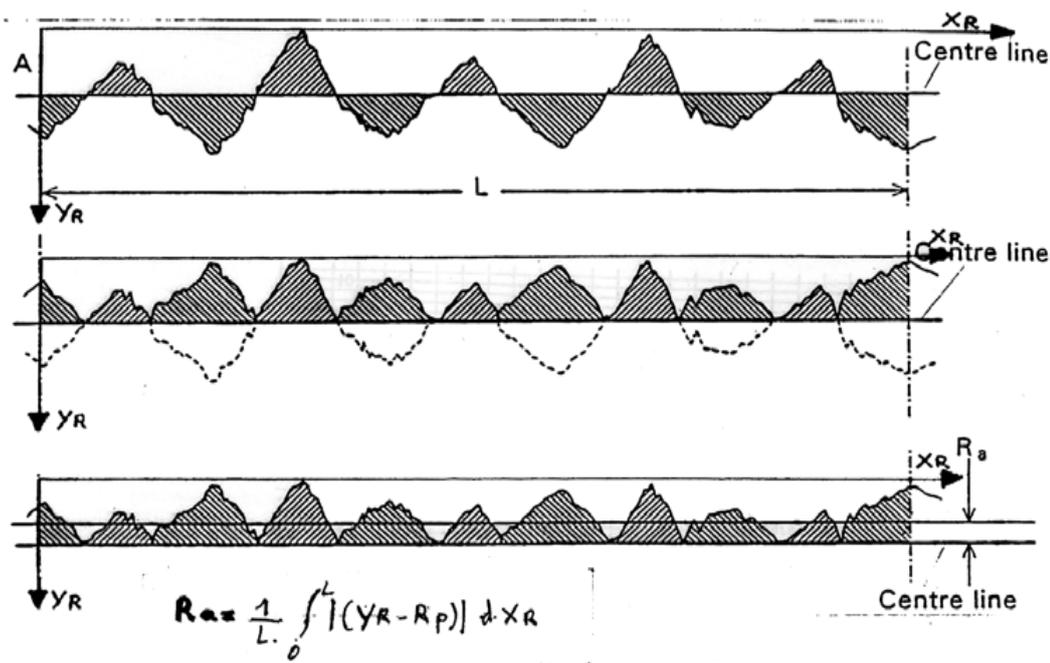


Figure 1.12 - Schéma représentant le mode de calcul du paramètre industriel Ra [19]

Le critère Ra reste encore le plus répandu dans l'industrie - seules les entreprises de pointe utilisent d'autres paramètres pour caractériser les états de surface des pièces usinées – car sa sensibilité permet de faire la distinction entre des surfaces de qualités différentes.

L'acier à l'état durci est aujourd'hui fini dans des conditions qui conduisent à des surfaces comparables à celles de la finition précise (R_a de 0,2 à 0,4 μm). Ceci est dû à la disponibilité de céramiques et de CBN de qualité et à des machines outil de grande rigidité. Pour produire des surfaces de bonne qualité avec des avances par tour raisonnables, il faut un outil de grand rayon de bec. Pour des vitesses de coupe importantes, le profil de la pièce est très voisin de l'enveloppe théorique de l'outil, alors que des arrachements sont courants aux vitesses de coupe traditionnelles. En fait, l'état de surface s'améliore avec une augmentation de la vitesse de coupe. On observe une vitesse optimale pour divers couples outils matières. Pour des vitesses inférieures, il se produit des adhérences de copeaux, le détachement se produit de façon irrégulière et diminue la qualité de la surface obtenue. Pour des vitesses supérieures, on constate soit une stagnation, soit une légère diminution des qualités de surface [32].

1.13 Formation de copeau par TD

Pour l'usinage des aciers très durs (55 HRC), la formation de copeaux est différente de celle de l'usinage classique. En général, la coupe des aciers très durs entraîne la formation de copeaux discontinus appelés aussi en dents de scie [33].

Une nouvelle surface métallique est engendrée en continu lors de la formation de copeaux.

Elle est soumise, au contact de l'arrêter de coupe, à une pression et une température (supérieur à 1000° C) très élevées ce qui favorise la diffusion et les réactions chimiques [17].

L'un des points marquants de l'usinage des aciers durs est le type et l'évolution du copeau au cours de la coupe. Dans l'ensemble des opérations de coupe pratiquées, la forme du copeau est restée la même. Celui-ci ne se fractionne pas. La forme de la pièce provoque l'enroulement du copeau autour de la pièce ce qui détériore l'état de surface et ne facilite pas toujours la bonne évacuation de chaleur dégagée par la coupe. On provoque ainsi une concentration de chaleur à la surface de la pièce. Dans certaines manipulations, on a procédé à un soufflement du copeau à l'air comprimé pendant l'usinage pour éviter son enroulement autour de la pièce usinée [29].

1.14 Etat de l'art

Le tournage dur de haute précision est encore assez peu utilisé dans l'industrie mécanique et pourrait constituer une alternative totale ou partielle à la rectification. Il a comme avantage de générer simultanément un état de surface de qualité et une géométrie avec des cotes très précises ;

il produit également des copeaux, aisés à récupérer, puis à recycler, contrairement aux boues issues de la rectification [34].

Pour objectif final la détermination des conditions de coupe optimaux c'est-à-dire qui permettent l'amélioration de certains paramètres technologiques. Les principales méthodes utilisées sont l'analyse de Taguchi et la maximisation de la fonction de désirabilité dans la méthodologie de surface de réponse [26].

Jusqu'à présent, un grand nombre d'études sur la texture de surface, le taux d'enlèvement de matière, l'usure de l'outil de coupe, les efforts de coupe, la puissance de coupe et les vibrations de l'outil de coupe, liée à l'opération de tournage dur ont été menées. Saini et al [30]. Ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (RSM) et la conception des expériences BOX-Behnken pour prédire la rugosité de surface et l'usure de l'outil. Les données expérimentales utilisées sont obtenues par 29 essais de tournage d'acier à chaud AISI H11 de dureté comprise entre 48 et 50 HRC. Ils ont constaté qu'une bonne qualité de surface peut être obtenue lorsque la vitesse d'avance est faible et la vitesse de coupe est élevée. Mais, une grande vitesse de coupe introduit une usure plus élevée de l'outil de coupe. En outre, Manivel et Gandhinathan [35] ont étudié par l'intermédiaire de la méthode de Taguchi de réseau orthogonal L_{18} , l'optimisation et les interactions des paramètres de coupe sur la rugosité de surface (Ra) et l'usure d'outil (Vb). Le matériau usiné est la fonte ductile trempée (grade 3) de dureté 45 HRC et de résistance à la traction 1241 MPa, l'outil de coupe en carbure revêtu de CVD a été utilisé. L'analyse ANOVA indique que la vitesse de coupe à une contribution de 49,1% et 50,2% respectivement. Ils ont trouvé que la vitesse de coupe est le paramètre le plus influant sur les deux paramètres d'entrées (Ra et Vb). Selon Bartarya et Choudhury [36], la profondeur de coupe est le premier facteur le plus affectant les trois forces de coupe (F_x , F_y et F_z) lors du tournage d'acier EN31 de dureté 60 ± 2 HRC à l'aide d'outil CBN non revêtu. Le deuxième facteur est la vitesse d'avance et le dernier est la vitesse de coupe. D'après les résultats expérimentaux et numériques de tournage dur d'acier de travail à froid AISI D3 de dureté 60 HRC à l'aide d'un outil de coupe en céramique et un plan factoriel complet 3^3 (27 essais), Aouici et al [10] ont constaté que la vitesse d'avance (f) et la profondeur de coupe (ap) sont les deux paramètres influençant la force de coupe (F_t), la force de coupe spécifique (K_s) et la puissance (P). Par ailleurs, le paramètre déterminant la rugosité de surface (Ra) est la vitesse d'avance (f) avec une grande contribution égale à 87,33%.

Auparavant, une autre étude de Aouici et al [6] sur l'impact de trois paramètres d'usinage de tournage dur à sec (V_c , f et ap) et de la dureté de la pièce (H) a été effectuée en usinant un acier de travail à chaud AISI H11. Trois niveaux de dureté différents de la pièce (40, 45 et 50 HRC) et l'outil de coupe CBN de nom commerciale CBN7020 (désignation standard est SNGA12 04 08 S01020) sont utilisés. Après une analyse statistique par ANOVA et modélisation mathématique par

RSM des quatre paramètres de sorties (R_a , F_x , F_y et F_z), les résultats présentent que la dureté de la pièce et la profondeur de passe (H et ap) sont avant tout influencés par les trois composantes de la force de coupe. De plus, la dureté de la pièce et la vitesse d'avance sont notamment influencés sur la rugosité de la surface. Selon Azizi et al [3], les trois paramètres d'usinage les plus affectant la rugosité moyenne arithmétique (R_a) lors de tournage dur d'acier de roulement AISI 52100 par outil de coupe céramique mixte revêtu $Al_2O_3 + TiC$ sont : la vitesse d'avance (f), la dureté de la pièce (H) et la vitesse de coupe (V_c). En outre, la profondeur de coupe (ap), la dureté de la pièce (H) et la vitesse d'avance (f) sont les paramètres les plus influencés les trois composantes de la force de coupe.

Dans ses travaux, Jouini et al [37.38] ont étudié la relation entre la durée de vie en fatigue des contacts roulants et la qualité de surface. Les essais de tournage dur de précision à l'aide d'outil de coupe CBN sont effectués sur des bagues d'acier à roulement trempé AISI 52100 d'une dureté moyenne de 61 ± 1 HRC. La conclusion de ces études pratiques consiste à trouver une relation entre la durée de vie en fatigue des contacts roulants et l'amplitude de rugosité R_a . La durée de vie RCF atteint 5,2 millions de cycles pour $R_a = 0,11 \mu m$, 1,2 millions de cycles pour $R_a = 0,2 \mu m$ et 0,32 million de cycles pour $R_a = 0,25 \mu m$. Par conséquent, la durée de vie RCF des composants du roulement rectifiés atteint 3.2 millions de cycles pour $R_a = 0,05 \mu m$. De plus, la rugosité de surface de tournage dur de précision est de l'ordre de 0,1 à 0,2 μm . Le procédé de rectification produit des valeurs proches ou moindres que les valeurs de tournage dur de précision. En général, le processus de tournage dur de précision améliore l'intégrité de la surface des surfaces fonctionnelles (texture de surface, contraintes résiduelles et couche blanche) [39].

Meddour et al [40] ont étudié l'impact des paramètres de coupe et le rayon de bec d'outil en céramique mixte sur deux paramètres de sorties : la rugosité moyenne arithmétique (R_a) et les trois composantes de force (F_x , F_y et F_z). Les expériences de tournage dur sont faites sur l'acier à roulement AISI 52100 de dureté 59 HRC et l'intermédiaire d'une conception composite centrale (CCD) de 30 essais. Les résultats de l'analyse statistique (ANOVA) et graphique (RSM) des chercheurs en question ont montré que la profondeur de coupe est le premier paramètre d'usinage qui influence les trois composantes de la force, suivie de la vitesse d'avance. De plus, le rayon de bec n'affecte que la force de poussée (F_y). Toutefois, la vitesse d'avance et un grand rayon de bec sont les deux paramètres influencés significativement sur la rugosité de surface. Plus récemment, le même chercheur Meddour et al [41] ont modélisé la rugosité de surface (R_a) et les trois composantes de force de coupe lors de tournage d'acier trempé AISI 4140 de dureté 60 HRC. L'outil de coupe utilisé dans la partie expérimentale étant en céramique mixte (70% Al_2O_3 et 30% TiC). La modélisation a été faite par trois approches. La première est la régression quadratique par la méthode de surface de réponse. Les deux autres sont les réseaux de neurones artificiels (ANN) et

l'algorithme génétique (NSGA-II). Les réponses de sortie sont plus prédites par la technique ANN que par la régression quadratique. De plus, les résultats de l'optimisation par NSGA-II est plus efficace que les résultats de la méthode de la fonction de désirabilité (DF). Cette dernière utilise les modèles de RSM du second ordre. En outre, le rayon du bec de l'outil de coupe influant la rugosité de la surface plus que les paramètres technologiques lors de tournage dur de l'acier AISI 52100 de dureté 60 HRC par l'outil CBN revêtu [2].

1.15 Conclusion

Le tournage dur c'est une alternative rentable à la rectification. Le tournage dur est flexible, rapide et donne une bonne qualité de pièces. Pour réduire le nombre de modifications de configuration industrielle, et réduire les temps d'usinage et les coûts de plus, en fournissant plus souplesse, de haute qualité et des temps de production plus courts.

CHAPITRE 2

Matériau, appareils et méthodes utilisées

2.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des moyens mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le but de caractériser le comportement du matériau de coupe étudié, vis à vis du matériau à usiner, afin d'optimiser les conditions de coupes lors du tournage dur (TD) de acier de cémentation 16MC5, l'utilisation doit être faite profilomètre2D pour mesurer la rugosité de la pièce usinée. Nous avons présenté les conditions de coupe ainsi que les plans des expériences multifactorielle et mono-factorielle. Dans cette technique, le nombre de facteurs censés influencer le processus sera considérablement réduit et les facteurs ayant un impact minimal seront éliminés. En même temps, nous présentons l'approche utilisée pour planifier les expériences et les conditions d'exécution des tests sur le Acier 16MC5, puis des plans de facteurs complets sont présentés (PFC), ainsi que l'utilisation des plans expérimentaux de Taguchi, la méthodologie de la surface de réponse et le réseau de neurone artificiel. La modélisation par surface de réponse des paramètres de performance (réponses) d'un système nous aidera à diminuer le temps du calcul nécessaire au processus d'optimisation.

2.2 Matériels utilisés

2.2.1 Machine-outil

Les essais d'usinage ont été réalisés sur un tour conventionnel de la société tchèque 'TOS TRENCIN' modèle SN 40C avec une puissance de 6.6 KW.

Les échantillons de diamètre 30 mm sont usinés à l'aide d'un outil de coupe en céramique ayant une bonne tenue de coupe, une forte ténacité et une grande résistance à l'usure. Sa désignation selon la norme ISO est SNGN 12 08 08 (voir la figure 2.1). Toutefois, la désignation du porte-outil utilisé est : CSSNR3225 P12.

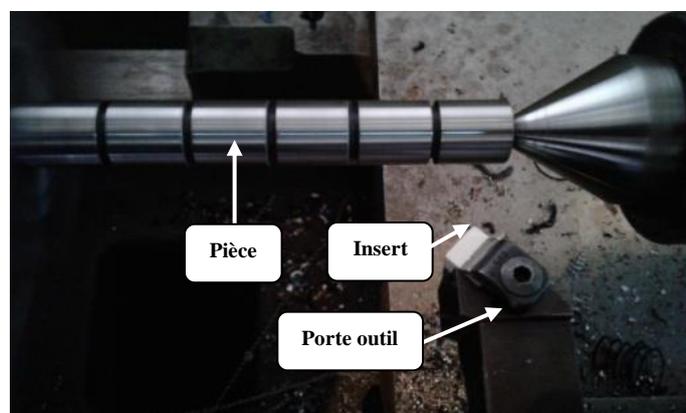


Figure 2.1- Vue du tour utilisé

2.2.2 Matériau à usiné

Le matériau usiné est un acier de cémentation 16MC5 (%C 0.14/0.18), cémenté et trempé, la trempe se fait à l'huile à une température de 860 °C, suivi d'un revenu à 200 °C. Sa dureté superficielle après revenu est de 52 HRC. La composition chimique de l'acier utilisé est donnée par le tableau 2.1. Cet acier est préconisé surtout pour la fabrication des pièces soumises à des efforts élevés comme par exemple : les arbres à cames, les roues dentées, les engrenages de la boîte de vitesse,...etc.

Tableau 2.1- Composition chimique d'acier 16MC5

% en masse	% C	% Mn	% Cr	% Si	% S	% Mo
Valeur mesurée	0,16	1,22	0,63	0,06	0,01	0,02

Les appellations équivalentes de l'acier 16MC5 selon les différentes normes internationales sont résumées dans le tableau 2.2

Tableau 2.2- Équivalence de la nuance d'acier 16MC5 en fonction des différentes normes et des pays [42]

Europe	France	Germany	USA
EN 10084	NF A 35-551	DIN 17210	AISI
16MnCr5	16MC5	16MnCr5	5115

2.2.2.1 Propriétés mécaniques et physico-chimiques

Les différentes propriétés mécaniques et physiques de l'acier 16MC5 sont données dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3-Propriétés mécaniques et physiques de l'acier 16MC5 [42]

Résistance à la traction Rm	640 - 1370 N/mm ²
Limite d'élasticité Rp0,2	440 - 635 N/mm ²
Allongement (Lo=5do)	A5% 9 - 11
Striction	Z% 35 - 40
Résilience (Kcu)	> 34 J/cm ²
Dureté Brinell (HB30)	140 - 187
Densité	7,85 kg/dm ³
Module E	210 KN/mm ²
Conductibilité thermique (W/mk)	35-45
Dilatation thermique (10-6/K)	11-14

2.2.3 profilomètre 2D utilisé

La profilomètre est une méthode d'utilisation de certains moyens pour créer une coupe transversale d'une surface ou d'un profil de surface. La profilomètre mécanique est une méthode séculaire de mesure des profils de surface, mais elle est de plus en plus difficile à faire sur de très

petites surfaces. La profilométrie des ombres est la méthode la plus efficace et la plus indépendante de l'échelle disponible pour la caractérisation 2D [43].

A la fin de chaque essai, des mesures de rugosité ont été réalisées sur les surfaces usinées afin d'analyser l'effet des différents paramètres de coupe. Les valeurs de rugosité indiquées dans cette étude sont une moyenne de trois mesures effectuées sur chaque surface usinée en trois endroits différents.



Figure 2.2 - La profilométrie 2D

Les mesures des paramètres de la courbe de portance sont faites sur un profilomètre 2D TAYLOR HOBSON doté d'un palpeur avec une pointe en diamant de rayon de courbure $2 \mu\text{m}$ (PRECISION MEASUREMENT SYSTEM FORM TALYSURF 120), utilisant un filtre Gaussien et une longueur d'onde de coupure $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$. Les profils de la courbe de portance sont mesurés sur une longueur d'évaluation $L_n = 4,8 \text{ mm}$, selon la norme ISO 13565 standard. Chaque surface est caractérisée par trois mesures dans différents endroits et la valeur moyenne est utilisée dans l'étude.

Les paramètres mesurés de la texture de surface pendant tous les essais de tournage dur sont (ISO 13565 standard) : R_{PK} : Hauteur des pics saillants (μm), R_K : Profondeur de rugosité du cœur (μm), R_{VK} : Profondeur des creux profonds (μm).

Les paramètres fonctionnels R_{PK} , R_K , et R_{VK} se déterminent à partir de la courbe d'Abbott Firestone "courbe du taux de portance" (voir figure 2.3).

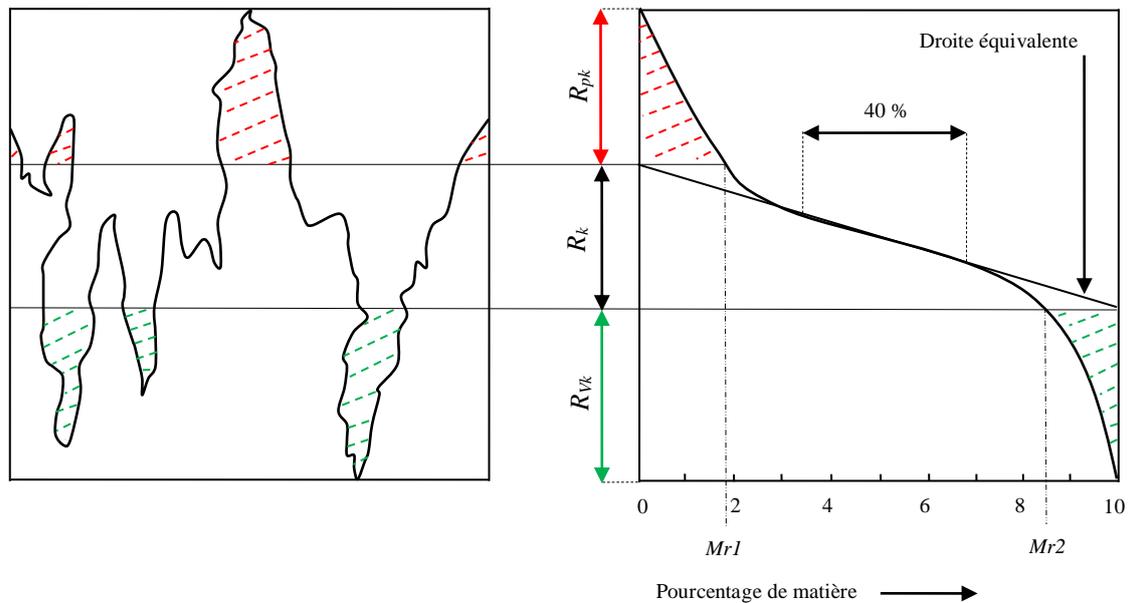


Figure 2.3- Courbe du taux de portance (Courbe d'Abbott Firestone)

2.2.4 Conditions de coupe

Parmi les facteurs les plus significatifs affectant le système de coupe, on peut citer les éléments du système de coupe (V_c , f , ap), le temps de fonctionnement, les conditions de travail....etc [22].

Considérant $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ comme paramètres d'entrée et $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ comme paramètres de sortie. L'influence d'un ou de plusieurs facteurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) sur un paramètre Y , peut être obtenue en utilisant les deux méthodes suivantes :

- Une méthode uni-factorielle,
- Une méthode multifactorielle.

NB : les niveaux des paramètres de coupe ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe.

2.2.4.1 Méthode uni-factorielle

L'objectif de la méthode uni-factorielle est l'analyse comparative du comportement de la rugosité, d'efforts de coupe et l'usure en fonction des paramètres de coupe (V_c, f et ap) [31].

Cette méthode est d'évaluer l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y . L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné X , tout en maintenant tous les autres facteurs constants. Pour chaque $X = X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i [44]. Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation (2.1):

$$Y = F(f, V_c, ap) \quad (2.1)$$

Où F est la fonction de réponse et Y est la réponse correspondante (R_{pk} , R_k et R_{vk}). Dans ce cas, on varie seulement le facteur X , tout en maintenant les autres facteurs constants.

Dans notre étude, nous avons varié la vitesse de coupe, ensuite nous avons varié la profondeur de passe et en troisième lieu nous avons varié l'avance. Les paramètres de sortie sont les trois critères de rugosité (R_{pk} , R_k et R_{vk}). Le tableau regroupe les conditions de coupe en unifactoriel et les paramètres de sortie.

Tableau 2. 4- Conditions de coupe pour les essais et les paramètres de sortie

N°	Facteur variable	Valeur	Paramétrr de sorite
1	Avance f (mm/tr)	0,050	R_{pk} R_k R_{vk}
		0,106	
		0,142	
		0,198	
		0,256	
2	Vitesse de coupe V_c (m/min)	24	R_{pk} R_k R_{vk}
		34	
		48	
		68	
		96	
3	Profonde de passe a_p (mm)	0,10	R_{pk} R_k R_{vk}
		0,15	
		0,20	
		0,25	
		0,30	

2.2.4.2 Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y . Pour déterminer le nombre d'essais nécessaire, nous appliquons la formule (2.2) suivante [31] :

$$N = q^k \quad (2.2)$$

Avec :

N : Nombre d'essai.

q : Nombre de niveau de variation des facteurs de base.

k : Nombre de facteurs de base.

Dans notre étude, nous avons trois facteurs ($k = 3$) et chaque facteur de base à cinq niveaux de variation ($q = 5$). Nous avons donc un nombre d'essai $N = 125$ selon la méthode de plan factoriel complet. Pour diminuer le nombre d'essais sans pour autant diminuer la précision des résultats, nous avons opté pour un plan de Taguchi suivant la table orthogonale standard $L_{25} (5^3)$. Dans notre cas de la première série, nous avons trois facteurs de base ($k=3$), (V_c , f et a_p) et chaque

facteur à cinq niveaux de variation (niveau 1, niveau 2, niveau 3, niveau 4 et niveau 5). Nous avons alors : $N=5^3=25$. Les essais sont numérotés de 1 à 25. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau 2.5. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe est représentée par le tableau 2.6.

Tableau 2.5- Table orthogonale de Taguchi $L_{25} (5^3)$

Trail n°	A: Vc	B: f	C: ap
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	1	5	5
6	2	1	2
7	2	2	3
8	2	3	4
9	2	4	5
10	2	5	1
11	3	1	3
12	3	2	4
13	3	3	5
14	3	4	1
15	3	5	2
16	4	1	4
17	4	2	5
18	4	3	1
19	4	4	2
20	4	5	3
21	5	1	5
22	5	2	1
23	5	3	2

24	5	4	3
25	5	5	4

Tableau 2.6- Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 25 essais

Trail n°	A: Vc	B: f	C: ap
1	24	0.050	0.10
2	24	0.106	0.15
3	24	0.142	0.20
4	24	0.198	0.25
5	24	0.256	0.30
6	34	0.050	0.15
7	34	0.106	0.20
8	34	0.142	0.25
9	34	0.198	0.30
10	34	0.256	0.10
11	48	0.050	0.20
12	48	0.106	0.25
13	48	0.142	0.30
14	48	0.198	0.10
15	48	0.256	0.15
16	68	0.050	0.25
17	68	0.106	0.30
18	68	0.142	0.10
19	68	0.198	0.15
20	68	0.256	0.20
21	96	0.050	0.30
22	96	0.106	0.10
23	96	0.142	0.15
24	96	0.198	0.20
25	96	0.256	0.25

2.2.5 Plans d'expériences

2.2.5.1 Définition

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit effectuer [31]. La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux d'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.

Une propriété peut toujours être décrite par une expression mathématique [44] : telle que:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3 \dots \dots x_n) \quad (2.3)$$

Y grandeur (ici appelé variable de sortie) qui exprime la propriété à laquelle s'intéresse l'expérimentateur.

Xi variable (ici appeler paramètre d'entrée) choisie par l'expérimentateur qui en maîtrise les valeurs.

La mise en place d'un plan d'expérience demande donc de suivre le processus d'élaboration suivant [44] :

- **Identification des critères** : Définition des limites des objectifs des variables grandeurs étudiées.
- **Déterminer les variables de l'étude** : Paramètres d'entrée.
- **Choix du critère d'arrêt** : Paramètre mesurable permettant de définir une limite à l'expérimentation.
- **Choix du type de plan** : Choix à priori de la forme mathématique de la propriété étudiée.
- **Expérimentation** : Identification des expériences à effectuer.
- **Analyse des résultats** : Explication complète des expressions mathématiques des variables de sorties en fonction des paramètres d'entrée.
- **Validation des résultats** : Tracés des graphiques vérifiant la fiabilité de la réponse.
- **Optimisation** : Recherche de l'optimum (variable d'entrer en fonction de la sortie).
- **Conclusion.**

2.2.5.2 Terminologie

L'amplitude d'intérêt, qui est généralement observée par y , est appelée la réponse. Les variables X qui peuvent changer la réponse sont appelées facteurs. Nous parlons donc des facteurs qui influencent la réponse. La terminologie et le facteur de réponse sont couramment utilisés dans le domaine des plans expériences [44].

Le diagramme ci-dessous résume de manière plus simple cette définition :



Avant de commencer à développer un plan d'expérience, vous acquérez des connaissances sur certains termes tels que:

- ✓ **Facteurs:** Un facteur est un paramètre qui peut varier d'une expérience à l'autre, ce qui affecte le résultat final (réponse). Habituellement, le nombre de facteurs impliqués est supérieur au nombre de réponses.
- Facteur quantitatif: tout facteur mesurable, lorsqu'il est exprimé naturellement en utilisant des valeurs numériques (pression, température, durée, etc.)
- Facteur qualitatif: tout facteur non mesurable (couleur, type de matériau, etc.).
- ✓ **Niveau de facteur:** est la détermination du champ de différence pour un facteur spécifique. En général, la diversité de chaque facteur est déterminée par deux niveaux: supérieur et inférieur.

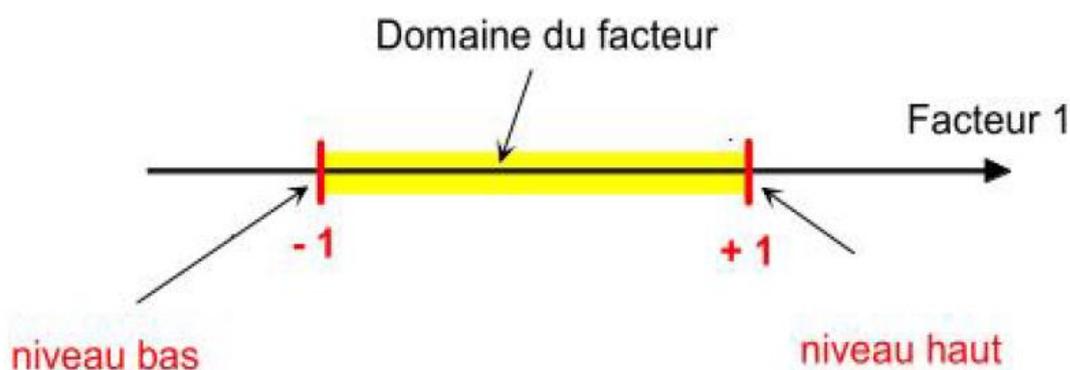


Figure 2.4-Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut [44]

- ✓ **Domaine expérimental:** Le champ expérimental est tracé par polyédrique avec des dimensions de k , où k est le nombre de facteurs considérés. Chaque aspect de ce polyèdre est déterminé par deux niveaux extrêmes qui distinguent le facteur correspondant de ce côté.

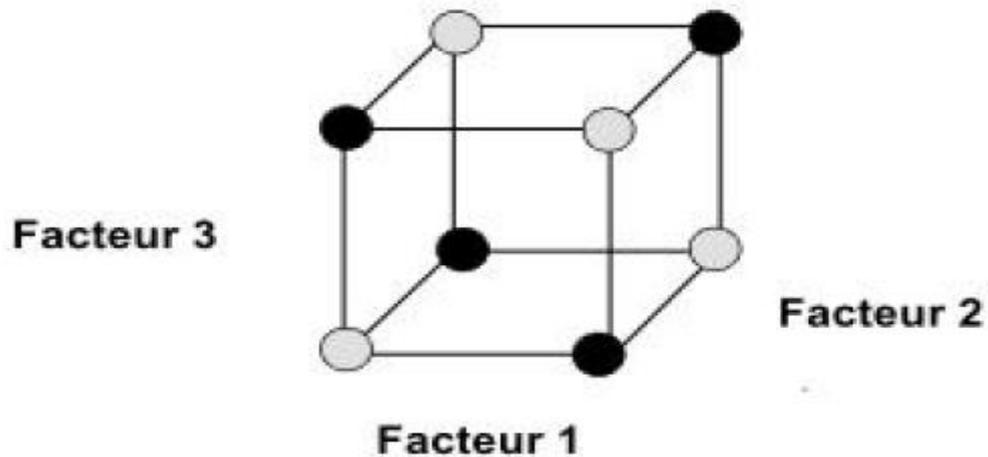


Figure 2.5-Définition du domaine expérimental [44]

- ✓ **Réponses :** Les réponses sont les propriétés à mesurer pour la variation d'un facteur.
 - réponses quantitatives continues : tels qu'un rendement, une viscosité, une résistance à la traction etc.
 - réponses quantitatives discontinues. : Il s'agit de réponses ne pouvant prendre que certaines valeurs discrètes;
- ✓ **Effet :** L'effet du facteur X sur la réponse Y est obtenu en examinant les différences dans les valeurs de Y en fonction de ce X . Si le facteur X a une interaction avec lui-même, nous parlons d'un effet carré. L'effet peut être positif, nul ou négatif. Il est exprimé par le multiplicateur de X dans un modèle mathématique de réponse. L'importance de l'effet de X sur Y est donnée par des tests statistiques.
- ✓ **Interaction:** Nous disons qu'il existe une interaction entre les facteurs X et X' "si l'effet de X dépend du niveau X' " et vice versa. Cette réaction est appelée réaction XX' ou $X'X$.

2.2.5.3 Type de facteurs

Les plans de construction et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés par l'étude. Il existe plusieurs types de facteurs. Nous conserverons les types de facteurs suivants: facteurs continus, facteurs discrets, les facteurs ordonnables, facteurs booléen [44].

- * **Facteurs continus** : La pression est un exemple de facteur continu. Dans une certaine plage de pression, toutes les valeurs possibles peuvent être choisies. Il en va de même pour la longueur, la focalisation ou la température. Ainsi, les valeurs prises par les facteurs continus sont représentées par des nombres continus.
- * **Facteurs discrets** : Peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.
- * **Facteurs ordonnables** : Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.
- * **Facteurs booléens** : sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

2.2.5.4 Type des plans d'expérience

a) Plans factoriels complète

Un plan factoriel complet est un plan pour lequel toutes les combinaisons possibles aux limites du domaine d'étude auront été réalisées : c'est le nombre maximal d'essais pour un plan d'expériences factoriel [45]. Le nombre d'essais N se calcule d'après la formule suivante : $N = P^k$ où k est le nombre de facteurs. Ces plans permettent l'étude de k facteurs à raison de P niveaux par facteur. Ils renferment toutes les combinaisons possibles des k facteurs à leurs P niveaux. Dans notre cas nous avons utilisé un plan factoriel complet de 125 essais.

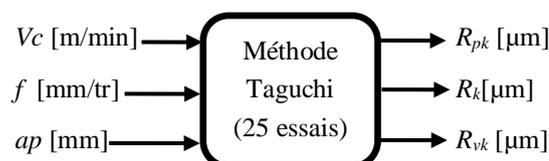
L'objectif de ce plan est d'analyser l'influence de différentes combinaisons de niveaux de fonction de mélange dans les paramètres de coupe (ap , Vc et f).

b) Tables de Taguchi

Afin de réduire le nombre d'essais par rapport au plan factoriel complet (PFC), l'expérience est basée sur la conception orthogonale L25 de Taguchi (25 essais). Cette méthode d'optimisation des paramètres de coupe diffère par rapport aux autres méthodes par : l'efficacité, la simplicité et la méthodologie [46]. En outre, la méthode de Taguchi peut être utilisée de plus en plus dans les recherches d'usinage [48]. Pour cela, un plan factoriel de trois facteurs a été sélectionné et chaque facteur possède cinq niveaux. Les niveaux présentés dans le tableau 2.7 sont choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant des outils de coupe. Le diagramme de la figure 2.6 représente les trois facteurs d'entrés et les trois réponses mesurées (sorties).

Tableau 2.7- Conditions de coupe et leurs niveaux

Niveau	Vc[m/min]	f [mm/tr]	ap [mm]
1	24	0,050	0,10
2	34	0,106	0,15
3	48	0,142	0,20
4	68	0,198	0,25
5	96	0,256	0,30

**Figure 2.6- Paramètres d'entrées/de sorties**

2.2.6 Méthode de modélisation

2.2.6.1 Méthodologie de surface de réponse (RSM)

La méthodologie de surface de réponse (RSM) (en anglais : Response Surface Methodology) est une procédure capable de déterminer une relation entre des paramètres de processus d'entrée indépendants et des données de sortie (réponse de processus) [6].

RSM est appliqué pour modéliser les données expérimentales, évaluer les effets des entrées et leurs interactions sur les réponses, et trouver les valeurs optimales des conditions de coupe. De plus, RSM permet de visualiser les effets des entrées dans les tracés 3D. L'estimation de la réponse (Y) est basée sur le modèle quadratique avec des interactions comme suit:

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^4 \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^4 \alpha_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j}^4 \alpha_{ij} X_i X_j \quad (2.4)$$

Où α_0 , α_i , α_{ii} et α_{ij} représentent respectivement les coefficients de régression des termes linéaire, quadratique et d'interaction. X_i révèle les variables codées correspondant à la vitesse de coupe (Vc), à la profondeur de coupe (ap), à la vitesse d'avancé (f) et au rayon de bec d'outil (r) [41].

2.2.6.2 Réseau de neurone artificiel (RNA)

Le réseau de neurones est le réseau de neurones interconnectés comme dans un cerveau humain qui produisent des signaux électriques de différents modèles. Il est conçu de manière à effectuer des tâches, similaires à un cerveau humain. Un réseau est construit par l'interconnexion de «neurones» ou «unités de traitement», et la capacité de traitement peut être améliorée en réglant les forces ou les poids de connexion inter-unités réduire l'erreur entre les valeurs réelles et prévues [48]. Cette technique a trouvé un large domaine d'application en raison de sa capacité

exceptionnelle à résoudre des problèmes très complexes, en particulier dans la fabrication. Afin d'obtenir des résultats significatifs, certaines propriétés fondamentales de cette technique, telles que le type de réseau, l'architecture de réseau et les paramètres de formation du réseau, doivent être soigneusement sélectionnées [41]. voici la figure 2.7.

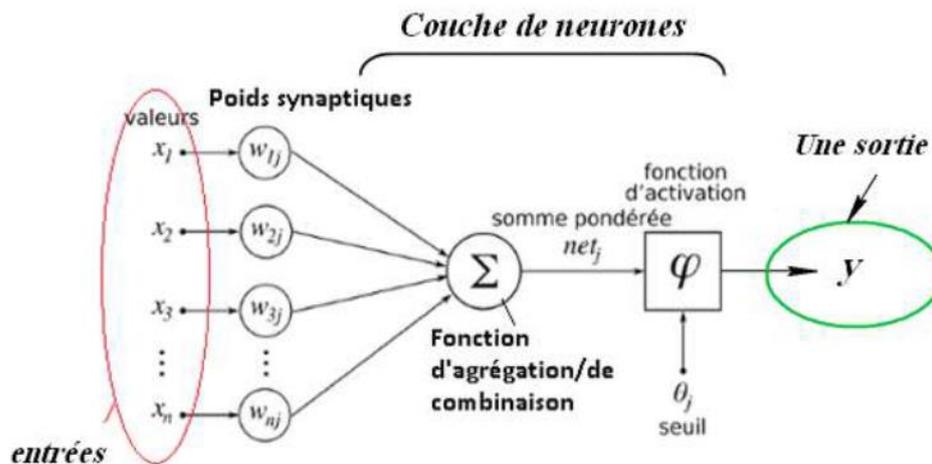


Figure 2.7- Schéma d'une couche de neurones [31]

Pour chaque réponse de sortie, un paradigme ANN à anticipation multicouche avec un seul nœud dans la couche de sortie et quatre neurones dans la couche d'entrée est utilisé. Le réseau a été construit progressivement, en augmentant à la fois le nombre de couches cachées et les nœuds jusqu'à ce qu'ils atteignent une architecture adaptée. La plus grande partie des données expérimentales est utilisée pour la formation en réseau et le reste est utilisé pour la validation. L'algorithme de propagation arrière, basé sur la règle de descente de gradient, est adopté pour l'entraînement en réseau. Le principe de cet algorithme est de rechercher la valeur minimale de l'erreur quadratique moyenne (MSE) en présentant les modèles entrée-sortie les uns après les autres, afin que les poids soient mis à jour à chaque fois. La minimisation se fait en ajustant les poids de la couche de sortie à la couche d'entrée. [41]Le MSE est calculé en utilisant Eq. (2.5):

$$MSE_r = \frac{1}{2} (D_r - O_r)^2 \quad (2.5)$$

Où D_r est la valeur expérimentale correspondant au numéro d'exécution r , et O_r la valeur obtenue par le réseau.

La direction de la mise à jour du poids est déterminée par le signe de la dérivée. L'algorithme s'exécute jusqu'à atteindre une valeur de fonction de performance définie ou un nombre maximum de tours de 500. La fonction de performance est la somme moyenne des erreurs de carrés pour l'ensemble des données, exprimée comme suit:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N (D_r - O_r)^2 \quad (2.6)$$

Le processus d'apprentissage nécessite que le changement de poids se fasse par étapes infinitésimales. À cette fin, un paramètre appelé taux d'apprentissage (η) est utilisé, généralement compris entre 0 et 1. Ce paramètre influence de manière significative les performances du réseau. Si le taux d'apprentissage est trop important (proche de 1), il peut se produire une oscillation et, s'il est trop petit (proche de 0), le temps de calcul augmente. Ainsi, afin de réduire le temps de calcul et l'effet d'oscillation, le taux d'apprentissage est fixé à 0,1. Le logiciel JMP 11 est utilisé pour la formation et la validation du réseau.

2.2.7 Méthode d'optimisation

Cette méthode permet d'optimiser l'agencement et l'exécution des expériences, dans le but d'arriver à une modélisation mathématique, pour simuler des processus systèmes complexes. Mais cette méthode selon qu'elle soit mono objective ou multi-objectives, le nombre d'essais et la manière de traitement peut différer.

2.2.7.1 Méthode mono-objectives

a) Méthode de Taguchi

Les techniques de Taguchi ont été largement utilisées dans la conception technique (Ross, 1996) (Phadke, 1989). La confiance principale des techniques de Taguchi est l'utilisation de la conception de paramètres, qui est une méthode d'ingénierie pour la conception de produits ou de processus qui se concentre sur la détermination des paramètres (facteurs) de paramètres produisant les meilleurs niveaux d'une caractéristique de qualité (mesure de performance) avec une variation minimale. Les conceptions Taguchi fournissent une méthode puissante et efficace pour concevoir des processus qui fonctionnent de manière cohérente et optimale dans une variété de conditions. Pour déterminer la meilleure conception, il nécessite l'utilisation d'une expérience conçue de manière stratégique, qui expose le processus à différents niveaux de paramètres de conception[49].

La méthode Taguchi est une technique puissante de résolution de problèmes pour améliorer les performances et la productivité des processus. Il permet de trouver des réponses aux problèmes qui doivent réduire, par exemple, les coûts de reprise et les coûts de fabrication en raison de la trop grande variabilité des processus. Taguchi [50] préconise l'utilisation de modèles de réseaux orthogonaux pour assigner les facteurs choisis pour l'expérience. Les conceptions de réseau orthogonal les plus couramment utilisées sont L8 (c'est-à-dire huit essais expérimentaux), L16 et L18. La puissance de la méthode Taguchi est d'intégrer des méthodes statistiques dans le processus d'ingénierie. Dans notre travail, nous avons mené une étude à partir d'une table orthogonale (L25) de Taguchi pour mesurer l'effet des trois paramètres retenus (V_c, f et ap).

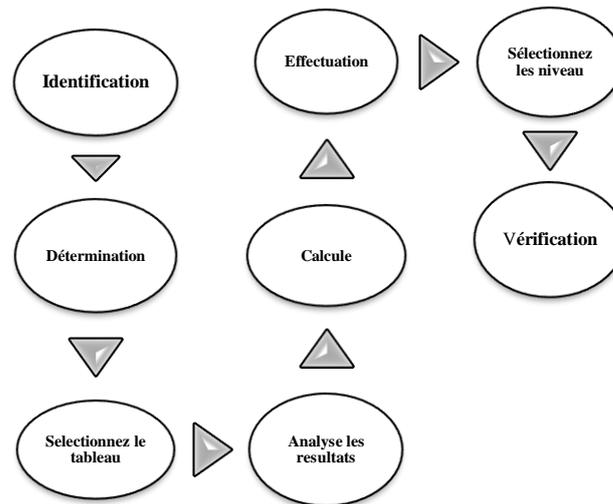


Figure 2.8- Les étapes de l'utilisation de la méthode de Taguchi

II.2.7.2 Méthodes multi-objectives

L'optimisation multi-objectifs fait partie intégrante des activités d'optimisation et a une importance pratique considérable, car presque tous les problèmes d'optimisation du monde réel sont parfaitement adaptés pour être modélisés à l'aide de plusieurs objectifs conflictuels. Il contient deux types de méthodes :

a) Méthode d'analyse relationnelle grise (GRA)

L'analyse relationnelle en gris est une technique proposée pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant le multi-objectif en un objectif unique pour obtenir une combinaison optimale de paramètres pour l'amélioration simultanée de plusieurs caractéristiques d'usinage [51].

L'utilisation de cette méthode contient les étapes suivantes:

Étape 1: Génération relationnelle grise

Selon l'optimisation de l'objectif visé pour minimiser ou maximiser les résultats expérimentaux, la normalisation du rapport S/N pour les résultats expérimentaux dans la plage entre zéro et un est nécessaire pour la génération relationnelle grise. En fonction de l'optimisation de la fonction objective, la normalisation peut être effectuée dans deux cas. Si le plus petit-le-meilleur est la caractéristique sélectionnée dans la séquence originale pour la minimisation, alors il devrait être normalisé en la formule suivante:

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (2.7)$$

Si la réponse doit être maximisée, alors les caractéristiques préférer plus grands sont destinées à être normalisées pour être mises à l'échelle dans une plage acceptable en la formule suivante [52] :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (2.8)$$

Où :

x est la valeur souhaitée.

$i=1, \dots, m$; $k=1, \dots, n$; m est le nombre de données expérimentales et n est le nombre de réponses.

$x_i^0(k)$ désigne la séquence originale.

$x_i(k)$ désigne la séquence après le prétraitement des données.

$\text{Max}x_i^0(k)$ représente la plus grande valeur de $x_i^0(k)$.

$\text{Min}x_i^0(k)$ représente la plus petite valeur de $x_i^0(k)$.

La plus grande valeur des résultats normalisés indique la meilleure caractéristique de performance et les résultats les mieux normalisés seront égaux à un.

Étape 2: Coefficient Relationnel Gris (GRC)

Le coefficient de corrélation gris ($\eta_i(k)$) décrit la corrélation entre les résultats idéaux et expérimentaux obtenus. Il peut être calculé comme suit [52] :

$$\eta_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \omega \Delta_{max}}{\Delta_{oi} + \omega \Delta_{max}} \quad (2.9)$$

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

- $\Delta_{oi}(k)$ Est la différence absolue entre la séquence de référence $x_0^k(k)$ et le rapport S/N de la suite mesurée $x_i^k(k)$.
- ω est le coefficient de distinction ou d'indentification est comprise entre 0 et 1.
- Δ_{min} et Δ_{max} sont les valeurs minimales et maximales des différences absolues ($\Delta_{oi}(k)$) de toutes les séquences de comparaison.

$$\Delta_{oi}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (2.10)$$

Étape 3: Grey Relationnel Grade (GRG)

La note relationnelle grise représente la corrélation entre les séries, elle est donnée par la formule suivante:

$$\alpha_i = \frac{1}{n} + \sum_{k=1}^n \eta_i(k) \quad (2.11)$$

Où

- n est le nombre de réponses.
- α_i est le degré de relation gris requis pour l'expérience.

Étape 4: Détermination des paramètres d'usinage optimum

Une fois la note relationnelle grise calculée, la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est basée sur le graphique des effets principaux pour (GRG). La plus grande valeur de nuance relationnelle grise trouvée près de la valeur normalisée idéale correspond à la combinaison optimale. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres de processus est le niveau ayant la plus grande valeur GRG.

Étape 5: tests de confirmation

Afin d'améliorer les performances du système, le test de vérification est effectué à la dernière étape pour s'assurer que la fiabilité des niveaux optimaux est suggérée par une analyse de gris relationnelle. En comparant la valeur du rapport S / N du GRG obtenu à partir du test optimal avec celle prédite par la formule suivante en utilisant des niveaux optimaux [51].

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (2.12)$$

Où

η_m : est la moyenne totale du rapport S/N,

$\bar{\eta}_i$: est la moyenne du rapport S/N au niveau optimal,

q : est le nombre de facteurs d'entrée principaux qui ont un effet significatif sur les réponses en sortie.

b) Méthode de la fonction de désirabilité (DF)

L'approche de fonction de désirabilité est en effet appropriée à la méthodologie de la surface de réponse, son principe est d' dimensionner toutes les réponses $Y_j(x)$, $j = 1, 2, 3, \dots, p$, obtenues à partir de différentes échelles de mesure, en des fonctions $d_j(Y_j(x))$ d'échelle identique, appelées fonctions de désirabilité individuelle variant de 0 à 1. On entend par x le vecteur des facteurs $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ [23].

Après avoir défini les fonctions pour chaque réponse individuellement, une fonction objective globale est définie comme une moyenne géométrique des différentes désirabilités.

$$D(x) = [d_1(Y_1(x)) \cdot d_2(Y_2(x)) \dots \dots d_p]^{\frac{1}{p}} \quad (2.13)$$

La fonction de désirabilité $d_j(Y_j(x))$ a été proposée originalement par de deux façons : [54]

$$d_j(Y_j(x)) = e^{Y_j(x)} \quad (2.14)$$

$$d_j(Y_j(x)) = e^{-|Y_j(x)|} \quad (2.15)$$

Puisque les transformations (2.14) ou (2.15) ne sont pas très flexibles dans le sens où ces fonctions ne peuvent pas assumer une variété de formes, [54] et autres ont proposé deux autres fonctions :

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_j(x) \leq Y_{\min j} \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_j}\right)^r & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 1 & \text{si } Y_j(x) \geq Y_{\max j} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{T_j - Y_{\min j}}\right)^s & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq T_j \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\max j}}{T_j - Y_{\max j}}\right)^t & \text{si } T_j \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 0 & \text{si } Y_j(x) \notin [Y_{\min j}; Y_{\max j}] \end{cases} \quad (2.17)$$

T_j la valeur cible pour une réponse j

$Y_{\min j}$ et $Y_{\max j}$ les limites de désirabilité

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

L'étape qui suit consiste à remplacer les polynômes $Y_j(x)$ développé par la méthodologie de surface de réponse dans les fonctions de désirabilités individuelles, qui seront eux-mêmes remplacé dans la fonction objective globale. Finalement, il ne reste qu'à maximiser la fonction objective globale $D(x)$.

Pour la méthodologie de la surface de réponse l'utilisation des variables codées (ou des variables centrées réduites) pour trouver le modèle de régression pour p variables est une pratique courante. La relation la plus répandue pour la transformation des variables réelles en variable codées a été proposée par [55] :

$$x = \frac{2t-(u+l)}{u-l} \quad (2.18)$$

Pour laquelle :

u : est la valeur supérieure pour t

l : est la valeur inférieure pour t

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

x : est la valeur codée qui correspond à t.

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthodologie des plans d'expériences qui à l'objectif de minimiser le plus possible le nombre d'essais à mener sans sacrifier la précision sur les résultats. Une attention particulière aux méthodes d'optimisations et modélisation cela se fait utilisant la méthodologie RSM associée à l'amélioration des réponses (désirabilité) et aux réseaux de neurones artificiels ANN. Outre deux méthodes d'amélioration, la première est une méthode mono-cible basée sur l'approche Taguchi, et la seconde est une méthode multi-objective basée sur deux méthodes (GRA, DF).

NB : La partie expérimentale a été réalisée par l'encadreur **Hamdi Amine au niveau de laboratoire d'optique appliquée (LOA), de l'institut d'optique et mécanique de précision, université Ferhat Abbas, Sétif 1, Algérie.**

CHAPITRE 3

Modélisation des paramètres de la courbe du taux de portance

3.1 Introduction

Ce chapitre, donne une étude statistique des trois paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}) en fonction des variables de coupe (vitesse de coupe V_c , vitesse d'avance f et profondeur de passe ou de coupe ap) lors de tournage d'acier 16MC5 de dureté 52 HRC. Cette étude repose sur deux méthodes de modélisation, la première se concentre sur la méthodologie de surface de réponse (RSM) et la deuxième utilise le réseau de neurones artificiels (ANN). En outre, le but est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés de la courbe d'Abbott-Firestone. A la fin de ce chapitre, une comparaison entre les modèles mathématiques obtenus par la méthode de réseau de neurones artificiels et la méthode de régression a été faite.

3.2 Modélisation par la méthodologie de surface de réponse (RSM)

3.2.1 Analyse de la variance (ANOVA)

Pour faire l'analyse de variance (ANOVA) nous avons utilisé un logiciel de statistiques appelé "MINITAB 16", utilisé pour la conception expérimentale de Taguchi (L25).

Les tableaux suivants (3.1-3.3) résument l'analyse de la variance (ANOVA) de trois paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}) en fonction des paramètres d'usinage et de leurs interactions et produits.

Tableau 3.1- Analyse de la variance de paramètre R_{pk}

Source	DL	SC	MC	F	P	Cont. %	Remarques
Modèle	9	17.2982	1.9220	68.41	< 0.0001	97.62	Signifiant
V_c	1	6.6771	6.6771	237.67	< 0.0001	37.68	Signifiant
f	1	3.8398	3.8397	136.68	< 0.0001	21.67	Signifiant
ap	1	0.2385	0.2384	8.49	0.011	1.346	Signifiant
$V_c \times f$	1	0.0292	0.0292	1.04	0.324	0.165	Insignifiant
$V_c \times ap$	1	0.0071	0.0071	0.25	0.622	0.040	Insignifiant
$f \times ap$	1	0.0034	0.0033	0.12	0.7333	0.019	Insignifiant
V_c^2	1	0.2250	0.2250	8.01	0.013	1.269	Signifiant
f^2	1	0.1510	0.1509	5.37	0.035	0.852	Signifiant
ap^2	1	0.0021	0.0021	0.08	0.787	0.012	Insignifiant
Erreur	15	0.4214					
Total	24	17.7196					

Le tableau 3.1 montre que parmi les paramètres de coupe significatifs sur la hauteur des pics saillants (R_{pk}), la vitesse de coupe apparaît comme le paramètre le plus significatif avec une contribution de 37,68%, suivie par la vitesse d'avance avec un pourcentage de contribution égal

21,67%, tandis que la profondeur de coupe est le dernier paramètre significatif avec un faible pourcentage de 1,346%. Concernant les interactions et les produits, il semble clair que les deux produits significatifs sont : $V_c \times V_c$ et $f \times f$ avec une contribution 1,269%, 0,852% respectivement.

Tableau 3.2 - Analyse de la variance de paramètre R_k

Source	DL	SC	MC	F	P	Cont. %	Remarques
Modèle	9	18.2400	2.02666	87.80	<0.0001	98.137	Signifiant
V_c	1	6.9985	6.99853	303.21	<0.0001	37.65	Signifiant
f	1	4.4392	4.43922	192.33	<0.0001	23.884	Signifiant
ap	1	0.2011	0.20109	8.71	0.010	1.082	Signifiant
$V_c \times f$	1	0.0590	0.05902	2.56	0.131	0.317	Insignifiant
$V_c \times ap$	1	0.0526	0.05263	2.28	0.152	0.283	Insignifiant
$f \times ap$	1	0.0047	0.00472	0.20	0.657	0.025	Insignifiant
V_c^2	1	0.2632	0.04366	1.89	0.189	1.416	Insignifiant
f^2	1	0.1956	0.18326	7.94	0.013	1.052	Signifiant
ap^2	1	0.0156	0.00685	0.30	0.594	0.277	Insignifiant
erreur	15	0.3462	0.2308				
total	24	18.5862					

A partir de l'analyse de la variance (ANOVA) de la profondeur de rugosité du cœur (R_k) (tableau 3.2), on peut constater que les trois conditions de coupe (V_c , f et ap) ont un effet significatif sur le paramètre de sortie (R_k). Cependant, la vitesse de coupe (V_c) est le facteur le plus important influençant la profondeur de rugosité du cœur (R_k) avec une contribution de 37,65%. Le facteur suivant influant la profondeur de rugosité du cœur (R_k) est la vitesse d'avance (f) suivi par la profondeur de coupe (ap), leurs contributions étant : 23,88% et 1,082%, respectivement. La contribution de produit de la vitesse d'avance ($f \times f$) est 0,986%. Les autres termes ont une contribution inférieure à 0,5%.

Comme indiqué le tableau 3.3, les deux vitesses (V_c et f) et le produit ($V_c \times V_c$) sont les paramètres significatifs sur la profondeur des creux profonds R_{vk} . Le plus significatif étant la vitesse de coupe avec un pourcentage de contribution de 36,91%, suivi par la vitesse d'avance (19,50%) et le produit de la vitesse de coupe ($V_c \times V_c$) avec une faible contribution de 1,801%. Les autres termes non significatifs ont une contribution inférieure à 1%. D'après les résultats de recherche de Agrawal et al [56] obtenus à travers 39 essais de tournage dur d'acier AISI 4340 de dureté 69 HRC, la vitesse d'avance suivie par la vitesse de coupe et la profondeur de coupe sont les paramètres affectant de manière significative la rugosité moyenne arithmétique (R_a). Selon Alok et al [57], l'analyse ANOVA de tournage dur à sec d'acier AISI 52100 avec une nouvelle plaquette en carbure revêtue HSN² indique que la vitesse de coupe est la première condition de coupe

significative sur la force de coupe avec une contribution égale 89,13%, suivie de la profondeur de coupe (2,57%) et enfin la vitesse d'avance (2,28%).

Tableau 3.3 - Analyse de la variance de paramètre R_{vk}

Source	DL	SC	MC	F	P	Cont. %	Remarques
Modèle	9	4.0483	0.4498	55.87	<0.0001	97.10	Signifiant
V_c	1	1.5387	1.5387	191.14	<0.0001	36.90	Signifiant
f	1	0.8131	0.8131	100.99	<0.0001	19.50	Signifiant
ap	1	0.0243	0.0243	3.02	0.103	0.582	Insignifiant
$V_c \times f$	1	0.1420	0.0142	1.76	0.204	3.406	Insignifiant
$V_c \times ap$	1	0.0002	0.0002	0.03	0.873	0.479	Insignifiant
$f \times ap$	1	0.0010	0.0010	0.13	0.720	0.024	Insignifiant
V_c^2	1	0.0752	0.0751	9.34	0.008	1.803	Signifiant
f^2	1	0.0144	0.0144	1.79	0.201	0.345	Insignifiant
ap^2	1	0.0006	0.0006	0.08	0.787	0.014	Insignifiant
Erreur	15	0.1207	0.0080				
Total	24	4.1691					

Le diagramme des effets principaux et leurs interactions pour les paramètres R_{pk} , R_k et R_{vk} sont représentés par les figures suivantes (3.1-3.3), respectivement.

Graphique des effets principaux pour R_{pk}

Moyennes des données

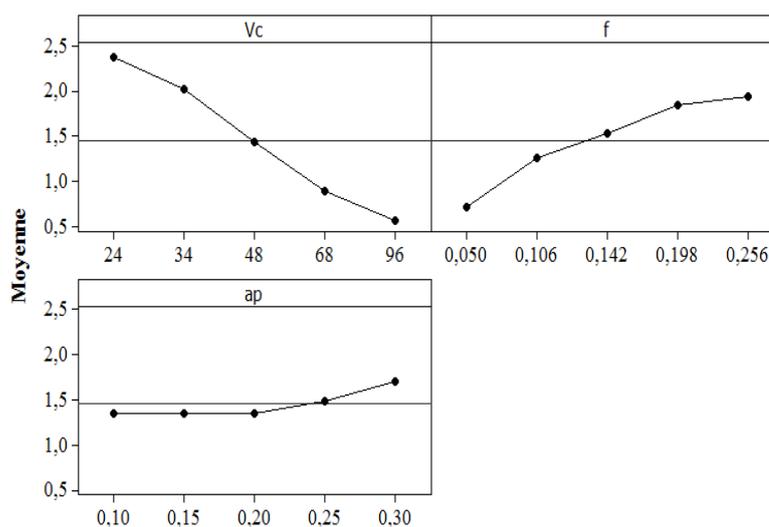


Figure 3.1- Graphiques des effets principaux et des interactions pour le paramètre R_{pk}

À partir de ces figures (3.1-3.3), il apparaît clairement que la vitesse de coupe (V_c) affecte fortement les rugosités R_{pk} , R_k et R_{vk} , l'avance par tour (f) a un effet moyen sur l'évolution des rugosités R_{pk} , R_k et R_{vk} . En outre, le troisième paramètre de coupe (ap) à aucune influence significative n'a été observé sur les trois critères de rugosité.

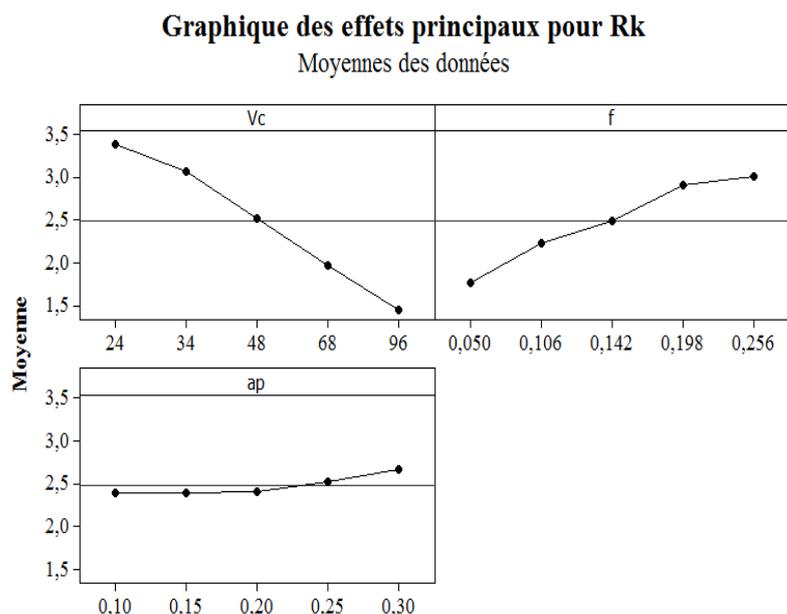


Figure 3. 2 - Graphiques des effets principaux et des interactions pour le paramètre R_k

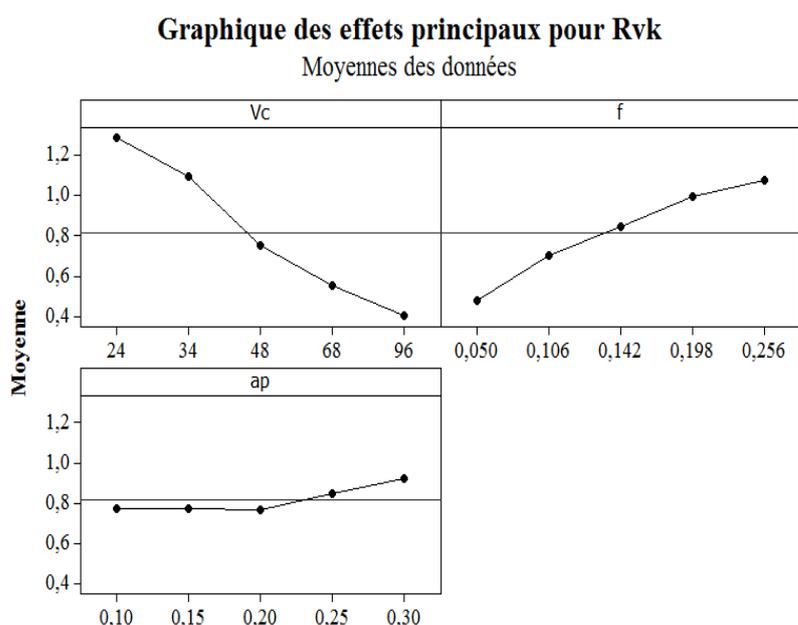


Figure 3.3- Graphiques des effets principaux et des interactions pour le paramètre R_{vk}

3.2.2 Analyse de régression

La modélisation ayant été réalisée à l'aide du logiciel de modélisation MINITAB 16, les différentes corrélations statistiques ont été développées par analyse de régression. Les équations (3.1) à (3.6) donnent les informations générales de régression, L'analyse de régression apparaît comme une technique dans le but d'étudier la relation fonctionnelle entre la variable dépendante et les variables indépendantes (Vc , f et ap) [58]. Sur la base des résultats expérimentaux, la régression quadratique est utilisée pour déterminer la relation entre les conditions de coupe et les trois paramètres de la courbe de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}). Le coefficient de déterminations multiples R^2

mesure la proportion de variation dans les points de données. Si la valeur de R^2 est très proche de +1 (100%), l'équation est considérée comme significative[59].

Le modèle de la hauteur des pics saillants R_{pk} est donné par l'équation (3.1). Le coefficient de détermination de ce modèle est égal à 97.62%.

$$R_{pk} = 1.78980 - 0.0640460 \times V_C + 21.2196 \times f - 0.732955 \times a_p + 0.000340937 \times V_C^2 - 0.0622210 \times V_C \times f + 0.0310595 \times V_C \times a_p - 32.4492 \times f^2 - 8.50436 \times f \times a_p + 4.09748 \times a_p^2 \quad (3.1)$$

$$(R^2 = 97.62\%)$$

L'équation quadratique de régression de la profondeur de rugosité du cœur R_k est donnée par l'équation (3.2). La valeur du coefficient de détermination est de 98.14%.

$$R_k = 2.76157 - 0.0484485 \times V_C + 20.5352 \times f - 2.30906 \times a_p + 0.000150177 \times V_C^2 - 0.0884360 \times V_C \times f + 0.0844375 \times V_C \times a_p - 35.7491 \times f^2 + 10.0335 \times f \times a_p - 7.35965 \times a_p^2 \quad (3.2)$$

$$(R^2 = 98.14\%)$$

L'équation quadratique de la profondeur des creux profonds R_{vk} est donnée par l'équation (3.3). Le coefficient de détermination de ce modèle est égal à 97.10%.

$$R_{vk} = 0.836586 - 0.0307799 \times V_C + 9.32216 \times f + 1.75402 \times a_p + 0.000197061 \times V_C^2 - 0.0433723 \times V_C \times f + 0.00537516 \times V_C \times a_p - 10.0318 \times f^2 - 4.7768 \times f \times a_p - 2.19134 \times a_p^2 \quad (3.3)$$

$$(R^2 = 97.10\%)$$

Afin d'alléger les modèles, les termes qui n'ont pas un effet significatif sur les réponses sont éliminés et les équations précédentes sont données par les équations suivantes :

$$R_{pk} = 2.00556 - 0.624687 \times V_C + 14.1186 \times f + 1.70400 \times a_p + 0.0003016 \times V_C^2 - 26.4607 \times f^2 \quad (3.4)$$

$$R_k = 2.37785 - 0.0272354 \times V_C + 12.2201 \times f + 1.38400 \times a_p - 19.4691 \times f^2 \quad (3.5)$$

$$R_{vk} = 1.56121 - 0.0335750 \times V_C + 2.90055 \times f + 0.000176997 \times V_C^2 \quad (3.6)$$

3.2.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

Les trois modèles précédents des composantes de la courbe de portance peuvent être utilisés pour prédire la rugosité de surface. La figure 3.4 expose une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites des composantes de la courbe du taux de portance. Les résultats de la présente étude confirment que les valeurs réelles sont très proches des valeurs prédites. En outre, les trois modèles non-linéaires sont statistiquement significatifs avec ($P < 0,05$), et par cela la validité des modèles est confirmée. Ces modèles quadratiques pourraient probablement fonctionner pour prévoir les valeurs des paramètres de la courbe de portance dans l'intervalle des conditions de coupe utilisés.

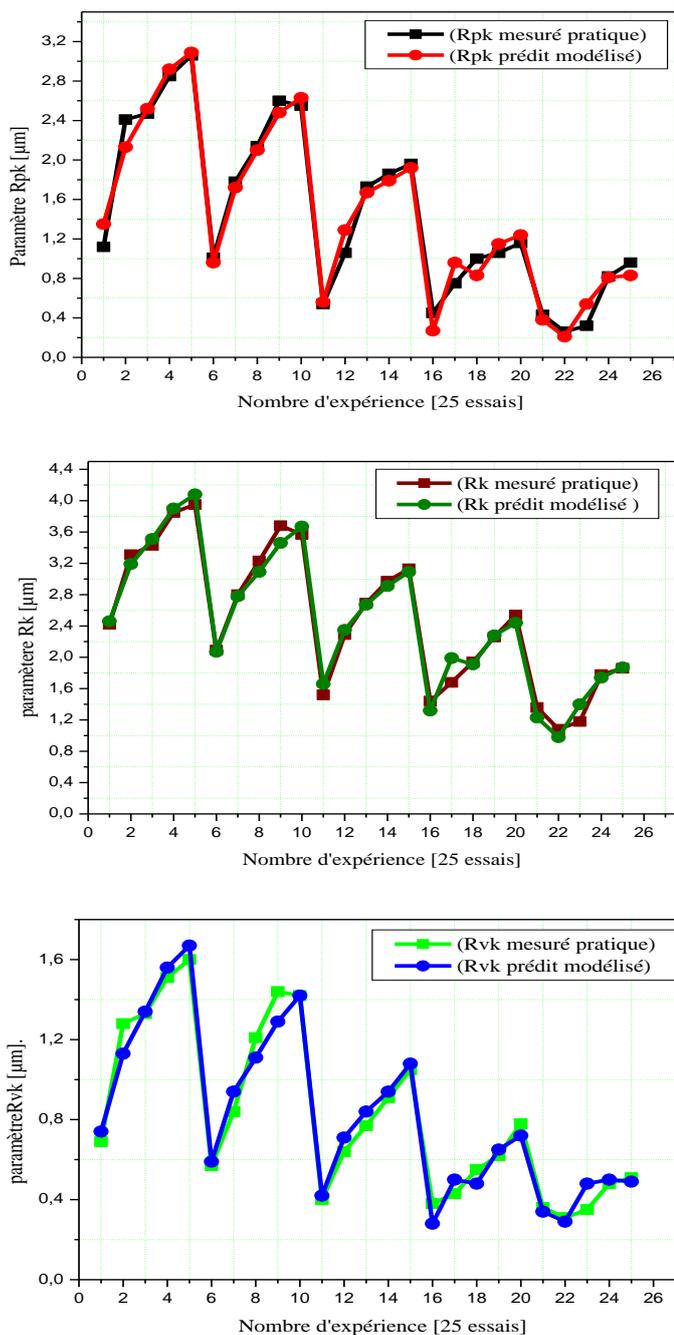


Figure 3.4- Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour les composantes de la courbe du taux de portance

Afin de vérifier les modèles mathématiques précédents en utilise l'analyse résiduelle. à l'aide du logiciel (Design Expert version 11) Les points en couleur dans les deux figures indiquent la valeur des paramètres de la courbe du taux de longueur portante. Les courbes de la probabilité normale de R_{pk} (a), R_k (b), et R_{vk} (c) sont illustrées dans la figure 3.5. Il est clair que les résidus se trouvent très proche par rapport à la ligne droite de la normalité, ce qui implique que les erreurs sont distribuées normalement. La figure 3.6 montre les résidus par rapport aux vingt-cinq (25) essais expérimentaux de R_{pk} (a), R_k (b), et R_{vk} (c). Les résidus ne présentent pas de tendance évidente et sont distribués dans les directions positives et négatives. Cela implique que la normalité semble être acceptable en plus de cela les coefficients de corrélation assez élevés.

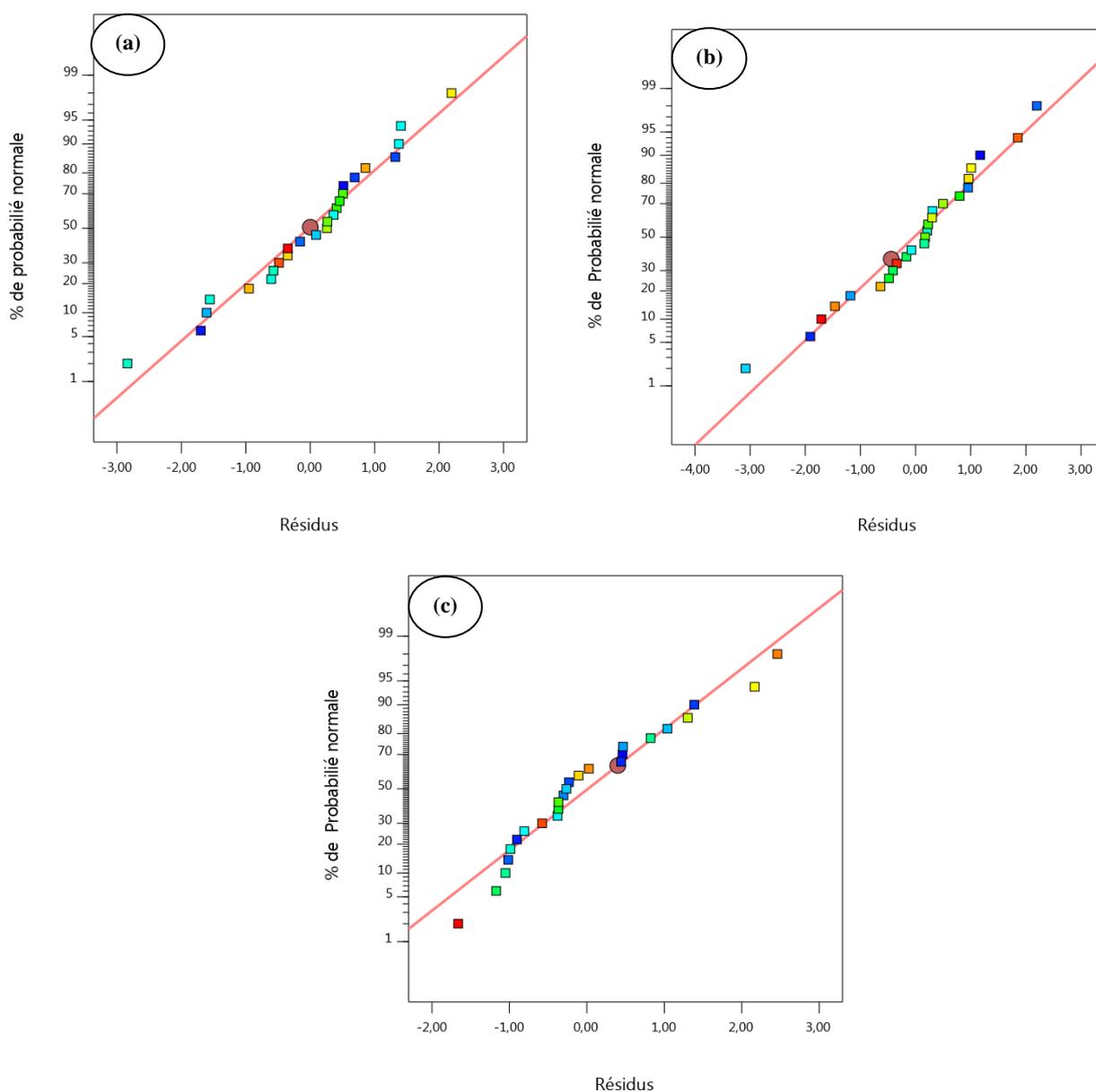


Figure 3.5- Probabilités normales des résidus pour: (a) R_{pk} , (b) R_k et (c) R_{vk}

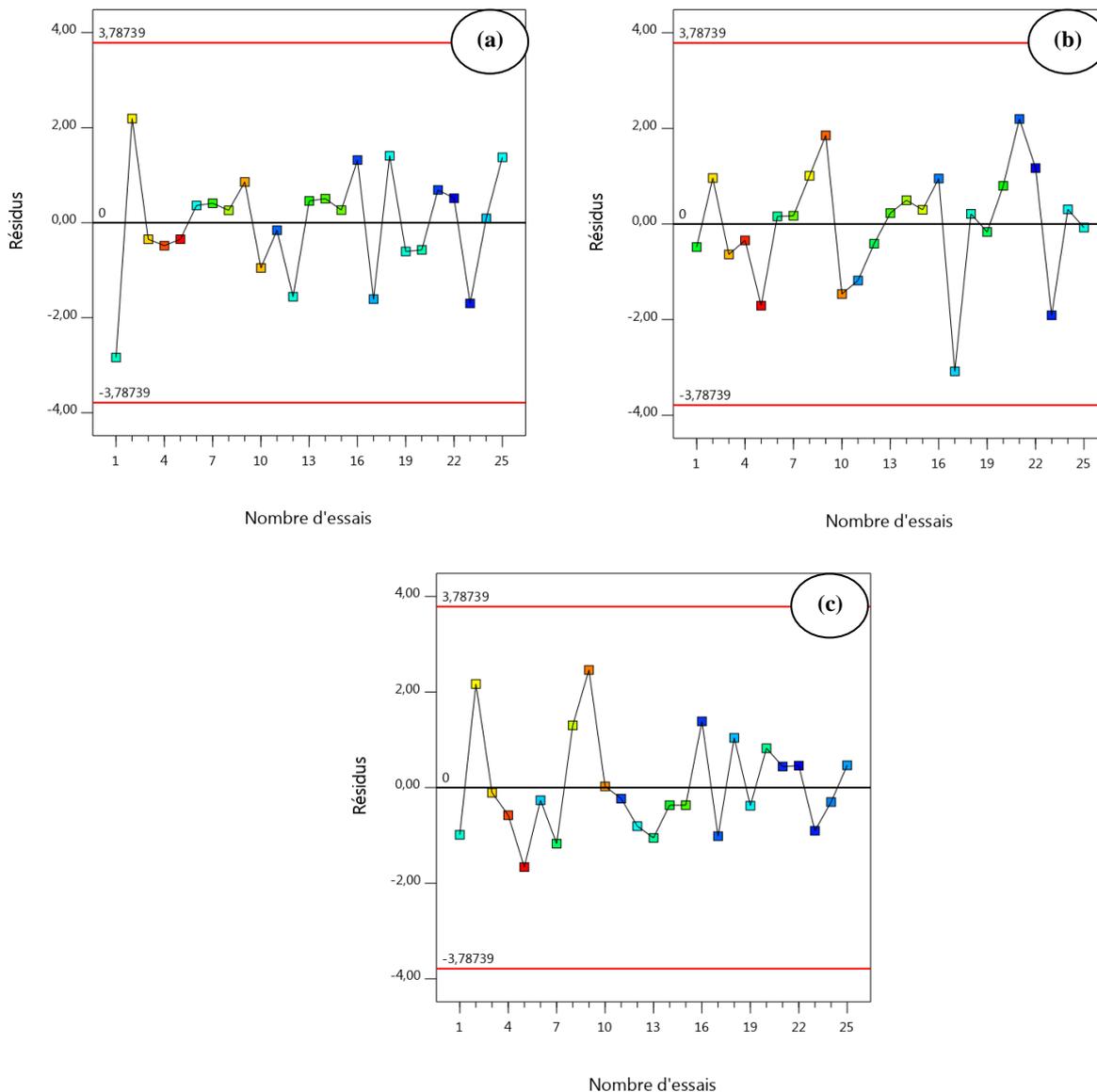
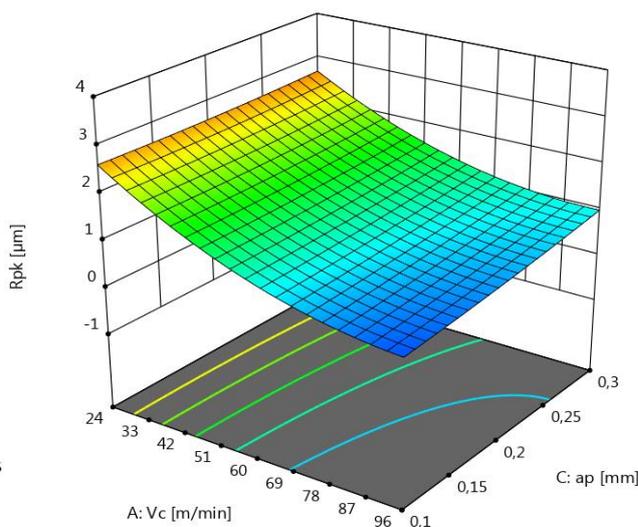
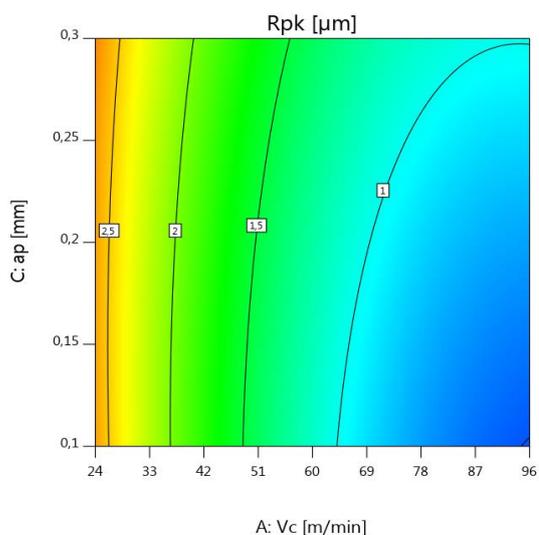
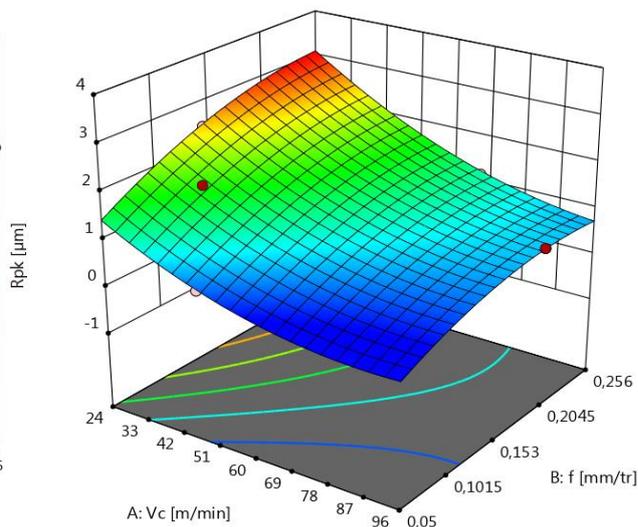
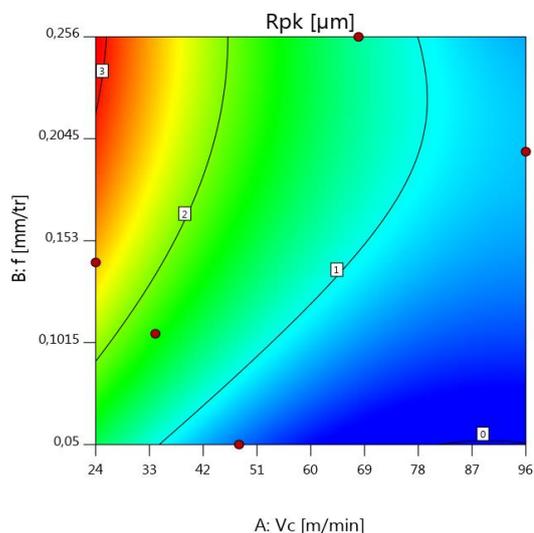


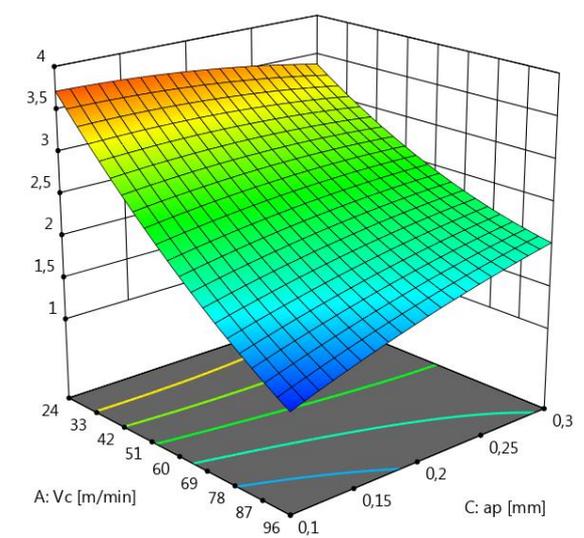
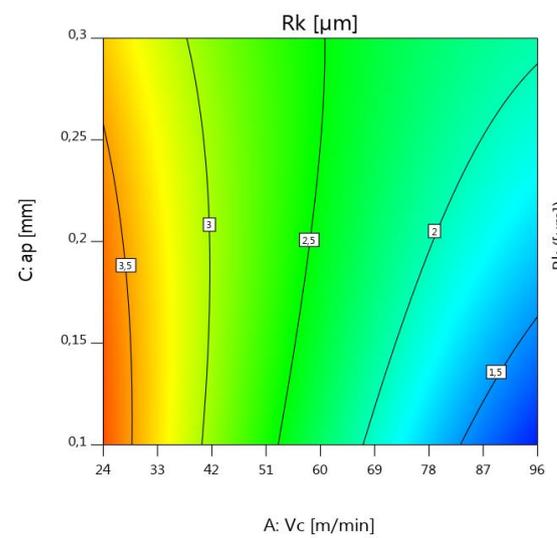
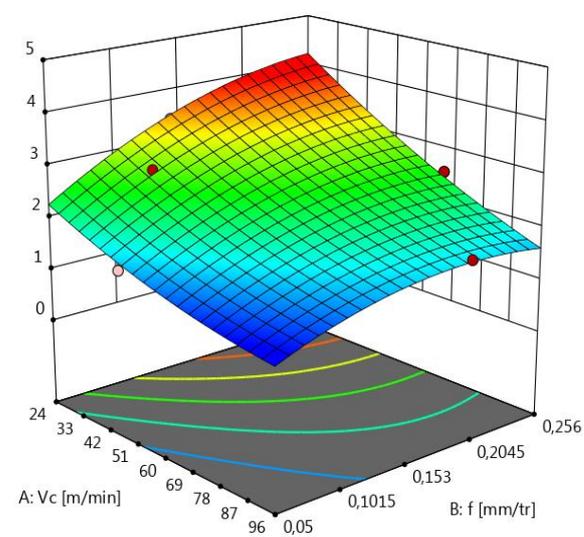
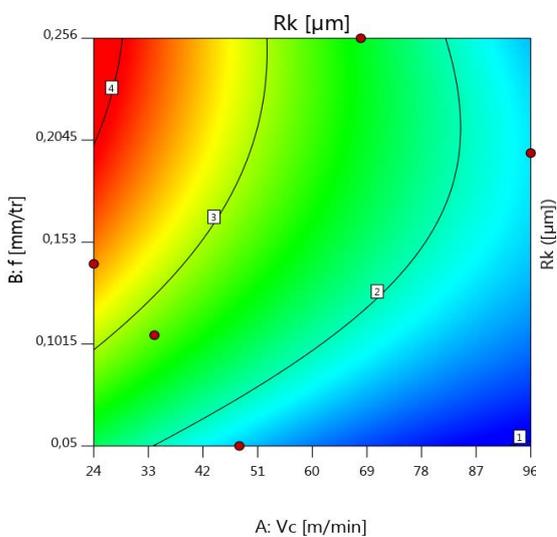
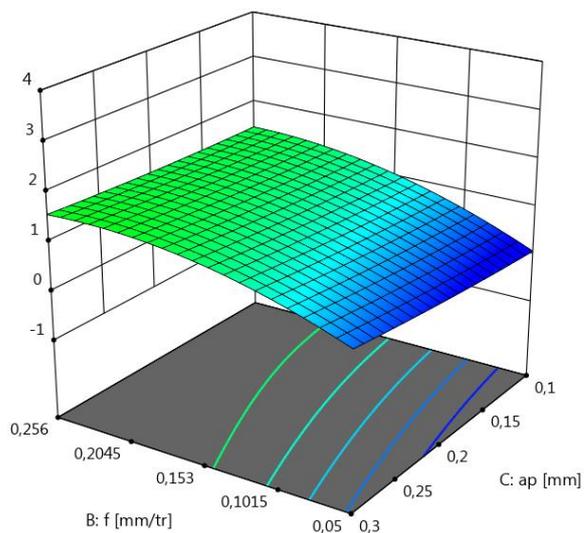
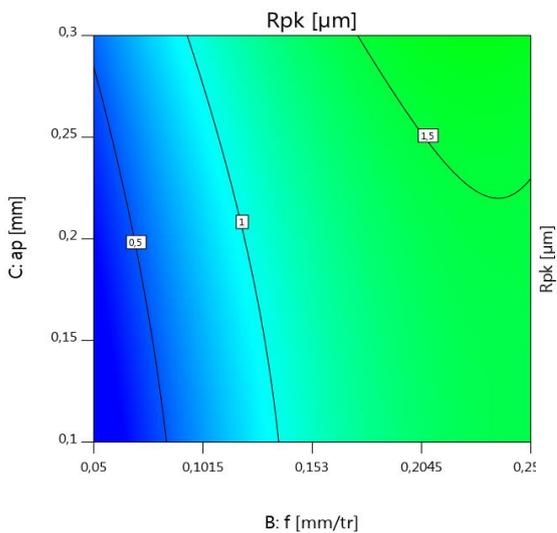
Figure 3. 6- Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour: (a) R_{pk} , (b) R_k et (c) R_{vk}

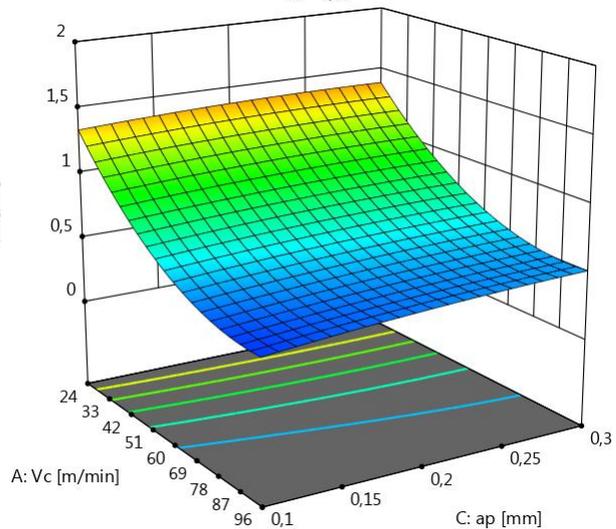
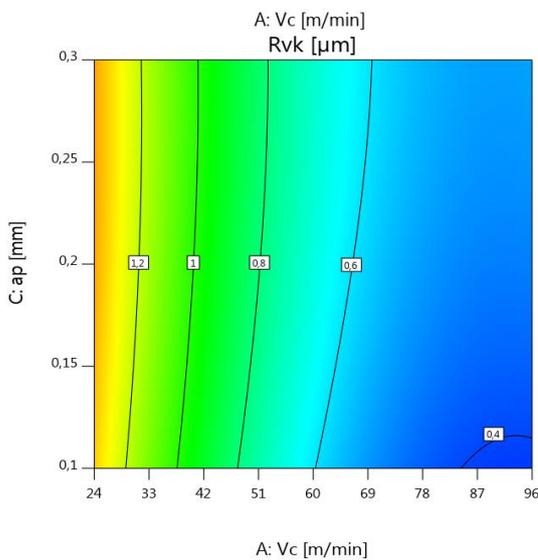
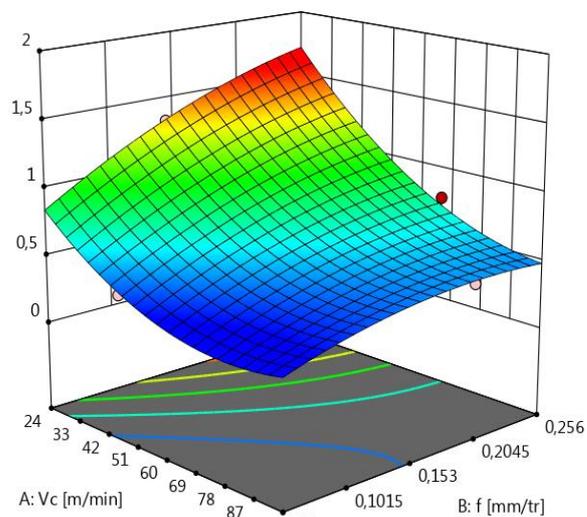
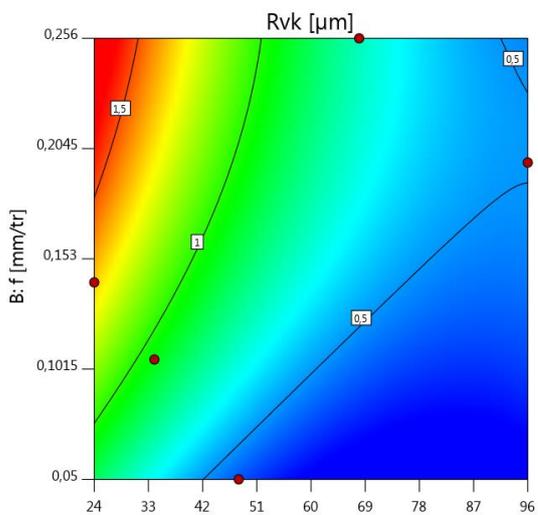
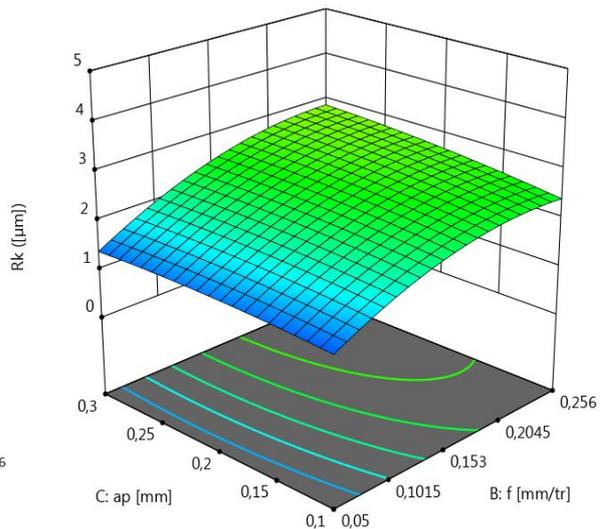
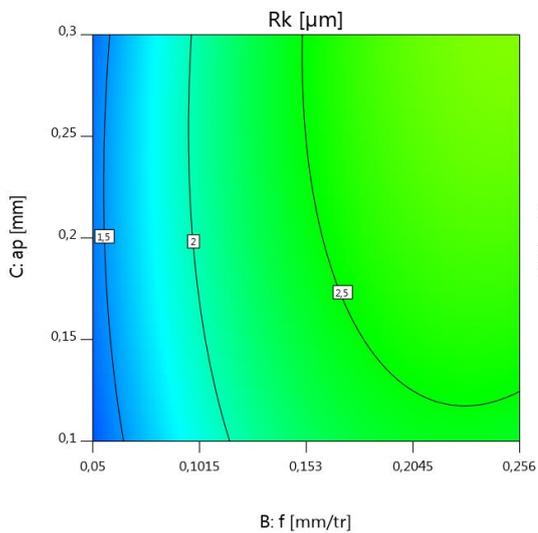
3.2.4 Analyse de surface de réponses

la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse ont été réalisés par l'utilisation des logiciels statistiques « Design-Expert 11 ». La figure 3.7 représente les graphiques de surface de réponse ((a) contours et (b) surface 3D) de trois variables dépendantes (R_{pk} , R_k et R_{vk}) sous l'effet des interactions de trois variables opératoires (V_c , f et ap). Donc, les interactions possibles sont : $V_c \times f$, $V_c \times ap$ et $ap \times f$. Dans la figure et pour chaque interaction, le facteur de contrôle non représenté est maintenu constant pour le niveau intermédiaire ($V_c = 48$ m/min, $f = 0,142$ mm/tr, $ap = 0,20$ mm). D'après cette figure, la pente de la vitesse de coupe est supérieure par rapport à la pente des deux autres facteurs de contrôle, ce qui implique que la vitesse de coupe (V_c) est la première condition de coupe affectant les paramètres de sortie. Le deuxième paramètre significatif est la vitesse d'avance (f) suivie par la profondeur de passe (ap). En outre, l'interaction ($V_c \times$

f) est apparue comme terme significatif des paramètres de la courbe de portance. Ces résultats sont en concordance avec le travail de chercheur Alok et al [57] qui ont trouvé que la vitesse de coupe est le paramètre le plus important qui influence la rugosité moyenne arithmétique (Ra). Selon la méthodologie de surface de réponse (RSM) effectuée par Hessainia et al [60] lors de tournage dur d'acier AISI 4140 de dureté 56 HRC, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe sont les deux conditions de coupe les plus affectant la rugosité moyenne arithmétique (Ra).







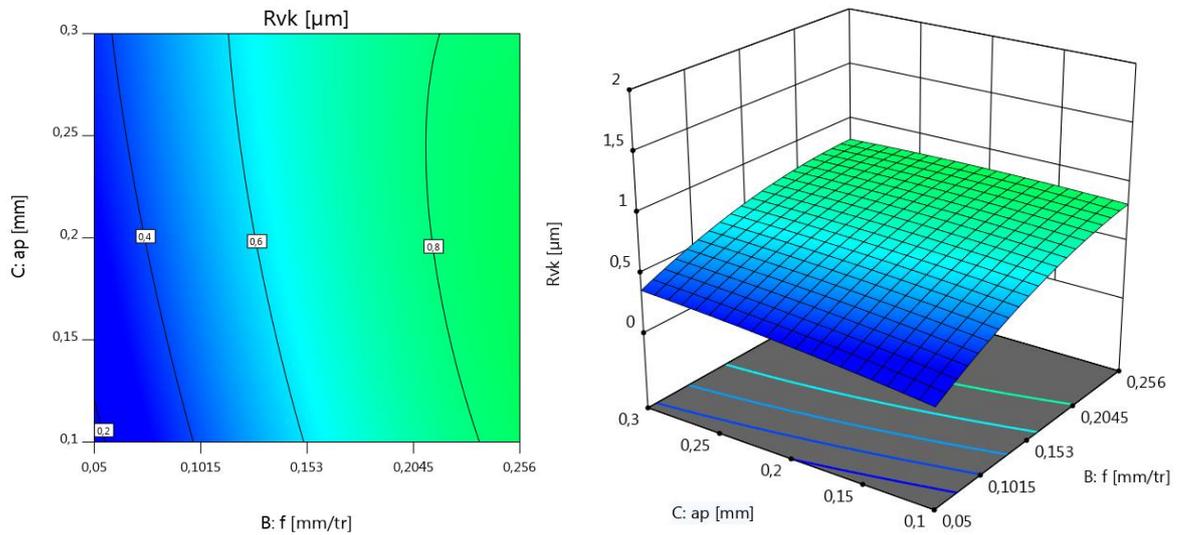


Figure 3.7- Graphique des contours et des surfaces de réponses en 3D des trois paramètres de BAC obtenues pour des différentes interactions

3.3 Modélisation par le réseau de neurones artificiels (RNA)

Le réseau de neurone artificiel (ANN) est une méthode de modélisation non-conventionnelle basée sur l'intelligence artificielle. Le perceptron multicouche de type Feed-forward a été utilisé afin de modéliser les trois paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}). De plus, les données expérimentales présentées dans le tableau 2.1 ont été exploitées pour établir les trois modèles. Le plan expérimental se compose de 25 essais, dont 20 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 5 essais ont été choisis aléatoirement pour l'étape de la validation. A l'étape de l'apprentissage du réseau, l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant a été choisi. La valeur de coefficient de corrélation R^2 est analysée sur la base de niveau de signification $\alpha = 0,05$, c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95%. L'étape qui reste est de déterminer l'architecture optimale, plusieurs structures de la couche cachée ont été testées pour chaque paramètre de sortie, la structure qui a donnée de meilleurs résultats a été choisie où la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est tend vers 0 et la valeur de coefficient de détermination (R^2) est supérieure à 0,95 (95%). L'architecture neurale optimale pour les deux paramètres R_{pk} et R_k est 3-6-1 (figure 3.8. (a)). Cette structure est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds (au nombre de paramètres), une seule couche cachée à 6 nœuds ayant une fonction d'activation tangente hyperbolique et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Concernant l'autre paramètre (R_{vk}), la structure ANN 3-7-1 a été choisie : une couche d'entrée à 3 nœuds, une seule couche cachée à 7 nœuds et une couche de sortie à 1 nœud (figure 3.8. (b)). Le logiciel JMP 11 est utilisé pour la formation et la validation du réseau.

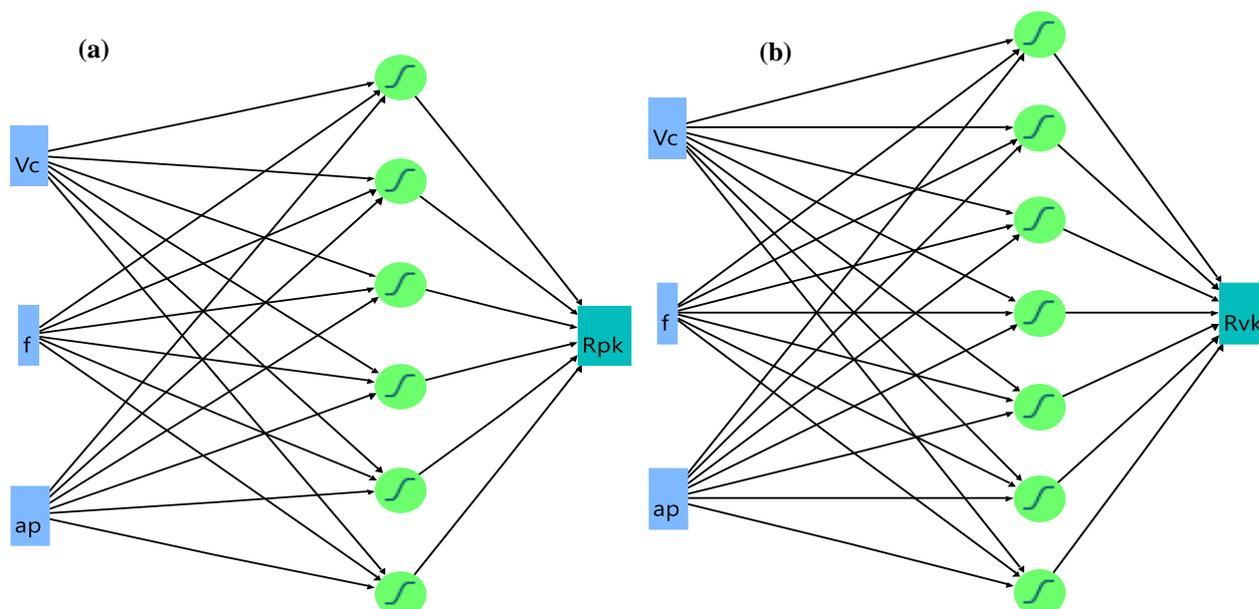


Figure 3. 8 - Structure du RNA des modèles: (a) paramètre R_{pk} et R_k , (a) paramètre R_{vk}

Le tableau 3.4 montre les résultats expérimentaux et prédites par les modèles de réseau de neurones artificiels des trois paramètres (R_{pk} , R_k et R_{vk}).

Tableau 3. 4– Résultats estimées par les trois modèles neuronaux (R_{pk} , R_k et R_{vk})

N° d'essai	Valeurs réelles			Réponses					
	V_c [m/min]	f [mm/tr]	ap [mm]	R_{pk} (exp) [μ m]	R_{pk} (pré) [μ m]	R_k (exp) [μ m]	R_k (pré) [μ m]	R_{vk} (exp) [μ m]	R_{vk} (pré) [μ m]
1	24	0.050	0.10	1,12	1,12	2,42	2,42	0,69	0,69
2	24	0.106	0.15	2,41	2,41	3,31	3,26	1,28	1,28
3	24	0.142	0.20	2,47	2,47	3,43	3,62	1,33	1,33
4	24	0.198	0.25	2,85	2,85	3,85	3,85	1,51	1,51
5	24	0.256	0.30	3,06	3,05	3,95	3,95	1,6	1,6
6	34	0.050	0.15	1,01	1,01	2,09	2,09	0,57	0,57
7	34	0.106	0.20	1,78	1,78	2,8	2,79	0,84	0,84
8	34	0.142	0.25	2,14	2,14	3,23	3,23	1,21	1,21
9	34	0.198	0.30	2,6	2,6	3,68	3,67	1,44	1,32
10	34	0.256	0.10	2,55	2,56	3,57	3,56	1,42	1,42
11	48	0.050	0.20	0,54	0,53	1,52	1,79	0,4	0,4
12	48	0.106	0.25	1,06	1,06	2,29	2,29	0,64	0,57
13	48	0.142	0.30	1,73	1,73	2,69	2,68	0,77	0,77
14	48	0.198	0.10	1,86	1,86	2,97	2,96	0,91	0,91
15	48	0.256	0.15	1,96	1,95	3,13	3,13	1,05	1
16	68	0.050	0.25	0,45	0,44	1,44	1,43	0,38	0,38
17	68	0.106	0.30	0,75	0,74	1,68	1,68	0,43	0,43
18	68	0.142	0.10	1	1	1,94	1,94	0,55	0,55

19	68	0.198	0.15	1,06	1,06	2,26	2,26	0,62	0,62
20	68	0.256	0.20	1,16	1,14	2,54	2,52	0,78	0,78
21	96	0.050	0.30	0,43	0,43	1,36	1,36	0,36	0,36
22	96	0.106	0.10	0,26	0,26	1,08	1,08	0,31	0,31
23	96	0.142	0.15	0,32	0,32	1,18	1,18	0,35	0,35
24	96	0.198	0.20	0,82	0,82	1,78	1,5	0,48	0,48
25	96	0.256	0.25	0,96	0,94	1,86	1,86	0,51	0,49

3.3.1 Modélisation de paramètre R_{pk}

Les équations des sorties de chaque neurone de la couche cachée (de H1 à H6) de la hauteur des pics saillants (R_{pk}) sont données par les équations (3.7).

$$\begin{aligned}
 H1 &= \tanh(0.5 \times (0.0886 \times Vc - 20.8790 \times f - 3.2582 \times ap + 1.2992)) \\
 H2 &= \tanh(0.5 \times (-0.0953 \times Vc - 8.6849 \times f + 30.9935 \times ap + 0.6270)) \\
 H3 &= \tanh(0.5 \times (-0.1045 \times Vc + 6.1226 \times f - 8.5776 \times ap + 5.0012)) \\
 H4 &= \tanh(0.5 \times (0.0965 \times Vc - 76.4311 \times f + 1.5639 \times ap + 3.0759)) \\
 H5 &= \tanh(0.5 \times (-0.0200 \times Vc + 22.6840 \times f + 53.5493 \times ap - 10.7672)) \\
 H6 &= \tanh(0.5 \times (-0.0383 \times Vc - 1.7277 \times f + 0.9516 \times ap + 0.9558))
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

La somme des sorties des 6 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de la hauteur des pics saillants (R_{pk}) indiqué dans l'équation (3.8).

$$R_{pk} = -0.6367 \times H1 + 0.7645 \times H2 + 0.6627 \times H3 - 0.6093 \times H4 - 0.3227 \times H5 - 1.8933 \times H6 + 0.9121 \tag{3.8}$$

Le tableau 3.5 présente les valeurs du coefficient de corrélation (R^2), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) pour le paramètre R_{pk} . Notez que le RMSE est presque atteint de 0 (égal à $0,95 \times 10^{-3}$) et la valeur de R^2 est supérieure à 0,95 ($R^2(R_{pk}) = 0,99$), ce qui montre que le modèle obtenu est apte à prédire avec une très haute précision du paramètre R_{pk} .

Tableau 3.5- R^2 ET RMSE du modèle de paramètre R_{pk}

Apprentissage		Validation	
R_{pk}	Mesures	R_{pk}	Mesures

R^2	0,9999366	R^2	0,9999983
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0068984	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0009539
Sommes fréquences	20	Sommes fréquences	5

La figure 3.9 présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs de la hauteur des pics saillants (R_{pk}) s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de paramètre R_{pk} est significatif. Les coefficients de corrélations $R^2 = 0,9999$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9999$ pour la validation présentent 99,99% et 99,99% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

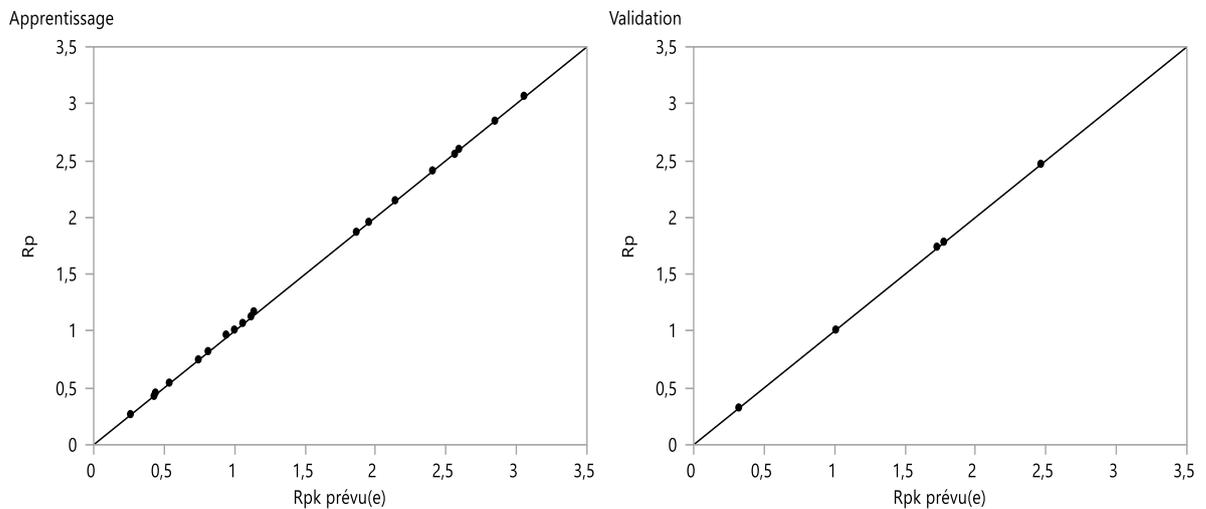


Figure 3. 9- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour R_{pk}

3.3.2 Modélisation de paramètre R_k

Les équations des sorties de chaque neurone de la couche cachée (de H1 à H6) de profondeur de rugosité du cœur (R_k) sont données par les équations (3.9).

$$\left. \begin{aligned}
 H1 &= \tanh(0.5 \times (-0.04570 \times Vc + 12.5006 \times f + 2.2921 \times ap - 0.3069)) \\
 H2 &= \tanh(0.5 \times (-0.0965 \times Vc - 12.4340 \times f + 5.3777 \times ap + 7.9741)) \\
 H3 &= \tanh(0.5 \times (0.0496 \times Vc + 0.3854 \times f - 9.824 \times ap - 1.7752)) \\
 H4 &= \tanh(0.5 \times (-0.0628 \times Vc + 56.7429 \times f - 26.0886 \times ap - 0.0863)) \\
 H5 &= \tanh(0.5 \times (-0.0434 \times Vc + 21.4522 \times f + 1.5715 \times ap - 2.3358)) \\
 H6 &= \tanh(0.5 \times (-0.0003 \times Vc - 11.8938 \times f + 17.6564 \times ap - 3.0916))
 \end{aligned} \right\} (3.9)$$

La somme des sorties des 6 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de profondeur de rugosité du cœur (R_k) indiqué dans l'équation (3.10).

$$R_k = 2.5734 \times H1 + 0.2216 \times H2 + 0.4907 \times H3 + 0.3173 \times H4 - 1.0644 \times H5 + 0.4617 \times H6 + 2.9415 \quad (3.10)$$

Le tableau 3.6 présente les valeurs du coefficient de corrélation (R^2), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) pour le paramètre R_k .

Tableau 3.6- R^2 et RMSE du modèle de paramètre R_k

Apprentissage		Validation	
R_k	Mesures	R_k	Mesures
R^2	0,9863517	R^2	0,9999952
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0979454	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0020859
Sommes fréquences	20	Sommes fréquences	5

La figure 3.10 présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs de profondeur de rugosité du cœur (R_k) s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de paramètre R_k est adéquat. Les coefficients de corrélations $R^2 = 0,9863$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9999$ pour la validation présentent 98,63% et 99,99% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

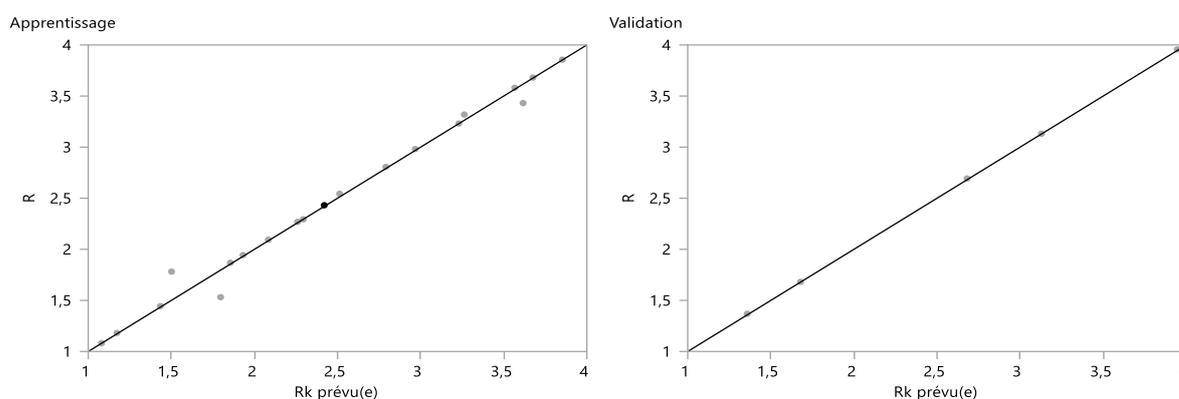


Figure 3.10- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour R_k

3.3.3 Modélisation de paramètre R_{vk}

Les équations des sorties de chaque neurone de la couche cachée (de H1 à H7) de profondeur des creux profonds (R_{vk}) sont données par les équations (3.11) :

$$\begin{aligned}
 H1 &= \tanh(0.5 \times (0.0562 \times Vc + 28.4660 \times f + 45.7842 \times ap - 16.8405)) \\
 H2 &= \tanh(0.5 \times (-0.0336 \times Vc + 35.4239 \times f + 45.7842 \times ap - 16.8405)) \\
 H3 &= \tanh(0.5 \times (-0.0229 \times Vc - 14.1701 \times f - 23.0994 \times ap - 1.3987)) \\
 H4 &= \tanh(0.5 \times (0.0010 \times Vc - 1.4104 \times f - 1.0951 \times ap - 0.1089)) \\
 H5 &= \tanh(0.5 \times (-0.1668 \times Vc + 16.9465 \times f + 18.2400 \times ap - 0.3320)) \\
 H6 &= \tanh(0.5 \times (0.0150 \times Vc + 15.1122 \times f + 16.0182 \times ap - 6.6829)) \\
 H7 &= \tanh(0.5 \times (0.1099 \times Vc - 21.0368 \times f - 18.8984 \times ap + 3.6442))
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

La somme des sorties des 7 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de profondeur des creux profonds (R_{vk}) indiqué dans l'équation (3.12).

$$R_{vk} = 0.4413 \times H1 + 0.2294 \times H2 + 0.4571 \times H3 - 3.3589 \times H4 + 0.7804 \times H5 - 0.3523 \times H6 + 0.4094 \times H7 + 0.2559 \tag{3.12}$$

Le tableau 3.7 présente les valeurs du coefficient de corrélation (R^2), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) pour le paramètre R_{vk} .

Tableau 3.7- R^2 et RMSE du modèle de paramètre R_{vk}

Apprentissage		Validation	
R_{vk}	Mesures	R_{vk}	Mesures
R^2	0,9935823	R^2	0,9999638
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0331162	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0023095
Sommes fréquences	20	Sommes fréquences	5

La figure 3.11 présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs profondeur des creux profonds (R_{vk}) s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de paramètre R_{vk} est adéquat.

Les coefficients de corrélations $R^2 = 0,9935$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9999$ pour la validation présentent 98,35% et 99,99% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

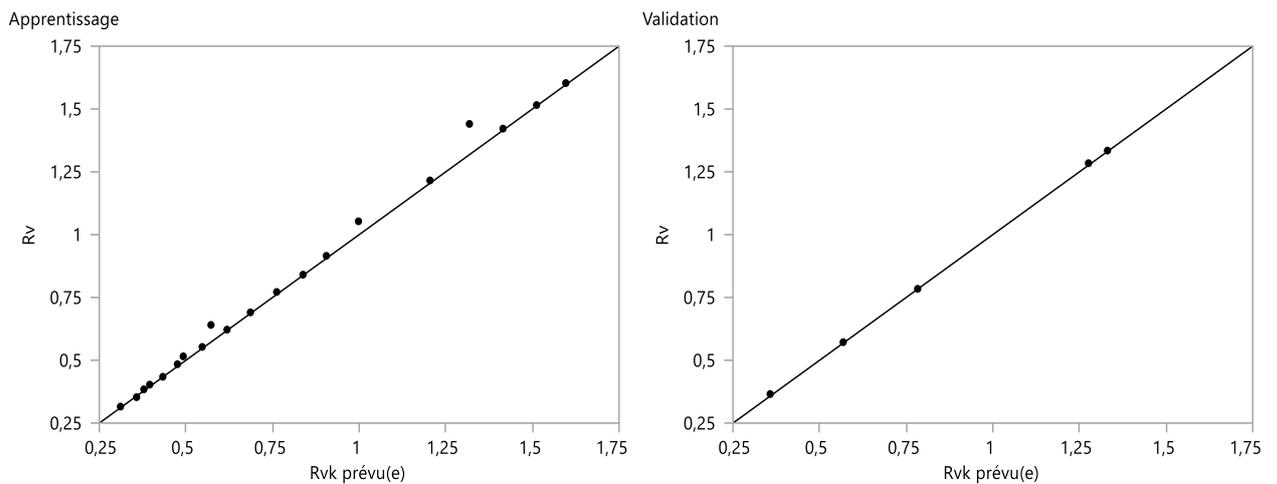
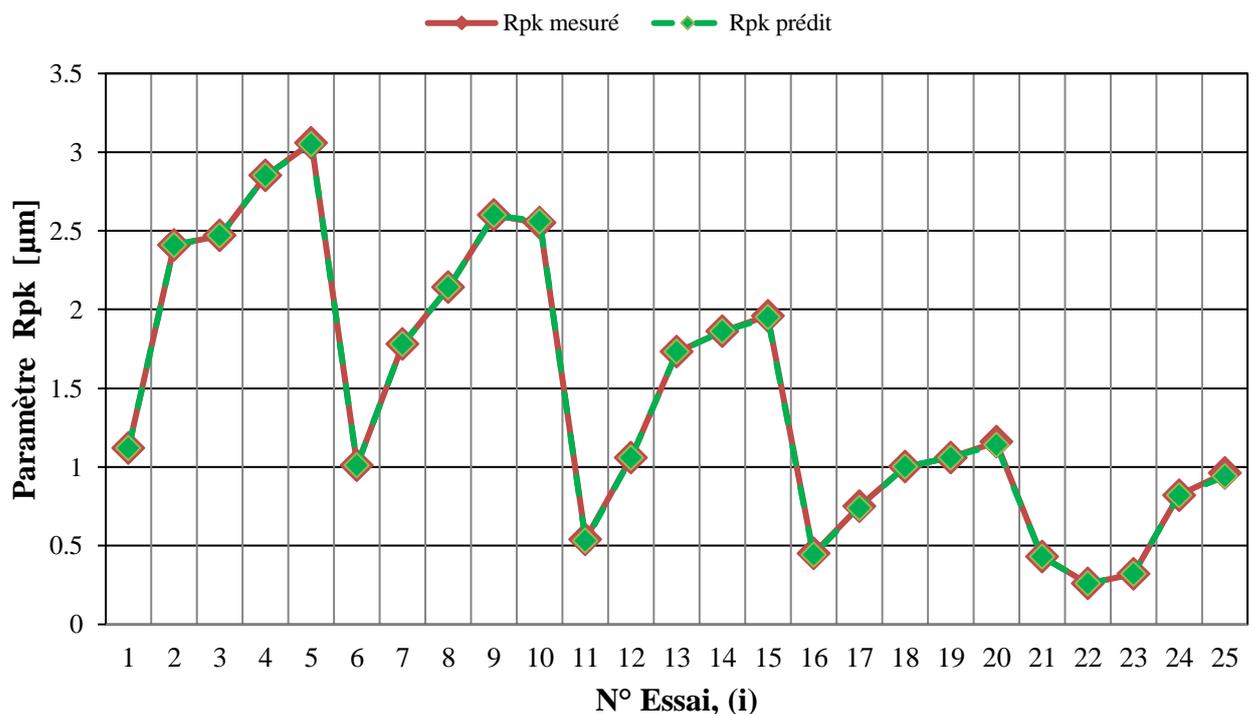


Figure 3.11- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour R_{vk}

3.3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

Les valeurs prévues par les trois modèles neuronaux des paramètres de la courbe du taux de portances et les valeurs cibles sont indiquées sur la figure 3.11. Selon cette figure, Le résultat des valeurs estimées sont également très voisins aux valeurs mesurées. Par conséquent, il y a deux à trois valeurs de R_k et R_{vk} sont assez éloignées. En outre, l'allure de la courbe des valeurs estimées est identique avec l'allure de la courbe des valeurs expérimentales. De plus, les points des valeurs exactes (expérimentales et numériques) sont en intersection.



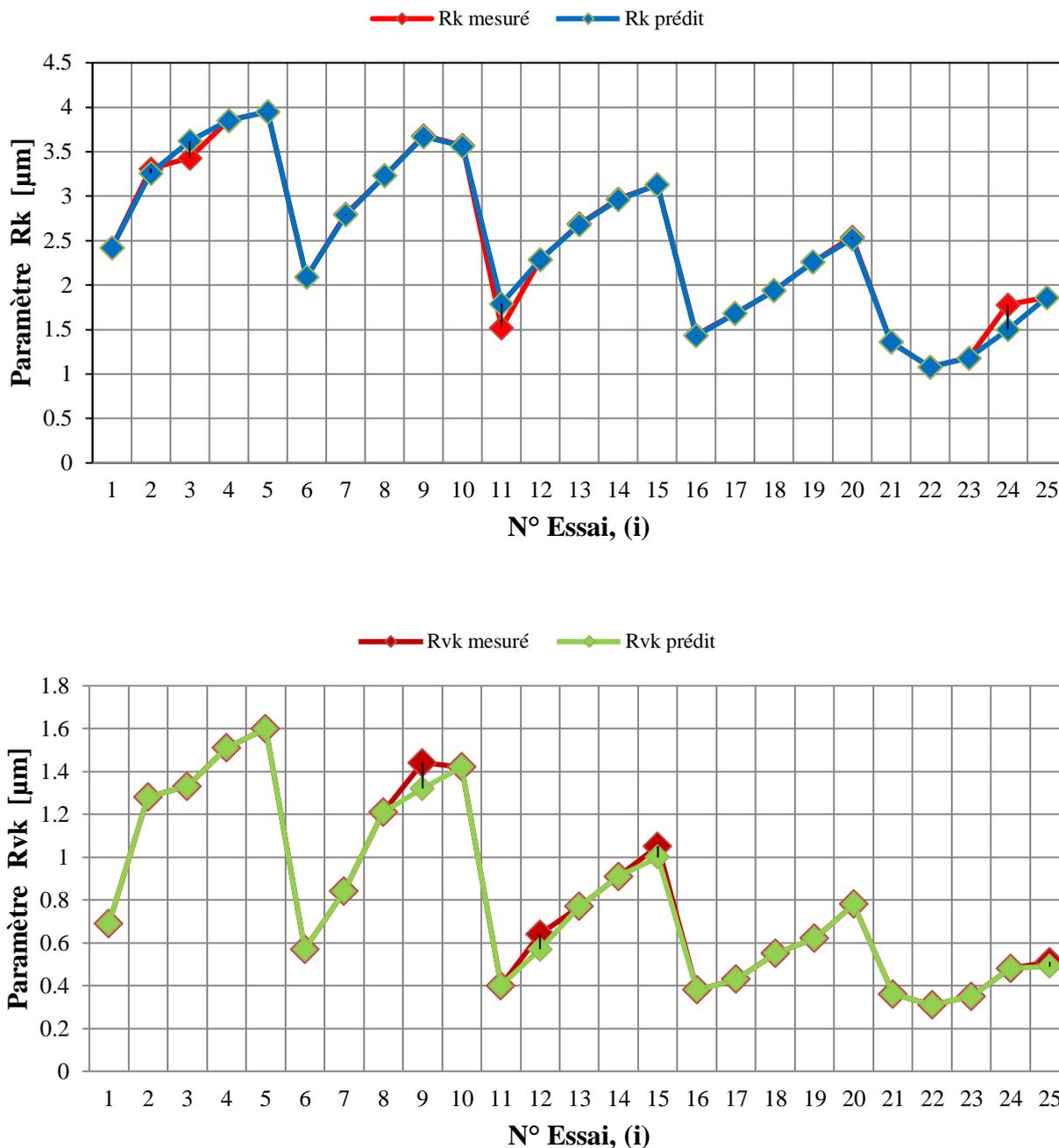


Figure 3.12- Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées de trois paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk})

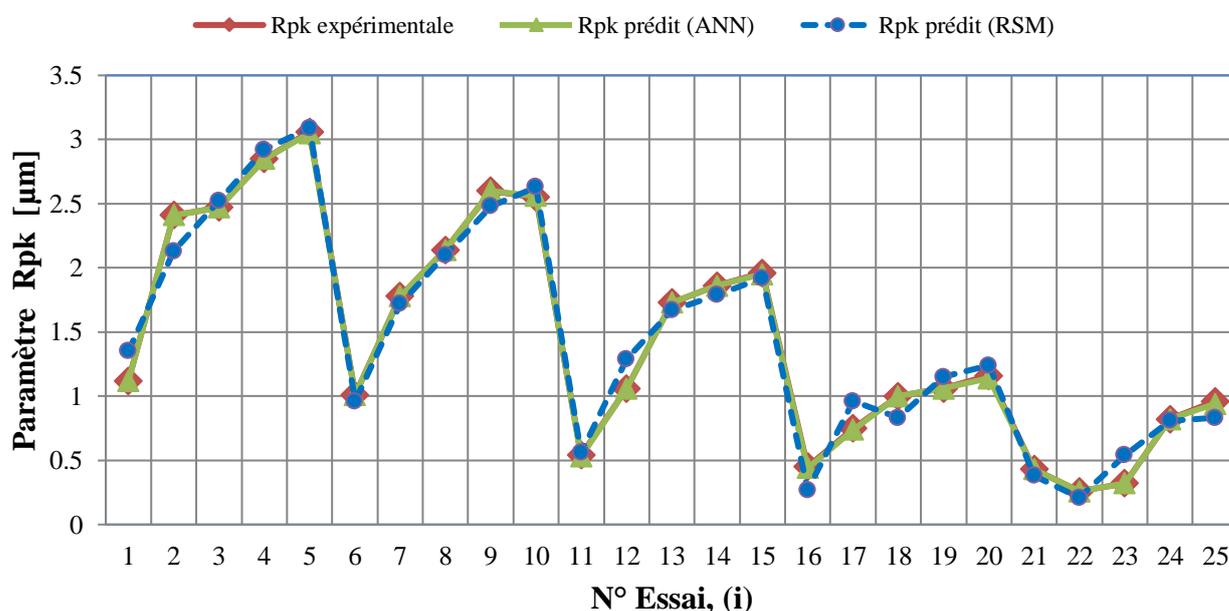
3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites par RSM et ANN

Afin de prendre une idée sur la précision, l'efficacité et surtout la capacité de prédiction des deux méthodes de modélisation mathématique les plus utilisées (ANN et RSM), les résultats des deux modèles obtenus par les deux techniques (ANN et RSM) et les valeurs expérimentales sont comparés. Il convient néanmoins de remarquer sur le tableau 3.8 que les valeurs des coefficients de corrélation (R^2) de la méthode ANN sont plus élevées que celles de la méthode RSM. Etant donné que les valeurs de R^2 obtenus par les modèles ANN sont presque égal 1 (0,9999), ce qui montre la fiabilité de cette technique. Pour une comparaison profonde, les résultats trouvés

expérimentalement et numériquement sont tracés par des courbes (voir figure 3.12). L'analyse de ces courbes permet de remarquer que les valeurs estimées par le modèle ANN sont complètement confondues avec les valeurs expérimentales, contrairement aux valeurs prédites par le modèle RSM où il y a des valeurs qui sont d'une petite divergence aux valeurs expérimentales. Cette analyse montre que le modèle neuronal explique très bien la variation de la rugosité de surface représentée par les trois paramètres de la courbe du taux de portance en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et a_p). Donc, la méthode de modélisation par ANN est plus efficace et précise que la deuxième méthode (RSM). Ce résultat est en concordance avec l'étude de Chabbi et al. [Cha2017] lors du tournage du polymère de polyoxyméthylène (POM C) où il a été conclu que la méthode de prédiction par ANN est plus efficace que la deuxième méthode de prédiction (RSM). En outre, Zerti et al. [Zer2019a, Zer2019b] ont utilisé les deux méthodes précédentes (ANN et RSM) afin d'estimer les valeurs des paramètres de sorties (R_a , R_z , R_t , F_x , F_y et F_z) lors de tournage d'acier inoxydable martensitique (AISI 420, 59HRC et plaquette CC6050) d'une part et les comparer avec les valeurs expérimentales d'autre part, la conclusion constatée par les auteurs dans les deux articles en question est que le modèle ANN est toujours plus précis que le modèle RSM.

Tableau 3.8 - Coefficients de corrélation (R^2) pour les modèles obtenus par RSM et ANN

	Coefficient de corrélation R^2 en %	
	RSM	ANN
Hauteur des pics saillants (R_{pk})	97,62	99,99
Profondeur de rugosité du cœur (R_k)	98,14	99,99
Profondeur des creux profonds (R_{vk})	97,10	99,99



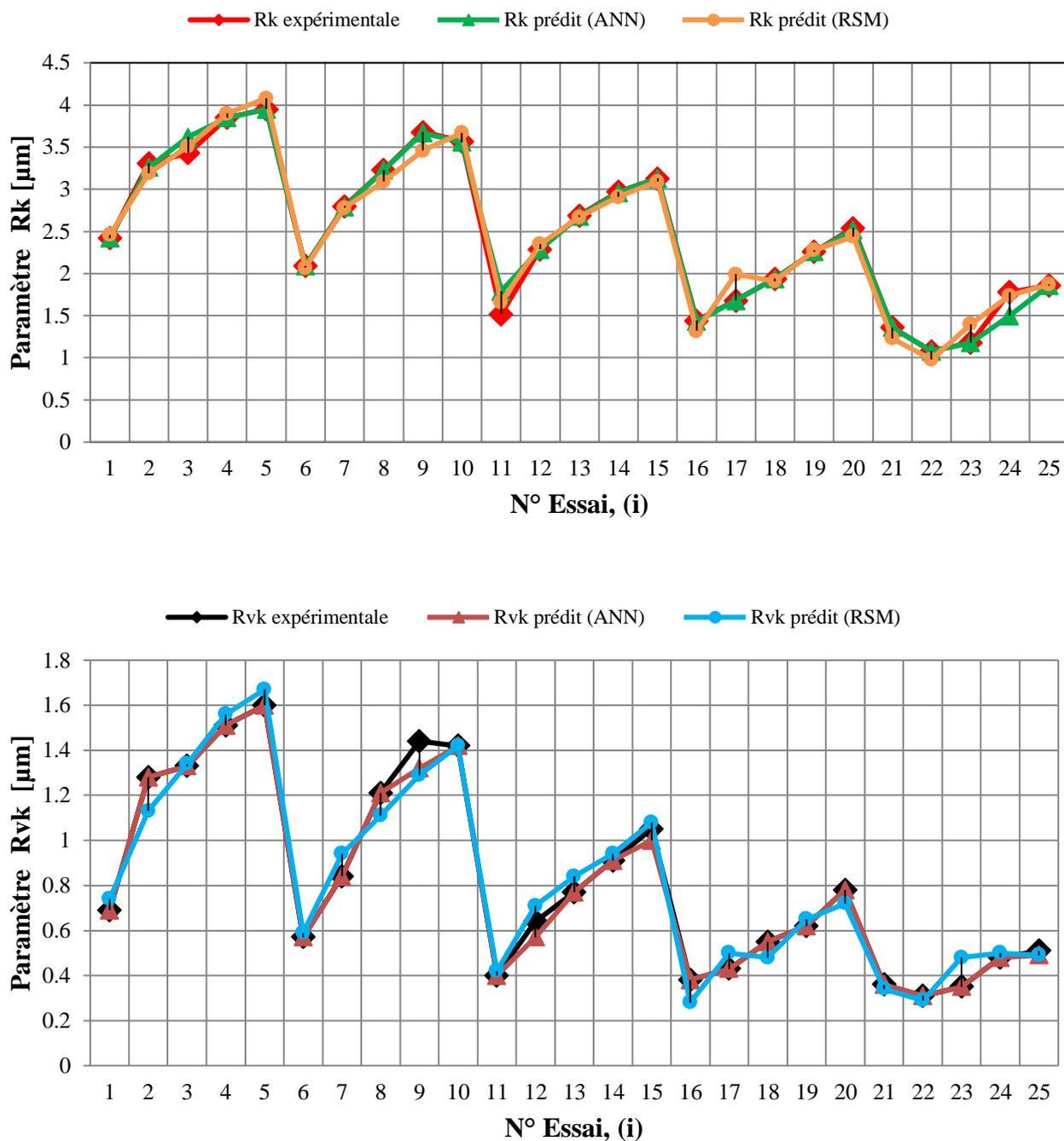


Figure 3.13- Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées de trois paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk})

3.5 Conclusion

Par des expériences et des tests menés par le plan de Taguchi (L_{25}) dans le but de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés de la courbe d'Abbott Firestone (R_{pk} , R_k et R_{vk}). L'analyse statistique de la variance (ANOVA) a été utilisée, nous concluons de ce qui précède que la vitesse de coupe (V_c) affecte fortement les rugosités, l'avance par tour (f) à un effet moyen sur l'évolution des rugosités. En outre, le troisième

paramètre de coupe (ap) à aucune influence significative n'a été observé sur les trois critères de rugosité. Le résultat des valeurs estimées est également très voisin aux valeurs mesurées et les valeurs des coefficients de corrélation (R^2) de la méthode ANN sont plus élevées que celles de la méthode RSM, les valeurs de R^2 obtenus par les modèles ANN sont presque égal 1. Cette méthode de modélisation par ANN est plus efficace et précise que la deuxième méthode RSM.

CHAPITRE 4

Optimisation mono et multi- objectif des paramètres de coupe

4.1 Introduction

Aujourd'hui, l'utilisation de l'optimisation des conditions de coupe dans le secteur manufacturier par enlèvement de matière (tournage, fraisage, rectification,...etc) prend une place importante. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que l'économie d'échelle. Donc, ce chapitre est consacré à l'application de deux méthodes d'optimisation différentes des paramètres de coupe (V_c , f et ap) lors de tournage d'acier 16MC5 de dureté 52 HRC.

Les méthodes d'optimisation utilisées dans ce chapitre sont :

- Optimisation mono-objectif : En utilisant la méthode de Taguchi.
- Optimisation multi-objectif : En utilisant l'analyse relationnelle grise (GRA).
- Optimisation multi-objectif : En utilisant la fonction de désirabilité (DF).

4.2 Optimisation mono-objectif par la méthode de Taguchi

Afin d'analyser les résultats expérimentaux, le rapport signal/bruit (S/N) est utilisé parce que c'est le critère le plus essentiel de la méthode de Taguchi[48]. Le rapport signal/bruit (S/N) de la technique de Taguchi optimise les facteurs de contrôle[61]. Ces derniers sont les variables qui peuvent être contrôlées de manière pratique et économique [62]. Le but de cette étude est de minimiser les deux paramètres (R_{pk} et R_k) et maximiser l'autre paramètre (R_{vk}) afin d'améliorer la qualité de la courbe de portance. Selon cette méthode pour obtenir les conditions de coupe optimales, le rapport S/N doit avoir une valeur maximale pour les trois paramètres (R_{pk} , R_k et R_{vk}). Le rapport S/N est généralement divisé en trois catégories données par les trois équations suivantes [63,49] :

Nominal est le meilleur :

$$S/N = 10 * \log\left(\frac{\bar{y}}{s_y^2}\right) \quad (4.1)$$

Le plus petit est le meilleur :

$$S/N = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (4.2)$$

Le plus grand est le meilleur :

$$S/N = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (4.3)$$

Le rapport S/N des deux paramètres R_{pk} et R_k est calculé en utilisant l'équation (4.2) «Le plus petit est le meilleur (minimiser)». Par ailleurs, la profondeur des creux profonds R_{vk} a été calculée en utilisant l'équation (4.3) «Le plus grand est le meilleur (maximiser)». Les résultats

expérimentaux des paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}) et leurs rapports signal/bruit S/N sont présentés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1-Résultats expérimentaux de trois paramètres de sorties (R_{pk} , R_k et R_{vk}) et leurs rapports S/N

Trail n°	A: V_c	B: f	C: ap	R_{pk} [μm]	S/N [dB]	R_k [μm]	S/N [dB]	R_{vk} [μm]	S/N [dB]
1	24	0.050	0.10	1.12	- 0.98	2.42	- 7.67	0.69	- 3.22
2	24	0.106	0.15	2.41	- 7.64	3.31	-10.39	1.28	2.14
3	24	0.142	0.20	2.47	- 7.85	3.43	-10.70	1.33	2.47
4	24	0.198	0.25	2.85	- 9.09	3.85	-11.70	1.51	3.57
5	24	0.256	0.30	3.06	- 9.71	3.95	-11.93	1.60	4.08
6	34	0.050	0.15	1.01	- 0.08	2.09	- 6.40	0.57	- 4.88
7	34	0.106	0.20	1.78	- 5.00	2.80	- 8.94	0.84	- 1.51
8	34	0.142	0.25	2.14	- 6.60	3.23	-10.18	1.21	1.65
9	34	0.198	0.30	2.60	- 8.29	3.68	-11.31	1.44	3.16
10	34	0.256	0.10	2.55	- 8.13	3.57	-11.05	1.42	3.04
11	48	0.050	0.20	0.54	5.35	1.52	- 3.63	0.40	- 7.95
12	48	0.106	0.25	1.06	- 0.50	2.29	- 7.19	0.64	- 3.87
13	48	0.142	0.30	1.73	- 4.76	2.69	- 8.59	0.77	- 2.27
14	48	0.198	0.10	1.86	- 5.39	2.97	- 9.45	0.91	- 0.81
15	48	0.256	0.15	1.96	- 5.84	3.13	- 9.91	1.05	0.42
16	68	0.050	0.25	0.45	6.93	1.44	- 3.16	0.38	- 8.40
17	68	0.106	0.30	0.75	2.49	1.68	- 4.50	0.43	- 7.33
18	68	0.142	0.10	1.00	0.00	1.94	- 5.75	0.55	- 5.19
19	68	0.198	0.15	1.06	- 0.50	2.26	- 7.08	0.62	- 4.15
20	68	0.256	0.20	1.16	- 1.28	2.54	- 8.09	0.78	- 2.15
21	96	0.050	0.30	0.43	7.3	1.36	- 2.67	0.36	- 8.87
22	96	0.106	0.10	0.26	11.70	1.08	- 0.66	0.31	-10.17
23	96	0.142	0.15	0.32	9.89	1.18	- 1.43	0.35	- 9.11
24	96	0.198	0.20	0.82	1.72	1.78	- 5.00	0.48	- 6.37
25	96	0.256	0.25	0.96	0.35	1.86	- 5.39	0.51	- 5.84

L'analyse de l'impact des conditions de coupe (V_c , f et ap) sur les résultats expérimentaux et leurs rapports S/N de tableau 4.1 montre que les meilleurs paramètres de la courbe de portance dont leurs valeurs de rapport S/N sont : 11,70 (dB), - 0,66 (dB) et -10,17 (dB) pour R_{pk} , R_k et R_{vk} , respectivement (réseau orthogonal 5 2 1). Dans ce cas, les conditions de coupe sont : la vitesse de coupe égale 96 m/min, la vitesse d'avance égale 0,106 mm/tr et la profondeur de coupe égale 0,10 mm. A l'opposé, les moindres paramètres de la courbe de portance dont leurs valeurs de rapport S/N sont : - 9,71 (dB), -11,93 (dB) et 4,08 (dB) pour R_{pk} , R_k et R_{vk} respectivement (réseau orthogonal 1 5 5).

Par la conception de Taguchi, le tableau4.2 montre les niveaux optimaux des conditions de coupe pour les valeurs optimales de trois paramètres de la courbe du taux de portance.

Tableau 4.2-Table de réponse S/N pour (a) paramètre R_{pk} , (b) paramètre R_k , et (c) paramètre R_{vk} ((a) et (b) : le plus petit est le meilleur, (c) le plus grand est le meilleur)

Niveau	A : V_c [m/min]	B : f [mm/tr]	C : a_p [mm]
(a)			
1	-7,058	3,709	-0,561
2	-5,626	0,208	-0,836
3	-2,230	-1,865	-1,415
4	1,527	-4,313	-1,784
5	6,201	-4,925	-2,589
Delta	13,259	8,634	2,028
Rank	1	2	3
(b)			
1	-10,484	-4,711	-6,922
2	-9,580	-6,342	-7,046
3	-7,759	-7,336	-7,278
4	-5,722	-8,914	-7,529
5	-3,035	-9,277	-7,804
Delta	7,449	4,566	0,882
Rank	1	2	3
(c)			
1	1,812	-6,668	-3,272
2	0,294	-4,150	-3,117
3	-2,900	-2,489	-3,105
4	-5,447	-0,919	-2,578
5	-8,077	-0,090	-2,245
Delta	9,889	6,577	1,027
Rank	1	2	3

Les valeurs de ce tableau sont représentées sous formes graphiques dans les figures 4.1, 4.2 et 4.3. À partir de ces graphiques et le tableau 4.2, les conditions de coupe optimales sont facilement déterminées pour minimiser les deux premiers paramètres de la courbe de portance et maximiser le dernier paramètre de cette courbe. Les meilleurs niveaux correspondent à des valeurs plus élevées de rapport S/N des trois paramètres (R_{pk} , R_k et R_{vk}). Alors, les niveaux et les rapports S/N des trois facteurs (A : V_c , B : f et C : a_p) donnant les meilleures valeurs de trois paramètres (R_{pk} , R_k et R_{vk}) sont : pour R_{pk} facteur A (niveau 5, S/N = 6,201), facteur B (niveau 1, S/N = 3,709) et facteur C (niveau 1, S/N = -0,561), pour R_k facteur A (niveau 5, S/N = -3,035), facteur B (niveau 1, S/N = -4,711) et facteur C (niveau 1, S/N = -6,922), et pour R_{vk} facteur A (niveau 1, S/N = 1,812), facteur B (niveau 5, S/N = -0,090) et facteur C (niveau 5, S/N = -2,245).

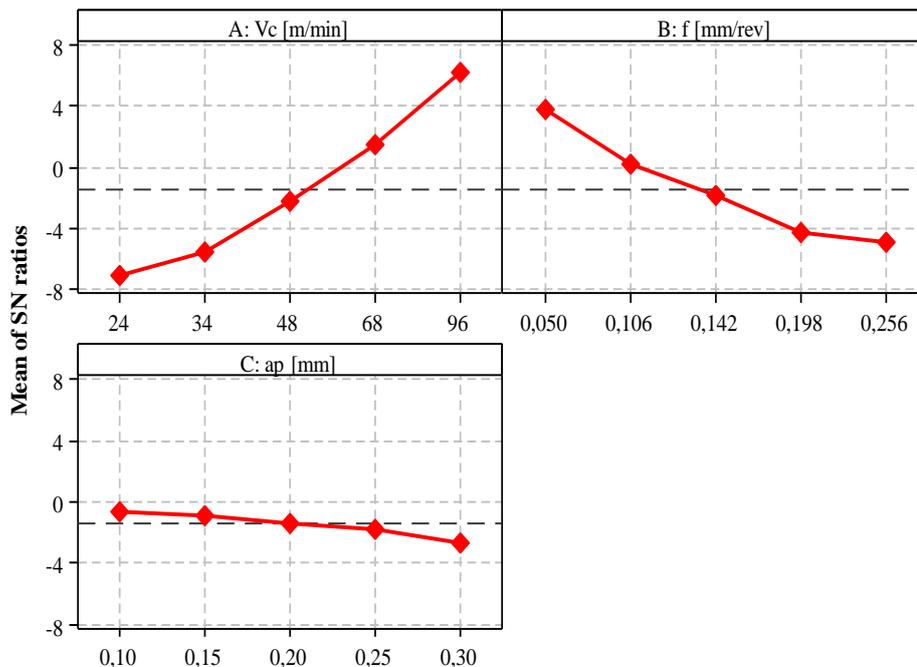


Figure 4.1 - Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_{pk}

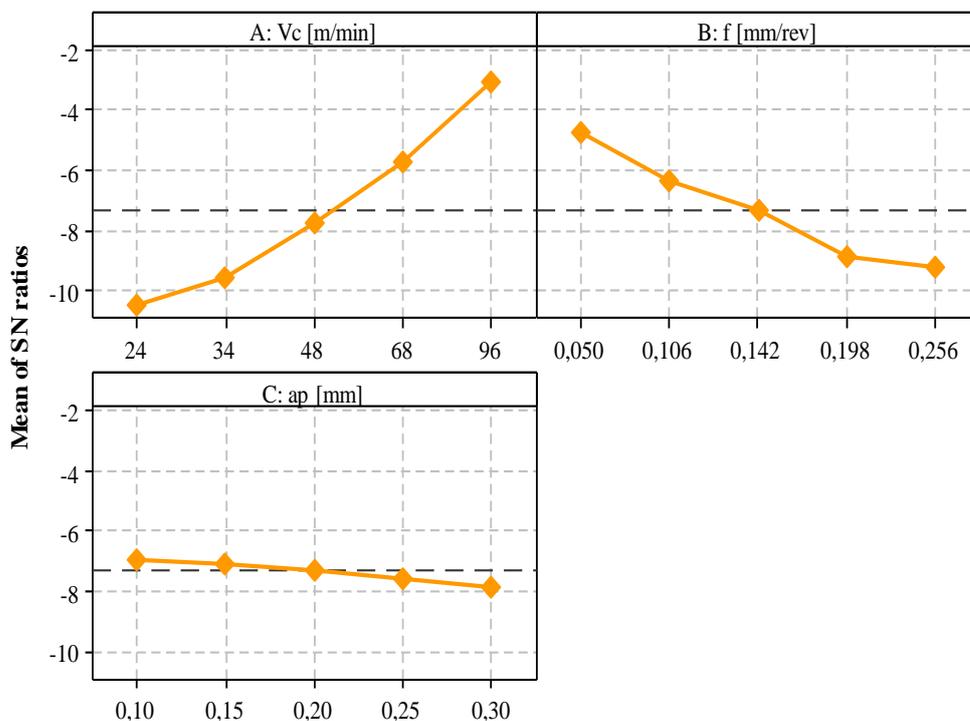


Figure 4. 2- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_k

En outre, on remarque que la pente de la vitesse de coupe (V_c) est plus grande que la pente de la vitesse d'avance et celle de la profondeur de coupe (la plus faible pente) (figures 4.1, 4.2 et 4.3), ce qui montre que la vitesse de coupe a un effet significatif le plus important et la profondeur de passe a un effet significatif le moins important. Dans cette optique, les valeurs optimales des trois paramètres de la courbe de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}) sont obtenues pour : vitesse de coupe de 96 m/min (A5), vitesse d'avance de 0,106 mm/tr (B2) et profondeur de passe de 0,10 mm (C1) (Figures 4.1, 4.2 et 4.3) parce que la valeur de $R_{vk} = 0,31 \mu\text{m}$ est une grande valeur afin

d'alimenter, circuler et de stocker l'huile pendant le fonctionnement de moteur. Actuellement, une comparaison peut être accomplie : par exemple, Meddour et al [41] ont trouvé que les deux paramètres de surface S_k et S_{pk} diminuent lorsque la vitesse de coupe augmente lors de tournage d'acier AISI 4140 de dureté 60 HRC. Khellouki et al [64] ont montré que si on travaille sur un acier de roulement AISI 52100 de dureté 62 HRC, la profondeur de rugosité du cœur R_k passe de 0,9 μm de tournage dur à 0,38 μm de toilage.

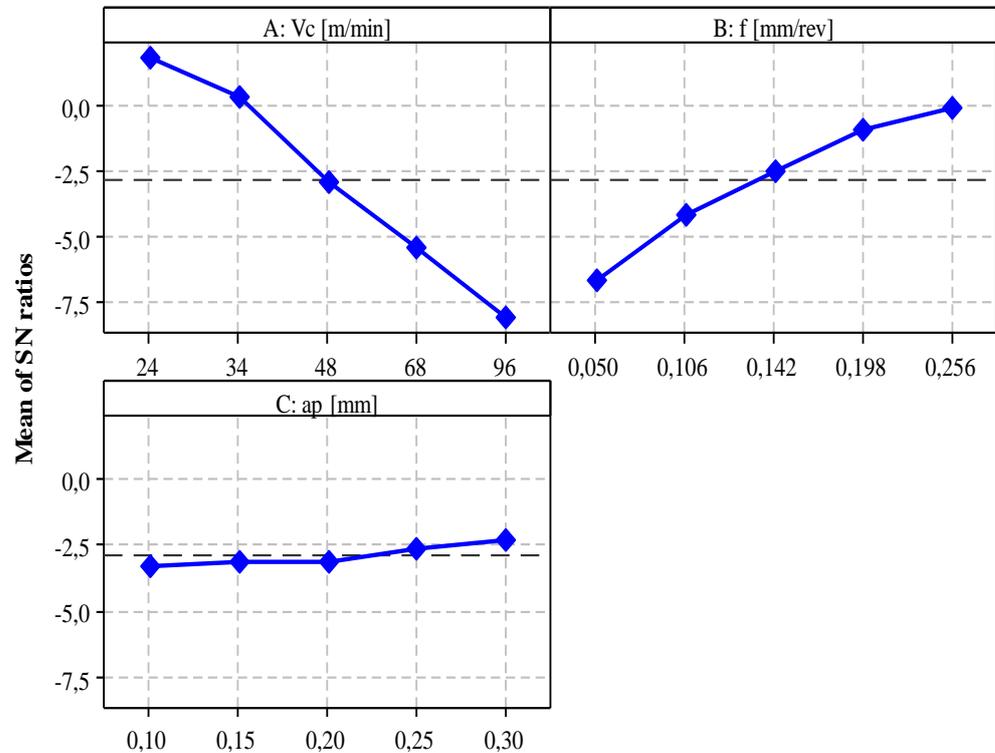


Figure 4.3- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_{vk}

4.3 Optimisation multi-objective par l'analyse relationnelle grise (GRA)

L'analyse relationnelle grise est l'une des techniques d'optimisation multi-objective le plus largement utilisée par les chercheurs et les fabricants. GRA a été développé afin de donner une solution précise de la situation groupée des objectifs différents. Donc, le but de cette technique est de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage dur qui nous permet de minimiser les deux paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} et R_k) et maximiser la profondeur des creux profonds (R_{vk}), simultanément. Cette méthode de l'optimisation s'effectue en trois étapes principales à savoir :

a) La normalisation

Afin de rendre toutes les réponses (R_{pk} , R_k et R_{vk}) en même grandeur dans l'intervalle de normalisation $[0, 1]$, les données expérimentales sont analysés selon le but d'optimisation (minimiser ou maximiser).

- Pour la minimisation du critère, c'est le cas de la hauteur des pics saillants (R_{pk}) et de la profondeur de rugosité du cœur (R_k), alors la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (4.5)$$

- Pour la maximisation du critère, c'est le cas de la profondeur des creux profonds (R_{vk}), alors la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (4.6)$$

Où :

- $x_i(k)$: la valeur normalisée de la séquence,
- $\max(x_i^0(k))$: la plus grande valeur de $x_i^0(k)$ de la $k^{\text{ième}}$ réponse,
- $\min(x_i^0(k))$: la plus petite valeur de $x_i^0(k)$ de la $k^{\text{ième}}$ réponse.

Les données traitées par la normalisation sont données dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3- Résultats expérimentale normalisé ($x_i(k)$)

N° Essai. (i)	R_{pk}	R_k	R_{vk}
Valeur idéale	1,000	1,000	1,000
1	0,69	0,53	0,29
2	0,23	0,22	0,75
3	0,21	0,18	0,79
4	0,07	0,03	0,93
5	0,00	0,00	1,00
6	0,73	0,64	0,20
7	0,45	0,40	0,41
8	0,32	0,25	0,69
9	0,16	0,09	0,87
10	0,18	0,13	0,86
11	0,90	0,84	0,06
12	0,71	0,57	0,25
13	0,47	0,43	0,35
14	0,42	0,34	0,46
15	0,39	0,28	0,57
16	0,93	0,87	0,05
17	0,82	0,79	0,09
18	0,73	0,70	0,18
19	0,71	0,58	0,24
20	0,67	0,49	0,36
21	0,93	0,90	0,03
22	1,00	1,00	0,00
23	0,97	0,96	0,03
24	0,80	0,75	0,13
25	0,75	0,72	0,15

b) Calcul des coefficients du Relationnel Gris :

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational) ($\eta_i(k)$) peuvent être calculés comme suit [53] :

$$\eta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \omega \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \omega \Delta_{\max}}; \quad 0 < \eta_i(k) \leq 1 \quad (4.7)$$

Où :

- $\Delta_{0i}(k)$: la différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$,
- Δ_{\min} : la plus petite valeur de $\Delta_{0i}(k)$,
- Δ_{\max} : la plus grande valeur de $\Delta_{0i}(k)$, coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (4.8)$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in I} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (4.9)$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in I} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (4.10)$$

La valeur de ω est en générale égale à (0,5) [65].

La valeur du coefficient η a été prise (0,5). Les valeurs des coefficients "Gris Rationnelle Coefficients" est présentés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4- Coefficients du GR ($\eta_i(k)$)

<i>N° Essai. (i)</i>	R_{pk}	R_k	Rvk
1	0,619	0,516	0,413
2	0,394	0,390	0,666
3	0,387	0,378	0,703
4	0,350	0,340	0,877
5	0,333	0,332	1,000
6	0,651	0,586	0,383
7	0,479	0,453	0,457
8	0,426	0,399	0,621
9	0,374	0,354	0,800
10	0,379	0,364	0,780
11	0,833	0,764	0,348
12	0,636	0,541	0,400
13	0,487	0,470	0,435
14	0,466	0,430	0,481
15	0,451	0,410	0,538
16	0,880	0,798	0,344
17	0,740	0,704	0,353
18	0,654	0,624	0,379
19	0,636	0,547	0,395
20	0,608	0,494	0,438
21	0,891	0,836	0,340
22	1,000	1,000	0,333
23	0,958	0,934	0,339
24	0,714	0,671	0,364

25	0,666	0,647	0,370
----	-------	-------	-------

c) **Calcul du GRG (Grey relational grade)**

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

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \eta_i(k) \quad (4.11)$$

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

La plus grande valeur de grade relationnel gris (Grey Relational Grade) est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale ($x_0(k)$) et la séquence donnée ($x_i(k)$). La séquence idéale ($x_0(k)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel (Relational Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale [66,67].

Selon le tableau 4.5 et la figure 4.4, la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 14 a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que cette expérience présente la combinaison des paramètres optimaux qui donne une rugosité de surface minimale, et un volume de copeau enlevé maximum.

Tableau 4.5 -Niveau relationnel gris et son ordre (Grey relational grade (GRG))

<i>N° Essai. (i)</i>	<i>GRG (α_i)</i>	<i>Ordre</i>
1	0,516	15
2	0,484	20
3	0,489	19
4	0,522	14
5	0,555	9
6	0,540	11
7	0,463	24
8	0,482	21
9	0,509	17
10	0,507	18
11	0,648	5
12	0,526	12
13	0,464	23
14	0,459	25
15	0,466	22
16	0,674	4
17	0,599	6
18	0,552	10
19	0,526	13
20	0,513	16
21	0,689	3
22	0,777	1
23	0,743	2
24	0,583	7
25	0,561	8

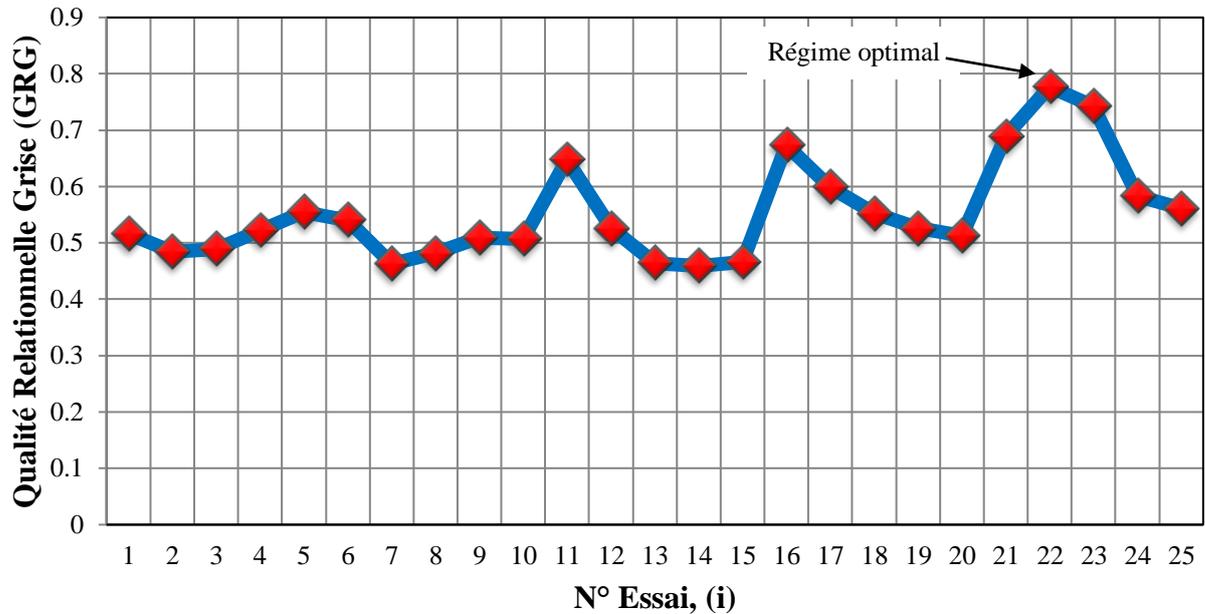


Figure 4.4- Qualité Relationnelle Grise (GRG)

La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage d'acier 16MC5 de dureté 52 HRC est obtenue à partir de tableau 4.6. Cette combinaison est :

- Vitesse de coupe optimale (niveau 5),
- Vitesse d'avance (niveau 2),
- Profondeur de passe optimale (niveau 1).

Tableau 4.6-Réponses pour la catégorie relationnelle grise (Grey Grade)

Niveau	V_c [m/min]	f [mm/tr]	ap [mm]
1	24	0,050	0,10
2	34	0,106	0,15
3	48	0,142	0,20
4	68	0,198	0,25
5	96	0,256	0,30

Donc la combinaison optimale pour les trois réponses des paramètres est : $V_c5 f 2 ap1$. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : (vitesse de coupe : $V_c = 96$ m/min, avance : $f = 0,106$ mm/tr et profondeur de passe : $ap = 0,10$ mm).

4.4 Optimisation multi-objectif par la fonction de désirabilité (DF)

Dans cette section, le but essentiel de l'optimisation numérique est de trouver les valeurs optimales des conditions d'usinage de tournage dur d'acier 16MC5 afin de produire la plus faible valeur des deux paramètres de la courbe de portance ($R_{pk} \searrow$ et $R_k \searrow$) et la plus grande valeur de l'autre paramètre ($R_{vk} \nearrow$). La fonction de désirabilité (FD) est utilisée afin d'optimiser les

paramètres de sorties. Le but des conditions de coupe et les paramètres de réponses, ainsi que leurs limites inférieures et supérieures sont illustrés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7-Conditions de l'optimisation des paramètres de tournage dur

Conditions	But	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe, V_c [m/min]	In range	24	96
Vitesse de coupe, f [mm/rev]	In range	0,050	0,256
Profondeur de passe, ap [mm]	In range	0,10	0,30
Paramètre R_{pk} , [μm]	Minimiser	0,26	3,06
Paramètre R_k , [μm]	Minimiser	1,08	3,95
Paramètre R_{vk} , [μm]	Maximiser	0,31	1,6

4.4.1 Optimisation des conditions de coupe pour R_{pk}

L'objectif choisi dans ce premier cas, c'est une hauteur des pics saillants minimale (R_{pk}) sans prendre par considération les autres paramètres de sortie (R_k et R_{vk}). Ce cas est très intéressant pour limité la période de rodage de moteur.

Le tableau 4.8 résume les résultats de l'optimisation de la réponse de paramètre de la courbe du taux de portance R_{pk} par la méthodologie de surface de réponse (MSR). La figure 4.5 illustre le graphique de contour de désirabilité (100 %) pour le premier critère de la courbe d'Abbott Firestone (R_{pk}).

La figure 4.6 montre le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des trois réponses ainsi que la désirabilité combinée $DF = 1,000$. La figure 4.7 illustre les résultats de graphique de l'optimisation de R_{pk} .

Tableau 4.8-Optimisation de la réponse pour le paramètre R_{pk}

Solution n°.	V_c [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	R_{pk} [μm]	Désirabilité	Remarques
1	87,964	0,077	0,168	0,156	1,000	Sélection
2	96,000	0,106	0,100	0,211	1,000	
3	57,889	0,051	0,150	0,231	1,000	
4	89,308	0,095	0,125	0,201	1,000	
5	92,901	0,060	0,100	-0,198	1,000	
6	89,883	0,055	0,219	0,100	1,000	
7	58,685	0,056	0,111	0,200	1,000	
8	94,540	0,083	0,104	0,030	1,000	
9	74,033	0,054	0,104	-0,117	1,000	
10	72,700	0,054	0,219	0,168	1,000	

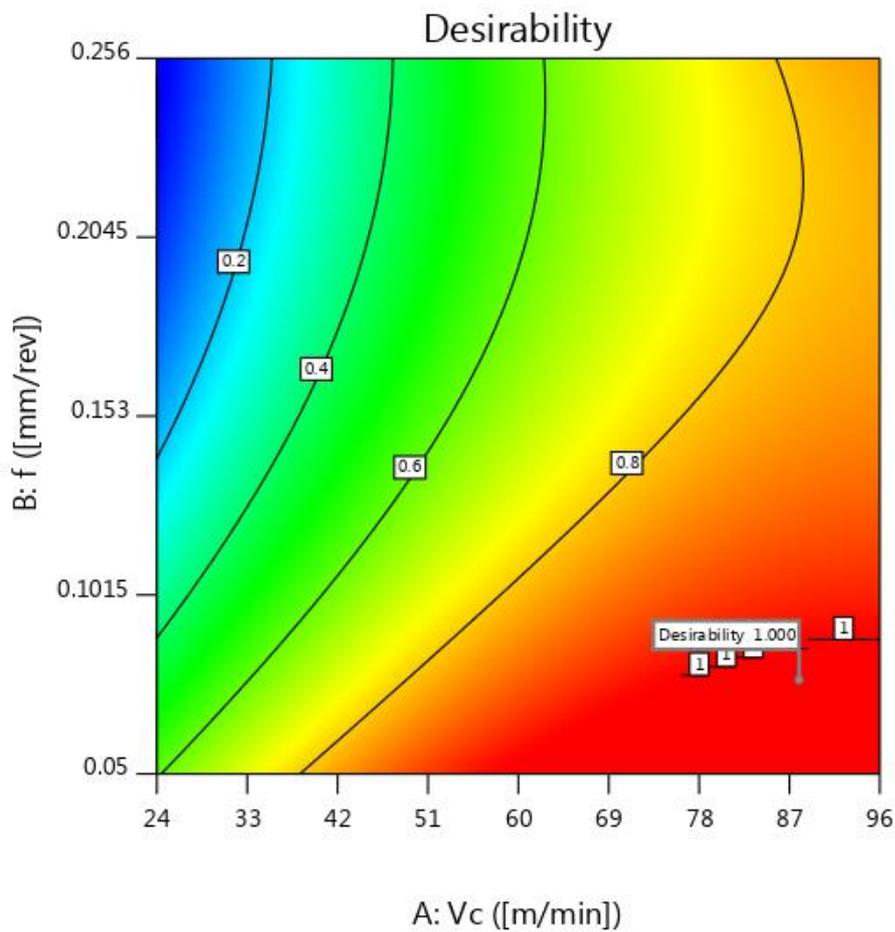


Figure 4.5- Graphique de contour de désirabilité pour le paramètre R_{pk}

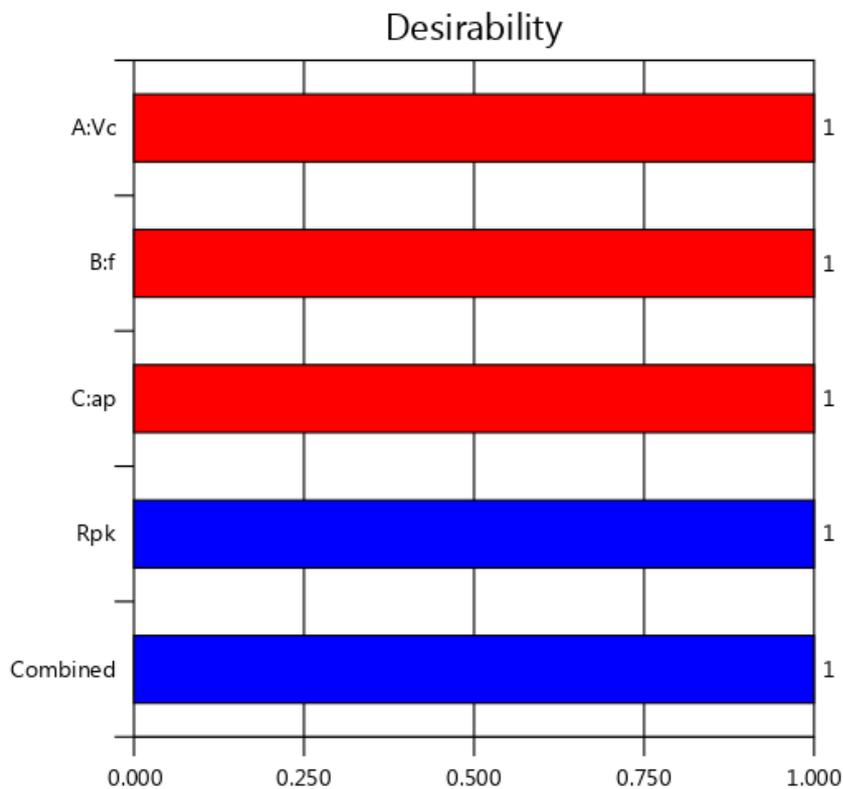
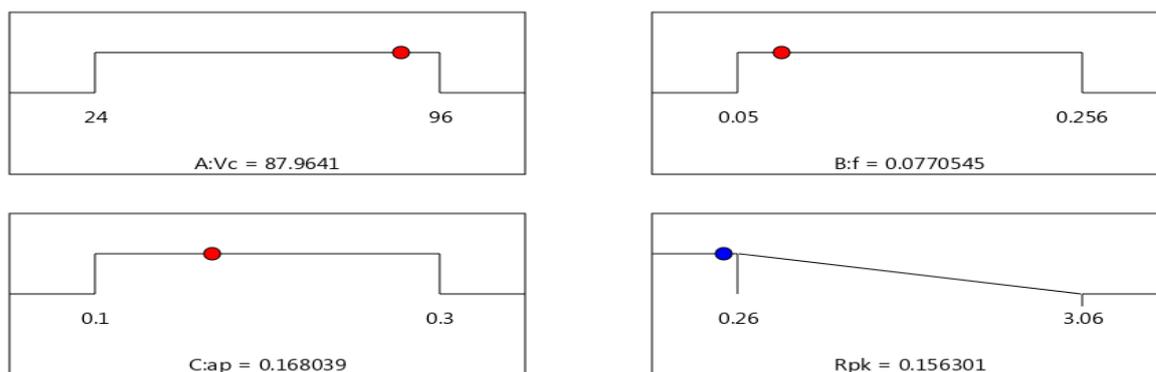


Figure 4.6- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de paramètre (R_{pk}) ainsi que les désirabilités combinés = 1



Desirability = 1.000

Figure 4.7- Graphique de la fonction de désirabilité de paramètres de sortie R_{pk}

D'après le tableau 4.8 et les figures (4.5-4.7), les paramètres de coupe optimaux s'avèrent : la vitesse de coupe (V_c) de 87,96 m/min, l'avance par tour (f) de 0,07 mm/tr et la profondeur de passe (ap) de 0,16 mm. La hauteur des pics saillants est $R_{pk} = 0,15 \mu\text{m}$.

4.4.2- Optimisation des conditions de coupe pour R_k

L'objectif choisi dans ce deuxième cas, c'est une profondeur de rugosité du cœur minimale (R_k) sans prendre par considération les autres paramètres de sortie (R_{pk} et R_{vk}). Ce cas est très attirant pour diminuer la consommation d'huile de moteur.

Le tableau 4.9 présente les résultats de l'optimisation de la réponse de paramètre de la courbe du taux de portance R_k par la méthodologie de surface de réponse (MSR). La figure 4.8 illustre le graphique de contour de désirabilité (100 %) pour le deuxième critère de la courbe d'Abbott Firestone (R_k).

La figure 4.9 illustre le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des trois réponses ainsi que la désirabilité combinée $DF = 1,000$. La figure IV.10 montre les résultats de graphique de l'optimisation de R_k .

Tableau 4.9- Optimisation de la réponse pour le paramètre R_k

Solution n°.	V_c [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	R_k [μm]	Désirabilité	Remarques
1	90,647	0,058	0,170	1,009	1,000	Sélection
2	96,000	0,106	0,100	0,982	1,000	
3	94,387	0,055	0,198	1,031	1,000	
4	95,969	0,118	0,106	1,074	1,000	
5	80,936	0,053	0,111	0,901	1,000	
6	88,666	0,052	0,129	0,823	1,000	
7	95,968	0,249	0,103	1,058	1,000	
8	93,334	0,053	0,139	0,809	1,000	
9	74,601	0,052	0,106	1,006	1,000	
10	95,566	0,057	0,156	0,883	1,000	

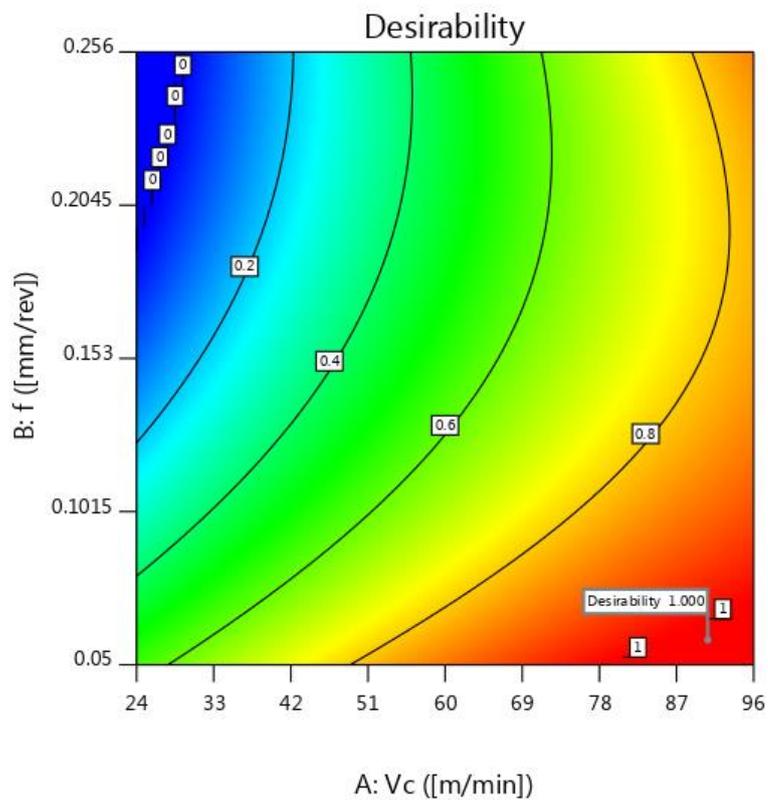


Figure 4.8- Graphique de contour de désirabilité pour le paramètre R_k

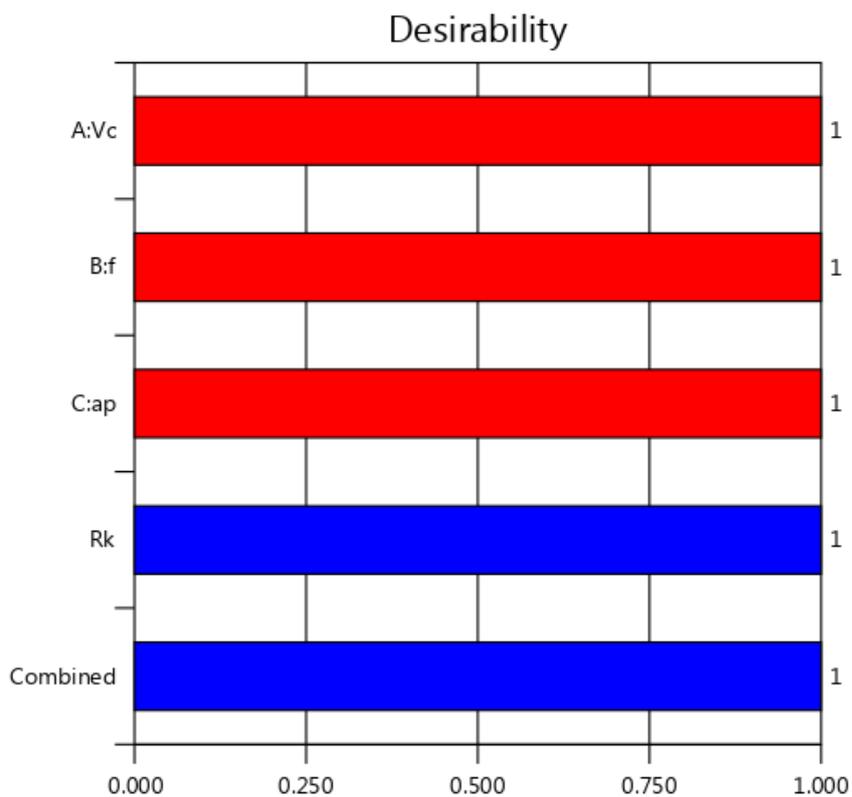


Figure 4.9- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de réponse (R_k) ainsi que les désirabilités combinés = 1

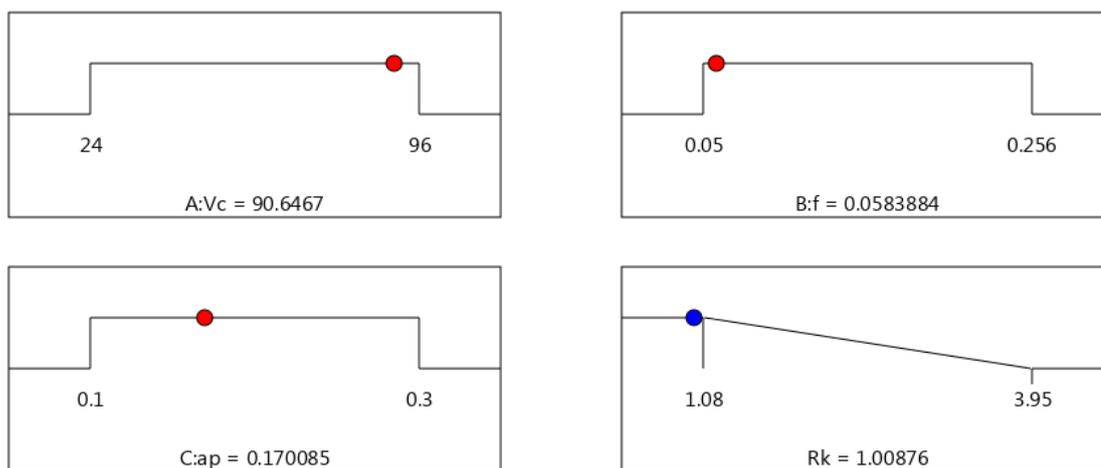


Figure 4.10- Graphique de la fonction de désirabilité de paramètres R_k

D'après le tableau 4.9 et les figures (4.8-4.10), les paramètres de coupe optimaux s'avèrent : la vitesse de coupe (V_c) de 90,64 m/min, l'avance par tour (f) de 0,06 mm/tr et la profondeur de passe (ap) de 0,17 mm. La profondeur de rugosité du cœur est $R_k = 1,00 \mu\text{m}$.

4.4.3 Optimisation des conditions de coupe pour R_{vk}

L'objectif choisi dans ce troisième cas, c'est une profondeur des creux profonds maximale (R_{vk}) sans prendre par considération les autres paramètres de sortie (R_{pk} et R_k). Ce cas est très attirant pour la circulation, l'alimentation et le stockage d'huile de moteur.

Le tableau 4.10 montre les résultats de l'optimisation de la réponse de paramètre de la courbe d'Abbott Firestone R_{vk} par la méthodologie de surface de réponse (MSR). La figure 4.11 présente le graphique de contour de désirabilité (100 %) pour le troisième critère de la courbe d'Abbott Firestone (R_{vk}).

La figure 4.12 présente le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des trois réponses ainsi que la désirabilité combinée $DF = 1,000$. La figure 4.13 illustre les résultats de graphique de l'optimisation de R_{pk} .

Tableau 4.10- Optimisation de la réponse pour le paramètre R_{vk}

Solution n°.	V_c [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	R_{vk} [μm]	Désirabilité	Remarques
1	25,724	0,237	0,168	1,622	1,000	Sélection
2	25,094	0,254	0,232	1,671	1,000	
3	25,236	0,243	0,179	1,652	1,000	
4	25,259	0,238	0,130	1,637	1,000	
5	24,483	0,222	0,105	1,604	1,000	
6	25,400	0,233	0,208	1,619	1,000	
7	24,549	0,244	0,289	1,643	1,000	
8	24,933	0,250	0,155	1,680	1,000	
9	25,583	0,250	0,124	1,657	1,000	
10	24,000	0,256	0,300	1,675	1,000	

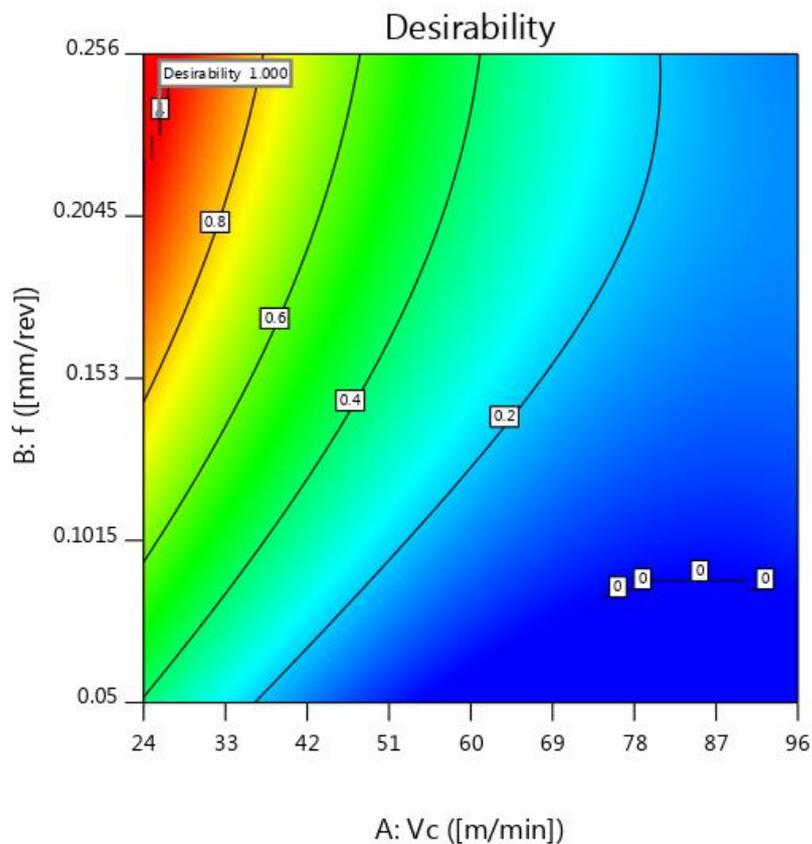


Figure 4.11- Graphique de contour de désirabilité pour le paramètre R_{vk}

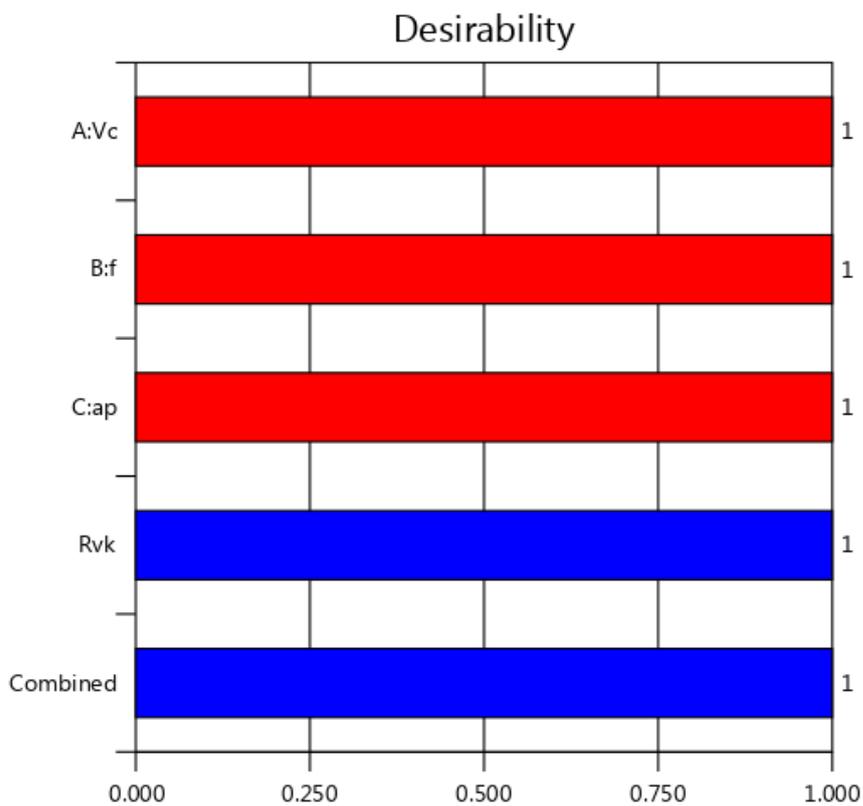


Figure 4.12- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses ainsi que les désirabilités combinés = 1

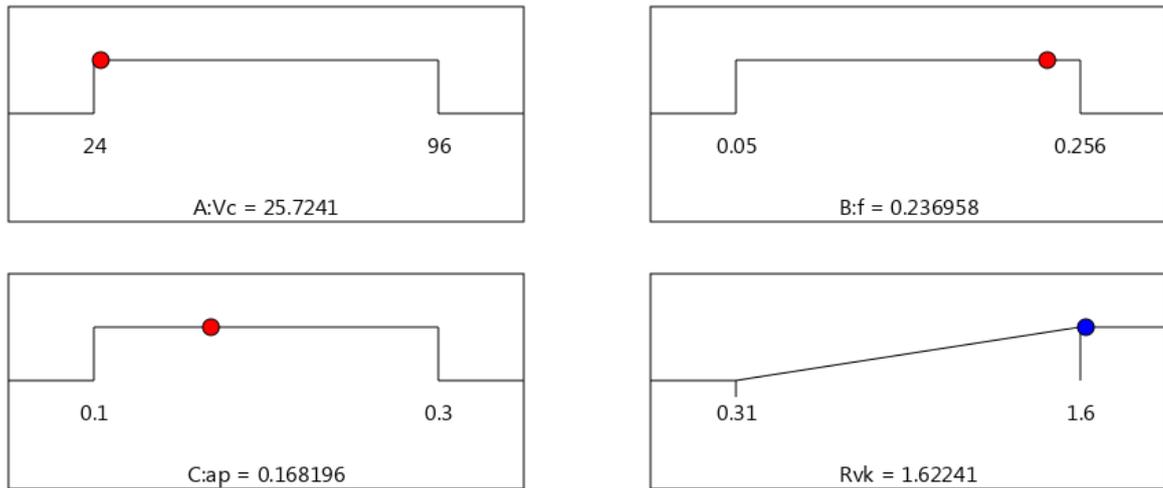


Figure 4.13- Graphique de la fonction de désirabilité de paramètre de sortie R_{vk}

D'après le tableau 4.10 et les figures (4.11-4.13), les paramètres de coupe optimaux s'avèrent: la vitesse de coupe (V_c) de 25,72 m/min, l'avance par tour (f) de 0,23 mm/tr et la profondeur de passe (ap) de 0,17 mm. La profondeur des creux profonds est $R_{vk} = 1,62 \mu\text{m}$.

4.4.4 Optimisation combinée (R_{pk} , R_k et R_{vk})

L'optimisation combinée à un avantage intéressant consiste à avoir une bonne qualité de la courbe du taux de portance ($R_{pk} \searrow$, $R_k \searrow$ et $R_{vk} \nearrow$), et c'est ce qu'il est visé dans l'industrie automobile. Le tableau 4.11 présente les résultats des solutions proposées obtenus dans le cas d'optimisation combinée. La figure 4.14 représente le graphique de contour de désirabilité (55,2 %) pour les trois critères de la courbe d'Abbott Firestone.

La figure 4.15 présente le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des trois réponses ainsi que la désirabilité combinée $DF = 0,552$. La figure 4.16 présente les résultats de graphique de l'optimisation combinée de R_{pk} , R_k et R_{vk} .

Tableau 4.11-Optimisation de la réponse pour les trois paramètres (R_{pk} , R_k et R_{vk})

Solution n°.	V_c [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	R_{pk} [μm]	R_k [μm]	R_{vk} [μm]	Désirabilité	Remarques
1	24.462	0.050	0.300	1.580	1.911	0.886	0.552	Sélection
2	24.771	0.050	0.300	1.567	1.904	0.880	0.552	
3	24.178	0.050	0.300	1.592	1.916	0.892	0.552	
4	25.761	0.050	0.300	1.527	1.885	0.858	0.551	
5	26.334	0.050	0.300	1.506	1.876	0.847	0.551	
6	27.364	0.050	0.300	1.464	1.853	0.825	0.550	
7	25.105	0.052	0.300	1.576	1.926	0.882	0.549	
8	25.425	0.050	0.288	1.517	1.939	0.861	0.549	
9	24.001	0.050	0.285	1.569	1.981	0.891	0.548	
10	25.933	0.053	0.300	1.556	1.926	0.870	0.548	

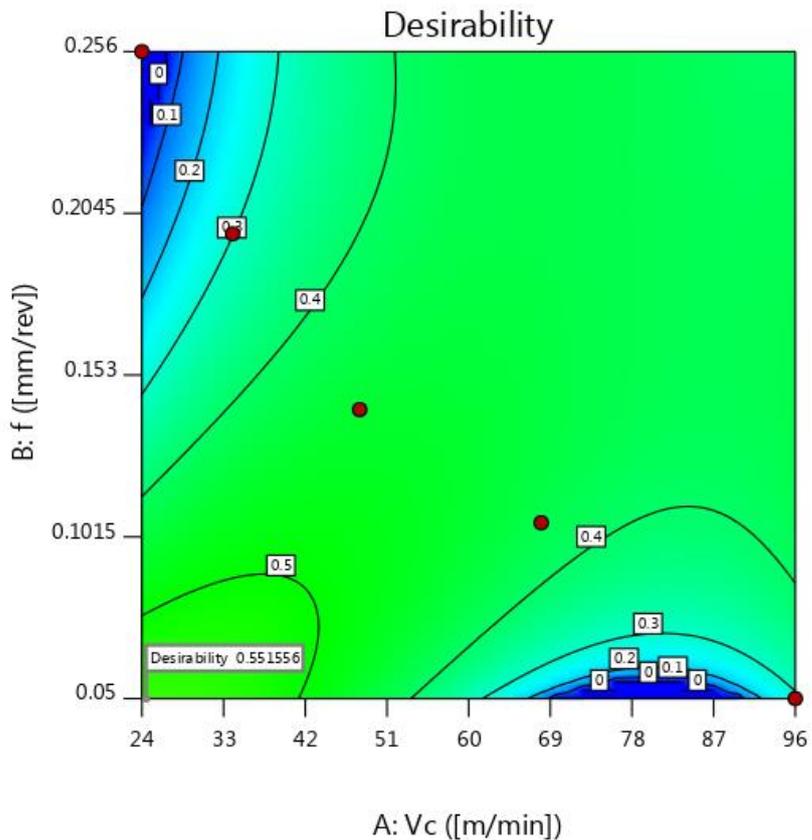


Figure 4.14- Graphique de contour de désirabilité pour les paramètres de sortie R_{pk} , R_k et R_{vk}

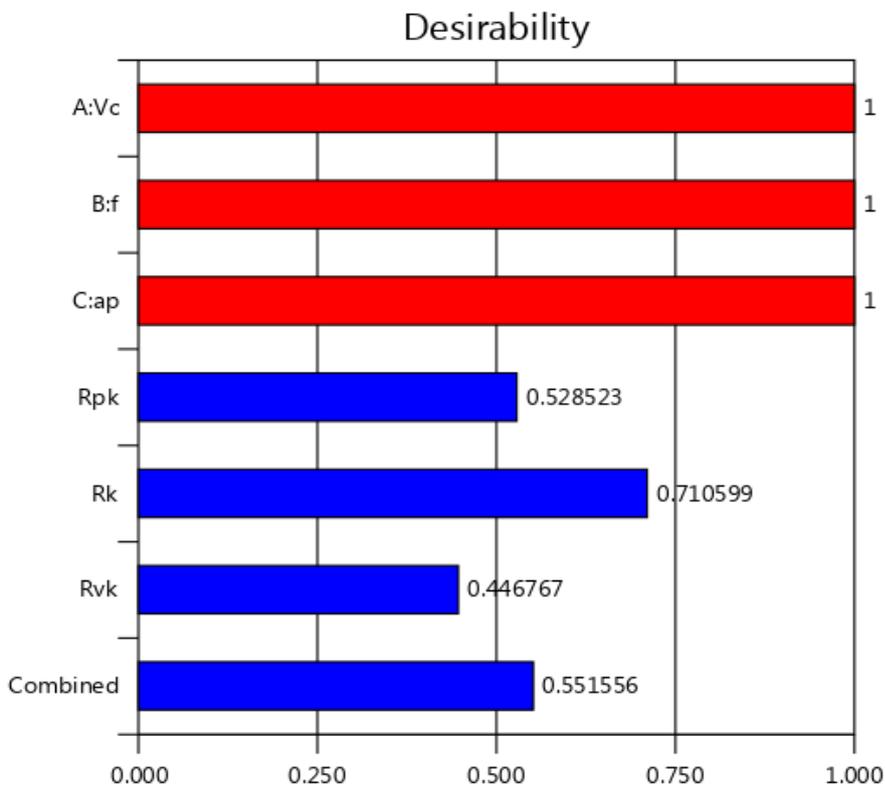
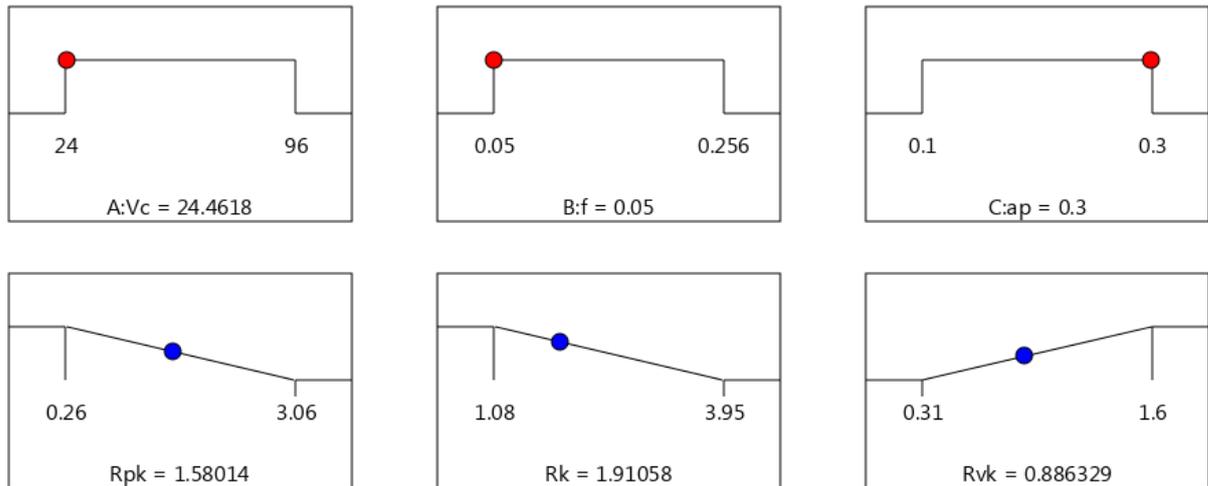


Figure 4.15- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses ainsi que les désirabilités combinés=0,551



Desirability = 0.552

Figure 4.16- Graphique de l'optimisation combinée de R_{pk} , R_k et R_{vk}

D'après le tableau 4.11 et les figures (4.14-4.16), les valeurs des paramètres de coupe optimaux pour obtenir une meilleure qualité de la courbe du taux de portance sont : $V_c = 24,46$ m/min, $f = 0,05$ mm/tr et $ap = 0,3$ mm. Toutefois, pour ce régime de coupe, les paramètres de la courbe d'Abbott Firestone sont : $R_{pk} = 1,58$ μ m, $R_k = 1,91$ μ m et $R_{vk} = 0,88$ μ m.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'optimisation des conditions de coupe (V_c , f et ap) par l'application de deux types de méthodes différentes à savoir : l'optimisation mono-objectif par la technique de Taguchi, où l'application exige de rechercher les conditions de coupe optimales pour un seul paramètre de réponse, et l'optimisation multi-objectif par deux techniques (GRA et DF), où les deux applications permettent de rechercher les conditions de coupe optimales pour deux ou plusieurs paramètres de sortie en même temps. L'étude réalisée dans cette partie de mémoire permet de tirer les conclusions suivantes :

- La combinaison optimale des paramètres de coupe obtenue par la méthode de Taguchi est : une vitesse de coupe de $V_c = 96$ m/min, une avance de $f = 0,05$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap = 0,1$ mm pour les deux paramètres optimales (R_{pk} et R_k) et $V_c = 24$ m/min, une avance de $f = 0,05$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap = 0,1$ mm pour l'autre paramètre optimale (R_{vk}).
- La combinaison optimale par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise est : $Vc5 f2 ap1$ (vitesse de coupe : $V_c = 96$ m/min, avance : $f = 0,106$ mm/tr et profondeur de passe : $ap = 0,10$ mm).

- La combinaison optimale par la technique de méthodologie de surface de réponse (RSM) pour une meilleure qualité de la courbe du taux de portance est : $V_c = 24,46$ m/min, $f = 0,05$ mm/tr et $ap = 0,3$ mm.
- La méthode de Taguchi peut être plus agissante dans le cas d'un seul paramètre de sortie. Par contre les méthodes (GRA) et (DF) sont employées pour l'optimisation multi-objective.

CNCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ces travaux de recherche ont été consacrés à l'étude de l'impact des conditions de coupe (vitesse de coupe V_c , vitesse d'avance f et profondeur de coupe a_p) du procédé de tournage dur (TD) sur trois paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}). Le matériau usiné est un acier de cémentation 16MC5 et l'outil de coupe en céramique.

Les principales conclusions retirées à partir de cette étude sont :

- Le tournage dur (TD) est un processus moderne dans son utilisation, le but de cette technique est que les pièces en acier de dureté élevée soient finies et permet d'obtenir un bon état de surface sans rectification conventionnelle.
- Le tournage dur est un procédé d'usinage qui réduit considérablement le prix de revient en ayant une bonne précision, flexible, rapide et donne une bonne qualité de pièces. Par conséquent, ce processus a été développé comme une alternative au processus de rectification conventionnelle.
- La méthode de Taguchi L_{25} a été exploitée avec succès pour réduire le nombre des expériences et d'augmenter le nombre des niveaux (5 niveaux dans notre cas). De plus, le rapport S/N est le critère important dans cette méthode.
- Le rapport S/N montre que la vitesse de coupe (V_c) est le facteur le plus fondamental affecte les paramètres de la courbe de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}) et la profondeur de coupe (a_p) est le moins signifiant.
- L'analyse ANOVA montre que parmi les paramètres de coupe significatifs sur la hauteur des pics saillants (R_{pk}), la vitesse de coupe apparait comme le paramètre le plus signifiant avec une contribution de 37,68%, suivie par la vitesse d'avance avec un pourcentage de contribution égal 21,67%, tandis que la profondeur de coupe est le dernier paramètre signifiant avec un faible pourcentage de 1,346%. Concernant les interactions et les produits, il semble clair que les deux produits significatifs sont : $V_c \times V_c$ et $f \times f$ avec une contribution 1,269%, 0,852% respectivement.
- L'analyse ANOVA des résultats de la profondeur de rugosité du cœur (R_k) constate que les trois conditions de coupe (V_c , f et a_p) ont un effet significatif. Cependant, la vitesse de coupe (V_c) est le facteur le plus important influençant avec une contribution de 37,65%. Le facteur suivant influant la profondeur de rugosité du cœur (R_k) est la vitesse d'avance (f) suivi par la profondeur de coupe (a_p), leurs contributions étant : 23,88% et 1,082%, respectivement. La contribution de produit de la vitesse d'avance ($f \times f$) est 0,986%. Les autres termes ont une contribution inférieure à 0,5%.
- L'analyse ANOVA constate que les deux vitesses (V_c et f) et le produit ($V_c \times V_c$) sont les paramètres significatifs sur la profondeur des creux profonds R_{vk} . Le plus signifiant étant la vitesse de coupe avec un pourcentage de contribution de 36,91%, suivi par la vitesse d'avance (19,50%) et

le produit de la vitesse de coupe ($V_c \times V_c$) avec une faible contribution de 1,801%. Les autres termes non significatifs ont une contribution inférieure à 1%.

- La comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimés par les modèles RSM et ANN montre clairement que, les modèles issus de la méthode des réseaux de neurones donnent des résultats excellents ($R^2(R_{pk}) = 99,99\%$, $R^2(R_k) = 99,99\%$ et $R^2(R_{vk}) = 99,99\%$) par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse ($R^2(R_{pk}) = 97,62\%$, $R^2(R_k) = 98,14\%$ et $R^2(R_{vk}) = 97,10\%$).

- Les modèles mathématiques trouvés représentent un intérêt important dans la mécanique et l'industrie, puisqu'ils permettent de faire des prédictions.

- Les deux méthodes (GRA) et (DF) sont employées pour l'optimisation multi-objective. Par contre, la méthode de Taguchi peut être plus agissante dans le cas d'un seul paramètre de sortie.

- Sur la base de l'approche d'optimisation de Taguchi, les paramètres de coupe optimales sont : une vitesse de coupe de $V_c = 96$ m/min, une avance de $f = 0,05$ mm/tr, et une profondeur de passe $a_p = 0,1$ mm pour les deux paramètres (R_{pk} et R_k) et $V_c = 24$ m/min, $f = 0,05$ mm/tr, et $a_p = 0,1$ mm pour l'autre paramètre optimale (R_{vk}).

- L'analyse relationnelle grise (GRA) a été utilisée pour résoudre le problème complexe d'optimisation simultanée de plusieurs réponses en convertissant l'optimisation multi-objective en un seul objectif d'optimisation équivalent. La combinaison optimale est : $V_c^5 f^2 a_p^1$ ($V_c = 96$ m/min, $f = 0,106$ mm/tr, et $a_p = 0,10$ mm).

- L'approche de la fonction de désirabilité est en effet appropriée à la méthodologie de la surface de réponse, son principe est de dimensionner toutes les réponses. Les valeurs optimales sont : $V_c = 24,46$ m/min, $f = 0,05$ mm/tr et $a_p = 0,3$ mm.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

- [1] Chunzheng DUAN and Minjie WANG .Microstructure and mechanism of adiabatic shear fracture during serrated chip formation of hard machining (2013) ;
- [2] S. Siraj, H. M. Dharmadhikari, N. Gore. Modeling of Roughness Value from Tribological Parameters in Hard Turning of AISI 52100 Steel. *Procedia Manufacturing* 20 (2018) 344-349 ;
- [3] M. W. Azizi, S. Belhadi, M. A. Yaltese, T. Mabrouki, J. F. Rigal: Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (12) (2012) 4105-4114 ;
- [4] A. Passeron, «Tournage», *Techniques de L'Ingénieur*, BM7086, 1997 ;
- [5] P.Umamaheswarrao*, D.Ranga Rajub, KNS Sumanc, B.Ravi Sankard,ABrief Note on the Application of Surface Defect Machining for Hard Turning ,*MaterialsToday: Proceedings* 18. 3087–3090 (2019) ;
- [6] H. Aouici, M. A. Yaltese, K. Chaoui, T. Mabrouki, J. F. Rigal, Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool : Prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement* 45 (2012) 344-353 ;
- [7] https://www.sandvik.coromant.com/sitecollection_documents/downloads/global/brochures/fr-fr/c-1040-161.pdf
Date de la dernière consultation du site: 28/03/2020
- [8] W. Grzesik, K. Żak. Modification of surface finish produced by hard turning using superfinishing and burnishing operations. *Journal of Materials Processing Technology* 212, 2012, 315-322 ;
- [9] W. Grzesik, T. Wanat. Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis. *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 364-371 ;
- [10] H. Aouici, H. Bouchelaghem, M. A. Yaltese, M. Elbah, B. Fnides: Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *Int J Adv Manuf Technol*, Volume 73, Issue 9-12, pp 1775-1788, 2014 ;
- [11] M. Dogra, V. S. Sharma, A. Sachdeva, N. M. Suri, J. S. Dureja. Tool Wear, Chip Formation and Workpiece Surface Issues in CBN Hard Turning, A Review. *International journal of precision engineerin and anufacturing*, Vol. 11, No. 2, pp. 341-358, 2010 ;
- [12] F. Klocke, E. Brinksmeier, K. Weinert, Capability profile of hard cutting and grinding processes. *CIRP Annals* 54, Volume 54, Issue 2, 2005, pp 22-45 ;
- [13] A. Khellouki, J. Rech, H. Zahouani, The effect of lubrication conditions on belt finishing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 50, Issue 10, 2010, pp 917-921 ;
- [14] P. Revel, N. Jouini, G. Thoquenne, F. Lefebvre, High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel. *Precision Engineering* 43 (2015) 24-34 ;
- [15] G.Poulachon, Usinabilité des matériaux difficiles. Application aux aciers durcis. *Laboratoire des Matériaux et Procédés LaBoMaP. Bourguignon* 2004 ;
- [16] Niclas Ånmark, Andrey Karasev and Pär Göran Jönsson, The Effect of Different Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Steels in *Materials* 8(2):751-783 • DOI: 10.3390/ma8020751 (2015) ;
- [17] A. Fouad, Etude de l'usure et de la rugosité lors de l'usinage De l'acier 100Cr6 avec les plaquettes CBN7020 Université de badjimokhtar – Annaba (2017) ;
- [18] Amritpal Singh, Mr. Harjeet Singh, Mr. Rakesh Kumar,Review on Effects of Process Parameters in Hard Turning of Steels ,pp: 2349-6010 (2016) ;
- [19] C. Pagès, Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition. Thèse de doctorat, N° d'ordre : 2003-37, Ecole centrale de lyon, (2003) ;
- [20] S. Ben chiheub, L. Boulanouar , Influence des paramètres de coupe sur la tenue du CBN 7020 lors du tournage ;
- [21] R. Mohamed, Sebaa Fethi, Automatisation des Instructions D'usinage cas Paramètres de Coupe, 2007 ;
- [22] W.M. Azizi , Utilisation des plans d'expériences en TD pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage (2014) ;
- [23] E. Mohamed, Investigation expérimentale sur l'effet de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe en Tournage en utilisant les techniques statistiques (2015) ;
- [24] I. Meddour, Prédiction de la rugosité de surface, des efforts prédiction de la rugosité de surface, des efforts de coupe et des vibrations de l'outil en Tournage dur par les méthodes RSM et ANN –Application au couple : AL2O3+TiC/ 100Cr6 ;
- [25] S.Khamel .Contribution à l'étude des phénomènes physique mis en jeu lors du tournage d'un acier traité (2014) ;
- [26] M, Allal, Optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage de deux aciers inoxydables.2016 ;
- [27] Labidi A, Prédiction de l'usure et de la durée de vie des outils de coupe lors du tournage des aciers 2012 ;
- [28] O. Zerti, Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA 2018 ;
- [29] Mehdi R, Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempe usine avec des plaquettes CBN (Nitrure de Bore Cubique).2001 ;
- [30] S. Saini, I. Singh Ahuja, V.S. Sharma, Influence of Cutting Parameters on Tool Wear and Surface Roughness in Hard Turning of AISI H11 Tool Steel using Ceramic Tools. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 8, pp. 1295-1302, 2012 ;

- [31] Z.Hessainia, Etude de l'impact des paramètres affectant la rugosité des surfaces et les efforts de coupe en usinage des pièces traitées thermiquement.2013 ;
- [32] M.C. Shaw, Assessment of machinability. Machinability, vol. 11ISI special report 94, the Iron steel, Institute, London ,1976 ;
- [33] B. Hadjira, Etude du comportement des outils CBN lors de l'usinage de l'acier fortement allié aisi D3 (2011).
- [34] Jouini, N, Matériaux & Surfaces, Mécanique et Morphologie des surfaces, 2010 Ref : A_3_1_2_2010_PR_02 1 Usinage de Haute Précision D'aciers a Roulements ;
- [35] D. Manivel, R. Gandhinathan, Optimization of surface roughness and tool wear in hard turning of austempered ductile iron (grade 3) using Taguchi method. Measurement 93 (2016) 108-116 ;
- [36] G. Bartarya, S.K.Choudhury, Effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness during finish hard turning AISI52100 grade steel. Procedia CIRP 1 (2012) 651-656 ;
- [37] N. Jouini, P. Revel, P.-E. Mazeran, M. Bigerelle, The ability of precision hard turning to increase rolling contact fatigue life. Tribology International 59 (2013) 141-146 ;
- [38] N. Jouini, P. Revel, G. Thoquenne, F. Lefebvre, Characterization of surfaces obtained by precision hard turning of AISI 52100 in relation to RCF life. Procedia Engineering 66 (2013) 793-802 ;
- [39] N. Jouini, P. Revel, M. Bigerelle, Relevance of Roughness Parameters of Surface Finish in Precision Hard Turning. SCANNING VOL. 9999, 1-9 (2013) ;
- [40] I. Meddour, M. A. Yallese, R. Khattabi, M. Elbah, L. Boulanouar, Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool. Int J Adv Manuf Technol, Volume 77, Issue 5-8, pp 1387-1399, 2014 ;
- [41] I. Meddour, M. A. Yallese, H. Bensouilah, A. Khellaf, M. Elbah , Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool. Int J Adv Manuf Technol (2018) 97:1931-1949 ;
- [42] Aissat Sahraoui, Mise au point d'un traitement de conversion de surface par diffusion précipitations, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. (2012) ;
- [43] Maerz, N. H., and Hilgers, M. C., 2010, A method for matching fractured surfaces using shadow profilometry. Third International Conference onTribology and Design 2010, May 11-13, 2010, Algarve, Portugal, pp. 237-248 ;
- [44] Goupy Jacques.Introduction aux plan d'expérience .Dunod, Paris,pp 303 (2001) ;
- [45] Technique d'ingénieur f1005, Planication expérimentale en agroalimentaire (2006) ;
- [46] H. Bensouilah, H. Aouici, I. Meddour, M. A. Yallese, T. Mabrouki, F. Girardin, Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process. Measurement 82 (2016) 1-18 ;
- [47] E. Yücel, M. Günay, Modelling and optimization of the cutting conditions in hard turning of high-alloy white castiron (Ni-Hard). Proc I MechE Part C: J Mechanical Engineering Science 227 (10), 2012, 2280-2290 ;
- [48] İ. Asiltürk, H. Akkus, Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. Measurement 44 (2011) 1697-1704 ;
- [49] R. Shetty, R.B. Pai, S.S. Rao, R. Nayak, Taguchi's technique in machining of metal matrix composites, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2009, vol.31, n.1, pp. 12-20 ;
- [50] Taguchi .G .Introduction to quality engineering .Asian productivity organisation, tokyo(1986) ;
- [51] Oussama Zertia2018.Article Simultaneous improvement of surface quality and productivity using grey relational analysis based Taguchi design for turning couple (AISI D3 steel/ mixed ceramic tool (Al₂O₃ + TiC)) ;
- [52] Bouzidi Adlane , Modélisation et optimisation nono et multi objectif des paramètres de coupe Lors de tournage d'un acier inoxydable 304L. 2019 ;
- [53] E.C. Harrington, The desirability function, IQC 21 (1965) ;
- [54] G. Derringer, Simultaneous optimization of several response variables, JQT, tome 12 (1980) ;
- [55] A.I. Khuri and J. Cornell, Response Surface Design and Analysis, Marcel Dekker, New York (1987) ;
- [56] A. Agrawal, S. Goelb, W. Bin Rashid, M. Pric, Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC). Applied Soft Computing 30 (2015) 279-286 ;
- [57] A. Alok, M. Das: Multi-objective optimization of cutting parameters during sustainable dry hard turning of AISI 52100 steel with newly develop HSN2-coated carbide insert. Measurement 133 (2019) 288-302 ;
- [58] O. Zerti, M. A. Yallese, R. Khattabi1, K. Chaoui, T. Mabrouki, Design optimization for minimum technological parameters when dry turning of AISI D3 steel using Taguchi method. Int J Adv Manuf Technol, Volume 89, Issue 5-8, 2017, pp 1915-1934 ;
- [59] S. Chinchankar, S.K. Choudhury, Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach. Measurement 46 (2013) 1572-1584 ;
- [60] Z. Hessainia, M. A. Yallese, L. Bouzid, T. Mabrouki, On the application of response surface methodology for predicting and optimizing surface roughness and cutting forces in hard turning by PVD coated insert. International Journal of Industrial Engineering Computations 6 (2015) 267-284 ;
- [61] Oussama Zertia2018, Article Simultaneous improvement of surface quality and productivity using grey relational analysis based Taguchi design for turning couple (AISI D3 steel/ mixed ceramic tool (Al₂O₃ + TiC)) ;
- [62] T. Kivak, Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. Measurement 50 (2014) 19-28 ;

- [63] T. Kıvak, G. Samtaş, A. Çiçek, Taguchi method based optimization of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills. *Measurement* 45 (2012) 1547-1557 ;
- [64] M. Nalbant, H. Gökkaya, G. Sur, Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials and Design* 28 (2007) 1379-1385 ;
- [65] A. Khellouki, J. Rêch, H. Zahouani, The effect of abrasive grain's wear and contact conditions on surface texture in belt finishing. *Wear* 263 (2007a), pp.81–87 ;
- [66] A. Kalyon, M. Günay, D. Özyürek, Application of grey relational analysis based on Taguchi method for optimizing machining parameters in hard turning of high chrome cast iron. *Advances in Manufacturing* 6 (4), 2018, 419–429 ;
- [67] A. Kacal, F. Yıldırım , Application of grey relational analysis in high-speed machining of hardened AISI D6 steel. *Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science* 227(7), 2012, 1566–1576 ;

Résumé

Le processus de tournage dur implique l'usinage des matériaux de très haute dureté. Aujourd'hui, ce processus est très utilisé dans l'industrie de mécanique de précision. En outre, la caractérisation de la texture de surface fonctionnelle par la norme ISO 13565 standard occupe une place importante dans la mécanique automobile. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux de ce mémoire, le but principal est d'étudier l'impact des conditions de coupe (vitesse de coupe V_c , vitesse d'avance f et profondeur de coupe ap) du procédé de tournage dur (TD) sur trois paramètres de la courbe du taux de portance (R_{PK} , R_K et R_{VK}). Pour cela, des essais de tournage d'acier 16MC5 par un outil de coupe en céramique a été utilisé. L'étude statistique qui repose sur la méthodologie de surface de réponse (MSR), le réseau de neurone artificiel (RNA), l'analyse de variance (ANOVA) et la régression quadratique (RQ) sont réalisées afin de modéliser les trois paramètres de sorties et d'optimiser les paramètres de coupe d'entrés. Le plan d'expérience utilisé dans cette étude est le plan orthogonal L_{25} de Taguchi.

Mots-clés : Tournage dur, Norme ISO 13565 standard, Courbe du taux de portance, MSR, RNA, ANOVA, Taguchi.

Abstract

The hard turning process involves machining very high hardness materials. Today, this process is widely used in the precision mechanical industry. In addition, the characterization of the functional surface texture by the norm ISO 13565 standard occupies an important place in automotive mechanics. It is in this context that the work of this memory, the main goal is to study the impact of cutting conditions (cutting speed V_c , feed rate f and cutting depth ap) of the hard turning process (HT) on three parameters of the bearing area curve (R_{PK} , R_K and R_{VK}). For this, tests of turning 16MC5 steel by a ceramic cutting tool were used. The statistical study which relies on the response surface methodology (RSM), and artificial neural network (ANN), analysis of variance (ANOVA) and quadratic regression (RQ) are performed in order to model the three output parameters and optimize the input cut parameters. The experimental design used in this study is the Taguchi L_{25} orthogonal array.

Keywords: Hard turning, ISO 13565 standard, Bearing area curve, RSM, ANN, ANOVA, Taguchi.

ملخص

تتضمن عملية الخراطة الصلبة تصنيع مواد ذات صلابة عالية جداً. في يومنا هذا، تستخدم هذه العملية على نطاق واسع في صناعة الميكانيكية الدقيقة. بالإضافة إلى ما سبق، يحتل توصيف نسيج السطح الوظيفي بواسطة معيار ISO 13565 مكاناً مهماً في ميكانيك السيارات، والهدف الرئيسي من الأطروحة هو دراسة تأثير ظروف القطع (سرعة القطع V_c ، معدل التغذية f وعمق القطع ap) لعملية الخراطة الصلبة (TD) على ثلاث معلمات لمنحنى معدل الرفع (R_{PK} ، R_K و R_{VK}). لهذا الغرض، تم إجراء

اختبارات على فولاذ 16MC5 باستخدام أداة قطع السيراميك. الدراسة الإحصائية تعتمد على منهجية سطح الاستجابة (RSM)، الشبكة العصبية الاصطناعية (RNA)، إجراء تحليل التباين (ANOVA) والانحدار التربيعي (RQ) لنمذجة معلمات الإخراج الثلاثة وتحسين معلمات قطع الإدخال. التصميم التجريبي المستخدم في هذه الدراسة هي المستوى المتعامد (L₂₅) تاكيشي. **الكلمات الرئيسية:** الخرطة الصلبة، معيار ISO 13565 ، منحنى معدل الرفع، MSR، RNA، ANOVA، تاكيشي