

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



Mémoire de fin d'étude

Présenté par : **DJEBIHA SAFA**

Master

Option : Construction Mécanique

=====

**Modélisation et optimisation des paramètres
de coupe lors de l'usinage d'un acier fortement
allié dans un environnement MQL**

=====

Sous la direction de : **Pr. Yaltese M.A**
Safi khaoula

Juillet 2021



Dédicace

Je m'incline devant Dieu tout puissant qui M'a ouvert la porte du savoir et M'a aidé à la Franchir.

Avec un cœur plein d'amour et de fierté je dédie ce travail :

*À l'étoile de mon ciel qui a su mettre la lumière dans mon univers, qui m'a toujours entourée d'amour, pour me soutenir et m'encouragée durant toute ma vie et donné l'espoir de poursuivre ce chemin jusqu'au bout «**MA MERE WARDA** ». Que dieu la protège.*

*À l'homme le plus généreux du monde, à celui qui a été toujours présent, qui m'a appris les valeurs de la vie, qui m'a soutenu en toutes circonstances et à celui qui m'a tout donné sans cesse, «**MON PERE YACIN** ». Que dieu le garde.*

*A ma sœur **MARWA**, que Dieu la protège.*

*A mes frères **KHAIR EDIN, SAIF EDIN, ILYAS, MOHAMED EL AMINE**, que Dieu les protèges.*

*À mon fiancé **HANI** qui m'a soutenu et m'a encouragé et, m'a donné les efforts je dédie ce travail et je lui souhaite une longue belle vie.*

*A mes chères amies et mes collègues d'étude : **KHAWLA** et **FADIA** et mes amies **CHOUROUK** et **ZIANEB** et **CHAIMA** et **FATHIA** Mes tentes surtout **FATIHA***

*À toute Mes deux familles : **DJEBIHA** et **REKIK***

À tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail de près ou de loin.

À toutes mes amies.

À tous ceux qui me connaissent.

Et à toute la promotion Construction mécanique 2021/2022.

Safa





Remerciement

Au terme de ce travail du mémoire de master, les mots justes sont difficiles à trouver pour exprimer nos remerciements à "Allah", le tout puissant, qui m'a accordé le courage afin de me permettre d'élaborer ce modeste travail.

*A Mon encadreur monsieur le **Pr YALLESE Med Athmane** et **M^{lle}. Khaoula Safi***

Je suis très honoré de vous avoir comme promoteur de mon mémoire.

Je vous remercie pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail.

J'ai eu le grand plaisir de travailler sous votre direction.

Mes remerciements aux membres de jury.

QUE DIEU VOUS ACCORDE SA GRACE...

Je n'oublie pas de remercier, toutes les personnes ayant participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail.



Merci

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire de Master a pour objectif d'étudier l'usinage d'un acier à outil par différents matériaux de coupe en utilisant un minimum de quantité de lubrification. Le but est de proposer une modélisation de la rugosité de surface (**Ra**) et l'usure en dépouille **Vb** suivie par une optimisation des conditions de coupe (**Vc**, **f_{et}** **ap**) ainsi que le matériau de l'outil lors de l'usinage d'un acier à outil fortement allié AISI D3 sous un environnement **MQL**. La méthode de surface de réponse **RSM** et l'analyse de la variance (**ANOVA**) ont été appliquées afin d'étudier l'influence des facteurs de coupe sur les sorties (**Ra** et **Vb**), le traitement statistique a permis de proposer des modèles mathématiques de prédiction. Aussi, une optimisation mono et multi objective ont été réalisées afin de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs fixés de l'optimisation. L'analyse de Taguchi basée sur le rapport signal/bruit (**S/B**) a été adaptée pour faire une optimisation mono objective pour déterminer le régime optimal des paramètres de coupe qui minimise les paramètres de sortie individuellement. Par contre les méthodes **GRA** et **DF** ont été utilisées pour une optimisation multi-objective en minimisant (**Ra** et **Vb**) ensemble.

Mots clés : Usinage, AISI D3, MQL, CVD, PVD, Cermet, ANOVA, RSM, GRA, DF, Optimisation.

The objective of the work carried out in this Master thesis is to study the machining of tool steel by different cutting materials using a minimum quantity of lubrication. The goal is to propose a modeling of surface roughness R_a and flank wear V_b followed by an optimization of the cutting conditions (V_c , f and ap) as well as the tool material during the machining of a high alloyed tool steel X210Cr12 under a **MQL** environment. The response surface method **RSM** and analysis of variance **ANOVA** were applied to study the influence of cutting factors on the outputs (**R_a** and **V_b**), the statistical treatment allowed to propose mathematical prediction models. Also, a mono and multi-objective optimization were performed in order to find the optimal values of the cutting parameters with respect to the fixed objectives of the optimization. The Taguchi analysis based on the signal-to-noise ratio (SNR) was adapted to perform a mono objective optimization to determine the optimal regime of the cutting parameters that minimizes the output parameters individually. In contrast, the **GRA** and **DF** methods were used for multi-objective optimization by minimizing (**R_a** and **V_b**) simultaneously.

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

يهدف العمل الذي تم تنفيذه كجزء من أطروحة الماجستير هذه إلى دراسة تصنيع الأدوات الفولاذية بـ مواد قطع مختلفة باستخدام الحد الأدنى من التشحيم. الهدف هو اقتراح نمذجة خشونة السطح (Ra) وارتداء الجناح Vb متبوعاً بتحسين ظروف القطع (Vc ، f_{cut}) وكذلك مادة الأداة أثناء تشكيل d AISI سبائك عالية أداة D3 الفولاذية في بيئة MQL. تم تطبيق طريقة سطح استجابة RSM وتحليل التباين (ANOVA) من أجل دراسة تأثير عوامل القطع على المخرجات (Ra و Vb) ، جعلت المعالجة الإحصائية من الممكن اقتراح نماذج رياضية. التنبؤ. أيضًا ، تم إجراء تحسين أحادي ومتعدد الأهداف من أجل العثور على القيم المثلى لمعاملات القطع فيما يتعلق بالأهداف المحددة للتحسين. تم تكييف تحليل Taguchi المستند إلى نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S / N) للقيام بتحسين أحادي موضوعي لتحديد النظام الأمثل لمعاملات القطع التي تقلل معاملات الإخراج الفردية. من ناحية أخرى ، تم استخدام أساليب GRA و DF من أجل تحسين متعدد الأهداف عن طريق تقليل (Ra و Vb) معًا.

الكلمات الرئيسية: الآلات ، AISI D3 ، MQL ، CVD ، PVD ، Cermet ، ANOVA ، RSM ،
DF ، GRA ، التحسين.

Figure	Chapitre I : étude bibliographique	page
Figure I.1	Matériaux de coupe	2
Figure I.2	Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe	2
Figure I.3	Classification des matériaux de coupe.	3
Figure I.4	Outils des usinages	4
Figure I.5	plaquettes brasées ou fixées sur un corps d'outil en acier	4
Figure I.6	Céramiques	5
Figure I.7	Plaquette CBN	6
Figure I.8	Plaquette en tête de diamant	6
Figure I.9	Rôle des revêtements	7
Figure I-10	Mécanismes d'usure en fonction de la température	10
Figure I.11	différents formes d'usure	10
Figure I.12	Caractéristiques du profil	11
Figure I.13	Profil de surface tournée	12
Figure I.14	système MQL mélange air/huile	13
Figure I.15	système MQL mono canal	14
Figure I.16	Systèmes MQL bi-canal	14
Figure I.17	Principes de générateurs de brouillard mono- et bi canal en interne	15
Figure I.18	Usinage cryogénique	18
Figure I.19	Rugosité de surface en fonction de la progression de l'usinage dans des conditions sèches, humides et MQL.	21
Figure I.20	Vues MEB de la plaquette usée après un usinage de 45 minutes dans des conditions (a) sèches, (b) humides et (c) MQL.	22
Figure I.21	Représenté les expériences (copeaux, abrasion, adhésion).	24
Figure I.22	Graphiques des effets principaux a) Moyenne de S/N ratio pour Ra b) Effets des paramètres de coupe sur Ra	25
Figure I.23	Graphiques des effets principaux a) Moyenne de S/N ratio pour Rz b) Effets des paramètres de coupe sur Rz.	25
Figure I-24	Effet de la vitesse d'avance et de la vitesse de coupe sous différentes méthodes de lubrification sur la rugosité de surface.	26
	Chapitre II : procédure expérimentale	
Figure II.1	Tour à charioter et à fileter modèle SN40.	28
Figure II.2	Nomenclature des différents organes du tour modèle SN40.	29
Figure II.3	Variateur de vitesse de coupe.	29
Figure II.4	Capteur de vitesse.	30

Figure II.5	Matériau usiné (AISI D3).	30
Figure II.6	Plaquettes et porte outil.	31
Figure II.7	Rugosimètre 2D en plein opération de mesure.	32
Figure II.8	Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).	32
Figure II.9	Système MQL	33
	Chapitre III :Modélisation de l'usure et de la rugosité de surface dans un environnement MQL	
Figure III.1	Graphique des effets principaux pour Ra.	42
Figure III.2	Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour Ra.	43
	Figure (3.a)	44
	Figure (3.b)	44
	Figure (3.c)	45
Figure III.3	Surface de réponse 3 D de Ra en fonction de (V_c , a_p , f) pour l'outil à revêtement CVD.	45
	Figure (4.a)	46
	Figure (4.b)	46
	Figure (4.c)	47
Figure III.4	Surface de réponse 3D de Ra en fonction de (V_c , a_p , f) pour l'outil en cermet.	47
	Figure (5.a)	48
	Figure (5.b)	48
	Figure (5.c)	49
Figure III.5	Surface de réponse 3D de Ra en fonction de (V_c , a_p , f) pour l'outil en carbure à revêtement PVD.	49
Figure III.6	Effet de conditions de coupe sur l'usure V_b .	51
Figure III.7	Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour l'usure V_b .	52
	Figure (8.a)	53
	Figure (8.b)	53
	Figure (8.c)	54
Figure III.8	Surface de réponse 3D de l'usure (V_b) en fonction de (V_c , f , a_p) pour l'outil à revêtement CVD	54
	Figure (9.a)	55

	Figure (9.b)	55
	Figure (9.c)	56
Figure III.9	Surface de réponse 3D de l'usure (V_b) en fonction de (V_c, f, a_p) pour l'outil en Cermet	56
	Figure (10.a)	57
	Figure (10.b)	57
	Figure (10.c)	58
Figure III.10	Surface de réponse 3D de l'usure (V_b) en fonction de (V_c, f, a_p) pour l'outil à revêtement PVD.	58
	Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe (Taguchi, GRA et DF)	
Figure IV.1	Graphique des effets principaux de (V_c, f, a_p et M) sur l'usure en dépouille V_b .	62
Figure IV.2	Graphique des effets principaux de V_c, f, a_p et M sur la rugosité de surface R_a .	63
	Figure (3.a)	67
	Figure (3.b)	68
	Figure (3.c)	68
Figure IV.3	Graphique de désirabilité de R_a et V_b (diagramme de surface 3D) pour le cas	68
Figure IV.4	Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (R_a) et l'usure (V_b).	69

Tableau	Chapitre I : étude bibliographique	page
Tableau I.1	Comparatif des propriétés de certains revêtements	8
Tableau I.2	Mécanisme et forme d'usure	9
Tableau I.3	Caractéristiques des huiles de coupe utilisées en MQL	16
Tableau I.4	Plan expérimental et valeurs mesurées.	19
Tableau I.5	Résultats expérimentaux des réponses selon la matrice Taguchi L8	23
Tableau I.6	Analyse de la variance pour les moyennes de Ra, Rq et Rz.	23
	Chapitre II : procédure expérimentale	
Tableau II.1	Composition chimique de l'AISI D3, (en % en poids)	30
Tableau II.2	Table orthogonale de Taguchi L ₁₈ .	34
Tableau II.3	Plan d'expérience de Taguchi (L18).	35
	Chapitre III :Modélisation de l'usure et de la rugosité de surface dans un environnement MQL	
Tableau III.1	Résultats des essais pour un plan de Taguchi L18.	40
Tableau III.2	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Ra.	41
Tableau III.3	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure Vb.	50
	Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe (Taguchi, GRA et DF)	
Tableau IV.1	Signal/Bruit des paramètres de sortie étudiées Ra et Vb.	61
Tableau IV.2	signal sur bruit (S/B) de l'usure (Vb) pour chaque niveau des facteurs.	62
Tableau IV.3	les rapports signal/bruit Ra pour chaque niveau des facteurs.	63
Tableau IV.4	Résultats de la génération relationnelle grise, calcul de Δ_{0i} (k), coefficient relationnel gris (GRC) et grade relationnel gris (GRG).	65
Tableau IV.5	But et gamme de paramètre pour le cas d'optimisation.	67
Tableau IV.6	Réponses de la rugosité de surface et l'usure pour le cas d'optimisation.	67
Tableau IV.7	comparaison entre les deux méthodes GRA et DF.	69

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).

GRA :Analyse relationnelle grise

DF : Fonction désirabilité.

R² : Coefficient de détermination.

Cont% : Pourcentage de contribution (%)

Chapitre I : étude bibliographique

I.1	Introduction.....	1
I.2	Matériaux de coupe.....	2
I.2.1	Caractéristiques d'un matériau de coupe.....	2
I.2.2	Classification des matériaux des outils de coupe.....	2
	a) Aciers Rapides.....	3
	b) Carbure.....	4
	c) Cermets	4
	d) Céramiques.....	5
	e) Nitrure de Bore Cubique (CBN).....	5
	f) Diamant industrielle	6
I.3	Revêtements des matériaux	6
I.4	paramètres technologiques d'usinage	8
I.4.1	Usure des outils de coupe.....	8
I.4.1.1	Influence des paramètres de coupe sur l'usure.....	8
I.4.1.2	Mécanisme et forme d'usure	9
I.4.2	Rugosité	1
		1
I.4.2.1	Généralités sur les états de surface.....	1
		1
I.4.2.2	Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques.....	1
		1
I.4.2.3	État de surface en tournage.....	1
		2
I.5	Minimum quantité de lubrification MQL.....	1
		2
I.6	Usinage à sec.....	1
		7
I.7	Cryogénie.....	1
		7

I.8	Etat d'art.....	1
		8
I.9	Conclusion.....	2
		6
Chapitre II : procédure expérimentale		
II.1	Introduction.....	2
		8
II.2	Matériels utilisés.....	2
		8
II.2.1	Machine-outil.....	2
		8
II.2.2	Matériau de la pièce à usiner	3
		0
II.2.3	Plaquettes et porte outil.....	3
		1
II.2.4	Instruments de mesure utilisés.....	3
		1
II.2.4.	Rugosimètre pour la mesure de la rugosité 2D.....	3
1		1
II.2.4.2	Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250)	3
		2
II.2.4.	Minimum de quantité de lubrification (MQL)	3
3		3
II.3	Planification des expériences.....	3
		3
II.4	Condition opératoire	3
		5
II.5	Conclusion.....	3
		5
Chapitre III :Modélisation de l'usure et de la rugosité de surface dans un environnement MQL		
III.1	Introduction.....	3
		7
III.2	Analyse de variance (ANOVA) et Modélisation.....	3
		7
III.2.1	Analyse de la variance (ANOVA)	3
		7
III.3	Résultats et discussions.....	3
		9
III.3.1	Analyse de variance et Modélisation de la rugosité Ra.....	4
		0
III.3.1.1	Analyse de variance ANOVA pour Ra.....	4
		0
III.3.1.2	Graphique des effets principaux pour Ra.....	4
		1

III.3.1.3	Analyse de régression pour Ra.....	4
		2
III.3.1.4	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	4
		2
III.3.1.5	Analyse de surface de réponse 3D pour Ra.....	4
		3
III.3.2	Analyse de variance et modélisation de l'usure Vb de l'outil de coupe	4
		9
III.3.2.1	Analyse de variance ANOVA pour Vb	4
		9
III.3.2.2	Graphique des effets principaux pour Vb.....	5
		0
III.3.2.3	Analyse de régression pour Vb.....	5
		1
III.3.2.4	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	5
		2
III.3.2.5	Analyse de surface en 3D de réponse pour Vb	5
		2
III.4	Conclusion.....	5
		8
Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe (Taguchi, GRA et DF)		
IV.1	Introduction.....	6
		0
IV. 2	Optimisation par la méthode de Taguchi.....	6
		0
IV.3	Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	6
		1
IV.3.1	Analyse des effets principaux sur l'usure Vb.....	6
		2
IV. 3.2	Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface Ra.....	6
		2
IV.4	Description de l'analyse relationnelle grise (GRA)	6
		3
IV. 5	Optimisation par la fonction désirabilité.....	6
		6
IV.5.1	Introduction.....	6
		6
IV.5.2	Cas d'optimisation étudié.....	6
		6
IV.6	Comparaison entre la méthode GRA et DF.....	6
		9
IV.7	Conclusion.....	6
		9



Introduction Générale



Dans tous les procédés d'usinage, l'usure de l'outil est un phénomène naturel qui conduit à sa détérioration et à sa défaillance. Les demandes croissantes pour une productivité élevée lors du processus d'usinage nécessitent l'utilisation des vitesses de coupe et des avances élevées ce qui a pour effet l'augmentation des températures de coupe. Cette dernière a pour effet non seulement la réduction de la durée de vie de l'outil, mais aussi endommage également l'état de surface de la pièce. Les fluides de coupe modifient les performances des opérations d'usinage en raison de leurs fonctions de lubrification, de refroidissement et d'évacuation des copeaux, mais l'utilisation des fluides de coupe est devenue plus problématique en termes de santé des employés et de pollution de l'environnement.

La réduction de l'utilisation des fluides de coupe présente également des avantages économiques en permettant d'économiser sur les coûts de lubrifiant et sur le temps de cycle de nettoyage des pièces/outils/machines. Le concept de lubrification à quantité minimale (MQL) a été suggéré il y a une dizaine d'années comme moyen de résoudre les problèmes de l'intrusion environnementale et les risques professionnels associés aux particules de fluide de coupe en suspension dans l'air dans les ateliers d'usine. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude. Le travail réalisé dans ce mémoire de master examine la modélisation et l'optimisation des conditions de coupe (V_c, f, ap, M) lors du tournage de l'AISI D3 avec des plaquettes en carbure métallique à revêtement CVD, Cermet et carbure métallique à revêtement PVD. Le mémoire de master est organisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre du mémoire nous avons présenté une étude bibliographique et des définitions techniques relatives à la coupe des métaux. Ensuite on a traité les phénomènes régissant le processus de coupe en particulier, l'usure des outils, la rugosité de surface. Aussi, nous avons fait une description de la planification expérimentale. La dernière partie de ce chapitre est réservée pour exposer l'état de l'art relatif en tournage des matériaux dans un environnement MQL.


Le deuxième chapitre est réservé à la description des équipements utilisés et les conditions expérimentales utilisées lors de la réalisation des essais. Les dispositifs de mesure, le mode de lubrification MQL et le couple outil-matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe.

Dans le troisième chapitre nous exposons les résultats d'une étude de modélisation basée sur la méthodologie de la surface de réponse RSM. Ensuite, l'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée afin de quantifier les effets des paramètres de coupe qui sont ($V_c, f,$

ap et M) et leurs interactions sur les paramètres technologiques à savoir ; la rugosité Ra et l'usure en dépouille Vb lors de l'usinage de l'acier (AISI D3) avec différents matériaux de coupe. 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.

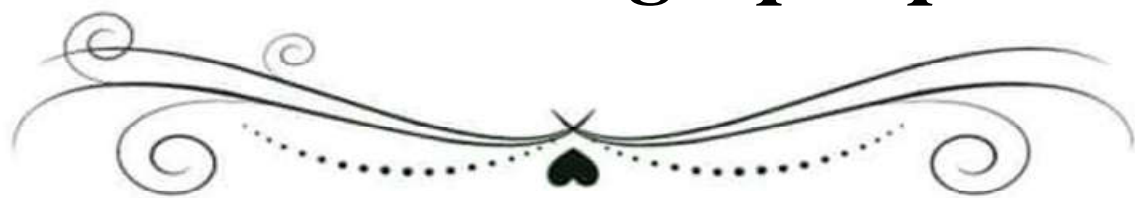
Le quatrième chapitre nous exposons les résultats d'une étude d'optimisation mono et multi-objective. Pour l'optimisation mono-objective des paramètres technologiques, nous avons utilisé l'approche de Taguchi, basée sur l'analyse du rapport signal/bruit (S/N). Par contre l'optimisation multi-objective a été réalisée par la méthode de l'analyse relationnelle grise GRA et l'approche de la fonction de désirabilité DF.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale qui expose les résultats obtenus durant cette recherche ainsi que les perspectives qui sont suivies d'une liste des références bibliographiques.



Chapitre I

Etude Bibliographique



I.1 Introduction

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 cessent 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 Matériaux de coupe

Les matériaux de coupe contemporains sont le résultat d'un long développement. Grâce à ce développement, les opérations d'usinage qui demandent une centaine de minutes en 1900 peuvent prendre actuellement moins d'une minute. L'importance des matériaux à outil de coupe ne peut pas être surestimée, parce que le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances des outils de coupe.

Pour choisir un outil de coupe convenable, il faut prendre en compte plusieurs facteurs comme : la nature de l'opération de coupe (ébauche ou finition, précision demandée, coupe continue ou intermittente), la forme et la matière de la pièce (structure, dureté, résistance, état de couche superficielle, affinité chimique, inclusions), le type de machine-outil (puissance, rigidité, capacité), les conditions de coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe), l'état de surface demandé (rugosité, contraintes résiduelles) et les coûts associés à cette opération. Étant donné le nombre de facteurs à considérer et la difficulté de les définir précisément, le choix d'un outil de coupe devient un problème très complexe [1-2].





Figure I.1 Matériaux de coupe.

I.2.1 Caractéristiques d'un matériau de coupe

Les caractéristiques recherchées dans un matériau de coupe peuvent être résumées Comme suit [1] :

- * posséder une dureté permettant de résister à l'usure et à la déformation, même à une température élevée,
- * posséder une ténacité élevée pour résister à la rupture,
- * être chimiquement inerte vis à vis du matériau usiné,
- * être chimiquement stable pour résister à l'oxydation et à la dissolution,
- * offrir une bonne conductibilité thermique et une bonne résistance aux chocs Thermiques.

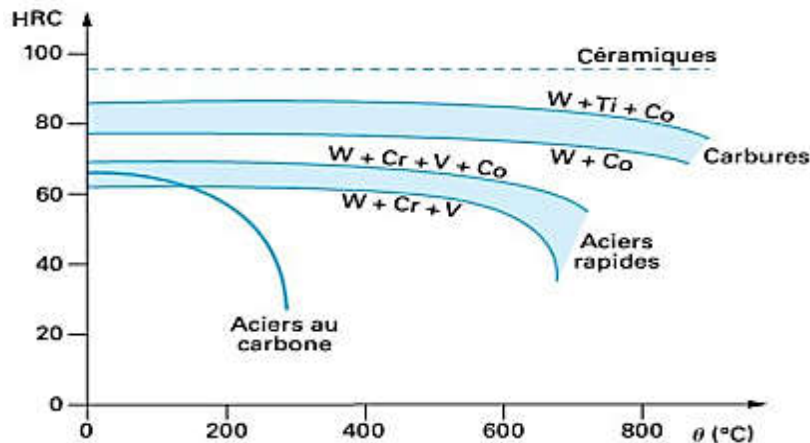


Figure I.2 Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour La fabrication des outils de coupe [3].

I.2.2 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). Ils sont divisés en un grand nombre de nuances dotées de Propriétés spécifiques. De manière générale, les matériaux de coupe doivent posséder les Propriétés suivantes :

- **Dureté:** résistance à l'usure en dépouille et à la déformation ;



- **Ténacité** : résistance à la rupture ;
- **Neutralité chimique** : absence de réaction chimique avec la matière à usiner ;
- **Stabilité chimique** : résistance à l'oxydation et à la diffusion ;
- **Résistance** aux variations thermiques brusques [4].

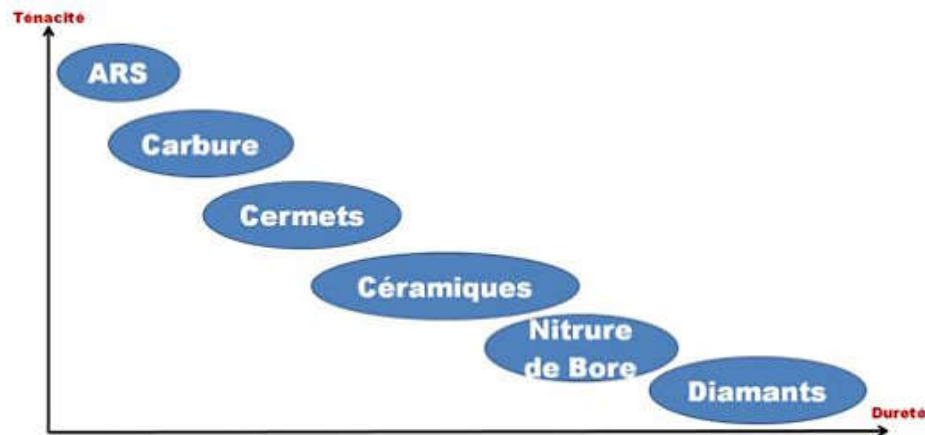


Figure I.3 Classification des matériaux de coupe [4].

Les matériaux de coupe utilisés en tournage des pièces peuvent être classés en Plusieurs groupes : les aciers rapides, les aciers rapides revêtus, les aciers rapides frittés, les Carbures métalliques, les carbures micro-grains, les cermets, les céramiques, le Nitride de Bore Cubique (CBN) et les diamants [1], [5], [6].

a) Aciers Rapides

Ce sont des aciers à fort pourcentage de carbone (0.9 à 1.5) qui contiennent des métaux comme : le tungstène, le chrome et le vanadium... etc. Dont le but est d'améliorer la dureté et la résistance à l'usure[7].

- **Aciers rapides au cobalt : HS 18-1-1-5**

Le cobalt permet de stabiliser les carbures à chaud et par conséquent la capacité à supporter les vitesses de coupe plus élevées.

- **Aciers rapides au molybdène : HS 2-9-1-8, HS 6-5-2-5**

*Le molybdène a une influence double de celle du tungstène

• Leur résistance aux chocs est supérieure à celle des aciers au tungstène.

- **Aciers rapides surcarbures : HS 6-5-4, HS 7-4-2-5, HS 2-9-1-8**

La teneur en carbone est supérieure à 1 %,

- **Aciers rapides resulfurés : Le soufre (0,10 et 0,20 %)**

-Permet d'améliorer l'aptitude à l'usinage et au meulage.



- Permet d'améliorer l'état de surface après usinage des outils (molettes de tournage, fraises mères à denture non rectifiée, fraises pour entrer de denture...etc.) (figure I.4).



Figure I.4 Outils des usinages [7].

b) Carbure

- une grande dureté
- une haute résistance à l'usure
- conservent leur dureté jusqu'à 900°C environ
- vitesses de coupe quatre à six fois supérieures à celles des aciers rapides.

Ils se présentent sous forme de plaquettes brasées ou fixées mécaniquement sur un corps d'outil en acier (figure I.5) [7].



Figure I.5 plaquettes brasées ou fixées sur un corps d'outil en acier [7].

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...) [8].

d) Céramiques

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium (figure I. 6).

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) [9].

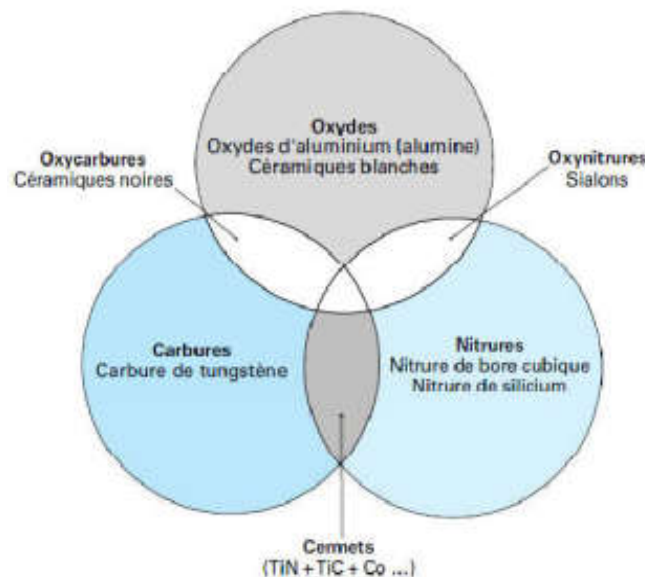


Figure I.6 Céramiques [8].

e) Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le CBN (figure I.7) 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.



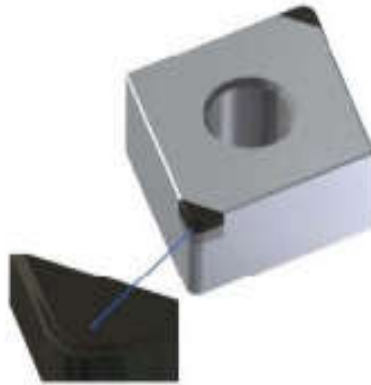


Figure I.7 Plaquette CBN.

f) Diamant industrielle

- *C'est le plus dur des matériaux connus.
- *Il se présente sous forme de grain brasé à l'extrémité d'un corps en acier.
- *On l'utilise pour certains travaux de finition.
- *Son prix de revient est élevé [7].



Figure I.8 Plaquette en tête de diamant [7].

I.3 Revêtements des matériaux

La métallurgie des plaquettes repose sur deux composantes : le substrat et le revêtement (figure I.9). Le substrat supporte les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage. Le revêtement améliore la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur la plaquette. Les revêtements sont depuis 1960 un domaine important de recherche. Améliorant les conditions de coupe et la productivité, l'emploi des revêtements s'est généralisé. Aujourd'hui la plupart des nuances de carbure sont revêtues [10].



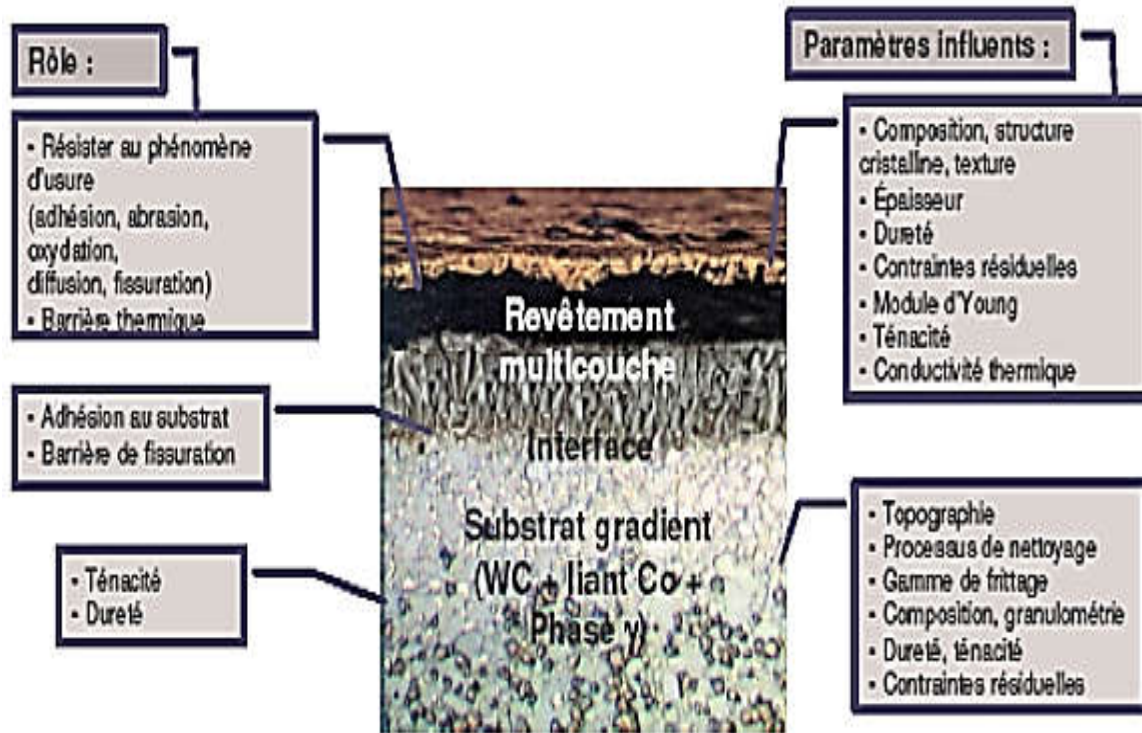


Figure I.9 Rôle des revêtements [11].

Le principe consiste à recouvrir le substrat d'un film mince. L'épaisseur totale du revêtement est généralement comprise entre 3 et 15 μm . Les méthodes de dépôt sont de type CVD (dépôt chimique en phase vapeur à température médium, 800 – 1000°C) ou de type PVD (dépôt physique en phase vapeur, 400 – 600°C). La qualité d'adhérence au substrat est un critère essentiel pour le choix du revêtement. Les matériaux déposés sont également sélectionnés par leurs propriétés à haute température (dureté, ténacité, conductivité thermique). La figure 1.9 illustre le rôle d'un revêtement. Pour l'essentiel il doit protéger le substrat de l'usure (adhérence, abrasion, oxydation, diffusion entre copeau et matière usinée), protéger thermiquement et résister à la fissuration. Les matériaux les plus fréquents rencontrés sont :

- ✓ Carbure de titane TiC
- ✓ L'alumine Al₂O₃
- ✓ Et leurs associations TiCN (carbonitrure de titane), AlTiN, ...

Différents travaux montrent que les outils carbures revêtues en TiCN ont les propriétés requises pour l'usinage des matières qui ont une dureté inférieure à 42 HRC, alors que les outils revêtus à base d'alumine s'utilisent pour des duretés supérieures à 42 HRC [12].

Les principales propriétés de ces revêtements sont présentées sous forme comparative dans le tableau I.1.



Tableau I.1 Comparatif des propriétés de certains revêtements[13].

Revêtements	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	Excellent	Petite	Petite	Bon
TiN	Bon	Bon	Bon	Excellent
Ti(C, N)	Moyen	Moyen	Moyen	Très bon
Al ₂ O ₃	Très bon	Excellent	Excellent	Moyen

I.4 paramètres technologiques d'usinage

I.4.1 Usure des outils de coupe

L'usure d'outil de coupe est une question-clé dans tous les processus de coupe des matériaux, principalement en raison de son effet néfaste sur l'intégrité extérieure de la surface usinée. En raison des développements récents des matériaux modernes d'outil de coupe tels que les outils Wiper en céramique et en nitrure de bore cubique (CBN), la productivité d'usinage des aciers durcis a augmenté sensiblement. La flexibilité et la capacité élevées de fabriquer des éprouvettes à géométrie complexe sont les avantages principaux du tournage dur comparés à la rectification [14].

I.4.1.1 Influence des paramètres de coupe sur l'usure

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et lubrification) :

- * **Vitesse de coupe** : la température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure ;
- * **Avance** : les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil ;
- * **Profondeur de passe** : la variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure ;
- * **Matériau usiné** : son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition);
- * **Lubrification** : son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la partie active

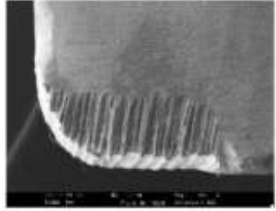







de l'outil. Le second groupe est formé par les paramètres physiques et mécaniques de l'outil (géométrie et composition du matériau de l'outil, dureté, efforts et propriétés thermiques) [14].

1.4.1.2 Mécanisme et forme d'usure

L'usure de l'outil de coupe est la conséquence directe des sollicitations très sévères qui subissent les faces de coupe et de dépouille [14].

Tableau I.2 Mécanisme et forme d'usure [14].

		Description du phénomène	Illustration
Mécanisme d'usure mécanique	Abrasion	L'usure par abrasion est essentiellement due aux frottements outil/pièce et copeau/outil. L'usure abrasive des outils résulte d'arrachement en surface de l'outil causé par des particules souvent anguleuses et de grande dureté contenues dans le matériau usiné (précipités en inclusions). Ces particules sont toujours renouvelées au cours de l'usinage. Les produits d'abrasion sont évacués en continu avec les copeaux. La vitesse d'usure abrasive croît avec la quantité de particules abrasives qui entrent en contact avec l'outil par unité de temps. Elle dépend donc de la composition chimique et du procédé d'élaboration du matériau usiné et croît avec la vitesse.	 
	Adhérence	Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. Lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Les rugosités et microrugosités des surfaces, en contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des micro-soudures. Ces micro-soudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus continu génère l'apparition d'arêtes rapportées.	 
Mécanisme d'usure physico-chimique	Diffusion	Ce type d'usure ne peut se produire qu'à des températures élevées. Les zones de températures élevées sont également le lieu de fortes pressions. Ainsi sous l'effet des températures et pressions élevées les atomes vont subir une migration de l'outil vers le copeau. Ce processus est grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques entre les atomes de la matière usinée et de l'outil.	
	Oxydation	L'environnement de l'usinage est constitué d'oxygène dans l'air, de hautes températures, de l'eau provenant des huiles de coupe solubles. Cet environnement est propice au phénomène d'oxydation et peut provoquer localement une fragilisation de l'outil. De plus, le potentiel d'oxydo-réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.	



Ces sollicitations sont d'abord de nature mécanique (efforts cycliques, frottement, ... etc), ce qui exige pour l'outil des qualités de dureté et de ténacité remarquables. Les sollicitations thermiques accentuent la dégradation des qualités de résistance du matériau coupant. Ces effets mécaniques et thermiques donnent naissance à des réactions physicochimiques inter-faciales qui aggravent l'usure de l'outil [14].

Ces réactions se manifestent par une diffusion des éléments chimiques entre l'outil et le copeau. Les mécanismes font intervenir, à des degrés plus ou moins importants, quatre phénomènes, qui sont l'adhésion, l'abrasion, la diffusion et l'écaillage. Tous ces modes sont fonction de la température de coupe (figure I-10) [14].

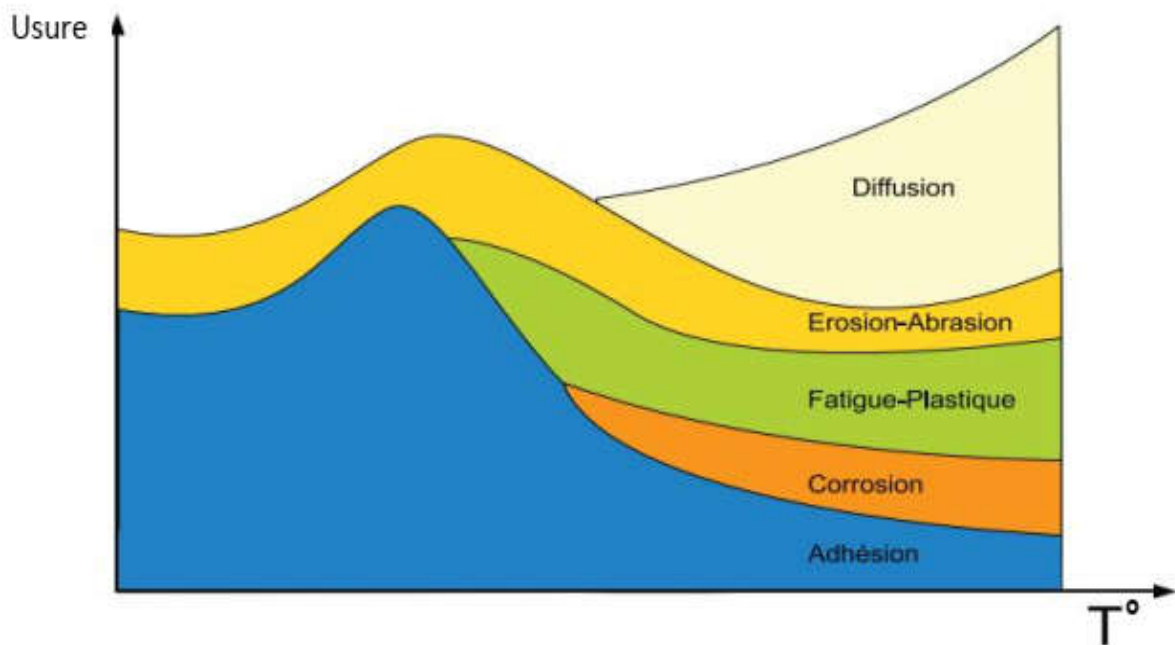
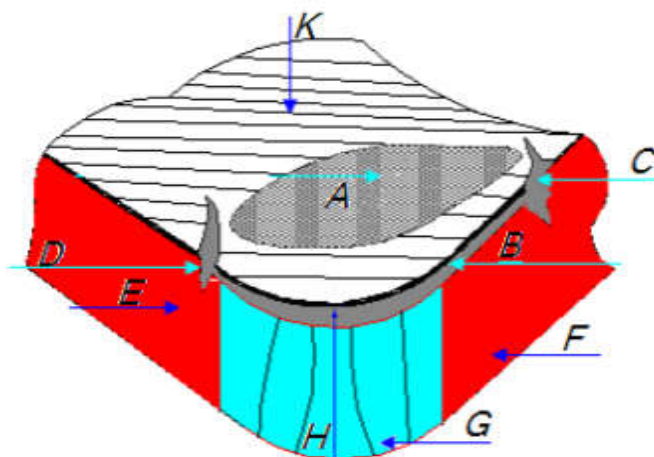


Figure I-10 Mécanismes d'usure en fonction de la température [14].



- A: usure en cratère.
- B: usure en dépouille.
- C: usure en entaille.
- D: usure en entaille dans le rayon.
- E: dépouille secondaire.
- F: dépouille principale.
- G: nez de l'outil.
- H: arête de coupe chanfreinée.
- K: surface d'attaque.

Figure I.11 différents formes d'usure [10].



I.4.2 Rugosité

I.4.2.1 Généralités sur les états de surface

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération [15].

I.4.2.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [15].

- **Surface géométrique**

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

- **Surface spécifiée**

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

- **Surface mesurée**

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

- ❖ **Surface réelle**

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

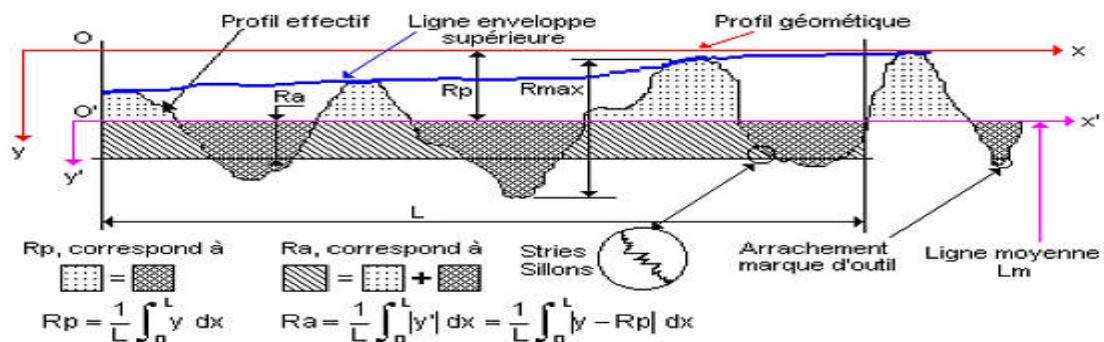


Figure I.12 Caractéristiques du profil[15].



***L** : Longueur de base du profil moyen

* **R_p** : Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de L'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base **L**.

***R_a** : **Écart** moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y (entre chaque point de la courbe et l'axe 'Ox').

I.4.2.3 État de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le Choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La Rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par la **figure I.13**. Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maximale du profil de rugosité R_{max} et donné par :

$$R_{max} = \frac{f^2}{8 \times r}$$

R_{max} : La rugosité maximale en millimètre ;

f : l'avance en millimètre ;

r : le rayon de l'outil de coupe maximal en millimètre ;

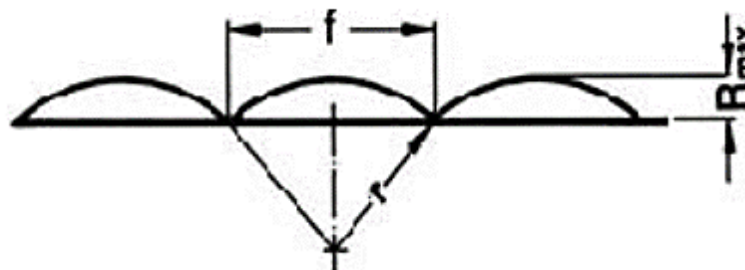


Figure I.13 : Profil de surface tournée.

I.5 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 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 [16].

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. 14) 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 [16].

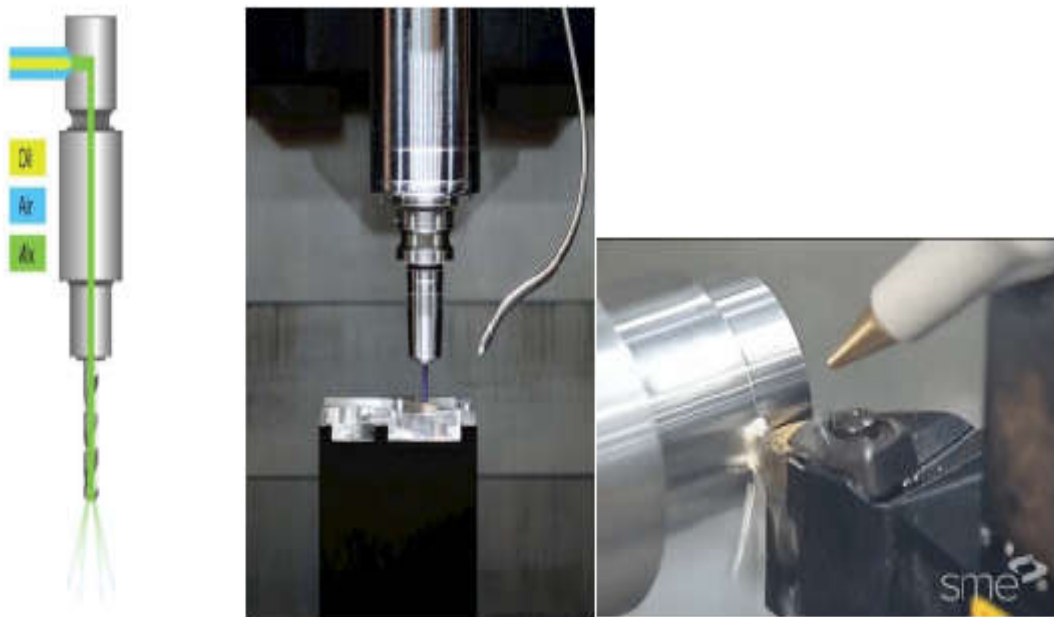


Figure I.14 système MQL mélange air/huile

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.15).il présente l'avantage de pouvoir être facilement mis en place sur une machine non conçue (au départ) pour réaliser des usinages **MQL**[16].



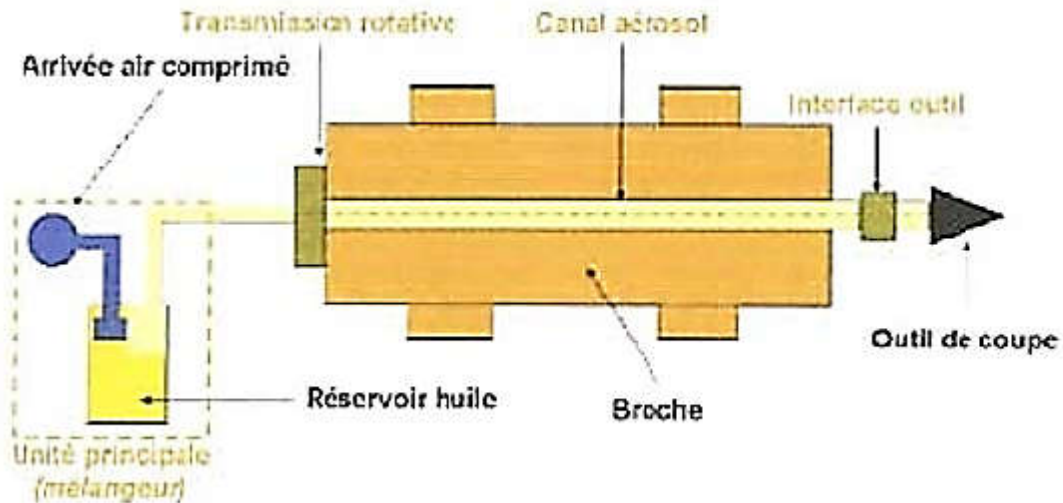


Figure I.15 système MQL mono canal [16].

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.16**). 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.17**). On notera que pour certaines applications (notamment lorsque la vitesse de rotation de la broche est supérieure à 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) [16].

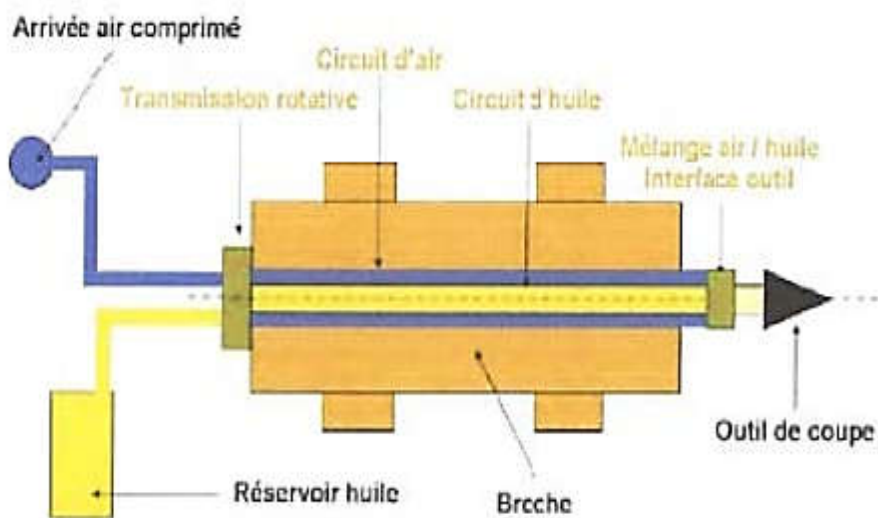


Figure I.16 Systèmes MQL bi-canal [16].



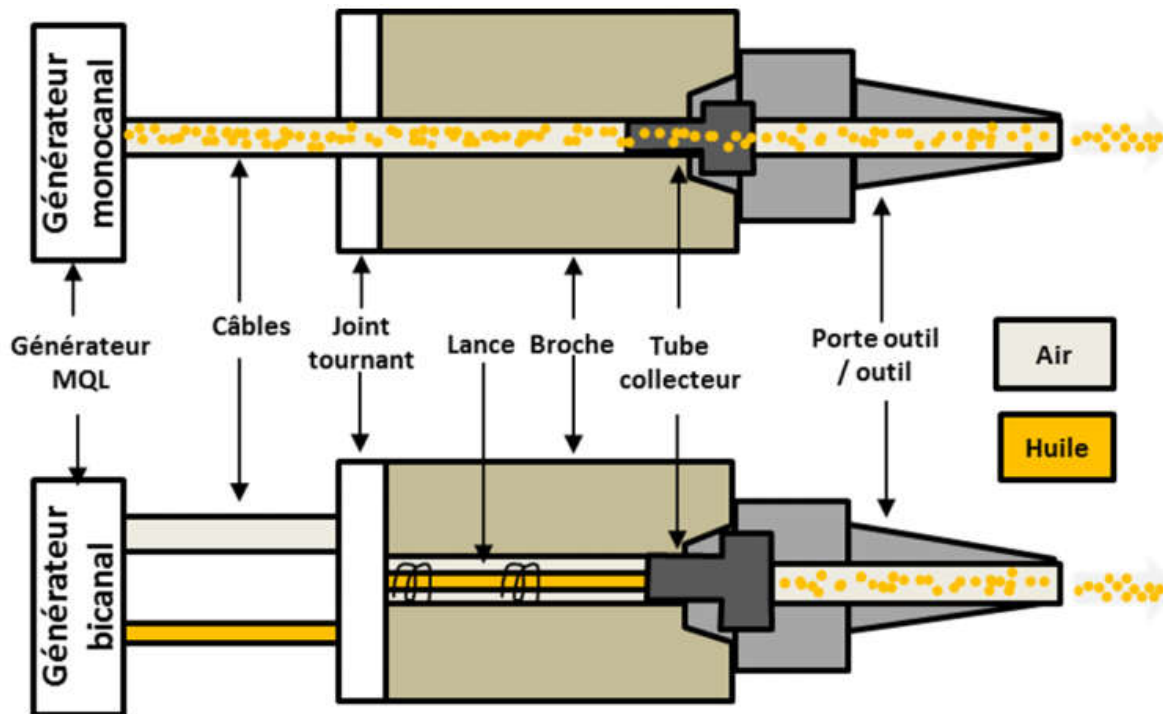


Figure I.17 Principes de générateurs de brouillard mono- et bi canal en interne [16].

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 [16] :

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 inférieure 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.

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.



Huiles utilisées en **MQL** le choix d'une huile de coupe en arrosage est guidé 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 permettre 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 huiles de coupe utilisés en **MQL** (**tableau I.3**).

* Les esters synthétiques

* Les alcools gras

Principales propriétés

- ❖ Bonne biodégradabilité
- ❖ Peu de risque de réaction à l'eau
- ❖ Non toxique.

Tableau I.3 Caractéristiques des huiles de coupe utilisées en MQL [16].

Esters synthétiques	Alcools gras
<p>-Point éclair élevé et faible viscosité -Très bonne propriétés lubrifiantes -Bonne résistance à la corrosion -Vaporisation avec résidus</p>	<p>-Point éclair bas (comparativement) et forte viscosité -Propriétés lubrifiantes faibles -Meilleures propriétés caloriques à l'évaporation -peu résidus</p>
Application à la technique d'usinage	
<p>-Réduction des frottements recherchée -Bonne qualité de surface demandée -Adhésion du copeau sur l'outil (arête rapportée) -Faibles vitesses de coupe -Lubrification des éléments de guidage</p>	<p>-Evacuation des calories recherchée</p>



I.6 Usinage à sec

L'usinage à sec est considéré comme la meilleure approche pour éliminer l'utilisation des fluides de coupe dans les entreprises de fabrication et donc réduire les coûts d'usinage et les risques écologiques[17].

Lors d'un usinage à sec, les coefficients de friction et la température ont tendance à être beaucoup plus élevés que dans le cas d'usinage avec émulsion. Ceci peut réduire la durée de vie de l'outil, réduire la qualité de surface et causer des écarts géométriques induits par la chaleur dans la pièce usinée. Cependant, ce n'est pas le cas pour tous les matériaux, et les opérations d'usinage à sec montrent des effets positifs tels qu'un choc thermique plus faible et une meilleure durée de vie dans certains cas. En revanche, cette méthode d'usinage ne peut pas être appliquée à tous les matériaux et surtout les métaux durs à usiner tels que l'inconel 718 et les alliages de titane[17].

En effet, la plus haute usinabilité est réalisable à une température de coupe critique dite température de coupe optimale (T_{opt}). T_{opt} est indépendante des paramètres de coupe et des conditions d'usinage. Elle dépend de la nature des matériaux de la pièce usinée et de l'outil de coupe. Afin d'atteindre cette température, certains chercheurs ont eu recours à des techniques tels que le préchauffage avec laser ou par envoi d'un faisceau d'ions afin d'augmenter la température de coupe à la T_{opt} . Mais en général, les températures de coupe sont élevées d'où l'utilisation des fluides de coupes afin de maintenir les températures de coupes inférieures à T_{opt} . Des fluides de coupe écologiques à base de gaz représentent une alternative efficace à la lubrification conventionnelle [17].

I.7 Cryogénie

Dans l'usinage cryogénique, des fluides de coupes gazeux, gaz liquéfiés en général, sont envoyés dans la zone de coupe afin de refroidir l'outil et/ou la pièce à usiner. Le fluide cryogénique absorbe la chaleur de la zone de coupe et s'évapore dans l'atmosphère. La plupart des fluides de refroidissement cryogéniques utilisés dans les opérations d'usinage, tels que de l'azote liquide (-196°C) et l'hélium liquide sont réalisés à partir de l'air, ils ne sont pas considérés comme des polluants pour l'atmosphère. En particulier l'azote qui est un gaz inerte, il forme 79% de l'atmosphère et il est plus léger que l'air. En conséquence, il est dispersé dans l'atmosphère et ne nuit pas aux opérateurs sur le sol de l'atelier[17].

Le dioxyde de carbone, liquide (-78°) ou neige carbonique, au contraire est considéré comme un polluant de l'air. Il est plus lourd que l'air et peut causer une accumulation de CO₂ et des problèmes de manque d'oxygène dans l'atelier et donc cela exige la ventilation au-dessus de la zone d'usinage[17].



L'usinage cryogénique est habituellement accompagné par des changements dans les propriétés de la pièce à usiner et/ou du matériau des outils de coupe, suite à l'abaissement de la température. Les températures ultra-basses augmentent la force et la dureté des matériaux, et réduisent le pourcentage d'allongement et la ténacité. Le refroidissement cryogénique peut être bénéfique pour l'usinage des matériaux qui, à température ambiante, ont un grand allongement à la rupture, un faible module d'élasticité et qui sont très ductiles. En outre, l'augmentation de la dureté des matériaux pour les outils de coupe peut améliorer leur résistance à l'usure et améliorer leur durée de vie.

L'effet de refroidissement des liquides cryogéniques est particulièrement intéressant dans l'usinage de matériaux difficiles à usiner qui souffrent d'usure d'outils excessive due principalement à des températures de coupe élevées, tels que des alliages à base de titane et d'inconel.

Alors que les fluides de coupe à base de gaz sont considérés comme solution plus respectueuse de l'environnement pour les opérations d'usinage, les développements actuels ne rivalisent pas économiquement et ergonomiquement face aux techniques actuelles [17].



Figure I.18 Usinage cryogénique [18].

I.8 Etat d'art

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés lors du tournage qui traite l'usinage de l'acier (AISI D3), l'usure des outils de coupe, la rugosité de surface et aussi le mode de lubrification (usinage à sec et **MQL**).

Priyanka B. Zaman et al [19] ont réalisé une étude concernant les effets des conditions de refroidissement (sec/quantité minimale lubrification –**MQL**), les types d'outils

(plaquettes en carbure revêtues) et les paramètres de coupe (diverses combinaisons de vitesse de coupe et d'avances par tour) sur différentes réponses comme la température, l'effort de coupe et la rugosité. Les essais ont été menés pendant le tournage de l'AISI 4140 l'acier selon un plan factoriel complet général avec 32 essais. Les auteurs développés des modèles mathématiques pour les différentes réponses étudiées, ces modèles peuvent être utilisés efficacement pour estimer ensuite les valeurs de réponse concernant les variables de contrôle au sein de l'intervalle des conditions de coupe adoptées. Aussi, les courbes des effets principaux, les courbes d'interaction et les (ANOVA) ont été utilisées pour visualiser et évaluer en détail les résultats expérimentaux.

Les résultats trouvés montrent que la vitesse de coupe s'est avérée être le facteur qui affecte le plus la température de coupe, tandis que le type d'outil a été trouvé pour l'effort de coupe et la rugosité de surface. De plus, la vitesse et les types d'outils ont un effet d'interaction significatif sur toutes les réponses. Inversement, le tournage dans des conditions de MQL et à faible avance était trouvé favorable pour tous les cas (tableau I.4).

Tableau I.4 Plan expérimental et valeurs mesurées [19].

Run	Environment	Tool type	Cutting speed, V m/min	Feed rate, f mm/rev	Cutting temperature, °C	Cutting force, N	Surface roughness, µm
1.	Dry	Uncoated	208	0.1	870	750	1.53
2.	MQL	Uncoated	246	0.14	880	659	1.4
3.	Dry	Coated	148	0.1	832	436	0.96
4.	Dry	Uncoated	148	0.14	835	835	1.83
5.	Dry	Coated	246	0.14	885	474	0.75
6.	Dry	Coated	104	0.14	826	522	1.5
7.	Dry	Uncoated	104	0.1	750	862	1.83
8.	Dry	Coated	148	0.14	835	513	1.2
9.	MQL	Uncoated	148	0.14	760	750	1.65
10.	Dry	Coated	104	0.1	813	472	1.35
11.	MQL	Uncoated	208	0.1	804	665	1.35
12.	MQL	Coated	246	0.14	872	435	0.7
13.	Dry	Uncoated	148	0.1	810	832	1.75
14.	Dry	Uncoated	104	0.14	774	875	1.95
15.	MQL	Coated	104	0.1	790	410	1.22
16.	Dry	Uncoated	246	0.1	918.1	671	1.4
17.	MQL	Uncoated	148	0.14	695	785	1.75
18.	MQL	Coated	246	0.1	858	365	0.6
19.	MQL	Coated	148	0.1	812	383	0.88
20.	MQL	Uncoated	148	0.1	737	736	1.55
21.	MQL	Uncoated	104	0.1	680	750	1.61
22.	MQL	Coated	104	0.14	811	473	1.38
23.	Dry	Coated	208	0.14	865	492	0.9
24.	MQL	Coated	208	0.1	850	370	0.73
25.	MQL	Uncoated	246	0.1	860	598	1.25
26.	Dry	Uncoated	246	0.14	939	740	1.55
27.	Dry	Uncoated	208	0.14	885	780	1.74
28.	Dry	Coated	208	0.1	865	415	0.8
29.	MQL	Coated	208	0.14	854	450	0.85
30.	MQL	Uncoated	208	0.14	825	700	1.57
31.	MQL	Coated	148	0.14	820	466	1.12
32.	Dry	Coated	246	0.1	870	404	0.65



Les résultats trouvés par les auteurs ont montré que :

- concernant la température de coupe, la vitesse de coupe a eu l'effet le plus important (61,03%), suivie par l'environnement (13,04%), le type d'outil (5,62%) et la vitesse d'avance (1,73%). La température a été augmentée avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance. Selon la courbe d'effet principal, la température la plus basse peut être atteinte sous Condition MQL, avec un outil non revêtu et à l'état d'alimentation à faible vitesse. Cependant, il y avait deux des effets d'interaction significatifs du type d'outil avec la vitesse de coupe (12,83%) et l'environnement (5,12%). Par conséquent, la relation entre la vitesse de coupe et l'environnement et la température dépend du type d'outil. En général, L'outil non revêtu est plus performant, mais l'outil revêtu est plus performant à une vitesse plus élevée. En outre, l'effet de **MQL** dans la réduction de la température est plus important pour l'usinage avec l'outil non revêtu.

N.R. Dhar et al[20] indiquent que dans tous les processus d'usinage, l'usure des outils est un phénomène naturel qui conduit à leur défaillance. Les demandes croissantes pour une productivité élevée de d'usinage nécessitent l'utilisation d'une vitesse de coupe et d'une d'avance élevées. Un tel usinage produit intrinsèquement une température de coupe élevée, ce qui non seulement réduit la durée de vie de l'outil, mais nuit également au produit. A cet effet, les auteurs affirment que les fluides de coupe modifient les performances des opérations d'usinage en raison de leurs fonctions de lubrification, de refroidissement et d'évacuation des copeaux, mais l'utilisation des fluides de coupe est devenue plus problématique en termes de santé des employés et de pollution de l'environnement. La réduction de l'utilisation des fluides de coupe présente également des avantages économiques en permettant d'économiser sur les coûts de lubrifiant et sur le temps de cycle de nettoyage des pièces/outils/machines. Le concept de lubrification à quantité minimale **MQL** a été suggéré il y a une dizaine d'années comme moyen de résoudre les problèmes de l'intrusion environnementale et les risques professionnels associés aux particules de fluide de coupe en suspension dans l'air dans les ateliers d'usine. Dans ce contexte, les auteurs proposent dans cet article une étude expérimentale du rôle de la lubrification **MQL** sur l'usure de l'outil et la rugosité de surface lors du tournage de l'acier AISI-4340 avec une plaquette en carbure non revêtue. Les résultats trouvés par les auteurs montrent une réduction significative du taux d'usure de l'outil et de la rugosité de surface par **MQL** principalement par la réduction de la température de la zone de coupe et un changement favorable dans l'interaction copeau-outil et travail-outil ([figure I.19 et I.20](#)).



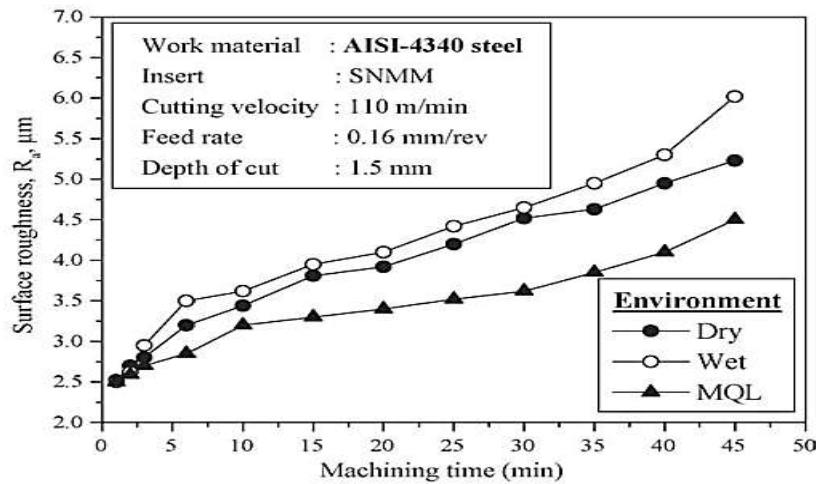


Figure I.19 Rugosité de surface en fonction de la progression de l'usinage dans des conditions sèches, humides et MQL [20].

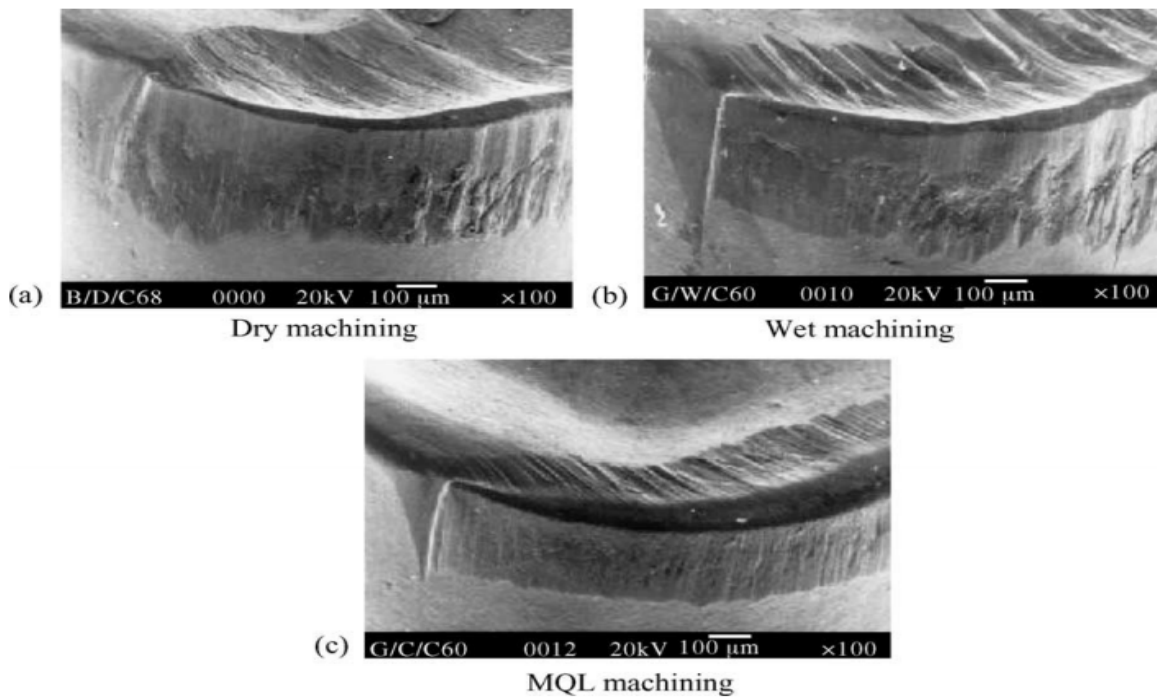


Figure I.20 Vues MEB de la plaquette utilisée après un usinage de 45 minutes dans des conditions (a) sèches, (b) humides et (c) MQL [20].

Mozammel Mia et al[21] ont effectué 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 sortie été les critères de rugosité de surface (R_a , R_q et R_z) (tableau I.5), 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, une avance de 0,2 mm/tr et une 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 en dépouille. Enfin, le sur le flanc auxiliaire l'usure la plus basse est constatée à une vitesse de coupe de 60 m/min, avec une avance de 0,2 mm/tr et 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 de l'usure, l'adhérence, l'abrasion et l'accumulation d'arêtes rapportée ont été considérées comme les principaux mécanismes d'usure (figure I.21).

Tableau I.5 Résultats expérimentaux des réponses selon la matrice Taguchi L8 [21].

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.6 Analyse de la variance pour les moyennes de Ra, Rq et Rz. [21].

Response	Response table for S/N ratio				Response table for means			
	Level	v_z	f	a_p	Level	v_z	f	a_p
R_a	1	-8.865	-7.991	-7.835	1	2.775	2.532	2.500
	2	-8.598	-7.441	-7.597	2	2.700	2.378	2.410
	3	-7.004	-	-	3	2.245	-	-
	4	-6.396	-	-	4	2.100	-	-
	Delta	2.468	0.550	0.238	Delta	0.675	0.155	0.090
	Rank	1	2	3	Rank	1	2	3
R_q	1	-10.931	-9.864	-9.858	1	3.520	3.145	3.158
	2	-10.370	-9.444	-9.450	2	3.315	3.000	2.987
	3	-9.096	-	-	3	2.865	-	-
	4	-8.219	-	-	4	2.590	-	-
	Delta	2.712	0.420	0.408	Delta	0.930	0.145	0.170
	Rank	1	2	3	Rank	1	3	2
R_z	1	-23.39	-22.34	-22.19	1	14.78	13.19	13.03
	2	-22.60	-21.89	-22.05	2	13.49	12.55	12.71
	3	-21.68	-	-	3	12.16	-	-
	4	-20.81	-	-	4	11.04	-	-
	Delta	2.58	0.45	0.14	Delta	3.74	0.63	0.33
	Rank	1	2	3	Rank	1	2	3

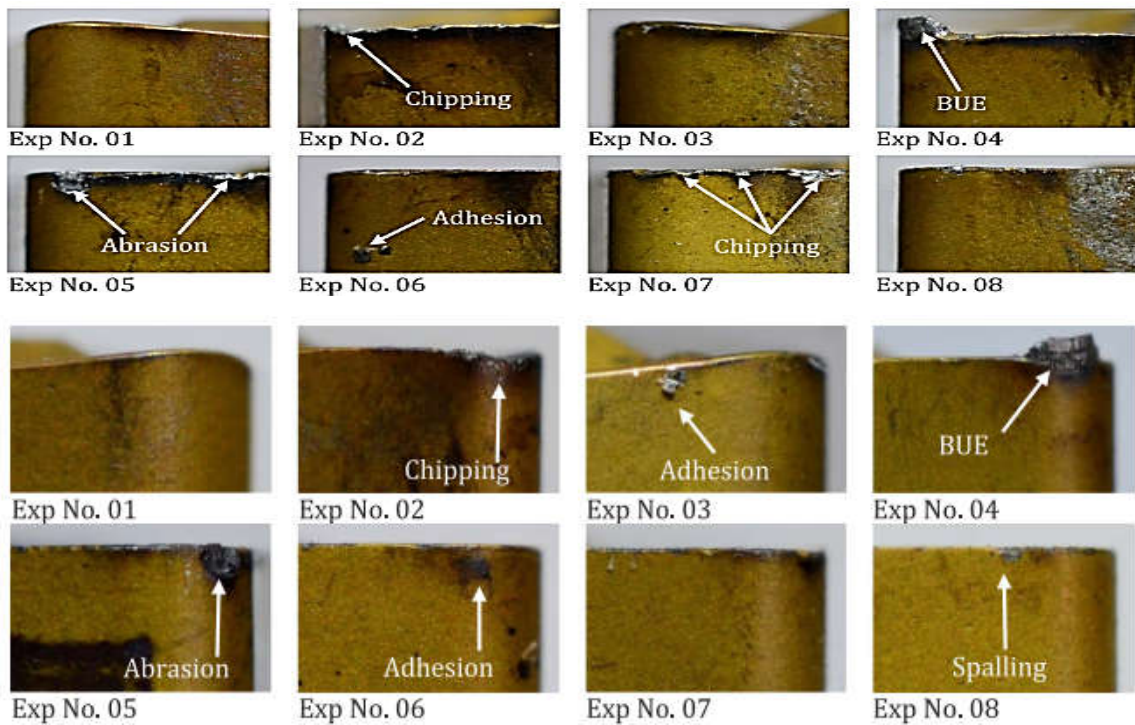


Figure I.21 Représenté les expériences (copeaux, abrasion, adhésion) [21].



Murat Sarikaya et abdukkadir güllü [22] ont établis un plan expérimental afin d'étudier l'effet des principaux paramètres d'usinage tels que la condition de lubrification, la vitesse de coupe, vitesse d'avance et la profondeur de passe sur la rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier AISI-1050. Les expériences sont effectuées sous lubrification conventionnelle, à sec et avec quantité minimale de lubrification **MQL**, les tests sont conçus selon un réseau orthogonal de Taguchi L16, ensuite une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour étudier l'importance des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface (R_a et R_z). La quantité de lubrifiant utilisée dans la technique **MQL** est variée entre un taux de 60 ml/h et 120ml/h sous pression d'air de 6 Bar. Les auteurs ont prouvé que la condition de lubrification a une haute influence sur la qualité de surface. Finalement les paramètres optimaux de coupe pour atteindre une meilleure rugosité de surface sont déterminés après l'analyse des rapports (S/N) (**figure I.22, figure I.23**), Les auteurs ont conclu que les tests de confirmation expérimentale du régime optimal trouvé ont prouvé l'efficacité de la méthode d'optimisation de Taguchi.



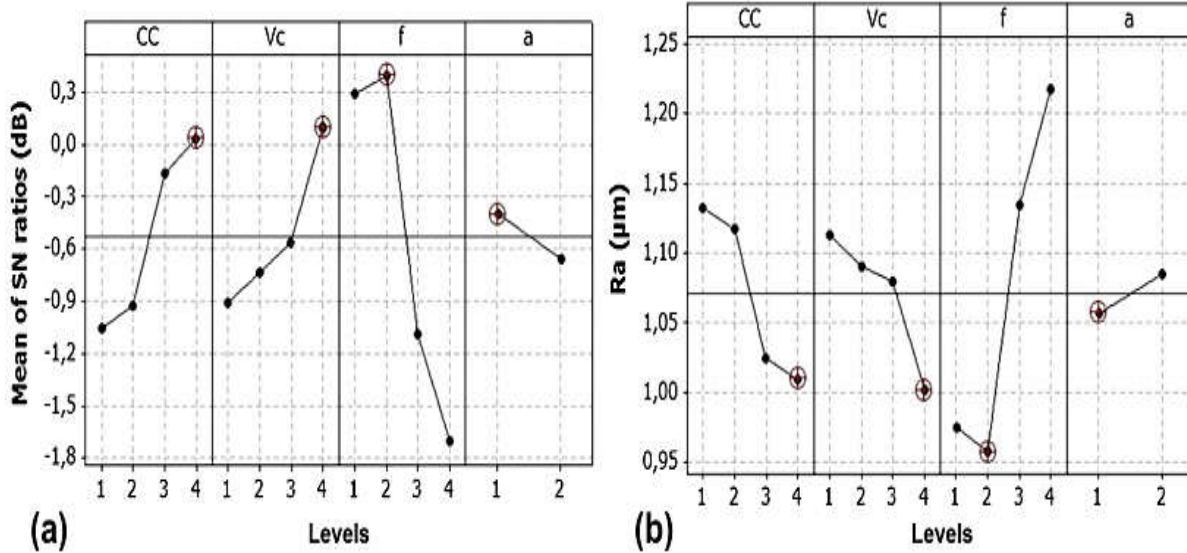


Figure I.22 Graphiques des effets principaux a) Moyenne de S/N ratio pour Ra b) Effets des paramètres de coupe sur Ra [22].

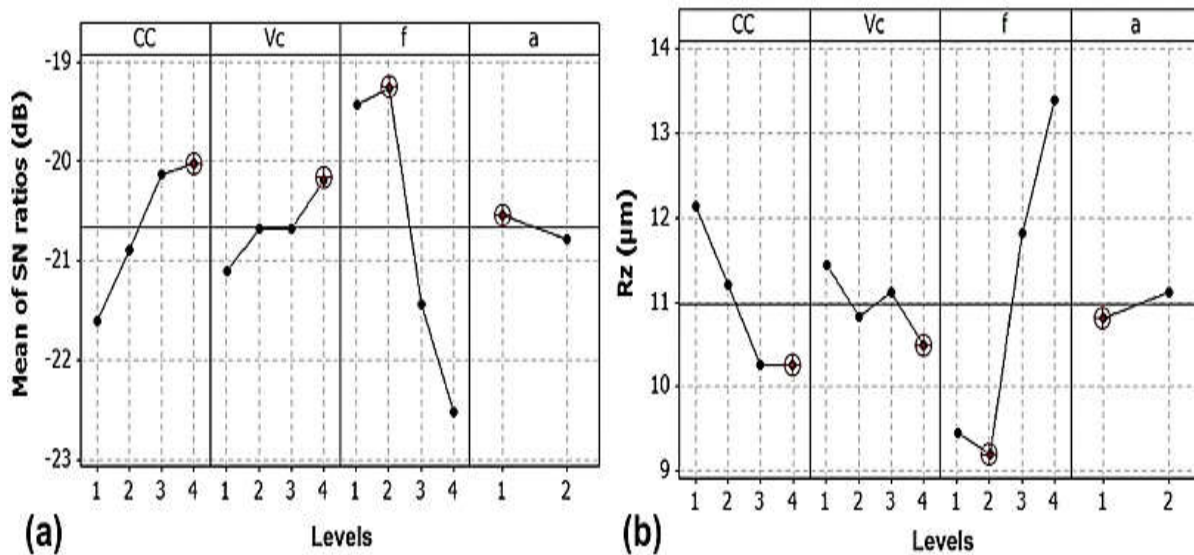


Figure I.23 Graphiques des effets principaux a) Moyenne de S/N ratio pour Rz b) Effets des paramètres de coupe sur Rz [22].

Shojaei et al [23] ont étudiés l'effet des conditions de lubrification sur la rugosité de surface **Ra** durant l'usinage de l'acier C60 sous les trois modes de lubrification. La qualité de surface est évaluée en regard de la vitesse de coupe, vitesse d'avance et de la profondeur de coupe selon le mode de lubrification appliqué. Les résultats montrent que la méthode **MQL** a une influence positive et indéniable sur la rugosité de surface. Cette technique améliore la rugosité de surface d'environ 35% et 17% par rapport à l'usinage à sec et à l'usinage lubrifié conventionnellement comme il est montré dans la [figure I.24](#).



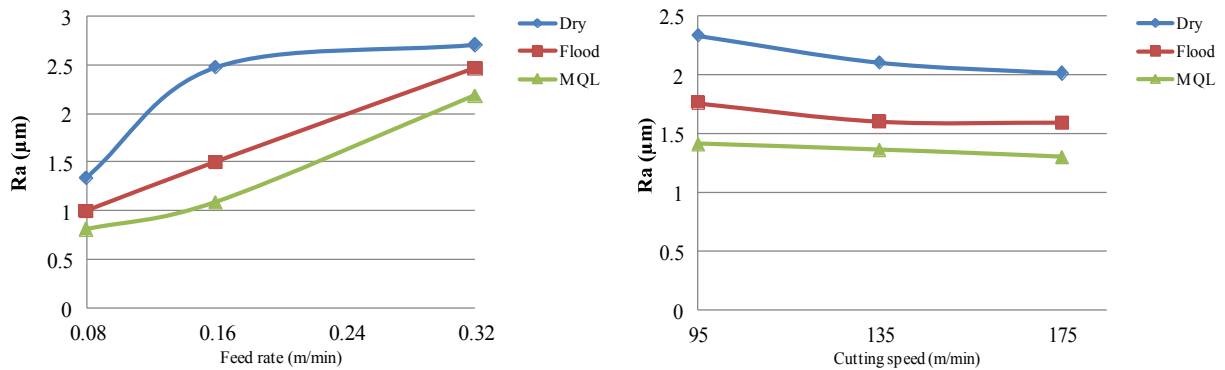


Figure I.24 Effet de la vitesse d'avance et de la vitesse de coupe sous différentes méthodes de lubrification sur la rugosité de surface [23].

I.9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases nécessaires à la compréhension de cette étude. Ce chapitre agrée une partie sur les matériaux de coupe tels que : les caractéristiques, les classifications et les revêtements des matériaux. Ensuite une partie exposant acide les paramètres technologiques d'usinage et usinage respectant l'environnement. 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.





Chapitre II

Procédure expérimentale



II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'ensemble du matériel exploité pour effectuer cette étude expérimentale. Le but est d'identifier le comportement du couple outil-matière en évaluant les différents paramètres technologiques d'usinage, tels que la rugosité de surface R_a , l'usure d'outil V_b en fonction des conditions de coupe (V_c , a_p , f , M) et le mode de lubrification MQL . 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) 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.

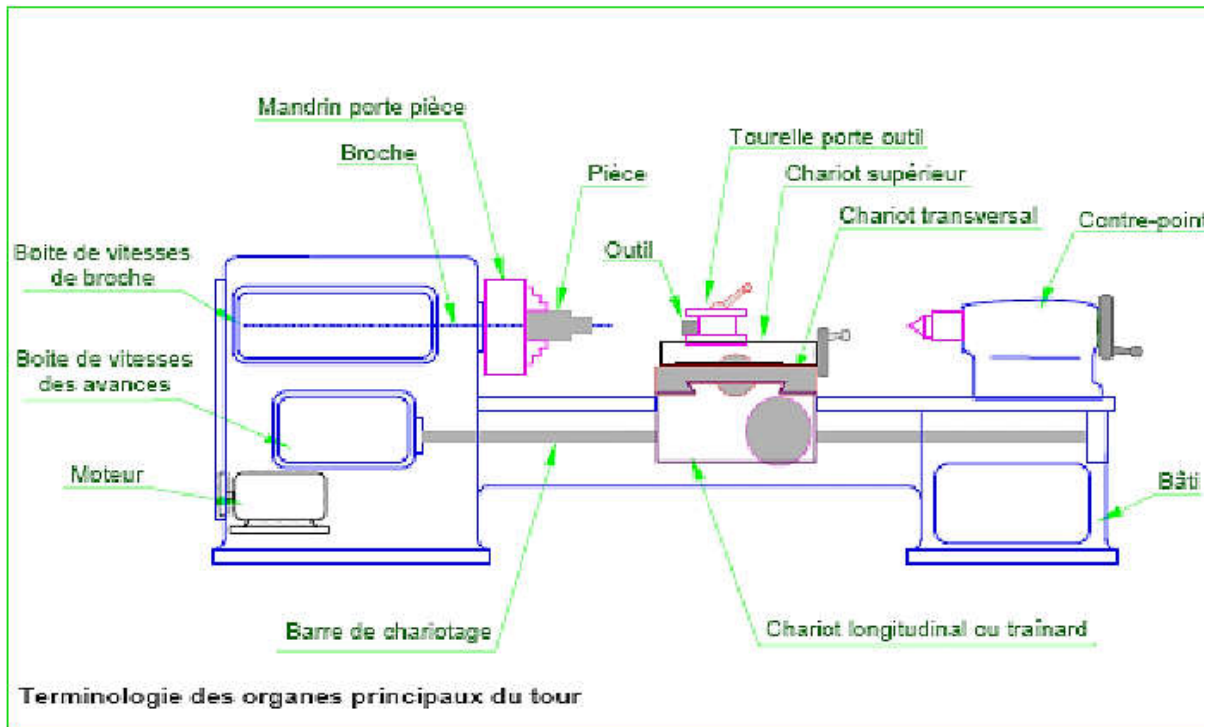


Figure II.2 Nomenclature des différents organes du tour modèle SN40.

Notre tour modèle SN40 est équipé d'un variateur de vitesse (**figure II.3**), il permet le réglage du nombre de tour en fonction de la vitesse de coupe choisie. La (**figure II.4**) illustre l'utilisation d'un capteur optique (tachymètre) utilisé, afin d'estimer le nombre de tour exacte de la broche.



Figure II.3 Variateur de vitesse de coupe.

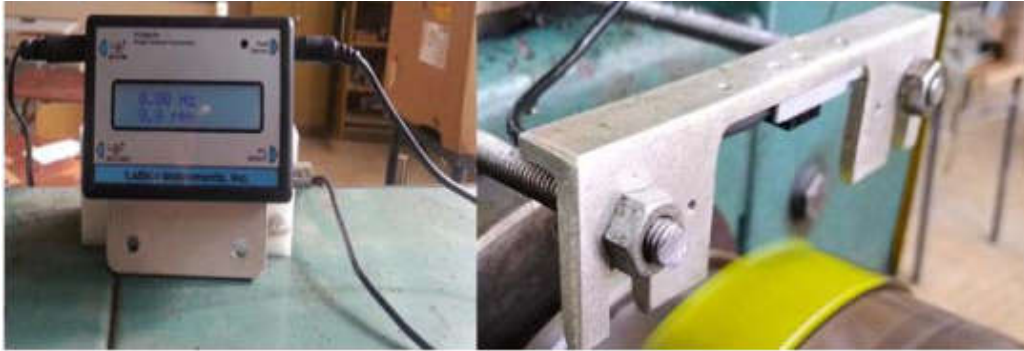


Figure II.4 Capteur de vitesse.

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. Ce matériau est utilisé pour la fabrication des matrices, des poinçons de découpage et d'emboutissage, des filières d'étrépage, des galets profileurs, des molettes, des outils à bois et peignes à rouler des filets.

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 GC1525**. Le seul type de porte outil qui a été utilisé pour les trois plaquettes de coupe est le **PSBNR2525K12** avec un angle de direction principal 75° (figure II.6).

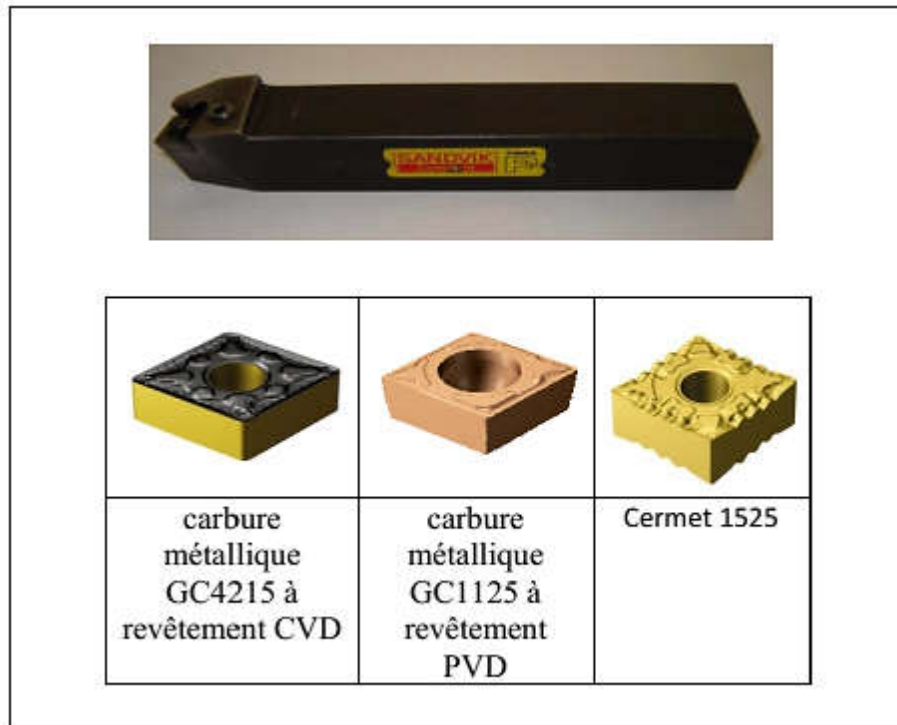


Figure II.6 Plaquettes et porte outil.

II.2.4 Instruments de mesure utilisés

Pour les différentes mesures des paramètres de sortie, nous avons utilisé les instruments de mesure suivants :

- Un 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 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité 2D

Le critère de la rugosité de surface **R_{aa}** 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.7**).



Figure II.7 Rugosimètre 2D en plein opération de mesure.

II.2.4.2 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.8**).

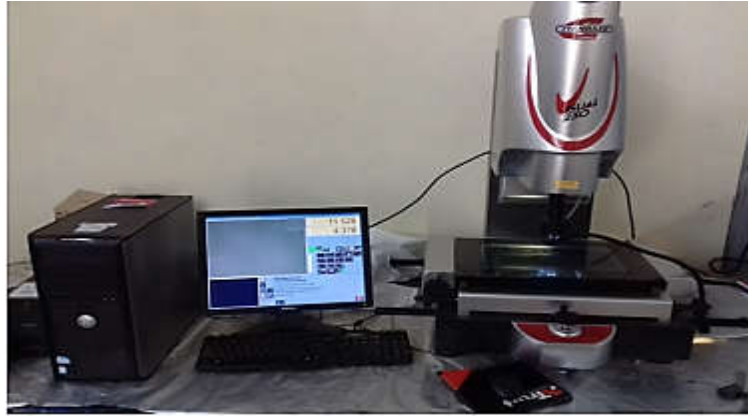


Figure II.8 Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).

II.2.4.3 Minimum de quantité de lubrification (MQL)

Le système MQL utilisée pour la lubrification (**figure II.9**).

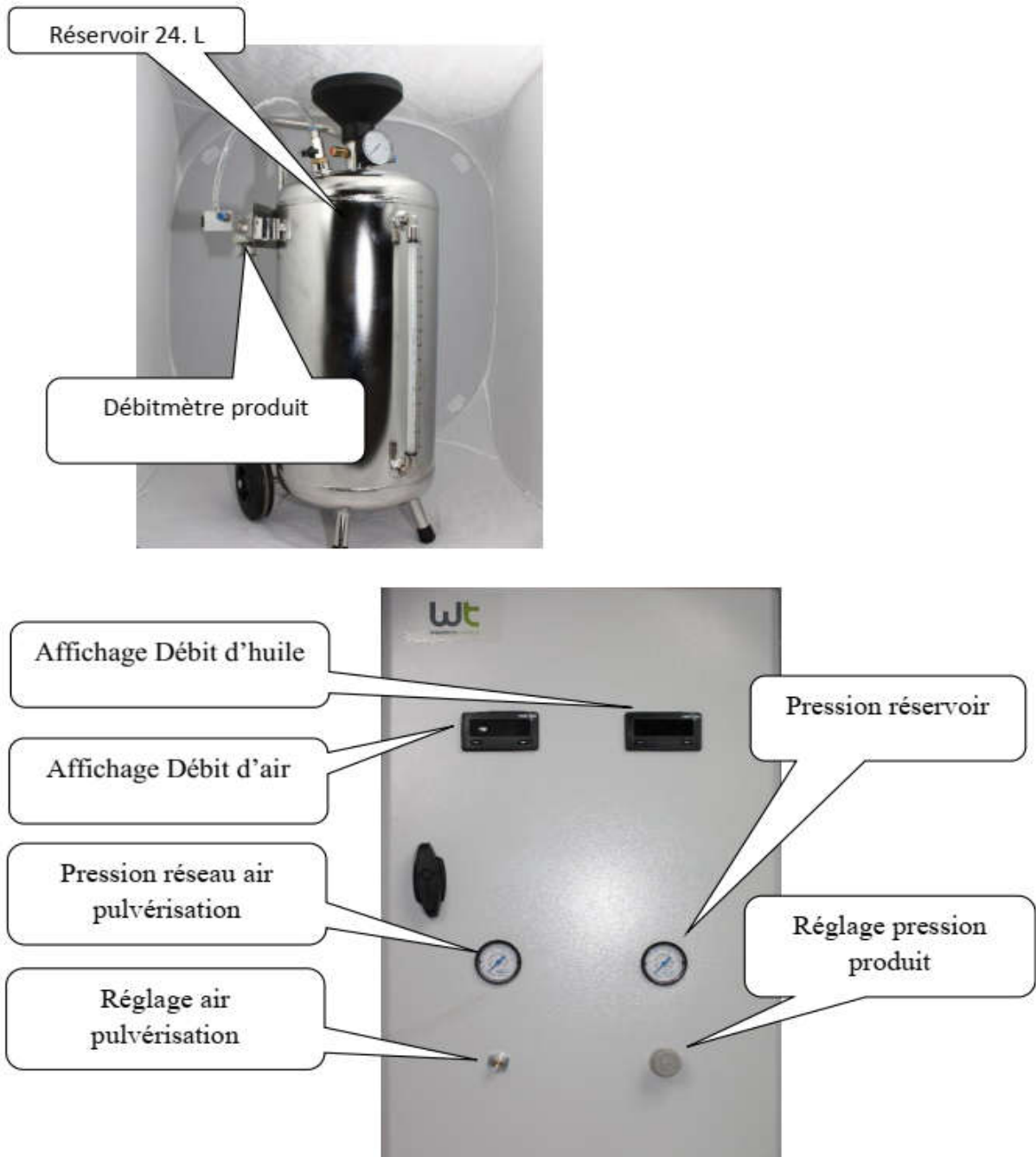


Figure II.9 système MQL.

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 (V_c , a_p , 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'entrée 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	207	Cermet	0.14
6	0.2	207	PVD	0.2
7	0.2	340	CVD	0.08
8	0.2	340	Cermet	0.14
9	0.2	340	PVD	0.2
10	0.4	200	CVD	0.08
11	0.4	200	Cermet	0.14
12	0.4	200	PVD	0.2
13	0.4	270	CVD	0.08
14	0.4	270	Cermet	0.14
15	0.4	270	PVD	0.2
16	0.4	340	CVD	0.08
17	0.4	340	Cermet	0.14
18	0.4	340	PVD	0.2

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, rugosimètre, système MQL et microscope pour mesurer l'usure (Visuel Gage 250)). La planification des expériences et les conditions de coupe ont été également présentées. Dans le chapitre qui suit, nous allons exposer les résultats des essais réalisés dans cette étude ainsi que la modélisation des paramètres de sortie.



Chapitre III

Modélisation de l'usure et de la rugosité de surface dans un environnement MQL



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**, et l'usure en dépouille **Vb** en utilisant la méthodologie de surface de réponse. L'usinage a été réalisé sur un acier fortement allié de désignation (AISI D3) par trois types de matériaux de coupe (**carbure à revêtement CVD, Cermet et carbure à revêtement PVD**) et cela dans un environnement de lubrification **MQL**. 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 la 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 [24]. 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 :

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

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

- **Yi** : la réponse moyenne observée dans les expériences,
- **N** : nombre total d'expériences,
- **Nnf** : niveau de chaque facteur f.

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

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

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

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \text{ (III.3)}$$

Avec : **MCe** 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.

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

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 [24] :

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

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** a 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 :

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

-**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) ;

-**a₀, 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.7).

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

Avec :

Y_i : valeur de la réponse calculée à la **i^{ème}** expérience ;

Ȳ_i : valeur mesurée à la **i^{ème}** expérience ;

Ȳ : 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 considérés statistiquement significatifs. En d'autres termes, plus le **R²** approche la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réelles [24].

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'acier (AISI D3) dans un environnement **MQL**. L'analyse des résultats de ce tableau montre que la valeur minimale correspond à la rugosité de surface **R_a**, a été trouvée suivant les conditions de **l'essai N°13** de (270 m/min ; 0,14 mm/tr ; 0.4 mm et Carbure à revêtement **CVD**), et pour la valeur minimale de **V_b**, elle a été trouvée avec **l'essai N°03** avec (200 m/min ; 0,2 mm/tr ; 0.2 mm et Carbure à revêtement **PVD**).

La valeur maximale 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 (340m/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)	Ra (µm)
1	0.2	200	CVD	0.08	0.062	0.919
2	0.2	200	Cermet	0.14	0.092	1.954
3	0.2	200	PVD	0.2	0.021	2.264
4	0.2	270	CVD	0.08	0.072	1.453
5	0.2	270	Cermet	0.14	0.148	2.452
6	0.2	270	PVD	0.2	0.035	2.164
7	0.2	340	CVD	0.14	0.071	1.553
8	0.2	340	Cermet	0.2	0.15	3.233
9	0.2	340	PVD	0.08	0.064	2.165
10	0.4	200	CVD	0.2	0.097	2.176
11	0.4	200	Cermet	0.08	0.185	1.514
12	0.4	200	PVD	0.14	0.036	2.541
13	0.4	270	CVD	0.14	0.075	0.832
14	0.4	270	Cermet	0.2	0.077	2.467
15	0.4	270	PVD	0.08	0.07	2.199
16	0.4	340	CVD	0.2	0.068	1.641
17	0.4	340	Cermet	0.08	0.37	2.532
18	0.4	340	PVD	0.14	0.057	2.043

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 **49,78%**. Puis, le produit **Vc*M** sa contribution est **9,88%**. Le troisième facteur important affectant la rugosité de surface est l'avance **f** avec une contribution de **13,64%**, puis la vitesse de coupe **Vc** avec **4.41%** de

contribution et en dernier lieu, la profondeur de passe **ap** avec **0,04%** 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	SC séq	Cont%	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	14	5.88686	96.30%	5.88686	0.42049	5.58	0.091
Linéaires	5	4.14899	67.87%	2.80070	0.56014	7.43	0.065
ap	1	0.00250	0.04%	0.16865	0.16865	2.24	0.232
Vc	1	0.26970	4.41%	0.07366	0.07366	0.98	0.396
f	1	0.83371	13.64%	0.46936	0.46936	6.23	0.088
M	2	3.04308	49.78%	1.88333	0.94166	12.49	0.035
Interaction	9	1.73787	28.43%	1.73787	0.19310	2.56	0.237
ap*Vc	1	0.27877	4.56%	0.07762	0.07762	1.03	0.385
ap*f	1	0.01758	0.29%	0.06201	0.06201	0.82	0.431
ap*M	2	0.16961	2.77%	0.27591	0.13795	1.83	0.302
Vc*f	1	0.41165	6.73%	0.01922	0.01922	0.25	0.648
Vc*M	2	0.60399	9.88%	0.81819	0.40909	5.43	0.101
f*M	2	0.25627	4.19%	0.25627	0.12813	1.70	0.321
Erreur	3	0.22619	3.70%	0.22619	0.07540		
Total	17	6.11305	100.00%				

III.3.1.2 Graphique des 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 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 en dépouille **Vb** de l'outil de coupe.

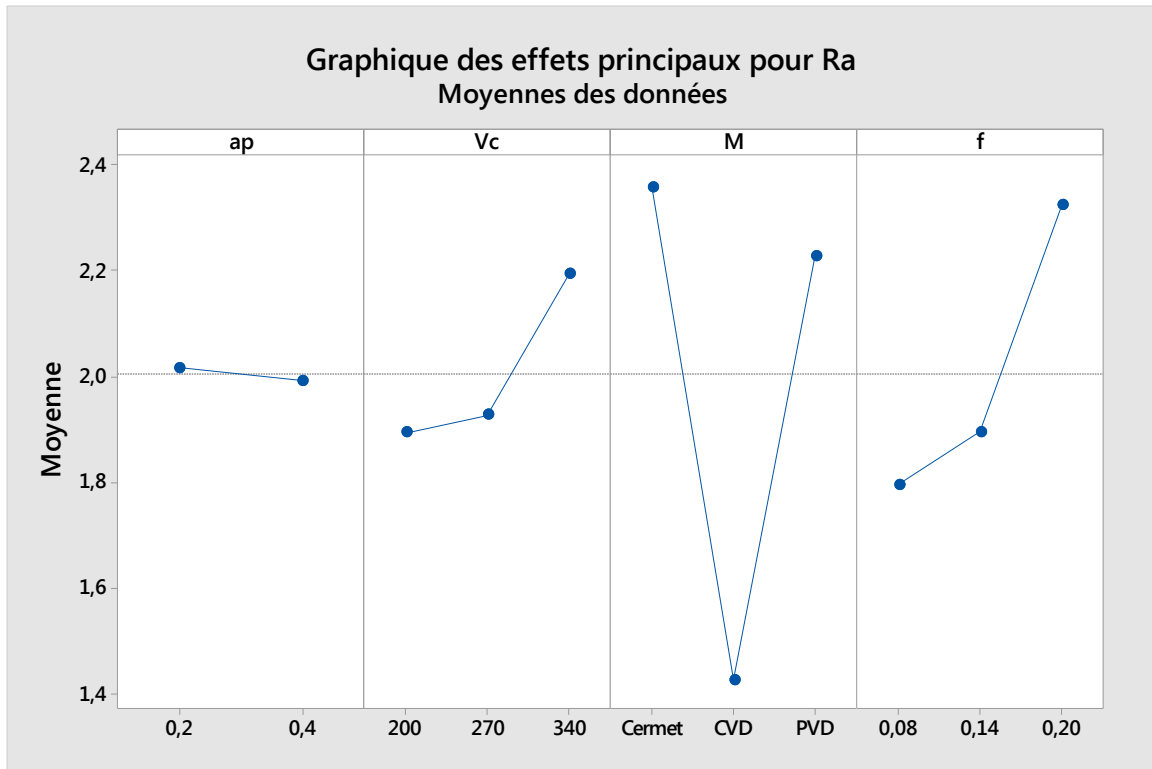


Figure III.1 Graphique des effets principaux pour Ra.

III.3.1.3. Analyse de régression pour Ra

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

Carbure avec revêtement CVD

$$Ra_{CVD} = 0,37 - 2,90 ap + 0,00488 Vc + 9,7 f - 0,0138 ap * Vc + 21,4 ap * f - 0,0158 Vc * f \quad (III.8)$$

Outil Cermet

$$Ra_{Cermet} = -0,38 - 0,84 ap + 0,01435 Vc - 0,1 f - 0,0138 ap * Vc + 21,4 ap * f - 0,0158 Vc * f \quad (III.9)$$

Carbure avec revêtement PVD

$$Ra_{PVD} = 1,65 + 1,56 ap + 0,00392 Vc - 0,8 f - 0,0138 ap * Vc + 21,4 ap * f - 0,0158 Vc * f \quad (III.10)$$

Où : Le coefficient de détermination : ($R^2 = 96,30\%$).

III.3.1.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité de surface Ra est présentée dans la figure III.2. 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.

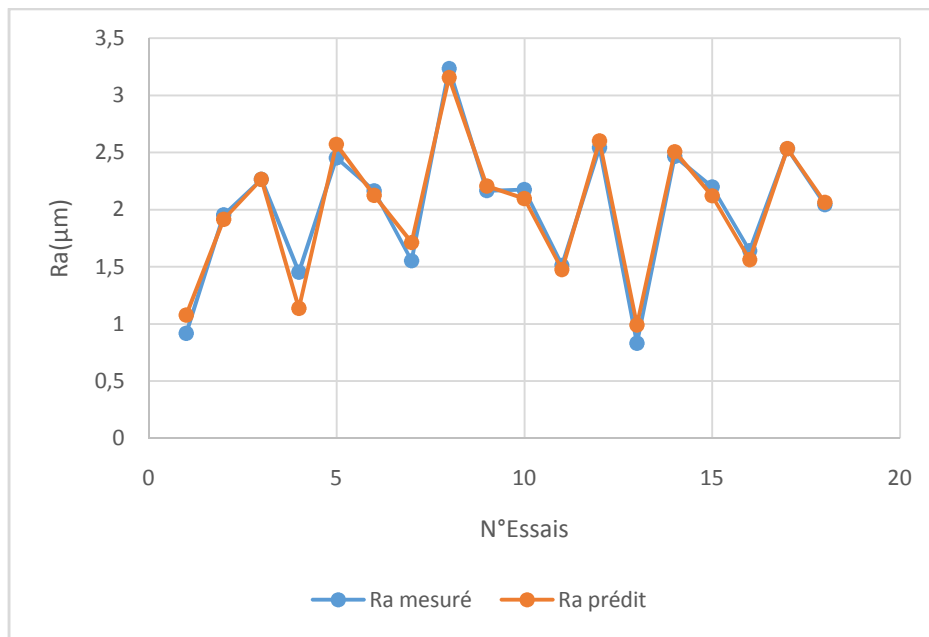


Figure III.2 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour Ra.

II.3.1.5 Analyse de surface de réponse 3D pour Ra

Les expériences ont été réalisées avec trois matériaux de coupe, usinage avec un outil de coupe en carbure métallique avec revêtement en CVD, un outil en Cermet et un outil en carbure avec un revêtement PVD. Les courbes de surface de réponse 3D pour Ra sont comme suit :

*Cas 01 : carbure à revêtement CVD

La Figure III.3 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(3.a) montre que l'augmentation de Vc induit une légère augmentation de Ra, alors que la profondeur de coupe ap n'a pas presque une influence significative sur Ra. La figure(3.b) montrent que l'effet de l'avance f sur la rugosité de surface Ra est important, plus l'avance augmente plus la rugosité Ra augmente. Notons aussi, que l'influence de la profondeur ap est insignifiante. La figure(3.c) montre clairement que l'augmentation de f et Vc induisent une augmentation de Ra. Puisque les essais d'usinage ont été réalisés sur une longueur importante, dans ce cas l'usure de la plaquette en carbure CVD intervient dans le processus de coupe et dégrade la surface usinée. C'est pour cela que l'augmentation des deux facteurs f et Vc induisent une augmentation de Ra.

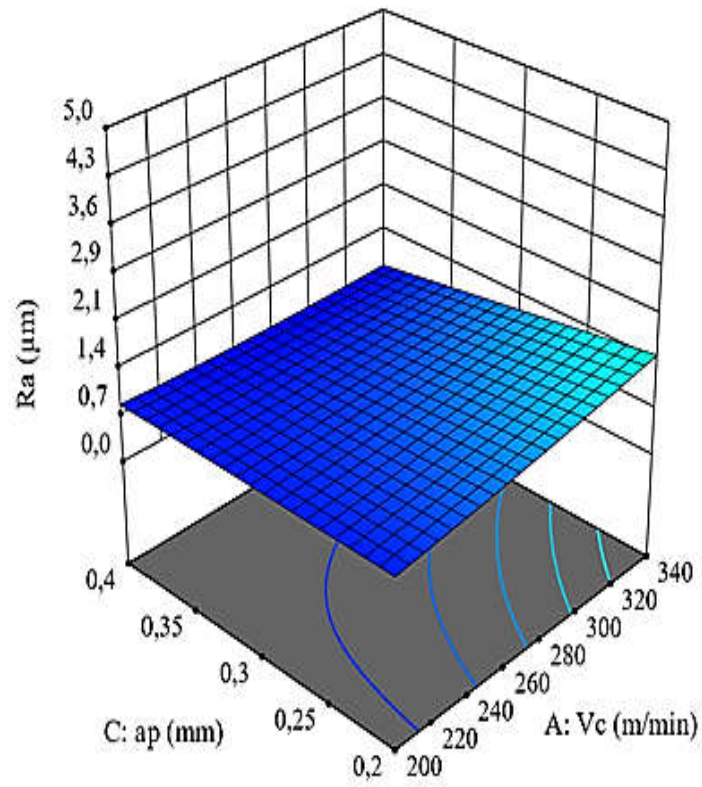


Figure (3.a)

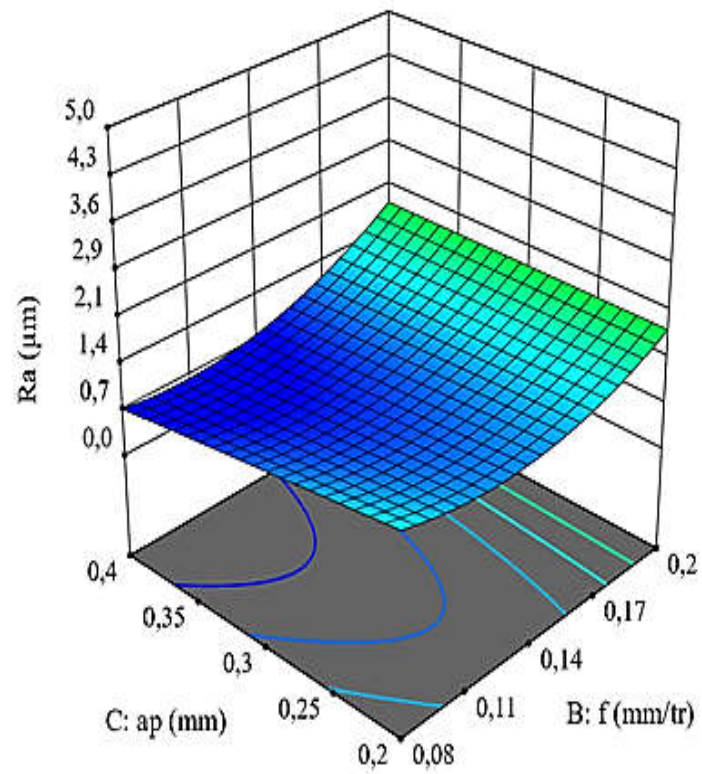


Figure (3.b)

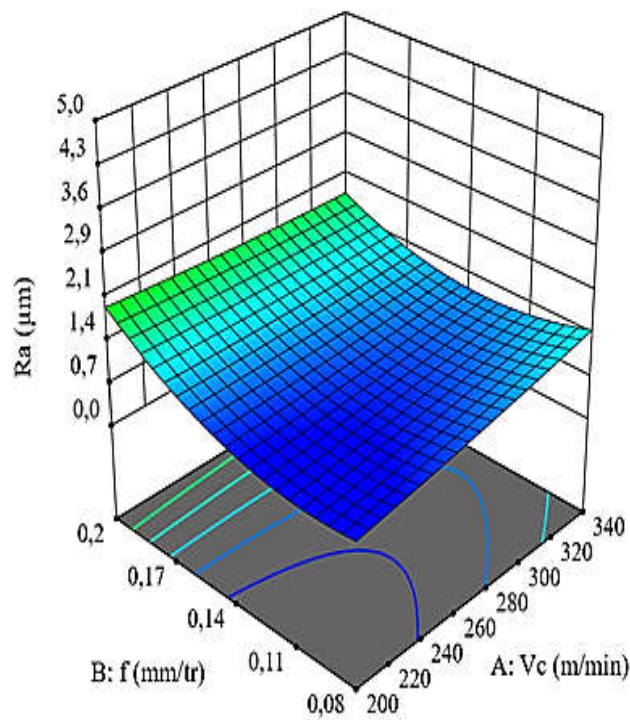


Figure (3.c)

Figure III.3 Surface de réponse 3 D de Ra en fonction de (Vc, ap, f) pour l'outil à revêtement CVD.

***Cas 02 : Cermet**

La 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 tendance des courbes est presque semblable à celle de l'outil en carbure CVD. L'effet de la profondeur de passe **ap** sur la rugosité de surface **Ra** est moindre par rapport aux effets de **Vc** et **f**. L'augmentation de la rugosité **Ra** en fonction de **Vc** peut être expliquée par l'accroissement de l'usure **Vb** en fonction de l'élévation de **Vc**, ce qui a pour effet d'augmenter la rugosité **Ra**.

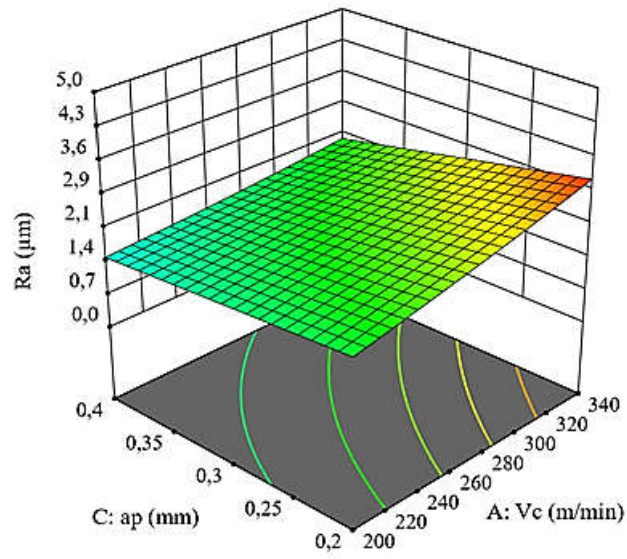


Figure (4.a)

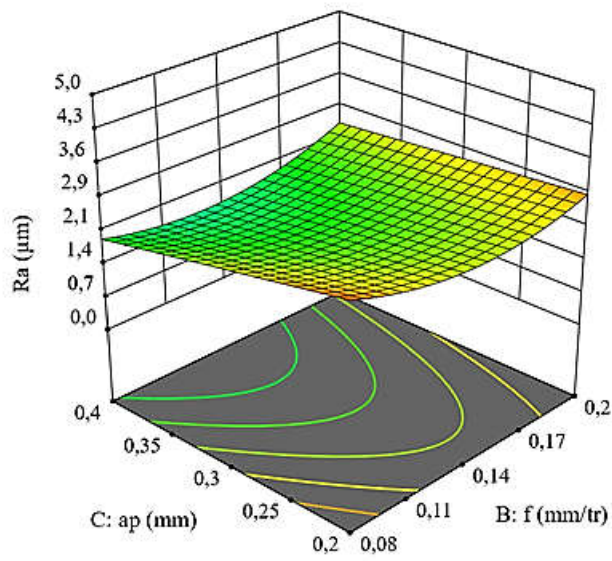


Figure (4.b)

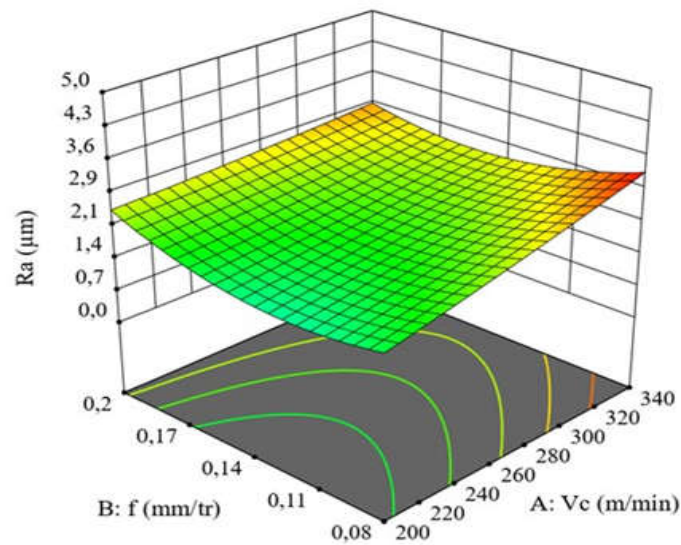


Figure (4.c)

Figure III.4 Surface de réponse 3D de Ra en fonction de (V_c , ap , f) pour l'outil en cermet.

***Cas 03 : carbure à revêtement PVD**

Le **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** pour le carbure à revêtement **PVD**. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA. On remarque que la figure (5.a) montre que l'effet de la vitesse de coupe **Vc** sur la rugosité de surface **Ra** provoque une augmentation de **Ra**. Par contre **ap** n'a pas presque d'effet sur **Ra**. Les figures (5.b) et (5.c) montrent que l'effet de **f** sur la rugosité de surface **Ra** est très important et provoque une augmentation de la rugosité **Ra** à cause de l'usure de l'arête de coupe de l'outil qui augmente en fonction de l'augmentation de **Vc**.

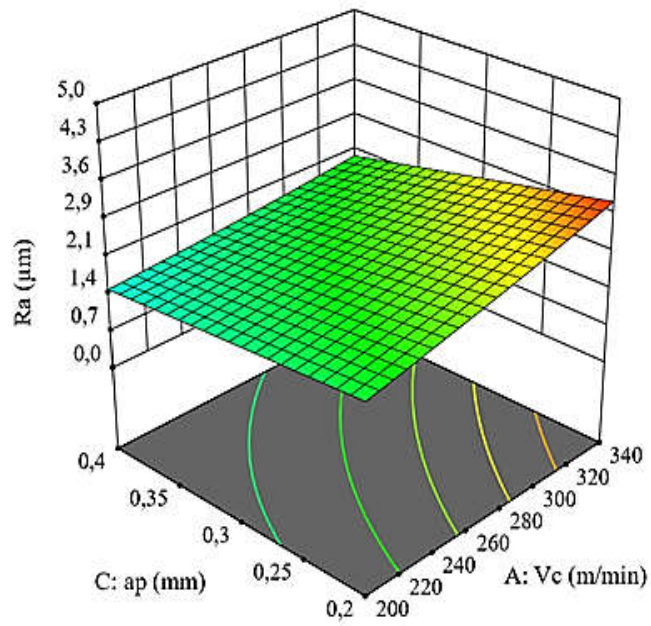


Figure (5.a)

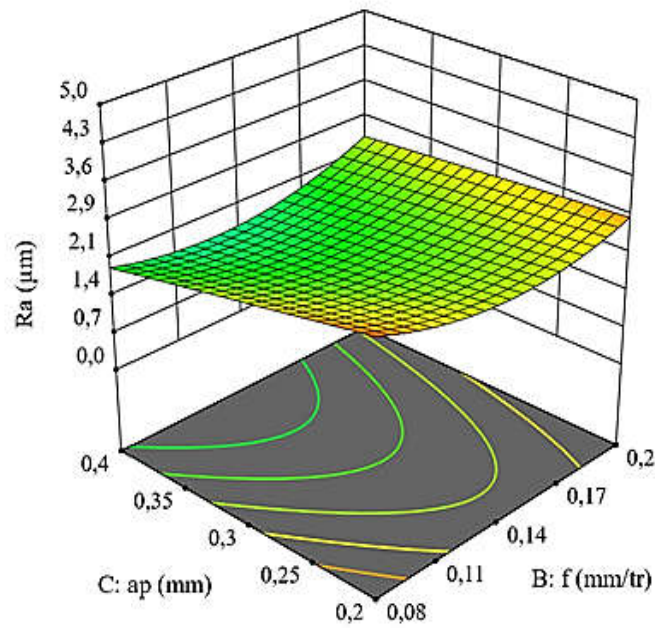


Figure (5.b)

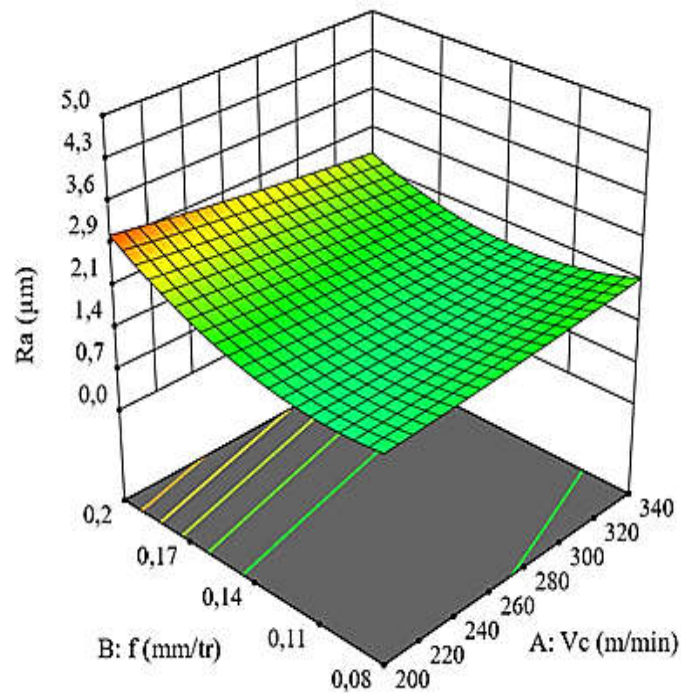


Figure (5.c)

Figure III.5 Surface de réponse 3D de Ra en fonction de (Vc, ap, f) pour l'outil en carbure à revêtement PVD.

III.3.2 Analyse de variance et modélisation de l'usure V_b de l'outil de coupe

III.3.2.1 Analyse de variance ANOVA pour V_b

Le [tableau III.3](#) illustre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour l'usure V_b . L'analyse des résultats montre que le facteur **M** est le premier facteur qui affecte l'usure V_b , avec une contribution de **46,26%**. On peut constater aussi que **f** a un effet significatif sur V_b avec une contribution de **10,78%**. Le facteur suivant influençant V_b est la vitesse de coupe **Vc** suivie par **ap**, leurs contributions sont de **6,31%** et **5,23%** respectivement. Aussi, les interactions (**Vc*M** et **f*M**) ont un effet significatif sur l'usure V_b avec des contributions de **5,30%** et **7,66%** respectivement.

Tableau III.3 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure Vb.

Source	DL	SC séq	Cont %	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	14	0.108260	99.58%	0.108260	0.007733	50.70	0.004
Linéaires	5	0.074566	68.59%	0.055460	0.011092	72.73	0.002
ap	1	0.005689	5.23%	0.000104	0.000104	0.68	0.470
Vc	1	0.006864	6.31%	0.006504	0.006504	42.65	0.007
f	1	0.011719	10.78%	0.005218	0.005218	34.21	0.010
M	2	0.050294	46.26%	0.045115	0.022558	147.91	0.001
Interaction	9	0.033694	30.99%	0.033694	0.003744	24.55	0.012
ap*Vc	1	0.000374	0.34%	0.000017	0.000017	0.11	0.759
ap*f	1	0.007980	7.34%	0.000227	0.000227	1.49	0.310
ap*M	2	0.004367	4.02%	0.000129	0.000064	0.42	0.689
Vc*f	1	0.006887	6.33%	0.000323	0.000323	2.12	0.242
Vc*M	2	0.005759	5.30%	0.011104	0.005552	36.40	0.008
f*M	2	0.008326	7.66%	0.008326	0.004163	27.30	0.012
Erreur	3	0.000458	0.42%	0.000458	0.000153		
Total	17	0.108717	100.00%				

III.3.2.2 Graphique des effets principaux pour Vb

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la figure III.6. A partir de cette figure, Il apparaît clairement que le matériau d'outil de coupe **M** : Cermet affecte fortement l'usure **Vb**, car il a la plus grande pente, suivie par l'avance **f** qui affecte fortement l'usure **Vb**, suivie par la vitesse de coupe **Vc**. Par contre, la profondeur de passe **ap** a une faible influence sur l'usure **Vb**.

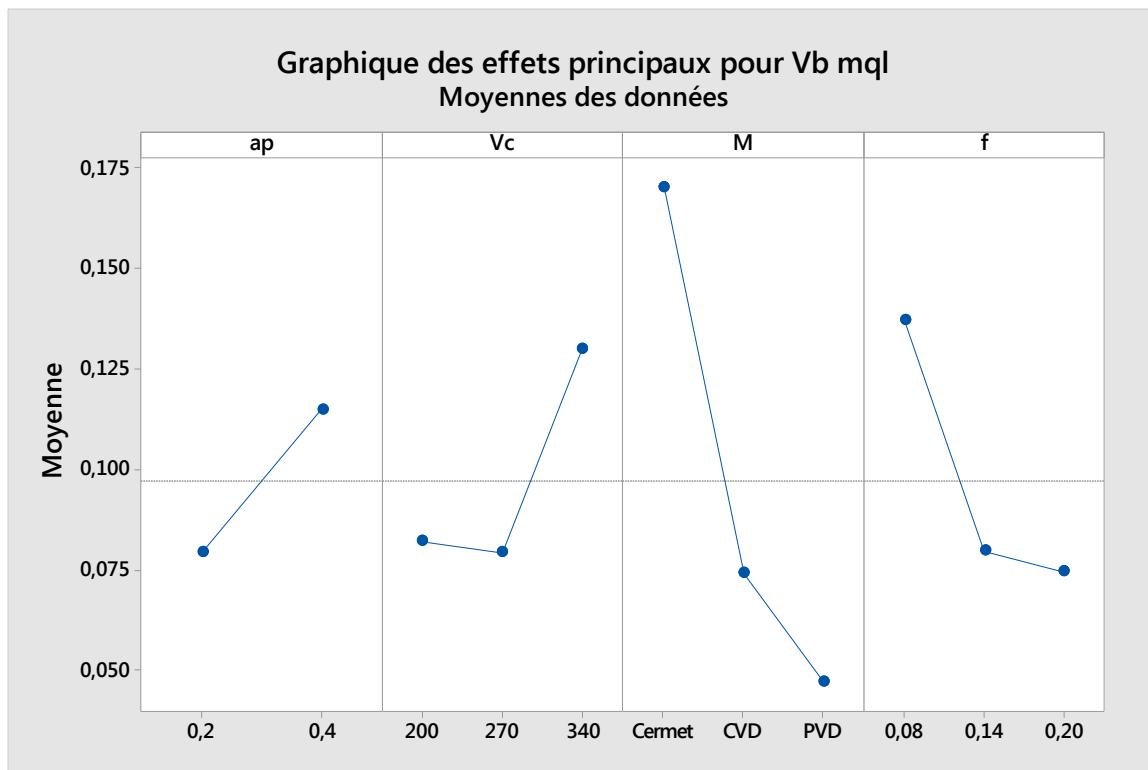


Figure III.6 Effet de conditions de coupe sur l'usure Vb.

III.3.2.3 Analyse de régression pour Vb

Les équations de régression obtenues avec le coefficient de détermination (R^2) pour les trois matériaux de coupe sont données par les expressions (III.11, III.12, III.13).

Carbure avec revêtement CVD

$$Vb_{CVD} = -0,0227 + 0,102 ap + 0,000120 Vc + 1,111 f + 0,000206 ap * Vc - 1,29 ap * f - 0,00205 Vc * f \quad (III.11)$$

Outil Cermet

$$Vb_{Cermet} = -0,0651 + 0,211 ap + 0,001360 Vc - 0,579 f + 0,000206 ap * Vc - 1,29 ap * f - 0,00205 Vc * f \quad (III.12)$$

Carbure avec revêtement PVD

$$Vb_{PVD} = -0,098 + 0,174 ap + 0,000397 Vc + 0,680 f + 0,000206 ap * Vc - 1,29 ap * f - 0,00205 Vc * f \quad (III.13)$$

Où : Le coefficient de détermination : ($R^2=99.58\%$).

III.3.2.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La figure III.7 illustre les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'usure V_b dans un environnement de lubrification MQL. La comparaison des résultats prouve que les valeurs prédites et celles mesurées sont très proches ce qui prouve que le modèle est fiable.

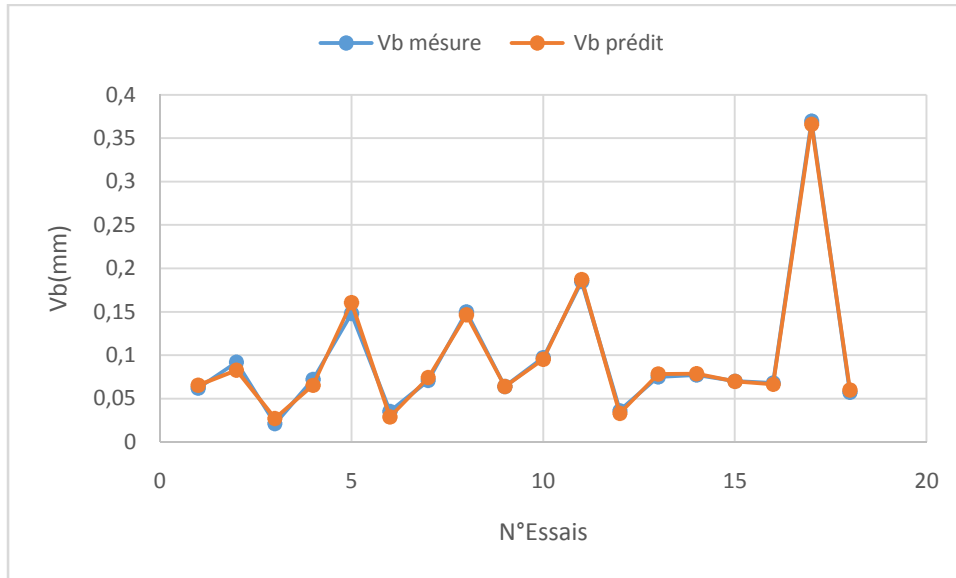


Figure III.7 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour l'usure V_b .

III.3.2.5 Analyse de surface en 3D de réponse pour V_b

Les expériences ont été réalisées avec trois matériaux de coupe, usinage avec un outil de coupe en carbure métallique avec revêtement en CVD, un outil en Cermet et un outil en carbure avec un revêtement PVD. Les courbes de surface de réponse 3D pour V_b sont comme suit :

*Cas 01 : carbure à revêtement CVD

La Figure III.8 présente 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 (8.a) montre que l'augmentation de la vitesse de coupe V_c et la profondeur de passe a_p provoque une légère augmentation de l'usure V_b . La figure (8.b) montre que l'augmentation de f a pour effet d'augmenter l'usure V_b . La figure (8.c) montre que l'avance f a une faible influence sur l'usure V_b par rapport à V_c . Par contre V_c a une légère diminution à cause du temps d'usinage qui n'est pas le même pour les trois vitesses de coupe.

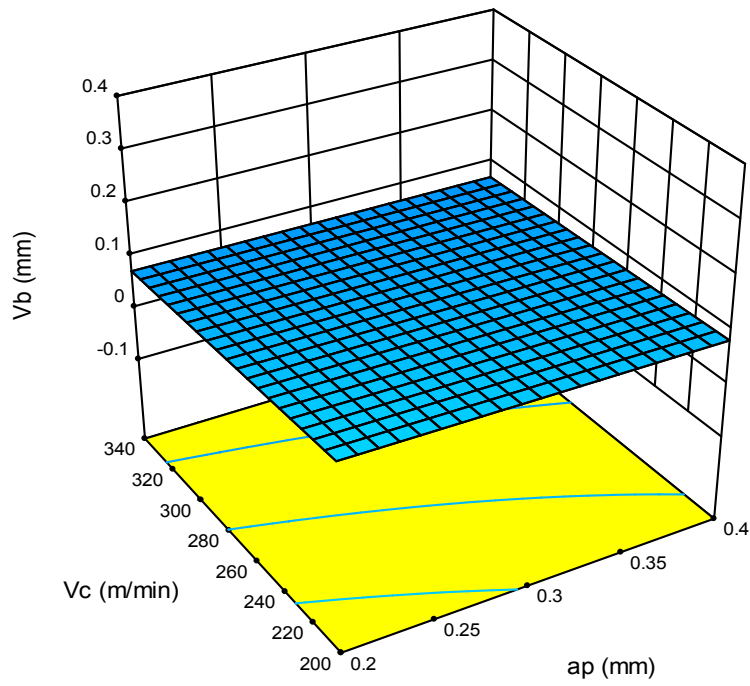


Figure (8.a)

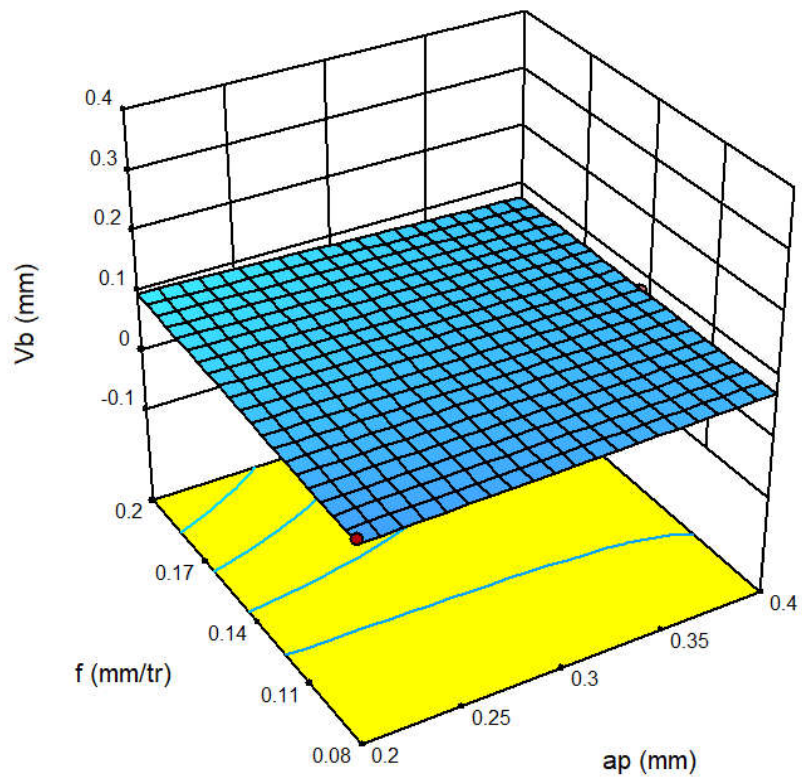


Figure (8.b)

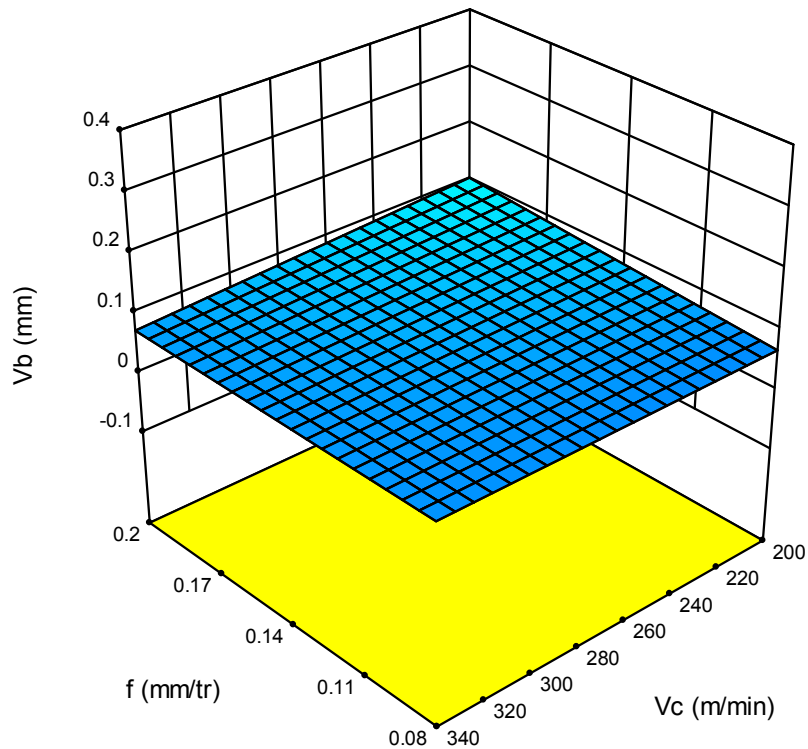


Figure (8.c)

Figure III.8 Surface de réponse 3D de l'usure (V_b) en fonction de (V_c, f, ap) pour l'outil à revêtement CVD.

***Cas 02 : Cermet**

La figure III.9 illustre les résultats de la surface de réponse (3D) de l'usure V_b en fonction des paramètres de coupe V_c, f, ap . L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA. On remarque que la figure (9.a) montre que l'augmentation de la vitesse de coupe V_c provoque une augmentation de l'usure V_b par contre, la profondeur de passe ap a presque pas d'effet sur l'usure V_b . Donc ce facteur V_c possède l'effet le plus significatif sur V_b . Aussi, dans la figure (9.b) l'avance f a une grande influence sur l'usure V_b , plus f augmente l'usure V_b diminue à cause du temps d'usinage qui se diffère d'une avance à une autre. Dans la figure (9.c). Dans ce cas l'augmentation de l'avance f conduit à la diminution de l'usure V_b et que l'augmentation de V_c conduit à l'augmentation de V_b . Nous pouvons dire dans ce cas que l'effet de V_c influe d'une manière accentuée par rapport à l'avance f sur l'usure V_b .

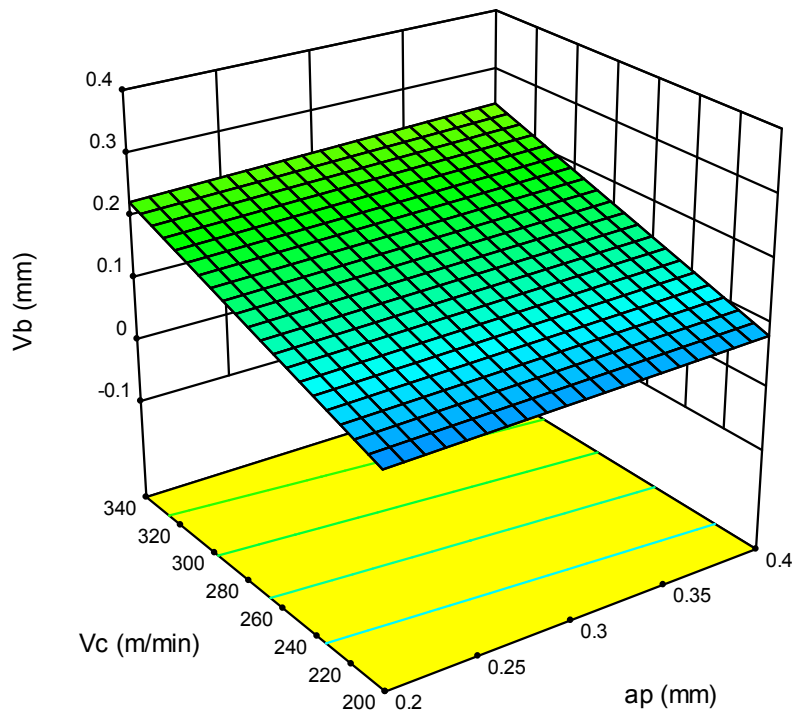


Figure (9.a)

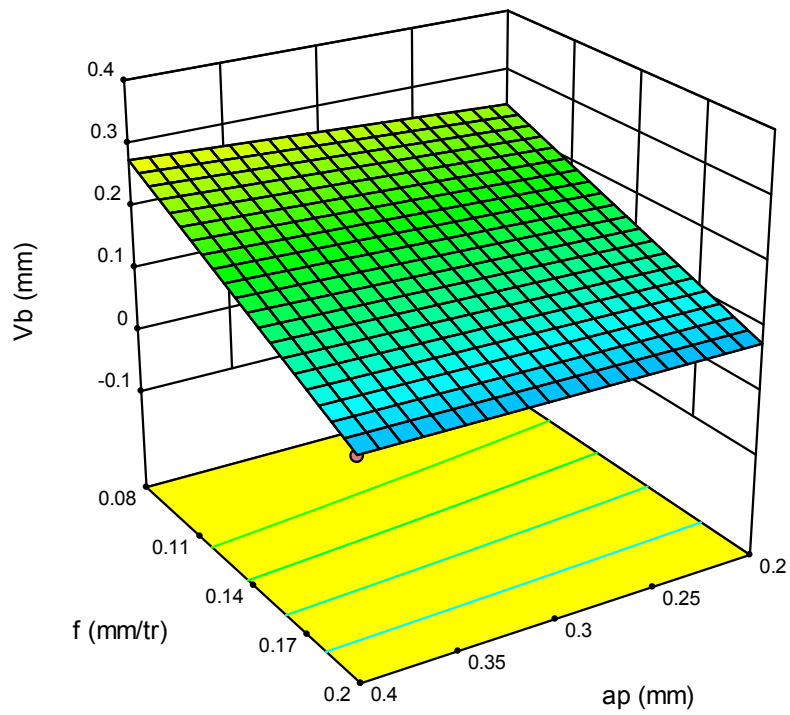


Figure (9.b)

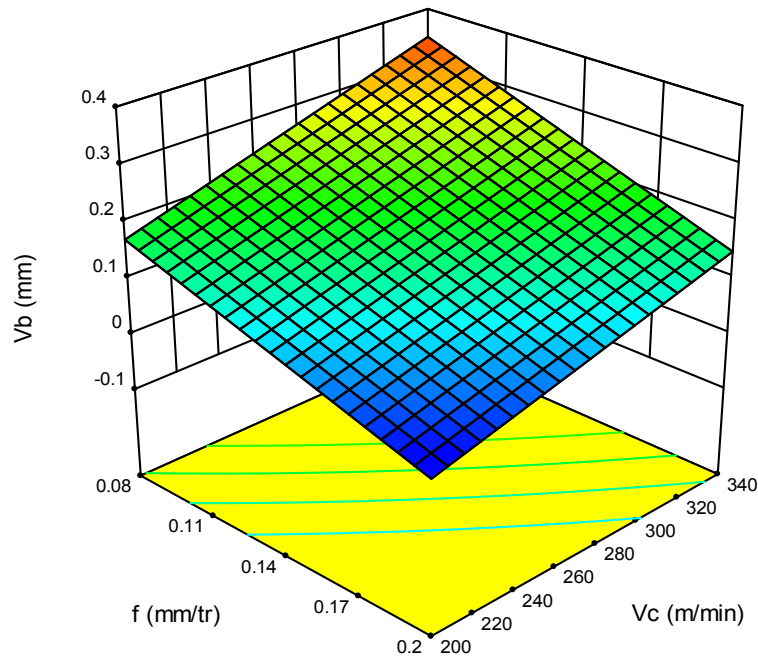


Figure (9.c)

Figure III.9 Surface de réponse 3D de l'usure (V_b) en fonction de (V_c , f , a_p) pour l'outil en Cermet.

***Cas 03. PVD**

La **Figure III.10** présente 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, on remarque de la figure (10.a) que l'augmentation de la vitesse de coupe V_c et la profondeur de passe a_p provoque une très faible augmentation de l'usure V_b , Par contre la figure (10.b) et (10.c) montre que l'augmentation de l'avance f conduit à la diminution de l'usure V_b .

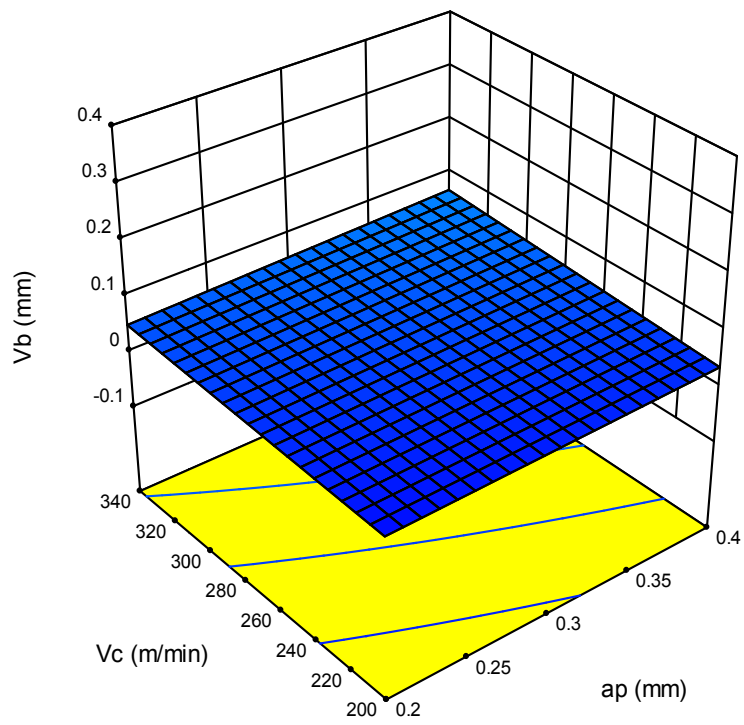


Figure (10.a)

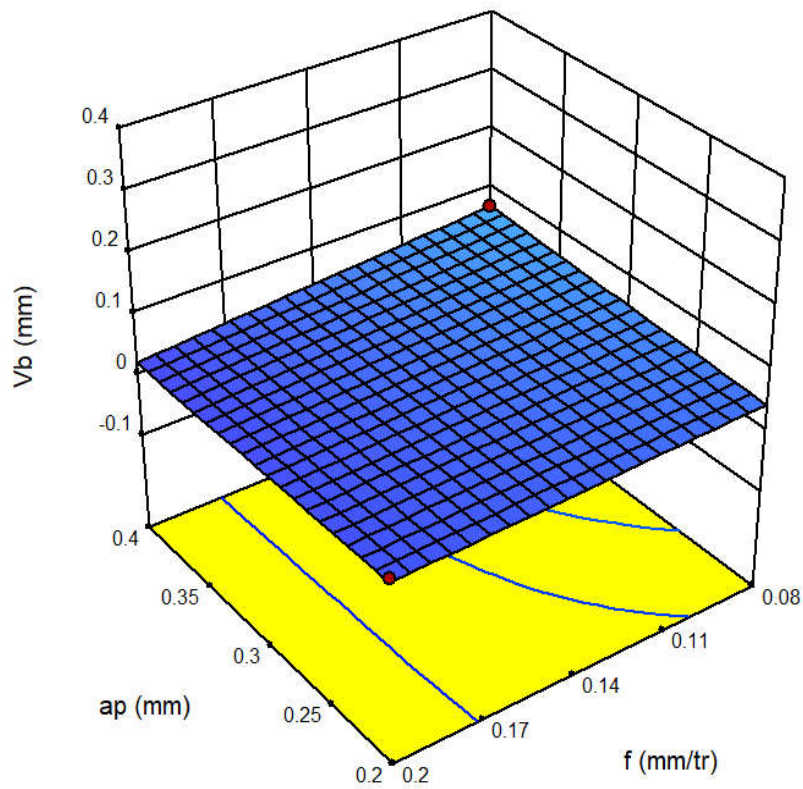


Figure (10.b)

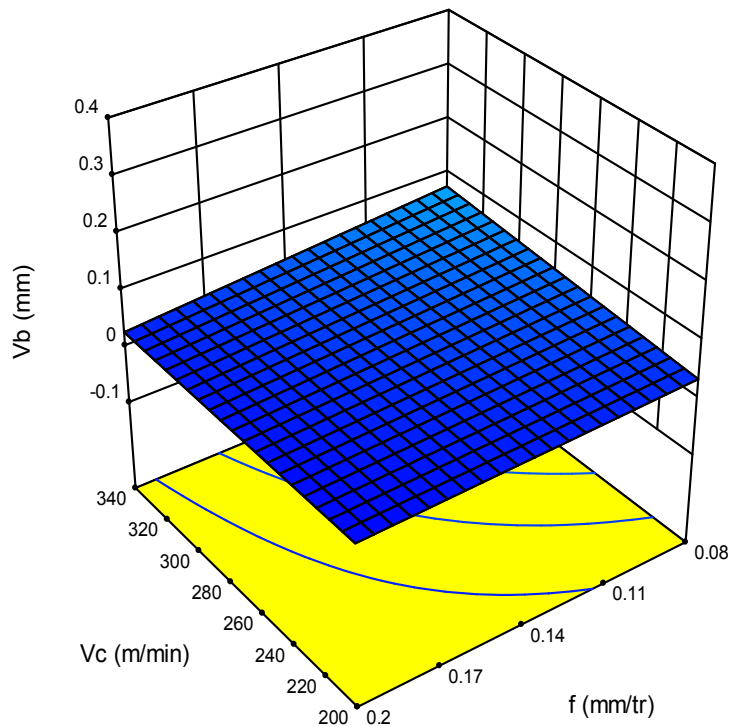


Figure (10.c)

Figure III.10 Surface de réponse 3D de l'usure (V_b) en fonction de (V_c, f, a_p) pour l'outil à 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 (**carbure à revêtement CVD, Cermet et carbure à revêtement PVD**) et cela dans un environnement de lubrification **MQL** a permis de faire l'analyse de la variance pour les paramètres technologiques de sortie 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** et l'usure **Vb** dans un environnement **MQL** en fonction des paramètres de coupe.



Chapitre IV
**Optimisation des conditions de coupe (Taguchi,
GRA et DF)**



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[17]. 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.
- Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode GRA.

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 **Ra** et l'usure en dépouille **Vb** 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 **Vc**, 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 **Ra** et l'usure en dépouille **Vb** minimale sont recherchées.

La caractéristique (**S/B**) la plus petite est la meilleur (smaller-the-better) a été utilisé pour (**Ra** et **Vb**).

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**).

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

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 et Vb.

N	ap (mm)	Vc (m/min)	M	f (mm/tr)	S/B (Vb)	S/B Ra
1	0.2	200	CVD	0.08	24.1522	0.919
2	0.2	200	Cermet	0.14	20.7242	1.954
3	0.2	200	PVD	0.2	33.5556	2.264
4	0.2	270	CVD	0.08	22.8534	1.453
5	0.2	270	Cermet	0.14	16.5948	2.452
6	0.2	270	PVD	0.2	29.1186	2.164
7	0.2	340	CVD	0.14	22.9748	1.553
8	0.2	340	Cermet	0.2	16.4782	3.233
9	0.2	340	PVD	0.08	23.8764	2.165
10	0.4	200	CVD	0.2	20.2646	2.176
11	0.4	200	Cermet	0.08	14.6566	1.514
12	0.4	200	PVD	0.14	28.8739	2.541
13	0.4	270	CVD	0.14	22.4988	0.832
14	0.4	270	Cermet	0.2	22.2702	2.467
15	0.4	270	PVD	0.08	23.0980	2.199
16	0.4	340	CVD	0.2	23.3498	1.641
17	0.4	340	Cermet	0.08	8.6360	2.532
18	0.4	340	PVD	0.14	24.8825	2.043

IV.3 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 (Vc , 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.3.1 Analyse des effets principaux sur l'usure V_b

Du **tableau IV.2** et de la **figure IV.1**, on remarque que les paramètres d'usinage (V_c , f , a_p et M) présentent des effets différents sur l'usure V_b . La plus importante influence correspond au matériau M avec un effet de **10,67** suivie par l'avance f avec un effet de **4,63** et puis la vitesse de coupe V_c avec **3,67** et en dernier lieu vient la profondeur de passe a_p avec **2,42** d'effet.

Tableau IV.2 signal sur bruit (S/B) de l'usure (V_b) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	a_p	V_c	M	f
1	23.37	23.70	16.56	19.55
2	20.95	22.74	22.68	22.76
3		20.03	27.23	24.17
Delta	2.42	3.67	10.67	4.63
Rang	4	3	1	2

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse V_b correspond aux niveaux V_{c1} , f_3 , a_{p1} et M_3 . Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de l'usure V_b sont donc la vitesse de coupe $V_c = 200$ m/min, la grande avance $f = 0,2$ mm et la grande profondeur de passe $a_p = 0,2$ mm et le matériau carbure métallique à revêtement PVD (Figure IV.1).

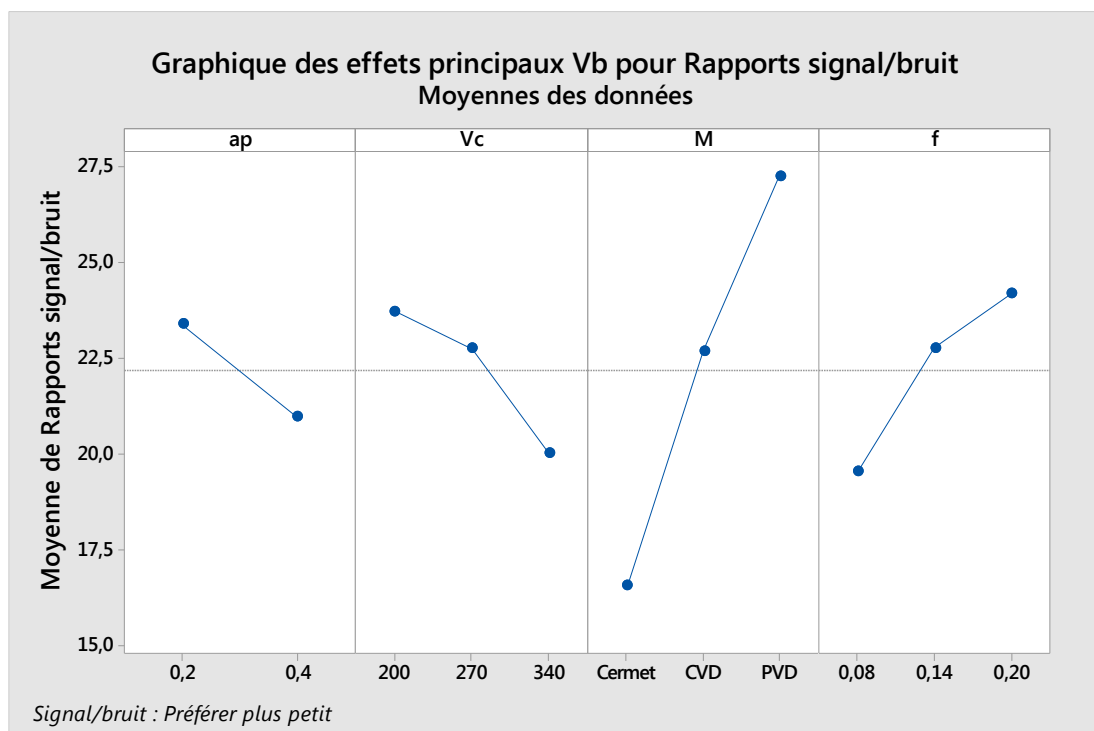


Figure IV.1 Graphique des effets principaux de (Vc, f, ap et M) sur Vb.

IV. 3.2 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface Ra

Du [tableau IV.2](#) et de la [figure IV.2](#), on remarque que les paramètres d'usinage (Vc, f, ap et M) présentent des effets différents sur la rugosité de surface Ra. La plus importante influence correspond au matériau M avec 4,587 d'effet suivie par l'avance f avec un effet de 2,526 et puis la vitesse de coupe Vc avec un effet de 1,444 et en dernier lieu vient la profondeur de passe ap avec 0,058.

Tableau IV.3 les rapports signal/bruit Ra pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	ap	Vc	M	f
1	-5.628	-5.106	-7.219	-4.623
2	-5.569	-5.139	-2.632	-5.023
3		-6.550	-6.944	-7.149
Delta	0.058	1.444	4.587	2.526
Rang	4	3	1	2

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse Ra correspond aux niveaux **Vc1**, **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 **Vc = 200 m/min**, la plus petite avance **f = 0,08 mm** et la grande profondeur de passe **ap = 0,4 mm** et le matériau carbure métallique à revêtement **CVD** ([figure IV.2](#)).

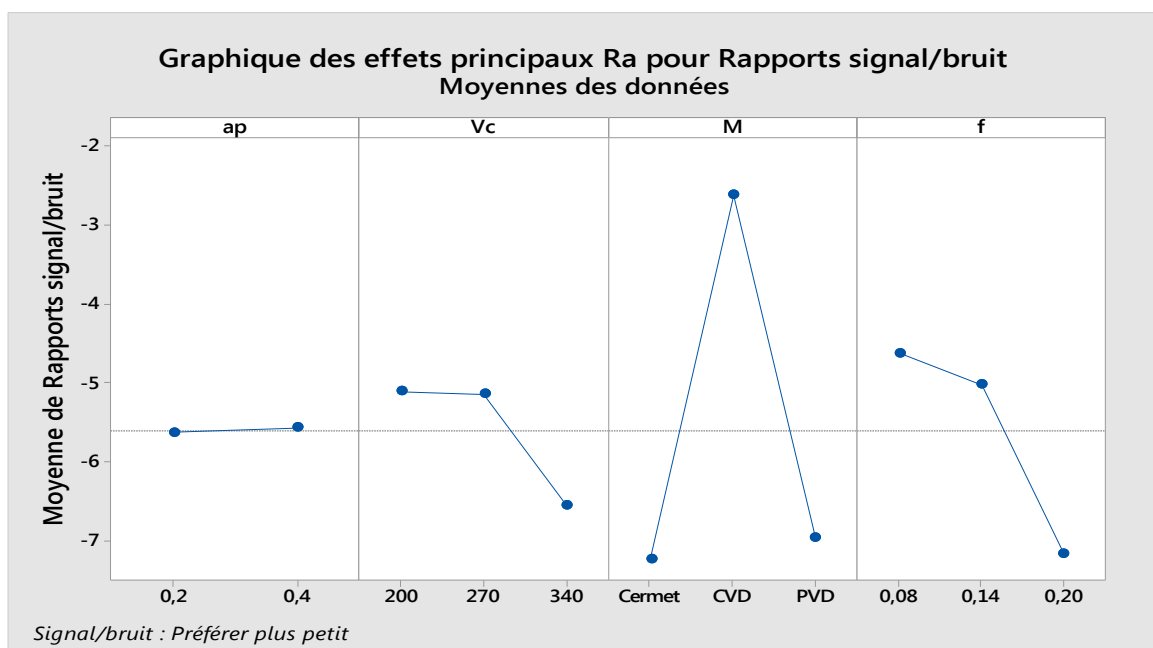


Figure IV.2 Graphique des effets principaux de Vc, f, ap et M sur Ra.

IV.4 Description de l'analyse relationnelle grise (GRA)

L'analyse relationnelle grise est une technique proposée pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant le multi-objectif en un objectif unique dans le but d'atteindre une combinaison optimale de niveaux de paramètres pour l'amélioration simultanée de multiples caractéristiques d'usinage [25]. L'utilisation de cette méthode contient les étapes suivantes :

- **Étape 1 : Génération relationnelle grise**

Selon l'objectif de l'optimisation prévue pour minimiser ou maximiser les résultats expérimentaux, la normalisation du rapport S/N pour les résultats expérimentaux dans la gamme entre zéro et un est nécessaire pour la génération relationnelle grise. En fonction de la fonction objective de l'optimisation, la normalisation peut être effectuée pour deux cas. Si la plus petite-la-meilleure est la caractéristique sélectionnée dans la séquence d'origine pour la minimisation, elle devrait être normalisée par l'équation (IV.2).

$$x_i^*(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{IV.2})$$

Si le plus grand-le-meilleur est la caractéristique sélectionnée dans la séquence d'origine pour la maximisation, elle devrait être normalisée par l'équation (IV.3).

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{IV.3})$$

Ou $x_i^*(k)$ est la valeur après la génération relationnelle grise (valeur normalisée), et $\max(x_i^*(k))$ et $\min(x_i^*(k))$ sont les valeurs les plus grandes et les plus petites de $(x_i^*(k))$ pour la réponse k^{th} . La plus grande valeur des résultats normalisés indique la meilleure caractéristique de performance et les meilleurs résultats normalisés seront égaux à un.

- **Étape 2 : Coefficient Relationnel Gris (GRC)**

Le coefficient relationnel gris décrit la corrélation entre les résultats expérimentaux idéaux et obtenus. La formule mathématique du coefficient relationnel gris ($\xi_i(k)$) est donnée comme suit:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi \Delta_{\max}} \quad (\text{IV.3})$$

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

$\Delta_{0i}(k)$ Est la différence absolue entre la séquence de référence x_{0k} (k) et le rapport S/N de la séquence mesurée x_{ik} (k).

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

(IV.4)

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

(IV.5)

$$\Delta_{max} = \max_{j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \text{ (IV.6)}$$

Ψ est le coefficient de distinction ($\Psi \in [0, 1]$). Dans notre cas la valeur de Ψ est 0.5.

- **Étape 3 : Grey Relational Grade (GRG)**

GRG représente la corrélation entre les séries, elle est donnée par la formule suivante :

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \text{ (IV.7)}$$

Ou n est le nombre des réponses.

- **Étape 4 : Détermination des paramètres d'usinage optimum**

Une fois que GRG est calculée, la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est faite en fonction du diagramme d'effets principaux pour (GRG). La plus grande valeur de GRG qui se trouve à proximité de la valeur normalisée idéale correspond à la combinaison optimale. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres du processus est le niveau avec la plus grande valeur GRG.

Tableau IV.4 Résultats de la génération relationnelle grise, calcul de $\Delta_{0i}(k)$, (GRC) et (GRG).

N	normalisation		déviation		GRC		GRG	Rang
	Vb	Ra	Vb	Ra	Vb	Ra		
1	0.623	0.036	0.377	0.964	0.570	0.342	0.456	16
2	0.485	0.467	0.515	0.533	0.493	0.484	0.488	12
3	1.000	0.596	0.000	0.404	1.000	0.553	0.777	1
4	0.571	0.259	0.429	0.741	0.538	0.403	0.470	15
5	0.319	0.675	0.681	0.325	0.424	0.606	0.515	9
6	0.822	0.555	0.178	0.445	0.737	0.529	0.633	4
7	0.575	0.300	0.425	0.700	0.541	0.417	0.479	14
8	0.315	1.000	0.685	0.000	0.422	1.000	0.711	2
9	0.612	0.555	0.388	0.445	0.563	0.529	0.546	6
10	0.467	0.560	0.533	0.440	0.484	0.532	0.508	10

11	0.242	0.284	0.758	0.716	0.397	0.411	0.404	18
12	0.812	0.712	0.188	0.288	0.727	0.634	0.681	3
13	0.556	0.000	0.444	1.000	0.530	0.333	0.432	17
14	0.547	0.681	0.453	0.319	0.525	0.610	0.568	5
15	0.580	0.569	0.420	0.431	0.544	0.537	0.540	8
16	0.590	0.337	0.410	0.663	0.550	0.430	0.490	11
17	0.000	0.708	1.000	0.292	0.333	0.631	0.482	13
18	0.652	0.504	0.348	0.496	0.590	0.502	0.546	7

Le régime optimal obtenu par la méthode GRA pour la minimisation de Ra et Vb correspondant à l'essai N°3 pour Vc=200m/min, f=0.2 mm/tr, ap=0.2mm avec le matériau à revêtement PVD.

IV. 5 Optimisation par la fonction désirabilité

IV.5.1 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 [26]. En recherchant un minimum, les désirabilités peuvent être calculées par les équations suivantes respectivement (IV.8, IV.9, IV.10).

$$Des(y) = \begin{cases} 0, & y < Low \\ \left(\frac{y-Low}{Tar-Low}\right)^w, & Low \leq y \leq Tar \text{ (IV.8)} \\ 1, & y > Tar \end{cases}$$

$$Des(y) = \begin{cases} 1, & y < Tar \\ \left(\frac{Up-y}{Up-Tar}\right)^w, & Tar \leq y \leq Up \text{ (IV.9)} \\ 0, & y > Up \end{cases}$$

$$Des_{comb} = (Des_1 \times Des_1 \times \dots \times Des_1 \times \dots \times Des_1)^{\frac{1}{n}} = (\prod_{i=1}^n Des_i)^{\frac{1}{n}} \text{ (IV.10)}$$

IV.5.2 Cas d'optimisation étudié

Dans notre étude, on s'est intéressé à un cas d'optimisation qui minimise l'usure et la rugosité de surface. Le **tableau IV.5** illustre la solution correspondant le cas cité. 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. Le régime optimal trouvé est de **Vc=200m/min**,

$f=0.08\text{mm/tr}$, $ap=0.4\text{mm}$ et le matériau d'outil de coupe en carbure métallique à revêtement CVD. La rugosité Ra et l'usure Vb prennent successivement les valeurs (0,832 μm et 0,068mm) et la désirabilité des = 0,930.

Tableau IV.5 But et gamme de paramètre pour le cas d'optimisation.

		Inferieur	Supérieure	Inferieur	Supérieure	
	Objectif	Limite	limite	Pois	Pois	Importance
Name	Dans l'intervalle	0.2	0.4	1	1	3
ap	Dans l'intervalle	200	340	1	1	3
Vc	Dans l'intervalle	0.08	0.2	1	1	3
f	Dans l'intervalle	CVD	PVD	1	1	3
D	Minimisation	0.021	0.37	1	1	5
Vb	Minimisation	0.832	3.233	1	1	5

Tableau IV.6 Réponses de la rugosité de surface et l'usure pour le cas d'optimisation.

Numéro	ap	Vc	f	D	Vb	Ra	Désirabilité	
1	0.262	200.002	0.080	CVD	0.068	0.832	0.930	Sélectionné

✓ **Le cas**

La (figure IV.3) 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.3) 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 la désirabilité pour le dernier cas étudié.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Desirability
 ● Design points above predicted value
 1.000
 0.000
 X1 = A: ap
 X2 = B: Vc
 Actual Factors
 C: f = 0.0800026
 D: D = CVD

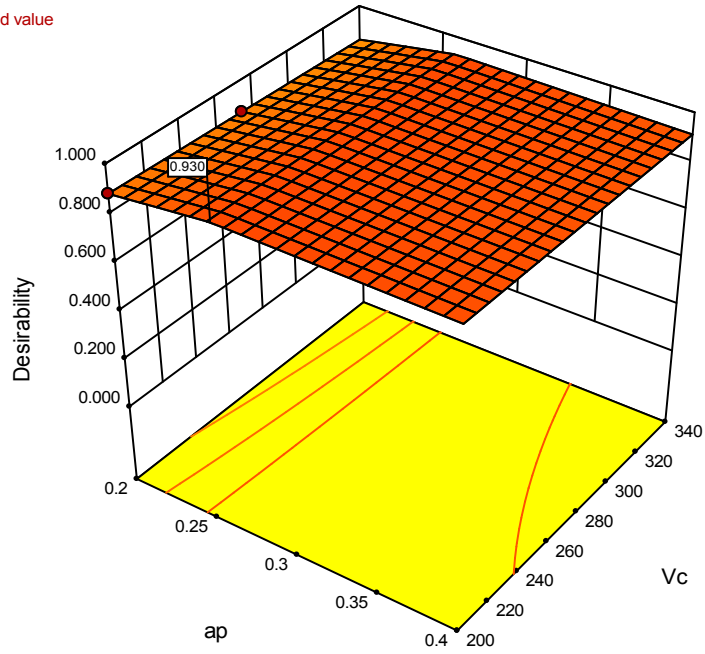


Figure 3.a

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Desirability
 1.000
 0.000
 X1 = A: ap
 X2 = C: f
 Actual Factors
 B: Vc = 200.009
 D: D = CVD

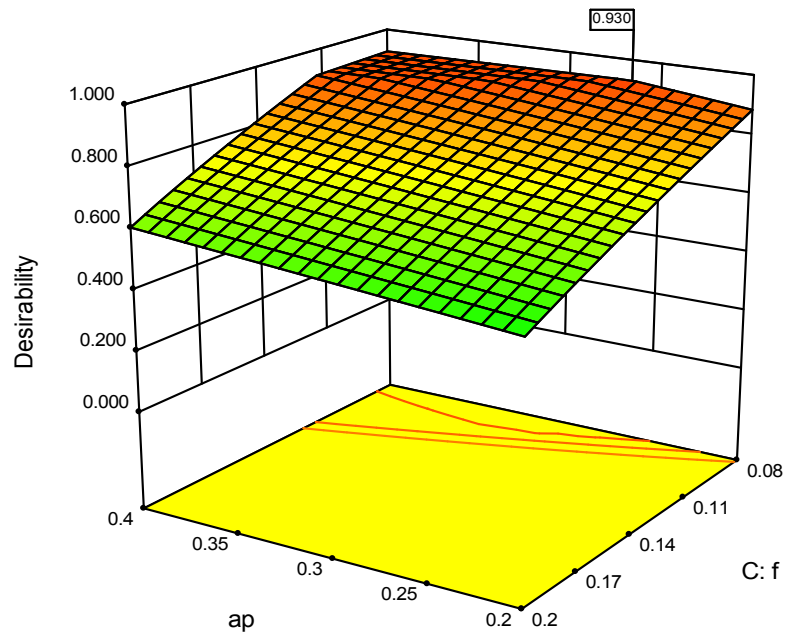


Figure 3.b

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Desirability



X1 = B: Vc
X2 = C: f

Actual Factors
A: ap = 0.262014
D: D = CVD

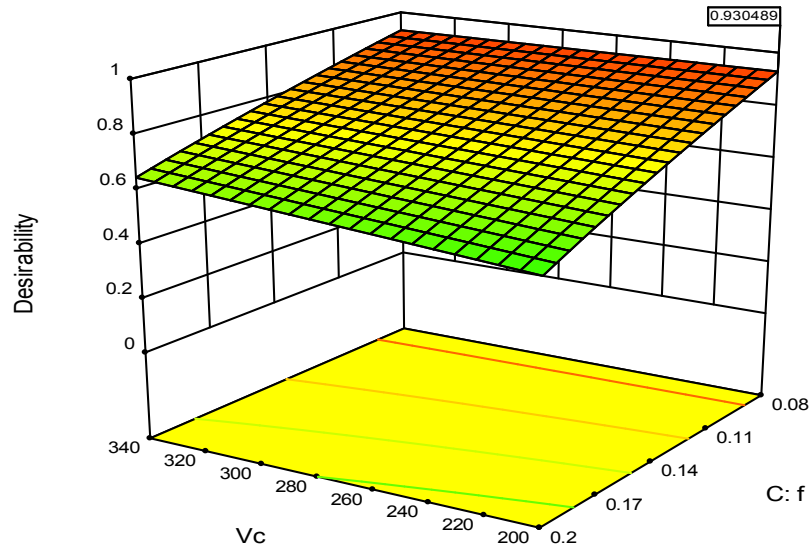


Figure 3.c

Figure IV.3 Graph de désirabilité de Ra et Vb (diagramme de surface 3D).

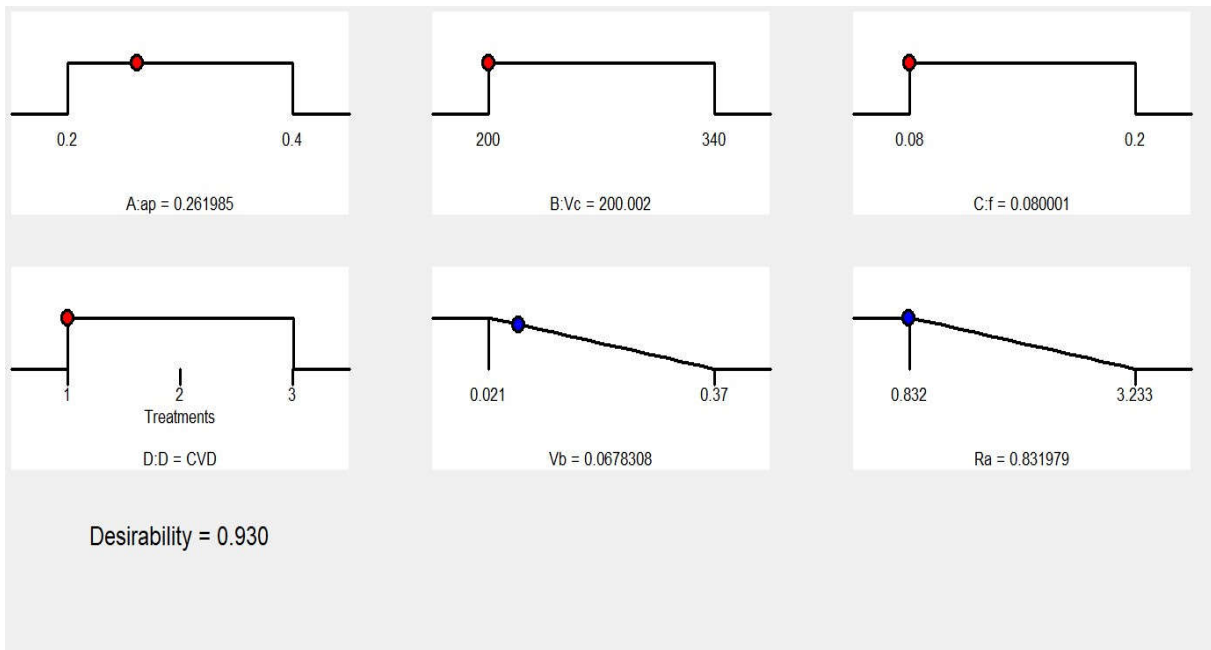


Figure IV.4 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (Ra) et (Vb).

IV.6 Comparaison entre la méthode GRA et DF

Tableau IV.7 comparaison entre les deux méthodes GRA et DF.

	M	Vc	f	ap	Ra	Vb
GRA	PVD	200	0.2	0.2	2.264	0.021

DF	CVD	200	0.08	0.2	0.832	0.068
-----------	-----	-----	------	-----	-------	-------

Le **tableau IV.7** présente le régime optimal obtenu par les deux méthodes, on remarque que la méthode **GRA** favorise la minimisation de l'usure **Vb** avec le matériau en carbure métallique **PVD** par contre, la fonction désirabilité favorise la minimisation de la rugosité **Ra** en appliquant le carbure à revêtement **CVD**.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté l'application de deux méthodes d'optimisation mono et multi-objective. La première optimisation nous avons utilisé la méthode de Taguchi basée sur le rapport signal/bruit. Concernant l'optimisation multi objective, la méthode de l'analyse relationnelle grise **GRA** et l'approche de la fonction de désirabilité **DF** pour optimiser la rugosité de surface **Ra** et l'usure **Vb** simultanément. Les régimes optimaux ont été déterminés pour les différentes méthodes d'optimisations utilisées.



Conclusion Générale



L'étude réalisée dans ce mémoire de fin d'étude porte sur l'usinage de l'acier fortement allié (acier AISI D3) avec trois matériaux de coupe (carbure à revêtement **CVD**, **cermet** et carbure à revêtement **PVD**) et cela dans un environnement de lubrification **MQL**. Le but est d'aboutir à une modélisation de la rugosité de surface usinée **Ra** et l'usure en dépouille **Vb** de l'outil de coupe et aussi à une optimisation mono et multi objective des conditions de coupe. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

✓ L'analyse ANOVA de la rugosité de surface **Ra** montre que le matériau de l'outil de coupe **M** est le facteur le plus important affectant la rugosité **Ra** avec une contribution de **49,78%**. Le deuxième facteur important affectant la rugosité de surface est l'avance **f** avec une contribution de **13,64%**, puis la vitesse de coupe **Vc** avec **4,41%** de contribution et en dernier lieu, la profondeur de passe **ap** avec **0,04%** de contribution. Pour l'interaction **Vc*M**, sa contribution est respectable, elle est de **9,88%**.

✓ L'analyse ANOVA de l'usure **Vb** montre que le matériau de l'outil de coupe **M** est le premier facteur qui affecte l'usure **Vb**, avec une contribution de **46,26%**. On peut constater aussi que **f** a un effet significatif sur **Vb** avec une contribution de **10,78%**. Le facteur suivant influençant **Vb** est la vitesse de coupe **Vc** suivie par **ap**, leurs contributions sont de **6,31%** et **5,23%** respectivement. Aussi, les interactions (**Vc*M** et **f*M**) ont un effet significatif sur l'usure **Vb** avec des contributions de **5,30%** et **7,66%** respectivement.

✓ Les modèles mathématiques basés sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour la rugosité de surface **Ra** et l'usure **Vb**, ayant un **R²** de **96,30%** et **99,58%** respectivement, présentent une 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.

✓ L'**optimisation mono-objective** réalisée dans ce travail est basée sur l'analyse de Taguchi basée sur le rapport du signal/bruit. Selon cette approche : L'optimum de la réponse **Ra** est obtenu aux paramètres d'usinage (**Vc**= 270m/min, **f**=0.08, **ap**=0.4 et le matériau de l'outil de coupe en carbure métallique à revêtement **CVD**). Cet optimum est la valeur la plus élevée du Signal/Bruit (**S/B**) **Ra**. L'optimum des réponses de **Vb** correspond aux paramètres d'usinage (**Vc**=200m/min, **f**=0.2 et **ap**=0.2 et le matériau de l'outil de coupe en carbure métallique à revêtement **PVD**). Cet optimum est la valeur la plus élevée du Signal/ Bruit (**S/N**) **Vb**. L'analyse résultats obtenus par méthode de Taguchi montre que cette approche peut être très efficace dans le cas d'une seule réponse, car elle est simple et rapide.

✓ **L'optimisation multi-objective** réalisée dans ce travail est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité **DF** et la méthode **GRA**. Les régimes optimaux obtenus par les deux approches sont comme suit :

GRA

• (Minimisation de Ra et VB) : $V_c = 200$ m/min, $f = 0,2$ mm/tr et $a_p = 0,2$ mm et M : carbure à revêtement **PVD**.

DF

• (Minimisation de Ra et VB) : $V_c = 200$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr et $a_p = 0,2$ mm et M : carbure à revêtement **CVD**.

✓ La comparaison entre les deux méthodes d'optimisation montre que la méthode **GRA** favorise la minimisation de l'usure **Vb** en utilisant le matériau en carbure métallique **PVD** par contre, la fonction désirabilité **DF** favorise la minimisation de la rugosité **Ra** en appliquant le carbure à revêtement **CVD**.

***Perspectives**

-Etude de la température de coupe générée lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D3 avec différents matériaux.

-Faire une investigation sur les effets de différent environnement de lubrification sur les paramètres technologiques de sortie.

-Evaluations des vibrations de l'outil et de la pièce lors de l'usinage de l'acier AISI D3.

1. BELHADI S, Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau, Thèse de doctorat de Productique, Université badji mokhtar-ANNABA, 2009.
 2. BUTIN R & PINOT M, Fabrications mécaniques technologie, tome III, Fouchier, juillet 1988.
 3. BAGUR F, Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 7080.
 4. Sandvik Coromant
http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H.P_DF
 5. CHANCEL P, les nouveaux outils coupants, CETIM information N° 147, Février, 1996.
 6. AOUCI H, Production Mécanique II, Ecole nationale supérieure de technologie, 2013.
 7. Innommé. Cours de TECHNOLOGIE DES FABRICATIONS MÉCANIQUES. Université Hassan II Ain-chock.
 8. NOUIOUA M. 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) Université du 8 Mai 45 Guelma
 9. BOUZID, L. 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).
 10. Vasques, B. (2008). *Étude du comportement du rayon d'arête et de son influence sur l'intégrité de surface en tournage à sec* (Doctoral dissertation, Tours).
 11. Altan, T., Fallböhrer, P., Rodriguez, C., & Özel, T. (1998). High speed cutting of cast iron and alloy steels-state of research. *VDI Berichte*, (1399), 309-332.
 12. Catalogue de tournage, 2007 – Documentation Valenite Safety.
 13. ELBAH, M. (2015). *INVESTIGATION EXPERIMENTALE SUR L'EFFET DE LA GEOMETRIE DE L'OUTIL ET DES CONDITIONS DE COUPE EN TOURNAGE EN UTILISANT LES TECHNIQUES STATISTIQUES* (Doctoral dissertation).
 14. BOUCHELAGHEM, H. (2011). *ETUDE DU COMPORTEMENT DES OUTILS CBN LORS DE L'USINAGE DE L'ACIER FORTEMENT ALLIE AISI D 3* (Doctoral dissertation).
-

15. ZERTI, O. (2018). *Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA* (Doctoral dissertation).
 16. Sana WERDA BEN SLIMA (2016). Influence de la conception d'un outil de fraisage dédié à la microlubrification (MQL) sur l'interaction outil-matière-lubrifiant : études expérimentales et numériques, université français (doctoral).
 17. LABDAZI, M. E. A. (2020). Modélisation et optimisation des conditions de coupe lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, taguchi et la fonction désirabilité. Mémoire de Master, université 8 Mai 1945 Guelma.
 18. Maitrise du risque chimique et innovations techniques. Innovations en usinage Blois, le 29 juin 2017. Hervé Lardilleux.
 19. Zaman, P. B., Sultana, N., & Dhar, N. R. (2020). Quantifying the effects of cooling condition, tool type and cutting parameters on machinability of turning AISI 4140 steel using full factorial DOE. *Journal of Production Systems and Manufacturing Science*, 1(2), 9-9.
 20. Dhar, N. R., Kamruzzaman, M., & Ahmed, M. (2006). Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of materials processing technology*, 172(2), 299-304.
 21. 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.
 22. Sarıkaya, M., & Güllü, A. (2014). Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. *Journal of Cleaner Production*, 65, 604-616.
 23. Shojaei, E. A., Farajov, A., & Jafari, A. (2011). Effect of moderate aerobic cycling on some systemic inflammatory markers in healthy active collegiate men. *International journal of general medicine*, 4, 79.
 24. 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.
-

25. Dabade, U. A. (2013). Multi-objective process optimization to improve surface integrity on turned surface of Al/SiCp metal matrix composites using grey relational analysis. *Procedia CIRP*, 7, 299-304.
26. 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 MécaniqueOption : Productique 2017.