

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté de science et technologie
Département de génie mécanique
Laboratoire de mécanique et structures (LMS)

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN 3^{ème} CYCLE

Domaine : Science et Technologie **Filière :** Génie mécanique
Spécialité : Génie des matériaux

Présentée par

SAFI Khaoula

Intitulée

**Etude statistique des performances des matériaux de coupe avec
différents revêtements lors du tournage dans un environnement à sec et
lubrifié**

Soutenue le : 10/01/2024 Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
DJEBALA Abderrezek	Pr	Université 8 Mai 1945 Guelma	Président
YALLESE Med Athmane	Pr	Université 8 Mai 1945 Guelma	Rapporteur
MABROUKI Tarek	Pr	Université de Tunis El Manar	Co-Rapporteur
LAOUAR lakhdar	Pr	Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur
BELBAH Ahmed	MCA	Université 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
BELHADI Salim	MCA	Université 8 Mai 1945 Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

Je tiens à dédier cette thèse :

À ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but.

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

Ma très chère sœur Ikram et mes frères Houcem et Annoir.

À toute ma famille.

À tous mes collègues et amis.

Remerciement

En premier lieu, nous exprimons notre gratitude envers Dieu, notre Créateur, pour nous avoir accordé la force nécessaire pour mener à bien ce travail.

Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur Yaltese Mohamed Athmane Professeur au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 de Guelma, à qui je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour la confiance qu'il m'a témoigné, pour son encouragement, conseils et son aide qu'il n'a pas cessé de me prodiguer tout au long de cette période.

Je remercie vivement mon co-directeur de thèse Monsieur le Professeur Mabrouki Tarek de l'Université de Tunis El Manar pour son aide et ses conseils.

Je tiens à remercier Mr. DJEBALA Abdelrezek, Professeur au département de Génie Mécanique, Université de Guelma, de l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury de thèse.

Je remercie vivement Messieurs : LAOUAR Lakhdar Pr à l'Université Badji Mokhtar Annaba, BELBAH Ahmed Dr à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, BELHADI Salim Dr à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma pour avoir accepté la tâche d'examineurs, et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux de thèse.

*Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers **BELHADI Salim**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, pour son précieux soutien et ses conseils tout au long de la réalisation de ma thèse de doctorat.*

*J'adresse mes remerciements également à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé à différents stades de ce travail, en particulier Mr **Chihaoui Salim**, **Laouissi Aissa**, **Benmedakhene Toufik** et à tous les membres, les thésards et les techniciens du Laboratoire de Mécanique et Structure (**LMS**).*

Résumé

Les matériaux à outils jouent un rôle important en usinage. Ils ont impact significatif sur la qualité de surface, la tenue de l'outil, la productivité et la consommation d'énergie. De-là, il est intéressant de chercher des outils qui ont des meilleures performances et de sélectionner les meilleurs. D'autres parts, l'usinage MQL gagne du terrain dans le monde industriel à cause de son respect de l'environnement. La technique MQL est en cours développement et nécessite plus de maîtrise. A cet effet, la modélisation des paramètres de performance ainsi et l'optimisation des conditions de coupe en usinage deviennent des étapes essentielles pour garantir la qualité du produit et pour que les opérations d'usinage seront réalisées à moindre coût et la fabrication des pièces mécaniques soit compétitive. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de recherche. Le travail proposé est divisé en trois grandes parties.

La première partie s'intéresse aux essais paramétriques qui concernent l'étude de l'influence des facteurs (V_c , f , a_p , r et le temps d'usinage) sur l'effort de coupe principale, la rugosité de surface, l'usure de l'outil et la température de coupe. Les essais de tournage sont réalisés sur l'acier X210Cr12 en utilisant un carbure CVD, carbure PVD et un cermet. Aussi, une investigation sur la topographie de surface 2D et 3D des surfaces usinées a été faite.

La deuxième partie est focalisée sur l'étude comparative des différents matériaux de coupe sous un environnement à sec et MQL. Le but est de proposer une modélisation afin de pouvoir faire la prédiction des paramètres technologiques de sortie pour les deux modes environnement. Pour cet objectif, la méthode de surface de réponse (RSM) et l'analyse de la variance ont été utilisées.

La dernière partie est réservée à une étude de modélisation et d'optimisation en se basant sur le plan d'expérience de Taguchi L_{16} , en utilisant le carbure revêtu en CVD (GC4215). Cinq méthodes d'optimisation multicritères (DF, GRA, MOORA, DEAR et WASPAS) ont été utilisées et comparées. Ce travail de recherche intéresse toutes les entreprises de fabrication mécaniques et les chercheurs travaillant dans le domaine de la modélisation et l'optimisation en usinage

Mots clés : Revêtement des outils ; Plan d'expérience ; Usure ; ANOVA ; Optimisation ; Taguchi ; RSM ;

Abstract

Materials for tools play a significant role in machining. They have a substantial impact on surface quality, tool life, productivity, and energy consumption. Therefore, it is interesting to search for tools with better performance and to select the best ones. On the other hand, Minimum Quantity Lubrication (MQL) machining is gaining ground in the industrial world due to its respect for the environment. The MQL technique is still emerging and requires more mastery. To this end, modelling performance parameters and optimizing machining conditions become essential steps to ensure product quality and cost-effective machining operations, making mechanical part manufacturing competitive. This research work falls within this context.

The proposed research is divided into three main parts. The first part focuses on parametric tests that involve studying the influence of factors such as (V_c , f , ap , r , and machining time) on main cutting force, surface roughness, tool wear, and cutting temperature. Turning trials are conducted on X210Cr12 steel using CVD carbide, PVD carbide, and cermet tools. Additionally, an investigation of the 2D and 3D surface topography of machined surfaces is carried out.

The second part of the study is focalized on a comparative analysis of different cutting materials in both dry and MQL environments. The goal is to propose a modelling approach to predict output technological parameters for both environmental modes. For this purpose, Response Surface Methodology (RSM) and Analysis of Variance (ANOVA) are employed.

Finally, the third part is reserved for modelling and optimization based on the Taguchi L_{16} experimental design, using CVD-coated carbide (GC4215). Five multicriteria optimization methods (DF, GRA, MOORA, DEAR, and WASPAS) are used and compared. This research work is of interest to all mechanical manufacturing companies and researchers working in the field of machining modelling and optimization.

Keywords: Tools Coating; Experimental design; Wear; ANOVA; Optimization; Taguchi; RSM;

الملخص

المواد المستخدمة في أدوات القطع تلعب دورًا كبيرًا في عمليات التصنيع. إذ لها تأثير كبير على جودة السطح، وعمر الأداة، والإنتاجية، واستهلاك الطاقة. لذا، من المثير للاهتمام أن نبحث عن أدوات ذات أداء أفضل ونختار الناجعة من بينها. من ناحية أخرى، تحظى تقنية التبريد بأدنى كمية (MQL) رواجًا كبيرًا في العالم الصناعي لأنها صديقة للبيئة. ومع ذلك، هذه التقنية لا تزال في مرحلة النمو وتتطلب مزيدًا من الإلتقان. لهذا الغرض، يصبح تمثيل معاملات الأداء وتحسين ظروف القطع جزءًا أساسيًا لضمان جودة المنتج وتحقيق الكفاءة من حيث التكلفة في عمليات التصنيع، مما يجعل صناعة القطع الميكانيكية تظل تنافسية. لذا يندرج هذا البحث في هذا السياق.

البحث المقترح مقسم إلى ثلاثة أجزاء رئيسية. الجزء الأول يركز على الاختبارات البارامترية، تتضمن دراسة تأثير العوامل مثل (r ، ap ، f ، Vc) وزمن القطع) على القوى الرئيسية للقطع، وخشونة السطح، وتآكل الأداة، وحرارة القطع. تُجرى هذه التجارب خلال الخراطة على فولاذ X210Cr12 باستخدام أدوات من الكربيد CVD والكربيد PVD والسيرميت. بالإضافة إلى ذلك، يُجرى تحقيق في توبوغرافيا السطح بأبعاد 2D و3D للأسطح المُصنَّعة.

الجزء الثاني من الدراسة يركز على دراسة مقارنة بين مواد القطع المختلفة في بيئة جافة وتحت تقنية (MQL). الهدف هو اقتراح نموذج للتنبؤ بالمعلمات التكنولوجية الناتجة لكلا الوضعين البيئيين. لهذا الغرض، يُستخدم طريقة سطح الاستجابة (RSM) وتحليل التباين (ANOVA)

الجزء الأخير مخصص لدراسة التمثيل والتحسين باستخدام تصميم التجربة Taguchi L_{16} باستعمال الكربيد (GC4215) المغلف بطريقة الطلاء (CVD). يتم استخدام خمسة طرق للتحسين متعددة المعايير و هم (GRA ، DF) ، (DEAR ، MOORA ، WASPAS) ويتم مقارنتها ببعضها.

تُعتبر هذه الأبحاث ذات أهمية خاصة لجميع شركات التصنيع الميكانيكي والباحثين العاملين في مجال تمثيل وتحسين عمليات القطع.

كلمات مفتاحية: تغليف الأقلام؛ تصميم تجريبي؛ تآكل؛ تحليل التباين (ANOVA)؛ طرق التحسين؛ طريقة Taguchi؛ تقنية سطح الاستجابة (RSM)؛

Index des figures

Chapitre I

Étude bibliographique

Figure I.1	Classification des matériaux de coupe en fonction de la dureté et la ténacité	6
Figure I.2	Procédés de fabrication de CVD et PVD	11
Figure I.3	Paramètres d'état de surface	13
Figure I.4	Les critères de la rugosité	14
Figure I.5	Construction graphique des paramètres R_k	16
Figure I.6	les paramètres S_k , S_{pq} , S_{vq} , S_{mr1} et S_{mr2}	17
Figure I.7	S_{vk} est la moyenne arithmétique de la profondeur des vallées	17
Figure I.8	Paramètres fonctionnels de volume	18
Figure I.9	Composants des efforts de coupe pendant l'opération de chariotage	19
Figure I.10	Mécanisme d'usure en fonction de la température de coupe	20
Figure I.11	Mécanismes d'usure	21
Figure I.12	Forme d'usure des arêtes de coupe	22
Figure I.13	Paramètres qui influent sur la température de coupe en tournage	23
Figure I.14	Schéma des zones de dégagement de chaleur	24
Figure I.15	Diagramme fer-carbone	24
Figure I.16	Classification des aciers à outil	25
Figure I.17	Types de lubrifiants couramment utilisés en usinage	27
Figure I.18	Les principes de base de la MQL	29
Figure I.19	Système MQL mono canal	30
Figure I.20	Système MQL bi canal	30
Figure I.21	Comparaison des valeurs expérimentales et prédit de F_z et R_a pour les outils WC revêtu et non revêtu	31
Figure I.22	Performance des outils de coupe en termes (a) de rugosité de surface, (b) d'usure de l'outil, et (c) la température de coupe	32
Figure I.23	Influence des paramètres de coupe sur R_a pour Ni-Hard avec 50 et 62 HRC	33

Figure I.24	Rugosité de la surface avec des outils en céramique Al_2O_3 mixte TiCN et les outils CBN	34
Figure I.25	Usure (V_b) en fonction du volume de métal enlevé avec des outils en carbure et en cermet revêtus	34
Figure I.26	Temps d'usinage en fonction de V_b , T° et R_a	35
Figure I.27	Graphique de l'effet principal du rapport S/B pour le niveau de relation grise	36
Figure I.28	Effet des paramètres du processus sur la GRG	37
Figure I.29	Représentation graphique des résultats de l'ANOVA	38
Figure I.30	Grade relationnel gris lors des expériences respectives	39
Figure I.31	Dispositif expérimental WEDM	39
Figure I.32	Valeurs MRPI pour l'analyse DEAR	41
Figure I.33	Morphologie de la surface usinée pour : a) un faible débit d'abrasif et b) débit d'abrasif élevé	41
Figure I.34	Organigramme illustrant l'optimisation du processus de tournage	42
Figure I.35	Effets de l'environnement de coupe sur l'usure, la température et la consommation d'énergie.	43
Figure I.36	Topographie de surface 3D pour le tournage : (a) MQL, (b) humide et (c) à sec	44
Figure I.37	Durée de vie de la plaquette de coupe à sec, humide et MQL	45
Figure I.38	Effet des facteurs de coupe sur l'effort F_z : à sec, humide et MQL	46
Figure I.39	Effet des facteurs de coupe sur la rugosité R_a : à sec, humide et MQL	46

Chapitre II

Procédure expérimentale

Figure II.1	Tour à charioter et à fileter modèle SN40	50
Figure II.2	Variateur de vitesse de coupe	51
Figure II.3	Capteur de vitesse	51
Figure II.4	Géométrie de l'éprouvette en montage d'usinage pour les essais de courte durée	52
Figure II.5	Géométrie de l'éprouvette en montage d'usinage pour les essais d'usure.	52

Figure II.6	Plaquettes de coupe utilisées : (1) Carbure métallique (GC4215), (2) Carbure métallique (GC1125), (3) Cermet (GC1525)	53
Figure II.7	Porte-outil utilisé avec illustration de sa géométrie	54
Figure II.8	Chaîne de mesure des efforts de coupe	55
Figure II.9	Rugosimètre 2D (Surftest 201, Mitutoyo)	56
Figure II.10	Chaîne de mesure de la rugosité en 3D	57
Figure II.11	Microscope pour la mesure de l'usure	58
Figure II.12	Microscope Electronique à Balayage (MEB)	60
Figure II.13	La caméra thermographie infrarouge	60
Figure II.14	Montage de système MQL	61
Figure II.15	a) Réservoir d'huile et b) MQL contrôle	61

Chapitre III

Usinabilité de l'acier X210Cr12

Figure III.1	Evolution de de l'effort (F_z) en fonction de (f)	74
Figure III.2	Evolution de l'effort (F_z) en fonction de (a_p)	74
Figure III.3	Evolution de l'effort (F_z) en fonction de (V_c)	75
Figure III.4	Evolution de l'effort (F_z) en fonction du rayon (r)	76
Figure III.5	Evolution de la rugosité (R_a) en fonction de (f)	77
Figure III.6	Evolution de la rugosité (R_a) en fonction de (a_p)	77
Figure III.7	Evolution de la rugosité (R_a) en fonction de (V_c)	78
Figure III.8	Evolution de la rugosité (R_a) en fonction de (r)	79
Figure III.9	Évolution de (V_b) en fonction du temps d'usinage à trois vitesses de coupe	80
Figure III.10	Morphologie de l'usure (V_b) au début et à la fin de l'usinage pour trois (V_c)	81
Figure III.11	Tenues de la plaquette de coupe (GC4215) pour trois vitesses de coupe	81
Figure III.12	Évolution de (R_a) en fonction de l'usure (V_b)	82
Figure III.13	Evolution de l'effort (F_z) en fonction de l'usure (V_b)	82
Figure III.14	Topographie de surface 3D en fonction de l'avance (f)	84
Figure III.15	Paramètre fonctionnels 2D (R_k) en fonction de l'avance (f)	86
Figure III.16	Paramètres fonctionnels (S_k) en fonction de l'avance (f)	87
Figure III.17	Paramètres volumiques en fonction de l'avance (f)	88

Figure III.18	Topographie de surface 3D en fonction de rayon (r)	90
Figure III.19	Paramètre fonctionnels 2D (Rk) en fonction de rayon (r)	91
Figure III.20	Paramètres fonctionnels (Sk) en fonction de rayon (r)	93
Figure III.21	Paramètres volumiques en fonction de rayon (r)	94
Figure III.22	Température de coupe (T°) en fonction de la vitesse (Vc)	95
Figure III.23	Température de coupe (T°) en fonction de la profondeur (ap)	96
Figure III.24	Température de coupe (T°) en fonction de l'avance (f)	97

Chapitre IV

Étude de l'impact des différents matériaux de l'outils dans un environnement à sec et lubrifié (MQL)

Figure IV.1	Comparaison des résultats expérimentaux de Ra, Fz et Vb à sec et MQL	101
Figure IV.2	Graphique des effets principaux de (Ra)	106
Figure IV.3	Graphique des effets principaux de (Fz)	106
Figure IV.4	Graphique des effets principaux de (Vb)	107
Figure IV.5	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Ra, Fz, Vb)	110
Figure IV.6	Usure en dépouille (Vb) de plan de Taguchi L ₁₈ à sec	112
Figure IV.7	Usure en dépouille (Vb) de plan de Taguchi L ₁₈ à lubrification MQL	113
Figure IV.8	Images de MEB de la plaquette revêtue CVD	114
Figure IV.9	Images de MEB de la plaquette revêtue PVD	115
Figure IV.10	Images de MEB la plaquette de Cermet	115

Chapitre V

Modélisation (RSM) et optimisation par DF et les méthodes MCDM

Figure V.1	Graphique des effets principaux de (Ra, Fz et Pc)	121
Figure V.2	Diagrammes de probabilité normale de (Ra, Fz et Pc)	122
Figure V.3	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra, Fz et Pc)	123
Figure V.4	Surface de réponse 3D de Ra	124
Figure V.5	Surface de réponse 3D de Fz	125
Figure V.6	Surface de réponse 3D de Pc	125
Figure V.7	Étapes de la méthodologie d'optimisation proposée	126

Figure V.8	Graphique des effets principaux pour (S/B)	130
Figure V.9	Diagramme de rampe de désirabilité	133
Figure V.10	Contours des surfaces de la désirabilité	134
Figure V.11	Effets principaux de (S/B) pour la méthode (GRA, MOORA, DEAR and WASPAS)	144

Index des tableaux

Chapitre I

Étude bibliographique

Tableau I.1	Comparaison des revêtements obtenus par les méthodes PVD et CVD	12
--------------------	-----------------------------------------------------------------	-----------

Chapitre II

Procédure expérimentale

Tableau II.1	Composition chimique de l'acier X210Cr12	52
Tableau II.2	Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées	53
Tableau II.3	Caractéristiques géométriques du porte-outil	54
Tableau II.4	Dimensions du porte-outil utilisé	54
Tableau II.5	Réalisation d'essais d'après la méthode paramétrique (OFAT)	63
Tableau II.6	Conditions de coupe pour les essais paramétriques	66
Tableau II.7	Matrice de planification pour un plan de Taguchi $L_{16} (3^4 2^1)$	66
Tableau II.8	Niveaux des différents paramètres de coupe pour le plan de Taguchi L_{16} à sec	67
Tableau II.9	Matrice de planification pour un plan de Taguchi $L_{18} (3^3 2^1)$	67
Tableau II.10	Niveaux des différents facteurs pour le plan de Taguchi L_{18} à sec et lubrifier	68

Chapitre IV

Étude de l'impact des différents matériaux de l'outils dans un environnement à sec et lubrifié (MQL)

Tableau IV.1	Résultats des essais pour un plan de Taguchi L_{18} à sec et MQL	100
Tableau IV.2	ANOVA pour Ra (usinage à sec)	103
Tableau IV.3	ANOVA pour Ra (usinage à MQL)	103
Tableau IV.4	ANOVA pour Fz (usinage à sec)	104
Tableau IV.5	ANOVA pour Fz (usinage à MQL)	104
Tableau IV.6	ANOVA pour Vb (usinage à sec)	105
Tableau IV.7	ANOVA pour Vb (usinage MQL)	105

Chapitre V**Modélisation (RSM) et optimisation par DF et les méthodes MCDM**

Tableau V.1	Résultats expérimentaux suivant le plan de Taguchi L16 ($4^3 2^1$)	118
Tableau V.2	Analyse de la variance de Ra	119
Tableau V.3	Analyse de la variance de Fz	119
Tableau V.4	Analyse de la variance de Pc	120
Tableau V.5	Résultats du rapport (S/B) pour (Ra, Fz, Pc et MRR)	127
Tableau V.6	Tableau des réponses pour le rapport (S/B) de Ra	128
Tableau V.7	Tableau des réponses pour le rapport (S/B) de Fz	128
Tableau V.8	Tableau des réponses pour le rapport (S/B) de Pc	129
Tableau V.9	Tableau des réponses pour le rapport (S/B) du MRR	129
Tableau V.10	Paramètre de coupe optimale et résultat expérimental	131
Tableau V.11	Objectifs et plages de variation des paramètres de coupe pour l'optimisation	132
Tableau V.12	Résultats de l'optimisation par la méthode (GRA)	136
Tableau V.13	Résultats de l'optimisation par la méthode (MOORA)	138
Tableau V.14	Résultats de l'optimisation par la méthode (DEAR)	140
Tableau V.15	Résultats de la méthode (WASPAS)	142
Tableau V.16	Régimes et réponses optimaux	145

Nomenclature

Vc	Vitesse de coupe (m/min)
ap	Profondeur de passe (mm)
f	Avance par tour (mm/tr)
r	Rayon de bec de l'outil (mm)
Fz	Effort de coupe tangentiel (N)
Ra	Rugosité moyenne arithmétique (μm)
Rt	Rugosité totale (μm)
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité (μm)
VB	Usure en dépouille (mm)
ANOVA	Analyse de variance
RSM	Méthodologie de surface de réponse
MCDM	Analyse décisionnelle multicritère
GRA	Analyse Relationnelle Grise
MOORA	Analyse du ratio d'optimisation multi-objectif
DEAR	Méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données
WASPAS	Evaluation du produit de la somme agrégée pondérée
DF	Fonction de désirabilité
α	Angle de dépouille principal (degré)
γ	Angle d'attaque (degré)
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré)
χ_r	Angle de direction principal (degré)
Gp	Géométrie des plaquettes de coupe
DL	Degrée de liberté
MC	Moyenne des carrés
Mr1, Mr1	Taux de longueur portante
Prob.	Probabilité
R²	Coefficient de détermination (%)
Adj R²	R ² ajusté
Pred R²	R ² prédit
SS	Somme des carrés
MS	Moyenne des carrés
F	Valeur de Fisher
P	Probabilité d'obtenir du résultat par hasard
DL	Degrés de libertés
Con%	Pourcentage de contribution [%]
ML	Système de lubrification minimale
Rk	Core Roughness depth (μm)
Rpk	Profondeur réduite des pics (μm)
Rvk	Profondeur réduite des vallées (μm)
Sk	Profondeur de rugosité centrale (μm)
Spk	Hauteur de crête réduite (μm)
Svk	Hauteur de vallée éliminée (μm)
Vmc	Volume matériel central (ml/m ²)
Vmp	Volume matériel de crête (ml/m ²)
Vvc	Volume vide central
Vvv	Volume vide de vallée

Table des matières

<i>Dédicace</i>	II
<i>Remerciement</i>	III
<i>Résumé</i>	V
<i>Index des figures</i>	VIII
<i>Index des tableaux</i>	XIII
<i>Nomenclature</i>	XV
<i>Table des matières</i>	XVI
<i>Introduction générale</i>	1

Chapitre I

Étude bibliographique

I.1 Introduction.....	5
I.2 Usinabilité des matériaux.....	5
I.3 Matériaux des outils de coupe.....	6
I.3.1 Caractéristiques des matériaux de coupe.....	6
I.3.2 Classification des matériaux de coupe.....	7
I.3.2.1 Aciers à outils.....	7
I.3.2.2 Carbures métalliques.....	7
I.3.2.3 Céramiques.....	8
I.3.2.4 Nitrure de bore cubique (CBN).....	8
I.3.2.5 Cermet.....	8
I.3.2.6 Diamants synthétiques.....	9
I.4 Revêtements des outils de coupe.....	9
I.4.1 Méthode d'élaboration d'un revêtement.....	10
I.4.1.1 Dépôt physique en phase vapeur.....	11
I.4.1.2 Dépôt chimique en phase vapeur.....	11
I.4.2 Choix de la méthode de revêtement.....	11
I.5 Etat de surface des pièces mécanique.....	12
I.5.1 Principaux critères de rugosité (Paramètres d'amplitude).....	12
I.5.2 Topographie de surface 3D et paramètres fonctionnels.....	14
I.5.2.1 Paramètre fonctionnels.....	15
I.5.2.1.1 Paramètres fonctionnels Rk.....	15

I.5.2.1.2 Les paramètres fonctionnels Sk.....	16
I.5.2.2 Parametres de volume.....	18
I.6 Efforts de coupe en usinage.....	19
I.7 Endommagement des outils de coupe.....	20
I.7.1 Mécanisme d'usure des outils.....	20
I.7.2 Forme d'usure des arêtes de coupe.....	21
I.8 Evolution de la température dans l'usinage.....	22
I.9 Les aciers.....	24
I.9.1 Aciers à outils.....	25
I.9.2 Composition chimique et le rôle des éléments d'addition.....	25
I.10 Lubrification en usinage.....	27
I.10.1 Types de lubrifiants utilisés dans l'usinage.....	27
I.10.2 Impact des fluides de coupe sur l'environnement.....	28
I.10.3 Minimisation des effets négatifs des fluides de coupe sur l'environnement	28
I.10.4 Minimum quantité de lubrification (MQL).....	28
I.11 Etat de l'art.....	30
I.11.1 Performance des matériaux de coupe.....	30
I.12 Conclusion.....	48

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction.....	50
II.2 Matériels utilisés.....	50
II.2.1 Machine-outil.....	50
II.2.2 Matériau à usiner.....	51
II.2.3 Outils de coupe utilisés.....	53
II.2.3.1 Plaquettes de coupe utilisée.....	53
II.2.3.2 Porte outil.....	53
II.3 Appareillages de mesure utilisées.....	54
II.3.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	54
II.3.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	56
II.3.2.1 Rugosimètre 2D.....	56
II.3.2.2 Rugosimètre 3D.....	56
II.3.3 Microscope pour la mesure de l'usure.....	58

II.3.4 Caractérisations morphologiques et chimiques.....	58
II.3.4.1 Microscope électronique à balayage (MEB).....	58
II.3.4.2 Spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDS).....	59
II.3.5 La caméra thermographie IR pour la mesure de la température.....	60
II.3.6 Minimum de quantité de lubrification (MQL).....	61
II.3.7 Autres équipements.....	62
II.4 Planification des expériences.....	62
II.4.1 Méthode de planification des expériences.....	62
II.4.1.1 La méthode paramétrique OFAT (Un facteur à la fois).....	62
II.4.1.2 Méthode multifactorielle.....	63
II.4.2 Différents types de facteurs.....	64
II.4.3 Démarche et plans d'expérience adoptés.....	65
II.4.4 Conditions de coupe adoptées.....	65
II.5 Méthode de modélisation appliquée.....	68
II.5.1 Méthodologie des surfaces de réponse (RSM).....	68
II.5.2 Analyse de la variance (ANOVA).....	69
II.6 Conclusion.....	71

Chapitre III

Usinabilité de l'acier X210Cr12

III.1 Introduction.....	73
III.2 Essais paramétriques.....	73
III.2.1 Influence des paramètres de coupe sur l'effort de coupe.....	73
III.2.2 Influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface.....	76
III.3 Evolution de l'usure.....	79
III.3.1 Evolution de l'usure et durée de vie.....	79
III.3.2 Evolution de la rugosité de surface en fonction de l'usure.....	81
III.3.3 Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure.....	82
III.4 Topographie de surface 3D générée après usinage.....	83
III.4.1 Topographie de surface 3D en fonction de l'avance.....	83
III.4.1.1 Paramètre fonctionnels 2D.....	85
III.4.1.2 Paramètre fonctionnels 3D.....	85
III.4.2 Topographie de surface 3D en fonction de rayon.....	89
III.4.2.1 Paramètre fonctionnels 2D.....	89

III.4.2.2 Paramètre fonctionnels 3D.....	92
III.5 Evolution de la température de coupe.....	95
III.5.1 Evolution de la température de coupe en fonction de la vitesse de coupe...	95
III.5.2 Evolution de la température de coupe en fonction de la profondeur de passe.....	96
III.5.3 Evolution de la température de coupe en fonction de l'avance.....	96
III.6 Conclusion.....	97

Chapitre IV

Étude de l'impact des différents matériaux de l'outils dans un environnement à sec et lubrifié (MQL)

IV.1 Introduction.....	99
IV.2 Analyse statistique et modélisation.....	99
IV.2.1 Analyse de la variance (ANOVA) à sec et MQL.....	102
IV.2.1.1 ANOVA pour (Ra).....	102
IV.2.1.2 ANOVA pour (Fz).....	103
IV.2.1.3 ANOVA pour (Vb).....	105
IV.2.1.4 Graphique des effets principaux de Ra, Fz et Vb.....	106
IV.2.2 Modélisation des paramètres technologiques de performance.....	107
IV.2.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites.....	110
IV.3. Evolution de l'usure en dépouille.....	111
IV.4. Conclusion.....	115

Chapitre V

Modélisation (RSM) et optimisation par DF et les méthodes MCDM

V.1 Introduction.....	117
V.2 Analyse statistique et modélisation.....	118
V.2.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra, Fz et Pc).....	118
V.2.2 Modélisation des paramètres technologiques de performance.....	121
V.3 Optimisation mono et multi-objectif.....	126
V.3.1 Optimisation mono-objectif par la méthode de Taguchi.....	126
V.3.2 Optimisation multi-objectif des conditions de coupe.....	131
V.3.2.1 Fonction de désirabilité (DF).....	131
V.3.2.2 Méthode hybride Taguchi-GRA.....	134
V.3.2.3 Méthode hybride Taguchi-MOORA.....	137

V.3.2.4 Méthode hybride Taguchi-DEAR.....	139
V.3.2.5 Méthode hybride Taguchi-WASPAS.....	140
V.3.2.6 Régimes de coupe optimaux par les différentes méthodes.....	142
V.3.3 Tests de confirmation et comparaison entre les méthodes.....	144
V.4 Conclusion.....	146
Conclusion générale et perspectives	147
Références bibliographiques	151

Introduction générale

La fabrication mécanique est l'un des piliers sur lesquelles repose l'industrie d'aujourd'hui. L'usinage des métaux est l'un des procédés qui a contribué le plus dans la fabrication des travaux de finition des pièces de précision.

Les matériaux pour les outils de tournage jouent un rôle important dans le processus de fabrication. Le choix du matériau de l'outil de coupe a un impact significatif sur l'amélioration de la qualité de la pièce usinée, de la durée de vie de l'outil, la vitesse de coupe et d'autres paramètres de l'opération de tournage. De là, il est très intéressant de trouver des plaquettes de coupe qui ont des meilleures performances et de sélectionner une plage des paramètres du régime de coupe où ces plaquettes peuvent productivement et efficacement usiner les pièces mécaniques.

L'usinage à sec et MQL gagne de plus en plus du terrain dans le monde industriel à cause de son respect éprouvé envers les systèmes écologique et environnemental. Cette technique de fabrication est encouragée d'émergence et nécessite plus de maîtrise. Afin de répondre aux exigences, les paramètres du processus de fabrication doivent être choisis dans les meilleures circonstances prenant en compte les conditions de lubrification, tout en respectant l'aspect écologique. La sélection des paramètres des processus optimaux joue un rôle important dans l'assurance de la bonne qualité du produit, de réduire le coût de fabrication et de préserver l'environnement.

Dans l'industrie, le défi des fabricants de pièces mécaniques est le choix des conditions d'usinage les plus appropriées lors de l'usinage d'une grande variété de matériaux, afin d'obtenir les résultats souhaités pour les paramètres technologiques désirés. Or, il est bien évident que le choix judicieux des conditions d'usinage est étroitement lié à la productivité et également au coût global d'une opération d'usinage. A cet effet, la modélisation des paramètres de performance ainsi et l'optimisation des conditions de coupe en usinage deviennent des étapes essentielles pour garantir la qualité du produit et pour que les opérations d'usinage seront réalisées à moindre coût et la fabrication des pièces mécaniques soit compétitive. En raison de l'énorme complexité des nombreux processus de fabrication et du nombre élevé des paramètres d'influence, les approches classiques de la modélisation du processus et l'optimisation ne sont plus suffisantes. Dans ce contexte, des techniques avancées d'optimisation doivent être développées et essayées pour un meilleur choix des conditions d'usinage. C'est dans ce cadre

que s'inscrivent les travaux de recherche de cette thèse de doctorat. Le manuscrit est réparti en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre de la thèse nous avons présenté, un ensemble de notions de base de la coupe des métaux. L'usinabilité des matériaux, spécifions en particulier dans notre cas " les aciers à outils ", les matériaux de coupe, différentes actions mécaniques ainsi que différents paramètres permettant de déterminer les performances d'usinage telles que : l'usure des plaquettes de coupe, la qualité de surface, les efforts de coupe, la température de coupe et le débit du copeau enlevé. Aussi, nous avons fait une description de la méthode de lubrification (MQL). La fin de ce chapitre est réservée à l'exposition d'une synthèse des travaux de recherches sur l'usinage des aciers fortement alliés avec différents matériaux de coupe et différents revêtements, différents modes de lubrification et les méthodes d'optimisation durant le processus de coupe.

Le deuxième chapitre est réservé à la description des équipements exploités et les conditions expérimentales utilisées lors de la réalisation des essais. Les dispositifs de mesure et le couple outil - matière sont présentés d'une manière précise avec tous les détails nécessaires pour une étude expérimentale rigoureuse dans le domaine de l'usinage des pièces mécaniques. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes statistiques des plans d'expérience sont également exposés dans ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats des essais paramétriques sur l'étude de l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe, rayon de bec de l'outil et le temps d'usinage) sur l'effort de coupe principale, la rugosité de surface, l'usure en dépouille (V_b) et la température de coupe qui règne dans la zone de coupe. Les essais de tournage sont réalisés sur l'acier X210Cr12 en utilisant trois différents outils de coupe (carbure métallique à revêtement CVD, carbure métallique à revêtement PVD et en cermet). Les résultats de l'usure en dépouille (V_b) des outils de coupe en fonction du temps d'usinage à différentes vitesses de coupe ainsi que la corrélation entre l'usure et la rugosité de surface et l'effort de coupe, sont aussi exposés dans ce chapitre. Aussi, nous présentons les résultats des essais de la topographie de surface 2D et 3D des surfaces usinées en fonction de la variation des facteurs de coupe. En dernier lieu, une investigation sur l'évolution de la température de coupe en fonction des conditions de coupe a été faite.

Dans le quatrième chapitre, nous avons réalisé une étude expérimentale comparative des différents matériaux de coupe sous un environnement à sec et en utilisant la méthode du

minimum de quantité de lubrification (MQL). Le but est de proposer une modélisation de la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe (F_z) l'usure en dépouille (V_b) afin de pouvoir faire la prédiction pour les deux modes de lubrification. Pour cet objectif, la méthode de surface de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) ont été utilisées.

Le dernier chapitre est réservé en premier lieu à la modélisation des paramètres de performance qui concerne la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe (F_z), la puissance consommée (P_c) et le débit du copeau enlevé (MRR), en utilisant la méthodologie de surface de réponse. L'usinage a été réalisé sur des éprouvettes en acier X210Cr12 en utilisant seulement un outil de coupe en carbure revêtu en CVD (GC4215), puisque ce dernier présente les meilleures performances comparativement aux autres outils utilisés. Les modèles développés par la méthodologie de surface de réponse sont obtenus en se basant sur un plan d'expérience réduit de Taguchi L_{16} . Les paramètres du processus de coupe choisis comme variables sont le rayon de bec de l'outil (r), la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p). La deuxième partie de ce chapitre va être focalisée sur la présentation, des résultats de l'optimisation mono et multi-objective des paramètres technologiques (R_a , F_z , P_c et MRR). L'optimisation mono-objective a été effectuée en se basant sur l'approche de Taguchi basée sur le rapport signal/bruit (S/B). Par contre l'optimisation multi-objective a été réalisée par cinq méthodes à savoir ; la fonction de désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (GRA), l'analyse du ratio d'optimisation multi-objectif (MOORA), la méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (DEAR) et l'évaluation du produit de la somme agrégée pondérée (WASPAS) afin de sélectionner un régime de coupe optimal qui satisfait les quatre paramètres de sortie simultanément. Ensuite une comparaison entre les régimes de coupes optimaux obtenus par les différentes méthodes utilisées a été réalisée.

Cette thèse de doctorat termine par une conclusion générale qui expose une synthèse des résultats obtenus durant ce travail de recherche ainsi que les perspectives suivies d'une liste des références bibliographiques.

CHAPITRE

I

Étude bibliographique

I.1 Introduction

La fabrication mécanique est l'un des piliers sur lesquelles repose l'industrie d'aujourd'hui. L'usinage des métaux est l'un des procédés qui a contribué le plus dans la fabrication des travaux de finition des pièces de précision [1, 2]. Dans ce chapitre, un ensemble de notions de base de la coupe des métaux est présenté. Parmi ces notions citons, le tournage qui se présente comme étant l'un des procédés d'usinage les plus utilisés pour l'usinage des pièces mécanique. Avec ce dernier s'accompagne, l'usinabilité des matériaux, spécifions en particulier dans notre cas " l'acier fortement allié ", les matériaux de coupe, différentes actions mécaniques ainsi que différents paramètres permettant de déterminer les performances d'usinage telles que : l'usure des plaquettes de coupe, la qualité de surface et le copeau enlevé. La fin de ce chapitre est réservée à l'exposition d'une synthèse des travaux de recherches sur l'usinage des aciers fortement alliés avec différents matériaux de coupe et différents revêtements, différents modes de lubrification et les méthodes d'optimisation dans le processus de coupe.

I.2 Usinabilité des matériaux

D'après [3], l'usinabilité fait référence à la facilité avec laquelle un matériau peut être usiné ou transformé en utilisant divers processus de fabrication tels que le tournage, le fraisage, le perçage, etc. Elle englobe les caractéristiques du matériau qui influencent sa capacité à être travaillé de manière efficace et précise. [4] Estime que l'usinabilité d'un matériau dépend de plusieurs facteurs, notamment sa composition chimique, sa microstructure, sa dureté, sa ductilité, sa résistance à l'usure, sa conductivité thermique et électrique, ainsi que sa réactivité chimique. Les ingénieurs et les concepteurs prennent en compte l'usinabilité d'un matériau lorsqu'ils choisissent les matériaux à utiliser pour un projet spécifique. Un matériau difficile à usiner peut entraîner des problèmes tels que l'usure rapide des outils de coupe, des temps de production plus longs et des coûts plus élevés. En revanche, un matériau doté d'une bonne usinabilité peut permettre des opérations de fabrication plus rapides, des tolérances plus précises et une meilleure qualité globale du produit fini [5]. Pour évaluer l'usinabilité d'un matériau, diverses mesures et tests peuvent être utilisés, notamment des essais d'usinabilité standardisés tels que l'essai de tournage. Les données d'usinabilité peuvent aider les ingénieurs à sélectionner les meilleures techniques d'usinage, les paramètres de coupe appropriés et les outils adéquats pour obtenir les meilleurs résultats lors de la fabrication de pièces [6].

En résumé, l'usinabilité est un concept essentiel dans l'ingénierie et la fabrication, car elle influence directement la manière dont les matériaux sont transformés en produits finis, et elle joue un rôle crucial dans la productivité, la qualité et les coûts de fabrication [7].

I.3 Matériaux des outils de coupe

Les matériaux de coupe en usinage font référence aux matériaux utilisés pour fabriquer les outils de coupe, tels que les fraises, les forêts, les lames de scie, les burins et d'autres instruments similaires. Ces outils sont utilisés pour enlever de la matière d'une pièce brute afin de la façonner, la tailler ou la transformer en une forme souhaitée. Les matériaux de coupe doivent être choisis avec soin en fonction des propriétés des matériaux à usiner, des conditions de coupe et des performances attendues [8].

I.3.1 Caractéristiques des matériaux de coupe

Les matériaux utilisés pour fabriquer des outils de coupe doivent posséder certaines caractéristiques spécifiques telles que la dureté, la ténacité et de résistance à l'usure pour assurer une performance optimale lors de l'usinage. Les principales caractéristiques recherchées dans un matériau de coupe : dureté élevée, résistance à l'usure, résistance à la chaleur, résistance aux contraintes mécaniques, ténacité, stabilité chimique, stabilité thermique, conductivité thermique, compatibilité avec les revêtements, disponibilité et coût. La **Figure I.1**, expose le classement des matériaux de coupe dans un graphe ténacité et dureté [9].

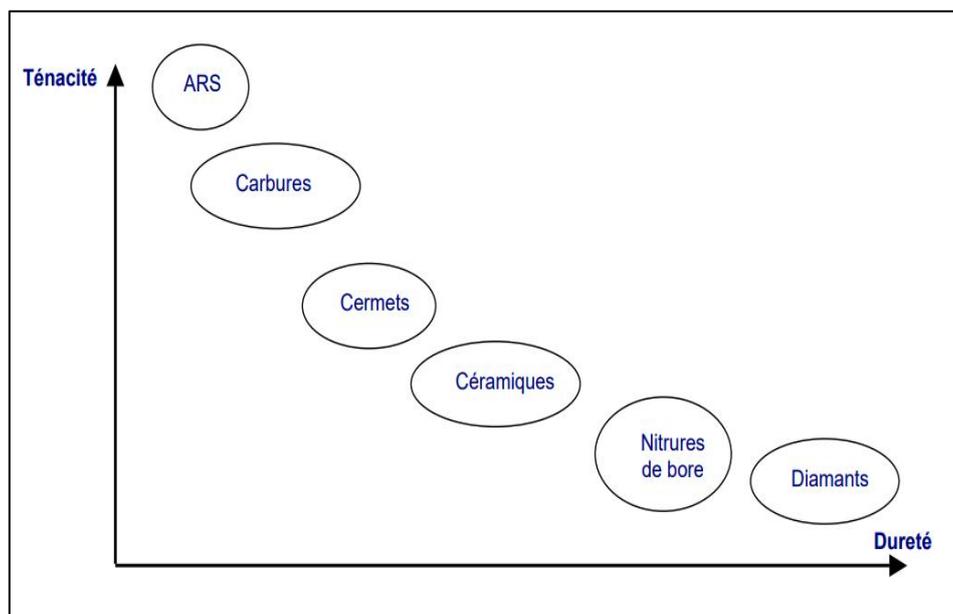


Figure I.1 Classification des matériaux de coupe en fonction de la dureté et la ténacité [9].

I.3.2 Classification des matériaux de coupe

Les matériaux de coupe sont classés en fonction de leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques, ainsi que de leur capacité à résister à l'usure et à la chaleur générées lors de l'opération de coupe. Les matériaux de coupe idéaux peuvent varier en fonction du type de matériau à usiner, de la géométrie de l'outil, des conditions de coupe et de l'application spécifique. Les fabricants d'outils de coupe recherchent un équilibre entre ces caractéristiques pour offrir des performances optimales dans diverses situations d'usinage. Voici une classification générale des matériaux de coupe couramment utilisés [10] :

I.3.2.1 Aciers à outils

Les aciers à outils sont des types spécifiques d'aciers conçus pour être utilisés dans la fabrication d'outils tels que des forets, des ciseaux, des marteaux, des matrices et d'autres instruments de coupe, de perçage, de formage et de manipulation des matériaux. Ces aciers doivent avoir des propriétés mécaniques exceptionnelles pour résister aux contraintes élevées, à l'usure et à la chaleur générées lors de l'utilisation d'outils. Les aciers à outils sont généralement classés en plusieurs catégories en fonction de leur composition chimique et de leurs propriétés. Voici une classification commune des aciers à outils : aciers au carbone, aciers à outils alliés, aciers rapides, aciers pour travail à froid, aciers pour travail à chaud, aciers pour matrices à chaud, aciers pour moules.

I.3.2.2 Carbures métalliques

Les carbures métalliques sont des composés chimiques qui résultent de la liaison entre des atomes de métal et des atomes de carbone. Ces matériaux combinent les propriétés des métaux et celles des composés carbonés, ce qui les rend utiles dans diverses applications industrielles et technologiques. Les carbures métalliques sont généralement caractérisés par leur haute résistance mécanique, leur conductivité électrique et thermique élevée, ainsi que leur capacité à maintenir leurs propriétés à des températures élevées. Ils sont couramment utilisés dans la fabrication d'outils de coupe, de revêtements protecteurs et de pièces d'usure. Les carbures de tungstène (WC), de titane (TiC), de tantale (TaC) et de niobium (NbC) sont parmi les carbures métalliques les plus couramment utilisés. Ce matériau est extrêmement dur et résistant à l'usure, ce qui en fait un choix privilégié pour l'usinage à grande vitesse, l'usinage de métaux durs et d'autres matériaux résistants. Les outils en carbure métalliques peuvent également fonctionner à des températures plus élevées que les aciers rapides [11].

I.3.2.3 Céramiques

Les céramiques sont des matériaux solides non métalliques fabriqués à partir d'argiles cuites, de poudres minérales et d'autres matières premières. Elles ont une grande variété d'applications en raison de leurs propriétés. Les outils de coupe en céramique sont fabriqués à partir de matériaux céramiques comme l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) ou le nitrure de silicium (Si_3N_4). Ils sont connus pour leur dureté élevée, leur résistance à la chaleur et leur capacité à maintenir leurs propriétés à des températures élevées. En résumé, les outils de coupe en céramique peuvent être très bénéfiques dans le domaine du tournage, en particulier pour des opérations nécessitant une haute précision, une durabilité accrue et des températures de coupe élevées. Cependant, il est essentiel de comprendre les propriétés et les limitations des matériaux céramiques et de choisir le bon matériau céramique en fonction de l'application spécifique [12].

I.3.2.4 Nitrure de bore cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique, également connu sous le nom de CBN (cubic boron nitride), est une forme cristalline de nitrure de bore. Il possède une structure cristalline similaire à celle du diamant mais composé d'atomes de bore et d'azote au lieu de carbone, ce qui lui confère des propriétés exceptionnelles en termes de dureté et de conductivité thermique. Le CBN est un matériau extrêmement dur et résistant à la chaleur, il est privilégié pour l'usinage de matériaux ferreux à haute dureté, tels que les aciers trempés. Ce matériau est moins sensible à l'usure mais peut être fragile et exiger des conditions d'utilisation spéciales [13].

I.3.2.5 Cermet

Le terme "cermet" est la contraction de "ceramic" (céramique) et "metal" (métal). Il désigne un matériau composite fabriqué en mélangeant des particules de céramique, généralement des carbures, des nitrures ou des oxydes, avec un liant métallique, tel que du cobalt ou du nickel. Les cermets sont conçus pour combiner les avantages des céramiques, tels que la dureté, la résistance à la chaleur et la stabilité dimensionnelle, avec la ductilité et la ténacité des métaux. Les cermets sont largement utilisés dans diverses applications industrielles, notamment dans la fabrication d'outils de coupe, de pièces d'usure, de composants pour les industries pétrolière et gazière, ainsi que dans d'autres domaines où la résistance à l'usure, la résistance à la chaleur et la durabilité sont essentielles. Les outils de coupe en cermet, par exemple, sont utilisés pour l'usinage de matériaux durs comme les métaux, les alliages et les céramiques [14].

I.3.2.6 Diamants synthétiques

Les outils de coupe fabriqués à partir de diamants synthétiques sont largement utilisés dans diverses industries pour leur durabilité exceptionnelle et leurs propriétés de coupe efficaces en termes de dureté, de résistance à l'usure et de conductivité thermique. Les diamants synthétiques sont créés en laboratoire en reproduisant les conditions de formation naturelle des diamants, ce qui aboutit à des cristaux de diamant possédant des caractéristiques similaires à celles des diamants naturels. Les outils de coupe en diamant synthétique sont extrêmement durs et peuvent usiner des matériaux très abrasifs tels que la céramique et la fibre de carbone. Ils sont souvent utilisés dans des applications de finition de haute précision [15].

I.4 Revêtements des outils de coupe

Les revêtements des outils de coupe jouent un rôle crucial dans l'amélioration des performances et de la durée de vie des outils utilisés pour couper, usiner ou former des matériaux tels que le métal, le bois, les plastiques et les composites. Ces revêtements sont appliqués sur la surface de l'outil de coupe pour offrir divers avantages, tels que la réduction de l'usure, l'amélioration de la résistance à la chaleur, la diminution des efforts de coupe et l'amélioration de la qualité de la surface usinée. Les revêtements peuvent grandement influencer les performances des outils de coupe et contribuer à réduire les coûts d'usinage en prolongeant la durée de vie des outils et en améliorant l'efficacité des opérations. Voici quelques-uns des revêtements couramment utilisés pour les outils de coupe [16] :

- **Revêtements en nitrure de titane (TiN)** : Ce revêtement est largement utilisé pour améliorer la résistance à l'usure des outils de coupe. Il réduit le frottement et augmente la dureté de la surface de l'outil, ce qui permet une meilleure durabilité. Il est particulièrement adapté aux aciers et aux matériaux ferreux.
- **Revêtement en nitrure d'aluminium (AlN)** : Ce revêtement est utilisé pour l'usinage des métaux non ferreux et des matériaux réfractaires. Il offre une excellente résistance thermique et chimique.
- **Revêtements en nitrure de titane et aluminium (TiAlN)** : Ces revêtements sont conçus pour offrir une meilleure résistance à la chaleur et à l'usure par rapport au TiN. Ils sont particulièrement adaptés aux opérations d'usinage à haute température. Il est efficace pour l'usinage à grande vitesse, à haute température et la coupe de matériaux difficiles à usiner tels que les superalliages.

- **Revêtements en nitrure de chrome (CrN)** : Les revêtements CrN offrent une excellente résistance à l'usure et sont souvent utilisés pour les applications de coupe et d'usinage à haute température. Ce revêtement est utilisé pour l'usinage de matériaux non ferreux, de plastiques et de matériaux composites. Il offre une faible friction et une excellente résistance à la corrosion.
- **Revêtements en nitrure de zirconium (ZrN)** : Le ZrN offre une combinaison de résistance à l'usure et de conductivité thermique élevées, ce qui en fait un choix populaire pour les outils de coupe travaillant à des températures élevées.
- **Revêtements en diamant** : Le diamant est extrêmement dur et offre une excellente résistance à l'usure. Les revêtements en diamant sont souvent utilisés pour les opérations d'usinage de matériaux très durs, tels que la céramique, certains métaux non ferreux de plastiques et de composites.
- **Revêtements en nitrure de bore cubique (CBN)** : Le CBN est similaire au diamant en termes de dureté et de résistance à l'usure. Il est principalement utilisé pour l'usinage de matériaux très abrasifs, tels que les alliages de fer.
- **Revêtements en carbure de titane (TiC)** : Ces revêtements offrent une meilleure résistance à l'usure et à la corrosion, ainsi qu'une amélioration des propriétés de surface de l'outil.
- **Revêtements en carbure de tungstène (WC)** : Les revêtements en WC sont souvent utilisés en combinaison avec d'autres revêtements pour améliorer la résistance à l'usure et la dureté de la surface de l'outil.
- **Revêtement en nitrure de titane et carbone (TiCN)** : Ce revêtement combine les propriétés du TiN avec une dureté accrue grâce à l'ajout de carbone. Il convient aux matériaux abrasifs et aux conditions de coupe à haute température.
- **Revêtement en oxyde d'aluminium (Al₂O₃)** : Ce revêtement céramique est utilisé pour l'usinage à haute vitesse et à faible vitesse d'alliages à base de nickel et de titane. Il offre une bonne résistance thermique et chimique.

I.4.1 Méthode d'élaboration d'un revêtement

L'élaboration d'un revêtement pour les outils de coupe vise généralement à améliorer leur durabilité, leur performance de coupe et leur résistance à l'usure. Il y a deux types de méthode couramment utilisées pour élaborer des revêtements d'outils de coupe. Le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) sont deux techniques de dépôt de couches minces utilisées en nanotechnologie et dans l'industrie des semi-conducteurs pour

fabriquer des revêtements et des structures à l'échelle microscopique. Bien qu'ils partagent la caractéristique commune d'opérer en phase vapeur, ils diffèrent par leur mécanisme et leur principe de fonctionnement. La figure I.2 montre les procédés de fabrication des revêtements par la méthode PVD et CVD [17].

I.4.1.1 Dépôt physique en phase vapeur

Cette méthode implique l'évaporation d'un matériau cible (généralement sous forme solide) est vaporisé dans une chambre à vide. Les atomes ou molécules éjectés se déposent sur la surface de l'outil pour former un revêtement mince. Les techniques PVD incluent la pulvérisation cathodique, l'évaporation thermique et l'atomisation cathodique magnétron.

I.4.1.2 Dépôt chimique en phase vapeur

Dans cette méthode, les réactions chimiques entre les gaz réactifs produisent une couche de revêtement solide sur les outils de coupe. Les réactions chimiques génèrent les atomes ou molécules nécessaires pour former la couche mince. Les dépôts chimiques en phase vapeur offrent une grande variété de matériaux et de propriétés de revêtement. Cela permet de déposer des revêtements plus épais et de contrôler précisément leur composition.

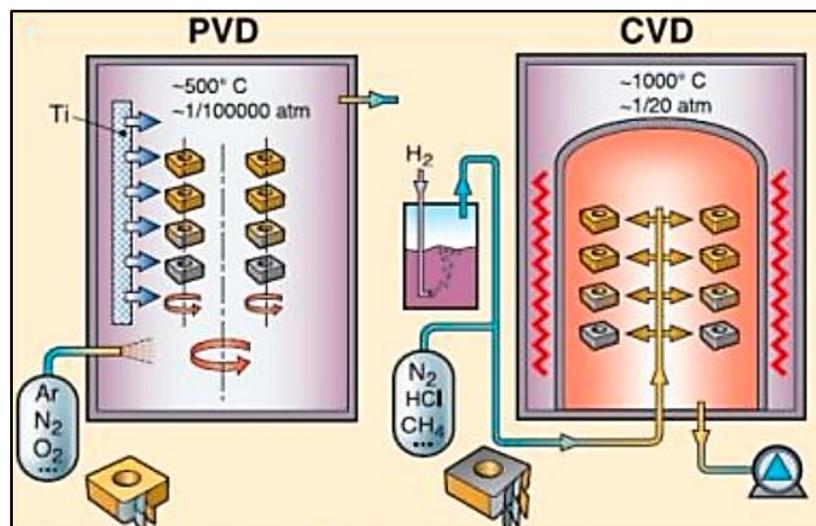


Figure I.2 Procédés de fabrication de CVD et PVD [17].

I.4.2 Choix de la méthode de revêtement

Le choix de la méthode de revêtement dépend des propriétés souhaitées, du matériau de l'outil de coupe, de l'application spécifique et du budget disponible. Chaque méthode a ses avantages et inconvénients, il est donc important de considérer tous ces facteurs avant de choisir la méthode appropriée pour votre application spécifique. Le tableau I.1 présente une comparaison des propriétés des revêtements obtenus par le dépôt PVD et le dépôt CVD [18].

Tableau I.1 Comparaison des revêtements obtenus par les méthodes PVD et CVD [18].

Critère	PVD	CVD
Modes de dépôt	Energie thermique	Réaction chimique
Contrôle de l'épaisseur	Généralement bien contrôlée	Généralement bien contrôlée
Adhérence	Excellente	Variable
Contrôle de la structure	Bon	Variable
Taux de dépôt	Plus lent	Plus rapide
Revêtements conformes	Moins bon	Très bon
Température de dépôt	Basse	Variable (peut être élevée)
Variété de matériaux	Limitée aux conducteurs/semi-conducteurs	Large gamme de matériaux
Contrôle de la composition	Moins précis	Précis
Complexité des équipements	Moins complexe	Plus complexe
Stabilité à long terme	Variable	Variable
Coût	Généralement inférieur	Généralement supérieur
Adhérence	Excellente	Variable, peut-être moins bonne
Microstructure	Peut-être plus contrôlée	Peut-être moins contrôlée
Taux de dépôt	Généralement plus lent	Généralement plus rapide
Uniformité	Bonne	Très bonne
Composition chimique	Généralement moins précise	Généralement plus précise

I.5 Etat de surface des pièces mécanique

L'état de surface est des caractéristiques physiques et géométriques qui décrivent la texture et la qualité d'une surface. Il est souvent mesuré et évalué en termes de rugosité, de défauts et d'autres caractéristiques visuelles. Ils jouent un rôle crucial dans de nombreux domaines tels que l'ingénierie, la fabrication, la conception industrielle, l'automobile, l'aérospatiale, etc. Les états de surface influencent directement les performances, la fonctionnalité et l'aspect visuel des pièces et des produits finis.

I.5.1 Principaux critères de rugosité (Paramètres d'amplitude)

Les différents critères de rugosité peuvent être utilisés en fonction de l'application spécifique et des exigences de la surface en question. Les normes internationales, telles que celles établies par l'ISO (Organisation internationale de normalisation), fournissent des directives détaillées sur les méthodes de mesure et les critères de rugosité appropriés pour diverses applications industrielles. Dans le domaine de la fabrication mécanique, définis selon la norme ISO 4287 (**Fig. I.3**). La rugosité se réfère généralement à la qualité de surface d'un

objet, d'une surface ou d'un matériau, caractérisée par des variations irrégulières ou accidentelles dans sa texture. Elle peut être quantifiée à l'aide de différents critères et mesures qui décrivent les irrégularités présentes sur la surface (**Fig. I.4**). Voici les principaux critères de rugosité [19] :

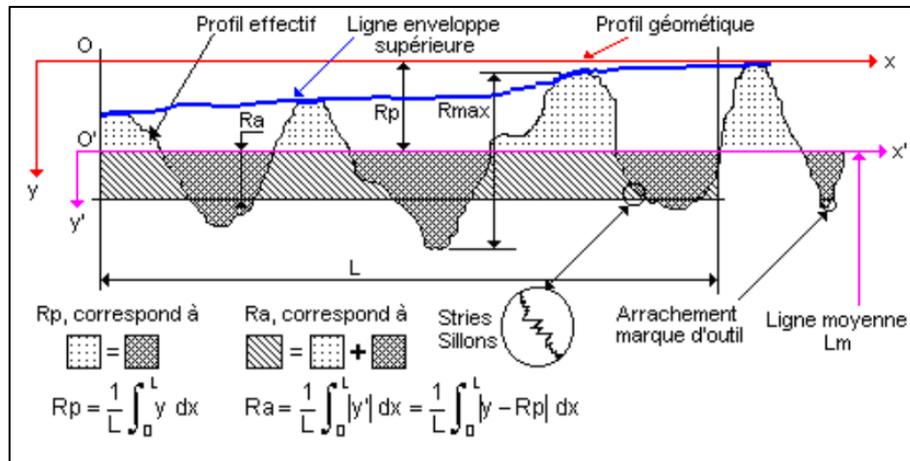


Figure I.3 Paramètres d'état de surface [19].

- **Rugosité moyenne (R_a)** : Il s'agit d'un paramètre de rugosité largement utilisé qui représente la valeur moyenne des hauteurs des aspérités de la surface par rapport à la ligne de référence. Il est mesuré en micromètres (μm) et donne une indication générale de la rugosité globale.

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

- **Rugosité maximale (R_z)** : Il s'agit de la distance verticale entre les points les plus hauts et les plus bas de la surface, dans une longueur de mesure spécifiée. R_z peut donner une idée de la variation extrême de la surface.

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z_1} + R_{z_2} + R_{z_3} + R_{z_4} + R_{z_5}) \quad (\text{I.2})$$

- **Hauteur maximale des aspérités (R_t)** : La hauteur maximale des aspérités est la distance verticale entre le point le plus bas et le point le plus élevé sur toute la longueur de mesure.

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4} \quad (\text{I.3})$$

- **Rugosité moyenne quadratique (R_q)** : Aussi connue sous le nom d'écart-type de la rugosité, R_q prend en compte les écarts entre les points de la surface et la ligne moyenne sur une longueur de mesure donnée.

- **Rugosité maximale des pics (R_p) et rugosité maximale des creux (R_v)** : Ce sont les hauteurs maximales des pics et des creux respectivement, mesurées par rapport à une ligne de base.

$$R_p = R_{p3} \quad (\text{I.4})$$

- **Longueur de corrélation (l_c)** : C'est la distance à laquelle les irrégularités de la surface commencent à se répéter. Une longueur de corrélation courte signifie que la surface est rapidement irrégulière, tandis qu'une longueur de corrélation plus longue indique une surface plus régulière.

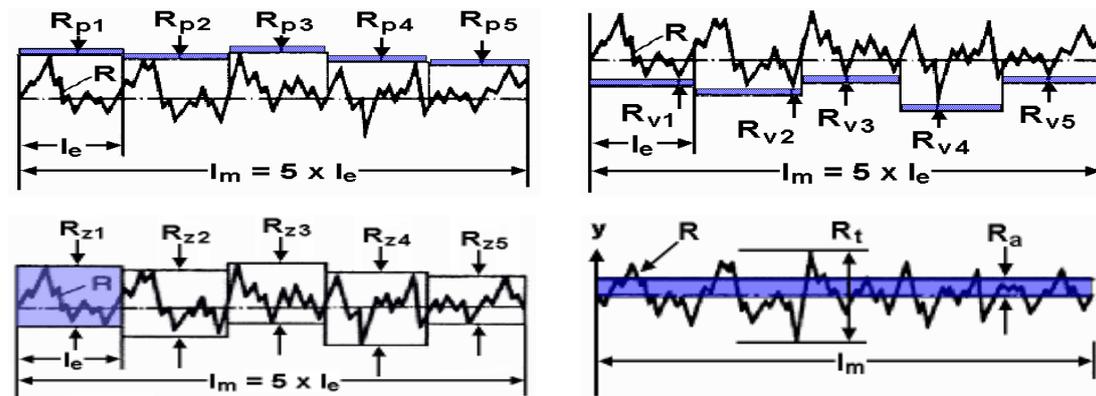


Figure I.4 Les critères de la rugosité.

I.5.2 Topographie de surface 3D et paramètres fonctionnels

Les états de surface surfaciques, également connus sous le nom de rugosité de surface, sont un aspect critique de la qualité et de la fonctionnalité des pièces mécaniques et des surfaces dans divers domaines industriels. Ces états de surface décrivent les propriétés microscopiques d'une surface, telles que sa rugosité, sa texture, sa planéité, sa rectitude, sa circularité, etc. Ils sont essentiels pour garantir le bon fonctionnement des pièces mécaniques et leur durabilité.

La rugosité de surface 3D, également appelée rugosité tridimensionnelle, est une mesure plus avancée de la qualité de la surface par rapport à la rugosité de surface 2D, qui est une mesure plus simple et plus courante. La rugosité de surface 3D prend en compte les caractéristiques tridimensionnelles de la topographie de la surface, ce qui signifie qu'elle tient compte non seulement de la rugosité en termes de crêtes et de creux, mais aussi de la forme et de la disposition des irrégularités sur la surface [20].

I.5.2.1 Paramètre fonctionnels

Pendant longtemps l'industrie mécanique a cherché un moyen d'améliorer les paramètres d'état de surface et les méthodes de filtrage pour les rendre mieux corrélés avec les besoins fonctionnels. Les paramètres fonctionnels sont des mesures spécifiques utilisées pour caractériser la qualité de la surface d'une manière qui tient compte de la fonctionnalité réelle de la pièce ou du produit. Contrairement aux paramètres 2D standard de rugosité de surface, qui se concentrent principalement sur des aspects de la topographie de surface, les paramètres fonctionnels sont conçus pour évaluer comment la rugosité de surface peut affecter le comportement d'une pièce mécanique ou d'une surface dans une application donnée [21].

I.5.2.1.1 Paramètres fonctionnels R_k

Ce paramètre étend les paramètres de courbe de rapport de matériau (R_k , R_{pk} , R_{vk} , Mr_1 et Mr_2) du paramètre de profil en trois dimensions (**Fig. I.5**). Ce paramètre convient à l'évaluation du frottement et de l'abrasion. Les valeurs R_k , Mr_1 et Mr_2 sont calculées à partir de la courbe linéaire (courbe linéaire équivalente) minimisant l'inclinaison de section correspondant à 40 % de la courbe de rapport de matière. Tracez un triangle avec l'aire équivalente à la protubérance de la courbe de rapport de matière segmentée par la largeur du paramètre R_k et calculez les paramètres R_{pk} et R_{vk} [22].

- **R_k : profondeur de rugosité du coeur (centre)**
- **R_{pk} : profondeur réduite des pics** : est utilisé pour caractériser les pics saillants qui risquent d'être éliminés durant la phase de rôdage.
- **R_{vk} : profondeur réduite des vallées** : est utilisé pour caractériser les vallées qui agissent comme réserve de lubrifiant ou qui seront comblées par les débris issus du rôdage.
- **Mr_1 et Mr_2 : taux de portance délimitant la zone du coeur** (Partie de matière).
- D'autres paramètres tels que **A_1 et A_2** peuvent également être calculés dans MountainsMap pour des applications particulières.

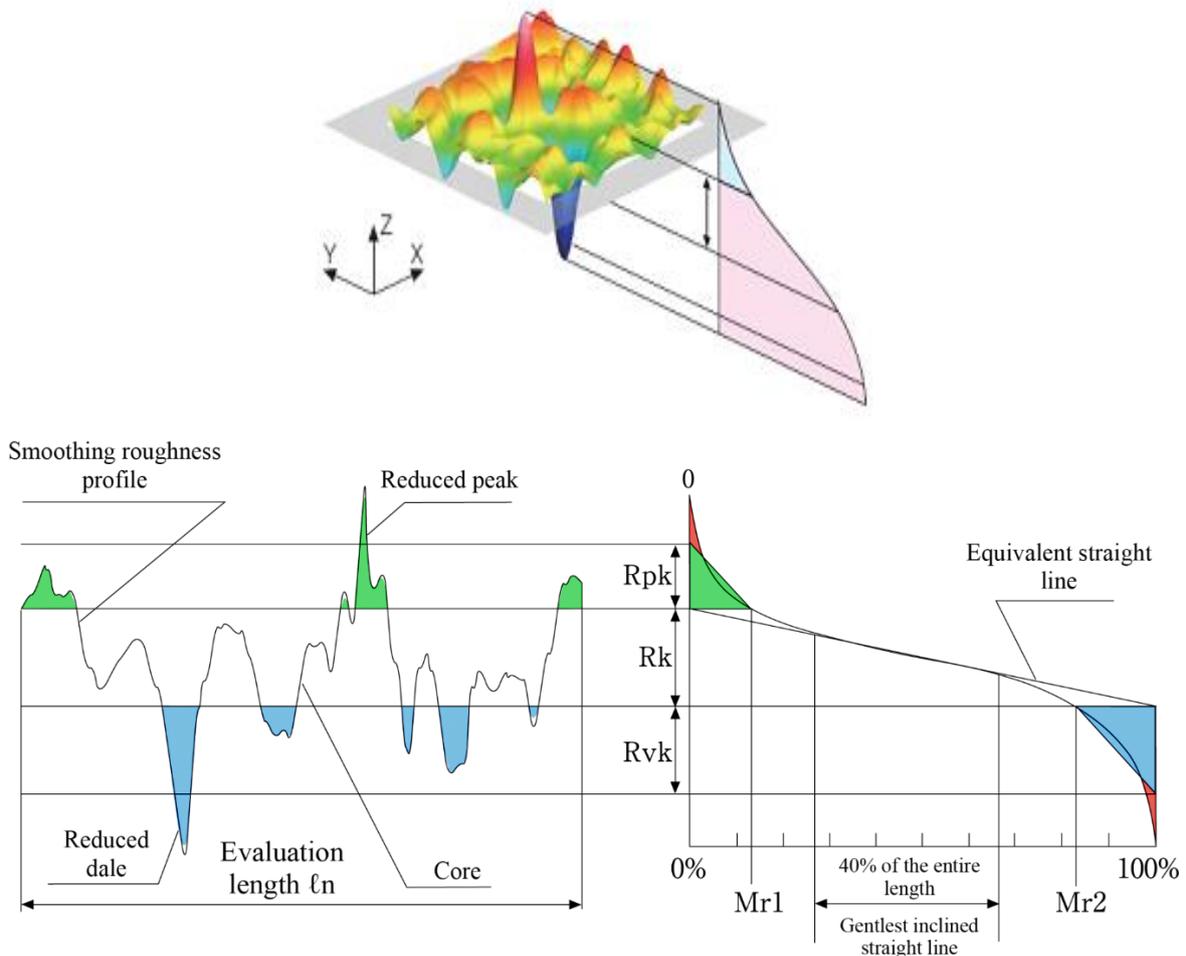


Figure I.5 Construction graphique des paramètres R_k [22].

I.5.2.1.2 Les paramètres fonctionnels S_k

La caractérisation fonctionnelle des surfaces joue un rôle essentiel dans le contexte des pièces mécaniques qui entrent en contact avec d'autres éléments et présentent des exigences en termes d'ajustement, de frottement sec ou lubrifié, d'étanchéité, etc. Dans cette perspective, la première étape a consisté à reprendre l'approche basée sur les paramètres fonctionnels tels que définis par la norme ISO 13565-2, qui inclut les paramètres R_k , R_{pk} et R_{vk} , originellement élaborés par l'industrie automobile allemande (DIN 4776/4777). Cette approche permet également de dériver des paramètres spécifiques aux surfaces, tels que S_k , S_{pk} , S_{vk} , S_{mr1} et S_{mr2} , en utilisant la même méthodologie basée sur la courbe d'Abbott, qui est elle-même calculée à partir de l'ensemble de la surface étudiée (Fig. I.6) [22].

- **S_k (Profondeur de rugosité centrale moyenne)** : Le paramètre S_k représente la hauteur de la surface écrêtée.

- **Le paramètre Sp_k (Hauteur de crête réduite moyenne)** : Représente la hauteur moyenne des pics saillants au-dessus de la surface centrale. Les pics éliminés se réfèrent aux zones éliminées par l'abrasion initiale.
- **Le paramètre Sv_k (hauteur de vallée éliminée moyenne)** : Donne la moyenne arithmétique de la profondeur de vallée éliminée de la courbe sous la surface centrale. Les vallées éliminées se réfèrent aux zones aptes à retenir le liquide appliqué sur la surface et permettant une meilleure lubrification (**Fig. I.7**).
- **Le paramètre $Smr1$ (Partie matérielle de crête)** : pourcentage de matière qui comprend les structures de crête (pics) associées à Sp_k .
- **Le paramètre $Smr2$ (Partie matérielle de creux)** : pourcentage de la zone de mesure qui comprend les structures de creux les plus profondes associées à Sv_k .

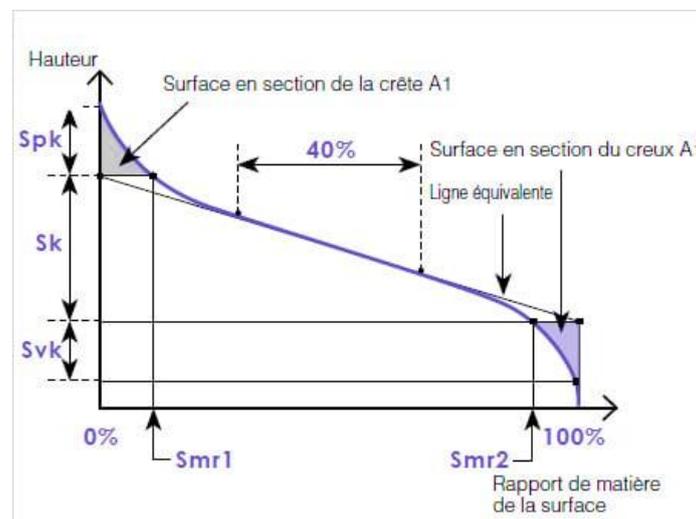


Figure I.6 les paramètres Sk , Sp_k , Sv_k , $Smr1$ et $Smr2$ [22].

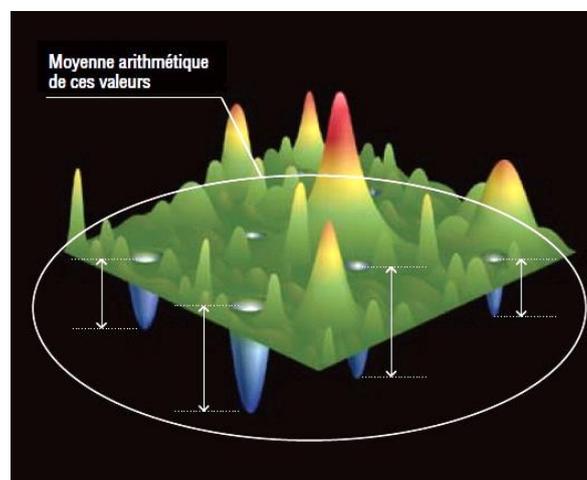


Figure I.7 Sv_k est la moyenne arithmétique de la profondeur des vallées [22].

I.5.2.2 Paramètres de volume

Paramètres fonctionnels de volume sont l'ultime évolution des indices fonctionnels et des paramètres fonctionnels Sk qui sont calculés sur la courbe d'Abbott (**Fig. I.8**). Ces paramètres de volume sont calculés par défaut avec des seuils de taux de portance à 10% et 80%, est considérée comme le seuil segmentant le sommet, le cœur et le creux. Deux paramètres de volume de matière et deux paramètres de volume de vide sont définis [23] :

- **Vmp (Volume de matière des pics)** : représente le volume de matière pour la valeur $p\%$ du rapport de matière de surface.
- **Vmc (Volume de matière du cœur)** : représente la différence entre le volume de matière au rapport de matière de surface $q\%$ et le volume de matière au rapport de matière de surface $p\%$.
- **Vvc (Volume de vide du cœur)** : représente la différence entre le volume de vide à la valeur $p\%$ du rapport de matière de surface et le volume de vide au rapport de matière de surface $q\%$.
- **Vvv (Volume de vide des vallées)** : représente le volume de vide des vallées pour la valeur $p\%$ du rapport de matière de surface.

Paramètres fonctionnels de volume est souvent utilisé pour évaluer l'abrasion et la rétention de lubrifiant. Ces paramètres sont exprimés en unité de volume par unité de surface (ml/m^2 ou $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$).

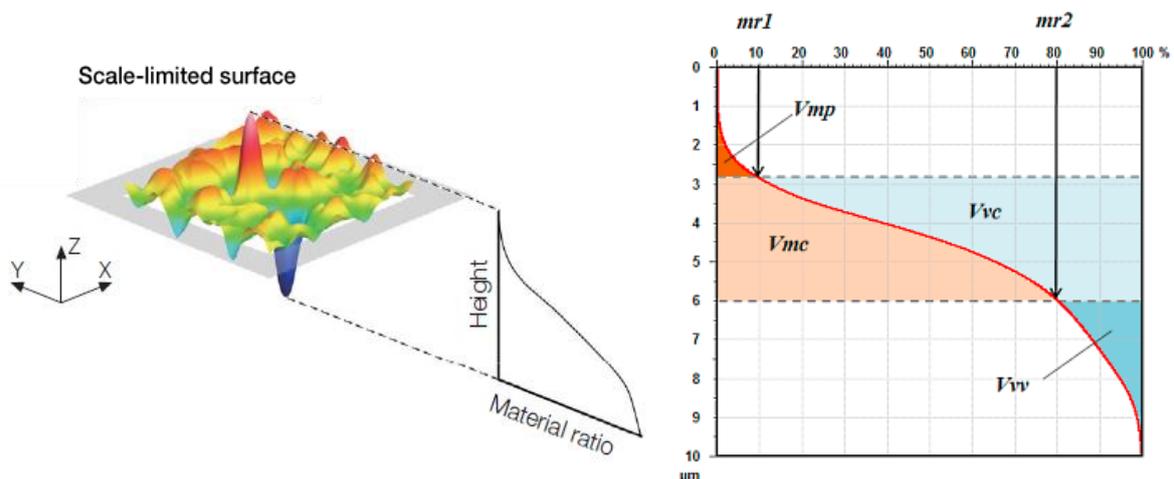


Figure I.8 Paramètres fonctionnels de volume [22].

I.6 Efforts de coupe en usinage

Les efforts de coupe en tournage se réfèrent aux forces physiques qui agissent sur l'outil de coupe lors du processus de tournage sur un tour. Le tournage est une opération d'usinage où un matériau est enlevé d'une pièce en rotation pour créer une forme spécifique. Les efforts de coupe sont cruciaux à comprendre pour obtenir des résultats de tournage de haute qualité, pour prolonger la durée de vie de l'outil et pour maintenir la sécurité de l'opérateur. Les principaux efforts de coupe impliqués dans le tournage sont les suivants (**Fig. I.9**) [24].

- **Effort de coupe (F_t)** : C'est l'effort qui agit perpendiculairement à la direction d'avance de l'outil. Elle est responsable de l'enlèvement de matériau de la pièce.
- **Effort radiale (F_r)** : Aussi appelée effort de traction ou effort latérale, elle agit radialement par rapport à l'axe de rotation de la pièce. Elle peut avoir un effet sur la précision dimensionnelle de la pièce ainsi que sur la stabilité du processus de coupe.
- **Effort axiale (F_a)** : C'est l'effort agissant dans la direction axiale de la pièce, c'est-à-dire le long de l'axe de rotation. Elle peut influencer la profondeur de coupe et l'état de surface de la pièce.
- **L'effort global de coupe (F_c)** : également appelé effort de coupe totale, est la somme vectorielle de tous les efforts de coupe qui agissent sur un outil de coupe pendant une opération d'usinage. L'effort global de coupe F_c est essentiel pour évaluer la charge totale supportée par l'outil et la machine, et pour garantir le bon fonctionnement de l'opération d'usinage (**Eq. I.1**).

$$F_c = \sqrt{F_t^2 + F_r^2 + F_a^2} \quad \text{I.1}$$

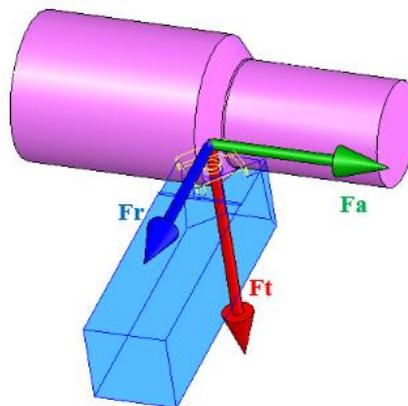


Figure I.9 Composants des efforts de coupe pendant l'opération de chariotage [24].

I.7 Endommagement des outils de coupe

L'endommagement des outils de coupe est un problème courant dans les industries de fabrication et d'usinage. Les outils de coupe, tels que les forets, les fraises et les outils de tournage, subissent divers types d'usure et d'endommagements lorsqu'ils sont utilisés pour couper, percer, façonner ou usiner différents matériaux. L'usure mécanique est le résultat direct du frottement entre l'outil de coupe et la pièce à usiner, ce qui entraîne une diminution progressive de la performance de l'outil au fil du temps. Elle peut se manifester sous différentes formes, comme l'usure de la surface de coupe, l'écaillage, la fissuration, etc. L'usure mécanique est influencée par la dureté, la vitesse de coupe, la profondeur de coupe et la composition du matériau.

I.7.1 Mécanisme d'usure des outils

Les contraintes mécaniques et thermiques qui se produisent le long du tranchant lors du processus d'usinage engendrent divers mécanismes d'usure prédominants, tant d'un point de vue mécanique que physico-chimique. Ces mécanismes conduisent à la détérioration de l'outil de coupe, et plusieurs modes d'usure se manifestent simultanément. L'importance relative de ces modes d'usure dépend de la température présente dans la zone de coupe, ainsi que par la vitesse à laquelle les copeaux se déplacent sur la plaquette. La figure I.10 présente les principaux mécanismes d'usure en fonction de la température [25].

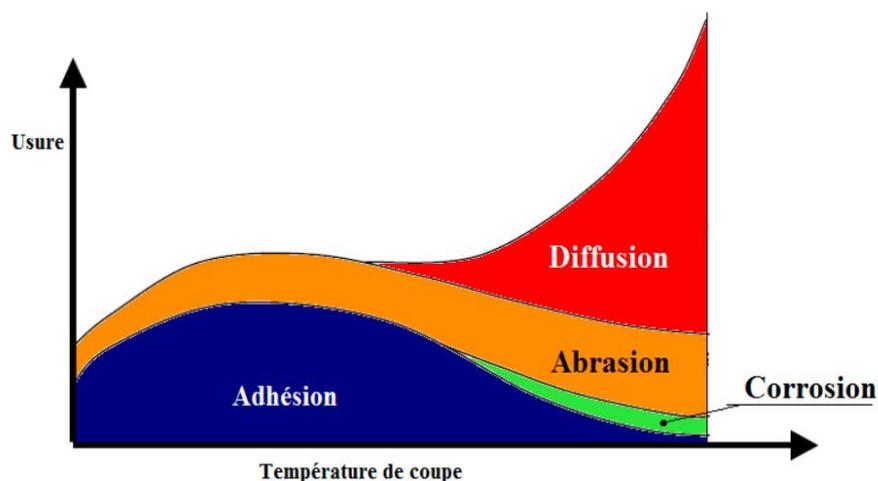


Figure I.10 Mécanisme d'usure en fonction de la température de coupe [25].

La figure **I.11** présente quelques informations générales sur les mécanismes et d'usure :

- **L'abrasion** peut se produire lorsque des particules abrasives provenant du matériau usiné ou de l'environnement entrent en contact avec l'outil de coupe.
- **L'adhésion** est un mécanisme d'usure dans lequel des matériaux provenant de la pièce en cours d'usinage ou de l'outil de coupe adhèrent à la surface opposée.
- **La diffusion** est un mécanisme par lequel des atomes ou des molécules d'un matériau migrent à travers une surface vers un autre matériau en raison de la chaleur et de la pression.
- **La corrosion** est un mécanisme d'usure chimique qui se produit lorsque des réactions chimiques entre le matériau de la pièce en cours d'usinage et l'environnement (par exemple, l'air ou des liquides) provoquent la détérioration de la surface de la pièce.

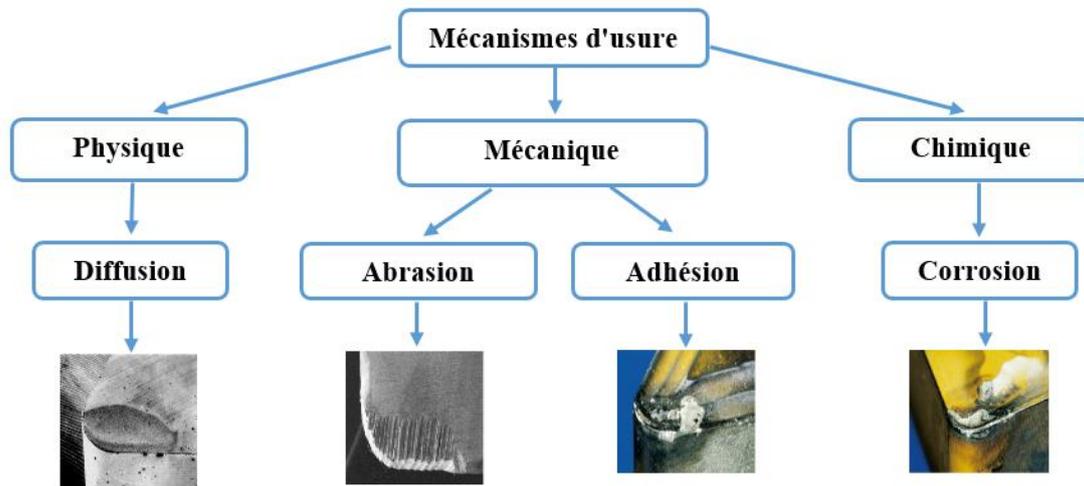


Figure I.11 Mécanismes d'usure.

I.7.2 Forme d'usure des arêtes de coupe

Les outils de coupe utilisés tournage, peuvent subir différentes formes d'usure en fonction des interactions avec la pièce en cours d'usinage et des conditions de coupe. Voici les principales formes d'usure des outils en tournage (**Fig. I.12**) [26].

- **L'usure en dépouille** : se produit lorsque la matière du matériau à couper est poussée latéralement, créant un petit espace ou une échancrure le long de l'arête de coupe. Cela peut être causé par des particules abrasives ou des efforts latéraux .
- **L'usure en cratère** : se produit lorsque des petites cavités en forme de cratères se forment sur l'arête de coupe en raison de la friction et de l'abrasion.

- **L'arête rapportée** : se produit lorsque des morceaux de matériau sont déposés ou adhérent à l'arête de coupe. Cela peut se produire lorsque le matériau coupé a une tendance à s'agripper à l'outil, créant ainsi une arête émoussée ou non efficace.
- **L'usure en entaille** : la formation de petites entailles ou rainures sur l'arête de coupe. Cela peut être causé par des particules abrasives ou des efforts mécaniques agissant.
- **L'usure par déformation plastique** : se produit lorsque la matière du matériau coupé est déformée sous l'effet de la pression et de la chaleur générées.
- **L'usure en peigne** : se caractérise par la formation de petites dents ou crans sur l'arête de coupe, ressemblant à un peigne. Cela peut se produire lorsque l'outil est soumis à des efforts de cisaillement intenses.
- **L'écaillage ou la rupture de l'arête** : se produit lorsque de petits morceaux d'arête se détachent en raison de la pression, la chaleur ou des efforts appliqués pendant la coupe.

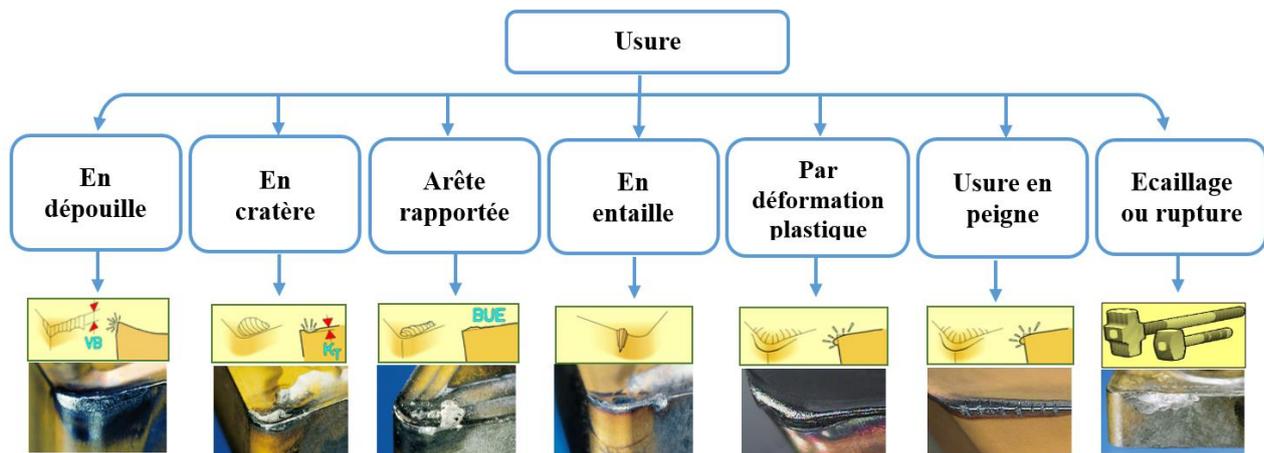


Figure I.12 Forme d'usure des arêtes de coupe.

I.8 Evolution de la température dans l'usinage

La température joue un rôle crucial dans les opérations d'usinage, car elle peut avoir un impact significatif sur les matériaux, les outils et la qualité des pièces produites. Lors de l'usinage, les outils coupants entrent en contact avec la pièce à usiner, générant ainsi de la chaleur due à la friction et à la déformation du matériau. Une augmentation excessive de la température de coupe peut entraîner une usure rapide de l'outil, une diminution de la durée de vie de l'outil et une qualité médiocre de la surface usinée. L'augmentation de la chaleur dans la zone de coupe pendant l'usinage des matériaux métalliques peut être due à plusieurs facteurs interdépendants. Ces facteurs incluent (Fig. I.13) [27].

Les frottements	• les frottements, lorsque l'outil de coupe entre en contact avec la pièce à usiner génèrent la chaleur.
Forces de coupe	• Lorsque la pièce métallique est soumise à des forces de coupe, elle subit une déformation plastique à l'échelle microscopique
Vitesse de coupe	• Une vitesse de coupe élevée peut augmenter la chaleur générée car elle accroît la friction entre l'outil et la pièce.
L'avance	• L'avance élevée peut également contribuer à l'augmentation de la chaleur en augmentant la quantité de matière enlevée.
Lubrification	• L'absence de lubrification peut augmenter le frottement entre l'outil et la pièce, conduisant à une augmentation de la chaleur générée.
Conductivité thermique	• Les matériaux à faible conductivité thermique ont tendance à accumuler davantage de chaleur dans la zone de coupe.
Conception de l'outil	• La conception de l'outil, y compris les angles de coupe et les arêtes tranchantes, peut influencer la quantité de chaleur générée.
Usure des outils	• Un outil usé a plus de chances de générer de la chaleur car il peut perdre ses propriétés de coupe efficace.
Paramètres d'usinage	• Des paramètres d'usinage mal réglés, tels que des vitesses de coupe ou d'avance inappropriées, peuvent conduire à une génération excessive de chaleur.

Figure I.13 Paramètres qui influent sur la température de coupe en tournage.

Pendant le processus d'usinage, lorsque l'outil arrache la matière, on peut observer la présence de quatre zones distinctes (**Fig. I.14**) [27].

- **Zone de cisaillement primaire (ZI)** : zone de déformation et de cisaillement. Une augmentation de la température se manifeste dans la masse du copeau et peut être transféré à l'outil et à la pièce.
- **Zone de cisaillement secondaire (ZII)** : zone de frottement copeau-outil (face d'attaque) : génération de chaleur.
- **Zone de cisaillement tertiaire (ZIII)** : zone de frottement outil-pièce (face en dépouille) : génération de chaleur.
- **Zone de forte pression hydrostatique** : bec de l'outil (arête rapportée ou zone morte : stable ou instable)

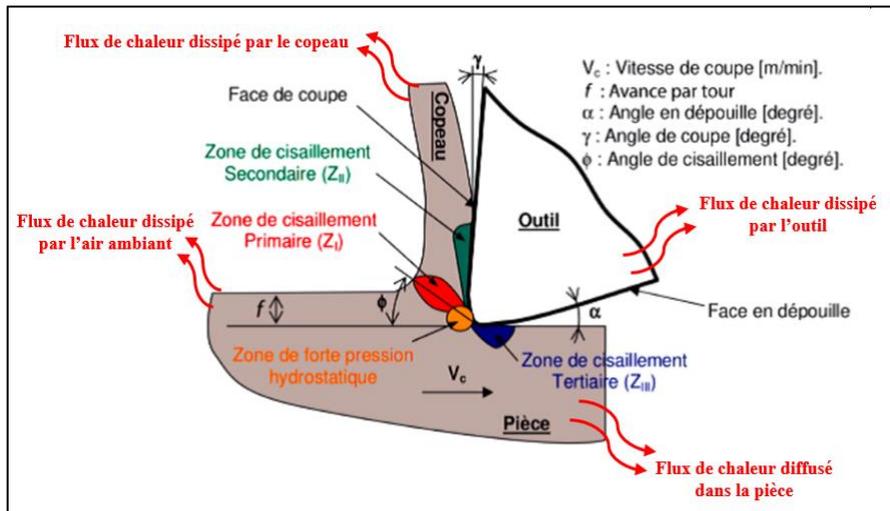


Figure I.14 Schéma des zones de dégagement de chaleur [27].

I.9 Les aciers

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone, ainsi que d'autres éléments en quantités variables, tels que le manganèse, le nickel, le chrome, etc. Ils sont caractérisés par leur résistance mécanique, leur dureté et leur capacité à être façonnés par des procédés de fabrication tels que le laminage, la forge et la soudure. Les aciers sont utilisés dans une multitude d'applications, allant des structures de bâtiments et de ponts aux véhicules, aux outils, aux appareils ménagers et bien d'autres produits manufacturés. Le pourcentage de carbone dans l'acier varie généralement de (0.02 à 2.1) % en poids (Fig. I.15) [28].

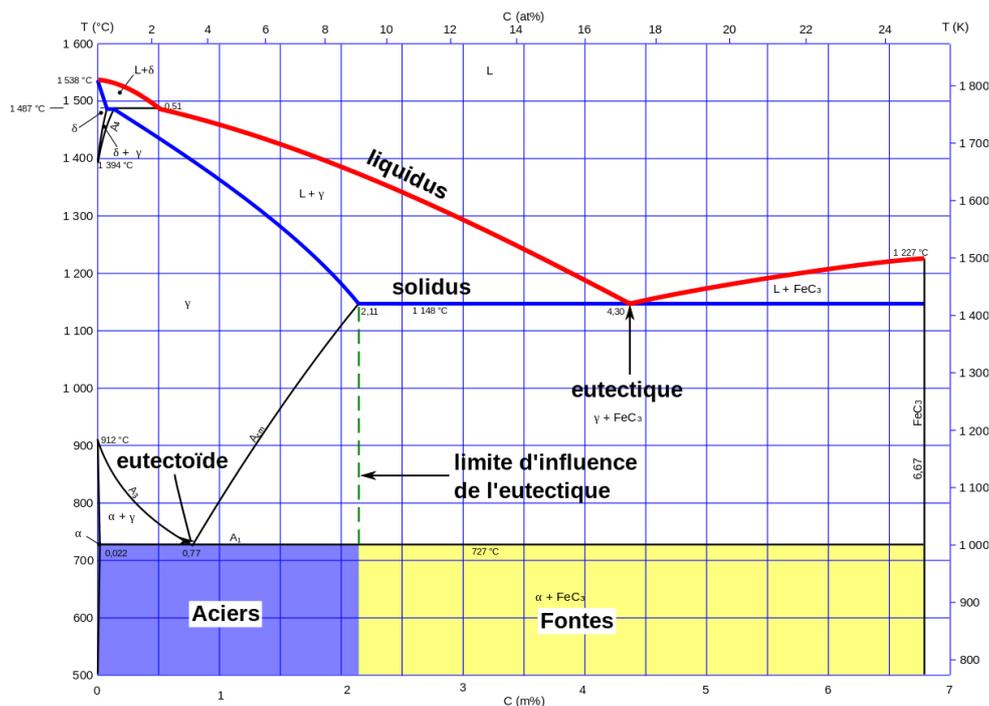


Figure I.15 Diagramme fer-carbone [28].

Les aciers à faible teneur en carbone sont plus malléables et faciles à souder, tandis que les aciers à haute teneur en carbone sont plus durs et plus résistants, mais peuvent être plus difficiles à travailler. L'ajout d'autres éléments d'alliage peut conférer des propriétés spécifiques aux aciers. La classification des aciers peut varier en fonction de plusieurs critères, tels que leur composition chimique, leurs propriétés mécaniques, leur application et leur traitement thermique. Dans notre étude on a basé sur la catégorie des aciers à outils.

I.9.1 Aciers à outils

Les aciers à outils sont des types d'acier spécialement conçus pour être utilisés dans la fabrication d'outils de coupe, de formage et d'autres types d'outils industriels qui nécessitent une grande résistance à l'usure, à la chaleur et à d'autres contraintes mécaniques. Ils sont largement utilisés dans des industries telles que la métallurgie, la fabrication d'automobiles, l'aérospatiale, la construction et d'autres domaines de l'ingénierie. Les aciers à outils sont souvent classifiés en fonction de leur composition chimique, de leurs propriétés physiques et de leurs caractéristiques d'utilisation. Voici une classification générale des aciers à outils en fonction de la température d'utilisation (**Fig. I.6**) [29] :

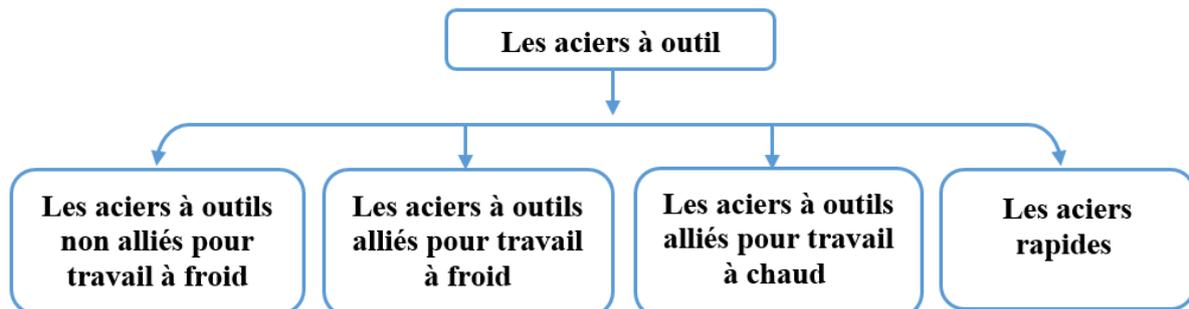


Figure I.16 Classification des aciers à outil.

I.9.2 Composition chimique et le rôle des éléments d'addition

La composition chimique des aciers à outils peut varier en fonction de l'application spécifique, mais généralement, ils contiennent certains éléments d'addition qui leur confèrent leurs propriétés particulières. Voici les éléments d'addition courants dans les aciers à outils et leurs rôles [30].

- ✓ **Carbone (C)** : Le carbone est l'élément principal qui confère aux aciers leur dureté. Les aciers à outils contiennent généralement une teneur élevée en carbone, qui peut varier

de 0.7 % à 1.5 % ou plus. Le carbone favorise la formation de carbures, ce qui renforce la structure de l'acier et augmente sa dureté.

- ✓ **Chrome (Cr)** : Le chrome est ajouté pour améliorer la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la stabilité à haute température des aciers à outils. Il forme des carbures de chrome, qui contribuent à la dureté et à la résistance à l'usure de l'acier.
- ✓ **Vanadium (V)** : Le vanadium est utilisé pour augmenter la dureté, la résistance à l'usure et la ténacité des aciers à outils. Il forme des carbures de vanadium, qui aident à améliorer la structure microscopique de l'acier et améliorent les propriétés mécaniques.
- ✓ **Molybdène (Mo)** : Le molybdène est ajouté pour améliorer la résistance à la chaleur, la résistance à l'usure à haute température et la résistance à la déformation des aciers à outils. Il contribue également à la formation de carbures de molybdène.
- ✓ **Tungstène (W)** : Le tungstène est utilisé pour accroître la dureté, la résistance à l'usure et la résistance à la chaleur des aciers à outils. Il forme des carbures de tungstène qui renforcent la structure de l'acier.
- ✓ **Cobalt (Co)** : Le cobalt est parfois ajouté pour améliorer la dureté, la résistance à l'usure et la résistance à haute température des aciers à outils. Il favorise également la cohésion des grains de l'acier à des températures élevées.
- ✓ **Nickel (Ni)** : Le nickel est utilisé pour améliorer la ténacité et la résistance à la corrosion des aciers à outils. Il peut également jouer un rôle dans la stabilité dimensionnelle de l'acier à haute température.
- ✓ **Silicium (Si)** : Le silicium est utilisé pour désoxyder l'acier et améliorer sa résistance à la corrosion. Il est également présent dans certains aciers pour améliorer la résistance à la chaleur.
- ✓ **Manganèse (Mn)** : Le manganèse est ajouté pour augmenter la résistance et la dureté de l'acier. Il agit également comme désulfurant, contribuant ainsi à améliorer la ductilité.
- ✓ **Phosphore (P)** : Le phosphore est présent en petite quantité dans la plupart des aciers, mais il est généralement maintenu à un niveau bas car il peut rendre l'acier cassant.
- ✓ **Soufre (S)** : Le soufre est généralement présent en faibles quantités dans les aciers et peut être indésirable en raison de son potentiel de rendre l'acier cassant. Cependant, dans certains cas, il est ajouté en quantités contrôlées pour améliorer l'usinabilité.
- ✓ **Titane (Ti)** : Le titane est utilisé pour former des carbures de titane, qui améliorent la dureté et la stabilité des grains à haute température.

I.10 Lubrification en usinage

La lubrification en l'usinage est une technique essentielle pour améliorer les performances de l'opération d'usinage, prolonger la durée de vie des outils et obtenir des pièces de meilleure qualité. Elle consiste à appliquer un lubrifiant, généralement sous forme d'huile ou d'émulsion, sur la zone de coupe lors de l'usinage de métaux, de plastiques ou d'autres matériaux. Le principal rôle de la lubrification en usinage est de réduire la friction entre l'outil de coupe et la pièce à usiner. Moins de friction signifie moins de chaleur générée pendant l'usinage, ce qui prévient l'usure excessive de l'outil. Les fluides de lubrification ont également un rôle essentiel dans le refroidissement de la zone de coupe. Elle facilite l'évacuation des copeaux de la zone de coupe. La lubrification peut également réduire la puissance requise pour l'usinage, ce qui peut avoir un impact sur l'efficacité énergétique des machines-outils [31].

I.10.1 Types de lubrifiants utilisés dans l'usinage

Dans l'usinage, Il existe différents types de lubrifiants utilisés en usinage en fonction des matériaux à usiner, des processus d'usinage et des exigences spécifiques de l'application. Voici quelques-uns des types de lubrifiants couramment utilisés en usinage (Fig. I.17) [31].

Huile de coupe	<ul style="list-style-type: none"> • Les huiles de coupe sont largement utilisées pour l'usinage des métaux. Elles sont formulées pour offrir une excellente lubrification et un refroidissement efficace. Les huiles de coupe minimisent la friction, réduisent l'usure des outils et contribuent à obtenir des pièces de qualité.
Émulsion	<ul style="list-style-type: none"> • Les émulsions sont des mélanges d'eau et d'huile. Elles sont utilisées pour l'usinage des métaux, des plastiques et d'autres matériaux. Les émulsions sont moins coûteuses que les huiles pures, mais elles peuvent nécessiter une surveillance constante pour maintenir la bonne concentration.
Lubrifiants solides	<ul style="list-style-type: none"> • Certains matériaux solides, tels que le graphite, le molybdène ou le disulfure de molybdène, sont utilisés comme lubrifiants solides dans des opérations spécifiques. Ces lubrifiants solides réduisent la friction et l'usure, ce qui est utile pour l'usinage de matériaux sensibles à la chaleur.
Lubrifiants spéciaux	<ul style="list-style-type: none"> • Pour des matériaux spécifiques ou des opérations particulières, des lubrifiants spéciaux peuvent être utilisés. Par exemple, des lubrifiants biodégradables peuvent être nécessaires pour des applications environnementales. Certains lubrifiants sont conçus pour l'usinage de composites, de plastiques ou d'autres matériaux spécifiques.
Graisse	<ul style="list-style-type: none"> • Les graisses sont généralement utilisées pour la lubrification des paliers et des guidages dans les machines-outils pour assurer un fonctionnement fluide.
Air comprimé	<ul style="list-style-type: none"> • Dans certaines applications, de l'air comprimé est utilisé pour souffler les copeaux et les particules de la zone de coupe, ce qui peut également servir de moyen de lubrification pour réduire la chaleur.
Lubrification par brouillard d'huile	<ul style="list-style-type: none"> • Cette méthode consiste à créer un brouillard d'huile finement pulvérisé dans la zone de coupe à l'aide d'un système d'atomisation. Cela permet une lubrification efficace tout en minimisant la quantité de lubrifiant utilisée.

Figure I.17 Types de lubrifiants couramment utilisés en usinage.

I.10.2 Impact des fluides de coupe sur l'environnement

Les fluides de coupe, également connus sous le nom de liquides de coupe, sont des substances utilisées dans l'industrie manufacturière pour refroidir, lubrifier et évacuer les copeaux de métal lors de l'usinage des pièces. Les aspects environnementaux liés à l'utilisation de ces fluides sont importants car ils peuvent avoir un impact significatif sur l'environnement. Voici quelques-uns des principaux aspects environnementaux associés aux fluides de coupe : élimination et gestion des déchets, émissions atmosphériques, consommation d'eau, toxicité des ingrédients, dégradation des sols et des eaux, alternatives plus écologiques, réduction de la consommation de fluides [32].

I.10.3 Minimisation des effets négatifs des fluides de coupe sur l'environnement

La minimisation des effets environnementaux négatifs des fluides de coupe est un objectif important dans l'industrie manufacturière, car ces fluides peuvent contenir des composés chimiques dangereux et avoir un impact significatif sur l'environnement s'ils ne sont pas gérés de manière appropriée. Voici quelques stratégies pour réduire ces effets : utilisation de fluides de coupe écologiques (biodégradables, non toxiques), réduction de la quantité de fluide utilisée, recyclage des fluides, gestion des déchets, équipement de filtration et de purification, surveillance de la qualité de l'air, substituts aux fluides de coupe (explorez des technologies et des méthodes d'usinage alternatives qui peuvent réduire la nécessité d'utiliser des fluides de coupe traditionnels, tels que la découpe au laser ou la découpe par jet d'eau), optimiser l'utilisation des fluides de coupe et de réduire les déchets, certifications environnementales pour vous assurer qu'ils répondent à des normes strictes en matière de durabilité [33].

I.10.4 Minimum quantité de lubrification (MQL)

La minimum quantité de lubrification est une technique de lubrification utilisée dans l'usinage et d'autres processus industriels où une petite quantité de lubrifiant est appliquée de manière précise pour réduire la friction et éviter la surchauffe des outils de coupe ou des pièces usinées. Contrairement à la lubrification traditionnelle, qui utilise souvent des quantités importantes de lubrifiant, l'objectif principal de la MQL est de minimiser la consommation de lubrifiant tout en maintenant des conditions de lubrification adéquates pour garantir la qualité de l'usinage.

L'intervalle de flux de lubrification dans la lubrification MQL est spécifique à chaque application et peut varier considérablement en fonction de plusieurs facteurs. Cependant, pour

vous donner quelques exemples généraux d'intervalle de flux en mL/h dans des situations courantes, voici quelques valeurs typiques à titre indicatif : dans le cas de l'usinage de l'aluminium, l'intervalle de flux peut varier de 50 mL/h à 200 mL/h, en fonction de la vitesse de coupe, de la profondeur de coupe et d'autres paramètres, pour l'usinage de l'acier, l'intervalle de flux peut être plus élevé, généralement entre 100 mL/h et 300 mL/h, en raison de la plus grande résistance du matériau et etc. Les principes de base de la MQL sont présentés dans la figure I.18 [34].

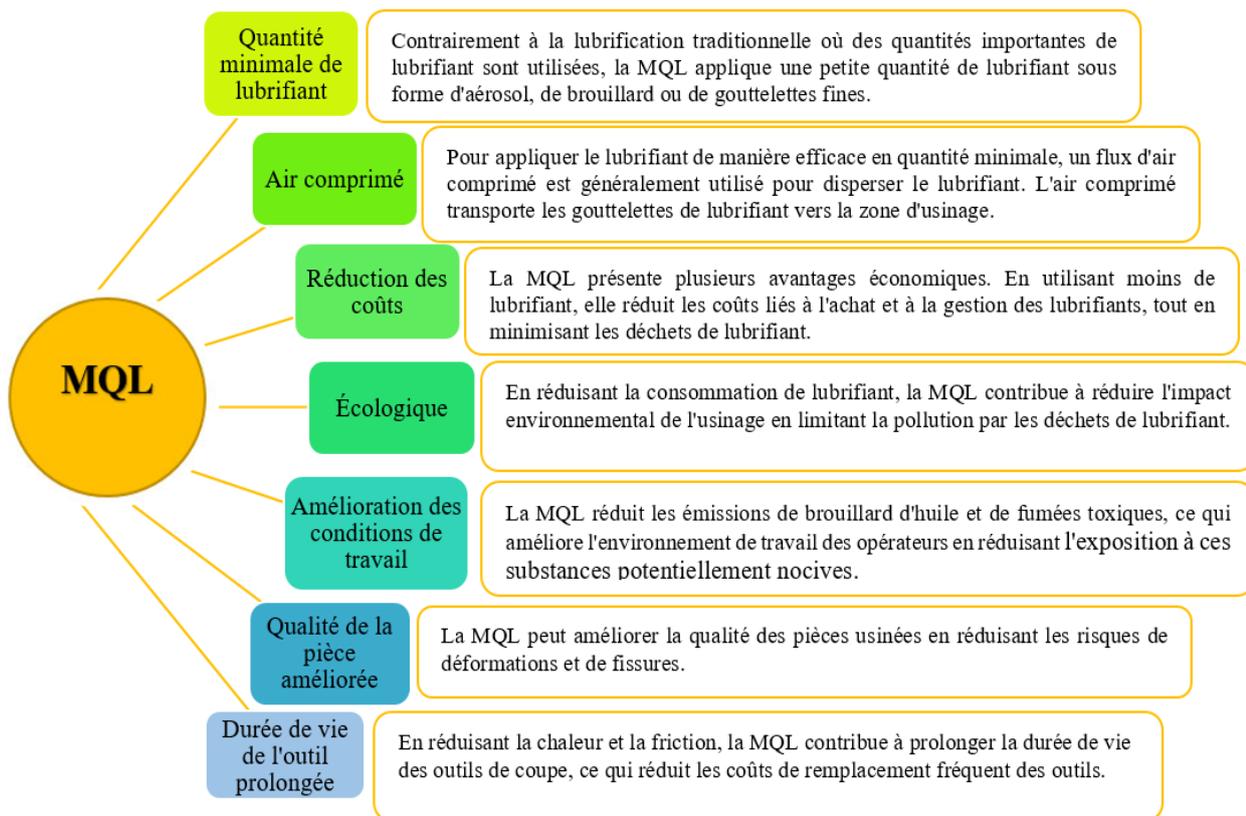


Figure I.18 les principes de base de la MQL.

Il existe principalement deux systèmes de lubrification (MQL) permettant de créer le mélange air-huile. Ces deux systèmes se différencient par le lieu de production du mélange. Dans le premier système à canal unique (**Fig. I.19**), le mélange est préparé en dehors de la machine, puis amené jusqu'à la zone de coupe par un seul canal. Cependant, ce système présente une réactivité limitée lorsqu'il s'agit de changer d'outil en raison de la longueur des canaux qui séparent l'unité principale de l'outil de coupe. L'activation du dispositif MQL ne provoque pas immédiatement la distribution de brouillard à la pointe de l'outil. En revanche, le système à double canal permet de mélanger l'air et l'huile au plus près du corps de l'outil (**Fig. I.20**). Pour mettre en place ce type de système, mais il offre une meilleure réactivité. Il convient de

souligner que, dans certaines applications, seul le système à double canal est capable de garantir une distribution optimale du brouillard d'air et d'huile, en assurant une parfaite homogénéité du mélange à la pointe de l'outil [35].

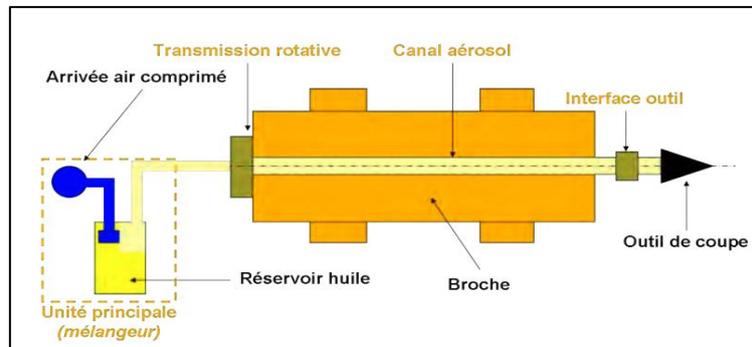


Figure I.19 Système MQL mono canal.

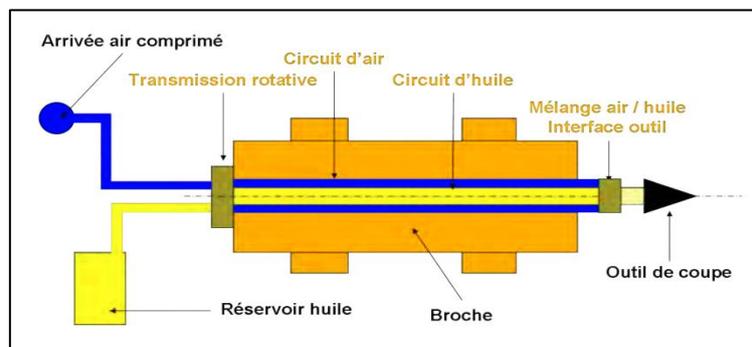


Figure I.20 Système MQL bi canal.

I.11 Etat de l'art

Diverses études ont été entreprises pour étudier les performances des outils de coupe avec et sans revêtement, l'application des différentes méthodes d'optimisation des conditions de coupe lors des opérations d'usinage des pièces mécaniques et finalement, les modes de lubrification en usinage.

I.11.1 Performance des matériaux de coupe

Badiger et al. [36] ont effectué une étude sur l'usinabilité de l'acier MDN431, difficile à usiner de dureté et de résistance élevées. Les essais sont réalisés sur avec un outil WC non revêtu et revêtu Ti multi-couche selon la technique d'optimisation de Taguchi. Au cours des expériences la variation des trois paramètres d'entrés est comme suit : $V_c = (398, 572, 625)$ tr/min, $f (0.093, 0.125, 0.175)$ mm/tr et $a_p (0.2, 0.3, 0.4)$ mm selon la matrice orthogonale Taguchi L_9 , Les paramètres de sortie étaient l'effort (F_z) et la rugosité (R_a).

Les résultats de l'optimisation révèlent que l'utilisation de l'outil (WC) revêtu de Ti-multi-couche a donné un effort de coupe (F_z) minimale avec le régime ; $V_c=625$ tr/min, $a_p=0.2$ mm, $f=0.093$ mm/tr et une rugosité (R_a) minimale avec le régime ; $V_c=625$ tr/min, $a_p=0.4$ mm, $f=0.093$ mm/tr. Les résultats optimaux obtenus avec une plaquette (WC) non revêtue montrent que l'effort minimale (F_z) est obtenu avec le régime ; $V_c=625$ tr/min, $a_p=0.2$ mm, $f=0.093$ mm/tr et pour la rugosité de surface (R_a) minimale le régime est ; $V_c=398$ tr/min, $a_p=0.4$ mm $f=0.093$ mm/tr.

Grâce à cette optimisation les auteurs ont déterminé que les plaquettes de coupe WC à revêtement Ti multicouche présente de meilleures performances que la plaquette de coupe non revêtue avec une rugosité et un effort de coupe réduits. Aussi, l'ANOVA a montré que l'avance (f) est le facteur qui influence la rugosité (R_a) et la profondeur (a_p) est le facteur qui influence le plus les efforts (F_x , F_y et F_z). Finalement, des modèles de régression ont été proposés (**Fig. I.21**).

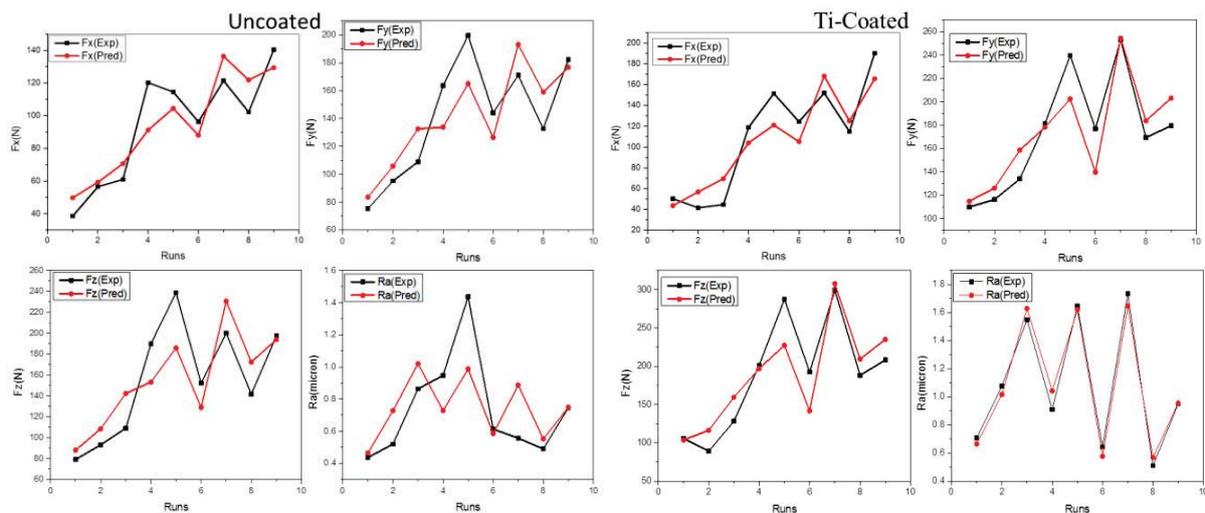


Figure I.21 Comparaison des valeurs expérimentales et prédites de F_z et R_a pour les outils WC revêtu et non revêtu [36].

Cuydes [37] a réalisé une étude en tournage continu de l'acier AISI 4340 avec trois nuances de matériaux de coupe ; le nitrure de bore cubique, la céramique et le carbure métallique de qualité P10. L'objectif de cette étude est d'étudier la performance des performances de ces outils de coupe et l'effet de la dureté de la pièce sur les réponses d'usinabilité. Les éprouvettes ont été trempées à l'huile à 250, 350 et 500°C pendant 1 h afin d'obtenir différentes valeurs de dureté. Les auteurs ont évalué les paramètres de sorties à savoir ; La rugosité de surface, l'usure de l'outil, la température de l'interface de la plaquette et les variations de micro-dureté. Un plan orthogonal de Taguchi L_{27} a été utilisé pour réaliser les

expériences avec la variation de cinq paramètres d'entrées ; la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe, la dureté de la pièce et les nuances d'outils. Les traitements statistiques des résultats par (ANOVA) ont montré que les paramètres influençant plus la rugosité de la surface sont le type d'outil de coupe (27.14 %) et l'avance (21.05 %), facteurs influençant plus l'usure sont l'outil de coupe et la vitesse de coupe avec des contribution respective (58.59 et 18.20) %, aussi les facteurs influençant plus la température sont l'outil de coupe et la vitesse de coupe avec des contribution respective (32.38 et 24.04) %. Les auteurs ont déterminé la combinaison optimale de paramètres de coupe, pour la rugosité minimale elle a été obtenue avec l'outil CBN à A3B1C1C1D1, tandis que les valeurs minimales d'usure des flancs et de température à l'interface puce-outil étaient obtenues respectivement aux réglages A1B2C2D1E1 et A1B1C1D1E1. Les résultats de la micro-dureté montrent qu'un durcissement thermique se produit sur la surface supérieure des échantillons usinés en raison des températures élevées. Le meilleur résultat a été obtenue avec l'outil CBN suivis par les outils en céramique puis en carbure P10 (**Fig. I.22**).

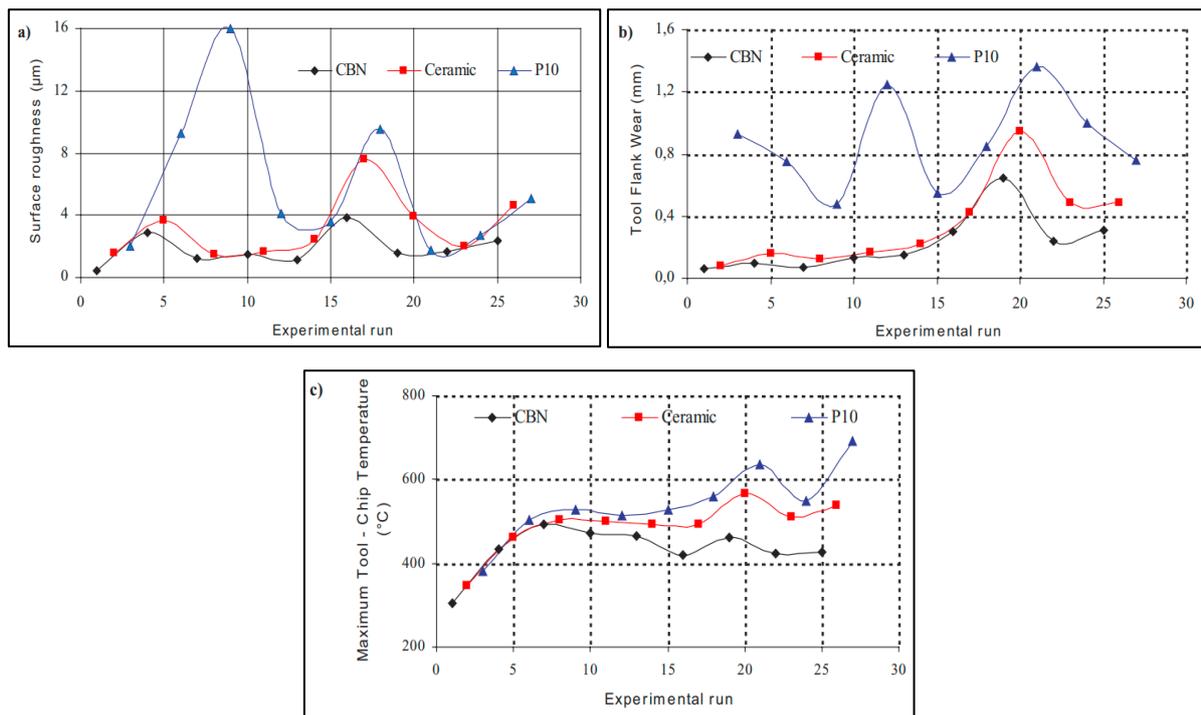


Figure I. 22 Performance des outils de coupe en termes (a) de rugosité de surface, (b) d'usure de l'outil, et (c) la température de coupe [37].

Gunay et Yucel [38] ont exécuté une étude concentrée sur l'optimisation des conditions de coupe obtenir une rugosité de surface (R_a) minimale, lors de l'usinage de la fonte blanche fortement alliée (Ni-Hard) à deux niveaux de dureté différents (50 et 62) HRC. Des essais

d'usinage ont été réalisés sur le tour CNC à l'aide d'outils de coupe en céramique et en nitrure de bore cubique (CBN). Les paramètres de coupe choisis pour réaliser les expériences sont : V_c (50, 100, 150) m/min, f (0.05, 0.075, 0.1) mm/tr et a_p (0.25, 0.50, 0.75) mm. Le plan orthogonal de Taguchi L_{18} a été utilisé pour la conception de l'expérience. Les conditions de coupe optimales ont été déterminées à l'aide du rapport (S/B). Les effets des paramètres de coupe et des matériaux de l'outil sur la rugosité de surface ont été évalués par (ANOVA). L'analyse statistique a indiqué que les paramètres qui ont le plus grand effet sur R_a pour les matériaux Ni-Hard avec 50 HRC et 62 HRC sont respectivement la vitesse de coupe et l'avance. Les plus petites valeurs de R_a se sont produites lors de l'usinage de Ni-Hard avec 62 HRC et Ni-Hard avec 50 HRC sont les suivants obtenus comme $0.262 \mu\text{m}$ et $0.280 \mu\text{m}$ respectivement avec l'outil de coupe CBN (Fig. I.23). Les résultats obtenus ont montré que la méthode Taguchi est une technique de conception et d'analyse de l'expérience qui peut être mise en œuvre avec succès dans les recherches sur l'usinage.

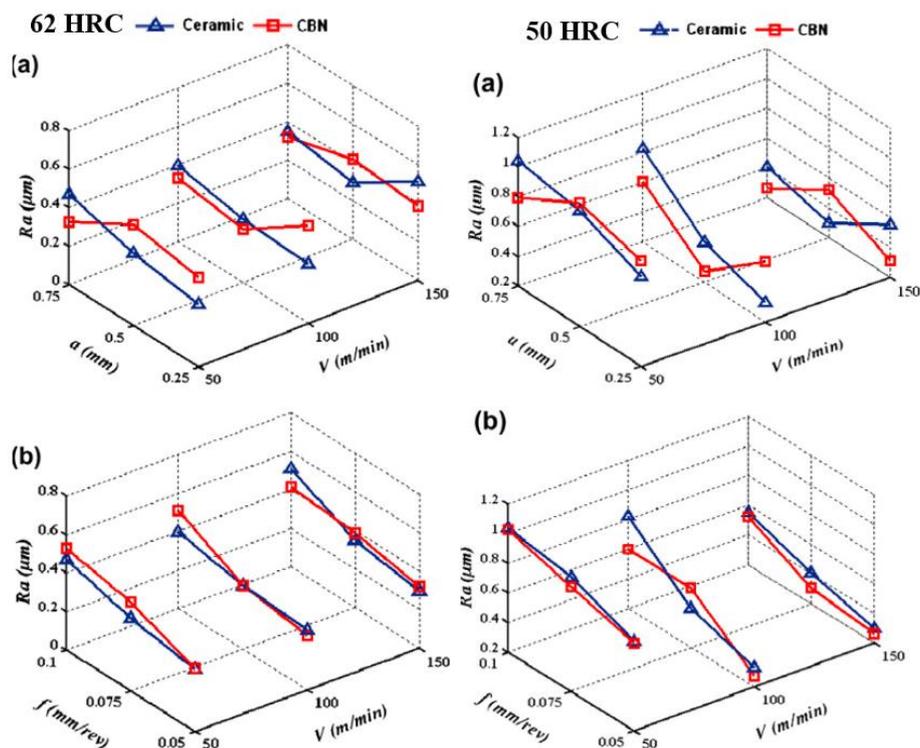


Figure I.23 Influence des paramètres de coupe sur R_a pour Ni-Hard avec 50 et 62 HRC [38].

Camuscu et Aslanont [39] ont réalisé une étude en fraisage à grande vitesse de l'acier AISI D3 trempé à 35HRC en utilisant des outils de coupe en carbure revêtu, en cermet revêtu, en alumine (Al_2O_3) à base de céramique mixte et en nitrure de bore cubique (CBN). Les performances des outils de coupe ont été comparées en ce qui concerne la durée de vie de l'outil

et l'état de surface de la pièce. Les résultats ont également été discutés en termes de coût de l'outillage. La meilleure performance de coupe a été obtenue avec l'outil CBN en termes de durée de vie de l'outil et de finition de surface. L'outil CBN a retiré un volume métallique de 260 cm^3 et a produit un fini de surface de l'ordre de $R_a 0.2$ à $0.4 \text{ }\mu\text{m}$ (**Fig. I.24**). La rugosité de surface (R_a) obtenue avec l'insert en céramique était comprise entre 0.5 et $0.6 \text{ }\mu\text{m}$, elle s'est avérée plus économique, car il était possible d'éliminer plus de volume de métal avec un insert en céramique qu'avec un insert en CBN, lorsque toutes les arêtes de coupe de l'insert en céramique sont utilisées (**Fig. I.25**). En revanche, les outils en carbure revêtu de $\text{TiCN} + \text{TiAlN}$ et les outils en cermet revêtu de TiAlN n'ont pas montré de bonnes performances lors des opérations de coupe à grande vitesse mais présentaient des performances similaires en termes de durée de vie et de finition de surface, tandis que le carbure revêtu de TiCN présentait les pires performances. Les auteurs affirment que le revêtement TiAlN , est plus efficace que le matériau de revêtement TiCN pour les applications d'usinage des aciers à outils trempés. De plus, les revêtements multicouches devraient être préférés aux revêtements à couche unique. Ils doivent plutôt être utilisés à des vitesses de coupe faibles ou modérées.

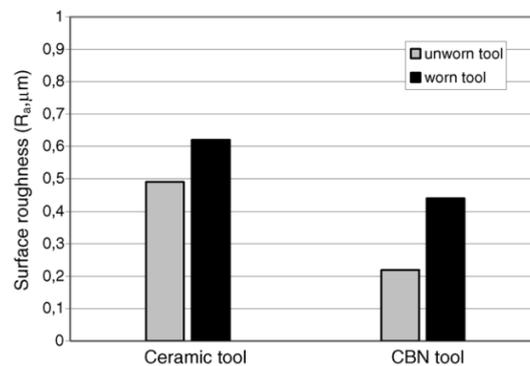


Figure I.24 Rugosité de la surface avec des outils en céramique Al_2O_3 mixte TiCN et les outils CBN [39].

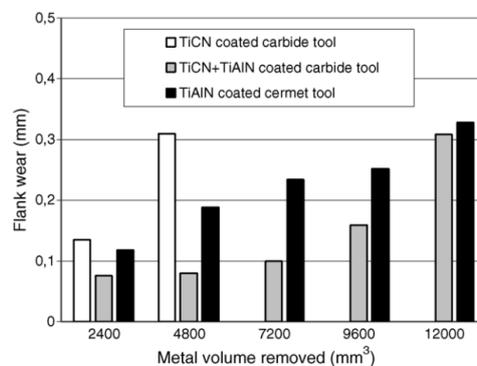


Figure I.25 Usure (V_b) en fonction du volume de métal enlevé avec des outils en carbure et en cermet revêtus [39].

Kumar et al. [40] ont réalisé une investigation qui s'est concentrée sur la modélisation mathématique, l'optimisation, la durée de vie de l'outil et l'analyse économique lors du tournage dur de finition de l'acier AISI D2. Des plaquettes en carbure revêtues par CVD ($\text{TiN/TiCN/Al}_2\text{O}_3$) et des plaquettes en carbure non revêtues ont été utilisées durant les essais. La méthode (RSM) et l'approche (GRA) ont été mises en œuvre pour la modélisation et l'optimisation multi-réponse. Une étude statistique et économique comparative a été réalisée pour les deux plaquettes, et l'adéquation du modèle de corrélation a été vérifiée. Les résultats trouvés par les auteurs montrent que valeurs expérimentales et prédites pour toutes les réponses étaient très proches les unes des autres, ce qui implique la signification du modèle et indique aussi que les coefficients de corrélation sont proches de l'unité. La durée de vie observée pour la plaquette en carbure revêtue était 15 fois supérieure à celle de la plaquette en carbure non revêtue à $V_b=0.3$ mm. L'utilisation de l'outil en carbure revêtu a permis de réduire les coûts d'usinage d'environ 3.55 fois par rapport à la plaquette en carbure non revêtue, et a apporté des avantages économiques. Les auteurs affirment que la plaquette en carbure revêtue multicouche est plus performante que la plaquette en carbure non revêtue en termes de l'usure, la température de coupe, et de la rugosité (**Fig. I.26**).

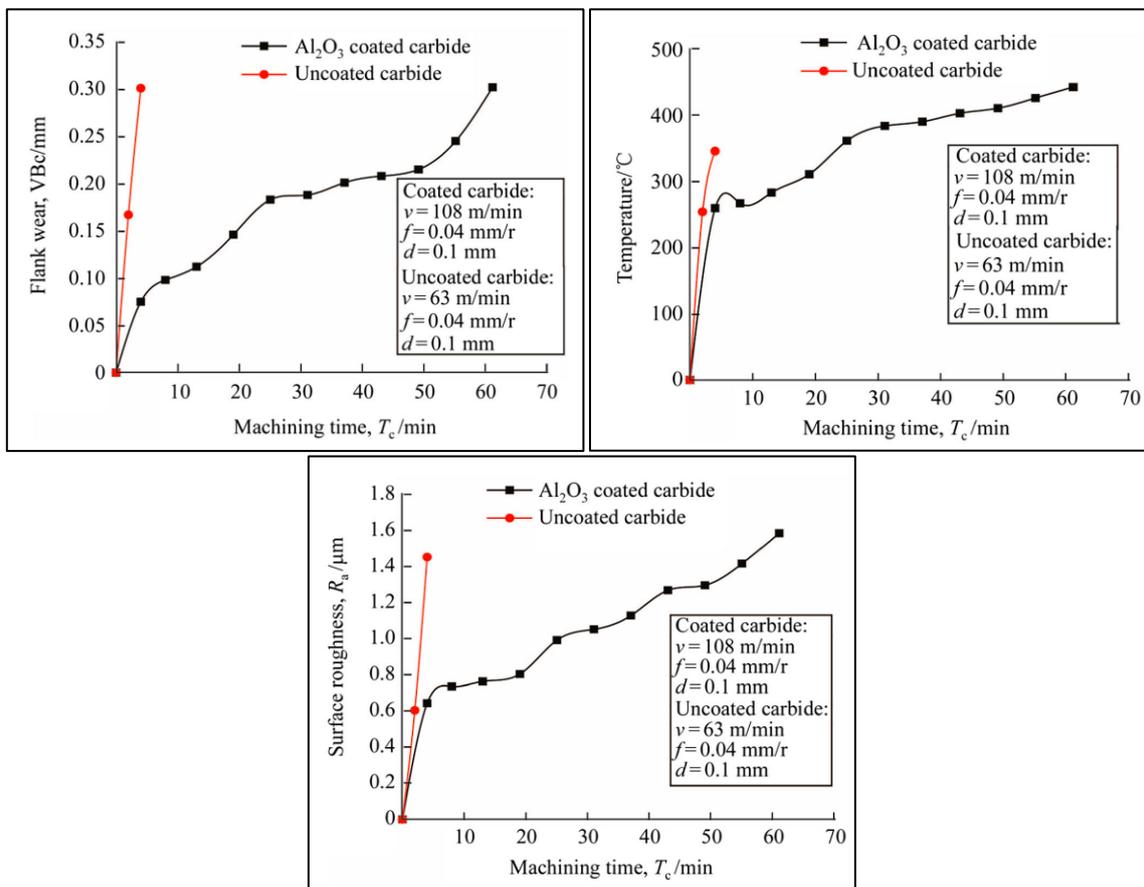


Figure I. 26 Temps d'usinage en fonction de V_b , T° et R_a [40].

I.11.2 Méthodes d'optimisation

Viswanathan et al. [41] ont appliqué la méthode (GRA) durant le tournage d'un alliage de magnésium à l'aide d'une plaquette de coupe en carbure de tungstène non revêtue dans des conditions de coupe à sec et MQL. L'objectif est de trouver un régime de coupe optimal des paramètres d'entrée tels que les conditions de coupe (V_c , f et a_p) comme facteurs de coupe et les réponses (V_b , R_a , F_z et t°). L'optimisation a été réalisée d'abord comme une optimisation mono-objective en utilisant la méthode Taguchi ; ensuite comme une optimisation multi-objectif par le biais de l'analyse (GRA) basée sur la méthode Taguchi. Les résultats de l'optimisation mono-objectif ont donné la combinaison d'une V_c de 40 m/min, d'une f de 0.10 mm/tr et d'une a_p de 0.5 mm sous lubrification MQL pour l'usure de l'outil et la température de coupe, et la même combinaison a permis d'optimiser l'effort de coupe en conditions à sec. La condition optimale pour la rugosité de surface était une vitesse de coupe de 140 m/min, 0.10 mm/tr d'avance, 0.5 profondeur de coupe sous lubrification MQL. La technique GRA a permis d'obtenir des conditions optimales, à savoir V_c de 90 m/min, f de 0.1 mm/tour et a_p de 0.5 mm sous lubrification MQL qui minimise les réponses simultanément (**Fig. I.27**). Il a été clairement démontré que les indicateurs de performance (V_b , R_a , F_z et t°) sont significativement améliorés dans le tournage de l'alliage de magnésium à l'aide de la GRA basée sur Taguchi. En général, le système MQL donne les meilleurs résultats par rapport à l'usinage à sec.

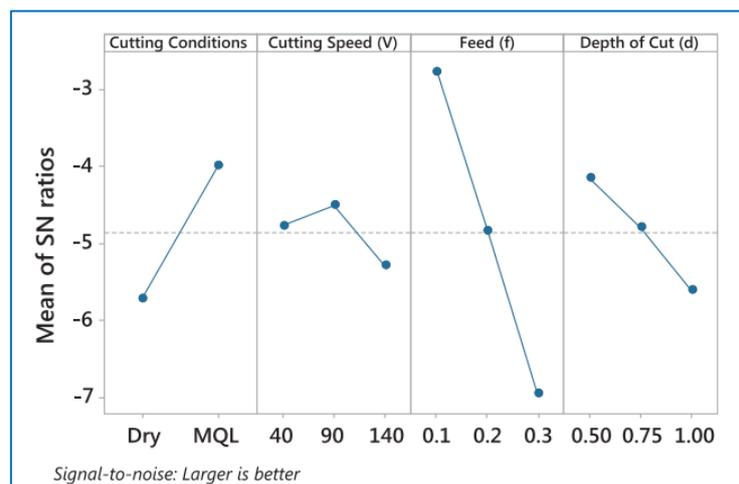


Figure I.27 Graphique de l'effet principal du rapport S/B pour le niveau de relation grise [41].

Sateesh et al. [42] ont utilisé l'analyse Taguchi-GRG pour trouver les valeurs optimales (V_c , f et a_p) de R_a et T° au niveau de la pointe de l'outil de coupe. L'usinage a été réalisé sur Al6063A-T6 à l'aide d'outils en carbure. L'analyse Taguchi-GRG est effectuée sur un réseau orthogonal L_9 pour trouver la vitesse, l'avance et la profondeur de coupe optimales afin d'obtenir une rugosité minimale et une faible température de l'outil de coupe. Les résultats de l'analyse montrent que la vitesse optimale (N_3) = 1400 tr/min, l'avance (F_1) = 0.1 mm/min et la profondeur de coupe (D_3) = 0.75 mm permettent d'obtenir une rugosité de surface minimale (R_a) de 0.855 micron et une température de l'outil de coupe (T) = 457°C pour l'usinage de l'Al6063A-T6 sur une machine de tournage à commande numérique.

Gopal et al. [43] ont réalisé une étude visant à examiner l'effet du matériau et des paramètres d'usinage sur les paramètres de performance (F_z , R_a et t°) pendant le fraisage d'un composite à matrice métallique (MMC) de magnésium (Mg) à l'aide d'un outil en carbure. Les expériences de fraisage ont été menées sur la base d'un plan orthogonal de Taguchi L_{27} . Une optimisation multi-objectifs a été réalisée en utilisant les méthodes (GRA) et (TOPSIS). Les deux techniques ont permis d'obtenir des paramètres optimaux similaires, à savoir des particules de 10 μm , un renfort de 5 %, un outil de 8 mm de diamètre, une vitesse de 710 tr/min, une avance de 20 mm/min et une profondeur de 0.5 mm (**Fig. I.28**). Ce régime optimal a permis d'obtenir un effort d'alimentation de 139.48 N, un effort d'alimentation transversale de 63.92 N, un effort de poussé de 42.6 N, une température de 68.96 °C et une rugosité de surface de 0.198 μm . L'ANOVA a été réalisée pour identifier l'importance et l'effet de chaque variable du processus sur les paramètres de réponse.

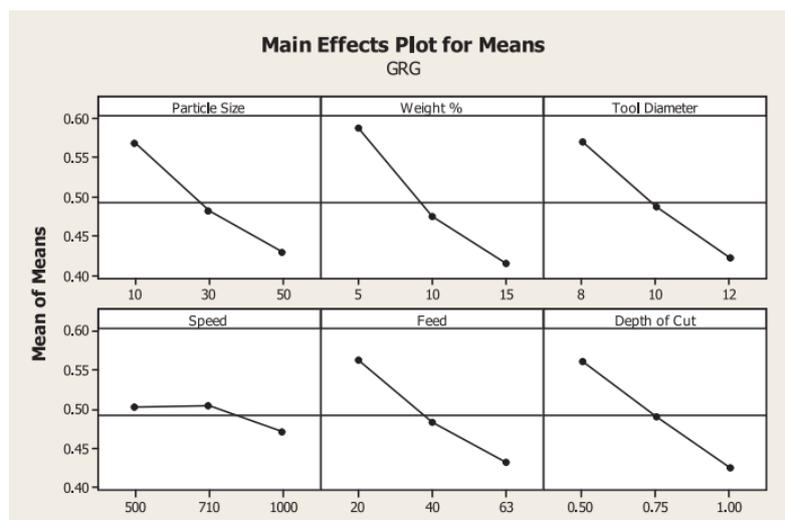


Figure I.28 Effet des paramètres du processus sur la GRG [43].

Lakshmanan et al. [44] ont étudié le tournage de l'aluminium l'Al7075 usiné par un outil en carbure de tungstène dans des conditions sèches et humides en faisant varier les paramètres d'entrée (V_c, f et a_p). L'analyse GRA est effectuée pour trouver la valeur minimale de la rugosité et le MRR est maximal. Les paramètres d'usinage optimaux pour le tournage de l'Al7075 sont recommandés à la fin de l'étude sur la base de la GRA et confirmés par l'utilisation de l'ANOVA. Les paramètres de coupe suggérés pour le tournage de l'Al7075 sont les suivants : vitesse = 1000 tr/min, avance = 0.05 mm/tr profondeur de coupe = 0.75 mm avec une plaquette en carbure de tungstène sous condition humide (**Fig. I.29**). Finalement, les auteurs affirment que l'analyse relationnelle grise (GRA) est une technique efficace qui implique des réponses multiples.

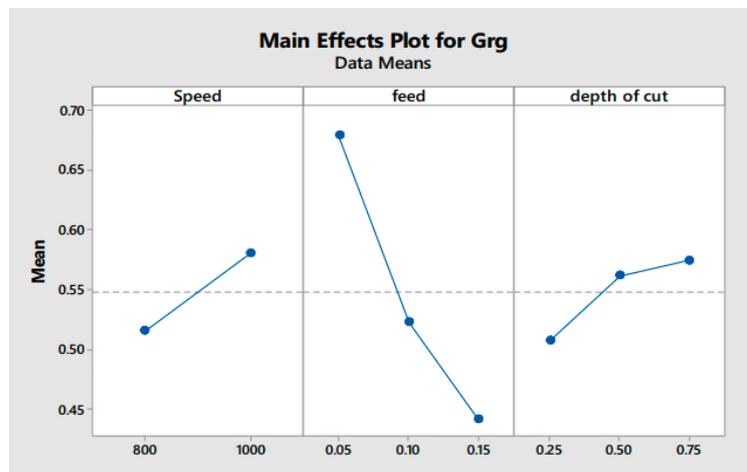


Figure I.29 Représentation graphique des résultats de l'ANOVA [44].

Narayanan et al. [45] ont présenté une recherche visant à trouver les paramètres optimaux qui permettent de maximiser (MRR) et de minimiser (R_a) lors du tournage du polymère (PTFE). La méthodologie de surface de réponse a été utilisée est un plan composite centrale basée sur 31 expériences menées en tenant compte de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur et le débit du liquide de refroidissement comme paramètres d'usinage a été adopté. L'analyse de la variance est utilisée pour prouver l'adéquation du modèle de régression quadratique des paramètres d'usinage. Les deux techniques d'optimisation (GRA) et (TOPSIS) ont été utilisées et comparées dans cette étude (**Fig. I.30**).

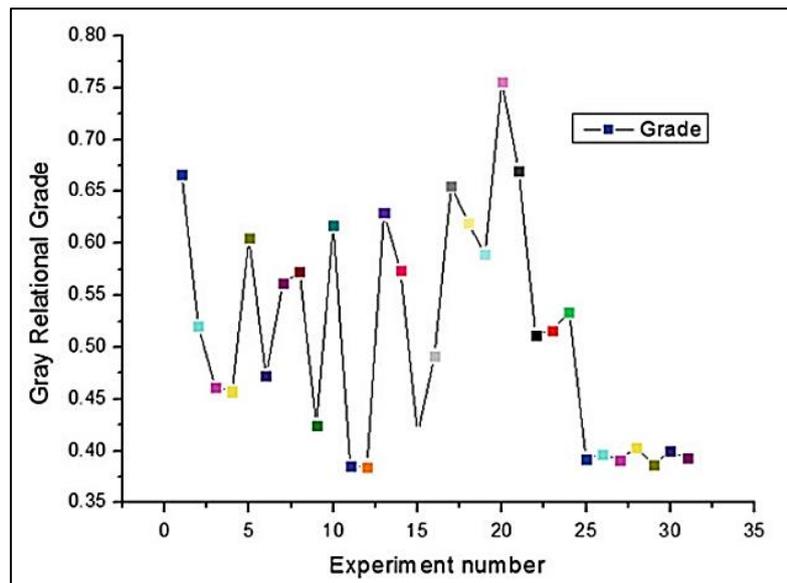


Figure I.30 Grade relationnel gris lors des expériences respectives [45].

Muniappan et al. [46] ont étudié l'optimisation des paramètres de coupe à l'aide de la technique (MOORA) pendant l'usinage par électroérosion à fil de l'alliage Al6061. Les expériences ont été réalisées à l'aide de la matrice de conception L_{27} de Taguchi, en faisant varier les paramètres d'usinage tels que (le courant, le temps d'impulsion, la tension de réglage de l'écart, le temps d'arrêt de l'impulsion, l'avance considérée et la tension du fil), afin d'optimiser (la rugosité (SR) et la largeur du trait de scie). Les résultats optimaux sont adoptés dans l'étude de validation et les résultats basés sur WEDM peuvent être améliorés efficacement par la méthode MOORA (**Fig. I .31**).



Figure I.31 Dispositif expérimental WEDM [46].

Singaravel et al. [47] ont utilisé la méthode MOORA et la technique de l'entropie pour optimiser les paramètres de coupe lors de l'usinage par tournage de l'acier EN25. Les paramètres d'usinage sélectionnés selon le plan de Taguchi L_{18} sont la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe et le rayon du nez de l'outil. L'objectif de l'optimisation par la méthode MOORA est la minimisation de la micro-dureté, de la rugosité et la maximisation du (MRR). Le concept d'entropie a été utilisé pour assigner les critères de poids de chaque objectif considéré. Les résultats obtenus dans l'analyse sont validés et les résultats basés sur les réponses du processus de tournage peuvent être efficacement améliorés.

Do Duc et al. [48] ont fait état d'une optimisation multi-objective du processus de rectification de la surface de l'acier SAE420. La méthode Taguchi a été appliquée pour concevoir la matrice expérimentale. Les paramètres d'entrée ont été choisis pour chaque expérience : le nombre de rainures sur la surface cylindrique de la meule, la vitesse de la pièce, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe. Les paramètres de sortie mesurés sont la rugosité de la surface et les vibrations du système. La technique DEAR a été appliquée pour déterminer les valeurs des paramètres d'entrée afin d'obtenir les valeurs minimales des sorties. En utilisant cette technique, les valeurs optimales du nombre de rainures de la meule, de la vitesse de la pièce, de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe étaient respectivement de 18 rainures, 15 m/min, 2 mm/course et 0.005 mm. Les résultats de la validation de la rugosité de surface et des vibrations dans les directions X, Y et Z étaient respectivement de (0.826, 0.53, 0.549 et 0.646) μm . Ces résultats ont été grandement améliorés par rapport aux résultats expérimentaux normaux. La méthode Taguchi et la technique DEAR peuvent être appliquées pour améliorer la qualité de la surface de rectification et réduire les vibrations du système technologique.

Pradhan et al. [49] ont réalisé une optimisation multi-objectifs de (R_a , T° et V_b) par la méthode (WASPAS) pendant l'usinage d'un alliage de titane. Dans cette étude, le plan de Taguchi L_{27} est utilisé pour mener l'expérience. Trois paramètres de coupe à trois niveaux sont sélectionnés, à savoir la vitesse de coupe, l'avance et le type de plaquettes de coupe (plaquette de coupe sans microsillon, plaquette de coupe avec microsillon triangulaire, plaquettes de coupe avec microsillon triangulaire avec lubrifiant solide). L'ANOVA est effectuée pour connaître le pourcentage de contribution de chacun des paramètres de coupe.

Vaddi et al. [50] ont réalisé une étude expérimentale pendant l'usinage (EDM) d'un alliage de titane (Ti-6Al-4 V). Le réseau orthogonal L_9 de Taguchi est utilisé pour mener les expériences. Les paramètres du processus, tels que le courant de pointe, le temps d'activation et le temps de désactivation de l'impulsion, sont choisis pour cette étude. L'objectif de ce travail est de trouver la combinaison optimale qui donne le maximum (MRR) et le minimum d'usure (TWR) et de rugosité de surface (SR) en utilisant la méthode DEAR. La méthode DEAR est utilisée pour trouver la valeur MRPI afin d'obtenir une combinaison optimale des paramètres du processus. La combinaison obtenue est (A3B1C3) où la valeur de MRR est de $2.30 \text{ mm}^3/\text{min}$, TWR est de $0.84 \text{ mm}^3/\text{min}$ et SR est de $7.023 \mu\text{m}$ (**Fig. I.32**).

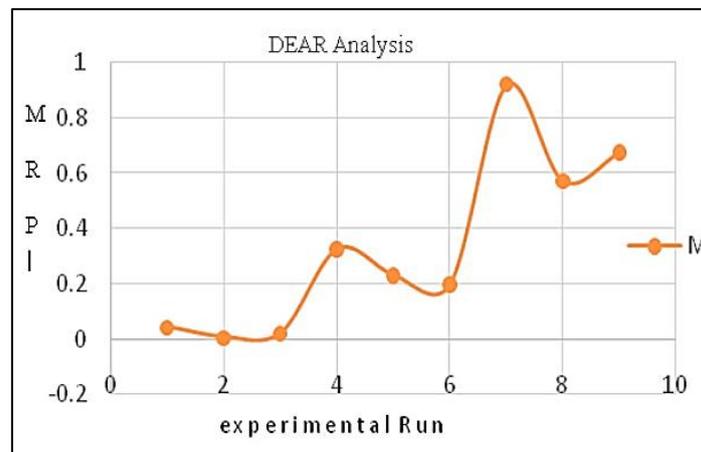


Figure I.32 Valeurs MRPI pour l'analyse DEAR [50].

Venkateshwar Reddy et al. [51] ont étudié l'optimisation des paramètres de coupe pendant l'usinage de l'Inconel 625 en utilisant les méthodes WASPAS et MOORA. Les auteurs indiquent que cette méthode est efficace pour l'optimisation multi-objective. La morphologie de la surface usinée est étudiée par microscopie électronique à balayage, plus le débit d'abrasif est élevé, plus l'état de surface est rugueux (**Fig. I.33**).

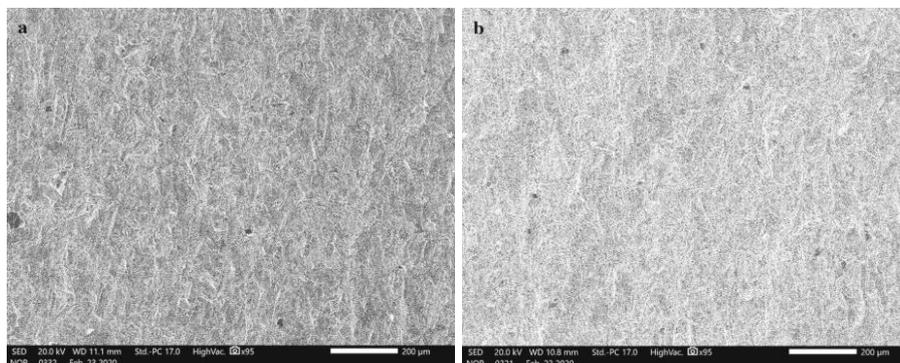


Figure I.33 Morphologie de la surface usinée pour : **a)** un faible débit d'abrasif et **b)** débit d'abrasif élevé [51].

Prasad et al. [52] ont effectué une étude sur l'usinage par jet abrasif (AJM) de l'alliage Nickel 233. L'objectif était d'obtenir une combinaison optimale de paramètres d'enlèvement de matière (MRR), la rugosité (Ra) et l'angle de conicité (Ta) en utilisant la méthode WASPAS et MOORA. Les résultats obtenus à l'aide de la méthode WASPAS sont identiques à ceux obtenus par la méthode MOORA, ce qui confirme l'applicabilité et la potentialité de ces deux méthodes MCDM pour résoudre les problèmes de sélection des paramètres du procédé AJM.

Chate et al. [53] ont effectué une étude sur l'usinage par tournage CNC de l'acier doux à l'aide de plaquettes en carbure. Le plan orthogonal de Taguchi L_{27} est utilisé pour optimiser le processus de tournage et analyser les facteurs (V_c , f et a_p) sur (MRR), (SR) et (CE). En outre, des études sont faites pour optimiser l'indice de durabilité en tenant compte des aspects économiques (MRR plus élevé), sociaux (réduction souhaitée du taux d'enlèvement de matière et de l'erreur de circularité) et environnementaux (usinage à sec). Pour atteindre cet objectif, deux méthodes d'optimisation populaires à savoir, l'analyse des enveloppes de données (DEAR), et l'optimisation multi-objectifs sur la base de l'analyse des ratios (MOORA) sont pris en compte. Ces deux méthodes sont comparées entre eux et proposent une condition optimale unique pour le processus de tournage (**Fig. I.34**).

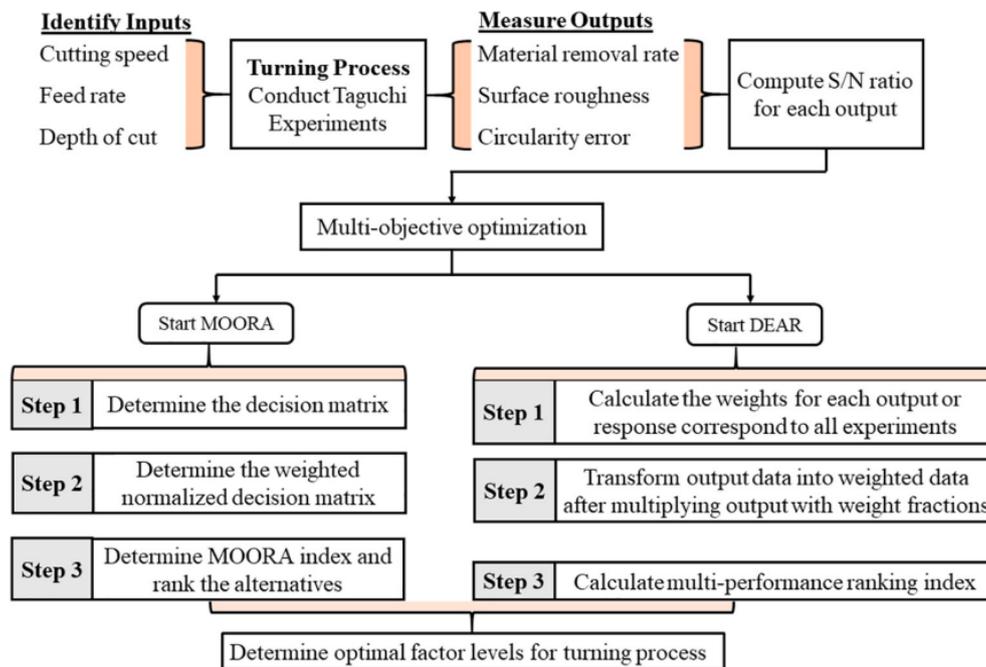


Figure I.34 Organigramme illustrant l'optimisation du processus de tournage [53].

I.11.3 Lubrification MQL

Salur et al. [54] ont réalisé une étude qui s'intéresse aux effets de deux environnements de coupe différents, à savoir le MQL et un environnement sec, sur plusieurs aspects importants lors du fraisage de l'acier AISI 1040. L'étude se penche plus particulièrement sur trois aspects clés : l'usure, la température et (P_c), par contre, la vitesse, l'avance et l'environnement d'usinage sont pris comme paramètres d'entrée. Pour analyser les effets des facteurs influençant le processus, les auteurs ont utilisé l'analyse de la variance. Aussi, le rapport signal/bruit de Taguchi a été utilisé pour déterminer les meilleures réponses en termes de qualité. Les résultats ont montré que le système MQL a fourni de meilleures performances par rapport au fraisage à sec en réduisant, l'usure de l'outil, la température de coupe et la consommation d'énergie des améliorations de 30.9 %, 32.5 % et 16.9 % respectivement (**Fig. I.35**).

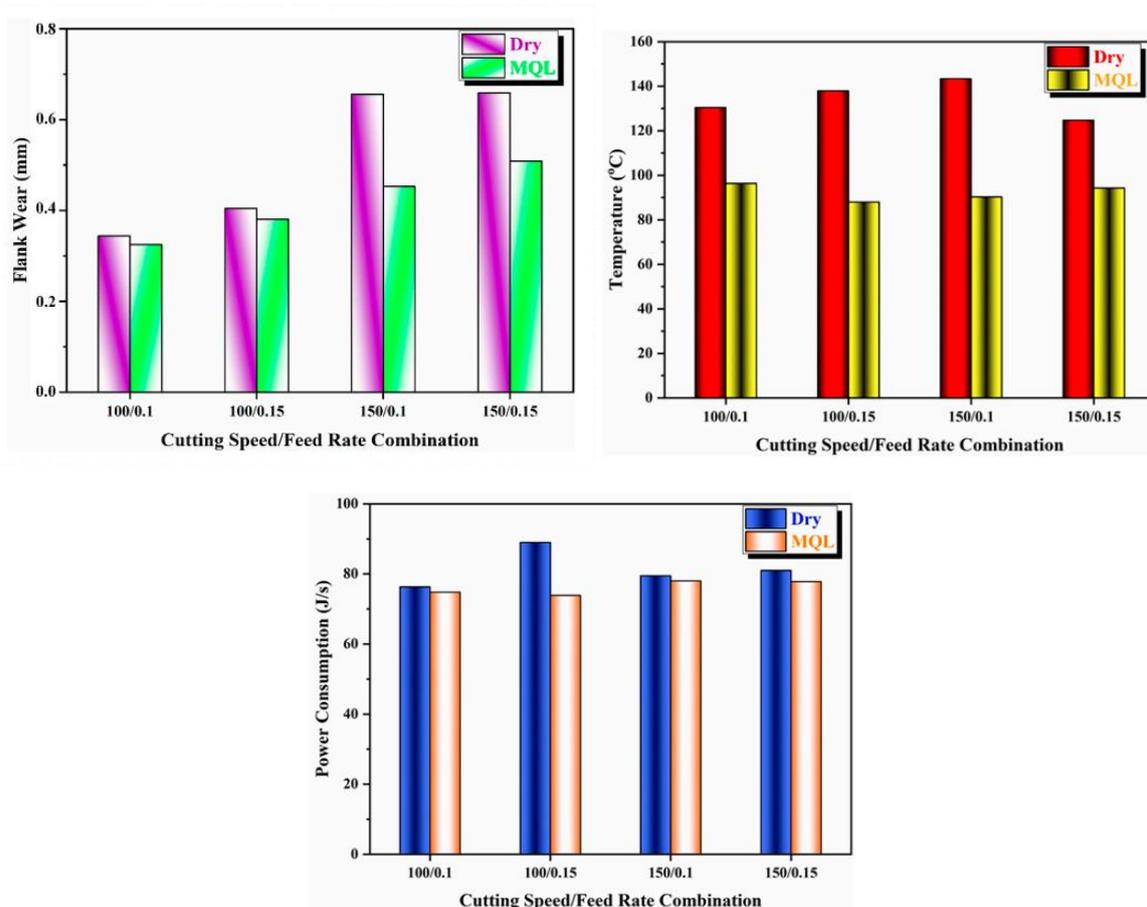


Figure I.35 Effets de l'environnement de coupe sur l'usure, la température et la consommation d'énergie [54].

Elbah et al [55] ont présenté dans cet article l'évaluation des performances des méthodes de lubrification (à sec, MQL et lubrification abondante) durant le tournage dur avec un acier faiblement allié à haute résistance AISI 4140 avec une céramique mixte revêtue (CC6050). Afin d'évaluer les paramètres de sortie à savoir, la rugosité, les composantes de l'effort de coupe et l'usure de l'outil, un certain nombre d'expériences d'usinage factorielles basées sur des plans d'expériences statistiques à quatre facteurs (V_c , f , a_p et r) ont été réalisées. Les résultats ont montré que la rugosité 3D obtenue avec le procédé d'usinage MQL s'est considérablement améliorée par rapport aux autres méthodes de lubrification. Par exemple : $Ra_{MQL} = 0.089 \mu\text{m}$, $Ra_{lub} = 0.110 \mu\text{m}$ et $Ra_{sec} = 0.129 \mu\text{m}$ (**Fig. I.36**). Ensuite, l'approche de la fonction de désirabilité a été utilisée pour définir les paramètres d'usinage optimaux. Enfin, les plages de meilleures conditions de coupe sont proposées pour une production industrielle en série.

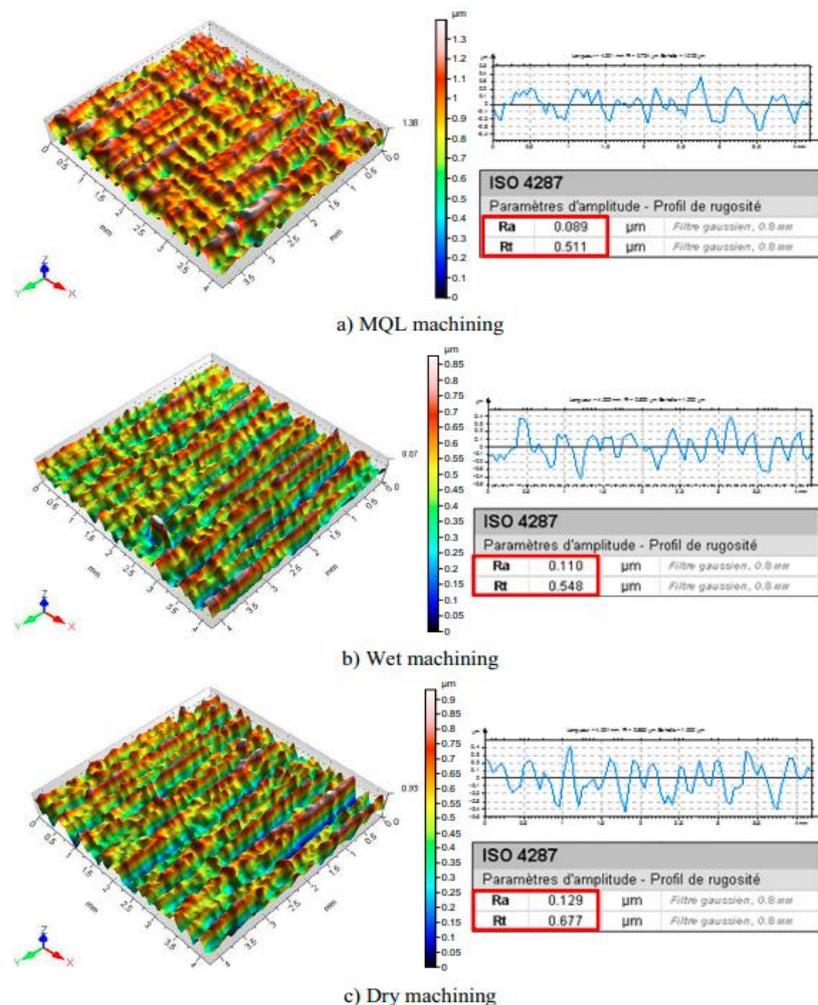


Figure I.36 Topographie de surface 3D pour le tournage : (a) MQL, (b) humide et (c) à sec [55].

Nouioua et al. [56] ont étudié l'influence de différents paramètres de coupe sur les différents facteurs d'usinage (la rugosité de surface, l'effort de coupe, la puissance de coupe, le taux d'enlèvement de copeaux et l'usure de l'outil) durant le tournage de l'acier X210Cr12 avec une plaquette en carbure de tungstène à revêtement multicouche, en utilisant différentes conditions de coupe (V_c , f et a_p), différents rayons du bec (r) et différent environnement de lubrification (à sec, lubrifié et MQL). Les auteurs ont utilisé le tableau orthogonal de Taguchi L_{18} pour concevoir les tests, déterminé l'effet des conditions de coupe à l'aide de l'ANOVA et développé des modèles mathématiques à l'aide de la méthode RSM. Les résultats trouvés indiquent que la lubrification par quantité minimale (MQL) conduit à une amélioration importante en termes de durée de vie de l'outil de coupe par un gain de 23~40% par rapport à l'usinage à sec et lubrifié (**Fig. I.37**). Le MQL est un moyen intéressant de minimiser les coûts de lubrification et de protéger la santé des opérateurs et l'environnement tout en conservant une meilleure qualité d'usinage.

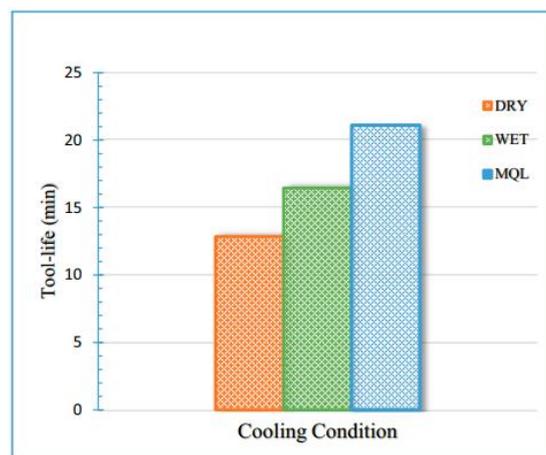


Figure I.37 Durée de vie de la plaquette de coupe à sec, humide et MQL [56].

Dans un autre travail de recherche, **Nouioua et al. [57]** ont utilisé la méthode (RSM) et les techniques de réseau neuronal artificiel (ANN) pour rechercher des modèles de prédiction qui conduisent à des meilleures performances d'usinage. L'expérience a été établie à l'aide d'un plan de Box-Behnken (BBD) pour mesurer l'effort tangentiel et la rugosité en fonction des combinaisons de vitesse de coupe, d'avance et de la profondeur de coupe lors du tournage de l'acier X210Cr12 en usinage lubrifié, à sec et MQL. La comparaison entre les modèles ANN et RSM prouve que la méthode ANN fournit des résultats plus précis par rapport à la méthode RSM. En fin, les auteurs affirment que la lubrification par MQL peut permettre d'atteindre les facteurs d'usinage requis en éliminant les problèmes de la lubrification abondante. Les résultats trouvés montrent que la lubrification peut améliorer l'usinabilité de ce type d'acier ; en outre, le

refroidissement MQL permet d'obtenir un faible effort de coupe car il réduit le frottement de contact (**Fig. I.38**). De plus, le refroidissement MQL contribue à l'amélioration de la qualité de la surface (**Fig. I.39**). L'usinage MQL peut être qualifié de processus d'usinage vert lorsque l'optimisation est prise en compte.

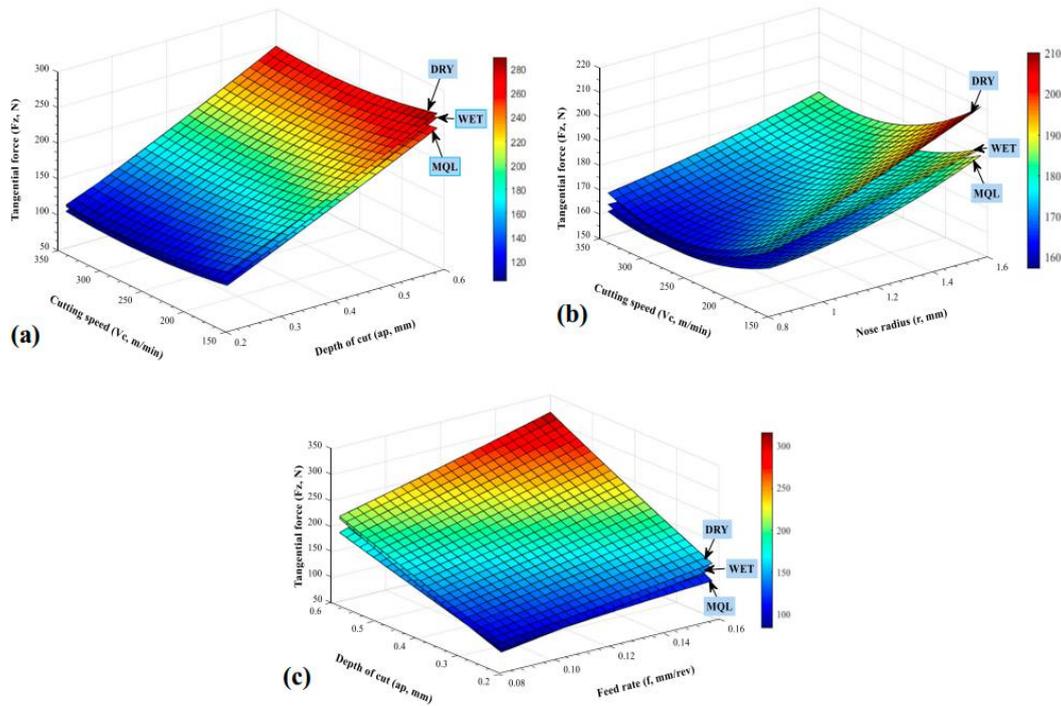


Figure I.38 Effet des facteurs de coupe sur l'effort F_z : à sec, humide et MQL [57].

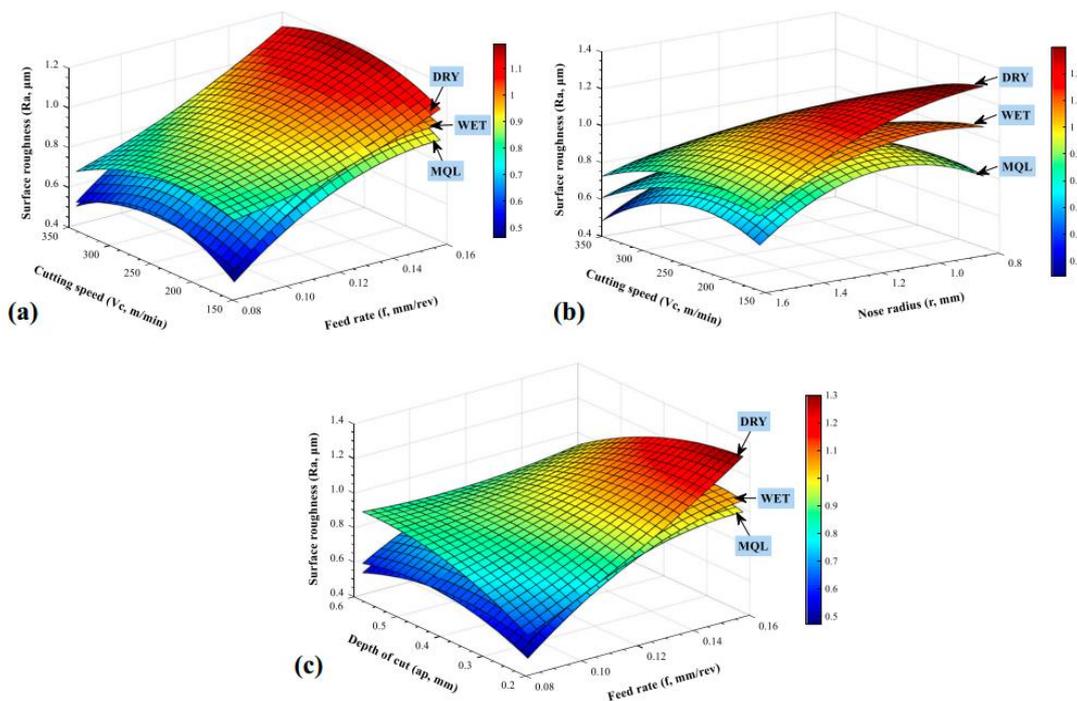


Figure I.39 Effet des facteurs de coupe sur la rugosité R_a : à sec, humide et MQL [57].

Panday et al. [58] ont présenté une investigation sur l'évaluation des performances de différentes huiles lors du tournage de l'aluminium 6061 avec une lubrification par un minimum de quantité de lubrification (MQL), et l'usinage dans des conditions sèches. La condition MQL a été étudiée en utilisant de l'huile végétale et de l'huile hydraulique. Les auteurs ont évalué les performances de coupe en termes de composante des efforts et de la rugosité, ainsi que la forme des copeaux. Les résultats montrent que la MQL utilisant des huiles végétales et hydrauliques produit un meilleur état de surface. D'après les résultats trouvés, la lubrification MQL est plus performante que l'usinage à sec.

Shukla et al. [59] ont examiné la rugosité et l'effort lors de l'usinage de l'acier AISI 304L en fonction de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur. La lubrification MQL est utilisée pour générer de fines particules de brouillard hautement pressurisées, qui permettent de réduire les efforts de coupe et la rugosité de surface pendant les opérations d'usinage par rapport à l'usinage à sec. L'usinage assisté par MQL donne de meilleurs résultats en termes d'effort optimisée (F_c) et de rugosité (R_a) par rapport à l'usinage à sec. L'utilisation d'huile de soja comme fluide de coupe a permis de réduire l'effort de coupe de 7.15 % et la rugosité de surface de 9.16 % par rapport à l'usinage à sec.

Oussama et al. [60] ont étudié les caractéristiques du tournage de l'acier inoxydable AISI 316L dans des conditions à sèche, MQL et MQL assistée par des nanotubes de carbone multi-parois (MWCNT), en ce qui concerne (R_a) et (F_z) et la température de coupe (CT). Dans cette étude, la NF-MQL et l'MQL pure ont donné de meilleurs résultats que la condition à sec. Enfin, l'analyse statistique, la modélisation de la régression et l'algorithme génétique (NSGA-II) et la technique (TOPSIS) sont utilisés pour résoudre différents problèmes d'optimisation multi-objectifs.

Swain et al. [61] ont étudié l'influence de la lubrification (MQL) et à sec et pour usiner l'alliage de titane Ti-6Al-4V en utilisant un carbure non revêtu. Les auteurs affirment que l'utilisation d'un outil en carbure non revêtu, le tournage de l'alliage Ti-6Al-4V en MQL s'est avéré plus précis en termes de vibrations de l'outil, la qualité de la surface, la durée de vie de l'outil et plus économique que le tournage à sec.

I.12 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des notions scientifiques nécessaires à la compréhension de cette étude. Des notions de base concernant l'usinabilité des matériaux, les matériaux à outils, les revêtements des outils de coupe et une attention particulière a été réservée aux aciers à outils. Aussi, une partie de ce chapitre a été focalisée sur les paramètres technologiques d'usinage et qui concerne, la rugosité de surface et la topographie de surface 3D, les efforts de coupe, mécanismes d'endommagement des outils de coupe, la température de coupe et les modes de lubrification. La dernière partie de ce chapitre (état de l'art) a traité quelques travaux de recherche sur les performances des revêtements, les méthodes de modélisation et d'optimisation des conditions de coupe et en dernier lieu, les modes de lubrification.

Une analyse des travaux de recherche mentionnés dans l'état d'art, montre clairement que les chercheurs travaillent toujours sur l'efficacité des revêtements pour les plaquettes de coupe face aux différents matériaux d'usinage ainsi que les études comparatives sont toujours d'actualité. Le but de ces recherches est de trouver des revêtements qui peuvent résister aux contraintes thermomécaniques générées lors de l'opération d'usinage et par cela protéger l'outil de coupe et augmenter sa durée de vie. Aussi, les recherches concernant les méthodes de modélisation pour plus de précision et les méthodes d'optimisation des conditions de coupe pour les différents procédés d'usinage sont en plein essor. Au-delà des explications des phénomènes physiques qui régissent le processus de coupe, presque la majorité des publications dans le domaine de l'usinage passe par les étapes de la modélisation et de l'optimisation. Cela prouve l'importance de ces étapes pour produire une pièce mécanique à moindre coût et pour être compétitif. Finalement, les méthodes de lubrification sont en plein expansion, et ces dernières années un nombre important de travaux de recherche sont publiés, le but est de trouver une lubrification qui améliore les paramètres de performance d'usinage tout en respectant l'environnement.

CHAPITRE II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons tous les moyens et les techniques expérimentales utilisés pour l'élaboration des expériences afin d'examiner, modéliser et optimiser les paramètres technologiques obtenue lors du tournage de l'acier fortement allié X210Cr12 avec des plaquettes de coupe en carbure métallique GC4215 à revêtement CVD, GC1125 à revêtement PVD et des plaquettes en cermet GC1525 en fonction de la variation des paramètres de coupe et dans différents environnements de lubrification. Il s'agit de la présentation d'un banc d'essais comportant un tour, une plateforme pour l'acquisition des efforts de coupe, un Rugosimètre (2D et 3D) pour déterminer la rugosité de la pièce usinée et un microscope pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe, Microscope électronique à balayage (MEB) et une caméra thermographie IR pour la mesure de la température et un système de lubrification MQL. Les expériences ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) du département de génie mécanique de l'université du 8 Mai 1945 de Guelma.

II.2 Matériels utilisés

Pour la réalisation des expériences concernant l'étude envisagée, il est nécessaire de préparer les équipements d'usinage, les instruments de mesure ainsi que les éprouvettes d'essais.

II.2.1 Machine-outil

Un tour parallèle de la société tchèque « TOS TRENCIN », modèle SN40C a été utilisé pour effectuer les expériences d'usinage. Cette machine-outil a une puissance sur la broche de 6.6 KW (**Fig. II.1**). Les vitesses de rotation de la broche sont commandées par un variateur de fréquence qui nous permet d'atteindre une vitesse de rotation jusqu'aux 2100 tr/min. La machine-outil offre une plage d'avance qui varie de 0.08 à 6.4 mm/tr.



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

Notre tour modèle SN40 est équipé d'un variateur de vitesse (**Fig. II.2**), il permet le réglage du nombre de tour en fonction de la vitesse de coupe choisie. La figure **II.3** illustre l'utilisation d'un capteur optique (tachymètre) utilisé, afin de compter le nombre de tour exacte de la broche.

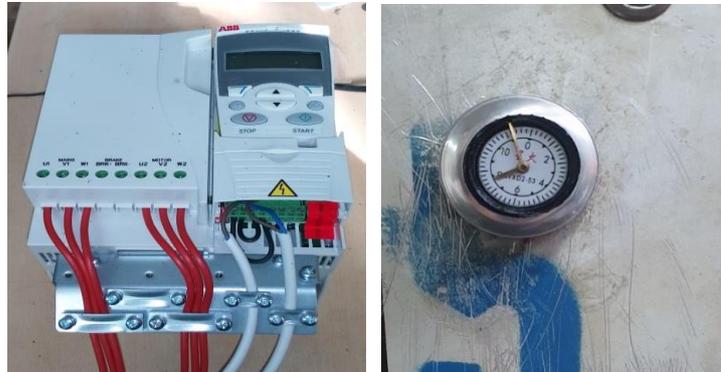


Figure II.2 Variateur de vitesse de coupe.



Figure II.3 Capteur de vitesse.

II.2.2 Matériau à usiner

Le matériau utilisé dans cette étude expérimentale est l'acier fortement allié X210Cr12, il a plusieurs désignations tels que : DIN 1.2080, GB Cr12, JIS SKD1, AFNOR Z200Cr12, AISI D3. Ce matériau est un acier à outil à haute teneur en chrome présentant le minimum de risques de déformation et d'altération des dimensions aux traitements thermiques. Il a une excellente tenue à l'usure (haute résistance à l'usure). Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suit [62] :

- Densité : 7.7g/cm³.
- Module d'élasticité (module de Young) : 210 GPa.
- Conductibilité thermique : 20 W/m.C°.
- Dureté : 280 HB.

Le tableau II.1 présente la composition chimique de l'acier X210Cr12 :

Tableau II.1 Composition chimique de l'acier X210Cr12.

Elément	C	Si	Mn	Cr	T	P	S	Cu	Mo	Ni
%	2	0.31	0.29	12	0.7	0.011	0.009	0.162	0.124	0.259

L'acier fortement allié X210Cr12 est utilisé surtout pour la fabrication des matrices et d'emboutissage et poinçons de découpage, outillage d'usinage du bois, outillage de presses à blocs, tiges de fermeture et moules à matières plastiques très résistants à l'usure, rouleaux profilés, filières d'étirage, galets profileurs, mollettes, peignes à rouler des filets, outils à bois, etc.... [62]. Nous avons utilisé deux types d'éprouvettes en acier X210Cr12 qui possèdent un diamètre $D=70$ mm et une longueur $L=400$ mm, pour les essais de rugosité, des efforts de coupe et de l'usure des plaquettes. Les essais de rugosité et des efforts de coupe ont été effectués sur des paliers de 22 mm (Fig. II.4). Tandis que l'évaluation de la tenue des plaquettes est réalisée par un usinage continue sur toute la longueur de la deuxième éprouvette $L=350$ mm (Fig. II.5).

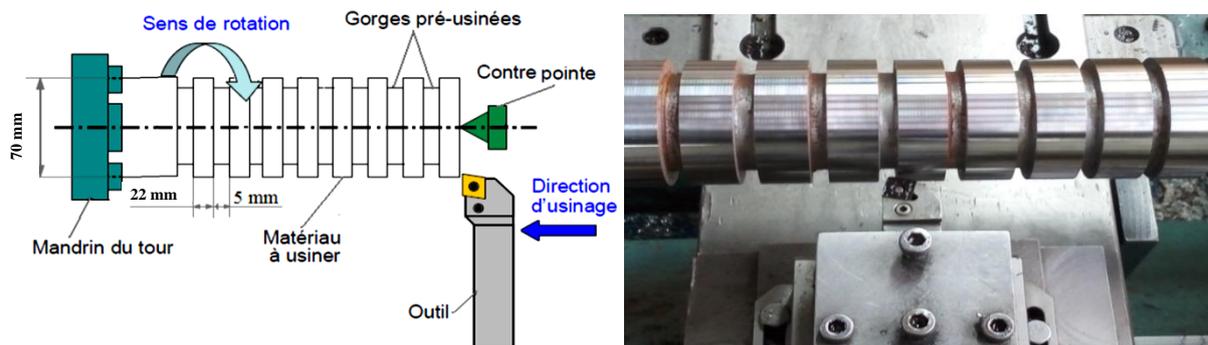


Figure II.4 Géométrie de l'éprouvette en montage d'usinage pour les essais de courte durée.

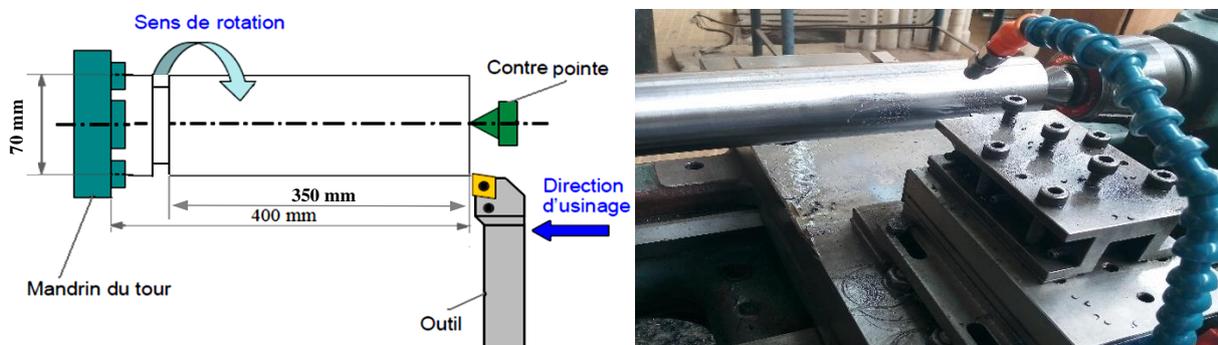


Figure II.5 Géométrie de l'éprouvette en montage d'usinage pour les essais d'usure.

II.2.3 Outils de coupe utilisés

II.2.3.1 Plaquettes de coupe utilisées

Toutes les opérations de chariotage durant cette étude expérimentale ont été effectuées par trois types de matériaux de coupe. Des plaquettes en carbure métalliques GC4215 à revêtement CVD, chaque plaquette est caractérisée par un rayon de bec $r = (0.4, 0.8, 0.12 \text{ et } 0.16)$ mm, ce qui fait un totale de quatre plaquettes GC4215, des plaquettes en carbure métallique GC1125 à revêtement PVD et des plaquettes en cermet 1525. Toutes les plaquettes sont amovibles, de forme carrée à fixation mécanique par trou centrale et chacune des plaquettes de coupe possède huit arêtes de coupe. Elles sont de marque SANDVIK et toutes les informations relatives aux plaquettes sont mentionnées dans le tableau **II.2**.

Tableau II.2 Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.

Matériau de coupe	Désignation firme	Désignation ISO	Composition	Rayon r
Carbure revêtue	GC4215	SNMG 12 04 04-PM	CVD ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiCN}$)	0.4
Carbure revêtue	GC4215	SNMG 12 04 08-PM	CVD ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiCN}$)	0.8
Carbure revêtue	GC4215	SNMG 12 04 12-PM	CVD ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiCN}$)	1.2
Carbure revêtue	GC4215	SNMG 12 04 16-PM	CVD ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiCN}$)	1.6
Carbure revêtue	GC1125	SNMG 12 04 08-MF	PVD ($\text{TiAlN}+\text{TiAlN}$)	0.8
Cermet revêtue	GC1525	SNMG 12 04 08-PF	PVD ($\text{TiCN}+\text{TiN}$)	0.8

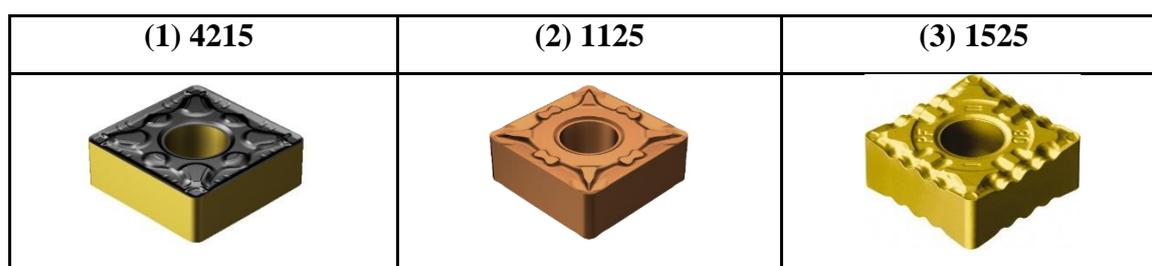


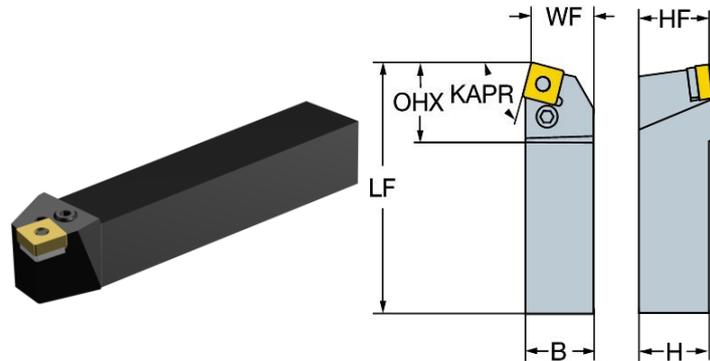
Figure II.6 Plaquettes de coupe utilisées : (1) Carbure métallique (GC4215), (2) Carbure métallique (GC1125), (3) Cermet (GC1525).

II.2.3.2 Porte outil

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé un porte-outil sur lequel on fixe les différentes plaquettes. La géométrie de porte-outil est donnée dans le tableau **II.3**. La figure **II.7** et le tableau **II.4** présentent les dimensions du porte-outil utilisé.

Tableau II.3 Caractéristiques géométriques du porte-outil.

Désignation	Marque	Section (mm ²)	χ_r°	α°	γ°	λ°
PSBNR2525K12	SANDVIK	25×25	75°	6°	-6°	-6°

**Figure II.7** Porte-outil utilisé avec illustration de sa géométrie.**Tableau II.4** Dimensions du porte-outil utilisé [63].

Hauteur de queue (H)	Largeur de queue (B)	Porte à faux Maximal (OHX)	Longueur Fonctionnelle (LF)	Largeur Fonctionnelle (WF)	Hauteur Fonctionnelle (HF)
25	25	27.5	150	22	25

II.3 Appareillages de mesures utilisées

II.3.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Nous avons employé un dynamomètre (KISTLER 9257 B) pour mesurer avec précision les efforts de coupe et déterminer leurs amplitudes. Ce dispositif est réputé pour sa fiabilité et est capable de mesurer les trois composantes de l'effort de coupe : effort axial (F_x), radial (F_y) et tangentiel (F_z) (**Fig. II.8**).

Le principe de mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Pendant le processus de tournage, la rotation est généralement attribuée à la pièce, tandis que l'outil reste immobile. L'outil est monté sur une plateforme appelée table, qui est fixée au chariot transversal de la machine-outil. La plateforme joue un rôle essentiel dans la mesure. Elle est équipée de quatre capteurs en quartz qui convertissent les forces exercées sur la plaque lors de la coupe en charges électriques. Après avoir été amplifiées par un amplificateur de signaux, ces charges électriques sont détectées par un ordinateur via une carte d'acquisition spécialement intégrée à son unité centrale. Un logiciel appelé DYNOWARE analyse et traite ces signaux, permettant ainsi d'exprimer directement l'effort générée suivant les trois directions (F_x , F_y et F_z).

Le dynamomètre (9257 B) présente les caractéristiques suivantes :

- Une grande rigidité et une fréquence propre très élevée ;
- Une large gamme de mesure ;
- Une bonne linéarité, sans hystérésis ;
- Une faible interaction (<1%) ;
- Une utilisation simple (prêt à l'emploi) ;
- Une construction compacte ;
- Une résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- Un câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- Un Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- Un Ordinateur personnel (PC).

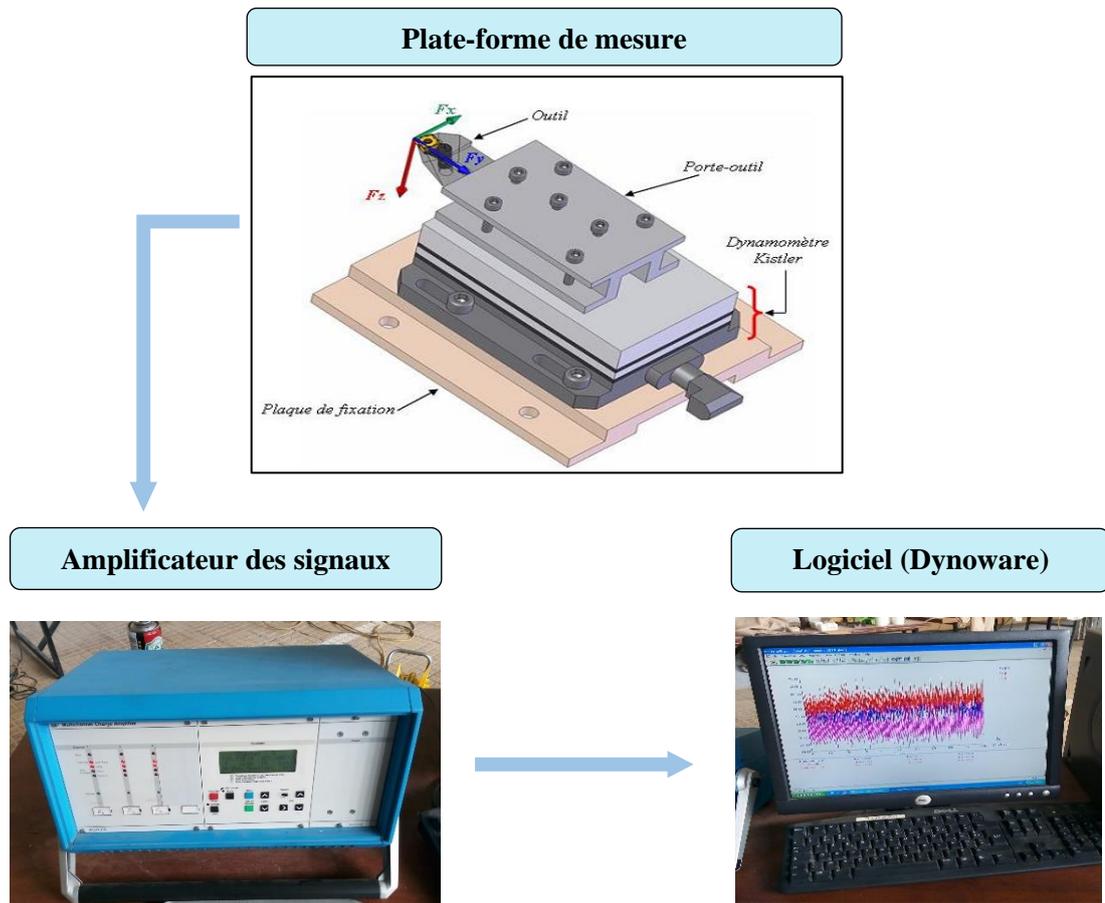


Figure II.8 Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II.3.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

II.3.2.1 Rugosimètre 2D

Nous avons utilisé un rugosimètre (2D) Surftest 210 (Mitutoyo) pour mesurer les différents critères de rugosité. Cet appareil est équipé d'une pointe en diamant (palpeur) avec un rayon de pointe de 5 μm , qui se déplace de manière linéaire sur la surface à mesurer. Afin de garantir une précision maximale et d'éviter les erreurs dues au démontage de la pièce, les mesures de rugosité ont été effectuées directement sur la machine. Nous avons effectué trois mesures répétées sur la surface usinée, en utilisant trois lignes de référence positionnées à 120° les unes des autres. Le résultat final est obtenu en prenant la moyenne de ces trois valeurs (**Fig. II.9**).

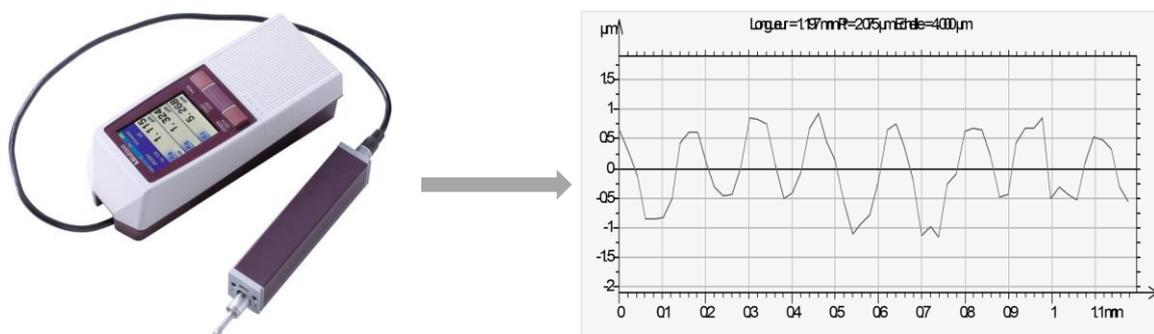


Figure II.9 Rugosimètre 2D (SurfTest 210, Mitutoyo).

II.3.2.2 Rugosimètre 3D

Pour mieux visionner la surface usinée nous avons utilisé un appareil de métrologie optique AltiSurf® 500. Cet appareil permet d'étudier finement la topographie de la surface des pièces usinées (**Fig. II.10**). L'appareil AltiSurf® 500 standard est composé :

- ✓ D'une base en granite ;
- ✓ D'un ensemble inférieur ou base de déplacement : Plusieurs tables de déplacement motorisées de haute précision permettant le mouvement de l'échantillon selon les axes X et Y, éventuellement selon un ou plusieurs axes rotatifs. Une plateforme rectangulaire permet de poser l'échantillon à mesurer ;
- ✓ D'un ensemble supérieur ou ensemble mesurant : Une table de déplacement motorisée de haute précision commande le mouvement de l'ensemble. Un support multi position accueille différents capteurs AltiProbe® optique, inductif, micro force, laser. Une caméra CCD haute définition à zoom optique et/ou numérique aide à la définition de la zone de mesure. Elle permet en outre la prise de clichés ;

✓ De différents accessoires :

Quatre poignées de transport amovibles. Fixées sur le marbre, elles facilitent le déplacement de la platine. Un jeu de quatre amortisseurs antivibratoires. Un jeu de cale-étalon (plan de verre, cale de rugosité, cale de step).

Le logiciel Phénix, qui fonctionne en tandem avec l'Altisurf, assure l'exécution des mesures. Phénix sert d'interface pour la configuration de tous les paramètres et la programmation. Il est composé de deux parties, à savoir une interface graphique et un composant serveur, qui maintient une communication constante avec le matériel et sollicite diverses cartes logées dans l'ordinateur industriel. Une fois la mesure effectuée, les données sont ensuite analysées par le logiciel d'analyse Altimap.

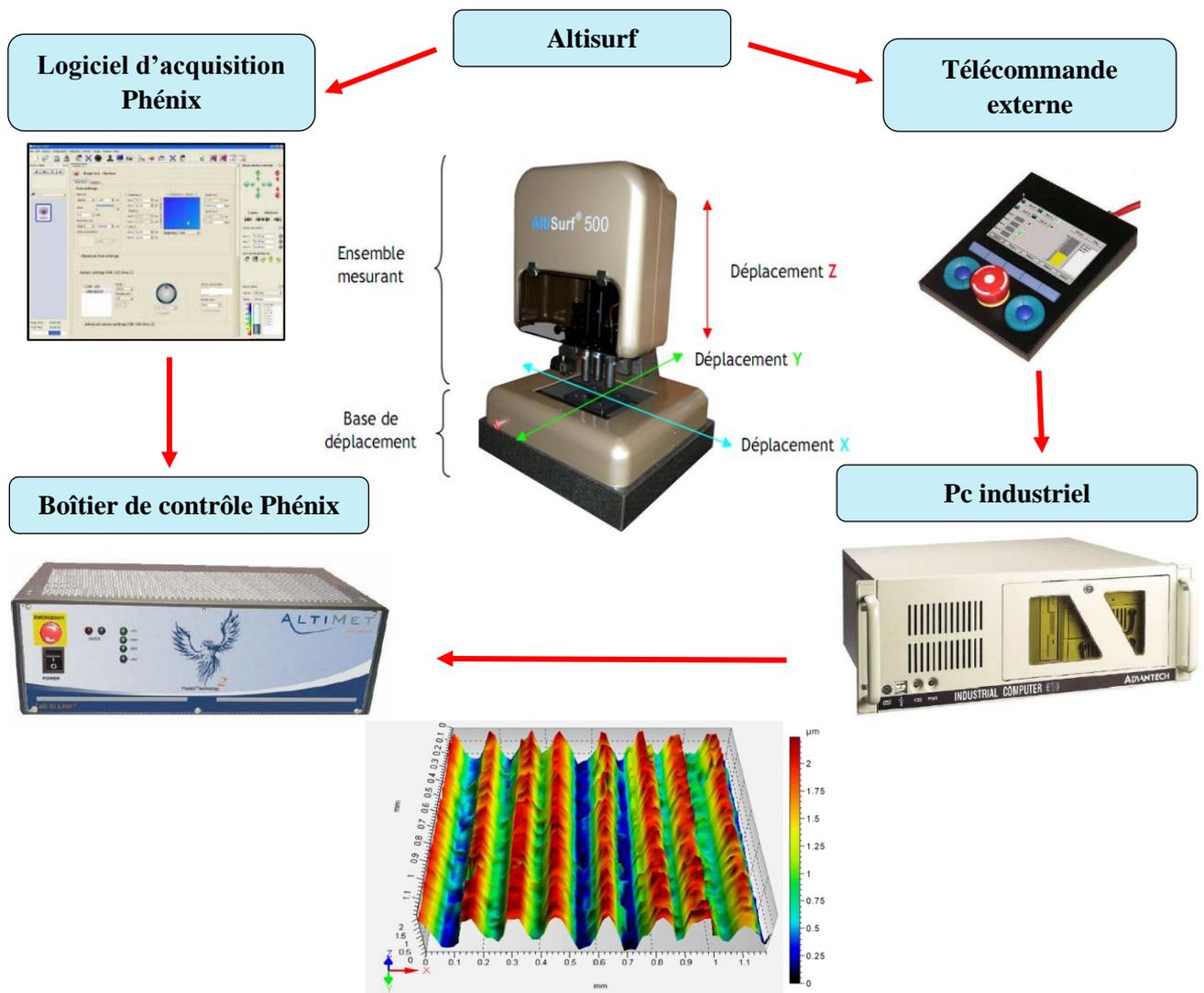


Figure II.10 Chaîne de mesure de la rugosité en 3D.

II.3.3 Microscope pour la mesure de l'usure

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) et entaille (VN) 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 (**Fig. II.11**).

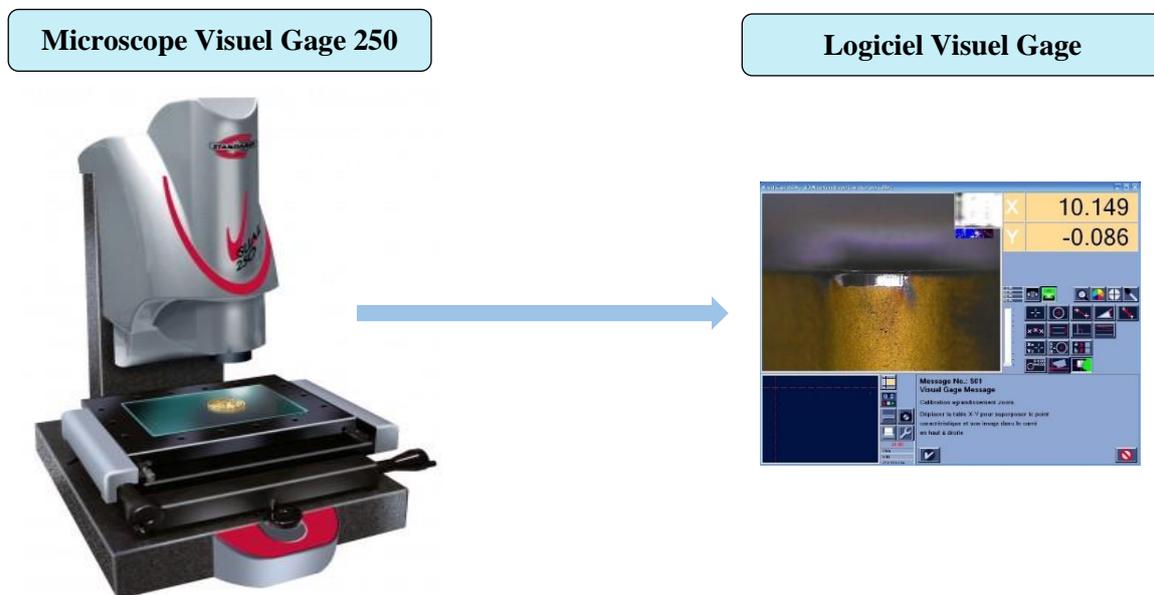


Figure II.11 Microscope pour la mesure de l'usure.

II.3.4 Caractérisations morphologiques et chimiques

II.3.4.1 Microscope électronique à balayage (MEB)

Dans cette étude, Le microscope électronique à balayage de la marque FEI, modèle Quanta 250 (**Fig. II.12**), a été employé. Le MEB est couramment utilisé pour l'observation topographique à l'échelle microscopique. Il offre la possibilité d'effectuer une analyse complète de la morphologie avec une profondeur de champ plus grande que celle offerte par la microscopie optique (agrandie jusqu'à 10^5 fois ou plus). Les données ont été traitées à l'aide du logiciel VISTA.

Le principe fondamental implique l'émission d'un faisceau d'électrons qui interagit avec l'échantillon, provoquant la production de divers rayonnements spécifiques. Ces rayonnements sont ensuite détectés et analysés en fonction de la technique sélectionnée. Dans le cadre de l'utilisation du microscope électronique à balayage (MEB), on peut examiner différents échantillons conducteurs sans préparation spécifique, en travaillant dans un environnement à vide primaire. Dans certains cas, il peut être nécessaire de déposer un film conducteur d'or ou de carbone afin de pouvoir observer des échantillons isolants. Au sommet de l'appareil, un canon à électrons génère un faisceau d'électrons. Le canon est situé au sein d'une colonne maintenue sous vide, et les électrons sont produits par la chauffe d'un filament de tungstène. Le faisceau d'électrons primaire ainsi créé parcourt une trajectoire verticale à l'intérieur de la colonne du microscope. Ensuite, il est possible de focaliser le faisceau sur l'échantillon en utilisant des lentilles électromagnétiques et des bobines défectrices. Les électrons secondaires permettent d'obtenir une visualisation détaillée de la topographie de la surface de l'échantillon, tandis que les électrons rétrodiffusés permettent d'observer les variations chimiques. Lorsque le faisceau interagit avec l'échantillon, les détecteurs spécialement positionnés recueillent les électrons secondaires, dont le signal est ensuite analysé et converti en une image visuelle.

La microscopie électronique à balayage est actuellement la méthode la plus utilisée et la plus précise pour observer la microstructure et les pistes d'usure.

II.3.4.2 Spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDS)

La spectroscopie à dispersion d'énergie EDS permet d'analyser le spectre X émis par un échantillon lorsqu'il est bombardé par un faisceau d'électrons. En utilisant le MEB en combinaison avec les détecteurs EDS, il est possible d'effectuer des analyses chimiques de surface. Ces analyses sont à la fois qualitatives et quantitatives, et la profondeur de pénétration atteint généralement quelques micromètres, dépendant de l'énergie des électrons incidents et du matériau étudié. Le détecteur EDS est constitué d'un cristal de silicium dopé partiellement avec du lithium. En le plaçant correctement, il est possible de capturer efficacement les photons X spécifiques émis lorsque les électrons changent de niveau d'énergie. Un logiciel est utilisé pour analyser le spectre obtenu et calculer les ratios de masse et d'atomes des éléments détectés. Des analyses par EDS ont été effectuées de manière systématique sur chaque zone spécifique.

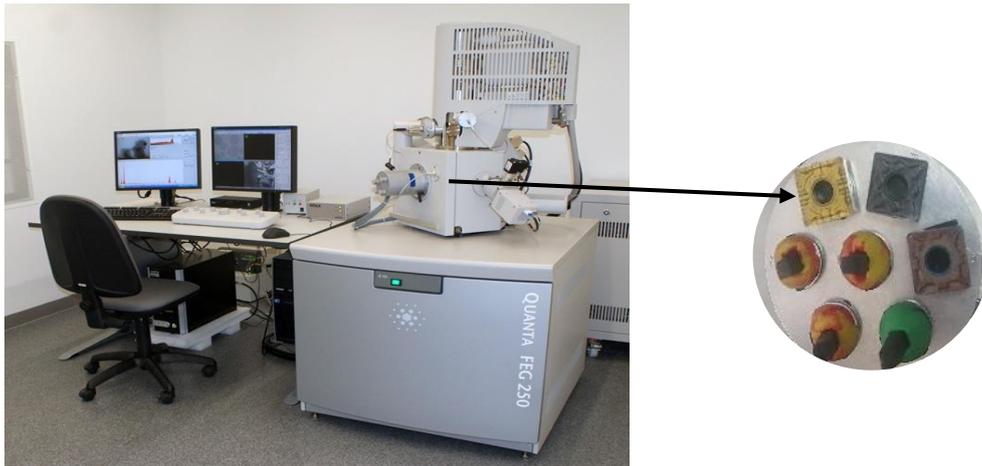


Figure II.12 Microscope Electronique à Balayage (MEB).

II.3.5 La caméra thermographie IR pour la mesure de la température

Afin de faire l'acquisition des valeurs de la température générée au niveau de la zone de coupe, nous avons utilisé une caméra thermographie infrarouge modèle RayCAM C.A 1884 (**Fig. II.13**). La RayCAM présente un format compact, une facilité d'utilisation et des fonctionnalités puissantes. Cette caméra intègre une technologie de détection hautement avancée, un traitement infrarouge (IR) sophistiqué de l'image et une interface informatique conviviale. Elle présente les caractéristiques suivantes : une gamme de mesure $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $1680\text{ }^{\circ}\text{C}$, un laser de mono point avec un réglage d'intervalle (entre 0 et 1) d'émissivité qui est une propriété du matériau essentielle à la bonne détermination de la température de la cible visée. Un logiciel appelé RayCAM report a été développé pour être utilisé conjointement avec une caméra, offrant un ensemble de fonctionnalités avancées pour le traitement d'images. Ce logiciel permet à l'opérateur de visualiser les images infrarouges et de mener des analyses précises par point, par ligne ou par zone. Actuellement, la RayCAM se classe parmi les appareils portatifs de thermographie infrarouge les plus performants.

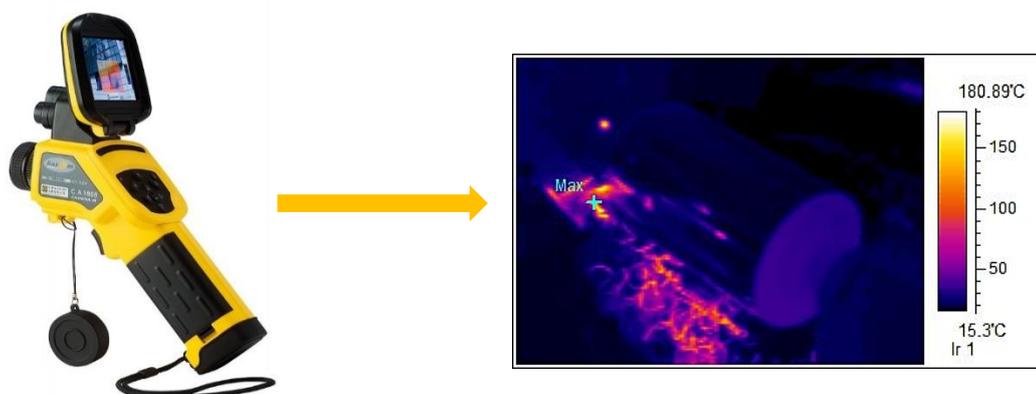


Figure II.13 La caméra thermographie infrarouge.

II.3.6 Minimum de quantité de lubrification (MQL)

La figure II.14 présente l'ensemble des équipements utilisés lors de lubrification avec le système MQL. La figure II.15. (a) montre le réservoir d'huile et ses composants (Réservoir de 24 L et débitmètre). La figure II.15. (b) montre la boîte contrôle de système MQL, elle comprend les éléments suivants : afficheur de débit (aire et huile), la pression du réseau de l'air pulvérisé, la pression du réservoir, réglage air pulvérisation et réglage pression produit.



Figure II.14 Montage de système MQL.

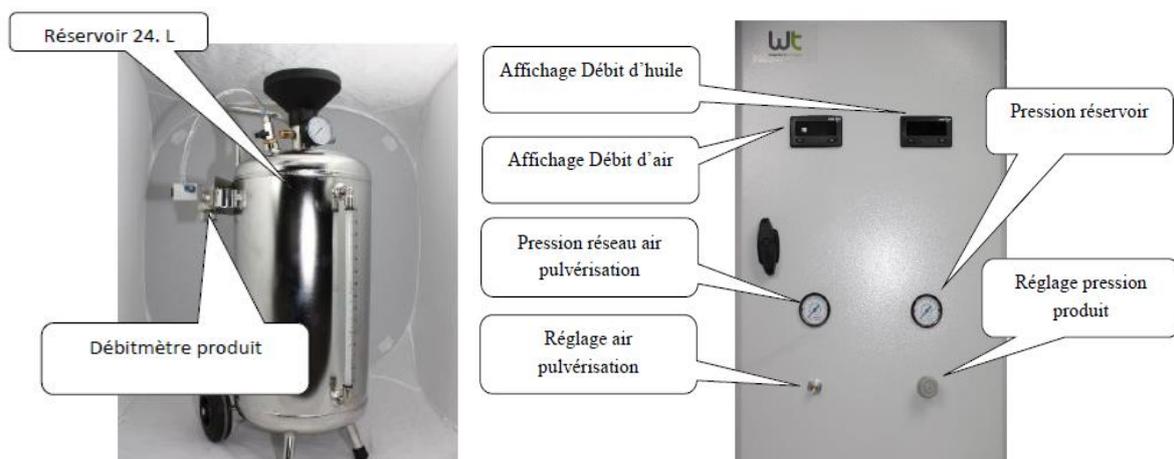


Figure II.15 : a) Réservoir d'huile et b) Système de contrôle MQL.

II.3.7 Autres équipements

1. Un chronomètre pour enregistrer le temps d'usinage ;
2. Un pied à coulisse a été utilisé pour mesurer le diamètre de la pièce ;
3. Un appareil photo numérique pour capturer des images des équipements employés.

II.4 Planification des expériences

La planification des expériences est un processus méthodique utilisé dans la recherche scientifique et l'industrie pour concevoir, organiser et mener des expériences de manière efficace et rigoureuse. L'objectif principal de la planification des expériences est d'obtenir des données fiables, significatives et exploitables en optimisant l'utilisation des ressources disponibles.

II.4.1 Méthode de planification des expériences

La planification des expériences est une approche qui permet de structurer et de réaliser les expériences de manière optimale afin de développer des modèles mathématiques permettant de simuler le processus de coupe. La stratégie de recherche expérimentale implique d'abord de déterminer le nombre d'essais requis, qui dépend à la fois des facteurs fondamentaux (variables d'entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs [64].

II.4.1.1 La méthode paramétrique OFAT (One-factor-at-a-time)

La méthode paramétrique est une approche utilisée dans divers domaines, tels que les sciences, les mathématiques, l'économie et la statistique, pour analyser et résoudre des problèmes en utilisant des paramètres comme variables. Les paramètres sont des valeurs qui déterminent les caractéristiques d'un système. On fait appel à cette méthode pour évaluer l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y . L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné [$X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$], tout en maintenant tous les autres facteurs constants (**Tab. II.5**). Pour chaque $X = X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i , ($i = 1 \div N$). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation $Y = f(X)$ [64].

Tableau II.5 Réalisation d'essais d'après la méthode paramétrique (OFAT).

N°	Facteur variable	Paramètre de sortie						
	X	Y ₁	Y ₂	-	Y _g	-	Y _n	Y _{moy}
1	X ₁	Y ₁₁	Y ₂₁	-	Y _{g1}	-	Y _{n1}	Y _{moy1}
2	X ₂	Y ₁₂	Y ₂₂	-	Y _{g2}	-	Y _{n2}	Y _{moy2}
3	X ₃	Y ₁₃	Y ₂₃	-	Y _{g3}	-	Y _{n3}	Y _{moy3}
i	X _i	Y _{1i}	Y _{2i}	-	Y _{gi}	-	Y _{ni}	Y _{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X _N	Y _{1N}	Y _{2N}	-	Y _{gN}	-	Y _{nN}	Y _{moyN}

II.4.1.2 Méthode multifactorielle

Méthode multifactorielle permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur plusieurs paramètres. Ils visent à optimiser la collecte de données en minimisant les erreurs expérimentales, en identifiant les facteurs les plus importants et en maximisant l'efficacité de l'expérimentation. Voici quelques types courants de plans d'expérience [65] :

- ✓ **Plan factoriel complet** : C'est l'un des plans les plus simples, où tous les niveaux de chaque facteur sont testés dans toutes les combinaisons possibles. Cela permet d'examiner l'effet de chaque facteur et de leurs interactions.
- ✓ **Plan factoriel fractionnaire** : Utilisé lorsque le nombre de combinaisons possibles dans un plan factoriel complet est trop élevé. Seules certaines combinaisons sont testées, ce qui réduit le nombre total d'expériences tout en permettant de comprendre les effets principaux.
- ✓ **Plan composite central** : Ce plan est utilisé pour étudier les effets des facteurs et trouver les valeurs optimales, souvent en ajustant les facteurs autour d'un point central et en explorant les régions extrêmes.
- ✓ **Plan de Taguchi** : Une approche pour l'optimisation des processus qui se concentre sur la recherche des niveaux optimaux des facteurs pour minimiser la variabilité et rendre le processus robuste.
- ✓ **Plans en blocs aléatoires** : Utilisés pour réduire l'impact des variations non contrôlées dans une expérience en divisant les expériences en blocs homogènes.
- ✓ **Plans d'expérience séquentiels** : Une approche itérative où chaque étape de l'expérience est basée sur les résultats précédents, permettant d'optimiser progressivement les conditions expérimentales.

- ✓ **Plans de surface de réponse** : Ces plans sont utilisés pour optimiser les réponses (par exemple, maximiser le rendement, minimiser les coûts) en explorant une gamme de niveaux de facteurs.
- ✓ **Plans de mélange** : Utilisés lorsque les facteurs ne peuvent pas être ajustés indépendamment les uns des autres, comme dans la formulation de produits chimiques.

Dans notre étude nous avons appliqué le plan de Taguchi, qui représente une approche statistique développée par le statisticien japonais Genichi Taguchi. Ces plans visent à optimiser la qualité et les performances des produits et des processus en réduisant la variabilité et en minimisant les défauts où ils permettent d'identifier rapidement les réglages optimaux des facteurs pour obtenir des résultats de haute qualité. Les plans de Taguchi sont particulièrement utiles dans les domaines de la fabrication, de l'ingénierie et de la conception de produits.

II.4.2 Différents types de facteurs

La création des plans et l'analyse des résultats sont fortement influencées par les types de facteurs impliqués dans l'étude. Différents types de facteurs peuvent être identifiés, à savoir les facteurs continus, les facteurs ordonnables, les facteurs discrets et les facteurs booléens, qui seront pris en considération [65]. Chaque facteur peut être :

- **Continu** : la pression est un exemple de facteur continu ce qui signifie qu'elle peut prendre différentes valeurs dans un intervalle donné. De même, la longueur, la concentration et la température sont également des facteurs continus, ce qui implique qu'ils peuvent être représentés par des nombres continus.
- **Facteurs discrets** : se distinguent des facteurs continus, car ils ne peuvent prendre que des valeurs spécifiques. Ces valeurs peuvent être représentées par des lettres, des noms, des propriétés ou même des nombres qui n'ont pas de valeur numérique intrinsèque, mais qui servent de repère. Par exemple, si l'on considère les couleurs d'un produit, telles que le bleu, le rouge et le jaune, ce sont des exemples de facteurs discrets.
- **Facteurs ordonnables (classés)** : ce sont des facteurs distincts qui peuvent être organisés dans un ordre logique. Par exemple, ils peuvent être regroupés selon leur taille : grand, moyen, petit, ou selon leur position : premier, deuxième, troisième et quatrième.
- **Facteurs booléens** : sont des variables discrètes qui se limitent à deux valeurs possibles : élevé ou bas, blanc ou noir, ouvert ou fermé et ainsi de suite.

II.4.3 Démarche et plans d'expérience adoptés

Les éléments du régime de coupe tel que la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), la profondeur de passe (a_p), le rayon du bec (r), et les différents matériaux de l'outil (M) sont considérés comme paramètres d'entrée. La rugosité de surface, l'effort de coupe, la puissance de coupe, le débit du copeau enlevé et l'usure représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode des plans des expériences. Nous nous servons des plans d'expériences pour quantifier les influences des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec les logiciels Design-Expert et MINITAB, ceux sont dédiés à la planification des expériences et l'analyse des résultats obtenus. La démarche suivante pour chaque type d'étude a été suivie :

- Clarifier les buts et des objectifs des essais.
- Sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses).
- Choisir du type de plan d'expérience approprié.
- Réaliser des essais nécessaires.
- Identifier les facteurs qui ont une influence significative.
- Créer des modèles pour prédire les réponses.
- Rechercher des paramètres optimaux.
- Valider les résultats obtenus.

La stratégie de recherche expérimentale implique d'abord de déterminer le nombre d'essais nécessaires. Le nombre dépend des facteurs fondamentaux (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs. Dans notre cas, trois séries d'expériences ont été adoptés :

- Expériences suivant la méthode paramétrique OFAT,
- Expériences suivant le plan de Taguchi (L_{18})
- Expériences suivant le plan de Taguchi (L_{16}).

II.4.4 Conditions de coupe adoptées

Les conditions de coupe utilisées pour les essais paramétriques pour évaluer les paramètres de sortie (F_z , P_c , R_a , V_b , Rugosité 3D) sont illustrées dans le tableau **II.6**.

Tableau II.6 Conditions de coupe pour les essais paramétriques.

Paramètre de sortie	Facteurs variables	Facteurs fixes
Rugosité et efforts de coupe	r_{GC4215} (0.4 ; 0.8 ; 1.2 ; 1.6)	$V_c=330$; $f=0.08$; $ap=0.2$
	$V_c_{GC4215, GC1125, GC1525}$ (200 ; 250 ; 300 ; 400)	$r=0.8$; $f=0.08$; $ap=0.2$
	$f_{GC4215, GC1125, GC1525}$ (0.08 ; 0.12 ; 0.16 ; 0.20)	$r=0.8$; $V_c=330$; $ap=0.2$
	$ap_{GC4215, GC1125, GC1525}$ (0.1 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4)	$r=0.8$; $V_c=330$; $f=0.08$
Rugosité de surface 3D	f_{GC4215} (0.08 ; 0.12 ; 0.18 ; 0.22)	$V_c=330$; $ap=0.15$; $r=1.6$
	r_{GC4215} (0.4 ; 0.8 ; 1.2 ; 1.6)	//
Usure	V_c_{GC4215} (280 ; 320 ; 350)	$f=0.08$; $ap=0.2$; $r=0.8$

Concernant le premier plan d'expérience adopté, nous avons quatre facteurs de base ($k=4$), (r , V_c , f et ap), trois facteurs (r , V_c et f) à quatre niveaux de variation (niveau 1, niveau 2, niveau 3, niveau 4) et un facteur (ap) à deux niveaux de variation (niveau 1, niveau 2). Si nous avons utilisé un plan factoriel complet, le nombre d'essais 128 essais : $N=4^3 \times 2^1=64 \times 2=128$. Mais dans notre cas, le plan de Taguchi L_{16} a été adopté. L'objectif était de réduire le nombre d'essais et par conséquent de minimiser les coûts et le temps nécessaires pour mener les expériences. Le tableau II.7 illustre la matrice de planification pour un plan de Taguchi L_{16} , qui présente les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les divers régimes de coupe. Il montre également la codification des facteurs utilisée.

Tableau II.7 Matrice de planification pour un plan de Taguchi L_{16} ($4^3 2^1$).

N° Essai	Valeurs codées			
	X_1	X_2	X_3	X_4
	r (mm)	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	1
3	1	3	3	2
4	1	4	4	2
5	2	1	2	2
6	2	2	1	2
7	2	3	4	1
8	2	4	3	1
9	3	1	3	1
10	3	2	4	1
11	3	3	1	2
12	3	4	2	2
13	4	1	4	2
14	4	2	3	2
15	4	3	2	1
16	4	4	1	1

Les conditions de coupe réelles utilisées pour les différents essais réalisés pour le plan L₁₆ sont indiquées dans le tableau II.8. Tous les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification.

Tableau II.8 Niveaux des différents paramètres de coupe pour le plan de Taguchi L₁₆ à sec.

Niveaux	1	2	3	4
r (mm)	0.4	0.8	1.2	1.6
Vc (m/min)	180	255	330	400
f (mm/tr)	0.08	0.12	0.16	0.20
ap (mm)	0.1	0.3	/	/

Pour la deuxième série d'expérience, nous avons étudié l'impact des différents paramètres de coupe (Vc, f et ap) et les différents matériaux de l'outil (M) sur la rugosité de surface et les efforts de coupe et l'usure des plaquettes de coupe. Nous avons choisi un plan factoriel réduit de Taguchi L₁₈ pour la planification des expériences. Les facteurs (Vc, f, et M) varient à trois niveaux (3³) et le facteur (ap) varie à deux niveaux (2¹). Les valeurs des paramètres ont été sélectionnées conformément aux recommandations du fabricant d'outils de coupe (SANDVIK). Les paramètres à étudier et les niveaux correspondants sont présentés dans le tableau II.9.

Tableau II.9 Matrice de planification pour un plan de Taguchi L₁₈ (3³ 2¹).

N° Essai	Valeurs codées			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
	ap (mm)	Vc (m/min)	M	f (mm/tr)
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

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais réalisés sont indiquées dans le tableau II.10. Notons que le plan de Taguchi L₁₈ a été réalisé deux fois, à sec (sans lubrification) et avec lubrification (MQL).

Tableau II.10 Niveaux des différents facteurs pour le plan de Taguchi L₁₈ à sec et lubrifier.

Niveaux	1	2	3
ap (mm)	0.2	0.4	/
Vc (m/min)	200	270	340
M	0.08	0.12	0.16
f (mm/tr)	0.1	0.3	/

II.5 Méthode de modélisation appliquée

II.5.1 Méthodologie des surfaces de réponse (RSM)

La méthodologie de la surface de réponse (RSM) a été adoptée pour la modélisation mathématique des paramètres de sortie à l'aide du logiciel statistique Miniab 18. L'objectif de cette approche est d'identifier les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif. Pour cela on a choisi un niveau de signification α fixé à ($\alpha = 0.05$) (niveau de confiance de 95%). La méthode de surface de réponse (RSM) est une procédure qui comprend les étapes suivantes [66] :

- 1) Identifiez les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie souhaitées ;
- 2) Sélectionnez un plan de conception expérimentale ;
- 3) Effectuer une analyse de régression en utilisant le modèle mathématique de (RSM) ;
- 4) Analyser par (ANOVA) les variables d'entrée indépendantes. Elle permet de déterminer les paramètres qui ont un impact significatif sur la réponse.
- 5) Déterminer la forme appropriée du modèle mathématique ;
- 6) Optimiser les paramètres d'entrée et effectuer les tests de confirmation pour évaluer les performances des modèles prédites obtenus.

La méthodologie de la surface de réponse est utilisée pour deux objectifs principaux : la modélisation d'une variable dépendante, appelée variable de réponse (Y), en fonction de plusieurs variables indépendantes (facteurs) telles que X_1, X_2, \dots, X_k , et l'analyse de l'influence et de l'interaction de ces facteurs sur la réponse. De cette manière, on peut exprimer le modèle pour une réponse donnée (Y) de la manière suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad (\text{II-3})$$

- Y est la grandeur d'intérêt ou la réponse à laquelle nous portons notre attention.
- X_i représente le niveau attribué au facteur i. X_i est la valeur choisie par l'expérimentateur pour mener un essai et représente la coordonnée du facteur i. La valeur de X_i est parfaitement connue et dans la suite, nous supposons même qu'elle est déterminée sans erreur, conformément à l'hypothèse classique de la régression.
- Les symboles a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} correspondent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Leur valeur n'est pas connue et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Le coefficient de détermination R^2 de la régression multilinéaire est calculé en comparant la dispersion des résultats, selon la relation (II-4).

$$R^2 = \frac{\sum (Y_j - \bar{y})^2}{\sum (\bar{Y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

Y_i : Représente la valeur de la réponse calculée lors de la i^{e} expérience.

\bar{Y}_j : Correspond à la valeur mesurée lors de la i^{e} expérience.

\bar{y} : La valeur moyenne des réponses mesurées.

Pour évaluer la validité du modèle, on utilise l'analyse de variance (ANOVA) pour examiner la signification et l'ajustement du modèle. L'ANOVA permet de visualiser les surfaces de réponse et d'estimer l'influence et l'interaction simultanée des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés.

II.5.2 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. 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), la moyenne des carrés (MC), l'indice F-value, P-value, degrés de liberté (DF) et la contribution (Cont. %).

- La somme des carrés (SC) est utilisée pour estimer le carré de l'écart par rapport à la moyenne. Il est exprimé par l'équation :

$$SC_{f=\frac{N}{N_{nf}}} = \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II-5})$$

Où, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ la moyenne des réponses, \bar{y}_i la réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son niveau $i^{\text{ème}}$, N : nombre total d'expériences, N_{nf} : niveau de chaque facteur f .

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

$$MC = \frac{SS_i}{df_i} \quad (\text{II-6})$$

- Pour évaluer l'adéquation du modèle, l'indice de la valeur de F est utilisé en comparant les valeurs de F calculées avec les valeurs critiques obtenues à partir de la table F.

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (\text{II-7})$$

Avec :

MC_e les carrés moyens des erreurs.

- La colonne des valeurs de P représente la probabilité (variant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude ont pu se produire par hasard.
 - Lorsque $P > 0.05$, le paramètre est considéré comme non significatif.
 - Lorsque $P < 0.05$, le paramètre est considéré comme significatif.
- Le pourcentage (Cont. %), montre la contribution des facteurs à la variation totale, indiquant ainsi le degré d'influence sur le résultat.

$$Cont\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (\text{II-8})$$

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des équipements employés (machine-outil, plaquette de coupe, éprouvettes, porte-outil, Plateforme KISTLER, Rugosimètre (2D et 3D) et microscope pour mesurer l'usure), Microscope électronique à balayage (MEB) et une caméra thermographie IR pour la mesure de la température. La planification des expériences et les conditions de coupe ont été également illustrées ainsi que la méthode de modélisation appliquée. Dans les chapitres qui suivent, les résultats des essais réalisés dans cette étude ainsi que les analyses seront exposés.

CHAPITRE III

Usinabilité de l'acier X210Cr12

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais paramétriques sur l'étude de l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe, rayon de bec de l'outil et le temps d'usinage) sur l'effort de coupe principale, la rugosité de surface, l'usure en dépouille (V_b) de l'outil de coupe et la température de coupe qui règne la zone de coupe. Les essais de tournage sont réalisés sur l'acier X210Cr12 par trois différents outils de coupe (carbure métallique à revêtement CVD, carbure métallique à revêtement PVD et en Cermet). Les résultats de l'usure en dépouille (V_b) des outils de coupe en fonction du temps d'usinage à différentes vitesses de coupe ainsi que la corrélation entre l'usure et la rugosité de surface et l'effort de coupe, seront aussi exposés dans ce chapitre. Nous présentons aussi les résultats des essais de la topographie de surface 2D et 3D afin d'analyser les effets de la variabilité des conditions de coupe sur le changement topographique des surface usinées. En dernier lieu, une investigation sur l'évolution de la température de coupe en fonction des conditions de coupe a été faite.

III.2. Essais paramétriques

III.2.1 Influence des paramètres de coupe sur l'effort de coupe

a) Influence de l'avance

La figure **III.1** expose les résultats de l'évolution de l'effort (F_z) pour les trois matériaux de coupe testés, plaquettes de coupe en carbure métallique GC4215 à revêtement CVD, plaquettes de coupe en carbure métallique GC1125 à revêtement PVD et des plaquettes en Cermet GC1525 en fonction de la variabilité de l'avance (f), à $V_c=330$ m/min, $a_p=0.15$ mm et $r=0.8$ mm. On remarque qu'une augmentation de l'avance (f) de (0.08 à 0.22) mm/tr, conduit à une augmentation de l'effort de coupe (F_z) à peu près de (224, 230, 250) % pour le carbure en PVD, le carbure en CVD et l'outil en Cermet, respectivement. Cette augmentation est due à l'accroissement de la section du copeau cisailé et par conséquent les efforts demandés pour l'enlèvement de la matière s'accroissent. Des résultats similaires ont été évoqués dans la littérature [67, 68].

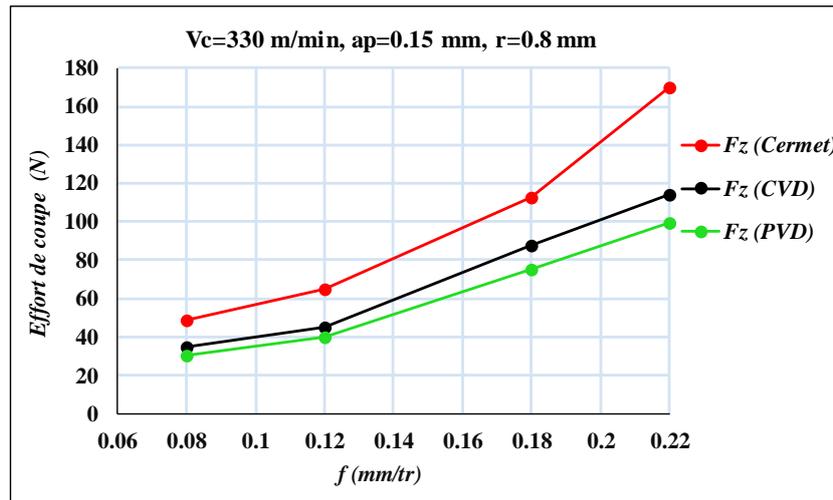


Figure III.1 Evolution de de l'effort (F_z) en fonction de (f).

b) Influence de la profondeur de passe

La figure III.2 illustre l'évolution de l'effort (F_z) en fonction de la profondeur de passe (ap) à $V_c = 330$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $r = 0.8$ mm. L'analyse de l'allure des courbes montre une augmentation croissante de l'effort (F_z) avec l'augmentation de la profondeur (ap). Cela confirme que ce paramètre possède une grande influence sur l'évolution de l'effort (F_z). Il est à signaler que l'accroissement de l'épaisseur du copeau conduit à une augmentation du volume de métal à enlever ce qui nécessite des efforts de coupe importants [69]. Notons ici, que pour une augmentation de la profondeur (ap) de (0.1 à 0.4) mm, l'effort de coupe (F_z) augmentent de (275, 287, 284) % pour les trois matériaux de coupe carbure PVD, carbure CVD, Cermet, respectivement. Ce pourcentage d'augmentation montre clairement que ce paramètre a une influence capitale sur l'effort de coupe. Plusieurs recherches confirment que l'influence de ce facteur est prépondérante [70, 71].

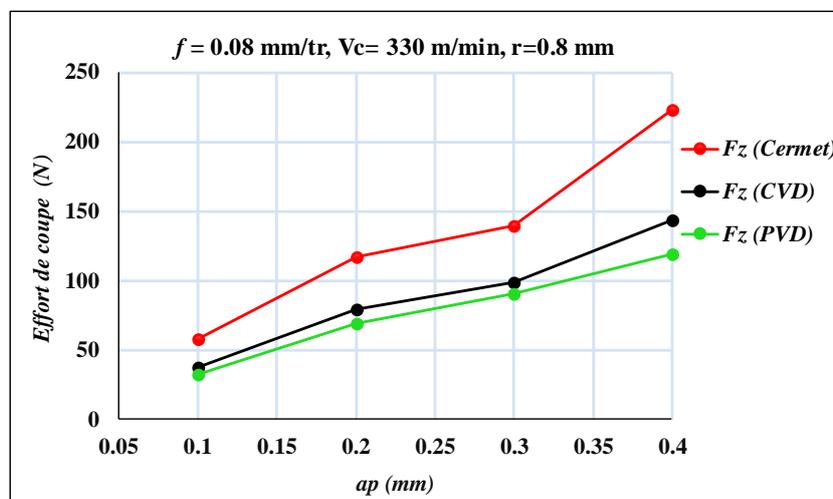


Figure III.2 Evolution de l'effort (F_z) en fonction de (ap).

c) Influence de la vitesse de coupe

La figure III.3 montre l'évolution de (F_z) en fonction de la variation de (V_c) à $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.15 \text{ mm}$ et $r = 0.8 \text{ mm}$. L'analyse des résultats montre que l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c) de 200 m/min jusqu'à 400 m/min conduit à une diminution de l'effort de coupe (F_z). Dans la première zone, l'augmentation de (V_c) de (200 à 250) m/min provoque une diminution rapide de l'effort (F_z) de (38, 39, 42) % pour les trois matériaux de coupe carbure PVD, carbure CVD et Cermet, respectivement. Ceci est dû probablement à un effet d'adoucissement thermique au niveau des zones cisailées du copeau induisant le décroissement des efforts de coupe [72]. Dans l'intervalle de variation de (V_c) de (250 à 400) m/min, l'effort (F_z) se stabilise légèrement traduisant une stabilité relative du système usinant [73].

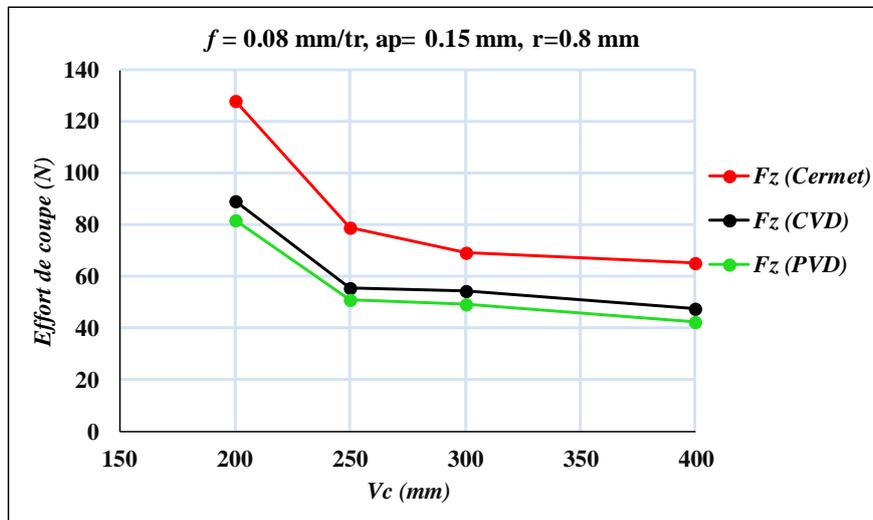


Figure III.3 Evolution de l'effort (F_z) en fonction de (V_c).

d) Influence de rayon de bec de l'outil

La figure III.4 illustre les résultats de l'influence de rayon de bec de l'outil (r) sur l'effort (F_z) pour quatre valeurs de r (0.4, 0.8, 1.2, 1.6) mm à $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.15 \text{ mm}$ et $V_c = 330 \text{ m/min}$ pour la plaquette en carbure CVD. On remarque une augmentation de l'effort de coupe avec l'accroissement de rayon (r). Ceci s'explique par l'augmentation de la zone de contact entre le bec de l'outil et la pièce. Par conséquent, cela provoque des frottements élevés induisant une élévation de l'effort de coupe [74]. L'augmentation de rayon de bec de l'outil (r) de (0.4 à 1.6) mm, conduit à une augmentation de l'effort (F_z) de 127 % pour la plaquette de coupe en carbure métallique à revêtement CVD. Ces résultats sont en bon accord avec ceux trouvés par Meddour et al. [75].

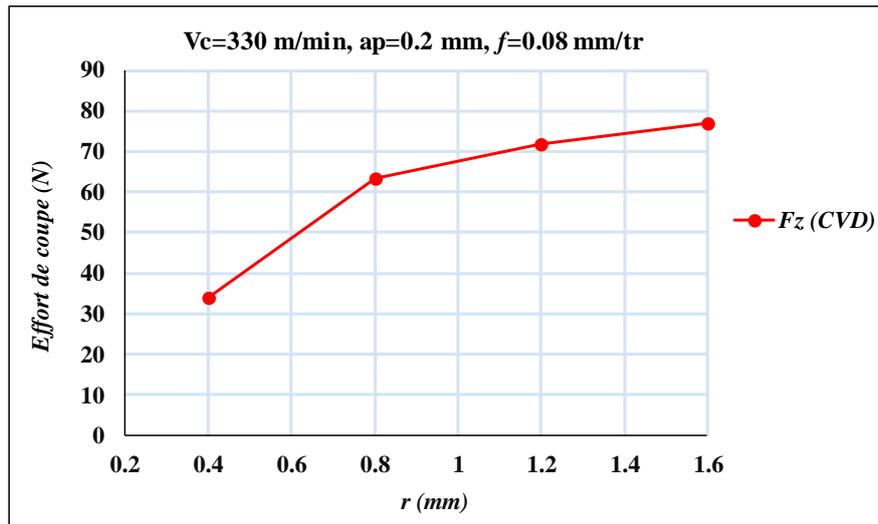


Figure III.4 Evolution de l'effort (F_z) en fonction du rayon (r).

III.2.2 Influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface

a) Influence de l'avance

La figure III.5 présente les résultats de l'évolution de la rugosité (R_a) générée par les outils de coupe en carbure métallique à revêtement CVD, en carbure métallique à revêtement PVD et en Cermet en fonction de l'avance (f) à $V_c=330$ m/min, $a_p=0.15$ mm et $r=0.8$ mm. Il est clair que l'augmentation de l'avance (f) induit une augmentation importante de la rugosité (R_a). Cela signifie que ce facteur a un effet majeur sur les critères de rugosité, c'est ce qui est démontré par les courbes qui sont presque linéaires avec une grande pente. Ceci est principalement dû à la cinématique de la coupe, l'augmentation de l'avance (f) engendre des sillons hélicoïdaux dus à la combinaison de la forme de l'outil et son mouvement par rapport aux mouvements de rotation de la pièce. Lorsque l'avance (f) augmente, les sillons augmentent en profondeur et en largeur [76]. En pratique, l'augmentation de l'avance (f) de (0.08 à 0.22) mm/tr, conduit à une augmentation de la rugosité (R_a), presque de (463, 424, 465) % pour les trois outils de coupe, carbure métallique CVD, carbure métallique à revêtement PVD et en Cermet, respectivement. Aussi, on remarque que la rugosité la plus basse est générée par le carbure CVD.

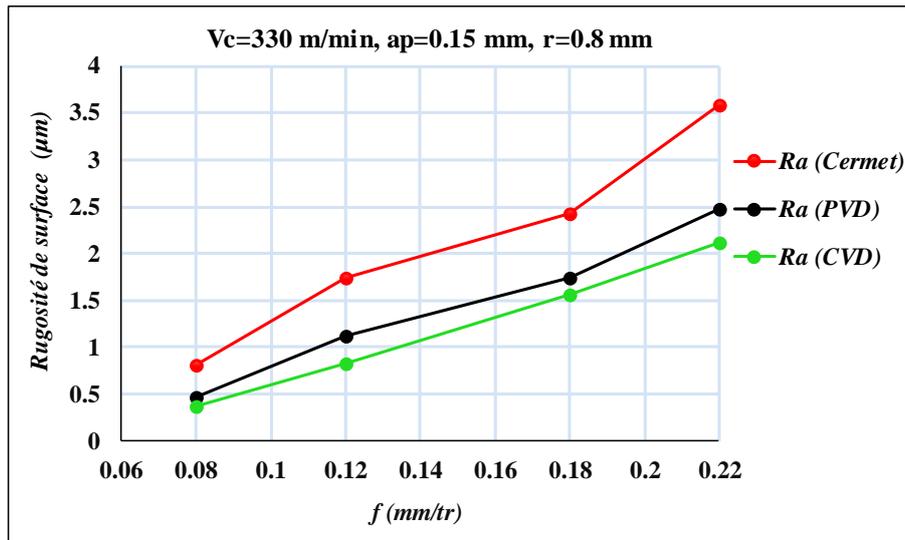


Figure III.5 Evolution de la rugosité (Ra) en fonction de (f).

b) Influence de la profondeur de passe

La figure III.6 illustre l'influence de (a_p) sur la rugosité (Ra) à $V_c=330$ m/min, $f=0.08$ mm/tr et $r=0.8$ mm. D'après l'allure des courbes, il est évident que ce facteur a un effet moins important que l'avance (f). L'augmentation de la profondeur (a_p) conduit à enlever une importante section de copeau induisant l'arrachement de la matière de la pièce ce qui conduit à des rugosités légèrement élevées. Des résultats similaires ont été évoqués dans [77]. L'élévation de la profondeur (a_p) de (0.1 à 0.4) mm a conduit à une augmentation de la rugosité (Ra) à peu près de (46, 43, 55) % pour les outils de coupe, carbure métallique CVD, carbure métallique à revêtement PVD et en Cermet, respectivement.

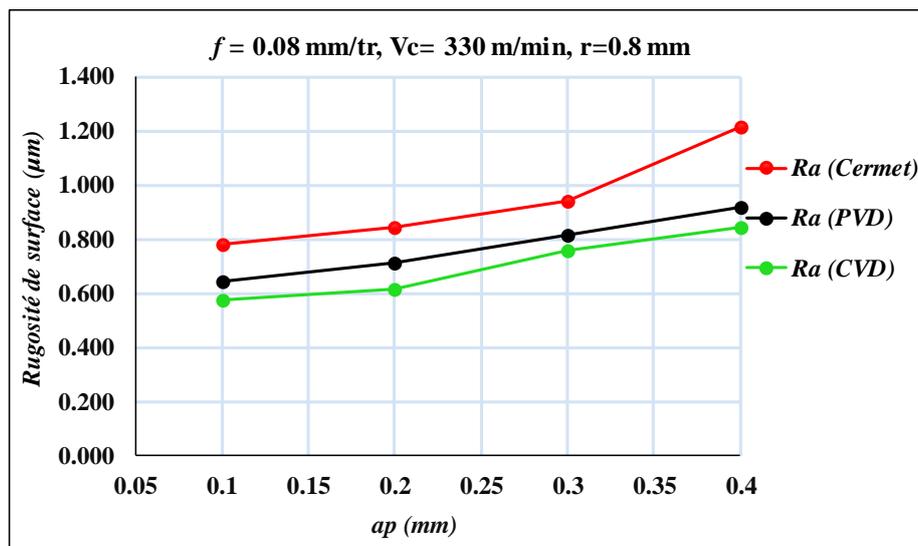


Figure III.6 Evolution de la rugosité (Ra) en fonction de (a_p).

c) Influence de la vitesse de coupe

La figure III.7 expose l'évolution de la rugosité (Ra) en fonction de la variation de (V_c) à $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.15$ mm et $r=0.8$ mm. Les résultats obtenus montrent une légère augmentation de la rugosité (Ra) avec l'augmentation de (V_c). Cela est expliqué par la ductilité du matériau de la pièce (présence du chrome 12% dans la composition chimique) causant l'apparition des micro-copeaux soudés sur la surface usinée de la pièce. Plus la vitesse de coupe (V_c) croît, plus les microsoudures augmentent en nombre et par conséquent le critère de rugosité augmente. Aussi, l'augmentation de la rugosité (Ra) est due à l'usure rapide des plaquettes liée aux vitesses élevées. Il est à noter que pour une augmentation de la vitesse (V_c) de (100 à 400) m/min, la rugosité (Ra) augmente à peu près de (19, 22, 45) % pour les outils, carbure métallique CVD, carbure métallique à revêtement PVD et en Cermet, respectivement.

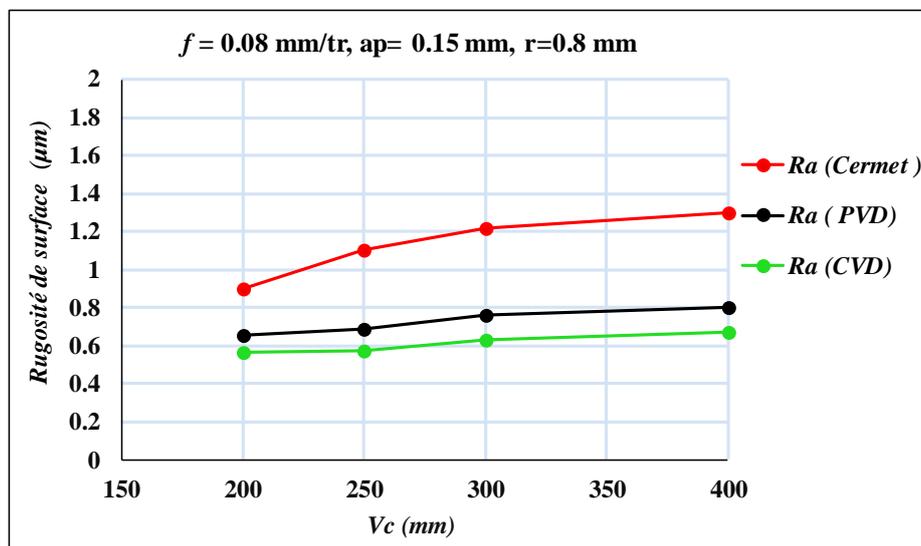


Figure III.7 Evolution de la rugosité (Ra) en fonction de (V_c).

d) Influence de rayon de bec de l'outil

La figure III.8 présente l'évolution de la rugosité (Ra) en fonction du rayon (r) à $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.2$ mm et $V_c=330$ m/min. On remarque que le rayon (r) a une influence significative sur la rugosité de surface (Ra). L'analyse de la courbe montre que lorsque le rayon (r) augmente, l'état de surface s'améliore énormément. Pratiquement, l'augmentation du rayon (r) entraîne un écrasement des aspérités de la surface usinée, ce qui a pour effet amélioration de l'état de surface [78]. Il est à noter qu'une augmentation (r) de (0.8 à 1.6) mm, conduit à une chute presque de 84 % de la rugosité (Ra) pour les plaquettes de coupe en carbure métallique à revêtement CVD.

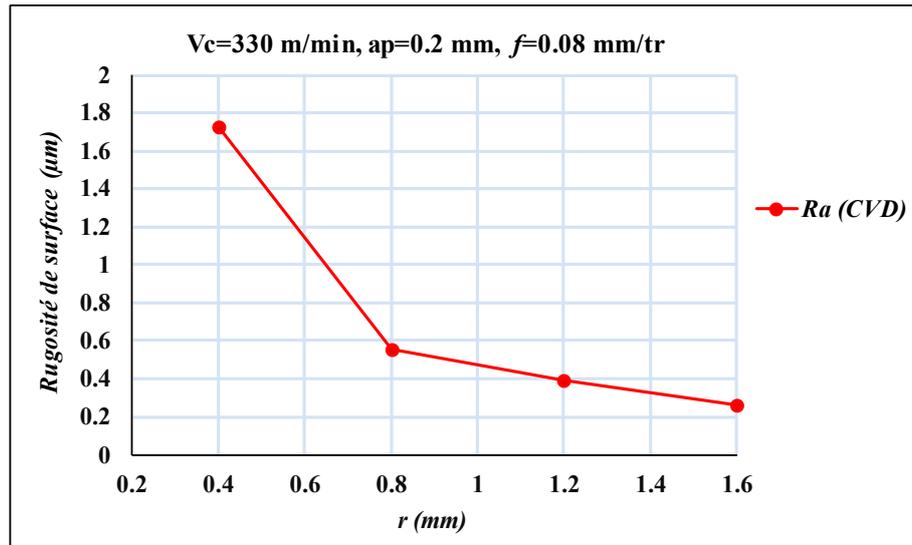


Figure III.8 Evolution de la rugosité (Ra) en fonction de (r).

III.3 Evolution de l'usure

L'usure de l'outil de coupe est un paramètre de sortie important à suivre pendant une opération d'usinage. On constate que les principaux paramètres technologiques, tels que la qualité de la surface, la précision de l'usinage, le coût de l'opération d'usinage et la productivité, sont en relation directe avec l'usure de l'outil [79]. Par conséquent, l'étude approfondie et continue de l'usure, notamment lors de l'usinage des aciers de travail à froid, tels que l'acier X210Cr12, est une tâche d'une grande importance économique et technologique en usinage [80]. Généralement, le comportement de l'outil est influencé par plusieurs facteurs, de nombreux chercheurs dans la littérature ont indiqué que le paramètre d'usinage le plus important affectant l'évolution de l'usure du dépouille (V_b) est la vitesse de coupe [81, 82].

III.3.1 Evolution de l'usure et durée de vie

La figure III.9 illustre l'évolution de l'usure en dépouille (V_b) en fonction du temps d'usinage lors du tournage de l'acier X210Cr12 pour trois vitesses de coupe 280, 320, 350 m/min, avec $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.2$ mm et $r=0.8$ mm, pour la plaquette de coupe en carbure métallique à revêtement CVD. Les essais d'usure de longue durée ont été réalisés jusqu'à la valeur de l'usure admissible $[VB]=0.3$ mm (selon la norme ISO 3685) [81]. L'analyse de ces résultats montre clairement que l'usure (V_b) est très sensible à la variation du temps d'usinage et de la vitesse de coupe. Plus, le temps d'usinage et la vitesse de coupe augmentent, plus l'usure (V_b) croît. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe les sollicitations thermomécaniques sur l'outil augmentent, la température de la zone de coupe s'élève faisant favoriser l'accélération

des mécanismes d'usure [83]. La figure III.10 montre la morphologie de l'usure du bec de l'outil au début de l'usinage et après avoir atteint l'usure admissible $[VB]=0.3\text{mm}$, pour les trois vitesses de coupe testées (280, 320 et 350) m/min. L'avance par tour et la profondeur de passe ont été maintenus constants ($f=0.08\text{ mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{ mm}$). La morphologie de l'usure pour les trois vitesses montre clairement que l'usure (V_b) se développe au début sous forme d'une bande striée et brillante sur la surface en dépouille. Ces stries, sont la preuve d'une usure abrasive [84], plus ils sont profonds, plus cette usure abrasive est agressive. Notons aussi, que ces striés ne disparaissent jamais, même à la fin de l'usinage après avoir atteint l'usure admissible. Des explications similaires ont été rapportées par [79, 81] estime que ces stries sont la cause des composant durs qui se trouve dans la composition chimique de la pièce à usinée. A la fin de l'usinage, l'usure (V_b) se manifeste par une augmentation de sa superficie (en hauteur et en largeur) et devient irrégulière. Aussi, à $V_c=320\text{ m/min}$ et surtout $V_c=350\text{ m/min}$, on remarque des écaillages sur le flanc de la plaquette de coupe causés par les pressions et les températures élevées entre l'outil de coupe et la pièce à usinée [85].

La figure III.11 illustre la tenue (t) de l'outil de coupe GC4215 lors du tournage de l'acier X210Cr12 pour les trois vitesses a été déterminée comme suit : $t=24\text{ min}$ pour $V_c=280\text{ m/min}$, $t=17\text{ min}$ pour $V_c=320\text{ m/min}$ et $t=14\text{ min}$ pour $V_c=350\text{ m/min}$. Donc on peut conclure que l'augmentation de la vitesse de coupe fait chuter la tenue de l'outil GC4215, et le Ratio $t_{V_c280}/t_{V_c320}=1.41$, $t_{V_c320}/t_{V_c350}=1.21$, $t_{V_c280}/t_{V_c350}=1.71$.

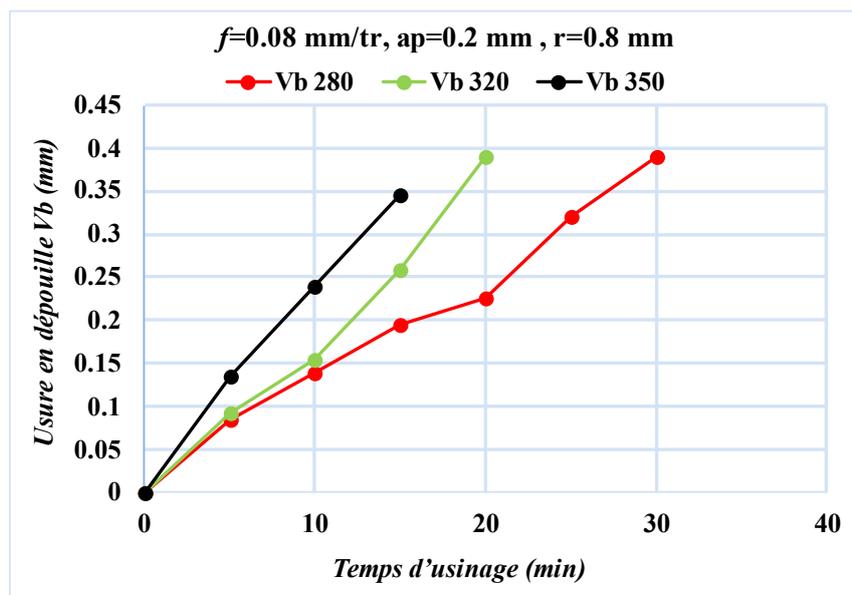


Figure III.9 Évolution de (V_b) en fonction du temps d'usinage à trois vitesses de coupe.

Vc= 280 m/min		Vc= 320 m/min		Vc= 350 m/min	
Vb=0.085 mm t=5min	Vb=0.320 mm t=25min	Vb=0.093 mm t=5min	Vb= 0.31 mm t=17.5min	Vb=0.134 mm t=5min	Vb= 0.345 mm t=15min

Figure III.10 Morphologie de l'usure (Vb) au début et à la fin de l'usinage pour trois (Vc).

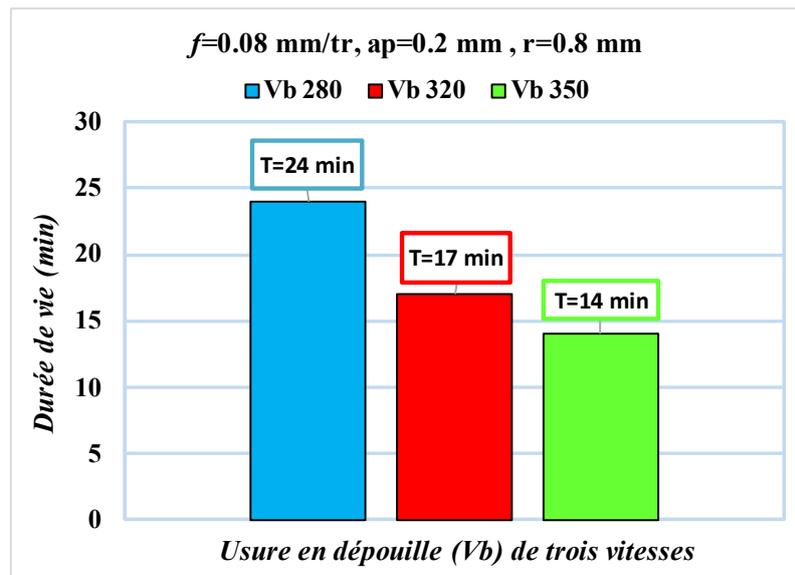


Figure III.11. Tenues de la plaquette de coupe (GC4215) pour trois vitesses de coupe.

III.3.2 Evolution de la rugosité de surface en fonction de l'usure

La figure III.12 présente les résultats de l'évolution de (Ra) en fonction de la bande d'usure en dépouille (Vb) de l'outil de coupe pour Vc=320 m/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.2$ mm et $r=0.8$ mm. Il est clair que l'augmentation de (Vb) induit une dégradation de l'état de surface et par conséquent l'augmentation de la rugosité (Ra). Lorsque l'usure (Vb) passe de la valeur (0.09 à 0.259) mm, (Ra) augmente de 32%, tandis que l'accroissement de la rugosité (Ra) est de à peu près de 81% quand (Vb) évolue de (0.259 à 0.39) mm. On remarque que dans la deuxième partie que l'usure s'accélère d'une manière drastique. Dans la littérature, presque la majorité des chercheurs affirment que l'usure de l'outil dégrade l'état de surface [86, 87].

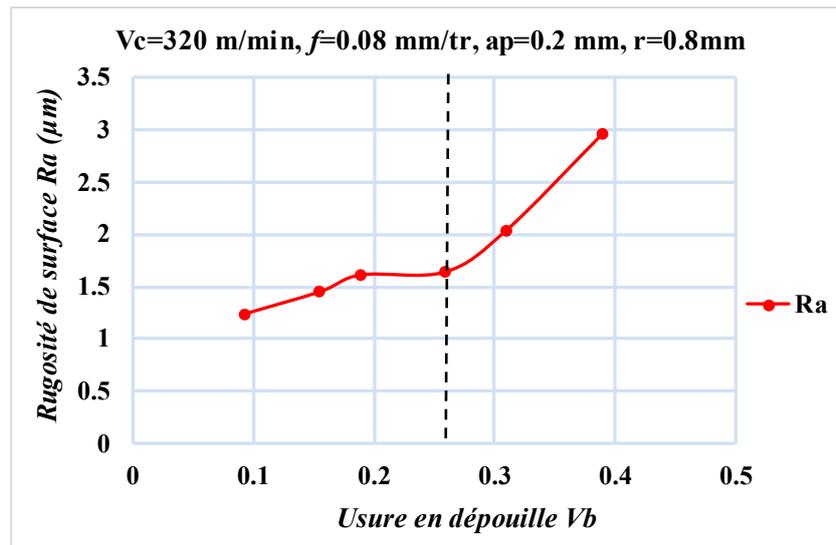


Figure III.12 Évolution de (R_a) en fonction de l'usure (V_b).

III.3.3 Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure

Le figure III.13 illustre l'évolution de l'effort de coupe (F_z) en fonction de l'usure (V_b) pour les paramètres de coupe $V_c = 320\text{m/min}$, $f = 0.08\text{mm/tr}$, $a_p = 0.2\text{mm}$. Il ressort que l'effort (F_z) augmente en fonction de l'usure (V_b). Ceci est une conséquence de l'évolution de l'usure (V_b) de l'outil, puisque dans ce cas la surface de contact entre l'outil de coupe coupant et la pièce augmente. Cela induit une augmentation des forces de frottements impliquant une augmentation de l'effort de coupe (F_z). Des explications similaires ont été évoquées par [79].

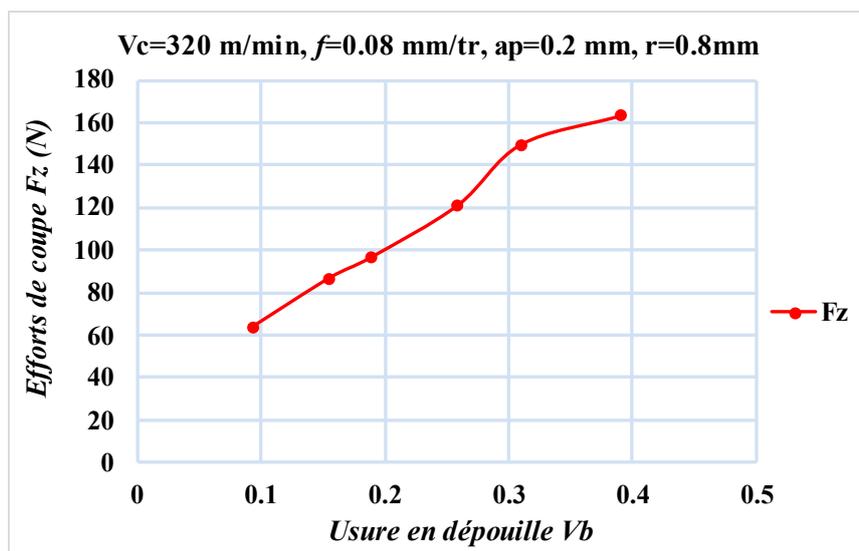


Figure III.13 Evolution de l'effort (F_z) en fonction de l'usure (V_b).

III.4 Topographie de surface 3D générée après usinage

Pour mieux comprendre les phénomènes physiques liés à la micro géométrie de la surface et pour caractériser les défauts de surface localisés au niveau des profils usinés, une analyse topographique a été réalisée à l'aide d'un rugosimètre optique 3D. Dans ce cas, nous avons utilisé les paramètres fonctionnels 2D et 3D (R_k et S_k) car ils sont plus proches de la rugosité réelle mesurée que les critères de rugosité conventionnels (R_a , R_z et R_q ...etc). Ces paramètres sont calculés à partir de la courbe d'Abbott obtenue par intégration de la distribution des hauteurs sur toute la surface mesurée [88, 89]. Dans notre étude toutes les courbes et les paramètres étudiés sont obtenues en utilisant un filtre de régression gaussien robuste. Ce filtre, en lissant les données de manière gaussienne, permet d'éviter certaines limitations des autres filtres tout en obtenant un profil de rugosité satisfaisant (conforme à la norme ISO 11562/1996) [90]. Il sépare l'ondulation et la rugosité de manière à ne pas altérer ni décaler le signal [91], réduisant également les erreurs près des pics et des vallées. Plusieurs études suggèrent l'utilisation d'un filtre gaussien robuste lors de l'évaluation de surfaces usinées afin de minimiser l'impact des vallées profondes qui peuvent perturber le profil de rugosité [91-93].

III.4.1 Topographie de surface 3D en fonction de l'avance

La figure III.14 illustre les résultats de différentes topographies de surface (3D) obtenues par quatre avances (0.08, 0.12, 0.18 et 0.22) mm/tr tout en conservant les valeurs à $V_c=330$ m/min, $r=1.6$ mm, et $a_p=0.15$ mm constants, par le carbure métallique CVD. L'analyse des résultats des topographies de surface (3D) montre que l'augmentation de l'avance f de 0.08 à 0.22 mm/tr conduit à une augmentation des critères (R_a , R_q , R_z et R_t) de (231.61, 203.83, 99.01, 80.54) %, respectivement. D'après cette figure on remarque que les rainures engendrées après usinage à différentes avances, sont plus profondes et plus larges et la distance entre les pics et les vallées est importante lorsque l'avance varie de (0.08 à 0.22) mm/tr. Des résultats similaires ont été trouvés par Laouissi et al [94].

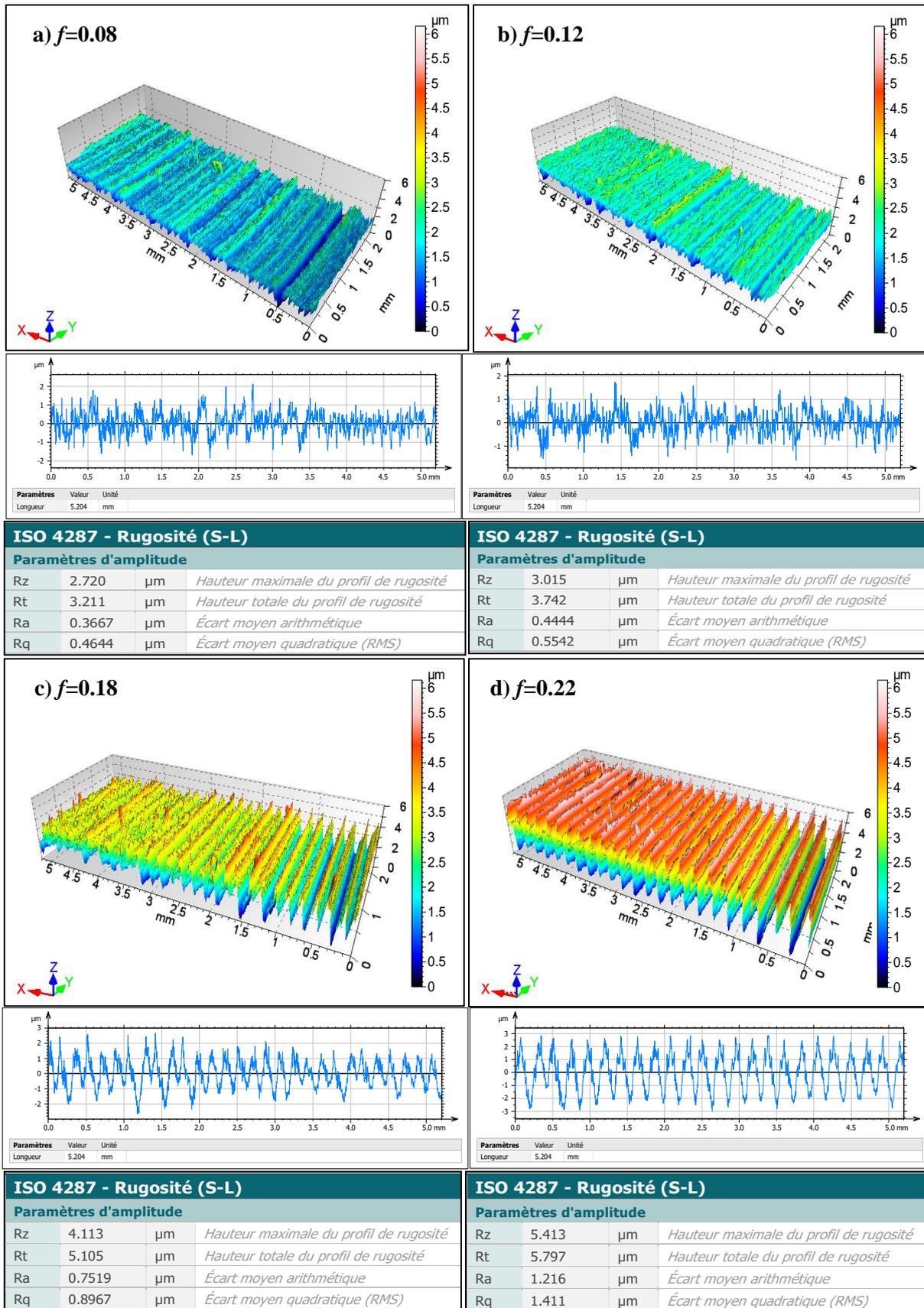


Figure III.14 Topographie de surface 3D en fonction de l'avance (f).

III.4.1.1 Paramètre fonctionnels 2D

La figure **III.15** illustre les paramètres fonctionnels R_k (Paramètres 2D) tels que R_{pk} , R_k , R_{vk} , Mr_1 et Mr_2 . Ces paramètres permettent de définir la forme du profil de rugosité en calculant la proportion de matière à différents niveaux. Les résultats présentés dans cette figure sont obtenus pour f de (0.08 à 0.22) mm/tr à $V_c=330$ m/min, $r=1.6$ mm, et $a_p=0.15$ mm. On remarque que la profondeur de rugosité du cœur (R_k), la profondeur réduite des pics (R_{pk}) et la profondeur de rugosité des vallées (R_{vk}) sont très influencées par la variation de l'avance. La figure montre que pour l'avance $f=0.08$ mm/tr ($R_k=0.691$, $R_{pk}=0.490$ et $R_{vk}=0.430$) μm , pour $f=0.12$ mm/tr ($R_k=0.842$, $R_{pk}=0.557$ et $R_{vk}=0.540$) μm , pour $f=0.18$ mm/tr ($R_k=0.705$, $R_{pk}=0.600$ et $R_{vk}=0.367$) μm et pour $f=0.22$ mm/tr ($R_k=0.884$, $R_{pk}=0.702$ et $R_{vk}=0.492$) μm . On remarque aussi que taux de portance délimitant la zone du cœur (Mr_1), augmente de (11.59 à 16.14) % lorsque l'avance augmente de (0.08 à 0.22) mm/tr. Cette figure montre aussi que la grande partie de la matière est occupée par le profil de noyau (Mr_2), entre (87.65 et 90.48) %.

III.4.1.2 Paramètre fonctionnels 3D

- **Les paramètres S_k**

La figure **III.16** montre la comparaison entre les valeurs des paramètres fonctionnels S_k (paramètres 3D) qui sont des extensions des paramètres R_k enregistrés pendant les expériences en fonction de quatre avance (0.08, 0.12, 0.18 et 0.22) mm/tr. D'après cette figure, on constate que l'augmentation de l'avance de $f = (0.08 \text{ à } f=0.22)$ mm/tr provoquer une augmentation de la rugosité de noyau (S_k), la rugosité des pics (S_{pk}) et des vallées (S_{vk}) comme suit : ($S_k=1.228$, $S_{pk}=0.5476$, $S_{vk}=0.5054$) μm pour $f=0.08$ mm/tr, et de ($S_k= 3.656$, $S_{pk}=0.6872$, $S_{vk}=0.9386$) μm pour $f=0.22$ mm/tr.

- **Paramètres volumiques**

La figure **III.17** présente les paramètres fonctionnels de volume, qui mesurent la quantité d'espace vide dans les vallées pour une valeur de $p\%$ du rapport de matière de surface. Les paramètres (V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} et V_{vv}) correspondent respectivement aux volumes de matière retirée des pics, de matière supprimée de la surface, d'espace vide dans la surface et d'espace vide dans les vallées. Pour utiliser ces paramètres de volume, il est nécessaire de définir les taux de longueur portante surfacique qui délimitent les pics retirés et les vallées retirées de la surface supprimée. Par défaut, les taux de (10 et 80) % sont utilisés. A partir de cette figure, on remarque qu'avec l'augmentation de l'avance de ($f=0.08$ jusqu'à $f=0.22$) mm/tr, le volume de matière des

pics (V_{mp}) augmente de $0.00002708 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ pour $f=0.08 \text{ mm/tr}$ jusqu'à $0.00004305 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ pour $f=0.22 \text{ mm/tr}$.

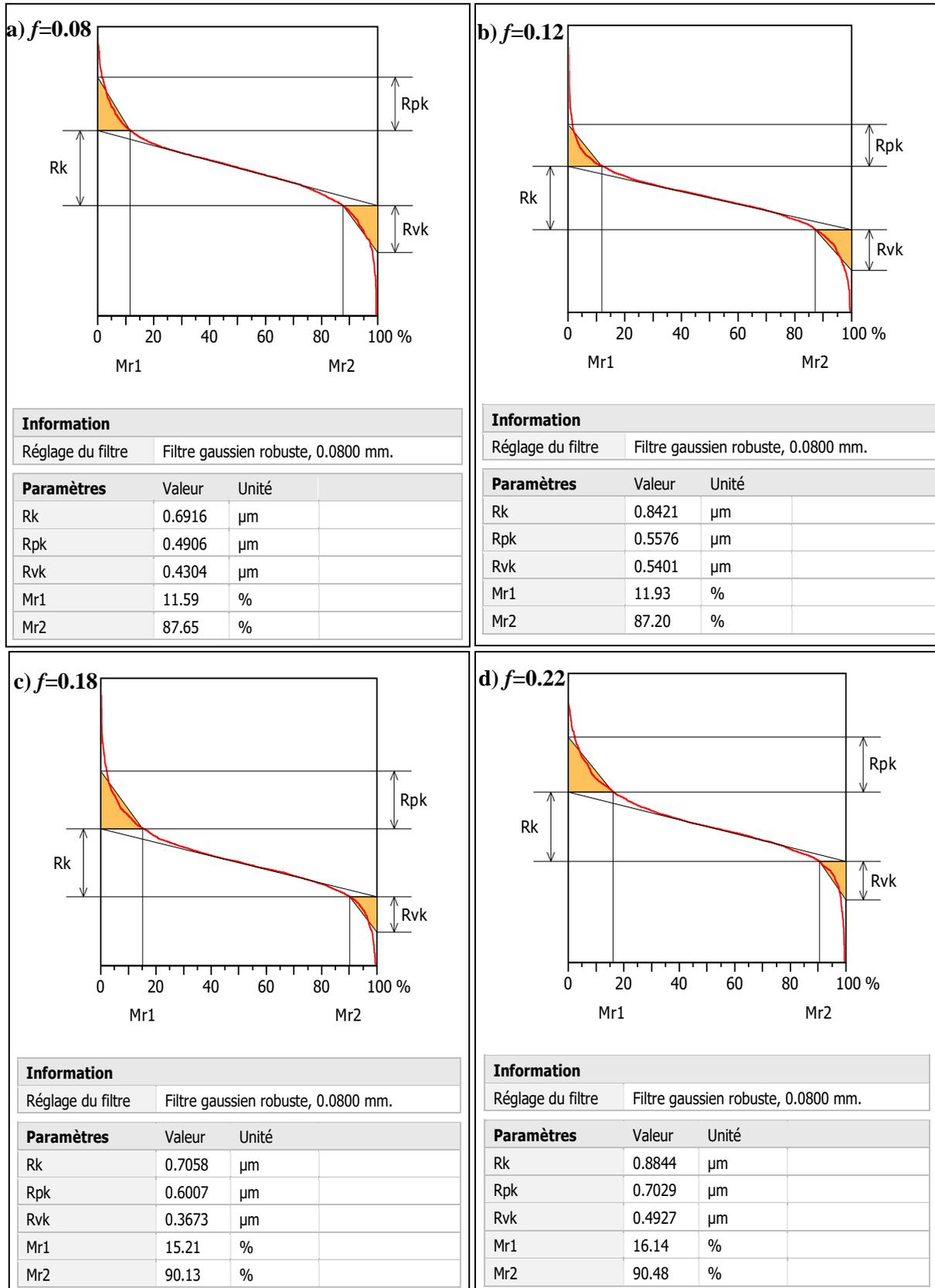


Figure III.15 Paramètre fonctionnels 2D (R_k) en fonction de l'avance (f).

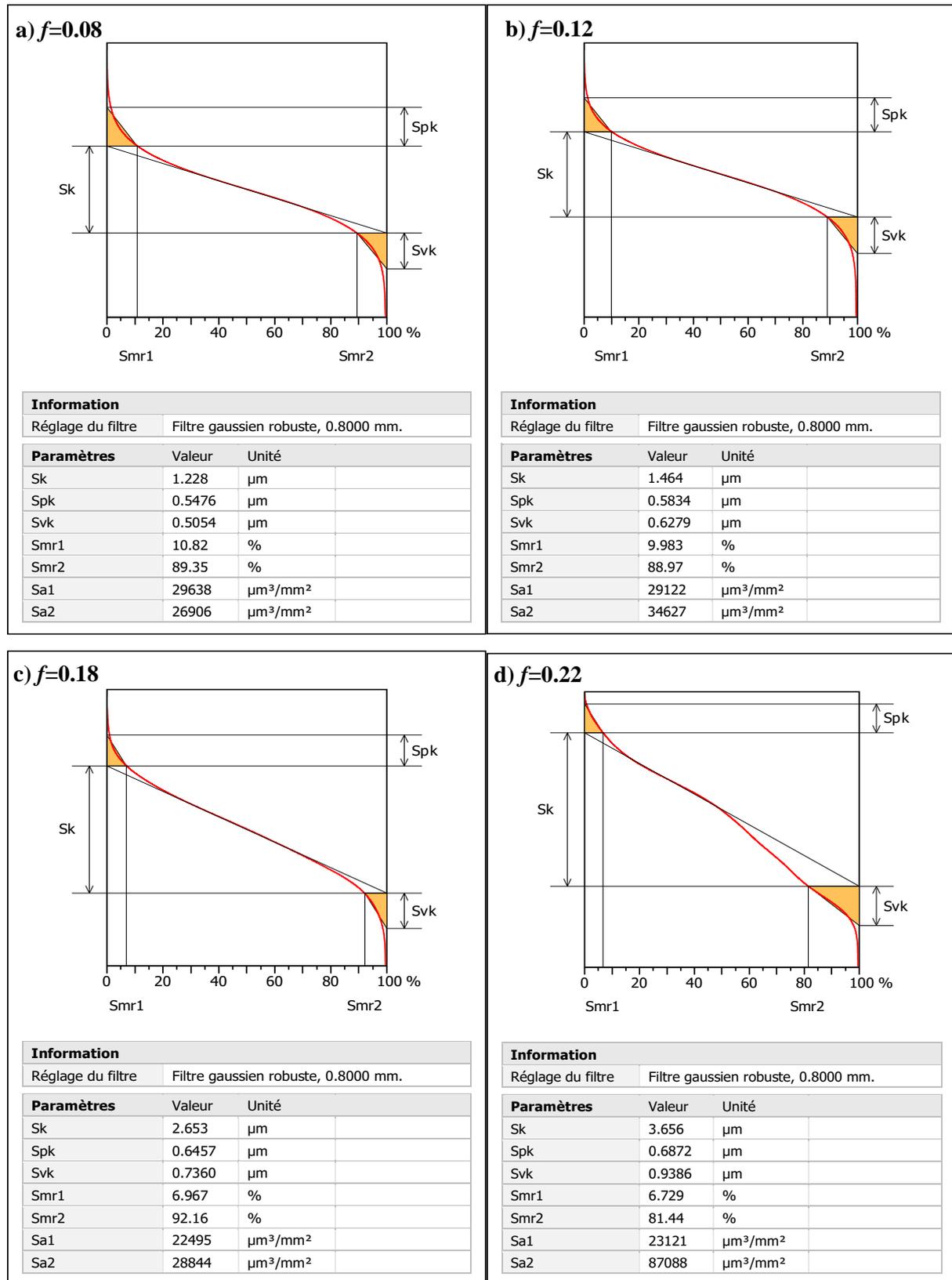


Figure III.16 Paramètres fonctionnels (S_k) en fonction de l'avance (f).

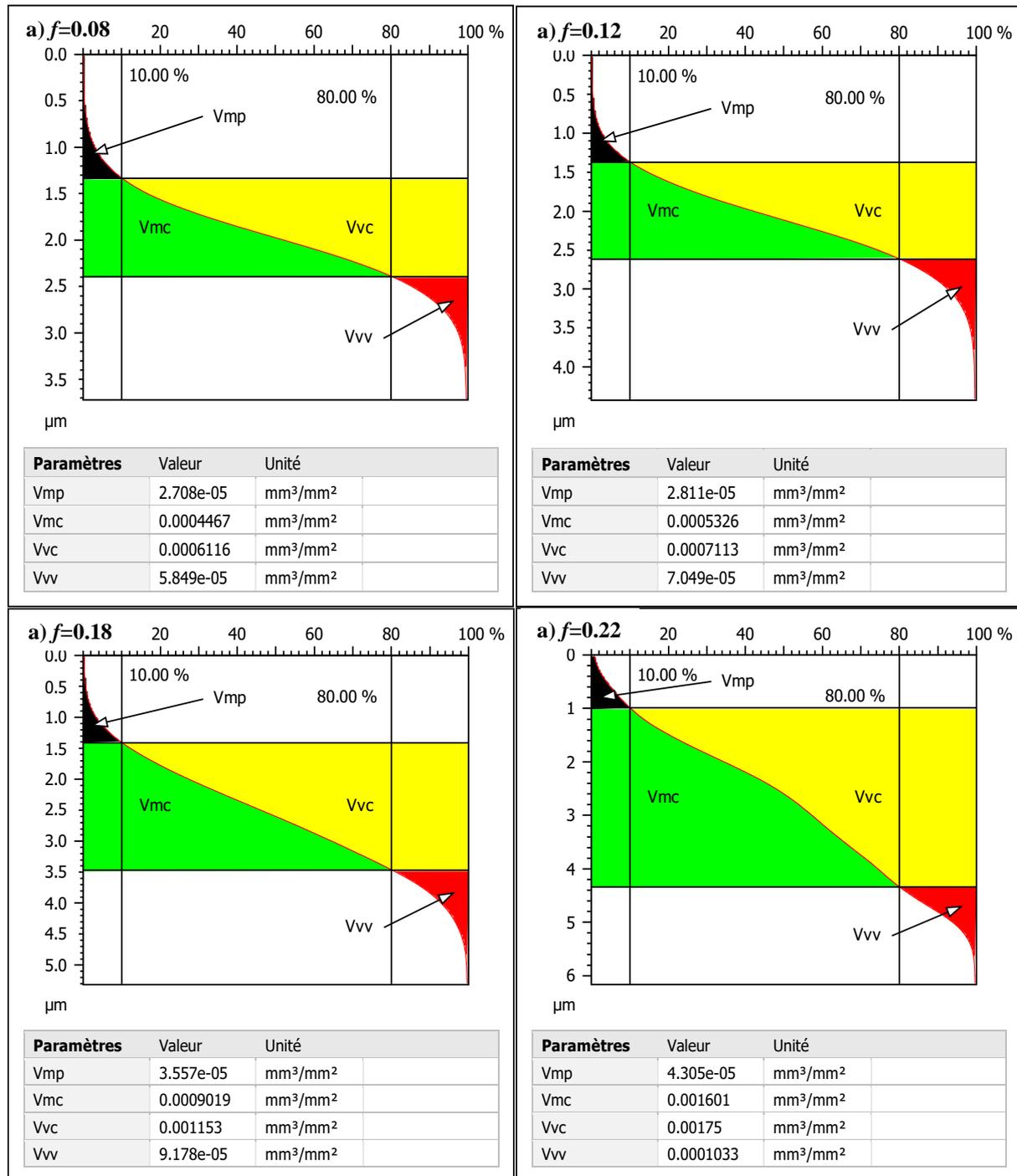


Figure III.17 Paramètres volumiques en fonction de l'avance (f).

III.4.2 Topographie de surface 3D en fonction de rayon

La figure **III.18** illustre les résultats de différentes topographies de surface (3D) obtenues en utilisant quatre rayons de bec de l'outil (0.4, 0.8, 1.2 et 1.6) mm tout en en maintenant les valeurs à $V_c=330$ m/min, $f=0.08$ mm/tr, et $a_p=0.15$ mm constants, par le carbure métallique CVD. L'analyse des résultats montrent que l'augmentation de rayon de (0.4 à 1.6) mm conduit à une diminution des critères (R_a , R_z et R_t) de (45, 24, 33) %, respectivement. Avec un rayon $r=0.4$ mm, on remarque que les pics des différents profils sont élevés, alors que pour un rayon de $r=1.6$ mm, les pics des profils ont une hauteur moins élevée. Ceci s'explique par l'augmentation de la zone de contact lorsque le rayon de bec de l'outil augmente, cela engendre un écrasement des aspérités et un affaissement des crêtes ce qui engendre une amélioration de l'état de surface [95]. Par conséquent, les valeurs des critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) diminuent nettement avec l'augmentation du rayon du bec (**Fig. III.18**).

III.4.2.1 Paramètre fonctionnels 2D

La figure **III.19** illustre les paramètres fonctionnels R_k . Les résultats présentés dans cette figure sont obtenus pour le rayon (r) de (0.4 à 1.6) mm à $V_c=330$ m/min, $f=0.22$ mm/tr, et $a_p=0.15$ mm. On remarque que la profondeur de rugosité du cœur (R_k), la profondeur réduite des pics (R_{pk}) et la profondeur de rugosité des vallées (R_{vk}) sont très influencées par la variation de l'avance. La figure montre que pour $r=0.4$ mm ($R_k=1.239$, $R_{pk}=1.895$ et $R_{vk}=0.6869$) μm , pour $r=0.8$ mm ($R_k=0.9914$, $R_{pk}=1.843$ et $R_{vk}=0.5821$) μm , pour $r=1.2$ mm ($R_k=0.7087$, $R_{pk}=0.9654$ et $R_{vk}=0.7562$) μm et pour $r=1.6$ mm ($R_k=0.5358$, $R_{pk}=0.6974$ et $R_{vk}=0.6316$) μm . On remarque aussi que taux de portance délimitant la zone du cœur (Mr_1), diminue de (21.89 à 11.90) % lorsque le rayon augmente $r= (0.08 \text{ à } 0.22)$ mm. Cette figure montre aussi que la grande partie de la matière est occupée par le profil de noyau (Mr_2), entre (93.66 et 86.37) %.

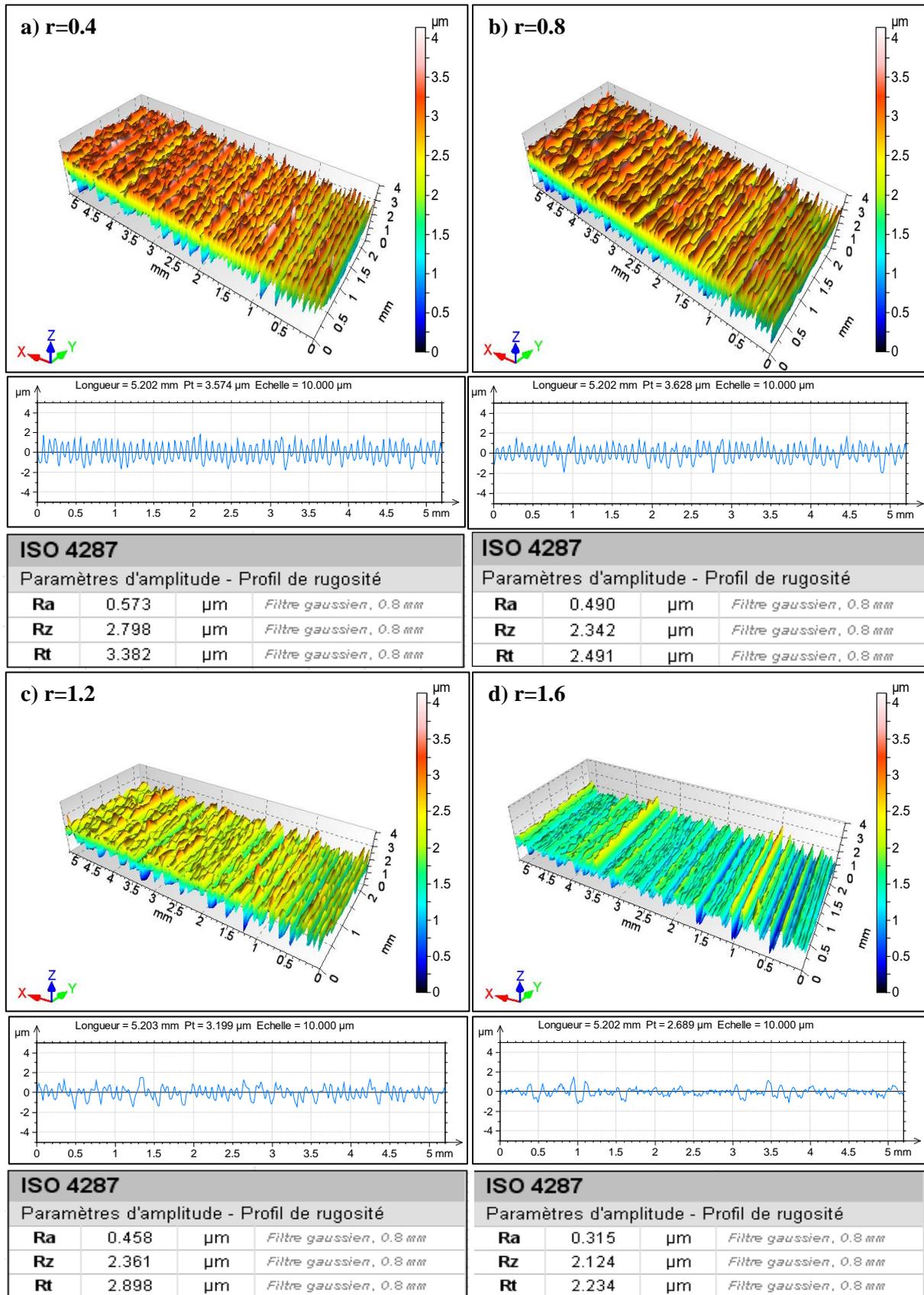


Figure III.18 Topographie de surface 3D en fonction de rayon (r).

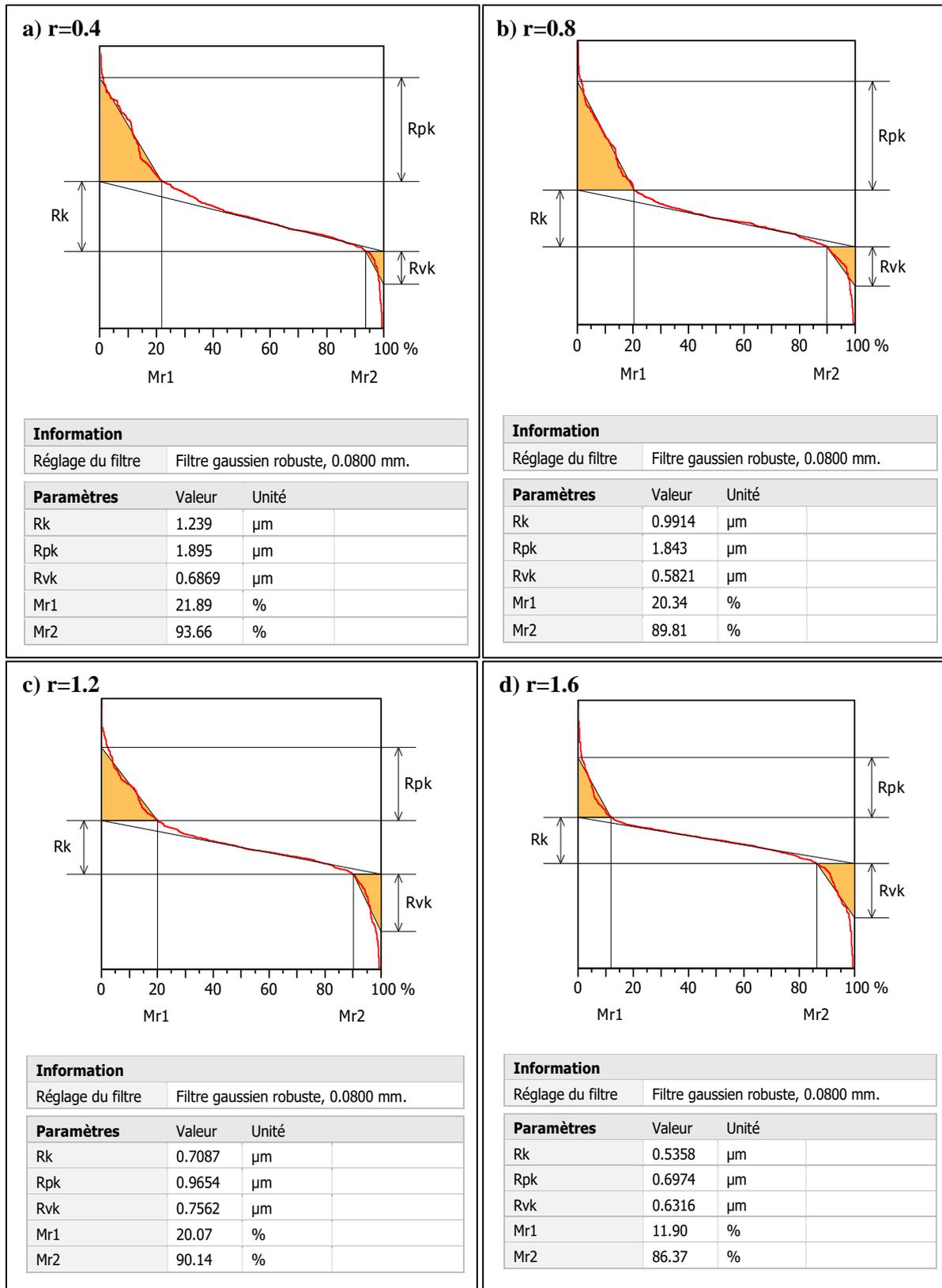


Figure III.19 Paramètre fonctionnels 2D (Rk) en fonction de rayon (r).

III.4.2.2 Paramètre fonctionnels 3D

- **Les paramètres Sk**

La figure **III.20** montre la comparaison entre les valeurs des paramètres fonctionnels Sk (paramètres 3D) qui sont des extensions des paramètres 2D Rk enregistrée pendant les expériences en fonction de quatre rayons de bec de l'outil (0.4, 0.8, 1.2 et 1.6) mm. D'après cette figure, on constate que l'augmentation du rayon de r=0.4 mm à r=1.6 mm provoquer une diminution de la rugosité de noyau (Sk), la rugosité des pics (Spk) et des vallées (Svk) de (Sk=2.374, Spk=1.489, Svk=0.6398) μm pour r=0.4 mm, et de (Sk=1.214, Spk=0.5512, Svk=0.5609) μm pour r=1.6 mm. D'autre part la surface portante des pics (S_{mr1}) diminué de (19.85 à 7.966) %.

- **Paramètres volumiques**

La figure **III.21** illustre les paramètres fonctionnels de volume. Ce paramètre représente le volume de vide des vallées pour la valeur p% du rapport de matière de surface. Afin d'utiliser les paramètres de volume (V_{mp}, V_{mc}, V_{vc}, et V_{vv}), il est nécessaire de spécifier les taux de longueur portante surfacique séparant les pics éliminés et vallées éliminées de la surface écrêtée. Par défaut, les taux (10 et 80) % sont utilisés. A partir de cette figure, on remarque qu'avec l'augmentation du rayon de (r=0.4 jusqu'à r=1.6) mm le volume de matière des pics (V_{mp}) diminution de 0.00004556 mm^3/mm^2 pour r=0.4 mm jusqu'à 0.0000291 mm^3/mm^2 pour r=1.6 mm.

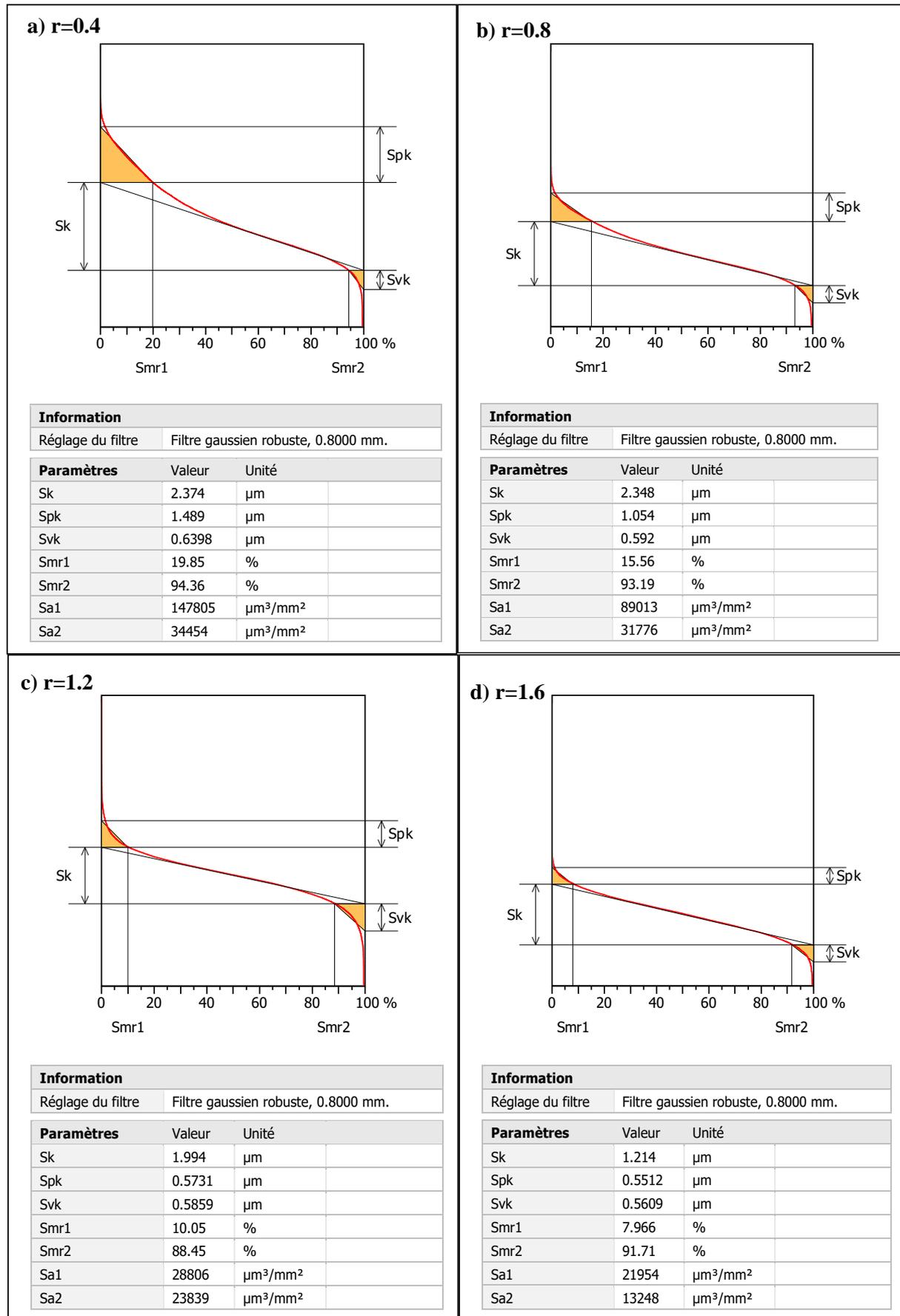


Figure III.20 Paramètres fonctionnels (Sk) en fonction de rayon (r).

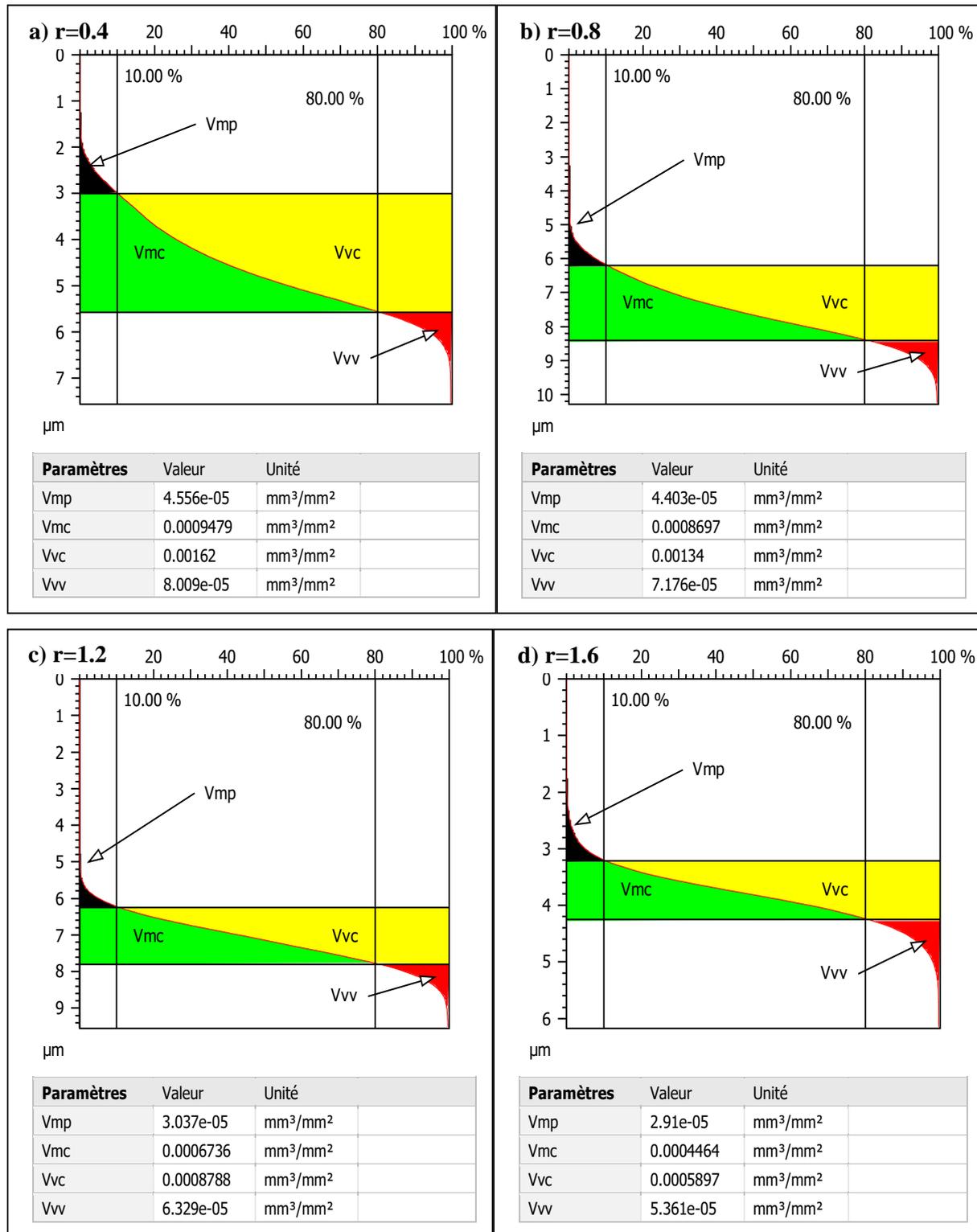


Figure III.21 Paramètres volumiques en fonction de rayon (r).

III.5 Evolution de la température de coupe

Le but de suivre l'évolution de la température de coupe lors de l'usinage de l'acier X210Cr12 par le carbure métallique CVD étant d'étudier systématiquement les variations de cette dernière en fonction de tous les paramètres de base de la coupe. Nous avons choisi d'observer essentiellement la variation de la température en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de profondeur de passe. La vitesse de coupe semble être l'un des paramètres les plus déterminants sur la température de coupe [96]. La valeur maximale de la température de coupe a été mesurée pour toutes les conditions de coupe.

III.5.1 Evolution de la température de coupe en fonction de (V_c)

La figure III.22 présente les températures dans la zone de coupe enregistrées durant l'usinage de l'acier X210Cr12 en fonction de deux vitesses de coupe de (200 et 400) m/min, avec $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.1$ mm et $r=0.8$ mm sont restées constantes. Il ressort que l'augmentation de la vitesse de coupe engendre une augmentation de la quantité d'énergie générée par le frottement et la déformation entre l'outil et la pièce ce qui élève la température dans la zone de coupe. La majorité de la chaleur dégagée du processus de coupe est évacuée par le copeau, les échanges thermiques avec la pièce sont minimes. Cela a pour effet d'éviter la dilatation thermique de la pièce, c'est à dire qu'elle ne sera pas affectée thermiquement [97]. Cependant, il existe une limite à la vitesse de coupe au-delà de laquelle la chaleur générée peut entraîner une usure excessive de l'outil. En pratique une élévation de la vitesse de coupe de (200 à 400) m/min, conduit à une élévation de la température de coupe dans la zone de contact (outil, copeau, pièce) de (154.06 jusqu'à 303.85) °C.

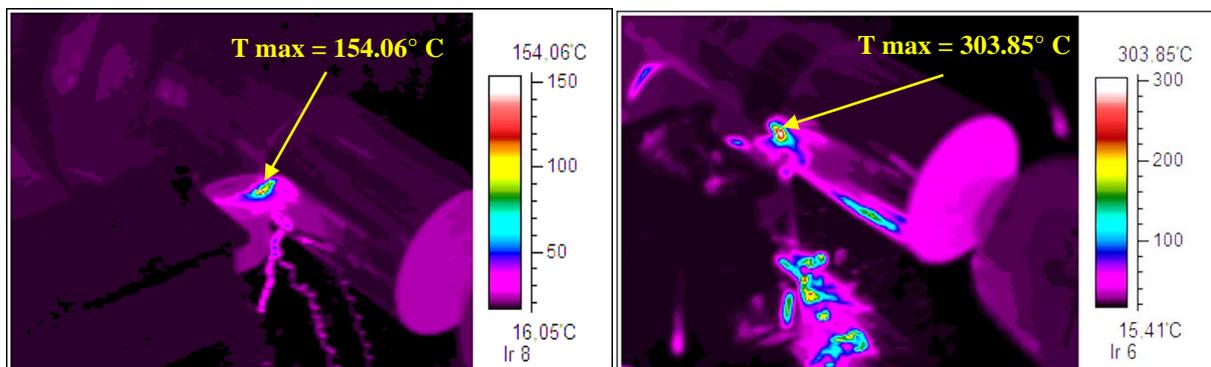


Figure III.22 Température de coupe (T°) en fonction de la vitesse (V_c).

III.5.2 Evolution de la température de coupe en fonction de (a_p)

La figure III.23 présente les températures dans la zone de coupe enregistrées durant l'usinage de l'acier X210Cr12 en fonction de deux profondeurs de passe (a_p) de (0.1 et 0.4) mm avec $V_c = 200$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $r = 0.8$ mm qui sont restées constantes. La profondeur de passe, c'est-à-dire la quantité de matière enlevée à chaque passe, peut également influencer la température de coupe. Une profondeur de passe plus importante signifie généralement une plus grande quantité de matière à enlever, ce qui peut entraîner une augmentation de la chaleur générée [98]. L'élévation de profondeurs de passe (a_p) de (0.1 et 0.4) mm, conduit à une augmentation de la température de coupe dans la zone de contact de (154.06 jusqu'à 249.54) °C.

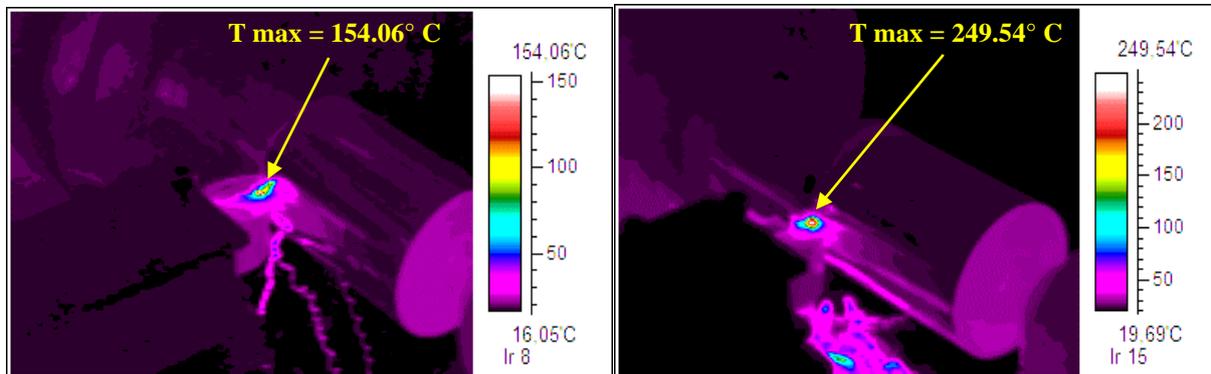


Figure III.23 Température de coupe (T°) en fonction de la profondeur (a_p).

III.5.3 Evolution de la température de coupe en fonction de (f)

La figure III.24 présente les températures enregistrées durant l'usinage de l'acier X210Cr12 en fonction de deux avances (f) de (0.08 et 0.22) mm/tr avec $V_c = 200$ m/min, $a_p = 0.1$ mm, et $r = 0.8$ mm qui sont restées constantes. L'avance (f) est la distance parcourue par l'outil de coupe pendant un tour complet de la pièce. Une augmentation de l'avance peut également augmenter la température de coupe, car elle augmente le frottement et la déformation plastique de la matière [99]. Cependant, une avance insuffisante peut provoquer un frottement excessif et une élévation de la température. L'élévation de l'avances (f) de (0.08 et 0.22) mm/tr, conduit à une augmentation de la température de coupe dans la zone de contact de (154.06 jusqu'à 217.44) °C.

Chacun de ces paramètres peut avoir un impact sur la température de coupe, mais ils interagissent également les uns avec les autres. Cependant, dans les conditions de coupe

étudiées, la vitesse de coupe a une influence supérieure sur la température par rapport à l'avance et la profondeur de passe.

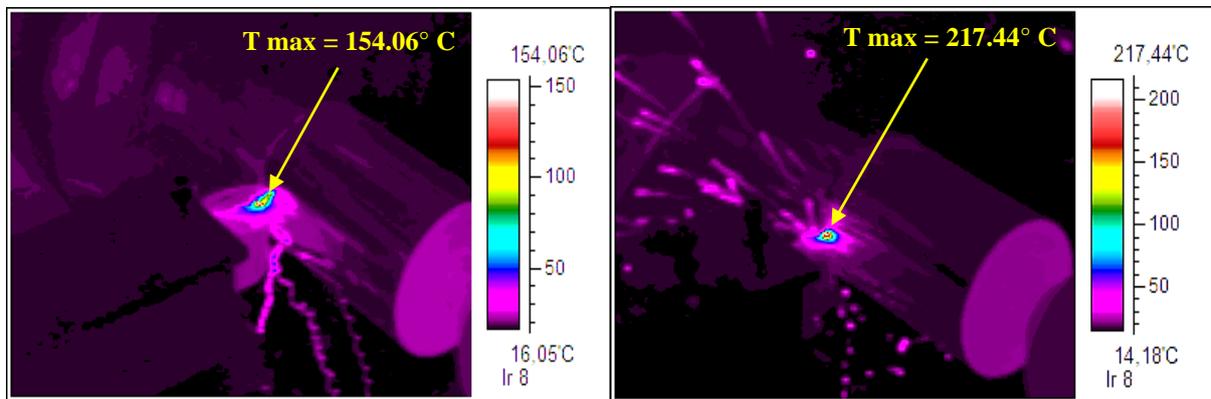


Figure III.24 Température de coupe (T°) en fonction de l'avance (f).

III.6 Conclusion

Les essais préliminaires ont apporté des informations intéressantes sur le comportement d'usinabilité du couple d'usinage (Acier X210Cr12/ Carbure métallique avec revêtement CVD, carbure métallique à revêtement PVD et en Cermet) car ils nous ont permis d'étudier l'influence des paramètres suivants : la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), la profondeur de passe (a_p) et le temps d'usinage (t) sur la rugosité de surface 2D et 3D, l'usure, l'effort de coupe et la température de coupe. Ainsi, les plages des paramètres de coupe liées au bon fonctionnement d'outil coupant, les mieux adaptées et les durées de vie ont été déterminées.

CHAPITRE IV

**Étude de l'impact des différents matériaux de
l'outils dans un environnement à sec et lubrifié
(MQL)**

IV.1 Introduction

Ce chapitre, concerne une étude expérimentale qui s'intéresse à étudier l'influence des conditions de coupe et du matériau de l'outil lors de l'usinage d'un acier à outil (X210Cr12) dans un environnement de lubrification à sec et en utilisant un minimum quantité de lubrification dans une distance d'usinage constante égale à 350 mm .Le but est de réaliser une étude statistique, de proposer une modélisation de la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe (F_z) l'usure en dépouille (V_b) et par la suite effectuer une optimisation des conditions de coupe (V_c , f et a_p) ainsi que le matériau de l'outil (M). La méthode de surface de réponse (RSM) a été appliquée afin d'étudier l'influence des facteurs d'entrée sur les sorties (R_a , F_z et V_b), le traitement statistique a permis de proposer des modèles mathématiques de prédiction.

IV.2 Analyse statistique et modélisation

Dans ce chapitre, un plan d'expérience de Taguchi L_{18} ($2^1 3^3$) a été adopté dans cette étude sous un environnement à sec et en utilisant un minimum quantité de lubrification (MQL) lors de tournage de l'acier X210Cr12. Les paramètres d'entrée retenus sont (V_c , f , a_p et M), chaque facteur à trois niveaux de variation, sauf la profondeur de passe (a_p) a été varié deux fois. Les niveaux des quatre facteurs ainsi que leurs valeurs sont illustrés dans le tableau **IV.1**. Les valeurs des quatre paramètres ont été choisies suivant les recommandations du fabricant d'outils en se basant sur la notion du couple outil-matière.

L'analyse des résultats de ce tableau **IV.1** montre que pour les différentes combinaisons du régime de coupe, les valeurs de la rugosité de surface (R_a) lors de l'usinage à sec et MQL varient dans les intervalles (1.418 à 4.350) μm et (0.919 à 3.233) μm , respectivement. On remarque aussi que l'effort de coupe (F_z) à sec et MQL obtenus varient dans les intervalles (43.84 à 371.5) N et (24.85 à 280) N, respectivement. Finalement, pour l'usure en dépouille (V_b) à sec et MQL, elles changent selon les intervalles (0.045 à 0.56) mm et (0.023 à 0.37) mm, respectivement.

Tableau IV.1 Résultats des essais pour un plan de Taguchi L₁₈ à sec et MQL.

N°	Paramètres d'usinage				Facteurs de réponse					
					A sec			MQL		
	ap (mm)	Vc (m/min)	M	f (mm/tr)	Ra (µm)	Fz (N)	Vb (mm)	Ra (µm)	Fz (N)	Vb (mm)
1	0.2	200	CVD	0.08	1.418	43.84	0.086	0.919	24.85	0.062
2	0.2	200	Cermet	0.14	2.311	135.2	0.14	1.954	101	0.089
3	0.2	200	PVD	0.2	1.973	115	0.045	1.764	73.2	0.023
4	0.2	270	CVD	0.08	1.619	56.03	0.109	1.353	45.18	0.072
5	0.2	270	Cermet	0.14	2.786	162.3	0.241	2.452	120.6	0.156
6	0.2	270	PVD	0.2	2.356	118	0.047	1.999	83	0.032
7	0.2	340	CVD	0.14	2.212	99.98	0.115	1.880	56.03	0.071
8	0.2	340	Cermet	0.2	4.350	165.8	0.219	3.233	136.5	0.15
9	0.2	340	PVD	0.08	1.738	68.36	0.062	1.465	46.27	0.057
10	0.4	200	CVD	0.2	2.292	217.5	0.071	1.910	164.9	0.067
11	0.4	200	Cermet	0.08	1.877	241	0.28	1.514	178.9	0.185
12	0.4	200	PVD	0.14	2.514	164.4	0.051	2.241	132.8	0.031
13	0.4	270	CVD	0.14	1.728	179.1	0.107	1.432	153.5	0.075
14	0.4	270	Cermet	0.2	3.241	317.8	0.167	2.752	274.6	0.092
15	0.4	270	PVD	0.08	2.021	113.6	0.07	1.864	64.19	0.06
16	0.4	340	CVD	0.2	2.401	243.7	0.104	2.076	186.3	0.068
17	0.4	340	Cermet	0.08	2.971	371.5	0.56	2.532	280.01	0.37
18	0.4	340	PVD	0.14	2.732	191.1	0.083	2.343	164	0.061

Lors des essais d'usinage, la rugosité de surface, l'effort de coupe et l'usure en dépouille obtenus conduisent à une amélioration importante sous lubrification avec MQL. La figure IV.1 illustre un graphique comparatif des mesures expérimentales de Ra, Fz et Vb dans les différentes conditions de lubrification à sec et MQL. On peut également observer l'effet significatif de la lubrification sur la qualité de surface, sur la minimisation des efforts de coupe, et la minimisation de l'usure des plaquettes de coupe. En effet, la technique MQL affecte non seulement la qualité de fabrication mais respecte également l'aspect écologique et préserve l'environnement en réduisant les utilisations d'huiles lubrifiantes dans les opérations nécessitant la lubrification.

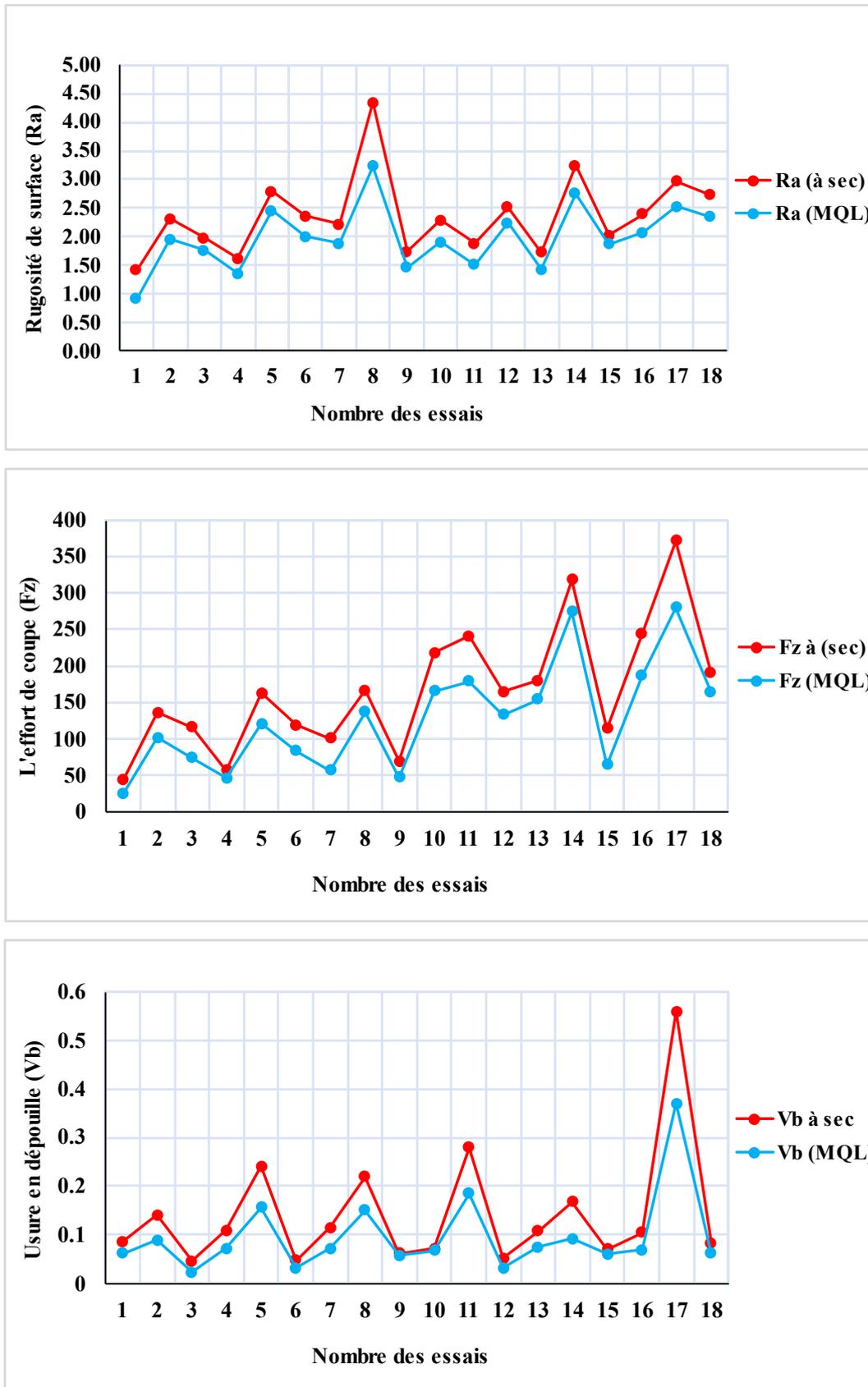


Figure IV.1 Comparaison des résultats expérimentaux de Ra, Fz et Vb à sec et MQL.

IV.2.1 Analyse de la variance (ANOVA) à sec et MQL

Afin de mener l'étude statistique et déterminer l'influence et la contribution des facteurs principaux et leurs interactions sur les paramètres de sortie, la méthodologie de la surface de réponse (RSM) a été utilisée conjointement avec l'analyse de la variance (ANOVA) [100]. Les résultats issus de l'ANOVA pour les paramètres technologiques (R_a , F_z et P_c), ont été obtenus pour un niveau de confiance de 95% ($\alpha = 0.05$). Les tableaux de l'ANOVA présentent les paramètres statistiques permettant d'évaluer l'influence des facteurs sur les résultats. Ils incluent la somme des carrés (SC), les degrés de liberté (DL), la contribution en pourcentage (Cont%) et les carrés moyens (CM) de chaque facteur, ainsi que les interactions. Le coefficient de Fisher (F) et la valeur de probabilité (p) indiquent le degré de signification des paramètres pour chaque source de variation. Une valeur de (p) inférieure à 0.05 montre un impact significatif du facteur sur la réponse mesurée.

IV.2.1.1 ANOVA pour (R_a)

La rugosité de surface est considérée comme l'une des contraintes les plus critiques pour la sélection des paramètres de coupe dans la planification du processus d'usinage. D'après l'ANOVA présentée dans les tableaux **IV.2** et **IV.3**, il est clair que le facteur le plus important affectant la rugosité de surface (R_a), c'est le matériau de l'outil de coupe (M), sa contribution de 37.13% et 38.61% respectivement en usinage sec et MQL. Il est suivi par l'avance (f) qui est le deuxième facteur le plus influant sur la rugosité de surface avec une contribution de 25.08% et 26.36% respectivement pour usinage sec et MQL. Durant le processus de tournage, la surface générées est un sillon hélicoïdal résultant de la forme du bec de l'outil et au mouvement hélicoïdal de l'outil-pièce généré par la machine-outil, plus l'avance augmente, plus les sillons augmentent en profondeur et par conséquent la rugosité augmente. L'analyse ANOVA montre aussi que la vitesse de coupe (V_c) est un facteur qui influe sur la rugosité de surface avec une contribution de 16.41 % et de 15.44 % en usinage à sec et en MQL. Les interactions ($ap \times M$) et ($V_c \times M$) sont également significatives en usinage sec et en MQL. Des résultats similaires ont été trouvés par Nouioua [101].

Tableau IV.2 ANOVA pour Ra (usinage à sec).

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
ap	1	0.05712	0.70%	0.01035	0.37	0.588
Vc	1	1.34603	16.41%	0.93814	33.23	0.01
f	1	2.05758	25.08%	1.15966	41.08	0.008
M	2	3.04643	37.13%	1.10773	39.24	0.007
ap×Vc	1	0.11544	1.41%	0.08282	2.93	0.185
ap×f	1	0.01353	0.16%	0.00319	0.11	0.759
ap×M	2	0.79887	9.74%	0.23433	8.3	0.06
Vc×f	1	0.0201	0.25%	0.02492	0.88	0.417
Vc×M	2	0.65272	7.96%	0.28869	10.23	0.046
f×M	2	0.01181	0.14%	0.0059	0.21	0.822
Erreur	3	0.08469	1.03%	0.02823		
Total	17	8.20432	100.00%			

Tableau IV.3 ANOVA pour Ra (usinage à MQL).

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
ap	1	0.15033	2.85%	0.041942	5.98	0.092
Vc	1	0.86779	15.44%	0.63038	89.87	0.002
f	1	1.39196	26.36%	0.746787	106.46	0.002
M	2	1.98589	38.61%	0.756051	107.78	0.002
ap×Vc	1	0.03575	0.68%	0.031634	4.51	0.124
ap×f	1	0.00142	0.03%	0.0154	2.2	0.235
ap×M	2	0.50982	9.66%	0.216103	30.81	0.01
Vc×f	1	0.11368	2.15%	0.014182	2.02	0.25
Vc×M	2	0.18578	3.52%	0.096237	13.72	0.031
f×M	2	0.01658	0.31%	0.008291	1.18	0.418
Erreur	3	0.02104	0.40%	0.007015		
Total	17	5.28007	100.00%			

IV.2.1.2 ANOVA pour (Fz)

Les tableaux **IV.4** et **IV.5** illustrent les résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe tangentiel (Fz) en usinage sec et MQL. A partir des résultats du tableau **IV.4**, l'analyse de la variance en usinage à sec montre que l'influence de la profondeur de coupe sur l'effort tangentiel (Fz) vient en première position avec une contribution de 49.44 %, suivie par le matériau d'outil de coupe (M) avec une contribution de 29.91%. Il est à noter que lors de l'augmentation de la profondeur de coupe (ap), la pièce à usiner exerce une résistance à la pénétration sur l'outil dans les deux directions tangentielle et axiale ce qui contribue à l'augmentation de l'effort tangentiel (Fz). L'avance par tour (f) est également un facteur important qui influe à son tour sur l'effort tangentiel avec une contribution de 5.15 % suivie par

la vitesse de coupe (V_c) avec une contribution de 3.20 %. Aussi, les interactions ($ap \times f$), ($V_c \times M$) et ($f \times M$) ont un effet significatif sur l'effort (F_z). Les résultats trouvés sont en bon accord avec les travaux des chercheurs précédents [102, 103].

L'analyse de variance ANOVA présentée dans le tableau IV.5 pour la composante de l'effort (F_z) en usinage MQL montre que la profondeur de passe (ap) vient en première position d'influence suivie par le matériau d'outil de coupe (M) et l'avance (f) puis la vitesse de coupe (V_c) avec des contributions de 49.63 %, 29.55 %, 6.96 % et 3.35 % respectivement. Aussi, les interactions ($ap \times f$), ($M \times f$) ont un effet significatif sur l'effort (F_z).

Tableau IV.4 ANOVA pour F_z (usinage à sec).

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
ap	1	64224	49.44%	23435.6	299.89	0.0001
Vc	1	4163	3.20%	4654.5	59.56	0.005
f	1	6696	5.15%	3174.3	40.62	0.008
M	2	38859	29.91%	19733.7	252.52	0.0003
ap×Vc	1	1711	1.32%	385.7	4.94	0.113
ap×f	1	34	0.03%	932.5	11.93	0.041
ap×M	2	7521	5.79%	736.2	9.42	0.051
Vc×f	1	2734	2.11%	519.3	6.64	0.082
Vc×M	2	722	0.56%	794.4	10.16	0.046
f×M	2	3000	2.31%	1500.2	19.2	0.02
Erreur	3	234	0.18%	78.1		
Total	17	129899	100.00%			

Tableau IV.5 ANOVA pour F_z (usinage à MQL).

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
ap	1	46265.8	49.63%	24487.4	254.09	0.001
Vc	1	3118.9	3.35%	5070.5	52.61	0.005
f	1	6491.4	6.96%	2049.6	21.27	0.019
M	2	27547.5	29.55%	15104.8	156.73	0.001
ap×Vc	1	1082.2	1.16%	5.9	0.06	0.82
ap×f	1	413	0.44%	1825.5	18.94	0.022
ap×M	2	4049.6	4.34%	181.8	1.89	0.295
Vc×f	1	1187.5	1.27%	454	4.71	0.118
Vc×M	2	608.9	0.65%	274.7	2.85	0.202
f×M	2	2161.3	2.32%	1080.6	11.21	0.041
Erreur	3	289.1	0.31%	96.4		
Total	17	93215.2	100.00%			

IV.2.1.3 ANOVA pour (Vb)

Les tableaux **IV.6** et **IV.7** illustrent les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour l'usure (Vb). L'analyse des résultats du tableau montre que le facteur (M) c'est le premier facteur qui affecte l'usure (Vb), avec une contribution de 55.54% et de 50.80%, respectivement à sec et MQL. On peut constater aussi que (f) a un effet significatif sur l'usure (Vb) avec une contribution de 8.32% et 10.44%, respectivement à sec et MQL. Le facteur suivant influençant l'usure (Vb) est la vitesse de coupe (Vc) suivie par (ap), leurs contributions sont de 6.96% et 3.86 % à sec et de 7.64% et 4.39% en usinage MQL, respectivement. Aussi, les interactions (Vc×f), (Vc×M), (f×M) ont des effets significatifs sur l'usure (Vb) en usinage à sec et les interactions (Vc×M), (f×M) ont des effets significatifs sur (Vb) en usinage en MQL.

Tableau IV.6 ANOVA pour Vb (usinage à sec).

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
ap	1	0.010225	3.86%	0.00134	27.42	0.014
Vc	1	0.018408	6.96%	0.021015	430.22	0
f	1	0.022016	8.32%	0.011432	234.04	0.001
M	2	0.146943	55.54%	0.066711	1365.72	0
ap × Vc	1	0.004033	1.52%	0.000413	8.45	0.062
ap × f	1	0.01635	6.18%	0.000011	0.22	0.67
ap × M	2	0.010621	4.01%	0.000263	5.39	0.101
Vc × f	1	0.011044	4.17%	0.0007	14.33	0.032
Vc × M	2	0.010576	4.00%	0.008503	174.08	0.001
f × M	2	0.014207	5.37%	0.007104	145.43	0.001
Erreur	3	0.000147	0.06%	0.000049		
Total	17	0.264571	100.00%			

Tableau IV.7 ANOVA pour Vb (usinage MQL).

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
ap	1	0.004901	4.39%	0.000335	11.41	0.043
Vc	1	0.008533	7.64%	0.008805	299.49	0
f	1	0.011656	10.44%	0.005774	196.41	0.001
M	2	0.056734	50.80%	0.025292	860.3	0
ap×Vc	1	0.001045	0.94%	0.000093	3.17	0.173
ap×f	1	0.007401	6.63%	0.00008	2.71	0.198
ap×M	2	0.004098	3.67%	0.000056	1.9	0.293
Vc×f	1	0.00519	4.65%	0.000211	7.16	0.075
Vc×M	2	0.005275	4.72%	0.004555	154.92	0.001
f×M	2	0.006768	6.06%	0.003384	115.11	0.001
Erreur	3	0.000088	0.08%	0.000029		
Total	17	0.11169	100.00%			

IV.2.1.4 Graphique des effets principaux de Ra, Fz et Vb

Les graphiques des effets principaux de la rugosité (Ra) sont présentés dans la figure IV.2. 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 de coupe en Cermet affecte fortement la rugosité (Ra) que les autres facteurs. Aussi l'avance (f) affecte fortement la rugosité (Ra) et puis la vitesse (V_c) et la profondeur (ap) respectivement. Notons dans ce cas d'usinage que l'augmentation de (V_c) entraîne une augmentation de (Ra) à cause de l'augmentation de l'usure de l'outil de coupe.

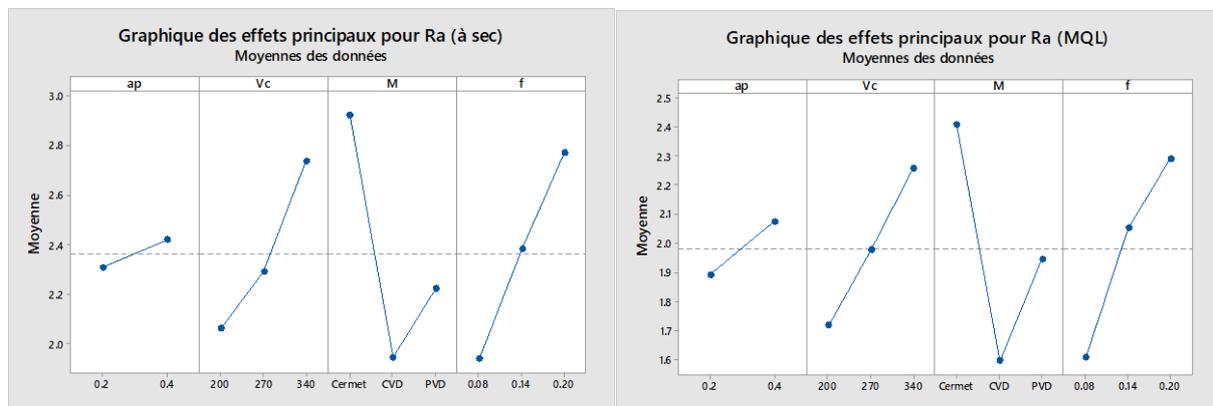


Figure IV.2 Graphique des effets principaux de (Ra).

Les graphiques des effets principaux de l'effort (Fz) sont présentés dans la figure IV.3. À partir de cette figure, on peut dire que la profondeur de passe (ap) affecte fortement l'effort (Fz), suivie par l'effet d'outil de coupe en Cermet puis l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c) respectivement. On remarque que l'effort (Fz) s'élève avec l'augmentation de l'avance. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande.

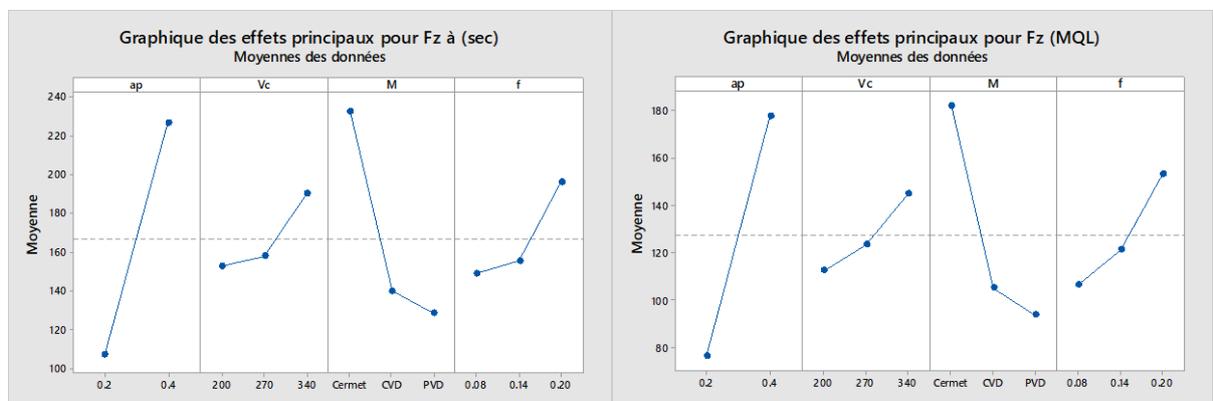


Figure IV.3 Graphique des effets principaux de (Fz).

Les graphiques des effets principaux l'usure (V_b) sont présentés dans la figure IV.4. A partir de cette figure, Il apparaît clairement que le matériau d'outil de coupe Cermet affecte fortement l'usure (V_b), car il a la plus grande pente. Il est suivi par l'avance (f) qui affecte fortement l'usure (V_b), suivie par la vitesse de coupe (V_c). Par contre, la profondeur de passe a_p a une faible influence sur l'usure (V_b). L'étude du graphique des effets principaux concorde avec les résultats de L'ANOVA.

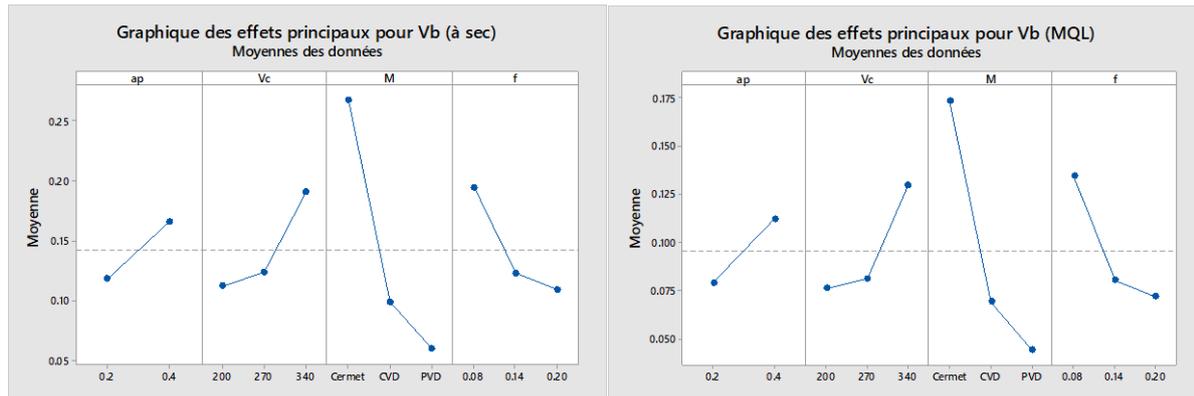


Figure IV.4 Graphique des effets principaux de (V_b).

IV.2.2 Modélisation des paramètres technologiques de performance

La relation entre les sorties étudiés (R_a , F_z et V_b) et les paramètres de coupe est caractérisée par un modèle numérique à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (RSM). Ces modèles de régression sont utilisés pour la prédiction des facteurs de réponse dans les opérations d'usinage dans l'intervalle de la variation des conditions de coupe. Les modèles mathématiques utilisées dans cette étude sont basés sur le modèle linéaire avec interaction.

Les équations (IV.1, IV.2 et IV.3) avec un coefficient de détermination (R^2) de 98.97% pour la rugosité de surface (R_a) lors de l'usinage à sec pour les différents matériaux de l'outil de coupe sont comme suit :

❖ Cermet

$$Ra (\text{à sec}) = -0.81 + 2.42 a_p + 0.01186 V_c + 0.56 f - 0.01430 a_p \times V_c + 4.9 a_p \times f + 0.0180 V_c \times f \quad (\text{IV.1})$$

❖ Carbure métallique avec revêtement CVD

$$Ra (\text{à sec}) = 0.53 + 1.66 a_p + 0.00290 V_c + 2.69 f - 0.01430 a_p \times V_c + 4.9 a_p \times f + 0.0180 V_c \times f \quad (\text{IV.2})$$

❖ Carbure métallique avec revêtement PVD

$$Ra (\text{\AA} \text{ sec}) = -1.04 + 6.56 a_p + 0.00499 V_c + 1.83 f - 0.01430 a_p \times V_c + 4.9 a_p \times f + 0.0180 V_c \times f \quad (\text{IV.3})$$

Les équations (IV.4, IV.5 et IV.6) avec un coefficient de détermination (R^2) de 99.60 % pour la rugosité de surface (R_a) lors de l'usinage sous lubrification MQL pour les différents matériaux de l'outil de coupe sont comme suit :

❖ **Cermet**

$$Ra (\text{MQL}) = -0.832 + 0.40 a_p + 0.01170 V_c + 5.50 f - 0.00884 a_p \times V_c + 10.68 a_p \times f - 0.01359 V_c \times f \quad (\text{IV.4})$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement CVD**

$$Ra (\text{MQL}) = -0.749 - 0.03 a_p + 0.00744 V_c + 7.80 f - 0.00884 a_p \times V_c + 10.68 a_p \times f - 0.01359 V_c \times f \quad (\text{IV.5})$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement PVD**

$$Ra (\text{MQL}) = -1.369 + 4.50 a_p + 0.00636 V_c + 7.38 f - 0.00884 a_p \times V_c + 10.68 a_p \times f - 0.01359 V_c \times f \quad (\text{IV.6})$$

Les équations (IV.7, IV.8 et IV.9) avec un coefficient de détermination (R^2) de 99.82 % pour l'effort de coupe (F_z) lors de l'usinage à sec pour les différents matériaux de l'outil de coupe sont comme suit :

❖ **Cermet**

$$F_z (\text{\AA} \text{ sec}) = -32.9 + 94 a_p + 0.701 V_c - 260 f + 0.976 a_p \times V_c + 2627 a_p \times f - 2.60 V_c \times f \quad (\text{IV.7})$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement CVD**

$$F_z (\text{\AA} \text{ sec}) = -72.0 - 184 a_p + 0.317 V_c + 585 f + 0.976 a_p \times V_c + 2627 a_p \times f - 2.60 V_c \times f \quad (\text{IV.8})$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement PVD**

$$F_z (\text{\AA} \text{ sec}) = -63.9 - 163 a_p + 0.213 V_c + 673 f + 0.976 a_p \times V_c + 2627 a_p \times f - 2.60 V_c \times f \quad (\text{IV.9})$$

Les équations (IV.10, IV.11 et IV.12) avec un coefficient de détermination (R^2) de 99.69 % pour l'effort de coupe (F_z) lors de l'usinage sous lubrification MQL pour les différents matériaux de l'outil de coupe sont comme suit :

❖ **Cermet**

$$Fz \text{ (MQL)} = -65.4 + 65 \text{ ap} + 0.830 \text{ Vc} - 426 \text{ f} + 0.121 \text{ ap} \times \text{Vc} + 3676 \text{ ap} \times \text{f} - 2.43 \text{ Vc} \times \text{f} \quad \text{(IV.10)}$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement CVD**

$$Fz \text{ (MQL)} = -98.7 + 36 \text{ ap} + 0.591 \text{ Vc} - 370 \text{ f} + 0.121 \text{ ap} \times \text{Vc} + 3676 \text{ ap} \times \text{f} - 2.43 \text{ Vc} \times \text{f} \quad \text{(IV.11)}$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement PVD**

$$Fz \text{ (MQL)} = -169.3 - 66 \text{ ap} + 0.553 \text{ Vc} + 467 \text{ f} + 0.121 \text{ ap} \times \text{Vc} + 3676 \text{ ap} \times \text{f} - 2.43 \text{ Vc} \times \text{f} \quad \text{(IV.12)}$$

Les équations (IV.13, IV.14 et IV.15) avec un coefficient de détermination (R^2) de 99.94% pour l'usure en dépouille (V_b) lors de l'usinage à sec pour les différents matériaux de l'outil de coupe sont comme suit :

❖ **Cermet**

$$V_b \text{ (à sec)} = -0.0080 + 0.007 \text{ ap} + 0.001797 \text{ Vc} - 1.185 \text{ f} + 0.001010 \text{ ap} \times \text{Vc} - 0.283 \text{ ap} \times \text{f} - 0.003018 \text{ Vc} \times \text{f} \quad \text{(IV.13)}$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement CVD**

$$V_b \text{ (à sec)} = -0.0020 - 0.198 \text{ ap} + 0.000435 \text{ Vc} + 0.642 \text{ f} + 0.001010 \text{ ap} \times \text{Vc} - 0.283 \text{ ap} \times \text{f} - 0.003018 \text{ Vc} \times \text{f} \quad \text{(IV.14)}$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement PVD**

$$V_b \text{ (à sec)} = -0.0635 - 0.116 \text{ ap} + 0.000288 \text{ Vc} + 0.855 \text{ f} + 0.001010 \text{ ap} \times \text{Vc} - 0.283 \text{ ap} \times \text{f} - 0.003018 \text{ Vc} \times \text{f} \quad \text{(IV.15)}$$

Les équations (IV.16, IV.17 et IV.18) avec un coefficient de détermination (R^2) de 99.92% pour l'usure en dépouille (V_b) pendant l'usinage sous lubrification MQL pour les différents matériaux de l'outil de coupe sont comme suit :

❖ **Cermet**

$$V_b \text{ (MQL)} = -0.0236 + 0.0942 \text{ ap} + 0.001238 \text{ Vc} - 0.784 \text{ f} + 0.000480 \text{ ap} \times \text{Vc} - 0.768 \text{ ap} \times \text{f} - 0.001655 \text{ Vc} \times \text{f} \quad \text{(IV.16)}$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement CVD**

$$V_b \text{ (MQL)} = 0.0039 + 0.002 \text{ ap} + 0.000146 \text{ Vc} + 0.610 \text{ f} + 0.000480 \text{ ap} \times \text{Vc} - 0.768 \text{ ap} \times \text{f} - 0.001655 \text{ Vc} \times \text{f} \quad \text{(IV.17)}$$

❖ **Carbure métallique avec revêtement PVD**

$$V_b \text{ (MQL)} = -0.0608 + 0.0346 \text{ ap} + 0.000278 \text{ Vc} + 0.511 \text{ f} + 0.000480 \text{ ap} \times \text{Vc} - 0.768 \text{ ap} \times \text{f} - 0.001655 \text{ Vc} \times \text{f} \quad \text{(IV.18)}$$

Sur le plan pratique, les modèles trouvés ont un intérêt considérable car ils permettent la prédiction des paramètres de qualification (Ra, Fz et Vb) dans l'intervalle des conditions de coupe utilisées. Toutes les valeurs de (R^2) sont élevées, ce qui indique que les modèles de régression identifiés sont efficaces pour représenter le système dans le contexte d'une expérience donnée.

IV.2.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La figure IV.5 montre la comparaison entre les valeurs prédites obtenues par la méthode de surface de réponse (RSM) et les valeurs expérimentales de Ra, Fz et Vb. On peut dire que les valeurs prédites de rugosité de surface, l'effort de coupe et l'usure en dépouille sont voisines de ceux enregistrés expérimentalement.

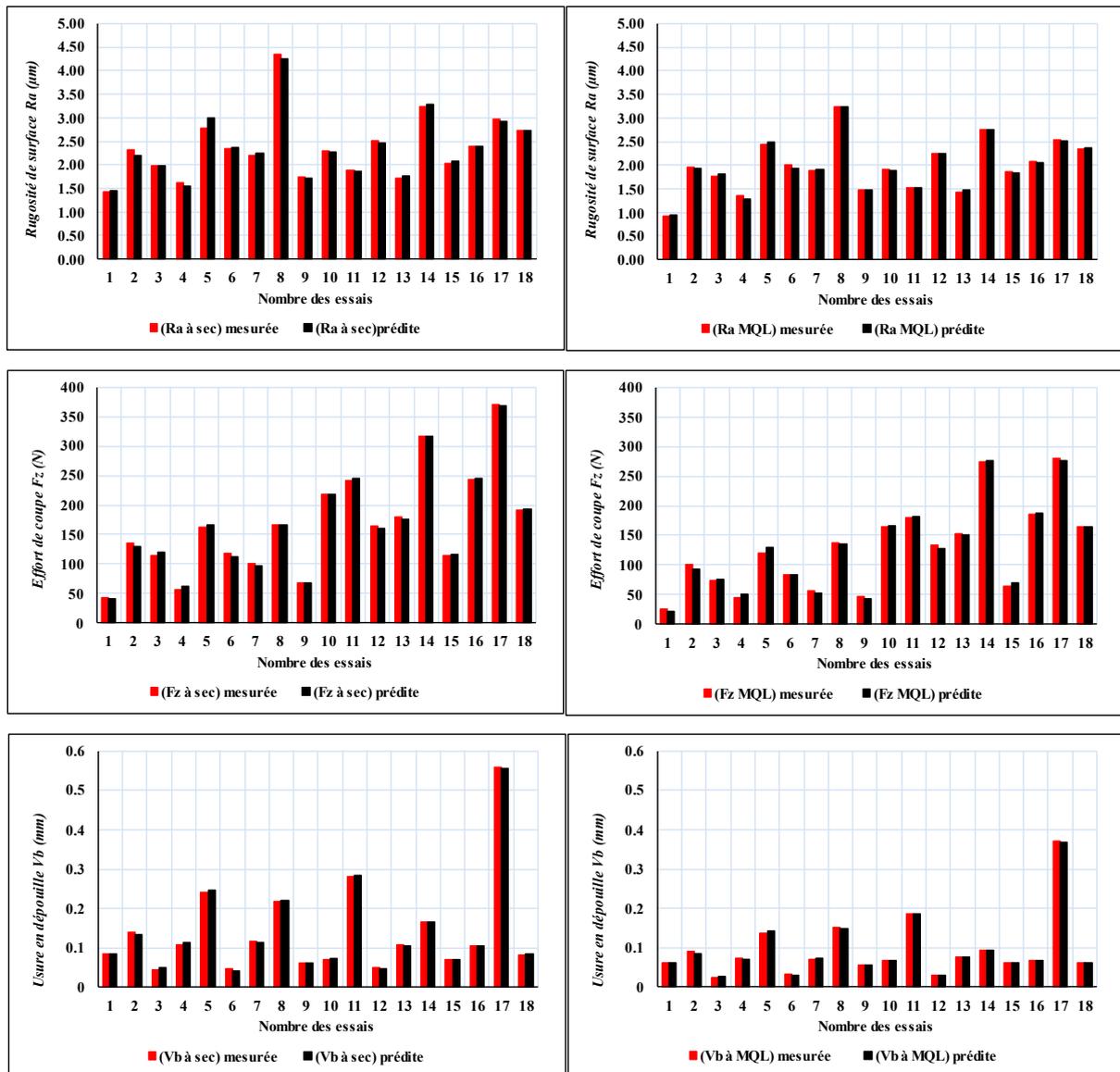


Figure IV.5 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Ra, Fz, Vb).

IV.3. Evolution de l'usure en dépouille

Les figures IV.6 et IV.7 exposent la morphologie de l'usure en dépouille (V_b) des deux plans L_{18} à sec et à lubrification MQL. On remarque que la morphologie de l'usure en dépouille pour les plaquettes de coupe en carbure métallique CVD et en carbure métallique PVD se développe suivant une bande régulière qui varie selon les conditions de chaque expérience. La comparaison de critère de l'usure (V_b) montre que les deux carbures métalliques à revêtement PVD et CVD présentes des taux d'usure semblable par rapport à ceux obtenu par la plaquette en Cermet. La valeur maximale de l'usure (V_b) enregistrée sur les plaquettes en Cermet en usinage à sec et en MQL de (0.56 et 0.37) μm , respectivement, ce qui dépasse la valeur de l'usure admissible $[V_b]=0.3 \text{ mm}$. Aussi, on remarque que pour l'essai N°17 l'apparition d'une arête rapportée sur le bec de l'outil. Cette dernière est la cause des contraintes thermomécaniques dans la zone de coupe et l'usinage à sec à favoriser ce phénomène. Cette arête rapportée a un effet néfaste sur la qualité de surface, sur l'augmentation des efforts de coupe et de la puissance consommée [73]. Par contre lors de la lubrification MQL ce phénomène n'apparaît pas, ce qui est probablement dû à la pression du système MQL qui supprime toute adhésion du copeau sur la surface de coupe.

Globalement, on peut dire que les deux plaquettes de coupe en carbure métallique CVD et en carbure métallique PVD sont bien adaptés à l'usinage de l'acier X210Cr12 par rapport au Cermet.

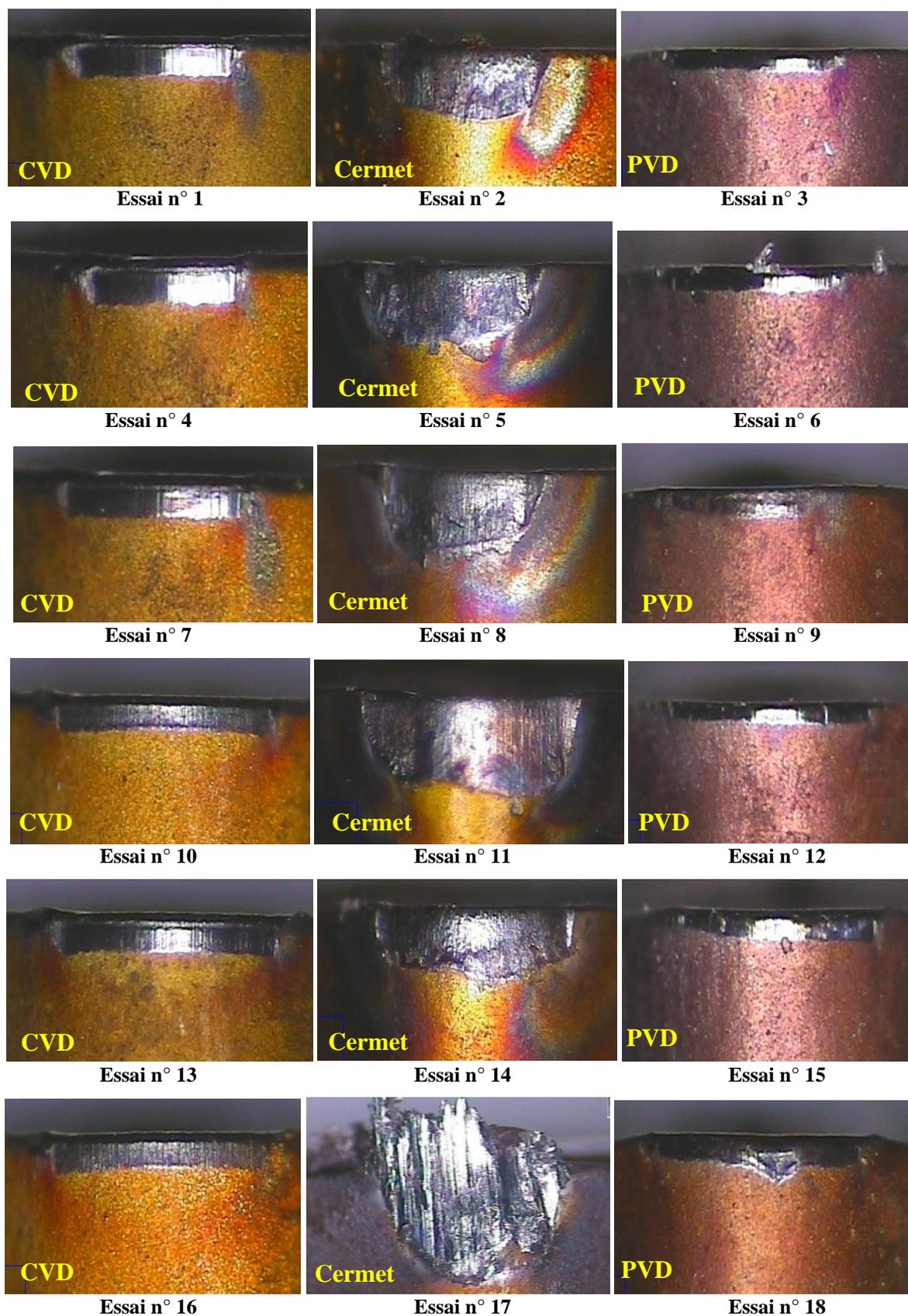


Figure IV.6 Usure en dépouille (Vb) de plan de Taguchi L₁₈ à sec.

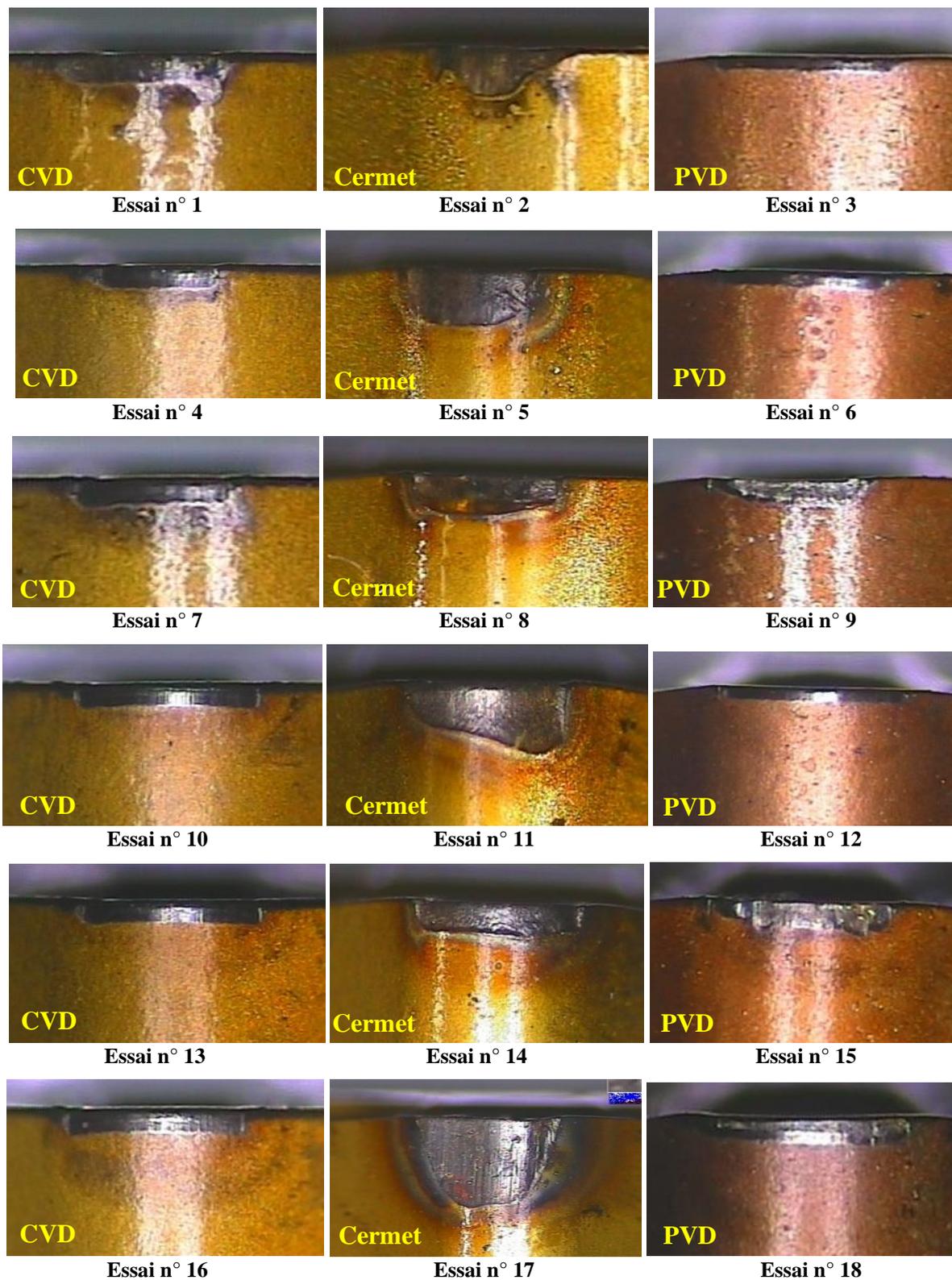


Figure IV.7 Usure en dépouille (V_b) de plan de Taguchi L_{18} à lubrification MQL.

Les Figures IV.8, IV.9 et IV.10 présentent les morphologies des arêtes des outils en carbure métallique à revêtement CVD, à revêtement PVD et Cermet, obtenues à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB). Ces images révèlent plusieurs phénomènes physiques, mécanismes et formes d'usure au niveau de l'arête de l'outil, tels que l'adhésion des microsoudures, l'usure par abrasion, l'usure en cratère, l'usure en entaille et la fissuration de la couche de revêtement. Les températures élevées dans la zone de coupe activent le mécanisme d'usure par adhésion, entraînant le dépôt de matériau usiné sous forme de microsoudures sur la face de râteau de l'outil en raison de l'adhérence entre le matériau usiné et l'outil sous l'effet de la pression, ainsi que l'utilisation des vitesses élevées. L'accumulation de microsoudures conduit à la formation d'arêtes rapportées, entraînant des dommages à la couche de revêtement de l'outil et, par conséquent, à la rupture de l'arête de coupe. Sur la face de coupe en cermet, on observe l'apparition de microfissures causées par des forces d'adhérence locales entre les couches supérieures de l'outil de coupe et le matériau usiné.

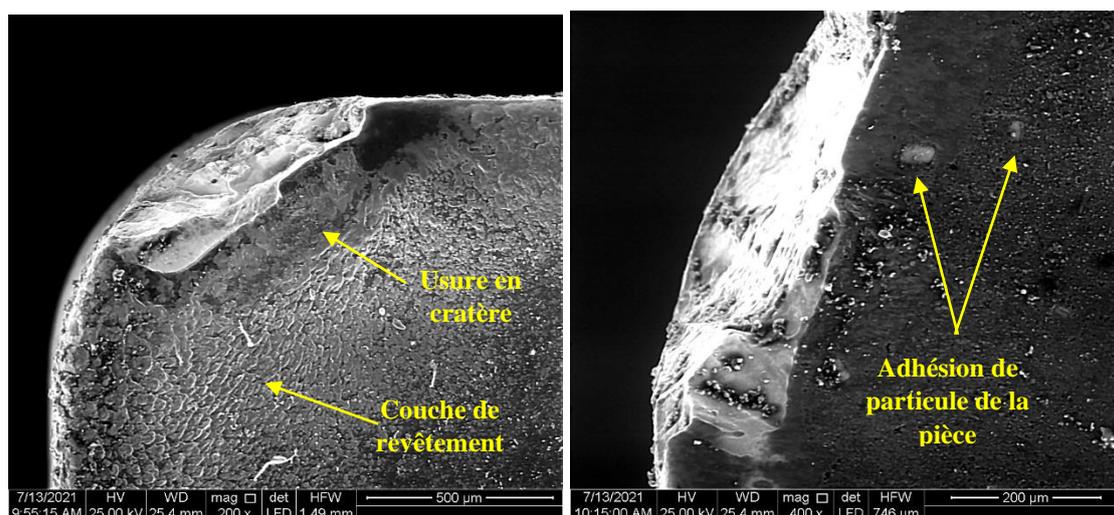


Figure IV.8 Images de MEB de la plaquette revêtue CVD.

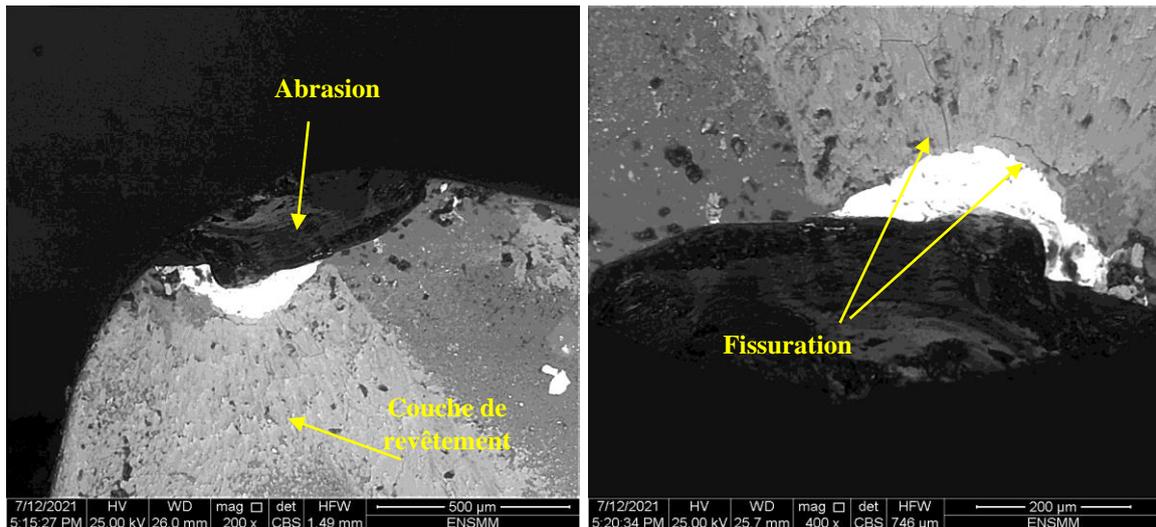


Figure IV.9 Images de MEB de la plaquette revêtue PVD.

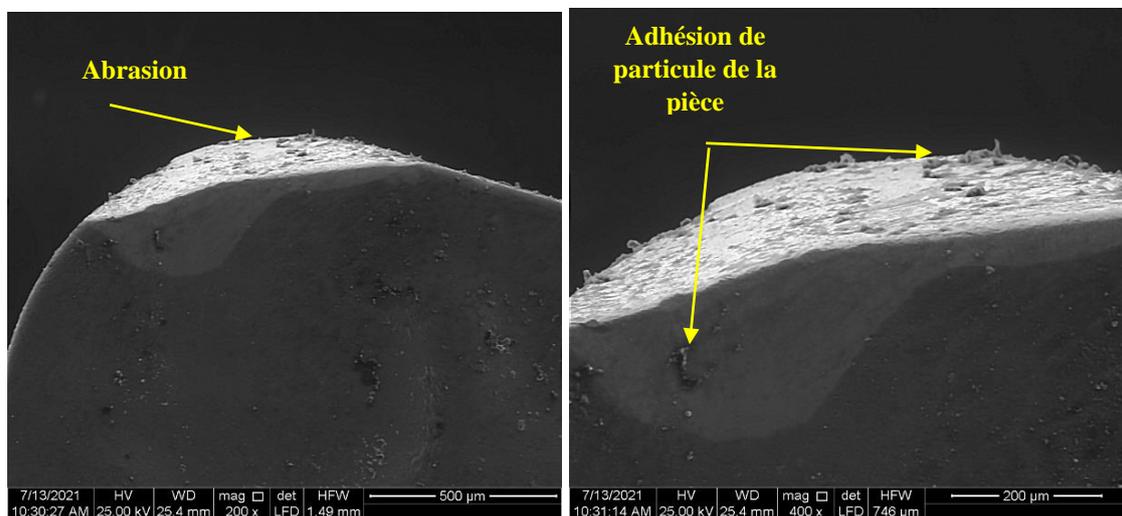


Figure IV.10 Images de MEB la plaquette de Cermet.

IV.4 Conclusion

L'étude de l'impact des conditions de coupe tels que ap , f , V_c et le matériau de coupe sur l'effort de coupe tangentiel, la rugosité de surface (R_a) et l'usure en dépouille (V_b) suivant le plan de Taguchi L_{18} sous un environnement à sec et MQL lors du tournage de la l'acier X210Cr12 a permis d'évaluer les performances des différents matériaux de coupe utilisés (plaquettes de coupe en carbure métallique à revêtement CVD, à revêtement PVD et cermet) en comparant les deux modes d'usinage (à sec et MQL). En général, le carbure métallique à revêtement CVD et PVD présentent des résultats très proches et meilleurs à ceux du matériau de coupe Cermet. Aussi, Les différents paramètres de sortie (R_a , F_z et V_b) sont largement diminués lors de l'usinage MQL.

CHAPITRE

V

**Modélisation (RSM) et optimisation par DF et
les méthodes MCDM**

V.1 Introduction

Dans l'industrie, le défi des fabricants de pièces mécaniques est le choix des conditions d'usinage les plus appropriées lors de l'usinage d'une grande variété de matériaux afin d'obtenir les résultats souhaités pour les paramètres technologiques désirés. Or, il est bien évident que le choix judicieux des conditions d'usinage est étroitement lié à la productivité et également au coût global d'une opération d'usinage. A cet effet, la modélisation des paramètres de performance ainsi et l'optimisation des conditions de coupe en usinage deviennent des étapes essentielles pour que les opérations d'usinage seront réalisées à moindre coût et la fabrication des pièces mécaniques soit compétitive [104]. Dans ce contexte, plusieurs techniques d'optimisation des paramètres d'usinage ont été utilisées pour le choix judicieux des conditions d'usinage, telles que les méthodes ; Taguchi, GRA, TOPSIS, GA, NSGA II, MOORA, DF, PSO, DEAR etc..... [105, 106].

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier lieu les résultats de la modélisation des paramètres de performance qui concerne la rugosité de surface arithmétique (R_a), l'effort de coupe (F_z), la puissance consommée (P_c) et le volume de copeau enlevé (MRR), en utilisant la méthodologie de surface de réponse. L'usinage a été réalisé sur des éprouvettes en acier X210Cr12 en utilisant un outil de coupe en carbure revêtu en CVD (GC4215), puisque cet outil présente les meilleures performances comparativement aux autres outils utilisés. Les modèles développés par la méthodologie de surface de réponse sont obtenus en se basant sur un plan d'expérience réduit de Taguchi L_{16} . Les paramètres du processus de coupe choisis comme variables sont le rayon de bec de l'outil (r), la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p). La deuxième partie de ce chapitre va être focalisée sur la présentation des résultats de l'optimisation mono et multi-objective des paramètres technologiques (R_a , F_z , P_c et MRR) individuellement. L'optimisation mono-objective a été effectuée en se basant sur l'approche de Taguchi basée sur le rapport signal/bruit (S/B). Par contre l'optimisation multi-objective a été réalisée par les méthodes à savoir ; la fonction de désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (GRA), l'analyse du ratio d'optimisation multi-objectif (MOORA), la méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (DEAR) et l'évaluation du produit de la somme agrégée pondérée (WASPAS) afin de sélectionner un régime de coupe optimal qui satisfait les quatre paramètres de sortie simultanément.

V.2 Analyse statistique et modélisation

Les résultats des paramètres de sortie en fonction de la variation des facteurs d'entrée sont présentés dans le tableau V.1, suite à l'utilisation du plan de Taguchi L₁₆. On observe que suivant la variation des conditions de coupe, la rugosité de surface (Ra) évolue dans un intervalle de (0.27 à 3.14) μm , tandis que l'effort de coupe (Fz) varie entre (18.3 à 178.9) N. La puissance consommée (Pc) change approximativement entre (55.1 à 800.9) Watt, et le volume de copeau enlevé par unité de temps (MRR) varie de (1.4 à 24.0) cm^3/min .

Tableau V.1 Résultats expérimentaux suivant le plan de Taguchi L₁₆ ($4^3 2^1$).

N°	Paramètres d'usinage				Facteurs de Réponse			
	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	Pc (W)	MRR (cm^3/min)
1	0.4	180	0.08	0.1	0.61	18.3	55.1	1.44
2	0.4	255	0.12	0.1	1.13	33.3	141.6	3.06
3	0.4	330	0.16	0.3	2.05	112.2	616.9	15.84
4	0.4	400	0.20	0.3	3.14	120.1	800.9	24
5	0.8	180	0.12	0.3	0.87	120.1	360.2	6.48
6	0.8	255	0.08	0.3	0.37	79.7	338.8	6.12
7	0.8	330	0.20	0.1	1.83	70.6	388.3	6.6
8	0.8	400	0.16	0.1	1.19	48.9	326.2	6.4
9	1.2	180	0.16	0.1	0.76	39.1	117.4	2.88
10	1.2	255	0.20	0.1	1.12	87.9	373.6	5.1
11	1.2	330	0.08	0.3	0.37	92.9	510.8	7.92
12	1.2	400	0.12	0.3	0.61	103.9	692.7	14.4
13	1.6	180	0.20	0.3	0.90	178.9	536.9	10.8
14	1.6	255	0.16	0.3	0.46	140.1	595.5	12.24
15	1.6	330	0.12	0.1	0.27	31.5	173.2	3.96
16	1.6	400	0.08	0.1	0.39	34.9	232.6	3.2

V.2.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra, Fz et Pc)

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) concernant (Ra) (Tab. V.2) révèlent que l'avance (f) et le rayon (r) ont une influence significative, ayant respectivement les plus grandes contributions à (42.55 et 36.83) %. Ensuite, on observe que (Vc) et (ap) ont des contributions respectives de (9.13 et 1.51) %. Les interactions (r x f) et (f x ap) sont également significatives, contribuant respectivement à (5.49 et 2.94) %. En revanche, les autres interactions (r x Vc), (r x ap), (Vc x f) et (Vc x ap) ne sont pas significatives, car leurs probabilités (p) dépassent 0.05. Des résultats semblables ont été trouvés par d'autres chercheurs [107].

Tableau V.2 Analyse de la variance de Ra.

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
r	1	1.08190	36.83%	1.08190	41.29	0.001
Vc	1	0.00036	9.13%	0.00036	0.01	0.911
f	1	0.82220	42.55%	0.82220	31.38	0.003
ap	1	0.06627	1.51%	0.06627	2.53	0.173
r × Vc	1	0.00019	0.00%	0.00019	0.01	0.935
r × f	1	0.22329	5.49%	0.22329	8.52	0.033
r × ap	1	0.00004	0.00%	0.00004	0.00	0.969
Vc × f	1	0.00053	0.00%	0.00053	0.02	0.893
Vc × ap	1	0.00544	0.06%	0.00544	0.21	0.668
f × ap	1	0.25906	2.94%	0.25906	9.89	0.026
Erreur	5	0.13100	1.49%	0.02620		
Total	15	8.82109	100.00%			

Le tableau **V.3** présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) concernant l'effort (Fz). Il est évident que les facteurs (ap et f) sont les plus influant sur l'effort (Fz), avec des contributions de (67.55 et 22.15) % respectives. Ensuite, les facteurs (r et Vc) suivent avec des contributions de (3.79 et 1.30) % respectives. Les interactions entre les facteurs ne se sont pas avérées significatives ($p > 0.05$). Ces résultats sont en accord avec ceux d'autres chercheurs [108, 109], indiquant que la section du copeau (ap x f) contribue considérablement à l'augmentation de l'effort (Fz). Dans son étude Nouioua et al. [57] lors de l'usinage de l'acier AISI D3 ont arrivé à conclure que la section du copeau intervient d'une manière significative sur l'évolution de l'effort tangentiel avec des contributions de 72.86 % et 20.66 % pour (ap) et (f) respectivement.

Tableau V.3 Analyse de la variance de Fz.

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
r	1	16.1	3.79%	16.1	0.22	0.659
Vc	1	20.8	1.30%	20.8	0.28	0.617
f	1	3112.5	22.15%	3112.5	42.42	0.001
ap	1	14333.4	67.55%	14333.4	195.34	0.000
r × Vc	1	335.6	0.99%	335.6	4.57	0.085
r × f	1	8.9	0.60%	8.9	0.12	0.742
r × ap	1	82.4	0.26%	82.4	1.12	0.338
Vc × f	1	171.0	0.65%	171.0	2.33	0.187
Vc × ap	1	429.2	1.36%	429.2	5.85	0.060
f × ap	1	58.3	0.19%	58.3	0.79	0.414
Erreur	5	366.9	1.17%	73.4		
Total	15	31488.8	100.00%			

Le tableau V.4 présente (ANOVA) pour la puissance (Pc). De manière évidente, il est clair que le facteur (ap) exerce la plus grande influence sur (Pc) avec une contribution de 60.88 %, suivi par la vitesse (Vc) et de l'avance (f) avec des contributions de (17.67 et 17.55) % respectivement. En revanche, l'ANOVA montre que le rayon (r) n'a pas d'effet significatif sur (Pc). Les interactions (r x f), (Vc x f), (r x ap) et (f x ap) ne sont pas considérées comme significatives, car leurs probabilités dépassent 0.05. Cependant, les deux interactions (Vc x ap) et (r x Vc) sont significatives, contribuant de (1.11 et 1.33) % respectivement. Des résultats similaires ont été rapportés par Aouici et al. [110] en tournage de l'acier X210Cr12. De plus, Davim et Figueira [111], lors du tournage de l'acier AISI D2.

Tableau V.4 Analyse de la variance de Pc.

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
r	1	419	0.00%	419	0.34	0.586
Vc	1	40926	17.67%	40926	33.00	0.002
f	1	61302	17.55%	61302	49.43	0.001
ap	1	297428	60.88%	297428	239.83	0.000
r x Vc	1	8033	1.11%	8033	6.48	0.052
r x f	1	20	0.26%	20	0.02	0.904
r x ap	1	2240	0.31%	2240	1.81	0.237
Vc x f	1	55	0.00%	55	0.04	0.842
Vc x ap	1	9537	1.33%	9537	7.69	0.039
f x ap	1	114	0.02%	114	0.09	0.774
Erreur	5	6201	0.86%	1240		
Total	15	718254	100.00%			

La Figure V.1 présente les effets principaux des facteurs sur les paramètres (Ra, Fz et Pc) sous forme graphique. On peut observer clairement que l'avance (f) et le rayon (r) ont une influence significative sur la rugosité (Ra) car leur pente est la plus marquée. En revanche, les paramètres (Vc et ap) ont un impact limité sur l'évolution des rugosités (Ra). L'effort de coupe (Fz) est fortement influencé par la combinaison de la section du copeau (ap x f). En ce qui concerne la puissance de coupe (Pc), les trois facteurs (ap, f et Vc) affectent fortement la puissance (Pc), tandis que le rayon du bec (r) a pratiquement aucun effet sur son évolution.

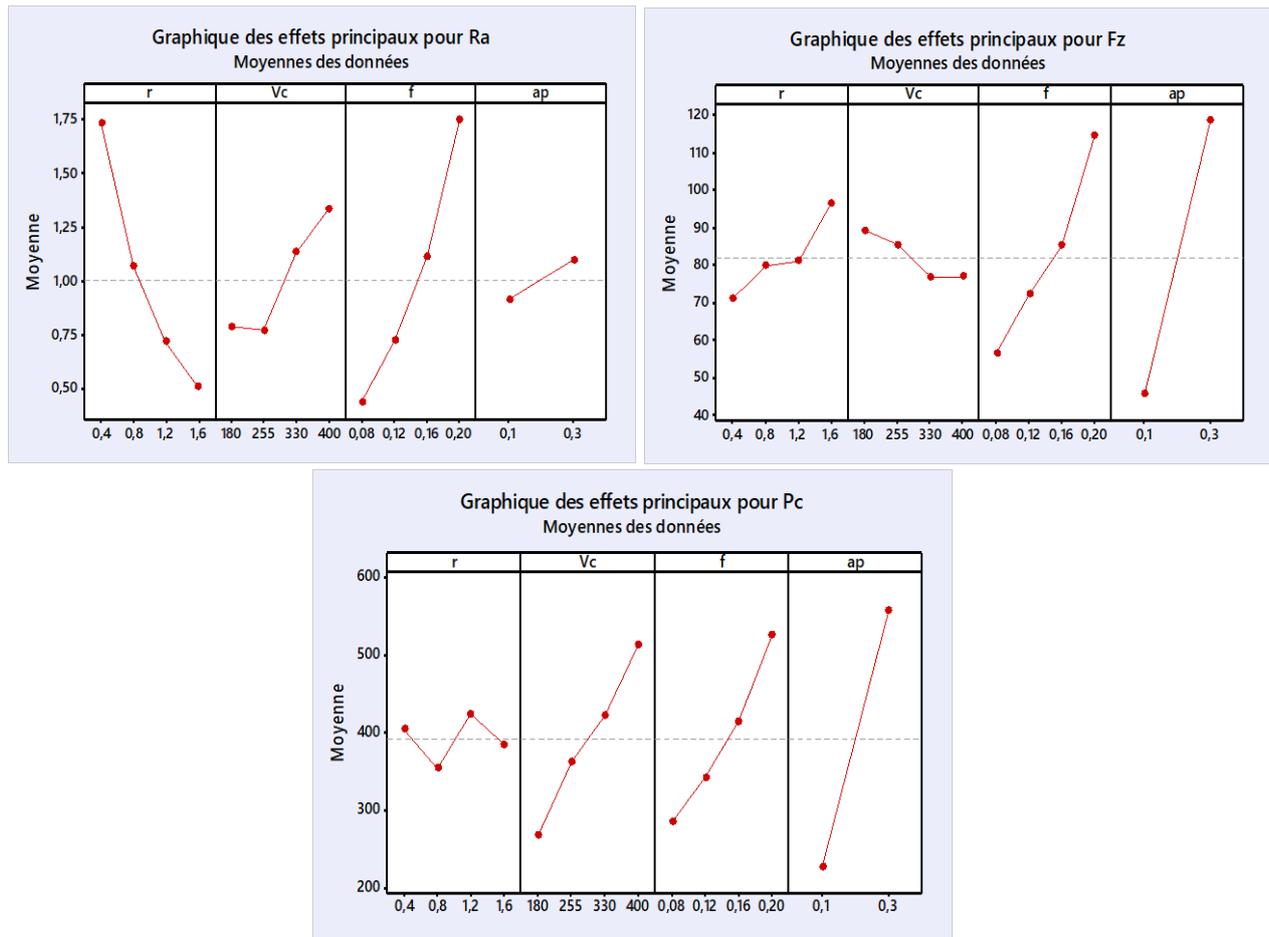


Figure V.1 Graphique des effets principaux de (Ra, Fz et Pc).

V.2.2 Modélisation des paramètres technologiques de performance

Des équations de régression ont été utilisées pour modéliser la relation entre les facteurs d'entrée et les paramètres de sortie. Les modèles de la rugosité (Ra), de l'effort (Fz) et de la puissance (Pc) sont basés seulement sur les effets principaux et des interactions significatives, et sont exprimés par les équations de régression (V.1), (V.2) et (V.3), avec leurs coefficients de détermination (R^2).

$$Ra = -0.898 + 1.037r - 0.00012Vc + 19.74f - 3.07ap - 14.60r \times f + 28.45f \times ap \quad R^2 = 98.45\% \quad (\text{V.1})$$

$$Fz = -57.6 + 19.31r - 0.0615Vc + 466.8f + 364.6ap \quad R^2 = 94.79\% \quad (\text{V.2})$$

$$Pc = -371.9 + 27.1r + 0.436Vc + 1989f + 710ap + 3.24Vc \times ap \quad R^2 = 97.43\% \quad (\text{V.3})$$

Sur le plan pratique, les modèles trouvés ont un intérêt considérable car ils permettent la prédiction des paramètres de qualification (Ra, Fz et Pc) dans l'intervalle des conditions de coupe utilisées. Toutes les valeurs de (R^2) sont élevées, ce qui indique que les modèles de

régression identifiés sont efficaces pour représenter le système dans le contexte d'une expérience donnée.

Les figures V.2 et V.3 (a, b et c) illustrent les courbes de probabilité normale et les différences entre les réponses mesurées de (Ra, Fz et Pc) et les prédictions respectivement. Les résultats de cette comparaison prouvent que les valeurs prédites sont plus proches des relevés enregistrés expérimentalement.

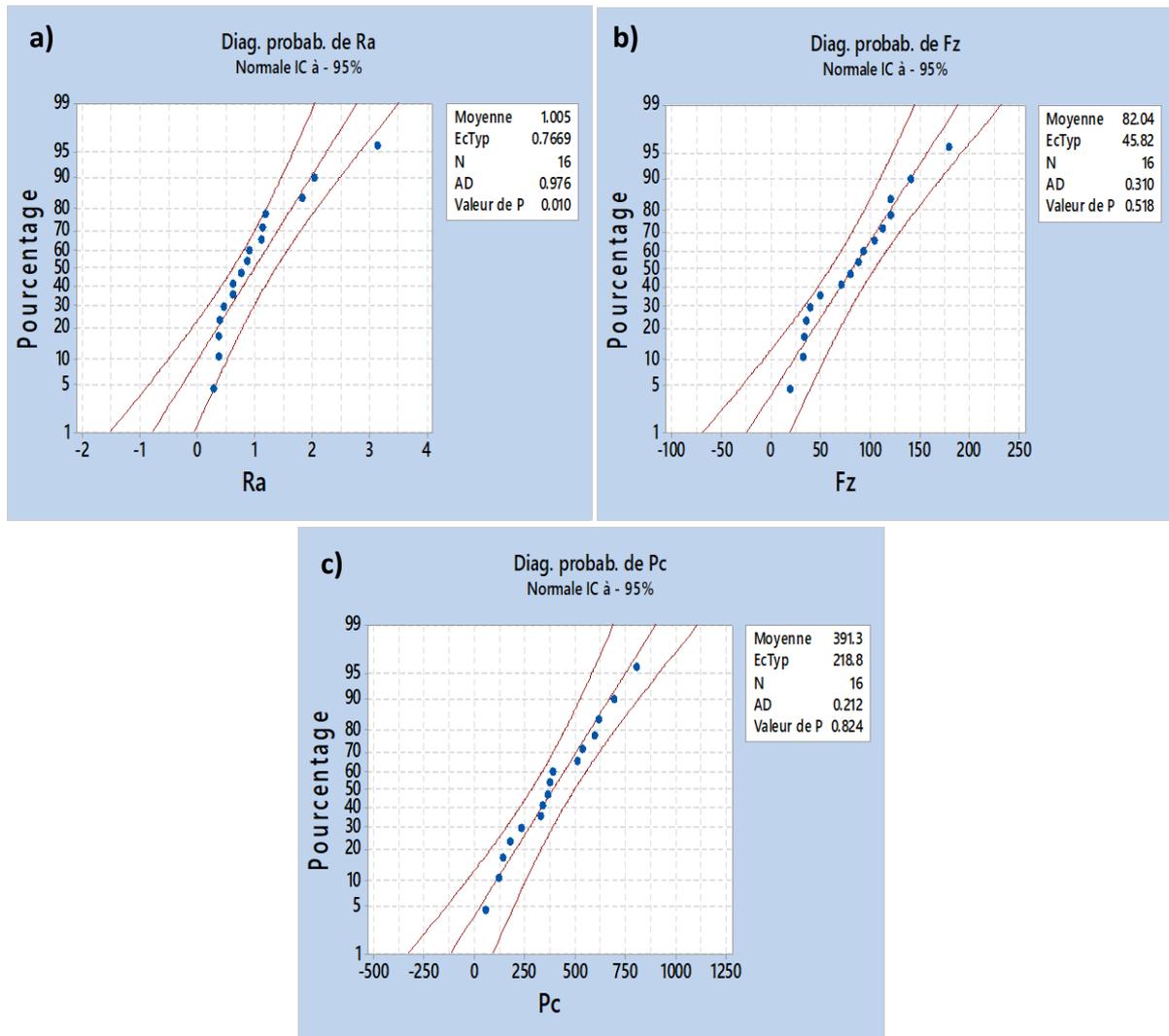


Figure V.2 Diagrammes de probabilité normale de (Ra, Fz et Pc).

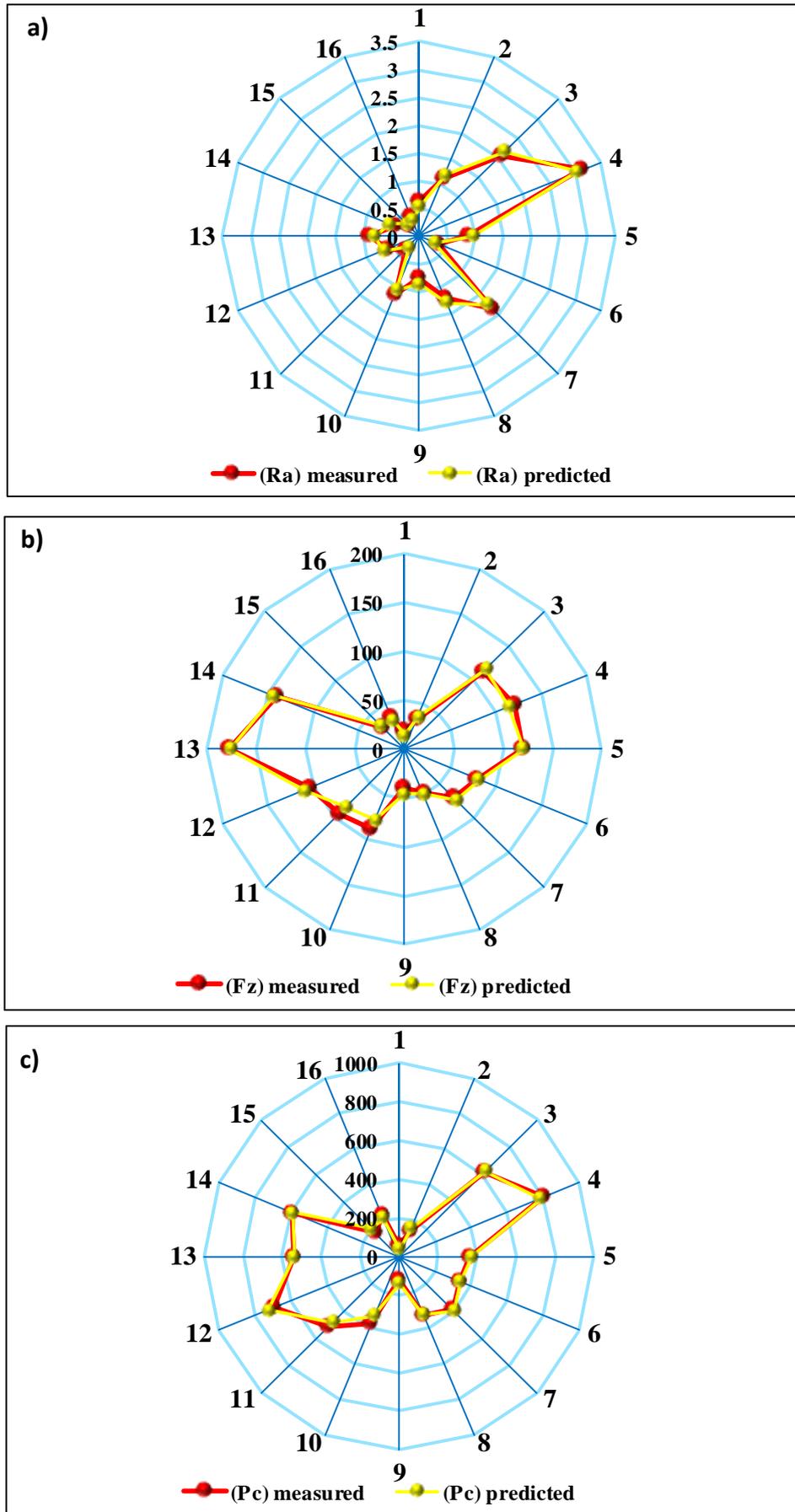


Figure V.3 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra, Fz et Pc).

La figure V.4 présente la graphique de la surface de réponse 3D de la rugosité (Ra) en fonction de (V_c et f) pour quatre valeurs de (r), respectivement (0.4, 0.8, 1.2 et 1.6) mm. Il est à constater que pour une faible valeur de (f), le rayon (r) a un faible effet sur (Ra), alors que pour des valeurs de (f) importantes, l'effet du rayon (r) est important. Aussi la rugosité (Ra) se trouve diminuer considérablement avec l'augmentation de (r). Finalement, il est clair que la meilleure rugosité (Ra) est obtenue en utilisant une valeur minimale pour (f) et une valeur maximale pour le rayon et la vitesse de coupe a un très faible effet sur (Ra). Les résultats trouvés sont en concordance avec ceux trouvés dans [112].

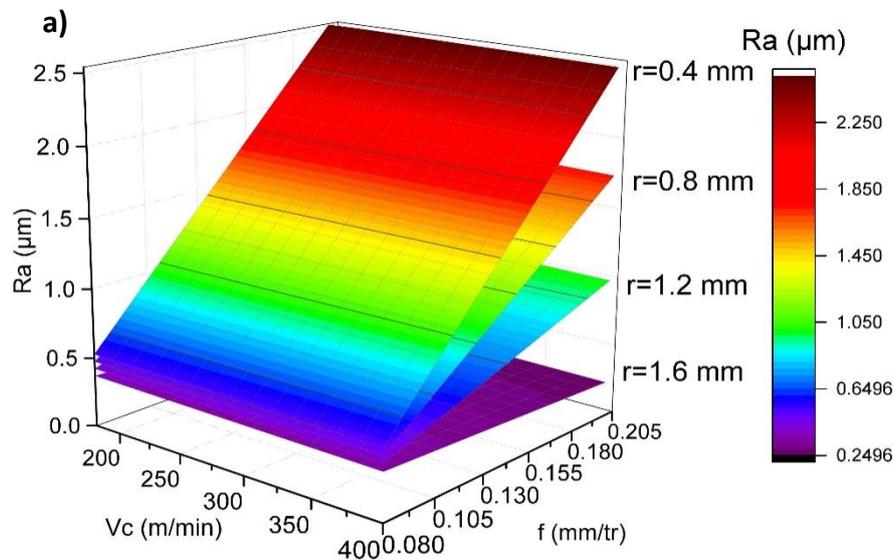


Figure V.4 Surface de réponse 3D de Ra.

La figure V.5 illustre la surface de réponse 3D de l'effort (F_z) en fonction de (V_c et a_p) pour les trois valeurs de (f) respectivement (0.08, 0.14 et 0.2) mm/tr. On remarque une légère diminution de l'effort (F_z) avec l'augmentation de (V_c) et une augmentation remarquable de l'effort (F_z) avec (a_p). Les résultats révèlent aussi que plus l'avance (f) augmente, plus la différence entre les courbes est importante. Par conséquent, l'effort minimal est obtenu pour une valeur minimale de (a_p et f) et une valeur maximale de (V_c). Des résultats similaires ont été rapportés dans la littérature par [113].

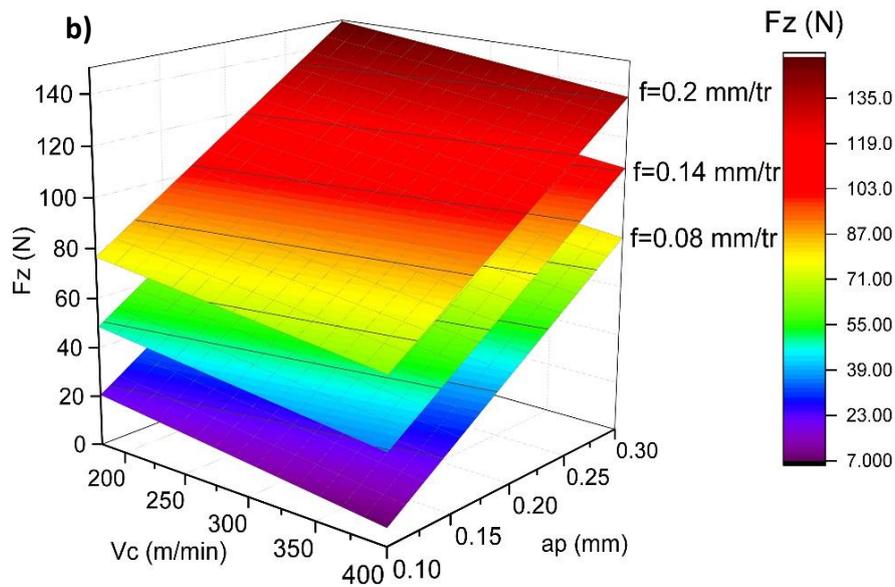


Figure V.5 Surface de réponse 3D de F_z .

La figure V.6 illustre la variation de la puissance (P_c) en fonction de (V_c et a_p) pour trois valeurs de f (0.08, 0.14 et 0.2) mm/tr. La tendance des courbes montre clairement que l'augmentation de (V_c et a_p) conduit à une augmentation de (P_c). On constate aussi, que plus (f) augmente, plus (P_c) croit. La valeur maximale de (P_c) est enregistrée lorsque les paramètres de coupe (V_c , f et a_p) sont à leurs niveaux supérieurs. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés dans [114].

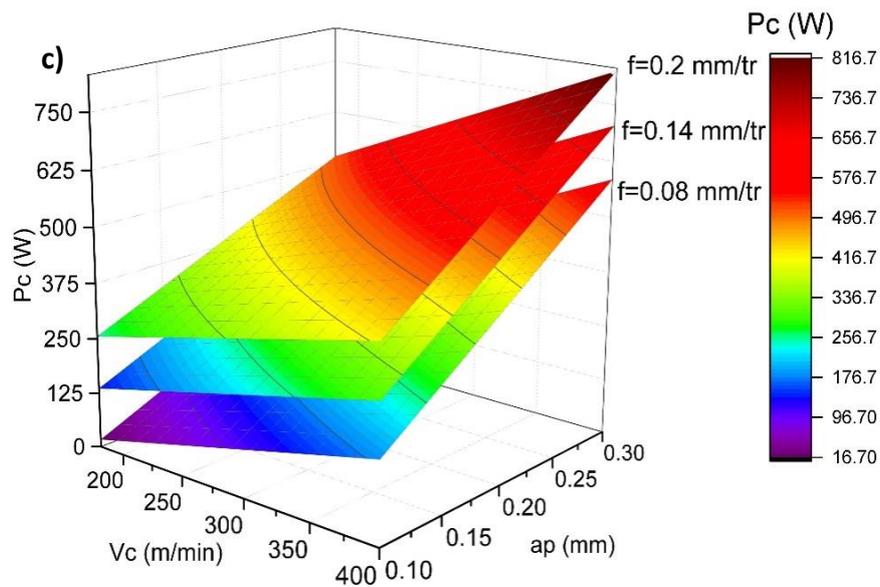


Figure V.6 Surface de réponse 3D de P_c .

V.3 Optimisation mono et multi-objectif

L'optimisation est une étape essentielle dans n'importe quel processus de fabrication des pièces mécaniques. Elle permet à l'utilisateur d'obtenir des conditions de coupe optimales afin de satisfaire les objectifs souhaités. Cela a un impact direct sur la qualité, la productivité et en dernier lieu le coût final d'un produit [115]. Dans une première étape, l'analyse de Taguchi basée sur le rapport signal/bruit (S/B) a été appliquée pour une optimisation de chaque paramètre de sortie individuellement. Pour la deuxième étape, cinq méthodes d'optimisation à savoir ; DF, GRA, MOORA, DEAR et WASPAS ont été appliquées pour une optimisation multi-objective des trois paramètres de sortie (Ra, Pc et MRR). La figure V.7 présente les étapes de la méthodologie d'optimisation proposée.

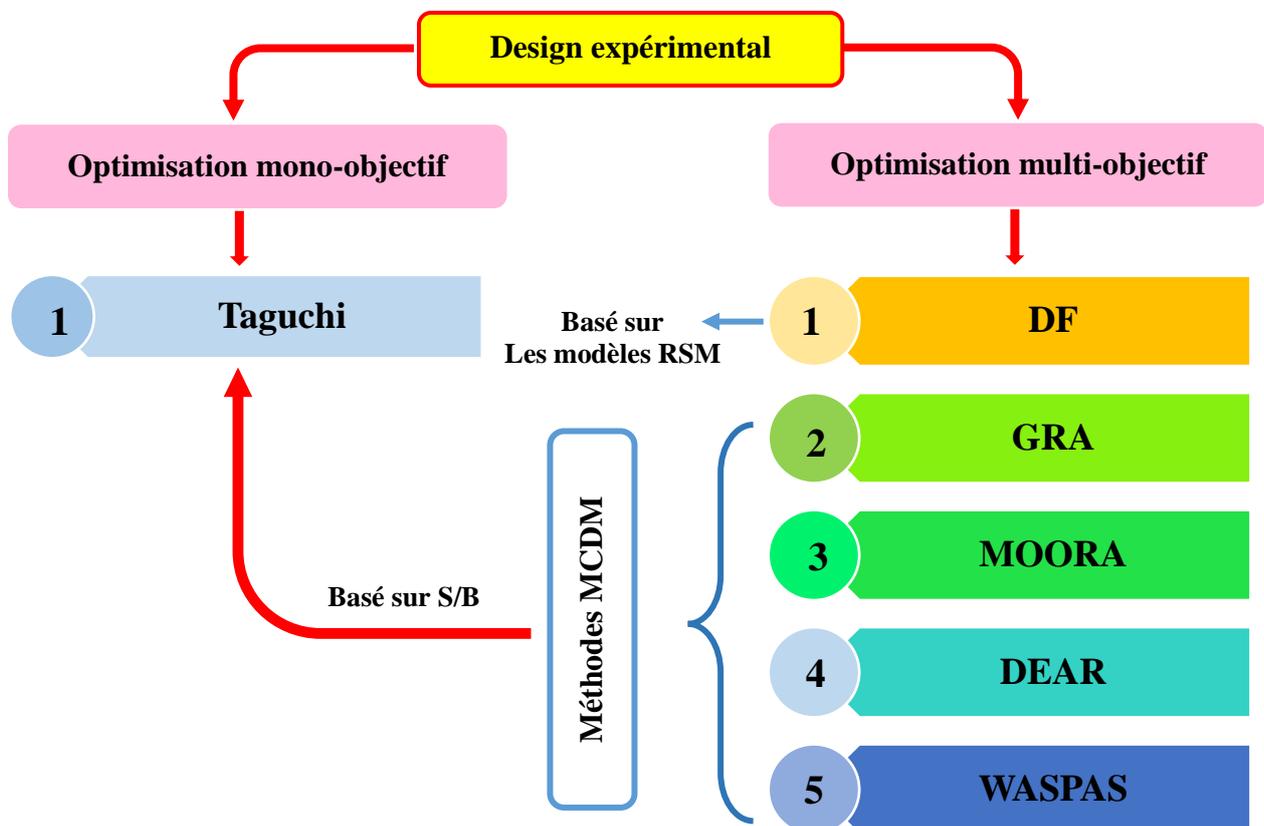


Figure V.7 Etapes de la méthodologie d'optimisation proposée.

V.3.1 Optimisation mono-objectif par la méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi est une technique d'optimisation mono-objectif utile qui a une grande contribution à l'amélioration des performances des systèmes et de résoudre les problèmes d'optimisation paramétrique pendant la production du produit. Cette méthode permet de contrôler simultanément les facteurs contrôlables et incontrôlables en convertissant les

réponses en rapport signal/bruit pour identifier les performances du système. Il permet de définir le degré d'influence du bruit indésirable sur le signal voulu [116, 117].

Les rapports S/B sont calculés par les équations suivantes :

$$\text{Plus grand est-le meilleur (maximiser)} : S/B = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (\text{V.4})$$

$$\text{Plus petit est-le meilleur (minimiser)} : S/B = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (\text{V.5})$$

Où \bar{y} est la moyenne des données observées, S_y^2 est la variance de y , n est le nombre d'observations et y_i est les données observées.

Dans ce travail l'analyse de Taguchi basée sur le rapport (S/B) a été adoptée. Afin de minimiser les paramètres de performance pour (Ra, Fz et Pc), le rapport (S/B) pour chaque facteur a été calculé suivant l'équation V.5. Par contre, l'équation V.4 a été utilisée pour la maximisation du (MRR). Le tableau V.5 expose les résultats du rapport (S/B) en fonction de la variation des paramètres d'entrée, suivant le plan de Taguchi L₁₆.

Tableau V.5 Résultats du rapport (S/B) pour (Ra, Fz, Pc et MRR).

N°	Résultats			
	S/B (Ra)	S/B (Fz)	S/B (Pc)	S/B (MRR)
1	4.236	-25.272	-34.815	3.167
2	-1.046	-30.454	-43.021	9.714
3	-6.222	-40.998	-55.805	23.995
4	-9.944	-41.593	-58.071	27.604
5	1.219	-41.588	-51.131	16.232
6	8.683	-38.032	-50.600	15.735
7	-5.272	-36.976	-51.783	16.391
8	-1.510	-33.791	-50.269	16.124
9	2.418	-31.854	-41.397	9.188
10	-0.976	-38.879	-51.447	14.151
11	8.659	-39.358	-54.165	17.975
12	4.236	-40.333	-56.811	23.167
13	0.895	-45.056	-54.598	20.669
14	6.801	-42.930	-55.498	21.756
15	11.276	-29.963	-44.770	11.959
16	8.112	-30.854	-47.332	10.103

Les tableaux (V.6, 7, 8, 9, 10) résume les régimes optimaux pour chaque paramètre (Ra, Fz, Pc et MRR), obtenues par la méthode mono-objective de Taguchi.

Le tableau V.6 montre que les paramètres d'usinage (r , V_c , f et ap) ont différents effets sur la rugosité (Ra). La plus importante influence correspond à (f) avec un effet de 11.2472, suivie par (r) avec un effet de 10.0156, suivie par (V_c) avec un effet de 3.1421 et en dernier lieu vient (ap) avec 0.3634 d'effet. Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Ra) correspond à la combinaison (r_4 , V_{c2} , f_1 et ap_1).

Tableau V.6 Tableau des réponses pour le rapport (S/B) de Ra.

Niveau	r	V_c	f	ap
1	-3.2440	2.1925	7.4228	2.1546
2	0.7797	3.3655	3.9217	1.7912
3	3.5844	2.1103	0.3716	
4	6.7716	0.2234	-3.8244	
Delta	10.0156	3.1421	11.2472	0.3634
Rang	2	3	1	4

Le tableau V.7 présente que les paramètres d'entrée (r , V_c , f et ap) ont différents effets sur l'effort (Fz). La plus importante influence correspond à (ap) avec un effet de 8.98, suivie par (f) avec un effet de 7.25, suivie par le rayon (r) avec un effet de 3.03 et en dernier rang vient (V_c) avec un effet de 1.63. Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fz) correspond à la combinaison (r_1 , V_{c1} , f_1 et ap_1).

Tableau V.7 Tableau des réponses pour le rapport (S/B) de Fz.

Niveau	r	V_c	f	ap
1	-34.58	-35.94	-33.38	-32.26
2	-37.60	-37.57	-35.58	-41.24
3	-37.61	-36.82	-37.39	
4	-37.20	-36.64	-40.63	
Delta	3.03	1.63	7.25	8.98
Rang	3	4	2	1

En analysant les résultats de la puissance de coupe (Pc) présentés au tableau V.8, on remarque que l'influence la plus importante correspond à (ap) avec un effet de 8.98, suivie par (V_c) avec un effet de 7.64, suivie par (f) avec un effet de 7.25 et en fin vient le rayon (r) avec 3.03 d'effet. Ce qui conduit à un régime optimal de (Pc) qui correspond à la combinaison (r_1 , V_{c1} , f_1 et ap_1).

Tableau V.8 Tableau des réponses pour le rapport (S/B) de Pc.

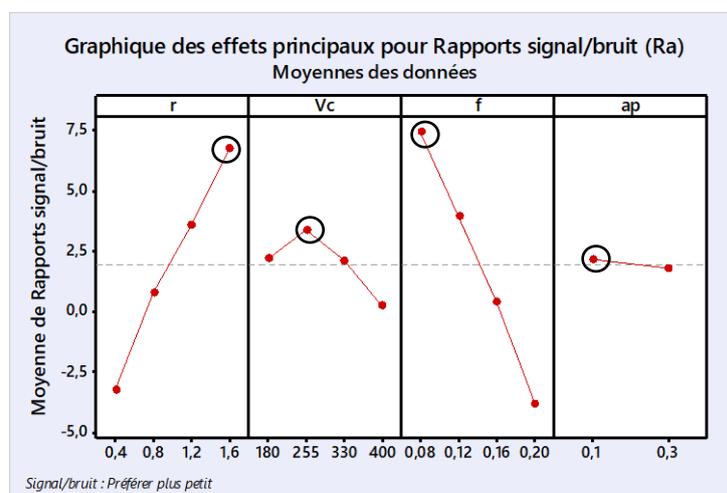
Niveau	r	Vc	f	ap
1	-47.93	-45.49	-46.73	-45.60
2	-50.95	-50.14	-48.93	-54.59
3	-50.96	-51.63	-50.74	
4	-50.55	-53.12	-53.98	
Delta	3.03	7.64	7.25	8.98
Rang	4	2	3	1

Enfin, d'après le tableau **V.9** le régime optimal pour le débit du coupeau enlevé (MRR) est donné par la combinaison (r4, Vc4, f4, ap2), qui correspond aux valeurs les plus grandes des paramètres de coupe. Si on veut une productivité maximale, il faut utiliser des conditions de coupe élevées.

Tableau V.9 Tableau des réponses pour le rapport (S/B) du MRR.

Niveau	r	Vc	f	ap
1	16.12	12.31	11.74	11.35
2	16.12	15.34	15.27	20.89
3	16.12	17.58	17.77	
4	16.12	19.25	19.70	
Delta	0.00	6.94	7.96	9.54
Rang	4	3	2	1

La figure **V.8** présente les graphes des effets principaux du (S/B) pour les paramètres de sortie (Ra, Fz, Pc et MRR). Les valeurs les plus élevées des différents facteurs (en cercle rouge) représentent le régime optimal.



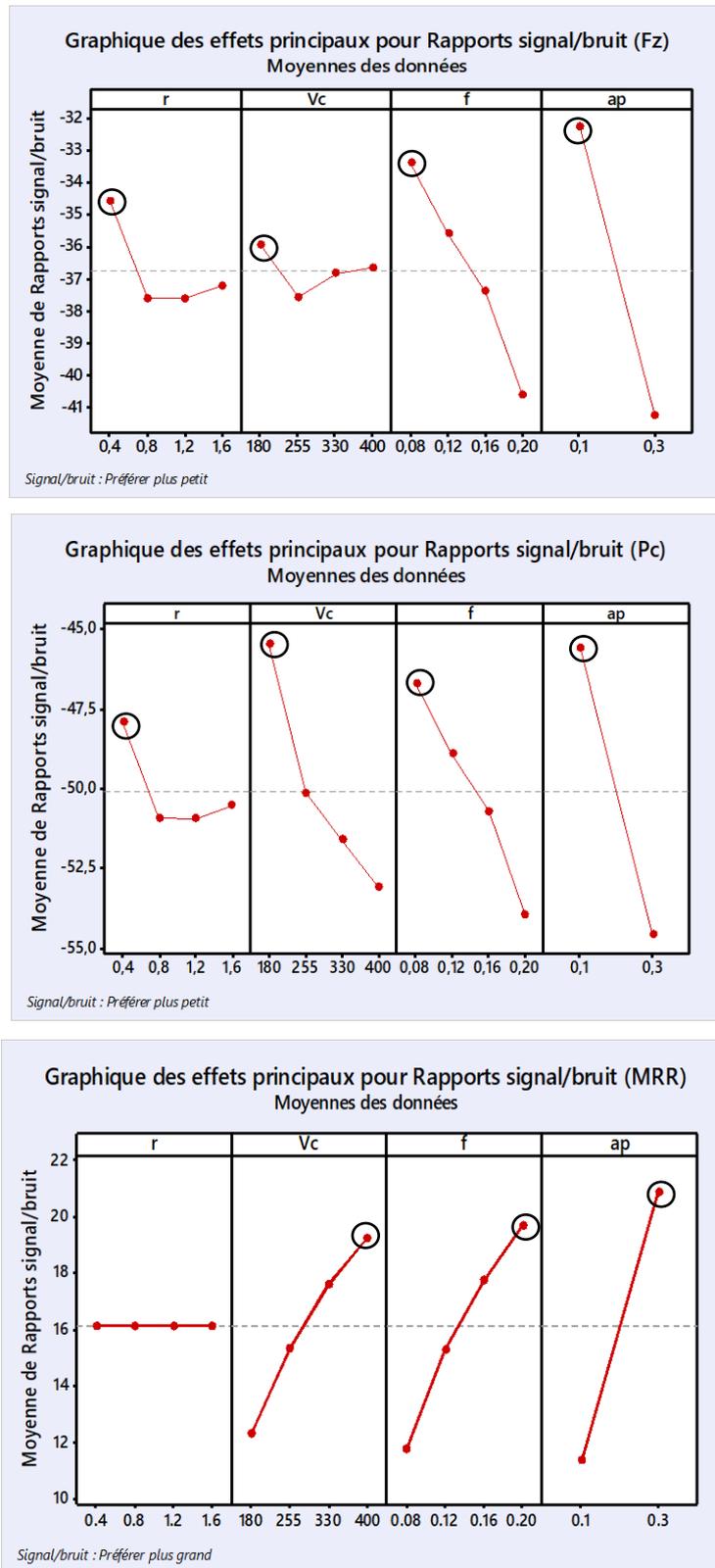


Figure V.8 Graphique des effets principaux pour (S/B) de (r, Vc, f et ap) sur (Ra, Fz, Pc et MRR).

Le tableau **V.10** récapitule les régimes de coupe optimaux trouvés pour les paramètres attendus (Ra, Fz, Pc et MRR) individuellement ainsi que les réponses optimisées.

Tableau V.10 Paramètre de coupe optimale et résultat expérimental.

Objectif	r	Vc	f	ap	Réponse
Min de (Ra)	1.6	255	0.08	0.1	Ra = 0.242 (μm)
Min de (Fz)	0.4	180	0.08	0.1	Fz = 18.3 (N)
Min de (Pc)	0.4	180	0.08	0.1	Pc = 55.1 (W)
Max de (MRR)	/	400	0.20	0.3	MRR = 24 (cm ³ /min)

V.3.2 Optimisation multi-objectif des conditions de coupe

Les méthodes d'optimisation multi-objective sont proposées pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant plusieurs 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. Dans notre cas, l'optimisation multi-objective a été réalisée par les cinq méthodes suivantes : la fonction de désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (GRA), l'analyse du ratio d'optimisation multi-objectifs (MOORA), méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (DEAR) and l'évaluation du produit de la somme agrégée pondérée (WASPAS). Ces différentes méthodes d'optimisation sont basées initialement sur une matrice de décision (R) (Eq. **V.6**) qui représente les paramètres de sortie, dans notre étude la matrice de décision est définie par les ratios S/B des paramètres technologiques (Ra, Pc et MRR) présentés dans le tableau **V.5**. L'objectif souhaité est la minimisation de (Ra et Pc) et la maximisation de (MRR).

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (\text{V.6})$$

V.3.2.1. Fonction de désirabilité (DF)

L'optimisation est une tâche d'une importance cruciale pour n'importe quel industriel afin de rester compétitive [118]. Plusieurs études de recherche ont été menées concernant l'amélioration des paramètres de coupe dans le processus d'usinage [119, 120]. L'approche de la fonction de désirabilité (DF) est privilégiée parmi les diverses méthodes d'optimisation, car elle offre la possibilité d'optimiser plusieurs objectifs simultanément en utilisant des mesures physiques de natures différentes. La désirabilité permet d'évaluer en fonction des réponses

calculées par le modèle statistique, l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés. En recherchant un minimum ou un maximum, la désirabilité peut être calculée à l'aide des équations (V.7), (V.8) et (V.9) [121] :

$$Des(y) = \begin{cases} 0 & y < Low \\ \left(\frac{y - Low}{Tar - Low}\right)^w & Low \leq y \leq Tar \\ 1 & y > Tar \end{cases} \quad (\text{V.7})$$

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

$$Des_{comb} = (Des_1 \times Des_2 \times \dots \times Des_i \times \dots \times Des_n)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{V.9})$$

Dans le présent travail, l'optimisation multicritère entre les paramètres de sortie (Ra, Pc et MRR) est proposée. Le tableau V.11 récapitule les objectifs souhaités, la gamme de variation des paramètres de coupe et l'importance accordée à chaque paramètre de sortie. Dans ce cas d'étude, l'importance est à son haut niveau (égale à 5), et tous les paramètres de sortie ont la même importance. Le régime de coupe optimale trouvé est ($r = 1.6$ mm, $V_c = 366.547$ m/min, $f = 0.168$ mm/tr et $a_p = 0.17$ mm). Ce régime correspond à ($Ra = 0.40$ μm , $Pc = 491.31$ W et $MRR = 10.57$ cm^3/min), la désirabilité est égale à 0.54. Il s'agit d'un cas intéressant lorsque les utilisateurs industriels recherchent un compromis entre une excellente qualité de surface, une consommation d'énergie minimale et un taux d'enlèvement de matière maximal. Il est à noter que la solution trouvée correspond à un besoin spécifique en fonction du contexte industriel considéré. Si l'objectif de l'optimisation change, le régime optimal changera aussi.

Tableau V.11 Objectifs et plages de variation des paramètres de coupe pour l'optimisation.

Conditions	Objectifs	Limite inférieure	Limite supérieure	Importance
r	Dans l'intervalle	0.4	1.6	-
Vc	Dans l'intervalle	180	400	-
f	Dans l'intervalle	0.08	0.20	-
ap	Dans l'intervalle	0.1	0.3	-
Ra	Minimiser	0.273	3.142	5
Pc	Minimiser	55.05	800.933	5
MRR	Maximiser	1.44	24	5

La figure V.9 présente le diagramme des rampes avec les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrée (r , V_c , f et a_p) et des paramètres technologiques de sortie (R_a , P_c et MRR) ainsi que la désirabilité pour le cas étudié.

La figure V.10 présente les contours de surfaces de la désirabilité en fonction de la variation des paramètres d'entrée. On remarque que le compromis entre les quatre paramètres de sortie est obtenu avec une valeur maximale de (V_c) et (r) et une valeur moyenne de (a_p) et (f) pour atteindre désirabilité maximale.

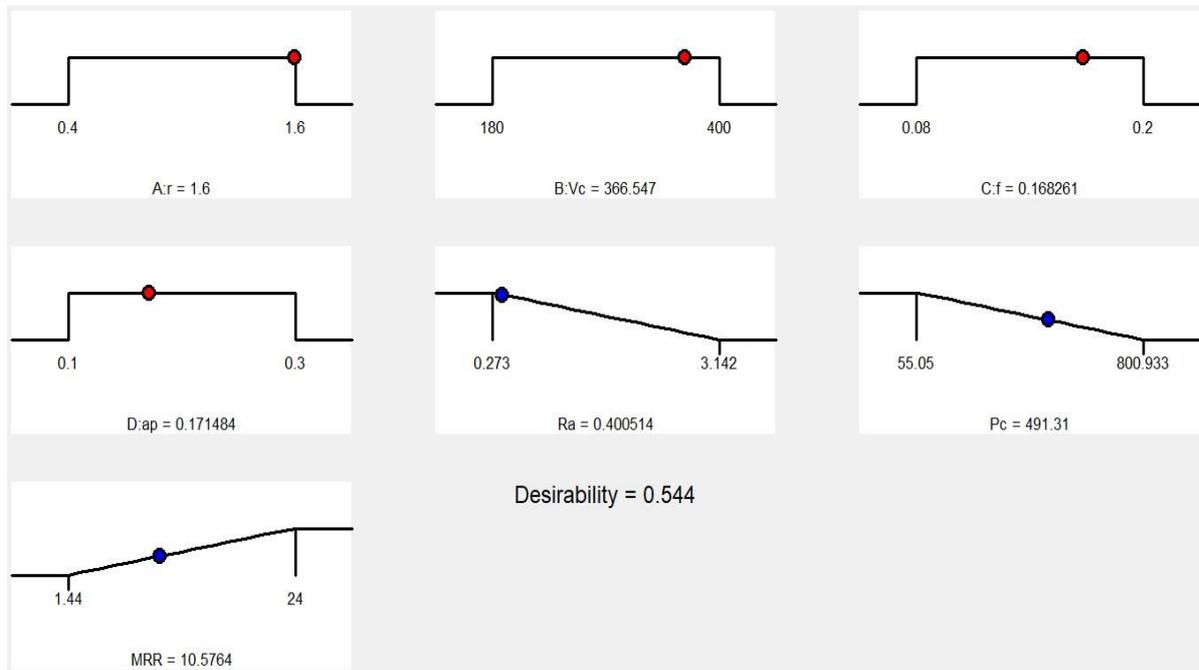


Figure V.9 Diagramme de rampe de désirabilité.

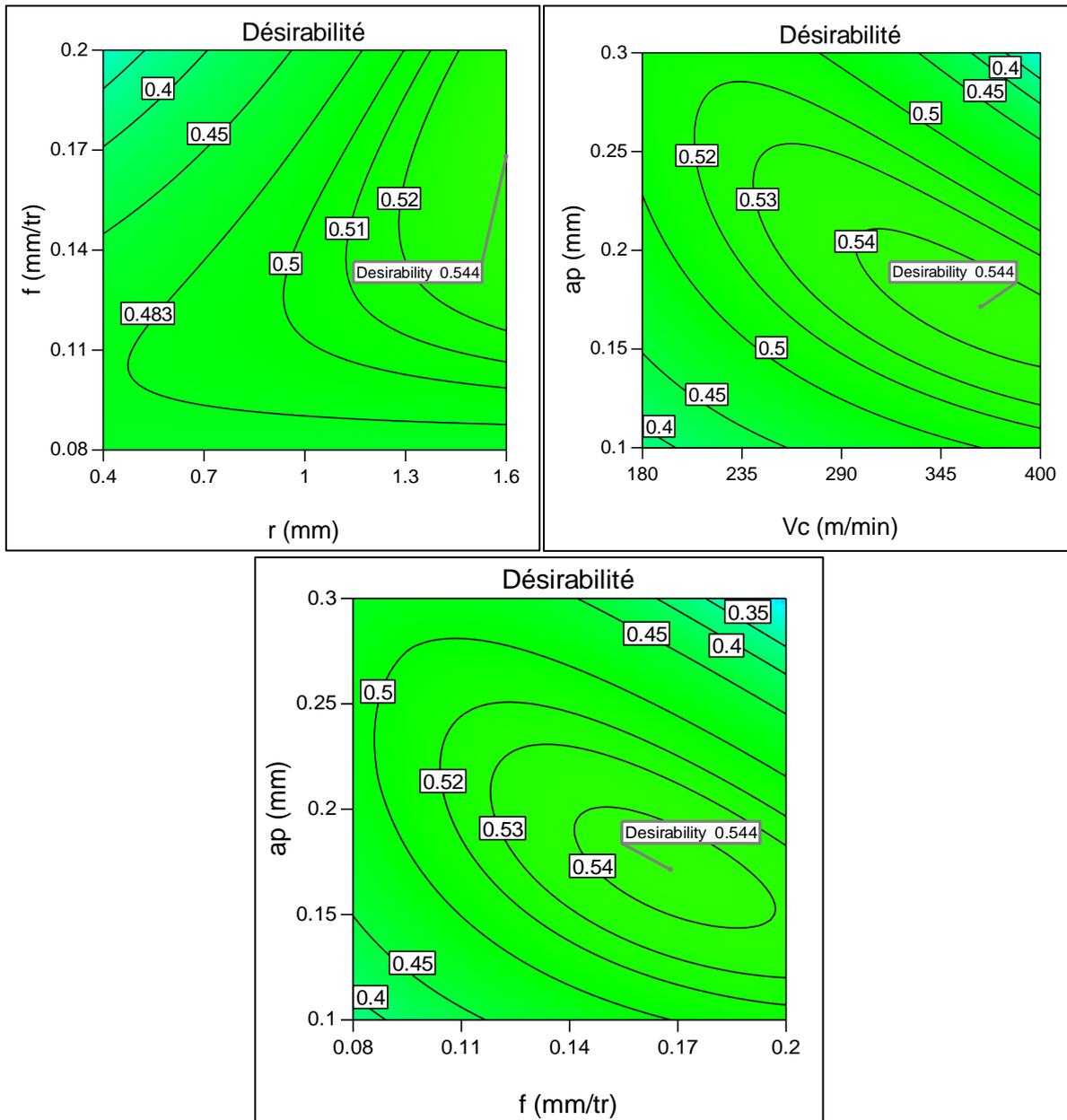


Figure V.10 Contours des surfaces de la désirabilité.

V.3.2.2 Méthode hybride Taguchi-GRA

L'analyse relationnelle grise (GRA) 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. La méthode (GRA) a été effectuée sur la base du rapport S/B des réponses mesurées et calculées ; rugosité de surface (R_a), puissance de coupes (P_c) et volume de copeau enlevé (MRR). L'amélioration simultanée en termes de maximisation de la qualité de surface et de la productivité est proposée comme une fonction objective. L'utilisation de cette méthode passe par les étapes suivantes [122] :

Étape 1. Normalisation des résultats expérimentaux

Selon l'objectif de l'optimisation prévue pour minimiser ou maximiser les résultats expérimentaux, la normalisation du rapport S/B pour les résultats expérimentaux dans l'intervalle $[0, 1]$, 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 **V.10**, et 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 **V.11**.

$$\text{Minimisation} \quad x_i^*(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{V.10})$$

$$\text{Maximisation} \quad x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{V.11})$$

Ou $x_i^*(k)$ est la valeur après la génération relationnelle grise (valeur normalisée), et $\max(x_i^0(k))$ et $\min(x_i^0(k))$ sont les valeurs les plus grandes et les plus petites de $(x_i^0(k))$ pour la réponse $k^{\text{ème}}$. La plus grande valeur des résultats normalisés indique la meilleure caractéristique de performance et les meilleurs résultats normalisés seront égaux à un.

Étape 2. Calcul du 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 en utilisant l'équation **V.12** :

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi\Delta_{\max}} \quad (\text{V.12})$$

$\Delta_{0i}(k)$ Est la différence absolue entre la séquence de référence $x_0^k(k)$ et le rapport S/B de la séquence mesurée $x_i^k(k)$.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{V.13})$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{V.14})$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{V.15})$$

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)

Le grade relationnel gris (GRG) représente la moyenne pondérée des différents GRC (Eq. V.12).

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (\text{V.16})$$

Où : n est le nombre des réponses.

Étape 4. Détermination des paramètres de coupe optimaux

Le tableau V.12 résume les résultats de l'application des différentes étapes de la méthode (GRA).

Tableau V.12 Résultats de l'optimisation par la méthode (GRA).

N°	Normalisation			GRC			GRG	Rang
	Ra	Pc	MRR	Ra	Pc	MRR		
1	0.668	1.000	0.000	0.601	1.000	0.333	0.645	2
2	0.419	0.647	0.268	0.463	0.586	0.406	0.485	12
3	0.175	0.097	0.852	0.377	0.356	0.772	0.502	11
4	0.000	0.000	1.000	0.333	0.333	1.000	0.556	7
5	0.526	0.298	0.535	0.513	0.416	0.518	0.482	13
6	0.878	0.321	0.514	0.804	0.424	0.507	0.578	5
7	0.220	0.270	0.541	0.391	0.407	0.521	0.440	16
8	0.397	0.335	0.530	0.453	0.429	0.516	0.466	14
9	0.583	0.717	0.246	0.545	0.639	0.399	0.527	9
10	0.423	0.285	0.449	0.464	0.411	0.476	0.450	15
11	0.877	0.168	0.606	0.802	0.375	0.559	0.579.	4
12	0.668	0.054	0.818	0.601	0.346	0.734	0.560.	6
13	0.511	0.149	0.716	0.505	0.370	0.638	0.505	10
14	0.789	0.111	0.761	0.703	0.360	0.676	0.580	3
15	1.000	0.572	0.360	1.000	0.539	0.438	0.659	1
16	0.851	0.462	0.284	0.770	0.482	0.411	0.554	8

D'après les résultats du GRG (**Tab. V.12**), la combinaison optimale correspond à la plus grande valeur du critère (GRG) parmi les essais du plan d'expérience, correspond au test numéro 15. La méthode d'optimisation GRA a été appliquée par des chercheurs dans différents domaines de l'optimisation de processus complexes. De nombreux documents de recherche indiquent l'efficacité de cette méthode [123, 124].

V.3.2.3 Méthode hybride Taguchi-MOORA

La méthode MOORA (Multi-Objective Optimization Ratio Analysis) a été introduite par Brauers [125] et est considérée comme une méthode multi-objective pour résoudre des problèmes complexes. En outre, les critères souhaitables et indésirables sont utilisés simultanément pour le classement afin de sélectionner une alternative supérieure ou plus élevée parmi différentes alternatives. Cette technique a un grand nombre d'applications telles que la sélection d'un fournisseur, l'optimisation des paramètres de processus des machines et la sélection des fabricants. L'application de cette méthode a été réalisée suivant les étapes ci-dessous :

Étape 1. Normalisation des données de la matrice (R) formée en utilisant l'équation V.17.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} ; i=1,2,\dots,m \text{ and } j=1,\dots,n \quad (\text{V.17})$$

En conséquence, x_{ij}^* illustre la valeur normalisée de la matrice de décision de la $i^{\text{ème}}$ alternative dans le $j^{\text{ème}}$ attribut.

Étape 2. Le R normalisé basé sur le poids est déterminé à l'aide de l'équation 14. W_j correspond au poids donné à la réponse.

$$Y_{ij} = [x_{ij} \times w_j]_{m \times n} ; i=1,2,\dots,m \text{ and } j=1,\dots,n \quad (\text{V.18})$$

Étape 3. Estimer l'indice MOORA et classer les alternatives. L'indice MOORA (Y_i) est fait à partir de l'équation V.19.

$$Y_i^* = \sum_{j=1}^l Y_{ij} - \sum_{j=l+1}^n Y_{ij} \quad (\text{V.19})$$

$$\text{Maximisation : } \sum_{j=1}^l Y_{ij}$$

$$\text{Minimisation : } \sum_{j=l+1}^n Y_{ij}$$

Termes, l et $l+1$ sont le nombre de sorties nécessitant une maximisation et de minimisation respectivement.

Le tableau **V.13** résume les résultats de l'application des différentes étapes de la méthode (MOORA).

Tableau V.13 Résultats de l'optimisation par la méthode (MOORA).

N°	Normalisation			Normalisation pondérée			Y _i	Rang
	Ra	Pc	MRR	Ra	Pc	MRR		
1.	0.172	-0.172	0.046	0.057	-0.057	0.015	0.015	8
2.	-0.043	-0.213	0.141	-0.014	-0.071	0.047	-0.038	13
3.	-0.253	-0.276	0.347	-0.084	-0.092	0.116	-0.061	14
4.	-0.405	-0.288	0.400	-0.135	-0.096	0.133	-0.098	16
5.	0.050	-0.253	0.235	0.017	-0.084	0.078	0.010	9
6.	0.353	-0.251	0.228	0.118	-0.084	0.076	0.110	3
7.	-0.215	-0.256	0.237	-0.072	-0.085	0.079	-0.078	15
8.	-0.062	-0.249	0.233	-0.021	-0.083	0.078	-0.026	11
9.	0.098	-0.205	0.133	0.033	-0.068	0.044	0.009	10
10.	-0.040	-0.255	0.205	-0.013	-0.085	0.068	-0.030	12
11.	0.353	-0.268	0.260	0.118	-0.089	0.087	0.115	2
12.	0.172	-0.281	0.335	0.057	-0.094	0.112	0.075	6
13.	0.036	-0.270	0.299	0.012	-0.090	0.100	0.022	7
14.	0.277	-0.275	0.315	0.092	-0.092	0.105	0.106	4
15.	0.459	-0.222	0.173	0.153	-0.074	0.058	0.137	1
16.	0.330	-0.234	0.146	0.110	-0.078	0.049	0.081	5

Selon les résultats de Y_i (**Tab. V.13**), la combinaison optimale correspondant à la valeur maximale du critère (Y_i) parmi les essais du plan expérimental, correspond à l'essai numéro 15. De nombreux chercheurs dans la littérature indiquent l'efficacité de cette méthode. Sahu et al [126] montrent que la méthode MOORA a été utilisée avec succès pour optimiser les paramètres du processus d'électroérosion. Liang et al [127] ont utilisé la méthode Taguchi basée sur MOORA pour optimiser les paramètres du procédé de soudage. Ils ont prouvé que la méthode MOORA avait été utilisée avec succès.

V.3.2.4 Méthode hybride Taguchi-DEAR

Dans cette méthode, une combinaison de réponses originales est transformée en un rapport, de sorte que les niveaux les plus appropriés peuvent être calculés sur la base de ce rapport. La valeur peut être considérée comme un indice de performance multi réponses (MRPI) pour calculer les combinaisons optimales des paramètres d'entrée. Les étapes suivantes sont impliquées dans la méthodologie de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données [128] :

Étape 1. Calculer les poids (W) pour chaque réponse (Ra , Pc et MRR). Le poids est le rapport entre une réponse et la somme de toutes les réponses comme il est indiqué aux (Eq. V.20, V.21 et V.22).

$$W_{Ra} = \frac{Ra}{\sum Ra} \quad (\text{V.20})$$

$$W_{Pc} = \frac{Pc}{\sum Pc} \quad (\text{V.21})$$

$$W_{MRR} = \frac{MRR}{\sum MRR} \quad (\text{V.22})$$

Étape 2. Convertir les données de réponse en données pondérées en multipliant les données observées par leur propre poids (Eq. V.23, V.24 et V.25).

$$A = W_{Ra} \cdot Ra \quad (\text{V.23})$$

$$B = W_{Pc} \cdot Pc \quad (\text{V.24})$$

$$C = W_{MRR} \cdot MRR \quad (\text{V.25})$$

Étape 3. Calculer l'indice de performance multi réponses (MRPI) en utilisant l'équation V.26.

$$MRPI_i = A + B + C \quad (\text{V.26})$$

Le tableau V.14 résume les résultats de l'application des différentes étapes de la méthode (DEAR).

Tableau V.14 Résultats de l'optimisation par la méthode (DEAR).

N°	W (Ra)	W (Pc)	W (MRR)	MRPI	Rank
1	0.134	0.043	0.012	-0.905	8
2	-0.033	0.054	0.038	-1.909	12
3	-0.197	0.070	0.093	-0.427	6
4	-0.315	0.072	0.107	1.879	2
5	0.039	0.064	0.063	-2.193	15
6	0.275	0.063	0.061	0.154	3
7	-0.167	0.065	0.064	-1.423	10
8	-0.048	0.063	0.063	-2.073	14
9	0.077	0.052	0.036	-1.626	11
10	-0.031	0.064	0.055	-2.496	16
11	0.274	0.068	0.070	-0.032	4
12	0.134	0.071	0.090	-1.377	9
13	0.028	0.068	0.080	-2.038	13
14	0.215	0.069	0.084	-0.542	7
15	0.357	0.056	0.046	2.082	1
16	0.257	0.059	0.039	-0.315	5

Selon les valeurs de MRPI calculées à partir des poids des différentes réponses et pour chaque expérience la combinaison optimale correspond à la plus grande valeur du critère (MRPI) (rang 1), cela correspond à l'essai numéro 15 dans le tableau **V.14** des résultats. La technique DEAR a montré une grande efficacité dans les domaines de la technologie de fabrication avec une méthodologie simple [129]. Plusieurs études indiquent l'efficacité de cette méthode [130, 131].

V.3.2.5 Méthode hybride Taguchi-WASPAS

L'évaluation du produit de la somme agrégée pondérée (WASPAS) est une méthode récemment présentée, elle est connue comme l'une des plus récentes méthodes proposées pour résoudre les problèmes d'optimisation à réponse unique ainsi que ceux à réponses multiples. Cette nouvelle méthode proposée par Zavadskas et al. [132] est basée sur la combinaison du modèle de somme pondérée (WSM) et le modèle de produit pondéré (WPM). Les auteurs affirment que cette méthode obtient une meilleure précision comparativement aux méthodes (WSM) ou (WPM) appliquées individuellement. Dans notre cas, la méthode (WASPAS) a été couplée à l'analyse de Taguchi. Pour le calcul des paramètres les plus favorables, les étapes suivantes sont suivies par la méthode (WASPAS) basé sur les résultats de (S/B) (**Tab. V.5**) :

Étape 1. Définir la matrice de décision initiale, dans notre cas c'est la matrice de décision (R).

Étape 2. Normalisation de la matrice de décision car les facteurs de sortie ont des grandeurs différentes afin qu'ils soient comparables et sans dimension à l'aide des équations V.27 et V.28.

Les résultats de la normalisation sont indiqués dans le tableau V.7.

$$\text{Maximisation} \quad \bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (\text{V.27})$$

$$\text{Minimisation} \quad \bar{x}_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (\text{V.28})$$

Étape 3. Dans la méthode (WASPAS), la mesure la plus importante de l'optimalité est liée à la méthode (WSM), C'est une méthode bien approuvée pour une optimisation basée sur de nombreux critères de décision. L'importance relative totale du $i^{\text{ème}}$ choix basé sur le modèle de somme pondérée (WSM) est calculée par l'équation V.29.

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} w_j \quad (\text{V.29})$$

Où w_j est le poids pour le $j^{\text{ème}}$ paramètre.

En outre, selon la technique (WPM), le poids relatif total de la $i^{\text{ème}}$ alternative est calculé par l'équation V.30.

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n \bar{x}_{ij}^{w_j} \quad (\text{V.30})$$

Étape 4. Un critère généralise conjoint d'agrégation pondéré des méthodes additives et multiplicatives est alors proposé par l'équation V.31.

$$Q_i = 0.5Q_i^{(1)} + 0.5Q_i^{(2)} = 0.5 \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} w_j + 0.5 \prod_{j=1}^n \bar{x}_{ij}^{w_j} \quad (\text{V.31})$$

Le tableau V.15 résume les résultats de l'application des différentes étapes de la méthode (WASPAS).

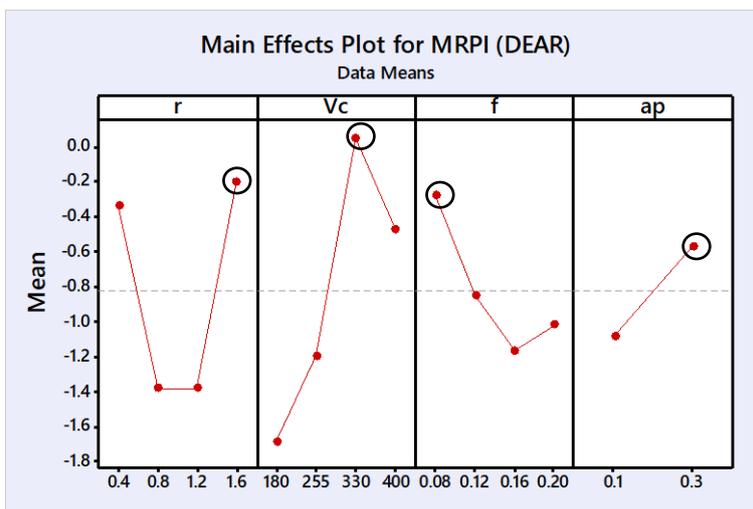
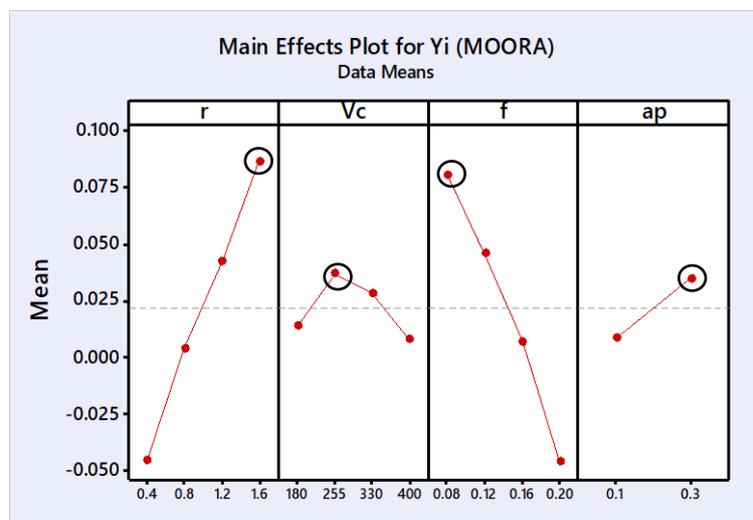
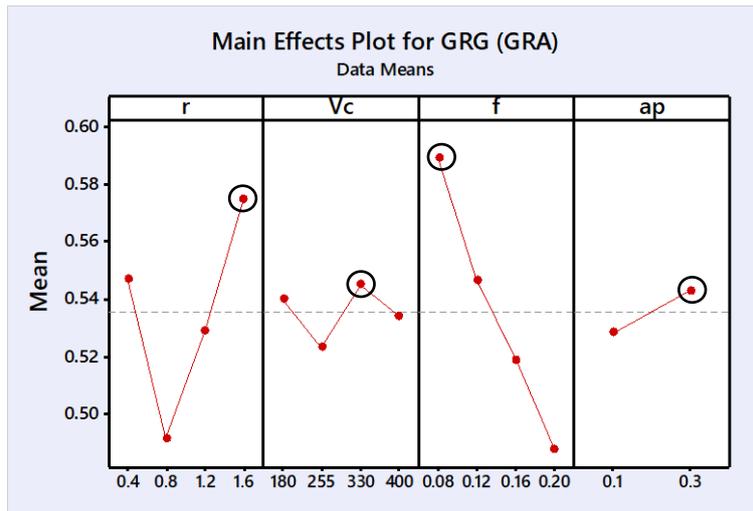
Tableau V.15 Résultats de la méthode (WASPAS).

N°	Normalisation			Valeurs d'évaluation pondérées			Rang
	Ra	Pc	MRR	Q ¹	Q ²	Q _i	
1	0.376	1.000	0.115	0.497	0.351	0.423	10
2	-0.093	1.236	0.352	0.498	-0.343	0.077	12
3	-0.552	1.603	0.869	0.640	-0.916	-0.137	15
4	-0.882	1.668	1.000	0.595	-1.137	-0.270	16
5	0.108	1.469	0.588	0.722	0.454	0.587	8
6	0.770	1.453	0.570	0.931	0.861	0.895	3
7	-0.468	1.487	0.594	0.538	-0.745	-0.103	14
8	-0.134	1.444	0.584	0.631	-0.483	0.073	13
9	0.214	1.189	0.333	0.579	0.439	0.509	9
10	-0.087	1.478	0.513	0.635	-0.403	0.115	11
11	0.768	1.556	0.651	0.992	0.920	0.955	1
12	0.376	1.632	0.839	0.949	0.801	0.875	4
13	0.079	1.568	0.749	0.799	0.454	0.626	7
14	0.603	1.594	0.788	0.995	0.912	0.953	2
15	1.000	1.286	0.433	0.906	0.823	0.864	5
16	0.719	1.360	0.366	0.815	0.710	0.762	6

D'après les résultats du tableau **V.15**, la combinaison optimale correspond à la plus grande valeur du critère généralisé (Q_i) (rang 1), cela correspond à l'essai numéro 11. La littérature montre clairement que la méthode WASPAS est un outil MCDM très peu utilisé dans le domaine de l'usinage. C'est pourquoi la méthode WASPAS a été adoptée et appliquée dans ce travail. La méthode WASPAS a également été appliquée avec succès dans le cadre des méthodes MCDM dans certains domaines [133, 134].

V.3.2.6 Régimes de coupe optimaux par les différentes méthodes

Pour obtenir les résultats d'optimisation, nous avons procédé au tracé des droites des effets principaux des différents indices déduits de chacune des méthodes utilisées (GRG, Y_i, MRPI et Q_i) (**Fig. V.11**). En effet, les niveaux optimaux des facteurs d'entrée correspondent à la valeur maximale des indices de chaque méthode. Les niveaux optimaux sont indiqués sur la figure 12. On peut voir, que le régime optimal pour la méthode (GRA) correspond à la combinaison (r₄, V_{c3}, f₁ et ap₂), pour à la méthode (MOORA) correspond à la combinaison (r₄, V_{c2}, f₁ et ap₂), concernant la méthode (DEAR) à la combinaison optimale est (r₄, V_{c3}, f₁ et ap₂), quant à la méthode (WASPAS) la combinaison correspond à (r₄, V_{c1}, f₁ et ap₂).



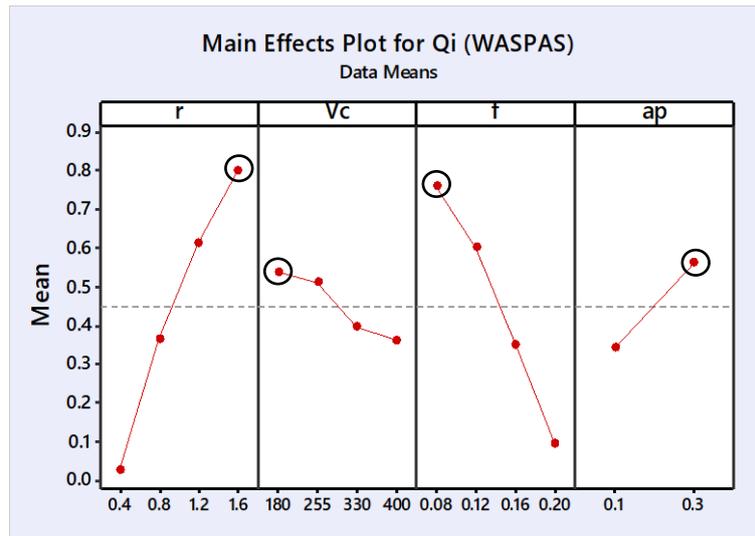


Figure V.11 Effets principaux de (S/B) pour la méthode (GRA, MOORA, DEAR and WASPAS).

V.3.3 Tests de confirmation et comparaison entre les méthodes

L'application des méthodes d'optimisation (GRA, MOORA, DEAR et WASPAS) ont permis d'obtenir les résultats résumés dans le tableau **V.16**. Les régimes optimaux définis par les quatre méthodes sont extraits des graphiques des effets principaux. L'équation **V.32** a été utilisée pour la prédiction des valeurs du rapport (S/B) des sorties (Ra, Pc et MRR) [114].

$$\bar{\varphi} = \varphi_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\varphi}_i - \varphi_m) \tag{V.32}$$

Où :

- $\bar{\varphi}$: Valeur attendue de la réponse dans les conditions optimales.
- φ_m : La moyenne de tous les rapports (S/B) de chacune des réponses.
- $\bar{\varphi}_i$: La moyenne des rapports (S/B) qui correspond au niveau optimal de chaque paramètre d'entrée.
- (q) : Le nombre de paramètres d'entrée.

Les valeurs prédites du rapport (S/B) calculées par l'équation **V.17**, sont converties en valeurs réelles pour les paramètres (Ra, Pc et MRR) à l'aide des équations (**V.33 à V.34**) :

- Pour la minimisation : $Valeurs\ réelles\ (Ra\ ou\ Pc) = \sqrt{10^{\left(-\frac{P(S/B)}{10}\right)}} \tag{V.33}$

$$\text{- Pour la maximisation : Valeur réelle (MRR)} = \frac{1}{\sqrt[10]{\left(-\frac{P(S/B)}{10}\right)}} \quad (\text{V.34})$$

Tableau V.16. Régimes et réponses optimaux.

Méthodes	Régimes optimaux				Réponses		
	r	Vc	f	ap	Ra	Pc	MRR
DF	1.6	366	0.16	0.17	0.40	491.00	10.00
GRA	1.6	330	0.08	0.3	0.246	457.6	7.92
MOORA	1.6	255	0.08	0.3	0.213	385.5	6.12
DEAR	1.6	330	0.08	0.3	0.246	457.6	7.92
WASPAS	1.6	180	0.08	0.3	0.24	225.53	4.32

Le tableau **V.16** présente les régimes optimaux obtenus par les cinq méthodes d'optimisation à savoir ; la méthode (DF) basé les modèles mathématiques obtenus par (RSM) et les quatre méthodes d'optimisation (MCDM) couplée à la méthode de Taguchi, basée sur le rapport (S/B). Pour la méthode de la fonction de désirabilité (DF), le régime de coupe optimal trouvé est (r=1.6 mm, Vc=366 m/min, f=0.16 mm/tr, ap=0.17 mm), il correspond aux sorties suivantes (Ra=0.4 µm, Pc=491 W, MRR=10 cm³/min) l'analyse de régime de coupe trouvé montre que la méthode (DF) favorise l'objectif de la maximisation de (MRR) par rapport à la minimisation de (Ra et Pc). Il s'agit d'un cas intéressant lorsque l'on recherche une productivité maximale dans l'industrie. On observe que pour les quatre méthodes (MCDM) utilisées, les résultats de l'optimisation ont gardé les mêmes valeurs du rayon (r=1.6 mm), de l'avance (f=0.08 mm/tr) et de la profondeur (ap=0.3 mm). Par contre, pour les méthodes (GRA et DEAR), la vitesse (Vc) est à son niveau maximal (Vc=330 m/min), ce qui a conduit à un (MRR) ainsi une consommation d'énergie (Pc) élevés. La méthode (MOORA) a donné la meilleure qualité de surface (Ra=0.21µm) par rapport aux trois autres méthodes, ainsi qu'une faible puissance (Pc) et une légère diminution du (MRR) par rapport (GRA et DEAR). Pour la méthode (WASPAS) la vitesse (Vc) est à son niveau minimal (Vc=180 m/min), ce qui a conduit à une faible valeur de (MRR) et la meilleure consommation d'énergie (Pc=225.53W). Pour la rugosité (Ra), la valeur trouvée est presque égale aux valeurs de (Ra) trouvés par GRA et DEAR. Les cinq méthodes d'optimisation étudiées présentent des cas intéressants, chaque cas pour une application spécifique lorsqu'on cherche, un compromis entre une bonne qualité de surface pour les opérations de finition ou une moindre consommation d'énergie pour minimiser le coût d'usinage ou une maximisation de la productivité ou bien un compromis entre les objectifs souhaités.

V.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentée l'étude expérimentale associée à la modélisation et l'optimisation du tournage de l'acier X210Cr12 avec une plaquette en carbure à triple revêtement CVD ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{TiCN}$). L'application de ANOVA a permis d'obtenir des modèles mathématiques en fonction des paramètres d'usinage. L'étude réalisée dans ce chapitre a montré que les modèles trouvés par la méthodologie des surfaces de réponse sont précis. Nous avons appliqué deux types d'optimisation à savoir ; l'optimisation mono-objective, où nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser la rugosité (R_a), l'effort (F_z), la puissance (P_c) et le volume de copeau enlevé (MRR). Optimisation multi-objectif, où nous avons utilisé les méthodes ; DF, GRA, MOORA, DEAR et WASPAS. Le but est de minimiser la rugosité (R_a) ainsi que la puissance (P_c) simultanément et maximiser le débit du copeau enlevé (MRR). A la fin une comparaison entre les régimes optimaux obtenus par les cinq méthodes d'optimisation a été réalisée et discutée.

Conclusion générale

Ce travail de recherche concerne l'étude comparative des performances des outils de coupe (carbure métallique à revêtement CVD, à revêtement PVD et cermet) lors du tournage de l'acier X210Cr12 sous un environnement à sec et MQL. Une étude statistique suivie par une modélisation des paramètres technologiques de sortie a été réalisée suivant plusieurs cas. Enfin, une étude d'optimisation des paramètres de coupe a été réalisée par plusieurs approches à savoir, DF, GRA, MOORA, DEAR et WASPAS. Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

Les résultats des essais paramétriques montrent que :

- D'après l'étude comparative entre les trois plaquettes de coupe en carbure métallique à revêtement CVD, en carbure métallique à revêtement PVD et cermet, il ressort que les deux carbures métalliques présentent des performances supérieures à celles du Cermet, en termes d'effort de coupe, de rugosité de surface et d'usure.
- Malgré la dureté de l'acier pour le travail à froid X210Cr12, le triple revêtement ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{TiCN}$) a protégé l'arête de coupe à des vitesses élevées. Il a atteint des durées de vie de 14 min, 17 min et 24 min pour des vitesses de coupe correspondantes à 350 m/min, 320 m/min et 280 m/min, respectivement. C'est un très bon choix pour l'usinage à sec pour un usinage de de longue durée à des vitesses élevées.
- Les essais de l'usure montrent clairement que l'augmentation de la largeur de l'usure (V_b) génère une augmentation de l'effort (F_z) et une dégradation de l'état de surface.
- L'analyse de la topographie des surfaces usinées en 3D montre que les paramètres fonctionnels 2D et 3D obtenues à partir de la courbe d'Abbott sont plus proches du phénomène physique mesuré (rugosité de surface) que les paramètres traditionnels et la plate-forme optique de métrologie modulaire est un outil d'investigation important dans la recherche de rugosité de surface. Elle permet de comprendre les caractéristiques des surfaces usinées en acier X210Cr12.
- L'analyse des résultats de la température de coupe montre une augmentation de la température avec l'augmentation des paramètres de coupe à savoir la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance. Cependant, dans les conditions de coupe étudiées, la vitesse de coupe a une influence supérieure sur la température par rapport à l'avance et la profondeur de passe, les valeurs peuvent atteindre jusqu'à 303.85 °C.

La modélisation (RSM) de (Ra, Fz et Vb) avec les trois plaquettes de coupe en carbure métallique à revêtement CVD, à revêtement PVD et Cermet selon les essais de longue durée lors de l'usinage à sec et en MQL a permis de proposer les conclusions suivantes :

- La technique des plans des expériences convient pour analyser les phénomènes de la rugosité de surface, effort de coupe et l'usure en dépouille avec un nombre minimum d'essais.
- L'ANOVA de (Ra) montre que le paramètre le plus important affectant la rugosité est le matériau de l'outil de coupe (M), avec une contribution de 37.13% et 38.61% respectivement en usinage sec et MQL. Il est suivi par l'avance (f) qui est le deuxième facteur le plus influant sur (Ra) avec une contribution de 25.08% et 26.36% respectivement pour l'usinage sec et MQL.
- L'ANOVA de l'effort tangentiel (Fz) en usinage à sec et MQL montre que l'influence de la profondeur de passe sur (Fz) vient en première position avec une contribution de 49.44 %, suivie par le matériau d'outil de coupe (M) avec une contribution de 29.91% en usinage à sec et de (49.63 et 29.5) % en usinage MQL respectivement.
- L'ANOVA pour l'usure (Vb) montre que le facteur (M) est le premier facteur qui affecte l'usure (Vb), avec une contribution de 55.54% et de 50.80%, respectivement à sec et MQL. On peut constater aussi que (f) a un effet significatif sur l'usure (Vb) avec une contribution de 8.32% et 10.44%, respectivement à sec et MQL. Le facteur suivant influençant l'usure (Vb) est la vitesse de coupe (Vc), elle est suivie par le facteur (ap), leurs contributions sont de 6.96% et 3.86 % à sec et de 7.64% et 4.39% en usinage MQL, respectivement.
- En général, le carbure métallique à revêtement CVD et PVD présentent des résultats très proches et meilleurs à ceux du matériau de coupe Cermet. Aussi, les différents paramètres de sortie (Ra, Fz et Vb) sont largement diminués lors de l'usinage MQL.
- D'après l'analyse des résultats, la technique (MQL) contribue à l'amélioration des résultats par rapport à l'usinage à sec. La lubrification par quantité minimale peut atteindre une meilleure qualité de surface avec minimisation de l'effort de coupe et l'usure par la minimisation du frottement et de la réduction de la température dans la zone de coupe.
- Les morphologies d'usure obtenue à l'aide du profilomètre optique et du microscope électronique à balayage (MEB) montrent le rôle des revêtements qui rend le matériau de

coupe plus résistant à l'usure et améliore son inertie chimique et thermique, grâce à sa grande dureté et son faible coefficient de frottement.

La modélisation (RSM) et l'optimisation en utilisant les méthodes (DF, GRA, MOORA, DEAR et WASPAS) lors de l'usinage de l'acier X210Cr12 avec une plaquette à revêtement CVD ont abouti aux résultats suivants :

- L'utilisation d'un plan réduit de Taguchi L_{16} pour réduire le nombre des expériences afin de déterminer les paramètres de coupe optimaux est réalisée avec succès.
- L'ANOVA de (Ra), indique que les paramètres (f) et (r) sont les facteurs qui ont le plus effet avec des contributions de (42.55 et 36.83) % respectives.
- L'ANOVA appliquée à l'effort (F_z) et la puissance (P_c), indique que (a_p) est le paramètre le plus influent sur les deux paramètres avec des contributions de (67.55 et 60.88) % respectivement.
- Les modèles mathématiques élaborés ont des corrélations (R^2) élevés. Ces modèles devraient représenter un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent d'entamer des prévisions menant à des gains importants en temps et en consommation de matière à usiner.
- L'optimisation mono-objectif par la méthode Taguchi basée sur le rapport (S/B) a donné les combinaisons optimales suivantes :
 - Ra (minimisation) : $V_c=255$ m/min, $r=1.6$ mm, $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.1$ mm.
 - F_z et P_c (minimisation) : $V_c= 80$ m/min, $r=0.4$ mm, $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.1$ mm.
 - MRR (maximisation) : $V_c=400$ m/min, $a_p=0.3$ mm et $f=0.2$ mm/tr.
- La méthode de Taguchi d'optimisation mono-objective a été exploitée avec succès pour identifier les paramètres de coupe optimale. De plus, le rapport S/B est le critère important dans cette méthode.
- L'utilisation des cinq méthodes d'optimisation multicritères à savoir ; DF, GRA, MOORA, DEAR, et WASPAS pour minimiser (Ra, P_c) et maximiser le (MRR) simultanément nous a permis d'obtenir les régimes de coupe optimaux suivants :
 - DF : $V_c = 366$ m/min, $a_p = 0.17$ mm., $f = 0.16$ mm/tr et $r = 1.6$ mm
 - GRA : $V_c = 330$ m/min, $a_p = 0.3$ mm, $f = 0.08$ mm/tr et $r = 1.6$ mm.
 - MOORA : $V_c = 255$ m/min, $a_p = 0.3$ mm, $f = 0.08$ mm/tr et $r = 1.6$ mm

-DEAR : $V_c = 330$ m/min, $a_p = 0.3$ mm, $f = 0.08$ mm/tr et $r = 1.6$ mm.

-WASPAS : $V_c = 180$ m/min, $a_p = 0.3$ mm, $f = 0.08$ mm/tr et $r = 1.6$ mm.

- L'application des cinq méthodes d'optimisation à savoir ; DF, GRA, MOORA, DEAR, et WASPAS ont été réalisées avec succès pour résoudre les problèmes d'optimisation multi réponse du processus d'usinage en tournage de l'acier à outil X210Cr12. Chaque méthode utilisée propose un régime différent qui favorise un ou deux paramètres de performance, c'est à l'utilisateur de faire le choix selon les objectifs souhaités.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- L'utilisation de la méthode de lubrification MQL chargée de nanoparticules.
- La simulation numérique de la coupe orthogonale de l'acier X210Cr12 par la méthode des éléments finis en utilisant le code ABAQUS.
- L'application des autres méthodes de modélisation telle que (la logique floue et SVM) et autres méthodes d'optimisation (PSO et NSGAI)

Référence bibliographique

- [1] **Alshataif, Y. A., Sivasankaran, S., Al-Mufadi, F. A., Alaboodi, A. S., & Ammar, H. R. (2020).** Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloys: a review. *Metals and Materials International*, 26, 1099-1133.
- [2] **Cai, W., & Lai, K. H. (2021).** Sustainability assessment of mechanical manufacturing systems in the industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110169.
- [3] **Rizzo, A., Goel, S., Luisa Grilli, M., Iglesias, R., Jaworska, L., Lapkovskis, V., ... & Valerini, D. (2020).** The critical raw materials in cutting tools for machining applications: A review. *Materials*, 13(6), 1377.
- [4] **Kalpajian, S. (2001).** Manufacturing engineering and technology. Pearson Education India.
- [5] **Wagner, V. (2011).** Amélioration de la productivité en usinage d'un titane réfractaire : le Ti5553 (Thèse de doctorat : univ-toulouse).
- [6] **Calatoru, V. (2007).** Usure par diffusion des outils en carbure pendant l'usinage des alliages d'aluminium. École Polytechnique de Montréal.
- [7] **Mills, B. (2012).** Machinability of engineering materials. Springer Science & Business Media.
- [8] **Bagur, F. (1999).** Matériaux pour outils de coupe. *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique*, , no BM7080, p. BM7080. 1-BM7080. 16.
- [9] **Hosseini, A., & Kishawy, H. A. (2014).** Cutting tool materials and tool wear. In *Machining of titanium alloys* (pp. 31-56). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [10] **Grzesik, W. (2008).** Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Elsevier.
- [11] **Fnides B. (2012).** Étude expérimentale sur le comportement des outils de coupe en tournage des aciers pour travail à chaud. (Thèse de doctorat : univ-guelma).

- [12] **Meddour I. (2015).** Prediction de la rugosité de surface, des efforts de coupe et des vibrations de l'outil en tournage dur par les méthodes rsm et ann-application au couple : al₂o₃+ tic/100cr6 (Thèse de doctorat : univ-guelma).
- [13] **Remadna M. (2001).** Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN. (Thèse de doctorat : univ-INSA de Lyon).
- [14] **Azizi, M. W. (2014).** Utilisation des plans d'expériences en TD pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage (Thèse de doctorat : univ-guelma).
- [15] **Dischler, B., & Wild, C. (Eds.). (2013).** Low-pressure synthetic diamond: manufacturing and applications. Springer Science & Business Media.
- [16] **Bouid L. (2015).** Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13 (Thèse de doctorat : univ-guelma).
- [17] **Hamadi, B., & Achour, A. (2010).** Etude des revêtements durs et application sur outil de coupe. (Mémoire de Magister : univ- Constantine)
- [18] **Mohammad, R. (2011).** Étude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec : mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette : application au cas de l'ébauche de turbines de pompage (Doctoral dissertation, Toulouse 3).
- [19] **Kablouti O, Boulanouar L, & AZIZI, R. B. M. (2017).** Impact du revêtement et des conditions de coupe sur le comportement à l'usure des outils et sur la rugosité de la surface usinée. Vol. 79, Iss. 3 pp. 89-102.
- [20] **Leach, R. (Ed.). (2013).** Characterisation of areal surface texture. Springer Science & Business Media.
- [21] **Leach, R. (2013).** Introduction to surface topography. In Characterisation of areal surface texture (pp. 1-13). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.
- [22] **Laouissi, A. (2019).** Etude du comportement du couple fonte/céramique en nitrure de silicium (Si₃N₄) revêtue et non revêtue, en sollicitations sévères lors du tournage-Modélisation et Optimisation (Thèse de doctorat : univ-guelma).

- [23] **Khellaf, A. (2022)** Modelisation et optimisation avancees du processus de tournage des pieces difficilement usinables. (Thèse de doctorat : univ-guelma).
- [24] **Laouissi, A., Yallese, M. A., Belbah, A., Belhadi, S., & Haddad, A. (2019).** Investigation, modeling, and optimization of cutting parameters in turning of gray cast iron using coated and uncoated silicon nitride ceramic tools. Based on ANN, RSM, and GA optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(1-4), 523-548.
- [25] **List, G. (2004).** Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caractérisation de l'interface outil copeau : application à l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351 (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).
- [26] **Belhadi, S. (2009).** 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 (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).
- [27] **Schmitt, T. (2010).** Mécanismes de dégradation de revêtements base CrN élaborés par arc-PVD : intérêt d'une nano-architecture (Doctoral dissertation, Ecully, Ecole centrale de Lyon).
- [28] **Durand-Charre, M. (2012).** La microstructure des aciers et des fontes : genèse et interprétation. EDP sciences.
- [29] **Barrau, O. (2004).** Étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud (Thèse de doctorat : univ-toulouse).
- [30] **Jegou, S. (2009).** Influence des éléments d'alliage sur la genèse des contraintes résiduelles d'aciers nitrurés (Thèse de doctorat : univ-ParisTech).
- [31] **Dolatabadi, F. (2010).** Étude de l'influence du mode de lubrification sur les performances d'usinage du composite à matrices d'aluminium (Thèse de doctorat : École Polytechnique de Montréal).
- [32] **Boulahmi, S. (2015).** Étude expérimentale des effets de l'outil de coupe, des conditions d'usinage et de lubrification sur la qualité de surface et le comportement en traction des pièces en alliages d'aluminium (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [33] **Nouioua, M. (2019).** Optimisation des paramètres de coupe lors de l'usinage à sec et avec quantité minimale de lubrification. (Thèse de doctorat : univ-guelma).

- [34] **Sharma, V. S., Singh, G., & Sørby, K. (2015).** A review on minimum quantity lubrication for machining processes. *Materials and manufacturing processes*, 30(8), 935-953.
- [35] **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 (Thèse de doctorat : univ-tours).
- [36] **Badiger, P. V., Desai, V., & Ramesh, M. R. (2018, April).** Performance of Ti-multilayer coated tool during machining of MDN431 alloyed steel. In *AIP conference proceedings* (Vol. 1943, No. 1). AIP Publishing.
- [37] **Çydaş, U. (2010).** Machinability evaluation in hard turning of AISI 4340 steel with different cutting tools using statistical techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224(7), 1043-1055.
- [38] **Günay, M., & Yücel, E. (2013).** Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron. *Measurement*, 46(2), 913-919.
- [39] **Camuşcu, N., & Aslan, E. (2005).** A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 170(1-2), 121-126.
- [40] **Kumar, R., Sahoo, A. K., Mishra, P. C., & Das, R. K. (2018).** Comparative study on machinability improvement in hard turning using coated and uncoated carbide inserts: part II modeling, multi-response optimization, tool life, and economic aspects. *Advances in Manufacturing*, 6, 155-175.
- [41] **Viswanathan, R., Ramesh, S., & Subburam, V. (2018).** Measurement and optimization of performance characteristics in turning of Mg alloy under dry and MQL conditions. *Measurement*, 120, 107-113.
- [42] **Sateesh, N., Satyanarayana, K., & Karthikeyan, R. (2018).** Optimization of machining parameters in turning of Al6063A-T6 using Taguchi-Grey analysis. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19374-19379.
- [43] **Gopal, P. M., & Prakash, K. S. (2018).** Minimization of cutting force, temperature and surface roughness through GRA, TOPSIS and Taguchi techniques in end milling of Mg hybrid MMC. *Measurement*, 116, 178-192.

- [44] **Lakshmanan, M., Rajadurai, J. S., & Rajakarunakaran, S. (2021).** Machining studies of Al7075 in CNC turning using grey relational analysis. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1625-1628.
- [45] **Narayanan, N., Baskar, N., Ganesan, M., Jenarathanan, M. P., & Praveen, S. (2019).** Evaluation and optimization of surface roughness and metal removal rate through RSM, GRA, and TOPSIS techniques in turning PTFE polymers. In *Advances in Manufacturing Technology: Select Proceedings of ICAMT 2018* (pp. 595-605). Springer Singapore.
- [46] **Muniappan, A., Raj, J. A., Jayakumar, V., Prakash, R. S., & Sathyaraj, R. (2018, August).** Optimization of WEDM process parameters using standard deviation and MOORA method. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 402, No. 1, p. 012139). IOP Publishing.
- [47] **Singaravel, B., Selvaraj, T., & Vinodh, S. (2016).** Multi-objective optimization of turning parameters using the combined moora and entropy method. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 40(1), 101-111.
- [48] **Do Duc, T., Nguyen, N. T., Tien, D. H., & Dang, H. L. (2021).** A research on multi-objective optimization of the grinding process using segmented grinding wheel by Taguchi-Deaer method. *EUREKA: Physics and Engineering*,(1), 67-77.
- [49] **Pradhan, S., Indraneel, S., Sharma, R., Bagal, D. K., & Bathe, R. N. (2020).** Optimization of machinability criteria during dry machining of Ti-2 with micro-groove cutting tool using WASPAS approach. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5306-5312.
- [50] **Vaddi, V. R., Ch, S. R., Pogaku, V. K., & Bushaboina, S. K. (2018).** Optimization of electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4 V) using Taguchi-DEAR method (No. 2018-28-0032). SAE Technical Paper.
- [51] **Venkateshwar Reddy, P., Suresh Kumar, G., & Satish Kumar, V. (2020).** Multi-response optimization in machining Inconel-625 by abrasive water jet machining process using WASPAS and MOORA. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(11), 9843-9857.
- [52] **Prasad, S. R., Ravindranath, K., & Devakumar, M. L. S. (2018).** Experimental investigation and parametric optimization in abrasive jet machining on nickel 233 alloy using WASPAS and MOORA. *Cogent Engineering*, 5(1), 1497830.

- [53] **Chate, G. R., GC, M. P., Harsha, H. M., Urankar, S. U., Sanadi, S. A., Jadhav, A. P., ... & Deshpande, A. S. (2021).** Sustainable machining: Modelling and optimization using Taguchi, MOORA and DEAR methods. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8941-8947.
- [54] **Salur, E., Kuntoğlu, M., Aslan, A., & Pimenov, D. Y. (2021).** The effects of MQL and dry environments on tool wear, cutting temperature, and power consumption during end milling of AISI 1040 steel. *Metals*, 11(11), 1674.
- [55] **Elbah, M., Laouici, H., Benlahmidi, S., Nouioua, M., & Yallese, M. A. (2019).** Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5-6), 2581-2597.
- [56] **Nouioua M, Yallese M.A, Khettabi R, Belhadi S. & Mabrouki T. (2017).** Comparative assessment of cooling conditions, including MQL technology on machining factors in an environmentally friendly approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 3079-3094.
- [57] **Nouioua, M., Yallese, M. A., Khettabi, R., Belhadi, S., Bouhalais, M. L., & Girardin, F. (2017).** Investigation of the performance of the MQL, dry, and wet turning by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5-8), 2485-2504.
- [58] **Panday, A., Goindi, G. S., & Singh, N. (2022).** Evaluation of effect of oil viscosity in MQL turning of aluminium 6061. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1740-1747.
- [59] **Shukla, A., Dubey, V., & Sharma, A. K. (2023).** Comparative study of dry machining with MQL assisted soybean oil in turning operation of AISI 304 steel. *Materials Today: Proceedings*.
- [60] **Oussama, B., Yapan, Y. F., Uysal, A., Abdelhakim, C., & Mourad, N. (2023).** Assessment of turning AISI 316L stainless steel under MWCNT-reinforced nanofluid-assisted MQL and optimization of process parameters by NSGA-II and TOPSIS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-14.
- [61] **Swain, S., Kumar, R., Panigrahi, I., Sahoo, A. K., & Panda, A. (2022).** Machinability performance investigation in CNC turning of Ti-6Al-4V alloy: Dry versus iron-

- aluminium oil coupled MQL machining comparison. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 5(4), 496-509.
- [62] **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. (Thèse de doctorat : univ-guelma).
- [63] **Sandvik coromant (2017)**. <http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads>.
- [64] **Goupy, J. L. (2005)**. *Pratiquer les plans d'expériences*. Dunod.
- [65] **Taguchi, G. (1987)**. *System of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize costs (Vol. 1)*. UNIPUB/Kraus International Publications.
- [66] **Kamoun, A., Chaabouni, M. M., & Ayedi, H. F. (2011)**. Plans d'expériences et traitements de surface-Méthodologie des surfaces de réponses (MSR).
- [67] **Bayraktar, F., & Kara, F. (2020)**. Investigation of the effect on surface roughness of cryogenic process applied to cutting tool. *International Journal of Analytical, Experimental and Finite Element Analysis*, 7(2), 19-27.
- [68] **Bartarya, G., & Choudhury, S. K. (2012)**. Effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness during finish hard turning AISI52100 grade steel. *Procedia CIRP*, 1, 651-656.
- [69] **Touggui, Y., Belhadi, S., Uysal, A., Temmar, M., & Yallese, M. A. (2021)**. A comparative study on performance of cermet and coated carbide inserts in straight turning AISI 316L austenitic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 241-260.
- [70] **Srithar, A., Palanikumar, K., & Durgaprasad, B. (2014)**. Experimental investigation and analysis on hard turning of AISI D2 steel using coated carbide insert. *Advanced Materials Research*, 984, 154-158.
- [71] **Fnides, B., Yallese, M. A., & Aouici, H. (2008)**. Comportement à l'usure des céramiques de coupe ($Al_2O_3 + TiC$ et $Al_2O_3 + SiC$) en tournage des pièces trempées. *Algerian J. Advanced Mater*, 5, 121-124.

- [72] **Aouici, H., Yallese, M. A., Chaoui, K., Mabrouki, T., & Rigal, J. F. (2012).** Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement*, 45(3), 344-353.
- [73] **Yallese, M. A. (2005).** Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).
- [74] **Meddour I. (2015).** prediction de la rugosité de surface, des efforts de coupe et des vibrations de l'outil en tournage dur par les méthodes rsm et ann-application au couple : $Al_2O_3 + TiC/100Cr6$. (Thèse de doctorat : univ-guelma).
- [75] **Meddour, I., Yallese, M. A., & Aouici, H. (2014, December).** Investigation and modeling of surface roughness of hard turned AISI 52100 steel: Tool vibration consideration. In *Conference on Multiphysics Modelling and Simulation for Systems Design* (pp. 419-431). Cham: Springer International Publishing.
- [76] **Yigit, R., Celik, E., Findik, F., & Koksall, S. (2008).** Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 26(6), 514-524.
- [77] **Chen, T., Li, S., Han, B., & Liu, G. (2014).** Study on cutting force and surface micro-topography of hard turning of GCr15 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72, 1639-1645.
- [78] **Patel, V. D., & Gandhi, A. H. (2019).** Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool. *Measurement*, 138, 34-38.
- [79] **Yallese, M. A., Chaoui, K., Zeghib, N., Boulanouar, L., & Rigal, J. F. (2009).** Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Journal of materials processing technology*, 209(2), 1092-1104.
- [80] **Aslan, A. (2020).** Optimization and analysis of process parameters for flank wear, cutting forces and vibration in turning of AISI 5140: A comprehensive study. *Measurement*, 163, 107959.
- [81] **Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., Amirat, A., & Belhadi, S. (2007).** Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel. *Mechanics*, 65(3), 57-65.

- [82] **Huang, Y., Chou, Y. K., & Liang, S. Y. (2007).** CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35, 443-453.
- [83] **Arunachalam, R. M., Mannan, M. A., & Spowage, A. C. (2004).** Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(9), 879-887.
- [84] **Poulachon, G., Bandyopadhyay, B. P., Jawahir, I. S., Pheulpin, S., & Seguin, E. (2003).** The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(2), 139-144.
- [85] **Suresh, R., Basavarajappa, S., & Samuel, G. L. (2012).** Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. *Measurement*, 45(7), 1872-1884.
- [86] **Yallese, M. A., Rigal, J. F., Chaoui, K., & Boulanouar, L. (2005).** The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60 HRC). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219(1), 35-55.
- [87] **Yallese, M. A., Boulanouar, L., & Chaoui, K. (2004).** Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique. *Mécanique & Industries*, 5(4), 355-368.
- [88] **Lemke, H. W., Seewig, J., Bodschwinn, H., & Brinkmann, S. (2003).** Characteristic parameters of the Abbott curve for the integral evaluation of 3D measured cylinder liner surfaces. *MTZ worldwide*, 64(5), 34-36.
- [89] **Prostrednik, D., & Osanna, P. H. (1998).** The Abbott curve—well known in metrology but not on technical drawings. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(5-6), 741-745.
- [90] **Krystek, M. (1996).** A fast Gauss filtering algorithm for roughness measurements. *Precision Engineering*, 19(2-3), 198-200.
- [91] **Brinkmann, S. (2000).** Development of a robust Gaussian regression filter for three-dimensional surface analysis. In *Proceedings of the Xth International Colloquium on Surface*, 2000.

- [92] **Brinkmann, S., Bodschwinn, H., & Lemke, H. W. (2001).** Accessing roughness in three-dimensions using Gaussian regression filtering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(13-14), 2153-2161.
- [93] **Li, H., Jiang, X., & Li, Z. (2004).** Robust estimation in Gaussian filtering for engineering surface characterization. *Precision Engineering*, 28(2), 186-193.
- [94] **Laouissi, A., Yallese, M. A., Belbah, A., Khellaf, A., & Haddad, A. (2019).** Comparative study of the performance of coated and uncoated silicon nitride (Si₃N₄) ceramics when machining EN-GJL-250 cast iron using the RSM method and 2D and 3D roughness functional parameters. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, 1-23.
- [95] **Khellaf, A., Aouici, H., Smaiah, S., Boutabba, S., Yallese, M. A., & Elbah, M. (2017).** Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(1-4), 333-354.
- [96] **Hamlaoui, N., Azzouz, S., Chaoui, K., Azari, Z., & Yallese, M. A. (2017).** Machining of tough polyethylene pipe material: Surface roughness and cutting temperature optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 2231-2245.
- [97] **Abdelkrim, M. (2008).** Etude de l'influence de la température de coupe dans l'usure des outils et sur les caractéristiques métallurgiques des alliages usinés (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [98] **Samsudeensadham, S., & Krishnaraj, V. (2014).** An analysis on temperature & surface roughness during end milling of Ti-6Al-4V alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 592, 38-42.
- [99] **Zimmermann, M., Heberger, L., Schneider, F., Effgen, C., & Aurich, J. C. (2016).** Investigation of chip formation and workpiece load when machining carbon-fiber-reinforced-polymer (CFRP). *Procedia Manufacturing*, 6, 124-131.
- [100] **Zerti, A., Yallese, M. A., Zerti, O., Nouioua, M., & Khettabi, R. (2019).** Prediction of machining performance using RSM and ANN models in hard turning of martensitic stainless steel AISI 420. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(13), 4439-4462.

- [101] **Nouioua, M., Yallese, M. A., Khettabi, R., Chabbi, A., Mabrouki, T., & Girardin, F. (2018).** Optimization of machining process during turning of X210Cr12 steel under MQL cooling as a key factor in clean production. In *Design and Modeling of Mechanical Systems—III: Proceedings of the 7th Conference on Design and Modeling of Mechanical Systems, CMSM'2017, March 27–29, Hammamet, Tunisia 7* (pp. 855-863). Springer International Publishing.
- [102] **Chandraker, S. (2015).** Taguchi analysis on cutting force and surface roughness in turning MDN350 steel. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3388-3393.
- [103] **Patole, P. B., & Kulkarni, V. V. (2018).** Prediction of surface roughness and cutting force under MQL turning of AISI 4340 with nano fluid by using response surface methodology. *Manufacturing Review*, 5, 5.
- [104] **Panda, A., Das, S. R., & Dhupal, D. (2018).** Experimental investigation, modelling and optimization in hard turning of high strength low alloy steel (AISI 4340). *Matériaux & Techniques*, 106(4), 404.
- [105] **Li, J., & Laghari, R. A. (2019).** A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 2929-2943.
- [106] **Rao, R. V., & Kalyankar, V. D. (2014).** Optimization of modern machining processes using advanced optimization techniques: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73, 1159-1188.
- [107] **Neşeli, S., Yıldız, S., & Türkeş, E. (2011).** Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology. *Measurement*, 44(3), 580-587.
- [108] **Sen, B., Mia, M., Mandal, U. K., & Mondal, S. P. (2019).** GEP-and ANN-based tool wear monitoring: a virtually sensing predictive platform for MQL-assisted milling of Inconel 690. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 395-410.
- [109] **Kant, G., Rao V, V., & Sangwan, K. S. (2013).** Predictive modeling of turning operations using response surface methodology. *Applied Mechanics and Materials*, 307, 170-173.

- [110] **Aouici, H., Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., Elbah, M., & Fnides, B. (2014).** Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73, 1775-1788.
- [111] **Davim, J. P., & Figueira, L. (2007).** Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(4), 625-633.
- [112] **Chihaoui, S., Yallese, M. A., Belhadi, S., Belbah, A., Safi, K., & Haddad, A. (2021).** Coated CBN cutting tool performance in green turning of gray cast iron EN-GJL-250: modeling and optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 3643-3665.
- [113] **Labidi, A., Tebassi, H., Belhadi, S., Khettabi, R., & Yallese, M. A. (2018).** Cutting conditions modeling and optimization in hard turning using RSM, ANN and desirability function. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18, 1017-1033.
- [114] **Sharma, P., & Bhambri, K. (2012).** Multi-response optimization by experimental investigation of machining parameters in CNC turning by Taguchi based grey relational analysis. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(5), 1594-1602.
- [115] **Kara, F., Köklü, U., & Kabasakaloğlu, U. (2020).** Taguchi optimization of surface roughness in grinding of cryogenically treated AISI 5140 steel. *Materials Testing*, 62(10), 1041-1047.
- [116] **Nalbant, M., Gökkaya, H., & Sur, G. (2007).** Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials & design*, 28(4), 1379-1385.
- [117] **Asiltürk, I., & Akkuş, H. (2011).** Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, 44(9), 1697-1704.
- [118] **Stojčić, M., Zavadskas, E. K., Pamučar, D., Stević, Ž., & Mardani, A. (2019).** Application of MCDM methods in sustainability engineering: A literature review 2008–2018. *Symmetry*, 11(3), 350.

- [119] **Marelli, D., Singh, S. K., Nagari, S., & Subbiah, R. (2020).** Optimisation of machining parameters of wire-cut EDM on super alloy materials—A review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1021-1027.
- [120] **Gupta, K., & Gupta, M. K. (Eds.). (2020).** Optimization of Manufacturing Processes. Springer International Publishing.
- [121] **Aggarwal, A., Singh, H., Kumar, P., & Singh, M. (2008).** Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. *Journal of materials processing technology*, 205(1-3), 42-50.
- [122] **Venkata Vishnu, A., Babu, S. S., & Kumar, P. J. (2022).** Multi-response optimization of machining characteristics using MQL through GRA and TOPSIS approach. In *Sustainable Machining Strategies for Better Performance: Select Proceedings of SMSBP 2020* (pp. 23-37). Springer Singapore.
- [123] **Meral, G., Sarıkaya, M., Mia, M., Dilipak, H., Şeker, U., & Gupta, M. K. (2019).** Multi-objective optimization of surface roughness, thrust force, and torque produced by novel drill geometries using Taguchi-based GRA. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 1595-1610.
- [124] **Rajeswari, B., & Amirthagadeswaran, K. S. (2017).** Experimental investigation of machinability characteristics and multi-response optimization of end milling in aluminium composites using RSM based grey relational analysis. *Measurement*, 105, 78-86.
- [125] **Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019).** New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM) (Vol. 277, pp. 103-08). Cham: Springer.
- [126] **Sahu, A. K., Mahapatra, S. S., Chatterjee, S., & Thomas, J. (2018).** Optimization of surface roughness by MOORA method in EDM by electrode prepared via selective laser sintering process. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19019-19026.
- [127] **Liang, Z. L., Yun, T. J., Oh, W. B., Lee, B. R., & Kim, I. S. (2020).** A study on MOORA-based taguchi method for optimization in automated GMA welding process. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1778-1785.
- [128] **Srinivasulu Reddy, K., Venkata Reddy, V., & Mandava, R. K. (2022).** Optimization of turning process parameters using entropy-GRA and DEAR methods. In *Recent*

Advances in Industrial Production: Select Proceedings of ICEM 2020 (pp. 315-324). Springer Singapore.

- [129] **Manoj, M., Jinu, G. R., & Muthuramalingam, T. (2018).** Multi response optimization of AWJM process parameters on machining TiB₂ particles reinforced Al7075 composite using Taguchi-DEAR methodology. *Silicon*, 10(5), 2287-2293.
- [130] **Huu Phan, N., & Muthuramalingam, T. (2021).** Multi criteria decision making of vibration assisted EDM process parameters on machining silicon steel using Taguchi-DEAR methodology. *Silicon*, 13(6), 1879-1885.
- [131] **Lakshmi, V. V., Subbaiah, K. V., Kothapalli, A. V., & Suresh, K. (2020).** Parametric optimization while turning Ti-6Al-4V alloy in Mist-MQCL (Green environment) using the DEAR method. *Manufacturing Review*, 7, 38.
- [132] **Pathapalli, V. R., Basam, V. R., Gudimetta, S. K., & Koppula, M. R. (2020).** Optimization of machining parameters using WASPAS and MOORA. *World Journal of Engineering*, 17(2), 237-246.
- [133] **Pradhan, D. K., Sahu, B., Bagal, D. K., Barua, A., Jeet, S., & Pradhan, S. (2022).** Application of progressive hybrid RSM-WASPAS-grey wolf method for parametric optimization of dissimilar metal welded joints in FSSW process. *Materials Today: Proceedings*, 50, 766-772.
- [134] **Zavadskas, E. K., Chakraborty, S., Bhattacharyya, O., & Antucheviciene, J. (2015).** Application of WASPAS method as an optimization tool in non-traditional machining processes. *Information Technology and Control*, 44(1), 77-88.

Les résultats de cette thèse ont été présentés via plusieurs publications et communications internationales et nationales qui sont comme suit :

Publication Internationales

- 1. Intitulé de la Publication :** Tool wear, 3D surface topography, and comparative analysis of GRA, MOORA, DEAR, and WASPAS optimization techniques in turning of cold work tool steel (2022).

Intitulé de la Revue : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology

Url de la revue/article : <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09326-6>

Auteurs : Safi Khaoula, Yallese Mohamed Athmane, Belhadi Salim, Mabrouki Tarek, Laouissi Aissa.

- 2. Intitulé de la Publication :** Parametric study and multi-criteria optimization during turning of X210Cr12 steel using the desirability function and hybrid Taguchi-WASPAS method. (2022).

Intitulé de la Revue : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science.

Url de la revue/article : <https://doi.org/10.1177/09544062221086171>

Auteurs : Safi Khaoula, Yallese Mohamed Athmane, Belhadi Salim, Mabrouki Tarek, Chihaoui Salim.

- 3. Intitulé de la Publication :** Optimisation multi objective des paramètres de coupe lors de l'usinage d'un acier pour travail à froid avec un carbure revêtu CVD ($Al_2O_3/TiC/TiCN$). (2021).

Intitulé de la Revue : UPB Scientific Bulletin, Series D : Mechanical Engineering

Auteurs : Safi Khaoula, Yallese Mohamed Athmane, Belhadi Salim, Boutabba Smail, Mabrouki Tarek.

- 4. Intitulé de la Publication :** modeling of cutting force and power consumption using ANN and RSM methods in turning of AISI D3 : Comparative study and precision benefit.

Intitulé de la Revue : Journal of Theoretical and Applied Mechanics. (2023).

Url de la revue/article : <https://doi.org/10.55787/jtams.23.53.1.49>

Auteurs : Safi Khaoula, Yallese Mohamed Athmane, Belhadi Salim, Mabrouki Tarek, Chihaoui Salim.

Communications internationales

- ✓ **Middle East international conference on contemporary scientific studies-VI. September 20-22, 2021 Beirut, Lebanon Saint Joseph University of Beirut, Faculty of Educational Sciences.**
Safi et al « Multi-objective optimization in turning operation of AISI D3 steel using Taguchi DEAR approach ».
<https://www.middleeastconference.org>
- ✓ **TOKYO SUMMIT 4th International Conference on Innovative Studies of Contemporary Sciences July 29-31, 2021 Tokyo, Japan.**
Safi et al « Optimization of AISI D3 steel using carbide cutting tool (CVD) based on Taguchi and TOPSIS approaches ».
<https://www.tokyosummit.org>
- ✓ **AL FARABI INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED SCIENCES 'Nakhchivan' University, Azerbaijan, May 2-4, 2021.**
Safi et al « Multi-Objective Optimization of Machining Parameters during dry turning of AISI D3 Steel using Taguchi based grey relational analysis ».
- ✓ **International Hazar scientific researches conference April 10 - 11, 2021 Baku, Azerbaijan Khazar University**
Safi et al « Multi-Objective Optimization of performance parameters in machining AISI D3 intended tool steel for cold working ».
<https://www.izdas.org/hazar>
- ✓ **1st International Symposium on Materials, Energy and Environment January 20-21st ; 2020, El Oued, ALGERIA**
Safi et al « Optimisation multi-objective de la rugosité de surface et du débit de copeau lors du tournage de l'acier fortement allié X210Cr12 ».
<https://mee2020.sciencesconf.org>
- ✓ **4th International Symposium on Materials and Sustainable Development ISMSD2019 November 12-14, 2019 Boumerdes – Algeria**

Safi et al « Modélisation de l'effort de coupe et de la puissance consommée lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM et ANN ».

<https://ismsd2019.sciencesconf.org/>

Communications nationales

- ✓ **Proceedings of 1st National Conference of Materials sciences And Engineering, (MSE'22) 28-29 June 2022, Khenchela**

Safi et al « Modeling and Optimization of Cutting Parameters During the Machining of a High-Alloy Steel in an MQL environment ».

<http://mse.epizy.com>

- ✓ **The 1st National Conference on Thermal Engineering Renewable and Conventional Processes NCTE'22 University of Batna 2, October 25-26, 2022**

Safi et al « Performance of CVD-Coated Carbide Tool in dry turning of AISI D3 steel ».

<http://conference.univ-batna2.dz/ncte22>

- ✓ **Congrès Algérien de Mécanique « CAM 2019 », Ghardaïa (Algérie) du 23 au 26 février 2020.**

Safi et al « Investigation expérimentale sur la rugosité de surface et l'usure de l'outil lors de l'usinage d'un acier fortement allié par un carbure à triple revêtement ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiCN}$) ».

http://www.cam-dz.org/home_uc_cam2019.html