

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar –
Annaba



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté de Technologie

كلية التكنولوجيا

Département Génie Mécanique

قسم الهندسة الميكانيكية

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat LMD

Spécialité : Génie Mécanique

Par :

SOUAIDI Chaima

Thème :

Effet de la microlubrification (MQL) sur les paramètres technologiques d'usinage des pièces avec et sans traitement thermique

Thèse soutenue le 01 Juillet 2026 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Lagred Ahmed	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	Yallese Mohamed Athmane	Prof.	Université 08 Mai 1945 Guelma	Rapporteur
03	Mokas Nacer	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examinateur
04	Belhadi Salim	Prof.	Université 08 Mai 1945 Guelma	Examinateur
05	Boucherit Septi	Prof.	Université 08 Mai 1945 Guelma	Examinateur

DÉDICACE

I dedicate this modest work to:

My dear father and mother, for their unconditional support;

My brother Salah and my sisters Roaya and Dina,

And my fiancé Y. Adel,

for their presence and encouragement;

The memory of my aunt S. Wassila;

My entire family;

All my friends and colleagues.

Last but not least, I want to thank me.

I want to thank me for believing in me.

I want to thank me for doing all the hard work.

I want to thank me. for never quitting.

I want to thank me for trying to do more right than wrong.

I want to thank me for just being me at all time.

REMERCIEMENT

Je remercie **Dieu** pour la vie, la patience et la force qui m'ont permis de mener à terme cette recherche, fruit d'années d'efforts marquées par la rigueur et la quête du savoir.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma plus profonde gratitude à mon directeur de thèse, le **Pr. YALLESE Mohamed Athmane**, pour son encadrement éclairé, sa rigueur scientifique, ses conseils constants et sa confiance. Sa disponibilité et ses remarques pertinentes ont été déterminantes à chaque étape de ce travail.

À la mémoire de mon premier encadrant, **Pr. Bengharsallah Mohieddine**, disparu durant la deuxième année de mon doctorat. Que Dieu accueille son âme et récompense son dévouement. Je lui suis reconnaissant pour les conseils et l'aide précieuse qu'il m'a apportée au début de ce parcours ; sa foi dans mon travail continue de m'inspirer.

Je remercie également chaleureusement mon Co-encadrant, **Pr. Amirat Abdelaziz**, pour son soutien et ses conseils continus qui ont grandement contribué à l'avancement de cette thèse.

J'adresse mes sincères remerciements à **Pr. Lagred Ahmed**, Professeur au Département de Génie Mécanique de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, pour avoir accepté la présidence du jury de cette thèse. Son érudition, sa simplicité et ses qualités humaines remarquables suscitent mon admiration et mon profond respect.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury : **Pr. MOKAS Nacer**, Professeur à l'Université Badji Mokhtar - Annaba, **Pr. BELHADI Salim**, Professeur à l'Université 8 Mai 1945 - Guelma et **Pr. BOUCHERIT Septi**, Professeur à l'Université 8 Mai 1945 - Guelma, pour le temps consacré à l'évaluation de cette thèse et pour leurs remarques instructives.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au **Pr. BELHADI Salim** pour son soutien indéfectible, sa disponibilité et ses conseils avisés, qui ont largement contribué à la réussite de ce travail.

Mes remerciements vont aux membres du CFD et aux enseignants-chercheurs engagés dans la formation doctorale, dont l'expertise, la pédagogie et le suivi méthodologique ont grandement contribué à notre formation scientifique et à notre autonomie.

Mes sincères remerciements vont à l'équipe des laboratoires **LRTAPM** et **LMS** pour leur soutien. J'exprime une gratitude particulière au **Dr. K. Safi**, **Dr. M. Kaddeche**, **Dr. S. Chihaoui**

et à mes collègues **S. Haoues, K. Abbed, C. Djafri** et **A. Khelfaoui**, dont l'aide et les échanges scientifiques ont été essentiels à la qualité de ce travail.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide ou leur soutien au cours de ce travail.

RÉSUMÉ

La lubrification par quantité minimale (MQL) s'affirme comme une solution durable qui améliore notablement l'usinabilité, la qualité de finition et la productivité par rapport à l'usinage à sec. En limitant les volumes de fluide de coupe et les coûts opérationnels, le MQL contribue également à réduire l'impact environnemental des opérations d'usinage. Cette étude évalue l'impact des deux stratégies de lubrification durable (usinage à sec et MQL) sur les performances de coupe lors du tournage de l'acier AISI 52100, en comparant les états avec et sans traitement thermique.

D'une part, une étude comparative a été menée entre l'usinage à sec et le MQL lors du tournage de l'acier AISI 52100 avec des plaquettes en carbure métallique revêtues CVD (GC-2015). Des essais paramétriques ont été réalisés pour évaluer l'influence de (V_c , f et a_p) sur les performances en termes d'usure d'outil, d'effort de coupe, de rugosité de surface, de consommation d'énergie et de température de coupe. Par la suite, un plan d'expériences Taguchi L9 (3^3) a été appliqué afin d'effectuer une analyse statistique basée sur l'ANOVA et de modéliser les performances (R_a , F_z , P_c , K_c et MRR) à l'aide de la méthode (MDR). Enfin, une optimisation multicritère a été réalisée via la fonction (DF) et plusieurs méthodes MCDM associées au rapport (S/B) de Taguchi (GRA, EAMR, FUCA, EDAS).

D'autre part, une étude comparative a été menée afin d'identifier la combinaison optimale des paramètres de coupe (V_c , f , a_p et mode de lubrification) pour le tournage d'un acier AISI 52100 trempé (60 HRC) avec des plaquettes en céramique mixte CC-650. Les réponses de performance ont été modélisées et prédites à partir d'un plan Taguchi mixte L18 ($3^3, 1^2$), en appliquant la méthode (MSR) et une analyse de la variance (ANOVA) pour extraire des modèles mathématiques pertinents. L'optimisation s'est déroulée en trois étapes à la base du rapport (S/B) ; optimisation mono-objectif pour chaque critère puis optimisation multi-objectif via trois approches innovantes (Probability, RAM, RAWEC) couplées à différentes pondérations (Égal, LOPCOW, CRITIC) afin d'identifier les compromis entre critères contradictoires, et validation et comparaison des solutions optimales à l'aide des coefficients de corrélation de Spearman et Pearson, suivies de l'agrégation des classements par la méthode de Borda pour aboutir à une décision finale robuste.

Mots clés : OFAT, Tournage dur, AISI 52100, MQL, Modélisation, Mono-objective, Multi-objective.

ABSTRACT

Minimum Quantity Lubrication (MQL) has emerged as a sustainable solution that markedly improves machinability, surface finish and productivity compared with dry machining. By drastically reducing cutting-fluid volumes and associated operational costs, MQL also helps lower the environmental footprint of machining operations. This study evaluates the influence of two sustainable lubrication strategies (dry and MQL machining) on cutting performance during the turning of AISI 52100 steel, comparing material states with and without heat treatment.

On the one hand, a comparative study was conducted between dry and MQL machining during the turning of AISI 52100 steel with CVD-coated carbide inserts (GC-2015). Parametric tests were performed to evaluate the influence of (V_c , f , and a_p) on performance in terms of tool wear, cutting force, surface roughness, power consumption, and cutting temperature. Subsequently, a Taguchi L9 (3^3) experimental design was applied to perform a statistical analysis based on ANOVA and to model performance (R_a , F_z , P_c , K_c , and MRR) using the MSR method. Finally, multi-criteria optimization was performed using the DF function and several MCDM methods associated with Taguchi's S/B ratio (GRA, EAMR, FUCA, EDAS).

On the other hand, a comparative study was conducted to identify the optimal combination of cutting parameters (V_c , f , a_p and lubrication mode) for turning hardened AISI 52100 (60 HRC) with CC-650 mixed ceramic inserts. Performance responses were modeled and predicted using a mixed Taguchi L18 ($3^3, 1^2$) design, applying the RSM method and analysis of variance (ANOVA) to extract relevant mathematical models. The optimization was carried out in three stages based on the (S/B) ratio; single-objective optimization for each criterion, then multi-objective optimization using three innovative approaches (Probability, RAM, RAWEC) coupled with different weightings (Equal, LOPCOW, CRITIC) in order to identify trade-offs between conflicting criteria, and validation and comparison of optimal solutions using Spearman and Pearson correlation coefficients, followed by aggregation of rankings using the Borda method to arrive at a robust final decision.

Keywords: OFAT, Hard turning, AISI 52100, MQL, Modeling, Single-objective, Multi-objective.

ملخص

يعد التبريد بالكميات الدنيا (MQL) حلاً مستدامًا يحسن بشكل ملحوظ عملية التشغيل، وجودة السطح والإنتاجية مقارنة بالتصنيع الجاف. من خلال الحد من كميات سوائل التبريد والتكاليف التشغيلية، تساهم تقنية MQL أيضًا في تقليل الأثر البيئي لعمليات التصنيع. تقيم هذه الدراسة تأثير استراتيجيتي التبريد المستدام (التصنيع الجاف وMQL) على أداء القطع عند خراطة الفولاذ AISI 52100، من خلال مقارنة الحالات المعالجة حرارياً وغير المعالجة حرارياً.

من جهة أولى، أجريت دراسة مقارنة بين التصنيع الجاف والتصنيع باستخدام MQL عند خراطة الفولاذ AISI 52100 باستخدام لقمة من الكربيد المعدني المطلي بطبقة CVD (GC-2015). أجريت اختبارات بارامترية لتقييم تأثير (V_c, f, ap) على عوامل الأداء من حيث تآكل الأداة، وجهد القطع، وخشونة السطح، واستهلاك الطاقة، ودرجة حرارة القطع. بعد ذلك، تم تنفيذ خطة تجربة تاغوشي (3^3) L9 لإجراء تحليل إحصائي قائم على ANOVA ونمذجة الأداءات (R_a, F_z, P_c, K_c) (MRR) بتطبيق طريقة (RSM). أخيراً، تم إجراء تحسين متعدد المعايير باستخدام طريقة DF وطرق MCDM مقترنة بنسب (S/B) لتاغوشي (EDAS، FUCA، EAMR، GRA).

من ناحية أخرى، أجريت دراسة مقارنة لتحديد التركيبة المثلى لمعلمات القطع (V_c, f, ap وطريقة التبريد) لخراطة الفولاذ AISI 52100 المقيس (60 HRC) باستخدام لقمة سيراميك مدمجة (CC-650). تم نمذجة استجابات الأداء والتنبؤ بها باستخدام مخطط Taguchi المختلط ($3^3, 1^2$) L18، بتطبيق طريقة (MSR) وتحليل التباين (ANOVA) لاستخراج النماذج الرياضية ذات الصلة. تمت عملية التحسين على ثلاث مراحل على أساس النسبة (S/B)؛ تحسين أحادي الهدف لكل معيار ثم تحسين متعدد الأهداف عبر ثلاث مقاربات مبتكرة (Probability, RAM, RAWEC) مقترنة بترجيحات مختلفة (Probability, RAM, RAWEC) من أجل تحديد التوازنات بين المعايير المتناقضة، والتحقق من صحة الحلول المثلى ومقارنتها باستخدام معاملات الارتباط Spearman و Pearson، تليها تجميع التصنيفات باستخدام طريقة Borda للوصول إلى قرار نهائي قوي.

الكلمات المفتاحية: OFAT، الخراطة الصلبة، AISI 52100، MQL، النمذجة، أحادي الهدف، متعدد الأهداف.

NOMENCLATURE

ML : Quantité minimale de lubrification	MCDM : Multi-Criteria Decision Making (Prise de décision multicritères)
AISI : American Iron and Steel Institute (Institut américain du fer et de l'acier)	DF : Fonction de désirabilité
Vc : Vitesse de coupe (m/min)	GRA : Grey Relational Analysis
f : Avance par tour (mm/tr)	EDAS : Evaluation based on Distance from Average Solution
ap : Profondeur de passe (mm)	EAMR : Energy-Assisted Magnetic Recording
Vb : Usure de l'outil (mm)	FUCA : Faire Un Choix Adéquat
T° : Température de coupe (°C)	PIV : Proximity Indexed Value
Ra : Rugosité moyenne arithmétique (µm)	RAM : Root Assessment Method
Rt : Rugosité totale ou maximale (µm)	RAWEC : Ranking of Alternatives with Weights of Criterion
Rz : Profondeur moyenne de la rugosité (µm)	
Pc : Puissance de coupe	
Fz : Effort de coupe	
Pc : Puissance de coupe	
Kc : Pression de coupe spécifique	
MRR : taux d'enlèvement de matière	
ANOVA : Analyse de variance	
MSR : Méthode de surface de réponse	
CBN : Nitrure de bore cubique	
PVD : Dépôt physique en phase vapeur	
CVD : Dépôt chimique en phase vapeur	
Al₂O₃ : Oxyde d'aluminium	
TiC : Carbure de titane	
HRC : Dureté Rockwell	
R² : Coefficient de détermination	
S/N : Rapport signal-sur-bruit	

INDEX DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1	Représentation de la coupe tridimensionnelle (chariotage).	6
Figure I.2	Diagramme fer-carbone.	9
Figure I.3	Usages des diverses familles de matériaux pour outils coupants.	10
Figure I.4	Différentes matières des plaquettes de coupe.	11
Figure I.5	Revêtement multicouche moderne de CVD combinant des couches de (TiN, Al ₂ O ₃ et MT-TiCN).	13
Figure I.6	Revêtement multicouche moderne de PVD.	14
Figure I.7	Différentes techniques écologiques de refroidissement en tournage.	15
Figure I.8	Système de distribution MQL	17
Figure I.9	a)Catégories de systèmes de distribution MQL. b)Représentation schématique d'un système MQL interne utilisant un canal unique et un canal double.	18
Figure I.10	Systèmes de lubrification MQL : a) Système MQL interne ; b) Système MQL externe utilisant (1- une buse à éjecteur et 2- une buse conventionnelle).	19
Figure I.11	Types de lubrifiants couramment utilisés en usinage.	21
Figure I.12	Cycle de traitement thermique.	22
Figure I.13	Amélioration de l'usure de plaquette de coupe.	25
Figure I.14	Profil de rugosité et principales variables influençant la qualité de surface.	26
Figure I.15	Composantes de l'effort de coupe.	27
Figure I.16	Conditions d'usure de l'outil dans des environnements MQL et en milieu sec pendant le tournage de l'acier des roulements (0,3 mm/tr, 0,6 mm, 90 m/min).	28
Figure I.17	Effet de l'avance sur Ra dans des environnements d'usinage presque secs à des vitesses de coupe de (a) 80 m/min, (b) 140 m/min et (c) 200 m/min.	29
Figure I.18	Effet du type d'outil et de la technique de refroidissement sur la rugosité de la surface en fonction des conditions de coupe.	30
Figure I.19	Effet du copeau en dents de scie sur l'usure du flanc à $f = 0,20$ mm/tour ; $V_c = 111$ m/min.	31
Figure I.20	Évolution de l'usure du flanc en fonction de temp d'usinage à $V_c=111$ m/min, $f = 0,24$ mm/tr dans différents modes de tournage.	31
Figure I.21	Comparaison entre les plaquettes GC4215, GC1015 et GC2015 sur l'usure et la rugosité de surface.	32
Figure I.22	Comparaison de : a) rugosité de surface, et b) consommation d'énergie dans différentes conditions d'usinage	33
Figure I.23	Effets de l'environnement de coupe sur : a) Usure des flancs, b) Température de coupe, et c) Puissance de coupe.	34
Figure I.24	Graphiques des effets principaux basée sur le rapport signal/bruit pour l'usure, la température et la consommation d'énergie.	35
Figure I.25	Profil contour illustrant l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité et	

	la température.	36
Figure I.26	Graphique de la fonction de rampe de la désirabilité pour la rugosité de la surface.	37

CHAPITRE II

Figure II.1	Eprouvettes utilisées pour les essais.	45
Figure II.2	Tour à charioter et à fileter modèle SN40.	46
Figure II.3	Variateur de vitesse de fréquence ABB.	46
Figure II.4	Ensemble capteur-indicateur de vitesse de rotation.	47
Figure II.5	Caractéristiques des plaquettes de coupe et du porte outils utilisés pour le tournage de l'AISI 52100 non-traité.	48
Figure II.6	Caractéristiques des plaquettes de coupe et du porte outils utilisés pour le tournage de l'AISI 52100 traité.	48
Figure II.7	Schéma de montage du système de Lubrification à Quantité Minimale (MQL).	50
Figure II.8	Réservoir d'huile.	50
Figure II.9	Boîte contrôle MQL.	50
Figure II.10	Rugosimètre 2D (Surftest SJ-210).	51
Figure II.11	Configuration du système de mesure KISTLER9257 B.	52
Figure II.12	Structure et composantes principales du dynamomètre KISTLER 9257B.	53
Figure II.13	Mesure de la température : Pyromètre à infrarouge CAUTION 9U0401.	53
Figure II.14	Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).	54
Figure II.15	Microscope électronique à balayage de modèle Quanta FEG 250.	55
Figure II.16	Dispositif et protocole expérimental du plan L9.	62
Figure II.17	Organigramme de la méthode RSM.	64

CHAPITRE III

Figure III.1	Morphologie obtenue par (MEB) et spectre EDS de la face de coupe usée de plaquette (GC-2015) revêtue par CVD (zone E).	69
Figure III.2	Morphologie de l'usure Vb sous environnements à sec et MQL.	70
Figure III.3	Morphologie de l'usure de plaquette de coupe avec le MEB.	70
Figure III.4	Evolution de l'usure Vb et Vb _{max} sous environnements à sec et MQL.	71
Figure III.5	Evolution de la rugosité de surface (Ra, Rz et Rt) à sec et MQL.	72
Figure III.6	Evolution des efforts (Fx, Fy et Fz) sous environnements à sec et MQL.	73
Figure III.7	Evolution de la puissance de coupe Pc sous environnements à sec et MQL.	73
Figure III.8	Evolution de la température sous environnement à sec et MQL.	74
Figure III.9	Formes du copeau produit selon les deux modes de lubrification (à sec et MQL).	75

Figure III.10	Image MEB du copeau produit à différentes vitesses de coupe selon l'usinage à sec.	75
Figure III.11	Image MEB du copeau produit à différentes vitesses de coupe selon l'usinage avec MQL.	76
Figure III.12	Graphique des effets principaux pour Ra et Fz lors de l'usinage à sec et MQL.	82
Figure III.13	Graphique des effets principaux pour Pc et Kc lors de l'usinage à sec et MQL.	83
Figure III.14	Comparaison des valeurs mesurées et prédites de (Ra, Fz, Kc et Pc) lors l'usinage à sec et MQL.	84
Figure III.15	Surfaces de réponse et les contours de (Ra) lors de l'usinage à sec et MQL.	86
Figure III.16	Surfaces de réponse et les contours de (Fz) lors de l'usinage à sec et MQL.	86
Figure III.17	Surfaces de réponse et les contours de (Kc) lors de l'usinage à sec et MQL.	87
Figure III.18	Surfaces de réponse et les contours de (Pc) lors de l'usinage à sec et MQL.	88
Figure III.19	Graphique à barres de désirabilité pour le 4 ^{ème} cas (a) à sec et (b) MQL.	91
Figure III.20	Surfaces de réponse 3D et contours de désirabilité pour le 4 ^{ème} cas lors de l'usinage à sec.	93
Figure III.21	Surfaces de réponse 3D et contours de désirabilité pour le 4 ^{ème} cas lors de l'usinage avec MQL.	93
Figure III.22	Organigramme de la méthode GRA	94
Figure III.23	Graphique des effets principaux de (GRG) (a) à sec et (b) MQL.	96
Figure III.24	Organigramme de la méthode EDAS.	97
Figure III.25	Graphique des effets principaux pour (ASi) lors de l'usinage à sec et MQL.	99
Figure III.26	Graphique des effets principaux de (S_i) (a) à sec et (b) MQL.	101
Figure III.27	Graphiques des effets principaux de (v_i) (a) à sec et (b) MQL.	103

CHAPITRE IV

Figure IV.1	Morphologie obtenue par (MEB) et spectre EDS de la face de coupe usée de la plaquette (CC-650) (zone E).	108
Figure IV.2	Morphologie de l'usure de la plaquette de coupe (CC-650) avec le MEB.	108
Figure IV.3	Diagramme de Pareto des effets des paramètres de coupe sur Ra, Fz, Pc et Kc.	113
Figure IV.4	Graphique des effets principaux des réponses (Ra et Fz).	114
Figure IV.5	Graphique des effets principaux des réponses (Pc et Kc).	115
Figure IV.6	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra, Fz, Pc et Kc).	116
Figure IV.7	Courbes 3D présentent l'effet de (V_c, f et a_p) sur (Ra).	117
Figure IV.8	Courbes 3D présentent l'effet de (V_c, f et a_p) sur (Fz).	118
Figure IV.9	Courbes 3D présentent l'effet de (V_c, f et a_p) sur (Pc).	118
Figure IV.10	Courbes 3D présentent l'effet de (V_c, f et a_p) sur (Kc).	119
Figure IV.11	Flux global de la méthodologie d'optimisation.	120

Figure IV.12	Graphique des effets principaux des réponses à la base du rapport (S/B) de Taguchi.	123
Figure IV.13	Diagrammes en barres des performances optimales des approches MCDM et poids.	135

INDEX DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1	Comparaison synthétique des matériaux de coupe	12
Tableau I.2	Recueil de référence des méthodes multi-objectifs appliquées dans divers domaines	41

CHAPITRE II

Tableau II.1	Structure chimique de l'AISI 52100	45
Tableau II.2	Propriétés mécaniques, physiques et thermiques de l'acier AISI 52100	45
Tableau II.3	Caractéristiques techniques du tour conventionnel modèle SN 40C	46
Tableau II.4	Paramètres de coupe des essais paramétrique	59
Tableau II.5	Matrice de planification du plan de Taguchi L9 (3^3)	60
Tableau II.6	Matrice de planification du plan de Taguchi L18 ($3^3, 2^1$)	60

CHAPITRE III

Tableau III.1	Résultats des essais paramétriques	69
Tableau III.2	Résultats des essais pour le plan de Taguchi L ₉	77
Tableau III.3	ANOVA pour (Ra)	78
Tableau III.4	ANOVA pour l'effort (Fz)	79
Tableau III.5	ANOVA pour (Kc)	80
Tableau III.6	ANOVA pour (Pc)	80
Tableau III.7	Résultats des paramètres de performances avec S/B	89
Tableau III.8	Contraintes d'optimisation et importance pour les quatre cas d'étude	92
Tableau III.9	Résultats de désirabilité pour les quatre cas	92
Tableau III.10	Normalisation des performances basée sur le rapport S/B ($y_i(k)$)	95
Tableau III.11	Calcul de (GRC) $\xi_j(k)$	95
Tableau III.12	Résultats des (GRG)	96
Tableau III.13	Régimes et réponses optimaux de la méthode GRA	97
Tableau III.14	Détermination de (AV_j)	97
Tableau III.15	Résultats de (PDA & NDA) lors de l'usinage à sec	98
Tableau III.16	Résultats de (PDA & NDA) lors de l'usinage avec MQL	98
Tableau III.17	Calcul des notes d'évaluation (ASi) lors de l'usinage à sec et MQL	98
Tableau III.18	Régime de coupe optimale en adoptant la méthode EDAS	99
Tableau III.19	Valeurs normalisées selon la méthode EAMR	100
Tableau III.20	Valeurs calculées de S_i	100

Tableau III.21	Régime de coupe optimale en adoptant la méthode EAMR	101
Tableau III.22	Classement des alternatives r_{ij}	102
Tableau III.23	Valeurs calculées et les résultats selon la méthode FUCA	102
Tableau III.24	Régime de coupe optimal en adoptant la méthode FUCA	103
Tableau III.25	Récapitulatif des régimes optimaux obtenus	104

CHAPITRE IV

Tableau IV.1	Résultats des essais pour le plan de Taguchi L18	107
Tableau IV.2	ANOVA pour (Ra)	109
Tableau IV.3	ANOVA pour l'effort (Fz)	110
Tableau IV.4	ANOVA pour (Pc)	111
Tableau IV.5	ANOVA pour (Kc)	111
Tableau IV.6	Résultats du rapport (S/B) pour (Fz, Ra, Pc, Kc et MRR)	120
Tableau IV.7	Analyse des réponses pour Taguchi (S/B)	122
Tableau IV.8	Paramètres de coupe optimales	123
Tableau IV.9	Résultats de pondération des critères	128
Tableau IV.10	Résultats de l'évaluation de la méthode de probabilité préférée à poids égal	128
Tableau IV.11	Résultats de la probabilité favorable globale et classement des alternatives	129
Tableau IV.12	Résultats évalués de la méthode RAM	130
Tableau IV.13	Le score global (RI_i) de la méthode RAM et le classement des expériences	131
Tableau IV.14	Double normalisation et calcul de l'écart par rapport au poids des critères	131
Tableau IV.15	Le score global (Q_i) dans la méthode RAWEC et le rang des expériences	132
Tableau IV.16	Classement des alternatives selon différentes méthodes	133
Tableau IV.17	Résultats de la corrélation de Spearman	137
Tableau V.18	Résultats de la corrélation de Pearson	138
Tableau V.19	Classement final des méthodes de pondération sur la base des scores de Borda	139

TABLE DES MATIERES

Dédicace	II
Remerciement	III
Résumé	V
Nomenclature	VIII
Index des figures	IX
Index des tableaux	XIV
Table des matières	XV
Introduction générale	1

CHAPITRE I

Bibliographie : Tournage Dur, Micro-lubrification, et Optimisation

I.1	INTRODUCTION	5
I.2	TOURNAGE DUR	5
I.2.1	Chariotage paraxial	6
I.2.2	Avantage du tournage dur	6
I.2.3	Limitations du tournage dur	7
I.2.4	Matériaux utilisés en tournage dur	7
I.3	USINAGE DES ACIER FAIBLEMENT ALLIÉS	7
I.4	OUTIL DE COUPE	9
I.4.1	Typologie des matériaux des outils de coupe	9
I.4.2	Matériaux d'outil de coupe en tournage	10
I.4.3	Revêtements et traitements des outils de coupe	13
I.5	STRATEGIES D'USINAGE ECOLOGIQUES	14
I.5.1	Usinage à sec	15
I.5.2	Usinage avec micro-lubrification (MQL)	16
I.5.3	Usinage cryogénique	17
I.5.4	Usinage par jet à haute pression	17
I.5.5	Usinage nano-fluides de coupe	18
I.6	TYPES D'APPLICATION DE SYSTEMES DE LUBRIFICATION MQL	18
I.6.1	Système MQL externe	18
I.6.2	Système MQL interne	19
I.7	PRINCIPAUX TYPES DE LUBRIFIANTS EN USINAGE	19
I.8	TRAITEMENT THERMIQUE (TTH)	21
I.8.1	Définition et objectifs des traitements thermiques	21
I.8.2	Élaboration de la loi thermique	21
I.8.3	Facteurs influençant la conception du cycle TTh	22
I.8.4	Principaux type de traitements thermiques	23
I.8.5	Plage de traitement thermique des aciers	23
I.9	PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE	24
I.9.1	Différents types d'amélioration de l'usure de plaquette de coupe	24
I.9.2	Rugosité de surface	25
I.9.3	Effort de coupe	26

I.10	ÉTAT DE L'ART	28
I.9.1	Impact des stratégies de lubrification sur les performances de l'usinage	28
I.9.2	Synthèse critique des méthodes d'optimisation.....	37
I.11	CONCLUSION	42

CHAPITRE II

Dispositifs et Méthodologie Expérimentale

II.1	Introduction.....	44
II.2	Équipements d'expérimentation.....	44
II.2.1	Caractérisation du matériau d'étude.....	44
II.2.2	Description technique de la machine-outil	45
II.2.3	Sélection des outils de coupe et porte-outils	47
II.2.4	Configuration du système MQL	49
II.3	Instruments de mesures des performances.....	50
II.3.1	Mesure de la rugosité de surface	51
II.3.2	Évaluation des efforts de coupe.....	51
II.3.3	Mesure de la température à l'interface outil-pièce.....	53
II.3.4	Caractérisation de l'usure des outils	54
II.3.5	Analyse morphologique et chimique des surfaces	55
II.4	Planification des expériences.....	56
II.4.1	Méthodes de planification des expériences	56
II.4.1.1	Méthode paramétrique uni-factorielle OFAT	56
II.4.1.2	Méthode multifactorielle.....	56
II.4.2	Différents types de facteurs	58
II.4.3	Démarche et plans d'expérience adoptés	59
II.5	Méthode de modélisation appliquée	62
II.5.1	Méthodologie des surface de réponse (MSR)	62
II.5.2	Analyse de la variance (ANOVA).....	65
II.5	Conclusion	66

CHAPITRE III

Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier AISI 52100 Lors de L'usinage à sec et MQL

III.1	Introduction.....	68
III.2	Essais paramétrique sous environnement à sec et MQL.....	68
III.2.1	Évolution de l'usure (Vb)	69
III.2.2	Évolution de la rugosité de surface (Ra, Rz, Rt).....	71
III.2.3	Évolution des efforts de coupe (Fx, Fy, Fz).....	72
III.2.4	Évolution de la puissance de coupe (Pc)	73
III.2.5	Évolution de la température de coupe (T°)	73
III.2.6	Formation des copeaux.....	74
III.3	Traitement statistique du plan de Taguchi L9.....	76

III.3.1	Analyse de la variance ANOVA pour (Ra, Fz, Pc et Kc)	77
III.3.2	Graphiques des effets principaux	81
III.3.3	Modélisation des paramètres technologiques	83
III.3.4	Surface de réponse 3D pour (Ra, Fz, Pc et Kc).....	85
III.4	Optimisation multi-objectif des conditions de coupe	88
III.4.1	Fonction de désirabilité (DF)	90
III.4.2	Méthode GRA	94
III.4.3	Méthode EDAS	97
III.4.4	Méthode EAMR	99
III.4.5	Méthode FUCA	101
III.4.6	Comparaison des méthodes d'optimisation	103
III.7	Conclusion	104

CHAPITRE IV

Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier Traité AISI 52100 Lors de L'usinage à sec et MQL

IV.1	Introduction.....	106
IV.2	Traitement statistique de résultats.....	106
IV.2.1	Morphologie de la plaquette CC650 par MEB.....	107
IV.2.2	Analyse de la variance ANOVA.....	109
IV.2.2.1	ANOVA pour (Ra).....	109
IV.2.2.2	ANOVA pour (Fz)	109
IV.2.2.3	ANOVA pour (Pc)	110
IV.2.2.4	ANOVA pour (Kc)	111
IV.2.3	Graphiques de Pareto	112
IV.2.4	Graphiques des effets principaux pour (Ra, Fz, Pc et Kc)	113
IV.2.5	Analyse de régression des paramètres technologiques	115
IV.2.6	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	115
IV.2.7	Surface de réponse 3D pour (Ra, Fz, Pc et Kc).....	116
IV.3	Optimisation mono et multi-objectif des conditions de coupe	119
IV.3.1	Optimisation mono-objective de Taguchi	121
IV.3.2	Optimisation multi-objectifs des conditions de coupe	123
IV.3.2.1	Optimisation par la méthode de Probabilité.....	124
IV.3.2.2	Optimisation par la méthode RAM.....	125
IV.3.2.3	Optimisation par la méthode RAWEC.....	125
IV.3.2.4	Méthodes objectives de détermination de la pondération des critères.....	126
IV.3.2.5	Application des méthodes proposées	128
IV.3.2.6	Analyse comparative des méthodes MCDM associées aux techniques de poids..	132
IV.3.2.7	Confirmation et analyse statistique des corrélations	136
IV.7	Conclusion	140
	Conclusion générale	141
	Perspectives	145
	Références bibliographiques	146

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le contexte de la fabrication moderne, où la précision et l'efficacité sont primordiales, l'adoption de stratégies de coupe innovantes et de technologies de lubrification durables et performantes s'impose comme une nécessité incontournable. L'évolution rapide des matériaux utilisés dans l'industrie, qu'ils soient durs, composites ou à haute performance, a considérablement élargi le champ des applications mais a également accru les défis liés à leur usinabilité. Cette diversité de matériaux exige non seulement la mise au point d'outils de coupe aux propriétés adaptées (géométrie, revêtement, et composition), mais aussi la conception de stratégies de lubrification/refroidissement innovantes, capables de répondre aux contraintes thermiques et tribologiques engendrées par les conditions d'usinage sévères.

Ces dernières années, des technologies avancées de refroidissement et de lubrification ont été développées dans le cadre de la philosophie de la « fabrication durable ». Ces alternatives visent à minimiser ou à éliminer l'utilisation des fluides de coupe traditionnels, avec des techniques telles que l'usinage à sec et l'usinage presque à sec. L'usinage presque à sec, qui se situe entre la coupe à sec et la coupe par inondation, réduit de nombreux problèmes liés aux fluides de coupe, tels que les coûts élevés, la faible durabilité et les risques pour la santé de l'opérateur, tout en assurant un meilleur refroidissement et une meilleure lubrification que l'usinage à sec.

Deux des techniques les plus prometteuses en termes d'usinage presque à sec sont l'usinage cryogénique et la lubrification avec quantité minimale (MQL). Cependant, le coût élevé des fluides cryogéniques rend les dépenses d'usinage comparables à celles de la coupe par inondation. La micro-lubrification est une technique qui implique l'application précise et minimale de lubrifiants, et elle s'est avérée être une solution prometteuse pour surmonter les défis des processus de tournage. De plus, des recherches récentes ont indiqué que ce procédé contribue à réduire l'usure des outils, à diminuer les efforts de coupe et à préserver l'intégrité de la surface par une moindre génération de chaleur et une friction réduite dans la zone de coupe. De ce fait, la microlubrification (MQL) est reconnue comme une solution particulièrement adaptée à l'usinage des matériaux difficiles à usiner, tels que l'acier AISI 52100.

L'acier à roulements de type AISI 52100 est un acier allié au chrome à haute teneur en carbone, réputé pour sa résistance à l'usure, sa dureté élevée et sa stabilité dimensionnelle après traitement thermique. Grâce à ces propriétés, il est largement utilisé dans la fabrication de roulements, ainsi que dans les applications automobiles et mécaniques de précision, où la durabilité et la fiabilité des composants sont essentielles.

Dans ce contexte, la présente thèse poursuit deux objectifs complémentaires.

- Le premier objectif est d'étudier l'effet des traitements thermiques sur le tournage de l'acier AISI 52100 en comparant des stratégies de lubrification durables (sec et MQL).
- Le second objectif consiste à évaluer l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance à l'aide d'une base de données expérimentale construite suivant un plan orthogonal de Taguchi. la thèse vise à développer des modèles prédictifs du processus et identifier les conditions de coupe optimales via des méthodes d'optimisations mono et multi-objectifs couplées à des techniques de pondération, ces résultats étant validés expérimentalement et statistiquement par des analyses statistiques appropriées (ANOVA, RSM).

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse s'articulent autour de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, une revue bibliographique a mis en lumière les phénomènes fondamentaux de l'usinage, l'usinabilité des aciers faiblement alliés, notamment l'AISI 52100 (traité et non traité) et souligne la nécessité d'adapter la géométrie, la composition et les revêtements des outils à la microstructure du matériau. Ensuite, le chapitre examine les stratégies de lubrification durable en décrivant leurs avantages et limites. Et puis, une section spécifique présente les indicateurs de performance étudiés dans ce travail. Enfin, ce chapitre est terminé par une synthèse des travaux de recherche consacrés à l'usinage des aciers difficiles à usiner et aux méthodes d'optimisation des conditions de coupe.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons en détail les équipements employés, la méthodologie expérimentale, à savoir le plan d'essais, le choix des facteurs et des niveaux et les conditions opérationnelles retenues pour les essais.

Le troisième chapitre présente une étude comparative visant à déterminer les conditions de coupe optimales (V_c , f et a_p) lors du tournage de l'acier non traité AISI 52100, à l'aide d'un outil en carbure revêtu CVD, sous environnements sec et MQL. Les essais paramétriques ont permis d'analyser l'influence des paramètres de coupe sur les performances d'usinage, tandis que les méthodes RSM et ANOVA ont été utilisées pour développer des modèles prédictifs. Enfin, plusieurs approches d'optimisation multicritères, dont la fonction de désirabilité et les méthodes MCDM (GRA, EDAS, EAMR et FUCA), ont permis d'identifier les conditions de coupe assurant un usinage à la fois performant et durable.

Le quatrième chapitre vise à identifier les conditions de coupe optimales (V_c , f , a_p , mode de lubrification) pour le tournage de l'AISI 52100 traité à une dureté de 60 HRC utilisant une plaquette céramique CC-650, selon un plan expérimental mixte Taguchi L18 ($3^3, 1^2$) et en observant les réponses R_a , F_z , P_c , K_c et MRR. Les données ont été modélisées par RSM et ANOVA suivis d'une optimisation en trois étapes : une optimisation mono-objective (Taguchi S/N), une optimisation multi-objectives avec l'application des méthodes Probabilité, RAM, RAWEC combinée à différentes pondérations (Égale, LOPCOW, CRITIC) et une consolidation et une validation des classements obtenus par le calcul des coefficients de corrélation de Spearman et de Pearson, suivie d'une agrégation finale des rangs par la méthode de Borda.

Le manuscrit se conclut par une synthèse générale des résultats et des contributions de la thèse, suivie de la liste des références bibliographiques et des annexes contenant les informations expérimentales complémentaires.

Introduction Générale

CHAPITRE I : Bibliographie : Tournage Dur, Micro-lubrification, et Optimisation

- I.1 Introduction
- I.2 Tournage dur
- I.3 Usinage des aciers faiblement alliés
- I.4 Outil de coupe
- I.5 Stratégies d'usinage écologiques
- I.6 Types d'application de systèmes de lubrification MQL
- I.7 Principaux types de lubrifiants
- I.8 Traitements thermiques
- I.9 Paramètres technologiques d'usinage
- I.10 État de l'art
- I.11 Conclusion

Chapitre II : Procédure Expérimental

Chapitre III : Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier AISI 52100

Lors de L'usinage à sec et MQL

Chapitre VI : Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier Traité AISI

52100 Lors de L'usinage à sec et MQL

CONCLUSION GENERALE

I.1. Introduction

L'usinage des matériaux difficiles à usiner tels que les aciers faiblement alliés constitue un problème industriel majeur, en raison de leur résistance mécanique élevée, de leur faible conductivité thermique et de leur sensibilité à l'écrouissage. Les traitements thermiques ajustent leur microstructure, modulant dureté et contraintes résiduelles, et conditionnent directement la difficulté d'usinage. Parallèlement, la microlubrification améliore le contrôle de la chaleur et réduit les frottements au niveau de la zone de coupe, ce qui accroît la longévité des outils et affine la qualité de la surface usinée. Ce chapitre offre un aperçu et une synthèse des recherches récentes portant sur l'usinage dur des aciers faiblement alliés, en examinant d'une part l'impact des traitements thermiques sur la microstructure et l'usinabilité, et d'autre part les gains technologiques apportés par la microlubrification en termes de réduction des efforts de coupe et de température. Les différentes méthodes d'optimisation associées sont également présentées dans ce chapitre. L'objectif de cette étude est d'identifier les tendances actuelles, de définir les limites des pratiques existantes et d'esquisser les orientations futures possibles de la recherche dans le domaine du tournage durable des aciers trempés.

I.2. Tournage dur

Le tournage dur consiste à usiner des pièces d'une dureté Rockwell supérieure ou égale à 45–50 HRC, en un seul passage, sur un tour ou un centre d'usinage à l'aide d'outils spécialement conçus. Il se positionne entre l'usinage conventionnel « doux » et la rectification, diminuant ou substituant fréquemment les processus de rectification lors des opérations de finition [KHE 22].

Introduit au début des années 1990, le tournage dur s'est développé parallèlement à la généralisation des grains de nitrure de bore cubique (CBN) et des céramiques, ainsi qu'aux progrès des techniques de dépôt physique en phase vapeur (PVD) pour les revêtements. Parallèlement, la conception de machines-outils plus rigides et stables a permis de supporter les forces de coupe et les moments de torsion élevés. Aujourd'hui, grâce à l'évolution des matériaux et des technologies, le tournage dur se présente comme une alternative compétitive à la rectification de précision : il permet d'augmenter les taux d'enlèvement de matière tout en réduisant les coûts et les délais associés aux opérations de finition [KUM 19] [FNI 14] [YAL 05].

I.2.1. Chariotage paraxial

Le tournage paraxial est une opération d'usinage tridimensionnelle réalisée au tour, au cours de laquelle une pièce en rotation est façonnée par un outil de coupe effectuant des mouvements radiaux et axiaux coordonnés. L'enfoncement radial (perpendiculaire) de l'outil détermine la profondeur de passe (a_p), tandis que son déplacement axial (parallèle) définit la vitesse d'avance (f). Associés à la vitesse de coupe (V_c) et à la géométrie de l'outil, ces paramètres contrôlent la formation du copeau, la qualité de la surface et la productivité (figure I.1). Des modélisations avancées (par exemple, par simulation éléments finis 3D) aident en outre à prévoir les forces, les températures et l'évacuation des copeaux pour optimiser la planification du procédé [HAB 06] [BOU 10].

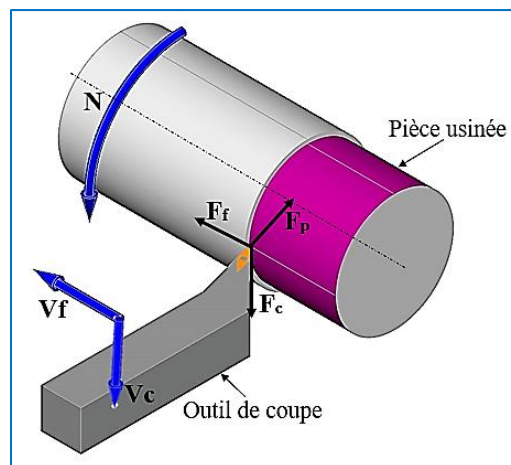


Figure I.1. Représentation de la coupe tridimensionnelle (chariotage).

I.2.2. Avantages du tournage dur

- **Réduction des temps de cycle** : l'intégration de l'ébauche et de la finition en une seule opération supprime l'étape de rectification et accélère l'ensemble du processus.
- **Investissement réduit** : seuls des tours CNC rigides standards suffisent, évitant l'achat coûteux de rectifieuses spécialisées.
- **Flexibilité améliorée** : ajuster la géométrie des pièces ou la taille des séries est plus aisé sur un tour que sur une ligne de rectification, facilitant l'adaptation aux nouveaux designs.
- **Tolérances et qualité de surface satisfaisantes** : avec des outils adaptés, on atteint des tolérances de l'ordre de ± 2 à $4 \mu\text{m}$ et une rugosité comprise entre $0,4$ et $1,6 \mu\text{m}$.

I.2.3. Limitations du tournage dur

- **Finition limitée** : le tournage dur atteint rarement des états de surface ultrafins ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$), obligatoires pour certaines applications à très haute précision.
- **Contraintes de géométrie** : la réalisation de profils longs, minces ou à interruptions fréquentes entraîne des vibrations et des forces de coupe irrégulières, rendant ces formes difficiles à usiner.
- **Usure et coût d'outillage** : l'usinage d'aciers trempés provoque une usure plus rapide de l'outil, surtout en coupes interrompues, ce qui génère des frais d'outils plus élevés et des changements fréquents.
- **Rigidité et précision de la machine** : seules des CNC à grande rigidité supportent les forces sans vibrations ; les machines moins rigides peinent à respecter les tolérances requises.

I.2.4. Matériaux utilisés en tournage dur

Les matériaux usinés en tournage dur comprennent principalement des aciers trempés, tels que l'AISI 52100 (acier à roulements), l'AISI 4140 et les aciers cémentés, dont la dureté varie généralement entre 45 et 65 HRC. Des aciers alliés, après traitement thermique, sont également couramment employés pour la fabrication de roulements, d'arbres, d'engrenages et d'outillages, grâce à leur excellente résistance mécanique. Bien que les aciers restent la référence en raison de la compatibilité chimique et mécanique avec les plaquettes diamant et CBN, certains matériaux non ferreux durcis, comme les alliages de titane ou de nickel, peuvent eux aussi être tournés en dur lorsqu'une haute performance et une grande précision dimensionnelle sont requises [MED 15].

I.3. Usinage des acier faiblement alliés

Les aciers faiblement alliés sont largement utilisés dans la fabrication de roulements, outils, coussinets, vilebrequins, engrenages, la carrosserie automobile et aérospatiale, les lignes de chemin de fer et les plaques d'ingénierie de structures côtières et au large des côtes. Les aciers au carbone contiennent généralement moins de 10 % d'éléments d'alliage (C, Mn, Cr, Ni, Mo, V et Si combinés), aucun élément ne dépassant 5 %. Selon ses composants et les traitements thermiques, ce type d'acier peut être modifié pour augmenter sa dureté, sa charge de rupture, sa résistance à l'usure, au fluage ou à la corrosion, ou une autre caractéristique spécifique à son utilisation [CAR 08] [AYA 21].

Les aciers faiblement alliés peuvent être traités thermiquement, alors que la plupart des aciers au carbone, dépourvus d'éléments d'alliage, ne présentent pas cette aptitude et ne peuvent bénéficier de ces procédés et donc ils sont utilisés pour des applications pour lesquelles la dureté ou la résistance mécanique sont des caractéristiques importantes, particulièrement en sections épaisses. Ils ont une plus haute résistance à l'abrasion, une robustesse plus élevée et une meilleure tenue à hautes températures que les aciers au carbone purs. La teneur en carbone est le critère déterminant pour la sélection des alliages d'acier :

- *Teneur en carbone de 0.30–0.37 % C* : résistance mécanique modérée, grande robustesse.
- *Teneur en carbone de 0.40–0.42 % C* : résistance mécanique élevée, bonne robustesse.
- *Teneur en carbone de 0.45–0.50 % C* : haute dureté et résistance, robustesse modérée.
- *Teneur en carbone de 0.50–0.62 % C* : forte dureté (ressorts, outils).
- *Teneur en carbone ≥ 1 % C* : très haute dureté et résistance à l'abrasion (roulements à billes, coussinets).

L'exploitation du diagramme fer–carbone (Figure I.2) révèle comment les traitements thermiques modifient la structure cristalline d'un matériau et par conséquent en améliorent les propriétés. Selon la température, le fer et ses alliages adoptent des réseaux cristallins différents : jusqu'à 912 °C, le fer α présente une maille cubique centrée (CC), puis, de 912 °C à 1394 °C, il se transforme en fer γ à maille cubique à faces centrées (CFC) [CAR 08].

On distingue deux grandes familles de matériaux en fonction de leur teneur en carbone :

- Les aciers (0,008 % à 1,7 % C)
 - *Hypoeutectoïdes* : ferrite + perlite (les plus courants en industrie).
 - *Hypereutectoïdes* : cémentite + perlite.
- Les fontes (2,11 % à 6,67 % C)

Le diagramme fer–carbone est limité à droite par la cémentite (6,67 % C), phase rendue fragile et cassante (figure I.2) [BOU 22] [BEZ 23].

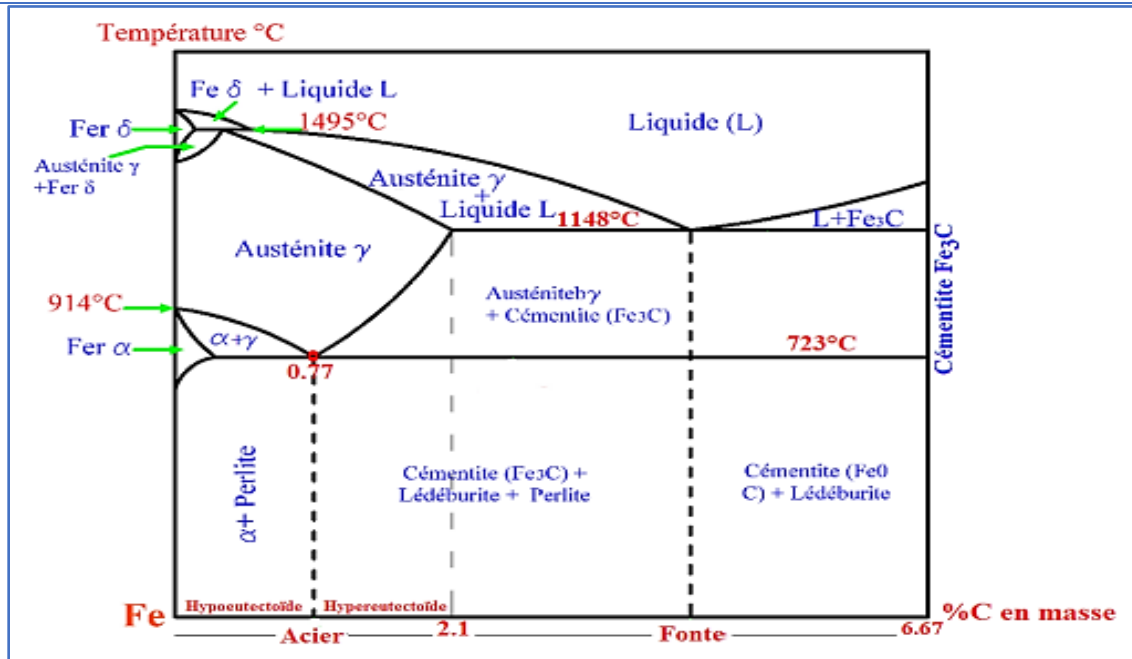


Figure I.2. Diagramme fer-carbone [BOU 22].

I.4. Outil de coupe

I.4.1. Typologie des matériaux des outils de coupe

Les matériaux de coupe se distinguent par leurs caractéristiques de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure, et sont déclinés en de très nombreuses nuances, chacune optimisée pour des applications spécifiques. Pour garantir des performances optimales, ces matériaux doivent présenter plusieurs qualités indispensables [MED 15] [BEL 09]:

- **Dureté** : assurer une excellente résistance à l'usure et limiter la déformation sous sollicitation.
- **Ténacité** : prévenir la propagation des fissures et résister aux chocs mécaniques.
- **Neutralité chimique** : ne pas réagir avec la pièce usinée, afin d'éviter tout phénomène d'adhérence ou de corrosion.
- **Stabilité chimique** : résister efficacement à l'oxydation et empêcher la diffusion d'éléments indésirables.
- **Résistance thermique** : supporter les variations de température rapides sans altération de la microstructure ni rupture.

Dans un contexte industriel en perpétuelle mutation, les outils de coupe jouent un rôle stratégique. Le choix du matériau qu'il s'agisse d'aciers rapides, de carbures métalliques, de céramiques ou d'alliages spécialement conçus dépendra des exigences de l'application (vitesse de coupe, état de surface, longévité, conditions de lubrification, etc) (figure I.3). Chaque famille de matériaux offre

un compromis unique entre productivité, coût et qualité de la pièce usinée, et c'est en comparant leurs performances dans des scénarios réels que l'on détermine la solution la mieux adaptée.

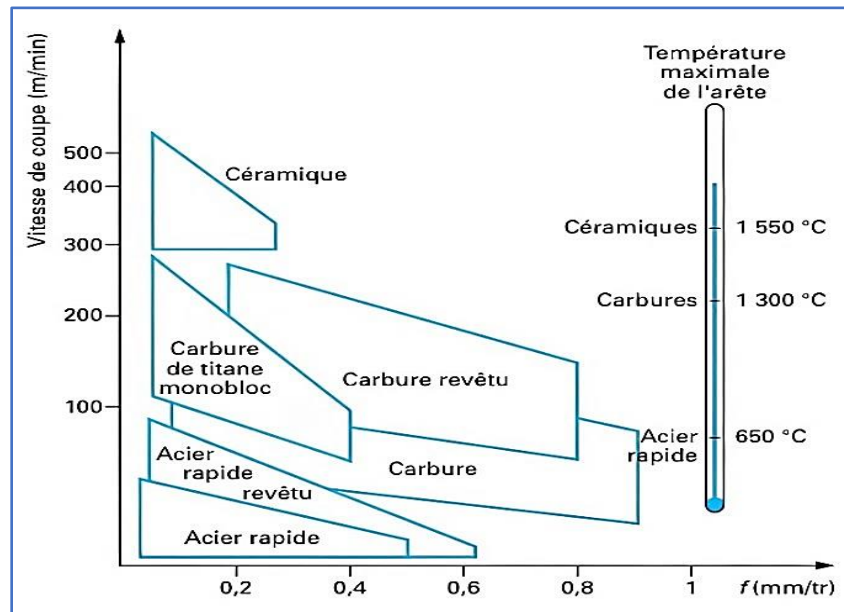


Figure I.3. Usages des diverses familles de matériaux pour outils coupants [BEL 09].

I.4.2. Matériaux d'outil de coupe en tournage

Le choix d'un matériau et d'une nuance de coupe est un facteur important pour la réussite d'une opération d'usinage. Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont répertoriées ci-dessous (voir la figure I.4). En outre, le tableau I.1 fournit une synthèse comparative des propriétés des différents matériaux de coupe [MED 15] [KHE 24].

- **Acier rapide :** alliage à haute teneur en tungstène (et souvent molybdène, chrome, vanadium et cobalt) offrant une excellente tenue en température et un bon compromis dureté/ténacité, utilisé pour les opérations de tournage général et à moyenne vitesse.
- **Carbures métalliques :** constitués principalement de carbure de tungstène, ces matériaux offrent une dureté et une résistance à l'usure exceptionnelles. Ils sont idéaux pour l'usinage à haute vitesse des matériaux durs (aciers trempés, fontes). Il existe toute une gamme de nuances carbures :
 - **Carbures non revêtus :** fabriqués par frittage d'un mélange de carbures durs (WC, TiC...) et d'un liant métallique (Co), assurant la résistance mécanique et la ténacité de la plaquette.

- **Carbures revêtus** : munis d'un dépôt de quelques μm (TiN , TiC , $\text{Al}_2\text{O}_3 \dots$), ces revêtements diminuent les coefficients de frottement et protègent la surface de l'outil, augmentant son rendement et sa durée de vie.
- **Cermets** : alliant titane et liants comme le nickel ou le cobalt, se spécialisent dans les opérations de finition. Ils présentent une résistance à l'usure et une stabilité chimique remarquables, particulièrement adaptées au tournage de finition des aciers inoxydables.
- **Céramiques** : frittées à partir d'oxyde d'alumine, se distinguent caractérisent par une dureté élevée et une bonne tenue à l'abrasion à haute température ; différentes formulations existent pour couvrir un large spectre d'applications.
 - **Les céramiques à base d'oxyde** : contiennent de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) additionné de zirconium (ZrO_2) pour limiter la propagation des fissures.
 - **Les céramiques non oxydées de type Sialons (à base de Si_3N_4)** : offrent la tenue mécanique des nitrures avec une excellente stabilité chimique.
- **Nitrure de bore cubique polycristallin (CBN)** : est un matériau de coupe qui possède une très grande résistance à la chaleur et peut être utilisé à de très grandes vitesses de coupe. Il possède aussi une bonne résistance aux chocs thermiques et une ténacité élevée.
- **Diamant polycristallin (PCD)** : est un matériau composé à partir de particules de diamant liées avec un liant métallique. Le diamant est le plus dur de tous les matériaux, et donc le plus résistant à l'usure par abrasion. Il offre une bonne résistance à l'usure mais il manque de stabilité chimique à haute température.



Figure I. 4. Différentes matières des plaquettes de coupe [SANDVIK coromant].

Tableau I. 1. Comparaison synthétique des matériaux de coupe

Matériau / Critère	Matériaux de base	Liant	Dureté	Ténacité	Température maxi	Usage & cible
Cermet (CT)	TiC/TiCN/TiN (70–85 %)	Ni/Mo/Co (15–30 %)	Très élevée, comparable au carbure	Moyenne, moins tenace sous choc	Jusqu'à 1800 °C (choc thermique)	Finitions & ébauche légère
Carbure cémenté	WC (70–94 %)	Co (6–30 %)	Très élevée, stable à chaud	Bonne, compense la fragilité du WC	Supporte hautes T ($\approx 900\text{--}1000\text{ °C}$)	Ébauche, semi-fini, usinage général à cadence élevée
Carbure métallique (GC / C)	WC, TiC, TaC (60–97 %)	Co, Ni, Ti, Ta (3–30 %)	Ajustable selon % liant & grain	Variable (fragile à très tenace)	Maintien dureté jusqu'à $\approx 600\text{ °C}$	Ébauche agressive, matériaux abrasifs & superalliages
Diamant polycristallin (PCD)	Diamant (90–95 %)	Liant Co (5–10 %)	6500–7500 HV	Bonne ténacité homogène	Sensible $> 700\text{ °C}$ sur acier, stable pour composites	Composites, MDF, bois, matériaux non ferreux
Nitrure de bore cubique (CBN)	CBN (45–95 %)	Liant céramique ou carbure	Seconde dureté après diamant ($\sim 3800\text{--}5000\text{ HV}$)	Excellente, faible affinité fer	Tolère $> 1000\text{ °C}$ ($\sim 1800\text{ °F}$)	Finition d'aciers durs ($> \text{HRC } 50$), vitesses élevées
Céramique (CC)	Al_2O_3 (70–95 %) + TiC (0–30 %)	Matrice céramique (Al_2O_3 ou Si_3N_4)	91–95 HRA	Faible, sensible au choc & broutage	Jusqu'à $1000\text{--}1200\text{ °C}$	Hautes vitesses, coupes à sec, matériaux très durs

I.4.3. Revêtements et traitements des outils de coupe

Actuellement, environ 95 % des arêtes de coupe des outils en carbure sont revêtues. Les revêtements de surface appliqués sur les outils coupants renforcent considérablement leurs performances et prolongent leur durée de vie en créant une barrière protectrice contre l'usure et la diffusion des éléments d'adhérence. En limitant les frottements et en améliorant la résistance thermique du substrat, ces films assurent la stabilité dimensionnelle lors d'usinages à haute température. À chaque cycle de coupe, ils maintiennent une efficacité constante, assurant une qualité de surface optimisée et une reproductibilité accrue, même dans des conditions d'usage intensif, réduisant la fréquence de remplacement des outils et une constance de la performance [MED 15].

Deux procédés principaux permettent le revêtement des outils [KHE 24] [HAM 23] :

1. Revêtement CVD (Chemical Vapour Deposition) : permettent de déposer, par réaction chimique à haute température (900 – 1 100 °C) et sous pression contrôlée, des films céramiques épais (5 – 30 μm) aux propriétés mécaniques et thermiques exceptionnelles. Ces couches augmentent l'adhérence chimique et mécanique au substrat en carbure et garantissent une résistance à l'usure et à la diffusion supérieure, au prix d'un recuit partiel du substrat qui nécessite un post-traitement thermique pour maintenir sa dureté (figure I.5).

Il existe deux types de revêtements par dépôt en phase vapeur (CVD) :

1.1. Structure monocouches de CVD

- TiC (Carbure de titane).
- TiCN (Carbonitrure de titane).
- TiN (Nitrure de titane).
- Al_2O_3 (Oxyde d'aluminium).
- Diamant synthétique (CVD Diamond).

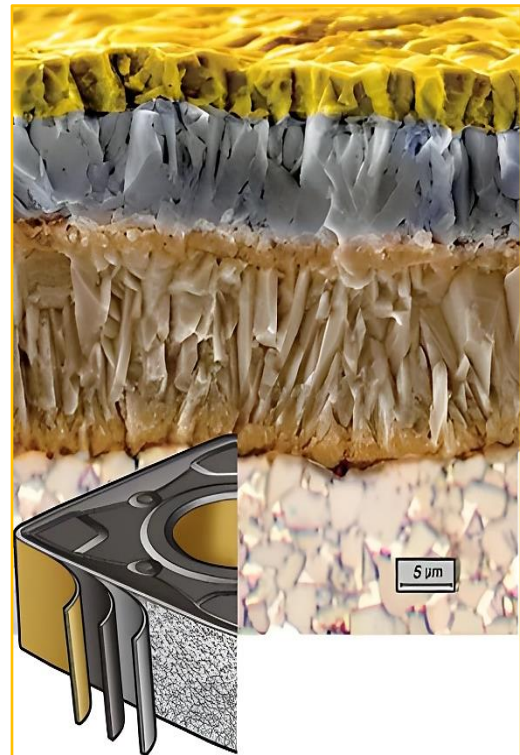


Figure I.5. Revêtement multicouche moderne de CVD combinant des couches de (TiN, Al_2O_3 et MT-TiCN) [SANDVIK Coromant].

1.2. Structures multicouches de CVD

- **TiN/TiC/TiN** : une formulation à trois couches qui combine l'adhérence (TiN), la résistance à l'abrasion (TiC) et l'étanchéité chimique (TiN) pour des performances accrues en formage et forgeage à chaud.
- **TiCN/Al₂O₃** : une combinaison d'une couche dure et tribologiquement active (TiCN) avec une couche thermique (Al₂O₃) pour les usinages à très grande vitesse.

2. Revêtement PVD (Physical Vapour Deposition) :

Le dépôt PVD consiste à vaporiser physiquement (arc cathodique, pulvérisation magnétron, faisceau d'électrons) le matériau de revêtement pour le condenser sous forme de film mince (généralement 1–5 μm) sur l'outil, dans une enceinte à vide partiel (10^{-3} – 10^{-6} Torr). Cette approche à basse température ($< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) préserve la dureté initiale des substrats en acier rapide ou en carbure, permet un dépôt multicouches et conserve une arête de coupe extrêmement nette. Les revêtements PVD (TiN, TiCN, TiAlN, AlTiN, ...) se caractérisent par une microstructure dense, une cohésion élevée et une stabilité thermique satisfaisante (jusqu'à $\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$), tout en maintenant un faible coefficient de frottement et une bonne résistance à la corrosion (figure I.6).

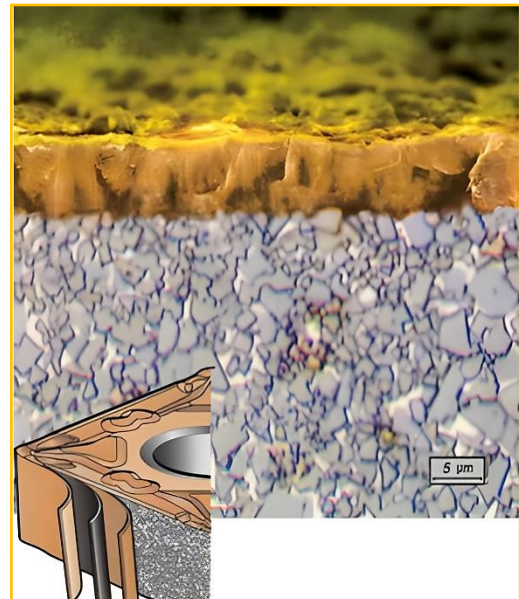


Figure I.6. Revêtement multicouche moderne de PVD [SANDVIK Coromant].

I.5. Stratégies d'usinage écologiques

Dans un contexte industriel marqué par des exigences croissantes en matière de durabilité et de responsabilité environnementale, l'usinage avec lubrification conventionnelle (inondation) présente indéniablement plusieurs avantages, notamment en améliorant les performances du processus, en réduisant les températures de coupe et en prolongeant la durée de vie des outils. Toutefois, l'utilisation massive de fluides de coupe conventionnels engendre des impacts environnementaux significatifs ainsi que des risques pour la santé des opérateurs, liés notamment à l'inhalation de brouillards d'huile et à la gestion des déchets chimiques. Face à ces préoccupations croissantes, l'industrie manufacturière moderne s'oriente résolument vers l'adoption de stratégies de refroidissement écologiques et durables (figure I.7), qui visent à minimiser l'empreinte

environnementale tout en maintenant, voire en améliorant, la qualité et l'efficacité du processus d'usinage [SEN 21] [ASH 23].

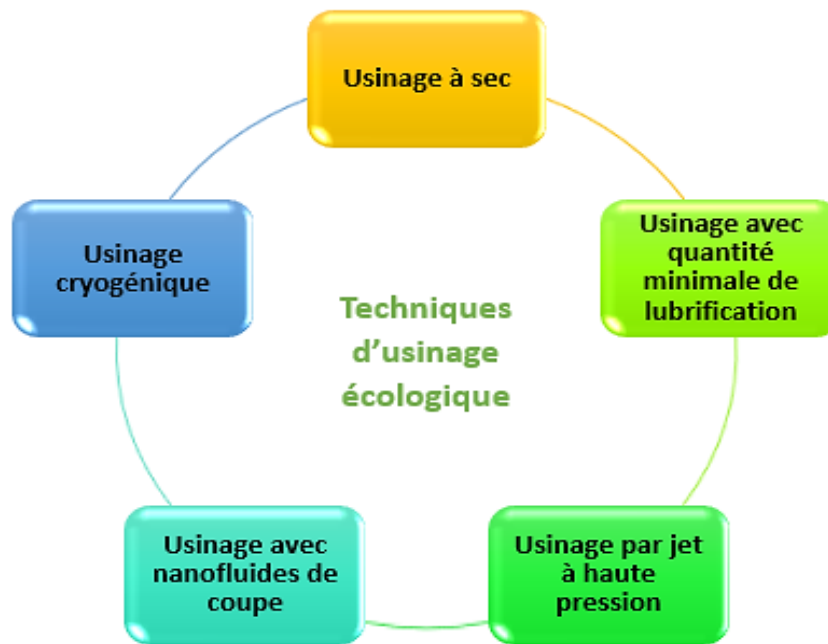


Figure I.7. Différentes techniques écologiques de refroidissement en tournage.

I.5.1. Usinage à sec

L'usinage à sec est un processus dans lequel les opérations de coupe sont effectuées sans fluides de lubrification ou de refroidissement, ce qui se traduit par des avantages en termes de coûts et d'environnement. Cette méthode élimine la nécessité de gérer les fluides de coupe et réduit les problèmes associés tels que la pollution et les risques pour la santé. Bien qu'il ne bénéficie pas des effets de refroidissement et de lubrification des fluides, l'usinage à sec offre des avantages tels qu'une récupération plus facile des copeaux de métal et un recyclage simplifié des déchets de production. Il minimise également le risque de choc thermique pour les outils de coupe pendant les opérations interrompues, ce qui prolonge leur durée de vie en évitant les variations thermiques soudaines. L'usinage à sec est une stratégie plus efficace et plus respectueuse de l'environnement pour les opérations de coupe des métaux dans les ateliers [PIM 24].

L'usinage à sec est une méthode qui pose des défis techniques et économiques, car elle nécessite des outils de coupe spécifiques présentant une grande résistance à la pression, à la température, à l'usure et à la friction, ainsi qu'une résistance à la chaleur. Des revêtements spéciaux sont

recommandés pour prolonger la durée de vie des outils, mais ils peuvent entraîner une hausse des coûts de production. En outre, une machine-outil rigide est essentielle pour résister aux forces de coupe et éviter les dommages dus à une chaleur excessive. Le respect des limites fixées pour les paramètres de coupe est crucial pour éviter une dégradation prématurée du processus. Le contrôle rigoureux des conditions d'usinage sans fluide est essentiel pour garantir la réussite de l'usinage à sec, soulignant ainsi l'importance d'une gestion minutieuse pour éviter d'endommager la pièce ou l'outil [ASH 23].

I.5.2. Usinage avec micro-lubrification (MQL)

La micro-lubrification, ou lubrification par quantité minimale (MQL), est la technique qui consiste à ajouter une petite quantité de lubrifiant dans la zone de coupe afin d'optimiser les conditions de tournage. Cette technique réduit l'usure de l'outil et les efforts de coupe, diminue le frottement et le transfert de chaleur, améliorant ainsi l'intégrité de la surface usinée. De plus, micro-lubrification utilise une faible consommation de fluides de coupe.

Initialement mise en place pour la rectification par Weck et Koch en 1993, la technique MQL a ensuite été élargie à d'autres processus d'usinage. Elle se positionne entre l'usinage à sec et l'usinage humide, avec un taux d'écoulement du fluide allant de 0,01 à 1 litre par heure, et un lubrifiant chimiquement stable est nécessaire pour qu'elle soit efficace [SIN 22]. Le lubrifiant est pulvérisé sous forme de minuscules gouttelettes qui forment un film lubrifiant, réduisant la surface de contact et le coefficient de frottement, et fournissant également un refroidissement localisé [SIN 20].

Deux approches distinctes de la MQL sont finalement développées en fonction de l'intention : l'utilisation d'huiles pures pour la lubrification et l'utilisation d'émulsions comme réfrigérants. Le succès de ces méthodes dépend de nombreuses variables, notamment la position et l'orientation de la buse par rapport à l'outil, et une optimisation précise est donc nécessaire pour obtenir des performances optimales [ASH 23]. La figure I.8 présente un schéma du système de distribution MQL.

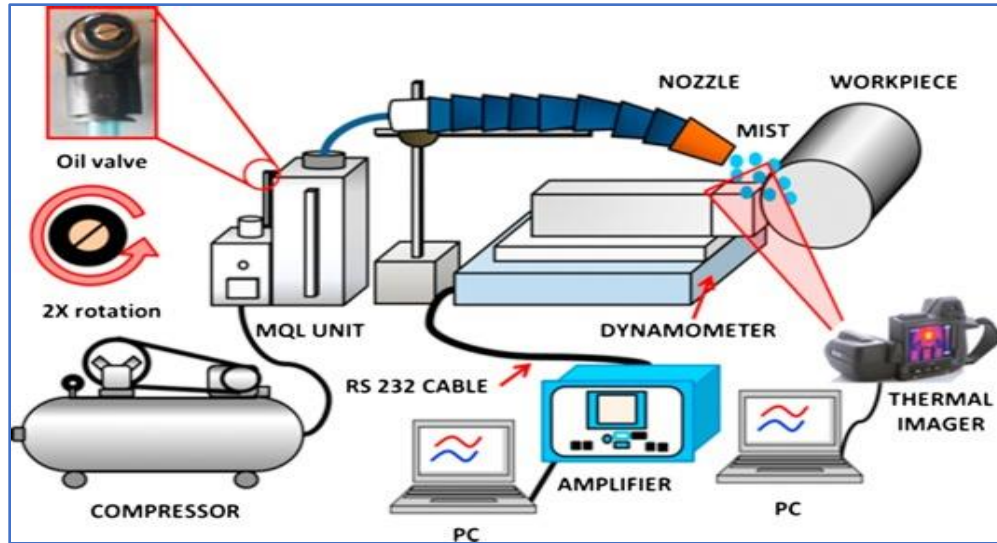


Figure I.8. Système de distribution MQL [LEE 24].

I.5.3. Usinage cryogénique

L'usinage cryogénique consiste à utiliser des liquides cryogéniques, comme le dioxyde de carbone liquide ou l'azote, dans la zone de coupe afin de mieux contrôler la chaleur. Le pré-refroidissement cryogénique est l'une des deux techniques de refroidissement utilisées, où les pièces sont pré-refroidies avant d'être découpées. La seconde méthode, plus pratique, utilise un fluide cryogénique dans la zone d'usinage pour un refroidissement continu. Parmi les inconvénients d'usinage cryogénique, citons le refroidissement excessif, qui ramollit la pièce, augmente les forces de coupe et présente des risques de fissuration ou de rupture. En outre, les matériaux réagissent différemment à l'influence cryogénique, ce qui limite l'utilisation de cette méthode et nécessite une adaptation spéciale pour chaque matériau [ASH 23] [PIM 24].

I.5.4. Usinage par jet à haute pression

Le refroidissement par jet à haute pression (HPJ) est une technique dans laquelle un fluide est libéré à très haute pression (5-35 MPa) à partir de buses dédiées afin d'agir précisément sur la zone de coupe. La haute pression brise efficacement les copeaux en segments, réduisant ainsi la surface de contact entre la pièce et l'outil et diminuant les frottements. Toutefois, cette méthode exige un débit de fluide très élevé, ce qui entraîne une forte consommation de lubrifiant et soulève des doutes quant à sa faisabilité économique et écologique. En outre, le système nécessite l'utilisation de pompes à haute pression, de buses à haute pression et de raccords rotatifs avec une

résistance à la pression élevée, ce qui contribue à la complication technique et au coût des techniques conventionnelles [ASH 23].

I.5.5. Usinage avec nano-fluides de coupe

Les nano-fluides de coupe consistent en des suspensions de nanoparticules (métalliques, céramiques ou carbonées) dans un fluide porteur, offrant grâce à leur très grand rapport surface/volume une conductivité thermique nettement supérieure à celle des fluides conventionnels. En circulation, ces particules agissent comme de microscopiques ailettes, facilitant un transfert de chaleur rapide depuis la zone de coupe et maintenant ainsi des températures d'usinage plus basses, tout en nécessitant une puissance de pompage réduite en raison de leur faible viscosité intrinsèque [PIM 24].

I.6. Types d'application de systèmes de lubrification MQL

Les différentes configurations de systèmes de lubrification à quantité minimale (MQL), illustrées à la figure 9 [ZHO 24], se déclinent selon deux modes d'alimentation du fluide lubrifiant :

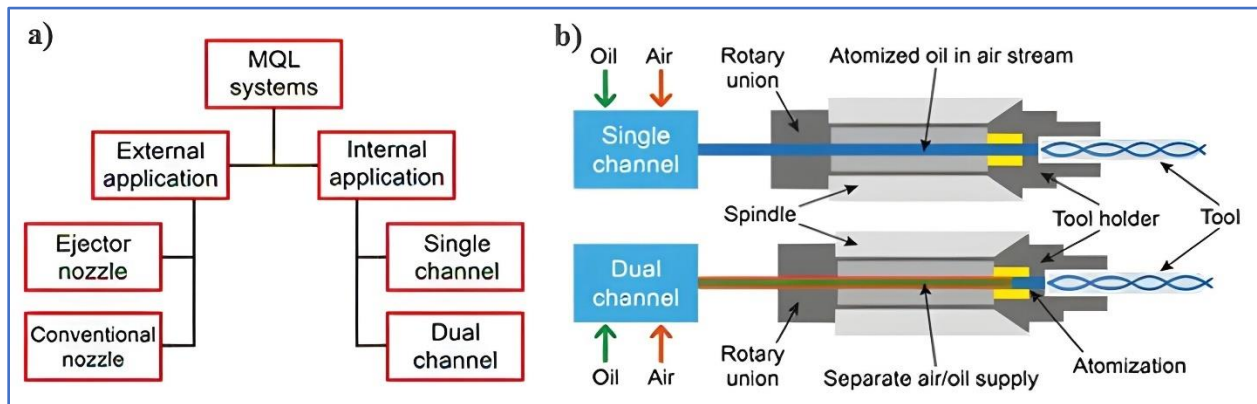


Figure I.9. a) catégories de systèmes de distribution MQL. **b)** représentation schématique d'un système MQL interne utilisant un canal unique et un canal double [ZHO 24].

I.6.1. Système MQL externe

Le dispositif externe repose sur une ou plusieurs buses positionnées à l'extérieur de la zone de coupe (figure I.10 a). Un mélange air-huile, à une pression contrôlée, est projeté directement sur les zones de frottement, de cisaillement et de température critique. L'efficacité de ce système dépend étroitement du choix de l'implantation et de l'orientation des buses, afin d'assurer une

couverture optimale du plan de coupe tout en limitant les pertes de fluide et les perturbations aérodynamiques autour de l'outil.

I.6.2. Système MQL interne

Dans ce mode de lubrification (figure I.10 b), le lubrifiant circule à l'intérieur même de l'outil à travers des canaux dédiés intégrés à sa géométrie. Cette conception permet d'acheminer le mélange lubrifiant directement à proximité immédiate de l'arête de coupe, réduisant la longueur de parcours à quelques millimètres et éliminant tout encombrement extérieur lié à la tuyauterie. En outre, la précision d'alimentation est accrue, puisque les problématiques de positionnement des buses externes sont totalement supprimées.

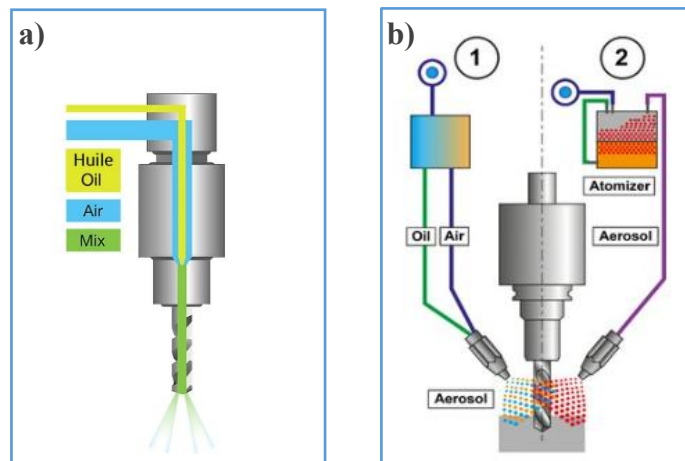


Figure I.10. Systèmes de lubrification MQL : a) Système MQL interne ; b) Système MQL externe utilisant (1- une buse à éjecteur et 2- une buse conventionnelle) [BOS 17].

I.7. Principaux types de lubrifiants en usinage

La lubrification en usinage joue un rôle critique en assurant simultanément la réduction des frottements et l'évacuation de la chaleur générée dans la zone de coupe, deux fonctions indispensables pour préserver à la fois la durabilité de l'outil et la qualité de la surface usinée. Le choix du fluide de coupe doit donc s'appuyer sur un compromis entre ses propriétés physico-chimiques, notamment la viscosité, la conductivité thermique et la composition en additifs et les exigences spécifiques du procédé (vitesse de coupe, profondeur de passe, matériau usiné) afin d'optimiser les performances globales du système d'enlèvement de matière. La figure I.11 présente les principales catégories de fluides de coupe. On y distingue notamment [SLI 16 et Safi 24] :

- **Huiles entières** : fluides concentrés d'origine minérale, synthétique ou végétale, enrichis en additifs extrême-pression (souffre, phosphore) pour minimiser le frottement entre l'outil et la pièce.
- **Huiles solubles** : émulsions huile/eau combinant le pouvoir lubrifiant de l'huile et l'excellent potentiel réfrigérant de l'eau via un détergent ; adaptées aux applications nécessitant un bon compromis lubrification-refroidissement.
- **Fluides synthétiques et semi-synthétiques** : formulations à base de composés organiques/inorganiques hydrosolubles (glycols, esters, silicones) avec peu ou pas d'huile, favorisant le refroidissement et la propreté au détriment d'une lubrification intrinsèque plus faible.
- **Lubrifiants solides** : poudres ou films (graphite, disulfure de molybdène, PTFE) déposant un film sec à haute température, utilisés en conditions extrêmes (températures élevées, vide, environnements sensibles à la contamination).
- **Aérosols et MQL (Minimum Quantity Lubrication)** : brouillard d'huile finement atomisé, délivré directement dans la zone de coupe (via les flûtes de l'outil) pour une lubrification ciblée avec très faible volume de fluide.
- **Lubrification cryogénique** : utilisation d'azote ou de CO₂ liquides projetés sous forme de gaz ou de cristaux pour extraire la chaleur par changement de phase, sans apport de lubrifiants organiques.
- **Refroidissement par air comprimé** : soufflage d'air à haute pression dirigé vers la zone de coupe, favorisant l'évacuation de la chaleur sans addition de lubrifiant ; simple à mettre en œuvre, il améliore la stabilité thermique de l'outil mais n'apporte pas d'effet lubrifiant proprement dit.



Figure I.11. Types de lubrifiants couramment utilisés en usinage.

I.8. Traitement thermique (TTh)

I.8.1. Définition et objectifs des traitements thermiques

Les traitements thermiques regroupent toutes les opérations réalisées à l'état solide, où l'acier est chauffé au-delà ou en-dessous de ses températures critiques, maintenu pour homogénéisation, puis refroidi selon un profil dicté par la loi thermique. Leur objectif principal est de modifier la microstructure interne du métal pour :

- Optimiser la dureté et la résistance à l'usure (ex : trempe martensitique).
- Améliorer la ductilité et la ténacité (ex. revenu).
- Dégager les contraintes internes (reprise de structure sans changement de phase).
- Obtenir des structures spécifiques comme la perlite, la bainitique ou les phases précipitées en acier inoxydable [SAB 22].

I.8.2. Élaboration de la loi thermique

Une loi thermique définit l'évolution de la température (T°) en fonction du temps (t) et se compose de trois phases fondamentales (figure I.12) :

- **Chauffage** : rythme de chauffage contrôlé pour atteindre le ou les paliers critiques (A_1 , A_3 ...) sans créer de gradient excessif de température (éviter fissuration, déformation).

- **Maintien** : maintien à température pour assurer l'homogénéité macroscopique et la transformation microstructurale souhaitée (dissolution, diffusion, formation d'austénite).
- **Refroidissement** : vitesse et mode de refroidissement (air, huile, eau, vide, bain isotherme) ajustés pour contrôler la formation de martensite, bainite, ou perlite.

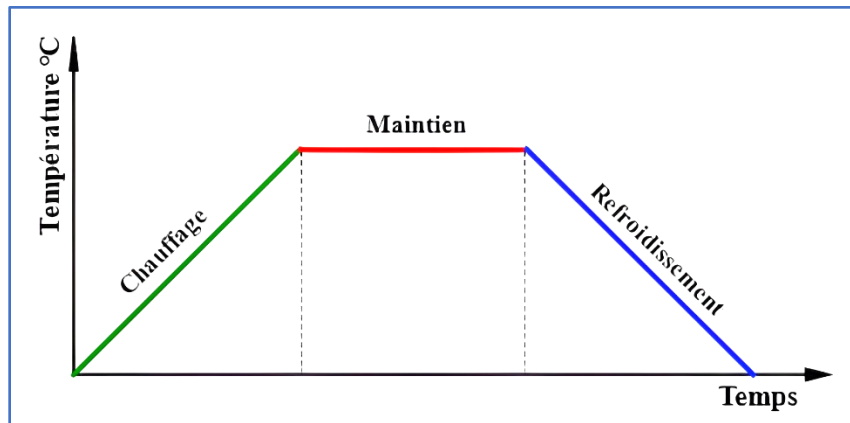


Figure I.12. Cycle de traitement thermique [LAK 71].

I.8.3. Facteurs influençant la conception du cycle TTh

1. Composition chimique

- Teneur en carbone : détermine les températures critiques et la malléabilité de l'austénite.
- Éléments d'alliage (Cr, Ni, Mo, Mn...) : influencent la vitesse de durcissement, la stabilité des phases et la trempabilité.

2. Propriétés finales

- Dureté : requiert souvent une trempe rapide pour obtenir la martensite, suivie d'un revenu pour atténuer la fragilité.
- Ténacité et ductilité : privilégient un refroidissement modéré ou un revenu à haute température pour obtenir une microstructure ferrito-perlitique ou bainitique.

3. État initial du matériau

- Microstructure de base : issue du laminage, forgeage ou traitement précédent (non uniformités, défauts).
- Contraintes résiduelles : résultant des processus de mise en forme, nécessitant des traitements de détente ou stabilisation avant transformation majeure.

I.8.4. Principaux types de traitements thermiques

Les traitements thermiques des aciers se répartissent en trois grandes catégories, selon leurs objectifs et du niveau de transformation :

❖ Traitements d'homogénéisation

Réalisés principalement sur les pièces coulées avant toute opération de forge ou d'usinage, ces traitements visent à stabiliser la composition chimique et la microstructure en éliminant les ségrégations de solidification. Ils peuvent également être appliqués sur des produits déjà corroyés pour uniformiser les propriétés internes.

❖ Traitements de recuit et d'adoucissement

Ces traitements, qui peuvent être mis en œuvre en cours ou en fin de fabrication, permettent d'abaisser la dureté et d'améliorer la ductilité. Ils regroupent notamment :

- **Le recuit de détente**, qui soulage les contraintes résiduelles sans modification majeure de la microstructure.
- **Le recuit normalisation**, qui affine le grain et homogénéise les phases.

❖ Traitements de durcissement structural (trempe + revenu)

Destinés à augmenter la dureté et la résistance mécanique, ils comprennent trois étapes successives :

- **La mise en solution** : chauffage jusqu'à la température où se dissout la phase dure.
- **La trempe** : refroidissement rapide pour former une structure martensitique.
- **Le revenu (ou maturation)** : chauffage à température intermédiaire pour ajuster la ténacité et atténuer les contraintes internes [FOU 23].

I.8.5. Plages de traitement thermique des aciers

Les traitements thermiques modifient la structure et les propriétés des alliages par trois opérations clés : chauffage jusqu'à une température cible, maintien à cette température, puis refroidissement à un rythme contrôlé. Les procédés principaux sont [DES 03] :

1. Trempe

Échauffement au-dessus de la température critique suivi d'un refroidissement rapide (eau, huile ou air forcé) pour obtenir une structure martensitique dure.

2. Revenu et vieillissement

Après trempe, un chauffage intermédiaire (revenu) permet de diminuer les tensions internes et d'ajuster la ténacité. Le vieillissement naturel ou artificiel peut ensuite renforcer certaines structures précipitées.

3. Recuit

Chauffage à une température inférieure à la phase critique puis refroidissement lent, pour restaurer la ductilité, homogénéiser la microstructure et réduire les contraintes.

- ❖ Les principaux paramètres qui différencient ces traitements sont :
 - La température de maintien, qui détermine la phase stable obtenue.
 - La vitesse de refroidissement, qui contrôle la formation des différentes structures (ferrite, perlite, martensite, etc).

I.9. Paramètres technologiques d'usinage

I.9.1. Différents types d'usure de plaquette de coupe

Pour comprendre les avantages et les limites de chaque matériau de coupe, il est important de connaître les différents mécanismes d'usure qui agissent sur les outils (figure I.13) [\[SAF 24\]](#) [\[KHE 24\]](#) :

- **Usure en dépouille (abrasion)** : il s'agit du mode d'usure le plus fréquent et le plus souhaitable car il évolue de façon régulière et prévisible ; il résulte de l'action abrasive des particules du matériau usiné sur la face de dépouille.
- **Usure en cratère (chimique)** : localisée sur la face de coupe, elle provient d'interactions chimiques et thermiques entre la pièce et l'outil ; elle est favorisée par l'augmentation de la vitesse de coupe. Une usure en cratère excessive affaiblit l'arête de coupe qui peut se rompre.
- **Arête rapportée (adhérence)** : provoquée par le dépôt soudé du copeau sur le bord de coupe ; ce phénomène est fréquent avec des matériaux adhésifs (aciers faiblement alliés, aciers inoxydables, aluminium) et est favorisé par des vitesses de coupe faibles.
- **Usure en entaille (adhérence)** : se manifeste par une encoche localisée sur la face de coupe et la face de dépouille à hauteur de la profondeur de passe, résultant d'adhérence suivie d'une déformation ; elle est courante lors de l'usinage des aciers inoxydables et des superalliages.
- **Déformation plastique (thermique)** : survient lorsque le matériau constituant l'outil se ramollit sous l'effet d'une élévation de température excessive pour la nuance considérée. En

règle générale, une nuance plus dure et un revêtement plus épais augmentent la résistance du matériau à ce type de déformation.

- **Fissures thermiques (thermique) :** des fissures perpendiculaires à l'arête apparaissent suite à des cycles de refroidissement brutal de l'arête de coupe ; ce phénomène est fréquemment observé lors de coupes interrompues et peut être accentué par l'emploi de fluides de coupe provoquant des chocs thermiques.
- **Écaillage ou rupture de l'arête (mécanique) :** la fracture ou l'arrachement de l'arête résulte d'une sollicitation mécanique excessive (telles que ; une profondeur de passe ou avance trop élevées, formation d'arêtes rapportées, vibrations ou usure avancée) conduisant à une rupture locale du tranchant.

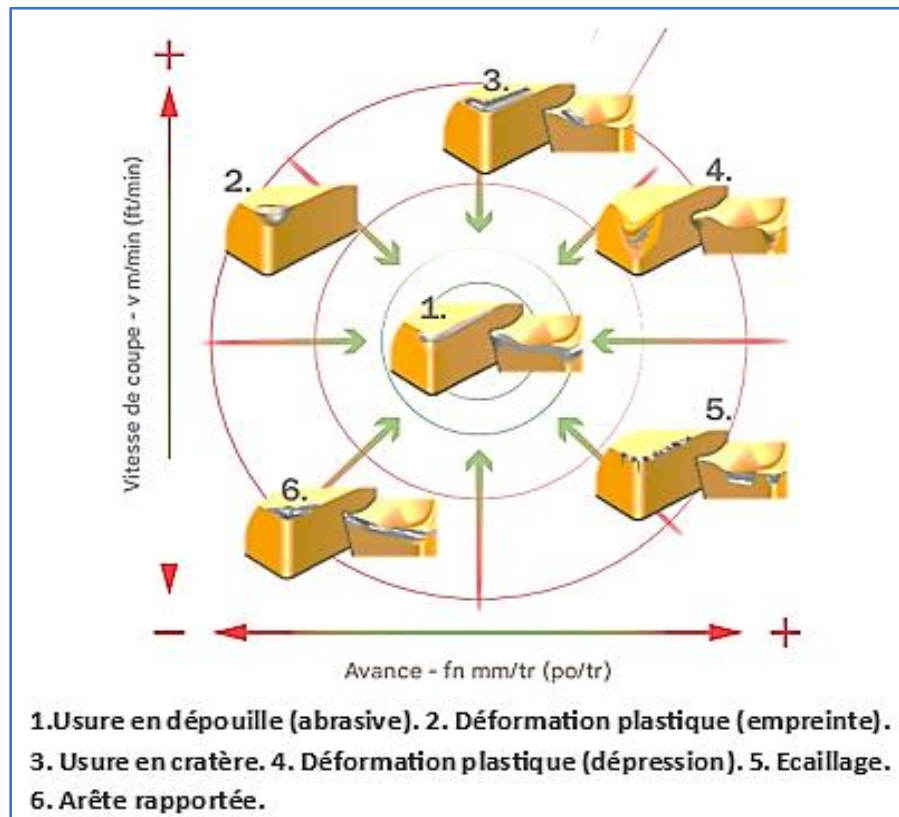


Figure I. 13. Amélioration de l'usure de plaquette de coupe [SANDVIK Coromant].

I.9.2. Rugosité de surface

Parmi les paramètres les plus étudiés, la rugosité de surface constitue un indicateur central de l'état de surface. Elle est définie comme l'ensemble des écarts verticaux, mesurés perpendiculairement à la surface nominale, et calculés sur une longueur d'évaluation donnée. Ces

écarts traduisent les irrégularités dues au procédé d'usinage, aux outils utilisés ou encore à la nature du matériau. Ils se manifestent sous forme de pics et de creux, visibles à l'échelle micro ou macro-géométrique [CHI].

La caractérisation de la rugosité nécessite l'acquisition de la topographie réelle de la surface soit par palpage, à l'aide d'un rugosimètre équipé d'une pointe dont le rayon de courbure est de l'ordre de dixième de micromètre, soit par des techniques d'imagerie (microscopie optique ou électronique). L'objectif est d'obtenir un profil de surface précis, puis de traiter numériquement ces données afin d'extraire des paramètres de rugosité (R_a , R_z , R_t , etc.) permettant de qualifier la texture de la surface étudiée (figure I.14) [CHI] [ELB 15].

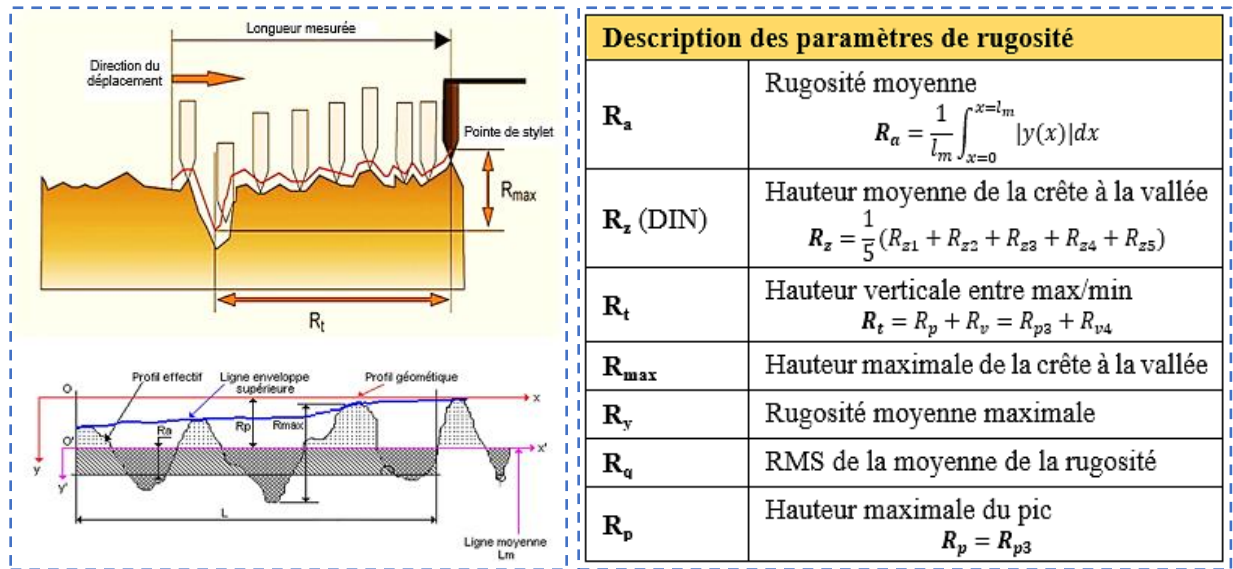


Figure I.14. Profil de rugosité et principales variables influençant la qualité de surface [SAF 24].

I.9.3. Efforts de coupe

Les efforts de coupe sont les forces exercées par le matériau en train d'être enlevé (copeau) sur l'outil de coupe lors d'une opération d'usinage. Ils résultent des déformations plastiques et des frottements à l'interface outil-copeau et se traduisent par un vecteur F_c dont l'analyse détaillée permet d'optimiser l'usinage. Ce vecteur se décompose classiquement en trois composantes orthogonales, chacune jouant un rôle spécifique dans le processus (figure I.15) [HAB 06] :

- **Fr ou Fy (effort radiale) :** composante perpendiculaire à l'axe de la pièce, dirigée vers le centre de la pièce, elle tend à écarter l'outil ou à faire vibrer la pièce.

- **Ft ou Fz (effort tangentielle)** : composante tangentielle au cylindre de coupe, responsable de l'enlèvement de matière et de la puissance absorbée par le processus.
- **Fa ou Fx (effort axiale)** : composante parallèle à l'axe de la pièce (direction d'avance de l'outil), liée à la formation de l'épaule et à la poussée dans la direction d'avance.
- **Fc (effort global de coupe)** : vecteur résultant des trois composantes Fr, Ft et Fa, tel que :

$$Fc = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \quad (\text{N}) \quad (\text{I.1})$$

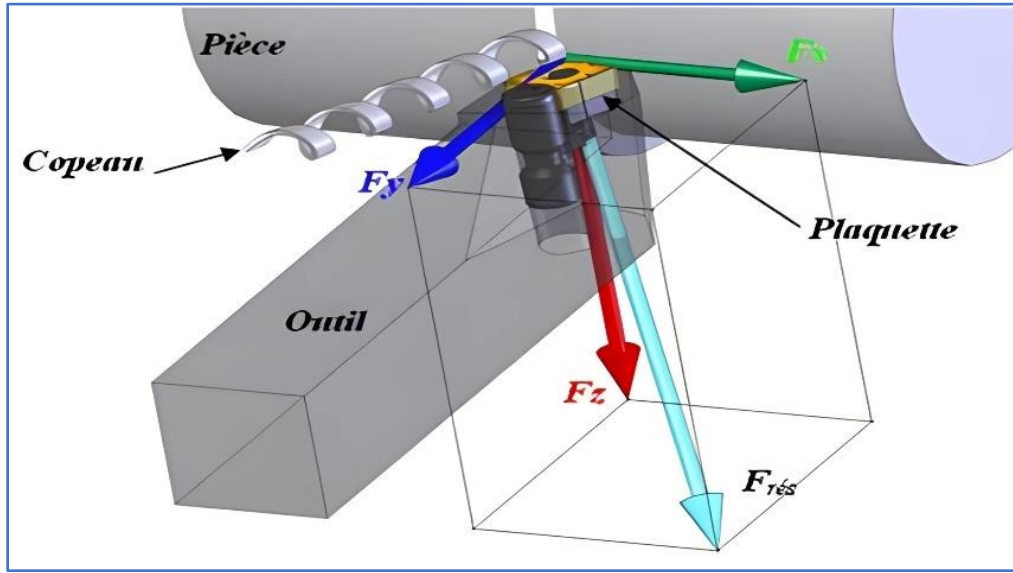


Figure I.15. Composantes de l'effort de coupe [ELB 15] [KHE 24].

La quantification des composantes des efforts de coupe est primordiale pour évaluer deux paramètres clés de l'usinage : la puissance de coupe (P_c) et la pression spécifique de coupe (K_c). La puissance de coupe, qui représente l'énergie nécessaire à l'enlèvement de matière, se déduit de l'effort de coupe résultant (F_c) et de la vitesse (V_c) selon la relation indiquée dans [KHE 24] :

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60} \quad (\text{W}) \quad (\text{I.2})$$

La pression spécifique de coupe, exprimée en N/mm^2 (ou MPa), quantifie la force nécessaire pour enlever une section unitaire de matière. Elle est déterminée par [ELB 15] :

$$K_c = \frac{F_c}{f \times a_p} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{I.3})$$

I.10. État de l'art

I.10.1. Impact des stratégies de lubrification sur les performances de l'usinage

le MQL est considéré comme un processus économique global et comme un facteur clé qui respecte les tendances écologiques. Dans ce contexte, de nombreuses recherches ont été menées sur l'usinage durable à l'aide de divers procédés de fabrication [He 23] [BAL 22].

La recherche réalisée par **Demirpolat et al** [DEM 23], analyse les performances du tournage durable de l'acier AISI 52100 en utilisant une lubrification minimale (MQL), comparativement au tournage à sec. Cette étude a analysé tous les facteurs clés, y compris l'abrasion de l'outil, la rugosité de la surface, les efforts de coupe, la température de l'extrémité et la configuration du copeau. Selon les données, l'utilisation de la lubrification MQL réduit considérablement l'usure des flancs (figure I.16), améliore la qualité de la surface en réduisant la rugosité jusqu'à 55 % dans certains cas, en particulier à des vitesses de coupe plus élevées, et prolonge la durée de vie de l'outil en réduisant les forces de coupe. En outre, la MQL offre une meilleure protection thermique puisque la température à l'extrémité de l'outil est plus basse. Des distinctions significatives entre les deux modes de tournage ont également été observées dans l'examen des copeaux. En coupe à sec, l'outil est souvent obstrué par des copeaux longs, enroulés et enchevêtrés, ce qui empêche la dissipation de la chaleur. En revanche, lors de l'usinage de l'AISI 52100 avec de faibles paramètres de coupe en mode MQL, la lubrification aide les copeaux à glisser hors de la zone de coupe, ce qui se traduit par des copeaux plus longs et une meilleure gestion thermique.

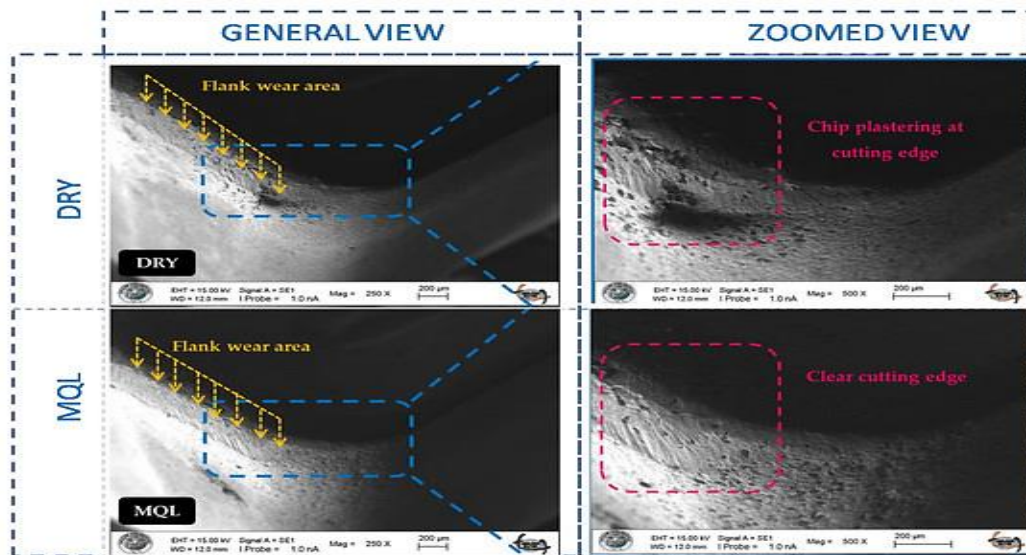


Figure I.16. Conditions d'usure de l'outil dans des environnements MQL et en milieu sec pendant le tournage de l'acier des roulements (0,3 mm/tour, 0,6 mm, 90 m/min).

Chavan et Sargade [CHA 20] examinent l'intégrité de la surface de l'acier dur AISI 52100 lors du tournage avec diverses méthodes d'usinage presque à sec. Le MQCL hybride se révèle plus performant, avec une rugosité de $0,34 \mu\text{m}$, une microdureté de $625 \text{ Hv}_{0.1}$, des contraintes résiduelles de compression de -168 MPa et une épaisseur de couche blanche de $0,9 \mu\text{m}$. En revanche, l'usinage à sec présente une rugosité plus élevée et une microdureté plus importante, avec des contraintes résiduelles de traction et une épaisseur de couche blanche accrue. Les conditions MQCL et CCAVT offrent des résultats intermédiaires. L'examen des résultats présentés en figure I.17 montre qu'une augmentation de la vitesse de coupe tend à améliorer l'intégrité de la surface, tandis qu'une hausse de l'avance conduit à une détérioration de celle-ci. Les données indiquent également que l'emploi de fluides de coupe améliore l'état de surface et prolonge la durée de vie des outils, ce qui met en lumière l'importance des conditions d'usinage presque sec pour la qualité des pièces usinées.

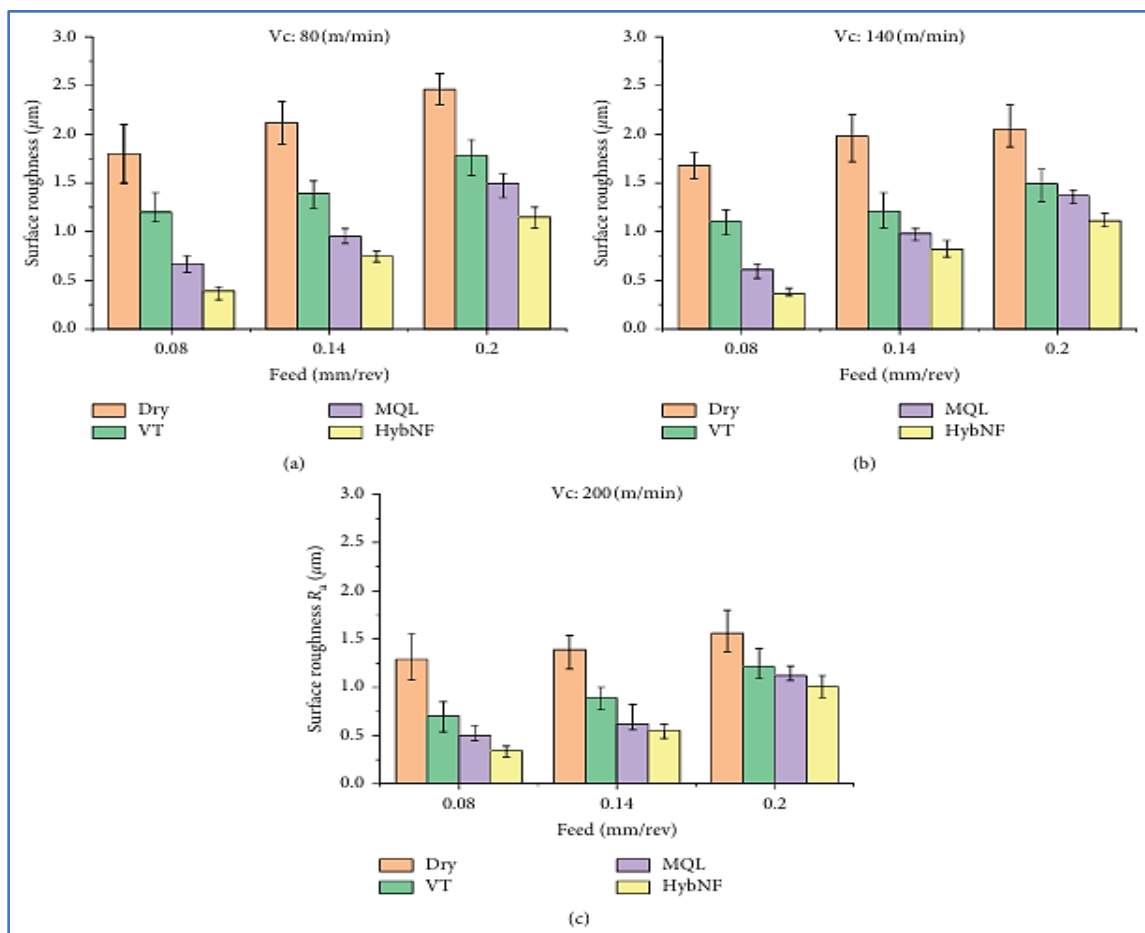


Figure I.17. Effet de l'avance sur la rugosité de surface dans des environnements d'usinage presque secs à des vitesses de coupe de (a) 80 m/min, (b) 140 m/min et (c) 200 m/min.

Pour l'usinage de l'acier AISI 52100, **Sivaiaha et al** [SIA 20] montrent que l'association d'outils texturés et de lubrification MQL réduit de 25 % la température de coupe, de 40 % l'usure du flanc et de 42 % la rugosité de surface par rapport aux outils conventionnels. L'analyse par microscopie électronique révèle une usure moindre des outils texturés. Ainsi, l'approche expérimentale un facteur à la fois (One Factor at a Time, OFAT) démontre que ces outils contribuent à maintenir une température plus basse, ce qui améliore l'efficacité de l'usinage. De plus, la réduction de la consommation de lubrifiant rend la méthode MQL plus écologique et économiquement viable. La figure I.18 confirment respectivement l'influence de refroidissement sur la rugosité de la surface selon diverses conditions de coupe. En conclusion, l'ajout de texturations lors de la fabrication des plaquettes améliore significativement les performances d'usinage, ce qui rend la combinaison de cette approche et de la lubrification en quantité minimale particulièrement adaptée à l'usinage de l'acier AISI 52100.

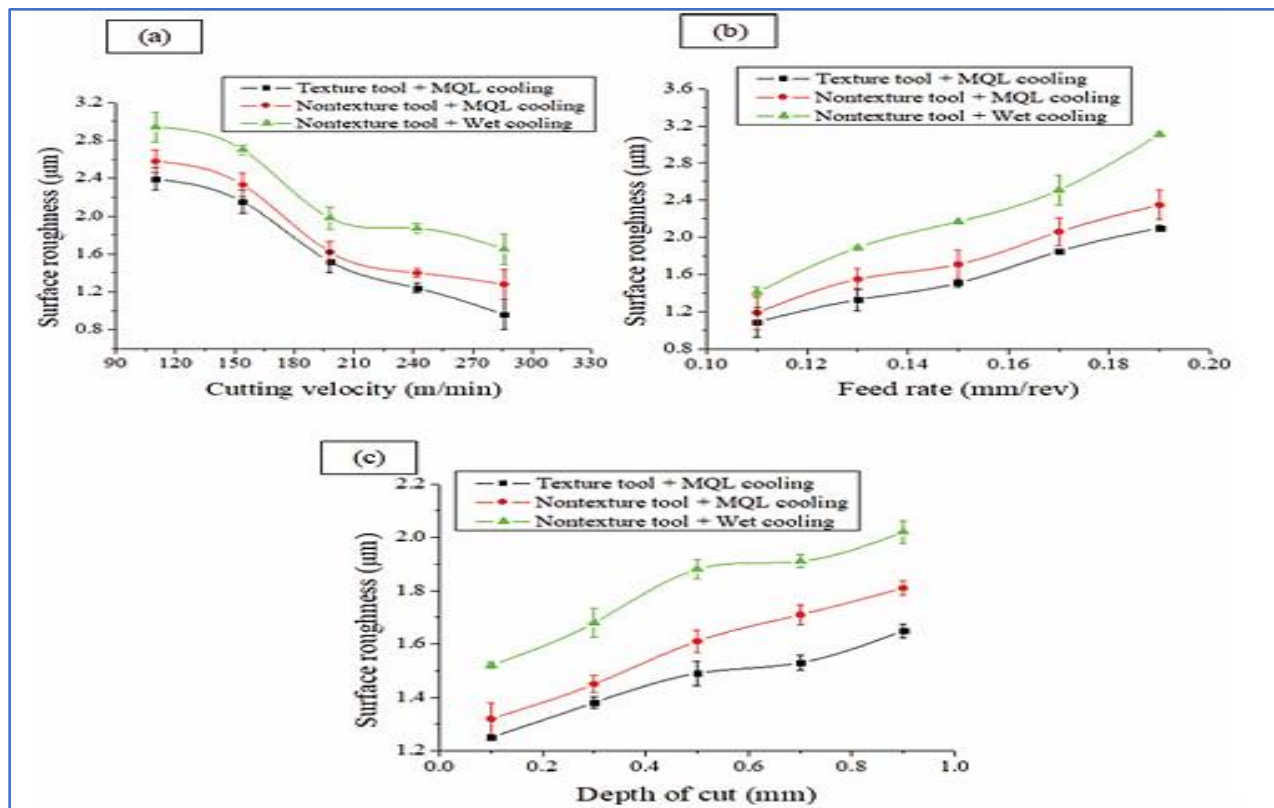


Figure I.18. Effet du type d'outil et de la technique de refroidissement sur la rugosité de la surface en fonction des conditions de coupe.

Lors du tournage de l'acier inoxydable austénitique Nitronic 60, **Das et al** [DAS 21] réalisent une étude centrée sur une comparaison des plusieurs méthodes de coupe écologique ; MQL,

refroidissement par air comprimé, arrosage et usinage à sec, afin d'évaluer la durée de vie des outils, le coût d'usinage et les caractéristiques des copeaux générés. Les résultats ont mis en évidence que la durée de vie de l'outil lors de l'usinage avec MQL était supérieure de 138 %, 72 % et 11 % respectivement par rapport aux conditions de coupe à sec, par air comprimé et par arrosage (figure I.19). En termes de coûts, l'utilisation d'outils en céramique SiAlON dans un environnement MQL s'est distinguée par le coût le plus bas par pièce, s'élevant à seulement 0,27 \$, alors que les autres méthodes affichaient des coûts de 0,36 \$ pour la coupe à sec, 0,31 \$ pour l'air comprimé et 0,29 \$ pour le liquide d'arrosage. L'analyse des caractéristiques des copeaux, effectuée à l'aide de microscopie optique et électronique, a révélé que la méthode MQL produisait des copeaux avec moins de déformation plastique et de dentelures, ce qui indique une meilleure performance du processus d'usinage. L'étude a également inclus une analyse de variance (ANOVA), qui a mis en évidence l'impact significatif de l'environnement de coupe sur la performance de l'outil et sur la qualité du produit final (figure I.20).

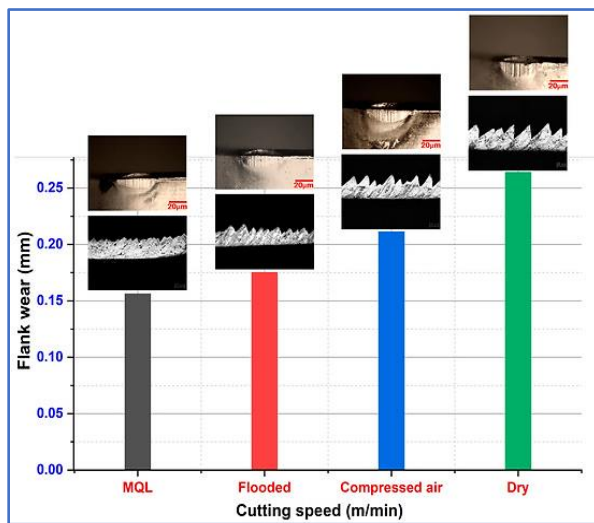


Figure I.19. Effet du copeau en dents de scie sur l'usure du flanc à $f = 0,20$ mm/tour ; $V_c = 111$ m/min.

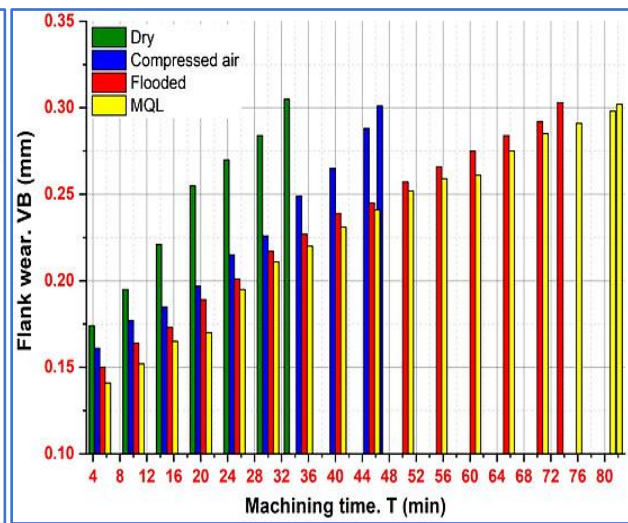


Figure I.20. Évolution de l'usure du flanc en fonction de temps d'usinage à $V_c = 111$ m/min, $f = 0,24$ mm/tr dans différents modes de tournage.

Hamadi et al [HAM 22] ont réalisé une étude expérimentale des performances des outils de coupe pendant le tournage à sec de l'acier AISI 4140, comparant trois plaquettes carbures revêtus (GC2015, GC4215 et GC1015). En utilisant la conception orthogonale de Taguchi et la méthodologie de la surface de réponse, ils ont optimisé les paramètres de coupe, et se concentre

sur l'évaluation de l'usure, la rugosité de surface, les efforts de coupe, la puissance de coupe et le taux d'enlèvement de matière. L'étude a révélé que le carbure à triple revêtement (TiCN-Al₂O₃-TiN) offrait les meilleures performances avec un taux d'usure de 0,069 mm, surpassant les plaquettes à revêtement bilatéral (GC4215) et à couche unique (GC1015), qui présentaient des taux d'usure de 0,140 mm et 0,306 mm, respectivement. Par ailleurs, la rugosité de surface minimale a été obtenue par la plaquette de coupe GC 2015, tandis que la valeur la plus élevée a été observée par la plaquette GC 1015 (figure I.21). De plus, l'application de la méthode d'optimisation NAMDE a permis d'obtenir les conditions de coupe idéales qui minimisent simultanément (Fc) et (Pc), tout en maximisant le taux d'enlèvement de matière.

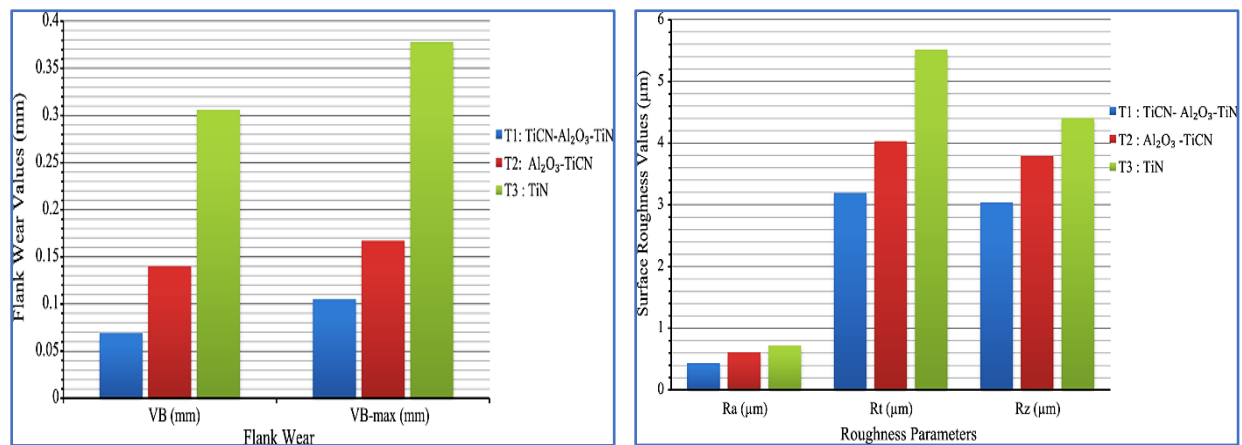


Figure I.21 Comparaison entre les plaquettes GC4215, GC1015 et GC2015 sur l'usure et la rugosité de surface.

L'étude menée par **Mawandiya et al** [MAW 22] se penche sur le processus d'usinage de l'acier AISI 4340, dans laquelle ils mettent en pratique un système de lubrification à quantité minimale (MQL) utilisant de l'huile biodégradable. On a comparé les performances d'usinage dans trois modes de refroidissement : à sec, avec MQL et MQSL, en utilisant deux vitesses de coupe (100 et 140 m/min), avec une vitesse d'avance et une profondeur de coupe fixées respectivement à 0,5 mm/tr et 0,5 mm. Les analyses montrent que l'utilisation d'huile de ricin dans un cadre MQL a donné lieu à une surface avec une rugosité minimale de 1 442 μm, alors que la technique MQSL a montré la plus faible usure d'outil, estimée à 0,08 mm. De plus, l'utilisation des techniques MQL et MQSL a contribué à réduire les émissions de carbone. En résumé, cette étude met en évidence que les techniques MQL et MQSL, lorsqu'elles utilisent du biodiesel comme fluide de coupe,

améliorent significativement la rugosité de surface, réduisent la consommation énergétique et limitent l'impact environnemental (figure I.22).

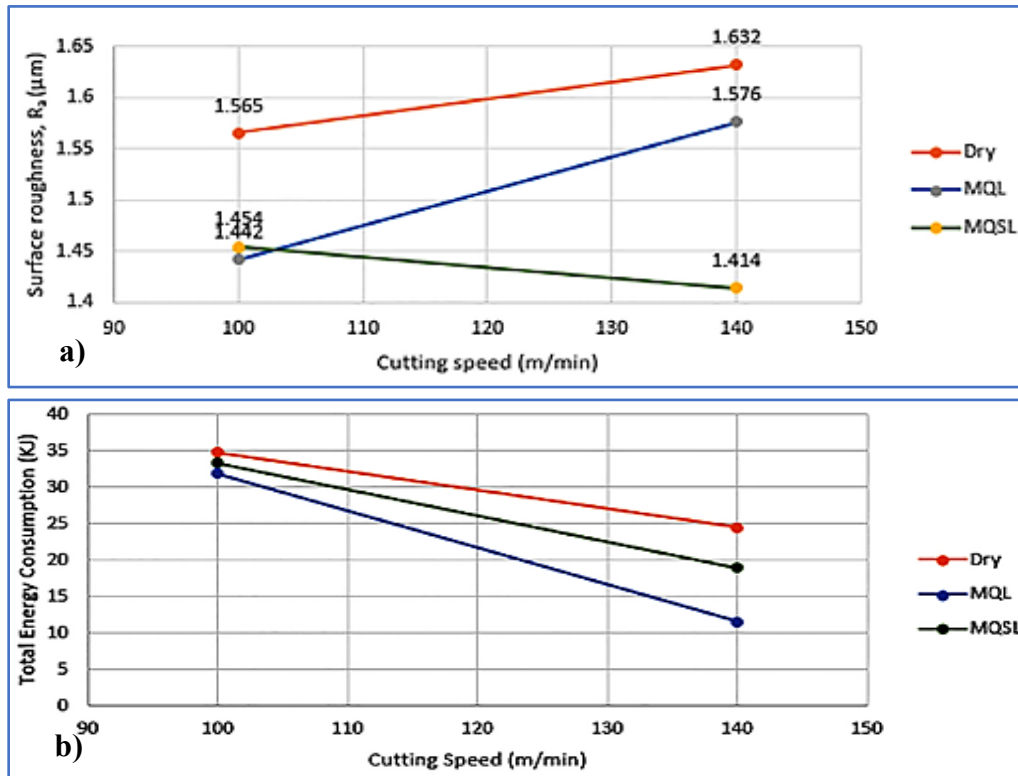


Figure I.22. Comparaison de : **a)** rugosité de surface, et **b)** consommation d'énergie dans différentes conditions d'usinage

Salur et al [SAL 21] ont étudié l'effet de la lubrification en quantité minimale (MQL) par rapport l'usinage à sec sur différents paramètres de performance du fraisage de l'acier AISI 1040, notamment l'usure des outils, la température de coupe et la puissance de coupe. L'étude expérimentale a été conduite à deux vitesses de coupe (100 et 150 m/min) et deux avances (0,1 et 0,15 mm/tr). En mode MQL, l'usure de l'outil est significativement réduite avec une valeur maximale observée de 0,325 mm, tandis que la température de coupe diminue de 32,5 %, ce qui améliore la qualité de surface et prolonge la durée de vie des plaquettes. Par ailleurs, grâce à un refroidissement accru, la consommation d'énergie baisse de 16,9 %, notamment à haute vitesse de coupe (figure I.23). Cette performance est due à l'amélioration de la lubrification et du refroidissement, assurés par le brouillard d'huile, mettant ainsi en évidence ses avantages économiques et environnementaux.

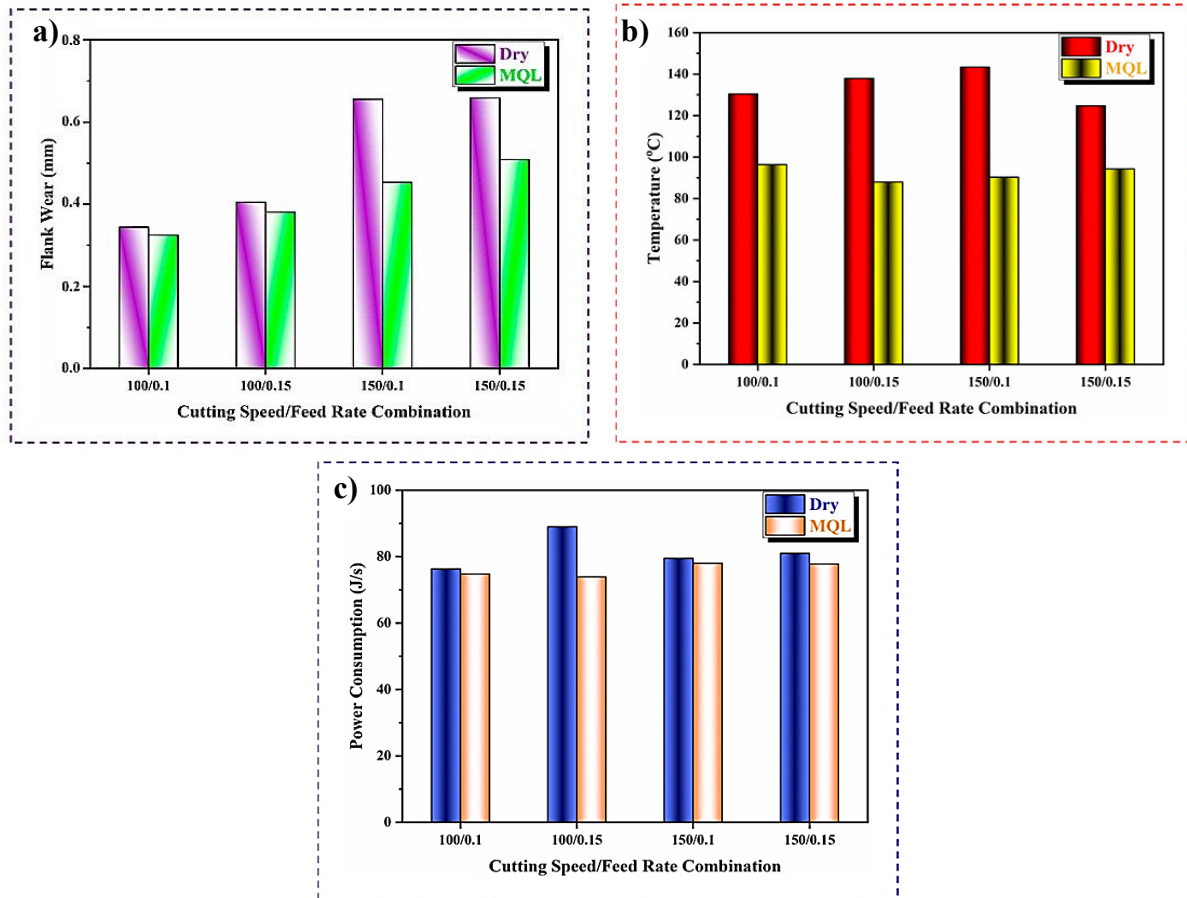


Figure I.23. Effets de l'environnement de coupe sur : **a)** Usure des flancs, **b)** Température de coupe, et **c)** Puissance de coupe.

L'analyse de variance (ANOVA) présentée dans la figure I.24 révèle que le mode d'usinage (MQL vs sec) influence avec une contribution de 94 % sur la puissance consommée et de 37 % sur la température de coupe, le MQL assurant une lubrification et un refroidissement supérieurs, ce qui se traduit par des rapports signal/bruit plus favorables et donc des températures et consommations d'énergie réduites. Par ailleurs, la vitesse de coupe apparaît comme le facteur prédominant dans le phénomène d'usure, avec une contribution de 74 %. L'augmentation de cette vitesse, de 100 à 150 m/min, entraîne une diminution significative des rapports S/N, suggérant par conséquent une diminution de l'usure.

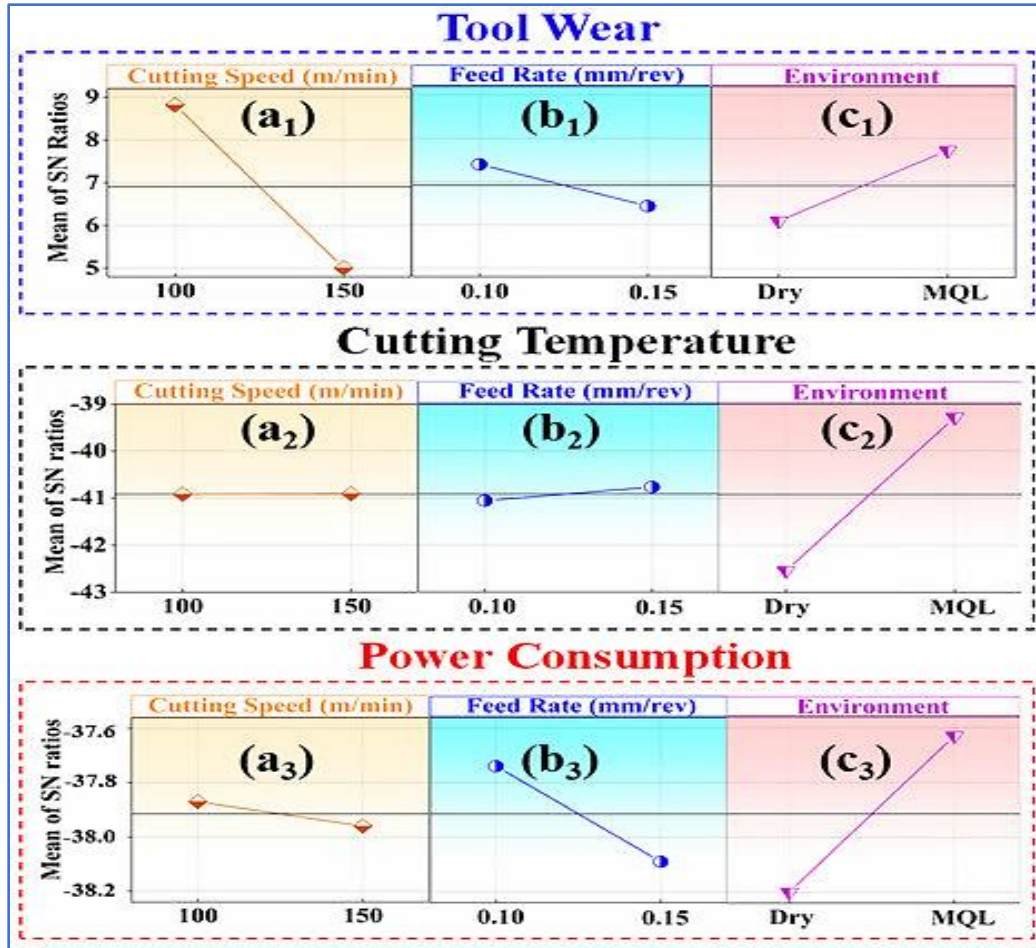


Figure I.24. Graphiques des effets principaux basée sur le rapport signal/bruit pour l'usure, la température et la consommation d'énergie.

Mane et al [MAN 25] se concentre sur l'optimisation du tournage dur de l'acier AISI 52100 avec l'application minimale de fluide de coupe par jet pulsé à grande vitesse (MCFA). Les résultats montrent que l'application de MCFA améliore significativement la qualité de l'usinage, avec une réduction de la rugosité de surface à $0,34 \mu\text{m}$ et une température de coupe minimale mesurée à 521°C , démontrant une amélioration par rapport aux méthodes de tournage à sec (figure I.25). L'ANN a surpassé la méthode RSM en termes de précision prédictive, avec un taux d'erreur moyen de 1,95 % pour la température de coupe et 1,42 % pour la rugosité de surface, tandis que la RSM affichait des erreurs respectives de 4,73 % et 5,79 %. Les figures 5 et 6 illustrent respectivement l'influence des paramètres de coupe sur la température de coupe et la rugosité de surface, et viennent étayer ces conclusions.

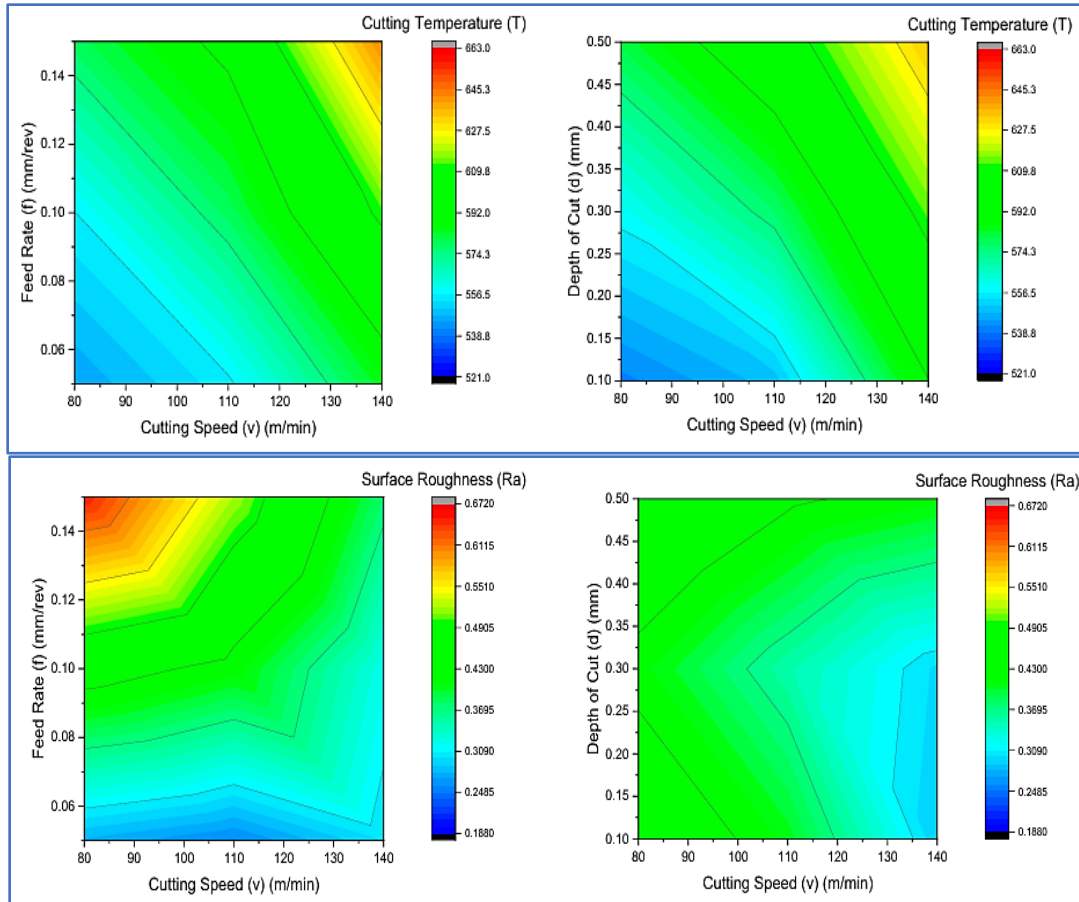


Figure I.25. Profil contour illustrant l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité et la température.

Mane et Kumar [MAN 22] explore l'impact de la technique de lubrification à quantité minimale (MCFA) sur la rugosité de surface lors du tournage de l'acier allié AISI 52100 à dureté élevée (58 HRC) avec une plaquette en carbure revêtue multicouche (TiN/TiCN/Al). Les auteurs ont étudié les effets des paramètres de coupe sur la rugosité de surface (R_a) en utilisant la méthode de surface de réponse (RSM) basé sur le modèle de régression quadratique. Les résultats montrent que le taux d'avance a un effet significatif sur la rugosité de surface, suivi de la vitesse de coupe.

De plus, l'application de la fonction de désirabilité à la réponse unique a permis d'atteindre la meilleure rugosité de surface, soit $0,229 \mu\text{m}$, pour les conditions optimales : $V_c = 140 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,19 \text{ mm}$ (Figure I.26).

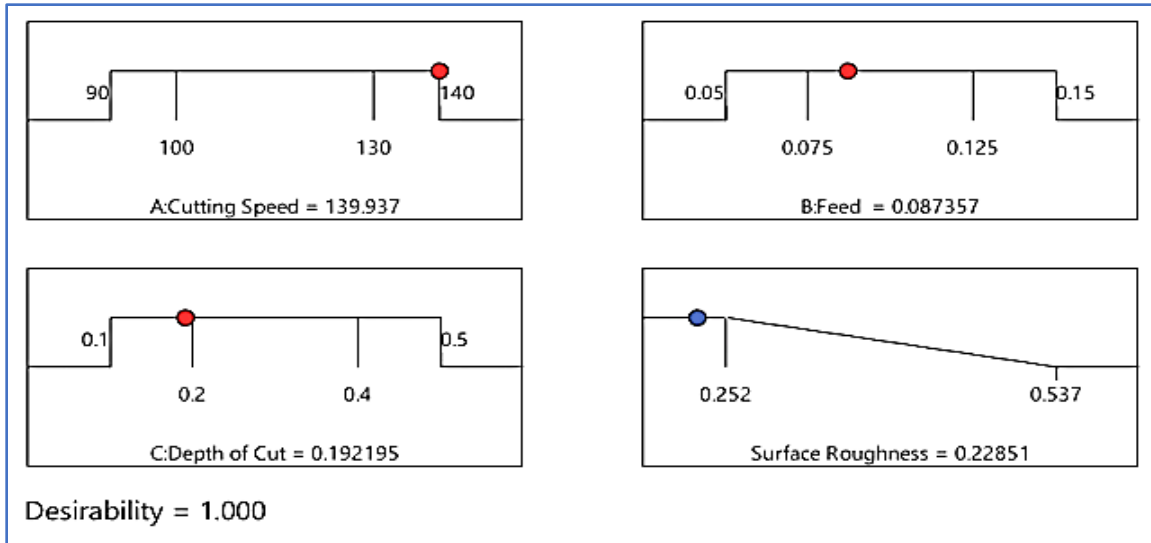


Figure I.26. Graphique de la fonction de rampe de la désirabilité pour la rugosité de la surface.

I.10.2. Synthèse critique des méthodes d'optimisation

Dans l'industrie manufacturière contemporaine, le défi majeur réside dans la mise en œuvre d'un processus de fabrication qui améliore simultanément la qualité du produit tout en réduisant les coûts [SAH 23]. Plusieurs articles se penchent sur cette problématique en proposant des méthodes d'optimisation multi-objectifs telles que les techniques de prise de décision multicritères (MCDM) afin de traiter et d'améliorer les conditions et les performances de coupe (tableau I.2)

Zhujani et al [ZHU 24] ont étudié l'optimisation mono et multi-objective des performances pendant le tournage de l'Inconel 718 en utilisant la méthode Taguchi basée sur le rapport (S/N) et la méthode (GRA). Les résultats d'optimisation mono-objective a permis d'atteindre R_a minimale de $0,167 \mu\text{m}$, V_B de $44,65 \mu\text{m}$, un temps de coupe (CT) de $19,72 \text{ s}$ et MRR de $4550 \text{ mm}^3/\text{min}$. Par contre, en optimisation multi-objectifs, la méthode GRA permet d'identifier les valeurs optimales des performances étudiées (R_a , V_b , MRR et CT) (minimum ou maximum) de manière simultanée réalisée par un régime optimal de ($V_c=100 \text{ m/min}$, $a_p=0,4 \text{ mm}$, $f=0,051 \text{ mm/tr}$ et $r=0,4 \text{ mm}$).

Wu et al [WU 21] ont proposé une méthode combinée TM-RSM-DF pour l'optimisation robuste d'un produit de précision. Une évaluation comparative des techniques d'optimisation (TM-RSM-DF, TM-DEA, TM-GRA et TM-Fuzzy) a révélé que la méthode TM-RSM-DF se distingue une amélioration en termes de performance pour l'estimation du rapport d'amplification du déplacement (DAR) et de la fréquence naturelle (NF), respectivement $6,148\%$ et $0,537\%$ par

rapport à la conception initiale prévue. De plus, la technique TM-RSM-DF s'est révélée être la plus précise parmi toutes les méthodes examinées.

Patnaik et al [PAT 22] ont également appliqué des méthodes multi-objectifs : GRA-Taguchi, TM-RSM-DF, TOPSIS-Taguchi et PSI-Taguchi. Ces approches visaient à identifier la configuration paramétrique optimale des processus d'usinage par décharge électrique (EDM) pour l'Inconel 718 afin de sélectionner les combinaisons idéales de critères contradictoires qui équilibrent un MRR élevé, un faible TWR et un faible SR. En outre, l'analyse ANOVA révèle que le facteur le plus significatif sur les paramètres de sortie est le temps d'impulsion (Ton), suivi de la tension (V) et du courant de pic (Ip).

Dans l'étude de **Dhote et al** [DHO 22], la méthode GRA a été utilisée pour l'optimisation paramétrique pendant le tournage de l'alliage Haynes 25 sous lubrification MQL. Les tests de validation ont montré des améliorations significatives, avec des augmentations de 6,4 % et de 24,5 % dans le GRG des résultats expérimentaux par rapport aux paramètres de conception initiaux que l'on utilise des plaquettes revêtues ou non revêtues.

Trung et al [TRU 22] ont effectué une analyse comparative des méthodes MCDM, à savoir MAIRCA, COCOSO, MABAC, TOPSIS et EAMR, avec différentes méthodes de pondération lors du tournage de l'acier AISI 1045. La méthode EAMR s'est avérée la plus cohérente pour le classement des solutions, tandis que la combinaison de la méthode de pondération FUCOM avec les méthodes MCDM a permis d'identifier les solutions les plus cohérentes. de pondération FUCOM avec les méthodes MCDM a permis d'identifier la solution classée solution optimale.

Thinh [THI 23] a utilisé la méthode FUCA en appliquant diverses méthodes de pondération (RS, ROC, MEREC et Equal Weight) pour traiter un problème d'optimisation multicritère dans le domaine du tournage. Les résultats indiquent que le choix de la méthode de pondération des critères influence fortement le classement des résultats expérimentaux. En outre, on observe que toutes les méthodes conduisent au même essai optimal.

Dans l'étude d'**Okponyia et al** [OKP 21], de nouvelles méthodes telles que EDAS-Taguchi-Pareto et EDAS-Taguchi ont été appliquées pour sélectionner les paramètres du processus d'électroérosion à fil de l'alliage à mémoire de forme de nitinol. Les résultats obtenus ont confirmé

l'efficacité de ces méthodes pour déterminer les paramètres optimaux du processus d'électroérosion.

Trung [TRU 21] a utilisé la méthode EDAS pour le fraisage de l'acier A37AP. En plus de l'EDAS, l'auteur a exploré d'autres méthodes telles que : MARCOS, TOPSIS, PIV et MOORA, pour traiter le même problème. Les résultats indiquent que toutes les méthodes convergent vers une solution considérée comme la meilleure parmi les options examinées.

L'étude de **Makhesana et Patel** [MEK 21] examine les défis de l'usinage des alliages à base de nickel et met en avant l'importance des stratégies de refroidissement et de lubrification pour améliorer l'usinabilité. L'étude utilise la méthode GRA combinée à Taguchi pour déterminer les paramètres d'usinage optimaux, en mettant particulièrement l'accent sur des paramètres clés tels que la rugosité de surface, la consommation d'énergie, la température et l'usure de l'outil. Des comparaisons entre différentes conditions montrent une amélioration significative de la durée de vie de l'outil (69% avec MQL, 75% avec MQSL), de la consommation d'énergie (49% avec MQL, 64% avec MQSL), et de la diminution des émissions de carbone (45% avec MQL, 79% avec MQSL), soulignant les avantages environnementaux de ces techniques de lubrification.

L'étude de **Yallese et al** [YAL 25] se penche sur l'optimisation de l'usinage intermittent de l'acier AISI D3, soulignant l'impact significatif de l'optimisation des paramètres de coupe sur la qualité de la surface, avec une réduction allant jusqu'à 42% des valeurs Ra observées pour une finition améliorée. Des réglages efficaces réduisent également les vibrations tangentielles (A_z), prolongeant ainsi la durée de vie de l'outil. Les méthodes de décision multicritères (MCDM) telles que TOPSIS, COCOSO, EAMR et EDAS évaluent et comparent les configurations de coupe, TOPSIS excellant dans la maximisation du taux d'enlèvement de matière (MRR) à 46,08 cm³/min, tandis que COCOSO se concentre sur la réduction de l'intensité du bruit (I_s), conduisant à une productivité inférieure de 50 % par rapport à TOPSIS.

Zheng et al [ZHE 23] explore a probability-based multi-objective optimization (PMOO) method to enhance the turning process of EN 10503 steel. The focus is on minimizing surface roughness, vibrations, and cutting forces while maximizing the material removal rate. Using linear correlation coefficients for cluster analysis, the study effectively separates independent attributes from various

performance measures. The PMOO method proved reliable and rational in identifying optimal solutions, highlighting its effectiveness in multi-objective optimization for machining processes.

Dua et al [DUA 24] présentent un cadre complet qui intègre cinq méthodes de pondération objective (MEREC, CRITIC, LOPCOW, Entropie et MEAN) à trois techniques MCDM (MARA, RAM et PIV) pour améliorer la sélection des matériaux. L'étude évalue les options de matériaux dans trois applications : huile lubrifiante pour les moteurs à deux temps, fabrication d'arbres à vis et production d'engrenages. En utilisant le coefficient de corrélation de rang de Spearman pour évaluer la cohérence des classements, les résultats indiquent que la RAM est particulièrement efficace pour les arbres à vis et les engrenages, tandis que la MARA est la plus performante pour la sélection des lubrifiants. Les chercheurs apprécient la méthode PIV pour sa capacité à minimiser les inversions de rang. Cependant, la RAM permet de mieux comprendre les facteurs de décision sous-jacents.

Dua et Trung [DUA.T 24] ont présenté l'approche hybride innovante MEPSI et confirmé son efficacité à travers trois études de cas qui ont évalué des matériaux pour des amortisseurs automobiles, des engrenages et des bielles. Leur étude, qui a comparé la MEPSI aux méthodes MCDM reconnues, a produit des coefficients de corrélation de rang de Spearman compris entre 0,7833 et 1, ce qui indique un degré important de cohérence dans les classements. Ces résultats confirment que la méthode MEPSI est un outil prometteur pour la sélection des matériaux dans l'ingénierie mécanique.

L'étude de **Puška et al** [ADI 25] présente une nouvelle méthode de décision multicritères, le modèle RAWEC pour la sélection de sites de distribution agricole à Brčko, en Bosnie-Herzégovine, en se basant sur des critères comme la capacité de transport multimodal et la distance aux clients et fournisseurs. Les poids des critères sont déterminés par la méthode LMAW, puis le modèle RAWEC est utilisé pour classer les alternatives, les résultats montrent que la zone Baza Mc Gown (A7) est la plus appropriée, tandis que Boderišće (A3) se classe en dernier. Par ailleurs, une étude comparative entre la méthode RAWEC avec huit autres méthodes MCDM confirme la fiabilité et la robustesse du RAWEC, soulignant sa pertinence pour les problèmes de classement multi-alternatifs, notamment dans la logistique agricole.

Tableau I.2. Recueil de référence des méthodes multi-objectifs appliquées dans divers domaines

Auteurs	Méthode	Domaine d'application	Paramètres de performance	Matériaux	Plan d'expériences
Dua et al. (2025)	Probability	Tournage	Ra, RE, et MRR.	Acier inox martensitique 3X13	Taguchi L9
Trung et al. (2024)	Probability	Sélection de machines industrielles	Critères techniques, économiques, environnementaux	Choix de machines	N/A
Kang et al. (2025)	GRA	Usinage par électroérosion proche-à-sec (N-EDM)	Ra, MRR, ratio d'usure de l'électrode relative (REWR), largeur de passe (WOC),	Alliage de titane (Ti-6Al-4V)	Plan orthogonal L27 (4 ³)
Prakash et al. (2023)	GRA	Usinage par électroérosion à fil (WEDM)	Ra, MRR	Alliage d'aluminium (413)	Taguchi L27 (3 ³)
Sharma et al. (2023)	EDAS-PSO	Usinage par électroérosion à fil (WEDM)	Précision dimensionnelle (DA), Ra, Rz	Titane pur (Grade 2)	Taguchi L16
Nguyen et al. (2023)	EAMR, MARCOS, TOPSIS, MAIRCA	Rectification interne	Ra, MRR	Acier D2 (SKD11)	Taguchi L16 (4 ⁴ × 2 ²)
Khanh & Cuong (2021)	PIV	Fraisage	Ra, MRR	Acier SCM440	Taguchi (L27)
Trung et al. (2022)	PIV	Tournage	Ra, RE, et MRR	Acier 9XC	Taguchi L16
Trung et al. (2024)	RAM	Sélection de matériaux pour engrenages à vis sans fin	Dureté, résistance à la traction, limite d'élasticité, allongement, contraction et résilience	Acier C35, C45, C50, 42CrMoS4, C15, et C10	Analyse multicritère
Trung et al. (2024)	RAM	MCDM - normalisation des données pour RAM	N/A	N/A	N/A

Nguyen H. Giang et al. (2025)	RAWEC	Sélection des matériaux des vilebrequins	Densité, module d'élasticité, limite élastique, coût, dureté...	Acier : 1080, 18CrMo4, 4130, S48C	Analyse multicritère
Trung et al. (2024)	RAWEC	MCDM - Normalisation des données pour RAWEC	N/A	N/A	N/A

I.11. Conclusion

Cette revue bibliographique a mis en lumière les phénomènes fondamentaux de l'usinage, en particulier les interactions thermomécaniques outil-pièce à l'origine de la formation du copeau et de la dissipation thermique. L'usinabilité des aciers faiblement alliés a été analysée, notamment l'AISI 52100 dans ses états traités ou non, afin de souligner la nécessité d'adapter la composition et le revêtement des outils de coupe à la microstructure du matériau. Par ailleurs, l'examen des stratégies de lubrification durable a démontré que la microlubrification (MQL) combine efficacement réduction des frottements, maîtrise de l'échauffement et respect des enjeux environnementaux. Enfin, l'état de l'art a révélé la nécessité de proposer des modèles prédictifs plus robustes et des protocoles expérimentaux uniformisés.

Malgré les progrès réalisés dans le domaine du tournage dur de l'acier AISI 52100, peu d'études ont analysé conjointement l'effet des traitements thermiques et des stratégies de lubrification durables sur les performances d'usinage. Cette thèse se propose donc d'étudier cet effet combiné, d'évaluer l'influence des paramètres de coupe via un plan de Taguchi, puis de développer des modèles prédictifs et d'identifier les conditions optimales par optimisation mono- et multi-objectifs, validées expérimentalement et statistiquement (ANOVA, RSM).

Ces fondations théoriques et méthodologiques servent de base au chapitre II, qui détaille les matériaux, équipements et méthodes d'essai sélectionnés pour optimiser les paramètres de coupe et caractériser le comportement en frottement et en coupe de l'acier à roulement AISI 52100.

Introduction Générale

CHAPITRE I : Bibliographie : Tournage Dur, Micro-lubrification, et Optimisation

Chapitre II : Procédure Expérimental

- II.1 Introduction
- II.2 Équipements d'expérimentation
- II.3 Instruments de Mesure des Performances
- II.4 Planification des expériences
- II.5 Méthode de modélisation appliquée
- II.6 Conclusion

Chapitre III : Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier AISI 52100 Lors de L'usinage à sec et MQL

Chapitre IV : Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier Traité AISI 52100 Lors de L'usinage à sec et MQL

CONCLUSION GENERALE

II.1. Introduction

Ce chapitre présente une description détaillée des matériaux, équipements et approches expérimentales utilisés pour l'usinage de l'acier faiblement allié AISI 52100 (100Cr6), avec et sans traitements thermiques. L'objectif principal est d'analyser le comportement du couple outil-matière en fonction des variations des conditions de coupe, dans des environnements d'usinage à sec et sous lubrification minimale (MQL). Pour garantir des résultats fiables et reproductibles, une gamme complète d'équipements et d'instruments de mesure a été mobilisée. Un banc d'essais équipé d'un tour couplé à un système de lubrification MQL a été utilisé pour effectuer les essais. Les plaquettes de coupe adaptées aux deux matériaux étudiés, à savoir GC-2015 et CC-650, ont été sélectionnées pour répondre aux exigences des conditions de coupe. Une plateforme d'acquisition des efforts de coupe a permis de mesurer précisément les forces générées lors de l'usinage. La qualité des surfaces usinées a été évaluée à l'aide d'un rugosimètre 2D, tandis qu'un microscope a servi à analyser l'usure des outils de coupe. De plus, un microscope électronique à balayage (MEB) a été employé pour observer les microstructures et détecter d'éventuels défauts sur les surfaces usinées. Les températures générées à l'interface outil-pièce ont été mesurées avec précision à l'aide d'un pyromètre infrarouge et d'une caméra thermographique IR. Les essais ont été conduits au Laboratoire de Mécanique et de Structure (LMS, Université 8 Mai 1945, Guelma). Le cadre expérimental a permis d'évaluer conditions de coupe et mécanismes d'usinage de l'AISI 52100.

II.2. Équipements d'expérimentation

II.2.1. Caractérisation du matériau d'étude

Des barres métalliques de l'acier AISI 52100 (100Cr6 selon la norme allemande DIN) ont été utilisées lors des essais de tournage l'un traité thermiquement, avec une dureté de 60 (HRC) et l'autre non traité. Ce matériau est un acier faiblement allié de désignation l'AISI 52100 est conforme à la norme américaine **AISI (American Iron and Steel Institute)**, connu aussi sous le nom « acier à roulement ». Il est destiné généralement pour la fabrication des roulements (à billes, à rouleaux ou à aiguilles), butées, cames, galets, vilebrequins, arbres de transmission, freins antiblocage, accouplements, glissières, machine-outil et instruments de mesure [RAJ 20], il est aussi utilisé en mécanique comme outillage : goupilles, poinçons, colonnes de guidage, forets, alésoirs. Ces derniers sont des éléments souvent présents dans les systèmes mécaniques lorsqu'une fonction de rotation doit être assurée. La composition chimique ainsi que les propriétés de l'acier AISI 52100 sont respectivement présentées dans les tableaux 1 et 2.

Tableau II.1. Structure chimique de l'AISI 52100

Éléments	C	Mn	Si	Ni	Al	Cr	V	Ti	Mo
Poids (en %)	0.939	0.277	0.265	0.175	0.012	1.444	0.004	0.005	0.058

Tableau II.2. Propriétés mécaniques, physiques et thermiques de l'acier AISI 52100

Propriété	Symbole	Unité	Type	Valeurs
Densité	ρ	[g/cm ³]	Physique	7.8
Module d'Young	E	[GPa]	Mécanique	200
Dureté	-	[HRC]	Mécanique	< 66 (67)
Chaleur spécifique	C	[J/kg-K]	Thermique	464
Conductivité thermique	λ	[W/(m.K)]	Thermique	42.4

Les séries d'essais de cette étude ont été effectuées sur trois barres pleines en acier faiblement allié AISI 52100. D'abord, des essais paramétriques ont consisté en un usinage continu de 80 mm sur l'une de ces barres ($\varnothing$ 60 mm) afin d'évaluer l'influence de la vitesse de coupe sur les critères de performance (figure II.1 a). Ensuite, deux barres supplémentaires de diamètre $\varnothing$ 65 mm, et longueur $L = 350$ mm, ont été utilisées pour les essais expérimentaux. Chaque barre a été divisée en neuf paliers de 25 mm, séparés par des gorges de 5 mm (figure II.1 b). Pour aborder le tournage dur, l'une des éprouvettes a reçu un traitement thermique qui consiste à une trempe suivie d'un revenu, portant sa dureté à 60 HRC [ELB 15], tandis que l'autre est restée à l'état recuit. Cette configuration rigoureuse permet une analyse approfondie des performances d'usinage en fonction des caractéristiques géométriques et métallurgiques des pièces.

**Figure II.1.** Éprouvettes utilisées pour les essais.

II.2.2. Description technique de la machine-outil

Un tour parallèle conventionnel « TOS TRENCIN » (modèle SN 40C) (figure II.2) a été exploité afin de réaliser les différents essais de chariotage programmés. Les caractéristiques techniques de cette machine-outil sont présentées dans le tableau II.3.

Cette machine robuste et polyvalente a été choisie pour sa capacité à garantir une précision et une stabilité adéquates lors des opérations d'usinage, répondant ainsi aux exigences des conditions expérimentales.

Tableau II.3. Caractéristiques techniques du tour conventionnel modèle SN 40C

Puissance du moteur électrique (kW)	Vitesses de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance en (mm/tr)
6.6	45 à 2000	0.08 à 6.4



Figure II.2. Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

Le tour conventionnel modèle SN40, est également équipé d'un variateur de vitesse de la série ACS355, fabriqué par ABB (figure II.3). Ce variateur permet de régler précisément le nombre de tours par minute, y compris pour des vitesses qui ne sont pas disponibles dans la boîte de vitesses standard. Par ailleurs, un capteur de vitesse, illustré dans la figure II.4, est intégré au système. Ce capteur fournit une indication en temps réel de la vitesse de rotation, garantissant ainsi un contrôle optimal lors de l'utilisation du variateur.

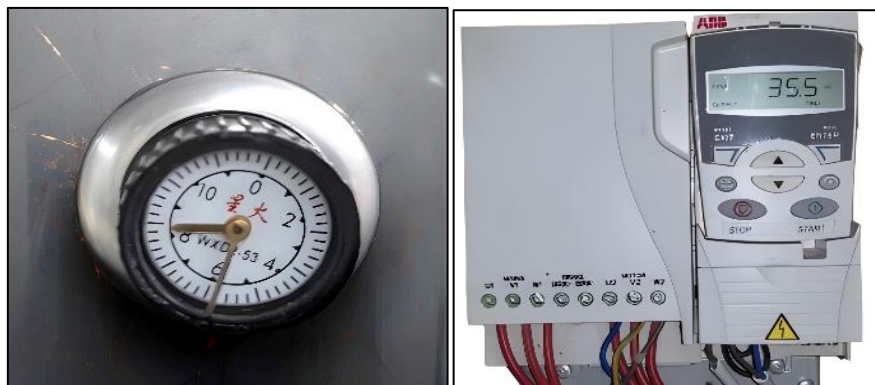


Figure II.3. Variateur de vitesse de fréquence ABB.



Figure II.4. Ensemble capteur-indicateur de vitesse de rotation.

II.2.3. Sélection des outils de coupe et porte-outils

Pour les opérations de tournage de l'AISI 52100 à l'état non traité, des plaquettes en carbure métallique (de désignation Iso : SNMG 1204, référence GC-2015) revêtues par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ont été utilisées. Ces plaquettes présentent un revêtement multicouche composé de nitrure de titane (TiN), d'oxyde d'alumine (Al_2O_3) et de carbonitrure de titane (MT-TiCN). Le TiN améliore la résistance à l'usure tout en facilitant la détection de celle-ci, tandis que l' Al_2O_3 renforce la résistance à la déformation plastique et à l'usure en cratère. Le MT-TiCN, grâce à sa dureté, offre une excellente résistance à l'usure abrasive et réduit l'usure des flancs [SAF 22]. Les plaquettes, de forme carrée et amovibles, comportent huit arêtes de coupe et sont fixées mécaniquement par un trou central. Elles sont montées sur un porte-outil de type ISO PSBNR/L 2525 M12, dont les spécifications, ainsi que celles des plaquettes GC-2015, sont illustrées à la figure II.5. Il est à noter que chaque essai a été réalisé en utilisant une nouvelle arête de coupe afin de garantir des conditions expérimentales optimales et reproductibles.

En revanche, pour les opérations de tournage sur l'AISI 52100 à l'état traité, des plaquettes en céramique noire de désignation ISO SNGA120408T01020 (Sandvik) ont été employées. Ces plaquettes, également amovibles et de forme carrée, sont fixées mécaniquement par un trou central et disposent de huit arêtes de coupe. Elles sont spécifiquement recommandées pour les opérations de finition à haute vitesse sur des aciers trempés dans des conditions de coupe stables. Le porte-plaquette utilisé pour ces essais est de type TIZIT Maxilock PSBNR 2020 K12-T, dont les spécifications sont présentées à la figure II.6. Ce choix d'outillage permet d'optimiser les performances de coupe dans des conditions exigeantes, tout en assurant une précision et une durabilité accrues.

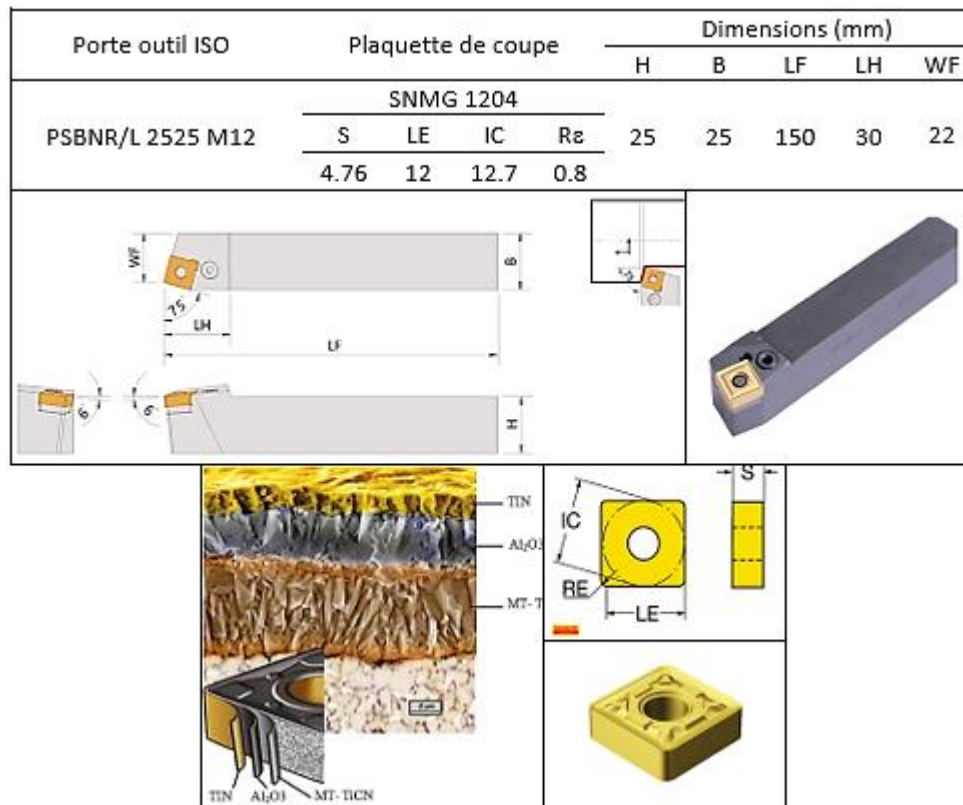


Figure II.5. Caractéristiques des plaquettes de coupe et du porte outils utilisés pour le tournage de l'AISI 52100 non-traité [SANDVIK Coromant].

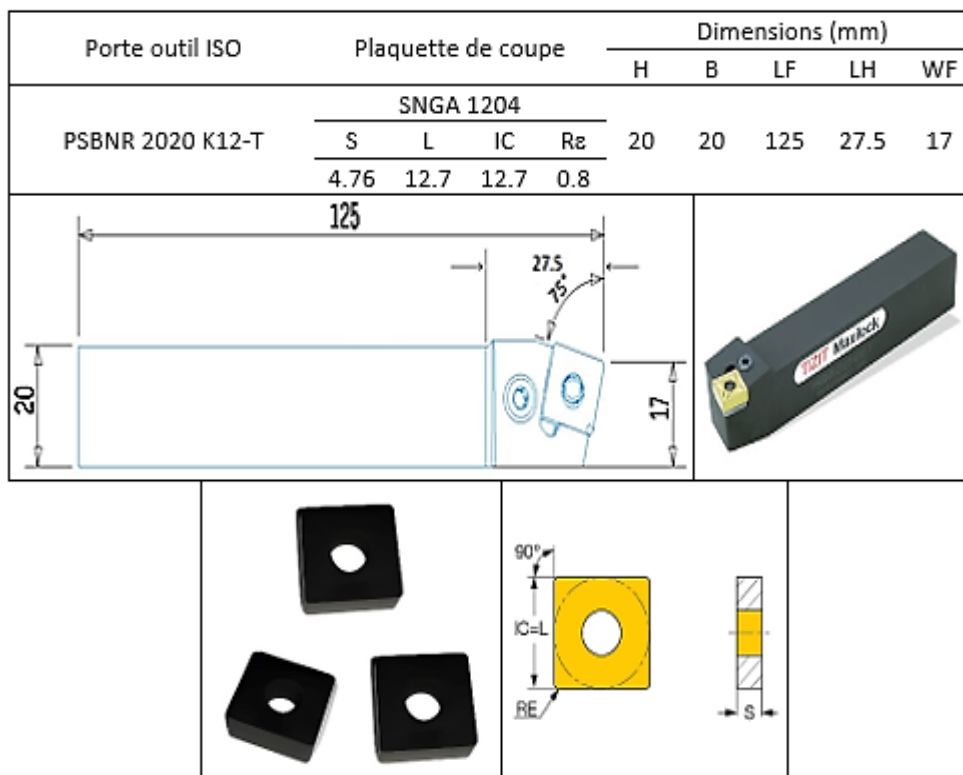


Figure II.6. Caractéristiques des plaquettes de coupe et du porte outils utilisés pour le tournage de l'AISI 52100 traité [SANDVIK Coromant].

II.2.4. Configuration du système MQL

Le système de lubrification minimale (MQL) repose sur l'intégration de plusieurs composants essentiels, chacun jouant un rôle déterminant dans son efficacité et son fonctionnement global. Il est conçu pour générer une fine pulvérisation d'huile dans un flux d'air comprimé, optimisant les conditions de coupe tout en réduisant significativement la consommation de lubrifiant. Parmi ses principaux éléments, le compresseur d'air, le boîtier de commande et le réservoir d'huile forment le cœur du système. La figure II.7 illustre le schéma de montage du système de lubrification à quantité minimale (MQL).

Le compresseur d'air, composant central, fournit un flux d'air comprimé à une pression stable, généralement comprise entre 4 et 6 bars. Cet air comprimé est indispensable pour atomiser le fluide lubrifiant et le transporter efficacement jusqu'à la zone de coupe. Il contribue également au refroidissement de cette zone, réduisant les températures générées par le frottement entre l'outil et la pièce. La qualité de l'air comprimé, assurée par des filtres et des sècheurs éliminant l'humidité et les particules, est cruciale pour garantir une pulvérisation homogène et préserver la performance des autres composants du système.

Le réservoir d'huile, présenté à la figure II.8, constitue un autre élément clé. D'une capacité de 24 litres, il contient le fluide lubrifiant utilisé dans le système. Équipé d'un débitmètre, il permet de contrôler et d'ajuster précisément le débit d'huile, garantissant une application optimale sur la zone de coupe. Le boîtier de commande, illustré à la figure II.9, regroupe les dispositifs de réglage et de contrôle nécessaires au fonctionnement optimal du système MQL. Il inclut des afficheurs permettant de surveiller les débits d'air et d'huile, un régulateur de pression pour le réseau d'air pulvérisé, un dispositif de contrôle de la pression du réservoir, ainsi que des réglages précis pour l'air de pulvérisation et la pression du produit. Ensemble, ces composants, complétés par les buses de pulvérisation, les tuyaux de distribution et les connecteurs (figure II.7), assurent une atomisation efficace du mélange air-huile. Ce dispositif permet de diminuer la consommation de lubrifiant et d'améliorer la finition des pièces, tout en réduisant l'impact environnemental et en allongeant la durée de vie des outils et des éléments du système.

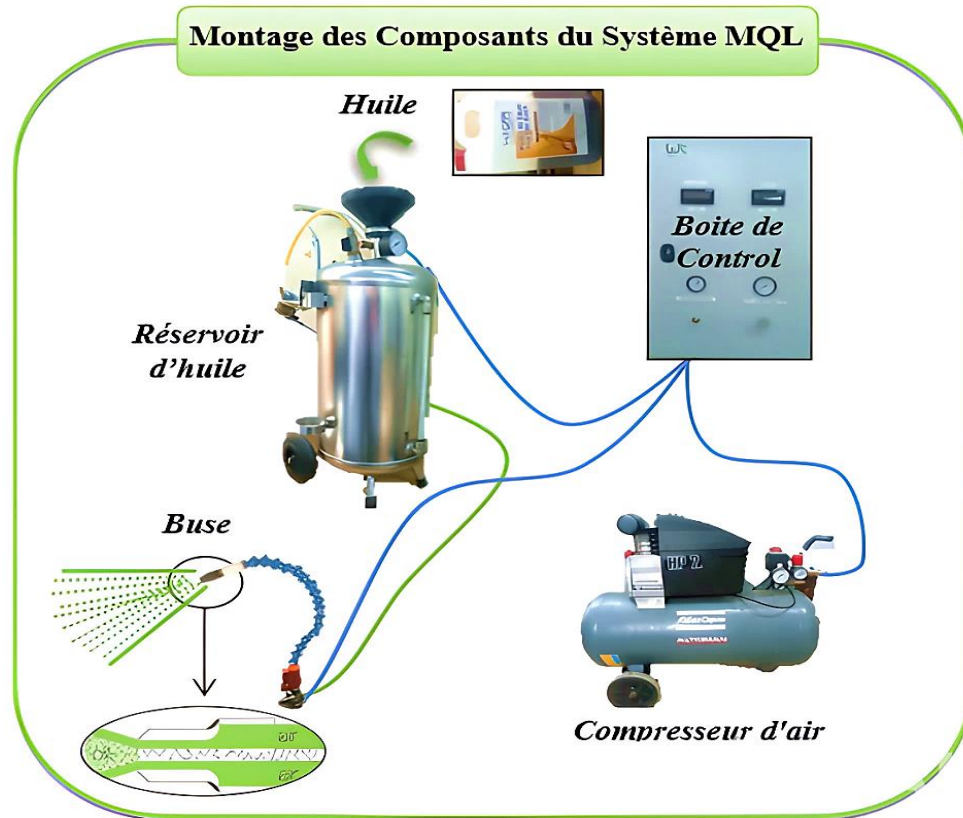


Figure II.7. Schéma de montage du système de Lubrification à Quantité Minimale (MQL).

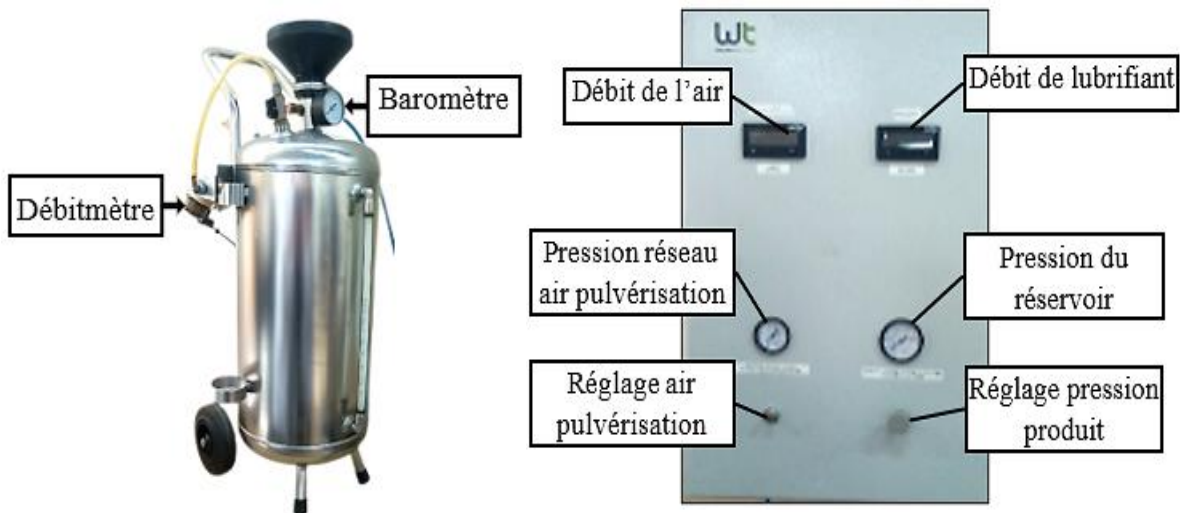


Figure II.8. Réservoir d'huile.

Figure II.9. Boite contrôle MQL.

II.3. Instruments de mesure des performances

Pour évaluer avec précision les performances du processus de coupe de l'AISI 52100 sous environnements à sec et MQL et caractériser les paramètres de sortie, une gamme d'instruments de mesure spécialisés a été employée. Parmi ces outils, un rugosimètre 2D pour la mesure de la rugosité de surface, un dynamomètre KISTLER 9257B a permis de quantifier

les efforts de coupe. Un microscope optique Visual Gage 250 a été utilisé pour analyser l'usure des plaquettes de coupe, tandis que les températures générées au cours du processus ont été mesurées à l'aide d'un pyromètre infrarouge et d'une caméra thermographique IR. Enfin, une analyse morphologique et chimique approfondie des plaquettes de coupe a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB).

II.3.1. Mesure de la rugosité de surface

Dans le cadre de nos expériences, un rugosimètre 2D a été utilisé pour mesurer les différents critères de rugosité de surface, notamment R_a , R_z , et R_t . Ces mesures ont été réalisées immédiatement après chaque passage de l'outil, en utilisant un appareil Mitutoyo Surftest SJ-210 équipé d'une pointe en diamant de $5\text{ }\mu\text{m}$, se déplaçant linéairement sur la surface usinée. Afin de minimiser les erreurs de reprise et d'assurer une précision optimale, les mesures ont été effectuées directement sur la pièce, sans démontage, en trois points distincts répartis à 120° autour de la circonférence. Cette méthodologie garantit une évaluation fiable et reproductible des critères de rugosité. Le rugosimètre 2D utilisé est illustré à la figure II.10.

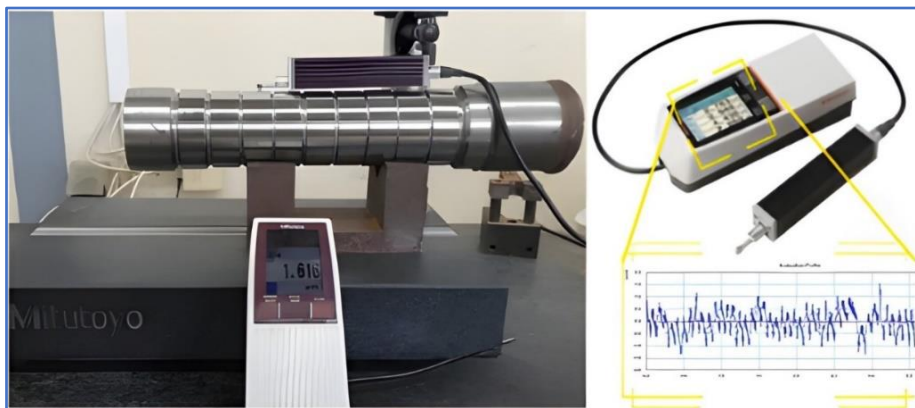


Figure II.10. Rugosimètre 2D (Surftest SJ-210).

II.3.2. Évaluation des efforts de coupe

Un dynamomètre KISTLER 9257B (figure II.12) a été utilisé pour mesurer les composantes des efforts de coupe avec une grande précision. Cet équipement est largement reconnu pour sa fiabilité dans l'analyse des trois composantes principales de l'effort de coupe (F_x , F_y , et F_z). Le système se compose de plusieurs éléments interconnectés, notamment une plateforme de mesure capable de capter les forces appliquées, un amplificateur de signaux pour convertir les données en un format exploitable et un ordinateur équipé du logiciel DYNOWARE pour l'acquisition et l'analyse des données. Cette configuration garantit une

mesure précise et une analyse approfondie des efforts de coupe dans des conditions expérimentales variées.

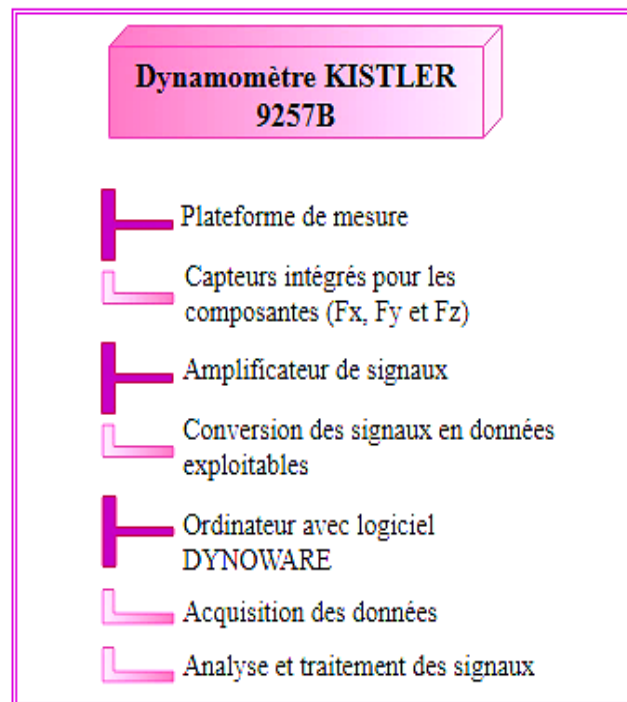


Figure II.11. Configuration du système de mesure KISTLER9257 B.

La mesure s'appuie sur l'effet piézoélectrique, qui transforme des efforts mécaniques en signaux électriques. Lors du tournage, la pièce assure le mouvement de rotation tandis que l'outil réalise une translation pour travailler la surface. L'outil est fixé sur une plateforme de mesure, elle-même fixée au chariot transversal de la machine-outil via une plaque de liaison. Cette plateforme, cœur du montage expérimental, est équipée de quatre capteurs en quartz. Ces capteurs transforment les forces appliquées sur la plateforme pendant le processus de coupe en charges électriques. Ces charges électriques sont ensuite amplifiées par un amplificateur de signaux, garantissant une conversion précise en données exploitables. Les signaux amplifiés sont transmis à un ordinateur équipé d'une carte d'acquisition dédiée, qui permet de recueillir et de traiter les données en temps réel. Le logiciel DYNOWARE, installé sur l'unité centrale, analyse et traite ces signaux, permettant d'exprimer directement les forces générées pendant le tournage sous forme de leurs trois composantes principales (Fx, Fy, et Fz). Cette configuration assure une mesure fiable et précise des efforts de coupe. La figure II.12 présente un exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.

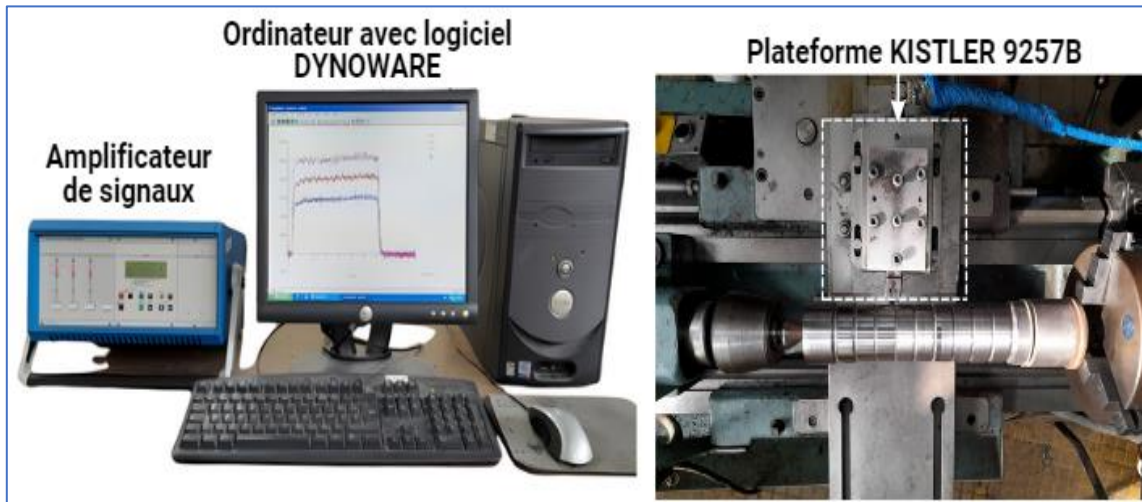


Figure II.12. Structure et composantes principales du dynamomètre KISTLER 9257B.

II.3.3. Mesure de la température à l'interface outil-pièce

Pour caractériser la température générée lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 non traité, un pyromètre à infrarouge de modèle CAUTION 9U0401 a été utilisé (figure II.13). Cet instrument permet une mesure sans contact en captant l'énergie infrarouge émise par la surface cible et en calculant sa température. Le dispositif offre une lecture directe des températures maximales, minimales et moyennes, affichées sur un écran numérique en degrés Celsius ou Fahrenheit. Il est également équipé d'une sortie analogique et numérique, facilitant le transfert des données enregistrées pour une analyse ultérieure. Le pyromètre CAUTION 9U0401 se distingue par ses spécifications techniques : une gamme de mesure allant de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, bande spectrale $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$, précision spécifiée $\pm 1\text{ }\%$ ou $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{F}$), et un temps de réponse rapide de 500 ms pour atteindre 95 % des valeurs mesurées. De plus, il intègre une visée laser monopoint pour une localisation précise de la zone de mesure, garantissant une évaluation fiable et précise des températures dans des conditions de coupe exigeantes.



Figure II.13. Mesure de la température : Pyromètre à infrarouge CAUTION 9U0401.

II.3.4. Caractérisation de l'usure des outils

Le microscope VISUEL GAGE 250 (Figure II.14) est un instrument optique binoculaire de haute précision, équipé d'une caméra CCD couleur et de chariots à mouvements croisés offrant une précision de 0,001 mm. Il propose un grossissement variable et un zoom indexable, avec un éclairage diascoïque et annulaire pour une illumination optimale. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette sur une table micrométrique, où l'opérateur utilise une interface graphique pour localiser l'intersection de la face de coupe et de la face de dépouille, servant de référence pour évaluer l'usure. Les données sont acquises via le logiciel Visual Gage 2.2.0, permettant une mesure rapide et précise avec une interface conviviale. Le microscope offre une étendue de mesure de 250 x 150 mm et fonctionne à une température de référence de 20°C $\pm$ 1°C, combinant précision mécanique et fonctionnalités optiques avancées pour la mesure de l'usure des outils de coupe.



Figure II.14. Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).

II.3.5. Analyse morphologique et chimique des surfaces

II.3.5.1. Observation des microstructures au microscope électronique à balayage

Le Microscope Électronique à Balayage (MEB) est un instrument puissant pour l'analyse des microstructures et la détection des défauts sur les surfaces. Pour cette étude, l'analyse de la microstructure et celle des pistes d'usure des plaquettes de coupe a été effectuées à l'aide d'un microscope électronique à balayage de la marque FEG, modèle Quanta 250 (figure II.15). Cet appareil utilise un faisceau d'électrons pour produire des images à haute résolution, permettant une observation précise à l'échelle micrométrique et nanométrique. Le principe de fonctionnement de base du MEB consiste à balayer la surface d'un échantillon avec un faisceau d'électrons. Les interactions entre ce faisceau et la matière génèrent différents signaux, tels que

les électrons secondaires (SE) qui relèvent la topographie et les électrons rétrodiffusés (BSE) qui mettent en évidence les contrastes de composition chimique. Ces signaux sont ensuite captés pour créer des images détaillées, révélant les microstructures et les défauts de surface avec une grande précision. Grâce à ses capacités avancées, le MEB est largement utilisé dans les études de matériaux et les analyses de surface.

II.3.5.2. Identification chimique par spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDS)

L'identification chimique par Spectroscopie X à Dispersion d'Énergie (EDS) est une méthode essentielle pour analyser la composition élémentaire des échantillons. Lorsqu'un échantillon est bombardé par un faisceau d'électrons dans un Microscope Électronique à Balayage (MEB), il émet des rayons X caractéristiques, dont l'énergie est spécifique à chaque élément. Ces rayons X sont capturés par un détecteur EDS, composé d'un cristal de silicium dopé au lithium, qui les convertit en un spectre analysable. Ce spectre permet d'identifier les éléments présents de manière qualitative et quantitative, en calculant les ratios de masse et d'atomes. La profondeur de pénétration du faisceau, généralement de quelques micromètres, dépend de l'énergie des électrons incidents et de la nature du matériau. En combinant le MEB et l'EDS, des analyses chimiques précises peuvent être réalisées sur des zones spécifiques de l'échantillon, révélant ainsi la distribution et la concentration des éléments. Cette technique a été systématiquement appliquée pour examiner chaque zone d'intérêt, fournissant des données détaillées sur la composition chimique des surfaces étudiées.



Figure II.15. Microscope électronique à balayage de modèle Quanta FEG 250.

II.4. Planification des expériences

La planification des expériences (*Design of Experiments*, DOE) est une méthode statistique structurée qui permet d'organiser, d'analyser et d'interpréter les essais expérimentaux de manière optimale. Cette démarche systématique aide à identifier les facteurs clés d'un système, à estimer leurs effets individuels et d'interaction, et à déterminer les réglages qui maximisent les performances du procédé étudié. En limitant le nombre d'essais requis tout en garantissant des résultats fiables et reproductibles, la DOE réduit sensiblement les coûts en temps et en ressources liés à l'expérimentation. De plus, elle offre un cadre robuste pour optimiser un processus par l'ajustement de ses paramètres critiques.

II.4.1. Méthodes de planification des expériences

Plusieurs approches existent en fonction des objectifs et des contraintes expérimentales. L'influence d'un ou de plusieurs facteurs d'entrées sur les paramètres de performances, peut être obtenue en utilisant les deux méthodes suivantes :

- ✓ Méthode uni-factorielle.
- ✓ Méthode multifactorielle.

II.4.1.1. Méthode paramétrique uni-factorielle OFAT (One-factor-at-a-time)

La méthode paramétrique est une approche utilisée dans divers domaines, 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 d'entrée sur un paramètre de performance. L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné, tout en maintenant tous les autres facteurs constants [GOU 05].

II.4.1.2. Méthode multifactorielle

Le choix d'une méthode DOE dépend des objectifs, des contraintes et de la nature des variables. Chaque approche offre un équilibre unique entre précision, coût et applicabilité, permettant aux chercheurs et ingénieurs de maximiser la valeur des données expérimentales. Voici les principales méthodes de planification des expériences [TAG 87] :

1. **Plans factoriels** : étudient systématiquement tous les facteurs et leurs interactions en testant toutes les combinaisons possibles de niveaux. L'objectif de ce plan est d'identifier les effets principaux des facteurs. Ainsi qu'analyser les interactions entre variables. Ils se divisent en deux types :

- **Plan factoriel complet** : examine toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs étudiés. Il permet d'évaluer à la fois les effets principaux et les interactions entre les facteurs. Leur avantage est de fournir une analyse détaillée des interactions.
- **Plan factoriel fractionnaire** : est une version réduite du plan factoriel complet, où seules certaines combinaisons de niveaux sont testées. Il permet d'obtenir des résultats représentatifs avec moins d'expériences, en supposant que certaines interactions sont négligeables. L'avantage de ce plan est la réduction du nombre d'essais.

2. Plans de Taguchi

La méthode de Taguchi repose sur l'utilisation de tableaux orthogonaux pour concevoir des expériences avec un nombre réduit d'essais tout en garantissant des résultats robustes. Elle permet d'optimiser les paramètres en analysant les résultats à l'aide du rapport signal/bruit (S/N), ce qui contribue à une meilleure efficacité expérimentale avec un minimum d'expériences.

3. Plans de Surface de Réponse (RSM)

Le plan de Surface de Réponse (RSM) est une approche statistique destinée à optimiser des processus en modélisant les relations complexes (souvent non linéaires) entre les variables d'entrée et les réponses. Elle s'appuie sur l'utilisation de plans expérimentaux structurés, tels que le Central Composite Design (CCD) ou le Box-Behnken, pour identifier les paramètres optimaux (maximum, minimum ou cible) et visualiser les interactions via des modèles quadratiques.

4. Plans de mélanges

Ces plans s'avèrent particulièrement utiles lorsque la réponse dépend des proportions de plusieurs composants, comme dans la formulation de matériaux ou de produits chimiques, et facilitent l'optimisation des formulations. Ils sont également employés en chimie pour tester différentes compositions de polymères.

5. Plans de criblage (screening designs)

Les plans de criblage permettent d'identifier rapidement les facteurs significatifs parmi un grand nombre de variables en distinguant clairement les effets importants des effets négligeables, contribuant ainsi à réduire la complexité des études ultérieures.

6. Plans de blocs

Les plans de blocs regroupent les essais en blocs homogènes pour contrôler les sources de variabilité externe et ainsi isoler l'effet des variables d'intérêt des perturbations externes et d'améliorer la précision des estimations. Par exemple, ils permettent de neutraliser les variations climatiques lors de l'étude de l'effet d'un engrais.

Dans le cadre de cette étude, nous examinons deux plans d'expérience de Taguchi appliqués à l'usinage de l'acier AISI 52100. Le premier plan, destiné à l'acier non traité, permet d'analyser trois facteurs, chacun à trois niveaux, à travers seulement 9 essais expérimentaux. Le second plan, dédié à l'acier traité AISI 52100, utilise une matrice orthogonale L18 adaptée à trois facteurs à trois niveaux et un facteur supplémentaire à deux niveaux. Les configurations détaillées de ces deux plans sont présentées respectivement dans les tableaux II.5 et II.6.

II.4.2. Différents types de facteurs

La conception des plans expérimentaux et l'interprétation des résultats reposent largement sur la nature des facteurs étudiés. On distingue principalement quatre types de facteurs [TAG 87] :

- **Facteurs continus** : ces facteurs peuvent prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle donné. Par exemple, la concentration, la longueur, la température ou la pression sont des facteurs continus, leurs valeurs étant décrites par des nombres réels.
- **Facteurs discrets** : les facteurs discrets, à la différence des facteurs continus, n'admettent qu'un ensemble restreint de valeurs possibles. Ces modalités peuvent être textuelles ou symboliques et peuvent être exprimées par des noms, des lettres ou des propriétés (la couleur ; bleu, rouge, jaune).
- **Facteurs ordonnables** : il s'agit de facteurs discrets pour lesquels un ordre logique peut être établi. Des exemples incluent des tailles (grand, moyen, petit) ou des rangs (premier, deuxième, troisième, etc.).
- **Facteurs booléens** : ces facteurs discrets ne comportent que deux modalités. Par exemple, ils peuvent représenter des états opposés tels que haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir.

NB : Dans cette étude, deux catégories de variables ont été considérées lors de la conception des plans expérimentaux. D'une part, les facteurs continus correspondant aux conditions de

coupe principales (V_c , f et a_p). D'autre part, un facteur discret relatif au mode de lubrification employé, à savoir l'usinage à sec versus l'usinage sous lubrification minimale (MQL).

II.4.3. Démarche et plans d'expérience adoptés

Dans le contexte de l'usinage, de nombreux facteurs influent sur le système d'usinage. Parmi ceux-ci, on peut citer les paramètres liés au régime de coupe (la vitesse de coupe V_c , l'avance par dent f et la profondeur de passe a_p) ainsi que les conditions opérationnelles telles que la rigidité de la machine. Ces éléments constituent les paramètres d'entrée du système. En contrepartie, les paramètres de sortie comprennent les efforts de coupe, la rugosité de surface, la puissance, la pression spécifique de coupe, l'usure, et le volume de copeaux enlevé. Dans notre étude, nous avons mis en place trois plans expérimentaux de Taguchi afin d'évaluer l'influence de trois facteurs fondamentaux (V_c , f , a_p) ainsi que le mode de lubrification (à sec versus MQL) sur divers paramètres technologiques.

La première série est réservée aux essais paramétriques afin d'évaluer les paramètres de performance lors du tournage de l'acier AISI 52100 non traité dans un environnement de lubrification à sec et à quantité minimale de fluide de coupe connue sous le nom de MQL. Pour les conditions de coupe utilisées, la vitesse de coupe (V_c) a été variée trois fois à (220, 300, 380) m/min. par contre l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p) ont été maintenues constantes ($f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.4$ mm). L'étude uni-factorielle a été conduite pour analyser l'impact de la vitesse de coupe (V_c) ainsi que le mode de lubrification sur plusieurs paramètres technologiques notamment la rugosité de surface (R_a , R_t , R_z), les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z), la puissance de coupe (P_c), l'usure de la plaquette de coupe (V_b) et la température dans la zone de coupe (T°). Le tableau II.4 détaille les conditions de coupe appliquées lors des essais paramétriques.

Tableau II.4. Paramètres de coupe des essais paramétrique

Modes de lubrification	Facteurs d'entrés	Niveau	Performances
Sec / MQL	V_c (m/min)	220 ; 300 ; 380	R_a , R_t , R_z
	f (mm/tr)	0.08	F_x , F_y , F_z
	a_p (mm)	0.4	P_c , V_b , T°

Lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 non traité, une série d'essais multifactoriels suivant le plan orthogonale de Taguchi L9 (3^3) a été réalisée dans les deux conditions de lubrification (à sec et MQL) afin d'évaluer l'influence des facteurs d'entrée (V_c , f et a_p) sur les paramètres

de performance (R_a , F_z , P_c , K_c et MRR), une deuxième série d'essais multifactoriels suivant le plan de Taguchi L9 (3^3) a été réalisée. Le tableau II.5 illustre la matrice de planification du plan de Taguchi L9, les valeurs des facteurs d'entrée sont choisies d'après les recommandations du fabricant d'outil (SANDVIK).

Tableau II.5. Matrice de planification du plan de Taguchi L9 (3^3)

N° d'essai	Paramètres de coupe		
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)
1	200	0.08	0.15
2	200	0.12	0.30
3	200	0.16	0.45
4	250	0.08	0.30
5	250	0.12	0.45
6	250	0.16	0.15
7	300	0.08	0.45
8	300	0.12	0.15
9	300	0.16	0.30

Dans le cadre de l'étude menée sur l'usinage de l'acier AISI 52100 traité, un plan expérimental de type L18 ($2^1 3^3$) a été adopté. Ce plan se caractérise par l'adoption d'un facteur catégorique, qui présente le mode de lubrification sous deux conditions distinctes (à sec et MQL) et trois facteurs numériques continus (V_c , f , et a_p), chacun à trois niveaux. Les essais ont été numérotés de 1 à 9 pour la lubrification à sec, et de 10 à 18 pour le mode MQL, comme présenté dans le tableau II.6

Tableau II.6. Matrice de planification du plan de Taguchi L18 (3^3 , 2^1)

N° d'essai	Paramètres de coupe			
	Mode de lubrification	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)
1	à sec	160	0.08	0.15
2	à sec	160	0.14	0.3
3	à sec	160	0.2	0.45
4	à sec	230	0.08	0.15
5	à sec	230	0.14	0.3
6	à sec	230	0.2	0.45
7	à sec	300	0.08	0.3
8	à sec	300	0.14	0.45

9	à sec	300	0.2	0.15
10	MQL	160	0.08	0.45
11	MQL	160	0.14	0.15
12	MQL	160	0.2	0.3
13	MQL	230	0.08	0.3
14	MQL	230	0.14	0.45
15	MQL	230	0.2	0.15
16	MQL	300	0.08	0.45
17	MQL	300	0.14	0.15
18	MQL	300	0.2	0.3

En outre, nous avons appliqué la méthodologie de surface de réponse (MSR) en nous appuyant sur les logiciels d'optimisation statistique Minitab 18 et Design-Expert 12. Ces outils ont permis d'établir une planification rigoureuse des essais, d'effectuer une analyse statistique approfondie des données et de modéliser les relations entre les variables, garantissant ainsi une exploration systématique des interactions et l'identification des conditions optimales. Par ailleurs, l'évaluation des paramètres technologiques tels que la puissance de coupe (P_c), la pression spécifique de coupe (K_c) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) a été réalisée en se référant respectivement aux équations II.1, II.2 et II.3 [YAL 07 et HAO 23]. La figure II.16 présente un récapitulatif des équipements utilisés ainsi que la méthodologie adoptée.

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60} \quad (\text{W}) \quad (\text{II.1})$$

$$MRR = V_c \times f \times ap \quad (\text{cm}^3/\text{min}) \quad (\text{II.2})$$

$$K_c = \frac{F_z}{f \times ap} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{II.3})$$

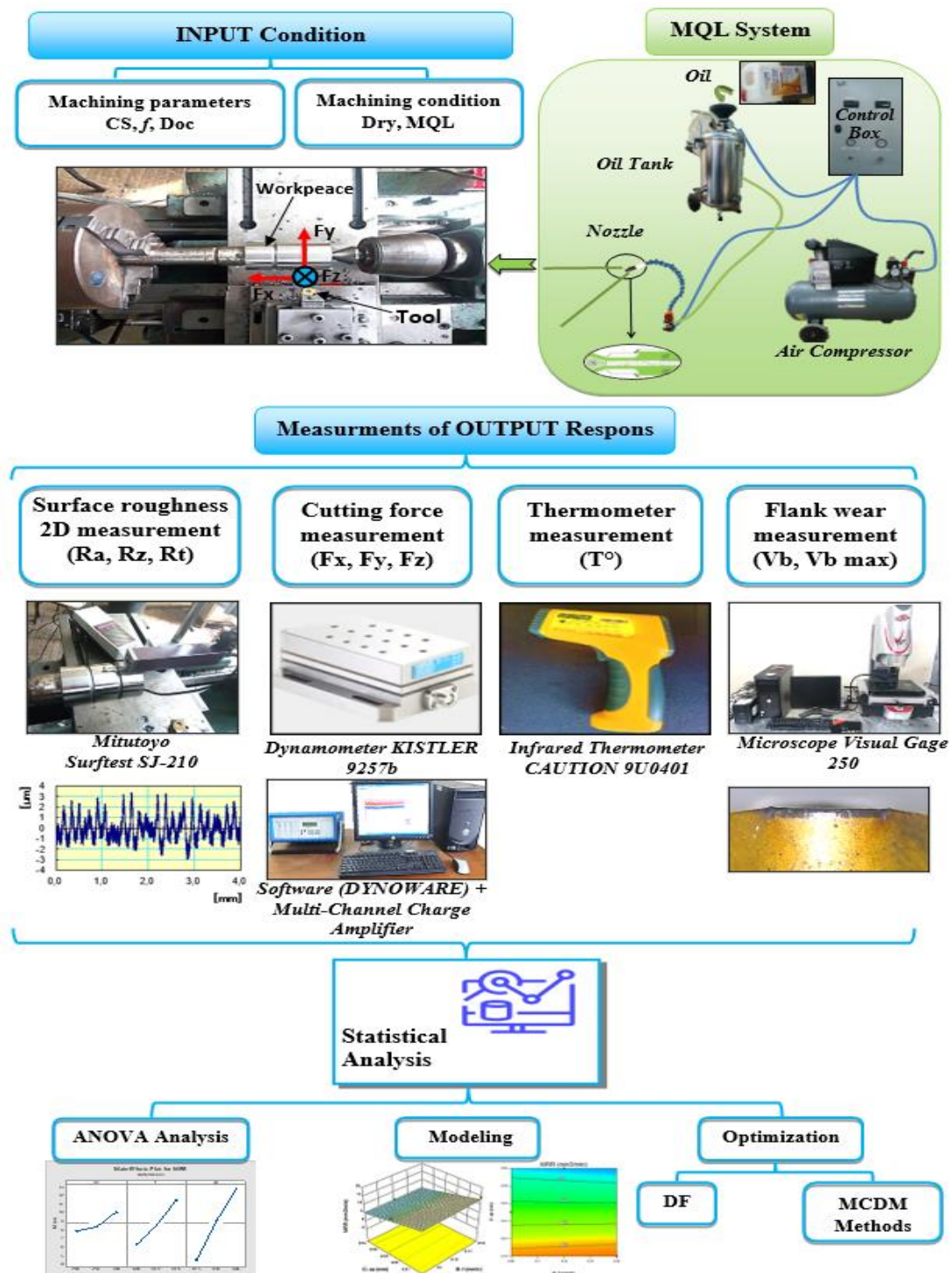


Figure II.16. Dispositif et protocole expérimental du plan L9.

II.5. Méthode de modélisation appliquée

II.5.1. Méthodologie des surfaces de réponse (MSR)

La méthode de surface de réponse (MSR) est une méthode utilisant des techniques mathématiques et statistiques pour créer des modèles prédictifs basés sur des expériences. Elle vise à optimiser la réponse d'un processus à une variable en fonction de plusieurs variables

indépendantes. La RSM peut inclure à la fois des expériences physiques et numériques, chacune ayant leurs propres types d'erreurs [HAM 22 et KAM 11]. La figure II.17 montre l'organigramme utilisé pour cette méthode. Ainsi, il est possible d'exprimer le modèle pour une réponse donnée selon l'équation suivante :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad (\text{II.4})$$

Dans le modèle polynomial de second ordre (équation II.4), a_0 représente la constante de régression, tandis que a_i et a_{ij} désignent respectivement les coefficients associés aux effets linéaires et aux interactions d'ordre deux entre les paramètres d'usinage. Ces coefficients, déterminés par analyse de régression, quantifient l'influence individuelle et combinée des variables indépendantes X_i et X_j correspondant ici à la profondeur de coupe (ap), l'avance par tour (f) et la vitesse de coupe (V_c) sur la réponse étudiée [HAM 24].

D'après la relation (II.5), le coefficient de détermination R^2 est utilisé pour évaluer la précision des prédictions. Associé à l'analyse des résidus, il aide à distinguer les effets linéaires et non linéaires des paramètres, garantissant ainsi des conclusions plus fiables.

$$R^2 = \frac{\sum (Y_j - \bar{y})^2}{\sum (\bar{Y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- Y_i : Réponse calculée pour la i^{e} expérience.
- $\bar{Y}_j$: Réponse mesurée pour la i^{e} expérience.
- $\bar{y}$: Moyenne des réponses mesurées.

Pour vérifier si le modèle est pertinent et bien ajusté, on utilise l'ANOVA. Cette méthode permet non seulement de tester la signification statistique du modèle, mais aussi de visualiser les surfaces de réponse. Elle aide ainsi à quantifier l'influence individuelle et l'interaction simultanée des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés.

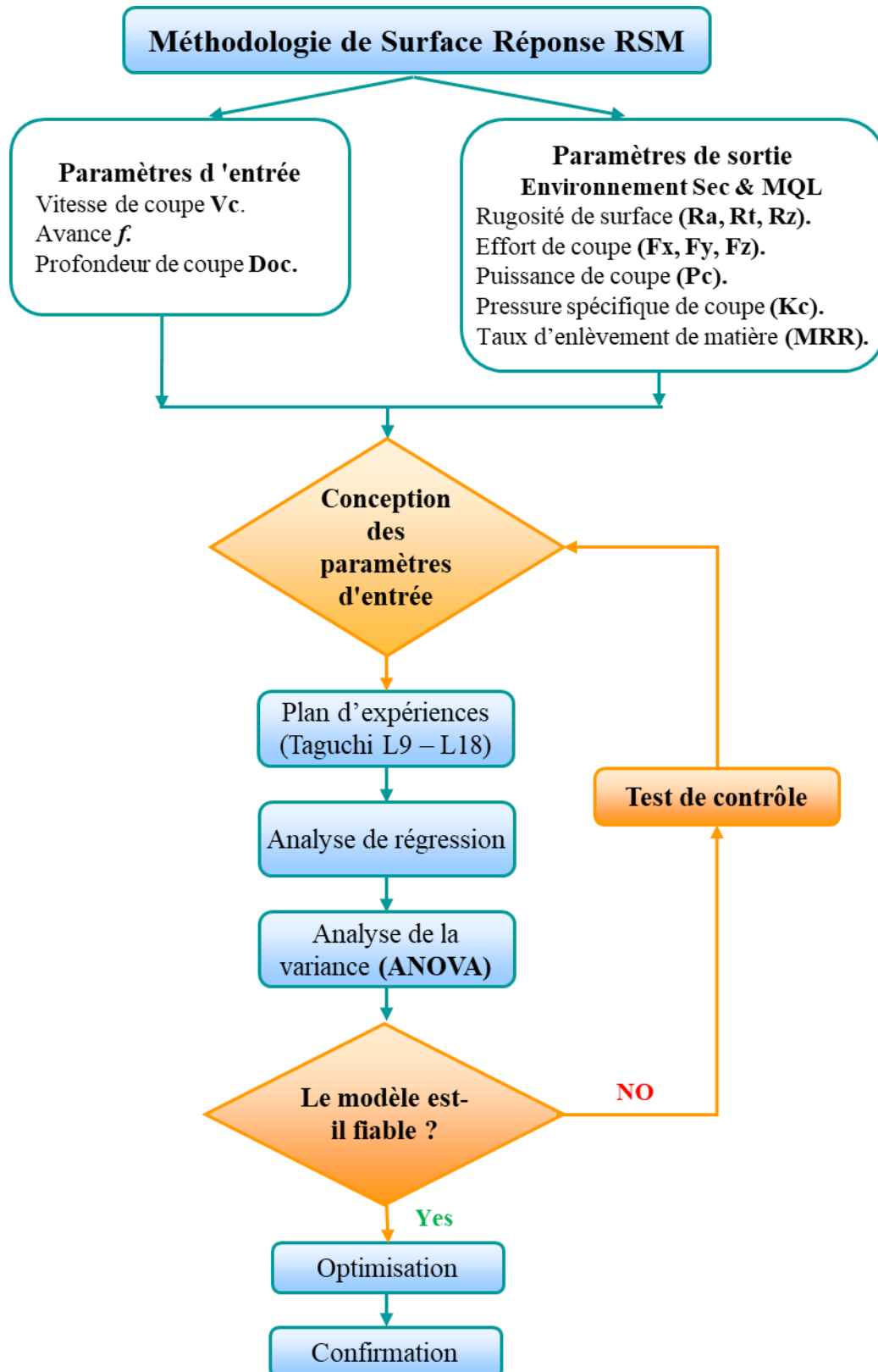


Figure II.17. Organigramme de la méthode RSM.

II.5.2. Analyse de la variance (ANOVA)

L'ANOVA est une méthode statistique standard qui permet d'examiner la relation entre une variable explicative (catégorielle) et une variable dépendante (quantitative) en testant si les différences observées entre les groupes sont significatives ou dues au hasard. En décomposant la variance totale, elle mesure la contribution de chaque facteur à la variabilité globale, facilitant ainsi l'identification de leur impact relatif sur la réponse étudiée. Ainsi, l'ANOVA constitue un outil essentiel pour comprendre et modéliser l'effet des variables explicatives sur une variable cible dans des contextes où la précision de l'inférence statistique est primordiale. Un tableau ANOVA regroupe toutes les informations indispensables pour analyser la variance. Il détaille pour chaque source de variation des indicateurs essentiels, notamment, les degrés de liberté (DF), la somme des carrés (SC), le carré moyen (MS), la statistique F et la valeur P de probabilité ainsi que la contribution en pourcentage (Cont. %) [ABB 25 et DJO 25].

- ✓ **Degrés de liberté (DF)** : ce nombre indique combien d'informations indépendantes sont utilisées pour estimer la variance pour chaque source. Par exemple, pour un facteur avec k niveaux, les degrés de liberté sont $k - 1$.
- ✓ **Somme des carrés (SC)** : cet indicateur mesure la quantité totale de variation attribuable à chaque source. La SS totale est ainsi décomposée en SS entre les groupes (due aux différences entre les moyennes des groupes) et SS à l'intérieur des groupes (due aux fluctuations aléatoires).

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.6})$$

- ✓ **Carré moyen (MS)** : c'est la somme des carrés divisée par les degrés de liberté correspondants.

$$MC = \frac{SC_i}{df_i} \quad (\text{II.7})$$

- ✓ **Statistique F** : ce rapport est obtenu en divisant le carré moyen d'une source (par exemple, celui du facteur) par le carré moyen de l'erreur. Une valeur F élevée suggère que la variance entre les groupes est supérieure à la variance au sein des groupes, ce qui peut indiquer un effet significatif du facteur.

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (\text{II.8})$$

- ✓ **Valeur P** : elle indique la probabilité d'observer une statistique F aussi extrême (ou plus) si l'hypothèse nulle était vraie (c'est-à-dire, s'il n'existait pas de différence réelle entre les groupes). Une valeur p inférieure à un seuil (souvent 0,05) permet de rejeter l'hypothèse nulle.

- ✓ **Pourcentage de contribution (Cont %)**

Le pourcentage de contribution d'un facteur permet d'évaluer l'importance relative de ce facteur dans l'explication de la variabilité totale. Il se calcule de la manière suivante

$$\textbf{Pourcentage de contribution} = \left(\frac{SC_f}{CS_T} \times 100 \right) \quad (\textbf{II.9})$$

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les équipements employés pour nos expériences d'usinage de l'acier AISI 52100, tant en conditions sec qu'avec une lubrification minimale (MQL). Nous avons également décrit les caractéristiques des matériaux de coupe et des pièces usinées, les instruments de mesure utilisés, ainsi que le choix des conditions de coupe. Une planification expérimentale a été mise en place afin d'évaluer le comportement du couple outil-matière en analysant divers paramètres technologiques. Le traitement des résultats, la modélisation ainsi que l'optimisation des performances seront présentées dans les chapitres suivants.

Introduction Générale

CHAPITRE I : Bibliographie : Tournage Dur, Micro-lubrification, et Optimisation

Chapitre II : Procédure Expérimental

Chapitre III : Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier AISI 52100 Lors de L'usinage à sec et MQL

III.1 Introduction

III.2 Essais paramétriques

III.3 Traitement statistique

III.3.1 Analyse de la variance (ANOVA)

III.3.2 Graphique des effets principaux

III.3.3 Modélisation des paramètres technologiques

III.3.4 Surface de réponse 3D

III.4 Optimisation multi-objective des conditions de coupe

III.5 Conclusion

Chapitre VI : Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier Traité AISI 52100 Lors de L'usinage à sec et MQL

CONCLUSION GENERALE

III.1. Introduction

Ce chapitre présente une étude comparative vise à déterminer la combinaison optimale des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) lors de l'usinage de l'acier faiblement allié non traité AISI 52100 avec un outil en carbure métallique (GC2015) revêtu en CVD ($\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$) dans deux environnements différents (à sec et MQL). Tout d'abord, des essais paramétriques ont été menés pour analyser l'impact des conditions de coupe sur les différents paramètres technologiques tels que (V_b , R_a , R_t , R_z , F_x , F_y , F_z , P_c et T°). Ensuite, ce travail inclut une étude statistique et modélisation des paramètres de performance à savoir (R_a , F_z , P_c , K_c et MRR) afin de proposer des modèles mathématiques prédictifs utilisant l'approche RSM et l'analyse ANOVA. Enfin, cinq méthodes d'optimisation multi-objectif ont été utilisées ; la fonction de désirabilité DF et quatre méthodes MCDM couplées avec l'approche Taguchi basée sur le rapport S/B, notamment GRA, EDAS, EAMR et FUCA.

III.2. Essais paramétriques sous environnement à sec et MQL

La première série est réservée aux essais paramétriques afin d'évaluer les paramètres de performance lors du tournage de l'acier AISI 52100 non traité dans un environnement de lubrification à sec et à quantité minimum de fluide de coupe connue sous le nom de MQL. Pour les conditions de coupe utilisées, la vitesse de coupe (V_c) a été variée trois fois à (220, 300, et 380) m/min. par contre l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p) ont été maintenues constantes à ($f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.4$ mm).

Dans le tableau III.1, les résultats des essais paramétriques sont consignés des différents paramètres technologiques mesurés à savoir ; les critères de rugosité (R_a , R_t et R_z), les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z), la température (T°), l'usure en dépouille (V_b) de la plaquette de coupe, et la puissance de coupe (P_c). Noter que les résultats mesurés sont la moyenne de trois mesures répétées du même essai.

Figure III.1 présente la micrographie obtenue par microscopie électronique à balayage (MEB) de la plaquette de coupe SNMG 120408. Cette image met en évidence la morphologie de l'outil de coupe en carbure métallique revêtue par dépôt en phase vapeur (CVD). Le revêtement se compose de trois couches successives : une couche supérieure de TiN, assurant une excellente adhérence et une résistance à l'usure ; une couche intermédiaire d' Al_2O_3 , renforçant la résistance thermique ; et une couche inférieure de TiCN, augmentant la dureté de l'outil. La figure présente également l'analyse de la composition chimique réalisée par EDS, qui révèle la distribution de chaque élément au sein des différentes couches de la zone E.

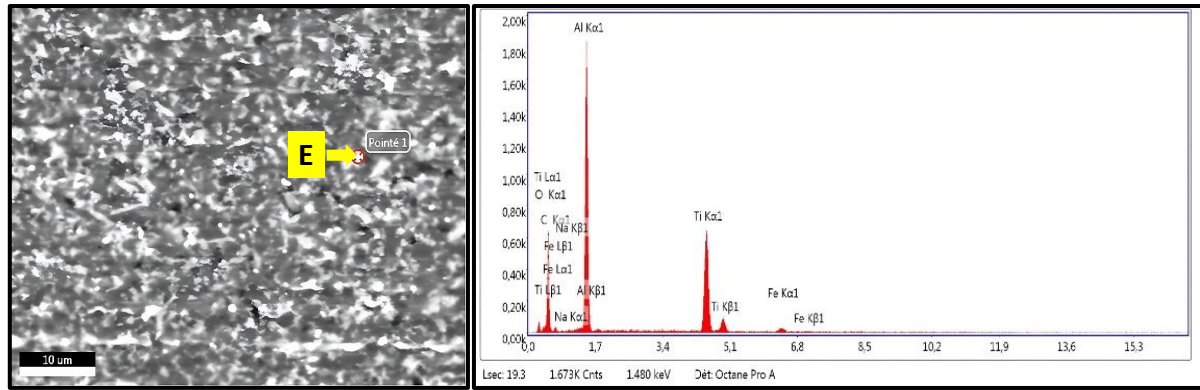


Figure III.1. Morphologie obtenue par (MEB) et spectre EDS de la face de coupe usée de plaquette (GC-2015) revêtue par CVD (zone E).

Tableau III.1. Résultats des essais paramétriques

		Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	t _{usinage} (s)	Vb (mm)	Vb _{max} (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Pc (W)	T (°C)
A sec	1	220	0.08	0.4	80	0.082	0.106	1.036	9.329	8.3	89.87	120.79	139.86	512.8	58
	2	300			60	0.062	0.077	1.024	6.762	6.251	77.79	123.4	136.51	682.5	37
	3	380			48	0.094	0.104	0.776	5.456	4.706	64.35	106.4	121.61	770.2	34
MQL	1	220			80	0.062	0.09	0.716	6.937	5.562	70.92	106	127.69	368.2	40
	2	300			60	0.053	0.061	0.747	5.326	4.048	65.94	107.82	123.91	619.5	35
	3	380			48	0.073	0.093	0.589	3.884	3.297	56.76	99.49	115.92	734.2	32

III.2.1. Evolution de l'usure (Vb)

L'usure de l'outil de coupe est un paramètre important à suivre lors de l'usinage des pièces mécaniques, car elle influe sur la qualité de surface, la précision dimensionnelle et sur le coût de l'opération d'usinage Yallese et al [YAL 07]. La figure III.2 présente la morphologie de l'usure (Vb) de la plaquette GC 2015, observée au microscope visuel Gage 250. L'analyse a été effectuée à trois vitesses de coupe différentes (220, 300 et 380 m/min) lors d'usinages à sec et MQL. Ces évaluations indiquent que l'usure (Vb) s'exhibe de façon régulière sous forme d'une bande. De plus, les observations réalisées au microscope électronique à balayage (MEB), illustrées à la figure III.3, mettent en évidence des différences marquées entre l'usinage à sec et avec MQL. En effet, l'usinage à sec entraîne fréquemment une usure caractérisée par des entailles et un écaillage. L'absence de refroidissement et de lubrification génère des températures très élevées, favorisant ainsi l'accumulation d'énergie mécanique et thermique, la formation d'arêtes usées et, par conséquent, le décollement prématuré du revêtement.

À l'inverse, l'application de MQL permet d'obtenir un micro-refroidissement et une lubrification qui modulent efficacement les contraintes thermiques et mécaniques. De ce fait,

l'usure V_b et $V_{b_{max}}$, dominée par des mécanismes abrasifs, est mieux contrôlée qu'en conditions d'usinage à sec. Par ailleurs, les gouttelettes d'huile, en plus de réduire la friction, contribuent à ralentir l'évolution rapide des défauts mécaniques à l'interface outil–copeaux. En comparant la morphologie de l'usure pour les deux modes de lubrification, on remarque que pour l'usinage avec MQL, des traces de brûlures de couleur noire apparaissent sur la surface en dépouille de la plaquette, notamment aux abords de la zone d'usure et ce pour les trois vitesses testées. Ces marques imputables à l'huile de lubrification combinée aux températures élevées générées par les frottements pendant le processus d'usinage. Des résultats et observations similaires ont d'ailleurs été rapportés par [HAM 22, HAM 24, DAS 21].

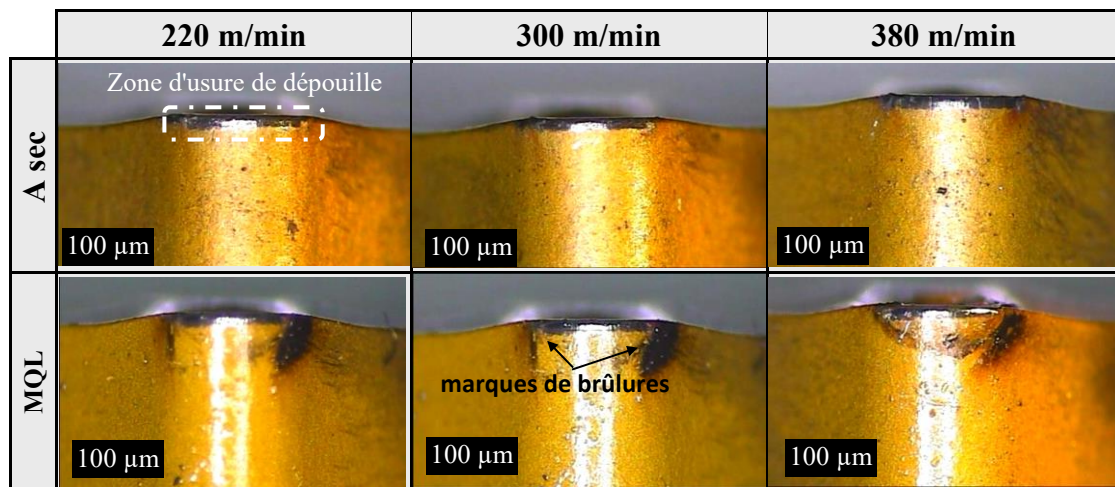


Figure III.2. Morphologie de l'usure V_b sous environnements à sec et MQL.

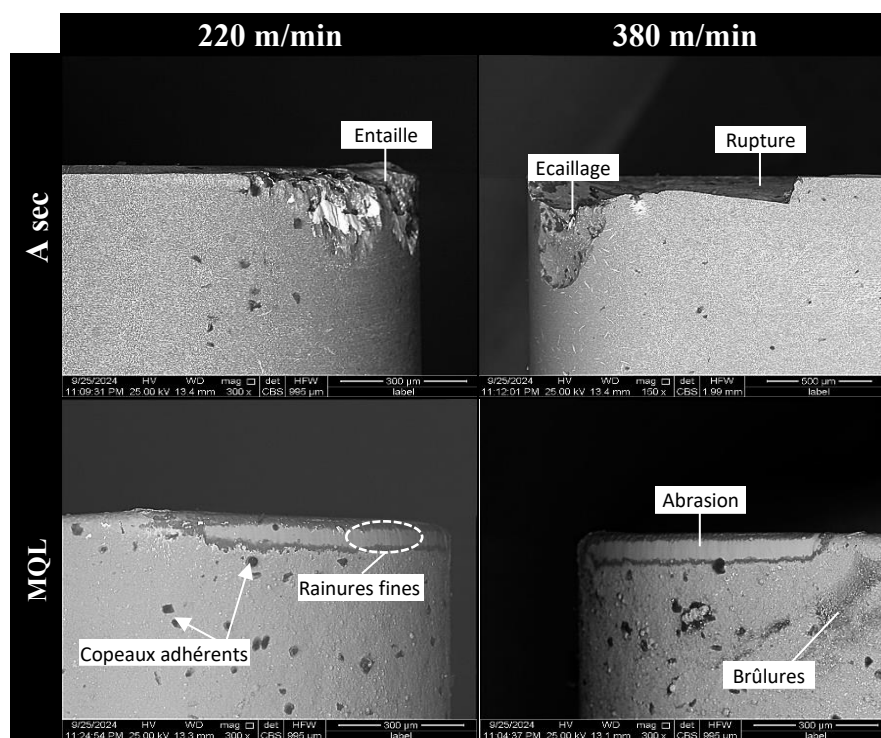


Figure III.3. Morphologie de l'usure de plaquette de coupe avec le MEB.

Pour visualiser de manière optimale l'usure (V_b et $V_{b_{max}}$) des plaquettes, des histogrammes de comparaison ont été tracés pour les deux modes de lubrification (figure III.4). On remarque tout d'abord que pour les trois vitesses utilisées (220, 300 et 380 m/min), l'usure (V_b et $V_{b_{max}}$) ont été réduite respectivement de (24.39%, 14.52% et 22.34%) pour V_b et (15.09%, 20.77% et 10.57%) pour $V_{b_{max}}$ lors de l'usinage avec MQL. L'usinage sous MQL permet d'obtenir un meilleur refroidissement grâce à l'air comprimé et une lubrification accrue par des gouttelettes d'huile, ce qui réduit à la fois la friction et la température et, par conséquent, l'usure des plaquettes. Des observations similaires sont rapportées par [MAR 16, MAR 18].

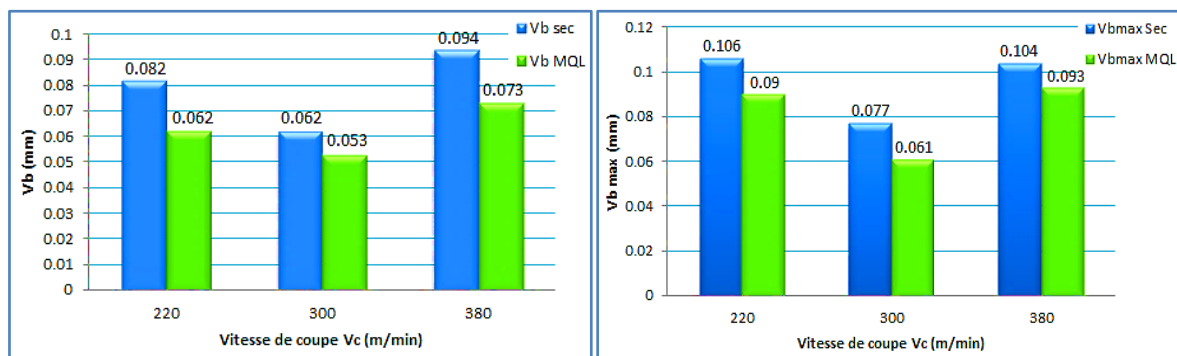


Figure III.4. Evolution de l'usure V_b et $V_{b_{max}}$ sous environnements à sec et MQL.

III.2.2. Evolution de la rugosité de surface (R_a , R_z , R_t)

La figure III.5 présente l'évolution des trois paramètres de rugosité de surface (R_a , R_z et R_t) en conditions d'usinage à sec et sous MQL, pour des vitesses de coupe de 220, 300 et 380 m/min. L'analyse met en évidence que la lubrification MQL réduit significativement les valeurs de R_a , R_z et R_t pour les trois vitesses considérées, respectivement de (30,9 %, 27,05 % et 24,1 %), (33 %, 35,24 % et 30 %) et (25,64 %, 21,23 % et 28,81 %). Les faibles valeurs obtenues sous MQL peuvent être attribuées à un meilleur contrôle et dégagement du copeau, favorisé par la pression combinée de l'air et de l'huile sur la surface usinée, améliorant ainsi la qualité de finition. De plus, la réduction de la température dans la zone de coupe limite l'usure de l'outil. Des observations similaires ont été rapportées par Maruda et al et [SHA 20 et MAW 22], confirmant l'efficacité du MQL pour l'amélioration de la rugosité de surface. Par ailleurs, les résultats révèlent une diminution de la rugosité avec l'augmentation de (V_c), due à l'adoucissement thermique du matériau à haute vitesse, ce qui réduit les efforts de coupe et atténue les vibrations de l'outil. Les résultats obtenus confirment ceux de la littérature existante lors de l'utilisation d'une lubrification MQL [SIV 18, SIV 20].

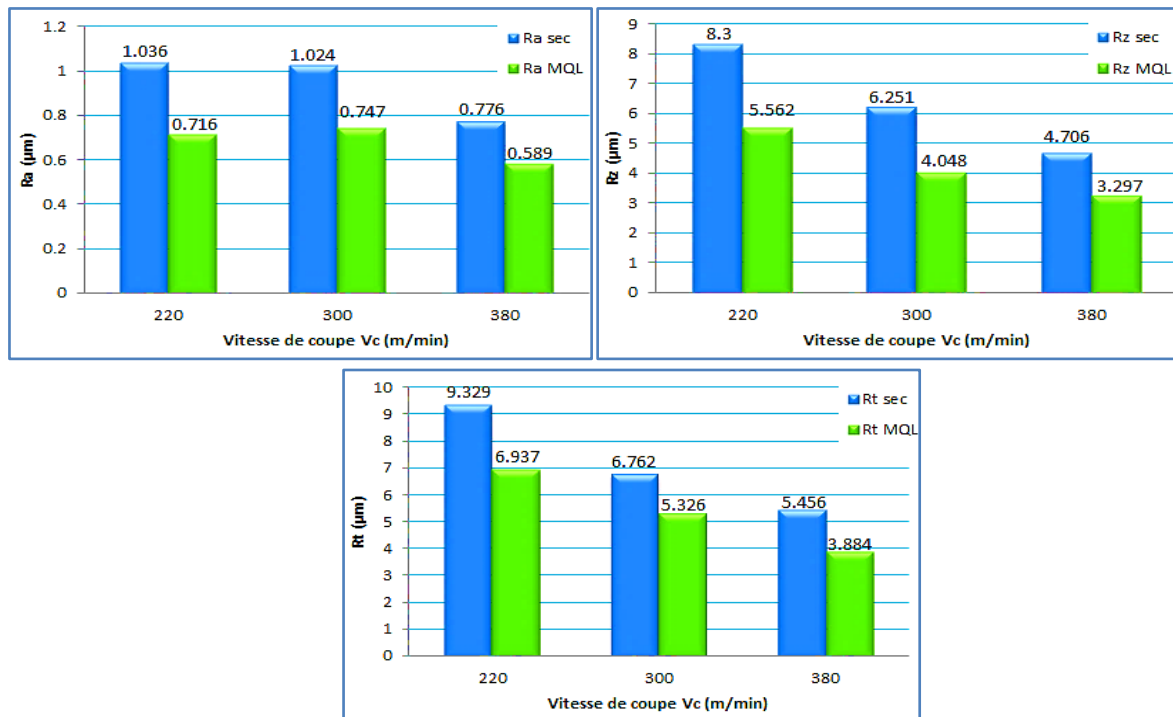


Figure III.5. Evolution de la rugosité de surface (Ra, Rz et Rt) à sec et MQL.

III.2.3. Evolution des efforts de coupe (F_x , F_y , F_z)

La figure III.6 illustre l'évolution des composants de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) en fonction des vitesses de coupe sous environnement à sec et MQL. Les résultats obtenus montrent une diminution importante des composantes (F_x , F_y et F_z) avec l'augmentation de (V_c). Cela peut s'expliquer d'une part par le fait que l'augmentation de (V_c) induit une augmentation de la température dans les zones des frottements et par conséquent les caractéristiques du matériau de la pièce diminuent ce qui facilite l'enlèvement de matière, ce phénomène a été expliqué dans la littérature par [CHI 21, et SHI 23]. D'autre part, une diminution de (F_x , F_y et F_z) a été enregistré lors de l'usinage MQL comparativement à l'usinage à sec pour les trois vitesses (220, 300 et 380) m/min de (21.08%, 11.37% et 11.79%), (12.24%, 12.62% et 6.4%) et (8.7%, 10.69% et 4.67%) respectivement. Cette diminution est due à l'effet de l'huile qui contribue à minimiser les frottements et facilite le glissement du copeau.

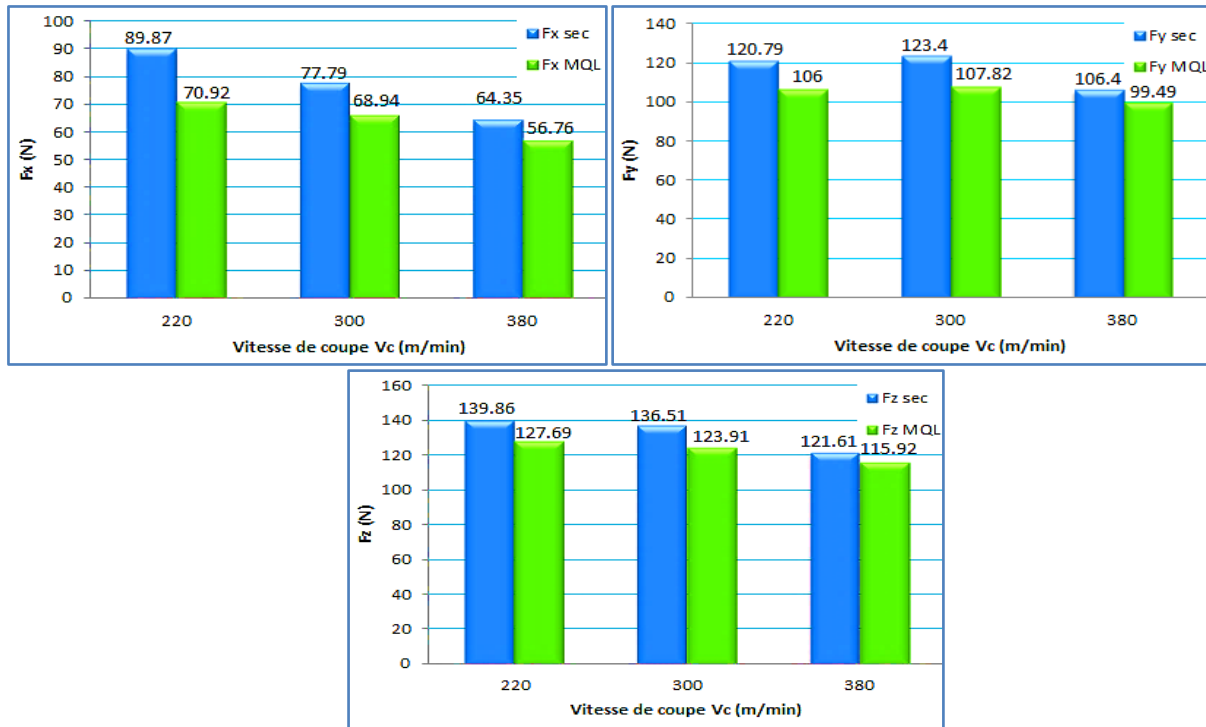


Figure III.6. Evolution des efforts (Fx, Fy et Fz) sous environnements à sec et MQL.

III.2.4. Evolution de la puissance de coupe (Pc)

L'évolution de la puissance (Pc) en fonction de (Vc) sous environnements à sec et MQL est illustrée sur la figure III.7. Les résultats obtenus indiquent une élévation de (Pc) quand (Vc) accuse une augmentation. Lorsque (Vc) varie entre (220, 300 et 380) m/min. (Pc) prend des valeurs de (512.82 et 368.19) W, (682.55 et 619.55) W et (770.19 et 734.16) W respectivement aux environnements sec et MQL. Une diminution de (28.2%, 9.2% et 4.67%) est atteinte lors de l'usinage MQL, elle s'explique par les avantages tribologiques et mécaniques [MAW 22].

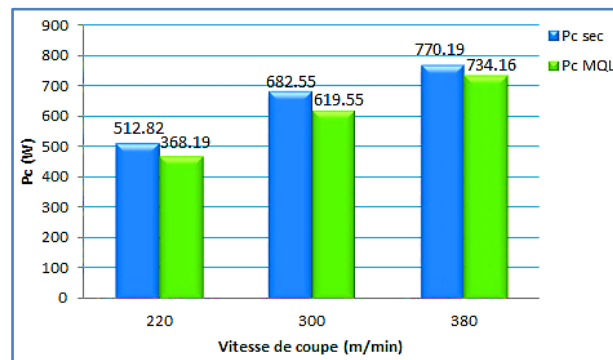


Figure III.7. Evolution de la puissance de coupe Pc sous environnements à sec et MQL.

III.2.5. Evolution de la température de coupe (T°)

La figure III.8 expose les résultats de la température maximale mesurée dans la zone de coupe sous environnement à sec et MQL pour les vitesses (220, 300 et 380) m/min. La

comparaison des résultats montre une diminution de la température en usinage MQL de (20, 16.28 et 18.42) % respectivement. Cela est dû au faible frottement entre (outil/pièce à usiner) et (copeau/surface d'attaque). Des résultats de même tendance ont été observés par [SHI 23 et QUY 19] concernant la diminution de la température dans la zone de coupe. De plus, une augmentation de V_c de 220 à 380 m/min entraîne une diminution de la température à des valeurs de 41.54% à sec et 40.38% pour l'usinage MQL. Ceci peut être expliqué par le temps d'usinage pour chaque vitesse de coupe. A $V_c = 220$ m/min le temps d'usinage est de 80 s par contre, à $V_c = 380$ m/min le temps d'usinage est de 48 s.

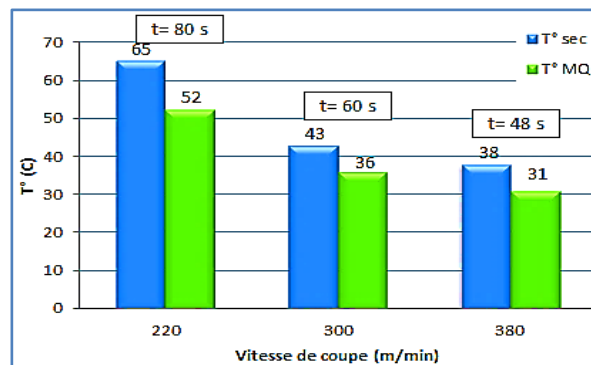


Figure III.8. Evolution de la température sous environnement à sec et MQL.

III.2.6. Formation des copeaux

Les figures III.9, III.10 et III.11 présentent la morphologie des copeaux issus de l'usinage à sec et MQL. On constate d'emblée que, dans les deux modes, la formation des copeaux conduit à une structure hélicoïdale en forme de rondelle. En outre, des dentelures régulières de grandes dimensions se dessinent aux extrémités des copeaux, bien que leur profondeur augmente avec la vitesse de coupe, quel que soit le mode de lubrification employé. Par ailleurs, les copeaux produits lors de l'usinage à sec se caractérisent par des dentelures larges, alors que ceux obtenus grâce à la technologie MQL exhibent des dentelures plus étroites. Cette différence s'explique probablement par l'injection simultanée d'huile de lubrification et d'air comprimé dans la zone de coupe, ce qui permet d'évacuer efficacement une grande quantité de chaleur. De plus, l'amélioration de la résistance au cisaillement du matériau de la pièce tend à limiter le glissement de cisaillement et par conséquent à atténuer la formation de dentelures sur l'arête du copeau [SAM 18 et KHA 15].

D'autre part, l'observation en bas de la figure III.11 révèle une agglomération de matière à la surface des copeaux, sans doute due à la présence de particules d'huile autour de la zone de coupe. Ainsi, la surface apparaît moins endommagée et plus rugueuse. Des constats analogues

ont été rapportés dans [DEM 23 et SWA 22]. Enfin, il est à noter que le copeau issu de l'usinage à sec conserve la teinte grise du matériau d'origine, tandis que celui obtenu par MQL présente des nuances brûlées allant du bleu au violet, conséquence du contact entre l'huile à haute pression et le copeau chaud.

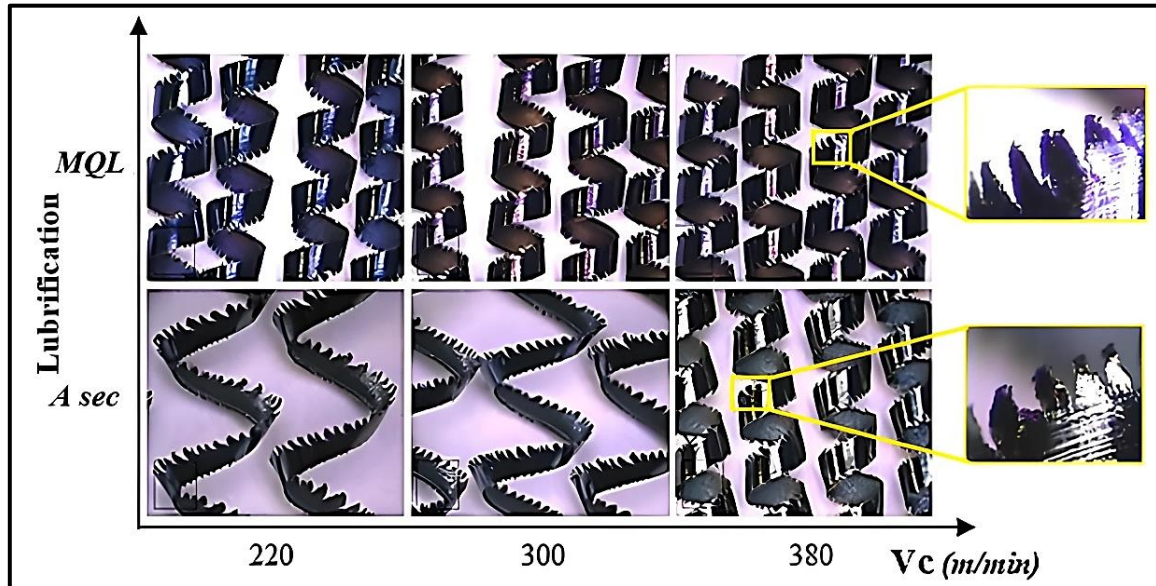


Figure III.9. Formes du copeau produit selon les deux modes de lubrification (à sec et MQL).

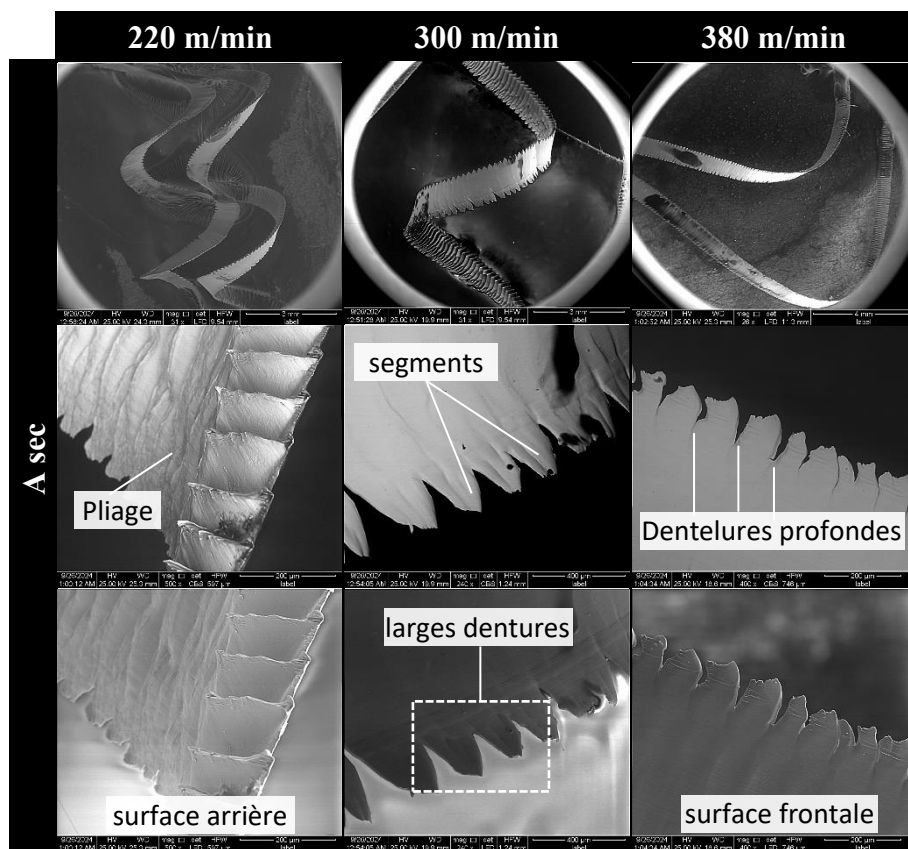


Figure III.10. Image MEB du copeau produit à différentes (V_c) à sec.

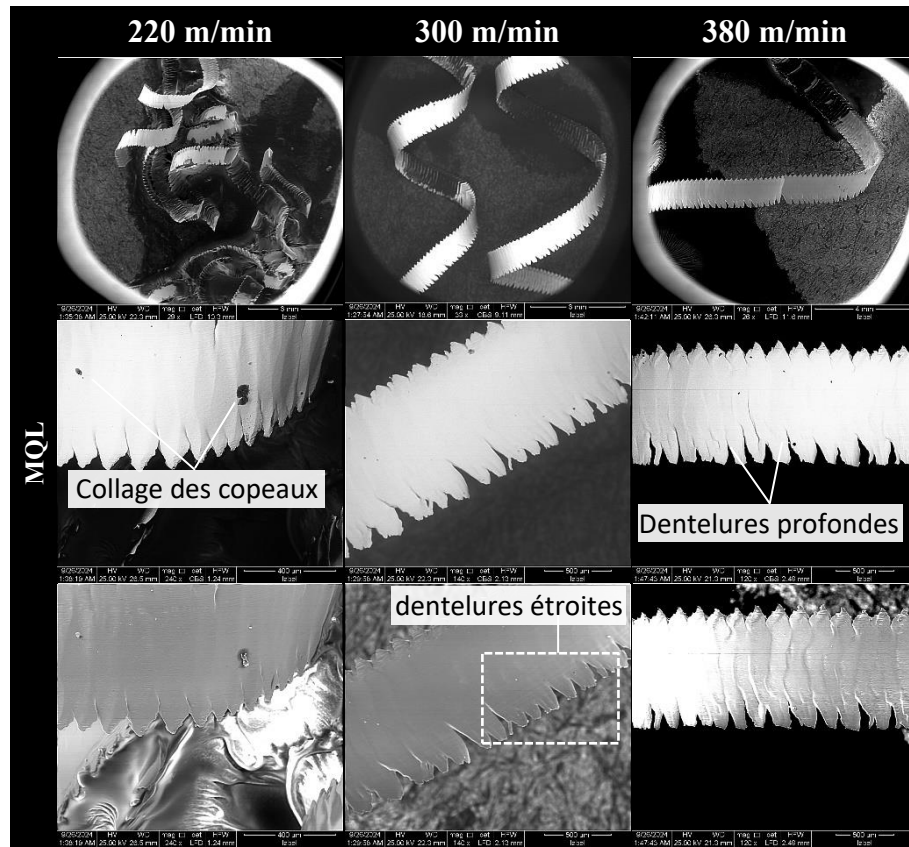


Figure III.11. Image MEB du copeau produit à différentes (V_c) avec MQL.

III.3. Traitement statistique du plan de Taguchi L9

Le tableau III.2 présente les résultats expérimentaux obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe lors de tournage de l'acier (AISI 52100) pour un usinage à sec et MQL. L'analyse des résultats de ce tableau montre que pour les différentes combinaisons du régime de coupe les valeurs de l'effort de coupe (F_z) varient respectivement selon les intervalles [60.95-230.43] N et [56.8-219.85] N pour l'usinage à sec et MQL. Le critère de rugosité (R_a) varie dans les intervalles [0.929-1.411] μm et [0.546-1.27] μm . Pour la puissance de coupe (P_c) et la pression de coupe (K_c) elles varient selon les intervalles [203.17-784.3] W et [189.93-753.13] W et [3200.42-5079.17] MPa et [2829.7-4748.33] MPa respectivement pour l'usinage à sec et MQL. Finalement, les valeurs des taux d'enlèvement de matière (MRR) sont les mêmes et varient selon l'intervalle [2.4–14.4] mm^3/min .

Tableau III.2 Résultats des essais pour le plan de Taguchi L₉

N° d'essai	Paramètre d'entrée			Paramètre de sortie								
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra _{sec} (μm)	Ra _{MQL} (μm)	Fz _{sec} (N)	Fz _{MQL} (N)	Pc _{sec} (W)	Pc _{MQL} (W)	Kc _{sec} (MPa)	Kc _{MQL} (MPa)	MRR (cm ³ /min)
1	200	0.08	0.15	0.929	0.749	60.95	56.8	203.17	189.93	5079.17	4748.33	2.4
2	200	0.12	0.30	1.177	0.993	136.41	130.39	454.7	434.63	3789.17	3621.94	7.2
3	200	0.16	0.45	1.411	1.269	230.43	219.85	768.1	732.83	3200.42	3053.47	14.4
4	250	0.08	0.30	0.890	0.592	106.08	99.58	442	414.92	4420.00	4149.17	6
5	250	0.12	0.45	1.018	0.771	185.29	180.75	772.04	753.13	3431.30	3347.22	13.5
6	250	0.16	0.15	1.393	1.234	99.54	93.29	414.75	388.71	4147.50	3887.08	6
7	300	0.08	0.45	0.788	0.546	140.2	121.2	700.6	606	3892.22	3366.67	10.8
8	300	0.12	0.15	0.935	0.753	79.45	60.25	397.25	301.25	4413.89	3347.22	5.4
9	300	0.16	0.30	1.330	1.231	156.86	135.83	784.3	679.15	3267.92	2829.79	14.4

III.3.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra, Fz, Pc et Kc)

L'ANOVA a été adoptée pour déterminer l'impact des différents facteurs et interactions sur la rugosité de surface (Ra), l'effort (Fz), la pression spécifique (Kc) et la puissance de coupe (Pc). Les résultats ont été présentés dans un tableau qui indique les valeurs des degrés de liberté (DL), la somme des carrés (SS), les carrés moyens (MS) et la contribution en pourcentage. La valeur de la probabilité (p) a été utilisée pour évaluer la signification des différents facteurs d'entrées sur les sorties. Les facteurs où la valeur de p est inférieure à 0.05 sont considérées comme ayant un impact significatif sur les paramètres de sorties. Au-delà de la valeur de 0.05, les facteurs et les interactions ne sont pas significatifs. Le tableau III.3 illustre les résultats de l'ANOVA pour le paramètre (Ra) lors de l'usinage à sec et MQL. L'analyse des résultats montre que l'avance (*f*) est le seul facteur signifiant sur la variation de (Ra) avec une contribution de 87.15% durant l'usinage à sec et 85.83% pour l'usinage MQL. Les paramètres (Vc) et (ap) ne sont pas significatifs car leur valeur de probabilité p est supérieure à 0.05. Le deuxième pourcentage de contribution enregistré est celui de (Vc) avec des valeurs de (8.05% et 7.15%) respectivement pour l'usinage à sec et MQL. Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux issus de la littérature concernant l'impact de l'avance (*f*) sur la rugosité (Ra) [KHE 23, MAK 21, SAF 21].

Tableau III.3. ANOVA pour (Ra)

Usinage à sec							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	6	0.432183	96.92%	0.432183	0.072031	10.47	0.090
Linéaires	3	0.424771	95.25%	0.319189	0.106396	15.47	0.061
Vc	1	0.035883	8.05%	0.017487	0.017487	2.54	0.252
<i>f</i>	1	0.388621	87.15%	0.205590	0.205590	29.89	0.032
ap	1	0.000267	0.06%	0.000132	0.000132	0.02	0.902
Interaction à 2 facteurs	3	0.007412	1.66%	0.007412	0.002471	0.36	0.793
Vc* <i>f</i>	1	0.000640	0.14%	0.000001	0.000001	0.00	0.992
Vc*ap	1	0.006687	1.50%	0.003001	0.003001	0.44	0.577
<i>f</i> *ap	1	0.000086	0.02%	0.000086	0.000086	0.01	0.921
Erreur	2	0.013756	3.08%	0.013756	0.006878		
Total	8	0.445940	100.00%				

Usinage avec MQL							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	6	0.713533	97.64%	0.713533	0.118922	13.77	0.069
Linéaires	3	0.679683	93.01%	0.562053	0.187351	21.70	0.044
Vc	1	0.052267	7.15%	0.030402	0.030402	3.52	0.201
<i>f</i>	1	0.627267	85.83%	0.368672	0.368672	42.70	0.023
ap	1	0.000150	0.02%	0.002834	0.002834	0.33	0.625
Interaction à 2 facteurs	3	0.033850	4.63%	0.033850	0.011283	1.31	0.461
Vc* <i>f</i>	1	0.001690	0.23%	0.003621	0.003621	0.42	0.584
Vc*ap	1	0.031208	4.27%	0.012343	0.012343	1.43	0.354
<i>f</i> *ap	1	0.000952	0.13%	0.000952	0.000952	0.11	0.771
Erreur	2	0.017267	2.36%	0.017267	0.008633		
Total	8	0.730800	100.00%				

Le tableau III.4 illustre les résultats de l'ANOVA pour (Fz) lors de l'usinage à sec et MQL. Il est clair que pour l'usinage à sec, les facteurs (ap, *f* et Vc) sont significatifs avec des contributions de (73.07%, 23.64% et 1.93%). Par contre, pour l'usinage MQL, seuls les paramètres (Vc) et (*f*) sont significatifs avec des contributions respectives de 71.28% et 21.56%. Pour l'usinage à sec, les interactions (Vc *ap) et (*f**ap) sont significatives. Pour les deux environnements de lubrifications, (ap) est le facteur le plus dominant suivi par l'avance (*f*). Plus la section (ap**f*) du copeau augmente, plus l'usinage demande un effort (Fz) important pour enlever le copeau. Des explications semblables sont mentionnées dans la littérature [SAF 21 et CHI 21].

Tableau III.4. ANOVA pour l'effort (Fz)

Usinage à sec							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	6	22758.9	99.99%	22758.9	3793.15	3350.07	0.000
Linéaires	3	22452.6	98.64%	14275.2	4758.39	4202.56	0.000
Vc	1	439.6	1.93%	48.7	48.73	43.04	0.022
<i>f</i>	1	5380.8	23.64%	2024.1	2024.05	1787.62	0.001
ap	1	16632.1	73.07%	7335.5	7335.51	6478.66	0.000
Interaction à 2 facteurs	3	306.3	1.35%	306.3	102.10	90.17	0.011
Vc* <i>f</i>	1	10.9	0.05%	0.2	0.21	0.19	0.708
Vc*ap	1	211.1	0.93%	22.1	22.15	19.56	0.048
<i>f</i> *ap	1	84.3	0.37%	84.3	84.35	74.50	0.013
Erreur	2	2.3	0.01%	2.3	1.13		
Total	8	22761.1	100.00%				

Usinage avec MQL							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	6	22583.8	99.68%	22583.8	3763.97	104.15	0.010
Linéaires	3	22382.9	98.79%	14153.3	4717.76	130.55	0.008
Vc	1	1348.2	5.95%	538.4	538.40	14.90	0.061
<i>f</i>	1	4885.5	21.56%	1561.7	1561.72	43.22	0.022
ap	1	16149.2	71.28%	7868.6	7868.60	217.74	0.005
Interaction à 2 facteurs	3	200.9	0.89%	200.9	66.97	1.85	0.369
Vc* <i>f</i>	1	21.9	0.10%	38.4	38.44	1.06	0.411
Vc*ap	1	176.9	0.78%	80.1	80.12	2.22	0.275
<i>f</i> *ap	1	2.1	0.01%	2.1	2.09	0.06	0.833
Erreur	2	72.3	0.32%	72.3	36.14		
Total	8	22656.1	100.00%				

Le tableau III.5 illustre l'ANOVA pour la pression (Kc) lors de l'usinage à sec et MQL. Les résultats indiquent que pour l'usinage à sec, les facteurs (ap) et (*f*) ont le plus grand effet sur (Kc) avec des contributions respectives de (52.65 % et 41.76 %). Par contre, pour l'usinage MQL, les contributions des facteurs (*f*, ap et Vc) sont (37.32, 29.45 et 21.21) % respectivement. L'ANOVA pour (Pc) lors de l'usinage à sec et avec MQL est indiquée au tableau III.6. L'analyse des résultats montre que le facteur (Doc) est le plus important qui affecte (Pc) pour les deux environnements, avec des contributions de 70.1% (à sec) et de 76.24% (à MQL). L'avance (*f*) vient en deuxième position avec une contribution de 18.02% (à sec) et 18.06% (MQL). Le troisième facteur affectant (Pc), durant l'usinage à sec, est la vitesse de coupe (Vc) qui a une contribution de 9.71%. Par ailleurs, lors de l'usinage à sec les interactions (Vc**f*) et

($f \cdot ap$) sont significantes avec des contributions de (1.94%, 0.2%) respectivement. Des résultats similaires de l'impact des facteurs (V_c , f et ap) sur l'évolution de (P_c) ont été rapportés par beaucoup des chercheurs Yallese et al [YAL 07, CHI 21 et SAF 21].

Tableau III.5. ANOVA pour (K_c)

Usinage à sec							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	6	3010629	97.92%	3010629	501771	15.70	0.061
Linéaires	3	2943630	95.74%	2304330	768110	24.03	0.040
V_c	1	40792	1.33%	152	152	0.00	0.951
f	1	1283951	41.76%	401459	401459	12.56	0.071
ap	1	1618887	52.65%	1071011	1071011	33.51	0.029
Interaction à 2 facteurs	3	66999	2.18%	66999	22333	0.70	0.634
$V_c \cdot f$	1	36934	1.20%	66436	66436	2.08	0.286
$V_c \cdot ap$	1	3931	0.13%	23871	23871	0.75	0.479
$f \cdot ap$	1	26134	0.85%	26134	26134	0.82	0.461
Erreur	2	63928	2.08%	63928	31964		
Total	8	3074557	100.00%				

Usinage avec MQL							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	6	2550942	91.86%	2550942	425157	3.76	0.225
Linéaires	3	2443542	87.99%	1512949	504316	4.46	0.189
V_c	1	589110	21.21%	344331	344331	3.05	0.223
f	1	1036523	37.32%	306498	306498	2.71	0.241
ap	1	817909	29.45%	357778	357778	3.16	0.217
Interaction à 2 facteurs	3	107400	3.87%	107400	35800	0.32	0.817
$V_c \cdot f$	1	1014	0.04%	0	0	0.00	1.000
$V_c \cdot ap$	1	95257	3.43%	25509	25509	0.23	0.682
$f \cdot ap$	1	11129	0.40%	11129	11129	0.10	0.783
Erreur	2	226094	8.14%	226094	113047		
Total	8	2777035	100.00%				

Tableau III.6. ANOVA pour (P_c)

Usinage à sec							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	6	357027	99.98%	357027	59505	1825.62	0.001
Linéaires	3	349376	97.84%	292302	97434	2989.31	0.000
V_c	1	34684	9.71%	20550	20550	630.47	0.002
f	1	64353	18.02%	32358	32358	992.74	0.001
ap	1	250339	70.10%	130082	130082	3990.95	0.000
Interaction à 2 facteurs	3	7652	2.14%	7652	2551	78.25	0.013

Vc*f	1	6923	1.94%	1571	1571	48.19	0.020
Vc*ap	1	6	0.00%	260	260	7.97	0.106
f*ap	1	723	0.20%	723	723	22.18	0.042
Erreur	2	65	0.02%	65	33		
Total	8	357092	100.00%				

Usinage avec MQL							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	6	319102	99.36%	319102	53184	51.81	0.019
Linéaires	3	311577	97.02%	260042	86681	84.44	0.012
Vc	1	8740	2.72%	2979	2979	2.90	0.231
f	1	57986	18.06%	24121	24121	23.50	0.040
ap	1	244851	76.24%	141335	141335	137.68	0.007
Interaction à 2 facteurs	3	7525	2.34%	7525	2508	2.44	0.304
Vc*f	1	7429	2.31%	4208	4208	4.10	0.180
Vc*ap	1	2	0.00%	28	28	0.03	0.884
f*ap	1	94	0.03%	94	94	0.09	0.791
Erreur	2	2053	0.64%	2053	1027		
Total	8	321155	100.00%				

III.3.2. Graphique des effets principaux

Les courbes des effets principaux tracées dans la figure III.12 et 13 montrent l'impact des paramètres de coupe représentés par (Vc, f et ap) sur les paramètres technologiques (Ra, Fz, Kc et Pc) pour les deux environnements d'usinage. Les effets principaux de (Ra) sont présentés sur la figure III.12.a et b. On observe que l'avance (f) a le plus grand impact sur la variation de (Ra). En effet, son augmentation induit une élévation de (Ra). Le deuxième facteur qui affecte (Ra) est (Vc) dont l'augmentation provoque une diminution de (Ra). Enfin, l'impact de (ap) est quasiment négligeable pour les deux environnements d'usinage à sec et MQL.

La figure III.12.c et d présente les effets principaux de l'effort (Fz). Il apparaît clairement que (ap) affecte fortement l'effort (Fz) pour les deux environnements (à sec et MQL) car elle possède la plus grande pente. Elle est suivie par (f), puis (Vc). Aussi, on constate que l'augmentation de ces deux facteurs (ap) et (f) entraîne une élévation de (Fz). Cependant, l'augmentation de (Vc) induit une diminution de l'effort (Fz). Concernant le paramètre (Kc) les graphes des effets principaux sont illustrés sur la figure III.13.e et f. On remarque que (ap) est le facteur ayant le plus grand effet sur (Kc) pour l'usinage à sec, suivi de près par (f). Pour (Vc) son effet est presque négligeable. Par contre, pour l'usinage MQL le facteur le plus influant sur l'évolution de (Kc) est l'avance (f) suivie par (ap) et finalement (Vc). Donc on peut dire que l'augmentation de tous ses facteurs (Vc, f , et ap) induit une diminution de (Kc) pour les deux

modes d'usinage à sec et MQL. La figure III.13.g et h présente les graphes des effets principaux pour (Pc). L'analyse montre que (ap) a l'effet le plus important, suivi de l'avance (f) puis (V_c). Ainsi, accroître des facteurs (f , ap et V_c) conduit à une hausse de (Pc). Tous ces résultats sont en bonne concordance avec les résultats de l'ANOVA.

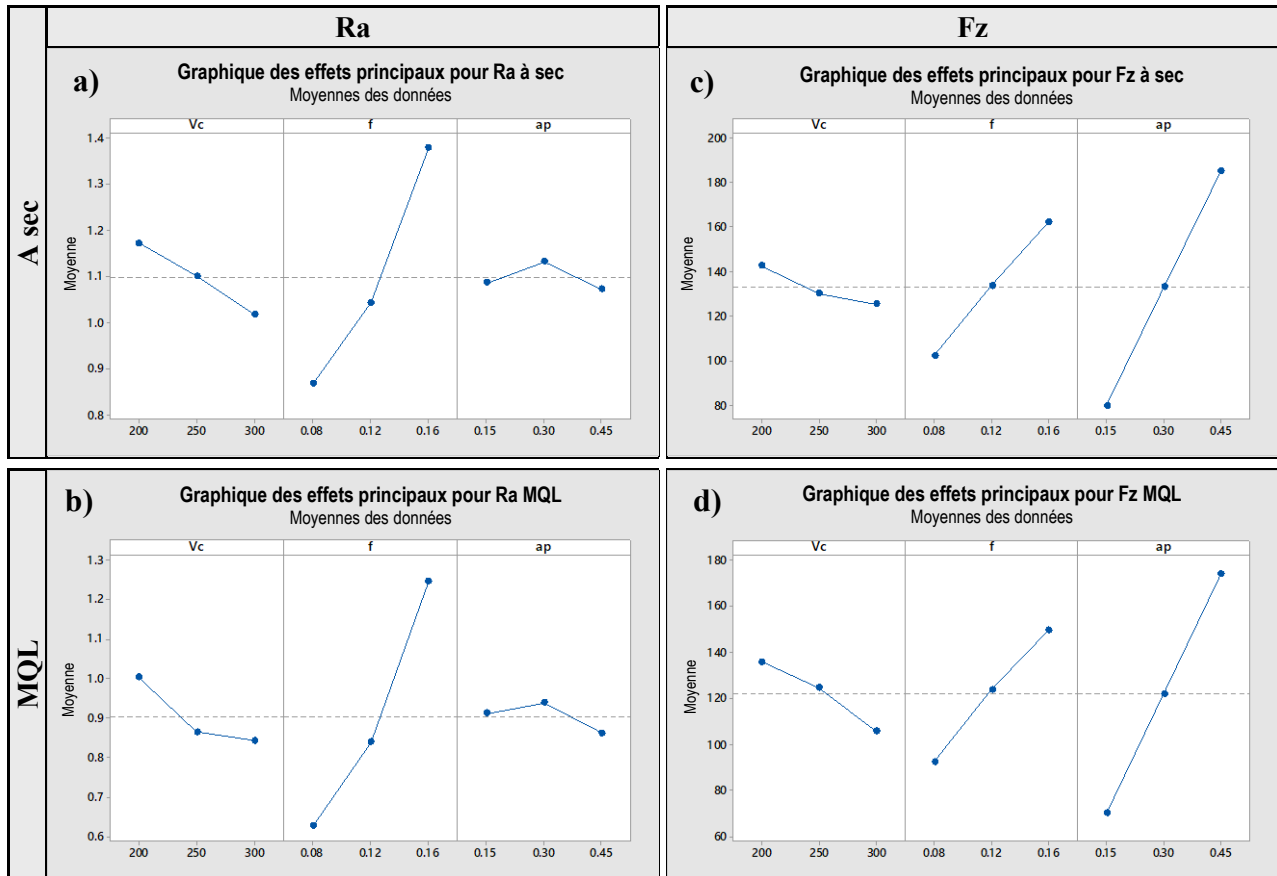
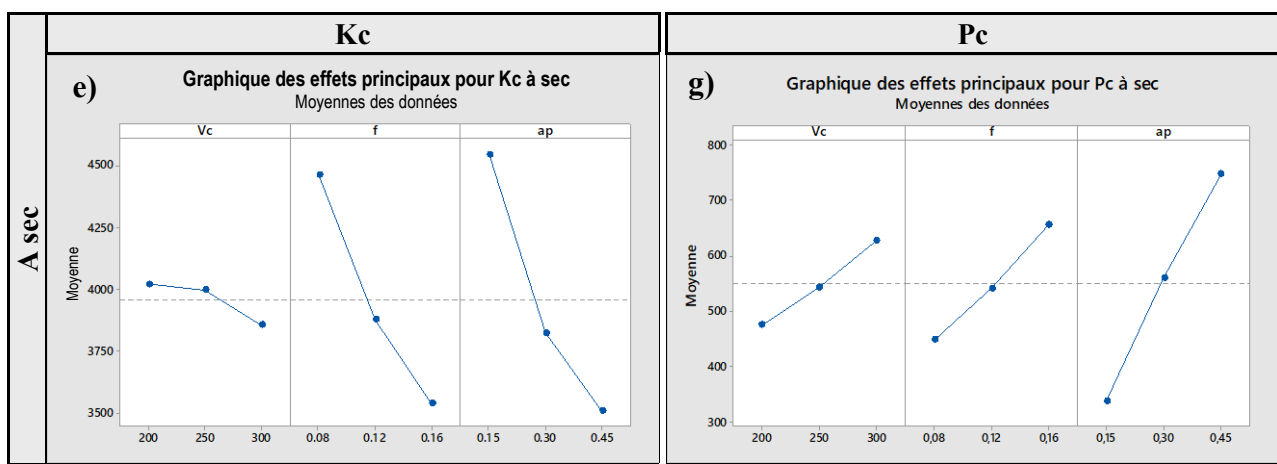


Figure III.12. Graphique des effets principaux pour Ra et Fz lors de l'usinage à sec et MQL.



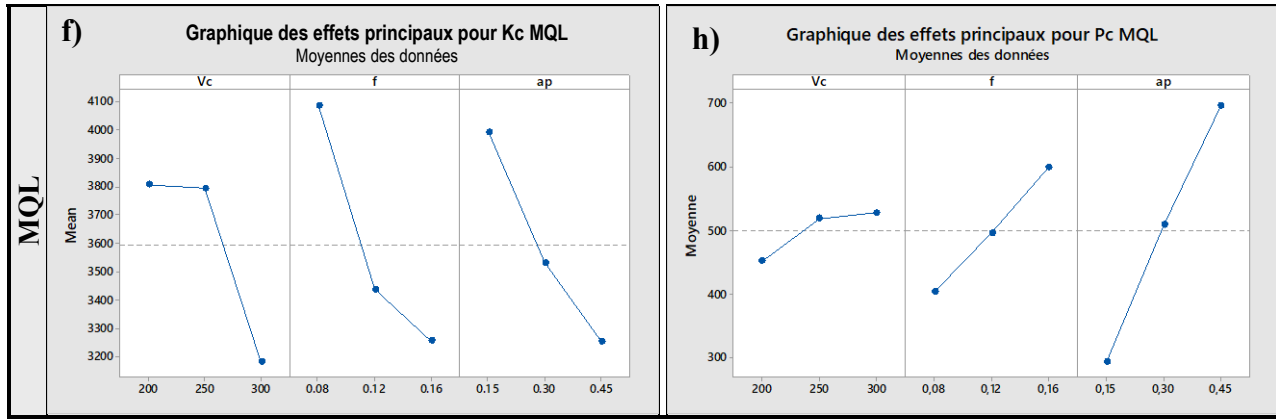


Figure III.13. Graphique des effets principaux pour Pc et Kc lors de l'usinage à sec et MQL.

III.3.3. Modélisation des paramètres technologiques

La modélisation des paramètres de performance en usinage revêt un intérêt majeur, car elle permet d'effectuer des prédictions fiables [KHE 23]. Les relations liant les variables d'entrée (V_c , f et a_p) aux réponses étudiées (R_a , F_z , K_c et P_c) pour l'usinage à sec et sous MQL de l'acier AISI 52100 ont été représentées au moyen de modèles linéaires incluant termes d'interaction. Les équations de régression obtenues pour ces paramètres de sortie, accompagnées de leurs coefficients de détermination (R^2), sont présentées aux équations (III.1) à (III.8).

$$Ra_{Sec} = 1.122 - 0.00361V_c + 7.53f - 1.57a_p - 0.0004V_c \times f + 0.0068V_c \times a_p - 1.4f \times a_p \quad (R^2 = 96.92\%) \quad \text{(III.1)}$$

$$Ra_{MQL} = 1.147 - 0.00362V_c + 10.42f - 5.31a_p - 0.0169V_c \times f + 0.0154V_c \times a_p + 9.8f \times a_p \quad (R^2 = 97.44\%) \quad \text{(III.2)}$$

$$Fz_{Sec} = -20.9 + 0.0626V_c + 216f + 327.6a_p + 0.213V_c \times f - 0.581V_c \times a_p + 1417f \times a_p \quad (R^2 = 99.99\%) \quad \text{(III.3)}$$

$$Fz_{MQL} = 22.2 - 0.299V_c - 175f + 614a_p + 2.87V_c \times f - 1.105V_c \times a_p + 223f \times a_p \quad (R^2 = 99.68\%) \quad \text{(III.4)}$$

$$Kc_{Sec} = 5198 + 8.44V_c + 12569f - 12020a_p - 119.3V_c \times f + 19.1V_c \times a_p + 24945f \times a_p \quad (R^2 = 97.92\%) \quad \text{(III.5)}$$

$$Kc_{MQL} = 8062 - 13.2V_c - 3667f - 5437a_p + 0V_c \times f + 19.7V_c \times a_p - 16278f \times a_p \quad (R^2 = 91.86\%) \quad \text{(III.6)}$$

$$Pc_{Sec} = 176.9 - 1.029V_c - 3056f + 48a_p + 18.35V_c \times f + 1.990V_c \times a_p + 4149f \times a_p \quad (R^2 = 99.98\%) \quad \text{(III.7)}$$

$$Pc_{MQL} = 378 - 2.73V_c - 4663f + 1889a_p + 30.0V_c \times f - 0.65V_c \times a_p - 1493f \times a_p \quad (R^2 = 99.36\%) \quad \text{(III.8)}$$

Tous les modèles trouvés sont précis et possèdent à (R^2) qui varie entre (96.92 et 99.99) % pour l'usinage à sec et de (91.86 à 99.68) % pour l'usinage MQL. La figure III.14 montre que les valeurs prédites obtenues à partir des équations de régression (III.1 à III.8) et les valeurs expérimentales de tous les paramètres technologiques sont très proches dans les deux environnements de lubrification (à sec et MQL).



Figure III.14. Comparaison des valeurs mesurées et prédites de (Ra, Fz, Kc et Pc) lors de l'usinage à sec et MQL.

III.3.4. Surface de réponse 3D pour (Ra, Fz, Pc et Kc)

La figure III.15 présente les graphes 3D de la surface de réponse et les contours en 2D de (Ra) en fonction des combinaisons des paramètres de coupe (V_c et f), (V_c et a_p) et (f et a_p) durant l'usinage à sec et MQL. La tendance des courbes est presque la même pour les deux modes étudiés. La figure III.15.a et b illustrent les surfaces de réponse de (Ra) en fonction de la variation des facteurs (V_c et f). On remarque que l'augmentation de (f) induit une élévation de (Ra) par contre, (V_c) n'a presque pas d'effet sur (Ra). La meilleure rugosité de surface (Ra) est atteinte en utilisant une valeur minimum de (f) et une valeur maximum de (V_c) pour les deux environnements (à sec et MQL). La figure III.15.c et d présente les surfaces de réponse de (Ra) en fonction de la variation (V_c , a_p). Il est clair que les deux facteurs (a_p) et (V_c) induisent une légère diminution de (Ra). Les résultats obtenus de (Ra) pour la combinaison des facteurs (f et a_p) (figure III.15.e et f), montrent que l'influence de l'avance (f) est prédominante comparativement à (a_p). Les résultats trouvés sont en parfaite concordances avec ceux de L'ANOVA. Les résultats obtenus pour l'effort (Fz) sont illustrés sur la figure III.16 pour les deux modes à sec et MQL. Les figures III.16.a et b montrent les surfaces de réponse de (Fz) en fonction de (V_c et f). On observe que l'augmentation de (f) provoque une hausse nette de (Fz), tandis qu'une augmentation de (V_c) entraîne une légère baisse de cette composante d'effort. En conséquence, la valeur minimale de (Fz) est atteinte en combinant la plus faible avance avec la plus grande (V_c), pour les conditions d'usinage à sec comme pour le MQL. Les figures III.16c et d, qui montrent (Fz) en fonction de (V_c et a_p), mettent en évidence que (a_p) exerce l'influence la plus importante sur (Fz), tandis que (V_c) continue d'afficher un effet légèrement atténuant. Enfin, les figures III.16e et f illustrent l'évolution de (Fz) en fonction de (f et a_p), (Fz) croît lorsque (a_p) et (f) augmente, ce qui s'explique par l'accroissement de la section de copeau à enlever. Dans ce cas, l'influence du facteur (a_p) est prépondérante par rapport à (f). De plus, on constate que l'usinage avec MQL a un effet significatif sur la réduction de (Fz). Les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec la littérature [PAT 22, KOU 22].

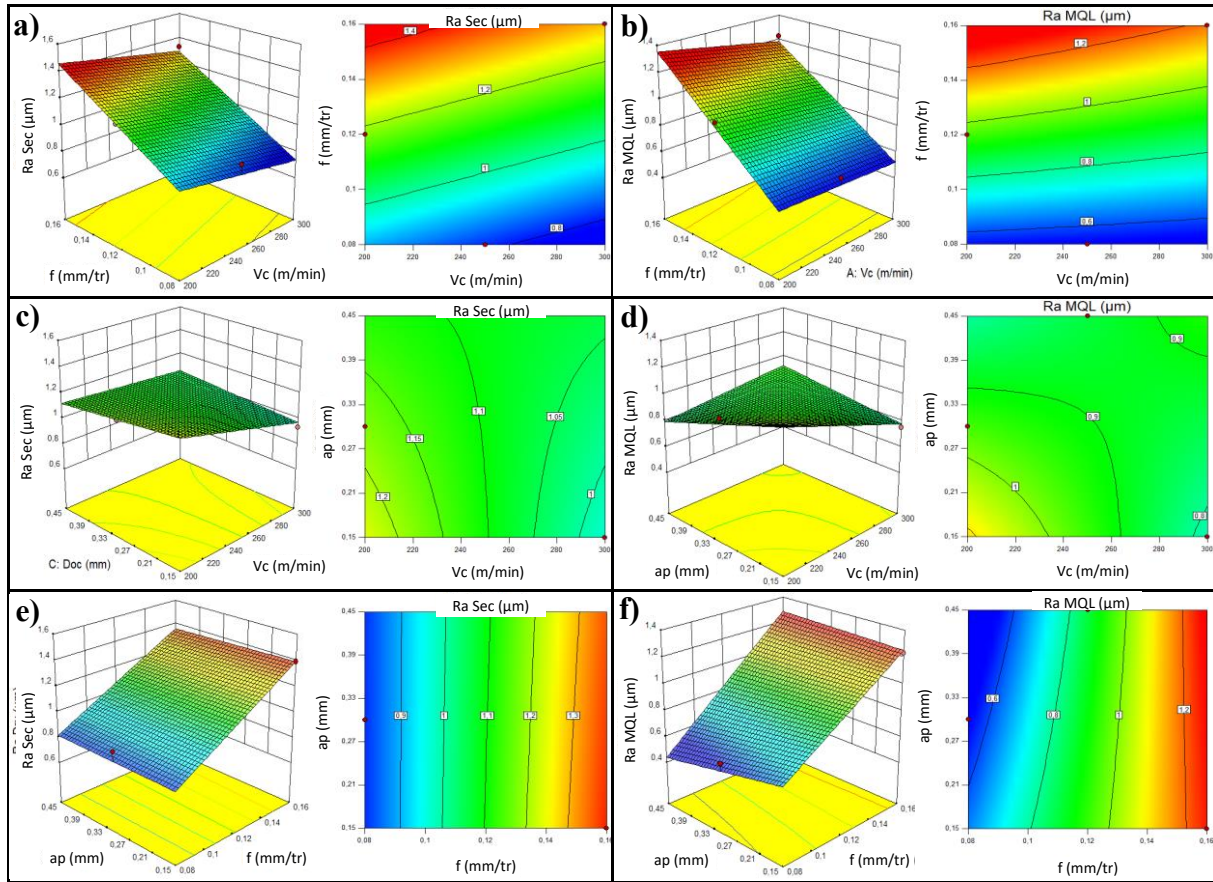


Figure III.15. Surfaces de réponse et les contours de (Ra) lors de l'usinage à sec et MQL.

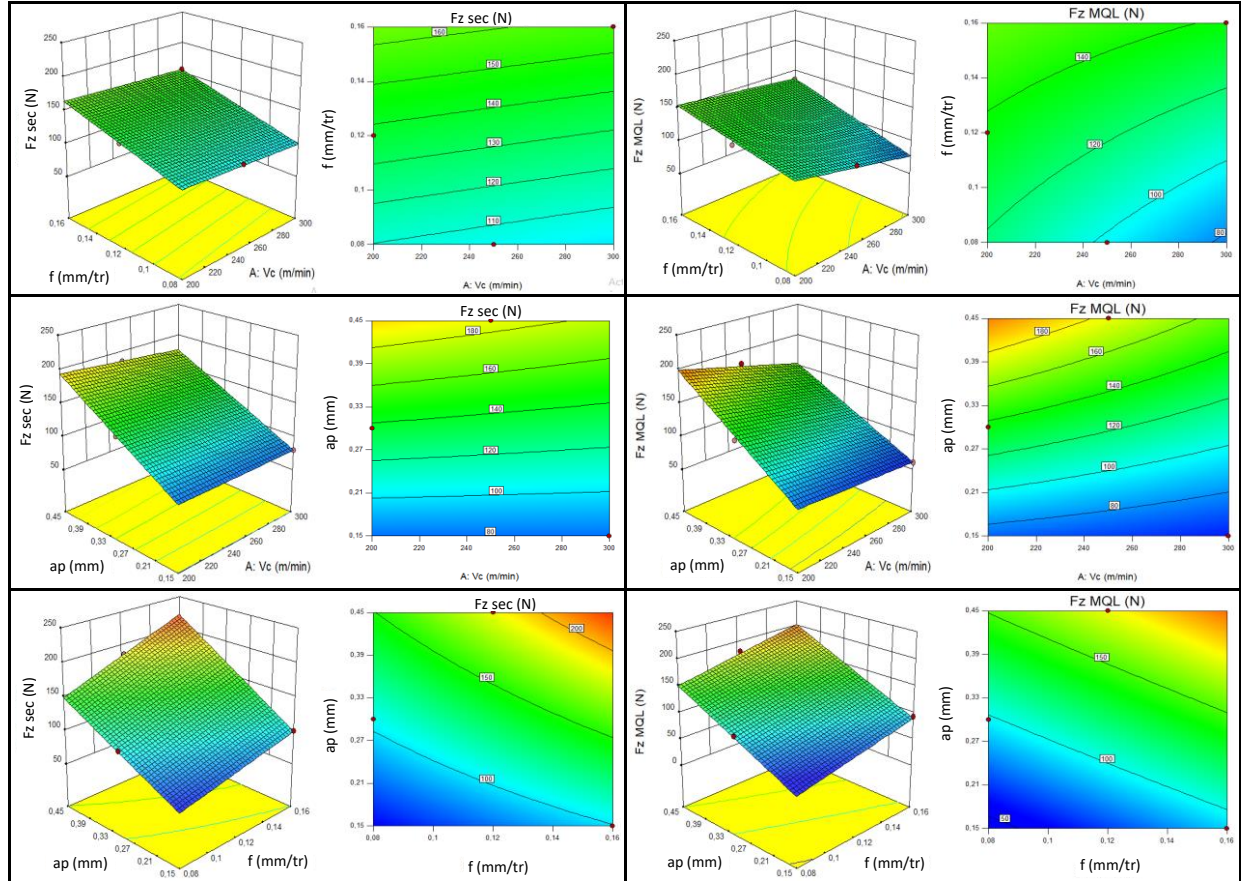


Figure III.16. Surfaces de réponse et les contours de (Fz) lors de l'usinage à sec et MQL.

Les cartographiques de la réponse 3D et les contours en 2D de la pression (K_c) sont présentés dans la figure III.17 en termes des facteurs (V_c , f et a_p). On peut observer que les facteurs (f) et (a_p) ont un impact significatif sur (K_c), leur augmentation induit une diminution de (K_c) ce qui est profitable au processus de coupe car la pression exercer sur l'arête de coupe de l'outil est faible lorsque (f) et (a_p) diminue. Ces résultats s'appliquent à chacun des deux environnements (sec et MQL). La figure III.18 présente les graphes de la surface de réponse 3D et les contours en 2D de la puissance (P_c) en fonction de (V_c , f et a_p) durant l'usinage à sec et MQL. On remarque que la tendance des courbes est presque la même pour les deux cas étudiés. On peut observer aussi que l'augmentation des trois facteurs (a_p), (f) et (V_c) provoquent l'élévation de la puissance (P_c). Ces résultats sont logiques par rapport à l'équation (1), puisque le paramètre (P_c) est étroitement lié à (F_z) et (V_c). Aussi, à son tour l'élévation de (F_z) est liée à l'élévation de la section du copeau (f et a_p). La plus grande pente est attribuée au facteur (a_p) donc, il a la plus grande influence sur (P_c). Afin de minimiser la puissance (P_c), il faut garder les trois facteurs d'entrée à leurs bas niveaux. Les résultats trouvés sur l'effet des trois facteurs (V_c , f et a_p) sont en parfaite concordance avec d'autres travaux de recherche [KOU 22 et BOU 21].

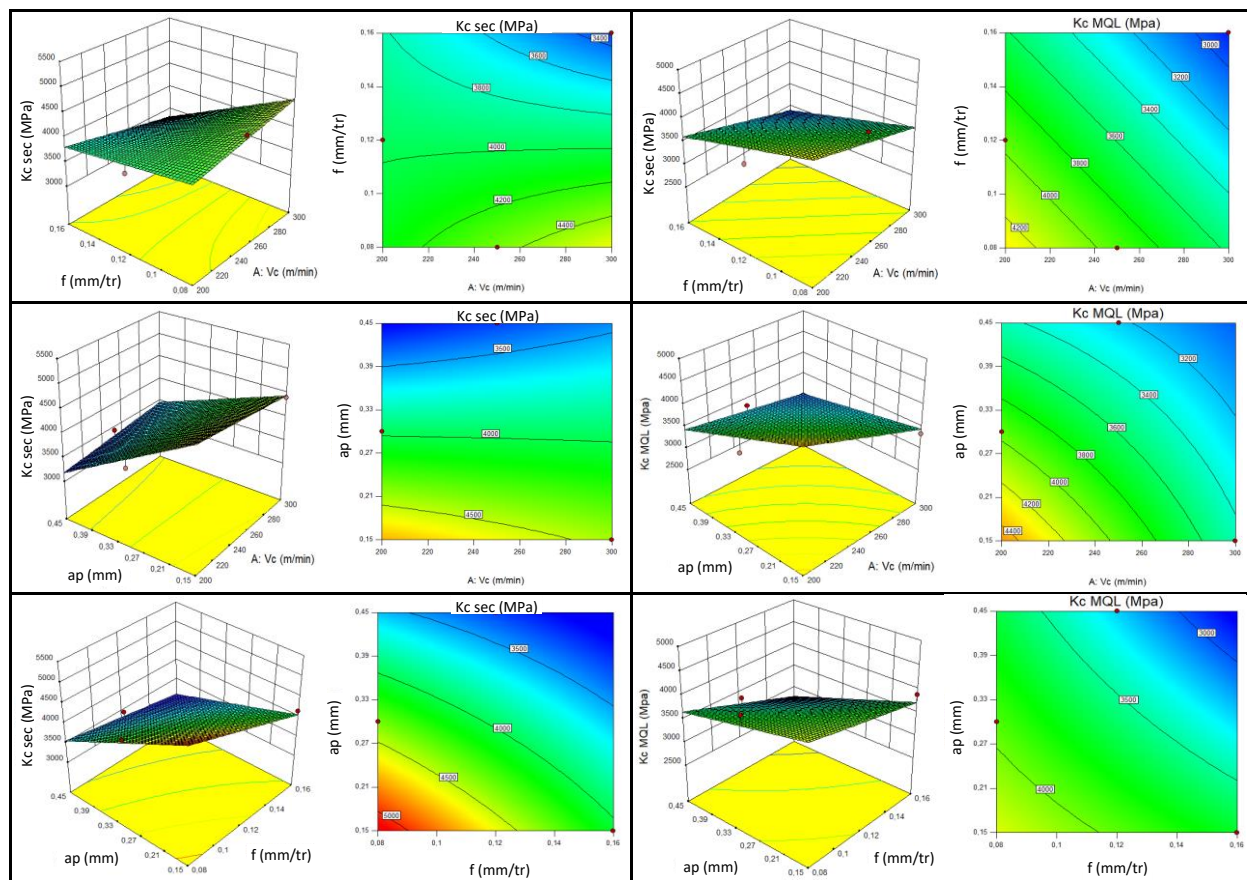


Figure III.17. Surfaces de réponse et les contours de (K_c) lors de l'usinage à sec et MQL.

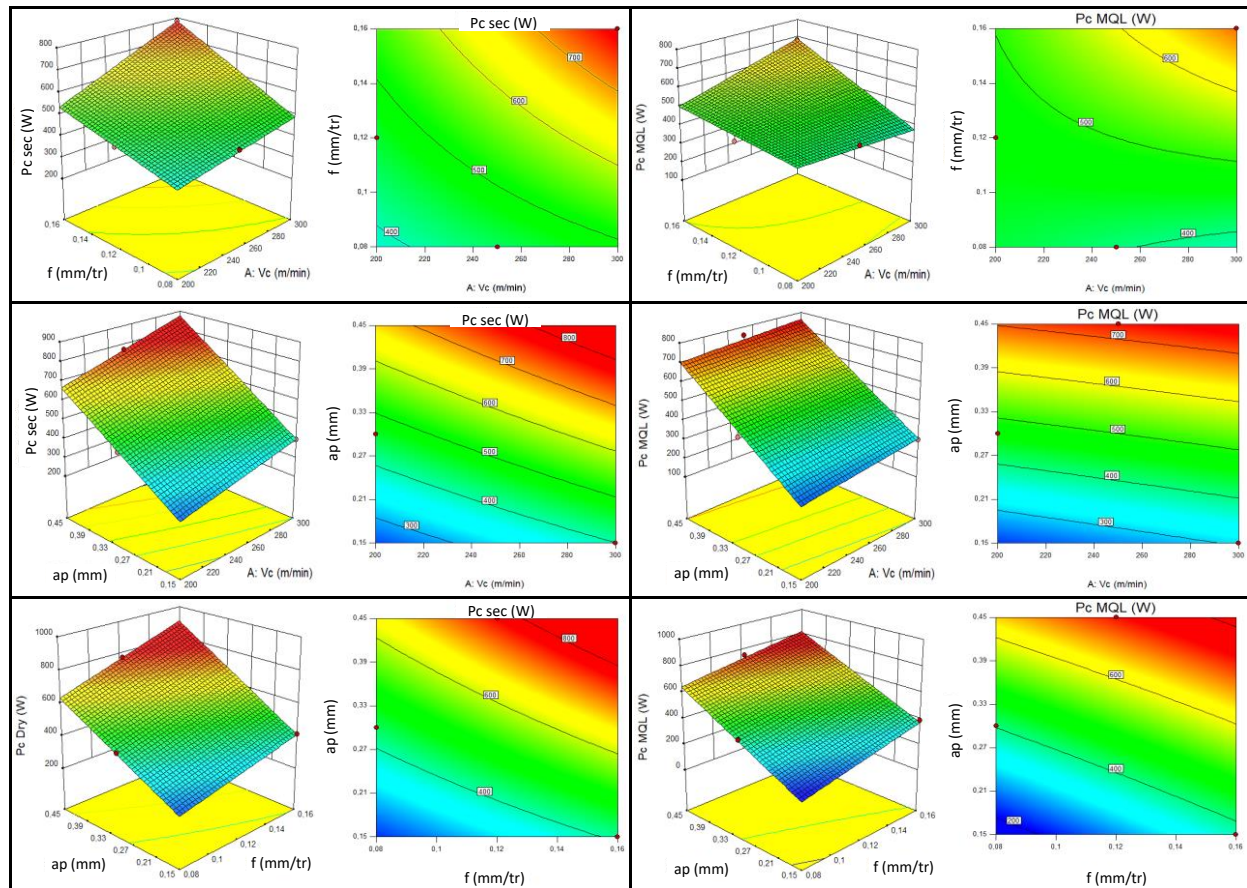


Figure III.18. Surfaces de réponse et les contours de (P_c) lors de l'usinage à sec et MQL.

III.4. Optimisation multi-objectif des conditions de coupe

Dans le cadre de l'optimisation multi-objectif, l'objectif principal est de déterminer l'ensemble optimal de solutions qui représentent les meilleurs compromis entre des objectifs contradictoires [ATI 24]. L'optimisation des paramètres de coupe dans le processus d'usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche [SAH 23, SER 18].

Dans cette section, cinq méthodes d'optimisation multi-objectifs ont été appliquées et comparées, à savoir : la fonction de désirabilité DF, GRA, EDAS, EAMR et FUCA. D'abord, l'analyse de Taguchi sur la base du rapport signal/bruit (S/B) a été utilisée pour calculer chaque critère de performance de sortie sous les conditions à sec et MQL afin de trouver les valeurs les plus faibles de R_a , F_z , P_c et K_c et les valeurs les plus élevées du MRR respectivement par les équations III.9 et 10. Ainsi, les résultats trouvés seront utilisés pour développer les méthodes MCDM tels que : GRA, EDAS, EAMR et FUCA. De plus, par souci de simplicité, tous les critères ont été pondérés de manière égale, en attribuant à chacun un poids de $w_j = 1/5$.

- Plus petit est le meilleur

$$\frac{S}{N} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2 \right) \quad (\text{III.9})$$

- Plus grand est le meilleur

$$\frac{S}{N} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right) \quad (\text{III.10})$$

Où : y représente les paramètres de performances et n le nombre d'essais.

En se basant sur les équations III.9 et III.10, le tableau III.7 récapitule les résultats du S/N pour les cinq paramètres de performances étudiés pour le cas de l'usinage à sec et MQL.

Pour les régimes optimaux hors plan (tableau III.2) trouvées par les méthodes MCDM, on applique l'équation III.11 [ABB 23] afin de calculer les valeurs prédites basées sur (S/B) des différentes sorties.

$$P = M_G + \sum_{j=1}^n [(M_{ij}) - M_G] \quad (\text{III.11})$$

Où :

M_G : Moyenne globale pour chaque paramètre de sortie.

M_{ij} : Moyenne de la réponse au niveau optimal.

n : Nombre de paramètres de coupe. Dans ce cas précis. $n=3$ (V_c , f et a_p).

Les valeurs (S/B) prédites des différentes réponses de l'équation (III.11) ont été converties en valeurs réelles (V_r) à l'aide des équations (III.12) et (III.13).

$$V_r = \sqrt{10^{\left(\frac{-P}{10}\right)}} \quad (\text{III.12})$$

$$V_r = \frac{1}{\sqrt{10^{\left(\frac{-P}{10}\right)}}} \quad (\text{III.13})$$

Tableau III.7. Résultats des paramètres de performances avec S/B

N° d'essai	Résultats du rapport signal/bruit								
	Ra à sec (μm)	Ra MQL (μm)	Fz à sec (N)	Fz MQL (N)	Pc à sec (W)	Pc MQL (W)	Kc à sec (MPa)	Kc MQL (MPa)	MRR (cm^3/min)
1	0.64	2.51	60.95	-35.09	203.17	-45.57	-74.12	-73.53	7.60
2	-1.42	0.06	136.41	-42.31	454.7	-52.76	-71.57	-71.18	17.15
3	-2.99	-2.069	230.43	-46.84	768.1	-57.30	-70.10	-69.70	23.17
4	1.01	4.55	106.08	-39.96	442	-52.36	-72.91	-72.36	15.56
5	-0.15	2.26	185.29	-45.14	772.04	-57.54	-70.71	-70.49	22.61
6	-2.88	-1.83	99.54	-39.40	414.75	-51.79	-72.36	-71.79	15.56
7	2.07	5.26	140.2	-41.67	700.6	-55.65	-71.80	-70.54	20.67
8	0.58	2.46	79.45	-35.60	397.25	-49.58	-72.90	-70.49	14.65
9	-2.48	-1.81	156.86	-42.66	784.3	-56.64	-70.29	-69.04	23.17

III.4.1. Fonction de désirabilité (DF)

La méthode de la fonction de désirabilité (DF) est une technique statistique qui intègre de nombreux paramètres de réponse pour obtenir un score élémentaire de "désirabilité" qui montre à quel point un produit correspond à un ensemble de normes de qualité spécifiées [HAS 24]. La désirabilité varie entre [0 et 1], une désirabilité de (0) correspond à la configuration la plus défavorable de la réponse sélectionnée, tandis qu'une désirabilité de (1) représente le cas idéal [SIA 18]. L'approche (DF) s'exprime par les équations (III.14 à III.16) :

$$D(y) = \begin{cases} 0 & y < Low \\ \left(\frac{y - Low}{Tar - Low} \right)^w & Low \leq y \leq Tar \\ 1 & y > Tar \end{cases} \quad (III.14)$$

$$D(y) = \begin{cases} 0 & y < Low \\ \left(\frac{y - Low}{Tar - Low} \right)^w & Low \leq y \leq Tar \\ \left(\frac{y - High}{Tar - High} \right)^w & Tar \leq y \leq High \\ 0 & y \geq High \end{cases} \quad (III.15)$$

$$DF = (D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n)^{\frac{1}{n}}$$

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n D_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (III.16)$$

Où : D_i est la désirabilité spécifique de chacun des (n) paramètre de réponse.

w_i est la fonction de pondération correspondante.

Dans la présente étude l'approche (DF) a été utilisée pour l'optimisation simultanée des facteurs de performance (Ra, Fz, Kc, Pc et MRR). L'objectif principal était de déterminer les valeurs optimales des paramètres d'entrée lors de l'usinage de l'AISI 52100 avec des plaquettes en carbure métallique GC-2015 revêtues en CVD. Le tableau III.8 présente les contraintes d'optimisation pour les deux cas d'usinage (à sec et MQL), ainsi que l'objectif et l'importance pour quatre cas d'étude proposés. Le logiciel "Design Expert 13" a été utilisé pour le traitement des résultats de l'optimisation. Le tableau III.9 expose les solutions trouvées en termes de combinaisons de coupe optimales, paramètres de sortie optimisés et les valeurs de désirabilité pour les quatre cas d'étude. De plus, la figure III.19 présente les graphiques de barres de désirabilité pour le 4^{ème} cas d'optimisation lors de l'usinage (à sec et MQL).

Dans le premier cas d'optimisation, l'objectif principal recherché concerne une production maximale, en attribuant une importance de (5) pour le (MRR), tout en gardant une faible importance (1) pour le paramètre (Ra). La combinaison optimale ainsi que les sorties

trouvées lors de l'usinage à sec sont respectivement. ($V_c=206.6$ m/min, $f=0.16$ mm/tr et $a_p=0.438$ mm). ($MRR=14.4$ cm³/min et $R_a=1.393$ µm) avec une désirabilité idéale de 0.995. Concernant l'usinage MQL, les résultats trouvés sont : ($V_c=299.99$ m/min, $f=0.109$ mm/tr et $a_p=0.45$ mm) ($MRR=14.4$ cm³/min et $R_a=0.818$ µm) avec une désirabilité de 0.924. Le deuxième cas vise à améliorer la qualité de surface en minimisant (R_a). Une importance de (5) est attribuée à (R_a), tandis que le (MRR) prend une faible importance de (1). Pour l'usinage à sec les résultats trouvés sont : ($V_c=300$ mm/min, $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.45$ mm) et ($R_a=0.788$ µm, $MRR=10.8$ cm³/min) avec un taux de désirabilité très acceptable 0.942. Avec le MQL les résultats trouvés sont : ($V_c=299.996$ mm/min, $f=0.081$ mm/tr et $a_p=0.45$ mm) et ($R_a=0.546$ µm, $MRR=10.921$ cm³/min) avec un taux de désirabilité très acceptable 0.945.

Dans le troisième cas une minimisation a été appliquée sur les réponses (F_z) et (P_c), avec une importance de (5) afin de réduire la consommation d'énergie. Les facteurs de coupe optimisés pour l'usinage à sec sont : ($V_c=203.246$ m/min, $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.15$ mm), avec les paramètres de sorties ($F_z=61.017$ N et $P_c=203.153$ W). Pour l'usinage MQL, les résultats sont : ($V_c=204.519$ m/min, $f=0.084$ mm/tr et $a_p=0.439$ mm) et ($F_z=56.784$ N et $P_c=94.029$ W) avec une désirabilité idéale de 1 pour les deux modes d'usinage. Le dernier cas d'optimisation concerne la minimisation de (R_a , F_z , K_c et P_c) et la maximisation du (MRR) simultanément. Une importance de (5) est attribuée pour les cinq sorties. Ce cas général d'optimisation est recherché lorsqu'un compromis entre les différentes sorties est souhaitait. Les résultats trouvés lors de l'usinage à sec sont : ($V_c=200$ m/min, $f=0.08$ mm/tr et $a_p=0.417$ mm) avec ($R_a=0.859$ µm, $F_z=147.762$ N, $K_c=3393.623$ MPa, $P_c=501.453$ W et $MRR=7.384$ cm³/min) avec une désirabilité de 0.599. De plus, l'usinage avec MQL donne les résultats d'optimisation suivants : ($V_c=300$ m/min, $f=0.086$ mm/tr et $a_p=0.293$ mm) ($R_a=0.566$ µm, $F_z=79.621$ N, $K_c=3533.174$ MPa, $P_c=402.444$ W et $MRR=7.132$ cm³/min) avec une désirabilité de 0.667.

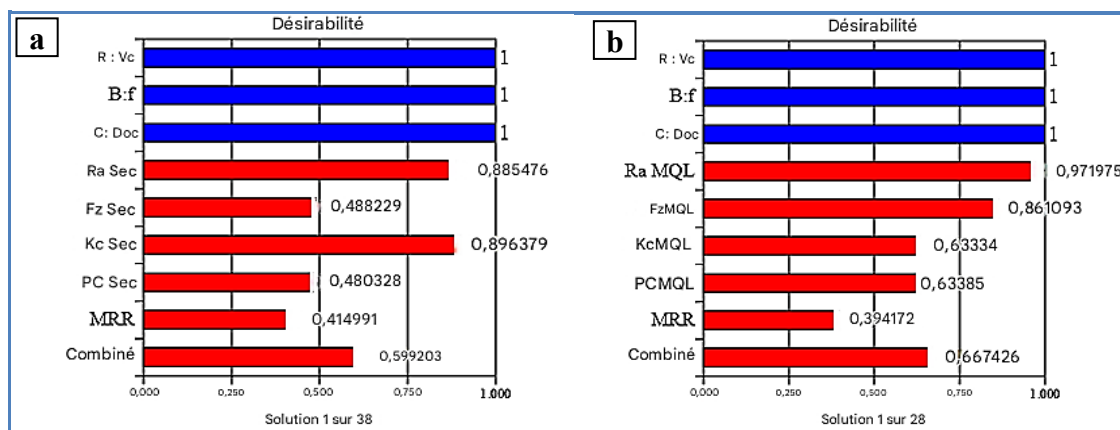


Figure III.19. Graphique à barres de désirabilité pour le 4ème cas (a) à sec et (b) MQL.

Tableau III.8. Contraintes d'optimisation et importance pour les quatre cas d'étude

Paramètres	Limite min	Limite max	Limite min	Limite max	Objectifs	Importance			
A sec			MQL			Cas			
						1	2	3	4
Entrées									
Vc (m/min)	200	300	200	300	Dans la plage			3	
f(mm/tr)	0.08	0.16	0.08	0.16				3	
ap (mm)	0.15	0.45	0.15	0.45				3	
Sorties									
Ra (µm)	0.788	1.411	0.546	1.269	Minimisé	1	5	-	5
Fz (N)	60.95	219.85	56.8	219.85	Minimisé	-	-	5	5
Kc (MPa)	3200.42	4748.33	2829.79	4748.33	Minimisé	-	-	-	5
Pc (W)	203.17	753.13	189.93	753.13	Minimisé	-	-	5	5
MRR(cm³/min)	2.4	14.4	2.4	14.4	Maximisé	5	1	-	5

Tableau III.9 Résultats de désirabilité pour les quatre cas

Cas d'optimisation	Lubrification	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	Fz (N)	Kc (MPa)	Pc (W)	MRR (cm ³ /min)	Désirabilité
1 ^{er} cas	Sec	206.612	0.16	0.438	1.393	-	-	-	14.4	0.995
	MQL	299.999	0.109	0.45	0.818	-	-	-	14.4	0.924
2 ^{eme} cas	Sec	300	0.08	0.45	0.788	-	-	-	10.8	0.942
	MQL	299.996	0.081	0.45	0.546	-	-	-	10.92	0.945
3 ^{eme} cas	Sec	203.246	0.08	0.15	-	61.017	-	203.15	-	1
	MQL	204.519	0.084	0.439	-	56.784	-	94.03	-	1
4 ^{eme} cas	Sec	200	0.08	0.417	0.859	147.762	3393.62	501.45	7.38	0.599
	MQL	300	0.086	0.293	0.566	79.621	3533.17	402.44	7.13	0.667

L'effet des facteurs de coupe, tels que (Vc, f et ap) sur la désirabilité pour le 4^{eme} cas est présenté à l'aide des graphiques (3D) ainsi que des contours lors de l'usinage (sec et MQL) (figure III.20). La figure III.20.a (à sec), montre que la meilleure valeur de désirabilité soit 0.599, est assurée avec le régime suivant : (Vc =200 m/min. f=0.08 mm/tr et ap =0.45 mm). De plus, on remarque que f exerce l'influence la plus significative sur la désirabilité, tandis que (CS et Doc) ont une influence relativement faible. La figure III.21.b (MQL), illustre les graphiques de désirabilité (3D), on remarque que la désirabilité prend la valeur de 0,667 avec les facteurs d'entrée optimisés suivants : (Vc =300 m/min, f=0.08 mm/tr et ap =0.45 mm).

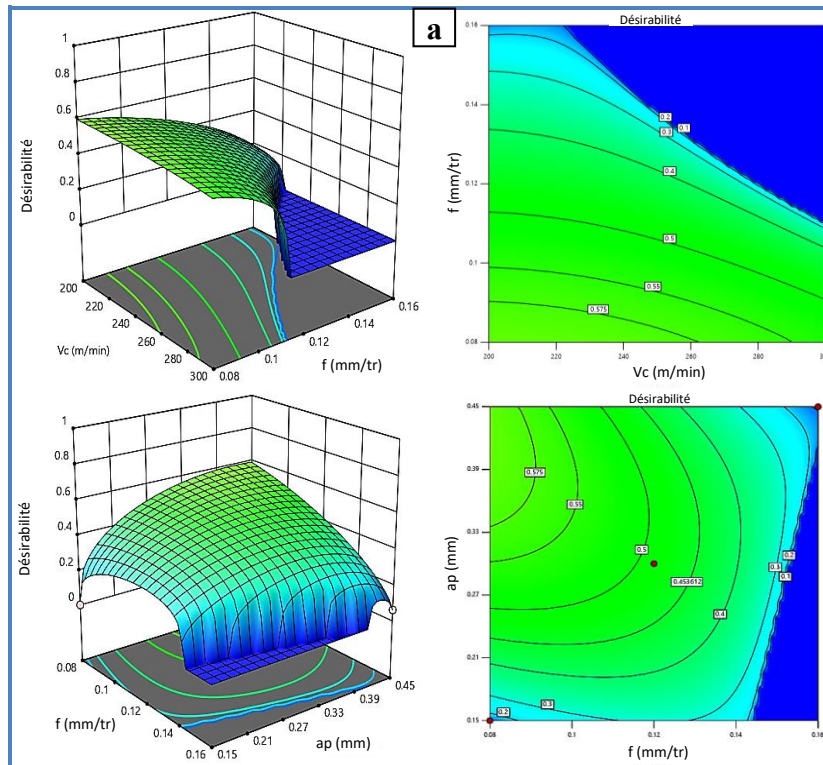


Figure III.20. Surfaces de réponse 3D et contours de désirabilité pour le 4^{ème} cas lors de l'usinage à sec.

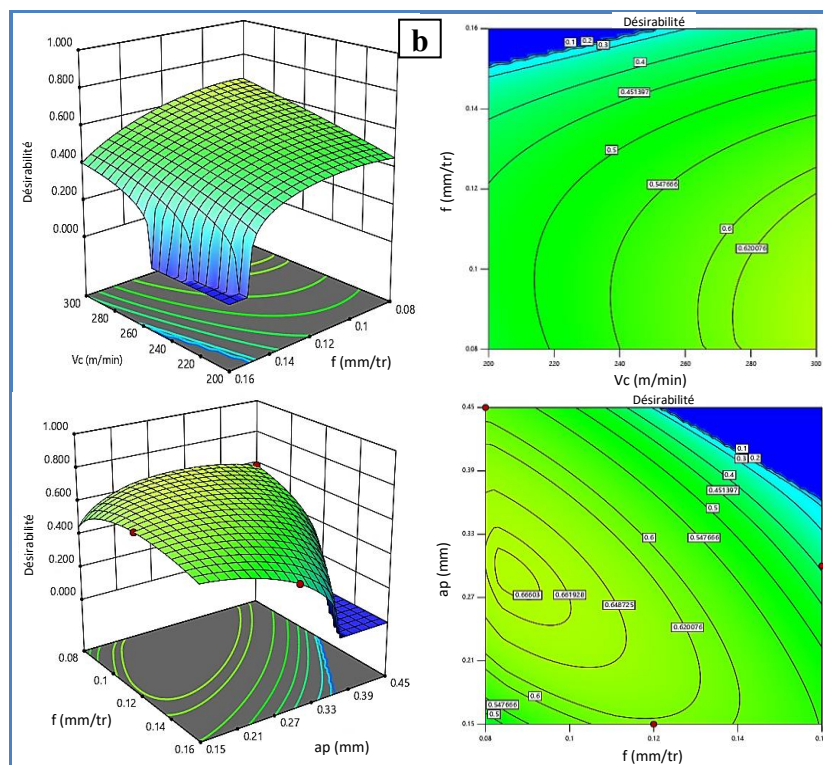


Figure III.21 Surfaces de réponse 3D et contours de désirabilité pour le 4^{ème} cas lors de l'usinage avec MQL.

III.4.2. Méthode GRA

La méthode GRA est utilisée pour l'optimisation multi-objective dans différents domaines scientifiques [SAH 23]. Elle aborde le problème MCDM en fusionnant les valeurs de coefficient de réponses multiples pour créer un indice de performance pour chaque alternative. Cinq étapes de calcul de la méthode GRA sont indiquées dans la figure III.22 [UMA 18, GH0 15] :

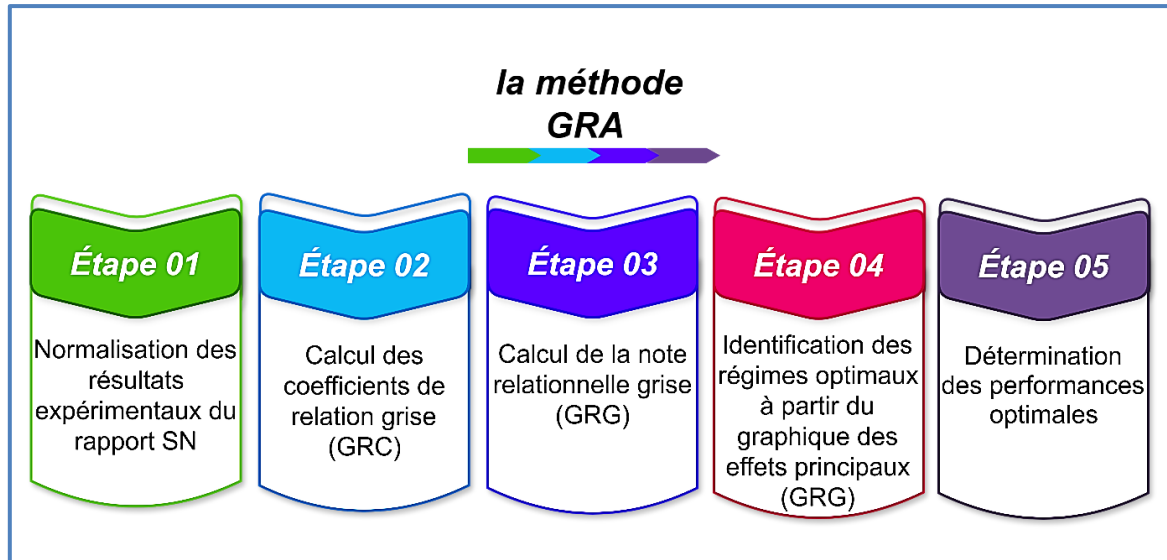


Figure III.22. Organigramme de la méthode GRA

Étape 1 : normalisation des Réponses basés sur le rapport (S/B)

La génération relationnelle est le processus lors de la transformation des données expérimentales en séquence décimale entre 0 et 1 basé sur les situations : “ Plus grand est le meilleur ” dans le but de maximiser les paramètres d’étude et “ Plus petit est le meilleur ” pour minimiser les paramètres d’étude. Dans notre cas, les réponses obtenues par l'analyse de Taguchi basé sur le rapport (S/B) (tableau III.7) sont normalisées en utilisant l'objectif “ Plus grand est le meilleur ” (équation III.18).

$$y_i^*(k) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (\text{III.17})$$

$$y_i^*(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (\text{III.18})$$

Où :

$i = 1, \dots, m$; $k = 1, \dots, n$, m est le nombre des essais expérimentales et n est le nombre de réponses, $y_i^*(k)$ sont les valeurs relationnelles grises générées, $\max y_i(k)$ et $\min y_i(k)$ sont les valeurs les plus grandes et les plus petites de $y_i(k)$, pour k observation, respectivement, Les

meilleurs résultats normalisés devraient donc être égaux à 1 ; pour obtenir un meilleur rendement, on s'attend à une plus grande valeur des résultats normalisés.

Tableau III.10. Normalisation des performances basée sur le rapport S/B ($y_i(k)$)

Test n°	Usinage à sec					Usinage MQL				
	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
1	0.717	1	1	0	0	0.625	1	1	0	0
2	0.311	0.394	0.404	0.634	0.613	0.291	0.386	0.399	0.523	0.613
3	0	0	0.015	1	1	0	0	0.020	0.853	1
4	0.791	0.583	0.425	0.301	0.511	0.904	0.585	0.433	0.261	0.511
5	0.560	0.164	0.012	0.849	0.964	0.591	0.145	0	0.676	0.964
6	0.022	0.631	0.472	0.439	0.511	0.033	0.633	0.480	0.387	0.511
7	1	0.374	0.084	0.576	0.839	1	0.440	0.158	0.664	0.839
8	0.706	0.801	0.504	0.304	0.453	0.619	0.956	0.665	0.676	0.453
9	0.101	0.289	0	0.955	1	0.036	0.356	0.075	1	1

Étape 2 : calcul de GRC : Elle consiste à calculer GRC $\xi_j(k)$ à partir des valeurs normalisées à l'aide de l'équation III.19 (tableau III.11).

$$\xi(y_j^*(k).y_0^*(k)) = \frac{\Delta_{min}(k) + \omega \Delta_{max}(k)}{\Delta_{oj}(k) + \Delta_{max}(k)} \quad (\text{III.19})$$

Où : $\Delta_{oi}(k) = |y_0^*(k) - y(k)|$ est une séquence de déviation.

$y_0^*(k)$ Séquence de référence.

$y_j^*(k)$ Séquence de comparabilité.

ω Est le coefficient de distinction ou d'identification et la plage se situe entre 0 et 1.

En général la valeur de ω est définie à 0.5.

Tableau III.11 Calcul de (GRC) $\xi_j(k)$

Test n°	Usinage à sec					Usinage MQL				
	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
1	0.639	1	1	0.333	0.333	0.572	1	1	0.333	0.333
2	0.421	0.452	0.456	0.578	0.564	0.413	0.449	0.454	0.512	0.564
3	0.333	0.333	0.337	1	1	0.333	0.333	0.338	0.773	1
4	0.705	0.545	0.465	0.417	0.506	0.839	0.547	0.468	0.403	0.506
5	0.532	0.374	0.336	0.768	0.933	0.550	0.369	0.333	0.606	0.933
6	0.338	0.575	0.486	0.471	0.506	0.341	0.577	0.490	0.449	0.506
7	1	0.444	0.353	0.541	0.757	1	0.472	0.373	0.598	0.757
8	0.630	0.715	0.502	0.418	0.477	0.567	0.920	0.599	0.606	0.477
9	0.358	0.413	0.333	0.917	1	0.342	0.437	0.351	1	1

Étape 3 : calcul de (GRG) : Après avoir calculé la moyenne des GRC, les valeurs des GRG (γ_i) peuvent être obtenus en utilisant l'équation III.20 :

$$\gamma_j(y_0^*, y_j^*) = \frac{1}{n} \sum_{k=i}^n \xi(y_j^*(k), y_0^*(k)) \quad (\text{III.20})$$

n: est un nombre de caractéristiques de réponse.

Les résultats du GRG sont présentés dans le tableau III.12 pour le cas où tous les paramètres de réponse sont combinés (Ra, Fz, Pc, Kc et MRR).

Tableau III.12. Résultats des (GRG)

Test n°	Usinage à sec	Usinage MQL
	GRG	GRG
1	0.661	0.648
2	0.494	0.478
3	0.601	0.555
4	0.528	0.553
5	0.589	0.558
6	0.475	0.473
7	0.619	0.640
8	0.548	0.634
9	0.604	0.626

Étape 4 : détermination des paramètres optimaux pour la GRG

L'analyse suivante a utilisé les GRG générés pour chaque expérience comme réponse. L'analyse a été effectuée en utilisant la caractéristique de qualité « Plus grand est le meilleur », ce qui signifie qu'un GRG plus élevé correspond à une amélioration des performances du processus. Les graphiques des effets principaux ont été utilisés pour examiner les GRG résultants. Comme le montre la figure III.23, les résultats indiquent que l'approche maintient le même régime optimal pour l'usinage à sec et MQL ($V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm), étant donné que ce régime se trouve initialement dans le plan L9 de Taguchi (tableau III.13).

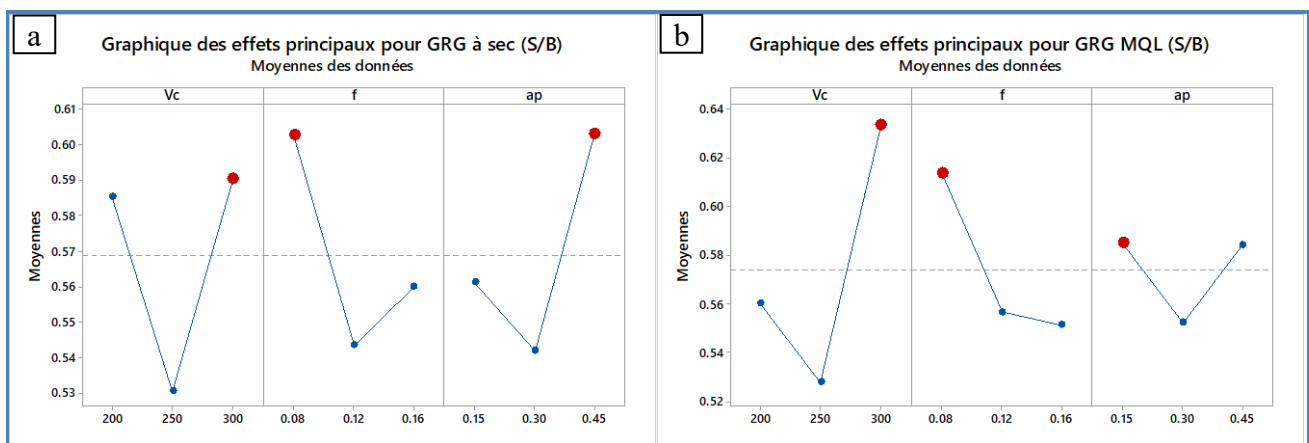


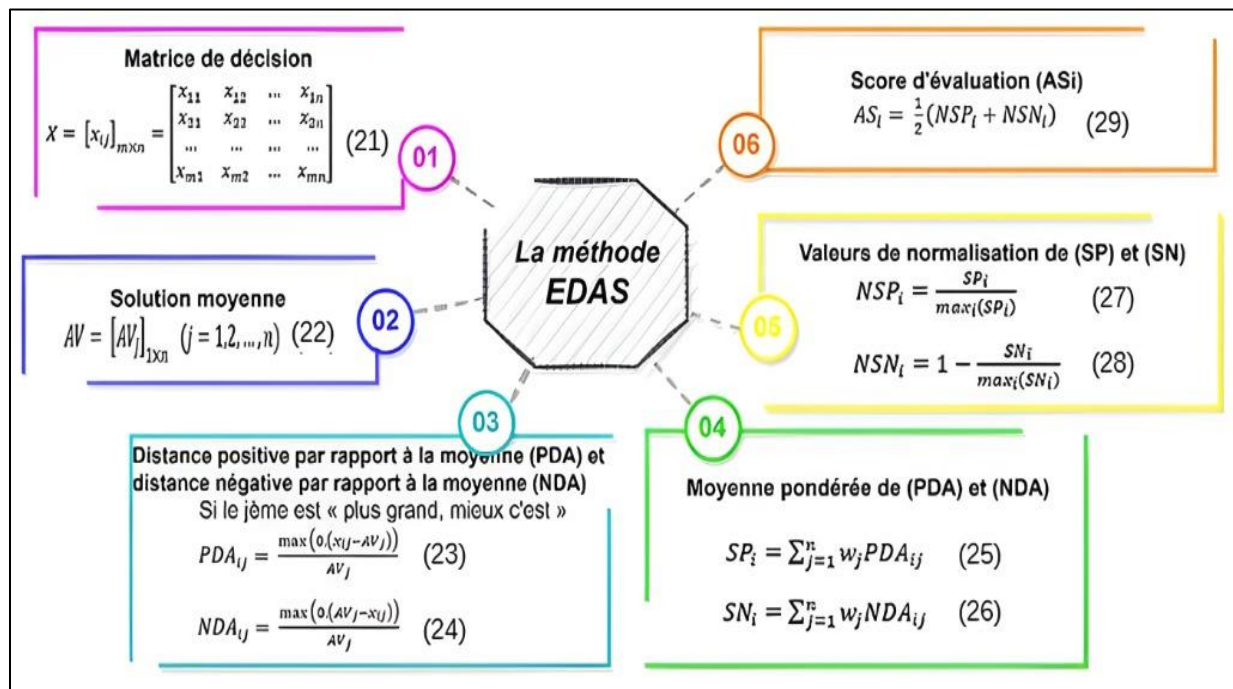
Figure III.23. Graphique des effets principaux de (GRG) (a) à sec et (b) MQL.

Tableau III.13. Régimes et réponses optimaux de la méthode GRA

	Paramètres de coupe optimaux			Paramètres de sortie optimaux				
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μ m)	Fz (N)	Pc (W)	Kc (MPa)	MRR (cm ³ /min)
A sec	300	0.08	0.45	0.788	140.12	700.6	3892.22	10.8
MQL	300	0.08	0.45	0.546	121.2	606.0	3366.7	10.8

III.4.3. Méthode EDAS

La méthode EDAS a été développée par M. Keshavarz et al, elle est très utile pour les critères contradictoires [GHO 17]. Les étapes de cette méthode sont appliquées pour les deux conditions (à sec et MQL) et présentées sous forme d'un ordinogramme dans la figure III.24 [GHO 16]. Il convient de noter que les valeurs PDA et NDA ont été calculées selon l'objectif « Plus grand est le meilleur » sur la base de données de Taguchi avec le rapport S/B (tableau III.7). Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux III.14 à 17.

**Figure III.24.** Organigramme de la méthode EDAS.**Tableau III.14.** Détermination de (AV_j)

	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
A sec	-0.624	-41.813	-54.091	-71.861	17.793
MQL	1.267	-40.966	-53.243	-71.014	17.793

Tableau III.15. Résultats de (PDA & NDA) lors de l'usinage à sec

Ra		Fz		Pc		Kc		MRR	
PDA _{ij}	NDA _{ij}	PDA _{ij}	NDA _{ij}	PDA _{ij}	NDA _{ij}	PDA _{ij}	NDA _{ij}	PDA _{ij}	NDA _{ij}
-2.026	0	-0.146	0	-0.147	0	0	-0.031	0	0.573
0	-1.270	0	-0.021	-0.017	0	-0.004	0	0	0.036
0	-3.796	0	-0.130	0	-0.067	-0.024	0	0.302	0
-2.623	0	-0.031	0	-0.022	0	0	-0.015	0	0.125
-0.751	0	0	-0.085	0	-0.068	-0.016	0	0.271	0
0	-3.617	-0.044	0	-0.032	0	0	-0.007	0	0.125
-4.319	0	0	-0.027	0	-0.052	-0.001	0	0.162	0
-1.936	0	-0.091	0	-0.039	0	0	-0.014	0	0.177
0	-2.972	0	-0.050	0	-0.070	-0.022	0	0.302	0

Tableau III.16. Résultats de (PDA & NDA) lors de l'usinage avec MQL

Ra		Fz		Pc		Kc		MRR	
PDA _{ij}	NDA _{ij}	PDA _{ij}	NDA _{ij}	PDA _{ij}	NDA _{ij}	PDA _{ij}	NDA _{ij}	PDA _{ij}	NDA _{ij}
0.981	0	-0.143	0	-0.144	0	0	-0.035	0	0.573
0	0.952	0	-0.033	-0.009	0	0	-0.002	0	0.036
0	2.633	0	-0.143	0	-0.076	-0.019	0	0.302	0
2.594	0	-0.024	0	-0.017	0	0	-0.019	0	0.125
0.783	0	0	-0.102	0	-0.081	-0.007	0	0.271	0
0	2.441	-0.038	0	-0.027	0	0	-0.011	0	0.125
3.148	0	0	-0.017	0	-0.045	-0.007	0	0.162	0
0.945	0	-0.131	0	-0.069	0	-0.007	0	0	0.177
0	2.425	0	-0.041	0	-0.064	-0.028	0	0.302	0

Tableau III.17. Calcul des notes d'évaluation (ASi) lors de l'usinage à sec et MQL

Usinage à sec					Usinage MQL				
Spi	Sni	NSPi	NSNi	ASi	Spi	Sni	NSPi	NSNi	ASi
-0.464	0.108	-8.277	0	-4.139	0.139	0.107	0.210	0.790	0.500
-0.004	-0.251	-0.076	3.319	1.621	-0.002	0.191	-0.003	0.627	0.312
0.056	-0.799	0.991	8.377	4.684	0.057	0.483	0.086	0.056	0.071
-0.535	0.022	-9.553	0.795	-4.379	0.511	0.021	0.773	0.958	0.866
-0.099	-0.030	-1.774	1.282	-0.246	0.209	-0.037	0.317	1.071	0.694
-0.015	-0.700	-0.273	7.464	3.596	-0.013	0.511	-0.020	0	-0.010
-0.832	-0.016	-14.843	1.146	-6.849	0.661	-0.012	1	1.024	1.012
-0.413	0.032	-7.376	0.700	-3.338	0.148	0.035	0.223	0.931	0.577
0.056	-0.619	1.000	6.714	3.857	0.055	0.464	0.083	0.092	0.088

Les graphiques des effets principaux du facteur (ASi) sont utilisés lors de l'analyse des résultats de la méthode EDAS pour trouver les régimes optimaux ainsi que les performances (Ra, Fz, Pc et Kc MRR) optimisées simultanément pour les deux environnements (sec et MQL) (figure III.25). La combinaison optimale observée est : ($V_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0.16 \text{ mm/tr}$, $a_p =$

0.3 mm) pour l'environnement sec et ($V_c=300\text{m/min}$, $f=0.08\text{ mm/tr}$, $a_p=0.45\text{ mm}$) pour la lubrification MQL. De plus, les valeurs optimisées de (R_a , F_z , P_c , K_c et MRR) correspondant à ces régimes optimaux sont respectivement les suivantes : ($R_a = 1.54\text{ }\mu\text{m}$, $F_z = 164.74\text{ N}$, $P_c = 549.15\text{ W}$, $K_c = 3432.18\text{ MPa}$ et $MRR = 9.6\text{ cm}^3/\text{min}$) et ($R_a = 0.548\text{ }\mu\text{m}$, $F_z = 147\text{ N}$, $P_c = 619.7\text{ W}$, $K_c = 3949.2\text{ MPa}$ et $MRR = 10.8\text{ cm}^3/\text{min}$) (tableau III.18).

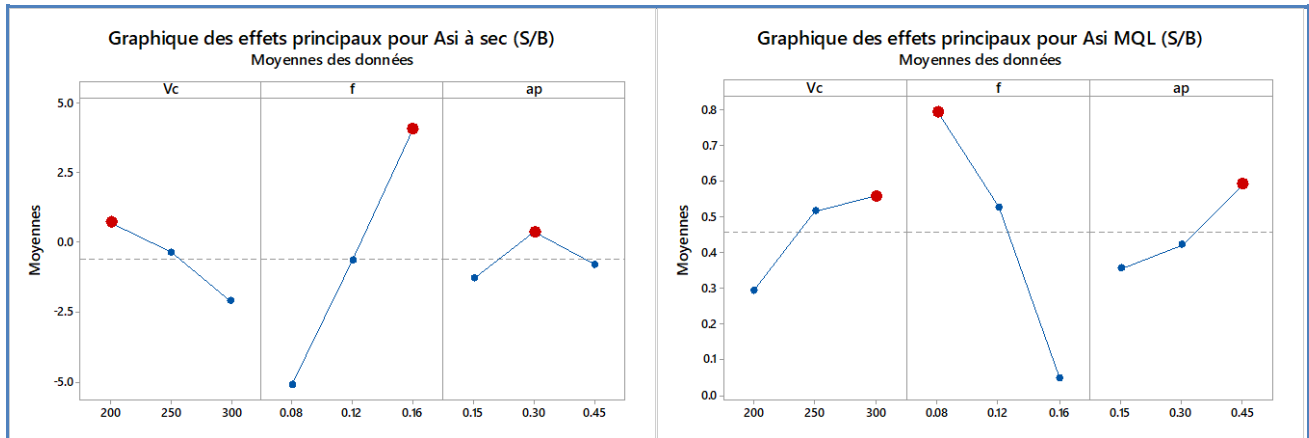


Figure III.25. Graphique des effets principaux pour (ASi) lors de l'usinage à sec et MQL.

Tableau III.18. Régime de coupe optimale en adoptant la méthode EDAS

	Paramètres de coupe optimaux			Paramètres de sortie optimaux				
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a (μm)	F_z (N)	P_c (W)	K_c (MPa)	MRR (cm^3/min)
A sec	200	0.16	0.30	1.54	164.74	549.15	3432.18	9.6
MQL	300	0.08	0.45	0.548	147.0	619.7	3949.2	10.8

III.4.4. Méthode EAMR

La méthode EAMR a été développée par Ghorabae et al [GHO 16], elle est basée sur les étapes suivantes [TRU 21, DAS 23] :

Étape 1 : elle est identique à l'étape 1 de la méthode EDAS (matrice de décision).

Étape 2 : normaliser les données selon l'équation (III.30), le tableau III.19 présente les résultats de normalisation des réponses basée sur Taguchi avec le rapport S/B :

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \quad (\text{III.30})$$

Étape 3 : calcul des valeurs normalisées à l'aide des poids (équation III.31).

$$v_{ij} = n_{ij} \cdot w_{ij} \quad (\text{III.31})$$

Étape 4 : calcul des scores normalisés pour les critères.

$$G_i^+ = v_{i1}^+ + v_{i2}^+ + \dots + v_{im}^+ \quad \text{Pour des critères aussi grands que meilleurs} \quad (\text{III.32})$$

$$G_i^- = v_{i1}^- + v_{i2}^- + \dots + v_{im}^- \quad \text{Pour des critères aussi petits que meilleurs} \quad (\text{III.33})$$

Étape 5 : calcul de la valeur de (S_i) à l'aide de l'équation III.34 :

$$S_i = \frac{G_i^+}{G_i^-} \quad (\text{III.34})$$

Étape 6 : classer les solutions selon le principe que celui avec les valeurs de (S_i) le plus élevé est le meilleur.

Pour cette méthode, l'objectif " Plus grand est le meilleur " est utilisé pour normaliser les réponses obtenues à partir de l'analyse de Taguchi (S/B) (tableau III.7). De ce fait, le calcul des scores de performance normalisés pour la quatrième étape suivra également cet objectif pour chaque performance de sortie à l'aide de l'équation III.33. Où (G_i^-) se verra égal à 1. Le tableau III.20 montre également les résultats des équations III.32 à III.34.

Tableau III.19. Valeurs normalisées selon la méthode EAMR

Test n°	Usinage à sec					Usinage MQL				
	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
1	0.309	1	1	1.057	0.328	0.478	1	1	1.065	0.328
2	-0.684	1.196	1.152	1.021	0.740	0.012	1.206	1.158	1.031	0.740
3	-1.445	1.324	1.250	1	1	-0.394	1.335	1.257	1.010	1
4	0.489	1.135	1.146	1.040	0.672	0.866	1.139	1.149	1.048	0.672
5	-0.075	1.271	1.251	1.009	0.976	0.430	1.287	1.263	1.021	0.976
6	-1.391	1.119	1.134	1.032	0.672	-0.347	1.123	1.137	1.040	0.672
7	1	1.203	1.233	1.024	0.892	1.000	1.188	1.221	1.022	0.892
8	0.282	1.064	1.126	1.040	0.632	0.469	1.015	1.088	1.021	0.632
9	-1.197	1.230	1.254	1.003	1	-0.343	1.216	1.243	1	1

Tableau III.20. Valeurs calculées de S_i

Usinage à sec			Usinage MQL		
G_i^+	G_i^-	S_i	G_i^+	G_i^-	S_i
0.739	1	0.739	0.774	1	0.774
0.685	1	0.685	0.829	1	0.829
0.626	1	0.626	0.842	1	0.842
0.896	1	0.896	0.975	1	0.975
0.886	1	0.886	0.995	1	0.995
0.513	1	0.513	0.725	1	0.725
1.070	1	1.070	1.065	1	1.065
0.829	1	0.829	0.845	1	0.845
0.658	1	0.658	0.823	1	0.823

Lors de l'application de la méthode EAMR, la combinaison optimale observée par les graphiques des effets principaux du facteur (S_i) (figure III.26) est la suivante : ($V_c=300\text{m/min}$, $f=0.08\text{ mm/tr}$, $a_p=0.45\text{ mm}$) pour les deux conditions de coupe (sec et MQL). Ainsi, les valeurs de performances optimisées sont respectivement : ($R_a = 0.788\text{ }\mu\text{m}$, $F_z = 140.12\text{ N}$, $P_c = 700.6\text{ W}$, $K_c = 3892.22\text{ MPa}$ et $MRR = 10.8\text{ cm}^3/\text{min}$) et ($R_a = 0.546\text{ }\mu\text{m}$, $F_z = 121.2\text{ N}$, $P_c = 606\text{ W}$, $K_c = 3366.67\text{ MPa}$ et $MRR = 10.8\text{ cm}^3/\text{min}$) (tableau III.21).

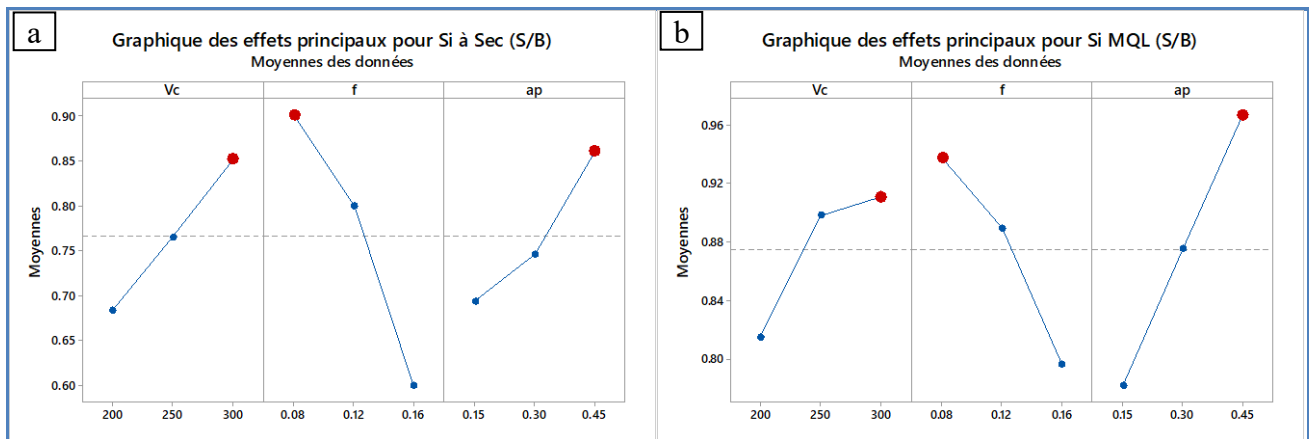


Figure III.26. Graphique des effets principaux de (S_i) (a) à sec et (b) MQL.

Tableau III.21. Régime de coupe optimale en adoptant la méthode EAMR

	Paramètres de coupe optimaux			Paramètres de sortie optimaux				
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a (μm)	F_z (N)	P_c (W)	K_c (MPa)	MRR (cm^3/min)
A sec	300	0.08	0.45	0.788	140.12	700.6	3892.22	10.8
MQL	300	0.08	0.45	0.546	121.2	606	3366.67	10.8

III.4.5. Méthode FUCA

Dans la méthode FUCA (Faire Un Choix Adéquat), les alternatives sont classées selon les étapes suivantes [HOA 23, THI 23, TRU 22]:

Étape 1 : classement (r_{ij}) des alternatives représentées par les valeurs du (S/B) des différents paramètres de performance. En supposant qu'il y a (m) alternatives, la meilleure valeur est classée en premier, et la pire valeur est classée (m^{th}). S'il y a (n) critères, effectuer un classement pour chaque critère. Dans notre cas, on applique l'objectif "Plus grand est le meilleur" pour toutes les alternatives de l'étude.

Lorsque pour un critère donné, deux alternatives possèdent la même valeur de classement, comme dans le cas du critère K_c , où les alternatives 4 et 8 sont au même classement et prennent les rangs 7 et 8. Ces deux alternatives seront classées au même rang de 7.5 qui est la moyenne

des rangs 7 et 8. Les résultats du classement des options pour chaque critère sont présentés dans le tableau III.22.

Tableau III.22. Classement des alternatives r_{ij}

Test	Usinage à sec					Usinage MQL				
	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
1	3	1	1	9	9	3	1	1	9	9
2	6	5	5	4	5	6	5	5	6	5
3	9	9	7	1	1.5	9	9	8	2	1.5
4	2	4	4	7.5	6.5	2	4	4	8	6.5
5	5	8	8	3	3	5	8	9	3.5	3
6	8	3	3	6	6.5	8	3	3	7	6.5
7	1	6	6	5	4	1	6	6	5	4
8	4	2	2	7.5	8	4	2	2	3.5	8
9	7	7	9	2	1.5	7	7	7	1	1.5

Étape 2 : calcul du score v_i de chaque solution de rechange selon la formule III.35 :

$$v_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot w_j \quad (\text{III.35})$$

Où w_j est le poids du critère j. Dans notre cas $w_j = 1/5$.

Tableau III.23. Valeurs calculées et les résultats selon la méthode FUCA

Usinage à sec						Usinage MQL					
Ra	Fz	Pc	Kc	MRR	v_i	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR	v_i
0.6	0.2	0.2	1.8	1.8	4.6	0.6	0.2	0.2	1.8	1.8	4.6
1.2	1	1	0.8	1	5	1.2	1	1	1.2	1	5.4
1.8	1.8	1.4	0.2	0.3	5.5	1.8	1.8	1.6	0.4	0.3	5.9
0.4	0.8	0.8	1.5	1.3	4.8	0.4	0.8	0.8	1.6	1.3	4.9
1	1.6	1.6	0.6	0.6	5.4	1	1.6	1.8	0.7	0.6	5.7
1.6	0.6	0.6	1.2	1.3	5.3	1.6	0.6	0.6	1.4	1.3	5.5
0.2	1.2	1.2	1	0.8	4.4	0.2	1.2	1.2	1	0.8	4.4
0.8	0.4	0.4	1.5	1.6	4.7	0.8	0.4	0.4	0.7	1.6	3.9
1.4	1.4	1.8	0.4	0.3	5.3	1.4	1.4	1.4	0.2	0.3	4.7

Étape 3 : classement des alternatives selon les valeurs de v_i . La meilleure alternative est l'alternative avec le plus petit v_i , et vice versa (tableau 23).

Les tracés des effets principaux de v_i (figure III.27) montrent un régime optimal similaire pour les deux conditions (sec et MQL), où ($V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.15$ mm). Ce régime conduit aux valeurs des paramètres de performances suivantes, respectivement selon les conditions (sec et MQL) ; $R_a = 0.795$ μm , $F_z = 60.2$ N, $P_c = 300.9$ W, $K_c = 5017.9$ MPa et $MRR = 3.6$ cm^3/min) et ($R_a = 0.589$ μm , $F_z = 48.2$ N, $P_c = 241.1$ W, $K_c = 4018.1$ MPa et $MRR = 3.6$ cm^3/min) (Tableau III.24).

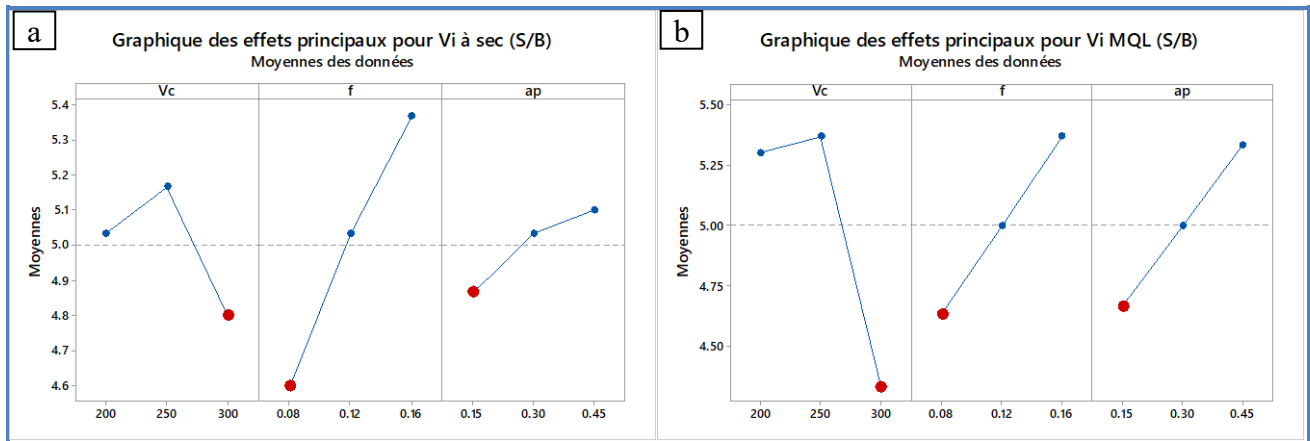


Figure III.27. Graphiques des effets principaux de (v_i) (a) à sec et (b) MQL.

Tableau III.24. Régime de coupe optimal en adoptant la méthode FUCA

	Paramètres de coupe optimaux			Paramètres de sortie optimaux				
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a (μm)	F_z (N)	P_c (W)	K_c (MPa)	MRR (cm^3/min)
A sec	300	0.08	0.15	0.795	60.2	300.9	5017.9	3.6
MQL	300	0.08	0.15	0.589	48.2	241.1	4018.1	3.6

III.4.6. Comparaison des méthodes d'optimisation

Les résultats obtenus par l'application des cinq méthodes d'optimisation. La fonction DF et quatre méthodes MCDM se basant sur Taguchi (S/B) sont présentés dans le tableau III.25. L'analyse comparative révèle que les méthodes GRA et EAMR identifient le même régime optimal pour les deux conditions à sec et MQL ; $V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm. Ce régime met en évidence son orientation vers l'amélioration de la productivité à 10.8 cm^3/min , meilleure qualité de surface $R_a = 0.546$ μm et la réduction de la pression de coupe exercée sur l'arête de l'outil $K_c = 3366.67$ MPa. Aussi, la méthode EDAS suggère le même régime optimal que GRA et EAMR pour l'usinage MQL. Cependant, pour l'usinage à sec, le régime proposé réduit le facteur V_c à 200 m/min et a_p à 0.3 mm avec un pourcentage de réduction de 33 %, ainsi qu'une augmentation du facteur f à 0.16 mm/tr (augmentation de 100%). Cela entraîne des valeurs de sortie comme suit : $R_a = 1.54$ μm , $F_z = 164.74$ N, $P_c = 549.15$ W, $K_c = 3432.18$ MPa et $MRR = 9.6$ cm^3/min .

En revanche, la méthode FUCA a abouti au même régime optimal pour les deux environnements (à sec et MQL) ; $V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $Doc = 0.15$ mm. Ce régime permet d'obtenir des valeurs très proches des méthodes GRA et EAMR pour R_a avec une différence de 0.89% pour l'usinage à sec et 7.88% pour MQL. Cependant, cette méthode permet

d'avoir des valeurs minimales de P_c et F_z comparativement aux autres méthodes, favorisant ainsi un usinage économique en énergie. Toutefois, il convient de noter que pour les conditions à sec et MQL, le paramètre K_c atteint des valeurs maximales de 5017.92 et 4018.12, respectivement, ce qui peut endommager l'arête de coupe. Par contre, cette méthode a abouti à la productivité la plus faible $MRR = 3.6 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Comparativement aux autres méthodes, les régimes de coupe proposés par la méthode DF pour les deux environnements se distinguent par la capacité de produire des résultats équilibrés pour tous les paramètres R_a , F_z , P_c , K_c et MRR , afin d'améliorer à la fois la productivité et la qualité de la surface tout en optimisant la consommation d'énergie et la pression de coupe.

Tableau III.25. Récapitulatif des régimes optimaux obtenus

méthodes d'optimisation	Mode de lubrification	Paramètres de coupe optimaux			Paramètres de sortie optimaux				
		V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a (μm)	F_z (N)	P_c (W)	K_c (MPa)	MRR (cm^3/min)
Désirabilité	A sec	200	0.08	0.417	0.859	147.762	501.45	3393.62	7.384
	MQL	300	0.086	0.293	0.566	79.621	402.44	3533.17	7.132
GRA	A sec	300	0.08	0.45	0.788	140.12	700.60	3892.22	10.8
	MQL	300	0.08	0.45	0.546	121.20	606.00	3366.67	10.8
EDAS	A sec	200	0.16	0.30	1.54	164.74	549.15	3432.18	9.6
	MQL	300	0.08	0.45	0.546	121.20	606.00	3366.67	10.8
EAMR	A sec	300	0.08	0.45	0.788	140.12	700.60	3892.22	10.8
	MQL	300	0.08	0.45	0.546	121.20	606	3366.67	10.8
FUCA	A sec	300	0.08	0.15	0.795	60.18	300.89	5017.92	3.6
	MQL	300	0.08	0.15	0.589	48.15	241.10	4018.12	3.6

III.5. Conclusion

Cette étude présente une analyse comparative de l'usinage durable de l'acier AISI 52100, réalisée sous deux conditions de lubrification (à sec et MQL). Dans un premier temps, le chapitre évalue l'impact des paramètres (V_c , f et a_p) sur divers indicateurs de performance, à savoir l'usure de la plaquette de coupe (V_b et $V_{b\max}$), les critères de rugosité de surface (R_a , R_t et R_z), les composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z), la puissance consommée (P_c) ainsi que la température dans la zone de coupe (T°). Par la suite, il présente une analyse statistique fondée sur l'ANOVA, une modélisation via la méthode RSM et une optimisation multi-objective portant sur les paramètres (R_a , F_z , P_c , K_c et MRR), conformément à un plan Taguchi L9 (3^3) applicable aux deux modes d'usinage. Enfin, une optimisation multicritère comparative est réalisée à l'aide de la méthode DF et de quatre autres méthodes MCDM (GRA, EAMR, FUCA et EDAS) basées sur le rapport signal-bruit (S/N) de Taguchi.

Introduction Générale

CHAPITRE I : Bibliographie : Tournage Dur, Micro-lubrification, et Optimisation

Chapitre II : Procédure Expérimental

Chapitre III : Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier AISI 52100 Lors de L'usinage à sec et MQL

Chapitre VI : Analyse Statistique et Optimisation de l'Acier Traité AISI 52100 Lors de L'usinage à sec et MQL

IV.1 Introduction

IV.2 Traitement statistique de l'acier AISI 52100 traité

IV.2.1 Morphologie du plaquette CC650 par MEB

IV.2.2 Analyse de la variance (ANOVA)

IV.2.3 Graphiques de Pareto

IV.2.4 Graphiques des effets principaux de Ra, Fz, Pc et Kc

IV.2.5 Analyse de régression des paramètre technologiques

IV.2.6 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

IV.2.7 Graphiques de surface de réponse 3D

IV.3 Optimisation mono et multi-objective des conditions de coupe

IV.4 Conclusion

CONCLUSION GENERALE

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente une étude comparative visant à déterminer la combinaison optimale des paramètres de coupe (V_c , f , a_p , ainsi que le mode de lubrification), lors de l'usinage de l'acier traité AISI 52100 (60 HRC) à l'aide d'un outil en céramique mixte (CC-650). Le travail comprend une modélisation statistique et prédictive des grandeurs de performance (R_a , F_z , P_c , K_c et MRR) fondée sur un plan d'expériences mixte Taguchi L18 ($3^3, 1^2$), et s'appuie sur la méthode (RSM) associée à l'analyse de la variance (ANOVA) pour l'identification de modèles mathématiques pertinents.

La phase d'optimisation est structurée en trois volets. Dans un premier temps, une optimisation mono-objective est réalisée sur la base des rapports signal-sur-bruit (S/N) de Taguchi, afin d'identifier les régimes optimaux pour chaque indicateur de performance pris isolément. Dans un second temps, trois méthodes d'optimisation multi-objectifs (MOO) sont mises en œuvre, à savoir (Probabilité, RAM et RAWEC) et sont combinées avec diverses méthodes de pondération (poids Égal, LOPCOW et CRITIC) pour déterminer les combinaisons de facteurs offrant le meilleur compromis entre les critères technologiques conflictuels. Enfin, une évaluation comparative des résultats optimaux est conduite à l'aide des coefficients de corrélation de Spearman et de Pearson afin de vérifier la cohérence.

Étant donné que ces deux métriques peuvent conduire à des classements divergents, une agrégation des classements obtenus est effectuée par la technique de Borda pour aboutir à une conclusion robuste sur la combinaison la plus fiable.

IV.2. Traitement statistique des résultats

Le tableau IV.1 rassemble les résultats expérimentaux obtenus lors le tournage de l'acier AISI 52100 (60 HRC) en conditions à sec et sous lubrification minimale (MQL). Il révèle que l'effort de coupe (F_z) varie de 117.9 à 210.17 N selon les combinaisons de paramètres, tandis que la rugosité moyenne (R_a) varie entre 0.268 et 1.622 μm . De même, la puissance de coupe (P_c) évolue de 324.93 à 953.50 W et la pression de coupe spécifique (K_c) se situe entre 2335.22 et 11829.17 MPa. Enfin, Le taux d'enlèvement de matière (MRR) évolue dans un intervalle défini entre 1.92 et 20.70 mm^3/min selon les conditions expérimentales. Cette plage de variation traduit l'influence directe des paramètres de coupe, notamment (V_c , f et a_p), sur la productivité du processus.

Tableau IV.1. Résultats expérimentales du plan Taguchi L18

Test N°	Paramètre d'entrée				Paramètre de sortie				
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Lub	Ra (μ m)	Fz (N)	Kc (MPa)	Pc (W)	MRR (cm ³ /min)
1	160	0.08	0.15	Sec	0.374	141.95	11829.06	378.53	1.92
2	160	0.14	0.3	Sec	0.993	164.85	3925.00	439.60	6.72
3	160	0.2	0.45	Sec	1.622	217.36	2415.13	579.63	14.4
4	230	0.08	0.15	Sec	0.366	119.60	9966.74	458.47	2.76
5	230	0.14	0.3	Sec	0.883	169.70	4040.50	650.52	9.66
6	230	0.2	0.45	Sec	1.507	210.17	2335.22	805.65	20.7
7	300	0.08	0.3	Sec	0.363	138.84	5785.00	694.20	7.2
8	300	0.14	0.45	Sec	0.925	190.70	3026.98	953.50	18.9
9	300	0.2	0.15	Sec	1.402	124.80	4160.00	624.00	9
10	160	0.08	0.45	MQL	0.268	149.90	4163.85	399.73	5.76
11	160	0.14	0.15	MQL	0.781	121.85	5802.32	324.93	3.36
12	160	0.2	0.3	MQL	1.526	176.67	2944.50	471.12	9.6
13	230	0.08	0.3	MQL	0.285	124.22	5175.87	476.18	5.52
14	230	0.14	0.45	MQL	0.796	174.90	2776.19	670.45	14.49
15	230	0.2	0.15	MQL	1.419	136.84	4561.30	524.55	6.9
16	300	0.08	0.45	MQL	0.337	162.57	4515.83	812.85	10.8
17	300	0.14	0.15	MQL	0.911	117.90	5614.29	589.50	6.3
18	300	0.2	0.3	MQL	1.19	169.04	2817.33	845.20	18

IV.2.1. Morphologie de la plaquette CC650 par MEB

L'analyse combinée MEB/EDS (figure IV.1) de la zone E de la plaquette céramique mixte CC-650 (ISO SNGA 120408 T01020) après usinage révèle un mécanisme d'usure mixte dominé par l'abrasion et l'adhésion. Les micrographies montrent des stries et rainures parallèles caractéristiques d'une usure abrasive, ainsi que des décollements localisés et des microfissurations compatibles avec des sollicitations thermo-mécaniques cycliques, des dépôts superficiels formant un film tribologique. Le spectre EDS met en évidence une teneur très élevée en Fe, indiquant un transfert de matière depuis la pièce (adhésion), une forte présence de Ti cohérente avec la présence de TiC et des contributions notables en C, O et Al, ces dernières traduisant respectivement la matrice carbure/carbone et une oxydation de surface liée aux températures de coupe. La combinaison des observations morphologiques et chimiques indique que les conditions de coupe ont favorisé l'abrasion par particules dures et le transfert adhésif de matière, tandis que la conservation des pics Ti et Al suggère une stabilité globale de la matrice (70% Al₂O₃ + 30% TiC) malgré l'endommagement. En conclusion, la plaquette CC-650 subit une

usure significative due à des conditions de coupe sévères, mais sa composition chimique de base reste intacte, ce qui corrobore sa tenue chimico-physique en usinage dur [ELBAH].

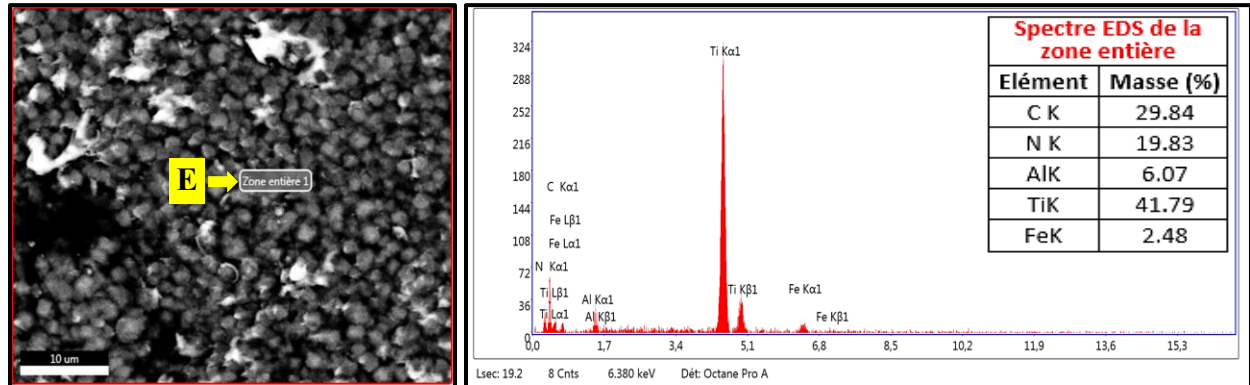


Figure IV.1. Morphologie obtenue par (MEB) et spectre EDS de la face de coupe usée de la plaquette (CC-650) (zone E).

La figure IV.2 présente des micrographies MEB de l'arête de l'outil céramique après usinage. L'observation révèle que la texture de la plaquette signale plusieurs phénomènes physiques, et des formes d'usure mixte au niveau de l'arête de l'outil, telles que des stries abrasives, usure en cratère, et une usure en entaille localisée témoignent d'une combinaison d'abrasion et d'adhésion-déformation induite par des contraintes thermomécaniques concentrées. L'entaille se traduit par un creusement irrégulier lié à la déformation plastique. Par ailleurs, des fissures thermiques perpendiculaires soulignent la vulnérabilité de la céramique aux chocs thermiques dus aux variations rapides de température, illustrant l'interaction critique entre sollicitations mécaniques et thermiques dans la dégradation de l'outil.

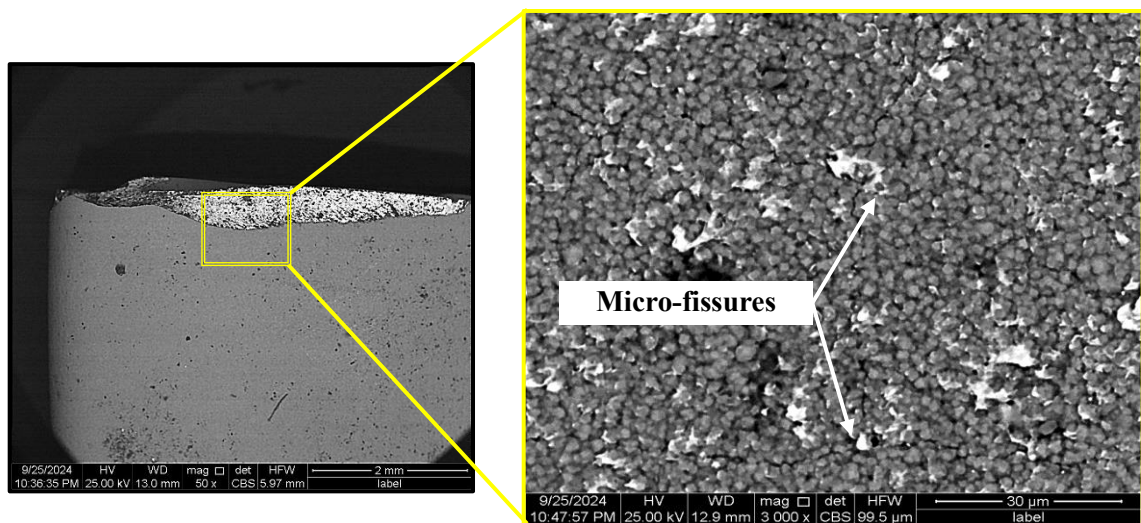


Figure IV.2. Morphologie de l'usure de la plaquette de coupe (CC-650) avec le MEB.

IV.2.2. Analyse de la variance (ANOVA)

IV.2.2.1. ANOVA pour (Ra)

Le tableau IV.2 expose l'analyse détaillée de la rugosité arithmétique de surface (Ra) à partir d'un modèle linéaire intégrant les interactions. Les résultats montrent que, parmi les paramètres de coupe principaux, l'avance (f) constitue le facteur prédominant, expliquant 96.06 % de la variance de (Ra). Cette importance s'explique par la modélisation classique de la rugosité géométrique, selon laquelle l'amplitude des ondulations laissées par l'outil dépend essentiellement de l'avance et du rayon de la plaquette. Ainsi, le mode de lubrification sur (Ra) a une contribution de 1.22 %. Par ailleurs, l'interaction entre (V_c*f) apparaît également significative, avec une contribution de 1.13 %. Des observations similaires ont été rapportées par Aouici et al [AOU 12] lors du tournage dur de l'acier AISI H11 (50 HRC) à l'aide d'un outil en CBN7020.

Tableau IV.2. ANOVA pour (Ra)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	10	3.83206	99.20%	3.83206	0.38321	86.64	0.000
Linéaires	4	3.77721	97.78%	2.31541	0.57885	130.87	0.000
V_c	1	0.01584	0.41%	0.01624	0.01624	3.67	0.097
f	1	3.71074	96.06%	2.15048	2.15048	486.19	0.000
a_p	1	0.00340	0.09%	0.00057	0.00057	0.13	0.730
Lub	1	0.04723	1.22%	0.03721	0.03721	8.41	0.023
Interaction à 2 facteurs	6	0.05485	1.42%	0.05485	0.00914	2.07	0.182
V_c*f	1	0.04380	1.13%	0.03872	0.03872	8.75	0.021
V_c*a_p	1	0.00537	0.14%	0.00317	0.00317	0.72	0.425
V_c*Lub	1	0.00219	0.06%	0.00307	0.00307	0.69	0.432
$f*a_p$	1	0.00108	0.03%	0.00097	0.00097	0.22	0.654
$f*Lub$	1	0.00137	0.04%	0.00085	0.00085	0.19	0.675
a_p*Lub	1	0.00104	0.03%	0.00104	0.00104	0.24	0.642
Erreur	7	0.03096	0.80%	0.03096	0.00442		
Total	17	3.86303	100.00%				

IV.2.2.2. ANOVA pour (Fz)

L'analyse de l'effort tangentiel (Fz) (tableau IV.3), montre que l'ensemble des paramètres étudiés exerce un effet significatif, la profondeur de passe (a_p) étant le facteur prédominant avec

une contribution de 61.2 %. Cette influence s'explique par l'augmentation de la section de copeau et donc du volume de métal à déformer qui requiert des efforts de coupe plus élevés pour l'enlèvement du matériau [ELB 15]. L'avance (f) apporte une contribution de 20.4 %, suivie par le mode de lubrification (Lub) à 7.2 % et de la vitesse de coupe (V_c) à 2.5 %. Par ailleurs, l'interaction (V_c *Lub) présente une contribution non négligeable de 2.62 %, alors que les autres interactions n'ont pas d'influence significative sur F_z .

Tableau IV.3. ANOVA pour (F_z)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	10	15749.7	98.50%	15749.7	1574.97	46.12	0.000
Linéaires	4	14592.0	91.26%	11043.3	2760.82	80.85	0.000
V_c	1	393.7	2.46%	234.2	234.23	6.86	0.034
f	1	3260.4	20.39%	2231.4	2231.37	65.34	0.000
ap	1	9784.7	61.20%	6803.5	6803.47	199.24	0.000
Lub	1	1153.3	7.21%	542.2	542.19	15.88	0.005
Interaction à 2 facteurs	1	1153.3	7.21%	542.2	542.19	15.88	0.005
Modèle	6	1157.7	7.24%	1157.7	192.96	5.65	0.019
V_c * f	1	80.0	0.50%	5.6	5.63	0.16	0.697
V_c *ap	1	398.5	2.49%	161.3	161.31	4.72	0.066
V_c *Lub	1	419.0	2.62%	252.1	252.08	7.38	0.030
f *ap	1	116.4	0.73%	44.0	43.96	1.29	0.294
f *Lub	1	142.1	0.89%	142.1	142.10	4.16	0.081
ap*Lub	1	1.7	0.01%	1.7	1.72	0.05	0.829
Erreur	7	239.0	1.50%	239.0	34.15		
Total	17	15988.8	100.00%				

IV.2.2.3. ANOVA pour (P_c)

Le tableau IV.4 montre que le modèle linéaire avec interactions, construit selon le plan de Taguchi, est significatif pour la prédiction de la puissance (P_c). L'ANOVA met en évidence (V_c) comme facteur prédominant, avec une contribution de 57.5 %, suivie par (ap) avec 27.1 %, l'avance (f) avec 6.2 % et le mode de lubrification avec une contribution de 2.3 %. Parmi les interactions à deux facteurs, les effets (V_c *ap) et (f *Lub) se distinguent, contribuant respectivement à 5.0 % et 0.5 % de la variance de P_c .

Tableau IV.4. ANOVA pour (Pc)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	10	534636	99.41%	534636	53464	117.72	0.000
Linéaires	4	499979	92.96%	477996	119499	263.12	0.000
Vc	1	309030	57.46%	264971	264971	583.43	0.000
<i>f</i>	1	33095	6.15%	26859	26859	59.14	0.000
ap	1	145603	27.07%	114404	114404	251.90	0.000
Lub	1	12251	2.28%	5772	5772	12.71	0.009
Interaction à 2 facteurs	1	12251	2.28%	5772	5772	12.71	0.009
Modèle	6	34657	6.44%	34657	5776	12.72	0.002
Vc* <i>f</i>	1	56	0.01%	2223	2223	4.89	0.063
Vc*ap	1	26885	5.00%	15309	15309	33.71	0.001
Vc*Lub	1	2635	0.49%	1430	1430	3.15	0.119
<i>f</i> *ap	1	1961	0.36%	461	461	1.01	0.347
<i>f</i> *Lub	1	2613	0.49%	3003	3003	6.61	0.037
ap*Lub	1	508	0.09%	508	508	1.12	0.325
Erreur	7	3179	0.59%	3179	454		
Total	17	537815	100.00%				

IV.2.2.4. ANOVA pour (Kc)

Le tableau IV.5 révèle que le modèle global explique 92.7 % de la variance de la pression spécifique de coupe (Kc) et qu'il est statistiquement significatif. Parmi les effets linéaires, (ap) et (*f*) contribuent respectivement à 39.9 % et 38.2 % sur la variation de (Kc). Cela illustre leur rôle prédominant lié à l'énergie nécessaire à l'enlèvement de copeau. En revanche, la vitesse de coupe (Vc) et le mode de lubrification (Lub) n'influencent pas significativement sur Kc ($p > 0.05$). Les interactions bifactorielles représentent 8.2 % de la variance totale et sont demeurées non significatives, ce qui confirme leur impact négligeable sur la précision du modèle de prédiction.

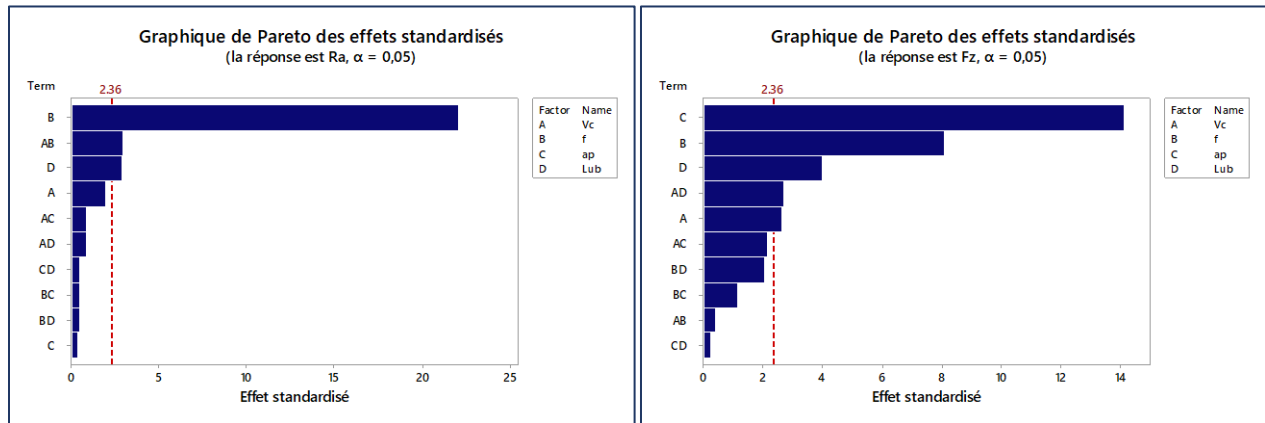
Tableau IV.5. ANOVA pour (Kc)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modèle	10	99677204	92.69%	99677204	9967720	8.88	0.004
Linéaires	4	90856001	84.49%	47623048	11905762	10.60	0.004
Vc	1	2219333	2.06%	421982	421982	0.38	0.559
<i>f</i>	1	41080731	38.20%	16623581	16623581	14.80	0.006
ap	1	42943179	39.93%	22751335	22751335	20.26	0.003
Lub	1	4612758	4.29%	499231	499231	0.44	0.526
Interaction à 2 facteurs	1	4612758	4.29%	499231	499231	0.44	0.526

Modèle	6	8821203	8.20%	8821203	1470200	1.31	0.363
Vc*f	1	368628	0.34%	333437	333437	0.30	0.603
Vc*ap	1	1718326	1.60%	987047	987047	0.88	0.380
Vc*Lub	1	2282879	2.12%	447389	447389	0.40	0.548
f*ap	1	2574669	2.39%	2898343	2898343	2.58	0.152
f*Lub	1	370775	0.34%	107101	107101	0.10	0.766
ap*Lub	1	1505926	1.40%	1505926	1505926	1.34	0.285
Erreur	7	7859880	7.31%	7859880	1122840		
Total	17	107537083	100.00%				

IV.2.3. Graphiques de Pareto

Les diagrammes de Pareto de la figure IV.3, dérivés de l'analyse de variance (ANOVA), mettent en évidence l'effet des conditions de coupe et de leurs interactions sur les réponses mesurées (Ra, Fz, Pc et Kc). Les barres standardisées correspondent à l'effet de chaque facteur divisé par l'erreur associée à son estimation. De plus, les coefficients standardisés qui dépassent la valeur critique (2.36), pour un niveau de confiance de 95 %, sont considérés comme significatifs. En d'autres termes, un coefficient standardisé de grande valeur signifie que le facteur correspondant contribue fortement à la variation de la réponse étudiée [HAO 25].



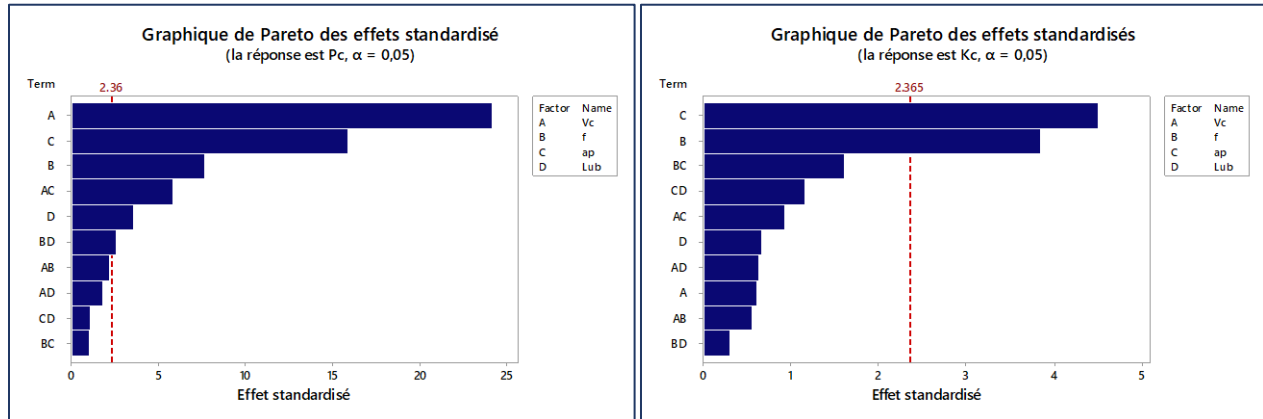


Figure IV.3. Diagramme de Pareto des effets des paramètres de coupe sur Ra, Fz, Pc et Kc.

IV.2.4. Graphique des effets principaux pour (Ra, Fz, Pc et Kc)

La figure IV.4 illustre les diagrammes des effets principaux des paramètres technologiques (Ra, Fz, Pc et Kc) par rapport aux conditions de coup (V_c , f , a_p et mode de lubrification). Plus précisément, la figure IV.4.a met en lumière l'influence de chacun de ces facteurs sur la rugosité moyenne (Ra). Il en ressort que le taux d'avance (f) prédomine, son inclinaison étant la plus marquée, ce qui signifie qu'une hausse de (f) se traduit par une augmentation sensible de (Ra). Par ailleurs, l'adoption de la lubrification MQL limite cet accroissement, abaissant (Ra) et de ce fait, améliorant la qualité de surface par rapport à l'usinage à sec. Enfin, les facteurs (V_c) et (a_p) se distinguent par des pentes très faibles, témoignant de leur impact presque négligeable sur (Ra).

La figure IV.4.b présente le tracé des effets principaux des efforts (Fz). La pente la plus accentuée est observée pour (a_p), suivie de (f), ce qui indique que l'augmentation simultanée de ces deux paramètres produit une augmentation prononcée de l'effort et par conséquent de la rugosité de surface. En revanche, l'application d'une lubrification à quantité minimale (MQL) entraîne une réduction notable des efforts de coupe. En outre, l'augmentation de (V_c) entraîne une diminution substantielle de (Fz) pendant le processus d'usinage.

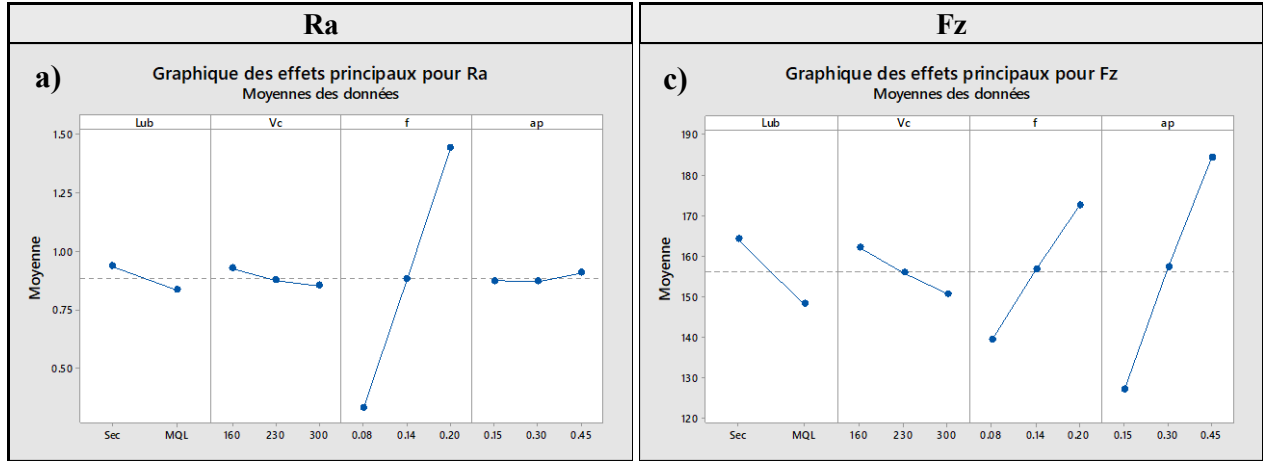


Figure IV.4. Graphique des effets principaux des réponses (Ra et Fz).

L'analyse du tracé des effets principaux de (Pc) (Figure IV.5.a) montre que (Vc) constitue le facteur prédominant ; en effet, lorsque (Vc) passe de 160 à 300 m/min, (Pc) croît sensiblement, évoluant d'environ 430 W à près de 760 W. Ensuite, (ap) se révèle en deuxième position, car toute augmentation de (ap) engendre une hausse de la puissance absorbée. Par ailleurs, le taux d'avance (f) exerce lui aussi une influence notable sur (Pc). Enfin, l'application de la lubrification MQL permet d'atténuer partiellement cet effet, puisque la puissance nécessaire chute de 620 W en condition sèche à 560 W en usinage avec MQL.

La figure IV.5.b présente le tracé des effets principaux de (Kc). L'analyse de ce graphique montre que (ap) et (f) entraînent les réductions les plus importantes, en raison de pentes particulièrement prononcées. Ainsi, l'augmentation de (ap) de 0.15 à 0.45 mm conduit à une baisse significative de (Kc), qui passe d'environ 7 000 à 3 300 MPa. De façon comparable, une augmentation de (f) de 0.08 à 0.20 mm/tr, provoque une décroissance de (Kc), qui passe de près de 6800 à 3 300 MPa, ce qui confirme que l'avance joue un rôle essentiel dans la réduction de (Kc). Par ailleurs, l'adaptation de la lubrification MQL ainsi que l'augmentation de (Vc) contribuent à une diminution plus modérée de (Kc).

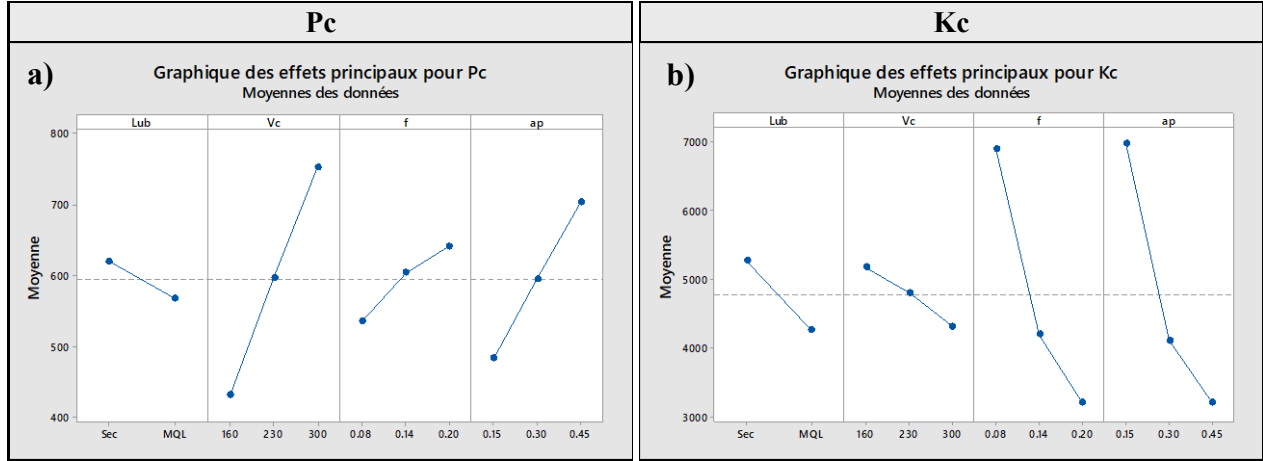


Figure IV.5. Graphique des effets principaux des réponses (Pc et Kc).

IV.2.5. Analyse de régression des paramètres technologiques

Les équations de régression reposent sur des modèles mathématiques complets élaborés selon la méthodologie de surface de réponse (MSR) [KHE 47]. Ces modèles, obtenus par régressions linéaires à effets d'interaction, décrivent la relation entre les critères de réponse (Ra, Fz, Pc et Kc) et les paramètres d'usinage (Vc, f, ap et mode de lubrification). La fiabilité des prédictions est attestée par un coefficient de détermination (R^2).

Les expressions mathématiques détaillées de chaque critère, accompagnées de leurs (R^2) respectifs pour les deux conditions de lubrification (sec et MQL), sont présentées ci-dessous :

$$Ra_{Sec} = -1.013 + 0.00251 Vc + 14.20 f + 0.782 ap - 0.01913 Vc \times f - 0.00219 Vc \times ap - 1.82 f \times ap \quad (IV. 1) \quad (R^2 = 99.20\%)$$

$$Ra_{MQL} = -1.140 + 0.00301 Vc + 13.83 f + 0.616 ap - 0.01913 Vc \times f - 0.00219 Vc \times ap - 1.82 f \times ap \quad (IV. 2)$$

$$Fz_{Sec} = 146.1 - 0.257 Vc + 152 f + 39.5 ap - 0.231 Vc \times f + 0.494 Vc \times ap + 388 f \times ap \quad (IV. 3) \quad (R^2 = 98.50\%)$$

$$Fz_{MQL} = 79.9 - 0.113 Vc + 305 f + 32.8 ap - 0.231 Vc \times f + 0.494 Vc \times ap + 388 f \times ap \quad (IV. 4)$$

$$Kc_{Sec} = 23313 - 25.4 Vc - 70084 f - 37766 ap + 56 Vc \times f + 38.6 Vc \times ap + 99543 f \times ap \quad (IV. 5) \quad (R^2 = 92.69\%)$$

$$Kc_{MQL} = 19028 - 19.4 Vc - 65889 f - 31473 ap + 56 Vc \times f + 38.6 Vc \times ap + 99543 f \times ap \quad (IV. 6)$$

$$Pc_{Sec} = 290.7 + 0.077 Vc - 768 f - 388 ap + 4.58 Vc \times f + 4.811 Vc \times ap + 1255 f \times ap \quad (IV. 7) \quad (R^2 = 99.41\%)$$

$$Pc_{MQL} = 104 + 0.419 Vc - 66 f - 50 ap + 4.58 Vc \times f + 4.811 Vc \times ap + 1255 f \times ap \quad (IV. 8)$$

IV.2.6. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

Tous les modèles développés pour l'usinage de l'acier AISI 52100 traité se sont révélés d'une grande précision, avec des coefficients de détermination (R^2) compris entre 92.69 % et 99.41 %.

La figure IV.6 (a, b, c et d) met en évidence la correspondance entre les valeurs expérimentales des différents critères de réponse (R_a , F_z , P_c et K_c) et les valeurs estimées à l'aide des modèles linéaires à interactions obtenus selon la méthode des surfaces de réponse (MSR). Ces comparaisons confirment sans équivoque la fiabilité de nos modèles de régression et leur excellente adéquation aux données mesurées.

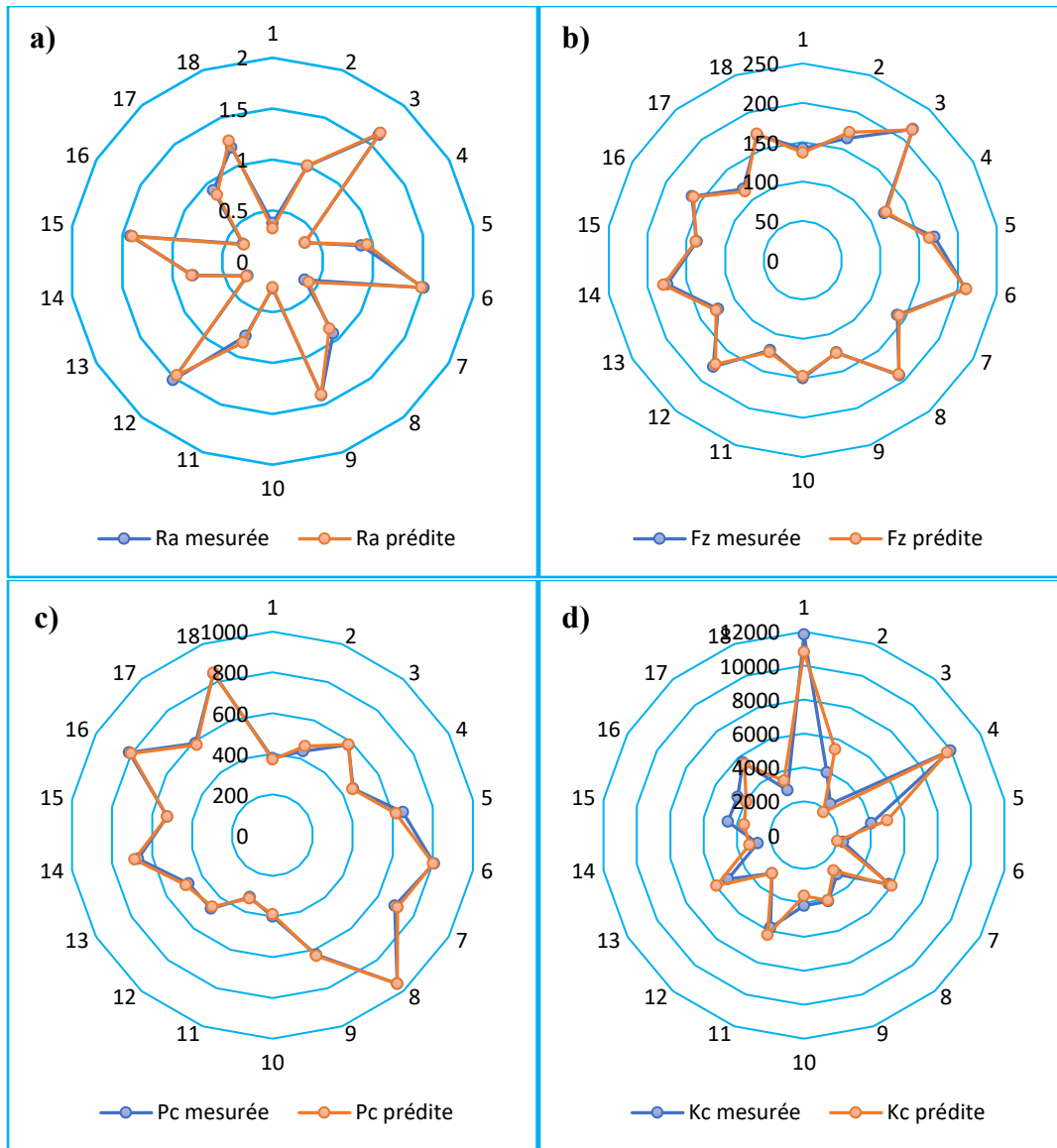


Figure IV.6. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (R_a , F_z , P_c et K_c).

IV.2.7. Surface de réponse 3D pour (R_a , F_z , P_c et K_c)

La figure IV.7 présente les graphiques 3D de surface de réponse comparant l'influence conjointe des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) sur la rugosité de surface (R_a), lors du tournage de

l'acier AISI 52100 à sec et avec lubrification MQL. L'illustration graphique montre qu'en dépit des différences dans l'environnement de lubrification, l'augmentation de l'avance (f) apparaît comme le facteur crucial qui entraîne une augmentation significative du (R_a). En outre, on constate que sur chaque plan de profile de (f), (R_a) croît légèrement lorsque (a_p) passe de 0.15 à 0.45 mm. la profondeur de passe affecte (R_a), mais moins fortement que (f). De plus, on observe une légère diminution de (R_a) lorsque (V_c) augmente (effet de refroidissement et cisaillement plus efficace) [MED 15]. Concernant le mode de refroidissement, on observe que les valeurs de (R_a) sont systématiquement plus basses en MQL. En effet, l'utilisation de cette technique de lubrification diminue l'impact du (V_c) et minimise la sensibilité au (f et à a_p). Les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec la littérature [MAN 25].

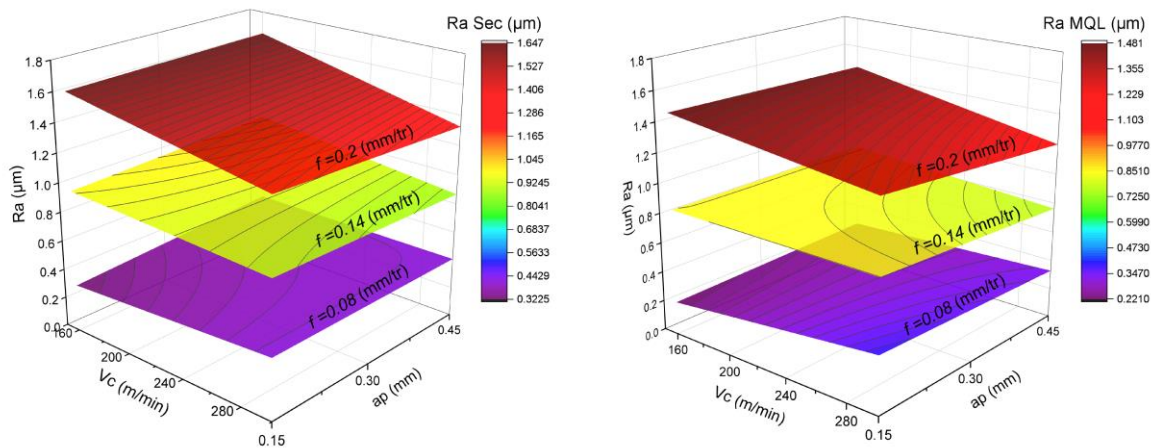


Figure IV.7. Courbes 3D présentent l'effet de (V_c , f et a_p) sur (R_a).

La figure IV.8 présente les surfaces de réponse 3D de l'effort de coupe tangentiel (F_z) en conditions (a) sec et (b) MQL. Tout d'abord, on observe que (a_p) exerce l'influence la plus marquée sur (F_z) ; une augmentation linéaire de a_p de 0.15 à 0.45 mm se traduit par un décalage progressif des plans vers des valeurs supérieures de (F_z). Par ailleurs, l'avance (f) affecte également (F_z) de manière significative, bien que son impact reste légèrement inférieur à celui de (a_p) pour les deux modes de lubrification. Ceci est dû à l'accroissement de la surface de coupe du copeau ($a_p \cdot f$), ce qui rend le processus de cisaillement plus complexe. En ce qui concerne (V_c), la figure IV.8.a montré qu'en usinage à sec, une augmentation de (V_c) entraîne une légère diminution de (F_z), tandis qu'en MQL (figure IV.8.b) la surface demeure presque plane selon l'axe V_c , révélant un effet négligeable. Enfin, la comparaison des deux conditions indique que la lubrification MQL réduit la sensibilité de (F_z) aux variations de (f et a_p) et rend l'effet de (V_c) presque négligeable [KUM 25].

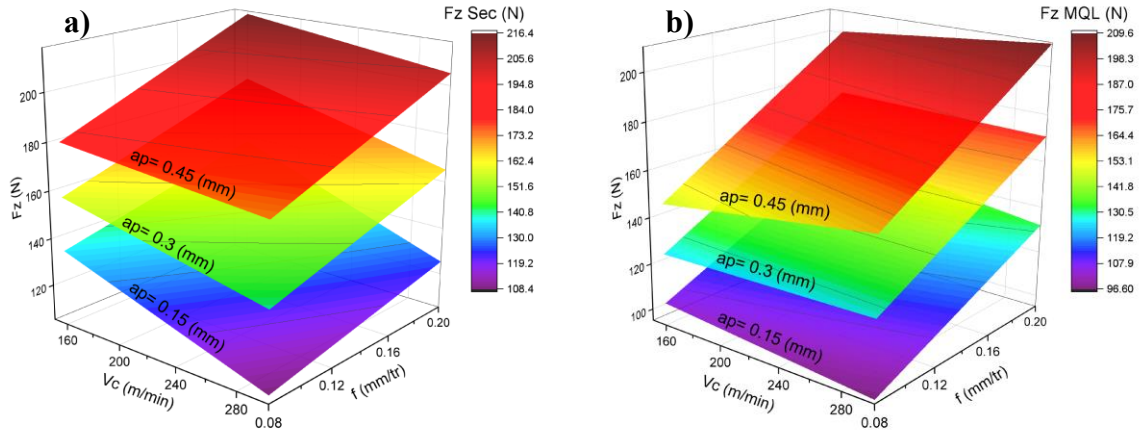


Figure IV.8. Courbes 3D présentent l'effet de (V_c , f et a_p) sur (F_z).

La figure IV.9 compare, en conditions à sec et MQL, les surfaces de réponse 3D de la puissance de coupe (P_c) en fonction des paramètres (V_c , a_p et f). D'abord, la pente la plus marquée se trouve selon la variation de (V_c), ce qui confirme que (V_c) est le facteur le plus déterminant. L'inclinaison des plans de surface montre que (P_c) s'accroît avec (V_c), lorsque (V_c) passe de 160 à 300 m/min, l'ensemble de la surface se décale clairement vers des valeurs plus élevées de (P_c). Ensuite, (a_p) a un impact significatif sur chaque niveau de (P_c). Une augmentation linéaire de (a_p) induit une augmentation significative de (P_c), comme en témoigne le déplacement progressif des plans de surface vers des valeurs supérieures. Par ailleurs, l'avance (f) exerce une influence plus modérée, presque négligeable en comparaison de (V_c et a_p). Enfin, la lubrification avec MQL atténue légèrement la sensibilité de (P_c) aux trois paramètres, comme le démontrent les surfaces moins prononcées lors de la lubrification MQL qu'à sec.

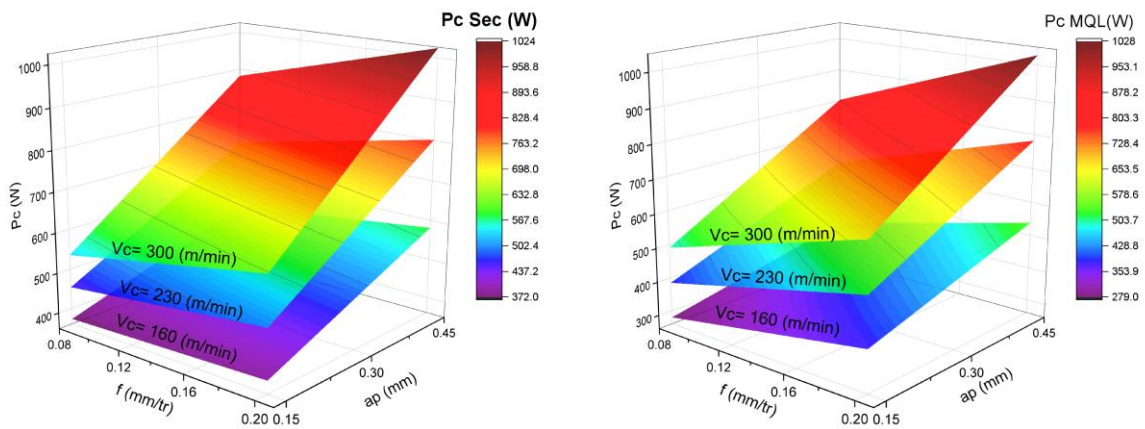


Figure IV.9. Courbes 3D présentent l'effet de (V_c , f et a_p) sur (P_c).

Les surfaces de réponse de la pression spécifique de coupe (figure IV.10) montrent que (K_c) diminue avec l'augmentation de (V_c) et croît avec (ap), tandis qu'une élévation de (f) contribue à réduire (K_c). L'application du MQL réduit systématiquement (K_c) par rapport à l'usinage à sec. Cette réduction est particulièrement marquée aux faibles vitesses et pour de grandes profondeurs de coupe, ce qui traduit une diminution de la contrainte spécifique et une amélioration de l'efficacité énergétique sous MQL. Ces constatations indiquent que l'association d'une grande vitesse et du MQL pourrait être une approche bénéfique pour réduire la pression spécifique et prolonger potentiellement la durée de vie de l'outil.

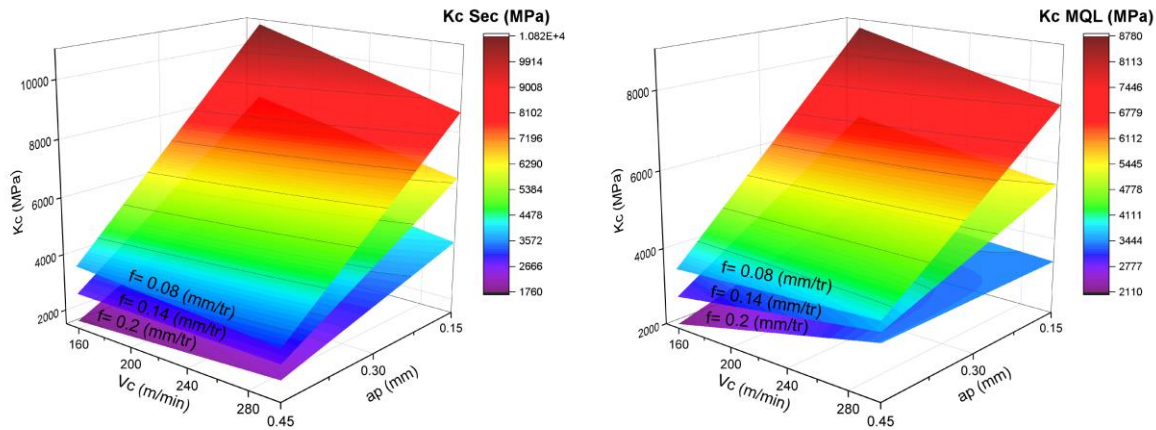


Figure IV.10. Courbes 3D présentent l'effet de (V_c , f et ap) sur (K_c).

IV.3. Optimisation mono et multi-objectif des conditions de coupe

Dans le cadre de la recherche d'un régime de coupe optimal, une étude comparative a été menée en adoptant à la fois une démarche mono-objectif et multi-objectif. D'une part, l'optimisation mono-objectif s'appuie sur la méthodologie Taguchi, qui transforme les données en rapports Signal/Bruit pour évaluer la variabilité du processus, le « signal » correspondant à la valeur cible de la caractéristique de sortie et le « bruit » aux sources de variation non maîtrisées par le plan d'expérience [LEE 03]. D'autre part, l'optimisation multi-objectif fait intervenir trois méthodes multicritères de décision (MCDM) notamment ; RAM, RAWEC, Probability. Ces méthodes ont été combinées avec les techniques de pondération (Égal, LOPCOW et CRITIC) afin de déterminer la combinaison idéale des conditions de coupe, prenant en compte l'importance relative des critères. L'organigramme de la figure IV.11 illustre le déroulement général de la méthodologie d'optimisation.

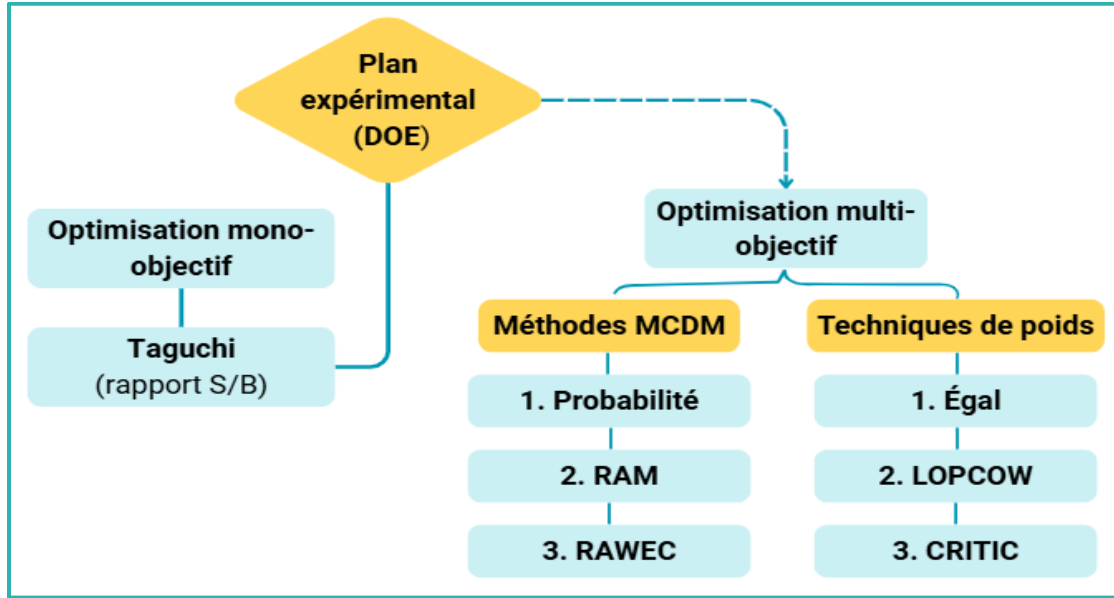


Figure IV.11. Flux global de la méthodologie d'optimisation.

Dans cette étude, l'amélioration des performances de coupe constitue l'objectif principal. L'objectif est donc d'obtenir le plus petit ratio (S/B) possible pour minimiser Ra, Fz, Pc et Kc. Ainsi que d'obtenir le plus grand ratio (S/B) possible pour maximiser les valeurs de MRR. Ces résultats ont été calculés suivant les équations III.12 à III.16 et synthétisés dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6. Résultats du rapport (S/B) pour (Fz, Ra, Pc, Kc et MRR)

Test N°	Rapport S/B				
	Ra (dB)	Fz (dB)	Kc (dB)	Pc (dB)	MRR (dB)
1	8.5426	-43.0427	-81.4591	-51.5620	5.6660
2	0.0610	-44.3418	-71.8768	-52.8612	16.5474
3	-4.2010	-46.7436	-67.6587	-55.2630	23.1672
4	8.7304	-41.5546	-79.9710	-53.2262	8.8182
5	1.0808	-44.5936	-72.1287	-56.2652	19.6995
6	-3.5623	-46.4514	-67.3666	-58.1229	26.3194
7	8.8019	-42.8503	-75.2461	-56.8297	17.1466
8	0.6772	-45.6070	-69.6202	-59.5864	25.5292
9	-2.9350	-41.9243	-72.3819	-55.9037	19.0849
10	11.4373	-43.5160	-72.3900	-52.0353	15.2084
11	2.1470	-41.7165	-75.2721	-50.2358	10.5268
12	-3.6711	-44.9433	-69.3802	-53.4626	19.6454
13	10.9031	-41.8838	-74.2796	-53.5554	14.8388
14	1.9817	-44.8558	-68.8690	-56.5273	23.2214
15	-3.0396	-42.7243	-73.1818	-54.3957	16.7770
16	9.4474	-44.2208	-73.0948	-58.2002	20.6685
17	0.8096	-41.4303	-74.9859	-55.4097	15.9868
18	-1.5109	-44.5598	-68.9968	-58.5392	25.1055

IV.3.1. Optimisation mono-objective de Taguchi

L'analyse basée sur le calcul des moyennes des rapports (S/B) issus des résultats expérimentaux, pour chacun des niveaux des paramètres d'usinage (V_c , f , ap et pour chaque mode de lubrification).

Les résultats présentés au tableau IV.7 et illustrés par la figure IV.12.a révèlent des effets contrastés des paramètres d'usinage et du mode de lubrification sur la rugosité (R_a). L'avance (f) exerce l'influence la plus marquée avec un effet de (12.797), suivie du mode de lubrification (1.257), tandis que (V_c) et (ap) ont des effets plus faibles de (0.296 et 0.254), respectivement. Selon l'approche Taguchi basée sur (S/B), la combinaison optimale pour minimiser (R_a) correspond aux niveaux (V_{c2} , f_1 , ap_3 et Lub2).

La figure IV.11.b présente que les paramètres de coupe ont différents effets sur (F_z). la profondeur de passe (ap) présente l'influence la plus marquée avec (3,17), suivie par (f) avec (1,71), du mode de lubrification (Lub) avec (0.81) et enfin de (V_c) avec un faible effet de (0.62). La combinaison optimale permettant de minimiser (F_z) est (V_{c3} , f_1 , ap_1 et Lub2).

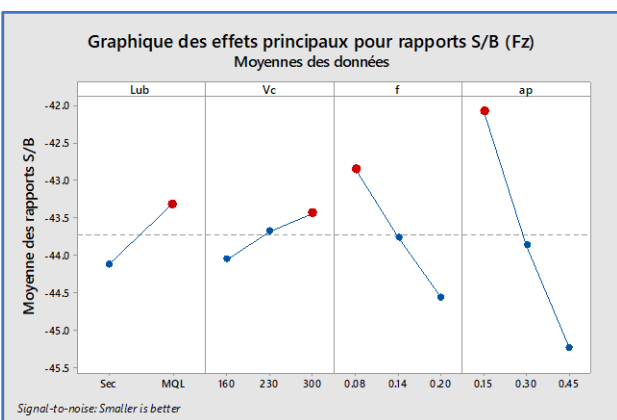
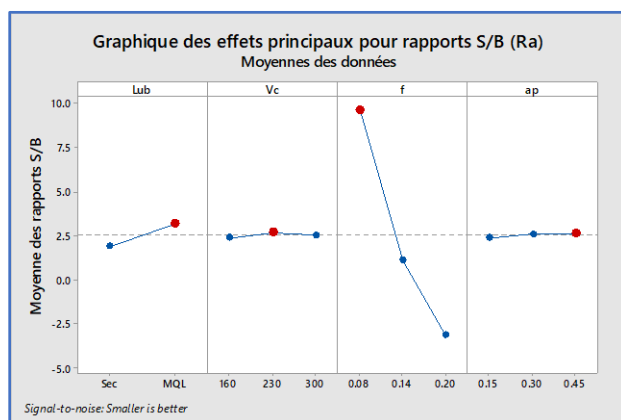
Les résultats relatifs à (P_c), présentés au tableau IV.7 et illustrés par la figure IV.12.c, montrent que (V_c) exerce l'influence la plus importante avec (4.84), suivie de (ap) avec (3.17) et l'avance (f) avec (1.71), tandis que le mode de lubrification (Lub) avec seulement un effet marginal (0.81). Ce qui conduit à un régime optimal de (P_c) qui correspond à la combinaison (V_{c1} , f_1 , ap_1 et Lub2).

Les résultats présentés au tableau IV.7 et illustrés par le graphique des effets principaux pour les rapports S/B mettent en évidence l'influence distincte des paramètres d'usinage et du mode de lubrification sur (K_c) (figure IV.12.d). La profondeur (ap) et l'avance (f) montrent les effets les plus significatifs, avec des deltas respectifs de (6.38 et 6.25), indiquant une sensibilité élevée de (K_c) à ces paramètres. En revanche, le mode de lubrification (Lub) et (V_c) ont des impacts marginaux, avec des deltas de (0.81 et 0.62). Conformément à l'approche Taguchi (S/B) où « plus petit, c'est mieux », la combinaison optimale pour minimiser (K_c) correspond aux niveaux suivants (V_{c3} , f_3 , ap_3 et Lub2).

Enfin, les données du tableau IV.7 et de la figure IV.12. e montrent que le taux de matière enlevée (MRR) atteint son optimum pour la combinaison (V_{c3} , f_3 et ap_3), correspondant aux niveaux maximaux des paramètres de coupe. Ces conditions optimales sont repérées sur la figure IV.11 au moyen de cercles rouges.

Tableau IV.7. Analyse des réponses pour Taguchi (S/B)

	Niveau	Lub	Vc	f	ap
Analyse Taguchi (S/B) pour Ra	1	1.911	2.386	9.644	2.376
	2	3.167	2.682	1.126	2.611
	3		2.548	-3.153	2.630
	Delta	1.257	0.296	12.797	0.254
	Rang	2	3	1	4
Analyse Taguchi (S/B) pour Fz	1	-44.12	-44.05	-42.84	-42.07
	2	-43.32	-43.68	-43.76	-43.86
	3		-43.43	-44.56	-45.23
	Delta	0.81	0.62	1.71	3.17
	Rank	3	4	2	1
Analyse Taguchi (S/B) pour Kc	1	-73.08	-73.01	-76.07	-76.21
	2	-72.27	-72.63	-72.13	-71.98
	3		-72.39	-69.83	-69.83
	Delta	0.81	0.62	6.25	6.38
	Rank	3	4	2	1
Analyse Taguchi (S/B) pour Pc	1	-55.51	-52.57	-54.23	-53.46
	2	-54.71	-55.35	-55.15	-55.25
	3		-57.41	-55.95	-56.62
	Delta	0.81	4.84	1.71	3.17
	Rank	4	1	3	2
Analyse Taguchi (S/B) pour MRR	1	18.00	15.13	13.72	12.81
	2	18.00	18.28	18.59	18.83
	3		20.59	21.68	22.35
	Delta	0.00	5.46	7.96	9.54
	Rank	4	3	2	1



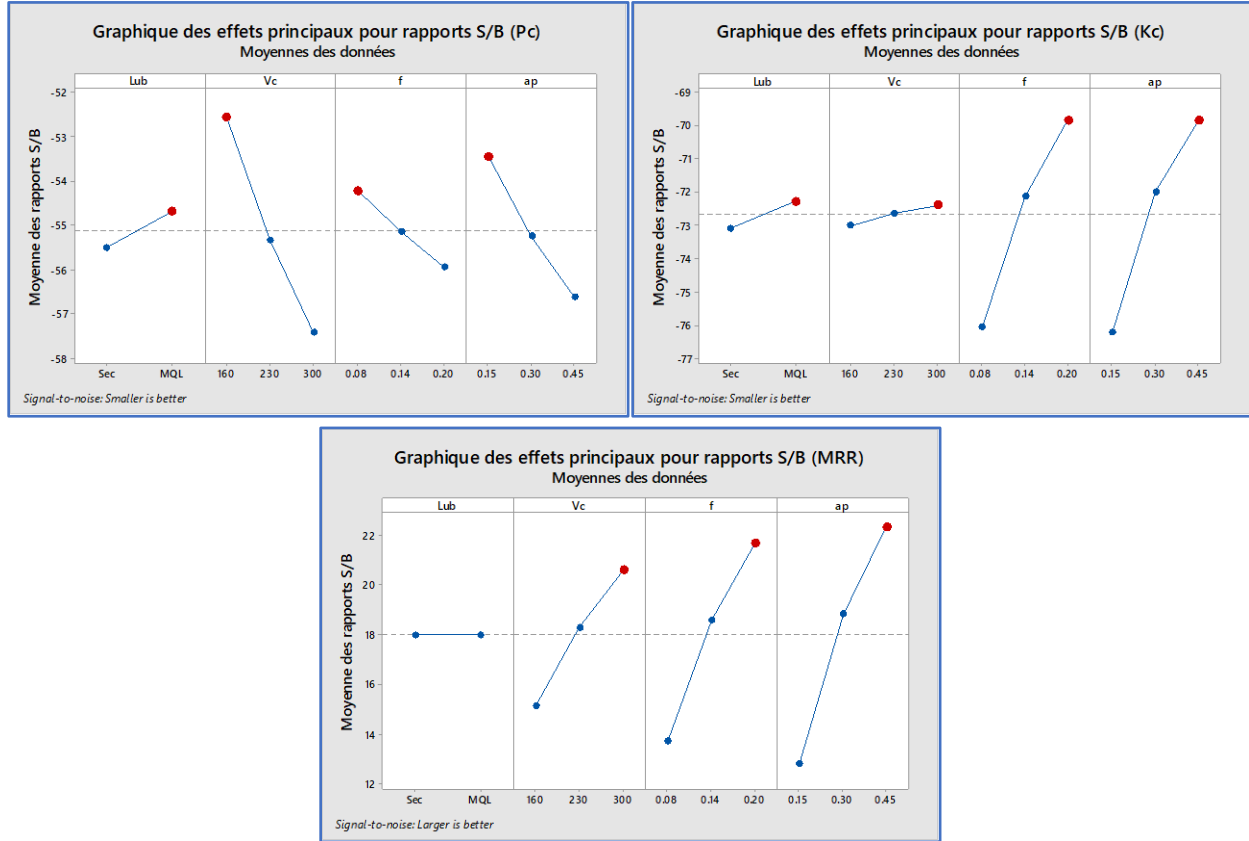


Figure IV.12. Graphique des effets principaux des réponses à la base du rapport (S/B) de Taguchi.

Le tableau IV.8 récapitule les conditions de coupe optimales associées à chaque paramètre de performance (Ra, Fz, Pc, Kc et MRR), telles qu'elles ont été déterminées à l'aide de l'approche mono-objectif de Taguchi basée sur le rapport (S/B).

Tableau IV.8. Paramètres de coupe optimales

Objectif	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Lub	Réponse
Min (Ra)	230	0.08	0.45	MQL	0.321 (μm)
Min (Fz)	300	0.08	0.15	MQL	110.9 (N)
Min (Pc)	160	0.08	0.15	MQL	317.7 (W)
Min (Kc)	300	0.2	0.45	MQL	2162.1 (MPa)
Max (MRR)	300	0.2	0.45	-	27 (cm^3/min)

IV.3.1. Optimisation multi-objectifs des conditions de coupe

La principale limite de l'approche mono-objectif fondée sur l'analyse de Taguchi et le rapport (S/B) tient à son incapacité à optimiser simultanément plusieurs critères de réponse [ZER 18]. Cette partie vise à identifier les combinaisons optimales de facteurs de coupe permettant d'obtenir

un compromis satisfaisant entre divers paramètres technologiques, en appliquant une série de méthodes d'optimisation multi-objectifs (MOO) récemment développées. Plus précisément, les méthodes employées incluent la méthode des probabilités, la méthode d'évaluation des racines (RAM), ainsi que la méthode de classement des alternatives avec pondération des critères (RAWEC). Le déroulement général du processus ainsi que les étapes méthodologiques sont comme suit :

IV.3.2.1. Optimisation par la méthode probabilité

La procédure suivante est employée pour traiter le problème de la prise de décision multicritère via la méthode des probabilités [ZHE 23].

- **Étape 1** : une matrice de décision est ainsi établie comme indiqué dans le tableau (1), où m indique le nombre d'alternatives et n le nombre de critères pour chaque alternative. x_{ij} est la valeur du critère j pour l'alternative i , avec $i = 1 \div m$, et $j = 1 \div n$.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

- **Étape 2** : la probabilité d'obtenir un résultat favorable dans le processus de décision est calculée selon les formules (2) et (3) :

$$\begin{cases} \alpha_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} & \text{if } j \in BC \\ P_{ij} \propto x_{ij}, \quad P_{ij} = \alpha_j x_{ij} \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

$$\begin{cases} \beta_j = \frac{1}{m \left(x_{jmax} + x_{jmin} - \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}}{m} \right)} & \text{if } j \in NC \\ P_{ij} \propto (x_{jmax} + x_{jmin} - x_{ij}) \\ P_{ij} = \beta_j (x_{jmax} + x_{jmin} - x_{ij}) \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

Où (BC) est utilisé pour le critère d'avantage et (NC) est utilisé pour les critères non complémentaires.

- **Étape 3** : en incorporant le poids w_j pour chaque critère j , calculer la probabilité favorable globale pour chaque alternative i à l'aide de la formule (4). L'alternative optimale est celle qui obtient la probabilité favorable globale la plus élevée.

$$P_i = \prod_{j=1}^n (P_{ij})^{w_j} \quad (\text{IV.12})$$

IV.3.2.2. Optimisation par la méthode RAM

Les étapes du classement des alternatives à l'aide de la méthode d'évaluation racine (Root Assessment Method, RAM) sont les suivantes [TRU 24].

- **Étape 1** : élaboration de la matrice de décision.
- **Étape 2** : normalisation des valeurs de la matrice de décision selon l'équation (20).

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (\text{IV.13})$$

- **Étape 3** : déterminer les valeurs normalisées en incorporant les poids attribués à chaque critère, comme défini dans la formule (21) :

$$Y_{ij} = w_{ij} \cdot n_{ij} \quad (\text{IV.14})$$

- **Étape 4** : déterminer le total normalisé selon les formules (15) et (16) :

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n Y_{+ij} \quad \text{if } j \in B \quad (\text{IV.15})$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^n Y_{-ij} \quad \text{if } j \in C \quad (\text{IV.16})$$

- **Étape 5** : déterminer le score de chaque alternative conformément à l'équation (24).

$$RI_i = \sqrt[2+S_{-i}]{2 + S_{+i}} \quad (\text{IV.17})$$

- **Étape 6** : classer les alternatives par ordre décroissant sur la base de leur score (RI_i), l'alternative obtenant le score (RI_i) le plus élevé étant considérée comme la meilleure.

IV.3.2.3. Optimisation par la méthode de RAWEC

Le processus de calcul pour l'utilisation de la (RAWEC) est le suivant [PUS 24].

- **Étape 1** : formation de la matrice de décision.
- **Étape 2** : une double normalisation a été appliquée pour normaliser la matrice de décision initiale, en utilisant les formules suivantes :

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}} \text{ et } n'_{ij} = \frac{x_j^{min}}{x_{ij}} \quad \text{pour } X \in BC \quad (\text{IV.18})$$

$$n_{ij} = \frac{x_j^{min}}{x_{ij}} \text{ et } n'_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}} \quad \text{pour } X \in NC \quad (\text{IV.19})$$

Les termes $x_{j \min}$ et $x_{j \max}$ désignent respectivement les valeurs minimale et maximale des alternatives pour un critère donné. Dans le cadre de la double normalisation, la matrice de décision initiale est transformée selon deux approches distinctes. La première normalisation, notée (n_{ij}) , convertit tous les critères en critères de type bénéfice, attribuant la valeur maximale (1) aux alternatives présentant les meilleures performances pour chaque critère. La seconde normalisation, notée (n'_{ij}) , traite les critères comme des critères de type coût, en attribuant la valeur maximale (1) aux alternatives présentant les plus faibles valeurs pour les critères concernés.

- **Étape 2** : calcul de l'écart par rapport au poids du critère. Cette étape combine la pondération de la matrice de décision normalisée et le calcul de l'écart par rapport au poids des critères. Ce calcul est réalisé à l'aide des expressions suivantes :

$$v_{ij} = \sum_{i=1}^n w_j \cdot (1 - n_{ij}) \quad (\text{IV.20})$$

$$v'_{ij} = \sum_{i=1}^n w_j \cdot (1 - n'_{ij}) \quad (\text{IV.21})$$

Où (w_j) représente le poids des critères. Les écarts entre les données normalisées et la valeur de référence (1) sont calculés. L'écart (v_{ij}) issu de la normalisation bénéfice doit être minimisé, tandis que l'écart (v'_{ij}) issu de la normalisation coût doit être maximisé. Sur la base de ces écarts, la valeur finale des alternatives est calculée.

- **Étape 3** : calcul de la valeur de la méthode RAWEC. Cette valeur est calculée sur la base de l'expression suivante :

$$Q_i = \frac{v'_{ij} - v_{ij}}{v'_{ij} + v_{ij}} \quad (\text{IV.22})$$

- **Étape 4** : les alternatives sont classées selon le principe que celle présentant le score le plus élevé est considérée comme la plus optimale. La méthode RAWEC attribue à chaque alternative une valeur comprise entre -1 et 1 , où la valeur la plus proche de 1 indique l'option la plus favorable et donc la solution idéale.

IV.3.2.4. Méthodes objectives de détermination de la pondération des critères

Pour calculer les poids des critères à l'aide de la méthode LOPCOW, on applique la séquence suivante [SIM 24] :

- **Étape 1** : construire la matrice de décision.
- **Étape 2** : calculer les valeurs normalisées des composantes (y_{ij}) :

$$n_{ij} = \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}}, \quad j \in B \quad (\text{IV.23})$$

$$n_{ij} = \frac{\max y_{ij} - y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}}, \quad j \in C \quad (\text{IV.24})$$

- **Étape 3** : calculer les valeurs PV_{ij} pour chaque composante, où σ est l'écart-type.

$$PV_{ij} = 100 \times \left| \ln \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m n_{ij}^2}}{m} \right| \quad (\text{IV.25})$$

- **Étape 4** : calculer les poids des critères.

$$w_j = \frac{PV_{ij}}{\sum_{j=1}^n PV_{ij}} \quad (\text{IV.26})$$

La procédure de calcul des poids des critères selon la méthode CRITIC se déroule comme suit [DUA 24] :

- **Étape 1** : construire une matrice de décision.
- **Étape 2** : calculer les valeurs normalisées des composantes (y_{ij}).

$$n_{ij} = \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \quad (\text{IV.27})$$

- **Étape 3** : le poids du critère j est calculé à l'aide des formules (IV.28) et (IV.29) :

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (\text{IV.28})$$

$$C_j = \sigma_j \times \sum_{j=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (\text{IV.29})$$

où σ_j est l'écart-type du critère j , r_{ij} est le coefficient de corrélation entre deux critères.

Pour rationaliser le processus de calcul des pondérations, une méthode de pondération égale a été adoptée et calculée à l'aide de l'Eq (30), selon laquelle chacun des n critères se voit attribuer un poids identique, en partant du principe que tous les critères ont la même importance [SOU 24].

$$w_j = \frac{1}{n} \quad j = (1 \div n) \quad (\text{IV.30})$$

L'attribution de poids aux critères à l'aide de ces méthodes de pondération subjective sera appliquée dans les sections suivantes de cette étude en utilisant le logiciel Excel comme outil. Les résultats sont récapitulés dans le tableau IV.9.

Tableau IV.9. Résultats de pondération des critères

Méthode poids	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
Égal	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
LOPCOW	0.16	0.21	0.21	0.28	0.14
CRITIC	0.22	0.19	0.18	0.18	0.23

IV.3.2.5. Application des méthodes proposées

❖ Application de la méthode probabilité

A partir des résultats du tableau IV.1, la méthode de probabilité a été utilisée pour identifier la solution optimale parmi les résultats expérimentaux. Le tableau IV.10 présente les résultats de l'évaluation de la probabilité d'obtenir une valeur favorable dans le processus de décision qui ont été calculés selon les formules (IV.10) et (IV.11). De plus, le tableau IV.11 résume les résultats de la probabilité favorable globale et rang des alternatives pour les trois méthodes de pondérations appliquées (Égal, LOPCOW et CRITIC).

Tableau IV.10. Résultats de l'évaluation de la méthode de probabilité préférée à poids égal

Test N°	P_{ij}				
	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
A1	0.08	0.06	0.07	0.01	0.01
A2	0.05	0.05	0.07	0.06	0.04
A3	0.01	0.04	0.06	0.07	0.08
A4	0.08	0.07	0.07	0.02	0.02
A5	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06
A6	0.02	0.04	0.04	0.07	0.12
A7	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04
A8	0.05	0.04	0.03	0.07	0.11
A9	0.03	0.07	0.05	0.06	0.05
A10	0.09	0.06	0.07	0.06	0.03
A11	0.06	0.07	0.08	0.05	0.02
A12	0.02	0.05	0.07	0.07	0.06
A13	0.09	0.07	0.07	0.05	0.03
A14	0.06	0.05	0.05	0.07	0.08
A15	0.03	0.06	0.06	0.06	0.04
A16	0.09	0.05	0.04	0.06	0.06
A17	0.05	0.07	0.06	0.05	0.04
A18	0.04	0.05	0.04	0.07	0.10

Le classement, présenté dans le tableau IV.11 par rapport aux diverses pondérations, identifie l'essai A14 comme la configuration optimale pour deux méthodes de poids (Égale et CRITIC). Réalisé avec des facteurs de coupe V_{c2}, f_2, a_{p3} et un mode de lubrification avec MQL, cet essai a obtenu le score P_i le plus élevé, signifiant son équilibre entre la minimisation du (R_a, F_z, P_c et K_c) et la maximisation du MRR. En outre, l'essai A10 choisi comme la solution optimale selon la méthode LOPCOW, avec des facteurs de coupe V_{c1}, f_1, a_{p3} et le mode de lubrification avec MQL. Dans ce cas, la méthode LOPCOW se révèle particulièrement axée sur l'optimisation des critères de bénéfice, tout en accordant une importance moindre aux critères de coût.

Tableau IV.11. Résultats de la probabilité favorable globale et classement des alternatives

Test N°	Égal		LOPCOW		CRITIC	
	P_i	Rank	P_i	Rank	P_i	Rank
A1	0.036	18	0.035	18	0.035	18
A2	0.053	9	0.055	5	0.052	9
A3	0.045	16	0.047	16	0.044	16
A4	0.043	17	0.043	17	0.042	17
A5	0.055	7	0.055	6	0.055	8
A6	0.048	13	0.049	15	0.049	11
A7	0.055	5	0.055	7	0.055	7
A8	0.054	8	0.052	11	0.056	5
A9	0.049	12	0.051	12	0.048	12
A10	0.059	2	0.060	1	0.059	3
A11	0.050	11	0.053	10	0.048	13
A12	0.047	14	0.050	13	0.046	14
A13	0.058	3	0.059	3	0.057	4
A14	0.061	1	0.060	2	0.062	1
A15	0.047	15	0.049	14	0.045	15
A16	0.057	4	0.056	4	0.059	2
A17	0.052	10	0.053	9	0.051	10
A18	0.055	6	0.054	8	0.056	6

❖ Application de la méthode RAM

Les résultats de calcul de la méthode d'évaluation de la racine (RAM) sont résumés dans le tableau IV.12. La normalisation de l'ensemble des données a été réalisée à l'aide de l'équation (IV.13) afin d'assurer l'homogénéité dimensionnelle entre les critères. Ensuite, les valeurs normalisées pondérées ont été dérivées à l'aide de l'équation (IV.14). Les scores normalisés totaux pour le critère de bénéfice ($S+i$) et le critère de non-bénéfice ($S-i$) ont ensuite été calculés à l'aide des

équations (IV.15) et (IV.16), respectivement. Le score global (RI_i) de chaque méthode de pondération ainsi que la classification de RI_i sont notamment présentés dans le tableau IV.13.

Tableau IV.12. Résultats évalués de la méthode RAM

Test N°	r_{ij}					y_{ij}					S_{-i}	S_{+i}
	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR		
A1	0.023	0.050	0.035	0.138	0.011	0.005	0.010	0.007	0.028	0.002	0.049	0.002
A2	0.062	0.059	0.041	0.046	0.039	0.012	0.012	0.008	0.009	0.008	0.042	0.008
A3	0.102	0.077	0.054	0.028	0.084	0.020	0.015	0.011	0.006	0.017	0.052	0.017
A4	0.023	0.043	0.043	0.116	0.016	0.005	0.009	0.009	0.023	0.003	0.045	0.003
A5	0.055	0.060	0.061	0.047	0.056	0.011	0.012	0.012	0.009	0.011	0.045	0.011
A6	0.094	0.075	0.075	0.027	0.120	0.019	0.015	0.015	0.005	0.024	0.054	0.024
A7	0.023	0.049	0.065	0.067	0.042	0.005	0.010	0.013	0.013	0.008	0.041	0.008
A8	0.058	0.068	0.089	0.035	0.110	0.012	0.014	0.018	0.007	0.022	0.050	0.022
A9	0.088	0.044	0.058	0.048	0.052	0.018	0.009	0.012	0.010	0.010	0.048	0.010
A10	0.017	0.053	0.037	0.048	0.033	0.003	0.011	0.007	0.010	0.007	0.031	0.007
A11	0.049	0.043	0.030	0.068	0.020	0.010	0.009	0.006	0.014	0.004	0.038	0.004
A12	0.096	0.063	0.044	0.034	0.056	0.019	0.013	0.009	0.007	0.011	0.047	0.011
A13	0.018	0.044	0.045	0.060	0.032	0.004	0.009	0.009	0.012	0.006	0.033	0.006
A14	0.050	0.062	0.063	0.032	0.084	0.010	0.012	0.013	0.006	0.017	0.041	0.017
A15	0.089	0.049	0.049	0.053	0.040	0.018	0.010	0.010	0.011	0.008	0.048	0.008
A16	0.021	0.058	0.076	0.053	0.063	0.004	0.012	0.015	0.011	0.013	0.042	0.013
A17	0.057	0.042	0.055	0.065	0.037	0.011	0.008	0.011	0.013	0.007	0.044	0.007
A18	0.075	0.060	0.079	0.033	0.105	0.015	0.012	0.016	0.007	0.021	0.049	0.021

D'après le tableau IV.13, la combinaison de la méthode RAM avec les pondérations Égal et LOPCOW a donné l'essai A14 le désignant ainsi employant la combinaison de coupe ($Vc2$, $f2$, $ap3$ et MQL) comme une solution optimale pour le cas établi. Par contre, le couple RAM et CRITIC sélectionner l'essai A8 comme la configuration optimale avec une combinaison de ($Vc3$, $f2$, $ap3$ et Sec). En outre, l'essai A1 apparaissant comme le moins bien classé, ce qui témoigne de son inefficacité à concilier les objectifs concurrents.

Tableau IV.13. Le score global (RI_i) de la méthode RAM et le classement des expériences

Test N°	Égal		LOPCOW		CRITIC	
	RI_i	Rank	RI_i	Rank	RI_i	Rank
A1	1.403	18	1.400	18	1.404	18
A2	1.407	11	1.406	9	1.408	11
A3	1.407	8	1.406	8	1.408	8
A4	1.405	17	1.402	17	1.405	17
A5	1.407	9	1.406	11	1.408	10
A6	1.409	4	1.407	5	1.411	4
A7	1.407	10	1.405	12	1.408	9
A8	1.410	2	1.407	4	1.411	1
A9	1.406	14	1.405	14	1.407	13
A10	1.409	5	1.407	2	1.410	6
A11	1.406	13	1.405	13	1.407	15
A12	1.407	12	1.406	10	1.407	12
A13	1.408	7	1.407	6	1.409	7
A14	1.410	1	1.408	1	1.411	2
A15	1.406	16	1.404	16	1.406	16
A16	1.409	6	1.406	7	1.410	5
A17	1.406	15	1.405	15	1.407	14
A18	1.410	3	1.407	3	1.411	3

❖ Application de la méthode RAWEC

Les valeurs normalisées n_{ij} et n'_{ij} de la matrice de décision pour chacun des critères, ainsi que les écarts v_{ij} et v'_{ij} en fonction des poids attribués, sont présentés dans le tableau IV.14 pour le couple de méthodes RAWEC + Égal. Par ailleurs, le score global (Q_i) obtenu par la méthode RAWEC, ainsi que le classement des expériences, figurent dans le tableau IV.15. Étant donné que la meilleure performance correspond à la valeur maximale de Q_i , il ressort clairement que la combinaison optimale identifiée par les trois méthodes de pondération est la même ($V_{c1} = 160 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$, $f_1 = 0.08 \text{ mm} \times \text{tr}^{-1}$, $ap_3 = 0.45 \text{ mm}$).

Tableau IV.14. Double normalisation et calcul de l'écart par rapport au poids des critères

Test N°	n_{ij}					n'_{ij}					v_{ij}	v'_{ij}
	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR		
A1	0.717	0.831	0.858	0.197	0.093	0.231	0.653	0.397	1.000	1.000	0.461	0.344
A2	0.270	0.715	0.739	0.595	0.325	0.612	0.758	0.461	0.332	0.286	0.471	0.510
A3	0.165	0.542	0.561	0.967	0.696	1.000	1.000	0.608	0.204	0.133	0.414	0.411
A4	0.732	0.986	0.709	0.234	0.133	0.226	0.550	0.481	0.843	0.696	0.441	0.441
A5	0.304	0.695	0.499	0.578	0.467	0.544	0.781	0.682	0.342	0.199	0.492	0.490
A6	0.178	0.561	0.403	1.000	1.000	0.929	0.967	0.845	0.197	0.093	0.372	0.394

A7	0.738	0.849	0.468	0.404	0.348	0.224	0.639	0.728	0.489	0.267	0.439	0.531
A8	0.290	0.618	0.341	0.771	0.913	0.570	0.877	1.000	0.256	0.102	0.413	0.439
A9	0.191	0.945	0.521	0.561	0.435	0.864	0.574	0.654	0.352	0.213	0.469	0.468
A10	1.000	0.787	0.813	0.561	0.278	0.165	0.690	0.419	0.352	0.333	0.312	0.608
A11	0.343	0.968	1.000	0.402	0.162	0.482	0.561	0.341	0.491	0.571	0.425	0.511
A12	0.176	0.667	0.690	0.793	0.464	0.941	0.813	0.494	0.249	0.200	0.442	0.461
A13	0.940	0.949	0.682	0.451	0.267	0.176	0.571	0.499	0.438	0.348	0.342	0.594
A14	0.337	0.674	0.485	0.841	0.700	0.491	0.805	0.703	0.235	0.133	0.393	0.527
A15	0.189	0.862	0.619	0.512	0.333	0.875	0.630	0.550	0.386	0.278	0.497	0.456
A16	0.795	0.725	0.400	0.517	0.522	0.208	0.748	0.852	0.382	0.178	0.408	0.526
A17	0.294	1.000	0.551	0.416	0.304	0.562	0.542	0.618	0.475	0.305	0.487	0.500
A18	0.225	0.697	0.384	0.829	0.870	0.734	0.778	0.886	0.238	0.107	0.399	0.451

Table IV.15. Le score global (Q_i) dans la méthode RAWEC et le rang des expériences

Test N°	Égal		LOPCOW		CRITIC	
	Q_i	Rank	Q_i	Rank	Q_i	Rank
A1	-0.145	18	-0.178	18	-0.158	18
A2	0.040	8	0.077	8	0.023	10
A3	-0.004	16	0.066	10	-0.015	16
A4	0.000	13	-0.033	17	-0.004	14
A5	-0.001	14	0.009	15	0.002	12
A6	0.029	10	0.071	9	0.040	9
A7	0.095	5	0.063	11	0.111	5
A8	0.030	9	0.024	13	0.057	8
A9	-0.001	15	0.035	12	-0.014	15
A10	0.321	1	0.318	1	0.318	1
A11	0.092	6	0.131	4	0.058	7
A12	0.021	11	0.088	5	-0.002	13
A13	0.269	2	0.253	2	0.270	2
A14	0.146	3	0.170	3	0.151	4
A15	-0.043	17	-0.004	16	-0.061	17
A16	0.127	4	0.087	6	0.154	3
A17	0.013	12	0.024	14	0.005	11
A18	0.062	7	0.082	7	0.075	6

IV.3.2.6. Analyse comparative des méthodes MCDM associées aux techniques de poids

Afin de garantir la précision de l'évaluation et de renforcer la fiabilité de la résolution du problème d'optimisation multi-objectifs, il est essentiel de comparer les classements des expériences obtenues à l'aide des méthodes MCDM associées aux méthodes de pondération. Cette comparaison valide la cohérence et la fiabilité des résultats, en garantissant que la méthode choisie équilibre efficacement les objectifs et s'aligne sur les approches alternatives. Les méthodes

distinctes de probabilité, RAM et RAWEC ont été utilisées simultanément pour classer les expériences. Les résultats sont récapitulés de manière exhaustive dans le tableau IV.16.

Les approches Probabilité, RAM et RAWEC ont toutes convenu que A1 était la moins avantageuse. Le tableau IV.16 montre clairement que A1 a un MRR beaucoup plus faible que les autres solutions, ainsi que la plus mauvaise Kc ce qui confirme l'ordre de classement. En ce qui concerne les alternatives optimales, les approches intégrées ; Probabilité + Égal, Probabilité + CRITIC, RAM + Égal, RAM + LOPCOW convergent vers la solution A14 comme étant le meilleur choix, tandis que Probabilité + LOPCOW, et RAWEC intégré à chacune des méthodes de pondération favorisent l'option A10. Ainsi, la méthode intégrée RAM + CRITIC identifier l'essai A08 comme le compromis optimal.

Tableau IV.16. Classement des alternatives selon différentes méthodes

Poids	Égal			LOPCOW			CRITIC		
MCDM	Probabilité	RAM	RAWEC	Probabilité	RAM	RAWEC	Probabilité	RAM	RAWEC
1	18	18	18	18	18	18	18	18	18
2	10	11	8	5	9	8	9	11	10
3	13	8	16	16	8	10	16	8	16
4	17	17	13	17	17	17	17	17	14
5	5	9	14	6	11	15	8	10	12
6	8	4	10	15	5	9	11	4	9
7	7	10	5	7	12	11	7	9	5
8	2	2	9	11	4	13	5	1	8
9	12	14	15	12	14	12	12	13	15
10	6	5	1	1	2	1	3	6	1
11	15	13	6	10	13	4	13	15	7
12	14	12	11	13	10	5	14	12	13
13	9	7	2	3	6	2	4	7	2
14	1	1	3	2	1	3	1	2	4
15	16	16	17	14	16	16	15	16	17
16	3	6	4	4	7	6	2	5	3
17	11	15	12	9	15	14	10	14	11
18	4	3	7	8	3	7	6	3	6

La figure IV.13 compare les performances de trois méthodes MCDM (Probabilité, RAM, RAWEC) combinées à trois techniques de pondération (poids Égal, LOPCOW, CRITIC) sur cinq critères contradictoires (Ra, Fz, Pc, Kc à minimiser, MRR à maximiser). L'objectif est d'identifier la combinaison optimale qui offre le compromis le plus équilibré entre tous les critères, sans sacrifier un critère pour améliorer excessivement un autre. Pour cela, on examine les forces et faiblesses de

chaque combinaison, en mettant en regard la ligne en noir qui exprime la valeur la plus basses pour Ra, Fz, Pc, Kc et la plus haute pour MRR.

La méthode Probabilité se distingue comme non additive et très fiable dans ses résultats. En pratique, avec une pondération LOPCOW, elle atteint les valeurs minimales de Ra, Fz et Pc, car LOPCOW favorise fortement les critères à forte variance dans les données. Cependant, cette disposition présente cet avantage au détriment d'un MRR très faible ($\sim 5,76 \text{ cm}^3/\text{min}$), le plus bas parmi les régimes optimaux observés. En outre, la combinaison Probabilité avec Égal et CRITIC obtient une MRR élevée ($\sim 14,49 \text{ cm}^3/\text{min}$) et des valeurs intermédiaires sur les critères de coût (Ra, Fz, Pc et Kc). La méthode RAM, récemment proposée pour sa simplicité et sa capacité à équilibrer efficacement critères de type bénéfice et coût, a été évaluée dans cette étude en combinaison avec différentes méthodes de pondération. Les résultats montrent que RAM + Égal et RAM + LOPCOW conduisent à un régime optimal similaire A14, caractérisés par une valeur très faible de Kc $\approx 2776.19 \text{ MPa}$, un MRR élevé $\approx 14,49 \text{ cm}^3/\text{min}$ et des valeurs modérées des autres indicateurs (Ra, Fz et Pc). En revanche, RAM + CRITIC favorise A8 avec un MRR maximal ($\approx 18.90 \text{ cm}^3/\text{min}$) tout en conservant des valeurs acceptables pour Ra $\approx 0.925 \mu\text{m}$ et Kc $\approx 3\,026.98 \text{ MPa}$, au prix d'un comportement moins satisfaisant pour Fz et Pc. Globalement, la configuration RAM + CRITIC permet d'augmenter fortement la productivité sans générer d'extremums sur les autres critères. La méthode RAWEC, bien que novatrice et capable de fournir un classement constant et stable, leur résultat sélectionne systématiquement le régime A10 pour toutes les méthodes de pondération. Ce choix conduit à la valeur la plus faible de MRR ($\approx 5.76 \text{ cm}^3/\text{min}$) parmi les régimes optimaux, tout en réduisant efficacement les critères de coût (Ra, Fz et Pc). Néanmoins, cette approche sacrifie excessivement le critère à maximiser (MRR) au profit des autres performances, ce qui contrevient à l'objectif d'un compromis équilibré entre les critères.

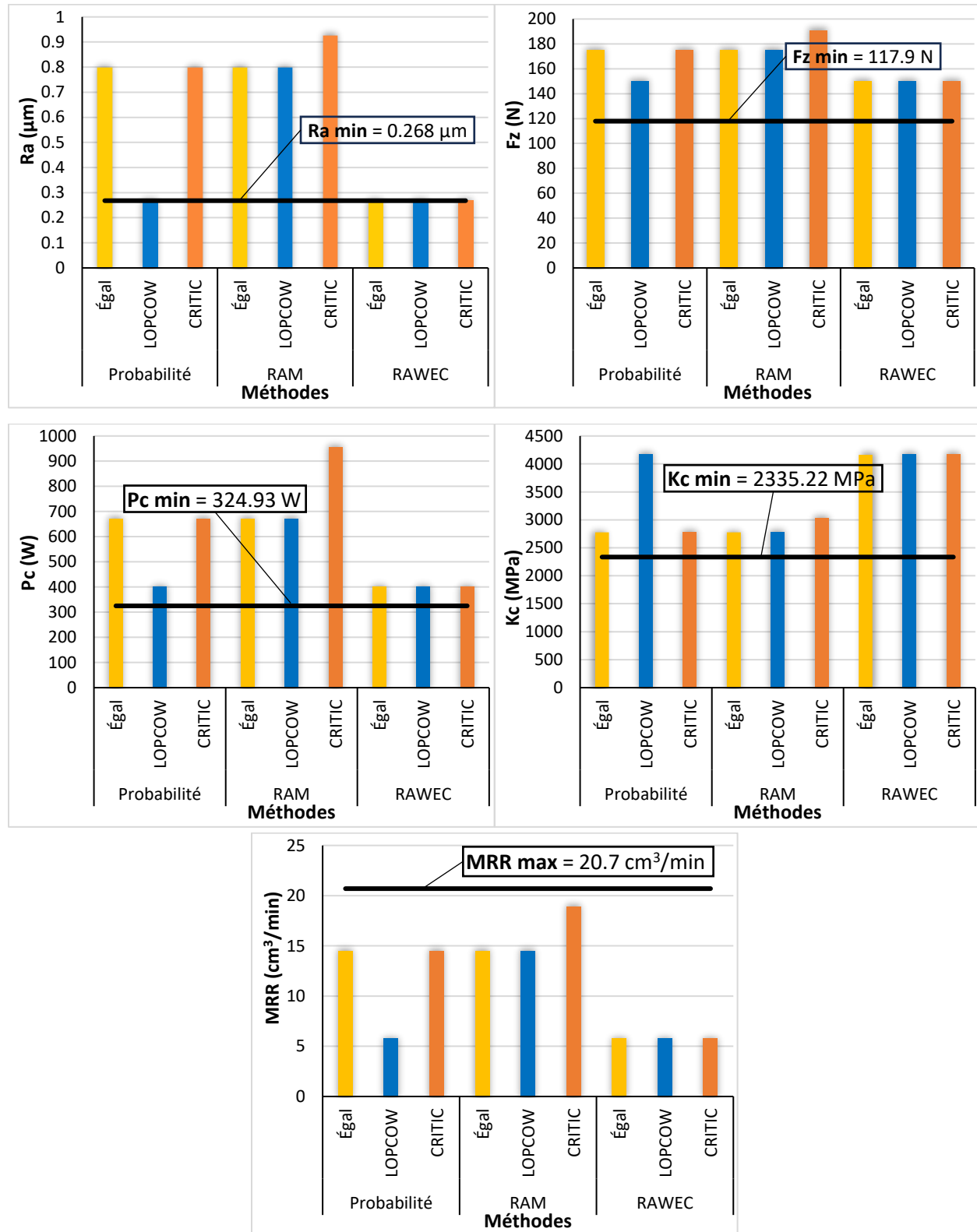


Figure IV.13. Diagrammes en barres des performances optimales des approches MCDM et poids.

IV.3.2.7. Confirmation et analyse statistique des corrélations

les résultats obtenus par les différentes méthodes d'optimisation ont été évalués sur la base de deux paramètres, à savoir la corrélation moyenne de Spearman et la corrélation moyenne de Pearson, afin de garantir une vérification complète de l'adéquation. Le rôle de chaque mesure et les étapes de calcul sont expliqués ci-dessous.

❖ Coefficients de Spearman

Les classements résultant des neuf méthodes ont été analysés à l'aide du test de corrélation des rangs de Spearman [KRI 20]. Ce test est notamment appliqué pour déterminer le degré de cohérence entre deux ensembles de rangs différents à l'aide de l'équation (IV.31) [LE 22] [PAR 22].

$$S = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^m D_i^2}{m(m^2 - 1)} \quad (\text{IV.31})$$

où D_i représente la différence de classement pour l'essai i^{th} lors de la comparaison des méthodes. Le coefficient de Spearman mesure la similarité entre les classements effectués par les différentes méthodes pour les neuf alternatives m . Un coefficient $S = 1$ indique que les méthodes classent les alternatives de manière identique, tandis que $S = 0$ signifie un désaccord total entre les classements. Lors de la comparaison de deux méthodes, un coefficient plus élevé reflète un accord plus étroit dans la manière dont les alternatives sont classées [VAF 18]. Le tableau IV.17 présente les valeurs du coefficient de Spearman calculées entre les méthodes.

Le tableau IV.17 met en évidence que l'ensemble des techniques de pondération appliquées aux méthodes d'optimisation présentent une fiabilité satisfaisante du classement, comme en témoigne la corrélation moyenne de Spearman, systématiquement supérieure à 0.6. Toutefois, il convient de noter que les meilleures concordances moyennes sont obtenues pour les combinaisons impliquant CRITIC, en particulier Probabilité + CRITIC, qui présente la plus grande stabilité des classements (moyenne 0.827). À l'inverse, la combinaison RAWEC + LOPCOW, affiche le score moyen le plus faible (0.670), apparaît comme la configuration la moins performante en termes de cohérence du classement.

Tableau IV.17. Résultats de la corrélation de Spearman

	Méthodes	Égal			LOPCOW			CRITIC		
		Probabilité	RAM	RAWEC	Probabilité	RAM	RAWEC	Probabilité	RAM	RAWEC
Égal	Probabilité	1	0.887	0.572	0.714	0.813	0.426	0.916	0.901	0.722
	RAM	0.887	1	0.512	0.551	0.967	0.597	0.786	0.988	0.700
	RAWEC	0.572	0.512	1	0.807	0.551	0.689	0.782	0.481	0.938
LOPCOW	Probabilité	0.714	0.551	0.807	1	0.603	0.673	0.899	0.523	0.835
	RAM	0.813	0.967	0.551	0.603	1	0.724	0.774	0.942	0.722
	RAWEC	0.426	0.597	0.689	0.673	0.724	1	0.611	0.537	0.772
CRITIC	Probabilité	0.916	0.786	0.782	0.899	0.774	0.611	1	0.790	0.885
	RAM	0.901	0.988	0.481	0.523	0.942	0.537	0.790	1	0.677
	RAWEC	0.722	0.700	0.938	0.835	0.722	0.772	0.885	0.677	1
	Moyenne	0.772	0.776	0.704	0.734	0.788	0.670	0.827	0.760	0.806
	Rang	5	4	8	7	3	9	1	6	2

❖ Coefficients de Pearson

Le coefficient de corrélation de Pearson est une mesure statistique largement utilisée pour étudier le degré de cohérence entre deux variables basées sur des intervalles ou des ratios [ARV 23]. Cette étude a effectué le test de corrélation de Pearson pour mesurer la capacité de chaque méthode de d'optimisation à générer des scores alternatifs fiables. Ce coefficient de corrélation de Pearson a été calculé entre chaque ensemble de scores alternatifs à l'aide de l'équation (IV.32) [LIU 20] [KRI 23].

$$r_s = \frac{\sum (P_{ix} - \bar{P}_x)(P_{iy} - \bar{P}_y)}{\sqrt{\sum (P_{ix} - \bar{P}_x)^2 (P_{iy} - \bar{P}_y)^2}} \quad (\text{IV. 32})$$

où P_{ix} : score d'une alternative i identifiée à l'aide de la méthode d'optimisation x ; P_{iy} : score d'une alternative i identifiée à l'aide de la méthode d'optimisation ; $\bar{P}_x$: score alternatif moyen de la méthode k ; $\bar{P}_y$: score alternatif moyen de la méthode y ; $i=1,2,...,m$. Il convient de noter que la valeur de r_s est comprise entre -1 et 1. Une valeur proche de 1 indique une plus grande cohérence, et inversement si elle est plus proche de -1 [URI 20 et TAN 21]. Le tableau IV.18 présente les valeurs du coefficient de Pearson calculées entre les méthodes.

D'autre part, dans le contexte de scores alternatifs fiables, sur la base du tableau IV.18, toutes les combinaisons impliquant Probabilité (avec Égal, LOPCOW ou CRITIC) occupent les premières

places. Ainsi que la combinaison Probabilité & Égal est la méthode la plus appropriée, avec un score moyen de 0.857. Suivi par Probabilité + CRITIC, avec une moyenne de 0.852, et Probabilité + LOPCOW avec moyenne de 0.843. Par contre, La pire combinaison extrait par la moyenne de Pearson est RAM + CRITIC avec une moyenne plus basse de 0.771, mais rester considérée stable et cohérent.

D'après le tableau IV.18, les combinaisons intégrant la méthode Probabilité (associée à Égal, LOPCOW ou CRITIC) se classent systématiquement en première position en termes de corrélation linéaire des scores. En particulier, Probabilité + Égal apparaît comme la combinaison la plus appropriée, avec un score moyen de 0.857, suivie par Probabilité + CRITIC (0.852) et Probabilité + LOPCOW (0.843). En revanche, la combinaison RAM + CRITIC présente la moyenne de Pearson la plus basse (0.771) ; néanmoins, cette valeur reste acceptable et témoigne d'une cohérence raisonnable des scores.

Tableau IV.18. Résultats de la corrélation de Pearson

	Méthodes	Égal			LOPCOW			CRITIC		
		Probabilité	RAM	RAWEC	Probabilité	RAM	RAWEC	Probabilité	RAM	RAWEC
Égal	Probabilité	1	0.792	0.797	0.972	0.816	0.764	0.992	0.752	0.831
	RAM	0.792	1	0.619	0.731	0.960	0.663	0.832	0.993	0.682
	RAWEC	0.797	0.619	1	0.811	0.654	0.949	0.756	0.563	0.990
LOPCOW	Probabilité	0.972	0.731	0.811	1	0.819	0.831	0.938	0.668	0.815
	RAM	0.816	0.960	0.654	0.819	1	0.760	0.826	0.924	0.685
	RAWEC	0.764	0.663	0.949	0.831	0.760	1	0.710	0.589	0.916
CRITIC	Probabilité	0.992	0.832	0.756	0.938	0.826	0.710	1	0.805	0.807
	RAM	0.752	0.993	0.563	0.668	0.924	0.589	0.805	1	0.639
	RAWEC	0.831	0.682	0.990	0.815	0.685	0.916	0.807	0.639	1
	Moyenne	0.857	0.808	0.793	0.843	0.827	0.798	0.852	0.771	0.818
	Rang	1	6	8	3	4	7	2	9	5

❖ Technique de Borda

Étant donné que les méthodes combinées présentaient des classements de performance différents pour les deux paramètres d'évaluation, il était difficile de conclure qu'elles étaient les plus appropriées. L'analyse s'est donc poursuivie par l'agrégation de ces classements en appliquant la technique de Borda. Cette option a été retenue en raison de la capacité de la méthode à limiter la perte d'information en modélisant mathématiquement l'ensemble des classements relatifs obtenus

par différentes mesures d'évaluation [GRA 17]. Les étapes suivantes ont été suivies pour déterminer le rang final d'adéquation de chaque combinaison grâce à la technique de Borda [ECE 21 et KRI 23] :

- Les points ont été attribués aux méthodes de normalisation en fonction de leur rang sur les deux autres mesures (tels que la métrique de corrélation de rang de Spearman moyenne, et de Pearson moyenne). La méthode classée première a reçu (rangs totaux - 1) points, (rangs totaux - 2) points pour la méthode classée deuxième, et ainsi de suite.
- Le score de Borda global de chaque combinaison a ensuite été obtenu en additionnant les points.
- Les méthodes de normalisation ont été reclassées par ordre croissant sur la base des scores de Borda agrégés, chaque score correspondant à une méthode.

Les résultats du classement final des combinaisons des méthodes (MCDM + pondération), établis à partir des scores de Borda sont présentés dans le tableau IV.19. D'un point de vue global, l'analyse par la méthode de Borda permet de conclure que la combinaison Probabilité & CRITIC fournit le classement le plus stable et cohérent et désigne A14 comme solution optimale. Les combinaisons Probabilité + Égal et RAM + LOPCOW désignent également A14 comme la solution la plus équilibrée, assurant un compromis optimal entre les critères contradictoires. En revanche, RAWEC + Égal et RAWEC + LOPCOW se révèlent les moins performantes et privilégient A10 comme solution optimale.

Tableau IV.19. Classement final des méthodes de pondération sur la base des scores de Borda

Méthodes / Métrique	Métrique de corrélation de Spearman		Métrique de corrélation de Pearson		Score global de Borda	Rank final
	Rank	Borda score	Rank	Borda score		
Probabilité + Égal	5	4	1	8	12	2
RAM + Égal	4	5	6	3	8	5
RAWEC + Égal	8	1	8	1	2	8
Probabilité + LOPCOW	7	2	3	6	8	5
RAM + LOPCOW	3	6	4	5	11	3
RAWEC + LOPCOW	9	0	7	2	2	8

Probabilité + CRITIC	1	8	2	7	15	1
RAM + CRITIC	6	3	9	0	3	7
RAWEC + CRITIC	2	7	5	4	11	3

IV.4. Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse systématique des résultats expérimentaux, de la modélisation statistique et de l'optimisation des paramètres de tournage de l'acier traité AISI 52100 à l'aide d'une plaquette en céramique mixte CC650. Les essais ont été menés selon un plan Taguchi L18 ($3^3, 1^2$), et les modèles développés par la méthodologie (RSM) ont montré une précision élevée avec un coefficients de détermination (R^2) excédant 92.69 %. Ainsi, la comparaison entre les valeurs prédites et mesurées a confirmé la fiabilité de ces modèles.

L'étude a ensuite porté sur deux types d'optimisation. L'optimisation mono-objectif, fondée sur la méthode de Taguchi, a permis d'identifier les conditions optimales pour chaque réponse individuelle. En revanche, les méthodes d'optimisation multi-objectifs (MOO), notamment (Probabilité, RAM et RAWEC), combinées aux techniques de pondération (pondération égale, LOPCOW et CRITIC), ont permis d'identifier trois régimes optimaux distincts (A8, A10, A14). Cette démarche visait à résoudre le problème contradictoire consistant à maximiser (MRR) tout en minimisant simultanément (R_a , F_z , P_c , et K_c).

Enfin, l'analyse comparative des régimes obtenus réalisée à l'aide des coefficients de corrélation de Spearman et de Pearson, garantissant une évaluation robuste. Cette évaluation a permis d'identifier la solution A14 comme meilleurs compromis, démontrant sa robustesse et son efficacité supérieure pour équilibrer l'ensemble des performances contradictoires.

CONCLUSION GENERALE

La présente thèse propose une étude approfondie des interactions thermomécaniques entre le couple outil-pièce lors du tournage de l'acier faiblement allié AISI 52100 (100Cr6), réalisée en conditions (sec et MQL). Elle évalue les performances d'usinage (R_a , F_z , P_c , K_c , MRR) pour l'acier dans deux états (non traité et traité à 60 HRC), en s'appuyant sur deux plans expérimentaux Taguchi distincts : L9 (3^3) pour l'état non traité en utilisant une plaquette en carbure revêtue en CVD et L18 ($3^3, 1^2$) pour l'état traité en utilisant une plaquette en céramique mixte. Les jeux de données ont été analysés par ANOVA, puis modélisés par la méthode des surfaces de réponse (RSM). Enfin, ils ont été optimisés par des approches mono et multi-objectifs afin d'identifier des régimes de coupe équilibrant des critères contradictoires.

Les résultats expérimentaux obtenus pour l'AISI 52100 non traité conduisent aux conclusions principales suivantes :

- Selon les tests paramétriques, l'analyse des résultats montre que l'utilisation de la lubrification MQL a réduit les performances (V_b , R_a , F_z , P_c et T°) pour les trois vitesses utilisées (220, 300 et 380) m/min, jusqu'à (24.39%, 14.52% et 22.34%) pour V_b , (30.9%, 27.05% et 24.1%) pour R_a , (21.08%, 11.37% et 11.79%) pour F_z , de (28.2%, 9.2% et 4.67%) pour P_c et (20%, 30% et 18%) pour T° .
- L'analyse des images MEB montrant que le copeau résultant est identifiable comme un copeau hélicoïdal en forme de rondelle avec des dentelures régulières sur les extrémités du copeau, pour les deux environnements (à sec et MQL). Le copeau obtenu par usinage à sec conserve la couleur grise du matériau d'origine, alors que celui obtenu par MQL est de couleur allant du bleu au violet à cause des brûlures.
- L'ANOVA de (R_a) révèle que le seul facteur principal significatif est (f) avec une contribution de 87.15% et 85.83% pour les conditions à sec et MQL, respectivement. Pour (F_z), l'ANOVA indique que le facteur (ap) est le plus dominant avec des contributions respectives de 73.07% et 71.28%, suivi par l'avance (f).
- L'ANOVA de (P_c) indique que le facteur (ap) exerce la plus grande influence avec 70.1% et 76.24% de contribution, respectivement à sec et MQL, Il est suivi par (f) et (V_c). Pour (K_c),

en usinage à sec, (a_p) et (f) apparaissent comme les facteurs les plus significatifs, avec une contribution de 52.65% et 41.76%, respectivement. Inversement, dans l'usinage MQL, les contributions des facteurs (f , a_p et V_c) sont respectivement de 37.32%, 29.45% et 21.21%.

- Les modèles de prédiction linéaire avec interaction suggérés pour les paramètres de performance (R_a , F_z , P_c et K_c) sont fiables et fournissent un (R^2) allant de (96.92 à 99.99) % pour l'usinage à sec et de (91.86 à 99.68) % pour l'usinage MQL.
- Les cinq méthodes d'optimisations multi-objectives ont permis d'obtenir les combinaisons optimales suivantes :
 - **DF** : $V_c = 200$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.417$ mm. Avec : $R_a = 0.859$ μm , $F_z = 147.762$ N, $P_c = 501.45$ W, $K_c = 3393.62$ MPa, $MRR = 7.384$ cm^3/min (**à sec**).
 $V_c = 300$ m/min, $f = 0.086$ mm/tr et $a_p = 0.293$ mm. Avec : $R_a = 0.566$ μm , $F_z = 79.621$ N, $P_c = 402.44$ W, $K_c = 3533.17$ MPa, $MRR = 7.132$ cm^3/min (**MQL**).
 - **GRA et EAMR** : $V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm. Avec : $R_a = 0.788$ μm , $F_z = 140.12$ N, $P_c = 700.6$ W, $K_c = 3892.22$ MPa, $MRR = 10.8$ cm^3/min (**à sec**) et $R_a = 0.546$ μm , $F_z = 121.2$ N, $P_c = 606$ W, $K_c = 3366.67$ MPa, $MRR = 10.8$ cm^3/min (**MQL**).
 - **FUCA** : $V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.15$ mm. Avec : $R_a = 0.795$ μm , $F_z = 60.18$ N, $P_c = 300.89$ W, $K_c = 5017.92$ MPa, $MRR = 3.6$ cm^3/min (**à sec**) et $R_a = 0.589$ μm , $F_z = 48.15$ N, $P_c = 241.1$ W, $K_c = 4018.12$ MPa, $MRR = 3.6$ cm^3/min (**MQL**).
 - **EDAS** : $V_c = 200$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.3$ mm. Avec : $R_a = 1.54$ μm , $F_z = 164.74$ N, $P_c = 549.15$ W, $K_c = 3432.18$ MPa, $MRR = 9.6$ cm^3/min (**à sec**).
 $V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm. Avec : $R_a = 0.546$ μm , $F_z = 121.2$ N, $P_c = 606$ W, $K_c = 3366.67$ MPa, $MRR = 10.8$ cm^3/min (**MQL**).
- L'analyse comparative des résultats des cinq méthodes d'optimisation indique que les méthodes GRA et EAMR met en évidence l'amélioration du (MRR et R_a) tout en réduisant (K_c). La méthode EDAS entraîne des valeurs maximales de (R_a et F_z) et propose des valeurs médianes de (P_c , K_c et MRR) lors de l'usinage à sec comparativement aux autres méthodes. La méthode FUCA favorise un usinage économe en énergie avec des valeurs minimales de (P_c et F_z), et génère également la productivité la plus faible. Pour la méthode DF, elle se distingue par la capacité à produire des résultats équilibrés pour toutes les performances.

Les observations obtenues lors du tournage de l'acier AISI 52100 (60 HRC) se résument comme suit :

- L'ANOVA de (Ra), montre que (f) constitue le facteur prédominant, expliquant 96,06 % de la variance de (Ra). Ainsi, le mode de lubrification a un effet significatif sur (Ra) avec une contribution de 1.22 %. Suivi par l'interaction entre (V_c*f) avec 1.13 %. D'autre part, l'analyse de (Fz), montre que l'ensemble des paramètres étudiés exerce un effet significatif, (a_p) étant le facteur prédominant avec une contribution de 61.2 %. Suivi par (f) avec une contribution de 20.4 %, le mode de lubrification (Lub) à 7.2 % et de (V_c) à 2.5 %. Ainsi, l'interaction (V_c*Lub) présente une contribution non négligeable de 2.62 %.
- L'ANOVA de (Pc) met en évidence (V_c) comme facteur prédominant, avec une contribution de 57.5 %, suivie par (a_p) avec 27.1 %, (f) avec 6.2 % et le mode de lubrification avec une contribution de 2.3 %. Parmi les interactions à deux facteurs, (V_c*a_p) et ($f*Lub$) se distinguent, contribuant respectivement à 5.0 % et 0.5 %. Concernant l'ANOVA de (Kc), parmi les effets linéaires (a_p) et (f) sont significatifs et contribuent respectivement à 39.9 % et 38.2 %. En revanche, (V_c), (Lub) et les interactions bifactorielles n'influencent pas significativement sur Kc ($p > 0.05$).
- Les modèles élaborés par la méthodologie MSR pour les réponses Ra, Fz, Pc et Kc, établis pour l'usinage de l'acier AISI 52100 traité en conditions (sec et MQL), montrent une forte corrélation entre valeurs prédites et mesurées, avec des coefficients de détermination (R^2) compris entre 92.69 % et 99.41 %.
- L'optimisation mono-objectif appuie sur la méthode Taguchi basée sur le rapport (S/N) pour les performances étudiées individuellement a donné les combinaisons optimales suivantes :
- L'optimisation mono-objectif, réalisée selon l'approche de Taguchi en se basant sur les rapports (S/N) pour chaque réponse prise isolément, a permis d'identifier les combinaisons optimales ci-dessous :
 - **Min (Ra) :** (MQL, V_{c2} , f_1 et a_{p3}) : $V_c = 230$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm.
 - **Min (Fz) :** (MQL, V_{c3} , f_1 et a_{p1}) : $V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.15$ mm.
 - **Min (Pc) :** (MQL, V_{c1} , f_1 et a_{p1}) : $V_c = 160$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.15$ mm.
 - **Min (Kc) :** (MQL, V_{c3} , f_3 et a_{p3}) : $V_c = 300$ m/min, $f = 0.2$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm.

- **Max (MRR) :** (V_{c3}, f_3 et a_{p3}) : $V_c = 300$ m/min, $f = 0.2$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm.
- L'optimisation multi-objectif, appliquée au moyen de trois approches innovantes (Probabilité, RAM et RAWEC) combinées à trois techniques de pondération (poids Égal, LOPCOW, CRITIC), montre que les approches intégrées ; Probabilité + Égal, Probabilité + CRITIC, RAM + Égal et RAM + LOPCOW convergent vers l'essai A14 comme étant la meilleure solution. Ainsi, Probabilité + LOPCOW, et RAWEC intégré à chaque méthode de pondération favorisent l'essai A10. Tandis que la méthode intégrée RAM + CRITIC identifie l'essai A08 comme le compromis optimal. Les régimes optimaux résultats sont les suivants :
 - **A08 :** (Sec, V_{c3}, f_2 et a_{p3}) : $V_c = 300$ m/min, $f = 0.14$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm. Avec : $R_a = 0.925$ μm , $F_z = 190.7$ N, $P_c = 953.5$ W, $K_c = 3026.98$ MPa, $MRR = 18.9$ cm^3/min .
 - **A10 :** (MQL, V_{c1}, f_1 et a_{p3}) : $V_c = 160$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm. Avec : $R_a = 0.268$ μm , $F_z = 149.9$ N, $P_c = 399.73$ W, $K_c = 4163.85$ MPa, $MRR = 5.76$ cm^3/min .
 - **A14 :** (MQL, V_{c2}, f_2 et a_{p3}) : $V_c = 230$ m/min, $f = 0.14$ mm/tr et $a_p = 0.45$ mm. Avec : $R_a = 0.796$ μm , $F_z = 174.9$ N, $P_c = 672.45$ W, $K_c = 2776.19$ MPa, $MRR = 14.49$ cm^3/min .
- L'analyse comparative des résultats du classement des combinaisons des méthodes (MCDM + pondération) à l'aide des coefficients de corrélation de Spearman et Pearson, puis leurs rangs agrégés selon la méthode de Borda permet de conclure que la combinaison Probabilité + CRITIC fournit le classement le plus cohérent et désigne A14 comme solution optimale, démontrant ainsi sa capacité à équilibrer les performances contradictoires.

PERSPECTIVES

Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives prometteuses.

- Étendre l'étude à une comparaison complète entre usinage à sec, MQL, NMQL (MQL chargée en nanoparticules) et usinage cryogénique, en évaluant à la fois les performances techniques et les métriques de durabilité.
- Pour la NMQL, nous évaluerons différents additifs nanoparticulaires (tels que Al_2O_3 , SiC et SiO_2) en faisant varier le type, la taille et la concentration des particules afin de quantifier leurs effets sur la lubrification, la conductivité thermique et les performances d'usinage.
- Réaliser des campagnes expérimentales détaillées mesurant l'évolution de la température de coupe, des contraintes résiduelles et des vibrations pendant le tournage dur, sous différents régimes de lubrification et conditions de coupe, puis corrélérer ces grandeurs à l'intégrité de surface et à l'usure.
- Utiliser et comparer des modèles prédictifs tels que les réseaux neuronaux artificiels (ANN) et la logique floue.
- Développer et tester de nouveaux cadres hybrides MCDM ainsi que des algorithmes méta-heuristiques (algorithmes génétiques ; PSO, NSGA-II...) et évaluer leur capacité à fournir des classements plus cohérents en présence de critères contradictoires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [KHE 22] KHELLAF, A. (2022). Modélisation et optimisation avancées du processus de tournage des pièces difficilement usinables (Doctoral dissertation).
- [KUM 19] Kumar, R. & Rao, P. S. (2019). REVIEW OF HARD TURNING AND HARD MILLING. International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science, 5(5), 899–904. Retrieved from <https://ijtimes.com/index.php/ijtimes/article/view/2630>
- [FNI 14] Fnides, B. (2014). Étude expérimentale sur le comportement des outils de coupe en tournage des aciers pour travail à chaud. (Doctoral dissertation).
- [YAL 05] Yallese, M. A. (2005). Étude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur. Doctorat d'Etat, Université Badji Mokhtar Annaba, Année.
- [HAB 06] Habak, M. (2006). Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6 (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech). (Thèse de doctorat : univ-guelma).
- [BOU 10] Bouchnak, T, B. (2010). Etude du comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aeronautique : le ti555-3. (Doctorat ParisTech)
- [MED 15] MEDDOUR, I. (2015). Prédiction de la rugosité de surface, des efforts de coupe et des vibrations de l'outil en tournage dur par les méthodes RSM et ANN-application au couple : AL2O3+ TiC/100Cr6. (Doctoral dissertation).
- [AYA 21] AYADI, S. (2021). Comportement a l'usure et tribologique des aciers au manganèse sous l'effet des éléments d'alliage et des traitements thermiques. (Thèse de doctorat : univ-annaba).
- [CAR 08] Cardinaux, D. (2008). Étude et modélisation numérique 3D par éléments finis d'un procédé de traitement thermique de tôles embouties après chauffage par induction : Application à un renfort de pied central automobile (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- [BOU 22] Ahmed, K. B. (2022). Etude et Caractérisation des Fils en Acier Dur Destinés pour la Fabrication des Torons (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et de la technologie).
- [BEZ 23] BEZZIOU, O. (2023). Etude de la soudabilité par fusion d'un acier inoxydable à un acier au carbone (Doctoral dissertation, mohamed khider university biskra).
- [ZIO 18] ZIOUCHE, A. (2018). élaboration et caractérisation des couches minces sur les aciers par les méthodes non destructives (doctoral dissertation, université m'hamed bougara de Boumerdès).

- [NIC 19] Nicoli, C. (2019) Etude et optimisation de la solidification d'aciers faiblement alliés lors du process de fonderie par inoculation. <https://pastel.hal.science/tel-02188155>.
- [SAF 24] SAFI, K. (2024). Etude statistique des performances des matériaux de coupe avec différents revêtements lors du tournage dans un environnement à sec et lubrifié (Doctoral dissertation). (Thèse de doctorat : univ-guelma).
- [BEL 09] 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. (Thèse de doctorat : univ-annaba).
- [KHE 24] Khelfaoui, F. (2024). Modélisation statistique et optimisation des paramètres d'usinage pour minimiser les vibrations, l'intensité sonore, la rugosité de surface, et la puissance consommée lors de l'usinage discontinu (Doctoral dissertation : univ-guelma).
- [HAM 23] HAMADI, B. (2023). Etude de l'impact des revêtements des outils de coupe sur les paramètres technologiques d'usinage en utilisant les méthodes statistiques (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).
- [SEN 21] Sen, B., Mia, M., Krolczyk, G.M. et al. (2021). Eco-Friendly Cutting Fluids in Minimum Quantity Lubrication Assisted Machining: A Review on the Perception of Sustainable Manufacturing. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 8, 249–280. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00158-6>.
- [ASH 23] Ashmawy, M., Elsheikh, A., & Elkassas, A. (2023). A Review of Cooling and Lubrication Techniques for Machining Difficult-to-cut Material. *Journal of Engineering Research*, 7(1), 21-31. <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/erjeng/vol7/iss1/4>.
- [PIM 24] Pimenov, D. Y., da Silva, L. R. R., Machado, A. R., Franca, P. H. P., Pintaude, G., Unune, D. R., ... & Krolczyk, G. M. (2024). A comprehensive review of machinability of difficult-to-machine alloys with advanced lubricating and cooling techniques. *Tribology International*, 196, 109677. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109677>.
- [SIN 22] Singh, A., Ghosh, S., & Aravindan, S. (2022). State of art for sustainable machining of nickel-based alloys using coated and uncoated tools and machining of high strength materials using surface modified cutting tools. *Tribology International*, 170, 107517. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107517>.
- [SIN 20] Singh, G., Aggarwal, V., Singh, S. (2020). Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining, *J. Cleaner Prod.* 271, 122185, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122185>.

- [LEE 24] Lee, Y. J., & Wang, H. (2024). Sustainability of methods for augmented ultra-precision machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 11(2), 585-622. <https://doi.org/10.1007/s40684-023-00546-z>.
- [ZHO 24] Zhou, S., Wang, D., Wu, S., Gu, G., Dong, G., An, Q., ... & Li, C. (2024). Minimum quantity lubrication machining nickel base alloy: a comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(5), 2407-2445. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11721-6>.
- [BOS 17] Boswell, B., Islam, M., Davies, I.J. et al. (2017). A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining. *Int J Adv Manuf Technol*, 92, 321–340. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0142-3>.
- [SLI 16] S.W.B 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 : UNIVERSITÉ FRANÇOIS – RABELAIS DE TOURS).
- [SAB 22] Saby, Q. (2022). Fusion laser sur lit de poudres et optimisation par traitements thermiques d'aciers martensitiques : Application aux moules d'injection plastique (Doctoral dissertation, Université de Lyon).
- [LAK 71] Lakhtine, I, Polonski, V. (1978). *Métallographie et traitements thermiques des métaux*. édition Mir Moscou, Technique soviétique.
- [DES 03] DESALOS, Y. (2003). Introduction aux traitements thermiques des métaux et alliages. Réf : M1105 v2, Techniques de l'ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v2-m1105>.
- [FOU 23] Fourcade, T. (2023). Les traitements thermiques des aciers. Réf : TBA1050 v2, Techniques de l'ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v2-tba1050>.
- [ELB 15] ELBAH, M. (2015). Investigation expérimentale sur l'effet de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe en tournage en utilisant les techniques statistiques. (Thèse de doctorat: univ-guelma).
- [He 23] He T, Liu N, Xia H, Wu L, Zhang Y, Li D, Chen Y. (2023). Progress and trend of minimum quantity lubrication (MQL): a comprehensive review. *J Clean Prod* 386:135809. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135809>.
- [BAL 22] Balasuadhakar A, kumaran ST, Kurniawan R, Ahmed F. (2022). A comprehensive review on minimum quantity lubrication in turning process. *Surf Rev Lett* 0218–625X. <https://doi.org/10.1142/S0218625X22300088>.
- [DEM 23] Demirpolat H, Binali R, Patange AD, Pardeshi SS, Gnanasekaran S. (2023). Comparison of tool wear, surface roughness, cutting forces, tool tip temperature, and chip shape

during sustainable turning of bearing steel. *Materials* 16:4408. <https://doi.org/10.3390/ma16124408>.

[CHA 20] Chavan A, Sargade V. (2020). Surface integrity of AISI 52100 Steel during hard turning in different near-dry environments. *Adv Mater Sci Eng* 2020:1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/4256308>.

[SIA 20] Sivaiah P, Bodicherla U. (2020). Effect of surface texture tools and minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in CNC turning of AISI 52100 steel. *J Inst Eng India Ser C* 101:85–95. <https://doi.org/10.1007/s40032-019-00512-2>.

[DAS 21] Das A, Padhan S, Das SR, Alsoufi MS, Ibrahim AMM, Elsheikh A. (2021). Performance assessment and chip morphology evaluation of austenitic stainless steel under sustainable machining conditions. *Metals* 11(12):1931. <https://doi.org/10.3390/met11121931>.

[HAM 22] Hamadi B, Yallese MA, Boulanouar L et al. (2022). Evaluation of the cutting performance of PVD, CVD and MTCVD carbide inserts in dry turning of AISI 4140 steel using RSM-based NAMDE optimization. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 44:342. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03633-5>.

[MAW 22] Mawandiya, B. K., Patel, H. V., Makhesana, M. A., & Patel, K. M. (2022). Machinability investigation of AISI 4340 steel with biodegradable oil-based MQL system. *Materials Today: Proceedings*, 59, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.199>.

[SAL 21] Salur E, Kuntoğlu M, Aslan A, Pimenov DY. (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. <https://doi.org/10.3390/met11111674>.

[MAN 25] Mane, S., Patil, R. B., & Al-Dahidi, S. (2025). Predictive modeling of surface roughness and cutting temperature using response surface methodology and artificial neural network in hard turning of AISI 52100 steel with minimal cutting fluid application. *Machines*, 13(4), 266. <https://doi.org/10.3390/machines13040266>.

[MAN 22] Mane, S., & Kumar, S. (2022). Analysis of surface roughness during turning of AISI 52100 hardened alloy steel using minimal cutting fluid application. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(sup1), 138-149. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1855965>.

[SAH 23] Sahoo SK, Goswami SS. (2023). A comprehensive review of multiple criteria decision-making (MCDM) methods: advancements, applications, and future directions. *Decis Mak Adv* 1(1):25–48. <https://doi.org/10.31181/dma1120237>.

[ZHU 24] Zhujani F, Abdullahu F, Todorov G, Kamberov K. (2024). Optimization of multiple performance characteristics for CNC turning of Inconel 718 using taguchi-grey relational approach and analysis of variance. *Metals* 14(2):186. <https://doi.org/10.3390/met14020186>.

- [WU 21] Wu J, Jiang Z, Wan L, Song H, Abbass K. (2021). Robust optimization for precision product using Taguchi-RSM and desirability function. *Arab J Sci Eng* 46:2803–2814. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05326-4>.
- [PAT 22] Patnaik PK, Mishra SK, Swain PTR, Purohit A, Parija SK, Panda SS. (2022). Multi-objective optimization and experimental analysis of electro-discharge machining parameters via Gray-Taguchi, TOPSIS-Taguchi and PSI-Taguchi methods. *Mater Today: Proc* 62:6189–6198. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.087>.
- [DHO 22]. Dhote T, Mali R, Katiyar J, Thammana VG. (2022). Multi-response optimization of cutting parameters in MQL assisted turning of Haynes 25 alloy with Taguchi based grey relational analysis. *J Eng Res* 10(2):142–157. <https://doi.org/10.36909/jer.9877>.
- [TRU 22] Trung DD, Nguyen NT. (2022). Applying Cocos, Mabac, Mairca, Eamr, Topsis and weight determination methods for multi-criteria decision making in hole turning process. *Strojnícky časopis-J Mech Eng* 72(2):15–40. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0014>.
- [THI 23] Hoang XT. (2023). Multi-objective optimization of turning process by Fuca method. *Strojnícky Časopis-J Mech Eng* 73(1):55–66. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0005>.
- [OKP 21] Okponyia KO, Oke SA. (2021). Novel EDAS-Taguchi and EDAS Taguchi-Pareto methods for wire EDM process parametric selection of Ni55.8Ti (Nitinol) shape memory alloy. *Int J Ind Eng Manag* 3(2):105–122. <https://doi.org/10.24002/ijieem.v3i2.4998>.
- [TRU 21] Trung DD. (2021). Application of EDAS, MARCOS, TOPSIS, MOORA and PIV methods for multi-criteria decision making in milling process. *Decis Mak* 4(7). <https://doi.org/10.2478/scjme-2021-0019>.
- [MEK 21] Makhesana MA, Patel KM. (2021). Optimization of Parameters and Sustainability Assessment Under Minimum Quantity Solid Lubrication-Assisted Machining of Inconel 718. *Process Integr Optim Sustain* 5:625–644. <https://doi.org/10.1007/s41660-021-00171-w>.
- [YAL 25] Yallese, M. A., Boucherit, S., Khelfaoui, F., Ouelaa, Z., Haoues, S., & Belhadi, S. (2025). Multi-Objective Optimization in Intermittent Turning: Balancing Productivity, Surface Quality, Sound Intensity, and Tool Vibration Using MCDM Methods. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 13(5), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s42417-025-01858-x>.
- [ZHE 23] Zheng, M., & Yu, J. (2023). Evaluation of steel turning by means of probability-based multi objective optimization with appropriate numbers of attributes. *Vojnotehnički glasnik*, 71(4), 898-910. <https://doi.org/10.5937/vojtechg71-42843>.
- [DUA 24] Dua, T. V., Duc, D. V., Bao, N. C., & Trung, D. D. (2024). Integration of objective weighting methods for criteria and MCDM methods: application in material selection. *EUREKA: Physics and Engineering*, (2), 131-148. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003171>.

- [DUA.T 24] Dua, T. V., & Trung, D. D. (2024). MEPSI (Mutriss Enhanced Preference Selection Index): a novel method for ranking alternatives. *EUREKA: Physics and Engineering*, (6), 169-178. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003408>.
- [ADI 24] A. Puska, A. Stilic, D. Pamucar, D. Bozanic, & M. Nedeljkovic. (2024). Introducing a Novel Multi-Criteria Ranking of Alternatives with Weights of Criterion (RAWEC) Model. *MethodsX*, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102628>.
- [DUA 25] Van Dua, T., Thinh, H. X., Bao, N. C., Van Duc, D., & Hoang, T. M. (2025). Multi-Objective Optimization of the Turning Process using the Probability Method. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(1), 19865-19870. <https://doi.org/10.48084/etasr.9472>.
- [TRU.D 24] Trung, D.D., Diep, M.T., Duc, D.V., Bao, N.C., & Son, N.H. (2024). Application of Probability Theory in Machine Selection. *Applied Engineering Letters*, 9(4), 203-214. <https://doi.org/10.46793/aeletters.2024.9.4.3>.
- [KAN 25] Kang, S., Zhuo, X., Kong, L., Li, Y., & He, Y. (2025). Machining characteristics and process parameter optimization of Near-dry electrical discharge milling of titanium alloy. *Scientific Reports*, 15(1), 8139. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-025-92830-y>.
- [PRA 23] Prakash, J. U., Sivaprakasam, P., Juliyana, S. J., Ananth, S., Rubi, C. S., & Sadhana, A. D. (2023). Multi-objective optimization using grey relational analysis for wire EDM of aluminium matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2395-2401. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.415>.
- [SHA 22] Sharma, V. S., Sharma, N., Singh, G., Gupta, M. K., & Singh, G. (2022). Optimization of WEDM parameters while machining biomedical materials using EDAS-PSO. *Materials*, 16(1), 114. <https://doi.org/10.3390/ma16010114>.
- [NGU 22] Nguyen, H. Q., Le, X. H., Nguyen, T. T., Tran, Q. H., & Vu, N. P. (2022). A comparative study on multi-criteria decision-making in dressing process for internal grinding. *Machines*, 10(5), 303. <https://doi.org/10.3390/machines10050303>.
- [KHA 21] Khanh, N. L., & Cuong, N. V. (2021). The combination of taguchi and proximity indexed value methods for multi-criteria decision making when milling. *Int. J. Mech*, 15, 1-9. <https://doi.org/10.46300/9104.2021.15.14>.
- [TRU 22] Trung, D. D., Thinh, H. X., & Ha, L. D. (2022). Comparison of the RAFSI and PIV method in multi-criteria decision making: application to turning processes. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 13, 14. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2022014>.
- [TRU.G 24] Trung, D. D., Giang, N. T. P., Duc, D. V., Dua, T. V., & Thinh, H. X. (2024). The use of SAW, RAM and PIV decision methods in determining the optimal choice of materials for the

manufacture of screw gearbox acceleration boxes. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 13(3), 338-347. Doi: 10.18178/ijmerr.13.3.338-347

[TRU.N 24] Trung, D. D., Nguyen, N. T., & Ašonja, A. (2024). Data Normalization for Root Assessment Methodology. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 15(2), 156-168. <http://doi.org/10.24867/IJIEM-2024-2-354>.

[NGU 24] Nguyen Hoang Giang, Nguyen Duc Chinh. (2025). Applying the RAWEC Method for Material Selection of Crankshafts. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 12(1), 2395-6011. <https://doi.org/10.32628/IJSRST2512147>.

[TRU.T 24] Trung, D., Truong, N., Duc, D., & Bao, N. (2024). Data Normalization in RAWEC Method: Limitations and Remedies. *Yugoslav Journal of Operations Research*. <https://doi.org/10.2298/YJOR240315020T>.

[RAJ 20] Rajarajan S, Ramesh Kannan C, Dennison MS (2020) A comparative study on the machining characteristics on turning AISI 52100 alloy steel in dry and microlubrication condition. *Aust J Mech Eng*. <https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1710019>.

[SAF 22] Safi K, Yallese MA, Belhadi S (2022) Tool wear, 3D surface topography, and comparative analysis of GRA, MOORA, DEAR, and WASPAS optimization techniques in turning of cold work tool steel. *Int J Adv Manuf Technol* 121:701–721. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09326-6>.

[SAN 22] Sandvik Coromant - outils et solutions pour l'usinage. Sandvik Coromant [online]. Dostupné z : <https://www.sandvik.coromant.com/fr-fr>.

[YAL 07] Yallese MA, Boulanouar L, Zeghib N, Belhadi S, Rigal J (2007). Etude des efforts et de la temperature de coupe lors de tournage dur de l'acier aisi 52100 par un outil cbn. *Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie* 16:74–86

[HAO 23] Haoues S, Yallese MA, Belhadi S et al. (2023). Modeling and optimization in turning of PA66-GF30% and PA66 using multi-criteria decision-making (PSI, MABAC, and MAIRCA) methods: a comparative study. *Int J Adv Manuf Technol* 124:2401–2421. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10583-8>.

[HAM 24] Hamdi A, Yapan YF, Uysal A, Merghache SM (2024) The effects of minimum quantity lubrication parameters on the lubrication efficiency in the turning of plastic mold steel. *Int J Adv Manuf Tech* 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13706-5>.

[GOU 05] Goupy, J. L. (2005). *Pratiquer les plans d'expériences*. Dunod. Paris. 560 pages.

[TAG 87] Taguchi, G. (1987). *System of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize costs* (Vol. 1). UNIPUB/Kraus International Publications.

- [KAM 11] Kamoun, A., Chaabouni, M. M., & Ayedi, H. F. (2011). Plans d'expériences et traitements de surface-Méthodologie des surfaces de réponses (MSR). <https://doi.org/10.51257/a-v1-m1429>.
- [ABB 25] ABBED, K. (2025). Etude de l'influence du matériau et de la géométrie de l'outil de coupe sur les paramètres de performance lors de tournage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V (Doctoral dissertation).
- [DJO 25] DJOUAMBI, N. (2025). Evaluation des paramètres de performance lors de l'usinage d'un polymère composite (POM-C GF25%): aspects de modélisation et d'optimisation (Doctoral dissertation).
- [HAM 22] Hamadi B, Yallese MA, Boulanouar L, Nouioua M, Hammoudi A. (2022). RSM-based MOALO optimization and cutting inserts evaluation in dry turning of AISI 4140 steel. Struct Eng Mech 84(1):17–33. <https://doi.org/10.12989/sem.2022.84.1.017>
- [MAR 18] Maruda RW, Krolczyk GM, Wojciechowski S et al. (2018). Effects of extreme pressure and anti-wear additives on surface topography and tool wear during MQCL turning of AISI 1045 steel. J Mech Sci Technol 32:1585–1591. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0313-7>
- [MAR 16] Maruda RW, Krolczyk GM, Nieslony P, Wojciechowski S, Michalski M, Legutko S. (2016). The influence of the cooling conditions on the cutting tool wear and the chip formation mechanism. J Manuf Process 24:107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.006>
- [SHA 20] Shah P, Khanna N, Zadafiya K, Bhalodiya M, Maruda RW, Krolczyk GM. (2020). In-house development of eco-friendly lubrication techniques (EMQL, Nanoparticles+ EMQL and EL) for improving machining performance of 15–5 PHSS. Tribol Int 151:106476. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106476>
- [SIV 18] Sivaiah P, Chakradhar D. (2018). Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17–4 PH stainless steel: a comparison with MQL, wet, dry machining. CIRP J Manuf Sci Technol 21:86–96. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.02.004>
- [SIV 20] Sivaiah P, Bodicherla U. (2020). Effect of surface texture tools and minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in CNC turning of AISI 52100 steel. J Inst Eng India Ser C 101:85–95. <https://doi.org/10.1007/s40032-019-00512-2>
- [CHI 21] Chihaoui S, Yallese MA, Belhadi S et al. (2021). Coated CBN cutting tool performance in green turning of gray cast iron EN-GJL-250: modeling and optimization. Int J Adv Manuf Technol 113:3643–3665. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06820-1>
- [SHI 23] Shinge VR, Pable MJ. (2023). Effect of nano-minimum quantity lubrication on cutting temperature and surface roughness of milling AISI D3 tool steel. Mater Today: Proc 72:1758–1764. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.479>

- [QUY 19] Quyet TT, Sam LH, Nhat TM, Son TA, Liem DT, Thanh TQ. (2019). Effects of minimum quantity lubrication (MQL) on cutting temperature, tool wear and surface roughness in turning AISI 1045 material. *VNUHCM J Eng Technol* 3(SI1):SI92–SI102. <https://doi.org/10.32508/stdjet.v3iSI1.726>
- [SAM 18] Sampaio, M. A., Machado, Á. R., Laurindo, C. A. H., Torres, R. D., & Amorim, F. L. (2018). Influence of minimum quantity of lubrication (MQL) when turning hardened SAE 1045 steel: a comparison with dry machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1), 959-968. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2342-x>
- [SWA 22] Swain S, Kumar R, Panigrahi I, Sahoo AK, Panda A. (2022). Machinability performance investigation in CNC turning of Ti–6Al–4V alloy: dry versus iron-aluminium oil coupled MQL machining comparison. *Int J Lightweight Mater Manuf* 5(4):496–509. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.06.002>
- [KHA 15] Khan, Z. A., Shihab, S. K., & Siddiquee, A. N. (2015). Analysis of chip morphology in dry hard turning of AISI 52100 alloy steel using RSM. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 17(6), 481-506. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2015.073720>
- [KHE 23] Khelfaoui F, Yallese MA, Boucherit S, Boumaaza H, Ouelaa N. (2023). Minimizing tool wear, cutting temperature and surface roughness in the intermittent turning of AISI D3 steel using the DF and GRA method. *Tribol Ind* 44(1):89. <https://doi.org/10.24874/ti.1395.10.22.01>
- [MAK 21] Makhesana MA, Patel KM. (2021). Optimization of Parameters and Sustainability Assessment Under Minimum Quantity Solid Lubrication-Assisted Machining of Inconel 718. *Process Integr Optim Sustain* 5:625–644. <https://doi.org/10.1007/s41660-021-00171-w>
- [SAF 21] Safi K, Yallese MA, Belhadi S, Boutabba S, Mabrouki T. (2021). Optimisation multi-objective des paramètres de coupe lors de l’usinage d’un acier pour travail à froid avec un carbure revêtu CVD (Al₂O₃/TiC/TiCN). *UPB Sci Bull, Ser D: Mech Eng* 83(1):149–168
- [PAT 22] Paturi UMR, Yash A, Palakurthy ST, Reddy NS. (2022). Modeling and optimization of machining parameters for minimizing surface roughness and tool wear during AISI 52100 steel dry turning. *Mater Today: Proc* 50:1164–1172. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.047>
- [KOU 22] Kouahla I, Yallese MA, Belhadi S, Safi K, Nouioua M. (2022). Tool vibration, surface roughness, cutting power, and productivity assessment using RSM and GRA approach during machining of Inconel 718 with PVD-coated carbide tool. *Int J Adv Manuf Tech* 122(3):1835–1856. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09988-2>
- [BOU 21] Boucherit S, Berkani S, Yallese MA, Khettabi R, Mabrouki T. (2021). Modeling and optimization of cutting parameters during machining of austenitic stainless steel AISI304 using RSM and desirability approach. *Period Polytech Mech Eng* 65(1):10–26. <https://doi.org/10.3311/PPme.12241>

- [ATI 24] Atif M, Junejo F, Amin I. (2024). Development of a framework for sustainability assessment of the machining process through machining parameter optimization technique. *Int J Sustain Eng* 17(1):1–24. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2287478>
- [SER 18] Serra R, Chibane H, Duchosal A. (2018). Multi-objective optimization of cutting parameters for turning AISI 52100 hardened steel. *Int J Adv Manuf Technol* 99:2025–2034. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2373-3>
- [ABB 23] Abbed K, Kribes N, Yallese MA, Chihaoui S, Boutabba S. (2023). Effects of tool materials and cutting conditions in turning of Ti-6Al-4V alloy: statistical analysis, modeling and optimization using CoCoSo, MABAC, ARAS and CODAS methods. *Int J Adv Manuf Technol* 128(3–4):1535–1557. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11775-6>
- [HAO 24] Haoues S, Yallese MA, Kaddeche M, Uysal A, Safi K. (2024). Investigation on machining of GFRP through ANOVA, DFA, and CoCoSo method combined with Taguchi approach. *J Reinf Plast Comp* 07316844241239249. <https://doi.org/10.1177/07316844241239249>
- [UMA 18] Umamaheswarrao P, Raju DR, Suman KNS, Sankar BR. (2018). Multi objective optimization of process parameters for hard turning of AISI 52100 steel using Hybrid GRA-PCA. *Procedia Comput Sci* 133:703–710. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.129>
- [GHO 15] Ghorabae MK, Zavadskas EK, Olfat L, Turskis Z. (2015). Multicriteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). *Informatica* 26(3):435–451. <https://doi.org/10.15388/Informatica.2015.57>
- [GHO 17] Ghorabae MK, Amiri M, Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J. (2017). A new multi-criteria model based on interval type-2 fuzzy sets and EDAS method for supplier evaluation and order allocation with environmental considerations. *Comput Ind Eng* 112:156–174. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.017>
- [GHO 16] Ghorabae MK, Zavadskas EK, Amiri M, Antucheviciene J. (2016). Evaluation by an area-based method of ranking interval type-2 fuzzy sets (EAMRIT-2F) for multi-criteria group decision-making. *Transform Bus Econ* 15(3), 76-95.
- [TRU 21] Trung DD, Thinh HX (2021) A multi-criteria decision-making in turning process using the MAIRCA, EAMR, MARCOS and TOPSIS methods: a comparative study. *Adv Produc Eng Manag* 16(4):443–456. <https://doi.org/10.14743/apem2021.4.412>
- [DAS 23] Das PP, Chakraborty S (2023) A comparative assessment of multicriteria parametric optimization methods for plasma arc cutting processes. *Decis Anal J* 6:100190. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100190>

- [**THI 23**] Thinh HX, Mai NT (2023) Comparison of two methods in multicriteria decision-making: application in transmission rod material selection. EUREKA: Phys Eng (6):59–68. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.003046>
- [**TRU 22**] Truong NX, Thinh HX (2022) Combined PIPRECIA method and modified FUCA method for selection of lathe. J Appl Eng Science 20(4):1355–1365. <https://doi.org/10.5937/jaes0-39335>
- [**HOA 23**] Hoang XT (2023) Multi-objective optimization of turning process by FUCA method. Strojnicky Časopis-J Mech Eng 73(1):55–66. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0005>
- [**KUM 25**] Kumar, R., Rafighi, M., Özdemir, M. et al. (2025). Modeling and optimization of hard turning: predictive analysis of surface roughness and cutting forces in AISI 52100 steel using machine learning. Int J Interact Des Manuf 19, 5749–5778. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02166-6>
- [**MED 15**] Meddour, I., Yallese, M.A., Khattabi, R. et al. (2015). Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization. Int J Adv Manuf Technol 77, 1387–1399. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6559-z>
- [**ZER 18**] Zerti, O. (2018). Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA (Doctoral dissertation). <http://dspace.univ-guelma.dz:8080/xmlui/handle/123456789/503>
- [**LEE 03**] Lee, J. (2003). Evaluation of the Distribution of Taguchi's Signal-to-Noise Ratio and the Effectiveness of the Signal-to-Noise Ratio for Detecting Changes in the Mean and/or Variance. Western Michigan University. https://scholarworks.wmich.edu/masters_theses/4764
- [**HAO 25**] HAOUES, S. (2025). Modélisation et optimisation des paramètres de performance lors de l'usinage des polymères thermoplastiques avec et sans renfort en utilisant les méthodes RSM, ANN, ANFIS-SC et MCDM (Doctoral dissertation).
- [**LE 22**] Le, H.-A., Hoang, X.-T., Trieu, Q.-H., Pham, D.-L., Le, X.-H. (2022). Determining the Best Dressing Parameters for External Cylindrical Grinding Using MABAC Method. Applied Sciences, 12 (16), 8287. <https://doi.org/10.3390/app12168287>
- [**KRI 20**] Krishnan, A. R., Mat Kasim, M., & Hamid, R. (2020). An alternate unsupervised technique based on distance correlation and Shannon entropy to estimate λ 0-fuzzy measure. *Symmetry*, 12(10), 1708. <https://doi.org/10.3390/sym12101708>.
- [**KRI 23**] Krishnan, A. R., Hamid, M. R., Tanakinjal, G. H., Asli, M. F., Boniface, B., & Ghazali, M. F. (2023). An investigation to offer conclusive recommendations on suitable benefit/cost

criteria-based normalization methods for TOPSIS. *MethodsX*, 10, 102227. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102227>

[PAR 22] Paradowski, B., & Szyjewski, Z. (2022). Comparative analyses of multi-criteria methods in supplier selection problem. *Procedia Computer Science*, 207, 4593-4602. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.523>.

[VAF 18] Vafaei, N., Ribeiro, R. A., & Camarinha-Matos, L. M. (2018). Data normalisation techniques in decision making: case study with TOPSIS method. *International journal of information and decision sciences*, 10(1), 19-38. <https://doi.org/10.1504/IJIDS.2018.090667>

[ARV 23] M. Arvin, P. Beiki, S.Z. Shahraki, A neighborhood-level analysis of association between social vulnerability and COVID-19 in ahvaz, Iran, *Int. J. Disaster RiskReduct.* 85 (2023) 103504. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103504>.

[LIU 20] Y. Liu, Y. Mu, K. Chen, Y. Li, J. Guo, Daily activity feature selection in smart homes based on Pearson correlation coefficient, *Neural Process Lett.* 51 (2020) 1771–1787. <https://doi.org/10.1007/s11063-019-10185-8>.

[URI 20] W. Uriawan, A. Wahana, D. Wulandari, W. Darmalaksana, R. Anwar, Pearson Correlation Method and Web Scraping for Analysis of Islamic Content on Instagram Videos, in: 2020 6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), IEEE, 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICWT50448.2020.9243626>.

[TAN 21] C. Tang, D. Xu, N. Chen, (2021). Sustainability prioritization of sewage sludge to energy scenarios with hybrid-data consideration: a fuzzy decision-making framework based on full consistency method and fusion ranking model, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 28 5548–5565. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10544-2>.

[GRA 17] Đ.-G. Granić, The problem of the divided majority: preference aggregation under uncertainty, *J. Econ. Behav. Organ.* 133 (2017) 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2016.10.022>.

[ECE 21] F. Ecer, A consolidated MCDM framework for performance assessment of battery electric vehicles based on ranking strategies, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 143 (2021) 110916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110916>.