

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



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour obtenir le diplôme de Master

Présenté par : **BOUHZEM Oussama**

Option : **Construction mécanique**

=====

**Modélisation et optimisation mono et multi-objective
des conditions d'usinage de l'acier AISI D3 en utilisant
les méthodes RMS, Taguchi et la fonction de
désirabilité**

=====

Sous la direction de : **Pr. yallese.M. A**

Année universitaire 2018/2019

Dédicaces

J'ai le grand honneur de dédie

Ce modeste travaille à :

A mes parents

A mes chères frères et sœurs

*A toute ma famille **Bouhzem***

A tous ceux qui me sont chers et proches

A tout le groupe G.M ainsi que les étudiants de Quelma

A toute personne m'ayant encouragé ou aidé au long de mes études.

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier الله le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce

Modeste travail.

En second lieu, je tiens à remercier notre encadreur Pr. Yaltese.M. A, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Je remercie également le président et les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je tiens à remercier également Dr. BOUCHRIT sabeti chef de département de génie mécanique.

J'adresse mes sincères remerciements au directeur du Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) de l'université de 08 mai 1945 Guelma. Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I-1 DIFFERENTS TYPES DE REVETEMENTS ET LEURS SIGNIFICATIONS	21
TABLEAU I-2 COMPARAISON DES PROPRIETES DES MODES DE DEPOSITION PVD ET CVD.	23
TABLEAU II-1 LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ACIER AISI D3.....	31
TABLEAU II-2 PROPRIETES TECHNIQUES DU AISI D3	32
TABLEAU II-3 CARACTERISTIQUES DE LA PORTE PLAQUETTE UTILISEE.	33
TABLEAU II-4 MATRICE DE PLANIFICATION POUR UN PLAN DE TAGUCHI (L16).	39
TABLEAU III-1 RESULTATS DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUE D'USINAGE POUR UN PLAN DE TAGUCHI L16	41
TABLEAU III-2 ANALYSE DE LA VARIANCE (ANOVA) POUR LA RUGOSITE DE SURFACE (RA).....	44
TABLEAU III-3 RESULTATS DE L'ANOVA POUR L'EFFORT DE COUPE (Fz).	50
TABLEAU III-4 ANALYSE DE LA VARIANCE (ANOVA) POUR DE LA PUISSANCE DE COUPE (PC)	55
TABLEAU III-5 ANALYSE DE LA VARIANCE (ANOVA) POUR DE LE COPEAU ENLEVE (MRR).....	58
TABLEAU IV-1 SIGNAL/BRUIT DES PARAMETRES DE SORTIES ETUDIEES.	66
TABLEAU IV-2 MOYENNE DES RATIOS S/B(RA) POUR CHAQUE TABLEAU IV 3NIVEAU DES FACTEURS... 67	67
TABLEAU IV-3 MOYENNE DES RATIOS S/B(Fz) POUR CHAQUE NIVEAU DES FACTEURS.....	68
TABLEAU IV-4 MOYENNE DES RATIOS S/B(PC) POUR CHAQUE NIVEAU DES FACTEURS.....	69
TABLEAU IV-5 MOYENNE DES RATIOS S/B(MRR) POUR CHAQUE NIVEAU DES FACTEURS.	70
TABLEAU IV-6 BUT ET GAMME DE PARAMETRES POUR LE 1ER CAS D'OPTIMISATION.	74
TABLEAU IV-7 BUT ET GAMME DE PARAMETRES POUR LE 2EMER CAS D'OPTIMISATION.	74
TABLEAU IV-8 BUT ET GAMME DE PARAMETRES POUR LE 3EME CAS D'OPTIMISATION.	74
TABLEAU IV-9 BUT ET GAMME DE PARAMETRES POUR LE 4EME CAS D'OPTIMISATION	75
TABLEAU IV-10 BUT ET GAMME DE PARAMETRES POUR LE 5EME CAS D'OPTIMISATION	75
TABLEAU IV-11 - SOLUTIONS DU 1ER CAS D'OPTIMISATION.....	76
TABLEAU IV-12 SOLUTIONS DU 2EME CAS D'OPTIMISATION.	76
TABLEAU IV-13 SOLUTIONS DU 3 ^{EME} CAS D'OPTIMISATION.....	76
TABLEAU IV-14 SOLUTIONS DU 4EME CAS D'OPTIMISATION.	77
TABLEAU IV-15 SOLUTIONS DU 5EME CAS D'OPTIMISATION.	77

LISTE DES FIGURES

FIGURE I-1 COMPARAISON DES MATERIAUX DE COUPE D'APRES [2]	3
FIGURE I-2 PLAQUETTE CARBURE (REVETEMENT MULTICOUCHE).	5
FIGURE I-3 STRUCTURE DU CERMET.	7
FIGURE I-4 OBTENTION DE PCBN (POLYCRISTALIN DE NITRURE DE BORE) [5].	7
FIGURE I-5 STRUCTURE D'UN REVETEMENT BICOUCHE. [6].....	8
FIGURE I-6 EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE [W/M.K], EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	8
FIGURE I-7 COURBE (θ° , T[MIN]),	9
FIGURE I-8 COURBE (θ° , T[MIN])	10
FIGURE I-9 INFLUENCE DE LA LUBRIFICATION	10
FIGURE I-10 MESURE DE RUGOSITE	12
FIGURE I-11 CRITERES DE RUGOSITE.....	12
FIGURE I-12 RA: RUGOSITE MOYENNE DU PROFIL	13
FIGURE I-13 RZ: HAUTEUR DE PROFIL MAXIMUM.....	14
FIGURE I-14 RT: HAUTEUR DE PROFIL TOTAL DU PROFIL R	14
FIGURE I-15 COMPOSANTES DE L'EFFORT DE COUPE[10].....	14
FIGURE I-16 INFLUENCE DE LA VITESSE DE COUPE SUR L'EFFORT DE COUPE	15
FIGURE I-17 AVANCE ET PROFONDEUR DE PASSE.....	16
FIGURE I-18 MATERIAU DE COUPE (PLAQUETTE).....	16
FIGURE I-19 BRISE-COPEAUX.	17
FIGURE I-20 INFLUENCE DE L'ANGLE DE DIRECTION PRINCIPAL.	17
FIGURE I-21 ANALYSE PAR MEB D'UNE PLAQUETTE USEE EN PCBN (CARSTEN, 2003).	18
FIGURE I-22 PRINCIPAUX MODES DE DEPOSITION DE REVETEMENT POUR OUTILS-COUPANTS [11].....	21
FIGURE I-23 STATISTIQUE SUR L'EVOLUTION DE L'UTILISATION RELATIVE DES REVETEMENTS.....	22
FIGURE I-24 EFFET D'INTERACTION DES PARAMETRES DE COUPE (F, Vc ET D) SUR : (Kc) ET (P) [10]. ...	24
FIGURE I-25 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS PREDITES ET MESUREES POUR LES TROIS RUGOSITES DE SURFACE CRITERES.	25
FIGURE I-26 COMPARAISON ENTRE LES PLAQUETTES CC6050WH ET CC6050 POUR LA RUGOSITE DE SURFACE RZ [12].	26
FIGURE I-27 EFFET DE LA PROFONDEUR DE PASSE ET LE TEMPS D'USINAGE SUR PUISSANCE ET PRESSION DE COUPE.	27
FIGURE I-28 INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR RA POUR LA FONTE BLANCHE AVEC UNE DURETE DE 50 HRC.	28
FIGURE I-29 L'EFFET DES CONDITIONS DE COUPE SUR LES FACTEURS DE REPONSE :(A) (RA) ; (B) (Fv) ET (C) (Fr).	28
FIGURE II-1 TOUR A CHARIOTER ET A FILETER MODELE SN40C.	30
FIGURE II-2 EPROUVETTES POUR DIFFERENTS ESSAIS.	31
FIGURE II-3 MATERIAU A USINER (AISI D3)	32
FIGURE II-4 PORTE OUTIL UTILISE	32
FIGURE II-5 MONTAGE DU DYNAMOMETRE SUR LA TABLE DE LA MACHINE.....	33
FIGURE II-6 CAPTEUR D'EFFORT DE COUPE KISTLER [13].	34

FIGURE II-7 EXEMPLE D'ACQUISITION DU LOGICIEL DYNOWARE.	34
FIGURE II-8 CHAINE DE MESURE DES EFFORTS DE COUPE.	35
FIGURE II-9 RUGOSIMETRE 2D	35
FIGURE III-1 GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX POUR (RA).	45
FIGURE III-2 DIAGRAMME D'INTERACTION POUR (RA).....	46
FIGURE III-3 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS MESUREES ET PREDITES DE (RA).	47
FIGURE III-4 EVOLUTION DE LA RUGOSITE RA EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE VC-F	48
FIGURE III-5 EVOLUTION DE LA RUGOSITE RA EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE AP-F48	
FIGURE III-6 EVOLUTION DE LA RUGOSITE RA EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE AP-VC	48
FIGURE III-7 EVOLUTION DE LA RUGOSITE RA EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE VC-R	49
FIGURE III-8 EVOLUTION DE LA RUGOSITE RA EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE R-F49	
FIGURE III-9EVOLUTION DE LA RUGOSITE RA EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE R-AP49	
FIGURE III-10 GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX POUR (Fz).	51
FIGURE III-11 DIAGRAMME D'INTERACTION POUR (Fz).....	51
FIGURE III-12 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS MESUREES ET PREDITES DE (Fz).....	52
FIGURE III-13 DIAGRAMMES DE SURFACES ET GRAPHIQUE DE CONTOUR DE (Fz) EN FONCTION DE Vc; F53	
FIGURE III-14 DIAGRAMMES DE SURFACES ET GRAPHIQUE DE CONTOUR DE (Fz) EN FONCTION DE Vc ; AP	53
FIGURE III-15 DIAGRAMMES DE SURFACES ET GRAPHIQUE DE CONTOUR DE (Fz) EN FONCTION DE F ; AP53	
FIGURE III-16 DIAGRAMMES DE SURFACES ET GRAPHIQUE DE CONTOUR DE (Fz) EN FONCTION DE Vc ; R54	
FIGURE III-17 DIAGRAMMES DE SURFACES ET GRAPHIQUE DE CONTOUR DE (Fz) EN FONCTION DE F ; R 54	
FIGURE III-18 DIAGRAMMES DE SURFACES ET GRAPHIQUE DE CONTOUR DE (Fz) EN FONCTION DE R ; AP54	
FIGURE III-19 GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX POUR LA PUISSANCE DE COUPE (Pc).....	56
FIGURE III-20 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS MESUREES ET PREDITES POUR LA PUISSANCE DE COUPE (Pc).....	56
FIGURE III-21 DIAGRAMMES DE SURFACES ET CONTOUR DU (Pc) EN FONCTION DE (AP, R)	57
FIGURE III-22 DIAGRAMMES DE SURFACES ET CONTOUR DU (Pc) EN FONCTION DE (R, F).....	57
FIGURE III-23 DIAGRAMMES DE SURFACES ET CONTOUR DU (Pc) EN FONCTION DE (Vc, R)	58
FIGURE III-24 GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX POUR LA DEBIT DU COPEAU ENLEVE (MRR).....	59
FIGURE III-25 DIAGRAMME D'INTERACTION POUR LA DEBIT DU COPEAU ENLEVE (MRR).	60
FIGURE III-26 EVOLUTION DE LA RUGOSITE MRR EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE VC- F.....	60
FIGURE III-27 EVOLUTION DE LA RUGOSITE MRR EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE AP- VC	61
FIGURE III-28 EVOLUTION DE LA RUGOSITE MRR EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE AP-F	61
FIGURE III-29 EVOLUTION DE LA RUGOSITE MRR EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE VC- R.....	61

FIGURE III-30 EVOLUTION DE LA RUGOSITE MRR EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE R-F	62
FIGURE III-31 20EVOLUTION DE LA RUGOSITE MRR EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE R- AP.....	62
FIGURE IV-1 GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX SUR (RA) PAR RAPPORTS SIGNAL. BRUIT	68
FIGURE IV-2 GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX SUR (Fz) PAR RAPPORTS SIGNAL. BRUIT	69
FIGURE IV-3 GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX SUR (PC) PAR RAPPORTS SIGNAL. BRUIT.....	70
FIGURE IV-4 GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX SUR (MRR) PAR RAPPORTS SIGNAL. BRUIT.....	71
FIGURE IV-5 DIAGRAMME DE DESIRABILITE 2D, (A) MINIMUM, (B) MAXIMUM.	72
FIGURE IV-6 GRAPH DE DESIRABILITE 1ER CAS.	79
FIGURE IV-7 DIAGRAMME D'OPTIMISATION DE REPONSES MULTIPLES DU RA, Fz, PC ET MRR 1ER CAS. 80	
FIGURE IV-8 GRAPH DE DESIRABILITE POUR LE 2EME CAS	82
FIGURE IV-9 DIAGRAMME D'OPTIMISATION DE REPONSES MULTIPLES DU RA, Fz, PC ET MRR POUR LE 2 ^{EME} CAS.....	83
FIGURE IV-10 GRAPH DE DESIRABILITE POUR LE 3EME CAS	85
FIGURE IV-11 DIAGRAMME D'OPTIMISATION DE REPONSES MULTIPLES DU RA, Fz, PC ET MRR POUR LE 3EME CAS.....	86
FIGURE IV-12 GRAPH DE DESIRABILITE DE RA, Fz, PC ET MRR POUR LE 4EME CAS	88
FIGURE IV-13 DIAGRAMME D'OPTIMISATION DE REPONSES MULTIPLES DU RA, Fz, PC ET MRR POUR LE 4EME CAS.....	89
FIGURE IV-14 GRAPH DE DESIRABILITE DE RA, Fz, PC ET MRR POUR LE 5EME CAS	91
FIGURE IV-15 DIAGRAMME D'OPTIMISATION DE REPONSES MULTIPLES POUR LE 5EME CAS	92

LISTE DES ABREVIATIONS

ANOVA	Analyse de la variance.
ap	Profondeur de passe (mm).
CVD	Dépôt chimique vapeur.
f	Avance par tour (mm/tr).
Frés	Effort de coupe résultant (N).
Fx (Fa)	Effort de coupe axial (N).
Fy (Fp)	Effort de coupe radial (N).
Fz (Fc)	Effort de coupe tangentiel (N).
Kx (Ka)	Pression de coupe axiale (N/mm ²).
Ky (Kp)	Pression de coupe radiale (N/mm ²).
Kz (Kc)	Pression de coupe tangentielle (N/mm ²).
MRR	Débit du copeau enlevé (cm ³ / min)
PVD	Dépôt physique vapeur.
Pc	Puissance de coupe (w).
P	Puissance absorbée par la machine (w).
r	Rayon de plaquette (mm).
Ra	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
RSM	Méthodologie de la surface de réponse.
Rt	Rugosité totale (μm).
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
t (Tc)	Temps de coupe.
Vc	Vitesse de coupe (m/min).
α	Angle de dépouille principal (degré).
γ	Angle d'attaque (degré).
χ	Angle de direction principal (degré).

Résumé

La modélisation et l'optimisation sont des tâches importantes dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus convenables. L'objectif de ce travail est de faire une modélisation des paramètres technologiques d'usinage (efforts de coupe, rugosité de surface, débit de coupe enlevé et puissance de coupe), et une optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage à sec de l'acier AISI D3, par un outil de coupe en carbure revêtu GC4215. Le plan de Taguchi L16 (4x3 et 2x1) a été appliqué pour la planification des expériences. Les résultats ont été traités statistiquement en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA) afin de déterminer les facteurs et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, aussi pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques. La méthodologie de surface de réponse (RSM) a été utilisée pour déterminer les modèles mathématiques de prédiction. L'analyse de Taguchi basée sur le signal/bruit (S/N) a été appliquée pour faire une optimisation mono-objective. La fonction de désirabilité (DF) a été aussi utilisée pour une optimisation multi-objective selon cinq cas souhaités.

Mots Clés : Acier AISI D3 ; ANOVA ; Taghuchi ; Rapport S/N ; Optimisation ; rugosité de surface ; Puissance de coupe ; Effort de coupe.

SOMMAIRE

Dédicaces.....	I
Remerciement.....	II
Liste des tableaux.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des abréviations.....	VII
Résumé	VIII
Introduction générale.....	XI
I CHAPITRE I.....	1
I.1 INTRODUCTION.....	2
I.2 NUANCES DES OUTILS DE COUPE :	2
I.2.1 CARBURES METALLIQUES :	3
I.2.2 CARBURES REVETUS :	4
I.2.3 CERAMIQUES :	6
I.2.4 CERMETS :	6
I.2.5 REVETEMENTS :	7
I.3 PARAMETRES D'USINAGE	9
I.3.1 USURE DES OUTILS	9
I.3.1.1 Types et cause d'usures [9]	10
I.3.2 RUGOSITE GENERALITES SUR LES ETATS DE SURFACE	12
I.3.2.1 Ra : rugosité moyenne du profil.....	13
I.3.2.2 Rz : hauteur de profil maximum.....	13
I.3.2.3 Rt : hauteur de profil total	14
I.3.3 LES EFFORTS DE COUPE	14
I.3.3.1 Intérêt de mesure des efforts de coupe	15
I.3.3.2 Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe.....	15
I.3.3.3 Effort spécifique de coupe (pression de coupe)	18
I.3.4 LA PUISSANCE DE COUPE	19
I.4 REVETEMENT DES OUTILS DE COUPE	19
I.4.1 FONCTION D'UN REVETEMENT EN USINAGE	19
I.4.2 PROPRIETES DES REVETEMENTS	19
I.4.3 TYPES DE REVETEMENTS.....	20
I.5 TRAVAUX DE RECHERCHE.....	23
I.6 CONCLUSION	28

II	CHAPITRE II	29
II.1	INTRODUCTION	30
II.2	MATERIEL UTILISE	30
II.2.1	MACHINE-OUTIL	30
II.2.2	MATERIAU A USINE	31
II.2.3	PLAQUETTE ET PORTE OUTILS UTILISES	32
II.2.4	INSTRUMENTS DE MESURE UTILISES	33
II.2.4.1	Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	33
II.2.4.2	Rugosimètre pour la mesure de la rugosité 2D	35
II.3	PLANS D'EXPERIENCES ADOPTES	36
II.3.1	DEFINITION	36
II.3.2	TERMINOLOGIE	36
II.3.3	DIFFERENTS TYPES DE FACTEURS	36
II.3.4	METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES	37
II.3.5	DEMARCHE ET PLAN D'EXPERIENCE ADOPTE	37
II.3.6	PLAN DE TAGUCHI L16	38
II.4	CONCLUSION	39
III	CHAPITRE III	40
III.1	INTRODUCTION	41
III.2	PLAN D'EXPERIENCE	41
III.3	ANALYSE ANOVA	42
III.4	METHODE APPLIQUEE	42
III.5	ANALYSE STATISTIQUE ET MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES	44
III.5.1	RESULTATS DE LA RUGOSITE DE SURFACE (Ra)	44
III.5.1.1	Analyse de la variance pour (Ra)	44
III.5.1.2	Graphes des effets moyens et des interactions	45
III.5.1.3	Equation de régression pour (Ra)	46
III.5.1.4	Diagrammes de surfaces 3D et graphiques de Contours	47
III.5.2	RESULTATS DE L'EFFORT DE COUPE (Fz)	50
III.5.2.1	Analyse de la variance pour (Fz)	50
III.5.2.2	Graphes des effets moyens et des interactions	51
III.5.2.3	Equation de régression pour l'effort de coupe (Fz)	52
III.5.3	RESULTATS DE LA PUISSANCE DE COUPE (Pc)	55
III.5.3.1	Analyse de la variance pour (Pc)	55
III.5.3.2	Graphes des effets moyens	55
III.5.3.3	Equation de régression pour la puissance de coupe (Pc)	56
III.5.3.4	Diagrammes de surfaces 3D et graphiques de contours	57
III.5.4	RESULTATS DE LA DEBIT DU COPEAU ENLEVE (MRR)	58
III.5.4.1	Analyse de la variance pour (MRR)	58
III.5.4.2	Graphique des effets moyens et diagramme d'interaction	59
III.5.4.3	Diagramme de surface 3D et graphique de contour	60
III.6	CONCLUSION	62

<u>IV</u> CHAPITRE 04.....	<u>64</u>
IV.1 INTRODUCTION.....	65
IV.2 OPTIMISATION PAR LA METHODE DE TAGUCHI.....	65
IV.2.1 ANALYSE DES EFFETS MOYENS DES NIVEAUX DES FACTEURS	67
IV.2.1.1 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra)	67
IV.2.1.2 Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe (Fz).....	68
IV.2.1.3 Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (Pc).....	69
IV.2.1.4 Analyse des effets principaux sur le débit du copeau enlevé (MRR).....	70
IV.3 OPTIMISATION PAR LA METHODE DE LA FONCTION DESIRABILITE	71
IV.3.1 INTRODUCTION	71
IV.3.2 LES CAS D'OPTIMISATION ETUDIES	72
IV.4 CONCLUSION.....	92
<u>V</u> CONCLUSION GENERALE	<u>93</u>
<u>VI</u> BIBLIOGRAPHIE.....	<u>96</u>

INTRODUCTION GENERALE

Le terme de fabrication représente les différents techniques de transformation de matière à l'aide d'une machine-outil, est un sujet important dans le domaine industriel. Cette technique nous permet la production des pièces de formes complexes et d'une grande précision sans modifier les caractéristiques de la matière usinée.

Le tournage est l'un des procédés d'usinage les plus utilisés, est un procédé d'usinage par enlèvement de matière. La réussite d'une opération de tournage est évaluée à l'aide des paramètres technologiques et économique (effort de coupe, puissance de coupe, rugosité de surface, débit de coupe enlevé, temps de coupe et le coût...etc.).

En générale, la connaissance des efforts de coupe nous renseigne sur les déformations plastiques et la puissance mécanique fournie nécessaire à l'enlèvement de matière. De plus, elle permet de délimiter la zone de coupe en choisissant des valeurs des efforts acceptables pour l'outil. La plage de fonctionnement autorisée est établie essentiellement en considérant l'évolution du débit de coupe enlevé (MRR) en fonction de la variation de la vitesse de coupe, pour des conditions d'avance et de profondeur de passe correspondant à celles du domaine de validité de l'outil coupant. Notre travail s'inscrit dans cet objectif, il a pour but en premier lieu de faire une modélisation des paramètres technologique d'usinage. En deuxième lieu, il propose une optimisation suivant deux méthodes :

- Optimisation mono-objectif de Taghuchi basée sur le rapport Signal/Bruit (S/N).
- Optimisation multi-objectif en utilisant la fonction de désirabilité suivant plusieurs cas souhaités.

Dans ce but, notre document est articulé sur quatre chapitres :

Dans **le premier chapitre** nous avons présenté une recherche bibliographique sur les bases scientifiques de la coupe des métaux.

Le second chapitre, présente le matériel utilisé, les caractéristiques du matériau de coupe et la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences.

Le troisième chapitre, déterminer les facteurs et leurs interactions qui ont un effet statiquement significatif sur les paramètres étudiés, aussi pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques en utilisant les méthodes ANOVA et RMS.

En fin, **le quatrième chapitre**, présente l'optimisation des conditions de coupe pour F_z , MRR , Ra et P_c obtenus lors de l'usinage de l'acier AISI D3 en tournage en utilisant un outil de coupe en carbure revêtu GC4215, en se basant sur la méthode Taghuchi et la fonction de désirabilité.

La dernière partie présente les conclusions de ce travail.

Chapitre I

Etude_bibliographique

I.1 Introduction

La coupe de métaux, procédé d'usinage dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication.

Malgré l'apparition de nouvelles techniques au cours des dernières années, elle reste à l'heure actuelle l'un des procédés les plus largement utilisés. Pour se convaincre de son importance économique, il suffit de considérer le volume des dépenses faites aux U.S.A. pour l'usinage des métaux. Il représente 5% du produit national brut, ce qui est énorme pour une seule technique [1].

La recherche d'une productivité toujours meilleure de la coupe des métaux est donc une préoccupation majeure. Cette amélioration permanente repose plus ou moins directement sur l'étude approfondie des mécanismes physiques et des lois régissant ce procédé. Celle-ci reste donc un objectif essentiel. Son intérêt ne peut être éclipsé par le développement de nouveaux moyens d'usinage ou de nouvelles techniques de commande et de programmation même si ces derniers points participent aussi au développement de la fabrication à grande vitesse. La mise en œuvre rationnelle de ces techniques passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le contrôlent.

I.2 Nuances des outils de coupe :

L'usinage des aciers durcis par trempe nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro-grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie. Les conditions optimales d'usinage pour un couple outil-matière donné ne sont pas faciles à déterminer. Elles doivent être établies par une série de tests rigoureux. La Figure I. 14 présente les matériaux des outils pour une exploitation dans le tournage des matériaux durs. En outre, les matériaux sont également caractérisés par leurs géométries.

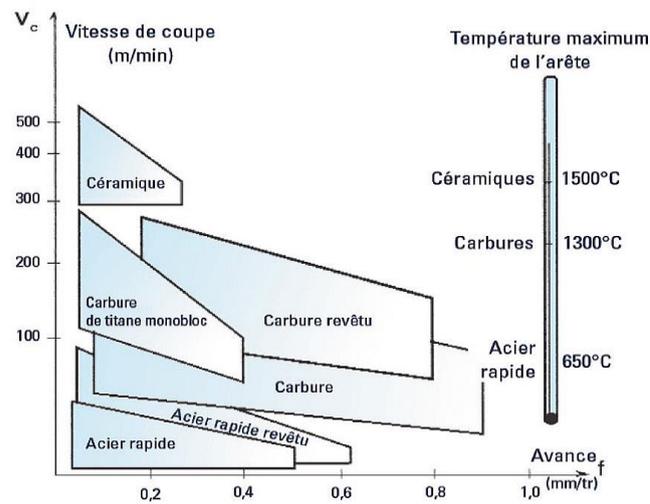


Figure I-1 Comparaison des matériaux de coupe d'après [2]

I.2.1 Carbures métalliques :

Les outils carbures sont aujourd'hui très utilisés. Ils sont constitués essentiellement de carbure de tungstène (phase α), et de carbure de titane, de tantale ou de niobium (phase γ) et d'un liant généralement le cobalt (phase β). Le rôle de l'addition du carbure de titane de tantale ou de niobium est d'augmenter les propriétés à haut température (vitesse de coupe élevée) par la réduction des frottements. C'est aussi de diminuer l'usure de la face de coupe en réduisant la diffusion du carbure de tungstène entre l'outil et copeau. Notant que l'accroissement de la proportion de carbure de titane entraîne une augmentation du coefficient de dilatation ce qui peut conduire à des variations dimensionnelles néfaste dans le cas de l'usinage de précision. Le carbure de tungstène, élément dur, conserve une résistance à l'usure à température élevée correspondant à des vitesses de coupe élevées. Le cobalt constitue le liant entre les grains de carbure. Il confère au corps fritté une bonne ténacité. Les principales évolutions des outils de coupe à base de carbures sont rapportées [3] :

- les nuances à micro grains,
- l'évolution des géométries,
- La généralisation des plaquettes indexables.

Certains carbures à base de grains ultrafins sont appelés "micro-grain". Ils sont caractérisés par une structure granulométrique très fine de carbure de tungstène d'une taille de 0,2 à 1 μm liée par une quantité de cobalt allant de 8 à 20%. Les nuances à micro grain permettent un bon compromis dureté/ténacité. Ils permettent aussi d'utiliser des angles de coupe positifs. La faible dimension des grains permet une grande finesse d'arête

et l'obtention des états de surfaces soignés. Ils sont utilisés pour des conditions de coupe sévères et pour des matériaux difficiles à usiner.

Depuis le début de leurs utilisations dans l'industrie et la mise au point de géométries d'outils adaptés à chaque usinage spécifique, le passage de la coupe négative à la coupe positive diminue les efforts de coupe et les usures des outils. La création de divers brise-copeaux augmente le fractionnement de celui-ci et la durée de vie de l'outil. Ces derniers ont permis d'améliorer les conditions d'usinage des aciers. La commercialisation des plaquettes indexables affûtées de grande précision a conduit à des meilleurs états de surfaces et à une généralisation de l'utilisation des carbures métalliques frittés.

I.2.2 Carbures revêtus :

Les propriétés de nuances des carbures non revêtus constituent un compromis entre la résistance à l'usure et la ténacité. Ces qualités varient en sens inverse selon le pourcentage des constituants. Les carbures revêtus sont mis au point dans le but d'associer une résistance élevée à l'usure de la surface des plaquettes et une haute ténacité du substrat. Les matériaux déposés en revêtement sont très nombreux. Les plus courants sont :

- Nitrure de titane TiN
- Oxyde d'aluminium Al₂O₃
- Carbure de titane TiC
- Carbonitrure de titane TiCN
- Alumino-nitrate de titane TiAlN.

Chacune de ces couches apporte à l'outil une amélioration dans un domaine particulier. Les dépôts multicouches sont réalisés afin de combiner les différents avantages (Figure I.15). Ces couches sont obtenues généralement par CVD (Chimical Vapor Diposition) ou par PVD (Physical Vapor Diposition) [4].

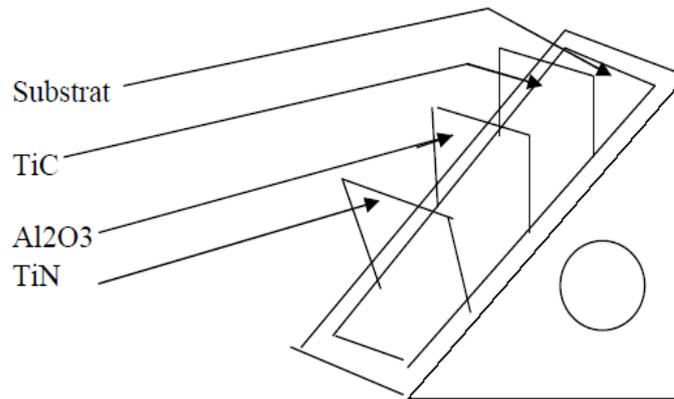


Figure I-2 Plaquette carbure (revêtement multicouche).

A titre de comparaison :

- le nitrure de titane (TiN) est réputé par sa bonne résistance à l'abrasion. Pour cette raison, il est souvent utilisé en couche externe. De plus, il tolère des dépôts plus épais sans nuire à sa tenue en service. Le TiN est inerte vis-à-vis des aciers et le coefficient de frottement du métal sur le revêtement TiN est plus faible, ce qui minimise le risque de formation d'arête rapportée.

- le carbure de titane (TiC) adhère mieux au substrat, constituant ainsi une excellente base d'application de couche de revêtements supplémentaires. Par contre, il est fragile et pour cela est déposé en couche n'excédant pas $5\mu\text{m}$.

- l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) est déposé en couche intermédiaire. Il constitue une barrière de diffusion à la chaleur. Il conserve sa dureté à hautes températures, offrant ainsi une excellente résistance à l'usure et une excellente protection contre la diffusion et l'oxydation à des vitesses et températures de coupe plus élevées. L'inconvénient majeur est la perte d'acuité d'arête dans le cas de revêtements multicouches des plaquettes de finition. Pour cette raison les métallurgistes ont mis au point des revêtements en couche minces de 1 à 2 μm . Les gains obtenus dans la coupe des métaux à l'aide de ces revêtements sont importants. Ces gains dépendent essentiellement du couple outil/matière. La caractérisation de l'usure des outils sera abordée ultérieurement. Cependant, pour caractériser l'influence du revêtement, nous précisons dès maintenant que trois détériorations peuvent intervenir :

- abrasion : Plus le revêtement est dur est moins ce mode d'endommagement peut intervenir. Le revêtement TiC et Al_2O_3 sont performant de point de vue abrasion,
- diffusion (outil/copeau) : ce mode d'endommagement est dans ce cas nettement plus important pour TiC, soluble dans l'austénite à partir de $1100-1150^\circ\text{C}$ que pour TiN et Al_2O_3 tous deux insolubles dans les aciers même liquide,

· fissuration et écaillage : la détérioration s'effectue par fissuration de revêtement soumis à de fortes contraintes d'origine thermique entraînant des micro-écaillages (sur l'arête ou sur les flancs) puis une usure contrôlée par diffusion et abrasion. Ainsi, une couche extérieure de TiN semble aujourd'hui conduire aux meilleurs résultats lors du tournage des aciers inoxydables.

I.2.3 Céramiques :

Les céramiques présentent de bonnes caractéristiques thermomécaniques. Ces dernières leur permettent d'être utilisées en coupe continue. Par contre, dans le cas de coupe intermittente, ces caractéristiques favorisent les ébréchures du bord des plaquettes et du craquage thermique.

Les outils de coupe en céramiques sont divisés en deux catégories :

- les céramiques à base d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 . Les céramiques pures sont à base d' Al_2O_3 mais contiennent un peu de zirconium (ZrO_2) qui permet d'augmenter la ténacité, tandis que les céramiques mixtes contiennent jusqu'à 30 à 40% de TiC ou TiB₂.
- les céramiques à base nitrure de silicium Si_3N_4 (Sialon). Possèdent de très bonnes propriétés thermiques. Leur haute ténacité et leur faible coefficient de dilatation font des Sialons des outils très résistants aux chocs thermiques. En contrepartie, ce sont les outils les plus fragiles.

I.2.4 Cermets :

Ils sont constitués principalement de TiC ou de TiC/N. Ils ont rapport aux métaux durs conventionnels une densité beaucoup plus faible avec une dureté et une résistance à l'usure plus élevées. Les forts coefficients de dilatation thermique des cermets ($7 \text{ à } 9 \cdot 10^{-6} /k$) dus au TiC et TiN par rapport aux outils carbures (WC) sont coresponsables de la faible résistance des cermets aux chocs thermiques. C'est également ce qui explique leurs faiblesses lors de l'usinage à coupe interrompue. Le remplacement de TiC par le TiN qui possède la plus grande conductivité thermique, a permis d'améliorer la résistance des cermets aux chocs thermiques.

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. Leur emploi diminue ou supprime le collage de copeaux, évitant ainsi les arrachements sur les matériaux malléables (inox, acier doux) et conduit à une durée de vie accrue (Figure I. 3).

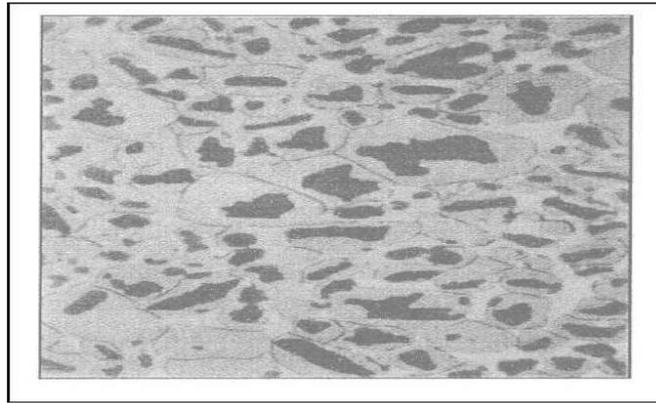


Figure I-3 Structure du Cermet.

On obtient avec ces matériaux des outils pouvant avoir des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Leur dureté à chaud permet de faire des usinages dans des conditions extrêmes : 1000°C.

I.2.5 Revêtements :

Afin d'améliorer les performances des outils, l'emploi de revêtements est devenu très fréquent. Les matériaux utilisés pour ces derniers peuvent être classés en quatre groupes [28] :

- 1 Revêtements à base de titane (TiC, TiN, TiB₂, TiCN) souvent complétés par de l'aluminium (TiAlN, TiAlON),
- 2 Revêtements céramiques ;
- 3 Revêtements ultra-durs (diamant, PCBN) (Figure I.4) ;
- 4 Revêtements autolubrifiants avec MoS₂ ou WC en couche externe.

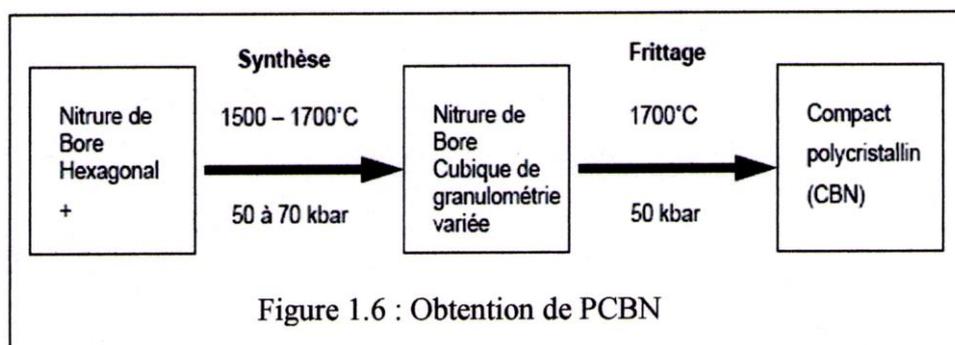


Figure I-4 Obtention de PCBN (PolyCristalin de Nitrure de Bore) [5].

Les revêtements sont constitués d'une couche unique ou d'une superposition de plusieurs couches de matériaux différents dont l'épaisseur totale n'excède généralement pas 5 µm (Figure I.5). Qu'il soit de type

CVD ou de type PVD, le procédé de déposition consiste à créer un lien étroit entre le substrat et son revêtement.

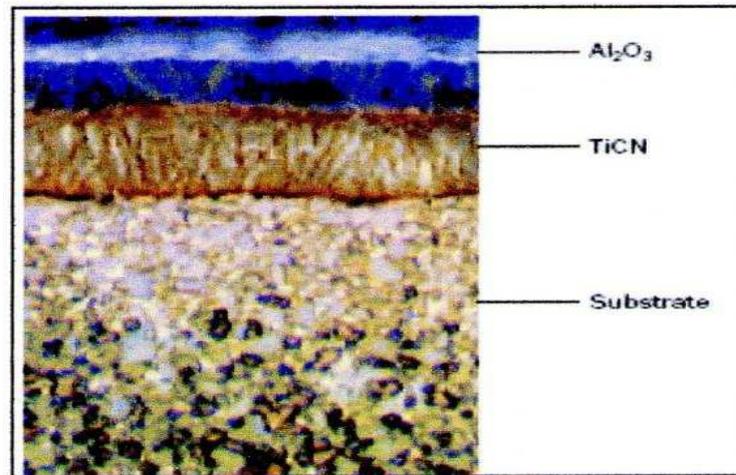


Figure I-5 Structure d'un revêtement bicouche. [6]

La performance d'adhésion au substrat est donc un critère essentiel pour le choix du revêtement. Ceux-ci seront également sélectionnés pour leurs propriétés à haute température (dureté, ténacité, conductivité thermique). Par exemple, l'emploi de l'alumine Al_2O_3 dans les revêtements multicouches aura une fonction d'isolant thermique afin de conserver les propriétés mécaniques du substrat.

La Figure I.6, donne un aperçu sur l'évolution de la conductivité thermique en Watt par mètre Kelvin, en fonction de la température en Kelvin des différents constituants des outils de coupe et des revêtements. [7]

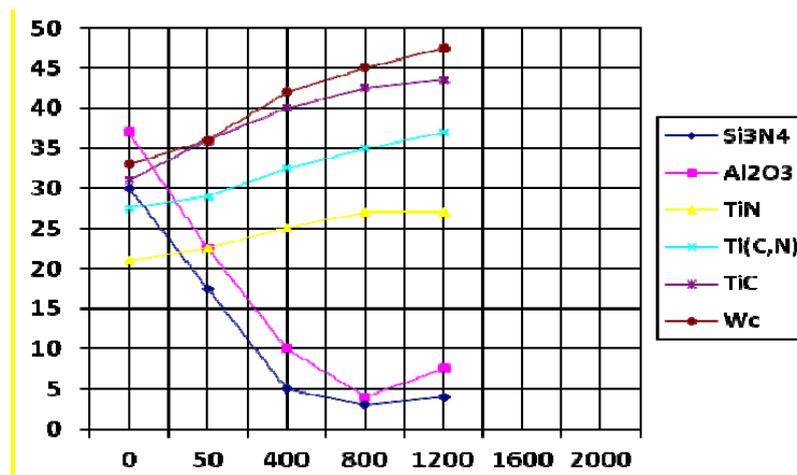


Figure I-6 Evolution de la conductivité thermique [W/m.K], en fonction de la température

Le revêtement étant la partie de l'outil réellement en contact avec la matière usinée, il sera donc conçu de manière à lui donner des propriétés bien spécifiques destinées à réaliser certaines performances. La résistance

à l'usure, le coefficient de frottement et l'inertie chimique figurent parmi les caractéristiques qu'un revêtement apporte à un outil de coupe.

I.3 Paramètres d'usinage

I.3.1 Usure des outils

L'usure des outils de coupe est un des phénomènes physico-chimiques les plus complexes. Il influe sur la géométrie de l'outil ainsi que sur la qualité de la pièce. Elle est due par son apparition aux causes suivantes figure (I-7) :

- Frottements outil-copeau, outil-pièce et pièce-copeau (usure abrasive).
- Déformations plastiques de la matière de la partie active de l'outil.
- Echauffement important dû à la coupe.
- L'émiettement de l'outil (arrachement de petites particules métal).

L'usure peut être sous plusieurs formes :

- L'usure abrasive est particulière à tous les outils, elle est la cause principale de l'emoussage de l'outil.
- L'usure due aux déformations plastiques de la matière de l'outil est surtout pour les

Outils en aciers à faible teneur en éléments d'alliages (acier rapide).

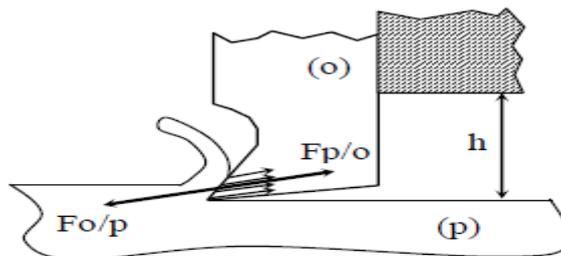
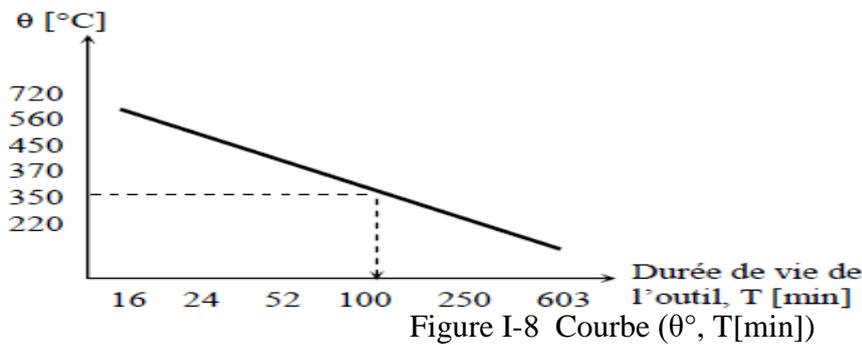


Figure I-7 Courbe (θ° , T[min]),

L'usure provoquée par une haute température de coupe se manifeste plus fortement dans les aciers au carbone et les aciers rapides, par suite de leurs résistances à chaud relativement faible. L'usure est d'autant plus rapide que la température de la partie active est plus élevée comme le montre la figure (I-8).

Figure I-8 Courbe (θ , T[min])

Une autre série d'expériences d'usinage dont l'objectif consistait à déterminer la vitesse « V_c » en fonction du temps « T » pour un usinage à sec et un autre avec lubrification, donne les résultats suivants figure (I-9).

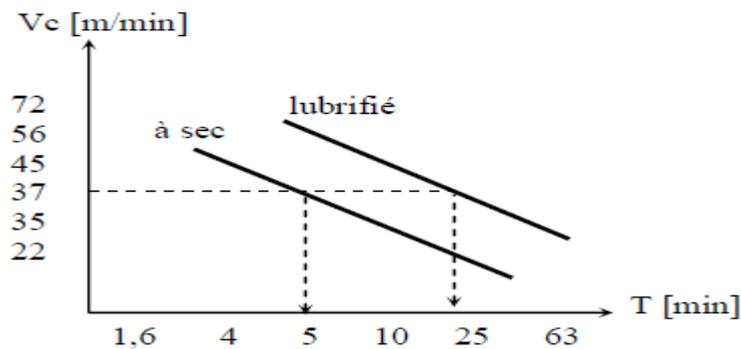


Figure I-9 Influence de la lubrification

Ce que l'on constate sur la figure, qu'avec une lubrification bien adoptée au travail à réaliser permet d'augmenter considérablement la durée de vie de l'outil, d'où une diminution de l'usure.

Les outils en carbures métalliques s'usent généralement à cause de l'émiettement c'est à dire l'arrachement de petites particules du métal de l'outil, tandis qu'ils restent fortement résistants à l'usure par frottement [8].

I.3.1.1 Types et cause d'usures [9]

En fonction des conditions de coupe, l'usure peut se produire suivant la surface de dépouille, suivant la surface d'attaque ou suivant les deux surfaces en même temps [9].

I.3.1.1.1 Usure en dépouille

❖ Cause

Usure rapide provoquant un mauvais état de surface ou des cotes hors tolérances.

- Vitesse de coupe trop élevée.
- Résistance à l'usure insuffisante.

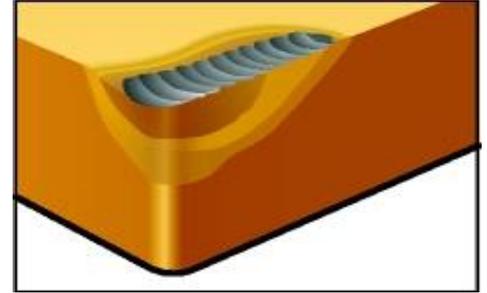
- Avance, f , trop faible.

I.3.1.1.2 Usure en cratère

❖ Cause

Usure excessive qui affaiblit l'arête de coupe. La dégradation, voire la rupture de l'arête entraîne de mauvais états de surface.

- Usure par diffusion due à des températures de coupe trop élevées sur la face de dégagement de la plaquette.



I.3.1.1.3 Déformation plastique

❖ Cause

Déformation plastique de l'arête, dépression ou renflement latéral entraînant un mauvais contrôle copeaux, un mauvais état de surface, voire la rupture de la plaquette.

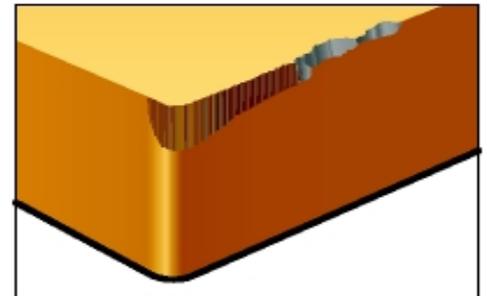
- Température et pression de coupe trop élevées.

I.3.1.1.4 Écaillage

❖ Cause

La partie de l'arête qui n'est pas engagée subit un écaillage dû au martèlement des copeaux. La face supérieure et le support de la plaquette peuvent être endommagés, ce qui génère de mauvais états de surface et une usure en dépouille excessive.

- Les copeaux sont déviés en direction de l'arête de coupe.

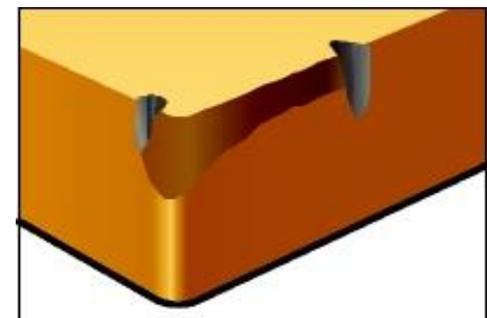


I.3.1.1.5 Usure en entaille

❖ Cause

Usure en entaille entraînant un état de surface médiocre et un risque de rupture de l'arête.

- Matières sujettes à l'écrouissage en coupe.
- Croûte.

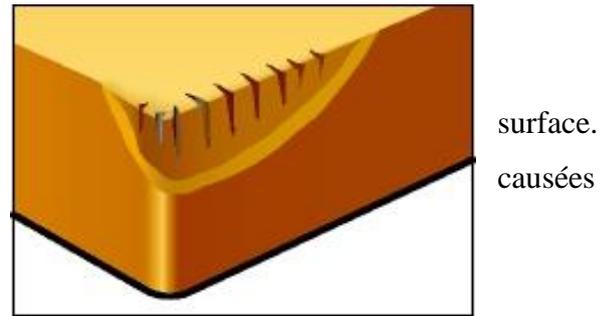


I.3.1.1.6 Usure en peigne

❖ Cause

Petites fissures perpendiculaires à l'arête de coupe provoquant un écaillage et une dégradation de l'état de surface. L'usure en peigne est due aux fluctuations thermiques par :

- Coupe intermittente.
- Adduction irrégulière de liquide de coupe.



surface.
causées

I.3.2 Rugosité Généralités sur les états de surface

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération figures (I-10 + I-11).



Figure I-10 mesure de rugosité

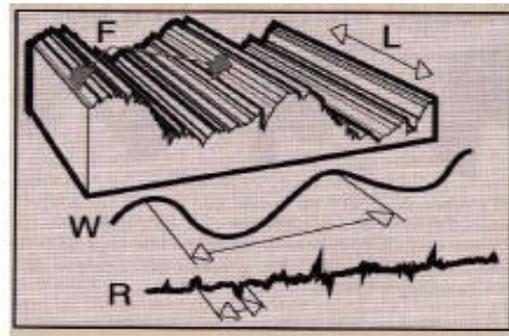


Figure I-11 critères de rugosité

Cette structure est définie par les critères suivants :

- La rugosité R : exprime les plus petites irrégularités, c'est à dire le fin réseau d'écarts micro géométriques mesurés sur la plus petite longueur d'échantillonnage.
- L'ondulation W : est constituée d'irrégularités de plus grande dimensions au niveau suivant de la longueur d'évaluation sur la surface de la pièce.
- La direction des traces d'usinage L : définit l'orientation du profil superficiel. Elle indique la direction dominante générée par la méthode d'usinage

Il existe un grand nombre de paramètres pour la définition de la rugosité, certains sont pourtant beaucoup plus employés que d'autres.

I.3.2.1 R_a : rugosité moyenne du profil

- Valeur moyenne de tous les écarts par rapport à une ligne droite, dans la longueur d'évaluation, indifféremment de la direction verticale figure (I-12).
- ✓ Impossible de savoir si les écarts sont des creux ou des bosses
- ✓ Pas d'altération pas des écarts isolés, donc risque de manquer un sommet
- ✓ Valeur de R_a typiques entre $0.02\mu\text{m}$ et $3.5\mu\text{m}$.

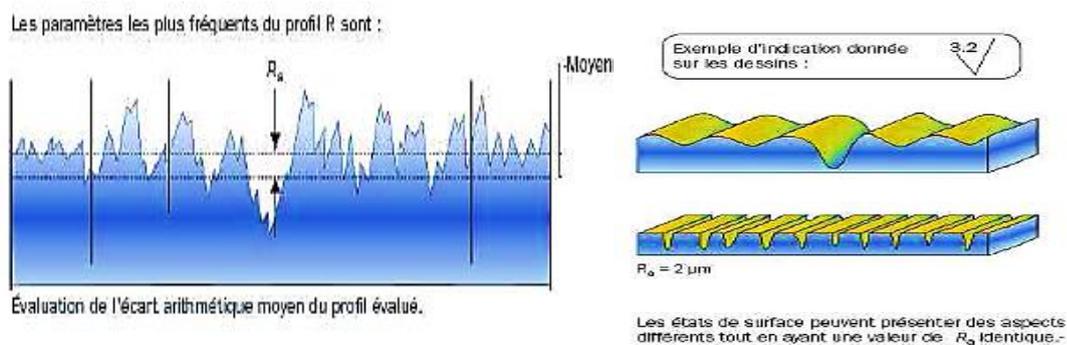


Figure I-12 R_a : rugosité moyenne du profil

I.3.2.2 R_z : hauteur de profil maximum

C'est la moyenne des différentes hauteurs de profil entre la hauteur de crête la plus élevée et la profondeur de creux la plus importante sur des longueurs de référence comprises dans la longueur d'évaluation figure (I-13).

- Il y a couramment 5 longueurs de référence.
- La valeur affichant la plus grande déviation dans la longueur de référence = R_{max} ou $R_{z\text{max}}$.

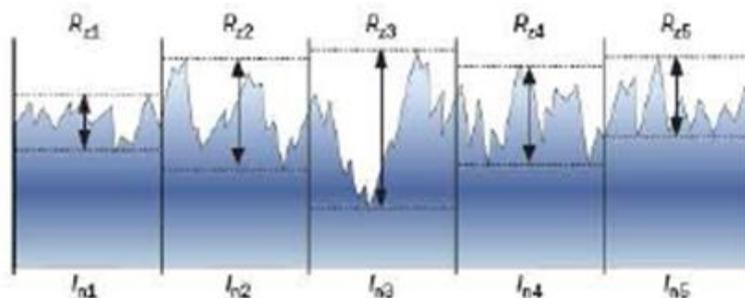


Figure I-13 Rz: hauteur de profil maximum

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5}$$

(I-5)

I.3.2.3 Rt : hauteur de profil total

C'est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation figure (I-14)

- Une seule valeur Rt, non combiné à un Rz ou Ra est l'une des exigences les plus strictes.

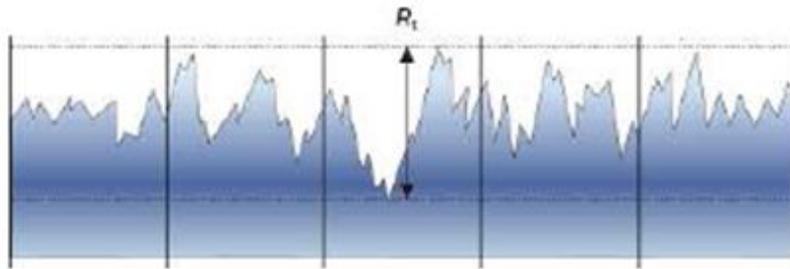


Figure I-14 Rt: hauteur de profil total du profil R

I.3.3 Les efforts de coupe

Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec certaine force dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe (**figure I-15**). La résultante de coupe ($F_{rés}$) est la somme de trois composantes suivantes :

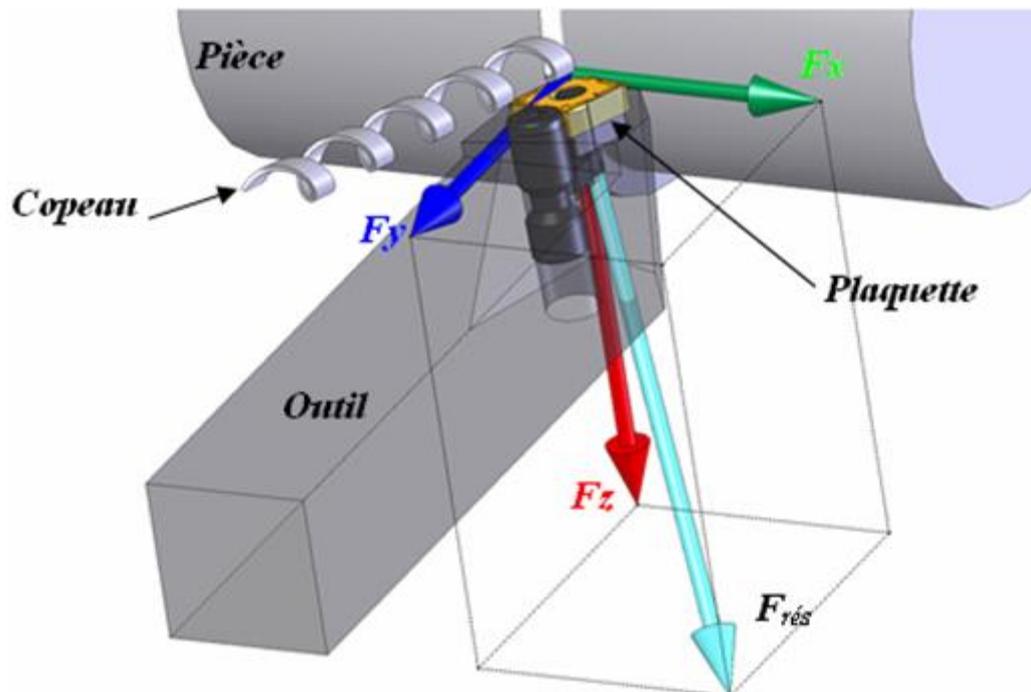


Figure I-15 Composantes de l'effort de coupe[10]

- **Fz** ou **Ft** : composante dans le sens de vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. C'est la composante qui a la plus grande valeur absolue.
- **Fx** ou **Fa** : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- **Fy** ou **Fr** : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.

Rapport des composantes :

La résultante de coupe $F_{rés}$ étant une diagonale de parallélépipède est égale à : $F_{rés} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$.

I.3.3.1 Intérêt de mesure des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage.

I.3.3.2 Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe

I.3.3.2.1 Influence de la vitesse de coupe

Il y a d'abord une diminution de l'effort aux très basses vitesses due à une diminution du frottement copeau-outil, puis l'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation de l'effort jusqu'à un maximum. Ensuite l'effort décroît à cause de la disparition progressive de l'arête rapportée.

La décroissance aux grandes vitesses est due à la diminution du frottement copeau-outil, suite à l'augmentation d'une part de la température à interface copeau-outil et outil-pièce et à la formation du cratère sur la surface d'attaque (**Figure I-16**).

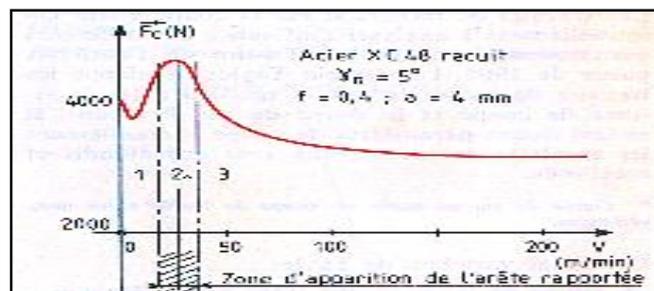


Figure I-16 Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe

I.3.3.2.2 Influence de profondeur de passe et l'avance

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

En doublant par exemple, la profondeur de passe ; on double également la largeur du copeau et cela conduit à une multiplication par deux de l'effort de coupe (**figure I-17**).

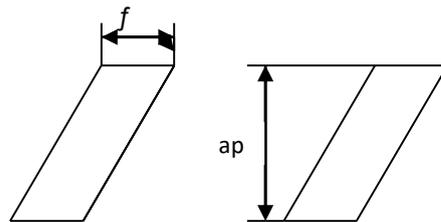


Figure I-17 Avance et profondeur de passe

I.3.3.2.3 Influence du matériau de coupe

Les matériaux de coupe revêtus, en particulier ceux avec des revêtements TiN ou Ti (C, N), accusent un frottement moindre et des efforts de coupe plus faible que les matériaux de coupe non revêtus.

Les faces d'attaque superfinies (rectifiées, rodées, polies) et dotées d'une arête de coupe acérée réduisent les efforts de coupe (**figure I-18**).

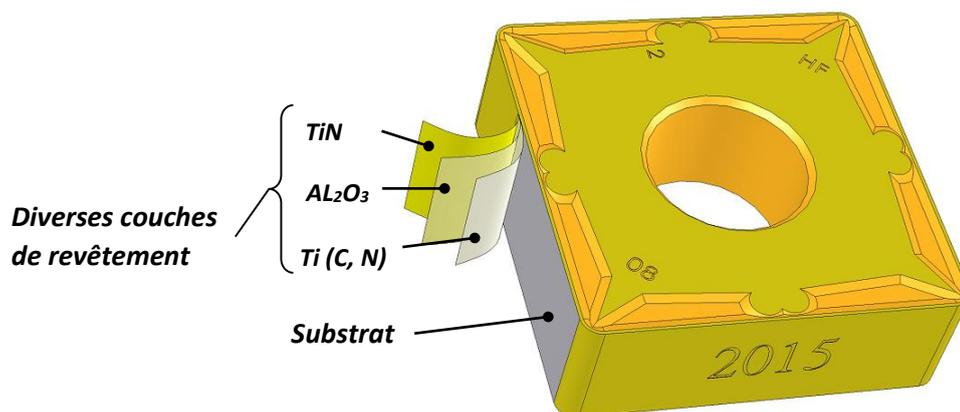


Figure I-18 Matériau de coupe (plaquette)

I.3.3.2.4 Influence du brise-copeaux

Les brise-copeaux qui forment une pente effective de coupe positive et qui ne présentent pas de liste négatif génèrent des efforts de coupe moindres. L'absence de "dos" sur lequel peut se dérouler les copeaux contribue également à des efforts plus réduits sans dégrader les propriétés de rupture du copeau (**figure I-19**).

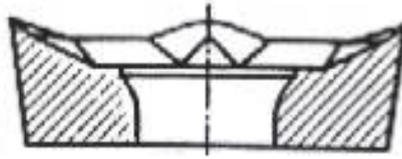


Figure I-19 Brise-copeaux.

I.3.3.2.5 Influence de l'angle de direction principal (χ)

Avec une avance inchangée, le copeau devient plus fin au fur et à mesure que l'angle χ diminue. Ceci conduit à une augmentation de l'effort de coupe principal.

La réduction de l'angle χ est limitée par les dégradations croissantes de la stabilité (forte augmentation des efforts d'avance et de pénétration, tendance au broutage), (**Figure I-20**).

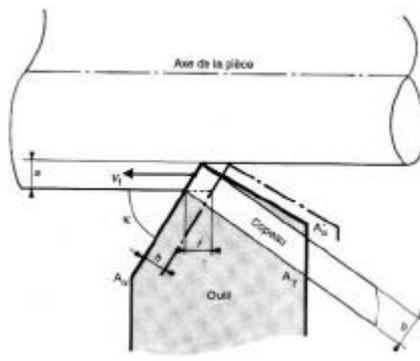


Figure I-20 Influence de l'angle de direction principal.

I.3.3.2.6 Influence de l'usure en dépouille

Les arêtes de coupe usées augmentent les efforts de coupe. En pratique on estime une augmentation de l'effort de 10% par 0,1mm d'usure sur la surface en dépouille de l'outil.

L'usure maximale admissible est fonction des résultats d'usinage souhaités (précision dimensionnelle, état de surface, etc.) et de l'outil utilisé. Pour les plaquettes amovibles, elle est égale à environ 10% de l'épaisseur de plaquette pour opération d'ébauche (**figure I-21**).

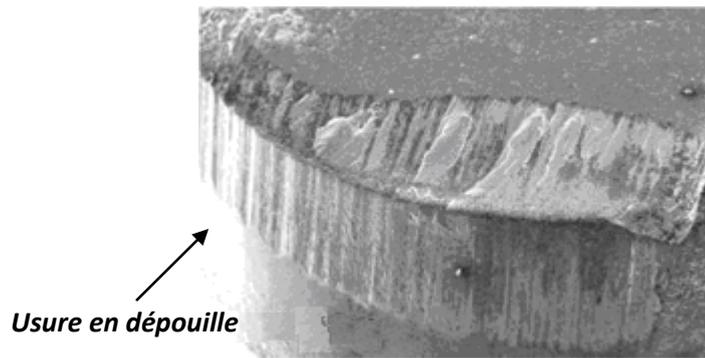


Figure I-21 Analyse par MEB d'une plaquette usée en PCBN (CARSTEN, 2003).

I.3.3.3 Effort spécifique de coupe (pression de coupe)

L'effort spécifique de coupe, aussi appelé pression de coupe, est également à déterminer. Cette grandeur est définie comme étant l'effort de coupe ramené à la section du copeau non déformé.

$$K_z = F_z/S \dots \dots \dots (I-1)$$

- F_z : effort de coupe (N) ;
- K_z : pression de coupe (N/mm^2) ;
- S : section du copeau (mm^2).

$$S = a_p \cdot f \dots \dots \dots (I-2)$$

- f : avance (mm/tr);
- a_p : profondeur de passe (mm) ;

L'effort spécifique varie en fonction de :

- matériau usiné ;
- épaisseur de coupe ;
- angle de coupe (diminution de 1.5 environ, pour augmentation de 1°) ;
- usure de l'outil (30 à 50 %, outil fortement usé).

I.3.4 La puissance de coupe

Elle est donnée par la relation :

$$P_c = F_z \cdot V_c \dots\dots\dots (I-3)$$

- V_c : vitesse de coupe (m/s) ;

- F_c : force de coupe (N) ;

- P_c : puissance de coupe (W).

Mais, d'après l'expression de la force de coupe, on peut utiliser la formule suivante :

$$P_c = K_z \cdot a_p \cdot f \cdot V_c \dots\dots\dots (I-4)$$

- P_c : puissance de coupe (W) ;

- K_z : pression de coupe (N/mm^2) ;

- a_p : profondeur de passe (mm) ;

- f : avance (mm/tr) ;

- V_c : vitesse de coupe (m/s).

La puissance de la machine se déduit de la puissance de coupe en fonction du rendement η

$$P = P_c / \eta \dots\dots\dots (I-5)$$

- P : puissance absorbée par la machine ;

I.4 Revêtement des outils de coupe

I.4.1 Fonction d'un revêtement en usinage

Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage. Ces sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre [11].

I.4.2 Propriétés des revêtements

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent en définitif se traduire par des objectifs opérationnels, en lien avec des propriétés physiques quantifiables et/ou qualifiables. Ainsi, il est possible de demander au système substrat + revêtement de répondre au cahier des charges suivant :

- ❖ Une ténacité élevée ;
- ❖ Une parfaite adhésion sur le substrat ;
- ❖ Une grande résistance à la formation et à la progression des fissures ;
- ❖ Une dureté élevée ;
- ❖ Une inertie chimique élevée ;
- ❖ Une faible conductivité et diffusivité thermiques ;
- ❖ Une haute résistance à l'oxydation ;
- ❖ Une épaisseur adéquate ;
- ❖ Une fonction barrière de diffusion.

Sachant que ces propriétés doivent être conservées à la plus haute température possible, en lien avec les sollicitations thermiques de l'opération d'usinage visée.

I.4.3 Types de revêtements

Les revêtements déposés industriellement peuvent se décomposer en 2 familles distinctes : les revêtements déposés par voie physique (Physical Vapor Deposition : PVD) et les revêtements déposés par voie chimique (Chemical Vapor Deposition : CVD) **figure I-22**. Chacune de ces familles possède une variété importante de sous-familles en constante évolution depuis quelques années. Ainsi, les procédés PVD sont basés sur trois types de technologie : l'évaporation, la pulvérisation et le dépôt ionique (ou 'ion-plating'). Chacune de ces sous-familles connaît également des variantes basées sur des moyens différents d'aboutir à l'évaporation ou à la pulvérisation des sources de matière : faisceau d'ions, effet joule, diode, etc.

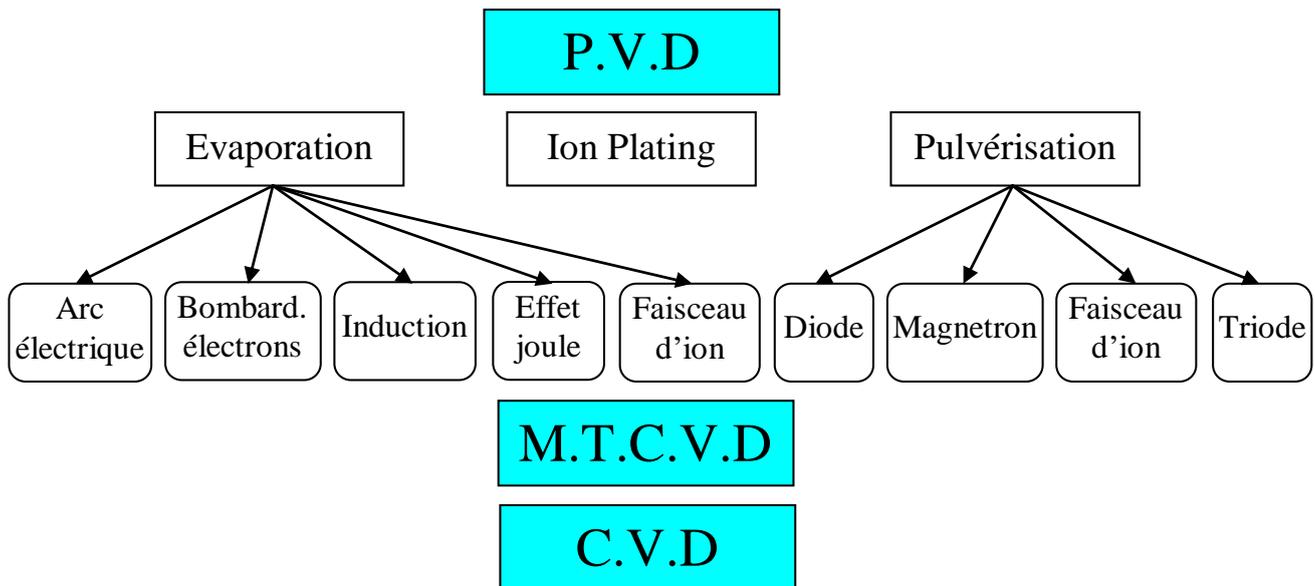


Figure I-22 Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils-coupants [11].

L'ensemble de ces procédés permet de déposer des couches de compositions et d'aspects très voisins. Cependant, les modalités de dépôts peuvent entraîner des différences très importantes en terme de texture, adhésion, dureté, etc. Il est important de noter que les technologies de dépôt ont subi de très grandes évolutions ces dernières années. A tel point qu'il est difficile de donner un aperçu exhaustif de l'ensemble des variantes [11].

Type	Signification	Température	Technique
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur	530°	La plus répandue
PVD	Dépôt physique en phase vapeur	200°	Courante
PCVD	Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma	315°	De plus en plus courante
MTCVD	Dépôt chimique en phase vapeur à moyenne température	425°	Récente

Tableau I-1 Différents types de revêtements et leurs significations

Les dépôts réalisés industriellement par PVD et CVD sont issus de familles très voisines, par contre leurs propriétés résultantes font que certains revêtements sont systématiquement réalisés par une des techniques. Ainsi, dans le domaine des outils-coupants, les procédés CVD produisent couramment les revêtements suivants :

- ❖ Revêtements à base de titane : TiC, Ti (C, N), TiN, TiB₂
- ❖ Revêtements céramiques : Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄
- ❖ Revêtements ‘ultra-dur’ : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC)

Les procédés PVD réalisent plutôt des revêtements du type :

- ❖ Revêtements à base de titane : TiC, Ti (C, N), TiN, TiB₂, (Ti, Al) N
- ❖ Revêtements ‘ultra-dur’ : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC), cubic Boron Nitride (c-BN)
- ❖ Revêtements lubrifiants : MoS₂, WC/C, CrC/C

Les revêtements de la famille des TiN, Ti (C, N) et (Ti, Al) N sont de loin les plus répandus en usinage comme le montre la **figure I-23**. Ces revêtements doivent leur succès à leurs très bonnes propriétés moyennes dans l’ensemble des applications d’usinage et surtout leurs très bonnes adhésions aux substrats les plus couramment utilisés : acier rapide, carbures, cermet. Les revêtements céramiques se sont beaucoup moins développés du fait de leurs grandes fragilités et de leurs manques d’adhésion.

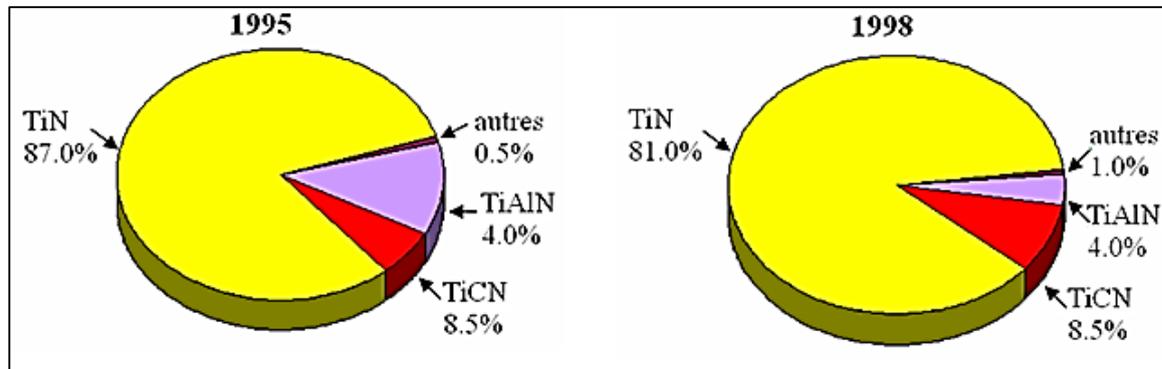


Figure I-23 Statistique sur l’évolution de l’utilisation relative des revêtements

De plus, les revêtements à base de titane se déposent aussi bien par les procédés PVD que par les procédés CVD, alors que les revêtements céramiques sont très difficiles à réaliser en PVD. Cela limite ainsi toute une partie des applications sur les outils en acier rapide. Les avantages et les inconvénients des deux techniques sont regroupés dans le **tableau I-2** :

	Avantages	Inconvénients
PVD	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Investissement limité ❖ Faible température de dépôt ❖ Bonne adhérence de dépôt ❖ Couches en contraintes compressives ❖ Nombreuses possibilités de dépôt ❖ Bonne acuité d'arête des outils 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Nécessité de réaliser les dépôts sur des pièces de formes voisines ❖ Vitesse de dépôt faible ❖ Dépôts non uniformes ❖ Difficultés pour revêtir des outils à géométrie complexe
CVD	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Grande pureté des dépôts ❖ Grande variété de composition ❖ Possibilité de dépôt sur des pièces complexes ❖ Bonne adhérence sur substrat carbure 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Température de déposition élevée ❖ Investissement élevé ❖ Résidus toxiques de déposition ❖ Mauvaise acuité d'arête des outils ❖ Couches en contraintes de traction ❖ Risques d'attaque des substrats par les gazes corrosifs

Tableau I-2 Comparaison des propriétés des modes de déposition PVD et CVD.

Ainsi dans le cadre d'un usinage continu (perçage, tournage), un revêtement épais et adhérent sera préféré (afin d'accroître la quantité de matière à enlever).

Pour les procédés à coupe interrompue (fraisage, taillage, etc.), il sera privilégié un revêtement tenace, résistant à l'oxydation et ayant des contraintes de compression. Ces conditions privilégient plutôt les revêtements obtenus par PVD. Cette analyse est à moduler avec l'apparition de revêtements MTCVD.

Par ailleurs, cela nécessite d'avoir des arêtes arrondies ce qui privilégie l'emploi des dépôts CVD, même si les dépôts PVD peuvent aussi s'appliquer sur des arêtes préalablement rodées. Les opérations de finition nécessitent des arêtes vives, ce qui privilégie plutôt l'emploi de revêtements PVD.

I.5 Travaux de recherche

Nalbant et autre [12] ont conduit une étude expérimentale en tournage dur avec un outil en carbure avec revêtement multicouche présente plusieurs avantages par rapport au processus de broyage. L'objectif était d'établir une relation mathématique (modèle prédictif) entre les paramètres de coupe tels que (la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe) et (l'effort de coupe, la puissance, l'effort de coupe spécifique). La performance des revêtements durs multicouches (TiC / TiCN / Al₂O₃) sur le substrat de carbure cimenté par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) pour l'usinage de l'acier AISI 4340 durci a été

évalué. Les auteurs ont tenté d'analyser les effets des paramètres de coupe par la technique de Taguchi. Des courbes de surface de réponse pour l'étude des effets d'interaction des conditions de coupe sur les facteurs d'usinabilité sont générés. Les corrélations ont été établies par des modèles de régression linéaire multiple. Les modèles de régression linéaire ont été validés au moyen de tests de confirmation. L'analyse du résultat a révélé que la combinaison d'une faible avance et une faible profondeur de coupe avec une grande vitesse de coupe est bénéfique pour réduire la puissance d'usinage. Alors qu'une avance élevée est nécessaire pour minimiser l'effort de coupe spécifique. La puissance d'usinage augmente presque linéairement avec la vitesse de coupe et la vitesse d'avance (Figure I-24).

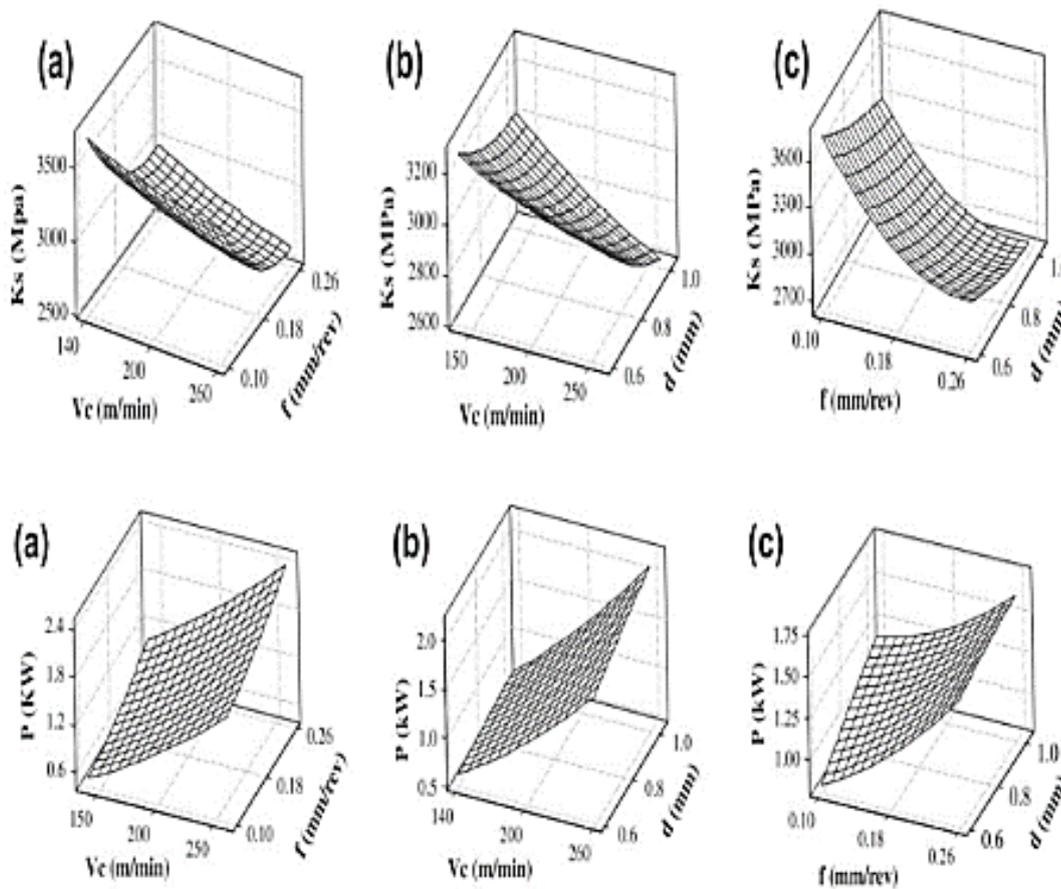


Figure I-24 Effet d'interaction des paramètres de coupe (f , V_c et d) sur : (K_c) et (P) [12]

Dans une autre étude Bouzid et autres [13] La rugosité de surface est un indice largement utilisé de la qualité du produit en termes de l'ajustement de précision des surfaces de contact, l'amélioration de la résistance à la fatigue, de la résistance à la corrosion, l'esthétique, etc. Cet article présente une approche pour déterminer l'optimum paramètres d'usinage conduisant à une rugosité de surface minimale par la méthode Taguchi. Les opérations de tournage ont été effectuées sur la base de la conception de l'expérience Taguchi, en utilisant un plan mixte L18 (2^1-3^4). Le rapport signal sur bruit (S/N) basé sur la qualité « plus

petit est le meilleur » a été calculé pour déterminer les niveaux optimaux des paramètres d'usinage. Les résultats de l'optimisation ont montré que la meilleure rugosité de surface est obtenue en utilisant un petit débit et un grand rayon de bec. L'application de l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour étudier l'effet des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface. Les résultats de cette étude indiquent que l'avance (f) et le rayon de bec (r) ont le plus important effet, suivi de l'interaction ($f \times ap$) sur la rugosité de surface. Pour la prédiction de la rugosité de surface, des modèles mathématiques en fonction des paramètres d'usinage et ces interactions ont été développés, en utilisant l'analyse de régression. Les résultats obtenus ont montré que la méthode Taguchi est très fiable pour l'optimisation des paramètres d'usinage, et pour améliorer la rugosité de surface, (Figure I-25).

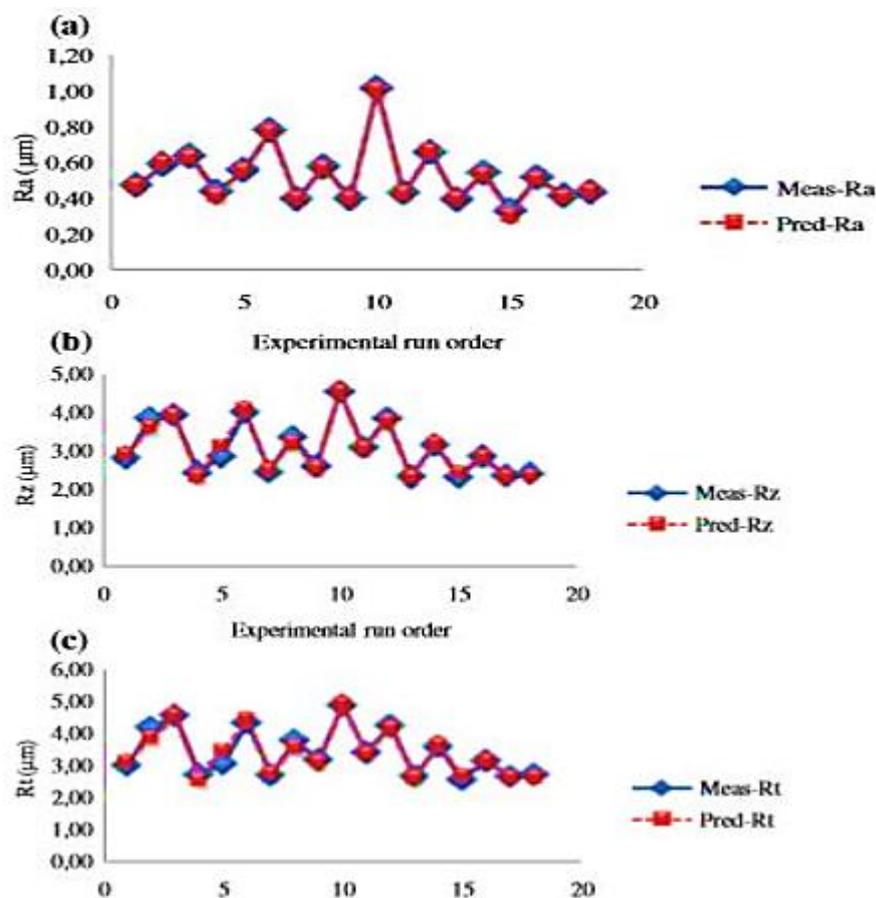


Figure I-25 Comparaison entre les valeurs prédites et mesurées pour les trois rugosités de surface critères[13].

Mohamed et autre [14] ont réalisé une étude expérimentale consiste à faire la comparaison entre les critères de la rugosité de surface (Ra, Rz et Rt) des plaquettes wiper avec des plaquettes conventionnelles, lors du tournage dur de l'acier trempé AISI 4140 (60 HRC). Les expériences étaient basées sur un plan orthogonal

(L27) de Taguchi. L'analyse statistique montre que la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont des effets significatifs dans l'amélioration de la rugosité de surface. Les résultats indiquent que l'outil en céramique wiper améliore significativement la qualité de surface obtenue par rapport à l'outil en céramique classique par de 2,5 fois. (Figure I-26).

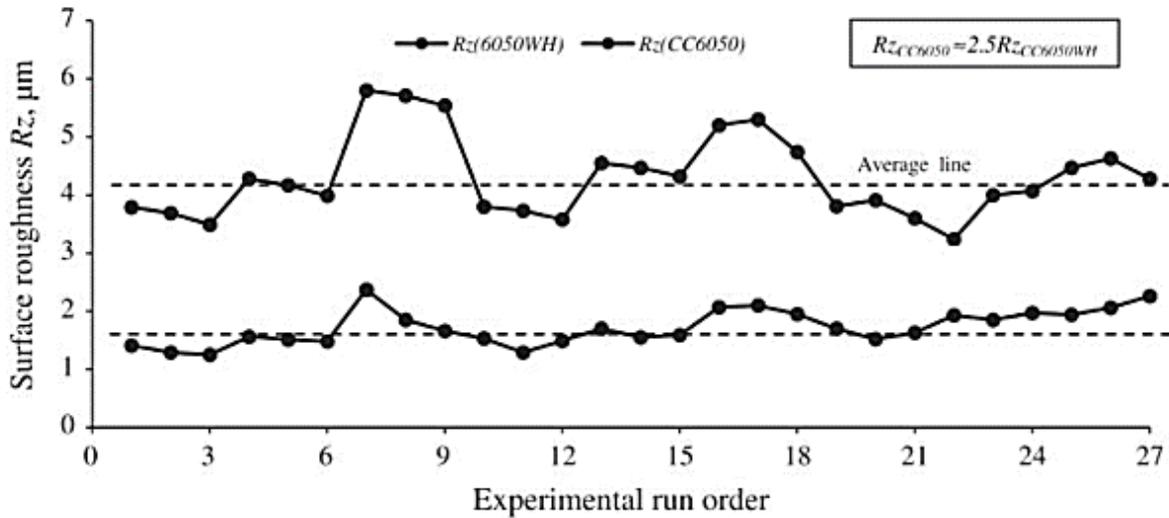


Figure I-26 Comparaison entre les plaquettes CC6050WH et CC6050 pour la rugosité de surface R_z [14].

[15] et autres ont étudié les caractéristiques de l'usinabilité de l'acier d'outil pour travail à froid à haute teneur en chrome AISI D2 en tournage avec les plaquettes en céramique (CC650, Wiper CC650WG et Wiper GC6050WH). Une tentative a été faite pour analyser les effets de la profondeur de passe et du temps d'usinage sur des aspects d'usinabilité tels que l'effort de coupe spécifique, la force d'usinage, la puissance, la rugosité de surface et l'usure de l'outil en utilisant les modèles mathématiques du deuxième degré. La planification des expériences a été faite par un plan factoriel complet (FFD). D'après l'analyse paramétrique, il s'est avéré que la plaquette Wiper CC650WG est plus performante en termes de la rugosité de surface et de l'usure de l'outil (Figures I-27).

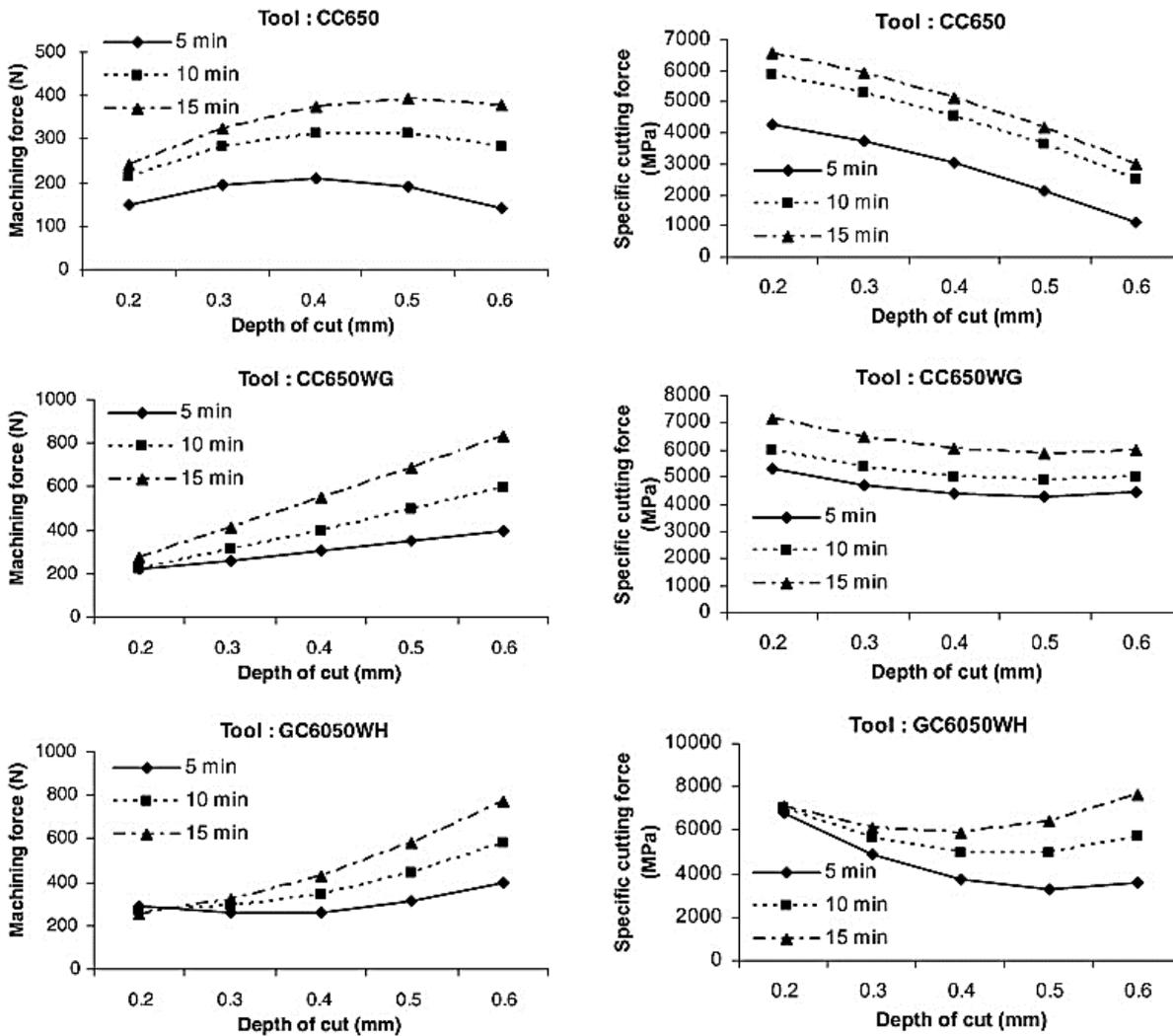


Figure I-27 Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur puissance et pression de coupe[15]

[16] et autres s'intéressent sur l'optimisation des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et la dureté) par la méthode de Taguchi pour déterminer la rugosité de la surface (Ra) optimale, lors du tournage dur de la fonte blanche martensitique (Ni-Dur) à deux différents niveaux de dureté (50 et 62 HRC) avec l'outil CBN et céramique revêtue. Ils ont constaté que l'avance est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface pour la fonte (Ni-Dur) avec la 62 HRC, tandis que la vitesse de coupe est l'acteur le plus significatif qui influence la rugosité de la surface pour la même matière avec la dureté 50 HRC (Figure I-28).

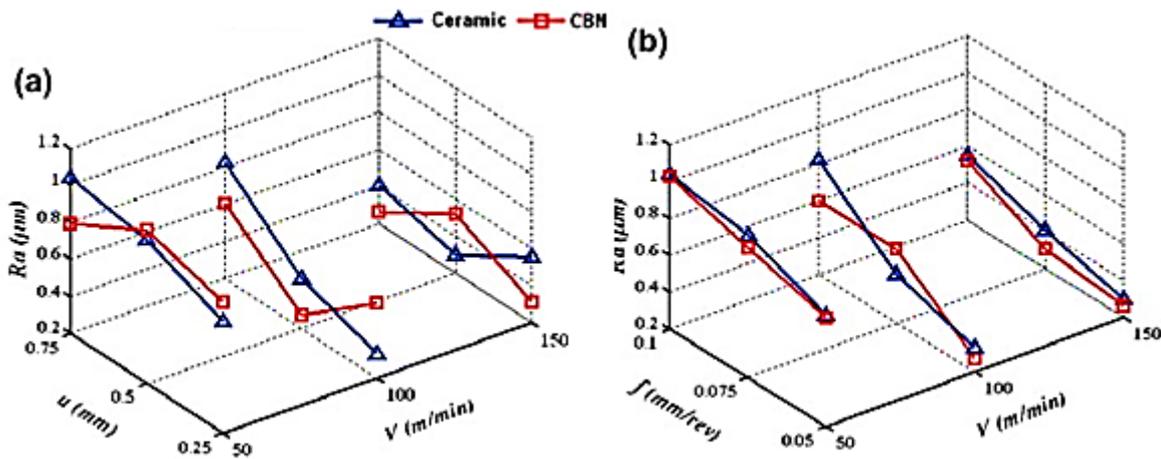


Figure I-28 Influence des paramètres de coupe sur Ra pour la fonte blanche Avec une dureté de 50 HRC[16]

[17] et autres, ont présenté une étude concernant le développement des modèles par la méthodologie de surface de réponse (RSM) sur la rugosité de surface et les efforts de coupe lors de tournage dur de l'acier AISI H11 à l'états traité (Figure I-29). Les modèles mathématiques sont développés en termes de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et la dureté de la pièce. Ils ont utilisé cette technique pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe en se servant d'un plan Box–Behnken (BBD).

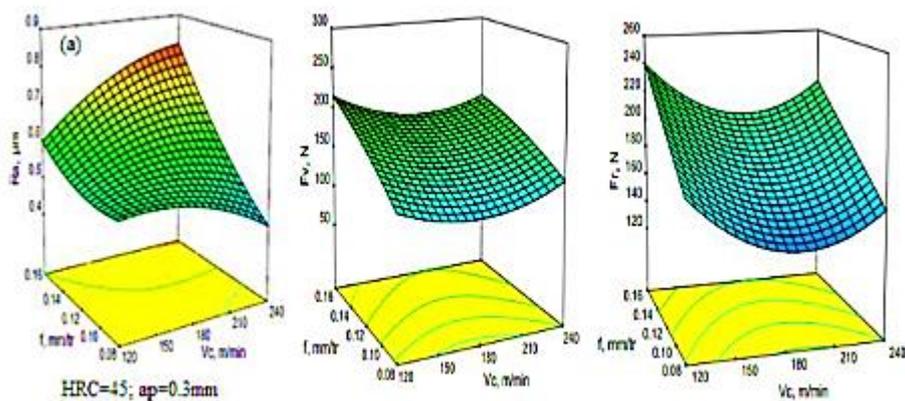


Figure I-29 L'effet des conditions de coupe sur les facteurs de réponse :(a) (Ra) ; (b) (F_v) et (c) (F_r) [17]

I.6 CONCLUSION

Nous avons présenté dans cette étude bibliographique les bases nécessaires à la compréhension de cette recherche. Ce chapitre est divisé en deux parties, la première expose un rappel des bases scientifique et des mécanismes de la coupe des métaux tels que : Nuances des outils de coupe, Paramètres d'usinage et le revêtement des outils de coupe. La deuxième partie de cette étude est consacrée à désigner l'état de l'art sur le tournage des aciers durcis et la méthode de Taguchi. A cet effet, nous avons présenté un résumé sur les différents travaux scientifiques réalisés ces dernières années.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'ensemble du matériel utilisé pour une approche expérimentale méthodique, qui a servi à l'étude de l'évolution des différents paramètres technologiques d'usinage, tels que la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fz), le débit du copeau enlevé (MRR), la puissance de coupe (Pc).

Les essais d'usinage sur l'acier X200Cr12, nécessaires à la réalisation de notre mémoire ont été effectués au Laboratoire de Mécanique et de Structure (LMS) et au département de Génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945- Guelma.

II.2 Matériel utilisé

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences ainsi que les équipements de mesure des différents paramètres technologiques. Un banc d'essais comportant un tour à charioter, une plateforme Kistler pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre (2D).

II.2.1 Machine-outil

Les essais sont réalisés sur une tour parallèle de marque TOSTRENCIN modèle SN40C (*figure II.1*), ayant les caractéristiques suivantes :

- Puissance du moteur électrique : 6,6kW.
- Nombre de tours par minute : 45 à 2000tr/min.
- Avance en millimètres par tour : 0,08 à 6,4mm/tr.



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

II.2.2 Matériau à usiné

Le matériau utilisé dans notre étude est un acier fortement allié de nuance *AISI D3* selon la norme « *AISI-SAE* ». Il est destiné généralement à la fabrication de haute performance, Il se classe parmi les aciers résistant aux chocs thermiques du fait de la présence du *chrome* (Le chrome augmente la trempabilité de l'acier, diminue le grossissement du grain lors de l'austénitisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température.), du *molybdène* (Le molybdène donne à l'acier une très bonne résistance à l'usure à chaud par la présence de carbure très dur de 1500 (M6C) à 2000 HV (M2C), et ralentit l'adoucissement.) du *vanadium* (Le vanadium permet de générer des carbures de très haute dureté (3000 HV). De petites additions supérieures à (0.2% en masse) sont très efficaces pour éviter le grossissement du grain lors du traitement thermique. Sa mauvaise résistance à l'oxydation au-dessus de 600°C est compensée par la présence de chrome) [19].

L'acier fortement allié *AISI D3*, Les plusieurs désignations tels que : DIN 1.2080, JIS SKD1, GB Cr12, AFNOR Z200Cr12.

La composition chimique de l'acier *AISI D3* est présentée dans le tableau II.1 comme suit :

Tableau II-1 La composition chimique de l'acier *AISI D3*

Elément	C	Si	Mn	Cr	P	S	Cu	Mo	Ni
%	2,00	0,31	0,29	12,00	0,011	0,009	0,162	0,124	0,259

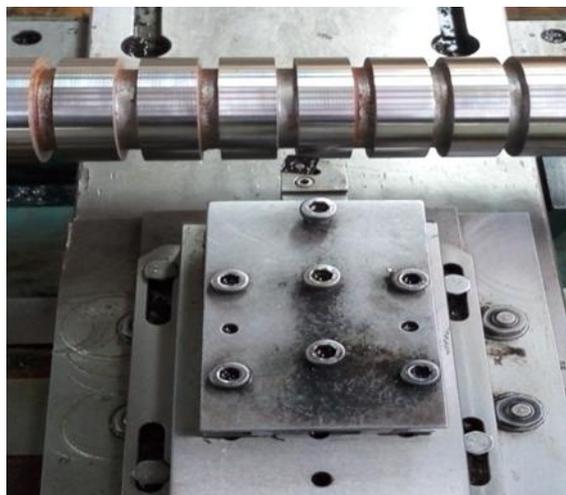


Figure II-2 Erouvettes pour différents essais.

Les propriétés techniques du *AISI D3* sont présentées dans le (*Tableau II 2*) :

Tableau II-2 Propriétés techniques du AISI D3

General	Valeurs	Unités
<i>Densité</i>	7.7	g/cm ³
Mécaniques	Valeurs	Unités
<i>Module d'élasticité à la traction</i>	210	GPa
Thermiques	Valeurs	Unités
<i>Conductivité thermique</i>	20	W/(m*k)
<i>Capacité thermique spécifique</i>	0,46	[J /g.K]
<i>Coefficient d'expansion thermique linéaire</i>	10-6	(C ⁰⁻¹)



Figure II-3 Matériau à usiner (AISI D3)

II.2.3 porte outils utilisés

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte-outil (SANDVIK) sur lequel sont fixées les plaquettes mécaniquement par trou central (figure II.4). La désignation du porte-outil selon la norme ISO est PSBNR2525K12 avec une géométrie de la partie active de l'outil matérialisée par certains angles (Tableau II.3). La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil.



Figure II-4 Porte outil utilisé

Tableau II-3 Caractéristiques de la porte plaquette utilisée.

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

II.2.4 Instruments de mesure utilisés

Pour réaliser les différentes mesures des paramètres de l'ortie, nous avons utilisé les instruments de mesure suivants :

- Un dynamomètre KISTLER 9257B pour la mesure des efforts de coupe.
- Un rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface.

II.2.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (KISTLER 9257 B) qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe, il comporte plusieurs éléments auxquels on cite : la plate - forme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel DYNOWARE et enfin une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil a le mouvement de translation. Ce dernier est monté sur la plate-forme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (*figure.II.5*). La plate-forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quatre (*figureII.6*).

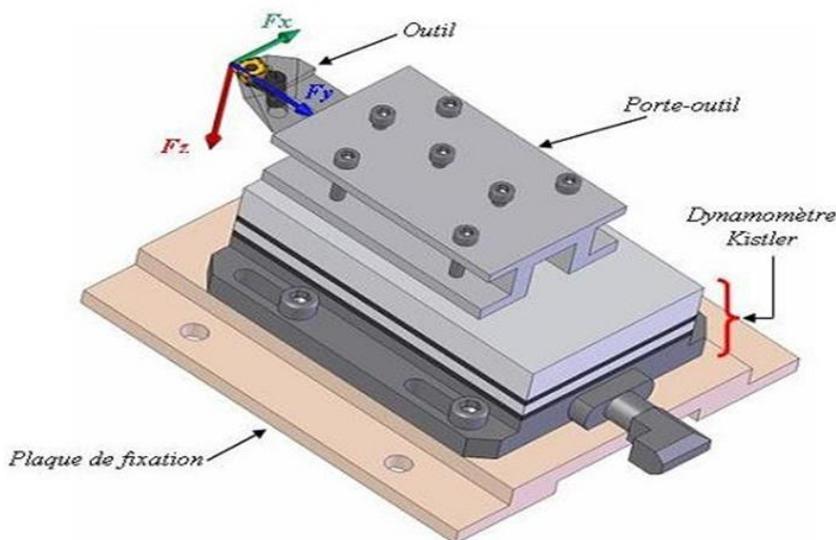


Figure II-5 Montage du dynamomètre sur la table de la machine

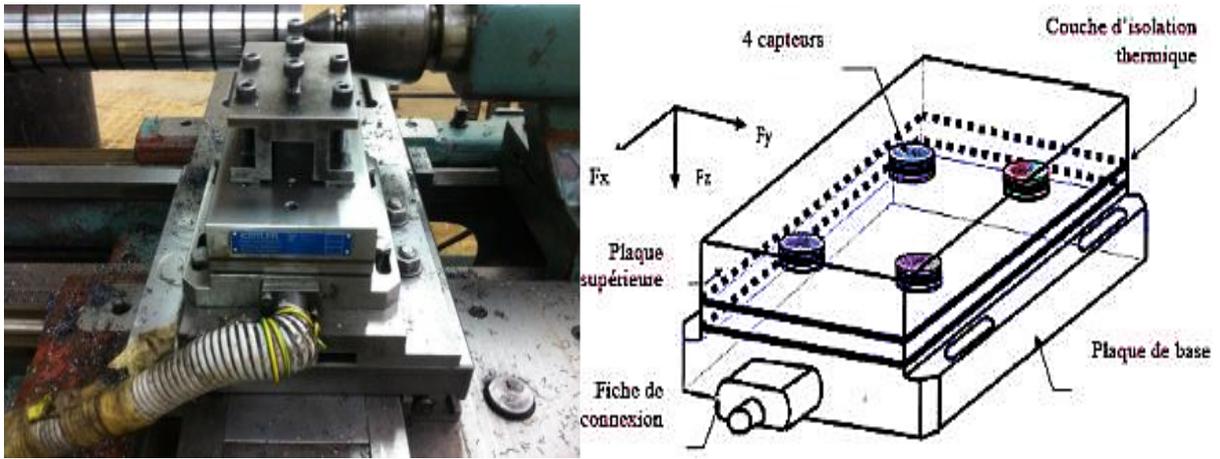


Figure II-6 Capteur d'effort de coupe KISTLER [13].

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de l'usinage sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes F_x , F_y et F_z .

La (figureII.7) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (effort axiale, effort radiale et effort tangentielle).

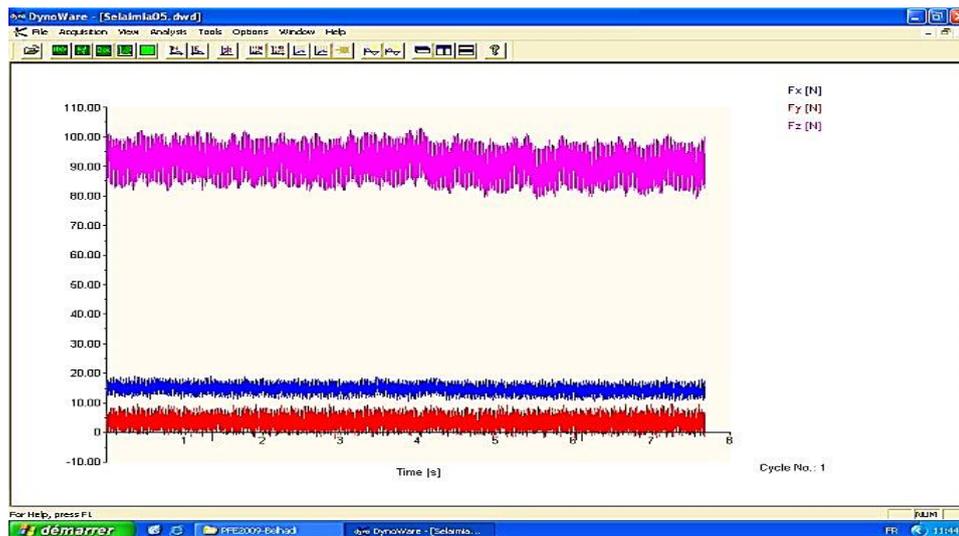


Figure II-7 Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.

La (*figure II.8*) illustre l'enchaînement des équipements et la méthode utilisée pour la mesure des efforts de coupe :



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

II.2.4.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité 2D

Les différents critères de la rugosité de surface (R_a , R_t et R_z) ont été obtenus instantanément après chaque passage de l'outil (essai) au moyen d'un appareil de rugosité Mitutoyo Surftest SJ-201 muni d'une pointe en diamant de $5 \mu\text{m}$ et se déplaçant linéairement (axialement) sur la surface usinée. Pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été effectuée directement sur la pièce en position de travail sans démonter celle-ci du tour. Les mesures ont été répétées trois fois sur trois lignes de cylindre axial séparées à 120° . La norme pour la mesure de la rugosité de surface est ISO 4287. Le rugosimètre 2D utilisé est présenté dans la (*figure II.9*).

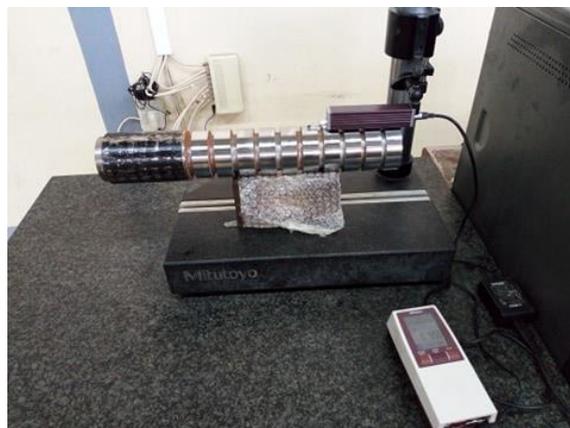


Figure II-9 Rugosimètre 2D

II.3 Plans d'expériences adoptés

L'approche expérimentale est adoptée en vue d'étudier les effets des différents facteurs et de leur interaction sur les réponses en les changeant d'une façon commandée.

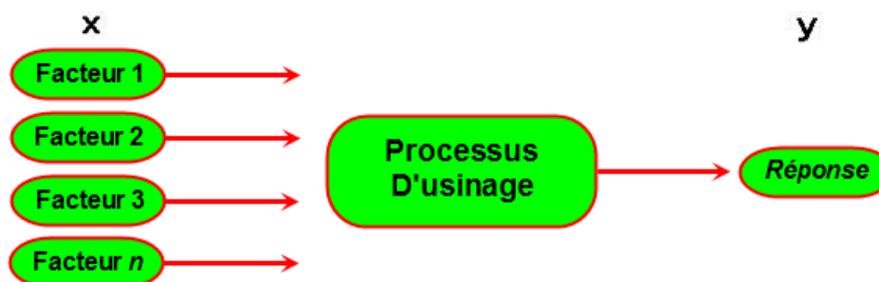
II.3.1 Définition

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

II.3.2 Terminologie

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de *réponse*. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées *facteurs*. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes *facteur* et *réponse* sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

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



II.3.3 Différents types de facteurs

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens.

Chaque facteur peut être :

- **Continu** : la pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.
- **Facteurs discrets** : au contraire, les facteurs discrets ne 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** : les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

II.3.4 Méthodologie des plans d'expériences

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

- ✓ **La recherche des facteurs influents** : Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs : parmi tous les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse, lesquels ont une influence significative ? Que vaut cette influence ? et y a-t-il des interactions entre ces facteurs ? Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences sont quantifiées, on passe au second stade
- ✓ **La modélisation** : Dans cette phase, on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe... et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de n lignes et k colonnes, où n est le nombre d'expériences et k est le nombre des effets.
- ✓ **L'optimisation** : Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié.

II.3.5 Démarche et plan d'expérience adopté

Les éléments du régime de coupe (r, V_c, f, ap) sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la rugosité de surface, la puissance de coupe et l'effort spécifique de coupe représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences. Nous nous servirons des plans d'expériences pour quantifier les influences des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel Design-Expert (version 10), c'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse des expériences. Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

- Établissement du but et des objectifs des essais ;

- Sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses) ;
- Choix du type de plan d'expérience ;
- Conduite des essais ;
- Détermination des facteurs influents ;
- Modélisation rapide des réponses ;
- Recherche des paramètres optimaux ;
- Validation des résultats.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre cas, deux plans d'expériences ont été adoptés : le Plan Factoriel Complet Taguchi (L16).

II.3.6 Plan de Taguchi L16

Nous allons travailler dans cette étude seulement avec un plan de 16 essais qui représente un plan de Taguchi (L16) ($4^3 2^1$), car il minimise les essais.

Les essais ont été numérotés de 1 à 16. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II 4.

Tableau II-4 Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L16).

N° d'essais	Paramètres d'usinage			
	r mm	Vc m/min	f mm/tr	ap mm
1	0,4	180	0,08	0,1
2	0,4	255	0,12	0,1
3	0,4	330	0,16	0,3
4	0,4	400	0,2	0,3
5	0,8	180	0,12	0,3
6	0,8	255	0,08	0,3
7	0,8	330	0,2	0,1
8	0,8	400	0,16	0,1
9	1,2	180	0,16	0,1
10	1,2	255	0,2	0,1
11	1,2	330	0,08	0,3
12	1,2	400	0,12	0,3
13	1,6	180	0,2	0,3
14	1,6	255	0,16	0,3
15	1,6	330	0,12	0,1
16	1,6	400	0,08	0,1

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos travaux. Les caractéristiques des matériaux de coupe, les instruments de mesure utilisés, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées. Dans le chapitre III qui suit, nous présenterons une étude sur l'usinabilité du l'acier fortement allié AISI D3, usiné par une plaquette de coupe en carbure métallique SCM120408(K10) en termes de rugosité de surface, des efforts de coupe, la puissance de coupe et la productivité (débit du copeau enlevé)

Chapitre III

Modélisation des paramètres technologiques d'usinage

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Cette dernière nous a permis le développement des modèles par régressions multiples de la rugosité arithmétique de surface (Ra), l'effort tangentiel de coupe (Fz), la puissance de coupe (Pc) et le débit Le débit du copeau enlevé (MRR). Ces réponses ont été mesurées lors du tournage de l'acier AISI D3 par un outil de coupe en carbure revêtu GC4215, dont les expériences ont été réalisées en variant la vitesse de coupe (Vc), et le rayon des plaquette (r) la profondeur de passe (ap) et l'avance par tour (f). Les résultats ont été traités statistiquement afin de proposer un régime de coupe optimal. Pour atteindre ces objectifs, nous avons utilisé l'analyse de la variance (ANOVA) qui a pour objectif de déterminer les facteurs et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, aussi pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques. Le traitement des résultats a été réalisé par des logiciels de statistique appelés « Design Expert 10 » et « Minitab-18 ».

III.2 Plan d'expérience

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe tel que la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) et le rayon (r) sur les différents paramètres technologiques d'usinage étudiés : (l'effort de coupe(Fz), rugosité de surface (Ra), la puissance de coupe (Pc) et le débit Le débit du copeau enlevé (MRR)), nous avons dressé un plan tagauchi L16 ($4^3 2^1$) pour les différents paramètres de sortie (*Tableau III.1*). L'usinage de l'acier AISI D3 est réalisé en tournage en utilisant un outil de coupe en carbure revêtu GC4215.

Tableau III-1 Résultats des paramètres technologique d'usinage pour un plan de Taguchi L16

N° essai	FACTEUR				REPENCE			
	r mm	Vc m/min	f mm/tr	ap mm	Ra µm	Fz N	Pc W	MRR cm ³ /min
1	0,4	180	0,08	0,1	0,614	18,35	55,05	1,44
2	0,4	255	0,12	0,1	1,128	35,32	150,11	3,06
3	0,4	330	0,16	0,3	2,047	142,18	781,99	15,84
4	0,4	400	0,2	0,3	3,142	151,14	1007,6	24
5	0,8	180	0,12	0,3	0,869	126,07	378,21	6,48
6	0,8	255	0,08	0,3	0,368	84,73	360,1025	6,12
7	0,8	330	0,2	0,1	1,835	76,6	421,3	6,6
8	0,8	400	0,16	0,1	1,19	74,93	499,5333	6,4
9	1,2	180	0,16	0,1	0,757	43,15	129,45	2,88

10	1,2	255	0,2	0,1	1,119	79,9	339,575	5,1
11	1,2	330	0,08	0,3	0,369	92,88	510,84	7,92
12	1,2	400	0,12	0,3	0,614	130,91	872,7333	14,4
13	1,6	180	0,2	0,3	0,902	181,98	545,94	10,8
14	1,6	255	0,16	0,3	0,457	140,13	595,5525	12,24
15	1,6	330	0,12	0,1	0,273	31,49	173,195	3,96
16	1,6	400	0,08	0,1	0,393	45,89	305,9333	3,2

L'analyse des résultats du tableau III.1 montre que la rugosité de surface est enregistrée dans l'intervalle des valeurs comprise entre (0,273 et 3,142) μm . Pour les autres paramètres (F_z , P_c et MRR), leurs variations sont comprises entre (18,35 et 181,98) N, (55,05 et 1007,6) W et (1,44 et 24) cm^3/min successivement.

III.3 Analyse ANOVA

ANOVA est une méthode statistique qui permet de déterminer l'interaction individuelle de tous les facteurs contrôlés dans un plan d'expérience. Dans notre étude on utilise l'ANOVA pour analyser les effets des paramètres d'entrées (vitesse de coupe, l'avance, rayon de plaquette et la profondeur de passe) sur les deux réponses étudiées (effort de coupe, débit de coupe enlevé, rugosité de surface et puissance de coupe).

Cette analyse a été réalisée avec un intervalle de confiance de 95% (pourcentage de signification : $\alpha = 0.05$). La dernière colonne du tableau montre la valeur de contribution en pourcentage, de chaque paramètre, ce qui indique le degré d'influence sur la performance du processus [20].

III.4 Méthode appliquée

La méthode appliquée pour la détermination des modèles mathématiques est la méthodologie de surface de réponse (MSR), en utilisant un logiciel de statistique, Design-Expert 10. Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif. Pour cela on a choisi un niveau de signification α fixé à ($\alpha = 0.05$). La méthodologie de surface de réponse (MSR) est une procédure qui comprend six étapes :

Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie voulues ;

- 1) Choisir un plan de conception expérimentale ;
- 2) Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique de (MSR) ;
- 3) Analyser par (ANOVA) les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- 4) Déterminer la forme du modèle mathématique appropriée ;
- 5) Optimiser les paramètres d'entrée et faire les tests de confirmation afin de vérifier les performances prédites.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Ψ , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k , d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Ψ) sous la forme suivante :

$$\Psi = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i X_i + \sum_{i=1}^k c_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j} c_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (III-1)$$

- Ψ est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- X_i représente le niveau attribué au facteur i . C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- c_0, c_i, c_{ij}, c_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (III-2).

$$R^2 = \frac{\sum (\psi - \bar{\psi})^2}{\sum (\psi_i - \bar{\psi})^2} \quad (III-2)$$

avec ψ_i : valeur de la réponse calculée à la i^{e} expérience ;

$\bar{\psi}_i$: valeur mesurée à la i^{e} expérience ;

$\bar{\psi}$: valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de la variance (*ANOVA*) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. L'*ANOVA* permet de tracer les surfaces de réponse, d'estimer l'influence et l'interaction simultanées des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés (*Ra, Fz, Pc et MRR*).

III.5 Analyse statistique et modélisation des paramètres technologiques

III.5.1 Résultats de la rugosité de surface (R_a)

III.5.1.1 Analyse de la variance pour (R_a)

Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions sur (R_a). Il est clair que l'avance par tour (f) est le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface (R_a), sa contribution est 42,55%. Le deuxième facteur important affectant la rugosité de surface est le rayon (r) avec 36,83 % de contribution, la vitesse de coupe (V_c) avec 9,13% de contribution. C'est logique car l'augmentation de l'avance génère des sillons résultants de la cinétique d'usinage qui sont plus profonds et plus larges lorsque l'avance par tour (f) augmente [21]. Aussi l'augmentation du rayon (r) a pour effet l'écrasement des aspérités de la surface usinée.

La contribution de l'interaction ($f \times r$) est de 5,39 % par contre, la contribution de (ap) est de 1,51%. Le produit (r^2) et (f^2) ont des contributions inférieures à 2,39% et à 1,5% successivement. Les autres termes peuvent être supposés non significatifs.

Tableau III-2 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (R_a)

Source	DL	SomCar séq	Contribu tion	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	remarque
Modèle	13	8,81504	99,93%	8,81504	0,67808	224,28	0,004	signifiant
r	1	3,24858	36,83%	1,08190	1,08190	357,85	0,003	signifiant
vc	1	0,80530	9,13%	0,00033	0,00033	0,11	0,773	insignifiant
f	1	3,75368	42,55%	0,82220	0,82220	271,95	0,004	signifiant
ap	1	0,13304	1,51%	0,06627	0,06627	21,92	0,043	signifiant
$r \times r$	1	0,21045	2,39%	0,00118	0,00118	0,39	0,596	insignifiant
$vc \times vc$	1	0,05778	0,66%	0,00117	0,00117	0,39	0,598	insignifiant
$f \times f$	1	0,12373	1,40%	0,12373	0,12373	40,92	0,024	signifiant
$r \times vc$	1	0,00023	0,00%	0,00019	0,00019	0,06	0,824	insignifiant
$r \times f$	1	0,47556	5,39%	0,20771	0,20771	68,70	0,014	signifiant
$r \times ap$	1	0,00004	0,00%	0,00004	0,00004	0,01	0,918	insignifiant
$vc \times f$	1	0,00036	0,00%	0,00053	0,00053	0,17	0,717	insignifiant
$vc \times ap$	1	0,00544	0,06%	0,00544	0,00544	1,80	0,312	insignifiant

$f \times ap$	1	0,00085	0,01%	0,00085	0,00085	0,28	0,649	insignifiant
Erreur	2	0,00605	0,07%	0,00605	0,00302			
Total	15	8,82109	100,00%					

III.5.1.2 Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-1) présente les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité (Ra). On remarque que l'effort de coupe (f) est le facteur le plus influent sur la rugosité (Ra) car il a la plus grande pente, suivie par le rayon de plaquette (r), suivie par la vitesse de coupe (Vc), suivie par l'avance en dernier lieu par la profondeur de passe (ap). La figure (III-2) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la rugosité (Ra). L'analyse des graphes indique que l'interaction ($r \times f$) est significative car les courbes se croisent, ce qui est en accord avec les résultats de l'ANOVA (tableau III-2). Par contre les deux autres interactions ($r \times vc$), ($r \times ap$), ($vc \times f$), ($vc \times ap$), ($f \times ap$) ne sont pas significatives.

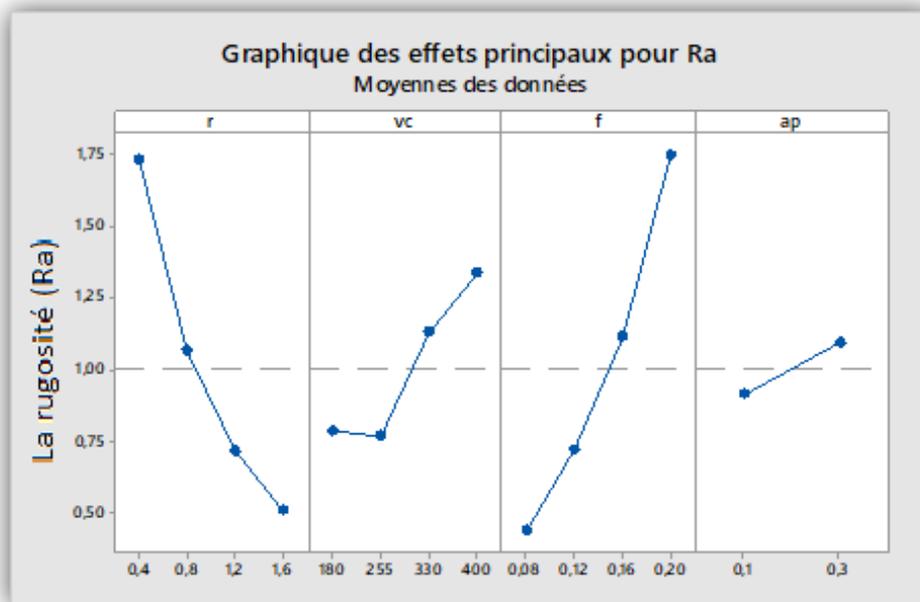


Figure III-1 Graphique des effets principaux pour (Ra).

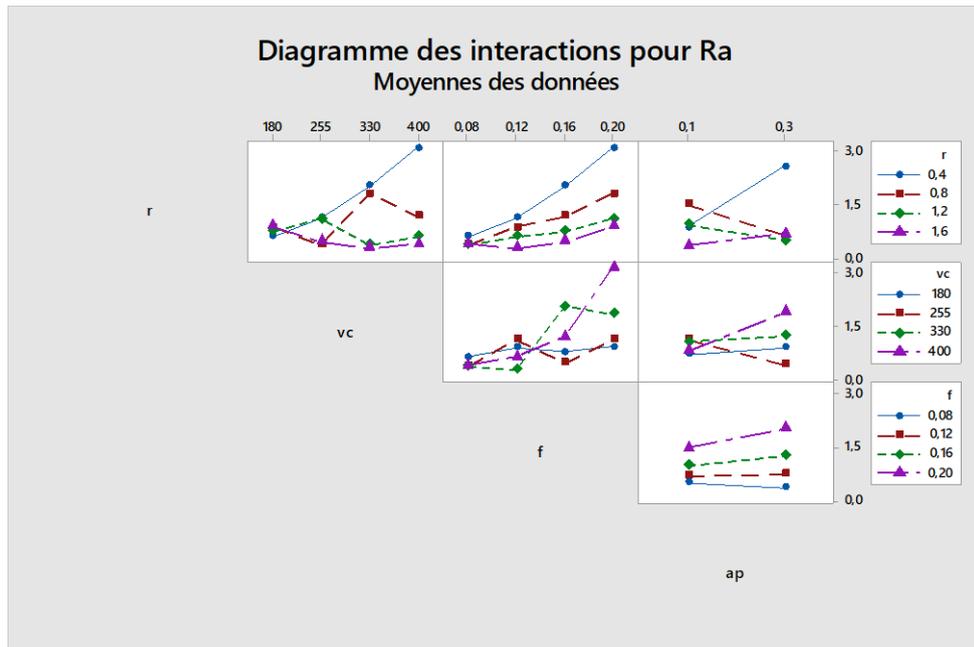


Figure III-2 Diagramme d'interaction pour (Ra).

III.5.1.3 Equation de régression pour (Ra)

La relation entre la variable dépendante (Ra) et les variables indépendantes (Vc, f, r et ap) sont exprimées par le modèle mathématique quadratique indiqué par l'équation (III.1) avec un coefficient de détermination (R²) égale à 92,22%.

$$Ra = 4,08 - 8,5r - 0,0413vc + 42,8f + 23,0ap + 4,78r \times r + 0,000071vc \times vc + 54,96f \times f - 0,000217r \times vc - 14,24r \times f - 0,056r \times ap - 0,00265vc \times f + 0,00245vc \times ap - 162f \times ap \quad (III-3)$$

La Figure (III 3) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la rugosité (Ra). L'analyse de cette figure montre une corrélation acceptable entre les deux courbes avec un coefficient de détermination R²=92,22%.

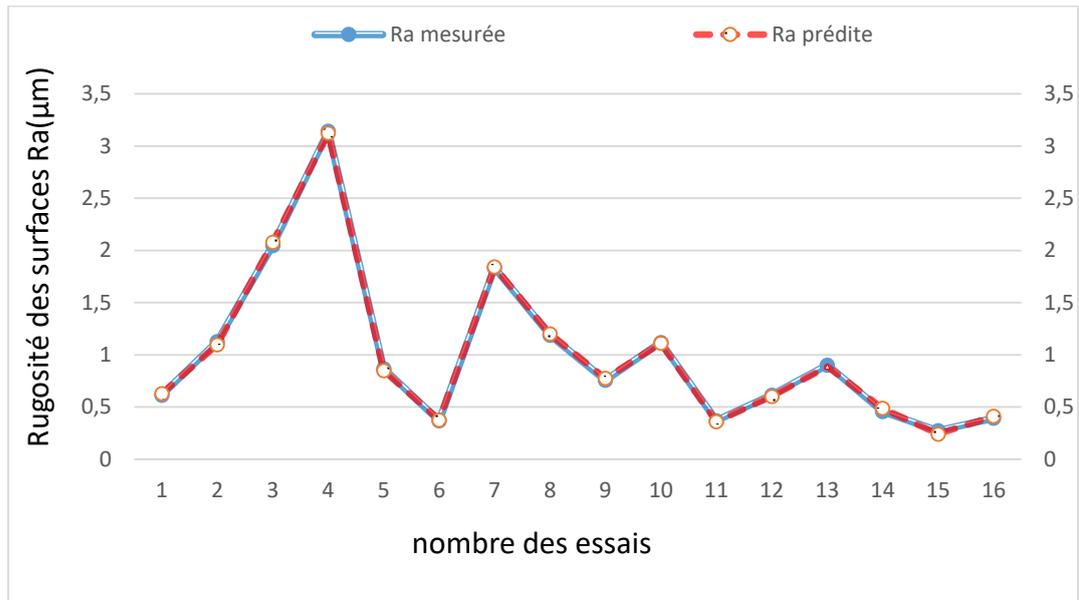


Figure III-3 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra).

III.5.1.4 Diagrammes de surfaces 3D et graphiques de Contours

La présentation en 3D (Figure III 4 à 9) montre que les pentes de l'avance et le rayon de la plaquette de coupe sont supérieurs par rapport aux autres facteurs (V_c et a_p), ce qui implique que ces deux facteurs ont une influence très importante sur la rugosité de surface (Ra). Cela est en accord avec les résultats de l'ANOVA.

D'autre part les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas Ra) et quatre facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

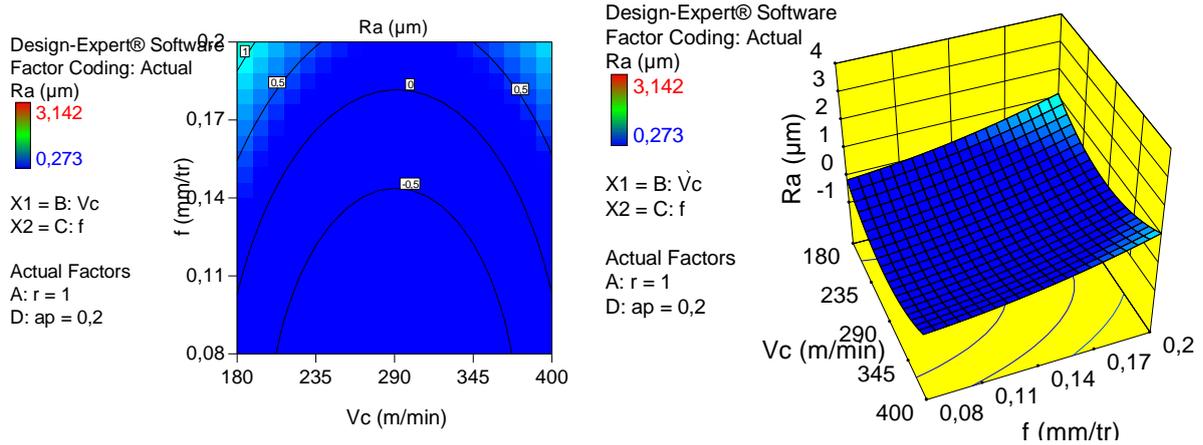


Figure III-4 Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe vc-f

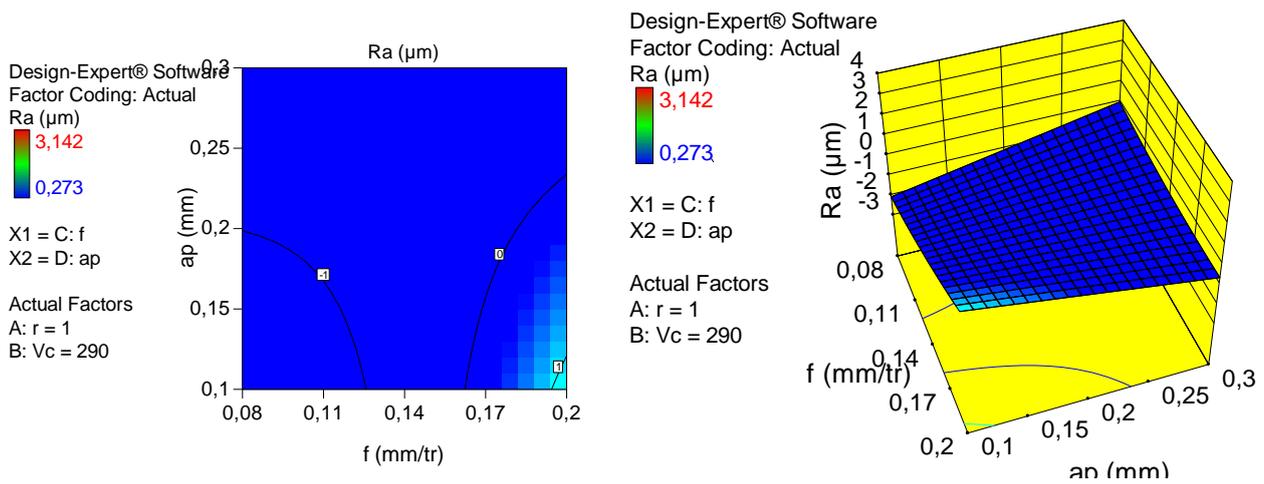


Figure III-5 Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe ap-f

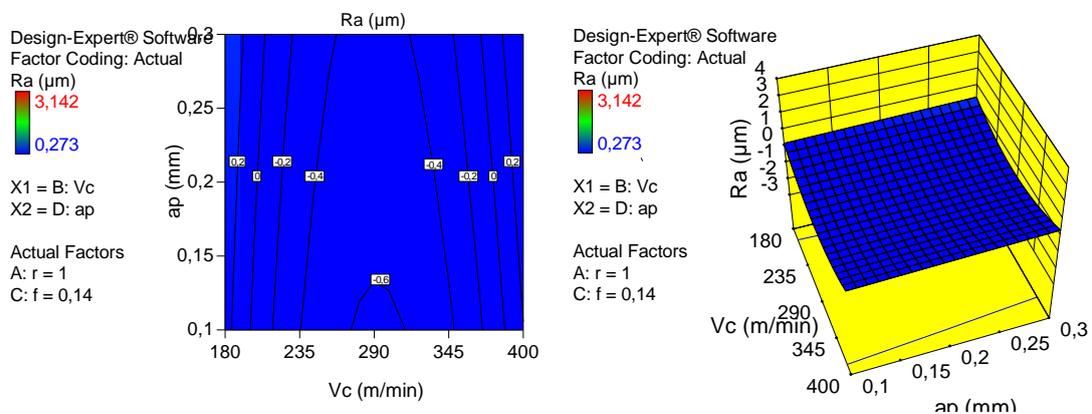


Figure III-6 Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe ap-vc

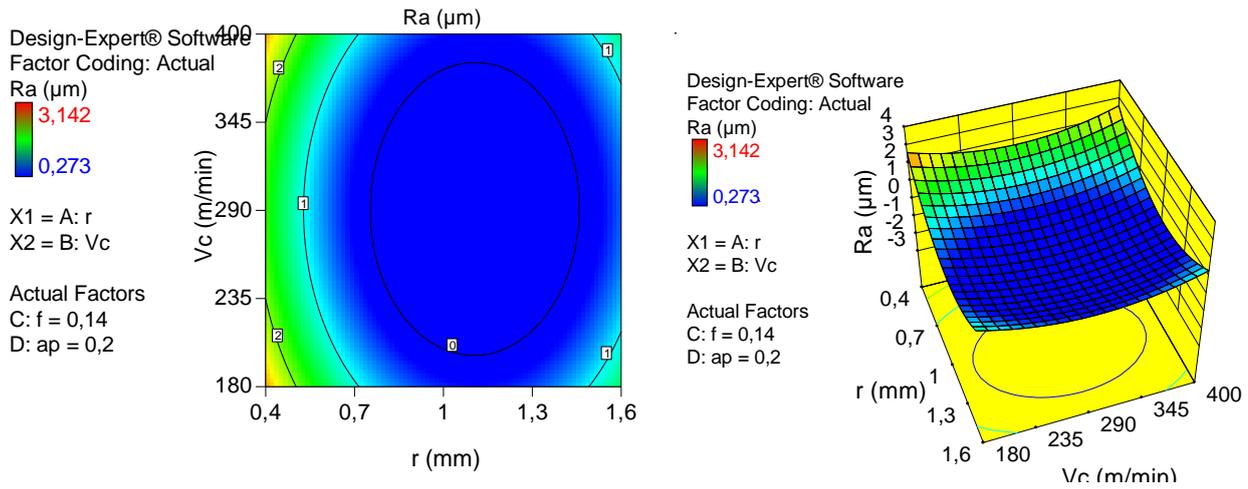


Figure III-7 Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe VC-r

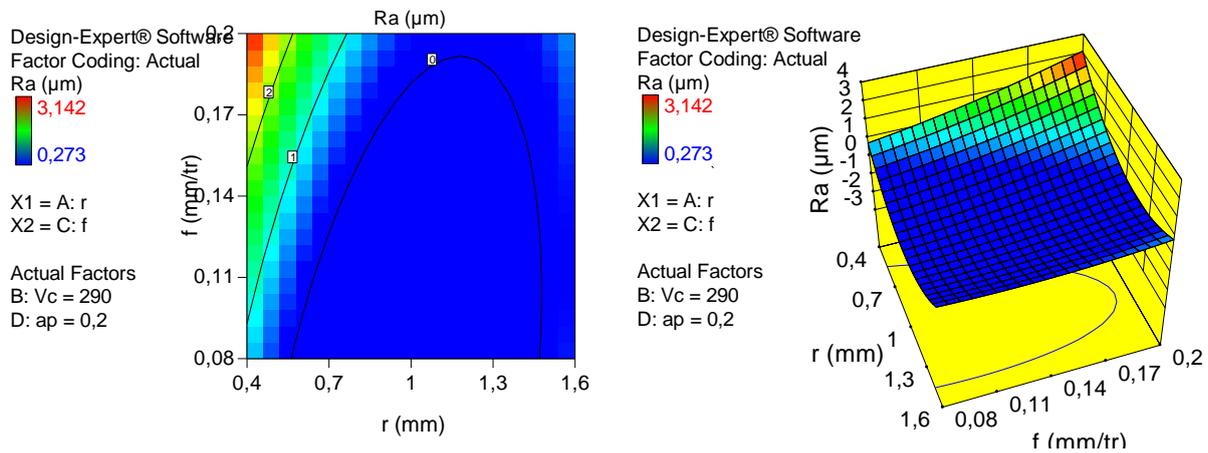


Figure III-8 Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe r-f

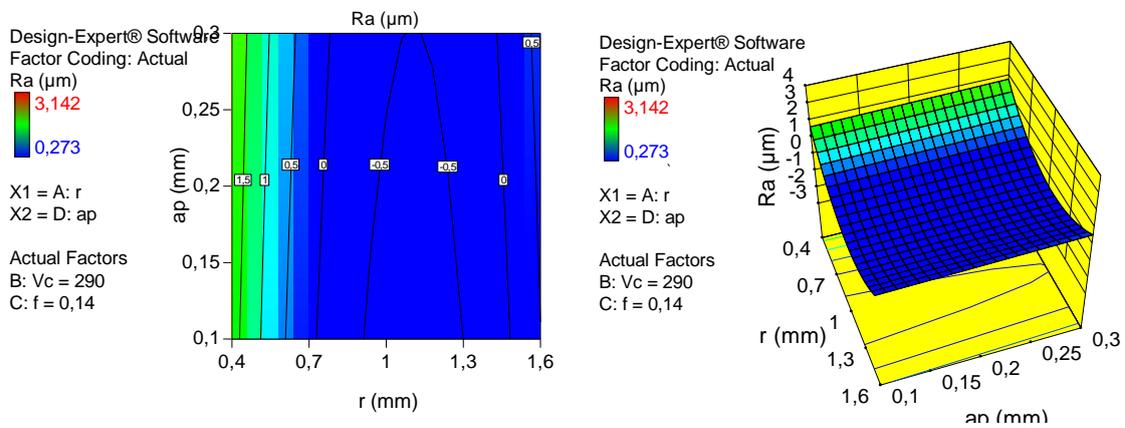


Figure III-9 Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe r-ap

III.5.2 Résultats de l'effort de coupe (F_z)

III.5.2.1 Analyse de la variance pour (F_z)

Le tableau (III-3) expose les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de l'effort de coupe (F_z). L'objectif est d'analyser l'effet des facteurs principaux et de déterminer la contribution des différents facteurs et interactions sur l'effort de coupe (F_z). L'analyse des résultats indique que les paramètres significatifs sont (ap) avec une contribution de 70,86% suivie par (f) avec une contribution de 22,94%, Les autres facteurs et les interactions peuvent être supposés non significatifs avec une légère contribution de moins de 1,37%.

Tableau III-3 Résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe (F_z).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	remarque
Modèle	13	36555,6	99,81%	36555,6	2812,0	79,91	0,012	signifiant
r	1	252,1	0,69%	106,4	106,4	3,02	0,224	insignifiant
vc	1	124,5	0,34%	244,9	244,9	6,96	0,119	insignifiant
f	1	8403,2	22,94%	3302,6	3302,6	93,86	0,010	signifiant
ap	1	25952,4	70,86%	16682,6	16682,6	474,11	0,002	signifiant
$r \times r$	1	87,0	0,24%	1,2	1,2	0,03	0,871	insignifiant
$vc \times vc$	1	501,7	1,37%	2,2	2,2	0,06	0,824	insignifiant
$f \times f$	1	3,3	0,01%	3,3	3,3	0,09	0,788	insignifiant
$r \times vc$	1	220,4	0,60%	248,7	248,7	7,07	0,117	insignifiant
$r \times f$	1	209,1	0,57%	69,3	69,3	1,97	0,296	insignifiant
$r \times ap$	1	5,5	0,01%	5,5	5,5	0,16	0,731	insignifiant
$vc \times f$	1	351,0	0,96%	306,9	306,9	8,72	0,098	insignifiant
$vc \times ap$	1	444,4	1,21%	444,4	444,4	12,63	0,071	insignifiant
$f \times ap$	1	1,0	0,00%	1,0	1,0	0,03	0,883	insignifiant
Erreur	2	70,4	0,19%	70,4	35,2			
Total	15	36626,0	100,00%					

III.5.2.2 Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-10) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort de coupe (F_z). On remarque que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influent sur l'effort de coupe (F_z) car il a la plus grande pente suivie par l'avance (f). La figure (III-11) expose le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour l'effort de coupe (F_z). L'analyse des graphes dévoile que les courbes pour l'interaction ($Vc \times ap$) ne sont pas parallèles, ce qui veut dire qu'il y'a des interactions significatives avec des faibles contributions qui ne dépasse pas les 1.2% dans le meilleur des cas (tableau III-3).

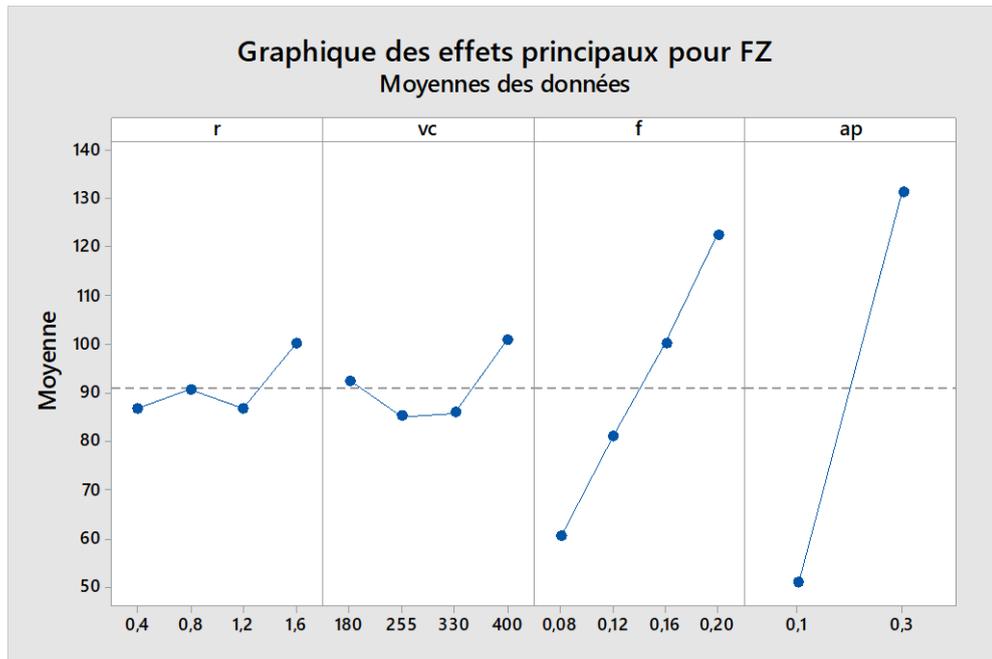


Figure III-10 Graphique des effets principaux pour (F_z).

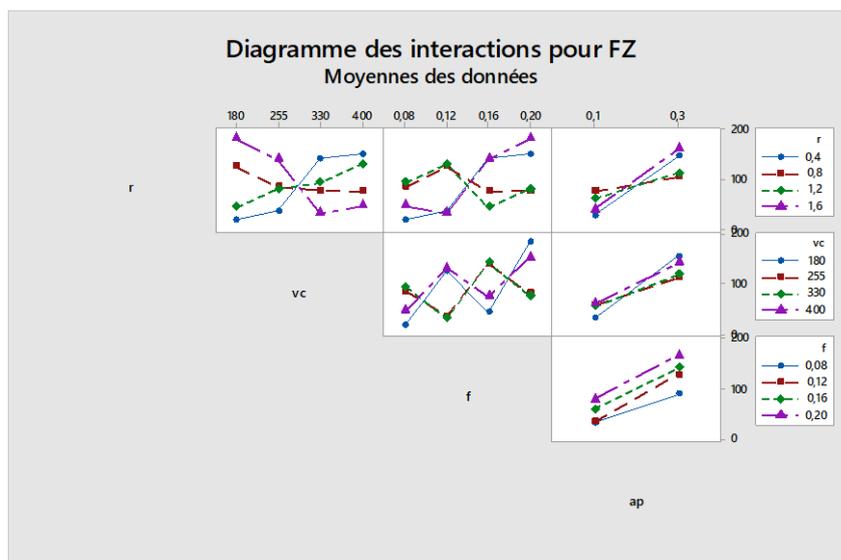


Figure III-11 Diagramme d'interaction pour (F_z).

III.5.2.3 Equation de régression pour l'effort de coupe (F_z)

Le modèle de l'effort de coupe (F_z) est donné par l'équation suivante (III-4). Son coefficient de détermination (R^2) est de 97,32%.

$$F_z = 109 - 445 r - 1,57 vc + 2053 f + 1298 ap + 147 r \times r + 0,00304 vc \times vc + 324 f \times f + 0,3225 r \times vc + 314,8 r \times f + 20,7 r \times ap - 2,340 vc \times f - 0,4095 vc \times ap - 5296 f \times ap \quad (III-4)$$

La figure (III 12) illustre les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'effort de coupe (F_z). Ces chiffres indiquent que les modèles quadratiques sont capables de représenter le système dans le domaine expérimental donné. La comparaison des résultats prouve que les valeurs prédites et celles mesurées sont très proches ce qui prouve que le modèle est fiable.

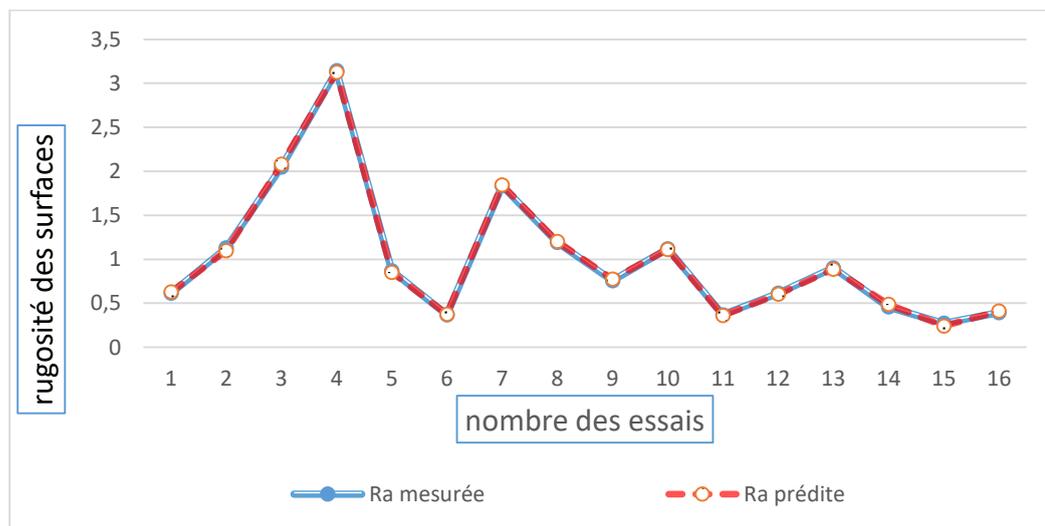


Figure III-12 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (F_z).

Diagrammes de surfaces 3D et graphique de Contour

La présentation en 3D (Figure III-(13 à 18)) montres que les pentes de l'avance et la profondeur de passe (ap) est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante l'effort de coupe (F_z). Cela est en accord avec les résultats de l'ANOVA.

D'autre part les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas F_z) et quatre facteurs à partir

d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

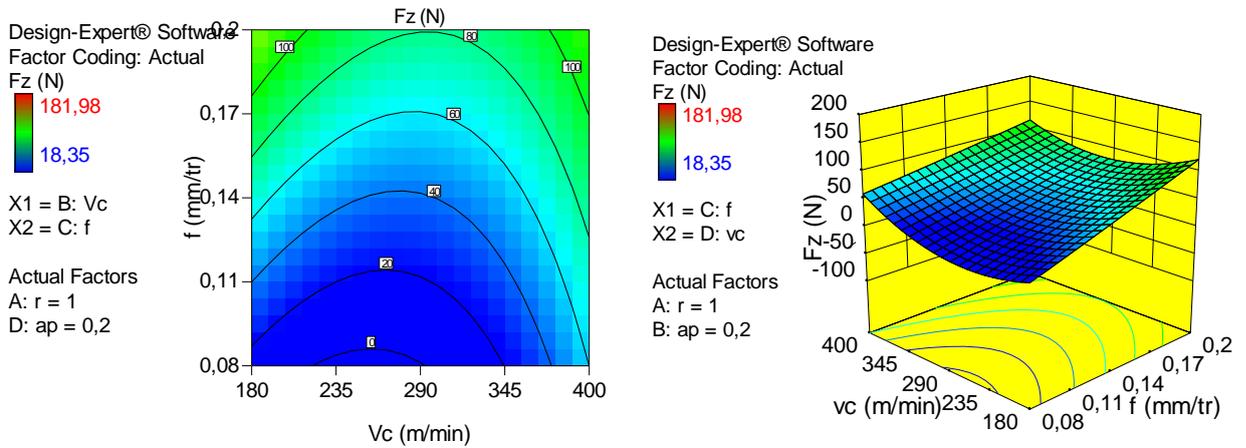


Figure III-13 Diagrammes de surfaces et Graphique de Contour de (Fz) en fonction de Vc; f

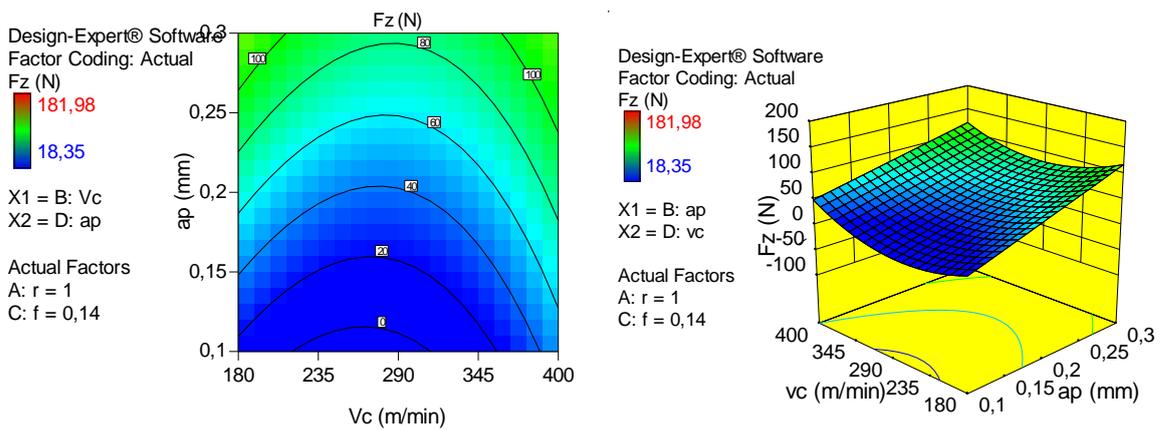


Figure III-14 Diagrammes de surfaces et Graphique de Contour de (Fz) en fonction de Vc ; ap

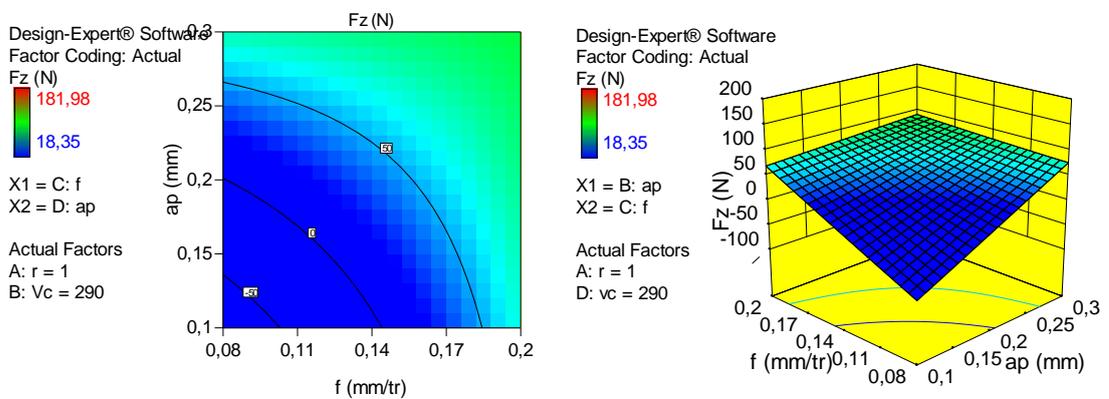


Figure III-15 Diagrammes de surfaces et Graphique de Contour de (Fz) en fonction de f ; ap

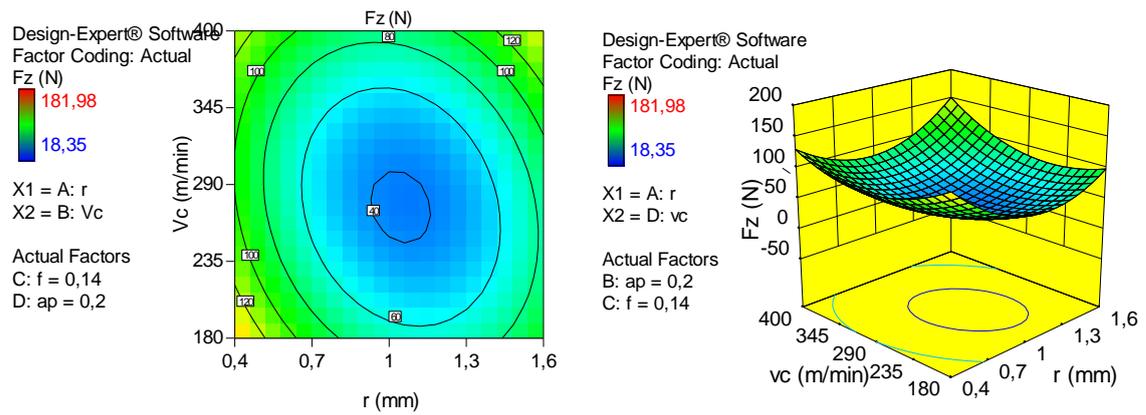


Figure III-16 Diagrammes de surfaces et Graphique de Contour de (Fz) en fonction de Vc ; r

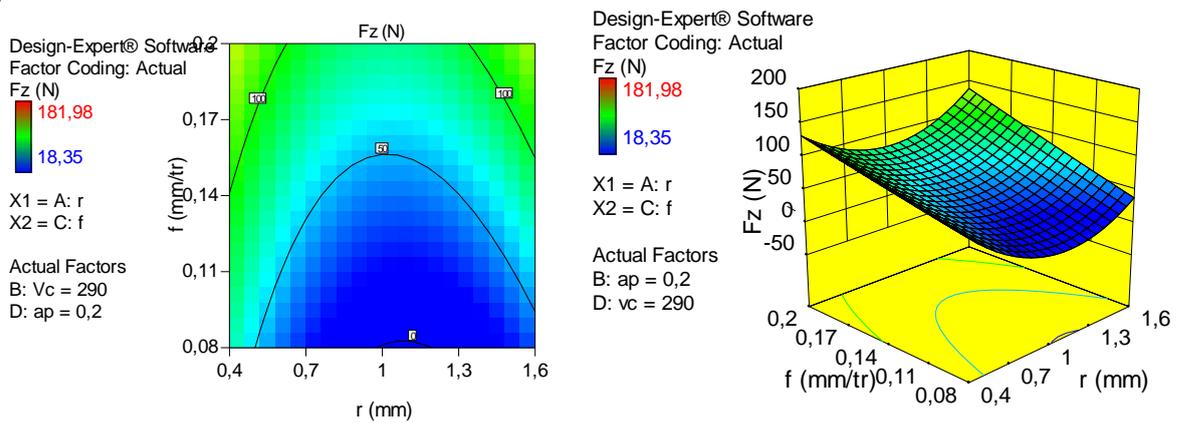


Figure III-17 Diagrammes de surfaces et Graphique de Contour de (Fz) en fonction de f ; r

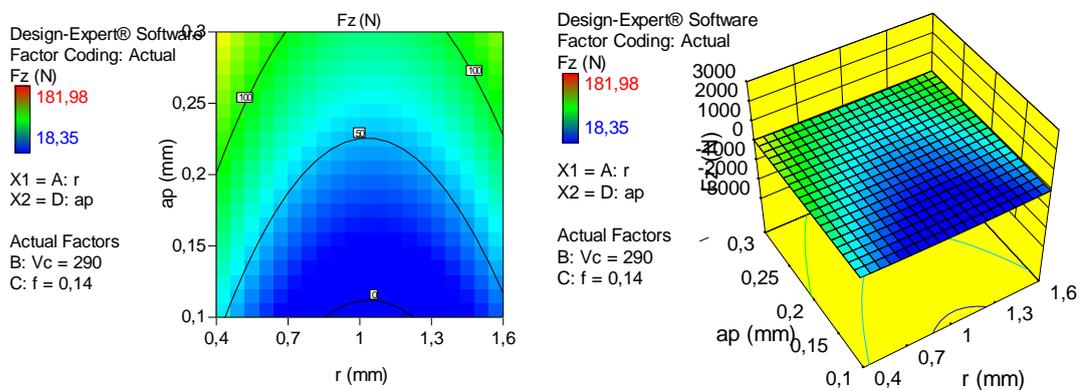


Figure III-18 Diagrammes de surfaces et Graphique de Contour de (Fz) en fonction de r ; ap

III.5.3 Résultats de la puissance de coupe (P_c)

III.5.3.1 Analyse de la variance pour (P_c)

Le tableau (III.4) présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour la puissance de coupe (P_c). L'objectif est d'analyser l'impact des facteurs principaux du régime de coupe sur (P_c). Il est à noter que la profondeur de passe est le paramètre qui a le plus grand effet sur (P_c) avec une contribution de 50,04%, suivie par (V_c) et (f) avec les contributions respectives de (29,97 et 15,27) %. La faible contribution correspond au facteur (r) insignifiant avec un pourcentage 0,97%.

Tableau III-4 Analyse de la variance (ANOVA) pour de la puissance de coupe (P_c)

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	remarque
Modèle	4	1066844	96,25%	1066844	266711	70,68	0,000	
Linéaires	4	1066844	96,25%	1066844	266711	70,68	0,000	
r	1	10787	0,97%	10787	10787	2,86	0,119	insignifiant
f	1	169257	15,27%	169257	169257	44,85	0,000	signifiant
Vc	1	332214	29,97%	332214	332214	88,04	0,000	signifiant
ap	1	554586	50,04%	554586	554586	146,97	0,000	signifiant
Erreur	11	41509	3,75%	41509	3774			
Total	15	1108352	100,00%					

III.5.3.2 Graphes des effets moyens

La figure (III-19) présente les effets moyens des paramètres de coupe sur la puissance de coupe (P_c). Cette figure montre que la profondeur de passe (ap), la vitesse de coupe (vc) et l'avance à des effets significatifs sur la réponse P_c . En effet, on remarque que les pentes des paramètres ap et V_c est plus grandes que les pentes de l'avance de coupe

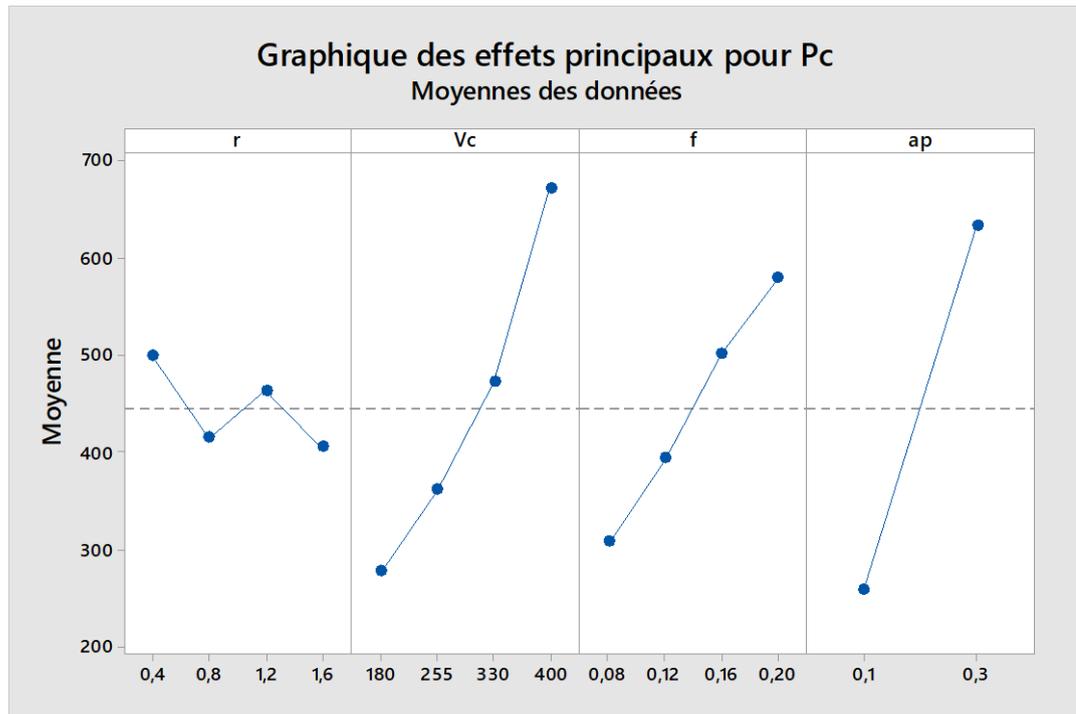


Figure III-19 Graphique des effets principaux pour la puissance de coupe (Pc).

III.5.3.3 Equation de régression pour la puissance de coupe (Pc)

Le modèle de la puissance de coupe (Pc) est donné par l'équation (III.5) ci-après. Son coefficient de détermination (R²) est de 91,66%.

$$Pc = -701,5 - 58,1 r + 2300 f + 1,753 Vc + 1862 ap \quad (III-5)$$

La Figure (III.22) présente une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la puissance de coupe (Pc). L'analyse des résultats de la figure (III.21) montre une bonne corrélation entre les deux courbes avec un coefficient de détermination de R² = 91,66%.

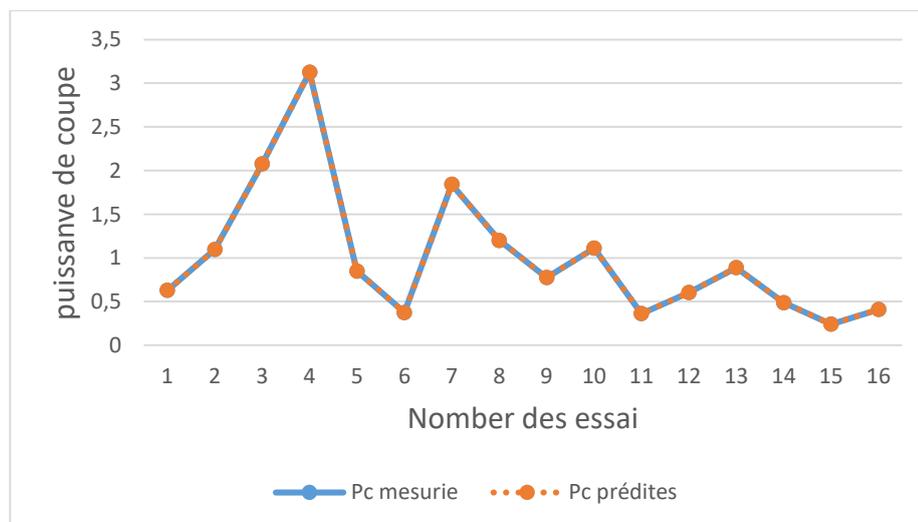


Figure III-20 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la puissance de coupe (Pc).

III.5.3.4 Diagrammes de surfaces 3D et graphiques de contours

La présentation en 3D (Figure III-(21 à 23)) montres que les pentes de la profondeur de passe (ap), la vitesse de coupe (vc) et l'avance (f) sont supérieur par rapport aux autre facteur (r) ce qui implique que cette facteurs a des influences très importante l'effort de coupe (Pc). Cela est en accord avec les résultats de l'ANOVA.

D'autre part les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas Pc) et quatre facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

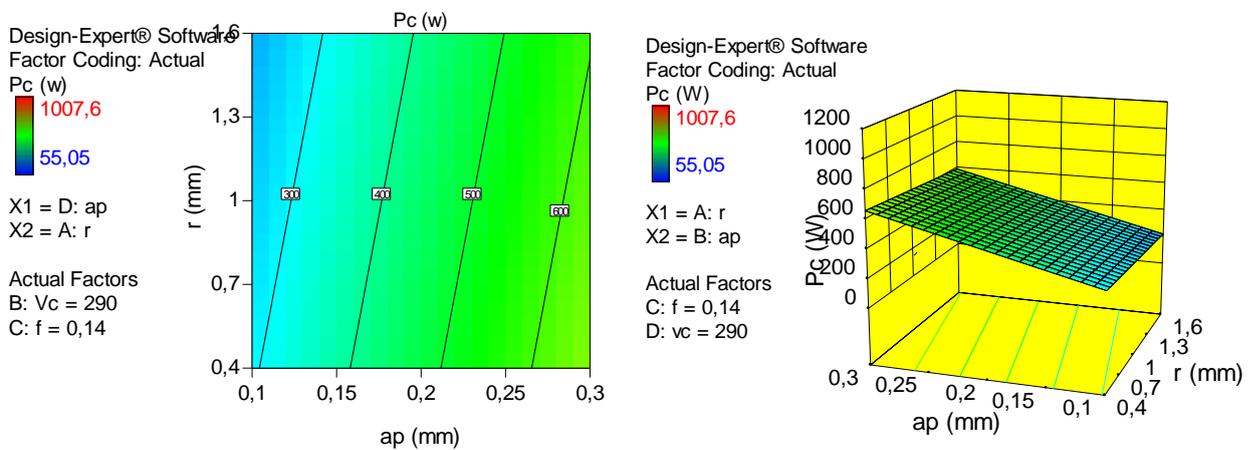


Figure III-21 Diagrammes de surfaces et contour du (Pc) en fonction de (ap, r)

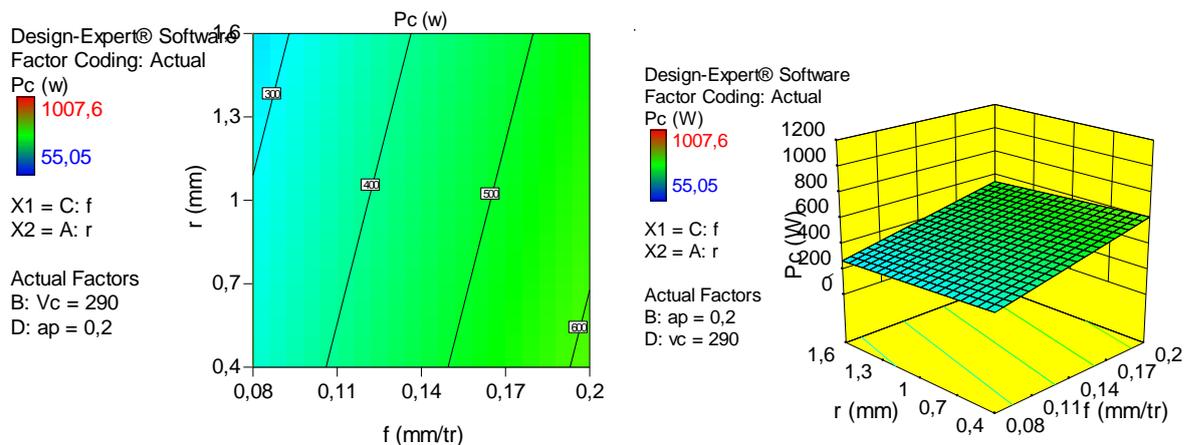


Figure III-22 Diagrammes de surfaces et contour du (Pc) en fonction de (r, f)

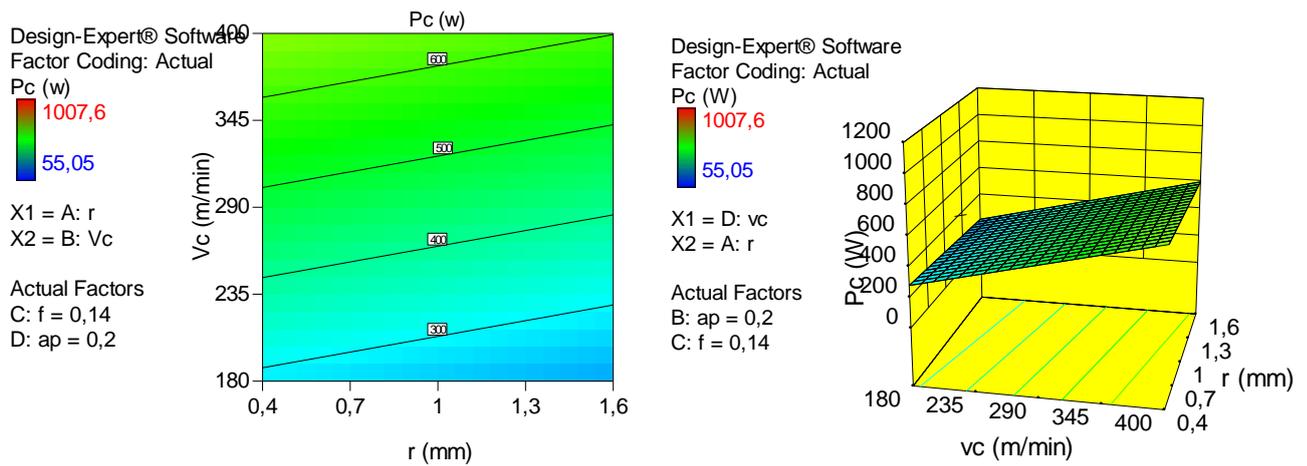


Figure III-23 Diagrammes de surfaces et contour du (Pc) en fonction de (Vc, r)

III.5.4 Résultats de la Débit du copeau enlevé (MRR)

III.5.4.1 Analyse de la variance pour (MRR)

Le tableau (III.6) expose les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) la Débit du copeau enlevé (MRR). Le but ici est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que leurs interactions sur la (MRR). Il est clair d'après l'analyse de ce tableau que (ap) et (f) ont la plus grande influence sur (MRR) avec les contributions respectives de (49,54 et 20,15) %, suivies par (Vc) avec 17,53% de contribution suivie par rayon de plaquette (r) avec 3,32% de contribution. Les interactions (r×f), (r×ap), (vc×f), (vc×ap) et (f×ap) sont significatives mais avec des contributions inférieures à 3,31%

Tableau III-5 Analyse de la variance (ANOVA) pour de le copeau enlevé (MRR)

SOURCE	DL	SOMCA R SEQ	CONTRIBU TION	SOMCAR AJUST	CM AJUS T	VALE UR F	VALEU R DE P	REMAR QUE
MODELE	13	535,666	100,00%	535,666	41,205	9411,6	0,0001	signifiant
r	1	17,785	3,32%	0,000	0,000	164,89	0,0060	signifiant
vc	1	93,895	17,53%	20,976	20,976	152,85	0,0065	signifiant
f	1	107,927	20,15%	24,190	24,190	170,57	0,0058	signifiant
ap	1	265,364	49,54%	142,337	142,33	177,97	0,0056	signifiant
r×r	1	21,716	4,05%	0,563	0,563	×	160,39	insignifiant
vc×vc	1	5,418	1,01%	0,564	0,564	×	161,04	insignifiant

f×f	1	0,000	0,00%	0,000	0,000	×	3,82	insignifiant
r×vc	1	0,009	0,00%	0,000	0,000	1,36	0,3644	insignifiant
r×f	1	1,116	0,21%	0,336	0,336	107,53	0,0092	signifiant
r×ap	1	0,176	0,03%	0,180	0,180	40,65	0,0237	signifiant
vc×f	1	3,901	0,73%	3,010	3,010	584,73	0,0017	signifiant
vc×ap	1	17,714	3,31%	17,714	17,714	3832,3	0,0003	signifiant
f×ap	1	0,644	0,12%	0,644	0,644	180,44	0,0055	signifiant
erreur	2	0,000	0,00%	0,000	0,000			
total	15	535,666	100,00%					

III.5.4.2 Graphique des effets moyens et diagramme d'interaction

Cette figure montre que la profondeur de passe (ap), l'avance (f), vitesse de coupe (vc) et rayon de plaquette (r) à des effets significatifs sur la composante MRR. En effet, on remarque que les pentes des paramètres ap et f est plus grandes que les pentes de la vitesse de coupe et celle du rayon de plaquette.

L'analyse des résultats de Figure (III- 24) montrent que l'augmentation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe avec le diminue de le rayon de plaquette entraine une augmentation Le débit du copeau enlevé (MRR)

L'étape suivante consiste donc à considérer l'interaction significative. Bien que nous avons déjà vérifié l'interaction significative via les résultats du (Tableau III 5), le diagramme des interactions nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. Les diagrammes des figures Figure III (25) montrent l'impact exercé par la variation des valeurs d'un facteur sur un autre facteur.

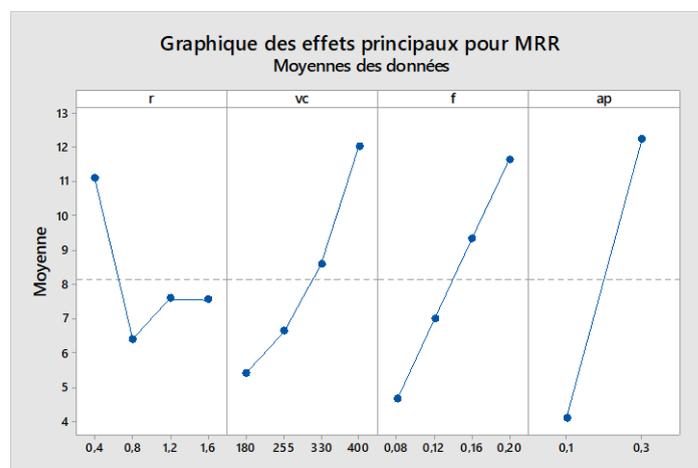


Figure III-24 Graphique des effets principaux pour la Débit du copeau enlevé (MRR).

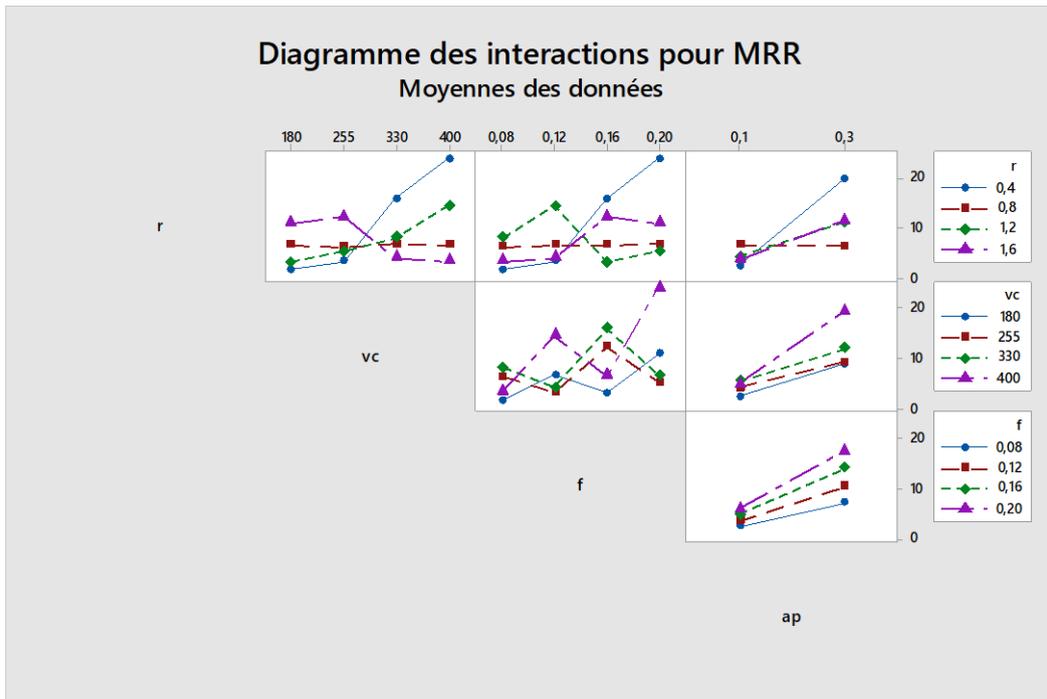


Figure III-25 Diagramme d'interaction pour la Débit du copeau enlevé (MRR).

III.5.4.3 Diagramme de surface 3D et graphique de contour

La présentation en 3D (Figure III-(26 à 31)) montres que les pentes de la profondeur de passe (ap), l'avance (f) et la vitesse de coupe sont supérieur par rapport le rayon de plaquette (r) ce qui implique que cette facteurs a des influences très importante sur le copeau enlevé (MRR).

D'autre part les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas MRR) et quatre facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

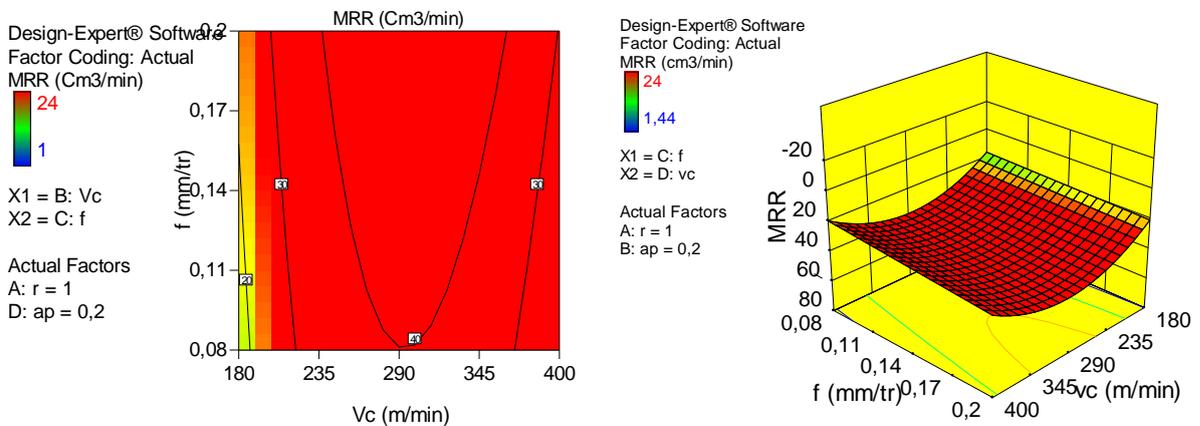


Figure III-26 Evolution de la rugosité MRR en fonction des paramètres du régime de coupe VC-f

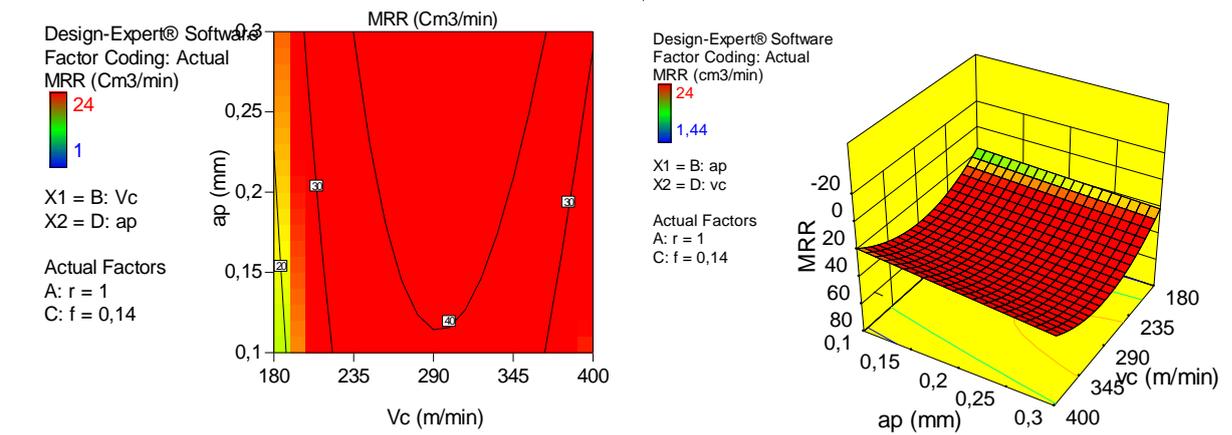


Figure III-27 Evolution de la rugosité MRR en fonction des paramètres du régime de coupe ap-vc

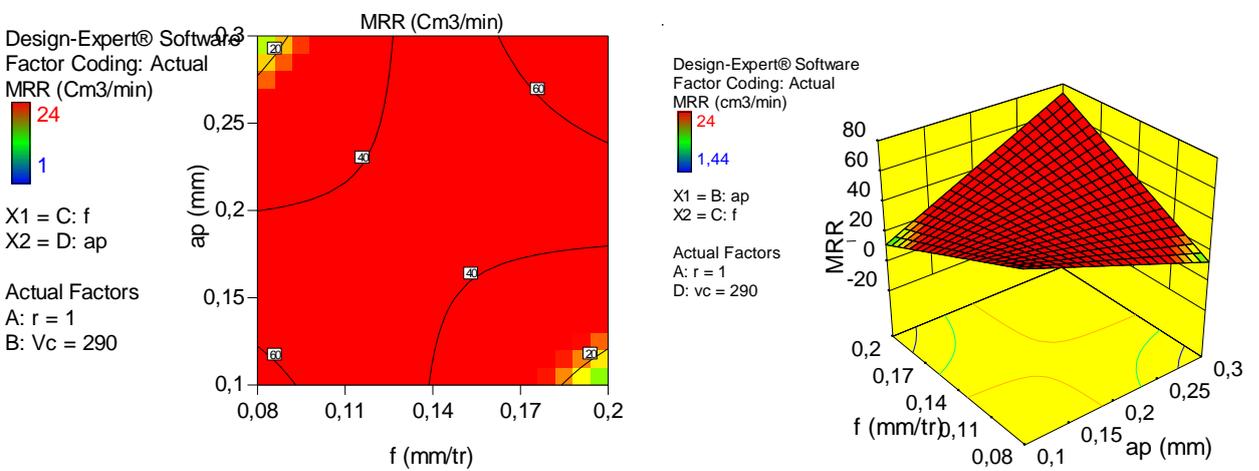


Figure III-28 Evolution de la rugosité MRR en fonction des paramètres du régime de coupe ap-f

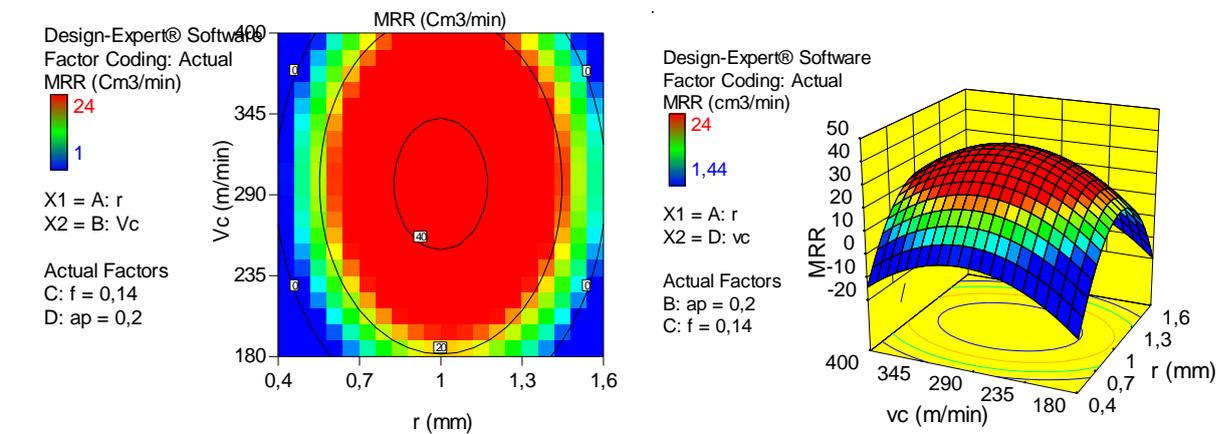


Figure III-29 Evolution de la rugosité MRR en fonction des paramètres du régime de coupe VC-r

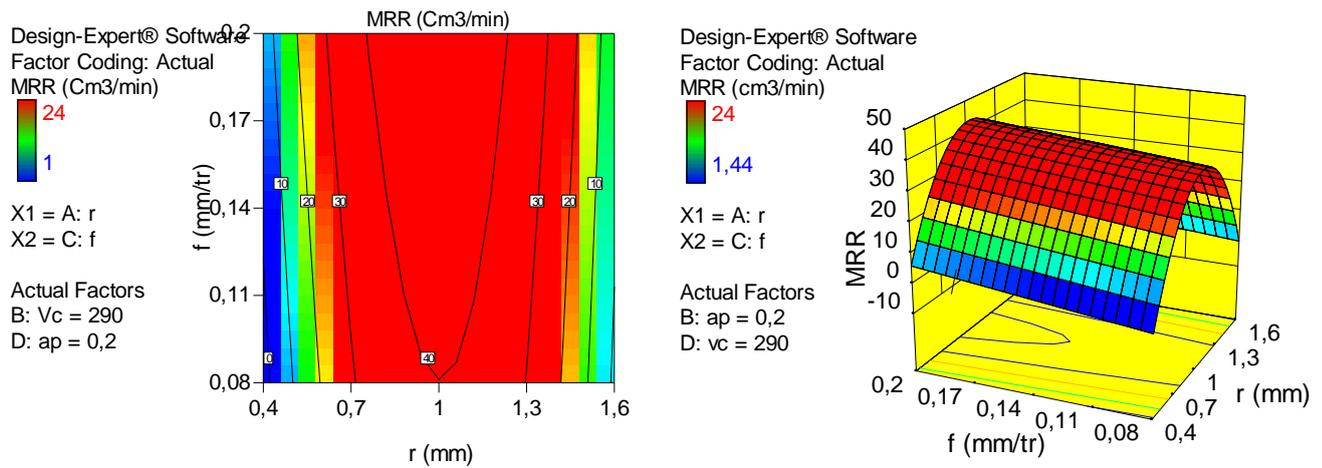


Figure III-30 Evolution de la rugosité MRR en fonction des paramètres du régime de coupe r-f

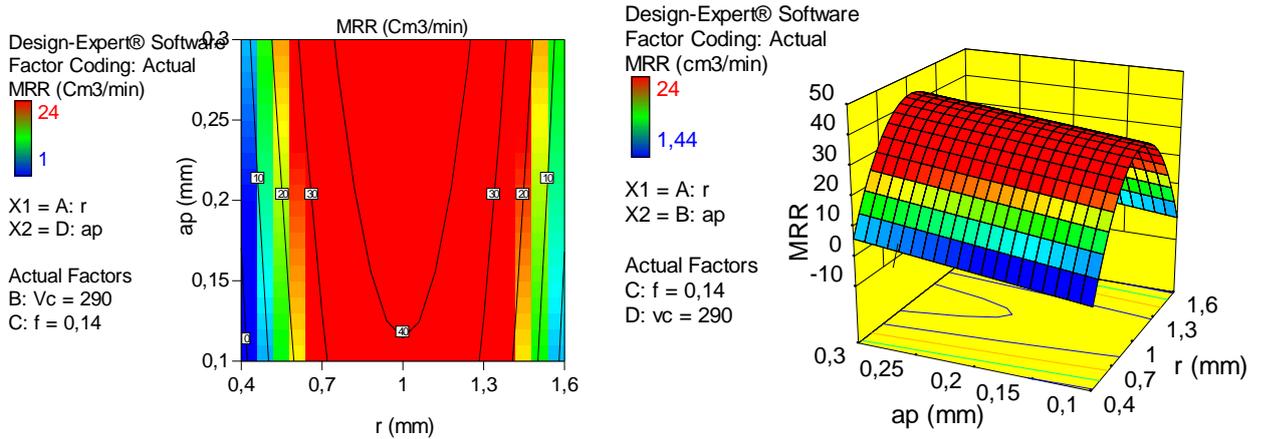


Figure III-31 Evolution de la rugosité MRR en fonction des paramètres du régime de coupe r-ap

III.6 Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- D'après les résultats de l'analyse ANOVA nous avons trouvé que :
 - ✓ L'avance (f) est le paramètre principal affectant la rugosité de surface (Ra) et le rayon de plaquette (r).

- ✓ L'effort de coupe (F_z) et la puissance de coupe (P_c) sont majoritairement influencés par la profondeur de passe (ap).
 - ✓ Le Débit du copeau enlevée (MRR) est influencée en grande partie par (vc), (f) et (ap).
- L'étude statistique a permis de modéliser les différents paramètres technologiques étudiés (R_a , F_z , P_c et MRR) et de donner de bons résultats avec des coefficients de déterminations (R^2) de 92,22%, 97,32%, 91,66% et 100%, respectivement.

Chapitre 04

Optimisation par la méthode Taguchi et la Fonction Désirabilité

IV.1 Introduction

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques, tels que la méthode, Taguchi, Elle permet le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus. Ce qui a généralement un impact économique direct sur la production tel que : le temps technologique d'usinage ou le coût global d'opération. L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation de différentes méthodes d'optimisation.

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

- ✓ Optimisation mono-objectif en utilisant la méthode de Taguchi ;
- ✓ Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode de la fonction désirabilité.

IV.2 Optimisation par la méthode de Taguchi

Dans le but de fabriquer des pièces de haute qualité avec une productivité maximale, un coût minimum et dans un bref délai ; les paramètres de coupe devraient être correctement choisis. Le but de notre tâche est : d'optimiser les paramètres technologiques, la rugosité de surface (R_a) et le débit de copeau enlevé (MRR), lors du tournage de face à sec de l'acier X200Cr12 (AISI D3) avec des plaquettes en carbure revêtu GC4215, en fonction de la variation des paramètres de coupe (vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), le rayon de plaquette (r) et la profondeur de passe (a_p)). La matrice de Taguchi L_{16} ($4^3 2^1$) a été utilisée, les paramètres du régime de coupe (V_c , f , r , et a_p) sont affectés successivement aux colonnes 1, 2, 3, et 4.

L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit (S/B). Le premier terme de ce rapport (signal), représente la variable principale à l'entrée du procédé et le second terme (bruit), représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie . Le rapport (S/B) mesure les caractéristiques de qualité provenant des valeurs désirées. Selon le cas étudié, le rapport (S/B) qu'il soit le plus faible ou le plus élevé est le paramètre décisif du niveau optimal des paramètres du processus de coupe. Dans cette étude, La plus faible rugosité de surface, et la plus élevée débit de copeau enlevé d'autre part sont souhaitables. La caractéristique (S/B) la plus petite est la meilleur (smaller-the-better) a été utilisé pour (R_a), (F_z) et (P_c). La caractéristique (S/B) la plus grande est la meilleur (larger-the-better) a été utilisé pour (MRR), tableau (V.1). Les caractéristiques de qualité (S/B), sont calculées avec les équations suivantes :

- a) L'optimum est une valeur minimale (plus petit c'est meilleur) : la valeur cible (m) est égale à zéro, on vise la minimisation de la caractéristique de performance. La caractéristique de performance Y a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec (y). Taguchi recommande l'utilisation de la fonction représentée par l'équation (IV 1) :

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

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

n = nombre de mesures effectuées

- b) L'optimum est une valeur maximale (plus grand c'est meilleur) : la valeur cible (m) est égale à l'infini, on vise la maximisation de la caractéristique de performance. Maximiser Y revient à minimiser $1/Y$ et, Taguchi recommande l'utilisation de l'équation (IV-2) :

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

Tableau IV-1 Signal/Bruit des paramètres de sorties étudiées.

N°	S/B-Ra	S/B-MRR	S/B-Fz	S/B-Pc
1	4,2366	3,1672	-3,1672	-25,2727
2	-1,0462	9,7144	-9,7144	-30,9604
3	-6,2224	23,9951	-23,9951	-43,0568
4	-9,9441	27,6042	-27,6042	-43,5876
5	1,2196	16,2315	-16,2315	-42,0122
6	8,6830	15,7350	-15,7350	-38,5607
7	-5,2727	16,3909	-16,3909	-37,6846
8	-1,5109	16,1236	-16,1236	-37,4931
9	2,4181	9,1878	-9,1878	-32,6996
10	-0,9766	14,1514	-14,1514	-38,0509
11	8,6595	17,9745	-17,9745	-39,3584
12	4,2366	23,1672	-23,1672	-42,3395
13	0,8959	20,6685	-20,6685	-45,2005
14	6,8017	21,7556	-21,7556	-42,9306
15	11,2767	11,9539	-11,9539	-29,9635
16	8,1121	10,1030	-10,1030	-33,2344

IV.2.1 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios (S/B) des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des quatre paramètres d'usinage (V_c , f , r et a_p). La moyenne des ratios (S/B) pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios (S/B) pour le même niveau du facteur divisé par le nombre des ratios pour le niveau du facteur. Les valeurs relatives du rapport (S/B) les plus grandes permettront d'identifier le ou les designs optimaux. On peut estimer l'effet de chaque facteur sur le rapport (S/B) en effectuant une analyse de la variance. On peut donc ainsi identifier les facteurs de design les plus importants. De plus on peut déterminer la modalité optimale de chaque facteur.

IV.2.1.1 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (R_a)

Du tableau (IV-2) et de la figure (IV-1), on remarque que les paramètres d'usinage (V_c , f , r , et a_p) présentent des effets différents sur la rugosité de surface (R_a). La plus importante influence correspond à l'avance par tour (f) avec un effet de 11,2472, Suivie par le rayon de plaquette (r) avec effet 10,0156 suivie la vitesse de coupe (V_c) avec un effet de 3,1421 et en dernier lieu vient la profondeur de passe (a_p) avec 0,3634 d'effet.

Préférer plus petit

Tableau IV-2 Moyenne des ratios S/B(R_a) pour chaque Tableau IV 3niveau des facteurs.

Niveau	r	vc	f	ap
1	-3,2440	2,1925	7,4228	2,1546
2	0,7797	3,3655	3,9217	1,7912
3	3,5844	2,1103	0,3716	
4	6,7716	0,2234	-3,8244	
Delta	10,0156	3,1421	11,2472	0,3634
Rang	2	3	1	4

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (R_a) correspond aux niveaux r_4 V_{c2} , f_1 et a_{p1} . Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (R_a) sont donc la vitesse de coupe $V_c = 225$ m/min et le plus grand rayon de plaquette 1,6 mm, la plus faible avance par tour $f = 0,08$ mm/tour et la petite profondeur de passe, $a_p = 0,1$ mm, Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence avec des cercles (figure IV.1).

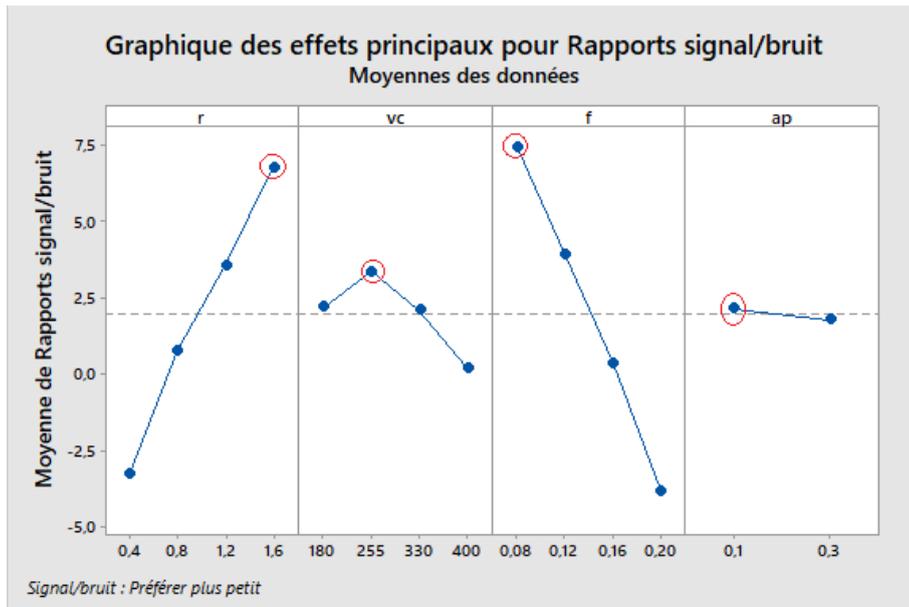


Figure IV-1 Graphique des effets principaux sur (Ra) par rapports Signal. Bruit

IV.2.1.2 Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe (Fz)

A partir du tableau (IV 3) et de la figure (IV 2), en remarque que les paramètres d'entrée (Vc, f, r et ap) montrent des effets différents sur l'effort de coupe (Fz). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe (ap) avec un effet de 8,96 suivie par l'avance par tour (f) avec un effet de 7,02 suivie par le rayon de plaquette de 3,22 et en dernier rang vient la vitesse de coupe (Vc) avec un effet de 2,87

Tableau IV-3 Moyenne des ratios S/B(Fz) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	r	vc	f	ap
1	-35,72	-36,30	-34,11	-33,17
2	-38,94	-37,63	-36,32	-42,13
3	-38,11	-37,52	-39,05	
4	-37,83	-39,16	-41,13	
Delta	3,22	2,87	7,02	8,96
Rang	3	4	2	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fz) correspond aux niveaux Vc1, f1, r1 et ap1. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de l'effort de coupe (Fz) sont donc la plus faible vitesse de coupe Vc = 180 m/min, la plus faible avance par tour f = 0,08 mm/tour, la petite

profondeur de passe, $ap = 0,1$ mm et la petite rayon $r = 0,4$ Les paramètres d'usinage optimaux ont été désignés par des cercles (figure IV 2).

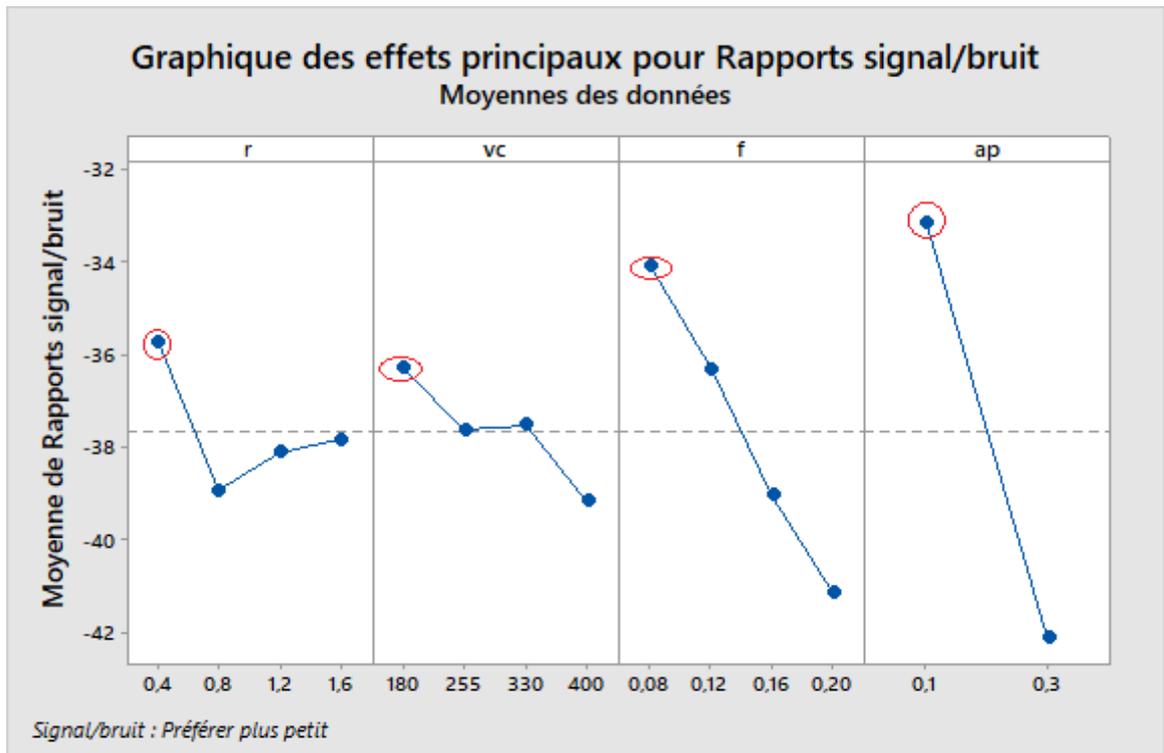


Figure IV-2 Graphique des effets principaux sur (Fz) par rapports Signal. Bruit

IV.2.1.3 Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (Pc)

Du tableau (IV 4) et de la figure (IV 3), en remarque que les paramètres d'usinage (Vc, f, r et ap) exposent des effets différents sur la puissance de coupe (Pc). L'influence La plus importante correspond à la vitesse de coupe (Vc) avec 9,80 d'effet suivie par la profondeur de passe (ap) avec un effet de 8,96 suivie par l'avance par tour (f) avec un effet de 7,02 et en fin vient le rayon de plaquette avec un effet de 3,22.

Tableau IV-4 Moyenne des ratios S/B(Pc) pour chaque niveau des facteurs

Niveau	r	vc	f	ap
1	-49,07	-45,84	-47,46	-46,52
2	-52,29	-50,19	-49,67	-55,48
3	-51,46	-52,32	-52,39	
4	-51,18	-55,64	-54,48	
Delta	3,22	9,80	7,02	8,96
Rang	4	1	3	2

D'après l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (P_c) correspond aux niveaux V_{c1} , f_1 et ap_1 . Les niveaux des paramètres prévus sous les conditions optimales de la puissance de coupe (P_c) sont donc la plus faible vitesse de coupe $V_c = 180$ m/min, la plus faible avance par tour $f = 0,08$ mm/tour, la plus petite profondeur de passe, $ap = 0,1$ mm et le plus petit rayon de plaquette de $r = 0,4$. Les paramètres du régime de coupe optimaux ont été signalés avec des cercles (figure V.4)

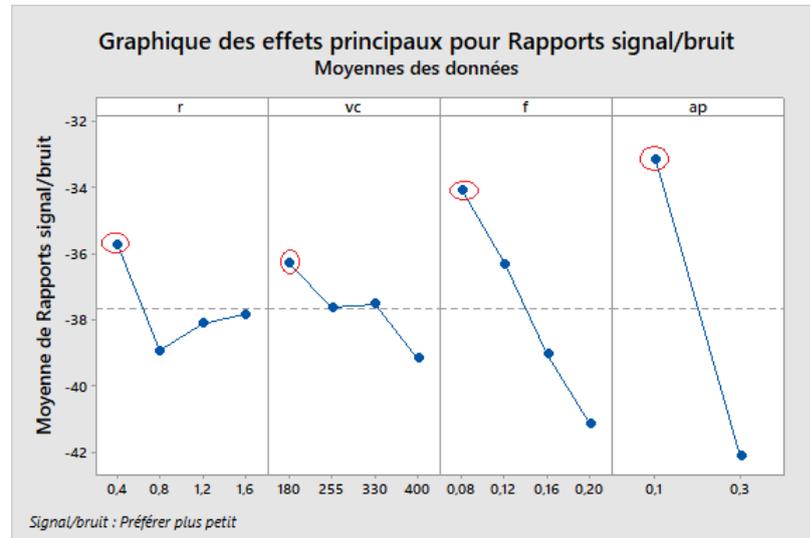


Figure IV-3 Graphique des effets principaux sur (P_c) par rapports Signal. Bruit.

IV.2.1.4 Analyse des effets principaux sur le débit du copeau enlevé (MRR)

Du tableau (IV 5) et de la figure (IV 4), on remarque que les paramètres d'usinage (V_c , r , f et ap) présentent des effets différents sur le débit du copeau enlevé (MRR). L'influence majeure correspond à la profondeur de passe (ap) avec un effet de 7,96 et l'avance par tour (f) avec un effet de 9,54 suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec 6,94 d'effet, suivie par en dernier lieu vient par le rayon de plaquette sans effet.

Tableau IV-5 Moyenne des ratios S/B(MRR) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	r	vc	f	ap
1	16,12	12,31	11,74	11,35
2	16,12	15,34	15,27	20,89
3	16,12	17,58	17,77	
4	16,12	19,25	19,70	
Delta	0,00	6,94	7,96	9,54
Rang	4	3	2	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse du débit du coupeau enlevé (MRR) correspond aux niveaux r_3 , Vc_3 , f_3 et ap_3 . Les niveaux des paramètres souhaités sous les conditions optimales du (MRR) sont donc la plus grande vitesse de coupe $Vc = 400$ m/min, la plus grande avance par tour $f = 0,2$ mm/tour, choisir aucun rayon et la grande profondeur de passe, $ap = 0,3$ mm, Les paramètres d'usinage optimaux ont été indiqués avec des cercles (figure V.5).

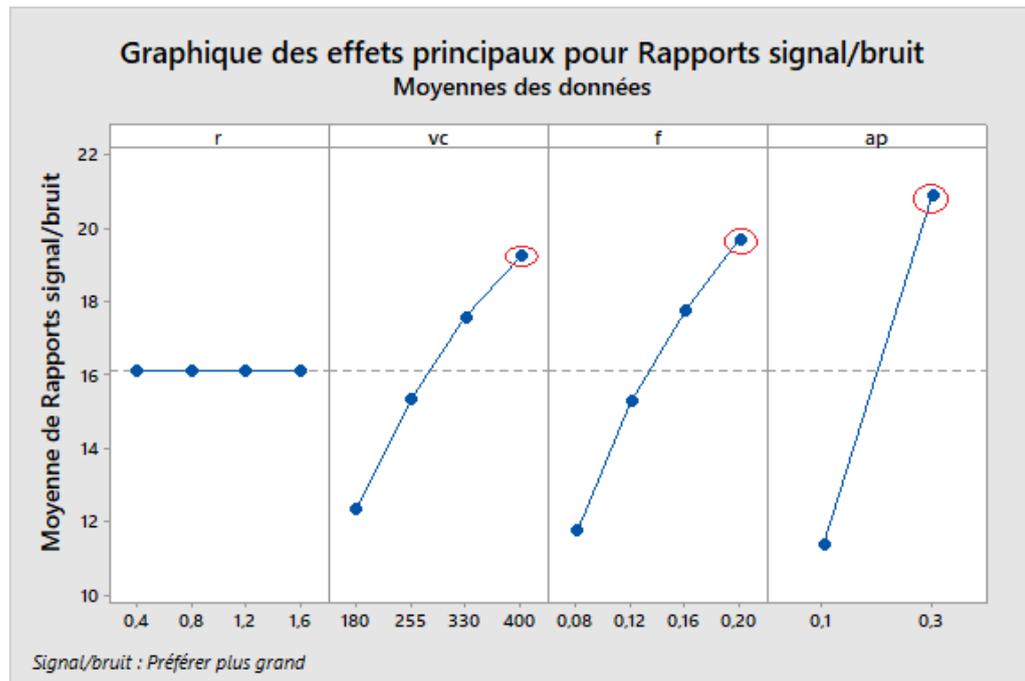


Figure IV-4 Graphique des effets principaux sur (MRR) par rapports Signal. Bruit.

IV.3 Optimisation par la méthode de la fonction désirabilité

IV.3.1 Introduction

L'approche de la fonction désirabilité est largement utilisée par les chercheurs pour l'optimisation multi-objective des réponses. L'utilisation considérable de cette approche est due en fait à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques.

La désirabilité permet d'évaluer en fonction des réponses calculées par le modèle statistique, l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés.

En recherchant un minimum ou un maximum, les désirabilités peuvent être calculées par les équations suivantes respectivement (IV-3, IV-4 et IV-4).

$$Des(y) = \begin{cases} 0, & y < Low \\ \left(\frac{y - Low}{Tar - Low}\right)^w, & Low \leq y \leq Tar \\ 1, & y > Tar \end{cases} \quad (IV-3)$$

$$Des(y) = \begin{cases} 1, & y < Tar \\ \left(\frac{Up - y}{Up - Tar}\right)^w, & Tar \leq y \leq Up \\ 0, & y > Up \end{cases} \quad (IV-4)$$

$$Des_{comb} = (Des_1 \times Des_2 \times \dots \times Des_i \times \dots \times Des_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n Des_i\right)^{\frac{1}{n}} \quad (IV-5)$$

La figure (IV-5) représente la désirabilité en 2D. Elle a été mise au point à partir des équations (IV-3 a IV-5). La figure (IV-6. a) montre la minimisation de la réponse, c'est-à-dire qu'au-dessous de la cible, la réponse est un, mais au-dessus de la limite supérieure, elle est nulle. Par contre la figure (IV-6. b) expose la maximisation de la réponse, (c.a.d) qu'au-dessous de la cible, la réponse est un, tandis qu'au-dessus de la limite supérieure, elle est nulle.

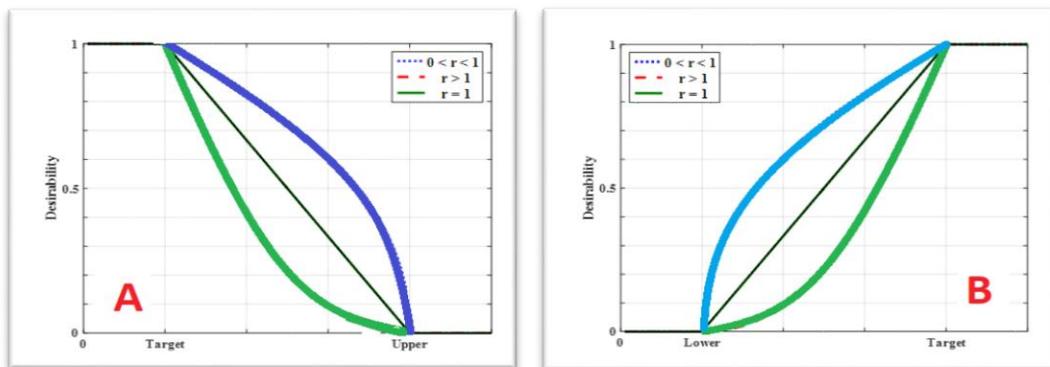


Figure IV-5 Diagramme de désirabilité 2D, (a) Minimum, (b) Maximum.

IV.3.2 Les cas d'optimisation étudiés

Dans notre étude, on s'est intéressé à cinq cas d'optimisation qui sont : Rugosité minimale, productivité maximale, et deux cas pour consommation d'énergie minimal (P_c , F_z) et compromis entre rugosité, consommation d'énergie et productivité. Les tableaux (IV 6IV-7, IV-8, IV-9, IV-10,) présentent les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, les poids et l'importance affectés à chaque paramètre pour les cinq cas d'optimisation. Les tableaux (IV-10, IV-11, IV-12, IV-13, IV-13,), illustrent les solutions correspondantes aux cinq cas cités.

Pour le premier cas d'optimisation, on a donné l'importance maximale à la rugosité de surface (R_a) (5+), tout en gardant (F_z , P_c et MRR) avec une importance (1+) de même pour les poids on a donné 0.5 à celui qui a plus d'importance et un poids de 0.1 à celui qui a moins d'importance. Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de $V_c=240,327$ m/min, $f=0,080$ mm/tr, $r=1,600$ mm et $a_p=0.23$ mm, La rugosité prend une valeur minimale de $R_a=0.393\mu\text{m}$, la $MRR=4,907$ cm³/min, $F_z=30,647$ N, $P_c=95,482$ W et la désirabilité $Des=0,977$. Ce cas est intéressant pour un tournage de finition où la qualité est exigée (rugosité minimale).

Concernant le deuxième cas d'optimisation, la (MRR) est devenu la mieux considérée avec une importance (5+), tandis que (R_a , F_z , P_c) avec une importance (1+). Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de $V_c=399,996$ m/min, $f=0,189$ mm/tour, $r=0,400$ mm et $a_p=0,297$ mm. La (MRR) prend une valeur maximale de la $MRR=22,269$ cm³/min, la rugosité $R_a=2,895\mu\text{m}$, $F_z=143,773$ N, $P_c=968,367$ W et la désirabilité $Des=0,897$. Ce cas d'optimisation est réservé pour une production maximale souhaité dans le tournage

. Le troisième cas s'intéresse à une optimisation là (F_z) est devenu la mieux considérée avec une importance (5+), tandis que (R_a , MRR , P_c) importance (1+). Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de $V_c=244,374$ m/min, $f=0,081$ mm/tour, $r=1,600$ mm et $a_p=0,194$ mm. La (F_z) prend une valeur minimale de la $F_z=18,350$ N, la rugosité $R_a=0,432\mu\text{m}$, $MRR=4,496$ cm³/min, $P_c=54,519$ W et la désirabilité $Des=0,977$. Ce cas d'optimisation est réservé pour une consommation d'énergie minimale souhaité dans le tournage.

. Le quatrième cas s'intéresse à une optimisation là (P_c) est devenu la mieux considérée avec une importance (5+), tandis que (R_a , MRR , F_z) avec une importance (1+). Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de $V_c=225,255$ m/min, $f=0,089$ mm/tour, $r=1,600$ mm et $a_p=0,210$ mm. La puissance (P_c) prend une valeur minimale de la $P_c=55,045$ W, la rugosité $R_a=0,447\mu\text{m}$, $MRR=4,735$ cm³/min, $F_z=25,667$ N et la désirabilité $Des=0,977$. Ce cas d'optimisation est réservé pour une consommation d'énergie minimale souhaité dans le tournage.

Le cinquième cas s'intéresse à une optimisation combinée entre (R_a , F_z , P_c , MRR) avec une même importance (1+) pour les cinq sorties. Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de $V_c=226,732$ m/min, $r=1,6$ mm, $f=0,089$ mm/tour et $a_p=0,209$ mm, La rugosité, la MRR , l'effort de coupe, la puissance de coupe et la désirabilité prennent successivement les valeurs ($0,446\mu\text{m}$, $4,721$ cm³/min, $25,091$ N, $55,157$ W et 0.816).

Tableau IV-6 But et gamme de paramètres pour le 1er cas d'optimisation.

Name	Goal	Lower	Upper	Lower	Upper	Importance
		Limit	Limit	Weight	Weight	
A:r	is in range	0,4	1,6	1	1	3
B:ap	is in range	0,1	0,3	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,2	1	1	3
D:vc	is in range	180	400	1	1	3
Ra	minimize	0,393	3,245	1	0,5	5
Fz	minimize	18,35	181,98	0,1	0,1	1
MRR	maximize	1	24	0,1	1	1
Pc	minimize	55,05	1007,6	1	0,1	1

Tableau IV-7 But et gamme de paramètres pour le 2ème cas d'optimisation.

Name	Goal	Lower	Upper	Lower	Upper	Importance
		Limit	Limit	Weight	Weight	
A:r	is in range	0,4	1,6	1	1	3
B:ap	is in range	0,1	0,3	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,2	1	1	3
D:vc	is in range	180	400	1	1	3
Ra	minimize	0,393	3,245	1	0,1	1
Fz	minimize	18,35	181,98	0,1	0,1	1
MRR	maximize	1	24	0,5	1	5
Pc	minimize	55,05	1007,6	1	0,1	1

Tableau IV-8 But et gamme de paramètres pour le 3ème cas d'optimisation.

Name	Goal	Lower	Upper	Lower	Upper	Importance
		Limit	Limit	Weight	Weight	
A:r	is in range	0,4	1,6	1	1	3
B:ap	is in range	0,1	0,3	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,2	1	1	3

D:vc	is in range	180	400	1	1	3
Ra	minimize	0,393	3,245	1	0,1	1
Fz	minimize	18,35	181,98	0,1	0,5	5
MRR	maximize	1	24	0,1	1	1
Pc	minimize	55,05	1007,6	1	0,1	1

Tableau IV-9 But et gamme de paramètres pour le 4ème cas d'optimisation

Name	Goal	Lower	Upper	Lower	Upper	Importance
		Limit	Limit	Weight	Weight	
A:r	is in range	0,4	1,6	1	1	3
B:ap	is in range	0,1	0,3	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,2	1	1	3
D:vc	is in range	180	400	1	1	3
Ra	minimize	0,393	3,245	1	0,1	1
Fz	minimize	18,35	181,98	0,1	0,1	1
MRR	maximize	1	24	0,1	1	1
Pc	minimize	55,05	1007,6	1	0,5	5

Tableau IV-10 But et gamme de paramètres pour le 5ème cas d'optimisation

Name	Goal	Lower	Upper	Lower	Upper	Importance
		Limit	Limit	Weight	Weight	
A:r	is in range	0,4	1,6	1	1	3
B:ap	is in range	0,1	0,3	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,2	1	1	3
D:vc	is in range	180	400	1	1	3
Ra	minimize	0,393	3,245	1	0,1	1
Fz	minimize	18,35	181,98	0,1	0,1	1
MRR	maximize	1	24	0,1	1	1
Pc	minimize	55,05	1007,6	1	0,1	1

Tableau IV-11 - Solutions du 1er cas d'optimisation.

Number	<i>r</i>	<i>ap</i>	<i>f</i>	<i>vc</i>	<i>Ra</i>	<i>Fz</i>	<i>MRR</i>	<i>Pc</i>	<i>Desirability</i>
1	<u>1,600</u>	<u>0,230</u>	<u>0,080</u>	<u>240,327</u>	<u>0,393</u>	<u>30,647</u>	<u>4,907</u>	<u>95,482</u>	<u>0,977</u>
2	1,600	0,231	0,080	239,678	0,393	30,786	4,908	94,940	0,977
3	1,600	0,229	0,081	241,728	0,393	31,490	4,954	101,259	0,977
4	1,600	0,229	0,080	241,368	0,393	30,857	4,924	98,081	0,977
5	1,600	0,228	0,080	242,510	0,393	30,530	4,917	98,675	0,977
6	1,600	0,232	0,081	239,739	0,393	31,902	4,957	99,547	0,977
7	1,600	0,231	0,081	241,211	0,393	32,600	4,999	104,879	0,977

Tableau IV-12 Solutions du 2eme cas d'optimisation.

Number	<i>r</i>	<i>ap</i>	<i>f</i>	<i>vc</i>	<i>Ra</i>	<i>Fz</i>	<i>MRR</i>	<i>Pc</i>	<i>Desirability</i>
1	<u>0,400</u>	<u>0,297</u>	<u>0,189</u>	<u>399,996</u>	<u>2,895</u>	<u>143,773</u>	<u>22,269</u>	<u>968,367</u>	<u>0,897</u>
2	0,400	0,297	0,188	399,996	2,887	143,894	22,270	969,173	0,897
3	0,400	0,296	0,189	399,998	2,903	143,701	22,275	967,845	0,897
4	0,400	0,298	0,188	399,995	2,880	144,078	22,285	970,427	0,897
5	0,400	0,299	0,187	399,995	2,876	144,061	22,272	970,338	0,897
6	0,400	0,297	0,189	399,996	2,912	144,158	22,372	970,790	0,897
7	0,401	0,295	0,189	400,000	2,908	143,482	22,249	966,374	0,897

Tableau IV-13 Solutions du 3^{eme} cas d'optimisation.

Number	<i>r</i>	<i>ap</i>	<i>f</i>	<i>vc</i>	<i>Ra</i>	<i>Fz</i>	<i>MRR</i>	<i>Pc</i>	<i>Desirability</i>
1	<u>1,600</u>	<u>04</u>	<u>0,081</u>	<u>244,374</u>	<u>0,432</u>	<u>18,350</u>	<u>4,496</u>	<u>54,519</u>	<u>0,977</u>
2	1,600	0,192	0,082	244,384	0,435	18,349	4,500	54,792	0,977
3	1,600	0,196	0,081	243,814	0,430	18,348	4,493	53,536	0,977
4	1,600	0,197	0,080	244,939	0,427	18,343	4,488	54,914	0,977
5	1,600	0,197	0,081	243,211	0,429	18,347	4,490	52,551	0,977
6	1,600	0,189	0,084	244,031	0,441	18,346	4,505	54,712	0,977
7	1,600	0,188	0,084	244,129	0,442	18,346	4,506	54,946	0,977

Tableau IV-14 Solutions du 4eme cas d'optimisation.

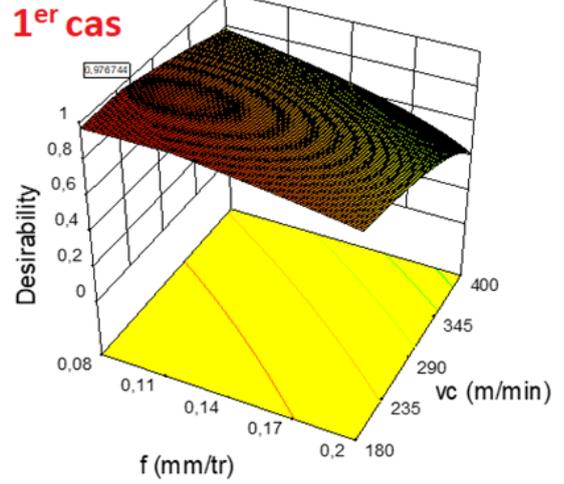
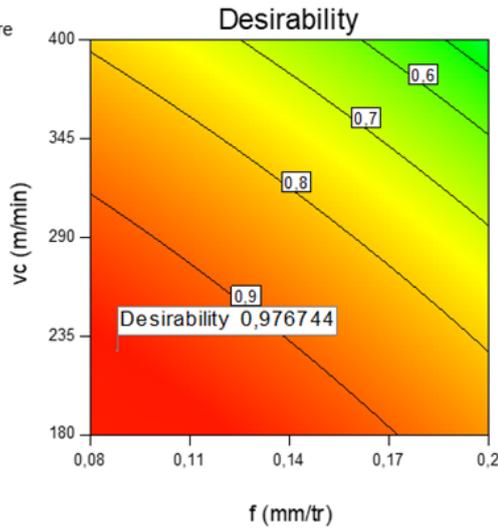
Number	<i>r</i>	<i>ap</i>	<i>f</i>	<i>vc</i>	<i>Ra</i>	<i>Fz</i>	<i>MRR</i>	<i>Pc</i>	<i>Desirability</i>
1	1,600	0,210	0,089	225,255	0,447	25,667	4,735	55,045	0,977
2	1,600	0,207	0,089	227,664	0,447	24,603	4,710	54,963	0,977
3	1,600	0,211	0,088	225,847	0,443	25,513	4,727	55,050	0,977
4	1,600	0,209	0,089	226,706	0,446	25,027	4,718	54,888	0,977
5	1,600	0,209	0,087	228,149	0,442	24,531	4,701	54,920	0,977
6	1,600	0,208	0,090	225,184	0,450	25,566	4,735	54,901	0,977
7	1,600	0,210	0,086	229,766	0,436	24,028	4,680	55,035	0,977

Tableau IV-15 Solutions du 5eme cas d'optimisation.

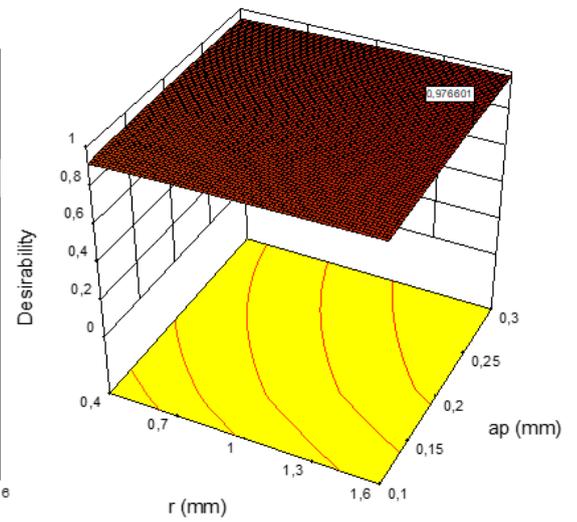
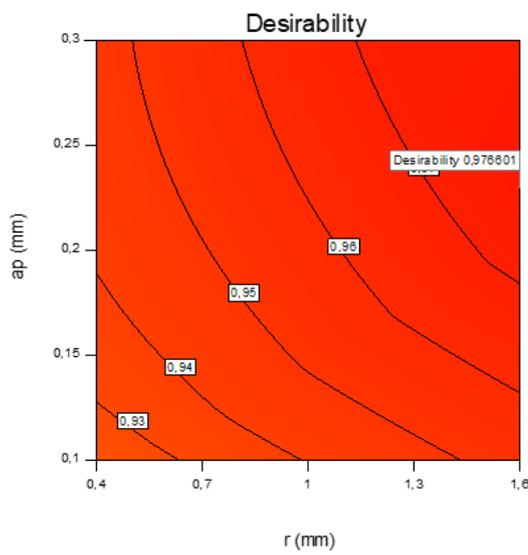
Number	<i>r</i>	<i>ap</i>	<i>f</i>	<i>vc</i>	<i>Ra</i>	<i>Fz</i>	<i>MRR</i>	<i>Pc</i>	<i>Desirability</i>
1	1,600	0,209	0,089	226,732	0,446	25,091	4,721	55,157	0,954
2	1,600	0,210	0,088	226,911	0,444	25,042	4,717	55,066	0,954
3	1,600	0,210	0,088	226,524	0,445	25,178	4,721	55,062	0,954
4	1,600	0,209	0,088	227,290	0,444	24,865	4,712	55,024	0,954
5	1,600	0,210	0,088	226,805	0,443	25,206	4,721	55,430	0,954
6	1,600	0,208	0,089	226,533	0,447	25,162	4,724	55,238	0,954
7	1,600	0,211	0,088	226,179	0,443	25,493	4,727	55,482	0,954

La figure (IV.6) montre le domaine de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (*Vc*, *f*, *r* et *ap*) pour obtenir une rugosité de surface minimale (meilleure qualité de surface). D'une autre manière, la figure (V.7) expose les valeurs optimales exactes des paramètres (*Vc*, *f*, *r* et *ap*), ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés (*Ra*, *Fz*, *Pc* et *MRR*) et la désirabilité pour ce cas.

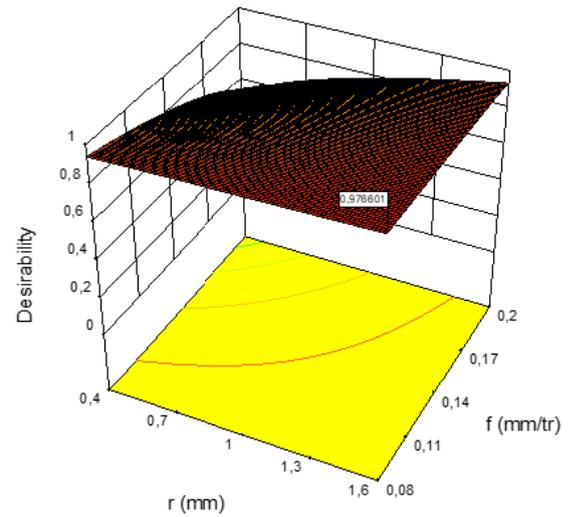
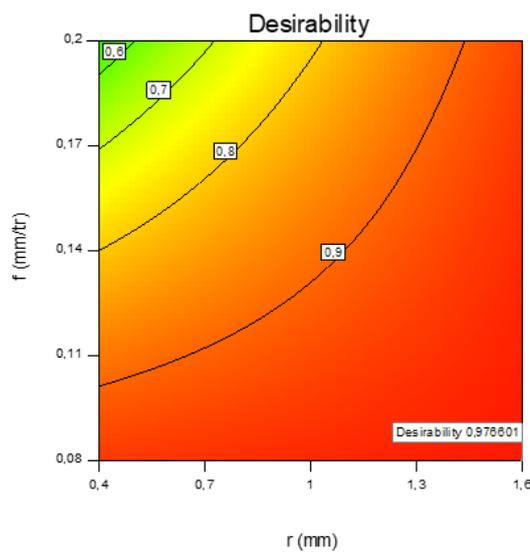
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Desirability
 1
 0
 X1 = C: f
 X2 = D: vc
 Actual Factors
 A: r = 1,59998
 B: ap = 0,210074



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Desirability
 1
 0
 X1 = A: r
 X2 = B: ap
 Actual Factors
 C: f = 0,0800654
 D: vc = 240,327



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Desirability
 1
 0
 X1 = A: r
 X2 = C: f
 Actual Factors
 B: ap = 0,229805
 D: vc = 240,327



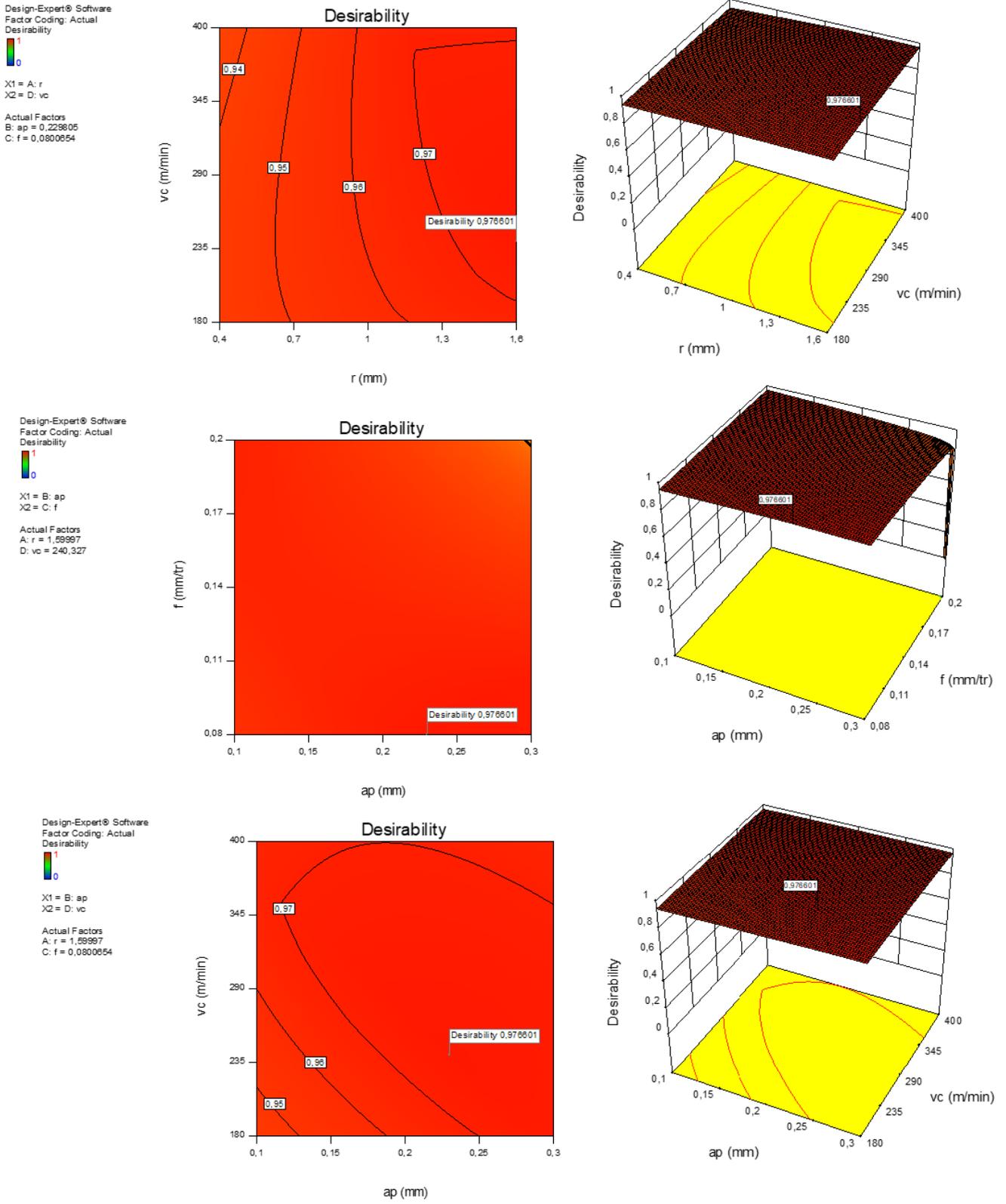


Figure IV-6 Graph de désirabilité 1er cas.

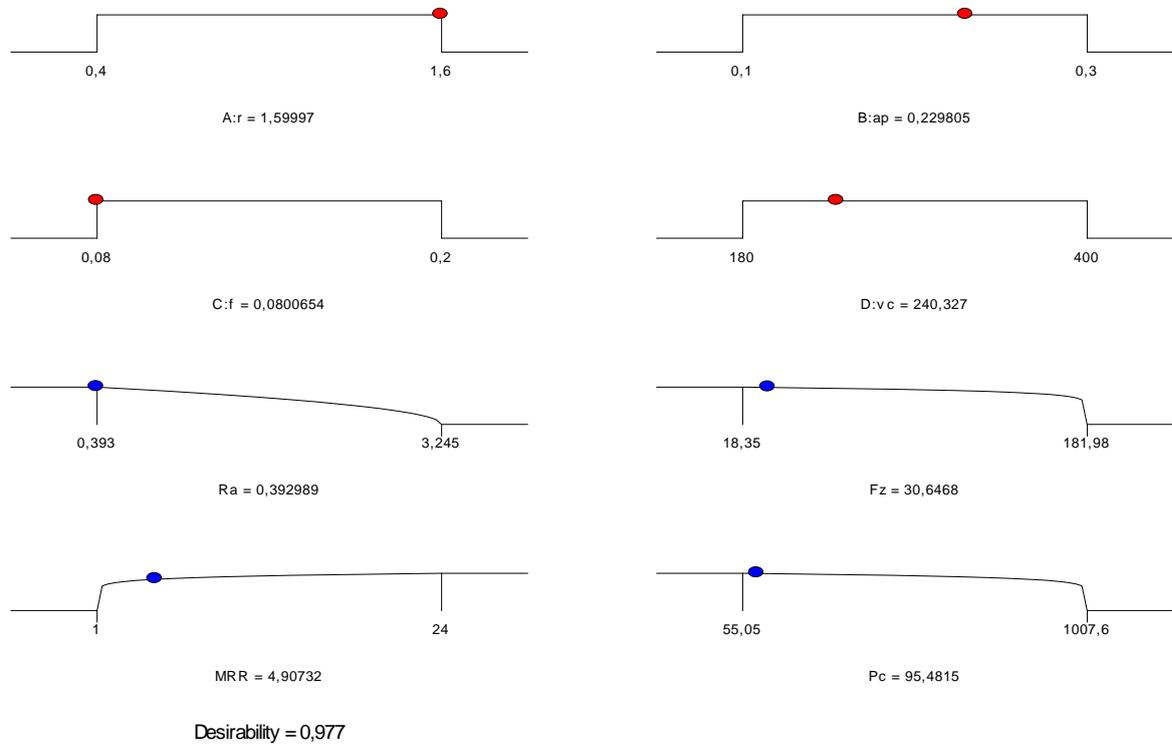
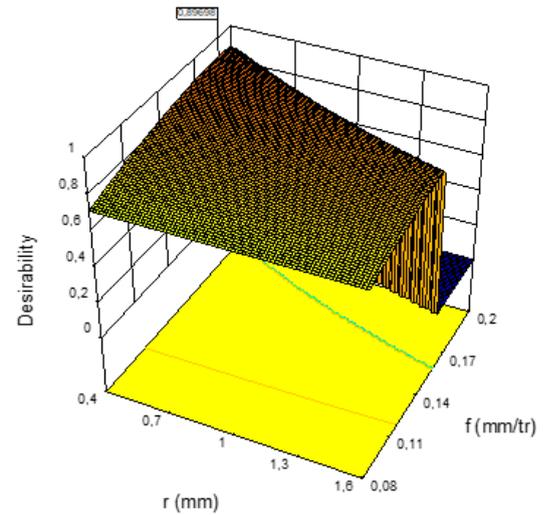
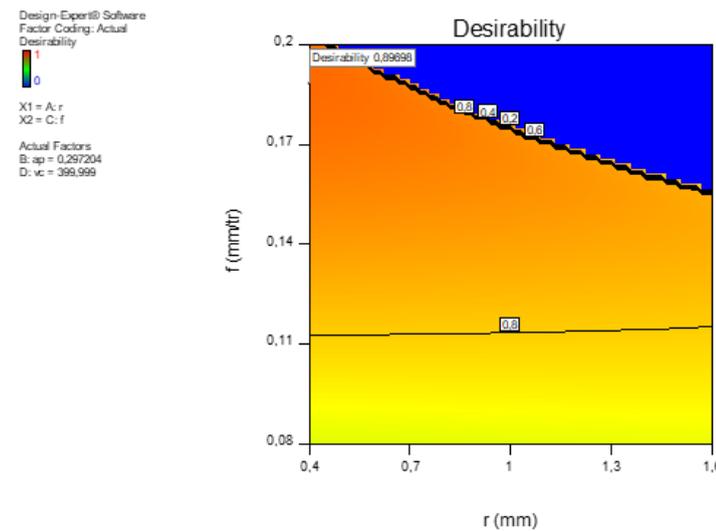
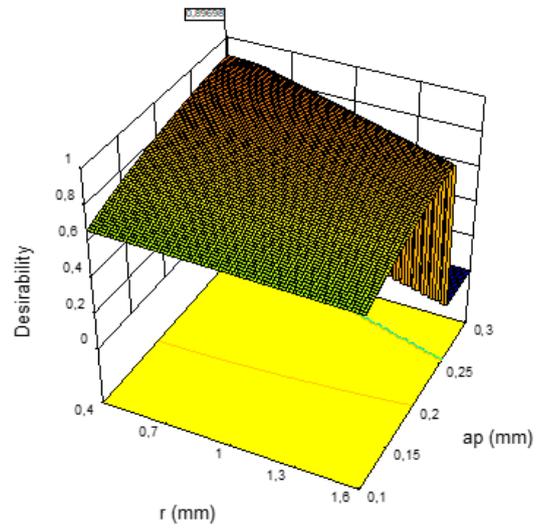
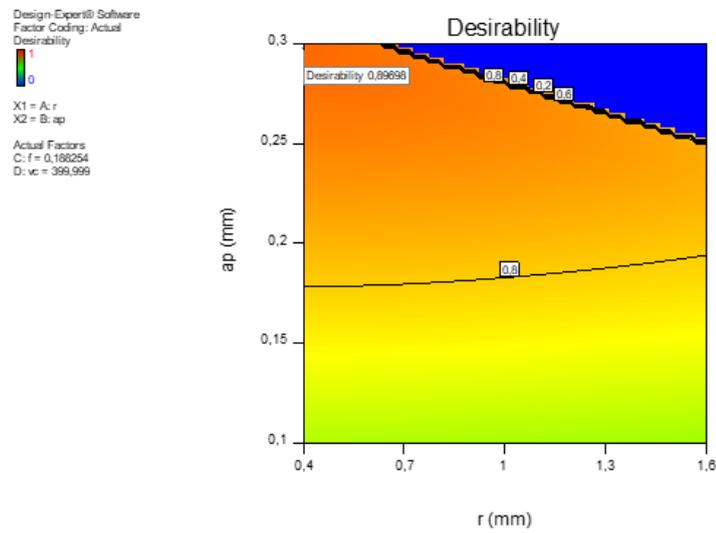
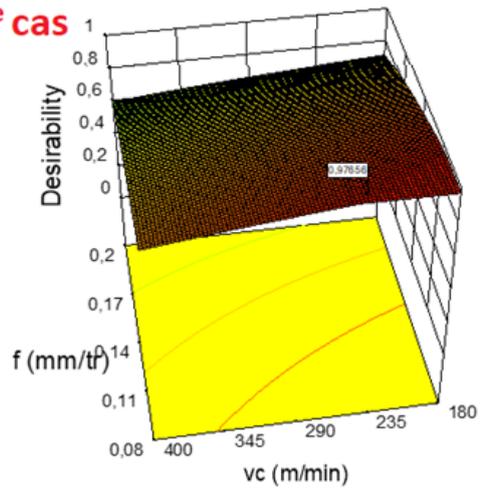
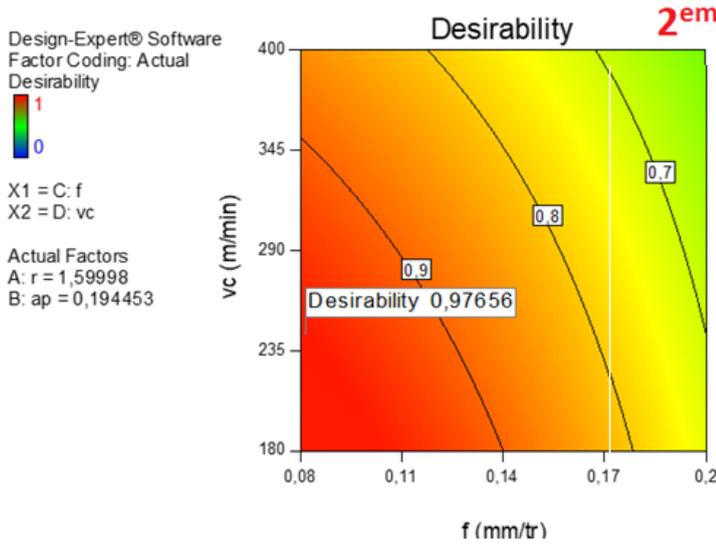


Figure IV-7 Diagramme d'optimisation de réponses multiples du R_a , F_z , P_c et MRR 1er cas.

La figure V.8 présente l'espace de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres du régime de coupe (V_c , f , r et ap) pour obtenir une quantité de copeau enlevé maximale (productivité maximale). D'une autre façon La figure V.9 expose, les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrée (V_c , r , f et ap), de même celles des paramètres technologiques (R_a , F_z , P_c et MRR) et la désirabilité pour ce deuxième cas.



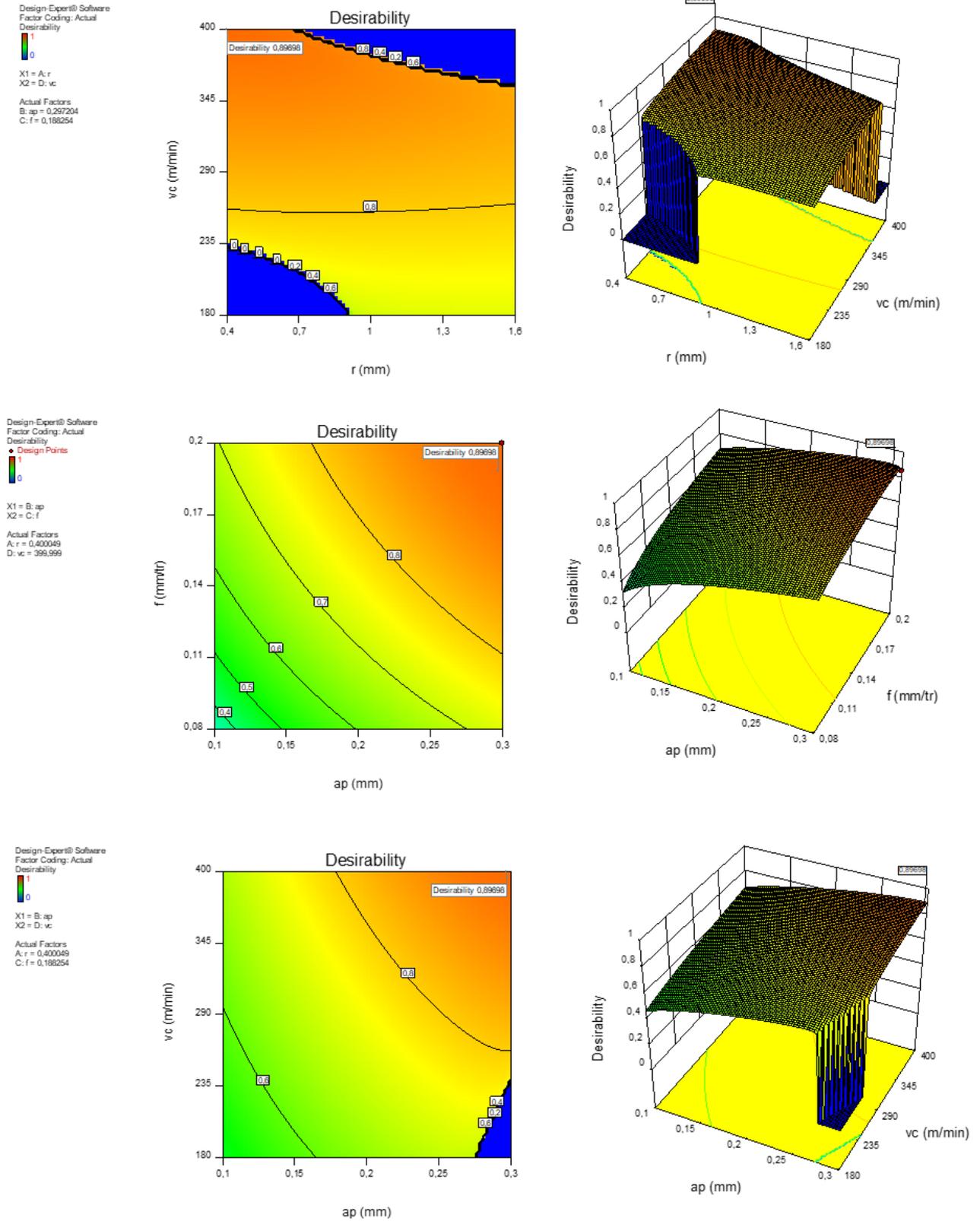


Figure IV-8 Graph de désirabilité pour le 2ème cas

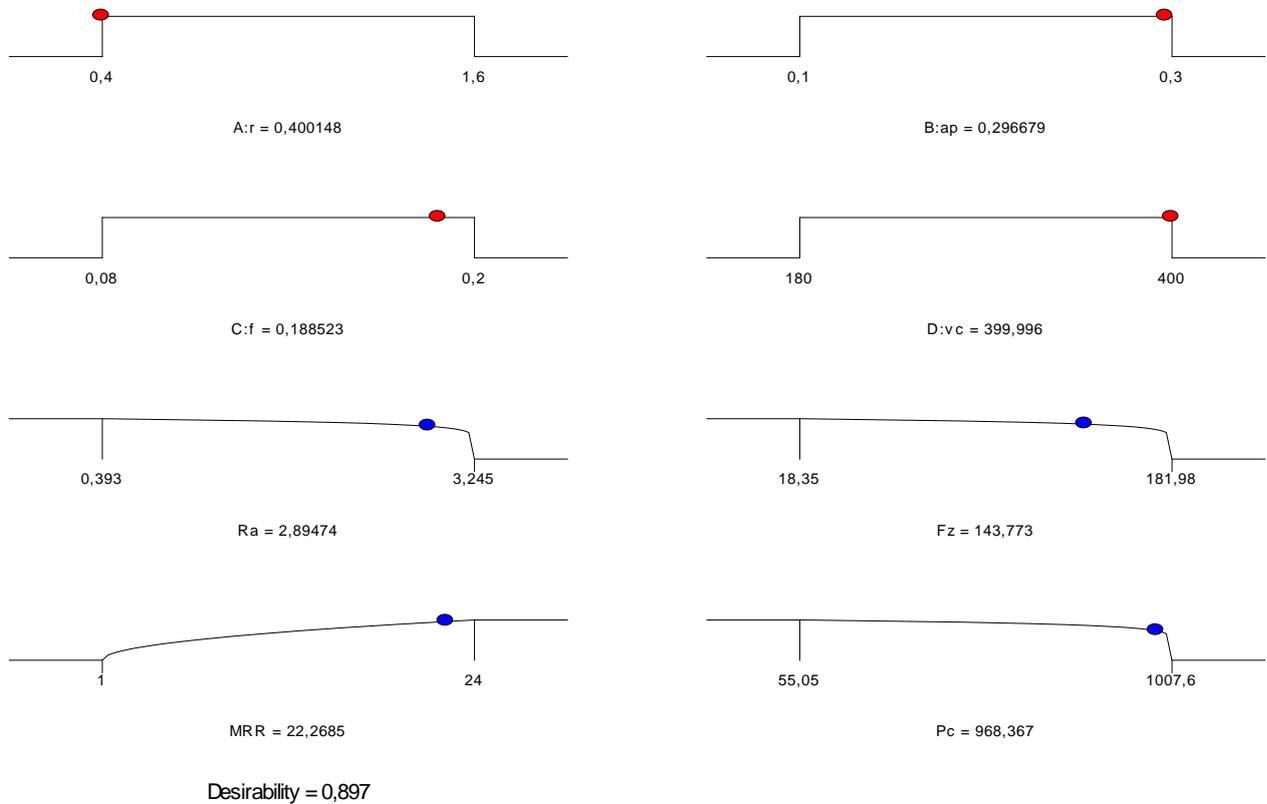
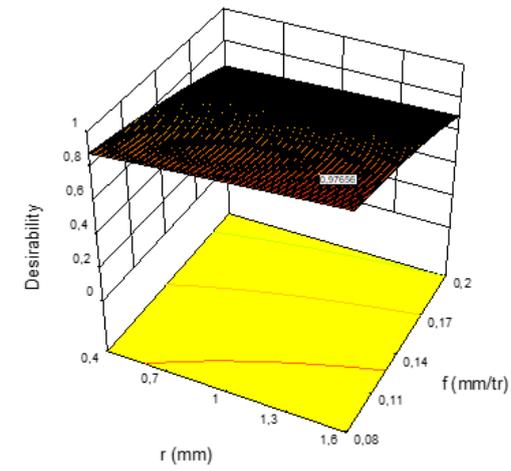
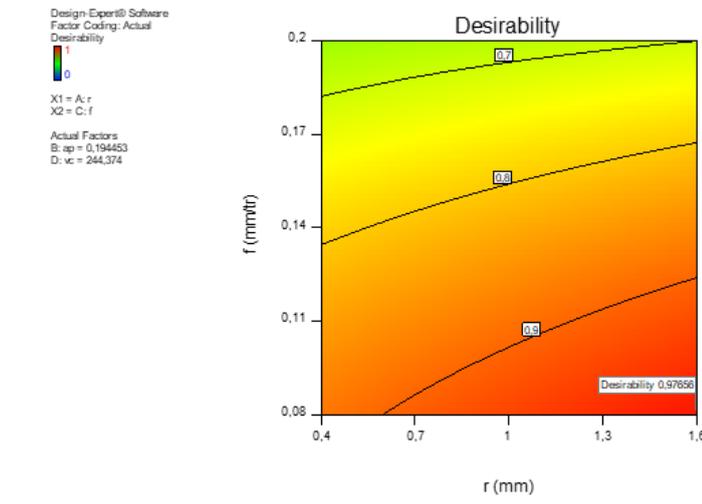
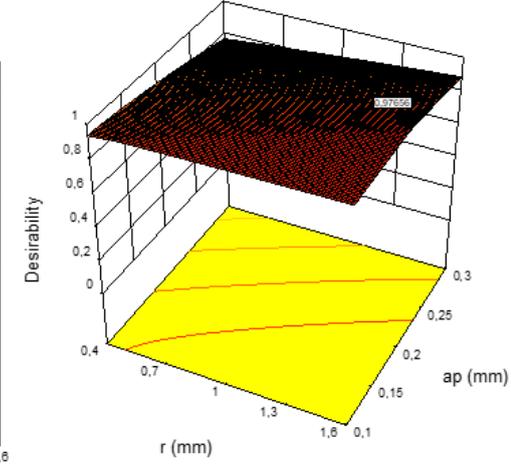
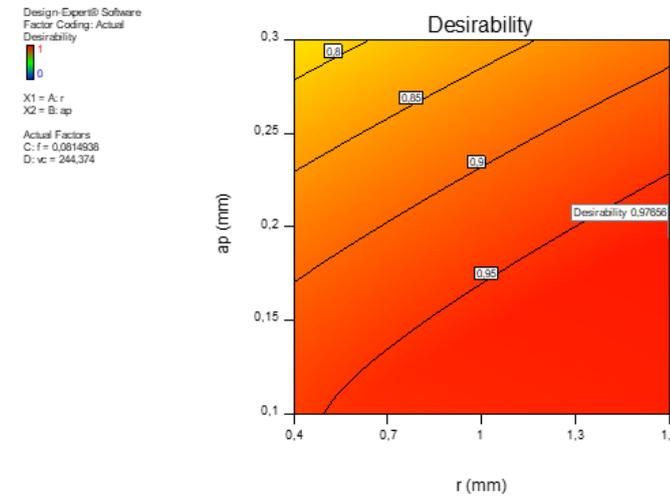
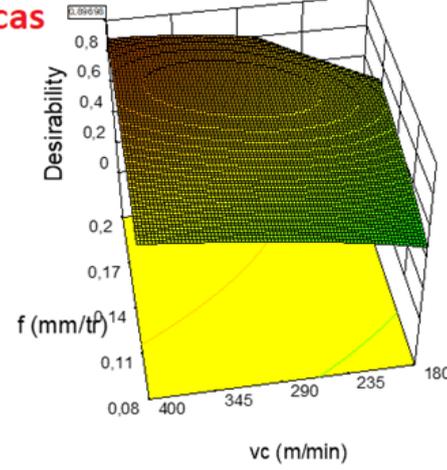
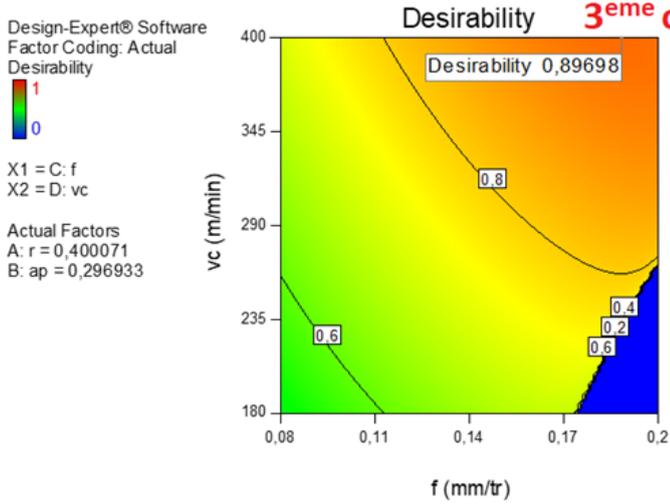


Figure IV-9 Diagramme d'optimisation de réponses multiples du Ra, Fz, Pc et MRR pour le 2^{ème} cas

La figure (V.10) montre le domaine de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f , r et ap) pour obtenir un effort de coupe minimale (moins consommation d'énergie). D'une autre manière, la figure (V.11) expose les valeurs optimales exactes des paramètres (V_c , f , r et ap), ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés (Ra, Fz, Pc et MRR) et la désirabilité pour ce cas.



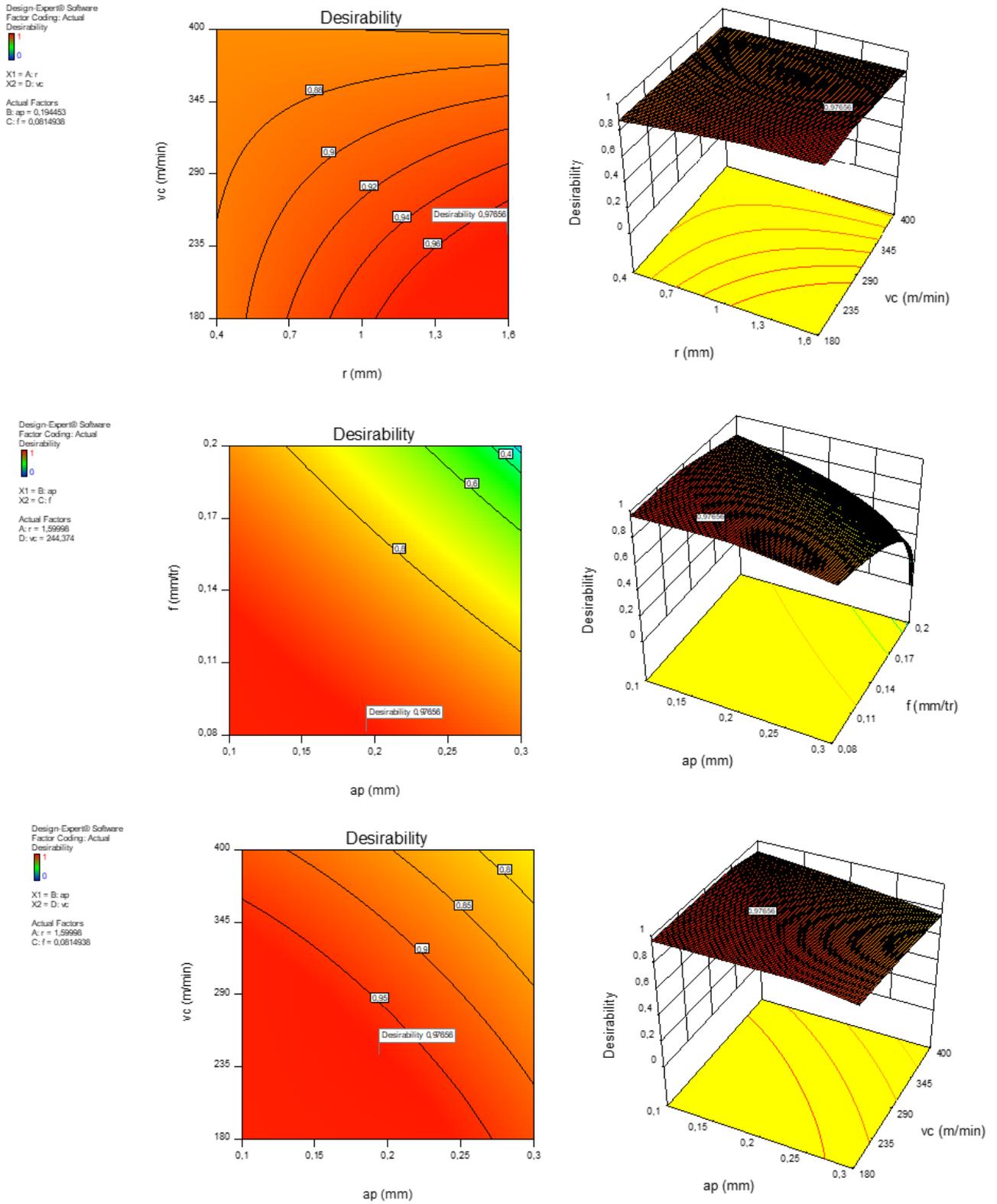


Figure IV-10 Graph de désirabilité pour le 3ème cas

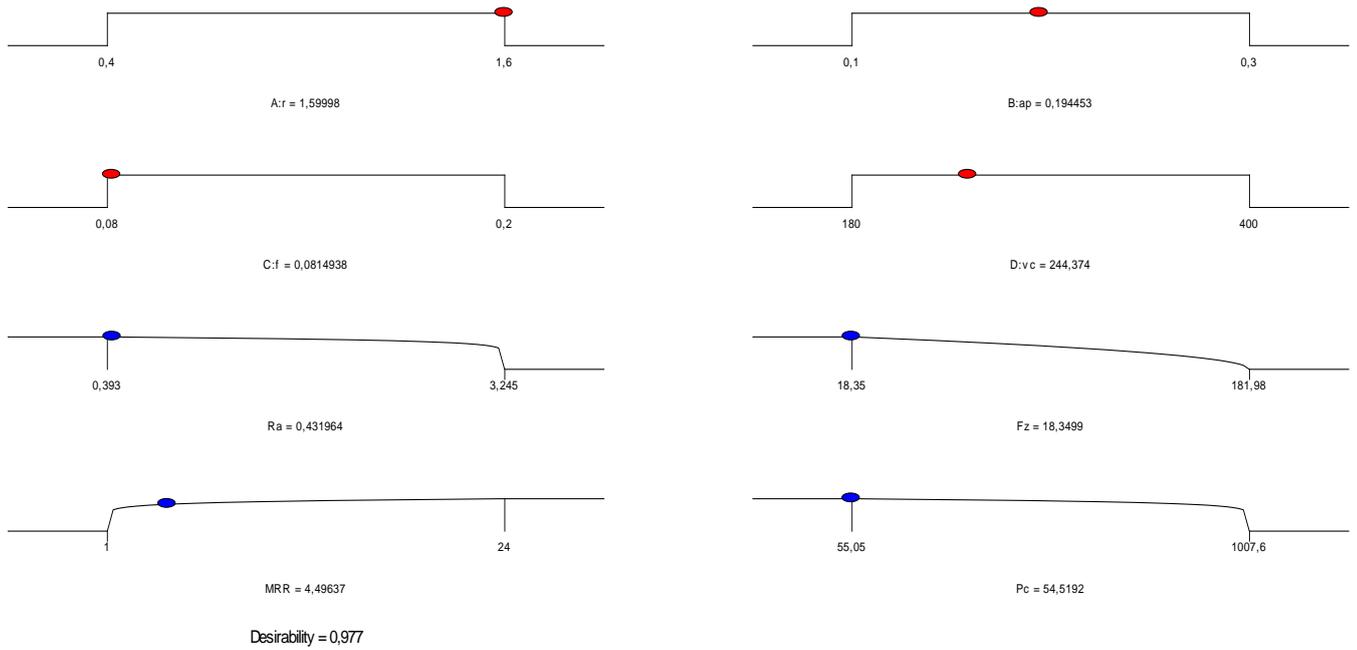
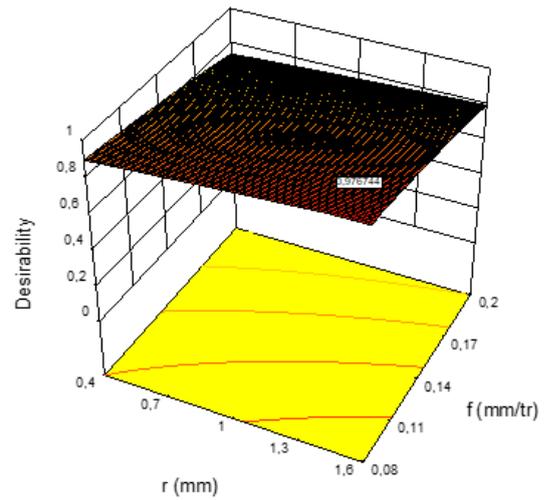
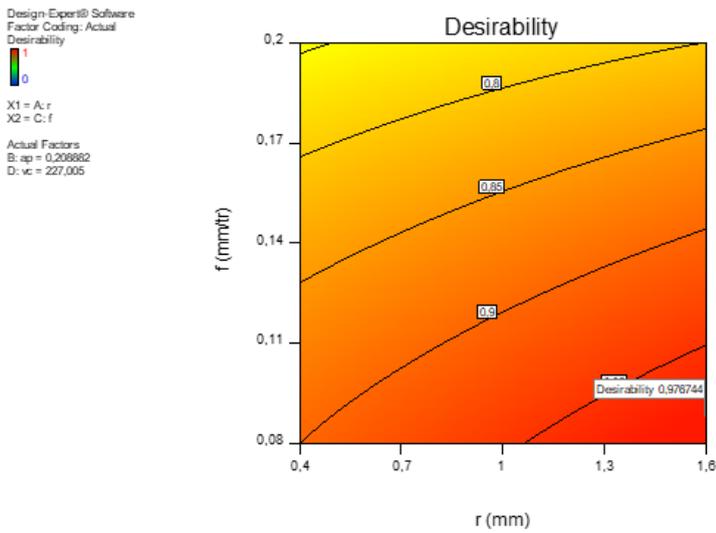
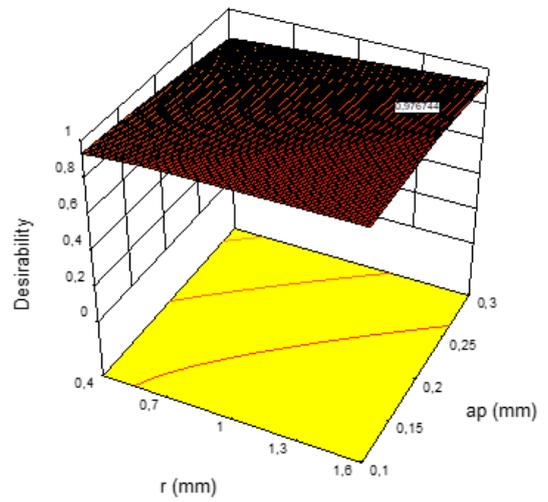
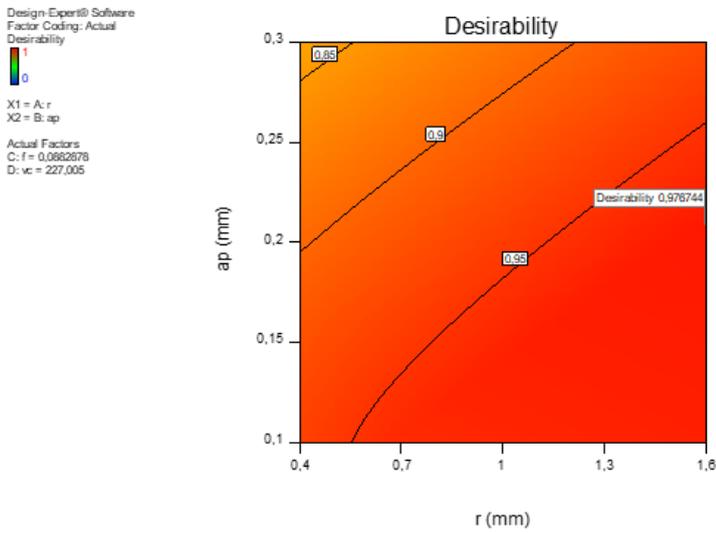
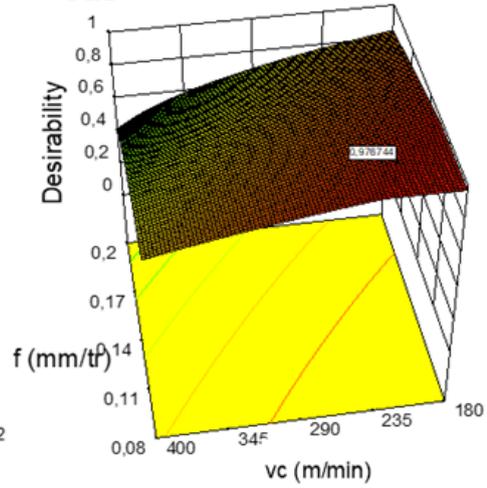
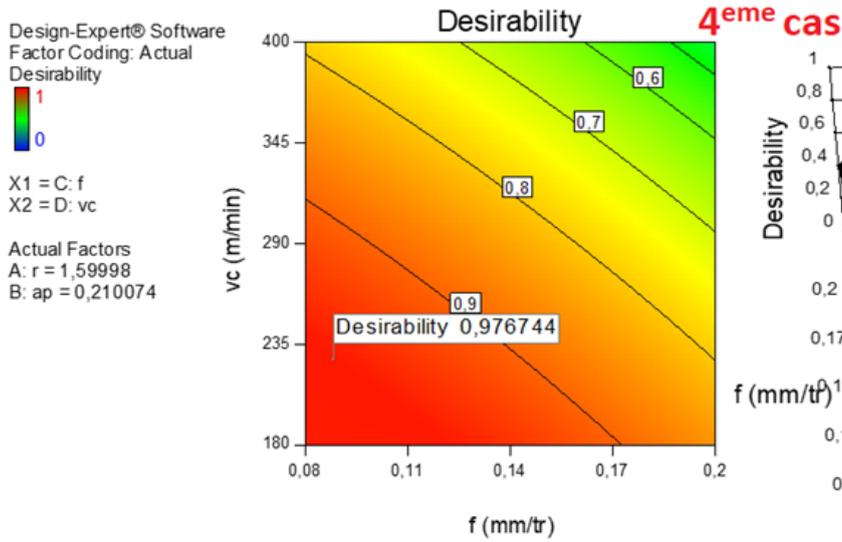


Figure IV-11 Diagramme d'optimisation de réponses multiples du Ra, Fz, Pc et MRR pour le 3ème cas

La figure (IV.12) montre le domaine de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f , r et a_p) pour obtenir une puissance de coupe minimale. D'une autre manière, la figure (IV.13) expose les valeurs optimales exacte des paramètres (V_c , f , r et a_p), ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés (R_a , F_z , P_c et MRR) et la désirabilité pour ce cas.



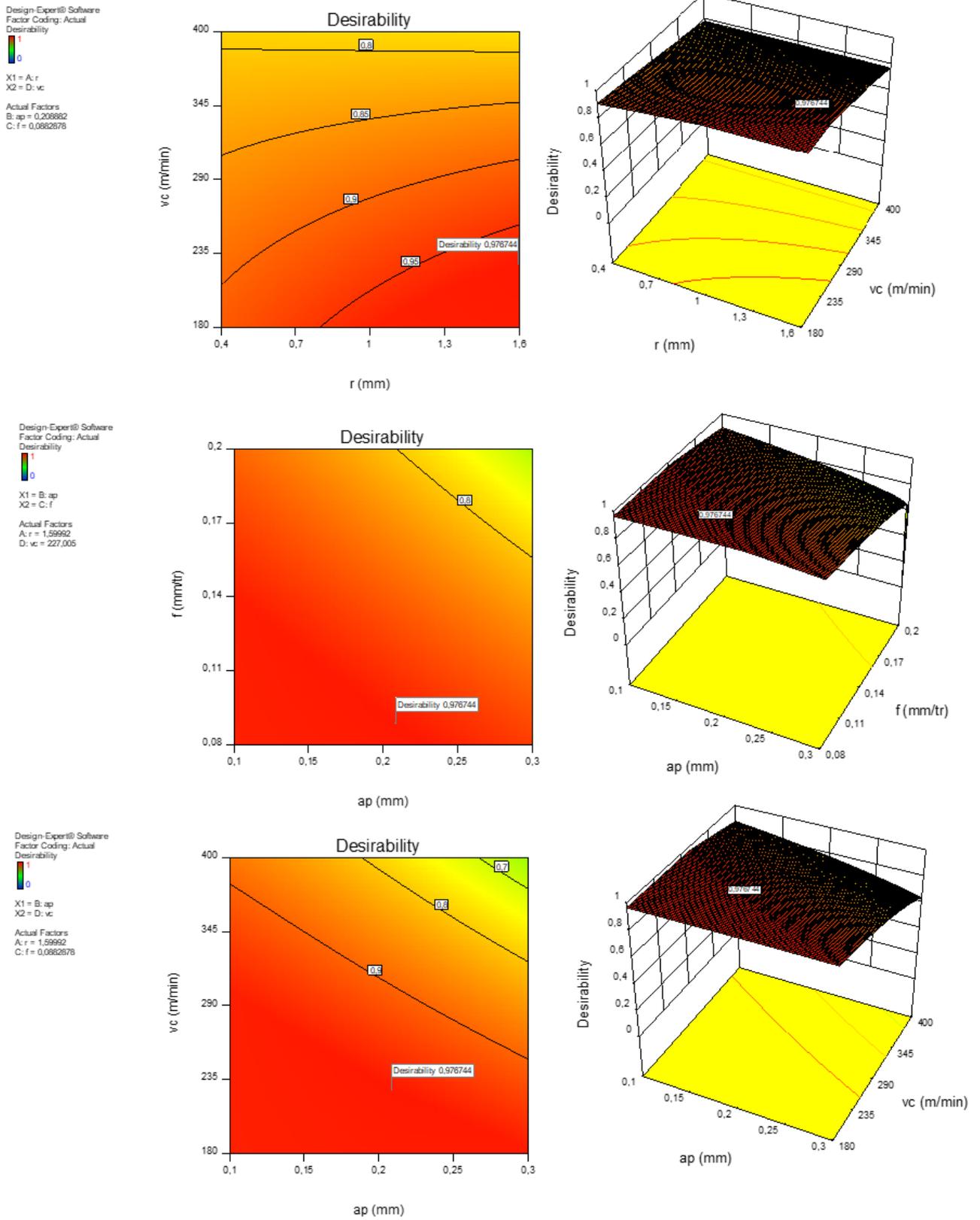


Figure IV-12 Graph de désirabilité de Ra, Fz, Pc et MRR pour le 4ème cas

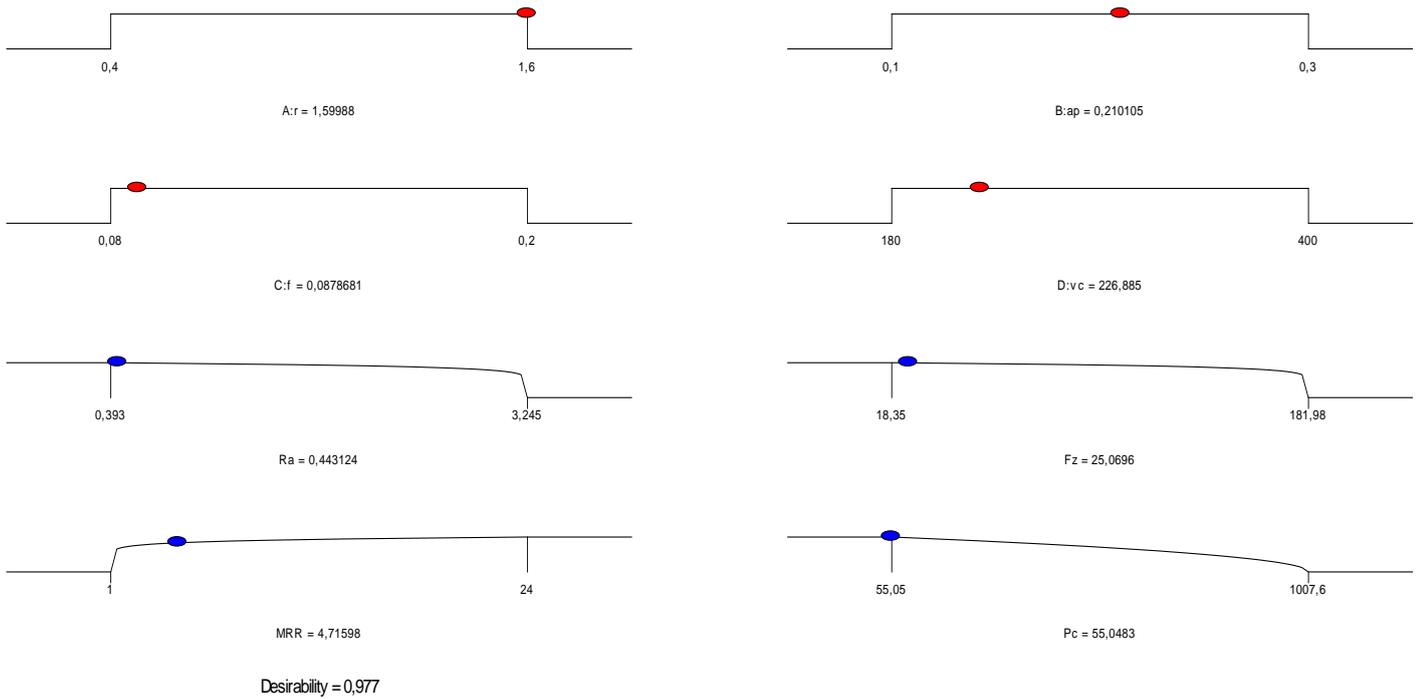
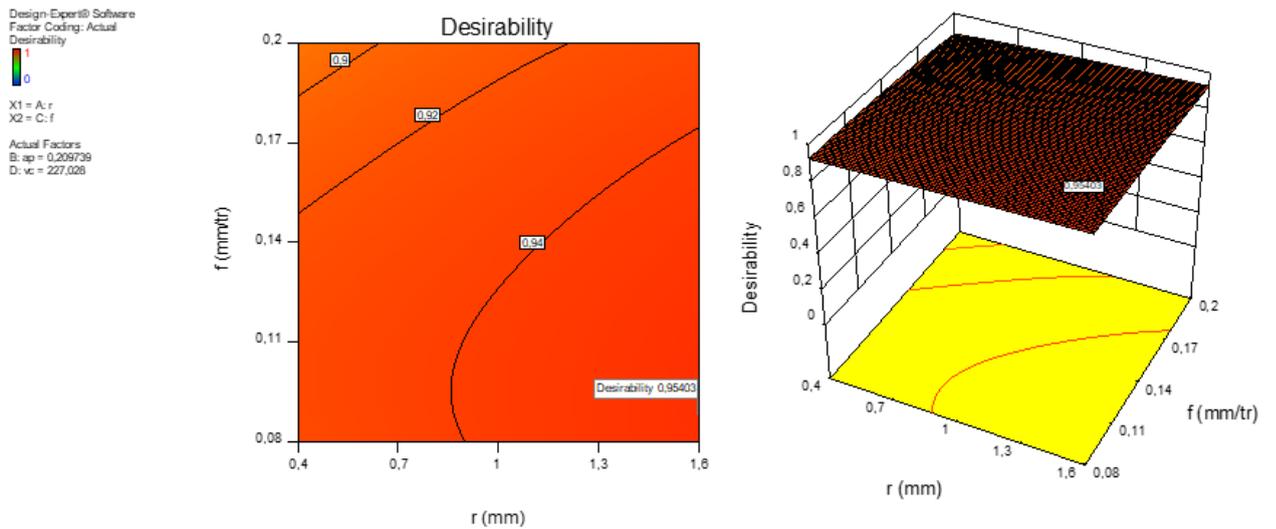
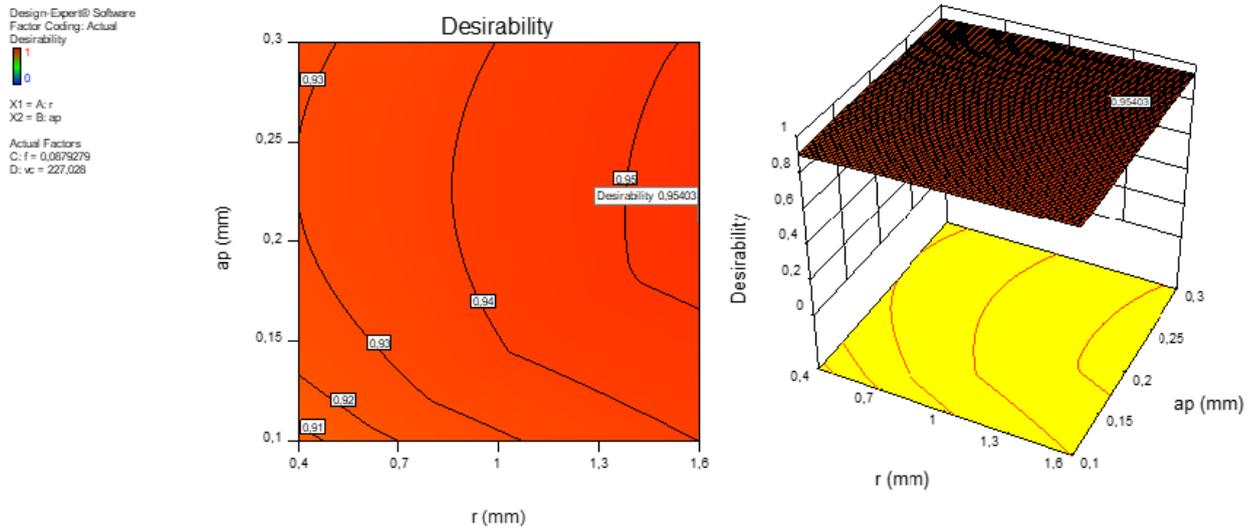
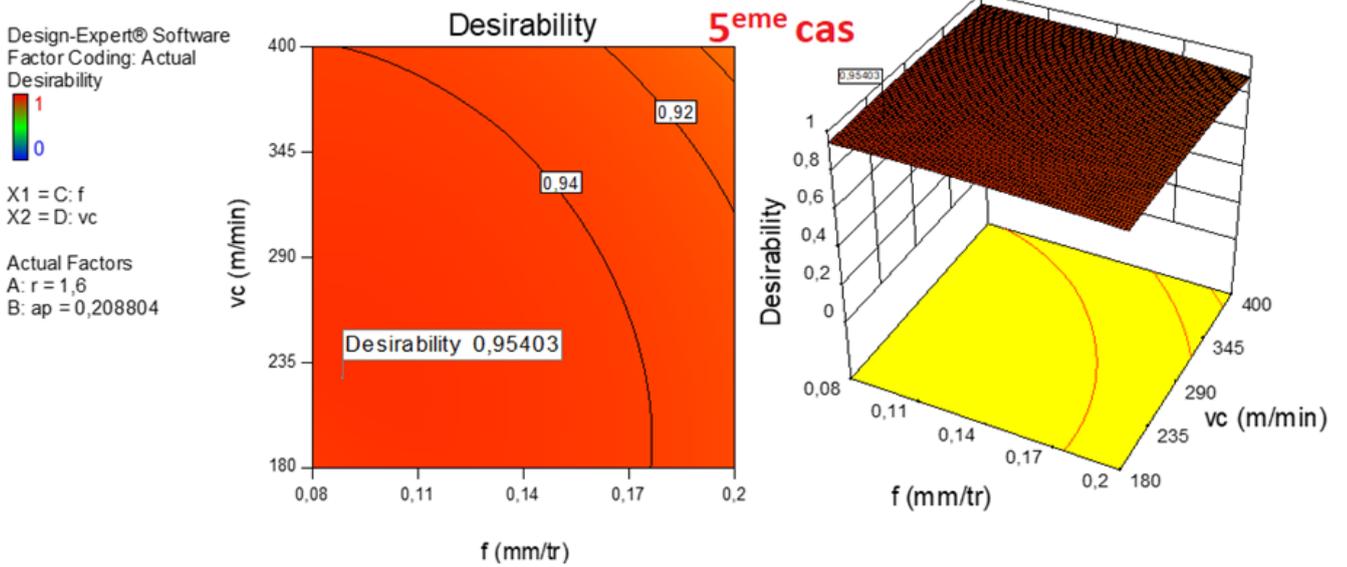


Figure IV-13 Diagramme d'optimisation de réponses multiples du Ra, Fz, Pc et MRR pour le 4ème cas

La figure IV.14 présente l'usage de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) pour obtenir un compromis entre qualité de surface et productivité exprimée par la rugosité de surface et la quantité de copeau enlevé. La figure V.15 exprime d'une manière différente, les valeurs optimales exactes des paramètres (V_c , f et a_p), de même celles des paramètres technologiques (R_a et MRR) et la désirabilité pour le dernier cas étudié.



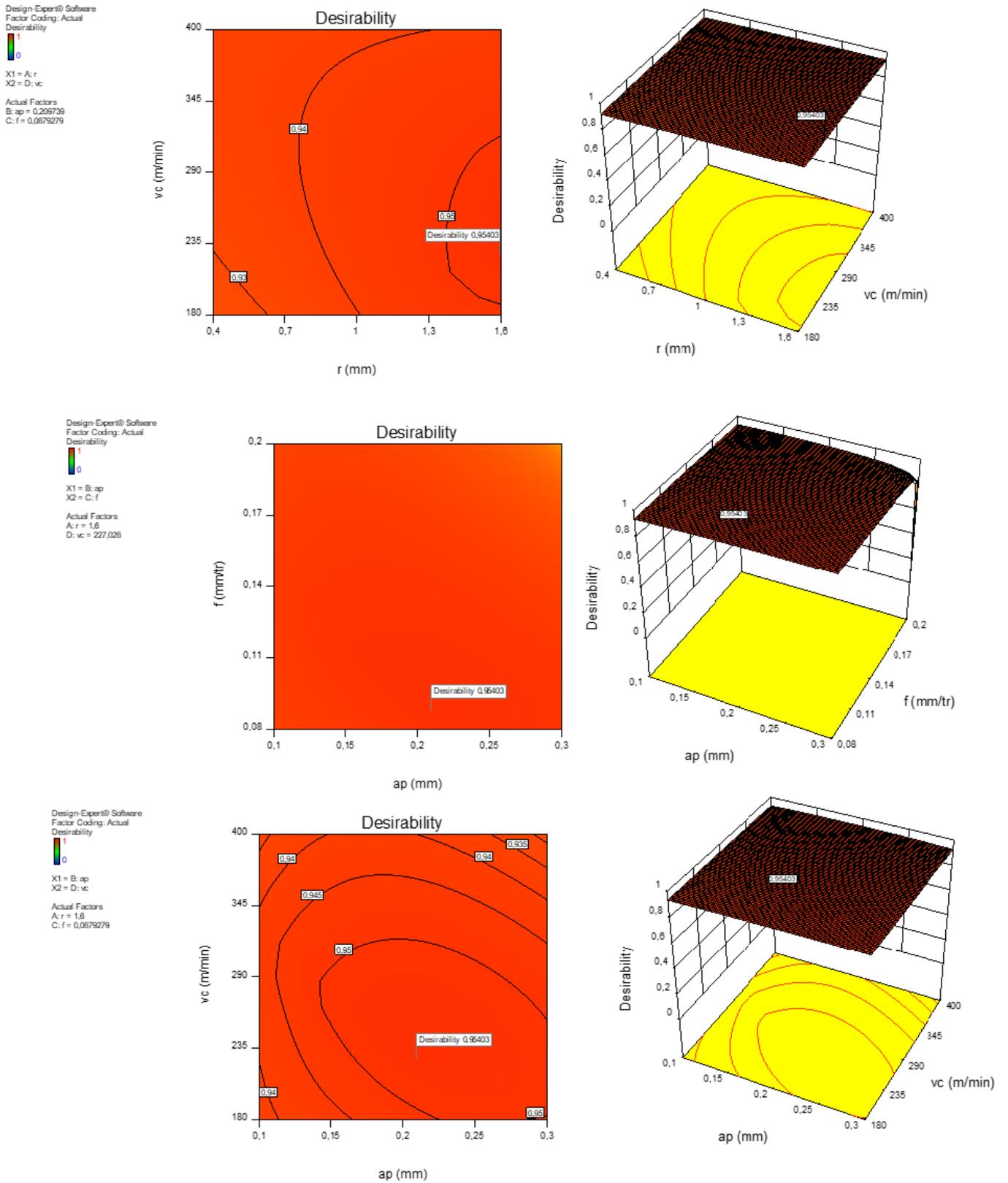


Figure IV-14 Graph de désirabilité de R_a , F_z , P_c et MRR pour le 5ème cas

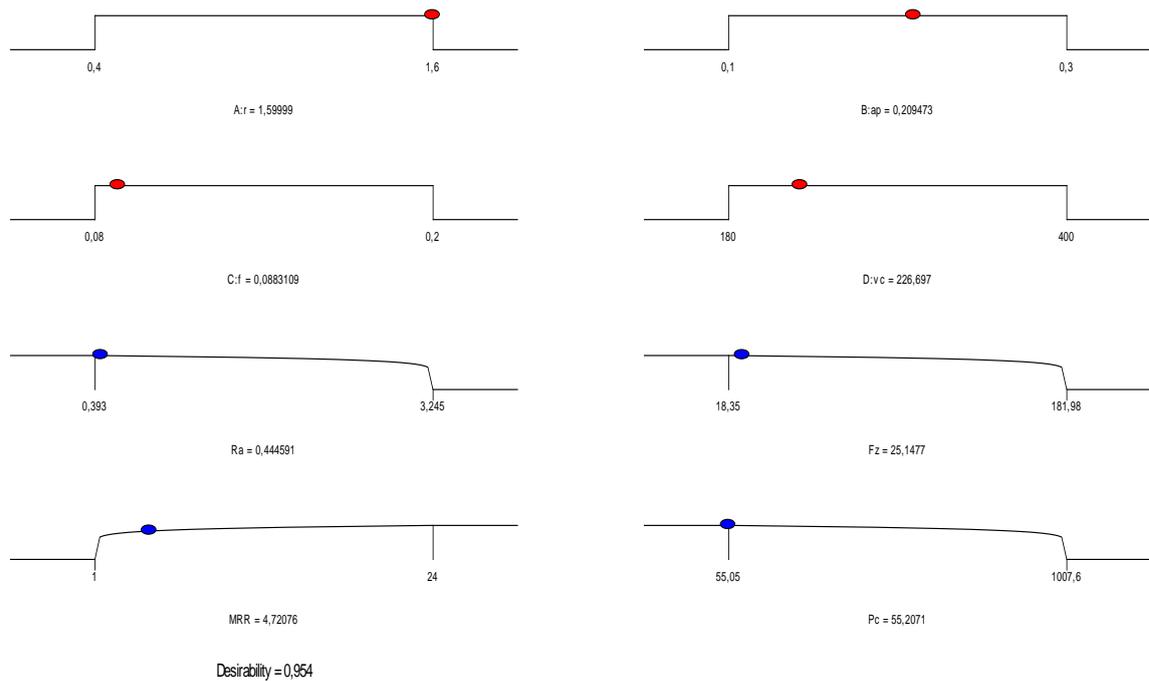


Figure IV-15 Diagramme d'optimisation de réponses multiples pour le 5ème cas

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objective, dans laquelle nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fz), la puissance de coupe (Pc) et la quantité de copeau enlevé (MRR), et l'optimisation multi-objectives, où nous avons utilisé l'approche de la fonction désirabilité pour optimiser (Ra, Fz, Pc et MRR) simultanément.

Conclusion générale

L'étude de modélisation des paramètres technologiques de sortie ; la rugosité des surfaces usinées, l'effort de coupe, la puissance de coupe, et le débit de copeau enlevé et l'optimisation des conditions d'usinage lors du tournage de l'acier X200Cr12 (AISI D3) en utilisant un outil de coupe en carbure revêtu GC4215, nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ✓ méthodologie des surfaces de réponse, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :
 - 1- Les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (R_a) pour un niveau de confiance de 95% montrent que l'avance par tour (f) est le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface (R_a), sa contribution est 42,55%. Le deuxième facteur important affectant la rugosité de surface est le rayon (r) avec 36,83 % de contribution, la vitesse de coupe (V_c) avec 9,13% de contribution. L'interaction ($f \times r$) est de 5,39 % par contre, la contribution de (ap) est de 1,51%. Le produit (r^2) et (f^2) ont des contributions inférieures à 2,39% et à 1,5% successivement. Les autres termes peuvent être supposés non significatifs.
 - 2- Les résultats de l'ANOVA pour l'effort tangentiel de coupe (F_z) pour un niveau de confiance de 95% montrent que (ap) est le facteur principal qui affecte l'effort F_z , sa contribution est de 70,86%. Elle est suivie par l'avance (f), avec (22,94) % de contributions. Les termes (r), (V_c), ($V_c \times f$), ($f \times ap$), ($f \times r$), ($r \times v_c$), ($ap \times r$), (V_c^2), (r^2), (ap^2) et (f^2) ont des contributions (moins de 1,37%).
 - 3- les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour la puissance de coupe (P_c). Il est à noter que la profondeur de passe est le paramètre qui a le plus grand effet sur (P_c) avec une contribution de 50,04%, suivie par (V_c) et (f) avec les contributions respectives de (29,97 et 15,27) %. La faible contribution correspond au facteur (r) insignifiant avec un pourcentage 0,97%.
 - 4- D'après les résultats de l'ANOVA la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important qui du copeau enlevé (MRR), sa contribution est 49,54%. Le deuxième facteur important affectant l'avance (f) avec 20,15% de contribution, suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec 17,53% de contribution. Le quatrième facteur le rayon de plaquette (r) avec 3% de contribution, Les termes (r^2) avec 4% de contribution et ($f \times ap$) avec 3% de contribution, les autres termes ($r \times f$), ($r \times ap$), ($v_c \times f$), ($v_c \times ap$) et ($f \times ap$), (V_c^2), (r^2), (ap^2) et (f^2) ont des contributions (moins de 3,31%).

5- L'optimisation mono-objective réalisée dans ce travail est basée sur la méthode de Taguchi. Selon son approche, l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/Bruit (S/B) représente la meilleure performance de la réponse Ra, Fz, Pc et MRR.

- Les conditions optimales de la rugosité de surface (Ra) sont donc la vitesse de coupe $V_c = 225$ m/min et le plus grand rayon de plaquette 1,6 mm, la plus faible avance par tour $f = 0,08$ mm/tour et la petite profondeur de passe, $a_p = 0,1$ mm.
- Les conditions optimales de l'effort de coupe (Fz) sont donc la plus faible vitesse de coupe $V_c = 180$ m/min, la plus faible avance par tour $f = 0,08$ mm/tour, la petite profondeur de passe, $a_p = 0,1$ mm et la petite rayon $r = 0,4$.
- Les conditions optimales de la puissance de coupe (Pc) sont donc la plus faible vitesse de coupe $V_c = 180$ m/min, la plus faible avance par tour $f = 0,08$ mm/tour, la plus petite profondeur de passe, $a_p = 0,1$ mm et le plus petit rayon de plaquette de $r = 0,4$.
- Les conditions optimales du (MRR) sont donc la plus grande vitesse de coupe $V_c = 400$ m/min, la plus grande avance par tour $f = 0,2$ mm/tour, choisir aucun rayon et la grande profondeur de passe, $a_p = 0,3$ mm.

6- L'optimisation multi-objective réalisée dans ce travail est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Cette optimisation est basée sur cinq critères choisis qui sont la qualité, la productivité, consommation d'énergie et une optimisation combinée entre les quatre cités en même temps.

- Solutions du 1^{er} cas d'optimisation l'importance maximale à la rugosité de surface (Ra) (5+), tout en gardant (Fz, Pc et MRR) à son bas niveau (1+)

r	ap	f	vc	Ra	Fz	MRR	Pc	Désirabilité
1,600	0,230	0,080	240,327	0,393	30,647	4,907	95,482	0,977

- Solutions du 2^{eme} cas d'optimisation l'importance maximale à e débit de coupe enlevé (MRR) (5+), tout en gardant (Fz, Pc et R) à son bas niveau (1+)

r	ap	f	vc	Ra	Fz	MRR	Pc	Desirabilit y
0,40 0	0,29 7	0,18 9	399,99 6	2,89 5	143,77 3	22,26 9	968,36 7	0,897

- Solutions du 3^{eme} cas d'optimisation l'importance maximale à l'effort de coupe (Fz) (5+), tout en gardant (Ra, Pc et MRR) à son bas niveau (1+)

r	ap	f	vc	Ra	Fz	MRR	Pc	Desirability
1,600	04	0,081	244,374	0,432	18,350	4,496	54,519	0,977

- Solutions du 4^{ème} cas d'optimisation l'importance maximale à la pissance de coupe (Pc) (5+), tout en gardant (Fz, Ra et MRR) à son bas niveau (1+)

r	ap	f	vc	Ra	Fz	MR R	Pc	Desirabilit y
1,60 0	0,21 0	0,08 9	225,25 5	0,44 7	25,66 7	4,73 5	55,04 5	0,977

- Solutions du 5^{ème} cas s'intéresse à une optimisation combinée entre une (Fz, Pc, MRR et R) avec une même importance (1+) pour les cinq sorties

r	ap	f	vc	Ra	Fz	MRR	Pc	Desirability
1,600	0,209	0,089	226,732	0,446	25,091	4,721	55,157	0,954

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **BEDRIN C.** Généralités sur la coupe des métaux, Lyon, Conférences CAST, INSA de Lyon, 1971, pp. 5-71.
- [2] A. Moufki, A. Devillez, D. Dudzinski, and A. Molinari. Thermomecaical modeling of cutting and experimental validation. In Kluwer Academic Publishers, editor, Metal Cutting and High Speed Machining, pages pp. 51–67, 2002.
- [3] J.-L. Battaglia, H. Elmoussami, L. Puigsegur, Modélisation du comportement thermique d'un outil de fraisage : approche par identification de système non entier, C. R. Mecanique Vol. 330 (2002), 857-864.
- [4] P. Pollet Usinabilité en fraisage d'un acier 42CrMo4 traité calcium, mémoire de PFE, (2000), ENSAM de Metz.
- [5] A. Moufki, A. Devillez, D. Dudzinski, and A. Molinari. Thermomecaical modeling of cutting and experimental validation. In Kluwer Academic Publishers, editor, Metal Cutting and High Speed Machining, pages pp. 51–67, 2002.
- [6] J. P. Cordebois and coll. Fabrication par usinage. ISBN 2 10 005586 0. Dunod, Paris, 2003.
- [7] G. Poulachon. Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Application : usinabilité de l'acier 100Cr6. PhD thesis, ENSAM de Cluny, 1999
- [8] Coupe des métaux.
<http://www.umc.edu.dz/vf/images/cours/FabricationMecanique/chapitreii.pdf>.
- [9] Usure de l'outil.
http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/Pages/default.aspx
- [10] **B. Fnides.** Evaluation des performances des matériaux de coupe lors de l'usinage de l'acier X38CrMoV5-1, Mémoire de magistère de Mécanique Productique. Université 08 mai 1945 de Guelma (2008).
- [11] **RECH J.**, CONTRIBUTION A LA COMPREHENSION DES MODES D' ACTIONS TRIBOLOGIQUES ET THERMIQUES DES REVETEMENTS EN USINAGE, thèse de doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers, (2002) pp. 290.

- [12] Nalbant, Y., Chu, K. H. "Optimization of a fermentation medium using neural networks and genetic algorithms." *Biotechnology Letters*. 25(21), pp. 1837-1842. 2003.
- [13] Oussama Zerti, Mohamed Athmane Yallese, Salim Belhadi and Lakhdar Bouzid. Taguchi Design of Experiments for Optimization and Modeling of Surface Roughness When Dry Turning X210Cr12 Steel.
- [14] Mohamed Elbah, Mohamed Athmane Yallese, Hamdi Aouici, Tarek Mabrouki, JeanFrançois Rigal. Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel; *www.elsevier.com* 46. pp. 3041–3056 (2013).
- [15] V.N. Gaitonde a, *, S.R. Karnik b,1, Luis Figueira c, J. Paulo Davim c,2.” Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts ‘’ 10.1016/j.ijrmhm.2008.12.007
- [16] V.N. Gaitonde a, S.R. Karnik b, Luis Figueira c, J. Paulo Davim c,2 ‘’ International Journal of Refractory Metals and Hard Materials ‘’ <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.12.007>.
- [17] CHRISTIAN PAGÈS, Comportement de revêtements céramique sur outil en tournage a sec de finition. Thèse de doctorat, École centrale. 2003
- [18] Turgay Kvak, Optimization of surface roughness and ank wear using the Taguchi method in milling of Hadeld steel with PVD and CVD coated inserts, *Measurement* 50 (2014) 19–28.
- [19] M. Remadna. Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d’un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN. Thèse de doctorat de mécanique. ISAL (2001).
- [20] Turgay Kvak, Optimization of surface roughness and ank wear using the Taguchi method in milling of Hadeld steel with PVD and CVD coated inserts, *Measurement* 50 (2014) 19–28.
- [21] YALLESE MOHAMED ATHMANE, Etude de comportement à l’usure des matériaux des coupes modernes en tournage dur. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba. 2005.