

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



Mémoire de fin d'étude

Présenté par : **Labdazi Mohamed El Akhdar**

Master

Option : Construction Mécanique

=====
**Modélisation et optimisation des conditions de
coupe lors du tournage de l'acier AISI D3 en
utilisant les méthodes RSM, tagushi et la fonction
désirabilité**
=====

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

Safi khaoula

Septembre 2020

Dédicaces

Je tiens à dédier Ce mémoire de fin d'étude:

*A mon maître de passion, de patience et de persévérance . . .
Mon père, A ma source d'inspiration, de motivation et de bénédiction
. . . Ma mère, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de
leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs
sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant
d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre
ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations
sans limite.*

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

Mes sœurs et mes frères ;

Toute ma famille ;

Mes chers amis

A La mémoire de mon grand-père

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

*Ce travail a été réalisé au laboratoire de mécanique et structures (LMS) de l'université de Guelma sous la direction de Monsieur le professeur **YALLESE Mohamed Athmane**, qui a fait preuve d'une grande disponibilité à mon égard tout au long de la période que j'ai passé au labo, pour m'avoir intégré rapidement au sein du laboratoire, pour la confiance qu'il m'a accordé dès mon arrivée, pour son esprit scientifique qui restera une grande source d'inspiration.*

*Et je tiens à remercier mademoiselle **Safi Khaoula** pour son assistance, sa présence et ces conseils durant la réalisation de ce projet fin d'étude.*

Rien n'aurait été possible sans la présence et le soutien indéfectible de ma famille trouve en cet aboutissement le fruit de la confiance qu'ils m'ont toujours accordée, et des sacrifices qu'ils ont faits pour moi durant ces années.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé à différents stades de ce travail.

Résumé

L'acier AISI D3, également connu sous le nom de X210Cr12 est un acier à outils pour travail à froid, à haute teneur en carbone et en chrome. Il présente une excellente résistance à l'abrasion, à l'usure et présente une bonne stabilité dimensionnelle et une résistance à la compression élevée. Il est considéré comme à acier à usinabilité difficile.

Le travail réalisé dans ce mémoire de master concerne la modélisation des paramètres de performance et l'optimisation des conditions de coupe lors du tournage de l'AISI D3 avec des plaquettes en carbure métallique à revêtement (CVD), Cermet et carbure métallique à revêtement (PVD). Le travail est divisé en deux parties. La première concerne la modélisation des réponses de sortie à savoir : la rugosité de surface (**Ra**), l'effort tangentiel (**Fz**) et l'usure (**Vb**), en utilisant la méthodologie de la surface de réponse **RSM**.

L'analyse de la variance **ANOVA** a été utilisée afin d'évaluer l'influence des paramètres de coupe, à savoir : Vitesse de coupe (**Vc**), avance (f) et profondeur de passe (**ap**) et le matériau d'outil de coupe (**M**) sur les paramètres de sortie. Le traitement statistique des résultats nous a permis de proposer des modèles mathématiques de prédiction pour (**Ra**), (**Fz**) et (**Vb**).

La deuxième partie de ce travail concerne l'optimisation des conditions de coupe en utilisant l'approche de **Taguchi** (analyse signal / bruit) et la fonction de désirabilité DF, selon quatre cas; minimiser (**Ra**), minimiser (**Fz**), minimiser (**Vb**) et optimisation combinée de (**Ra**) et (**Vb**) en même temps avec la même importance.

Mots clés: Usinage, tournage, Acier AISI D3, CVD, PVD, Cermet, ANOVA, RSM, Optimisation.

Abstract

In this experiment we use the **AISI D3** which is a D3 steel, also known as 1.2080 (Werkstoff), is an air hardening tool steel, with high carbon and chromium content. It has excellent abrasion, wear and dimensional stability and high compressive strength.

The research work carried out in this master concerns the turning of the AISI D3 with coated metal carbide inserts CVD, PVD and Cermet insert. The work is divided into two parts. The first relates to the modeling of the output responses namely: Surface roughness (**Ra**), tangential force (**Fz**) and wear (**Vb**), using the **RSM** response surface methodology. **ANOVA** analysis of variance is used to assess the influence of cutting parameters, namely: Cutting speed (**Vc**), feed (**f**) and depth of cut ap and material (**M**) on the output parameters.

The second part of this research work concerns the optimization of cutting conditions using the Taguchi approach (signal/ noise analysis) and the **DF** desirability function, according to four cases; Minimize (**Ra**), Minimize (**Fz**), Minimize (**Vb**) and combined optimization between (**Ra**) and (**Vb**).

Keywords: Machining, turning, AISI D3 steel, CVD, PVD, Cermet, ANOVA, RSM, Optimization.

ملخص

فولاذ **AISI D3**، المعروف أيضًا باسم X210Cr12، عبارة عن فولاذ يعمل على البارد وعالي الكربون والكروم. لديه مقاومة ممتازة للتآكل، ومقاومة التآكل ولديها ثبات أبعاد جيد وقوة ضغط عالية. يعتبر من الفولاذ المقاوم للقطع. يتعلق العمل الذي تم تنفيذه في رسالة التخرج هذه بنمذجة معلمات الأداء وتحسين ظروف القطع عند تحويل AISI D3 مع إدراج كربيد المعدن المطلي بـ CVD وطلاء PVD. العمل مقسم إلى جزئين. يتعلق الأول بنمذجة استجابات المخرجات وهي: خشونة السطح (**Ra**)، والقوة العرضية (**Fz**) والتآكل (**Vb**)، باستخدام منهجية سطح الاستجابة **RSM**. تم استخدام تحليل التباين **ANOVA** لتقييم تأثير معلم القطع، وهي: سرعة القطع (**Vc**)، التغذية f وعمق القطع (**ap**) والمادة (**M**) على معلمات الإخراج. أتاحت المعالجة الإحصائية لنتائج واقتراح نماذج تنبؤ رياضي لـ (**Ra**) و (**Fz**) و (**Vb**). يتعلق الجزء الثاني من هذا العمل بتحسين ظروف القطع باستخدام نهج Taguchi (تحليل الإشارة / الضوضاء) ووظيفة الاستحسان **DF**، وفقًا لأربع حالات؛ تصغير (**Ra**)، تصغير (**Fz**)، تصغير (**Vb**) والتحسين المشترك لـ (**Ra**) و (**Vb**) في نفس الوقت بنفس الأهمية.

الكلمات الرئيسية: القطع، الخراطة، التحسين، AISI D3 فولاذ، Cermet, CVD, PVD, ANOVA, RSM.

Index des Figures

Figure I.1 Usinage par enlèvement de matière	2
Figure I.2 Matériaux de coupe	3
Figure I.3 Classification des Matériaux de coupe	3
Figure I.4 Carbure de tungstène	4
Figure I.5 Céramiques	5
Figure I.6 Plaquette CBN	6
Figure I.7 Outils de coupe en diamant	6
Figure I.8 Opération de chariotage en tournage	7
Figure I.9 Profondeur de passe a_p et l'avance f en tournage	8
Figure I.10 Avance en tournage f	8
Figure I.11 Mécanisme de formation de copeau, a) tournage conventionnel, b) tournage dur	9
Figure I.12 Critères de la rugosité de surface	10
Figure I.13 Usure en cratère	11
Figure I.14 Usure en dépouille	11
Figure I.15 Usure en entaille	11
Figure I.16 Composantes d'efforts de coupe	12
Figure I.17 Plaque de fixation et porte outil	12
Figure I.18 Rapport des composantes F rés	13
Figure I.19 Température dans la zone de coupe en usinage dur	14
Figure I.21.a Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur	15
Figure I.21.b Champs de température dans le système pièce- outil- copeau pour différentes avance	15
Figure I.22 Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils coupants	17
Figure I.23 Statistiques sur l'évolution de l'utilisation relative des revêtements pour outils coupants	18
Figure I.24 Opérations de tournage à sec	20
Figure I.25 Opérations de tournage à arrosage	21
Figure I.26 Système MQL mélange air/huile	22
Figure I.27 Système MQL mono canal	22
Figure I.28 Systèmes MQL bi-canal	23
Figure I.29 Principes de générateurs de brouillard mono- et bi canal en interne	23
Figure I.30 Expériences (copeaux, abrasion, adhésion)	27

Figure I.31 Graphiques de surface 3D de réponse pour la rugosité de surface (Ra)	28
Figure I.32 Représentation graphique de la surface en 3D pour la force tangentielle (Fz)	29
Figure I.33 Graphiques de surface 3D de réponse pour la puissance de coupe (Pc, a, b) et le taux d'élimination des métaux (MRR, c, d)	29
Figure I. 34 Photo par MEB de l'usure en de dépouille et en cratère d'un outil de Coupe en CBN.	30
Figure I.35 Exemple de l'analyse par rayon X sur la surface de dépouille d'un outil de Coupe en CBN	31
Figure I.36 Graphique d'interaction pour l'usure moyenne du flanc de l'outil.	33
Figure I.37 Tracés de surface 3D	33
Figure II.1 Tour à charioter et à fileter modèle SN40	39
Figure II.2 Nomenclature des différents organes du tour modèle SN40	40
Figure II.3 Variateur de vitesse de coupe	40
Figure II.4 Capteur de vitesse	40
Figure II.5 Matériau usinée AISI D3	41
Figure II.6 Plaquettes et porte outil	42
Figure II.7 Montage du dynamomètre sur la table	43
Figure II.8 Capteur d'effort de coupe KISTLER	43
Figure II.9 PC Disposant du logiciel (DYNOWARE)	44
Figure II.10 Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE	44
Figure II.11 Rugosimètre 2D en plein opération de mesure	45
Figure II.12 Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250)	45
Figure III.1 Graphique des effets principaux pour Ra	55
Figure III.2 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour Ra	56
Figure III.3 Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour Ra	56
Figure III.4 Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de (Vc, ap, f) pour l'outil à revêtement CVD	58
Figure III.5 Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de (Vc, ap, f) pour l'outil en cermet.	60
Figure III.6 Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de (Vc, ap, f) pour l'outil à revêtement PVD	62
Figure III.7 Effet de conditions de coupe sur l'effort Fz	64

Figure III.8 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour F_z	65
Figure III.9 Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour F_z	66
Figure III.10 Surface de réponse pour l'effort F_z en fonction de (V_c, a_p, f) pour l'outil a revêtement CVD	68
Figure III.11 Surface de réponse pour l'effort F_z en fonction de (V_c, a_p, f) pour l'outil en Cermet	70
Figure III.12 Surface de réponse pour l'effort F_z en fonction de (V_c, a_p, f) pour l'outil a revêtement PVD	72
Figure III.13 Effet de conditions de coupe sur l'usure V_b	74
Figure III.14 Courbe de comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour l'usure V_b	75
Figure III.15 Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour V_b	75
Figure III.16 Surface de réponse de l'usure (V_b) en fonction de (V_c, f, a_p) pour l'outil a revêtement CVD	77
Figure III.17 Surface de réponse de l'usure (V_b) en fonction de (V_c, f, a_p) pour l'outil en Cermet	79
Figure III.18 Surface de réponse de l'usure (V_b) en fonction de (V_c, f, a_p) pour l'outil a revêtement PVD	81
Figure IV.1 Graphique des effets principaux de (V_c, f, a_p et M) sur la rugosité de surface (R_a)	87
Figure IV.2 Graphique des effets principaux de V_c, f, a_p et M sur l'effort tangentiel (F_z)	88
Figure IV.3 Graphique des effets principaux de V_c, f, a_p et M sur l'usure (V_b)	89
Figure IV.4 Graph de désirabilité de R_a, F_z et V_b (diagramme de surface 3D) pour le 1er cas	95
Figure IV.5 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (R_a), l'effort tangentiel (F_z) et l'usure (V_b)	95
Figure IV.6 Graph de désirabilité de R_a, F_z et V_b (diagramme de surface 3D) pour le 2ème cas	97
Figure IV.7 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (R_a), l'effort tangentiel (F_z) et l'usure (V_b)	97
Figure IV.8 Graph de désirabilité de R_a, F_z et V_b (diagramme de surface 3D) pour le 3ème cas.	99
Figure IV.9 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de	100

surface(Ra), l'effort tangentiel (Fz) et l'usure (Vb)

**Figure IV.10 Graph de désirabilité de Ra, Fz et Vb (diagramme de surface 3D)
pour le 4ème cas** 101

**Figure IV.11 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de
surface(Ra), l'effort tangentiel (Fz) et l'usure (Vb)** 102

Index des Tableaux

Tableau I.1 Différent types de revêtements et leurs significations	17
Tableau I.2 Comparaison des propriétés des modes de déposition PVD et CVD.	19
Tableau I.3 Caractéristiques des huiles de coupe utilisées en MQL	25
Tableau I.4 Résultats expérimentaux des réponses selon la matrice taguchi L8	26
Tableau I.5 Facteurs et niveaux utilisés dans le plan expérimental	28
Tableau I.6 Résultats expérimentaux de l'usinage de l'acier X210cr12	28
Tableau I.7 Analyse de la variance pour l'outil porte Vb (mm)	32
Tableau I.8 Résultats expérimentaux pour l'usure des outils	32
Tableau II.1 Composition chimique de l'AISI D3, (en% en poids)	41
Tableau II.2 Table orthogonale de Taguchi L18	46
Tableau II.3 Plan d'expérience de Taguchi (L18)	47
Tableau III.1 Résultats des essais pour un plan de Taguchi L18.	53
Tableau III.2 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Ra.	54
Tableau III.3 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort Fz.	63
Tableau III.4 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure Vb	73
Tableau IV.1 Signal/Bruit des paramètres de sorties étudiées Ra, Vb, et Fz	85
Tableau IV.2 Moyenne des ratios S/B de la rugosité (Ra) pour chaque niveau des facteurs.	86
Tableau IV.3 Moyenne des ratios S/B (Fz) pour chaque niveau des facteurs	87
Tableau IV.4 Moyenne des ratios S/B (Vb) pour chaque niveau des facteurs	88
Tableau IV.5 But et gamme de paramètres pour le 1er cas d'optimisation	91
Tableau IV.6 But et gamme de paramètres pour le 2ème cas d'optimisation	91
Tableau IV.7 But et gamme de paramètres pour le 3ème cas d'optimisation	92
Tableau IV.8 But et gamme de paramètres pour le 4ème cas d'optimisation	92
Tableau IV.9 Réponses de la rugosité de surface, l'effort tangentiel et l'usure pour le 1er cas d'optimisation	92
Tableau IV.10 Réponses de la rugosité de surface, l'effort tangentiel et l'usure pour le 2ème cas d'optimisation	93
Tableau IV.11 Réponses de la rugosité de surface, l'effort tangentiel et l'usure pour le 3ème cas d'optimisation	93
Tableau IV.12 Réponses de la rugosité de surface, l'effort tangentiel et l'usure pour le 4ème cas d'optimisation	93

Nomenclature

f : Avance par tour, tr/mm.

V_c : Vitesse de coupe, m/min.

a_p : Profondeur de passe, (mm).

R_a : Ecart arithmétique moyen, μm .

ANOVA : Analyse de la variance.

MSR : Méthodologie de la surface de réponse.

V_b : Usure en dépouille (mm).

Des : Désirabilité.

DF : Fonction désirabilité.

F_z : Effort tangentiel de coupe (N).

R_a : Rugosité moyenne arithmétique (μm).

R^2 : Coefficient de détermination.

Cont% : Pourcentage de contribution (%).

Sommaire

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1 Introduction et problématique	1
I.2 Notion de la coupe des métaux	1
I.3 Matériaux de coupe	2
I.4 Classification des matériaux des outils de coupe	3
I.5 Paramètres de coupe	6
I .5.1 Paramètres d'entries	7
I .5.2 Paramètres de sorties	9
I.6 Propriétés pour les plaquettes de coupe	16
I .6.1 Fonction et propriétés d'un revêtement en usinage	16
I .6.2 Types de revêtements	16
I .6.3 Avantages et les inconvénients de PVD et CVD	19
I.7 Différentes méthodes d'usinage	19
I .7.1 Usinage a Sec	19
I .7.2 Usinage avec lubrification (arrosage)	20
I .7.3 Notion de la minimum quantité de lubrification MQL	21
I .7.4 Huiles utilisées en MQL	24
I.8 Travaux de recherche	25
I.9 Conclusion	35

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction	39
II.2 Matériels utilisés	39
II.2.1 Machine outil	39
II.2.2 Matériau de la pièce à usiner	41
II.2.3 Plaquette et porte outil	41
II.2.4 Instruments de mesure utilisés	42
II.2.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme kistler)	42
II.2.4.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité 2D	44

II.2.4.3 Microscope pour la mesure de l'usure (<i>Visuel Gage 250</i>)	45
II.3 Planification des expériences	46
II.4 Condition opératoire	47
II.5 Conclusion	48

Chapitre III

Modélisation des paramètres technologiques d'usinage lors de l'usinage de l'acier l'AISI D3

III.1 Introduction	49
III.2 Analyse de variance (ANOVA) et modélisation	49
III.2.1 Analyse de variance (ANOVA)	49
III.2.2 Méthodologie des surfaces de réponses	50
III.3 Résultats et discussions	52
III.3.1 Analyse de variance et modélisation de la rugosité Ra	53
III.3.1.1 Analyse de variance ANOVA pour Ra	53
III.3.1.2 Effets principaux pour Ra	54
III.3.1.3 Analyse de régression pour Ra	55
III.3.1.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	56
III.3.1.5 Analyse de surface de réponse pour Ra	57
III.3.2 Analyse de variance et modélisation de l'effort tangentiel Fz	63
III.3.2.1 Analyse de variance ANOVA pour Fz	63
III.3.2.2 Effets principaux pour Fz	64
III.3.2.3 Analyse de régression pour Fz	64
III.3.2.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	65
III.3.2.5 Analyse de surface de réponse pour Fz	66
III.3.3 Analyse de variance et modélisation de l'usure de l'outil de coupe Vb	72
III.3.3.1 Analyse de variance ANOVA pour Vb	72
III.3.3.2 Effets principaux pour Vb	73
III.3.3.3 Analyse de régression pour Vb	74
III.3.3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	75
III.3.3.5 Analyse de surface de réponse pour Vb	76
III.4 Conclusion	82

Chapitre IV

Optimisation par la méthode Taguchi et la fonction Désirabilité

IV.1 Introduction	84
IV.2 Optimisation par la méthode de Taguchi	84
IV.2.1 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs	86
IV.2.1.1 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra)	86
IV.2.1.2 Analyse des effets principaux sur l'effort tangentiel (Fz)	87
IV.2.1.3 Analyse des effets principaux sur L'usure (Vb)	88
IV. 3 Optimisation par la fonction désirabilité	89
IV.3.1 Introduction	89
IV.3.1.1 Cas d'optimisation étudiés	90
IV.4 Conclusion	103

Conclusion Générale

Introduction Générale

Les aciers pour travail à froid comme L'AISI D3 sont largement utilisés dans les différents domaines à cause de leur résistance à la corrosion. Ils jouent un rôle très important dans la fabrication des poinçons et des matrices, l'industrie aéronautique, la fabrication des pièces médicales et dans l'agroalimentaire, Il présente une excellente résistance à l'abrasion, à l'usure et présente une bonne stabilité dimensionnelle et une résistance à la compression élevée.

D'autres parts, afin d'en assurer une qualité satisfaisante des produits finis, une attention particulière doit être portée sur la modélisation des paramètres technologiques et aussi l'optimisation des conditions de coupe permettant d'améliorer la qualité et la productivité en utilisant les méthodes statistiques pour la modélisation et l'optimisation du processus d'usinage. Le mémoire de master est structuré comme suit :

Le premier chapitre du mémoire est consacré à l'étude bibliographique sur l'usinabilité des matériaux et les critères de son évaluation, les principales définitions sur le tournage, la rugosité de surface, les efforts de coupe, l'usure des outils et le choix des matériaux de coupe. La dernière partie de la bibliographie traite l'état de l'art ayant pour but de présenter une synthèse sur les résultats des travaux de recherche (publications) relatifs à l'usinage des aciers pour le travail à froid ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation du processus de coupe en tournage.

Dans le second chapitre, nous présentons les équipements nécessaires à la réalisation des essais (tour, matériau de la pièce et le couple outil et porte outil) et la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont aussi présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe.

Dans le chapitre III, nous exposons les résultats expérimentaux des essais réalisés pour un plan de Taguchi (L18) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiés. Nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse MSR et l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (V_c , f , a_p et M) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Pour cela nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «Design-Expert» pour le calcul des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse.

Au **chapitre IV**, nous exposons les résultats d'une étude d'optimisation. L'optimisation est réalisée suivant deux méthodes.

- **Optimisation mono-objective**, en se basant sur l'approche de Taguchi et l'analyse (signal/ bruit) pour les paramètres technologiques d'usinage (V_c , f , a_p , M et R_a, V_b, F_z).
- **Optimisation multi-objective** en se basant sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Cette optimisation est basée sur quatre critères choisis. Le premier est celui de la minimisation de la rugosité (R_a), le deuxième est celui de la minimisation de l'effort tangentiel (F_z), le 3ème est celui de la minimisation de l'usure (V_b) et le dernier représente une optimisation combinée entre (R_a) et (V_b) en même temps avec de la même importance.

En dernier lieu, notre mémoire de master se termine par une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

Chapitre I

Etude Bibliographique

I.1 Introduction et problématique :

L'usinage par enlèvement de matière représente le procédé le plus répandu dans les domaines de fabrication des pièces mécaniques. Son principe d'enlèvement de la matière permet de donner à la pièce brute la forme et les dimensions des pièces voulues avec une grande précision, à l'aide d'une machine-outil. Depuis leur apparition, les techniques d'usinage ont subi de multiples améliorations. Elles ne cessaient d'être remises en question afin de rester en phase avec les exigences industrielles, qu'elles soient économiques ou écologiques. Toutes en assurant une meilleure productivité en termes de qualité des surfaces usinées, aspects humain et environnemental qui ont toujours été des préoccupations majeures pour les fabricants.

A l'heure actuelle, ils se trouvent dans l'obligation de produire des pièces mécaniques, dont les tolérances géométriques et dimensionnelles sont de plus en plus faibles. Des progrès au niveau de l'ensemble Pièce - Outil - Machine ont été effectués, permettant l'amélioration de l'usinabilité de plusieurs matériaux. De nombreux travaux ont été menés pour trouver les outils et les conditions de coupe optimales permettant de surmonter les problèmes d'usinage de la plupart des matériaux.

I.2 Notion de la coupe des métaux

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de matière (formation de copeaux) en utilisant un outil-coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil matière, c'est -à- dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe...), L'usinage des métaux met en jeu deux processus élémentaires, la création et l'évacuation d'un copeau, qui font jouer deux mécanismes physiques de base, la déformation plastique au sein du copeau et le contact de celui-ci avec l'outil.

La modélisation de la formation du copeau repose sur la compréhension de ces deux mécanismes et a pour objet la prévision de la géométrie du copeau, des efforts de coupe et des échauffements de la pièce et de l'outil à partir des conditions de coupe et des propriétés thermomécaniques du matériau usiné et de l'outil.

Afin de mieux placer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux consiste à façonner et finir une surface de pièce de configuration donnée par un ensemble d'opérations à effectuer à l'aide de machines-outils (**figure I. 1**).

Cette technique ancienne est souvent appelé coupe onéreuse, dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux) [1].

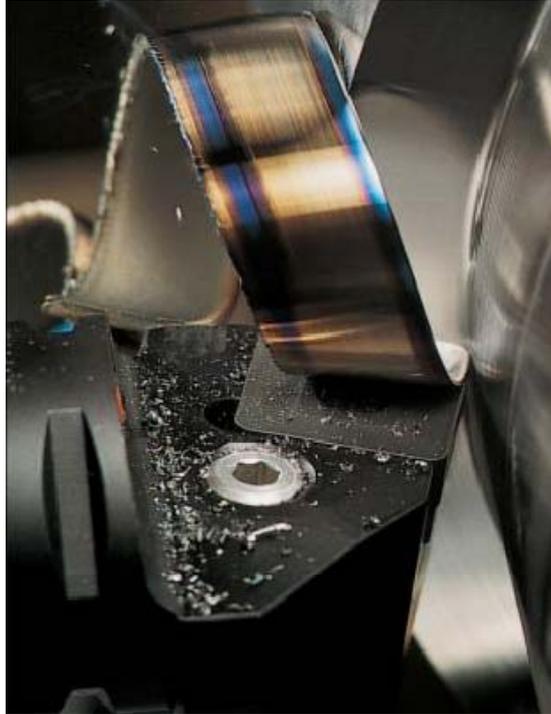


Figure I.1 Usinage par enlèvement de matière.

I.3 Matériaux de coupe

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

Dans le courant du XXe siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) (**Figure I.2**), et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces [2].



Figure I.2 Matériaux de coupe.

I.4 Classification des matériaux des outils de coupe

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure (figure I.3).

Les matériaux de coupe doivent posséder les propriétés suivantes :

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

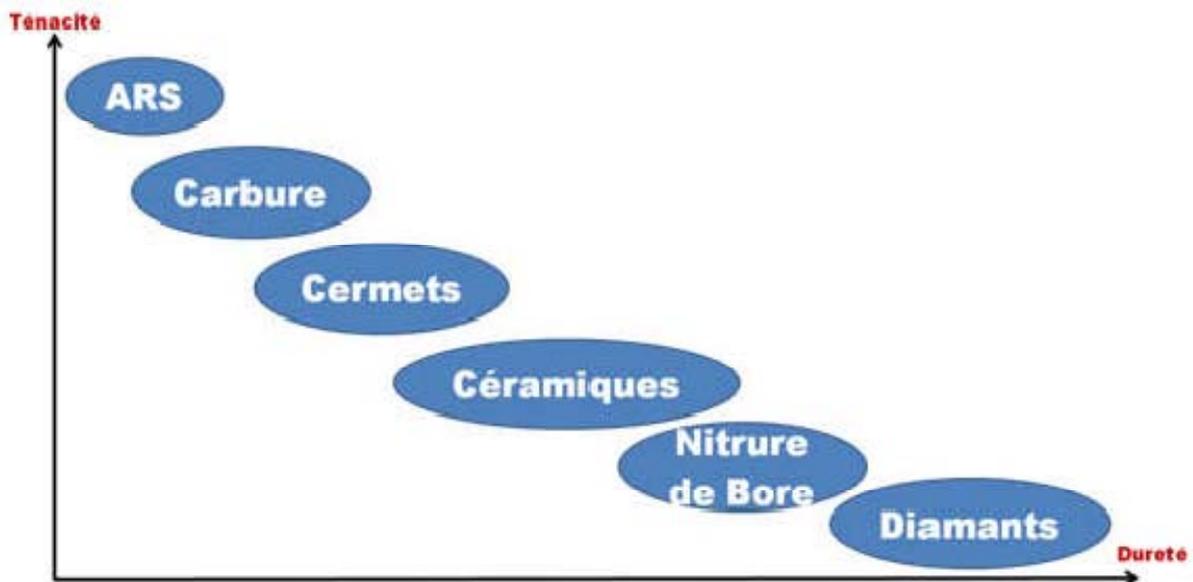


Figure I.3 Classification des Matériaux de coupe.

a) Aciers Rapides

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

Dans tous les cas environ 4 % de chrome(C).

- Du tungstène(W), du molybdène(D), du vanadium(V), en proportions variables.
- Eventuellement du cobalt (K) qui a pour rôle d'augmenter la dureté à chaud.

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

Il existe un grand nombre de combinaisons possibles de ces alliages, la norme NFA35-590 en retient 16, parmi les quelles des aciers sur carburés et des aciers au cobalt [2].

b) Carbure

Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on fixe sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide. Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

-Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement.

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

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

-Liant : cobalt : le plus courant ou nickel

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



Figure I.4 Carbure de tungstène

c) Cermets

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

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité.

Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...) [3].

d) Céramiques

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

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

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil) [2].

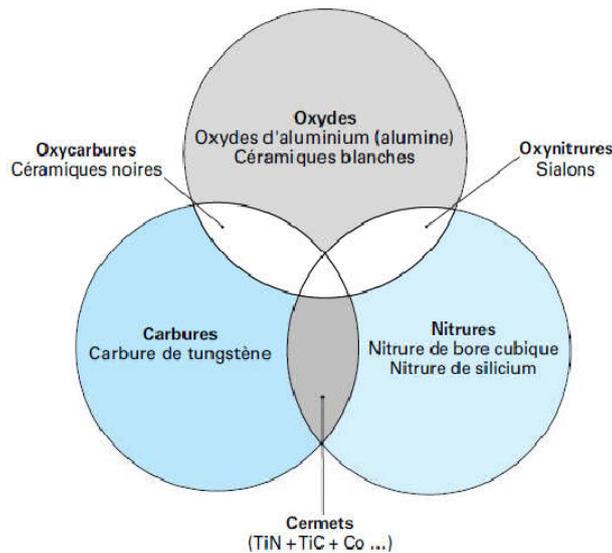


Figure I.5 Céramiques

e) Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le CBN (**figure I.6**) offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant.

Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures...

Son utilisation requiert

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



Figure I.6 Plaque CBN.

f) Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules. Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage). Par contre, son énorme inconvénient réside dans son non stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ se transforme en un morceau de graphite on ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux.

Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usant à basse température :

Alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissable [2].



Figure I.7 Outils de coupe en diamant

I.5 Paramètres de coupe

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

d'améliorer leurs processus de production pour l'augmentation de la productivité en termes de qualité ou quantité et réduisent les inconvénients de ces opérations. La satisfaction de ce besoin ne sera réalisée qu'à l'aide d'un choix judicieux des paramètres et des conditions de coupe [3].

I.5.1 Paramètres d'entries

Les trois paramètres de coupe principaux pour une opération de tournage sont :

a) Vitesse de coupe

La vitesse de coupe, ou « VC », est le chemin circonférentiel (ou périmètre) parcouru par un point situé sur le diamètre extérieur de la pièce pendant une minute.

La vitesse de coupe (**figure I.8**) notée **Vc** est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière.

La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la vitesse de rotation de la pièce.

La vitesse de rotation de la pièce est définie par :

Avec : V_c = vitesse de coupe, D = diamètre de la pièce et ω = vitesse de rotation en tour / min

$$N = \frac{100 \times V_c}{\pi \times D}$$

(I. 1)

$$V_{c\text{tournage}} = \pi D \omega$$

(I. 2)

Où D (mm) est le diamètre final de la pièce [3].

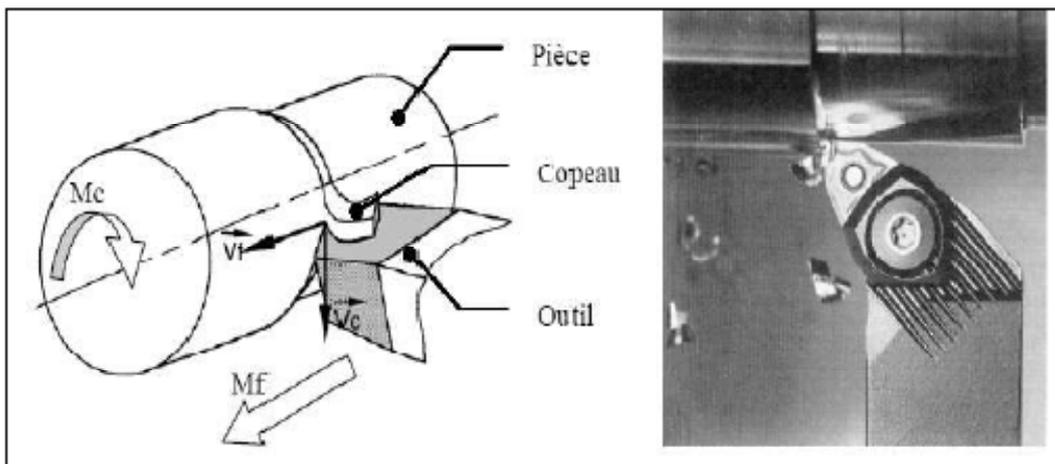


Figure I.8 Opération de chariotage en tournage

b) Profondeur de passe

La profondeur de passe (**figure I.9**) notée a_p , correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage [4].

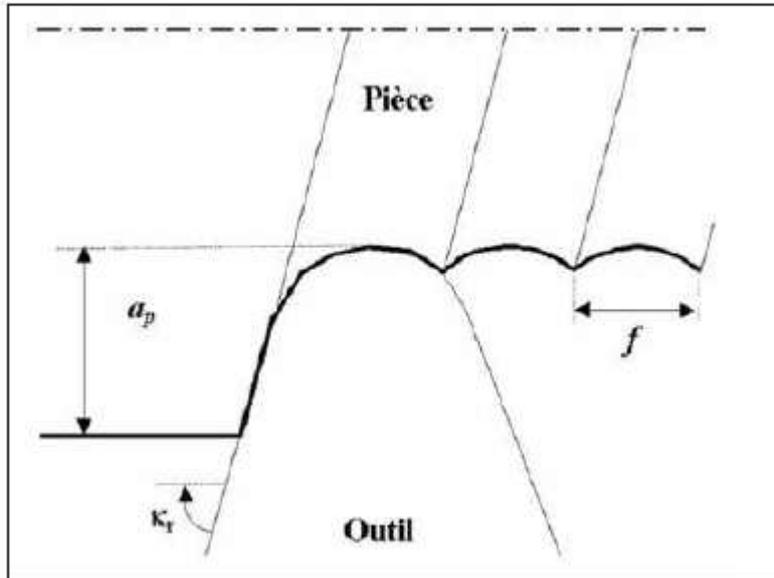


Figure I.9 Profondeur de passe a_p et l'avance f en tournage

c) Avance f

L'avance (**figures I.9, I.10**) notée f , correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage). La profondeur de passe et l'avance vont influencer aussi la formation du copeau car elles modifient la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière [4].

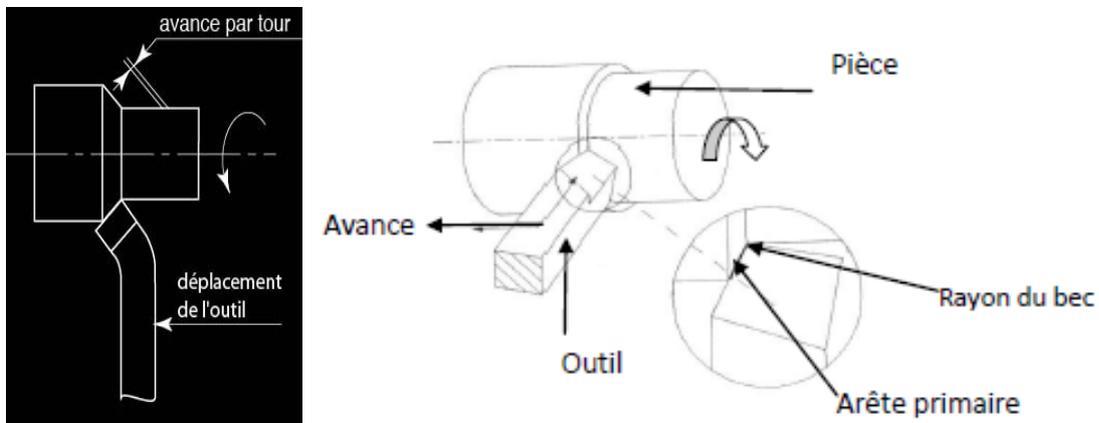


Figure I.10 Avance en tournage f

I.5.2 Paramètres de sorties

On a plusieurs paramètres de sorties on va distinguer les plus essentiels

a) Formation de copeau

Il est évident que plusieurs facteurs influencent la formation du copeau, il s'agit non seulement des paramètres de coupe (avance, profondeur de passe et vitesse de coupe) et de la géométrie de l'outil, mais aussi de la vibration du système et des propriétés mécaniques et métallurgiques de la pièce usinée.

Généralement, lors de l'usinage des matériaux ductiles, la formation du copeau s'accompagne d'une grande déformation plastique dans la zone de cisaillement. Contrairement à l'usinage conventionnel, cette déformation est limitée lors de l'usinage des matériaux durs par l'initiation de la rupture à la surface du copeau. Le copeau ainsi produit est appelé « dent de scie » selon la forme de sa section transversale (**Figure I. 11**).

Il faut noter que des copeaux longs ne sont pas souhaitables car ils peuvent se mettre en contact avec la pièce usinée et par conséquent nuire à son état de surface [4].

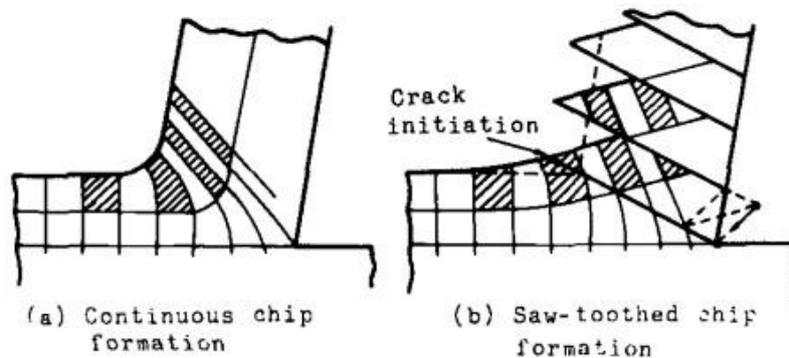


Figure I.11 Mécanisme de formation de copeau, a) Tournage conventionnel, b) Tournage dur

Note : L'épaisseur du copeau minimum dépend de plusieurs facteurs tels que la matière de l'outil de coupe et de sa géométrie (rayon du bec, arête), de la matière usinée et des paramètres de coupe.

b) Rugosité de surface usinée

La rugosité est une caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide.

Réellement, une pièce après usinage, présente toujours des défauts consécutifs à plusieurs raisons. Ces défauts influent directement sur les performances de la pièce lorsqu'elle est fonctionnelle tels que :

- Le frottement de glissement et de roulement.
- La résistance au matage.
- L'étanchéité.
- La résistance à l'écoulement des fluides
- La facilité d'accrochage des revêtements.
- La résistance aux efforts alternés [4].

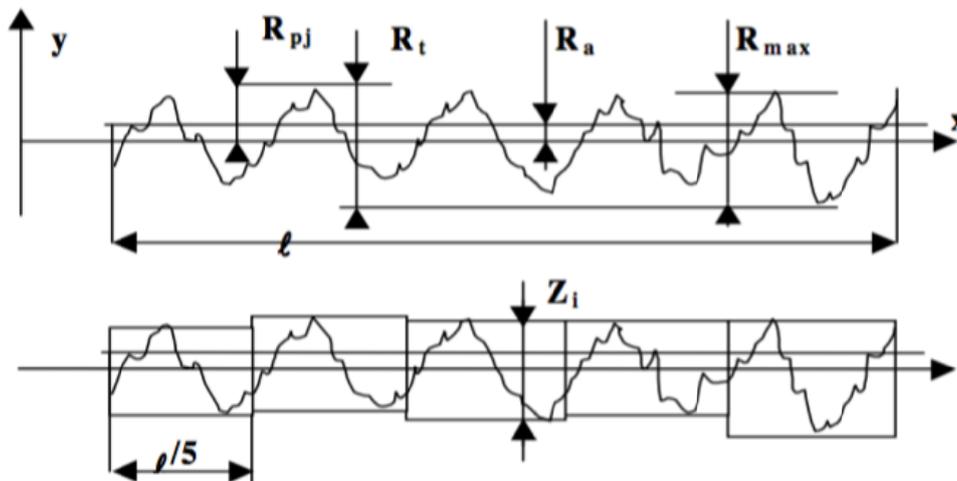


Figure I.12 Critères de rugosité

L'état de surface dépend de :

- la combinaison : avance-rayon de bec.
- la stabilité de la machine, vibration, variation thermique
- la qualité de la coupe : présence de lubrifiant, d'une arête rapportée

c) Usure des outils de coupe

Dans des conditions de production stabilisée, la qualité des surfaces obtenues est directement liée au degré d'usure de l'outil de la ou des arêtes de coupe. Il est donc important de bien caractériser ce phénomène afin de le rendre observable.

L'usure provient des sollicitations mécaniques et thermiques engendrées par les mouvements relatifs entre la pièce, l'outil et le copeau, qui provoquent un transfert de métal entre les surfaces en contact (érosion ou abrasion mécanique et diffusion physico-chimique). Les principaux mécanismes d'usure sont les suivants :

- **L'usure par abrasion** consiste à l'arrachement de micro copeaux par des particules très dure contenues dans la microstructure de la matière usinée. L'élévation de la température fait accentuer cette usure à cause de la diminution de la dureté de l'outil.
- **L'usure par adhésion** favorisée par les grandes pressions, des fragments du copeau peuvent adhérer contre l'outil en forme de microsoudures.
- **L'usure par diffusion** elle est due à la diminution de l'inertie chimique de l'outil provoquée par des températures très élevées. En conséquence, les atomes de l'outil réagissent chimiquement avec les atomes de la matière usinée, spécialement lorsqu'il y'a une affinité chimique entre les deux matières [4].

Les (figures I.13, I.14, I.15) suivantes représentent quelque Formes d'usure.

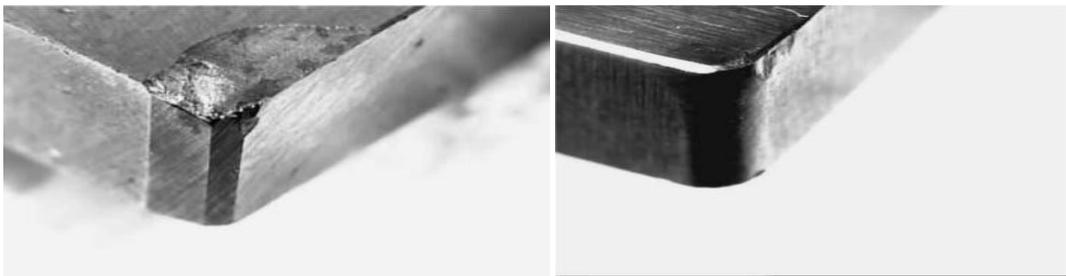


Figure I.13 Usure en cratère

Figure I.14 Usure en dépouille

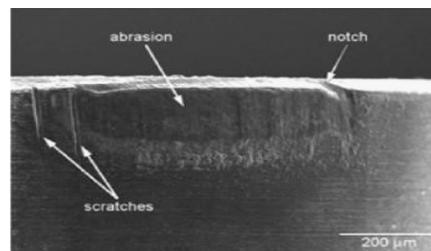


Figure I.15 Usure en entaille

Notre cas d'étude c'est l'usure en dépouille Vb, C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable étant donné qu'elle est plus prévisible et stable. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce. Elle s'observe sur la face de dépouille principale et apparaît suivant une bande striée et Brillante parallèle à l'arête de coupe. Elle est due au frottement de la pièce.

La largeur moyenne de cette bande est notée : V_b

La norme fixe comme critère de durée de vie : $V_b = 0,3 \text{ mm}$

d) Effort de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe

égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire : l'effort double environ quand la vitesse d'avance double).

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage (**figure I.16 figure I.17**).

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

F_y : 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 coupe orthogonale pure.

F_z : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe [2].

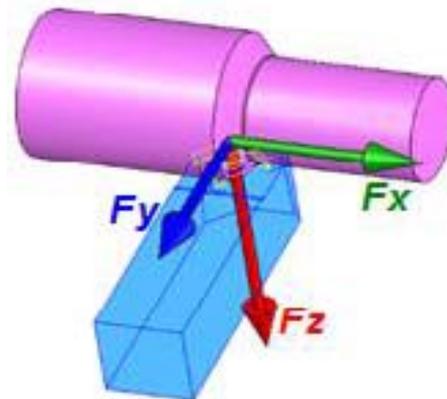


Figure I.16 Composantes d'efforts de coupe.

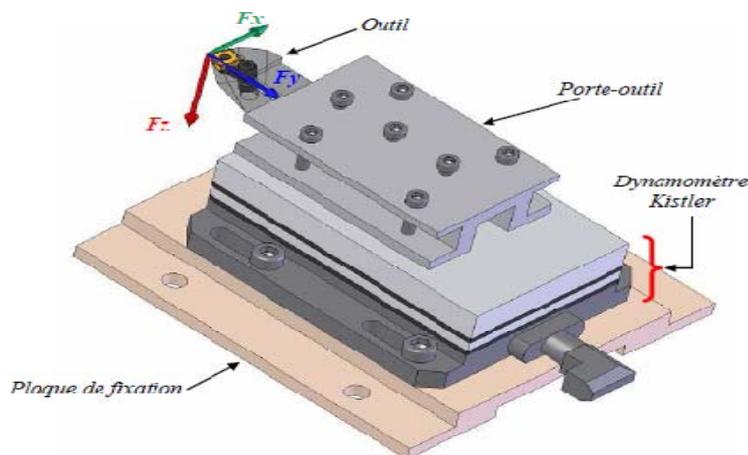


Figure I.17 Plaque de fixation et porte outil

La résultante de coupe Frés (**figure I.18**) étant une diagonale de parallélépipède est égale à :

$$F_{rés} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2} . \quad (I. 3)$$

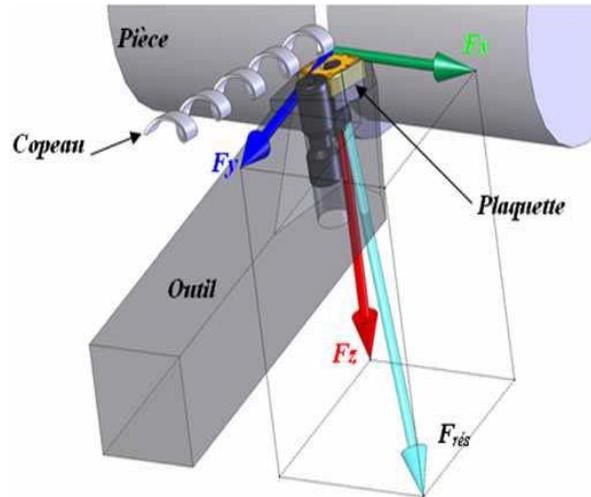


Figure I.18 Rapport des composantes F rés

e) Température de coupe

La formation du copeau dans des conditions d'UGV et l'usinage des pièces dures, met en jeu de très grandes vitesses de déformation et les matériaux sont fortement sollicités.

(Figure I.19).

Pour faire le lien avec l'usure des outils, les sollicitations thermiques doivent être étudiées. Depuis de nombreuses années, l'aspect thermique de la coupe a donc été largement étudié. Pourtant, à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu en usinage, il est très difficile de prédire l'intensité et la distribution des sources de chaleur. Les processus mécaniques et thermiques sont extrêmement couplés, en particulier parce que les propriétés des matériaux varient avec la température. On indique souvent que 90 à 100 % de l'énergie mécanique consommée est finalement convertie en énergie thermique [5].

Les principales sources de chaleur proviennent :

- Des déformations plastiques des zones de cisaillement primaire et secondaire
- De la dissipation du frottement générée à l'interface outil-copeau et entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée de la pièce (**figure I.20**).



Figure I.19 Température dans la zone de coupe en usinage dur

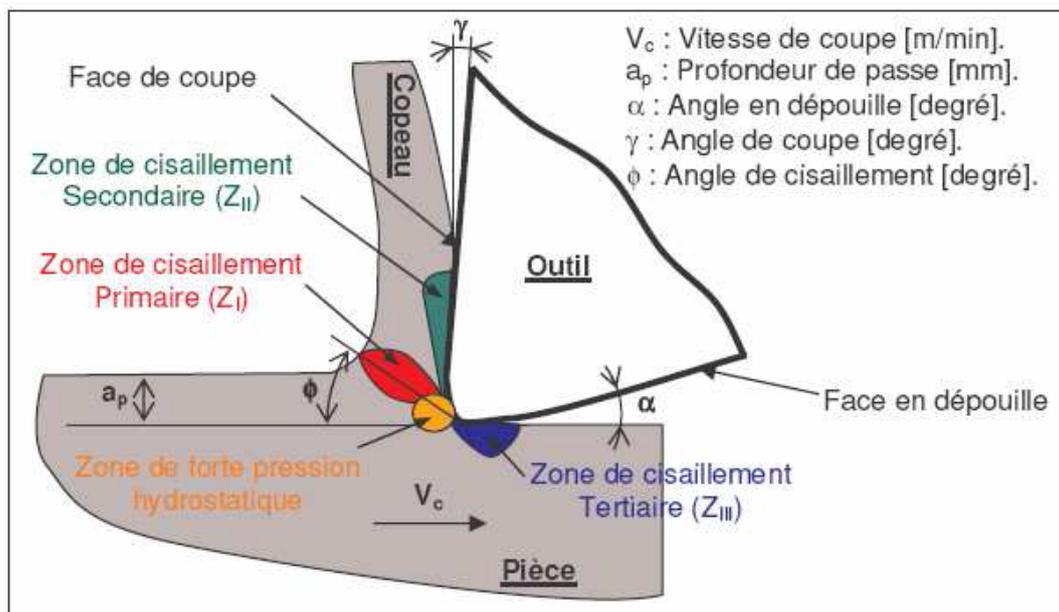


Figure I.20 Différentes zones de déformation lors de la formation d'un copeau

La chaleur ainsi créée va se répartir dans les différentes parties de l'outil, de la pièce et du copeau (Figure I. 21).

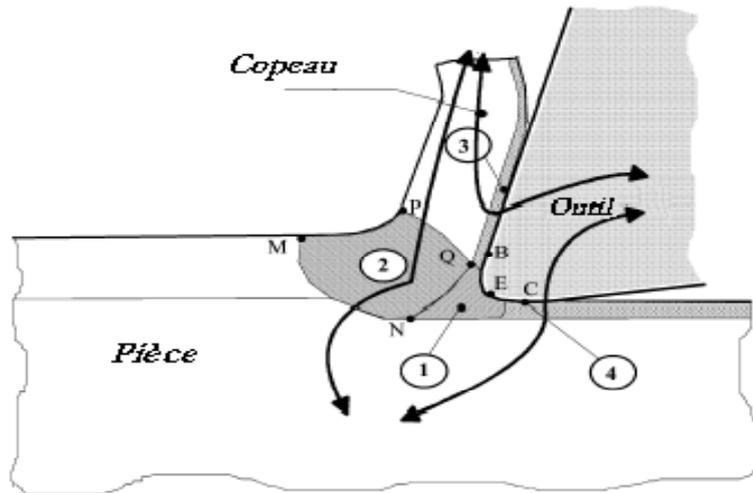


Figure I.21.a Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur

De fait, la répartition des flux ne se fait pas de manière équivalente et dépend bien sûr des conditions de coupe et des propriétés thermiques des matériaux. Seul un faible pourcentage de la chaleur générée est transmis à l'outil et la pièce (**figure I.21.b**), la majorité étant évacuée par le copeau [6].

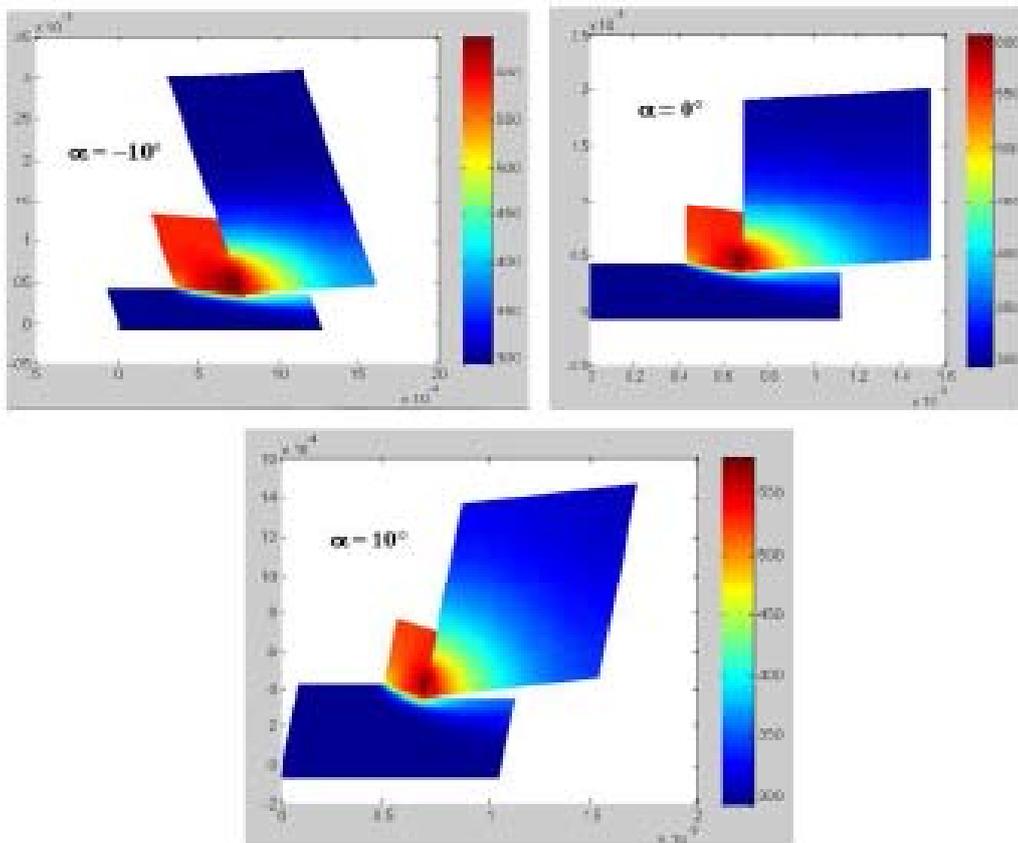


Figure I.21.b Champs de température dans le système pièce- outil- copeau pour différentes avance

I.6 Propriétés pour les plaquettes de coupe

I.6.1 Fonction et Propriétés 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.

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 [7].

I.6.2 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
- 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.

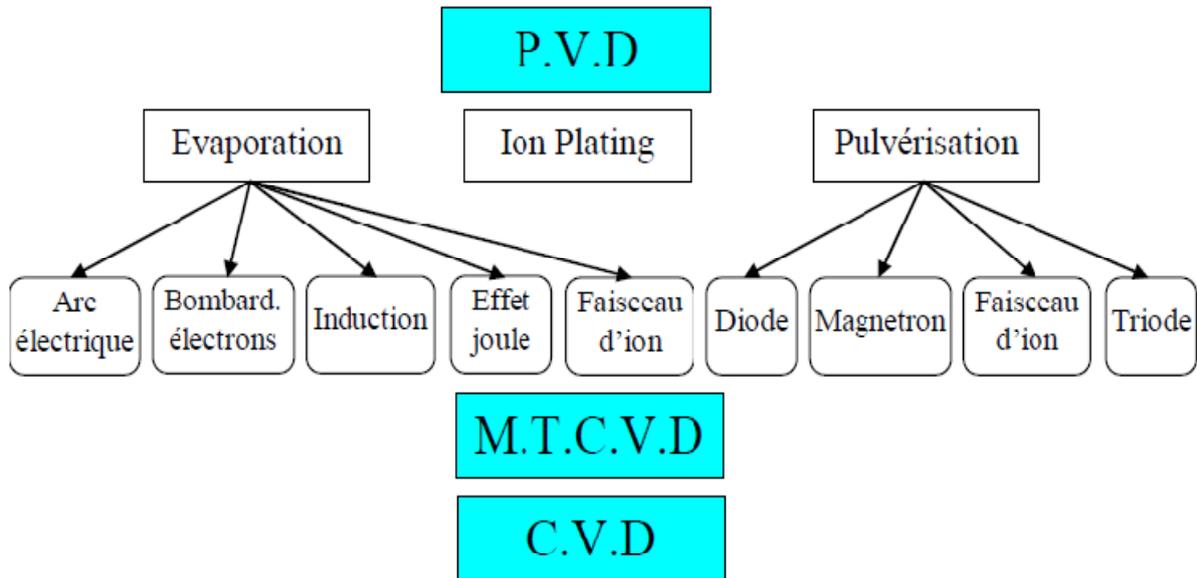


Figure I.22 Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils coupants.

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 termes 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.

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 Différent 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.

a. 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)

b. 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 [7].

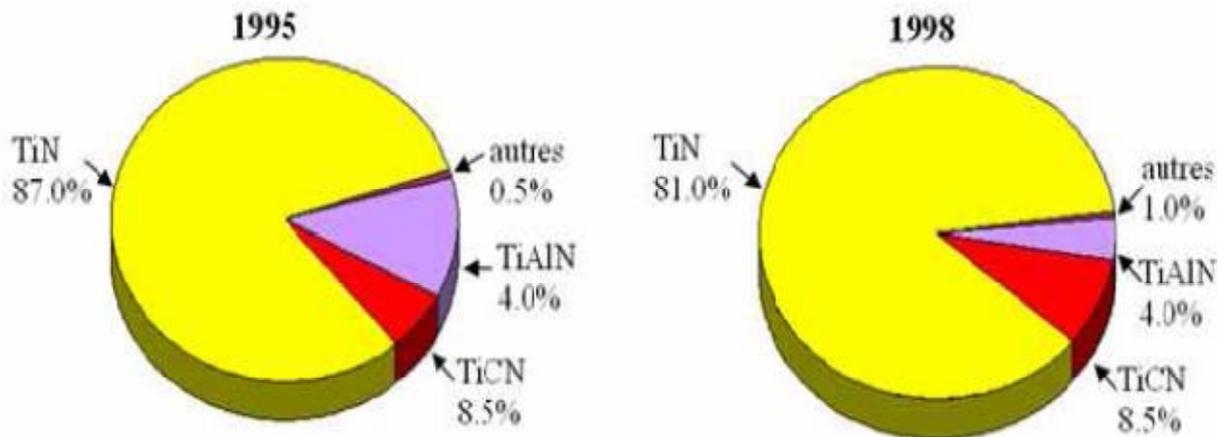


Figure I.23 Statistiques sur l’évolution de l’utilisation relative des revêtements pour outils coupants.

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.

I.6.3 Avantages et inconvénients de carbure métalliques à revêtements PVD et CVD

Les avantages et les inconvénients des deux techniques sont regroupés dans le **Tableau I. 02** :

	avantages	inconvénients
PVD	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement limité - Faible température de dépôt - Bon adhérence de dépôt - Couches en contraintes compressives - Nombreuses possibilité de dépôt - Bonne acuité d'arête de l'outil 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de réalisation le dépôt sur des pièces de forme voisine - Vitesse de dépôt faible - Dépôt non uniformes - Difficultés pour revêtir des outils a géométrie complexe
CVD	<ul style="list-style-type: none"> - Grande pureté de dépôt - Grande variété de composition - Possibilité de déport sur des pièces complexes - Bonne adhérence sur substrat carbure 	<ul style="list-style-type: none"> - Température de la disposition élevée - Investissement élevé - Résidus toxique de déposition - Mauvaise acuité d'arête d'outil - Couches de contraintes de traction - Risques d'attaque de substrat par les gaz 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).

Dans l'industriel on a 3 façons ou méthodes d'usinage qui ont utilisé au niveau d'industrie sont l'usinage à **Sec**, l'usinage à **lubrification** ou arrosage et l'usinage avec le système **MQL**. On va définir les trois modes d'usinage qui sont les suivant :

I.7 Différentes méthodes d'usinage

I.7.1 Usinage à Sec

L'usinage à sec (**Figure I.24**) est une famille de techniques de fabrication de pièces par enlèvement de copeaux dans un milieu sèche (sans lubrification). Le principe de **l'usinage à sec** est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision.

De nos jours, on utilise des machines-outils à commande numérique (MOCN), c'est-à-dire asservies par un système informatique (FAO), permettent d'automatiser partiellement ou totalement la procédure.

L'usinage à sec reste un objectif prioritaire pour certains industriels.



Figure I.24 Opérations de tournage à sec

I.7.2 Usinage avec lubrification (arrosage)

L'usinage à lubrification est un usinage avec un liquide de coupe (**figure I. 25**), et plus généralement un fluide d'usinage, est un liquide refroidissant et lubrifiant conçu spécialement pour le travail et l'usinage des métaux, En plus du refroidissement les liquides de coupe aident l'usinage en lubrifiant l'interface entre l'outil et le copeau. En diminuant les frottements à cette interface, ils diminuent la création de chaleur. Cette lubrification permet également de prévenir l'adhésion du copeau sur l'outil qui risquerait d'affecter l'usinage.

Dans l'industrie grande série, le liquide de coupe permet également d'évacuer les copeaux de la zone de coupe vers un dispositif de centralisation des copeaux.

Parmi Les fonctions du fluide de coupe L'utilisation, lors de l'usinage par enlèvement de matière, des liquides d'arrosage composé principalement d'eau, d'huiles minérales et d'additifs chimiques, permet d'assurer les fonctions suivantes :

- le refroidissement de l'outil.
- la diminution du coefficient de frottement.
- l'amélioration de l'état de surface.
- l'évacuation des copeaux.

Laboratoires de recherche est toujours améliorer les huiles de coupe est proposé plusieurs gamme de produit lubrifiant qui sont le plus propre pour l'environnement.

Les lubrifiants deviennent à 100 % écologiques, comme le démontrait à [CleanMeca la société Expert Environnement](#), qui distribue en France le liquide d'arrosage **SKV-02 de DPI** sans huile ni solvant [8].



Figure I.25 Opérations de tournage à arrosage

I.7.3 Notion de la minimum quantité de lubrification MQL

Depuis longtemps, la lubrification est utilisée dans le milieu industriel car on lui reconnaît une double action bénéfique :

- elle favorise l'évacuation des calories
- elle réduit les frottements de l'outil sur la pièce et du copeau sur l'outil

Vers une production propre, Pour Markus Kühni, l'utilisation de lubrifiants écologiques reste en tout cas la voie royale pour produire propre. « La lubrification en quantité minimale ou juste nécessaire (MQL) diminue bien sûr la consommation de fluide de coupe mais présente néanmoins certains inconvénients », souligne-t-il. À savoir, l'évacuation difficile des copeaux, le nettoyage indispensable des machines et la formation de vapeurs métalliques toxiques pour les opérateurs.

Le **MQL**, également appelé usinage semi-sec, est un des éléments essentiels d'un environnement durable de fabrication. L'objectif principal du système **MQL** contrôle la consommation des ressources en dommages causés à l'environnement, Le Système **MQL** fonctionne en mélangeant des gouttelettes **d'huile** avec pressurisé **l'air** et le transfert de ce mélange à la zone de coupe par buse.

La démarche MQL consiste à remplacer l'arrosage de liquide de coupe par la pulvérisation, dans la zone de coupe et uniquement lorsque cela est nécessaire, d'un brouillard d'air et huile. Cette technologie a été développée à partir des années 1990 en Allemagne sous l'impulsion du gouvernement. Les premières applications dans l'industrie automobile datent du début 2000. Le but de la démarche MQL (**figure I. 26**) est de réduire au strict de minimum la quantité huile nécessaire à la réalisation d'un usinage. Les débits huile utilisés sont généralement inférieurs à 50 ml/ h. l'air est pulsé avec un débit de 150 L/min. en arrosage conventionnel, la pièce est arrosée sous un débit d'environ 100L/min [9].

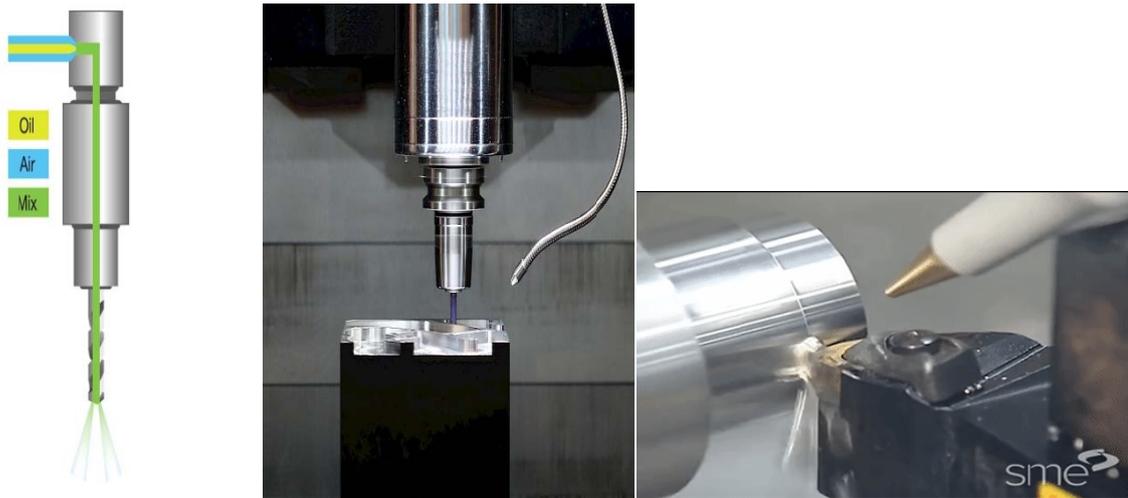


Figure I.26 Système MQL mélange air/huile.

Création du brouillard MQL, Il existe principalement deux systèmes permettant de créer le mélange **air-huile**. Ces deux systèmes se différencient par le lieu de production du mélange : **monocanal et bi-canal**.

Dans le premier système **monocanal**, le mélange est fait à l'extérieur de la machine puis amené au niveau de la zone de coupe par un canal unique. Ce système est décrit sur la (**figure I.27**). Il présente l'avantage de pouvoir être facilement mis en place sur une machine non conçue (au départ) pour réaliser des usinages **MQL**.

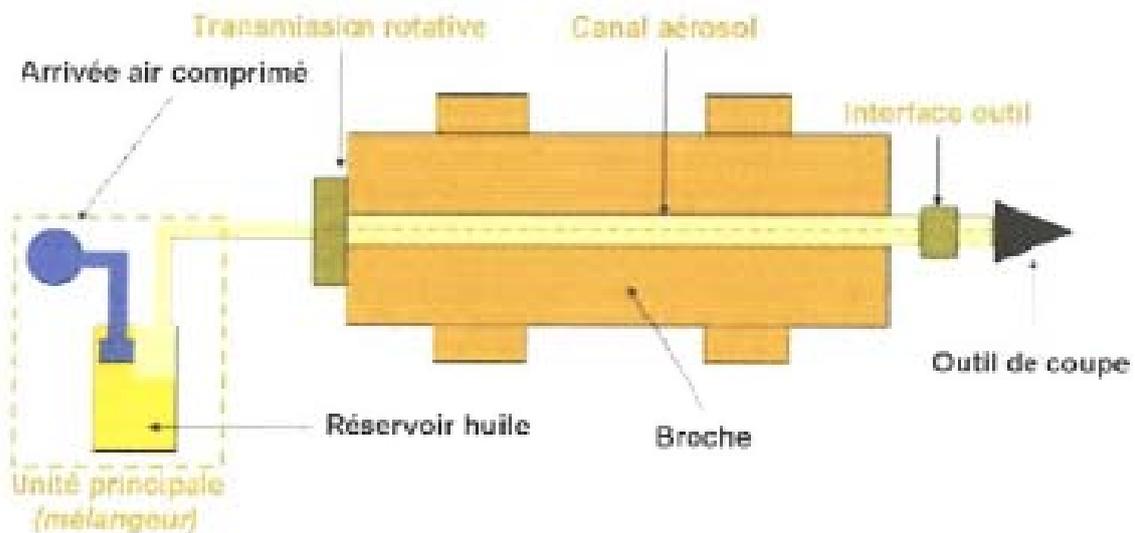


Figure I.27 Système MQL mono canal

Cependant, ce type de système est assez ou réactif lors d'un changement d'outil à cause de la longueur des canaux séparant l'unité principale de l'outil de coupe. La mise en service du dispositif **MQL** n'entraîne pas une distribution immédiate de brouillard à la pointe de l'outil.

Un autre système existe : le système **bi-canal** il permet de réaliser le mélange **air/huile** au plus près du corps de l'outil (**figure I.28**).

Ce type de système nécessite une modification de la broche mais offre un meilleur temps de réponse lors des changements d'outils. On a plusieurs d'avantages et inconvénients des deux technologies permettant de réaliser le brouillard air/ huile (**figure I.29**). On notera que pour certaines applications (notamment lorsque la vitesse de rotation de la broche est supérieure a 15 000 tr/min) seul le système bi-canal permet d'assurer une distribution du brouillard **air/ huile** dans de bonnes conditions (c'est à dire en assurant une bonne homogénéité du mélange air huile en pointe d'outil) [9].

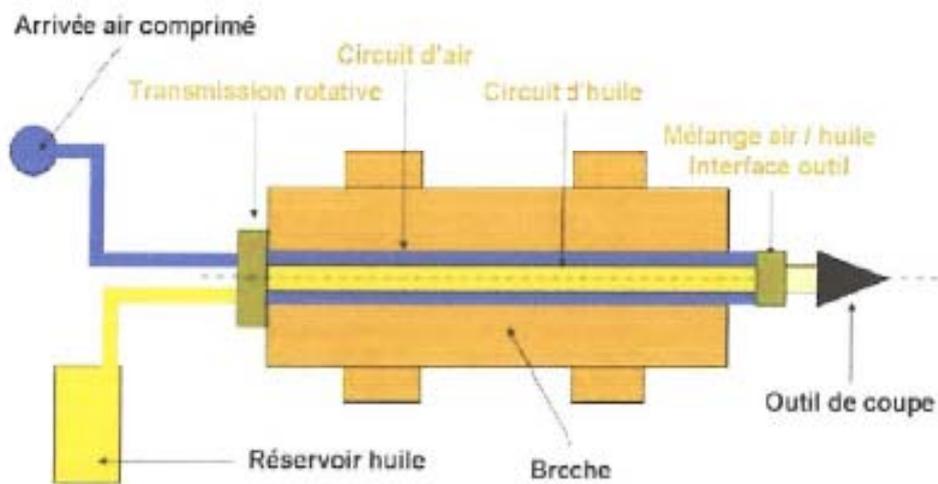


Figure I.28 Systèmes MQL bi-canal

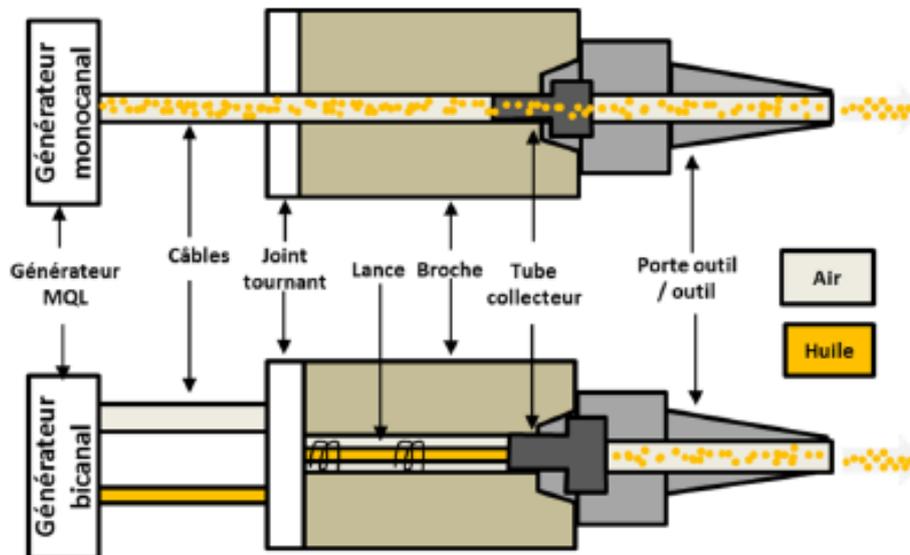


Figure I.29 Principes de générateurs de brouillard mono- et bi canal en interne

Le système MQL intérieur que ce soit le MQL monocanal ou le bi canal est utilisé pour un seul objectif ces de lubrifier pendant l'opération d'usinage et minimiser la consommation

d'huile et pour obtenir un bon résultat au niveau de la rugosité de la surface usinée, mais il ya toujours de avantages et des inconvénients pour les deux systèmes MQL soit le mono canal ou le bi canal, Et ils sont comme suit :

Pour les avantages et l'inconvénient de MQL mono canal sont comme suivant :

- rotation broche limitée à 16 000 tr/min
- influence de la vitesse de rotation de la broche sur la qualité du brouillard
- temps de réaction important
- viscosité d huile est inferieure de 50 mm/s préconisée
- influence faible de la géométrie des canaux internes de l'outil
- pression de L'air est supérieure à 5 Bar.

et pour les avantages et inconvénients de MQL bi canal on a :

- rotation broche jusqu'au 40 000 tr/min
- pas d'influence de la rotation de la broche sur la qualité du brouillard
- temps de réaction réduit, mélange crée proche de la géométrie de coupe
- système indépendant de la viscosité d'huile et de sa température
- forte influence de la géométrie des canaux internes de l'outil
- pression de l'air est supérieure à 4 Bar.

I.7.4 Huiles utilisées en MQL

Le choix d'un huile de coupe en arrosage est guide par son influence sur les performances de coupe. De nombreuses études ont été menées depuis une vingtaine d'années pour améliorer les performances des liquides de coupe et permette de guider le choix du liquide en fonction de l'usinage à réaliser.

En MQL, d'autres critères doivent être pris en compte pour choisir le liquide de coupe :

Biodégradabilité, stabilité à l'oxydation de l'air... En effet, la diminution de consommation de liquide de coupe entraîne l'existence dans l'atelier de production de nombreux réservoirs de liquide (un par machine d'usinage) soumis à des conditions de stockage plus ou moins agressives : variations de température, de luminosité, temps...

Il existe deux principales familles huile de coupe utilisés en MQL, le (**tableau I.3**) proposé par Weinert et al.

- Les esters synthétiques
- Les alcools gras

Esters synthétiques	Alcools gras
Huiles végétales modifiées chimiquement	Alcools a longues chaines fabriques a partir huiles minérales ou de matières premières naturelles
Principales propriétés	
Bonne biodégradabilité	
Peu de risque de réaction a l'eau	
Non toxique	
<ul style="list-style-type: none"> - Point éclair élevé et faible viscosité - Très bonnes propriétés lubrifiantes - Bonne résistance a la corrosion - Faibles propriétés caloriques - Vaporisation avec résidus 	<ul style="list-style-type: none"> -Point éclair bas (comparativement) et forte viscosité - Propriétés lubrifiantes faibles - Meilleurs propriétés caloriques liées a l'évaporations - Peu résidus
Application a la technique d'usinage	
<ul style="list-style-type: none"> -Réduction des frottements recherchée - Bonne qualité de surface demandée - Adhésion du copeau sur l'outil (arête rapportée) - Faibles vitesse de coupe -Lubrification des éléments de guidage 	Evacuation des calories recherchée

Tableau I.3 Caractéristiques des huiles de coupe utilisées en MQL

I.8 Travaux de recherche

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés lors du tournage qui traitent l'usinage de l'acier AISI D3, l'usure des outils de coupe, la rugosité de surface, l'évolution des efforts de coupe et aussi le mode de lubrification (usinage à sec, MQ Let sous lubrification abondante).

Mozammel Mia et al [11] ont réalisé une étude sur l'optimisation des conditions de coupe en utilisant l'approche de Taguchi basée sur le rapport signal/bruit. L'usinage est réalisé en tournage dur de l'acier AISI 1060 dans un environnement MQL en utilisant un outil en carbure cémenté revêtu. Les auteurs ont utilisé un plan de Taguchi L8 (**tableau I.4**) en

variant la vitesse de coupe pour quatre niveaux (45, 60, 75 et 90) m/min, la profondeur de passe en deux niveaux (1,0 et 1,5)mm et l'avance en deux niveaux (0.1 et 0.2)mm/tr. Les paramètres de sorti été les critères de rugosité de surface (R_a , R_q et R_z), l'usure (V_b et V_s) et du taux d'enlèvement de matière (MRR). Les résultats trouvés ont indiqué que :

- L'optimisation basée sur le rapport signal/bruit de Taguchi a révélé qu'une vitesse de coupe de 90 m/min, avance de 0,2 mm/tour et profondeur de coupe de 1,5 mm (tous les paramètres aux valeurs les plus élevées) sont responsables d'une rugosité de la surface minimale et du taux d'enlèvement de matière maximal. Au contraire, les valeurs les plus basses des paramètres de coupe sont accréditées à l'usure minimale sur le flanc principal. Enfin, le flanc auxiliaire le plus bas l'usure est constatée à une vitesse de coupe de 60 m/min, avec une avance de 0,2 mm/touret une profondeur de coupe de 1,0 mm.

- La vitesse de coupe, et non l'avance a principalement affecté les paramètres de rugosité de la surface ; dans le cas de l'usure des flancs de l'outil, l'influence la plus importante est créée par la profondeur de coupe suivie de la vitesse de coupe ; l'avance est considérée comme le facteur affectant le taux d'enlèvement de matière principalement (MRR).

-D'après les images, l'adhérence, l'abrasion et l'accumulation d'arêtes rapportée ont été considérées comme les principaux mécanismes d'usure (**Figure I.30**).

Table 4
Experimental results of responses according to Taguchi L_8 orthogonal array.

Exp. order	Roughness parameters (μm)			Flank wear (μm)		MRR (mm^3/min)
	R_a	R_q	R_z	V_B	V_S	
1	1.80	2.36	11.37	50	50	4500
2	2.66	3.25	13.26	80	60	13,500
3	2.92	3.63	13.89	60	40	6000
4	2.48	3.00	13.09	100	60	18,000
5	2.09	2.57	11.26	120	70	11,250
6	2.40	3.16	13.07	70	50	15,000
7	3.30	4.11	15.60	100	70	13,500
8	2.54	3.16	13.78	80	40	18,000

Tableau I.4 Résultats expérimentaux des réponses selon la matrice taguchi L_8

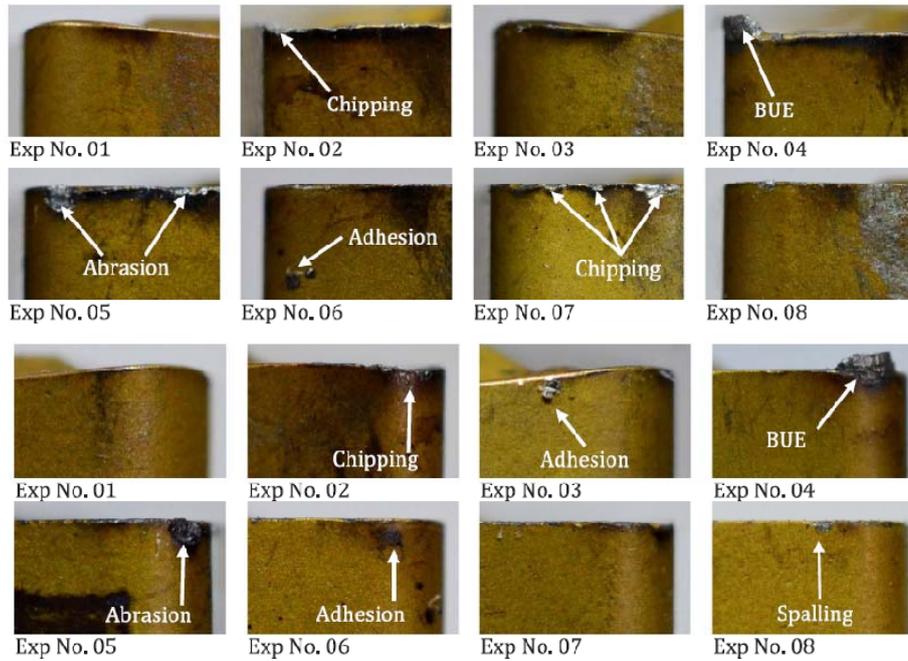


Figure I.30 Représenté les expériences (copeaux, abrasion, adhésion)

Nouioua.M et al. [12] Ont fait étude comparative des conditions de refroidissement, y compris Technologie MQL sur les facteurs d'usinage dans un environnement.

Les essais ont été effectués à l'aide d'un tour conventionnel « TOS TRENCIN » modèle SN-40. Le matériau de la pièce est en acier X210Cr12 de 80 mm de diamètre et une longueur de 330 mm. Le carbure de tungstène P15-CVD a été choisi comme outil de coupe avec différents rayons de nez. La référence du porte-outil est PSBNR 2525K12 avec la géométrie suivante : $\chi_r = +45^\circ$, $\lambda = 6^\circ$, $\gamma = 6^\circ$, et $\alpha = +6^\circ$.

Le porte-outil a été branché sur quatre composants de dynamomètre piézoélectrique (Kistler 9257B), et un environnement de programmation graphique (Dynoware 2825A1-1) pour l'analyse et la visualisation des données. En ce qui concerne la rugosité de surface de la pièce usinée, les auteurs ont utilisé un rugomètre (Mitutoyo SurfTest SJ-201) avec un rayon de $5 \mu\text{m}$. L'usure a été mesurée à l'aide d'une caméra CCD équipée d'un microscope optique HUND (W-AD). Les conditions de coupe choisies sont mentionnées au (tableau I.5).

Pour la condition de refroidissement (C), les essais d'usinage ont été effectués dans le cadre de la lubrification traditionnelle, l'usinage à sec et la technique MQL en utilisant huile synthétique [12].

Level	ap (mm)	Vc (m/min)	f (mm/rev)	r (mm)	Cooling condition
01	0.15	180	0.08	0.4	Dry
02	0.30	250	0.12	0.8	Wet
03	–	350	0.16	1.6	MQL (120 ml/h)

Tableau I.5 Facteurs et niveaux utilisés dans le plan expérimental

La combinaison des paramètres de la matrice orthogonale L18 avec les valeurs mesurées de rugosité de surface, coupage la force, la puissance de coupe et le taux d'enlèvement des métaux sont représentés dans le (tableau I.6).

No.	Cutting parameters					Response factors			
	ap (mm)	Vc (m/min)	f (mm/rev)	r (mm)	C	Ra (µm)	Fz (N)	Pc (W)	MRR (mm ³ /min)
1	0.15	180	0.08	0.4	Dry	0.87	93.02	279.06	2160
2	0.15	180	0.12	0.8	Wet	0.62	87.74	263.22	3240
3	0.15	180	0.16	1.6	MQL	0.54	93.14	279.42	4320
4	0.15	250	0.08	0.4	Wet	0.91	64.02	266.75	3000
5	0.15	250	0.12	0.8	MQL	0.77	84.67	352.79	4500
6	0.15	250	0.16	1.6	Dry	0.75	106.21	442.54	6000
7	0.15	350	0.08	0.8	Dry	0.55	62.96	367.27	4200
8	0.15	350	0.12	1.6	Wet	0.58	111.69	651.53	6300
9	0.15	350	0.16	0.4	MQL	1.29	80.57	469.99	8400
10	0.30	180	0.08	1.6	MQL	0.43	116.91	350.73	4320
11	0.30	180	0.12	0.4	Dry	1.35	113.29	339.87	6480
12	0.30	180	0.16	0.8	Wet	0.77	151.12	453.36	8640
13	0.30	250	0.08	0.8	MQL	0.51	107.57	448.21	6000
14	0.30	250	0.12	1.6	Dry	0.41	137.97	574.88	9000
15	0.30	250	0.16	0.4	Wet	1.27	140.75	586.46	12,000
16	0.30	350	0.08	1.6	Wet	0.39	95.37	556.33	8400
17	0.30	350	0.12	0.4	MQL	0.73	127.83	745.68	12,600
18	0.30	350	0.16	0.8	Dry	1.02	155.3	905.92	16,800

Tableau I.6 Résultats expérimentaux de l'usinage de l'acier X210cr12

L'objectif principal est d'analyser l'influence des conditions de coupe (ap, Vc, f, r, C) sur la variation totale des sorties étudiés (Ra, Fz, Pc, et MRR) les (Figures I.31, I.32, I.33) représente les Graphiques des surfaces 3D des réponses.

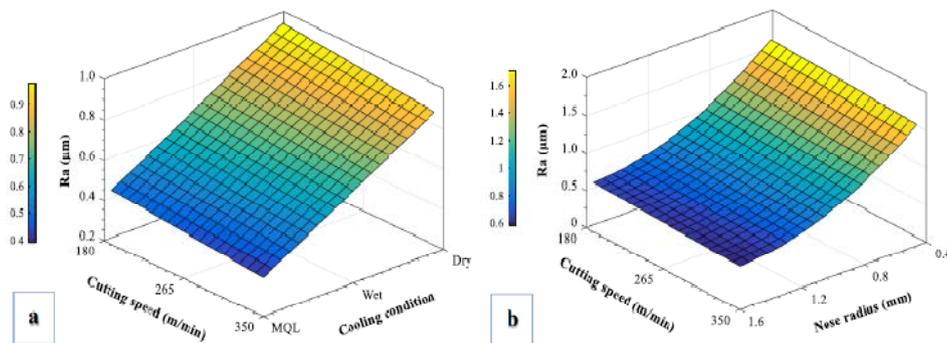


Figure I.31 Graphiques de surface 3D de réponse pour la rugosité de surface (Ra)

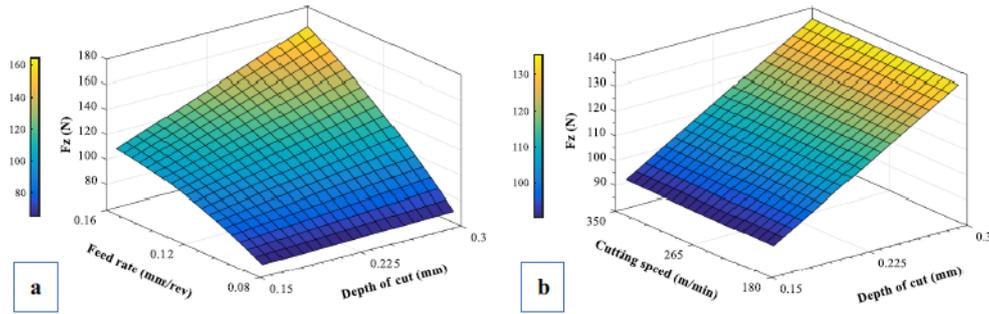


Figure I. 32 Représentation graphique de la surface en 3D pour la force tangentielle (F_z)

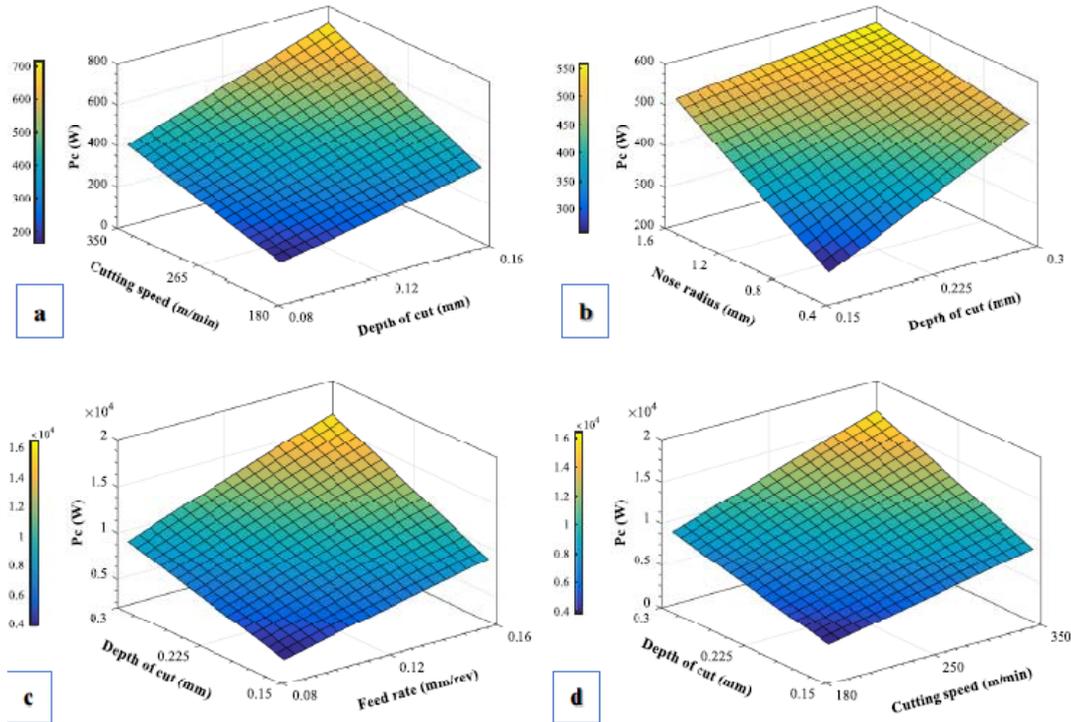


Figure I. 33 Graphiques de surface 3D de réponse pour la puissance de coupe (P_c ; a, b) et le taux d'élimination des métaux (MRR; c, d)

Après cette étude ils conclurent que :

- L'utilisation d'inserts de coupe avec un grand rayon de nez améliore la qualité de surface.
- L'effort de coupe tangentielle est largement affecté par la profondeur de coupe avec une contribution de 56,68 % .
- La puissance de coupe est principalement affectée par la vitesse de coupe et la profondeur de coupe.
- Le profil de rugosité, après le tournage avec un multicouche outil sous refroidissement sec et humide, montre beaucoup plus les perturbations tribologiques que dans le cas de l'usinage MQL.
- La carte de visualisation 3D de la surface de réponse est un indice d'enquête important. Il a

confirmé certaines caractéristiques des surfaces produites sous les différentes conditions de refroidissement.

-L'usinage MQL peut être qualifié d'usinage vert parce qu'il utilise une petite quantité de fluide de coupe comparativement à la lubrification abondante.

Bouchelaghem.H et al. [13] Ont conduit une recherche expérimentale pour déterminer l'influence des variables de coupe tels que, la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la rugosité, l'effort de coupe, la durée de vie et la température dans la zone de coupe, lors du tournage dur de l'acier AISI D3 (60HRC) avec des plaquettes en CBN. Les auteurs ont montrés dans cette étude, que la rugosité de surface est très sensible à la variation de l'avance et aussi ils ont trouvé que le principal mécanisme d'usure pour les outils CBN est l'abrasion du liant du matériau CBN par les particules dures en carbure de la pièce (**Figure I.34**). En plus, les résultats montrent que l'effort axial est très sensible à la variation de la profondeur de passe.

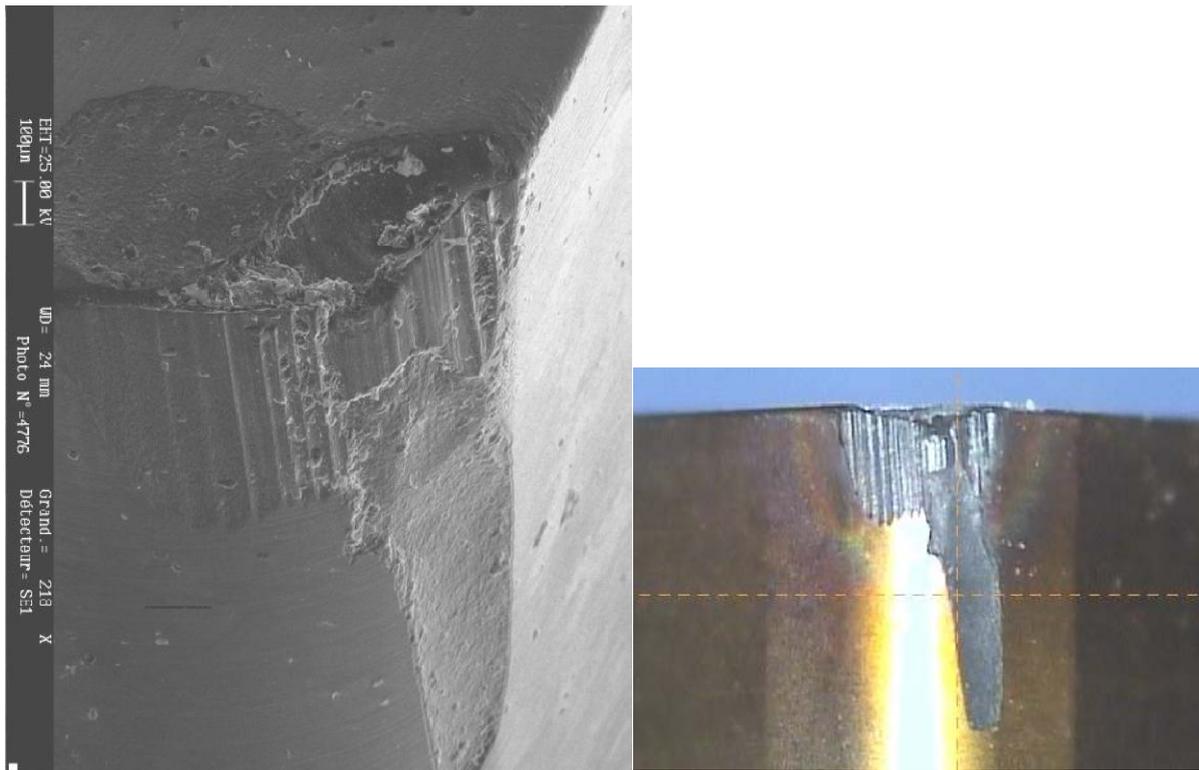


Figure I.34 Photo par MEB de l'usure de dépouille et en cratère d'un outil de coupe en CBN.

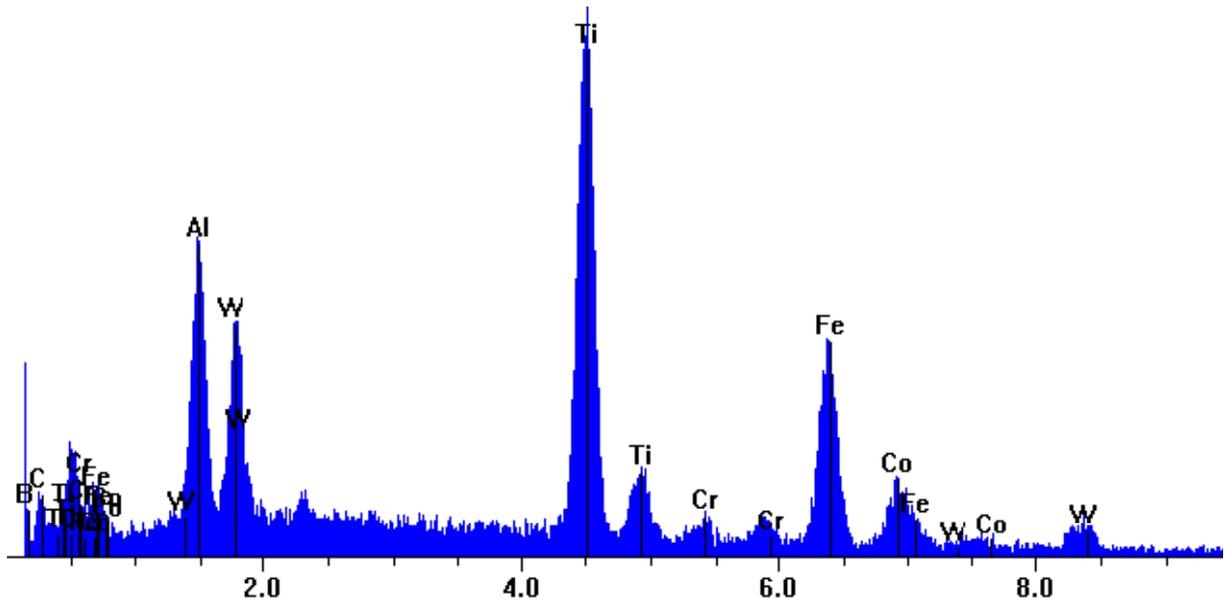


Figure I.35 Exemple de l'analyse par rayon X sur la surface de dépouille d'un outil de coupe en CBN.

Varaprasad.Bh et al. [14] Ont réalisé une étude expérimentale (**tableau I.8**) basée sur un plan composite central (CCD) qui a pour but, d'élaborer un modèle mathématique par la Méthodologie de surface de réponse (RSM). Ce modèle mathématique permet de prévoir l'usure en dépouille d'outil de coupe (plaquette en céramique mixte CC6050 avec un rayon de 0.8 mm) durant l'usinage dur de l'acier AISI D3. Les auteurs ont étudié les effets des Interactions de la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de coupe à l'aide des tracés de contours et des surfaces de réponse (**Figure I.36**). Ils ont vérifié l'adéquation du modèle développé par l'analyse de variance (ANOVA) (**tableau I.7**).

D'après cette étude, les auteurs ont trouvé les conclusions suivantes :

- La méthodologie de surface de réponse (RSM) basé sur les plans d'expériences est un outil très efficace pour déterminer les paramètres de coupe optimale à vitesse de 165m/min, l'avance de 0,05 mm/tr et la profondeur de coupe de 0,3 mm pour atteindre une faible usure de l'outil de 0.148 mm.
- La profondeur de coupe est le paramètre qui a une grande influence sur l'usure en dépouille de l'outil de coupe. La vitesse de coupe et l'avance ont peu d'influence sur la variation totale de l'usure.
- La relation entre la caractéristique de performance et les paramètres de coupe est exprimée par une équation de régression multiple et le modèle mathématique de l'usure V_b est trouvé comme suit :

$$V_b = 0.172945 + 0.004550V_c + 0.003700f + 0.013400ap + 0.009125V_c \times f + 0.010125V_c \times ap + 0.005125f \times ap \quad R^2 = 96.5\%$$

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.003898	0.003898	0.000433	30.79	0.000
Linear	3	0.002140	0.002140	0.000713	50.70	0.000
Square	3	0.000062	0.000062	0.000021	1.47	0.280
Interaction	3	0.001696	0.001696	0.000565	40.20	0.000
Residual Error	10	0.000141	0.000141	0.000014		
Lack-of-Fit	5	0.000061	0.000061	0.000012	0.76	0.616
Pure Error	5	0.000080	0.000080	0.000016		
Total	19	0.004039				

Tableau I.7 Analyse de la variance pour l'outil porte V_b (mm)

Experiment. No.	Un Coded Form			Tool Flank wear
	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	V_b (mm)
1	145	0.05	0.3	0.1740
2	165	0.05	0.3	0.1480
3	145	0.1	0.3	0.1560
4	165	0.1	0.3	0.1630
5	145	0.05	0.9	0.1730
6	165	0.05	0.9	0.1840
7	145	0.1	0.9	0.1720
8	165	0.1	0.9	0.2230
9	145	0.075	0.6	0.1750
10	165	0.075	0.6	0.1775
11	155	0.05	0.6	0.1680
12	155	0.1	0.6	0.1700
13	155	0.075	0.3	0.1630
14	155	0.075	0.9	0.1860
15	155	0.075	0.6	0.1780
16	155	0.075	0.6	0.1710
17	155	0.075	0.6	0.1780
18	155	0.075	0.6	0.1700
19	155	0.075	0.6	0.1690
20	155	0.075	0.6	0.1720

Tableau I.8 Résultats expérimentaux pour l'usure des outils

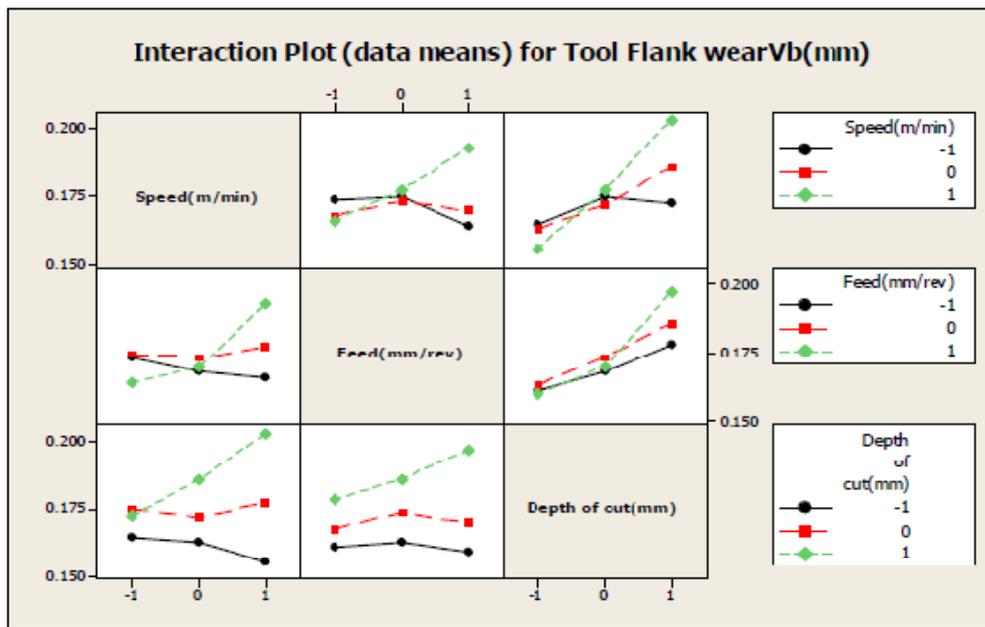


Figure I.36 Graphique d'interaction pour l'usure moyenne du flanc de l'outil.

Les tracés de surface 3D de l'usure du flanc de l'outil par rapport aux différentes combinaisons de paramètres de coupe sont présentés ci-dessous (Figure I.37).

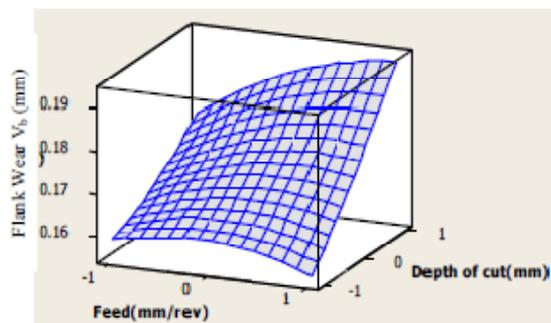


Fig.7a Surface plot for Flank wear Vs Depth of cut and Feed

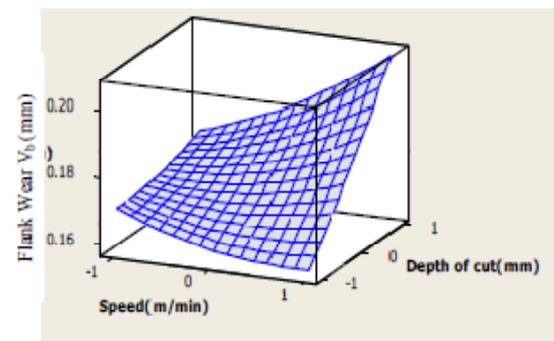


Fig.7b Surface plot for Flank wear Vs Depth of cut and Speed

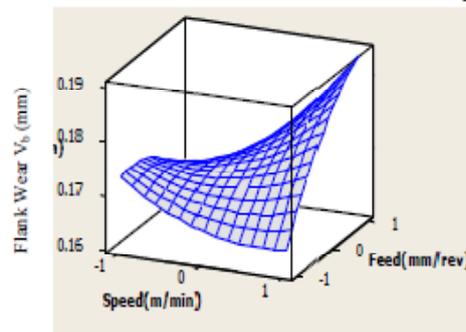


Fig.7c Surface plot for Flank wear Vs Feed and Speed.

Figure I.37 Tracés de surface 3D

Doniavi et al [15] Ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (MSR) afin de développer un modèle empirique pour la prédiction de la rugosité de surface et de choisir les Conditions de coupe optimales lors du tournage dur. Les auteurs ont montré que l'avance a un Impact significatif sur la rugosité de surface.

L'analyse de variance (ANOVA) a été appliquée et a montré que l'influence de la profondeur de coupe sur la rugosité de surface est faible par rapport à l'avance et la vitesse de coupe.

I.9 Conclusion

Ce chapitre a été réservé à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux en général et le tournage en particulier. La dernière partie de cette étude bibliographique est consacrée Aux travaux de recherche en tournage et particulièrement la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe.

Cette étude nous a permis de comprendre les phénomènes physiques intervenants dans le processus de coupe et aussi les méthodes modernes d'optimisation des conditions de coupe.

Le prochain chapitre présente l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'ensemble du matériel exploité pour effectuer cette étude expérimentale, afin d'identifier le comportement du matériau usiné en évaluant les différents paramètres technologiques d'usinage, tels que la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe tangentiel (F_z), l'usure d'outil (V_b). Par rapport aux conditions de coupe. Nous présentons au même temps la démarche utilisée pour la planification des expériences et de leurs conditions de réalisation. Les essais de tournage de l'acier **AISI D3** qu'on a réalisés ont été effectués au niveau du Laboratoire de Mécanique et de Structure (LMS) du département de génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945- Guelma.

II.2 Matériels utilisés

II.2.1 Machine outil

Les expériences de tournage que nous avons effectuées lors de notre étude ont été réalisées à l'aide d'un tour conventionnel « TOS TRENCIN » modèle SN40 (**Figure II.1**) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- puissance du moteur électrique : 6.6 kW.
- vitesses de rotation possibles : 45 à 2000 tr/min.
- avance par tour en millimètres par tour : 0.08 à 6.4 mm/tr.



Figure II.1 Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

La **Figure II.2** illustre la nomenclature de différentes parties du tour à charioter et à fileter modèle SN 40 utilisé durant les essais et les aussi les différents mouvements sur la machine.

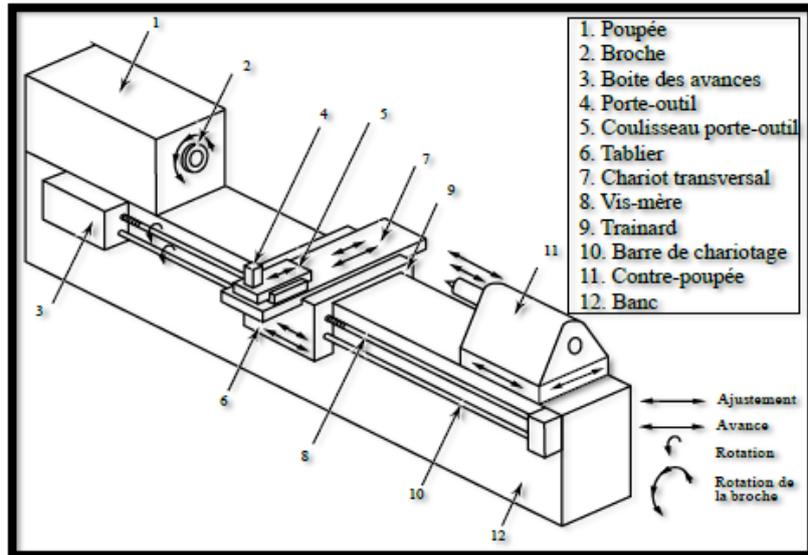


Figure II.2 Nomenclature des différents organes du tour modèle SN40.

Notre tour modèle SN40 est équipé d'un variateur de vitesse (**Figure II.3**) qui permet la sélection de n'importe vitesse de coupe. La (**figure II.4**) illustre l'utilisation d'un capteur de vitesse utilisé afin d'estimer le nombre de tour exacte de la broche.



Figure II.3 Variateur de vitesse de coupe.



Figure II.4 Capteur de vitesse.

II.2.2 Matériau de la pièce à usiner

Le matériau utilisé dans ces expériences est l'acier **AISI D3**, également connu sous le nom de **DIN 1.2080 (Werkstoff)**. C'est un acier à outils durcissant à l'air, à haute teneur en carbone et en chrome. Il présente une excellente résistance à l'abrasion et à l'usure et présente une bonne stabilité dimensionnelle et une résistance à la compression élevée.

Le (**tableau II.1**) montre la composition chimique de l'acier AISI D3.

Tableau II.1 Composition chimique de l'AISI D3, (en% en poids)

C	Si	Mn	Cr	S	P
2.05	0.25	0.3	11.5	0.02	0.025

Les éprouvettes utilisées possèdent un diamètre $d = 80 \text{ mm}$ et une longueur $L = 350 \text{ mm}$ (**Figure II.5**).



Figure II.5 Matériau usiné AISI D3.

II.2.3 Plaquettes et porte outil

Pour la réalisation des essais, toutes les opérations de tournage ont été effectuées par 03 types de plaquettes de coupe. Une plaquette de coupe en carbure métallique **GC4215** à revêtement **CVD**, une autre plaquette de coupe en carbure métallique **GC1125** à revêtement **PVD** et enfin une plaquette en **cermet 1525**. Le seul type de porte outil qui a été utilisé est le **PSBNR2525K12** avec un angle de direction principal 75° (**figure II.6**).

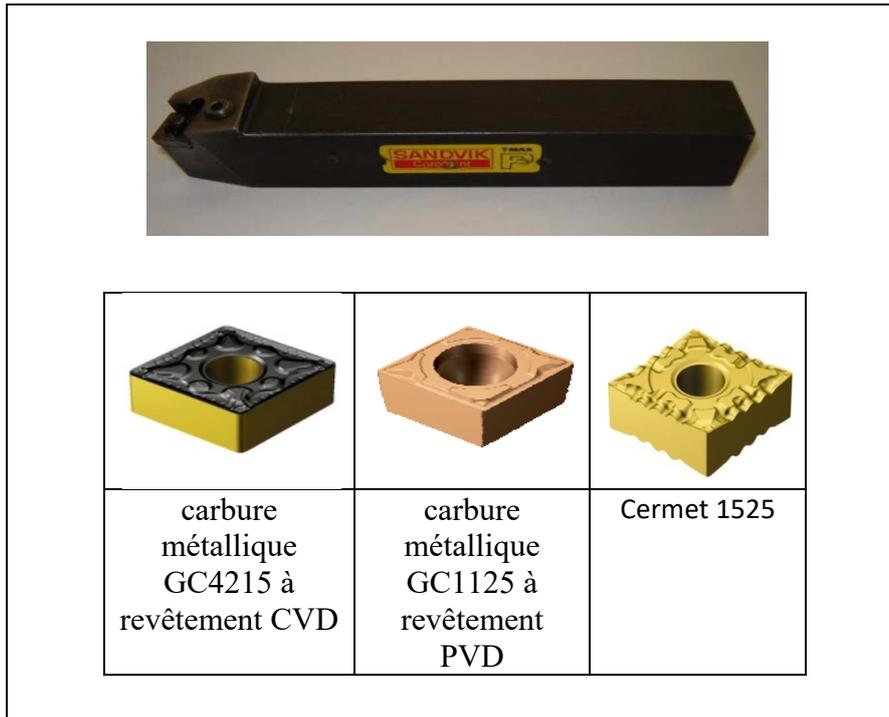


Figure II.6 Plaquettes et porte outil.

II.2.4 Instruments de mesure utilisés

Pour les différentes mesures des paramètres de sortie, 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 (**Surftest_SJ-210 Mitutoyo**).
- Un microscope pour la mesure de l'usure (**Visuel Gage 250**).

II.2.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme kistler)

Les mesures de l'amplitude des efforts de coupe ont été effectuées par le biais d'un dynamomètre (**KISTLER9257B**) qui compte parmi les équipements les plus fiables pour les mesures des efforts de coupe, il comporte plusieurs éléments desquels on cite : la plate-forme, l'amplificateur de charge, un PC qui dispose du logiciel **DYNOWARE** pour le traitement des résultats.

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.7**). La plate-forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure.

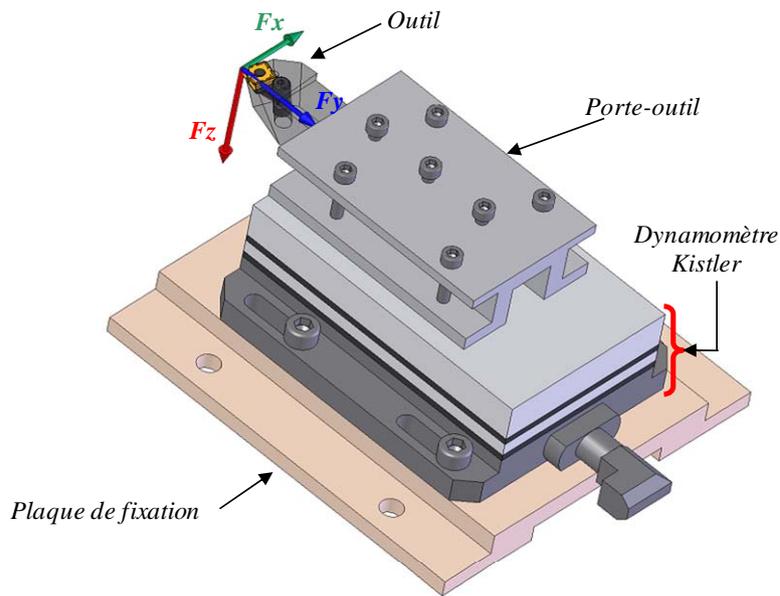


Figure II.7 : Montage du dynamomètre sur la table.

Les réactions qui agissent sur cette plaque lors de l'opération d'usinage sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des charges. Ensuite, l'acquisition de ces dernières est assurée par le PC disposant du logiciel (DYNOWARE) qui analyse, traite et converti ces charges en signaux, exprimant ainsi les forces produites lors du processus du tournage en trois composantes F_x , F_y et F_z , (figures II.8 et II.9).

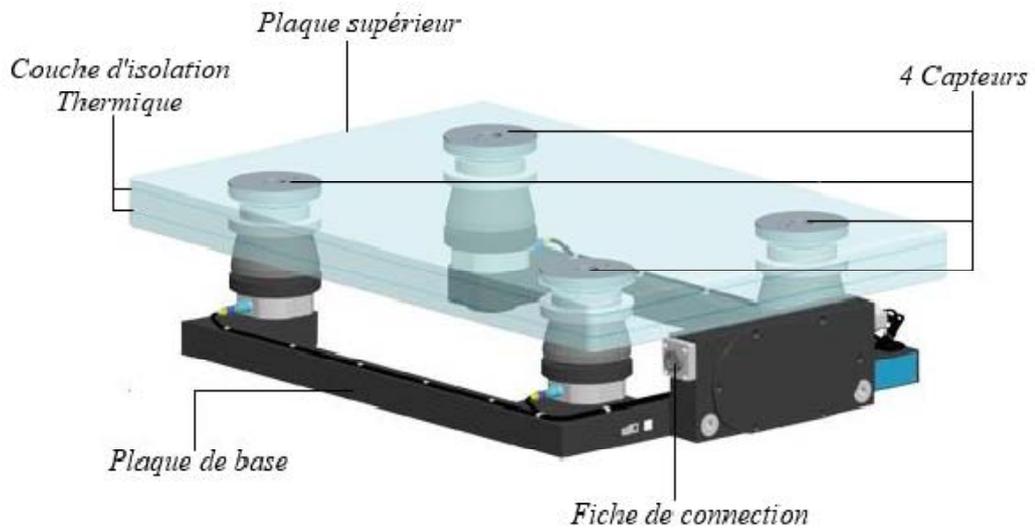


Figure II.8 Capteur d'effort de coupe KISTLER.



Figure II.9 PC Disposant du logiciel (DYNOWARE)

La **figure II.10** présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composants de l'effort de coupe (effort axial, effort radial et effort tangentiel).

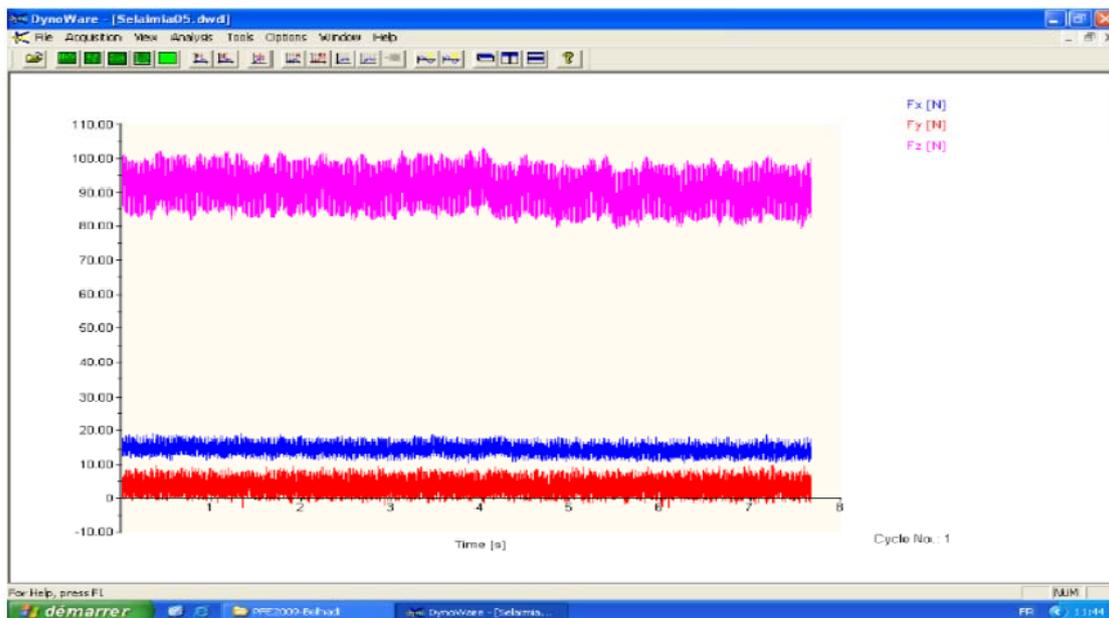


Figure II.10 Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.

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

Le critère de la rugosité de surface Ra a été mesuré 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 sur la surface usinée. Pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, les mesures de la rugosité ont été effectuées directement sur la pièce à trois reprises à 120 degré sans avoir recours à la démonter (**figure II.11**).



Figure II.11 Rugosimètre 2D en plein opération de mesure.

II.2.4.3 Microscope pour la mesure de l'usure (*Visuel Gage 250*)

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (V_b) et entaille (V_N) est un dispositif binoculaire de marque (*Visuel Gage 250*), avec un ordinateur équipé d'un logiciel *Visual Gage 2.2.0*. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du Microscope sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et Enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (figure II.12).



Figure II.12 Microscope pour la mesure de l'usure (*Visuel Gage 250*).

II.3 Planification des expériences

Entre le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer, les éléments du régime de coupe (**Vc, ap, f**), ainsi que les conditions de travail (**rigidité de la machine, ...etc.**). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. Les efforts de coupe, la rugosité, l'usure et le volume de copeau enlevé, représentent les paramètres de sortie.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (**Vc, f, ap**) sur les diverses fonctions d'optimisation (rugosité, effort de coupe et l'usure) en utilisant la méthodologie de surface de réponse **MSR** à l'aide de logiciel statistique d'optimisation **Design Expert**.

Dans notre cas, nous avons les facteurs de base (**Vc, f, ap et M**) et chaque facteur à trois niveaux de variation, sauf le (**ap**) il a 2 niveaux de variation, Nous avons alors :

L18 (2¹ 3³). Les essais ont été numérotés de **1** à **18**.

La matrice de planification **de Taguchi (L18)**, ainsi que les valeurs des facteurs codifiés sont illustrées dans le (**tableau II.2**).

Tableau II.2 Table orthogonale de Taguchi L18.

L18	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

II.4 Condition opératoire

Dans notre travail quatre (04) paramètres de coupe d'entée ont été testés. La vitesse de coupe et l'avance qui sont variées 03 fois, le matériau de la plaquette varié aussi 03 fois et dernier lieu la profondeur de passe varié 02 fois. Les valeurs réelles choisies sont mentionnées au (tableau II.3).

Tableau II.3 : Plan d'expérience de Taguchi (L18).

N° d'essais	Paramètres d'usinage			
	ap (mm)	Vc (m/min)	M	f (mm/tr)
1	0,2	200	CVD	0,08
2	0,2	200	Cermet	0,14
3	0,2	200	PVD	0,2
4	0,2	270	CVD	0,08
5	0,2	270	Cermet	0,14
6	0,2	270	PVD	0,2
7	0,2	340	CVD	0,14
8	0,2	340	Cermet	0,2
9	0,2	340	PVD	0,08
10	0,4	200	CVD	0,2
11	0,4	200	Cermet	0,08
12	0,4	200	PVD	0,14
13	0,4	270	CVD	0,14
14	0,4	270	Cermet	0,2
15	0,4	270	PVD	0,08
16	0,4	340	CVD	0,2
17	0,4	340	Cermet	0,08
18	0,4	340	PVD	0,14

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé et les instruments de mesure (machine-outil, éprouvettes, plaquettes de coupe, porte-outil, Plateforme **KISTLER**, rugosimètre, pyromètre et microscope pour mesurer l'usure).

La planification des expériences et les conditions de coupe ont été également présentées. Dans les chapitres qui suivent, nous allons exposer les résultats des essais réalisés dans cette étude ainsi que la modélisation des paramètres de sortie ainsi que l'optimisation des conditions de coupe.

Chapitre III

Modélisation des paramètres technologiques d'usinage lors de l'usinage de l'acier l'AISI D3

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la modélisation des paramètres technologiques de sortie à savoir ; la rugosité de surface arithmétique **Ra**, l'effort de coupe tangentiel **Fz** et l'usure en dépouille **Vb** en utilisant la méthodologie de surface de réponse, lors de l'usinage de l'acier AISI D3 par trois types de matériaux de coupe. Les modèles développés par la méthodologie de surface de réponse sont obtenus à partir d'un plan de Taguchi L18 (**18 essais**). Les paramètres du processus de coupe choisis comme variables, sont la vitesse de coupe **Vc**, l'avance **f** et la profondeur de passe **ap** et le matériau de l'outil **M**.

III.2 Analyse de variance (ANOVA) et Modélisation

III.2.1 Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) est une technique statistique standard qui est couramment utilisée pour déterminer l'importance des variables indépendantes sur les réponses de sortie [16]. Elle n'analyse pas les données directement, mais détermine le pourcentage de contribution de chaque facteur dans la détermination de la variabilité (variance) des données. La table ANOVA est composée de la somme des carrés (SC) et degrés de liberté (DF), Le (SC) est utilisé pour estimer le carré de l'écart par rapport à la moyenne. Il est exprimé par l'équation :

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_t - \bar{y})^2 \quad (\text{III.1})$$

Ou : $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ la moyenne des réponses,

- ❖ y_i la réponse moyenne observée dans les expériences,
- ❖ N : nombre total d'expériences,
- ❖ N_{nf} : niveau de chaque facteur f .

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté.

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (\text{III.2})$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice *F-value* est utilisé avec la base que les valeurs de *F-calculées* devraient être supérieures à celles obtenues à partir du *F-table*

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_\delta} \quad (\text{III.3})$$

Avec : **MC**e les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA (Cont. %), montre la contribution des facteurs sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$Cont. \% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (\text{III.4})$$

III.2.2 Méthodologie des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponse est un ensemble de techniques mathématiques qui se base sur la conception expérimentale pour déterminer la portée des variables d'entrée indépendantes. Cette méthode permet, grâce à des modèles mathématiques empiriques, de déterminer une relation d'approximation entre les réponses de sortie (Y), et les variables d'entrée vitesse de coupe **Vc**, l'avance par tour **f** et la profondeur de passe **ap** pour optimiser les paramètres du procédé afin d'atteindre des réponses souhaitables. Dans cette méthode, la réponse peut s'écrire sous la forme suivante [16] :

$$Y = \varphi(Vc.f.ap) \quad (\text{III.5})$$

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est une procédure qui comprend six étapes :

- ❖ Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées ;
- ❖ Adopter un plan de conception expérimentale ;

- ❖ Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de RSM ;
- ❖ Analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- ❖ Déterminer la situation du modèle quadratique de RSM et de décider si le modèle de RSM à besoin des variables de dépistage ou non et enfin ;
- ❖ Optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédite.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Y , dite variable de réponse (rugosité de la surface, effort de coupe tangentiel, effort spécifique tangentiel et puissance de coupe), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), 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 (Y) sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1} a_i X_i + \sum_{i=1} a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j \quad (\text{III.6})$$

- ✓ Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- ✓ X_i représente le niveau attribué au facteur i . C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- ✓ a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences. 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.5).

$$R^2 = \frac{\sum(Y_i - \bar{y})^2}{\sum(\bar{Y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

- Y_i : valeur de la réponse calculée à la *i*ème expérience ;
- \bar{Y}_i : valeur mesurée à la *i*ème expérience ;
- \bar{Y} : valeur moyenne des réponses mesurées.

L'analyse de variance (**ANOVA**) est utilisée pour tester la validité du modèle, ainsi qu'examiner la signification et l'adéquation du modèle.

Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérées statistiquement significatifs. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réelles [16].

III.3 Résultats et discussions

Le (**tableau III.1**) présente les résultats expérimentaux obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe lors de tournage de l'AISI D3. L'analyse des résultats de ce tableau montre que la valeur minimale correspond à l'effort de coupe **Fz**, a été trouvée suivant les conditions de l'essai **N°01** de (200 m/min ; 0,08 mm/tr ; 0.2 mm et CVD), et pour la valeur minimale de la rugosité de surface **Ra**, elle a été observée lors de l'essai **N°13** (270 m/min ; 0,14 mm/tr ; 0.4 mm et CVD) et pour la valeur-minimale de **Vb**, elle a été trouvée avec l'essai **N°06** avec (270 m/min ; 0,2 mm/tr ; 0.2 mm et PVD).

La valeur maximale de l'effort **Fz** a été observée à l'essai **N°17** de (340 m/min ; 0,08 mm/tr ; 0.4 mm et Cermet). Le maximum de la valeur de la rugosité de surface **Ra** a été observée à l'essai **N°08** c-à-d (340 m/min ; 0,2 mm/tr ; 0.2 mm et Cermet) et finalement, Le maximum de la valeur pour **Vb** a été observée à l'essai **N°17** (340 m/min ; 0,08 mm/tr ; 0.4 mm et Cermet).

Tableau III.1 Résultats des essais pour un plan de Taguchi L18.

N° d'essai	ap (mm)	Vc (m/min)	M	f (mm/tr)	Vb (mm)	Fz (N)	Ra (µm)
1	0,2	200	CVD	0,08	0,086	28,69	1,519
2	0,2	200	Cermet	0,14	0,14	112,28	2,16
3	0,2	200	PVD	0,2	0,047	105,47	2,301
4	0,2	270	CVD	0,08	0,109	40,57	1,628
5	0,2	270	Cermet	0,14	0,241	158,6	2,71
6	0,2	270	PVD	0,2	0,045	110,36	2,206
7	0,2	340	CVD	0,14	0,115	94,51	1,677
8	0,2	340	Cermet	0,2	0,219	143,98	4,25
9	0,2	340	PVD	0,08	0,052	58,4	2,412
10	0,4	200	CVD	0,2	0,071	209,32	2,314
11	0,4	200	Cermet	0,08	0,28	238,02	1,638
12	0,4	200	PVD	0,14	0,051	154,63	2,638
13	0,4	270	CVD	0,14	0,107	155,95	1,318
14	0,4	270	Cermet	0,2	0,167	308,87	2,586
15	0,4	270	PVD	0,08	0,07	110,64	2,221
16	0,4	340	CVD	0,2	0,104	235,1	1,773
17	0,4	340	Cermet	0,08	0,62	379,83	2,632
18	0,4	340	PVD	0,14	0,06	181,67	2,196

III.3.1 Analyse de variance et Modélisation de la rugosité Ra

III.3.1.1 Analyse de variance ANOVA pour Ra

Le (tableau III.2) illustre les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface **Ra**. Dans ce tableau, Il est clair que le facteur le plus important affectant la rugosité de surface **Ra**, c'est le matériau de l'outil de coupe **M**, sa contribution est 38,43%. Puis le produit **Vc*M** sa contribution est 21,90%. Le troisième facteur important affectant la rugosité de surface est l'avance **f** avec une contribution de 12,90%, puis la vitesse de coupe **Vc** avec 6,34% de contribution, la profondeur de passe **ap** avec 1,80% 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.

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

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	14	7,16769	97,09%	7,16769	0,51198	7,16	0,065
Linéaires	5	4,38979	59,46%	2,61384	0,52277	7,31	0,066
ap	1	0,13296	1,80%	0,23223	0,23223	3,25	0,169
Vc	1	0,46807	6,34%	0,16708	0,16708	2,34	0,224
f	1	0,95203	12,90%	0,29650	0,29650	4,15	0,135
M	2	2,83672	38,43%	1,80187	0,90094	12,60	0,035
Interaction à 2 facteurs	9	2,77790	37,63%	2,77790	0,30866	4,32	0,128
ap*Vc	1	0,45943	6,22%	0,16280	0,16280	2,28	0,228
ap*f	1	0,00274	0,04%	0,02378	0,02378	0,33	0,605
ap*M	2	0,48034	6,51%	0,17578	0,08789	1,23	0,408
Vc*f	1	0,10615	1,44%	0,03918	0,03918	0,55	0,513
Vc*M	2	1,61665	21,90%	1,52812	0,76406	10,68	0,043
f*M	2	0,11261	1,53%	0,11261	0,05631	0,79	0,531
Erreur	3	0,21455	2,91%	0,21455	0,07152		
Total	17	7,38224	100,00%				

III.3.1.2 Effets principaux pour Ra

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la (figure III.1). À partir de cette figure, on peut visualiser et comparer le degré d'influence de divers facteurs sur la réponse étudiée. La courbe qui a la pente la plus élevée signifie que le facteur a la plus grande influence sur la réponse. Il apparaît clairement que le matériau **B : Cermet**, affecte fortement la rugosité de surface usinée **Ra** que les autres facteurs. Aussi l'avance **f** affecte fortement la rugosité **Ra** et puis la vitesse de coupe **Vc** et la profondeur de passe **ap** respectivement. Notons dans ce cas d'usinage que l'augmentation de **Vc** entraîne une augmentation de **Ra** à cause de l'augmentation de l'usure de l'outil de coupe.

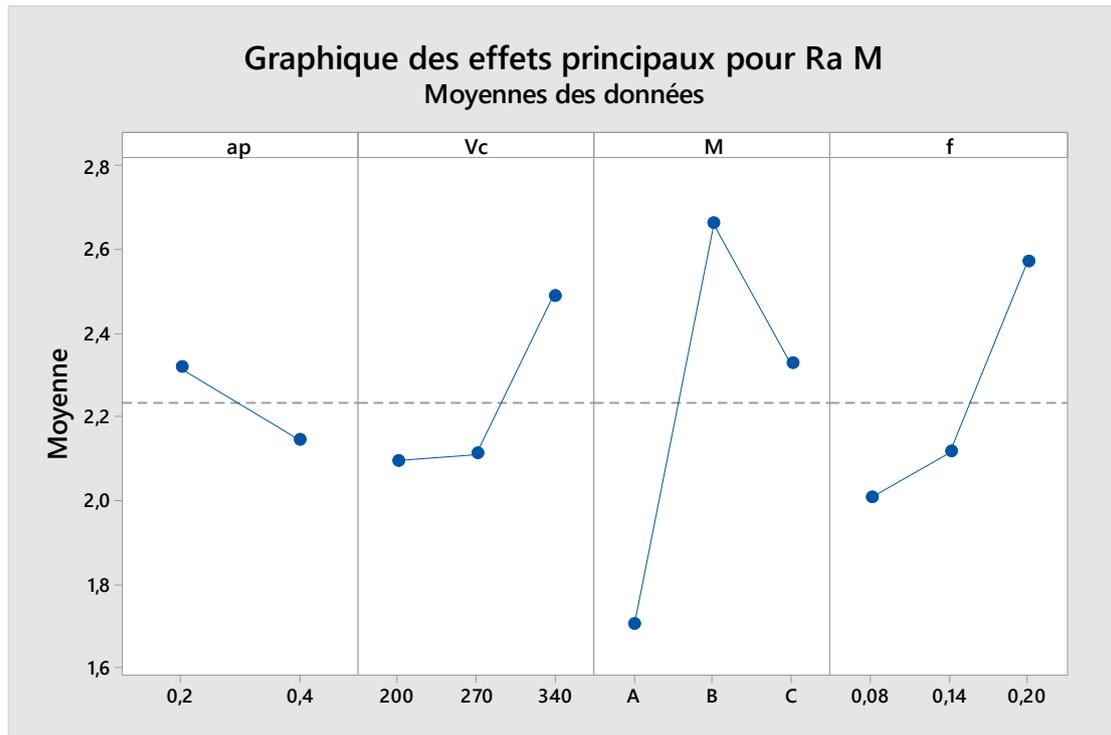


Figure III.1 Graphique des effets principaux pour Ra

III.3.1.3. Analyse de régression pour Ra

Les équations (III.8, III.9, III.10) expriment le modèle de la rugosité arithmétique **Ra** avec tous les facteurs principaux et leurs interactions (Modèle complet).

Carbure avec revêtement CVD

$$Ra = 1,79 + 1,34 ap - 0,00036 Vc - 1,7 f - 0,0201 ap*Vc + 13,3 ap*f + 0,0226 Vc*f \quad (III.8)$$

Outil Cermet

$$Ra = -0,08 + 0,63 ap + 0,01376 Vc - 6,7 f - 0,0201 ap*Vc + 13,3 ap*f + 0,0226 Vc*f \quad (III.9)$$

Carbure avec revêtement PVD

$$Ra = 2,56 + 3,54 ap + 0,00126 Vc - 9,7 f - 0,0201 ap*Vc + 13,3 ap*f + 0,0226 Vc*f \quad (III.10)$$

Où : Le coefficient de détermination: ($R^2 = 97,09\%$).

III.3.1.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité de surface R_a est présentée dans la (figure III.2 et la figure III.3). L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision de modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

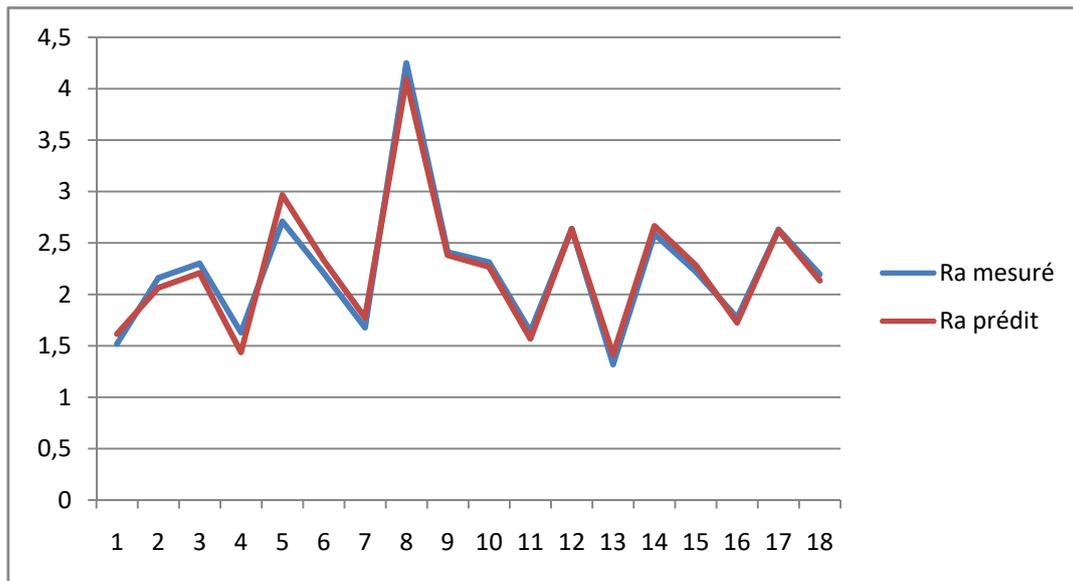


Figure III.2 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour R_a .

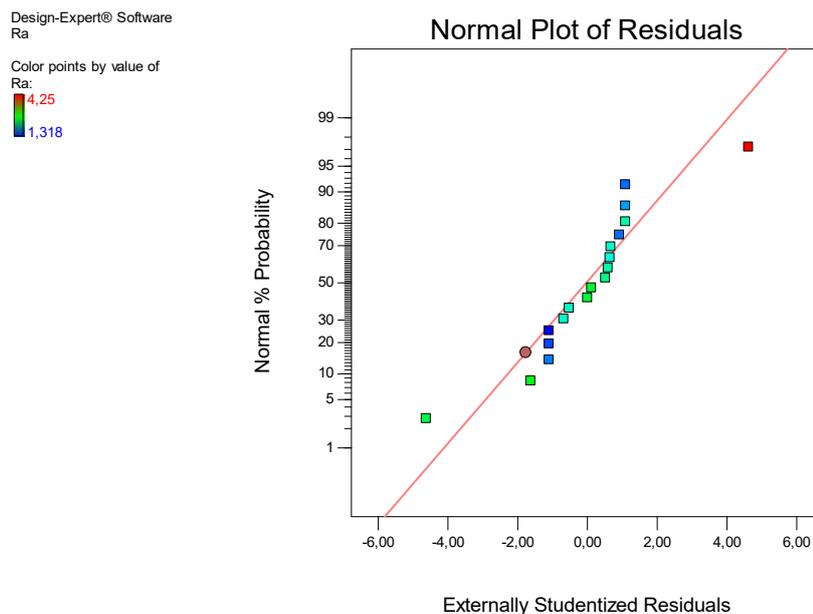


Figure III.3 Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour R_a

II.3.1.5 Analyse de surface de réponse pour Ra

On a trois cas dans notre expérience, usinage avec outil de coupe avec revêtement en CVD, Cermet et PVD respectivement, on va commencer par :

➤ Cas 01 (CVD)

Le graphe de surface de réponse (**Figure III.4**) présente les résultats de la surface de réponse (3D) de la rugosité **Ra**, en fonction des paramètres de coupe **Vc**, **f**, **ap**. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la figure (4.a) montre que l'augmentation de **Vc** induit une diminution moins importante de **Ra**, Par contre Les figures (4.b) et (4.c) montrent que l'effet de l'avance **f** sur la rugosité de surface **Ra** est très important et provoque une augmentation de la rugosité **Ra**. Il est clair que l'avance par tour **f** est le facteur le plus important qui affecte la Rugosité de surface **Ra** suivie par la vitesse de coupe **Vc**, alors que la profondeur de passe **ap** n'est pas d'influence significative sur **Ra**.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Ra
● Design points below predicted value
4,25
1,318
X1 = A: ap
X2 = B: Vc
Actual Factors
C: f = 0,14
D: M = A

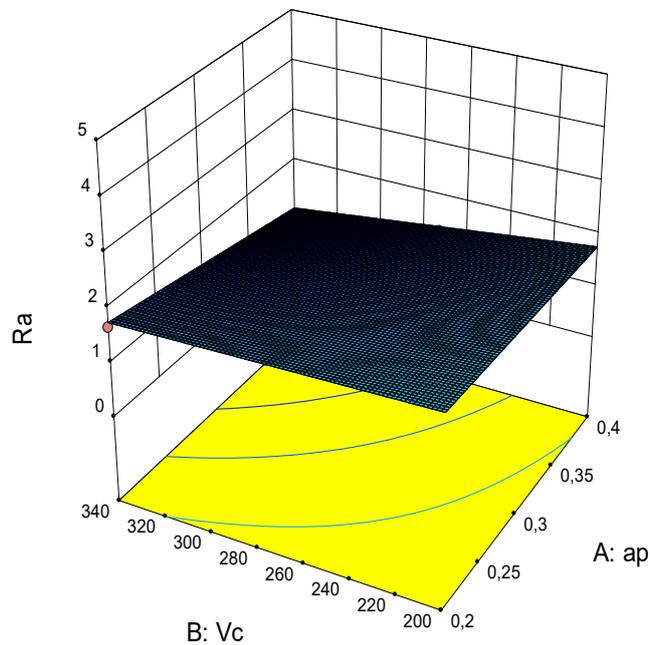


Figure (4.a)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Ra
 ● Design points above predicted value
 ○ Design points below predicted value
 4,25
 1,318
 X1 = A: ap
 X2 = C: f
 Actual Factors
 B: Vc = 270
 D: M = A

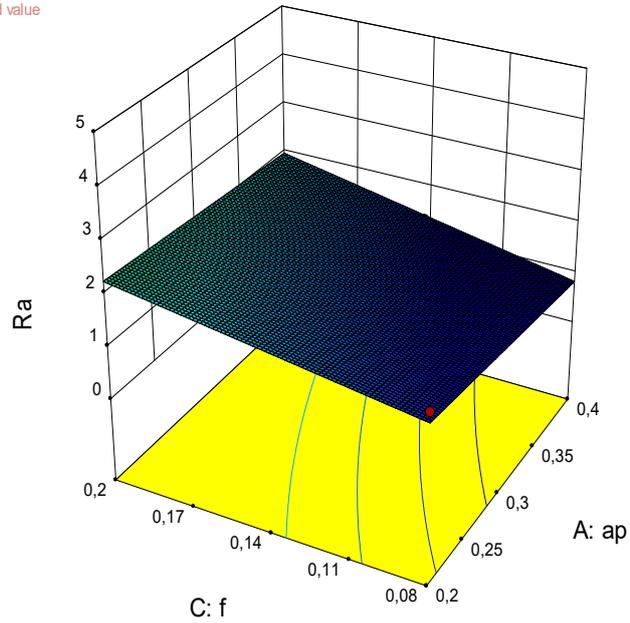


Figure (4.b)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Ra
 4,25
 1,318
 X1 = B: Vc
 X2 = C: f
 Actual Factors
 A: ap = 0,3
 D: M = A

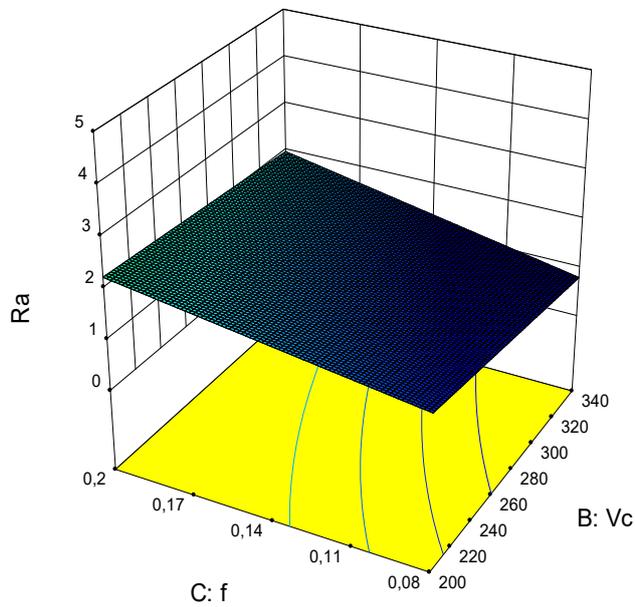


Figure (4.c)

Figure III.4 Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de (Vc, ap, f) pour l'outil à revêtement CVD.

➤ Cas 02 (Cermet)

Le graphe de surface de réponse (**Figure III.5**) présente les résultats de la surface de réponse (3D) de la rugosité **Ra**, en fonction des paramètres de coupe **Vc**, **f**, **ap**. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA. La figure (5.a) montre que l'effet de la profondeur de passe **ap** sur la rugosité de surface **Ra** est moindre par rapport aux effets de **Vc** et **f**.

On remarque que Les figures (5.b) et (5.c) montrent que l'effet de la vitesse de coupe **Vc** et l'avance **f** sur la rugosité de surface **Ra** est très important et provoque une augmentation de la rugosité **Ra**. Il apparait clairement que la vitesse de coupe **Vc** affecte fortement la rugosité de surface **Ra** que les autre facteurs.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Ra
● Design points above predicted value
○ Design points below predicted value
4,25
1,318
X1 = A: ap
X2 = B: Vc
Actual Factors
C: f = 0,14
D: M = B

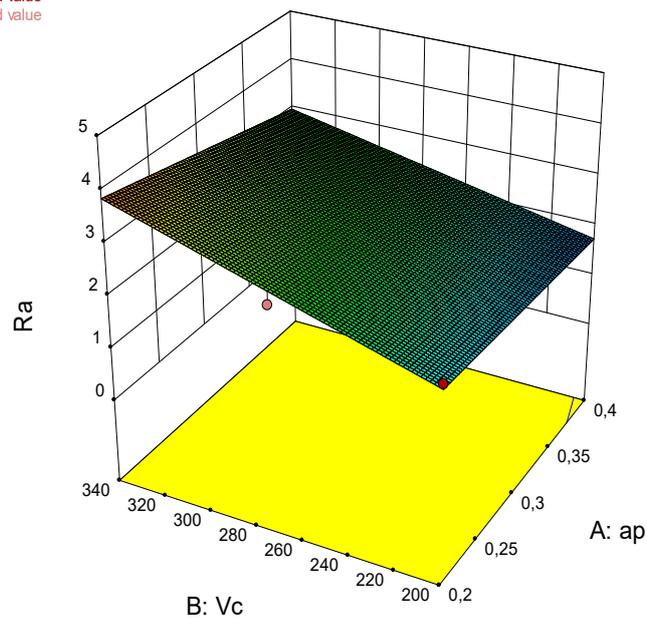


Figure (5.a)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Ra
● Design points below predicted value
4,25
1,318
X1 = A: ap
X2 = C: f
Actual Factors
B: Vc = 270
D: M = B

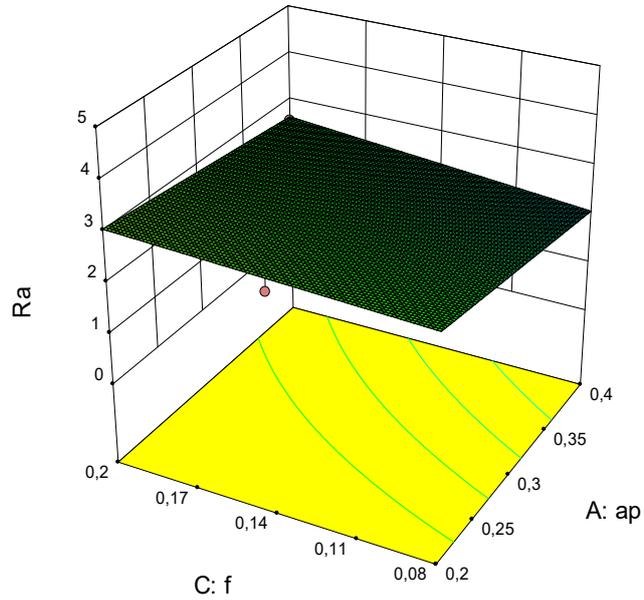


Figure (5.b)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Ra
4,25
1,318
X1 = B: Vc
X2 = C: f
Actual Factors
A: ap = 0,3
D: M = B

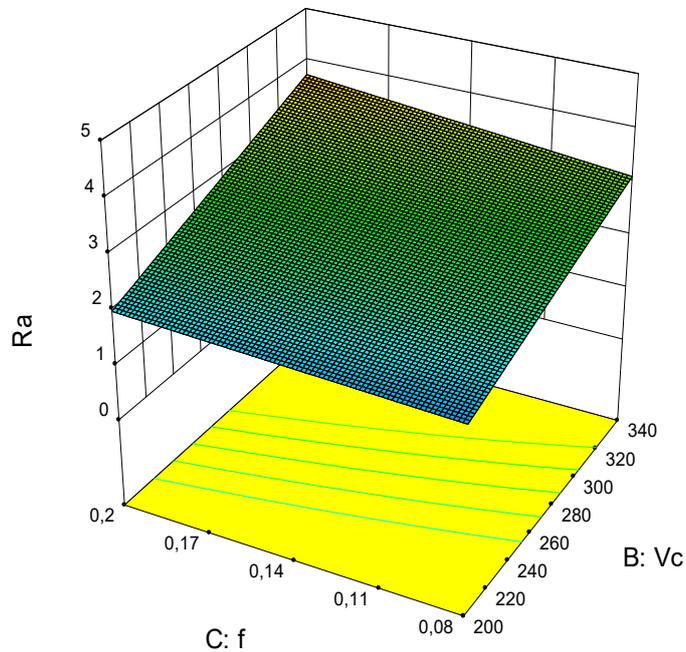


Figure (5.c)

Figure III.5 Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de (Vc, ap, f) pour l'outil en cermet.

➤ Cas 03 (PVD)

Le graphe de surface de réponse (**Figure III.6**) présente les résultats de la surface de réponse (3D) de la rugosité **Ra**, en fonction des paramètres de coupe **Vc, f, ap** pour le carbure à revêtement PVD. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA. On remarque que La figure (6.a) montre que l'effet de la vitesse de coupe **Vc** sur la rugosité de surface **Ra** provoque une diminution de **Ra**. Par contre les figures (6.b) et (6.c) montrent que l'effet de **f** sur la rugosité de surface **Ra** est très important et provoque une augmentation de la rugosité **Ra**.

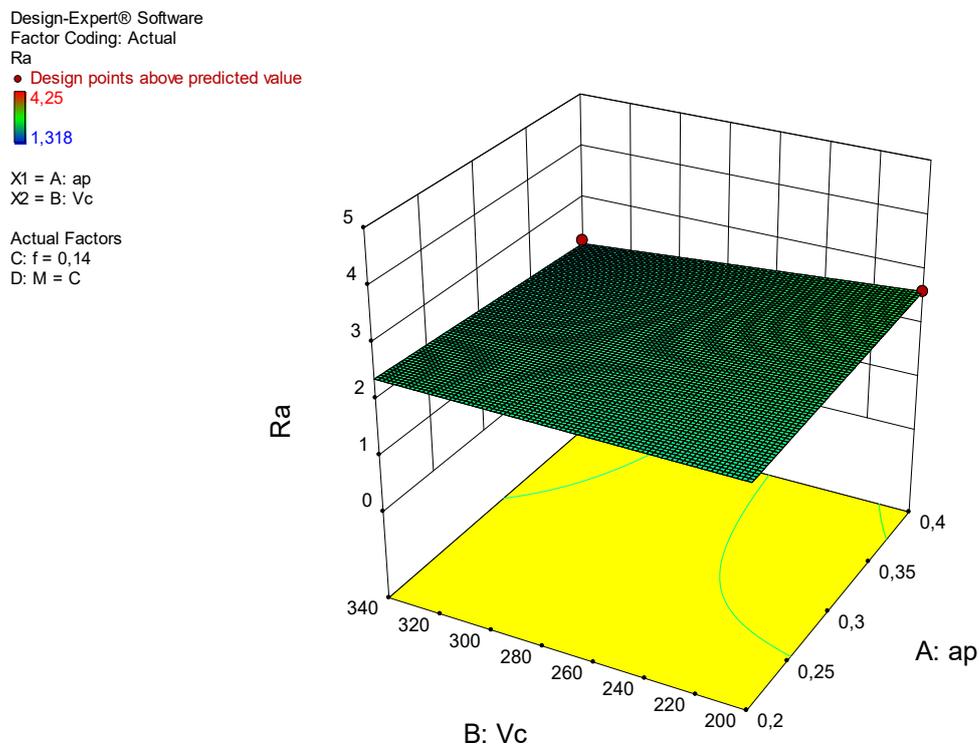


Figure (6.a)

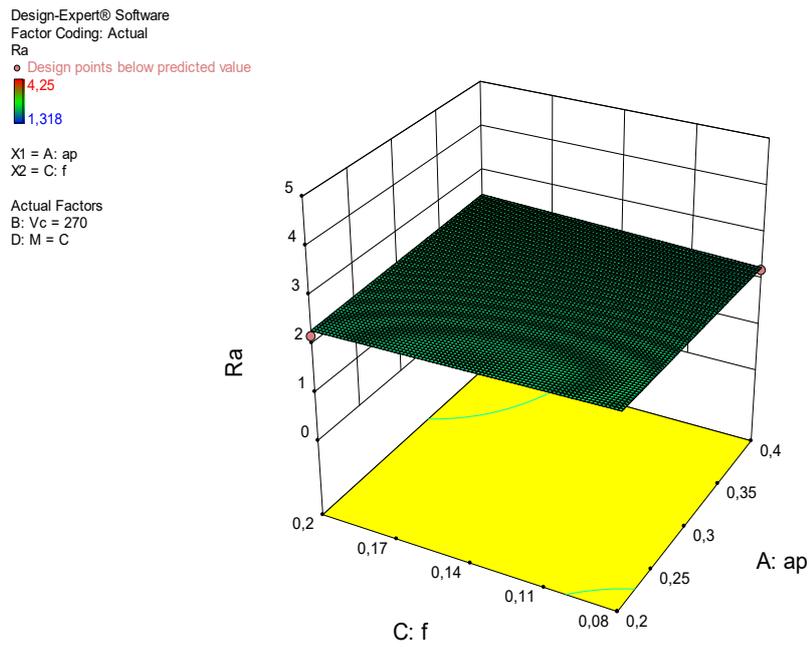


Figure (6.b)

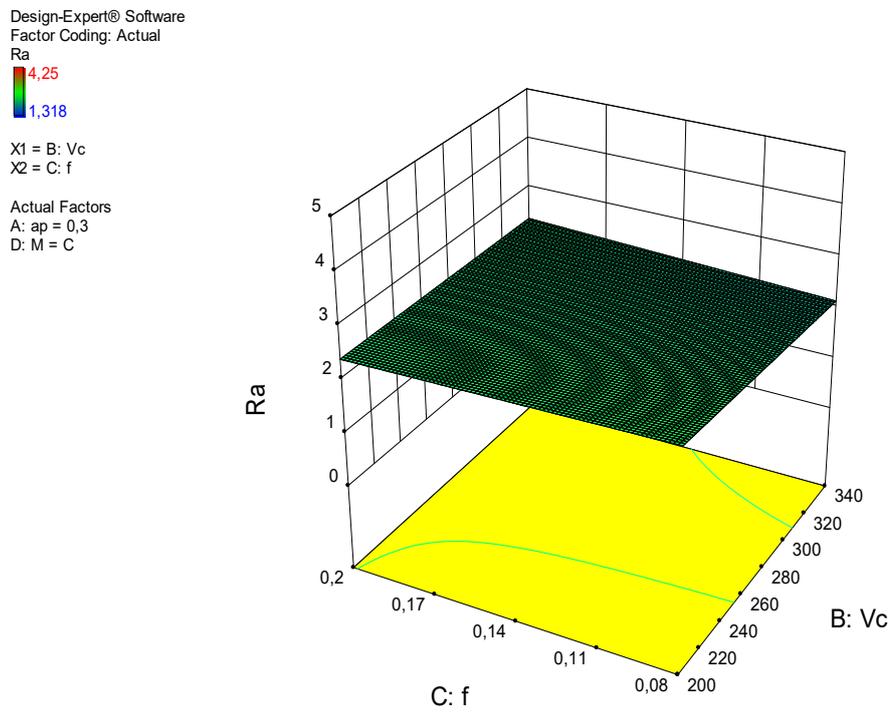


Figure (6.c)

Figure III.6 Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de (Vc, ap, f) pour l'outil à revêtement PVD.

III.3.2 Analyse de variance et Modélisation de l'effort tangentiel Fz

III.3.2.1 Analyse de variance ANOVA pour Fz

L'analyse de variance ANOVA présentée dans le (tableau III.3) pour la composante de l'effort tangentiel **Fz** montre que la profondeur de passe **ap** vient en première position d'influence sur l'effort tangentiel **Fz** suivie par le matériau d'outil de coupe **M** et l'avance **f** puis la vitesse de coupe **Vc** avec des contributions de 49,34%, 28,27%, 3,89% et 3,54% respectivement. Aussi, les interactions (**ap*M**, **f*M**, **Vc*M** et **ap*f**) ont un effet significatif sur l'effort Fz avec des contributions de 6,91%, 3,38%, 0,60% et 0,08% respectivement.

Tableau III.3 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort Fz.

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	14	141266	99,81%	141266	10090,4	113,70	0,001
Linéaires	5	120353	85,04%	72639	14527,9	163,70	0,001
ap	1	69835	49,34%	22200	22200,2	250,15	0,001
Vc	1	5005	3,54%	5129	5129,2	57,80	0,005
f	1	5502	3,89%	3496	3496,4	39,40	0,008
M	2	40011	28,27%	40623	20311,4	228,87	0,001
Interaction à 2 facteurs	9	20914	14,78%	20914	2323,7	26,18	0,011
ap*Vc	1	1732	1,22%	468	467,7	5,27	0,105
ap*f	1	107	0,08%	1058	1058,1	11,92	0,041
ap*M	2	9780	6,91%	2501	1250,4	14,09	0,030
Vc*f	1	3666	2,59%	538	538,5	6,07	0,091
Vc*M	2	850	0,60%	2303	1151,4	12,97	0,033
f*M	2	4778	3,38%	4778	2389,2	26,92	0,012
Erreur	3	266	0,19%	266	88,7		
Total	17	141532	100,00%				

III.3.2.2 Effets principaux pour Fz

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la (figure III.7). À partir de cette figure, On peut dire que la profondeur de passe **ap** effectue fortement l'effort tangentiel de coupe **Fz**, suivie par l'effet d'outil de coupe en (Cermet) puis l'avance **f** et la vitesse de coupe **Vc** respectivement. On remarque que **Fz** s'élève légèrement avec l'augmentation de l'avance. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande.

L'étude du graphique des effets principaux concorde avec les résultats de L'ANOVA.

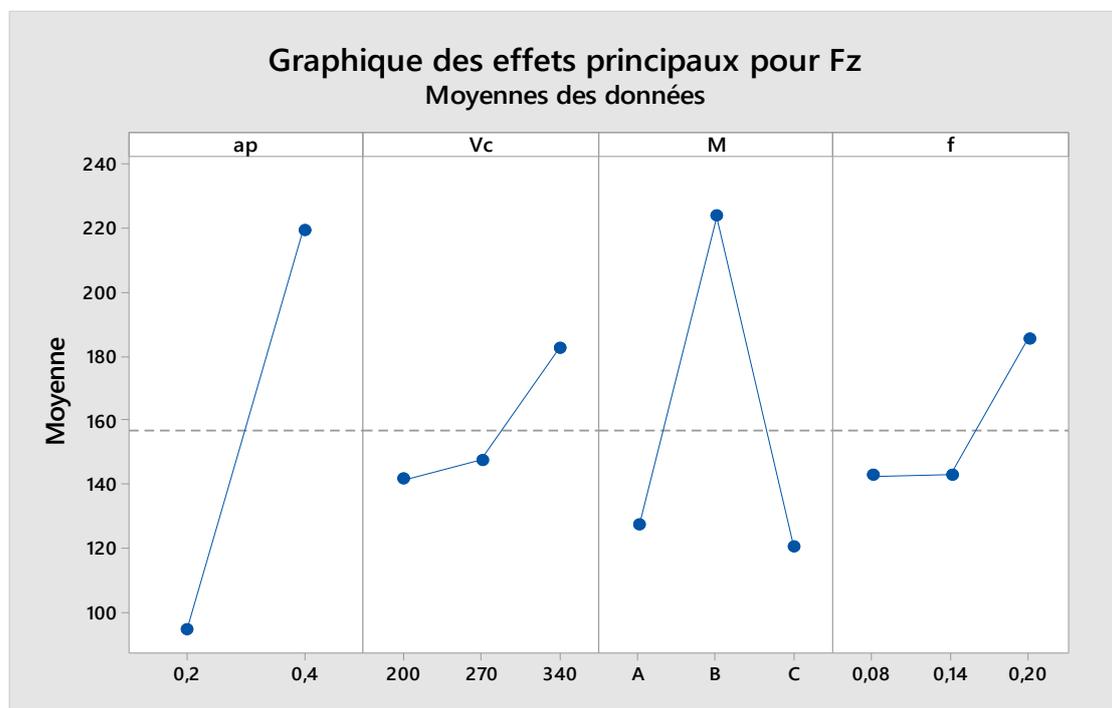


Figure III.7 Effet de conditions de coupe sur l'effort Fz.

III.3.2.3 Analyse de régression pour Fz

Les équations (III.11, III.12, III.13) expriment le modèle de l'effort de coupe tangentiel **Fz** avec tous les facteurs principaux et leurs interactions. Modèle complet:

Carbure avec revêtement CVD

$$Fz = -71,6 - 330 ap + 0,284 Vc + 768 f + 1,075 ap*Vc + 2798 ap*f - 2,65 Vc*f \quad (III.11)$$

Outil Cermet

$$F_z = -43,2 + 90 a_p + 0,755 V_c - 437 f + 1,075 a_p * V_c + 2798 a_p * f - 2,65 V_c * f \quad (\text{III.12})$$

Carbure avec revêtement PVD

$$F_z = -52,6 - 209 a_p + 0,174 V_c + 615 f + 1,075 a_p * V_c + 2798 a_p * f - 2,65 V_c * f \quad (\text{III.13})$$

Le coefficient de détermination $R^2 = 99,81\%$

III.3.2.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

Les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'effort tangentiel de coupe F_z sont exposées dans la (figure III.8 Et figure III.9). La comparaison des résultats montre que les valeurs prédites et celles mesurées sont proches ce qui prouve la fiabilité du modèle. De manière générale on remarque que la courbe des valeurs prédites épouse la forme de la courbe des valeurs expérimentales excepté quelques points d'essai où nous pouvons noter une petite divergence.

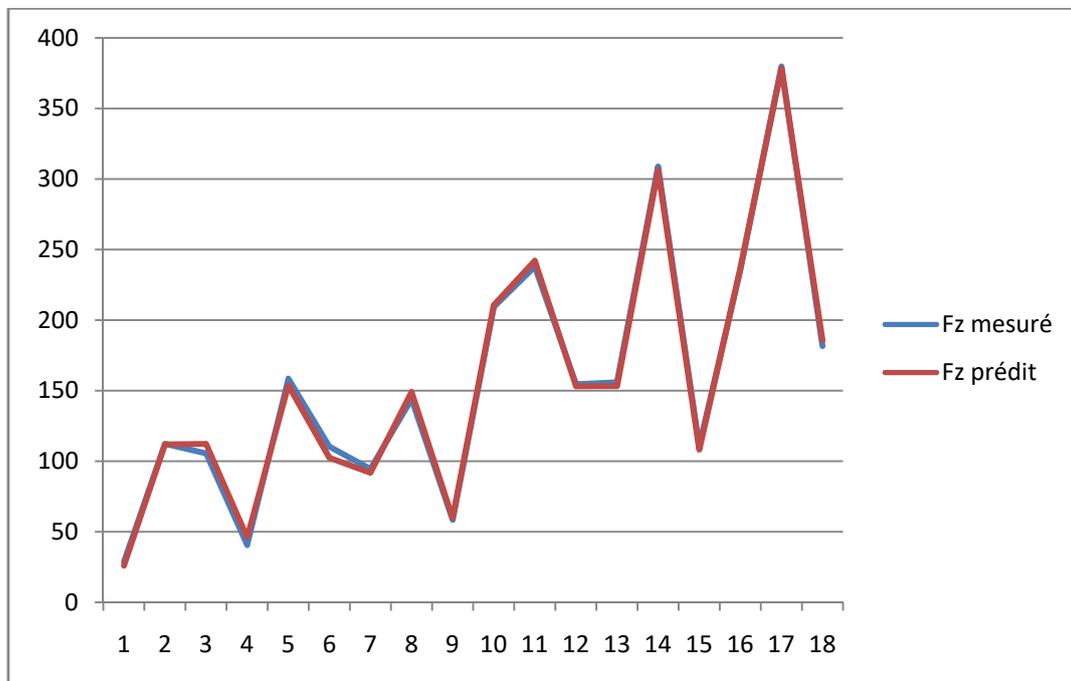


Figure III.8 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour F_z

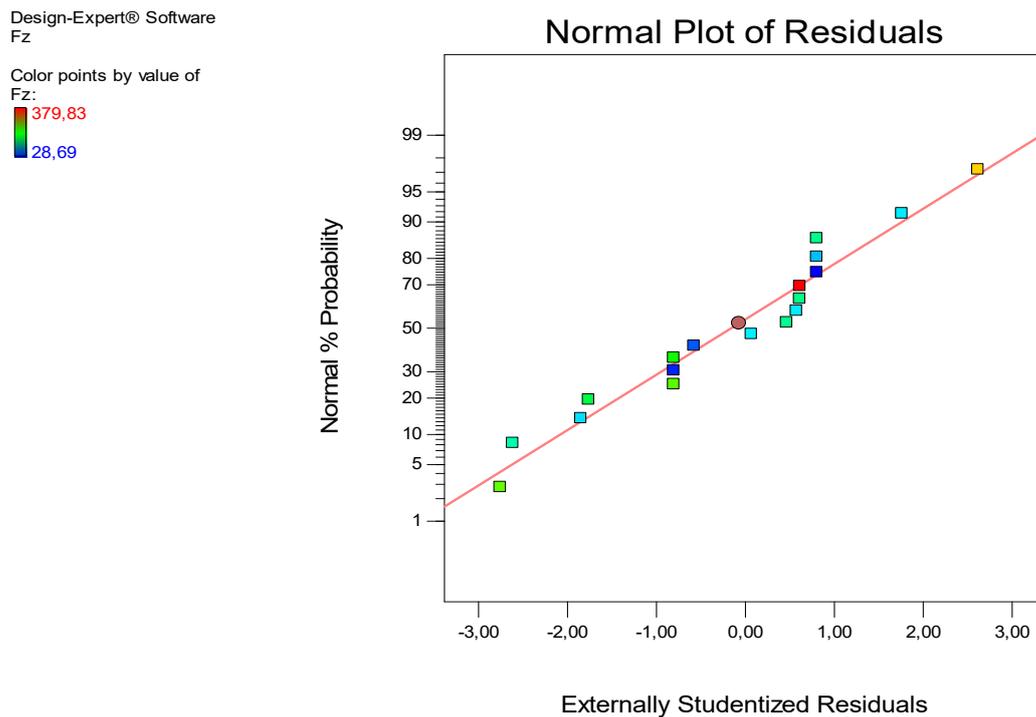


Figure III.9 Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour Fz.

III.3.2.5 Analyse de surface de réponse pour Fz

On a trois cas dans notre expérience, usinage avec outil de coupe en CVD, Cermet et PVD respectivement, on va commencer par :

➤ Cas 01. CVD

La figure III.10 Présente les surfaces de réponses en 3D. La figure (10.a) illustre l'effet de l'interaction entre la profondeur de passe ap et la vitesse de coupe Vc Comme il a été prévu, on remarque que l'effort tangentiel de coupe Fz augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe ap et de la vitesse de coupe Vc .

Ceci est dû à l'élargissement de la section de coupe. Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe ap est plus importante. Les figures (10.b) et (10.c) révèle que l'avance f a un effet très implorant sur l'effort tangentiel de coupe Fz ce qui confirme les résultats présentés dans le (tableau III.3)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Fz
 ● Design points above predicted value
 379,83
 28,69
 X1 = A: ap
 X2 = B: Vc
 Actual Factors
 C: f = 0,14
 D: M = A

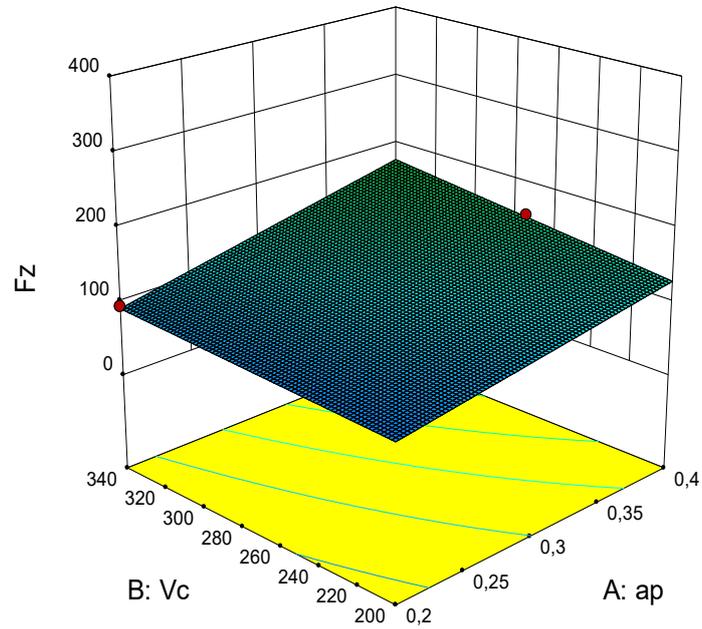


Figure (10.a)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Fz
 ● Design points above predicted value
 ● Design points below predicted value
 379,83
 28,69
 X1 = A: ap
 X2 = C: f
 Actual Factors
 B: Vc = 270
 D: M = A

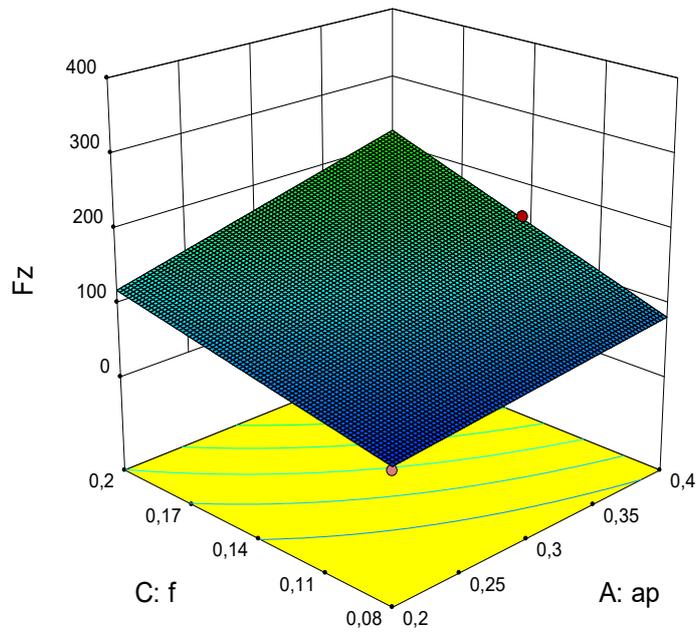


Figure (10.b)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Fz
379,83
28,69
X1 = B: Vc
X2 = C: f
Actual Factors
A: ap = 0,3
D: M = A

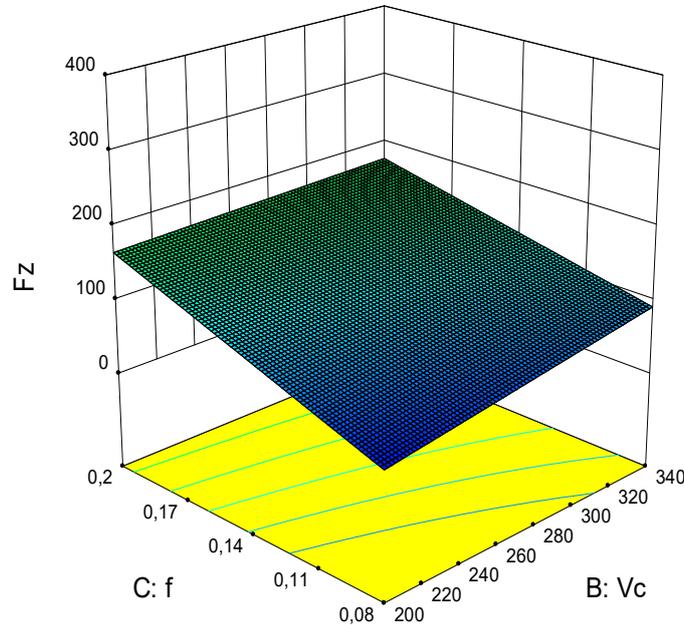


Figure (10.c)

Figure III.10 Surface de réponse pour l'effort F_z en fonction de (V_c , ap , f) pour l'outil a revêtement CVD.

➤ Cas 02. Cermet

La (figure III.11) Présente les surfaces de réponses en 3D. La figure (11.a) illustre l'effet de l'interaction entre la profondeur de passe ap et la vitesse de coupe V_c . Comme il a été prévu, on remarque que l'effort tangentiel de coupe F_z augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe ap et de la vitesse de coupe V_c .

Ceci est dû à l'élargissement de la section de coupe. Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe ap est plus importante. Les figures (11.b) et (11.c) révèle que l'avance f a un effet moindre sur l'effort tangentiel de coupe F_z ce qui confirme les résultats présentés dans le tableau III.3

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Fz
 ● Design points above predicted value
 379,83
 28,69
 X1 = A: ap
 X2 = B: Vc
 Actual Factors
 C: f = 0,14
 D: M = B

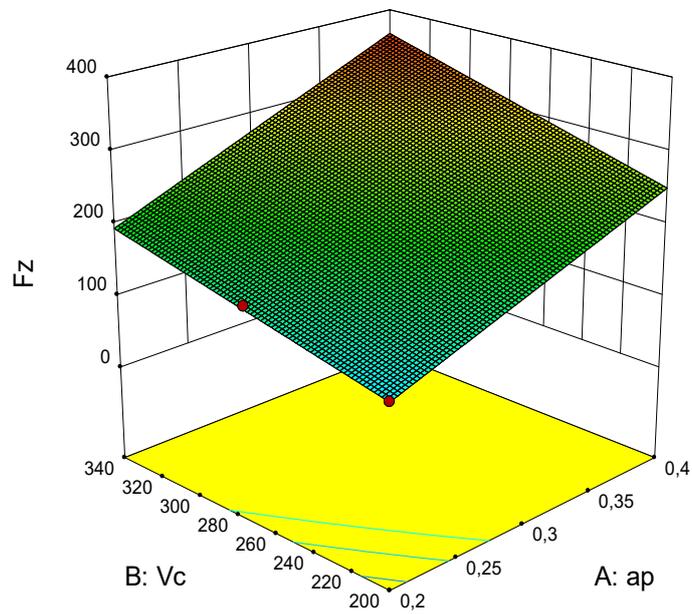


Figure (11.a)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Fz
 ● Design points above predicted value
 379,83
 28,69
 X1 = A: ap
 X2 = C: f
 Actual Factors
 B: Vc = 270
 D: M = B

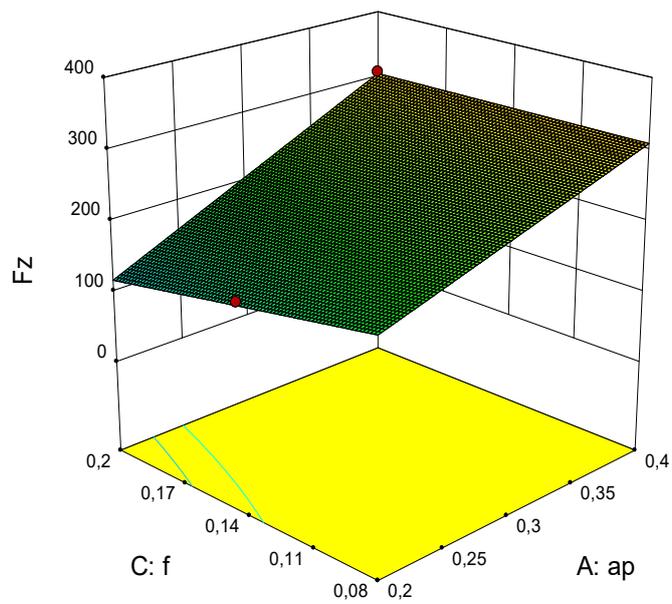


Figure (11.b)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Fz
379,83
28,69
X1 = B: Vc
X2 = C: f
Actual Factors
A: ap = 0,3
D: M = B

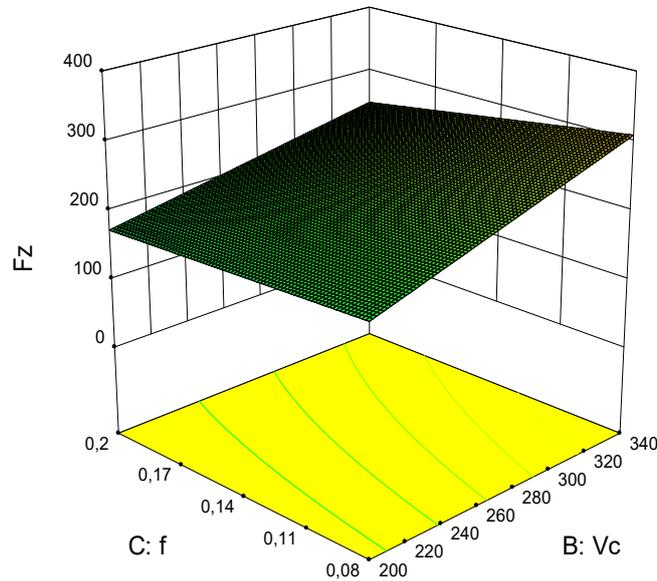


Figure (11.c)

Figure III.11 Surface de réponse pour l'effort F_z en fonction de (V_c , ap , f) pour l'outil en Cermet.

➤ Cas 03. PVD

La (figure III.12) Présente les surfaces de réponses en 3D. La figure (12.a) révèle que la vitesse de coupe V_c a un effet moindre sur l'effort tangentiel de coupe F_z par rapport a l'avance ap . aussi La figure (12.b) illustre l'effet de l'interaction entre la profondeur de passe ap et l'avance f Comme il a été prévu, on remarque que l'effort tangentiel de coupe F_z augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe ap et de l'avance f .

Dans la figure (12.c) il apparait clairement que l'avance f affecte fortement F_z que la vitesse de coupe V_c .

Ceci est dû à l'élargissement de la section de contact entre l'outil et la pièce usinée. Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe ap et l'avance f est plus importante. Ce qui confirme les résultats présentés dans le (tableau III.3)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Fz
 ● Design points above predicted value
 ● Design points below predicted value
 379,83
 28,69
 X1 = A: ap
 X2 = B: Vc
 Actual Factors
 C: f = 0,14
 D: M = C

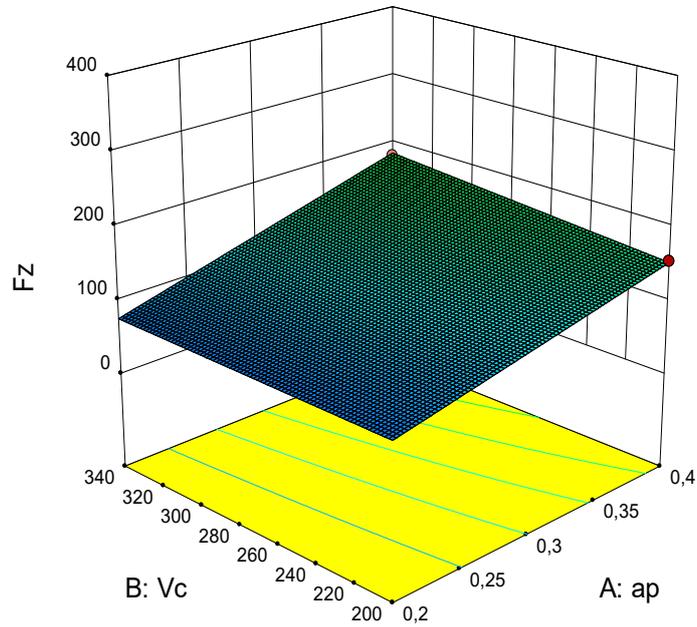


Figure (12.a)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Fz
 ● Design points above predicted value
 ● Design points below predicted value
 379,83
 28,69
 X1 = A: ap
 X2 = C: f
 Actual Factors
 B: Vc = 270
 D: M = C

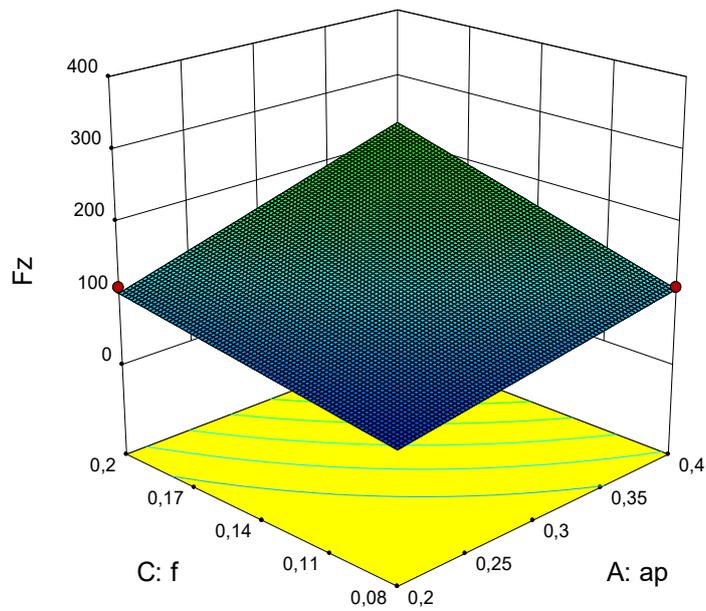


Figure (12.b)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Fz
379,83
28,69
X1 = B: Vc
X2 = C: f
Actual Factors
A: ap = 0,3
D: M = C

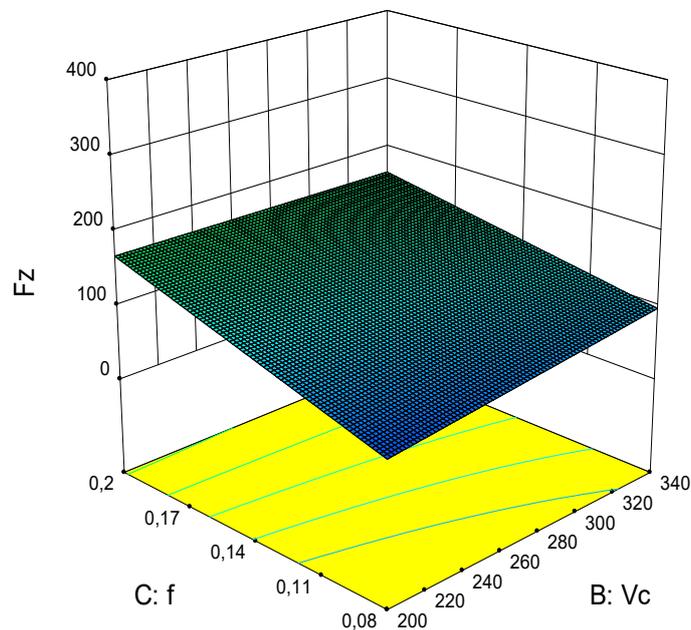


Figure (12.c)

Figure III.12 Surface de réponse pour l'effort F_z en fonction de (V_c , ap , f) pour l'outil à revêtement PVD.

III.3.3 Analyse de variance et modélisation de l'usure de l'outil de coupe V_b

III.3.3.1 Analyse de variance ANOVA pour V_b

Le (Tableau III.4) illustre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour l'usure V_b . L'analyse des résultats du tableau montre que le facteur M c'est le premier facteur qui affecte l'usure V_b , avec une contribution de 52,04%. On peut constater aussi que f a un effet significatif sur V_b avec une contribution de 8,20%. Le facteur suivant influençant V_b est la vitesse de coupe V_c suivi par ap , leurs contributions sont de 6,32% et 3,89% respectivement. Aussi, les interactions ($V_c * M$ et $f * M$) ont un effet significatif sur l'usure V_b avec des contributions de 5,27% et 5,17% respectivement.

Tableau III.4 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure V_b .

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	14	0,322411	99,75%	0,322411	0,023029	84,30	0,002
Linéaires	5	0,227730	70,45%	0,182589	0,036518	133,67	0,001
ap	1	0,012588	3,89%	0,001284	0,001284	4,70	0,119
Vc	1	0,020419	6,32%	0,022436	0,022436	82,13	0,003
f	1	0,026508	8,20%	0,014855	0,014855	54,37	0,005
M	2	0,168215	52,04%	0,154573	0,077286	282,90	0,000
Interaction	9	0,094681	29,29%	0,094681	0,010520	38,51	0,006
ap*Vc	1	0,006030	1,87%	0,001104	0,001104	4,04	0,138
ap*f	1	0,022331	6,91%	0,000044	0,000044	0,16	0,715
ap*M	2	0,015409	4,77%	0,001101	0,000550	2,01	0,279
Vc*f	1	0,017147	5,30%	0,001323	0,001323	4,84	0,115
Vc*M	2	0,017044	5,27%	0,025645	0,012823	46,94	0,005
f*M	2	0,016720	5,17%	0,016720	0,008360	30,60	0,010
Erreur	3	0,000820	0,25%	0,000820	0,000273		
Total	17	0,323230	100,00%				

III.3.3.2 Effets principaux pour V_b

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la (figure III.13). A partir de cette figure, Il apparaît clairement que le matériau d'outil de coupe **M : Cermet** affecte fortement l'usure V_b , car il a la plus grande pente, suivie par l'avance f qui affecte fortement l'usure V_b , suivie par la vitesse de coupe **Vc**. Par contre, la profondeur de passe **ap** a une faible influence sur l'usure V_b .

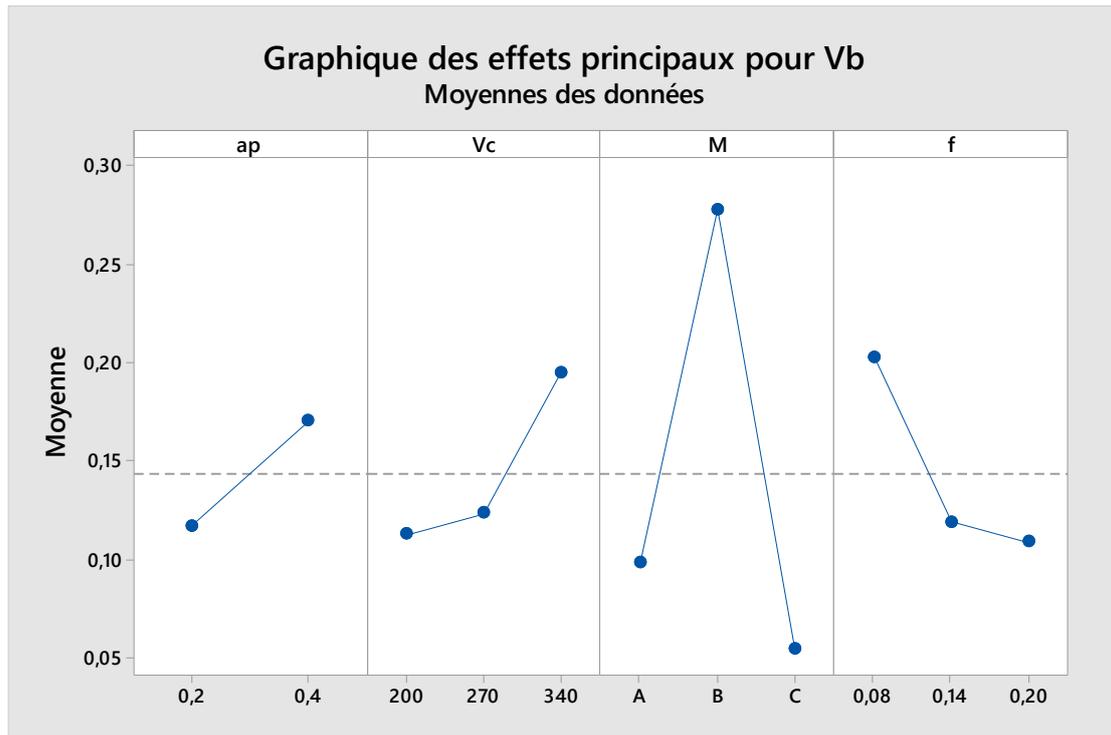


Figure III.13 Effet de conditions de coupe sur l'usure Vb

III.3.3.3 Analyse de régression pour Vb

L'équation de régression obtenue est donnée ci-dessous par l'équation (III.14, III.15, III.16) Avec un coefficient et leurs interactions.

Carbure avec revêtement CVD :

$$Vb = -0,002 - 0,352 ap + 0,000405 Vc + 1,067 f + 0,001651 ap*Vc - 0,57 ap*f - 0,00415 Vc*f \quad (III.14)$$

Outil Cermet :

$$Vb = -0,047 - 0,079 ap + 0,002003 Vc - 1,022 f + 0,001651 ap*Vc - 0,57 ap*f - 0,00415 Vc*f \quad (III.15)$$

Carbure avec revêtement PVD :

$$Vb = 0,002 - 0,283 ap + 0,000082 Vc + 1,108 f + 0,001651 ap*Vc - 0,57 ap*f - 0,00415 Vc*f \quad (III.16)$$

Le coefficient de détermination $R^2 = 99,75\%$.

III.3.3.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La (figure III.14) illustre les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'usure V_b . La comparaison des résultats prouve que les valeurs prédites et celles mesurées sont proches ce qui prouve que le modèle est fiable (Figure III.15).

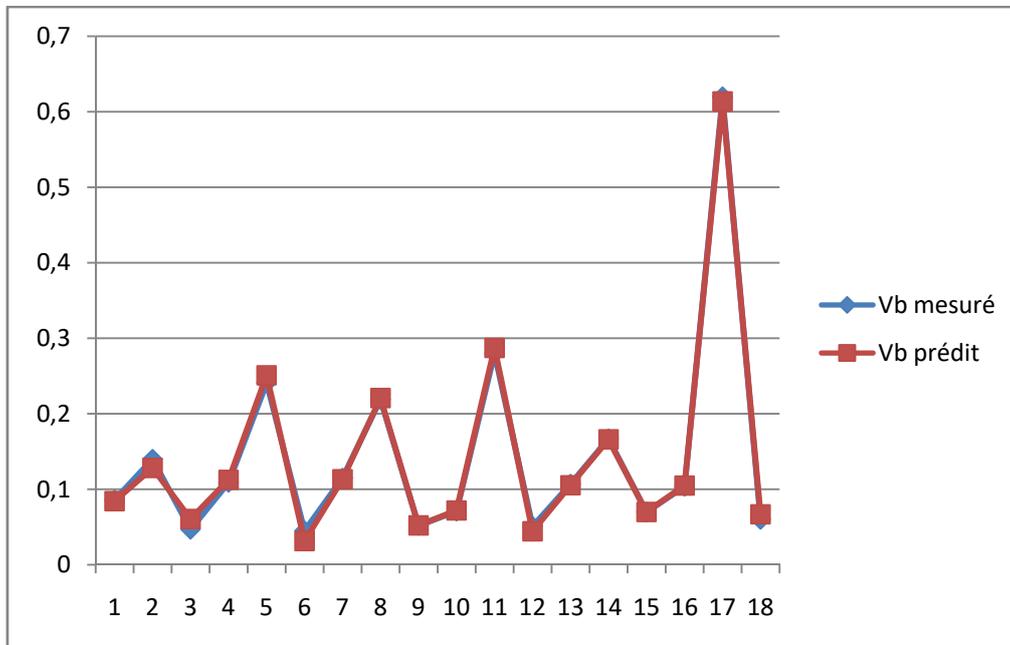


Figure III.14 Courbe de comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour l'usure V_b .

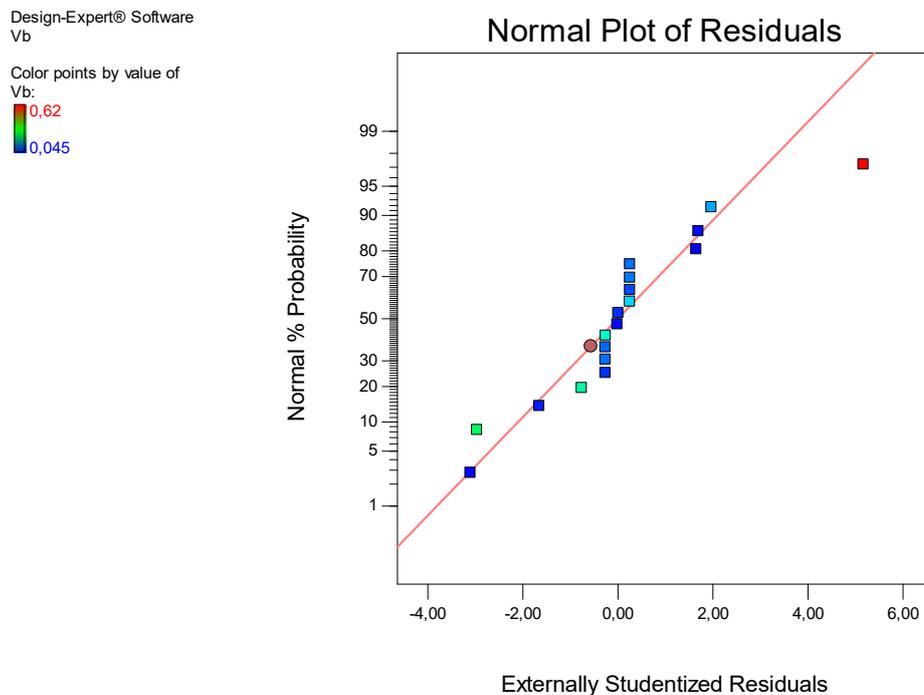


Figure III.15 Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour V_b .

III.3.3.5 Analyse de surface de réponse pour V_b

On a trois cas dans notre expérience, usinage avec outil de coupe en CVD, Cermet et PVD respectivement, on va commencer par :

➤ Cas 01. CVD

Le graphe de surface de réponse (**Figure III.16**) représente les résultats de la surface de réponse (3D) de l'usure V_b en fonction des paramètres de coupe V_c , f , a_p . L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA. La figure (16.a) montre que l'augmentation de la vitesse de coupe V_c et la profondeur de passe a_p provoque une augmentation de l'usure V_b . Par contre l'interaction de l'avance f et la vitesse de coupe V_c figure (16.b) induit une diminution de l'usure V_b .

La figure (16.c) montre que l'avance f a une faible influence sur l'usure V_b par rapport a V_c . Les grandes vitesses V_c de coupe engendrent d'une part une diminution des efforts et d'autre part une accélération de l'usure V_b .

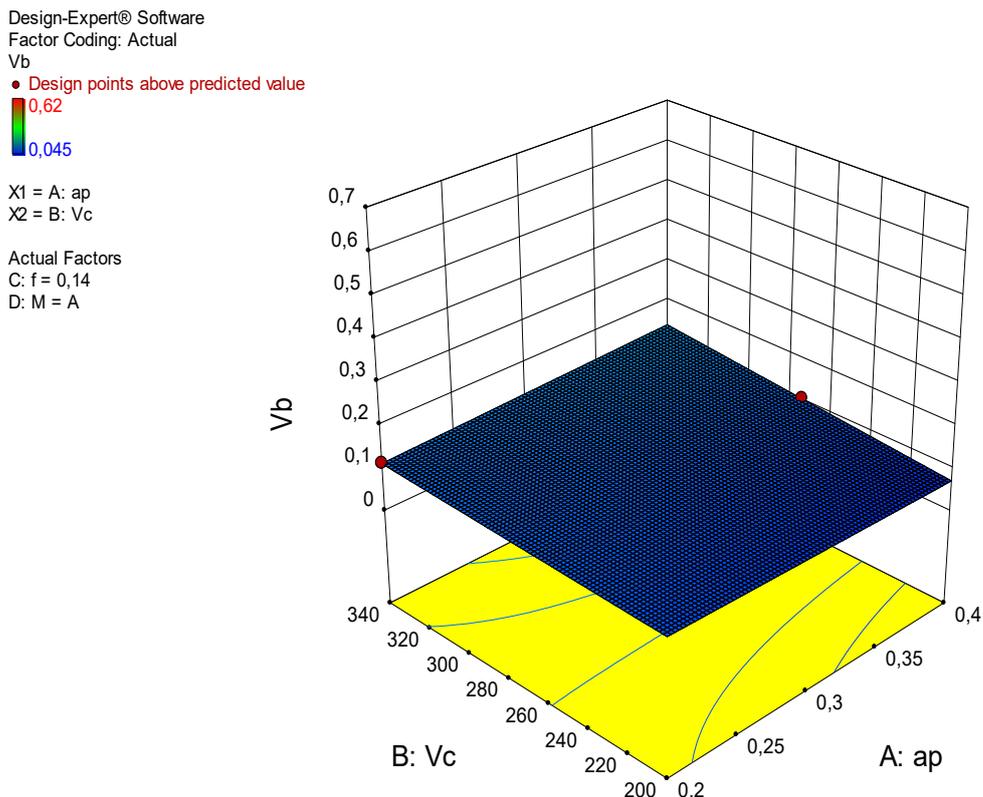


Figure (16.a)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Vb
 ● Design points above predicted value
 ○ Design points below predicted value
 0,62
 0,045
 X1 = A: ap
 X2 = C: f
 Actual Factors
 B: Vc = 270
 D: M = A

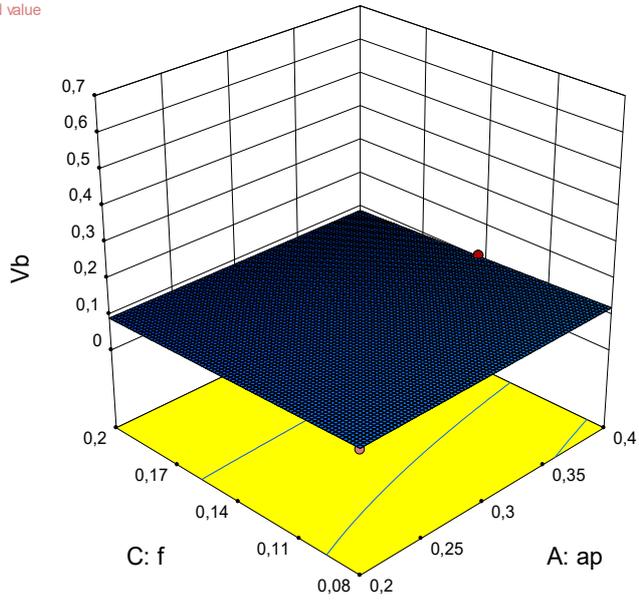


Figure (16.b)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Vb
 0,62
 0,045
 X1 = B: Vc
 X2 = C: f
 Actual Factors
 A: ap = 0,3
 D: M = A

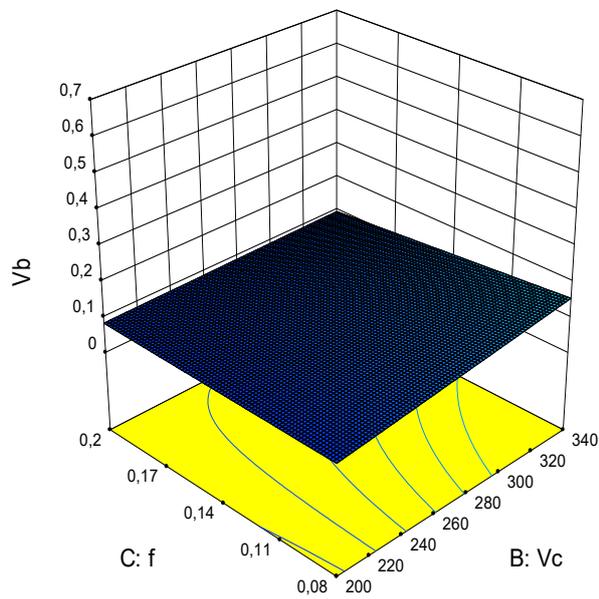


Figure (16.c)

Figure III.16 Surface de réponse de l'usure (Vb) en fonction de (Vc, f, ap) pour l'outil à revêtement CVD.

➤ Cas 02. Cermet

Le graphe de surface de réponse (**Figure III.17**) représente les résultats de la surface de réponse (3D) de l'usure **Vb** en fonction des paramètres de coupe **Vc**, **f**, **ap**. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que La **figure** (17.a) montre que l'augmentation de la vitesse de coupe et la profondeur de passe **ap** provoque une augmentation de l'usure **Vb**. La vitesse de coupe **Vc** affecte fortement l'usure **Vb** d'une façon supérieure par rapport à la profondeur de passe **ap**, donc ce facteur **Vc** possède l'effet le plus significatif sur **Vb**.

L'avance **f** a une faible influence sur l'usure **Vb**, figures (17.b) et (17.c).

Dans ce cas l'augmentation de l'avance **f** conduit à la diminution de l'usure **Vb**

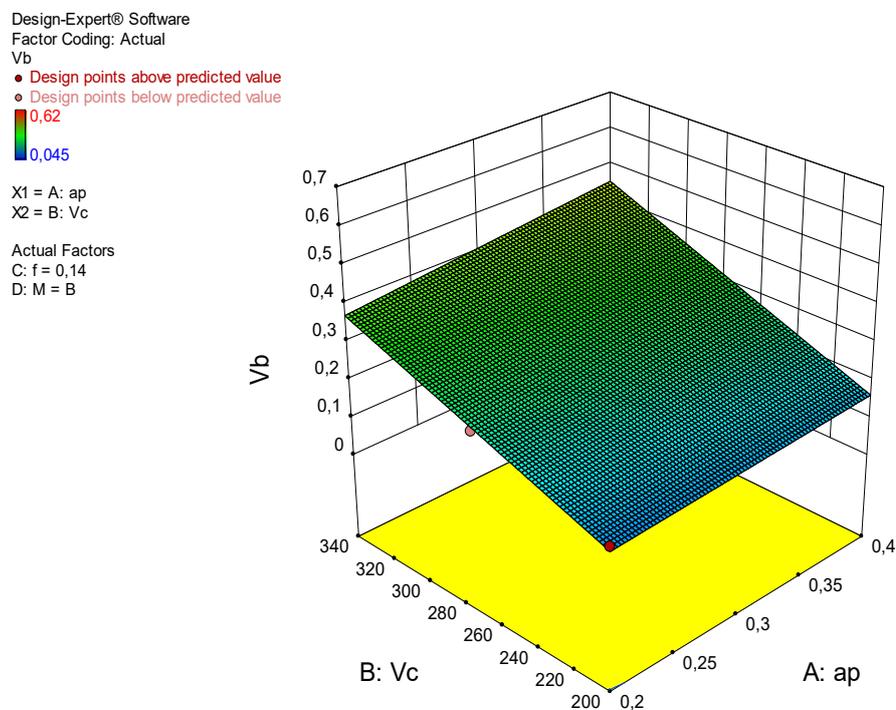


Figure (17.a)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Vb
 ● Design points above predicted value
 ○ Design points below predicted value
 0,62
 0,045
 X1 = A: ap
 X2 = C: f
 Actual Factors
 B: Vc = 270
 D: M = B

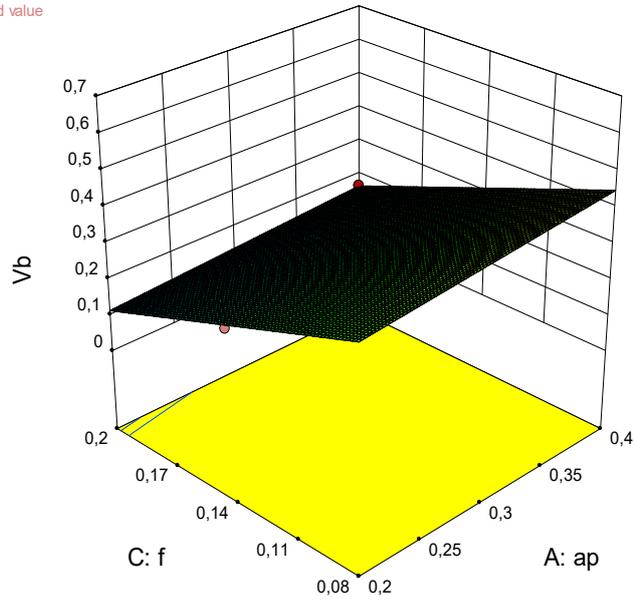


Figure (17.b)

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Vb
 0,62
 0,045
 X1 = B: Vc
 X2 = C: f
 Actual Factors
 A: ap = 0,3
 D: M = B

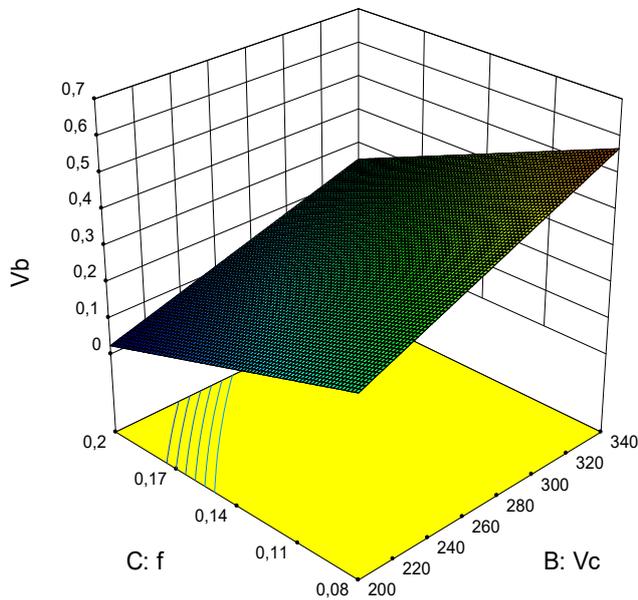


Figure (17.c)

Figure III.17 Surface de réponse de l'usure (Vb) en fonction de (Vc, f, ap) pour l'outil en Cermet.

➤ Cas 03. PVD

Le graphe de surface de réponse (**Figure III.18**) représente les résultats de la surface de réponse (3D) de l'usure **Vb** en fonction des paramètres de coupe **Vc**, **f**, **ap**. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque de la **figure** (18.a) que l'augmentation de la vitesse de coupe **Vc** et la profondeur de passe **ap** provoque une très faible augmentation de l'usure **Vb**, Par contre la **figure** (18.b) et (18.c) montre que l'augmentation de l'avance **f** conduit à la diminution de l'usure **Vb**.

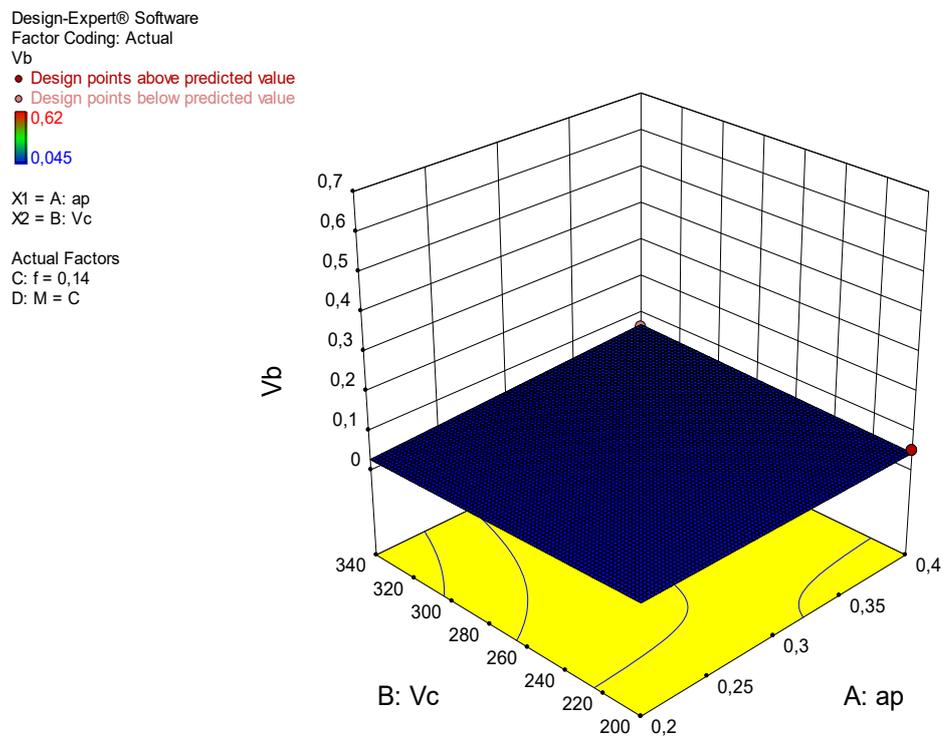


Figure (18.a)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Vb
● Design points above predicted value
0,62
0,045
X1 = A: ap
X2 = C: f
Actual Factors
B: Vc = 270
D: M = C

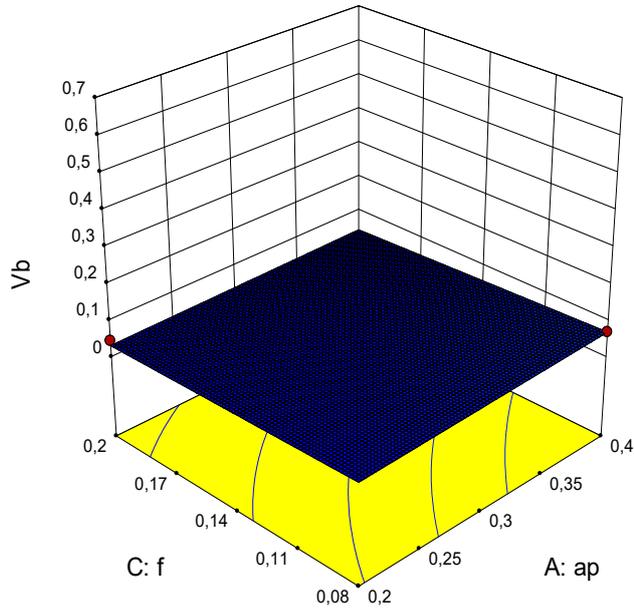


Figure (18.b)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Vb
0,62
0,045
X1 = B: Vc
X2 = C: f
Actual Factors
A: ap = 0,3
D: M = C

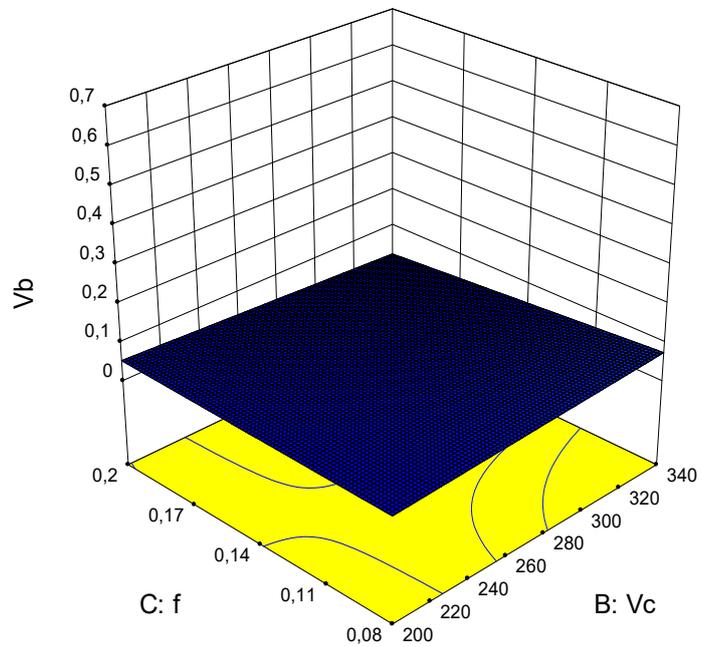


Figure (18.c)

Figure III.18 Surface de réponse de l'usure (Vb) en fonction de (Vc, f, ap) pour l'outil a revêtement PVD.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de la méthodologie de surface de réponse (**MSR**) en tournage de l'acier **AISI D3** avec trois matériaux de coupe a permis de faire l'analyse de la variance pour les paramètres technologiques de sorti et de connaître l'influence de chaque facteur d'entrée. Aussi, ces résultats nous ont permis de proposer des modèles mathématiques pour la rugosité de surface **Ra**, l'effort de coupe tangentiel **Fz** et l'usure **Vb** en fonction des paramètres de coupe.

Chapitre IV

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 les méthodes, Taguchi, GRA, GA, PSO, DF, etc. 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 d'usinage, la rugosité de surface R_a , l'effort tangentiel F_z et l'usure en dépouille V_b lors du tournage à sec de l'acier AISI D3. Les paramètres d'entrée sont le matériau des plaquettes de coupe en (carbure CVD, Cermet et carbure PVD), la vitesse de coupe V_c , l'avance f et la profondeur de passe ap . Dans notre cas, la matrice de Taguchi L18 a été utilisée.

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 (R_a), le minimum de l'effort tangentiel de coupe F_z et l'usure en dépouille V_b minimale sont recherchées.

La caractéristique (S/B) la plus petite est la meilleur (*smaller-the-better*) a été utilisé pour (R_a , F_z et V_b). La caractéristique (S/B) la plus petite est la meilleure.

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).

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

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

n = nombre de mesures effectuées.

Tableau IV.1 Signal/Bruit des paramètres de sortie étudiées Ra, Vb, et Fz.

	ap (mm)	Vc (m/min)	M	f (mm/tr)	Vb (mm)	Fz (N)	Ra (μm)	Vb (S/B)	Fz (S/B)	Ra (S/B)
1	0,2	200	CVD	0,08	0,086	28,69	1,519	21,310	-29,155	-3,631
2	0,2	200	Cermet	0,14	0,14	112,28	2,16	17,077	-41,006	-6,689
3	0,2	200	PVD	0,2	0,047	105,47	2,301	26,558	-40,463	-7,238
4	0,2	270	CVD	0,08	0,109	40,57	1,628	19,251	-32,164	-4,233
5	0,2	270	Cermet	0,14	0,241	158,6	2,71	12,360	-44,006	-8,659
6	0,2	270	PVD	0,2	0,045	110,36	2,206	26,936	-40,856	-6,872
7	0,2	340	CVD	0,14	0,115	94,51	1,677	18,786	-39,510	-4,491
8	0,2	340	Cermet	0,2	0,219	143,98	4,25	13,191	-43,166	-12,568
9	0,2	340	PVD	0,08	0,052	58,4	2,412	25,680	-35,328	-7,648
10	0,4	200	CVD	0,2	0,071	209,32	2,314	22,975	-46,416	-7,287
11	0,4	200	Cermet	0,08	0,28	238,02	1,638	11,057	-47,532	-4,286
12	0,4	200	PVD	0,14	0,051	154,63	2,638	25,849	-43,786	-8,425
13	0,4	270	CVD	0,14	0,107	155,95	1,318	19,412	-43,860	-2,398
14	0,4	270	Cermet	0,2	0,167	308,87	2,586	15,546	-49,796	-8,253
15	0,4	270	PVD	0,08	0,07	110,64	2,221	23,098	-40,878	-6,931
16	0,4	340	CVD	0,2	0,104	235,1	1,773	19,659	-47,425	-4,974
17	0,4	340	Cermet	0,08	0,62	379,83	2,632	4,152	-51,592	-8,406
18	0,4	340	PVD	0,14	0,06	181,67	2,196	24,437	-45,186	-6,833

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 trois paramètres d'usinage (V_c , f , M et ap). 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 , ap et M) présentent des effets différents sur la rugosité de surface R_a . La plus importante influence correspond au matériau M avec un effet de 3.641 suivie par l'avance f avec un effet de 2,010 et puis la vitesse de coupe V_c avec 1.262 et en dernier lieu vient la profondeur de passe ap avec 0.471 d'effet.

Tableau IV.2 Moyenne des ratios S/B de la rugosité (R_a) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	ap	V_c	M	f
1	-6,892	-6,260	-4,502	-5,856
2	-6,421	-6,224	-8,143	-6,249
3		-7,486	-7,325	-7,865
Delta	0,471	1,262	3,641	2,010
Rang	4	3	1	2

Selon l'approche de **Taguchi**, l'optimum de la réponse (R_a) correspond aux niveaux V_c2 , $f1$ et $ap2$ et $M1$. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (R_a) sont donc la vitesse de coupe $V_c = 270$ m/min, la plus faible avance $f = 0,08$ mm et la grande profondeur de passe, $ap = 0,4$ mm et le matériau A : carbure métallique à revêtement CVD. (**Figure IV.1**).

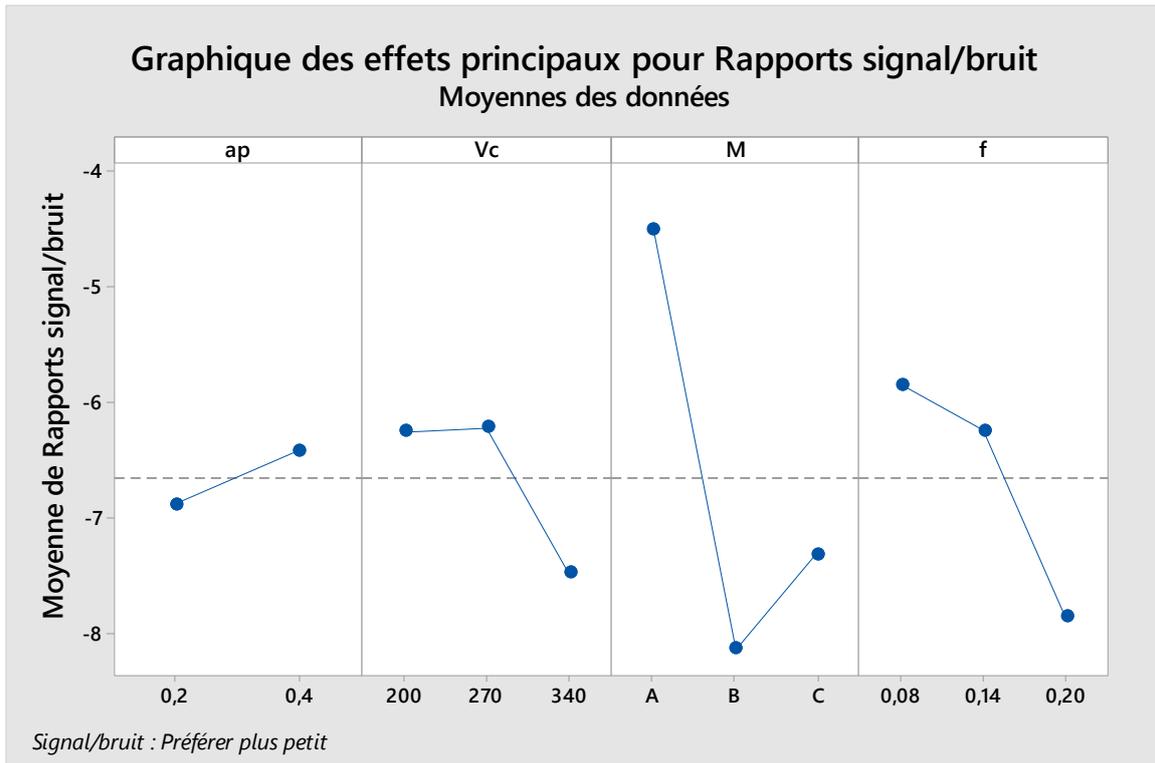


Figure IV.1 Graphique des effets principaux de (Vc, f, ap et M) sur la rugosité de surface (Ra).

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

L'analyse des résultats du (tableau IV.3) et de la (figure IV.2), montre que les paramètres d'usinage (Vc, f, ap et M) présentent des effets différents sur l'effort tangentiel Fz. La plus importante influence correspond à la profondeur de passe ap avec 7.87 d'effet suivie par le matériau M avec un effet de 6.43, puis l'avance f avec un effet de 5.25 et en dernier lieu vient la vitesse de coupe Vc avec 2.31.

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

Niveau	ap	Vc	M	f
1	-38,41	-41,39	-39,75	-39,44
2	-46,27	-41,93	-46,18	-42,89
3		-43,70	-41,08	-44,69
Delta	7,87	2,31	6,43	5,25
Rang	1	4	2	3

Selon l'approche de **Taguchi**, l'optimum de la réponse (F_z) correspond aux niveaux V_c1 , $f1$ et $ap1$ et $M1$. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de l'effort tangentiel (F_z) sont donc la plus petite vitesse de coupe $V_c = 200$ m/min, la plus faible avance $f = 0,08$ mm et la petite profondeur de passe, $ap = 0,2$ mm et le matériau A : carbure métallique a revêtement CVD (**figure IV.2**).

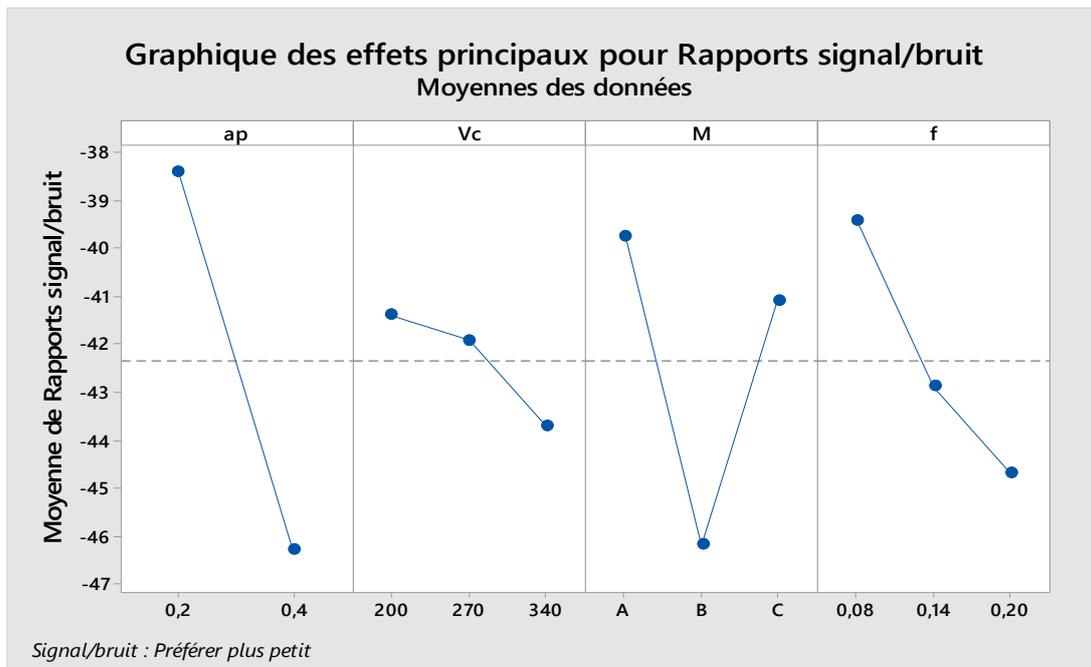


Figure IV.2 Graphique des effets principaux de V_c, f, ap et M sur l'effort tangentiel (F_z).

IV.2.1.3 Analyse des effets principaux sur l'usure (V_b)

Du (**tableau IV.4**) et de la (**figure IV.3**), on remarque que les paramètres d'usinage (V_c, f, ap et M) présentent des effets différents sur l'usure V_b . La plus importante influence correspond au matériau M avec 13,20 d'effet suivie par l'avance f avec un effet de 3,39 et puis la vitesse de coupe V_c avec un effet de 3,15 et en dernier lieu vient la profondeur de passe ap avec 1,66.

Tableau IV.4 Moyenne des ratios S/B (V_b) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	ap	V_c	M	f
1	20,13	20,80	20,23	17,42
2	18,46	19,43	12,23	19,65
3		17,65	25,43	20,81
Delta	1,66	3,15	13,20	3,39
Rang	4	3	1	2

Selon l'approche de **Taguchi**, l'optimum de la réponse Fz correspond aux niveaux Vc3, f1 et ap2 et M2. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de L'usure Vb sont donc la plus petite vitesse de coupe $V_c = 200$ m/min, la plus grande avance $f = 0,2$ mm et la petite profondeur de passe, $a_p = 0,2$ mm et le matériau C : carbure métallique a revêtement PVD (**Figure IV.03**).

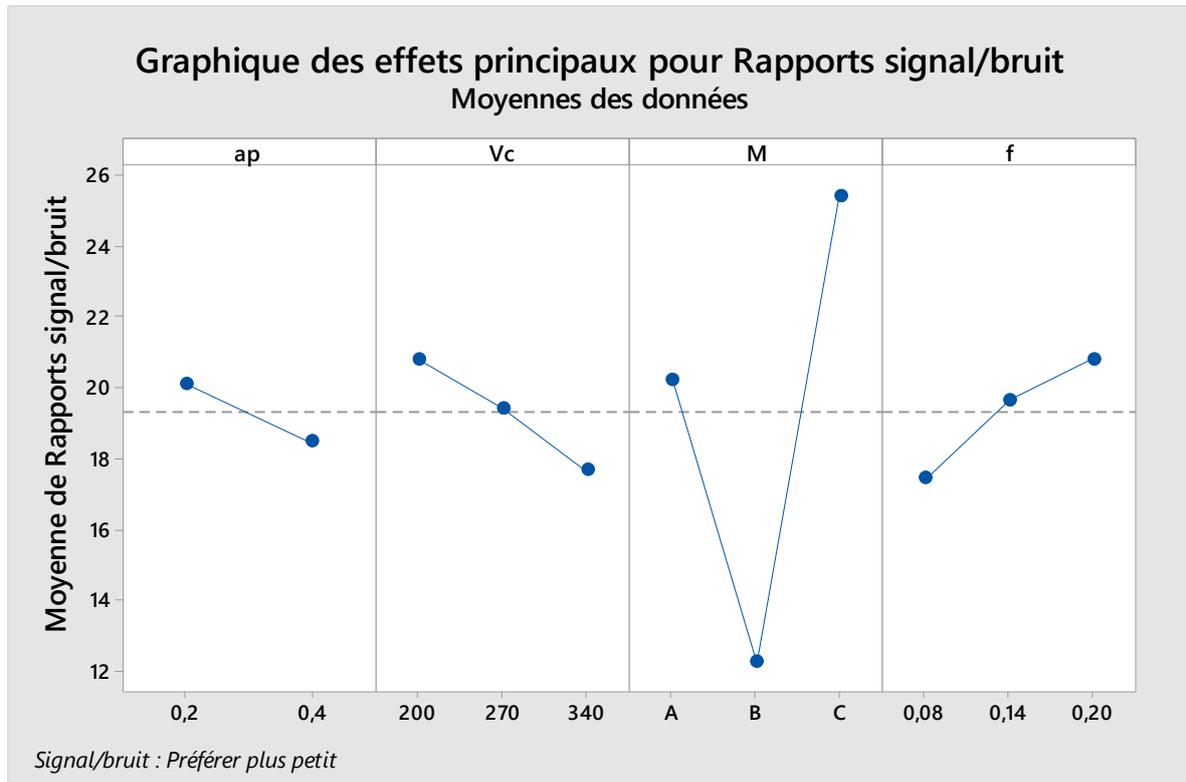


Figure IV.3 Graphique des effets principaux de V_c, f, a_p et M sur l'usure (V_b).

IV. 3 Optimisation par 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 [17].

En recherchant un minimum ou un maximum, les désirabilités peuvent être calculées par les équations suivantes respectivement (IV.2, IV.3, IV.4).

$$Des(y) = \begin{cases} 0, & y < Low \\ \left(\frac{y-Low}{Tar-Low}\right)^w, & Low \leq y \leq Tar \\ 1, & y > Tar \end{cases} \quad (IV.2)$$

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

$$Des_{comb} = (Des_1 \times Des_2 \times \dots \times Des_n)^{\frac{1}{n}} = (\pi_{i=1}^n Des_i)^{\frac{1}{n}} \quad (IV.4)$$

IV.3.1.1 Cas d'optimisation étudiés

Dans notre étude, on s'est intéressé à quatre cas d'optimisation qui sont: (1) Rugosité minimale, (2) effort tangentiel Fz minimal, (3) l'usure Vb minimale et (4) un compromis entre l'usure et la rugosité de surface. Les **tableaux (IV.5, IV.6, IV.7 et IV.8)** présentent les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, l'importance affectés à chaque paramètre pour les quatre cas d'optimisation. Les **tableaux (IV.9, IV.10, IV.11 et IV.12)**, illustrent les solutions correspondantes aux quatre cas cités.

➤ Premier cas d'optimisation

On a donné l'importance maximale à la rugosité de surface (Ra) (5+), tout en gardant la l'effort de coupe (Fz) et l'usure (Vb) à son bas niveau (1+) à celui qui a moins d'importance. Le régime optimal trouvé est de Vc=200m/min, f=0,08 mm/tr et ap= 0,385 mm. La rugosité prend une valeur minimale de Ra=1,318µm, l'usure Vb=0,072mm, l'effort tangentiel (Fz) = 46,047N, le matériau d'outil de coupe A : carbure métallique a revêtement CVD et la désirabilité est égale à Des=0,986. Ce cas est intéressant pour un tournage de finition où la qualité est exigée (rugosité minimale).

➤ Deuxième cas

L'optimisation de l'effort tangentiel (Fz) est devenue la mieux considérée avec une importance (5+), tandis que la rugosité (Ra) et l'usure (Vb) ont pris un niveau minimal avec une importance (1+). Le régime optimal trouvé est de Vc=200m/min, f= 0,080mm/tr, ap=0,225mm et le matériau d'outil de coupe A : carbure métallique a revêtement CVD. L'effort tangentiel Fz prend une valeur minimale, Fz=28,691N, la rugosité Ra=1,575 µm, l'usure Vb=0,083mm, et la désirabilité Des=0,978. Ce cas d'optimisation est réservé pour une production où on recherche les efforts minimaux (application à l'usinage des pièces minces).

➤ **Troisième cas**

S'intéresse à une optimisation où l'usure V_b est devenu la mieux considérée avec une importance (5+), tandis que la rugosité R_a et l'effort F_z ont pris un niveau minimal avec une importance (1+). Le régime optimale des conditions de coupe trouvé est de $V_c=200\text{m/min}$, $f=0,080\text{mm/tr}$, $a_p=0,4\text{mm}$ et le matériau d'outil de coupe A : carbure métallique a revêtement CVD. L'usure V_b prend une valeur minimale $V_b=0,071\text{mm}$, la rugosité $R_a=1,293\mu\text{m}$, l'effort tangentiel $F_z=47,730\text{N}$ et la désirabilité $Des=0,960$. Ce cas est intéressant lorsqu'on cherche une usure V_b minimale des outils de coupe.

➤ **Quatrième cas**

Ce cas s'intéresse à une optimisation combinée entre une rugosité minimale et une usure minimale avec une même importance (5+) pour les deux sorties et (F_z) avec une importance de 1. Le régime optimal trouvé est de $V_c=200\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.4\text{mm}$ et le matériau d'outil de coupe A : carbure métallique a revêtement CVD. La rugosité (R_a) et l'usure (V_b) prennent successivement les valeurs ($1,293\mu\text{m}$ et $0,071\text{mm}$) et la désirabilité $des = 0,974$.

Tableau IV.5 But et gamme de paramètres pour le 1er cas d'optimisation.

Constraints						
		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A: a_p	is in range	0,2	0,4	1	1	3
B: V_c	is in range	200	340	1	1	3
C: f	is in range	0,08	0,2	1	1	3
D:M	is in range	A	C	1	1	3
V_b	minimize	0,045	0,62	1	1	1
F_z	minimize	28,69	379,83	1	1	1
R_a	minimize	1,318	4,25	1	1	5

Tableau IV.6 But et gamme de paramètres pour le 2ème cas d'optimisation.

		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A: a_p	is in range	0,2	0,4	1	1	3
B: V_c	is in range	200	340	1	1	3
C: f	is in range	0,08	0,2	1	1	3
D:M	is in range	A	C	1	1	3
V_b	minimize	0,045	0,62	1	1	1
F_z	minimize	28,69	379,83	1	1	5
R_a	minimize	1,318	4,25	1	1	1

Tableau IV.7 But et gamme de paramètres pour le 3ème cas d'optimisation.

		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A:ap	is in range	0,2	0,4	1	1	3
B:Vc	is in range	200	340	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,2	1	1	3
D:M	is in range	A	C	1	1	3
Vb	minimize	0,045	0,62	1	1	5
Fz	minimize	28,69	379,83	1	1	1
Ra	minimize	1,318	4,25	1	1	1

Tableau IV.8 But et gamme de paramètres pour le 4ème cas d'optimisation.

		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A:ap	is in range	0,2	0,4	1	1	3
B:Vc	is in range	200	340	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,2	1	1	3
D:M	is in range	A	C	1	1	3
Vb	minimize	0,045	0,62	1	1	5
Fz	minimize	28,69	379,83	1	1	1
Ra	minimize	1,318	4,25	1	1	5

Tableau IV.9 Réponses de la rugosité de surface, l'effort tangentiel et l'usure pour le 1er cas d'optimisation.

Number	ap	Vc	f	M	Vb	Fz	Ra	Desirability	
1	0,385	200,000	0,080	A	0,072	46,047	1,318	0,986	Selected
2	0,385	200,003	0,080	A	0,072	46,055	1,318	0,986	
3	0,396	200,001	0,080	A	0,071	47,340	1,299	0,986	
4	0,365	205,442	0,080	A	0,077	46,413	1,318	0,985	
5	0,349	210,415	0,080	A	0,081	46,794	1,318	0,983	

Tableau IV.10 Réponses de la rugosité de surface, l'effort tangentiel et l'usure pour le 2ème cas d'optimisation.

Solutions for 3 combinations of categoric factor levels									
Number	ap	Vc	f	M	Vb	Fz	Ra	Desirability	
1	0,225	200,001	0,080	A	0,083	28,691	1,575	0,978	Selected
2	0,215	203,601	0,080	A	0,085	28,665	1,581	0,977	
3	0,240	200,001	0,080	A	0,082	30,285	1,551	0,976	
4	0,203	208,223	0,080	A	0,087	28,687	1,588	0,976	
5	0,256	200,007	0,080	A	0,080	32,070	1,525	0,974	

Tableau IV.11 Réponses de la rugosité de surface, l'effort tangentiel et l'usure pour le 3ème cas d'optimisation.

Solutions for 3 combinations of categoric factor levels									
Number	ap	Vc	f	M	Vb	Fz	Ra	Desirability	
1	0,400	200,001	0,080	A	0,071	47,730	1,293	0,960	Selected
2	0,389	200,000	0,080	A	0,072	46,519	1,311	0,960	
3	0,364	200,002	0,080	A	0,073	43,818	1,351	0,957	
4	0,343	200,002	0,080	A	0,075	41,496	1,385	0,955	
5	0,400	200,604	0,087	A	0,071	57,171	1,344	0,954	

Tableau IV.12 Réponses de la rugosité de surface, l'effort tangentiel et l'usure pour le 4ème cas d'optimisation.

Solutions for 3 combinations of categoric factor levels									
Number	ap	Vc	f	M	Vb	Fz	Ra	Desirability	
1	0,400	200,001	0,080	A	0,071	47,729	1,293	0,974	Selected
2	0,388	200,001	0,080	A	0,072	46,461	1,312	0,974	
3	0,376	202,308	0,080	A	0,074	46,192	1,318	0,972	
4	0,360	206,733	0,080	A	0,078	46,504	1,318	0,969	
5	0,400	204,829	0,087	A	0,074	59,430	1,318	0,968	

a) Cas 01

La (figure IV.4) montre le domaine de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f et ap) pour obtenir une rugosité de surface minimale (*meilleure qualité de surface*). Aussi la (figure IV.5) expose les valeurs optimales exacte des paramètres (V_c , f et ap), ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés (R_a , F_z et V_b) et la désirabilité pour ce cas.

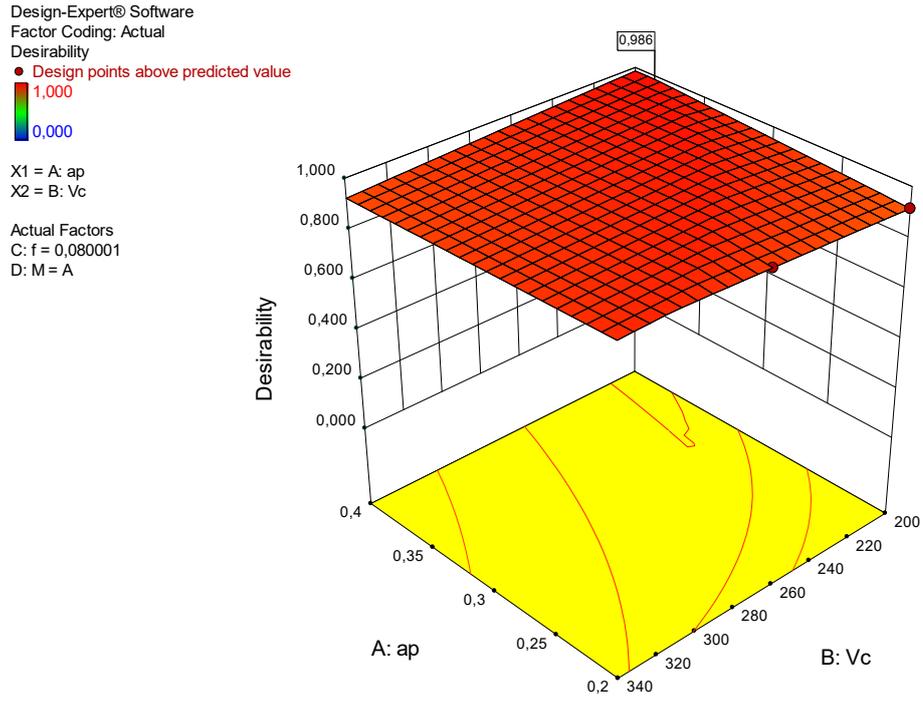


Figure 4.a

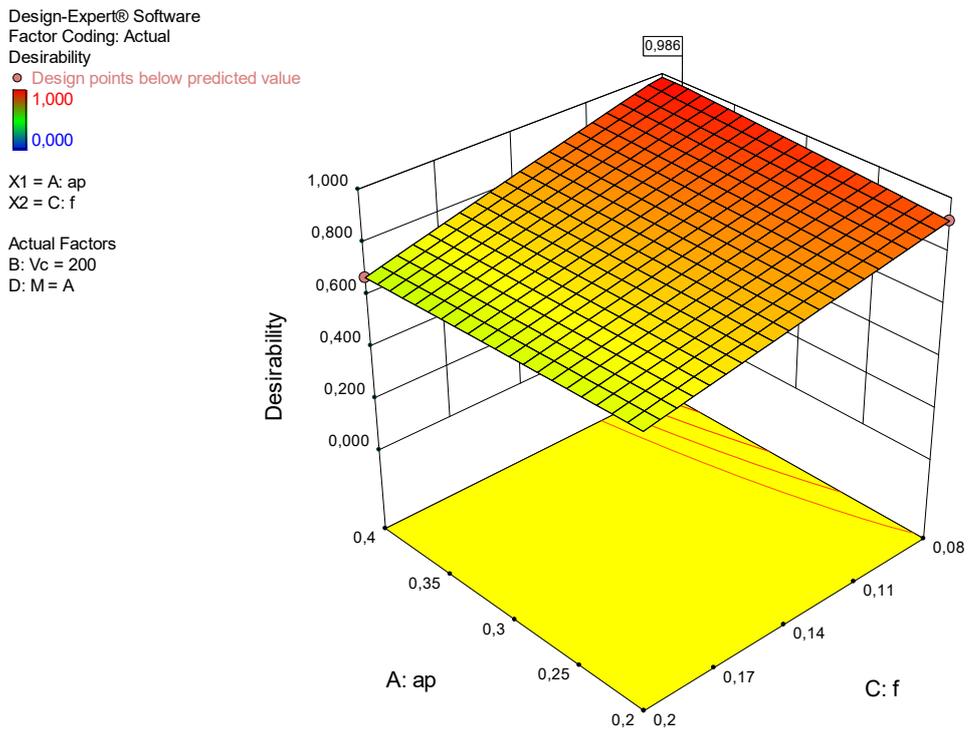


Figure 4.b

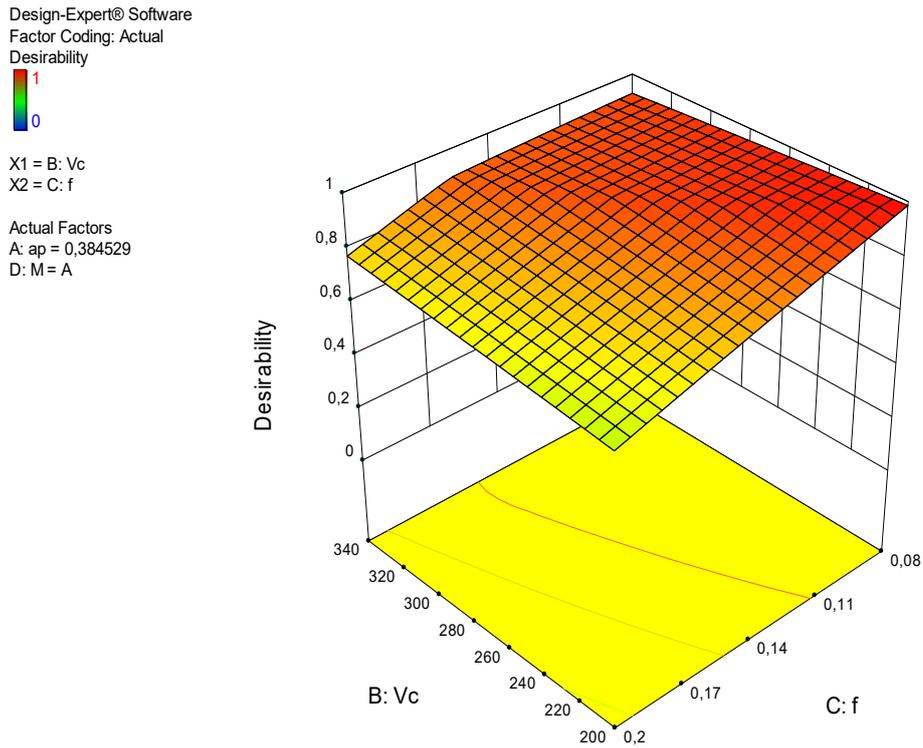


Figure 4.c

Figure IV.4 Graph de désirabilité de Ra , Fz et Vb (diagramme de surface 3D) pour le 1er cas.

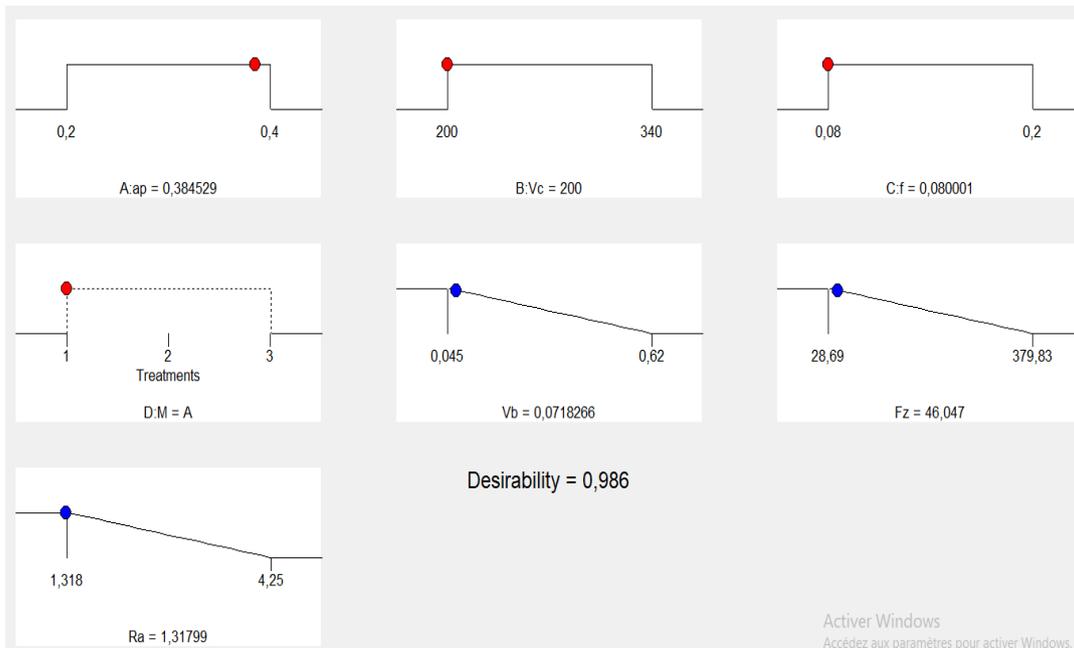


Figure IV.5 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra), l'effort tangentiel (Fz) et l'usure (Vb).

b) Cas 02

La **(figure IV.6)** présente l'espace de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des Paramètres du régime de coupe (V_c , f et ap) pour obtenir une valeur minimal de l'effort tangentiel (F_z) (minimisé les efforts). Aussi la **(figure IV.7)** expose, les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrée (V_c , f et ap), de même celles des paramètres technologiques (Ra , F_z et V_b) et la désirabilité pour ce deuxième cas.

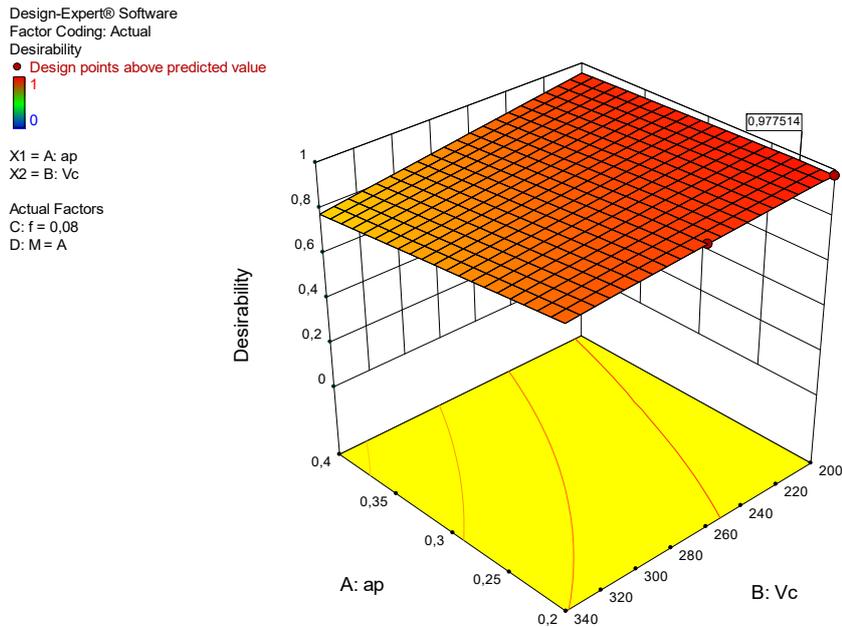


Figure 6.a

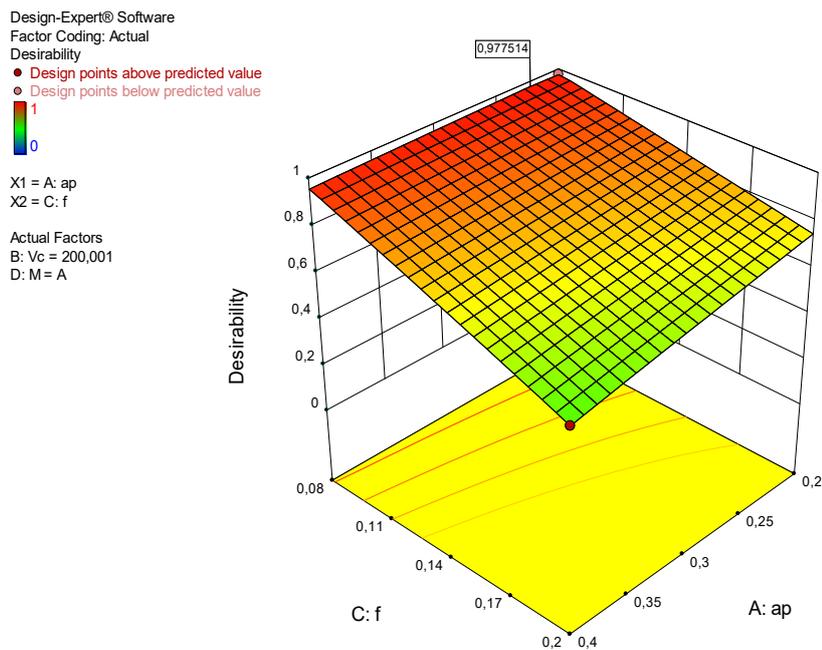


Figure 6.b

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Desirability
 1
 0
 X1 = B: Vc
 X2 = C: f
 Actual Factors
 A: ap = 0,225112
 D: M = A

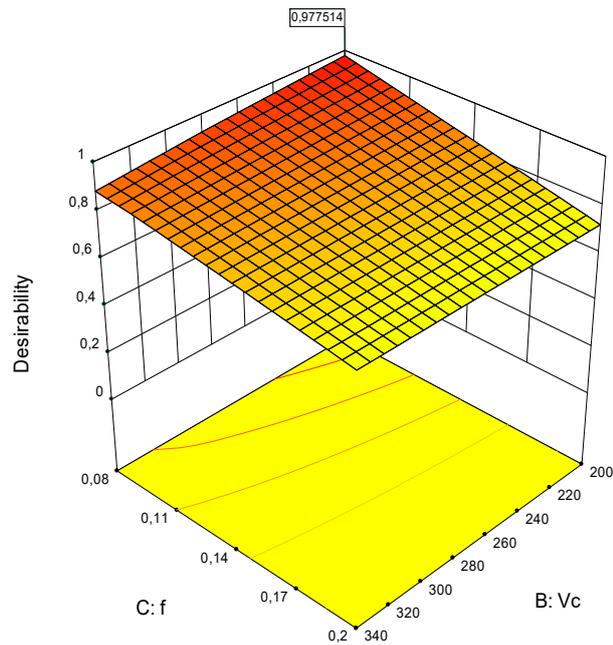


Figure 6.c

Figure IV.6 Graph de désirabilité de Ra, Fz et Vb (diagramme de surface 3D) pour le 2ème cas.

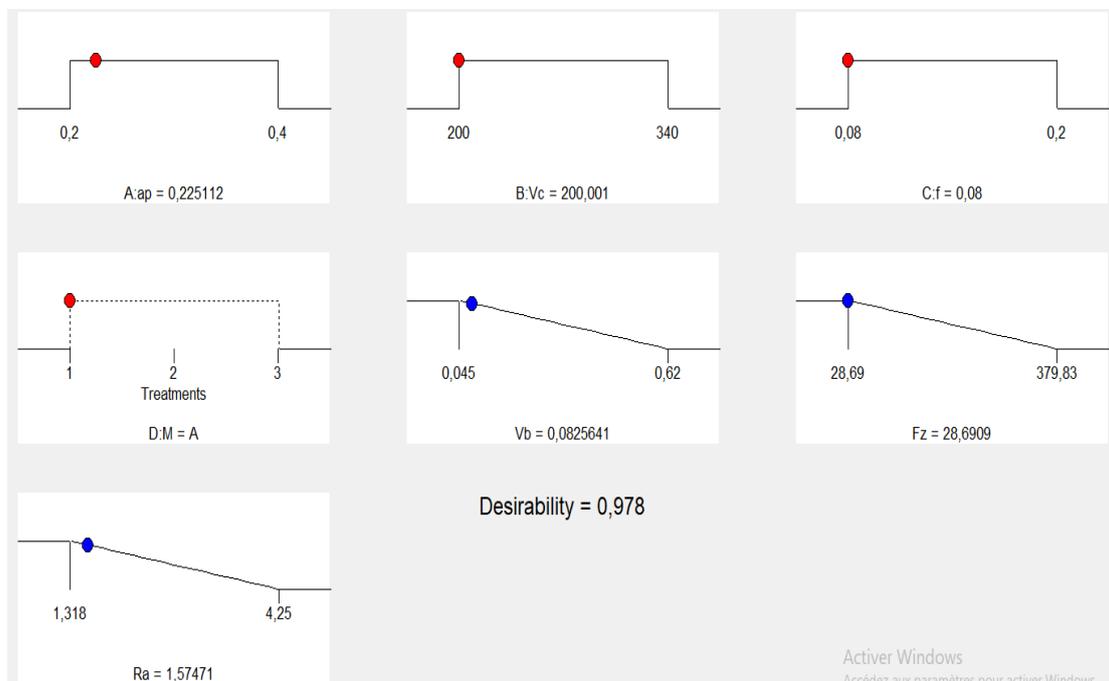


Figure IV.7 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra), l'effort tangentiel (Fz) et l'usure (Vb).

c) Cas 03

La (figure IV.8) montre le domaine de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) pour obtenir une usure d'outil de coupe minimale. D'autres parts, la (figure IV.9) expose les valeurs optimales exacte des paramètres (V_c , f et a_p), ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés (R_a , F_z et V_b) et la désirabilité pour le dernier cas étudié.

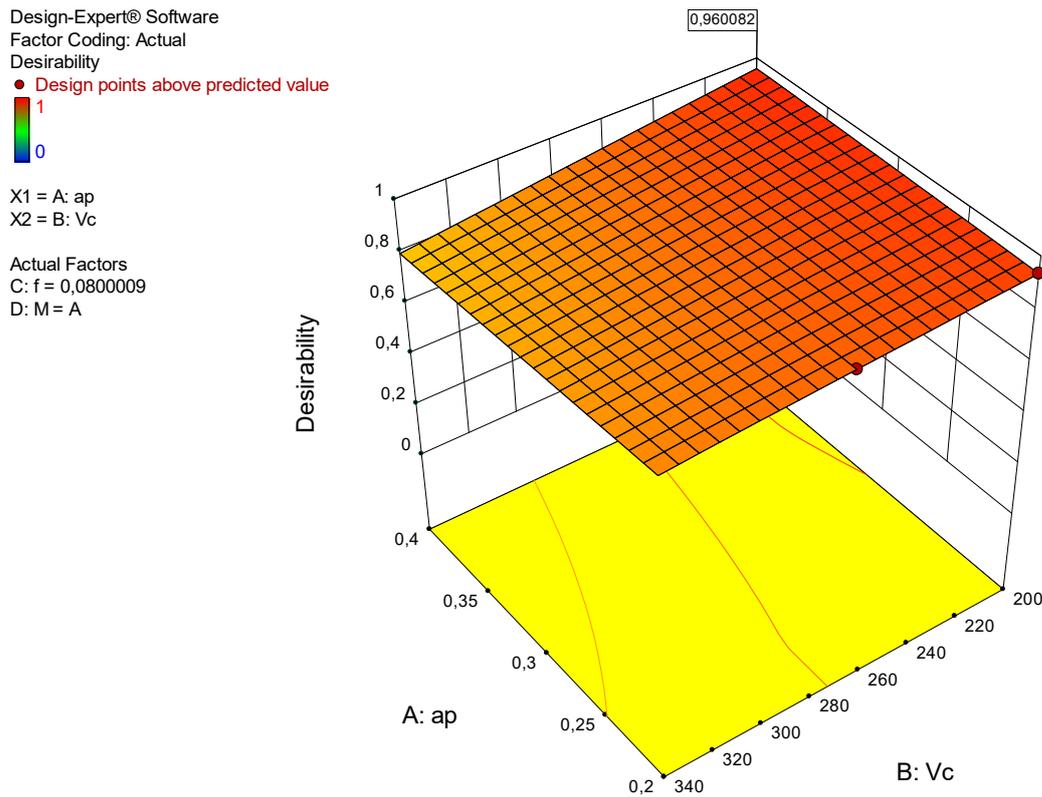


Figure 8 .a

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Desirability



X1 = B: Vc
 X2 = C: f

Actual Factors
 A: ap = 0,39999
 D: M = A

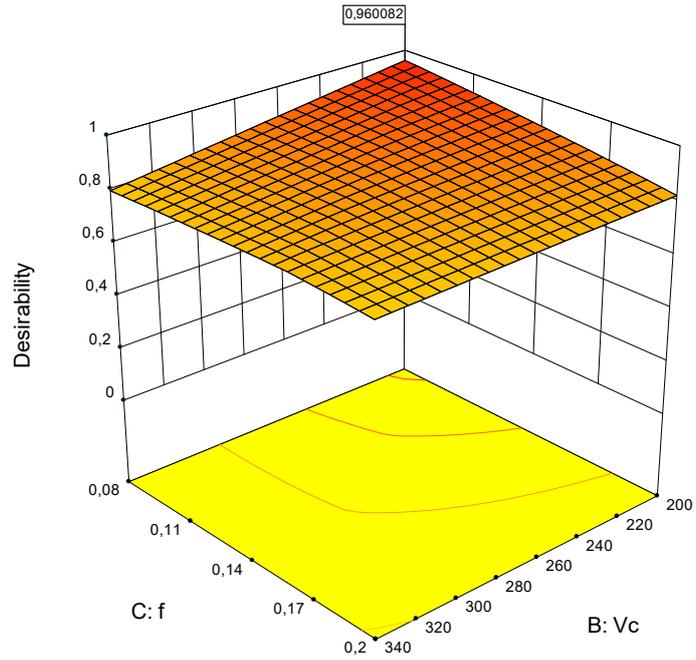


Figure 8 .b

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Desirability

● Design points above predicted value



X1 = A: ap
 X2 = C: f

Actual Factors
 B: Vc = 200,001
 D: M = A

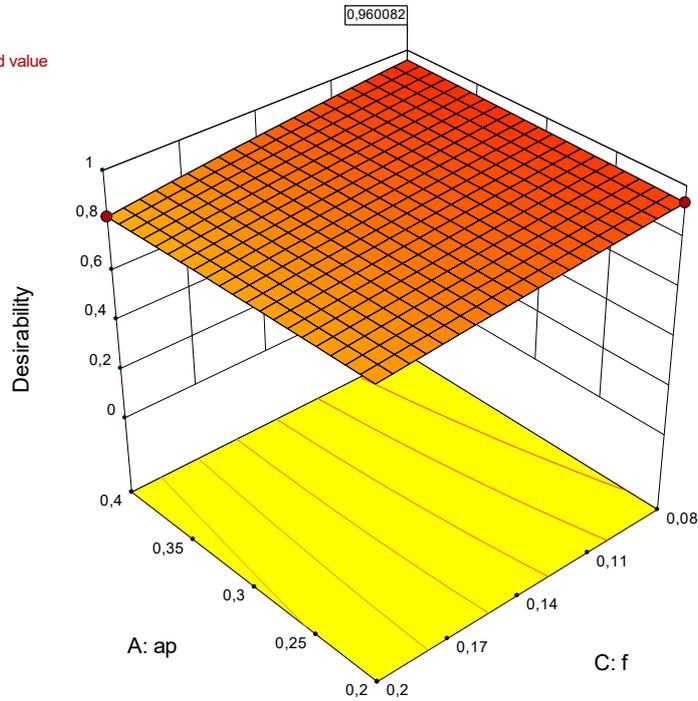


Figure 8 .c

Figure IV.8 Graph de désirabilité de Ra, Fz et Vb (diagramme de surface 3D) pour le 3ème cas.

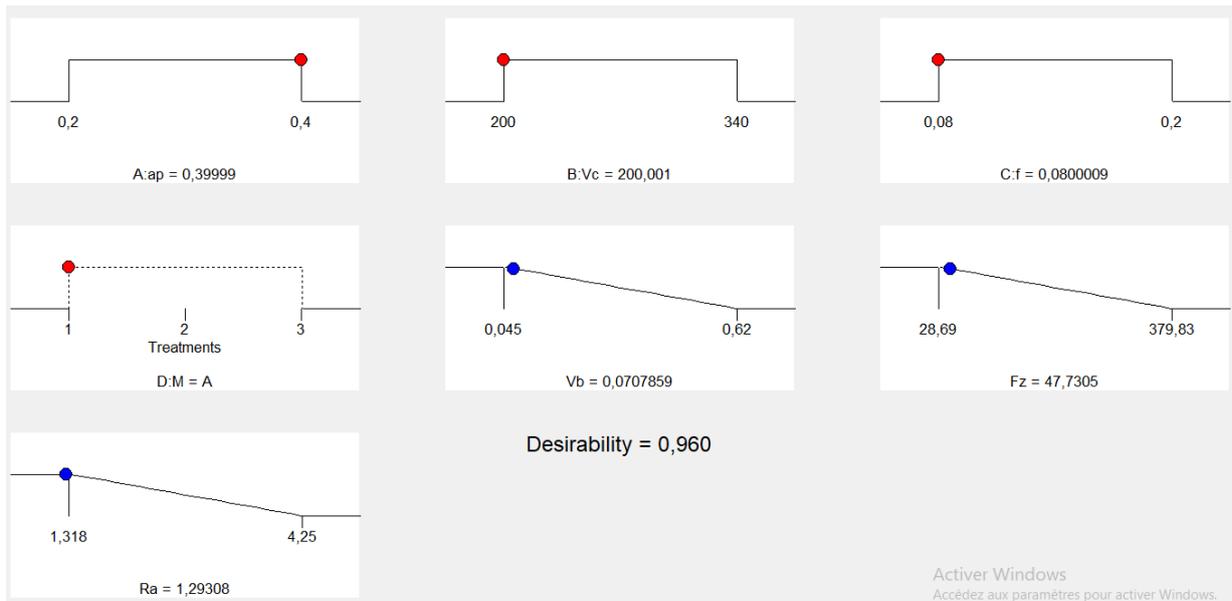


Figure IV.9 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra), l'effort tangentiel (Fz) et l'usure (Vb).

d) Cas 04

La (figure IV.10) présente l'usage de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres de coupe (Vc, f, ap et M) pour obtenir un compromis entre la rugosité de surface et l'usure. La (figure IV.11) exprime d'une manière différente, les valeurs optimales exactes des paramètres (Vc, f, ap et M), de même celles des paramètres technologiques (Ra, Vb et Fz) et la désirabilité pour le dernier cas étudié.

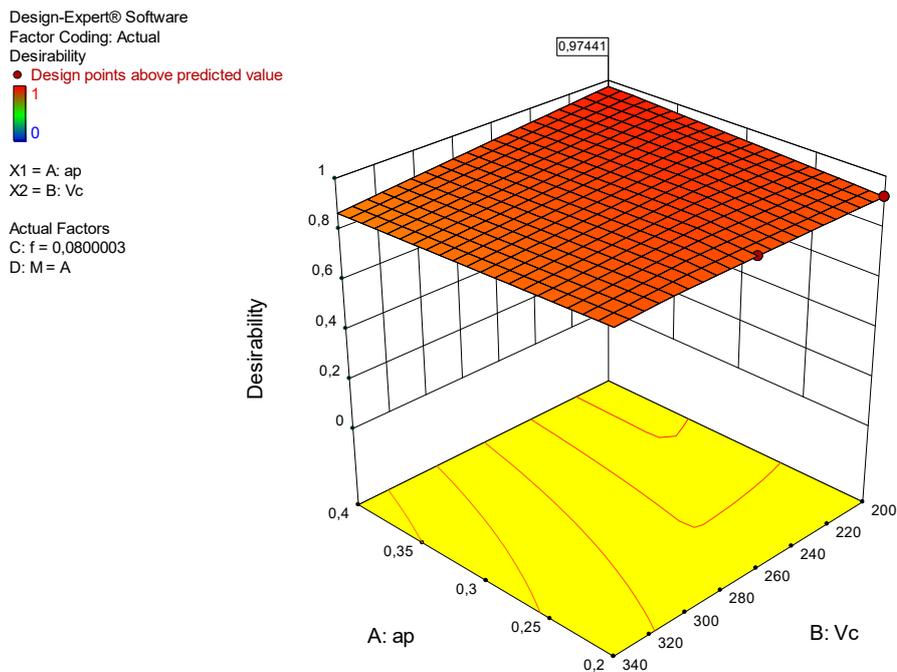


Figure 10.a

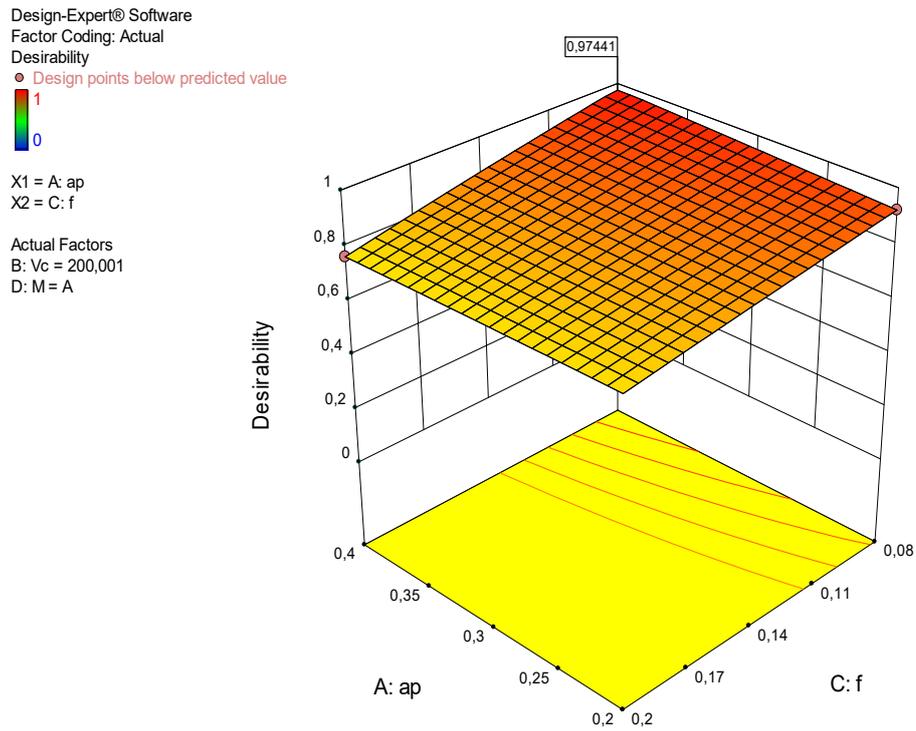


Figure 10.b

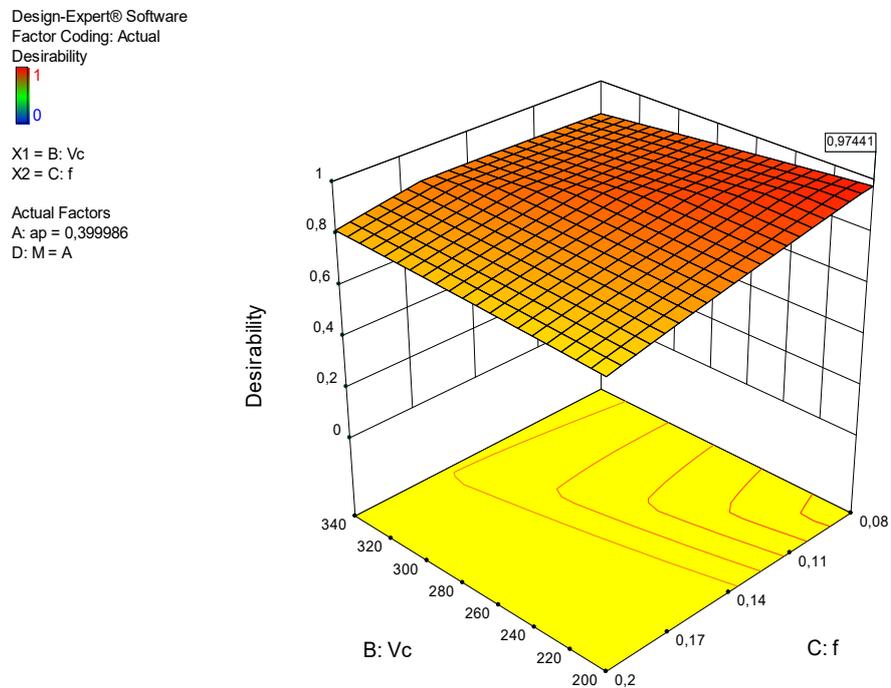


Figure 10.c

Figure IV.10 Graph de désirabilité de Ra, Fz et Vb (diagramme de surface 3D) pour le 4ème cas.

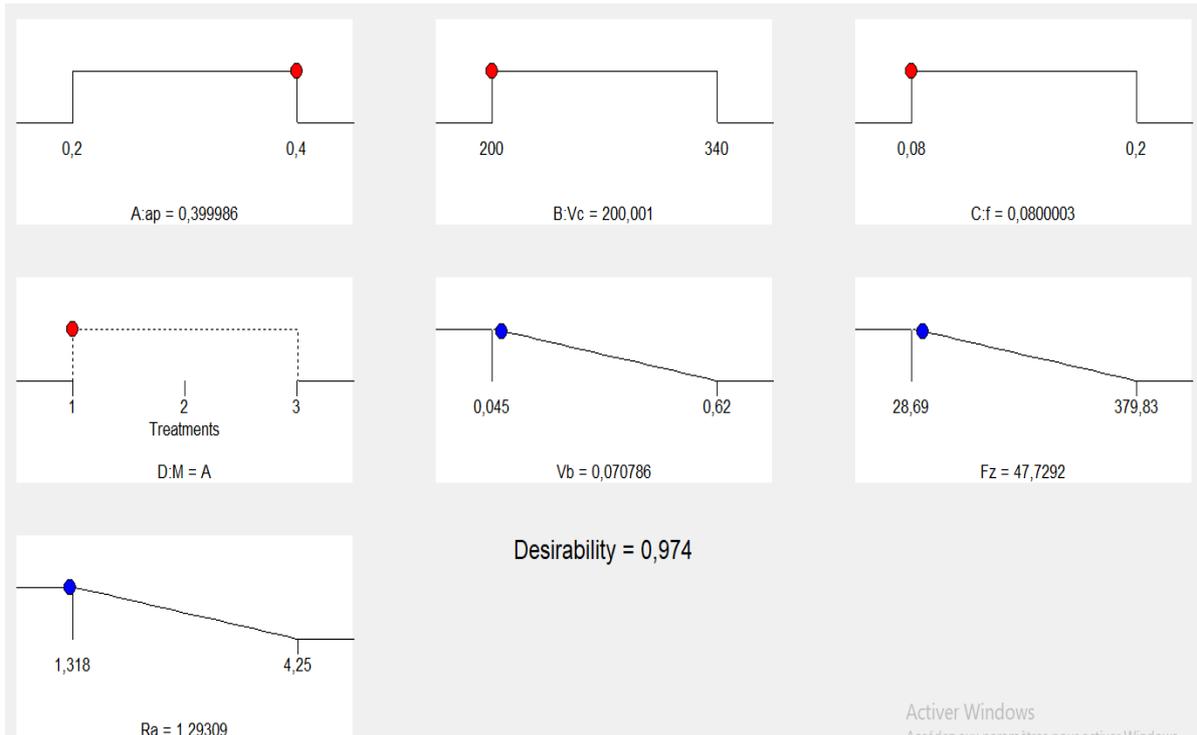


Figure IV.11 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra), l'effort tangentiel (Fz) et l'usure (Vb).

IV.04 Conclusion

Dans ce dernier 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 tangentiel **Fz**, et l'usure **Vb**.

L'optimisation multi-objective, où nous avons utilisé l'approche de la fonction **Désirabilité** pour optimiser la rugosité de surface **Ra** l'effort tangentiel **Fz**, et l'usure **Vb** suivant quatre cas souhaités.

Dans le cas d'optimisation en utilisant la fonction désirabilité, le seul matériau qui assure les meilleures performances c'est la plaquette en carbure métallique à revêtement **CVD**.

Conclusion générale

Dans ce travail, une recherche expérimentale est conduite afin de modéliser les paramètres de performances d'usinage (la rugosité de surface, l'effort tangentiel et l'usure de l'outil) et optimiser les conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe) lors du Tournage de l'acier AISI D3 avec des plaquettes en carbure métallique à revêtements CVD, PVD et des plaquette en Cermet. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

- L'analyse ANOVA de la rugosité de surface révèle que le matériau est le facteur le plus important qui affecte la rugosité (R_a) avec une contribution de 38,43%, suivie par l'avance avec une contribution de 12,90%, l'interaction ($V_c * M$) avec une contribution 21,90% et en fin la vitesse de coupe et la profondeur de passe avec une contribution de 6,34% et 1,80%. Les interactions ($a_p * f$ et $V_c * f$) ont des faibles contributions de 0,04% et 1,44% par conséquent, ils ne sont pas significatifs. Les termes carrés (V_c^2 , f^2 et a_p^2) ne sont pas aussi significatifs.
- L'analyse ANOVA des résultats de l'effort tangentiel (F_z) indique que les paramètres significatifs sont (a_p) avec une contribution de 49,34%, suivie par le matériau (M) et l'avance (f) avec des contributions respectives de 28,27% et 3,89%. Les interactions ($a_p * M$, $f * M$, $V_c * M$ et $a_p * f$) ont des contributions de 6,91%, 3,38%, 0,60%, 0,08% respectivement.
- L'analyse ANOVA des résultats de l'usure (V_b) indique que les paramètres significatifs sont le matériau (M) avec la contribution de 52,04%, suivi par f , V_c et a_p avec 8,20%, 6,32% et 3,89% de contributions respectivement. Les interactions ($V_c * M$, $f * M$) ont des contributions 5,27% et 5,17% respectivement.
- Les modèles mathématiques basés sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour la rugosité de surface (R_a), l'effort tangentiel (F_z), et l'usure (V_b), ayant un (R^2) de 97,09%, 99,81% et 99,75% respectivement, présentent la bonne concordance avec les données expérimentales. Ces modèles ont un intérêt industriel parce qu'ils peuvent être employés pour la prédiction des paramètres technologiques d'usinage et aussi pour l'optimisation.

- La comparaison entre les valeurs expérimentales de la rugosité de surface (R_a), l'effort tangentiel (F_z) et l'usure (V_b) avec les valeurs estimées montre qu'ils sont très proches. Donc on peut conclure que les modèles issus de la méthode de surface de réponse RSM sont très fiables.

L'optimisation mono-objective réalisée dans ce travail est basée sur la méthode de Taguchi qui (Selon son approche) :

- L'optimum de la réponse (R_a) est obtenu aux paramètres d'usinage ($V_c=270\text{m/min}$, $f=0.08$, $a_p=0.4$ et le matériau de l'outil de coupe en carbure métallique a revêtement CVD). Cet optimum est la valeur la plus élevée du Signal / Bruit (S/B) R_a .
- L'optimum de la réponse (F_z) correspond aux paramètres d'usinage ($V_c=200\text{m/min}$, $f=0.08$, $a_p=0.2$ et le matériau de l'outil de coupe en carbure métallique a revêtement CVD), V_{c1} , f_1 et a_{p1} et M1. L'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/ Bruit (S/B) représente la meilleure performance de la réponse (F_z).
- L'optimum des réponses de (V_b) correspond aux paramètres d'usinage ($V_c=200\text{m/min}$, $f=0.2$ et $a_p=0.2$ le matériau de l'outil de coupe en carbure métallique a revêtement PVD). Cet optimum est la valeur la plus élevée du Signal/ Bruit.

L'optimisation multi-objective réalisée dans ce travail est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Les régimes optimaux obtenus par cette optimisation selon les quatre critères choisis sont :

- (R_a minimisée) : $V_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,08\text{mm}$ et $a_p = 0,385 \text{ mm}$ et M : CVD.
- (F_z minimisée) : $V_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,08\text{mm}$ et $a_p = 0,225 \text{ mm}$ et M : CVD.
- (V_b minimisée) : $V_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,08\text{mm}$ et $a_p = 0,4 \text{ mm}$ et M : CVD.
- (R_a et V_b minimisé) : $V_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,08\text{mm}$ et $a_p = 0,4 \text{ mm}$ et M : CVD.

Dans le cas d'optimisation de fonction désirabilité le seul matériau qui assure les meilleures performances c'est la plaquette en carbure métallique à revêtement CVD.

L'analyse des deux méthodes d'optimisation montre que la méthode de **Taguchi** peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse, elle est simple et rapide. Par contre l'utilisation de la fonction de **désirabilité** est meilleure pour l'optimisation multi -objective.

Références bibliographique

- [1] KAHOUL, N. (2012). Evaluation des performances des matériaux de coupe lors de l'usinage de la fonte grise Ft25 Magister 2012, Université du 8 mai 1945 Guelma.
- [2] BOUZID, L. (2015). Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13 Thèse de doctorat de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée. Université du 8 Mai 45 Guelma, (2015).
- [3] NOUIOUA M. (2019). Optimisation des paramètres de coupe lors de l'usinage à sec et avec quantité minimale de lubrification, Thèse de doctorat Génie mécanique et matériaux avancés (2019)
- [4] BELHAMRA, N. (2014). Réalisations et caractérisations de revêtements durs à base de nitrures et de carbures: Applications à l'usinage des métaux, Université Mohamed Khider Biskra).
- [5] BOUCHELAGHEM, H. (2011). Étude du comportement des outils CBN lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D 3 Thèse de doctorat de génie mécanique option: productique mécanique Université du 8 Mai 45 Guelma, (2011).
- [6] ABDELKRIM, M. (2008). Etude de l'influence de la température de coupe dans l'usure des outils et sur les caractéristiques métallurgiques des alliages usinés Université de Batna 2).
- [7] BERKANI, S. (2009). Etude du comportement des matériaux de coupe lors du tournage d'un acier inoxydable L'université de 8 Mai 1945 Guelma, Spécialité : Génie Mécanique
- [8] Actualité du lubrifiant pour l'automobile et l'industrie. WWW.LESLUBRIFIANTS.COM (26/05/2020)
- [9] BEN SLIMA.W, S. (2016). Influence de la conception d'un outil de fraisage dédié à la micro lubrification (MQL) sur l'interaction outil-matière-lubrifiant: études expérimentales et numériques université François – Rabelais de tours école doctorale EMSTU laboratoire de mécanique et de rhéologie 08 décembre 2016
- [10] BOYER, H. F. (2013). Usinage à sec ou MQL: quantification et prise en compte des dilatations thermiques durant le process (ecole doctorale sciences des métiers de l'ingénieur doctorat paris Tech école supérieur d'arts et métiers génie mécanique procédés de production 12 juin 2013.
- [11] MIA.M., Dey, P. R., Hossain, M. S., Arafat, M. T., Asaduzzaman, M., Ullah, M. S., & Zobaer, S. T. (2018). Taguchi S/N based optimization of machining parameters for surface

roughness, tool wear and material removal rate in hard turning under MQL cutting condition. *Measurement*, 122, 380-391.

[12] NOUIOUA, M., Yallese, M. A., Khettabi, R., Belhadi, S., & Mabrouki, T. (2017). Comparative assessment of cooling conditions, including MQL technology on machining factors in an environmentally friendly approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9-12), 3079-3094.

[13] BOUCHELAGHEM, H., Yallese, M. A., Amirat, A., & Belhadi, S. (2007). Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel. *Mechanics*, 65(3), 57-65.

[14] Bh, V., & Vinay, P. V. (2014). Effect of machining parameters on tool wear in hard turning of AISI D3 steel. *Procedia Eng*, 97, 338-345.

[15] DONIAVI.A, Eskanderzade M, Tahmsebian M, Empirical modeling of surface roughness in turning process of 1060 steel using factorial design methodology. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7(17), pp. 2509-2513.

[16] DESAI, K. M., Survase, S. A., Saudagar, P. S., Lele, S. S., & Singhal, R. S. (2008). Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in fermentation media optimization: case study of fermentative production of scleroglucan. *Biochemical Engineering Journal*, 41(3), 266-273.

[17] SELAIMIA, A.(2017). Etude de l'usinage des aciers inoxydables lors du fraisage de face Thèse de Doctorat De L'Université du 08 Mai 45 Guelma Spécialité : Génie Mécanique Option : Productique 2017

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

[19] NOORUL H.A, Marimuthu P, Jeyapaul R. Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the taguchi method. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, 37, pp. 250–255, (2008).

[20] BOUZID.L, (2015). Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur esparamètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13-. Thèse de doctorat de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée. Université du 8 Mai 45 Guelma, (2015).

[21] TOSUN.N, (2006). Determination of optimum parameters for multiperformance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, 28, pp. 450–455, Mechanical Engineering Department, Firat University, 23119, Elazig, Turkey (2006).