

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



Mémoire de fin d'études

Présenté par : **RAMDANI FAOUEZ**

Master

Option : Construction Mécanique

Modélisation et optimisation des paramètres de performance en usinage dur sous un environnement à sec et MQL

Sous la direction de : **Pr. Yallese M.A**
Ms Souaidi chaima

Année universitaire : 2022/2023

Dédicace

Nous dédions ce travail

À ceux que nous aimons le plus,

*À nos très chers parents qui ont toujours été là pour nous, et
qui nous ont*

Donné de magnifiques modèles de labeur et de persévérance.

Nous espérons

*Qu'ils trouveront dans ce travail toutes nos reconnaissances
Et tout notre*

Amour.

A nos chères mères, et pères.

*A ma petite famille, ma femme, mais enfants, Hadjer, Zakaria,
Khadîdja, les symboles de bonheur et source de tendresse et
d'amour*

A nos professeurs.

A nos adorables amis.

Remerciements

A la fin de ce mémoire de fin d'études

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur

Pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail. J'adresse

Mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la

Réalisation de ce mémoire. En premier lieu, je tiens, à exprimer ma

Gratitude et mes remerciements à mon directeur de Mémoire

***Pr. YALLESE MOHAMMED ATHMANE, Professeur au
département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 de
Guelma.***

*En tant que Directeur de mémoire, il m'a guidé dans mon travail, m'a
aidé à trouver des solutions pour avancer et a fait preuve d'une très
grande compréhension et patience avec moi. J'ai eu le grand plaisir
de travailler sous sa direction.*

*Ensuite, je tiens à remercier, Ms Souaidi chaima, Ms. SAFI
KHAOULA, Ms. HAOUES SABRINA pour leurs aides et leurs
conseils durant la réalisation de ma mémoire fin d'étude*

Enfin, Mes vifs remerciements vont également aux membres

*Du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon projet de fin d'études en
acceptant d'examiner mon travail et l'enrichir par leurs propositions.*

Résumé

Dans ce travail, une étude comparative entre deux modes de lubrification à savoir ; l'usinage à sec et l'usinage avec une quantité minimale de lubrification (MQL) a été réalisé. L'usinage est effectué en tournage sur l'acier à roulement AISI 52100 (traité) par un outil en céramique suivant un plan de Taguchi L18. Le travail réalisé dans ce cadre est divisé en deux parties. La première partie concerne une étude statistique basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) afin de quantifier les effets des paramètres d'entrée ; la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), la profondeur de passe (a_p) et l'environnement de lubrification (à sec et MQL), sur les paramètres technologiques de sortie à savoir ; les deux critères de rugosité (R_a et R_z), et le taux d'enlèvement de matière (MRR). L'exploitation des résultats de l'ANOVA a permis de proposer des modèles mathématiques linéaires qui permettent la prédiction des paramètres de sortie pour les deux modes de lubrification.

La deuxième partie du travail concerne l'optimisation multi-objective des conditions de coupe. Trois méthodes d'optimisation ont été exploitées dans ce travail ; l'optimisation multi-objectif en utilisant la méthode de la fonction de désirabilité (DF); l'optimisation multi-objectif en utilisant la méthode (DEAR) avec et sans le rapport signal bruit et finalement l'optimisation multi-objectif en utilisant la méthode (PIV) (Méthode de Valeur indexée de proximité). Une comparaison des trois méthodes a été aussi réalisée.

Mots clés : Usinage, AISI 52100, MQL, ANOVA, MSR, DF, Optimisation

Abstract

In this work, a comparative study between two modes of lubrication namely; dry machining and machining with a minimum amount of lubrication (MQL) was performed. Machining is carried out by turning on AISI 52100 bearing steel (treated) by a ceramic tool according to a Taguchi L18 plan. The work carried out in this framework is divided into two parts. The first part concerns a statistical study based on the analysis of variance (ANOVA) in order to quantify the effects of the input parameters; the cutting speed (V_c), the feed (f), the depth of cut (a_p) and the lubrication environment (dry and MQL), on the technological output parameters, namely; the two roughness criteria (R_a and R_z), and the material removal rate (MRR). The exploitation of the results of the ANOVA made it possible to propose linear mathematical models, which allow the prediction of the output parameters for the two modes of lubrication.

The second part of the work concerns the multi-objective optimization of the cutting conditions. Three optimization methods were used in this work; multi-objective optimization using the desirability function (DF) method; multi-objective optimization using the (DEAR) method with and without the signal-to-noise ratio and finally multi-objective optimization using the (PIV) method (Proximity Indexed Value Method). A comparison of the three methods was also carried out.

Keywords: Machining, AISI 52100, MQL, ANOVA, MSR, DF, Optimization

ملخص

في هذا العمل ، دراسة مقارنة بين طريقتين للتزبييت وهما ؛ تم إجراء المعالجة الآلية والتشغيل الجاف بأقل قدر من التشحيم (MQL). تتم المعالجة الآلية عن طريق تشغيل فولاذ محمل AISI 52100 (معالج) بواسطة أداة خزفية وفقاً لخطة Taguchi L18. ينقسم العمل المنفذ في هذا الإطار إلى جزأين . يتعلق الجزء الأول بدراسة إحصائية تستند إلى تحليل التباين (ANOVA) من أجل تحديد تأثيرات معلمات الإدخال ؛ سرعة القطع (Vc) ، التغذية (f) ، عمق القطع (ap) وبيئة التشحيم (الجافة و MQL) ، على معلمات المخرجات التكنولوجية ، وهي ؛ معيارا الخشونة (Ra و Rz) ، ومعدل إزالة المواد (MRR). مكن استغلال نتائج ANOVA من اقتراح نماذج رياضية خطية تسمح بالتنبؤ بمعلمات الإخراج لطريقتين من التشحيم.

الجزء الثاني من العمل يتعلق بالتحسين متعدد الأهداف لظروف القطع . تم استخدام ثلاث طرق للتحسين في هذا العمل ؛ التحسين متعدد الأهداف باستخدام طريقة وظيفة الاستحسان (DF) ؛ تحسين متعدد الأهداف باستخدام طريقة (DEAR) مع وبدون نسبة الإشارة إلى الضوضاء وأخيراً التحسين متعدد الأهداف باستخدام طريقة (PIV) (طريقة القيمة المفهومة القرب). كما تم إجراء مقارنة بين الطرق الثلاث.

الكلمات الرئيسية: الآلات ، AISI 52100 ، MQL ، ANOVA ، MSR ، DF ، التحسين

INDEX DES FIGURES

Chapitre I	N °
Figure I.1 Usinage par enlèvement de matière.....	2
Figure I.2 Exemples de différentes plaquettes et outils de tournage.....	2
Figure I.3 Disposition les matériaux d’outil selon la ténacité et la dureté.....	3
Figure I.4 plaquettes du carbure.....	4
Figure I.5 plaquettes cermet.....	5
Figure I.6 plaquette Céramiques.....	6
Figure I.7 Plaquette CBN.....	6
Figure I.8 plaquettes Diamant.....	7
Figure I.9 Opération de chariotage du tournage dur (Sandvik Coromant)	7
Figure I.10 Principaux paramètres de coupe.....	9
Figure I.11 Caractéristiques du profil.....	10
Figure I.12 Profil de surface tournée.....	11
Figure I.13 présente la lubrification.....	13
Figure I.14 Usinage à sec.....	14
Figure I.15 système MQL-minimum-quantité-lubrifiants mélange air/huile.....	15
Figure I.16 lubrification abondante.....	16
Figure I.17 topographie de surface 3D pour tourner sous a) usinage à sec b) usinage humide c) Usinage MQL Pour : $f=0.12\text{mm /rev}$, $V_c= 120\text{ m /min}$. $a_p= 0.15$	18
Figure I.18 Variation de la rugosité de la surface en fonction du taux d'enlèvement.....	19
Figure I.19 Résultats EDX et cartographie des outils de coupe	19
Figure I.20 Surface de la pièce avec MQL et état sec $DOC=0,1\text{ mm}$	20
Figure I.21 Progression de l'usure moyenne des éclats (VBB) avec $DOK = 0,1\text{ mm}$	20
Figure I.22 Rugosité de surface SAE 1045 workpiece pour MQL et usinage à sec avec $DOR=0.2\text{mm}$	21
Figure I.23 forces d’usinage SAE 1045 pour usinage à sec et avec lubrification de MQL $DOC=0.2\text{ mm}$	21
Figure I.24 morphologie de la puce (A)MQL, (B) COD sec = $0,2\text{ mm}$	21
Figure I.25 illustration schématique du montage expérimental.....	22
Figure I.26 Photos MEB des outils de coupe appartenant à MQL et environnement sec.	23
Figure I.27 Changement d'usure des planches selon différents environnements.....	23
Figure I.28 la rugosité de la surface change en fonction des différents environnements....	23
Figure I.29 Changement de température de coupe selon les environnements différents	24

Figure I.30 Couper les changements d'énergie en fonction des différents environnements.....	24
Figure I.31 surfaces de réponse pour : a) F, b) Ra, c) Pc.....	25
Figure I.32 Topographie de surface 3D.....	26

Chapitre II

Figure II.1 Tour à charioter et à fileter modèle SN40.....	31
Figure II.2 Nomenclature des différents organes du tour modèle SN40.....	32
Figure II.3 Capteur de vitesse	32
Figure II.4 Variateur de vitesse de coupe	32
Figure II.5 Eprouvette utilisée pour les essais.....	33
Figure II.6 Plaquette et porte plaquette utilisés.....	34
Figure II.7 Rugosimètre (Surftest_SJ-210 Mitutoyo)	34
Figure II.8 Dynamomètre (KISTLER9257 B)	35
Figure II.9 Ordinateur d'acquisition piloté par le logiciel (DYNOWARE)	36
Figure II.10 Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.....	36
Figure II.11 Montage de système MQL.....	37
Figure II.12 boîte contrôle MQL.....	37
Figure II.13 Réservoir d'huile	37

Chapitre III

Figure III.1 Contributions des différents facteurs sur le critère (Ra).....	43
Figure III.2 Graphique des effets principaux pour (Ra).....	44
Figure III.3 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Ra).....	45
Figure III.4 Courbe de normalité pour (Ra).....	45
Figure III.5 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Ra) en fonction de (Vc et f) (a) à sec et (b) MQL.....	46
Figure III.6 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Ra) en fonction de (f et ap) (a) à sec et (b) MQL.....	47
Figure III.7 Contributions des différents facteurs sur (Rz).....	48

Figure III.8 Graphique des effets principaux pour (Rz).....	49
Figure III.9 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Rz).....	50
Figure III.10 Courbe de normalité pour (Rz).....	50
Figure III.11 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Rz) en fonction de (Vc et f) (a) à sec et (b) MQL.....	51
Figure III.12 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Rz) en fonction de (f et ap) (a) à sec et (b) MQL.....	52
Figure III.13 Surfaces de réponse et les contours de (MRR) en fonction de (Vc et f) (a) à sec et (b) MQL.....	53
Figure III.14 Surfaces de réponse et les contours de (MRR) en fonction de (f et ap) (a) à sec et (b) MQL.....	54

Chapitre IV

Figure IV.1 Graphe des rampes pour le 1 ^{er} cas d'optimisation.....	57
Figure IV.2 Graphe de surface de réponse 3D et contours de la désirabilité (a) à sec et (b) MQL.....	58
Figure IV.3 Graphes des rampes pour le 1 ^{er} cas d'optimisation.....	59
Figure IV.4 Graphe de surface de réponse 3D et contours de la désirabilité (a) à sec et (b) MQL.....	60
Figure IV.5 Graphes des rampes pour le 3 ^{ème} cas d'optimisation.....	61
Figure IV.6 Graphe de surface de réponse 3D et contours de la désirabilité (a) à sec et (b) MQL.....	62
Figure IV.7 Organigramme des étapes de la méthode DEAR.....	65
Figure IV.8 Valeurs de l'indice MRPI pour les différents essais.....	66

INDEX DES TABLEAUX

chapitre I		N°
Tableau I .1	Résultats de Fz , Ra et Pc selon les conditions de coupe.....	29
chapitre II		
Tableau II.1	Désignation de l'acier AISI 52100 selon les différentes normes.....	33
Tableau II.2	la composition chimique de l'acier AISI 52100	33
Tableau II.3	Caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 52100.....	33
Tableau II.4	Table orthogonale de Taguchi L18.....	38
Tableau II.5	Conditions de coupe utilisées.....	39
chapitre III		
Tableau III.1	Résultats des essais pour le plan de Taguchi L18.....	42
Tableau III.2	Analyse de la variance pour le critère de rugosité (Ra).....	43
Tableau III.3	Analyse de la variance pour le critère de rugosité (Rz).....	48
chapitre IV		
Tableau IV.1	Contraintes d'optimisation pour les trois cas d'étude.....	56
Tableau IV.2	Solutions de 1 ^{er} cas d'optimisation.....	57
Tableau IV.3	Solutions du 2 ^{ème} cas d'optimisation.....	59
Tableau IV.4	Solutions du 3 ^{ème} cas d'optimisation.....	61
Tableau IV.5	Régimes optimaux d'optimisation.....	62
Tableau IV.6	Résultats du signal/bruit (S/N) pour (Ra et Rz et MRR)	63
Tableau IV.7	Poids ($W_{x_{ij}}$) et le (MRPI) de chaque expérience.....	65
Tableau IV.8	Régime optimal pour la méthode DEAR couplée avec S/N.....	66
Tableau IV.9	Indices de performance multi réponses MRPI.....	67
Tableau IV.10	Régime optimal pour la méthode DEAR sans S/N.....	68
Tableau IV.11	Résultats des valeurs indexées de proximité (PIV).....	70
Tableau IV.12	Régime optimal pour la méthode MRPI sans S/N.....	70
Tableau IV.13	Comparaison des méthodes d'optimisation.....	71

Sommaires

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
ملخص.....	V
Indexe de figure.....	VI
Indexe des tableaux.....	VII
Sommaire.....	VIII
Nomenclature.....	IX
Introduction générale.....	IIX

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction.....	1
I.2 Notion de la coupe des métaux.....	1
I.3 Matériaux de coupe.....	2
I.3.1 Classification des matériaux des outils de coupe.....	3
a) Acier rapides supérieurs ARS.....	3
b) Carbure.....	4
c) Cermet.....	4
d) Céramiques.....	5
e) Nitrure de bore cubique.....	6
f) Diamant.....	6
I.4 Tournage dur.....	7
I.4.1 Définition du tournage dur.....	7
I.4.2 Avantage du tournage dur par rapport à la rectification.....	8
I.5 Les Principaux paramètres de coupe.....	8
a) La vitesse de coupe (V_c).....	9
b) La profondeur de coupe (a_p).....	9
c) Avance (f).....	9
I.6 Rugosité.....	10
I.6.1 Généralités sur les états de surface.....	10
I.6.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques.....	10

I.6.3 État de surface en tournage.....	10
I.7 Débit du copeau enlevé.....	11
I.8 Lubrification en usinage.....	11
I.8.1 Importance de la lubrification.....	12
I.8.2 Les avantages de la lubrification.....	12
I.8.3 Lubrifiants.....	13
I.8.4 Usinage à sec.....	14
I.8.7 Le système MQL.....	14
I.8.6 Cryogénie.....	15
I.8.7. Lubrification abondante.....	16
I.9 Etat d'art.....	17
I.10 Conclusion.....	26

Chapitre II : procédure expérimentale

II.1 Introduction	31
II.2 Matériels utilisés.....	31
II.2.1 Machine-outil.....	31
II.2.2 Matériau de la pièce à usiner.....	33
II.2.3. Plaquette et porte plaquette.....	34
II.2.4. Matériels de mesure.....	34
a) Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	34
b) Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme Kastler)	35
II.2.5 Système avec un minimum de quantité de lubrification (MQL).....	36
II.3 Planification des expériences.....	38
II.4 Condition de coupe.....	39
II.5 Débit de copeaux enlevé (MRR).....	39
II.6 Conclusion.....	40

Chapitre III: Etude statistique et modélisation

III.1 Introduction.....	41
III.2 Résultats des essais réalisés.....	41
III.3 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la rugosité (Ra).....	42
III.3.1 Analyse de la variance pour (Ra).....	42
III.3.2 Graphique des effets principaux pour (Ra).....	43
III.3.3 Modélisation de la rugosité de surface (Ra).....	44

III.3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Ra).....	44
III.3.5 Surface de réponse et graphique des contours pour (Ra).....	45
III.4 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la surface de (Ra).....	47
III.4.1 Analyse de variance pour (Ra).....	47
III.4.2 Graphique des effets principaux pour (Rz) III.4.3 Modélisation de la rugosité de surface (Rz).....	48 49
III.4.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (R).....	49
III.3.5 Surface de réponse et graphique des contours pour (Rz).....	50
III.3.6 Surfaces de réponse et graphiques des contours pour le (MRR).....	52
III.7 Conclusion.....	54

Chapitre IV : optimisation des conditions de coupe

IV Optimisation des conditions de coupe	55
IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Fonction de désirabilité	55
IV.2.1 Cas d'optimisation étudiés.....	56
IV.3 Optimisation par la méthode DEAR	63
IV.3.1 Méthode DEAR basée sur le signal bruit de Taguchi (S/N)	63
IV.3.2 Méthode DEAR sans rapport signal/bruit.....	66
IV.4 Méthode de valeur indexée de proximité (PIV).....	69
IV.5 Comparaison des Méthodes.....	70
Conclusion générale.....	72
Références bibliographiques.....	

Nomenclatures

Vc	Vitesse de coupe [m/min]
f	Avance par tour [mm/tr]
ap	Profondeur de passe [mm]
Pc	Puissance de coupe [W]
Ra	Rugosité moyenne arithmétique [μm]
Rt	Rugosité totale [μm]
Rq	Rugosité moyenne quadratique du profil [μm]
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité [μm]
tc	Temps d'usinage [min]
r	Rayon de bec de l'outil (mm).
HRC	Dureté Rockwell.
ANOVA	Analyse de la variance
Cont %	Pourcentage de contribution
F	Valeur de Fisher
R²	Coefficient de détermination
S/N	Rapport signal sur bruit [dB]
MSR	Méthodologie de surface de réponse
DF	fonction de désirabilité.
DAER	Méthode de classification basée sur l'analyse d'enveloppe de donnée.
PIV	valeurs indexées de proximité.
MRPI	Indices de performance multi réponses.
MRR	taux d'enlèvement de matière [cm^3/min].

Introduction générale

Les aciers à roulements AISI 52100 sont principalement utilisés dans le secteur prometteur comme l'industrie du roulement. Ces aciers de type outil offrent une dureté élevée, une excellente résistance à l'usure et une stabilité dimensionnelle. En raison de leur résistance plus élevée, ils conviennent aux applications de roulements, en particulier dans les secteurs automobiles. Dans toute opération de coupe de métal, le liquide de coupe joue un rôle essentiel en refroidissant la surface de la pièce et de l'outil de coupe, en éliminant les copeaux de la zone de coupe et en lubrifiant l'interface outil-pièce. Cependant, une mauvaise utilisation du fluide de coupe et de mauvaises méthodes d'élimination peut nuire gravement à la santé humaine et à l'environnement. En outre, il représente 16 à 20% du coût total de fabrication dans l'industrie de la production. Parmi les diverses techniques disponibles sur l'application du liquide de refroidissement, les chercheurs se sont récemment concentrés sur l'usinage à sec et la lubrification à quantité minimale (MQL) car elle minimise l'utilisation de liquide de refroidissement en pulvérisant le mélange d'air comprimé et de fluide de coupe de manière optimisée au lieu d'un refroidissement par inondation. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet de fin d'études. Il a pour but de réaliser une comparaison entre deux modes de lubrification (à sec et MQL). Une attention particulière est portée à la modélisation des paramètres du procédé et à l'optimisation des conditions de coupe suivant plusieurs méthodes. L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire de master est structuré en 4 chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique, au premier lieu, on y expose des notions de base sur l'usinabilité, des paramètres de coupe. Cette partie est suivie par un point qui concerne l'importance de la lubrification dans l'usinage, les avantages et les modes de lubrification. Enfin, une conclusion de ce chapitre a été réalisée.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation des équipements nécessaires à la réalisation des essais, la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe. Le couple outil-matière est aussi présenté d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe.

Dans le chapitre trois nous présentons les résultats des essais réalisés suivant le plan de Taguchi L18, lors de l'usinage de l'acier traité AISI 52100 (100Cr6). Une analyse de la

Variance (ANOVA) a été réalisée afin de quantifier les effets des paramètres d'entrée ; la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), la profondeur de passe (a_p) et l'environnement de lubrification (à sec et MQL), sur les paramètres technologiques de sortie à savoir ; les deux critères de rugosité de surface (R_a et R_z), et le taux d'enlèvement de matière (MRR). La méthodologie de surface de réponse est utilisée dans ce chapitre afin de proposer des modèles mathématiques qui permettent de faire des prédictions. Ces modèles seront exploités afin de faire une étude d'optimisation des conditions de coupe. Pour réaliser ces objectifs, les logiciels Mini-Tab 18 et design expert 13 ont été utilisés.

Dans le quatrième chapitre, l'objectif est de faire une optimisation multi-objective des conditions de coupe lors de l'usinage de l'acier traité AISI 52100 pour les deux conditions de lubrification (à sec et MQL) respectueuses de l'environnement. Trois méthodes d'optimisation ont été exploitées dans ce chapitre : Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode de la fonction de désirabilité (DF), en utilisant la méthode (DEAR) avec et sans le rapport signal bruit et l'optimisation avec l'utilisation de la méthode (PIV) (Méthode de Valeur indexée de proximité).

Finalement, nous avons terminé notre mémoire par une conclusion générale suivie des perspectives et d'une liste des références bibliographique.

Chapitre I

Etude

bibliographique

I.1 Introduction

L'usinage par enlèvement de matière représente le procédé le plus répandu dans les domaines de fabrication des pièces mécaniques. Son principe d'enlèvement de la matière permet de donner à la pièce brute la forme et les dimensions des pièces voulues avec une grande précision, à l'aide d'une machine-outil. Depuis leur apparition, les techniques d'usinage ont subi de multiples améliorations. Elles ne cessaient d'être remises en question afin de rester en phase avec les exigences industrielles, qu'elles soient économiques ou écologiques. Toutes en assurant une meilleure productivité en termes de qualité des surfaces usinées, aspects humain et environnemental qui ont toujours été des préoccupations majeures pour les fabricants. A l'heure actuelle, ils se trouvent dans l'obligation de produire des pièces mécaniques, dont les tolérances géométriques et dimensionnelles sont de plus en plus faibles. Des progrès au niveau de l'ensemble Pièce - Outil - Machine ont été effectués, permettant l'amélioration de l'usinabilité de plusieurs matériaux. De nombreux travaux ont été menés pour trouver les outils et les conditions de coupe optimales permettant de surmonter les problèmes d'usinage de la plupart des matériaux.

I. 2 Notion de la coupe des métaux

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de matière (formation de copeaux) en utilisant un outil- coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil matière, c'est –à- dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe...), L'usinage des métaux met en jeu deux processus élémentaires, la création et l'évacuation d'un copeau, qui font jouer deux mécanismes physiques de base, la déformation plastique au sein du copeau et le contact de celui-ci avec l'outil. La modélisation de la formation du copeau repose sur la compréhension de ces deux mécanismes et a pour objet la prévision de la géométrie du copeau, des efforts de coupe et des échauffements de la pièce et de l'outil à partir des conditions de coupe et des propriétés thermomécaniques du matériau usiné et de l'outil. Afin de mieux placer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux consiste à façonner et finir une surface de pièce de configuration donnée par un ensemble d'opérations à effectuer à l'aide de machines-outils (**figure I.1**) Cette technique ancienne est souvent appelé coupe onéreuse, dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux) [1].



Figure I.1 Usinage par enlèvement de matière. [1]

I. 3 Matériaux de coupe

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie. Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu. Dans le courant du XXe siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) (Figure I.2), et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces [2].



Figure I.2 Exemples de différentes plaquettes et outils de tournage [2]

I.3.1 Classification des matériaux des outils de coupe

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

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

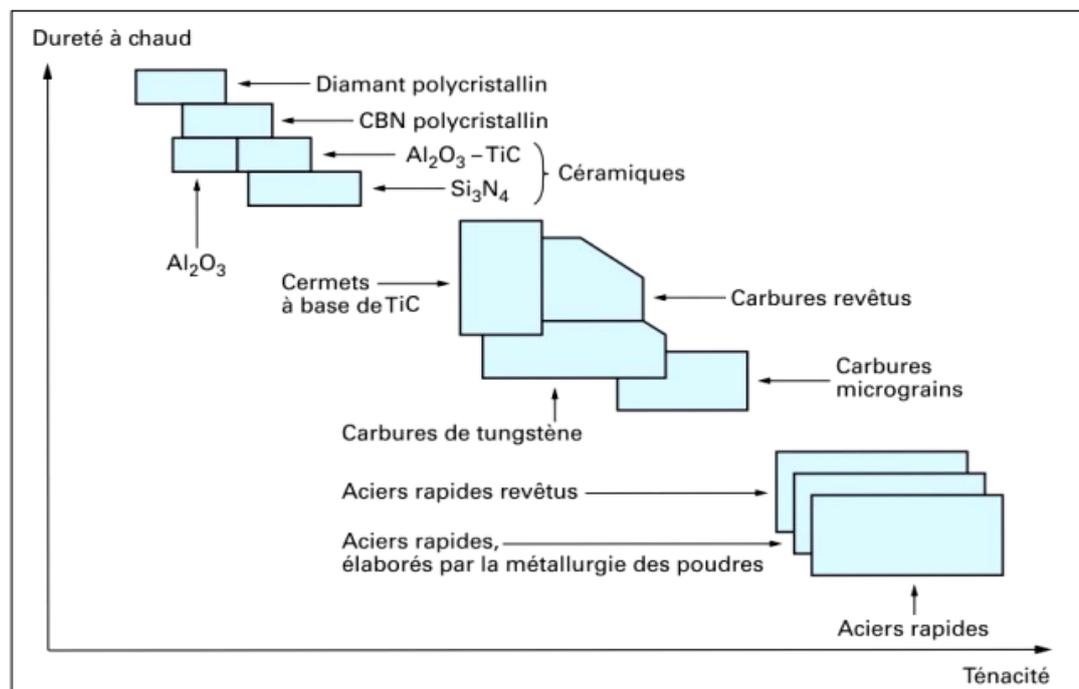


Figure I.3 Disposition des matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté. [2]

Les matériaux de coupe utilisés en tournage des pièces peuvent être classés en plusieurs groupes : les aciers rapides, les aciers rapides revêtus, les aciers rapides frittés, les Carbures Métalliques, les carbures micro-grains, les cermets, les céramiques, le Nitrure de Bore Cubique (CBN) et les diamants. [2-3].

a) Acier rapides supérieurs ARS

Les outils ARS (acier rapides supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier fortement allié subissant un traitement thermique, il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forêts, où les outils possèdent un faible angle du tranchant. On les utilise avec de

faibles vitesses de coupe pour éviter l'échauffement trop important et par conséquent une usure excessive, généralement ils sont des outils monobloc. En générale la composition chimique est présentée comme suit : 0,7 à 1,6% de carbone, 12 à 20 % tungstène, 3,5 à 10% molybdène, vanadium et cobalt, leur fabrication est réalisée par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres.

b) Carbure

Les outils en carbures sont les plus utilisés grâce à leur intérêt économique. Ils sont en général utilisés sous forme de plaquettes de différentes formes (**Figure I.4**). Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en aciers ordinaire, la partie active de ces outils étant réaffûtée au fur et à mesure de son usure. Il y a deux types d'outil en carbure.

* Les carbures non revêtus : sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène de titane ...) et de substance liante (cobalt) qui confère sa ténacité à la plaquette.

* Les carbures revêtus : sont des plaquettes de carbure recouvertes d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium.

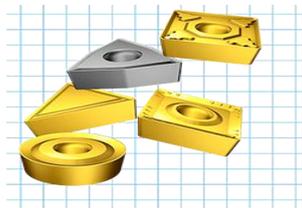


Figure I.4 Plaquettes du carbure [3]

c) Cermet

Cermet, un terme formé de deux syllabes : « cer » vient de céramique et « met » de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de Composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co. Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour un grand part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN, et TiCN et du rapport N/(C+N) qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des

Cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques. Les cermets présentent, en outre, une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Les Cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige [3] (**Figure I.5**).



Figure I.5 plaquettes cermet [3]

d) Céramiques

Les céramiques (**figure I.7**) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al_2O_3 . Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à 60HRC (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation. D'autres céramiques sont également employées. Les céramiques noires qui sont des mélanges d' Al_2O_3 et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircone (ZrO_2), sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al_2O_3 aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe. Le nitrure de silicium Si_3N_4 permet, lors de l'usinage de certains matériaux, des vitesses de coupe une fois et demie à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides ...) il s'emploie à sec. Les céramiques renforcées par des whiskers (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leurs confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires. Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes et un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe) (**Figure I.6**).

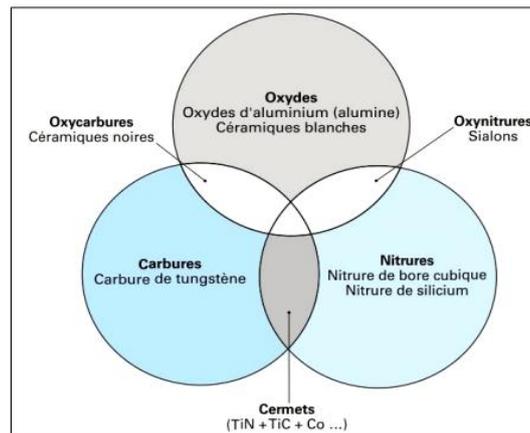


Figure I.6 Plaquette Céramiques [3]

e) Nitride de bore cubique

Le CBN est une matière très dure adaptée au tournage de l'acier trempé, de la fonte en coquille et d'alliages à base de nickel ou cobalt. Les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions coupe et de l'arête de coupe. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes céramiques ou en carbure. Les plaquettes en nitride de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition [2] (**Figure I.7**).

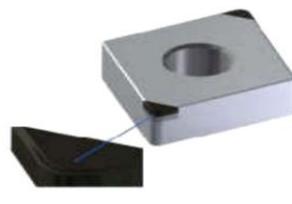


Figure I.7 Plaquette CBN

f) Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffutage des meules, il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassement). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650° se transforme en un morceau de graphite. On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Mais, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : Alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables...etc. [2] (**Figure I.8**).



Figure I.8 Plaquette en Diamant

I.4 Tournage Dur

I.4.1 Définition du tournage dur [4]

Le tournage des aciers d'une dureté supérieure à 45 HRC, de manière typique dans la plage 55 à 68 HRC, s'appelle le tournage dur (**figure I .9**). C'est une alternative économique à la rectification. Le tournage dur s'est avéré capable de réduire les temps d'usinage et les coûts de plus de 70 % tout en apportant plus de flexibilité, une qualité plus élevée et des temps de production moins longs. L'arrivée sur le marché de matériaux de coupe super durs tels que le nitrure de bore cubique (CBN) et les céramiques à base d'oxyde d'aluminium, ainsi que de fabrication fiable pour la production en grandes séries. Aujourd'hui, le tournage dur est bien accepté et tout à fait en mesure de répondre aux objectifs de productivité de l'industrie visant à une meilleure qualité de pièces finies et une réduction des temps de cycle.



Figure I.9 Opération de chariotage du tournage dur (Sandvik Coromant). [4]

Dans l'industrie automobile, le tournage dur est tout particulièrement compétitif. Les exigences croissantes de productivité et de réduction des coûts ont amené les constructeurs à réaliser le tournage des composants de boîtes de vitesses et de transmissions à l'état trempé.

Les pièces couramment usinées par tournage dur sont, par exemple, les pignons de boîtes de vitesses, les rotors de freins, les pignons de transmission, les rotules de direction, les sièges de soupapes, les blocs moteurs, les pistons, les chemises de cylindres et les carters d'embrayage. Les constructeurs conçoivent désormais ces pièces dans l'objectif du tournage dur et non plus de la rectification.

I.4.2 Avantage du tournage dur par rapport à la rectification

Le tournage dur est une méthode d'usinage à un seul point de contact qui permet d'usiner des contours complexes sans avoir recours aux meules de forme coûteuses qui nécessitent la rectification à points de contact multiples. Le tournage dur permet en outre de réaliser plusieurs opérations en un seul montage avec une excellente précision de positionnement, moins de manipulations et une baisse des risques d'endommagement des pièces. L'environnement est également bénéficiaire puisque cette méthode élimine les boues engendrées par la rectification et ne nécessite pas d'arrosage. Finalement, le tournage dur réduit les coûts machine et permet une meilleure maîtrise de la production, des rendements plus élevés et une meilleure qualité de la pièce finie. [4]

I.5 Principaux paramètres de coupe

Les deux mouvements fondamentaux qui contribuent à l'enlèvement de la matière pour former le copeau sont : Le mouvement de coupe (MC), le mouvement d'avance (MA) (**Figure I.10**). En tournage, le mouvement de coupe est donné par la rotation de la pièce usinée autour de son axe (N , tr/min), qui donne naissance à la vitesse de coupe (V_c , m/min) au niveau du bec de l'outil, le mouvement d'avance (f) mm/tr est donné par le déplacement de l'outil parallèlement à l'axe de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements produit une hélice à la pointe de l'outil, si cette pointe possède un rayant suffisamment grand par rapport au pas de l'hélice, elle engendre un cylindre. Pour enlever le copeau il faut ajouter aux deux mouvements précédents un troisième mouvement qui consiste à faire entrer l'outil à chaque passe d'usinage d'une certaine profondeur dans la matière c'est La profondeur de passe (a_p) mm.[5]

Les paramètres de coupe sont les variables qui influencent la qualité de la surface de la pièce usinée et les conditions opérationnelles de l'outil coupant. Les paramètres de coupe les plus importants sont la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de coupe (a_p), et la force de coupe (P_c). La vitesse de rotation de la pièce est définie par L'équation (**I .1**):

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \qquad V_c = \pi \times D \times \omega \qquad (I.1)$$

Avec : V_c = vitesse de coupe, D = diamètre de la pièce et ω = vitesse de rotation où D (mm) est le diamètre final de la pièce en tour / min.

a) Vitesse de coupe (V_c)

Est la vitesse de déplacement de l'outil coupant à travers la pièce. Elle est Exprimée en mètres par minute (m/min). La Vitesse de coupe a un impact sur la température de l'outil et sur la rugosité de la Surface usinée. Une vitesse de coupe élevée peut réduire la rugosité, mais peut Egalement entraîner une augmentation de la température de l'outil et une Réduction de la durée de vie de l'outil.

b) Profondeur de coupe (a_p)

Est la distance entre la surface de la pièce usinée et la surface la plus éloignée De l'outil coupant. Elle est exprimée en millimètres (mm) ou en pouces (in). La Profondeur de coupe peut influencer la force de Coupe requise et la rugosité de La surface usinée.

c) Avance (f)

L'avance f [mm/tour] s'exprime par le déplacement de l'outil (en tournage) pour : un tour; c'est l'avance par tour.

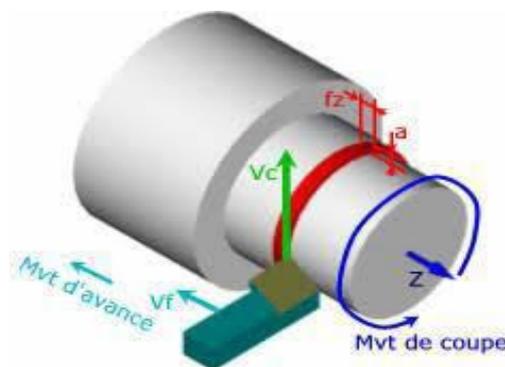


Figure I.10 Principaux paramètres de coupe [5]

I.6 Rugosité

I.6.1 Généralités sur les états de surface

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

I.6.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique (**Figure I.11**). Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [6].

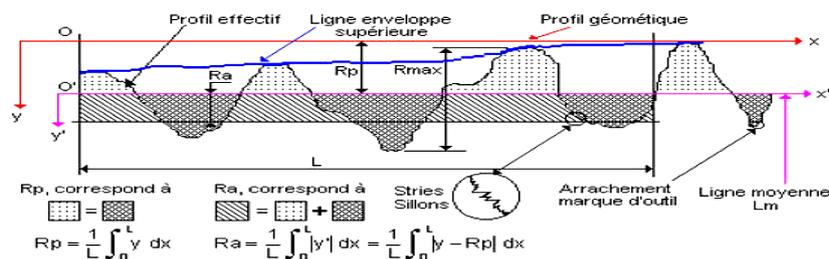


Figure I.11 Caractéristiques du profil.

L : Longueur de base du profil moyen.

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

R_a : Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y (Entre chaque point de la courbe et l'axe 'O x').

I.6.3 État de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le Choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La Rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par

(Figure I.12) Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maxi Profil de rugosité R_{max} et donné par [7] :

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

R max : La rugosité maximale en millimètre.

f : l'avance en millimètre.

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



Figure I.12 Profil de surface tournée.

I.7 Débit du copeau enlevé

Le débit de matière global (Q) est un paramètre à optimiser afin d'améliorer la productivité. Néanmoins, la variation de ce paramètre peut entraîner une augmentation des efforts de coupe, de la température de coupe, etc. Cela peut également entraîner une usure prématurée ou bien même la rupture de l'arête de l'outil de coupe, et par là même, une dégradation qualitative du composant usiné. Il faut donc veiller à appliquer une démarche de caractérisation rigoureuse, à laquelle un compromis entre productivité, durée de vie et qualité d'usinage sera nécessaire. Le débit de matière global (Q) s'exprime alors comme étant le volume de matière enlevée par l'outil et par unité de temps ($\text{cm}^3, \text{min}^{-1}$) :

$$Q = Vc \times f \times ap \quad (\text{I.2})$$

Où Vc : Vitesse de coupe ; f : vitesse d'avance et ap : profondeur de passe [8].

I.8 Lubrification en usinage

La lubrification est le procédé ou la technique utilisé pour réduire le frottement et l'usure d'une ou des deux surfaces à proximité et se déplaçant l'une par rapport à l'autre en interposant entre elles une substance appelée lubrifiant. Il existe divers types de lubrifiant, qui comprend des huiles, des émulsions huile-eau, des pâtes, des gels, des aérosols (brouillards) et de l'air ou d'autres gaz. Ils peuvent être fabriqués à partir de distillats de pétrole, de graisses animales, d'huiles végétales, d'eau et d'air, ou d'autres matières premières. Selon le contexte et le type de

fluide de coupe considéré, il peut être appelé fluide de coupe, huile de coupe, agent de coupe, agent de refroidissement ou lubrifiant.

La lubrification en usinage dur présente des défis spécifiques. La sélection du lubrifiant approprié, la détermination des paramètres de lubrification optimaux (pression, débit, taille des gouttelettes, etc.) et l'optimisation des performances globales du processus sont des aspects cruciaux pour garantir un usinage dur efficace et de haute qualité [9].

Différentes techniques de lubrification sont utilisées en usinage dur, notamment la lubrification par jet d'air, la lubrification par émulsion et la lubrification minimum quantité de liquide (MQL). La MQL est de plus en plus adoptée en raison de ses avantages économiques et environnementaux. Elle consiste à fournir une petite quantité de lubrifiant, sous forme d'aérosol ou de microgouttelettes, directement à la zone de coupe. Cela permet de réduire considérablement la quantité de lubrifiant utilisée tout en maintenant une lubrification efficace.

1.8.1 Importance de la lubrification

Il y a plusieurs raisons qui poussent les machinistes à utiliser du lubrifiant lors d'un processus d'usinage. Parmi celles-ci, on compte la réduction de la friction. Lors d'une coupe à haute vitesse, le travail des métaux génère de la chaleur. Cela est dû au fait que l'outil frotte sur la pièce, ce qui dissipe de l'énergie sous forme de chaleur. Si la pièce ou même l'outil de coupe devaient atteindre une température trop élevée, elles pourraient subir une déformation thermique, ce qui peut altérer le travail ou endommager l'équipement. En réponse à ce phénomène, la lubrification permet de limiter la surchauffe de la pièce, en réduisant le frottement et en abaissant sa température (**Figure I. 13**). Enfin, toujours lors de l'usinage, les fluides de coupe permettent de rincer la pièce et d'éliminer plus facilement les copeaux métalliques ou la limaille qui peut être produite. Ces copeaux peuvent ensuite être évacués vers un dispositif conçu pour les récolter. Il est primordial qu'aucun copeau n'adhère à la pièce, car cela pourrait affecter la précision de l'usinage [10].

1.8.2 Avantages de la lubrification

Ce qui est intéressant de la lubrification, c'est que les bénéfices ne s'arrêtent pas au processus de fabrication. Il y a aussi des avantages permanents pour la pièce produite. Ce procédé permet en effet de modifier avantageusement certaines de ses propriétés. Par exemple, certaines pièces faites de matières vulnérables à la corrosion seront mieux protégées contre celle-ci si un certain type de lubrifiant a été utilisé lors de leur production. Cela permet ainsi d'obtenir une espérance de vie utile supérieure. Lorsqu'une pièce mécanique est

fabriquée, plusieurs composantes d'équipement peuvent être mises à contribution. Celles-ci, si la lubrification est faite de bonne façon, seront soumises à moins de résistance et à une charge de travail moins importante. Elles risquent donc moins de souffrir d'usure prématurée. Même chose pour les lames de coupe. Si elles subissent moins de friction, elles seront moins susceptibles d'être endommagées et demanderont moins d'entretien mécanique [10].



Figure I.13 présente la lubrification

I.8.3 Lubrifiants

Lubrifiants ou liquides de refroidissement sont des liquides et des gaz appliqués à l'outil et à la pièce à usiner pour faciliter les opérations de coupe. Un lubrifiant doit avoir les propriétés suivantes :

- Haute absorption de chaleur pour absorber facilement la chaleur développée.
- Bonnes qualités lubrifiantes pour produire un faible coefficient de frottement.
- Point d'éclair élevé pour éliminer le risque d'incendie.
- Stabilité afin de ne pas oxyder dans l'air.
- Neutre afin de ne pas réagir chimiquement.
- Inodore afin de ne pas produire une mauvaise odeur même lorsqu'il est chauffé.
- Inoffensif pour la peau de l'opérateur.
- Inoffensif aux roulements.
- Non corrosif pour le travail ou la machine.
- Transparence afin que l'action de coupe de l'outil puisse être observée.
- Faible viscosité pour permettre le libre écoulement du liquide.
- Prix bas pour minimiser le coût de production.

Le type de lubrifiants à utiliser dépend du matériau de travail et des caractéristiques du procédé d'usinage. Ils sont classés en sept groupes principaux qu'ils sont comme suit:

- Eau

- Huiles solubles
- Huiles droites
- Huiles mixtes
- Huile chimique-additive
- Composants chimiques
- Lubrifiants solides

I.8.4 Usinage à sec

L'usinage à sec (**Figure I.14**) est une technique de fabrication de pièces par enlèvement de copeaux dans un milieu sèche (sans lubrification). Le principe de l'usinage à sec est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision [11]. L'usinage à sec présente les avantages suivants :

- La non pollution de l'atmosphère ou de l'eau, réduisant les dangers pour la santé en particulier les problèmes de peau et respiratoires.
- L'absence de lubrifiant sur les composants usinés, réduisant les coûts de nettoyage et les énergies associées.
- L'absence de lubrifiant sur les copeaux permettant une valorisation plus importante des déchets Suppression de l'achat, de la préparation, de la maintenance et du retraitement des fluides de coupe.

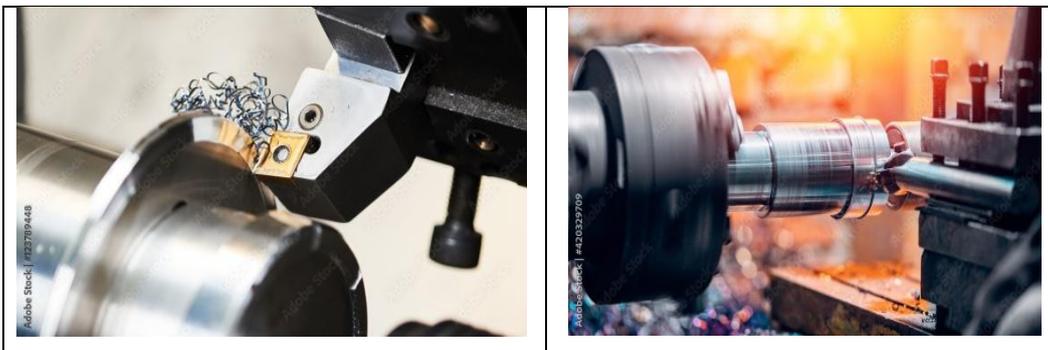


Figure I.14 Usinage à sec

I.8.5 Système MQL

Certaines opérations d'usinage nécessitent la lubrification, la solution consistant à utiliser un lubrifiant n'est pas toujours à privilégier car elle engendre des opérations de dégraissage et de recyclage, génère un surcoût d'utilisation, et pose aussi beaucoup de problèmes vis à vis de la santé des personnes s'exprimant par des maladies dermatologiques et respiratoires liées à la manipulation des huiles. Il est fortement recommandé d'éliminer ou

de réduire l'utilisation de ces fluides afin de préserver la bonne santé des utilisateurs. Cette tendance a créé un besoin d'une approche préventive globale humaine et environnementale tout en assurant une meilleure qualité du produit fabriqué. C'est Dans cette optique que les industriels et les chercheurs ont pu développer une technique basée sur des petites gouttes de fluide de coupe qui peuvent être transportées et pénétrées dans la zone de coupe par un écoulement d'air à grande vitesse. Cette technique est appelée : Lubrification á Quantité minimale (MQL). Avec cette technique les gouttes de fluide lubrifient les interfaces de contact, l'air à grande vitesse refroidit la zone de coupe et évacue les copeaux. L'objectif de l'usinage sous MQL est de remplacer la lubrification traditionnelle et les systèmes d'inondation de l'huile pure dans un environnement d'usinage avec un courant d'air comprimé contrôlé avec une précision qui fait transporter des quantités minimales de lubrifiant sous format "d'aérosol" à la zone de coupe. Cela qui assure à son tour la lubrification de la surface de coupe et permet un usinage de haute performance (**Figure I.15**).

L'aérosol de lubrification est transporté vers la zone de coupe de doubles façons

-**Externe** : l'huile est transportée dans ce cas par l'intermédiaire d'une buse externe à la zone de coupe disposée au voisinage de l'outil et la pièce.

-**Interne** : ou à travers l'outil : l'huile est acheminée à travers les trous de lubrification internes à l'outil de coupe [12]



Figure I.15 Système MQL-minimum-quantité-lubrifiants mélange air/huile [12]

I.8.6 Cryogénie

Dans l'usinage cryogénique, des fluides de coupes gazeux, gaz liquéfiés en général, sont envoyés dans la zone de coupe afin de refroidir l'outil et/ou la pièce à usiner. Le fluide cryogénique absorbe la chaleur de la zone de coupe et s'évapore dans l'atmosphère [13].

I.8.7. Lubrification abondante

L'usinage à lubrification est un usinage avec un liquide de coupe, et plus généralement un fluide d'usinage, est un liquide refroidissant et lubrifiant conçu spécialement pour le travail et l'usinage des métaux, En plus du refroidissement les liquides de coupe aident l'usinage en lubrifiant l'interface entre l'outil et le copeau. En diminuant les frottements à cette interface, ils diminuent la création de chaleur. Cette lubrification permet également de prévenir l'adhésion du copeau sur l'outil qui risquerait d'affecter l'usinage. Dans l'industrie grande série, le liquide de coupe permet également d'évacuer les copeaux de la zone de coupe vers un dispositif de centralisation des copeaux (**Figure I.16**). Parmi Les fonctions du fluide de coupe L'utilisation, lors de l'usinage par enlèvement de matière, des liquides d'arrosage composé principalement d'eau, d'huiles minérales et d'additifs chimiques, permet d'assurer les fonctions suivantes :

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



Figure I.16 lubrification abondante.

I.9 Etat d'art

Elbah et al [15] indiquent dans leur étude que des grandes quantités de fluides de refroidissement-lubrifiants sont encore largement utilisées dans l'industrie métallurgique, générant une forte consommation et des coûts élevés et aussi un impact négatif sur l'environnement. C'est dans ce contexte qu'une investigation sur l'évaluation des performances des différents environnements d'usinages (sec, humide conventionnel et technique MQL) est réalisée en tournage dur de l'acier faiblement allié à haute résistance AISI 4140 avec céramique mixte revêtue (CC6050). Les paramètres de performance traités sont : la rugosité de surface, les composantes de l'effort de coupe et l'usure de l'outil. Afin d'aboutir à cette comparaison, un plan de Taguchi L18 basé sur quatre facteurs statistiques (vitesse de coupe, avance par tour, profondeur de coupe et rayon de coupe) a été réalisé. Les résultats trouvés par les auteurs ont permis de comparais les trois environnements de lubrification (et aussi de proposer des modèles de prédiction pour les paramètres de sortie. Aussi, les auteurs ont réalisé des topographies de surface 3D dans différents environnement d'usinage (**figure I.17**)

$$Ft_{Dry} = -148.704 + 0.965Vc + 2004.25f + 120.81ap + 141.91r_{\epsilon} \\ -9.60Vc \times f - 0.17Vc \times ap - 0.461Vc \times r_{\epsilon} + 2960.55f \\ \times ap - 1389.55f \times ap + 55.21ap \times r_{\epsilon}$$

$$Ft_{MQL} = 2.85 + 0.136Vc + 149.14f + 187.69ap - 57.487r_{\epsilon} \\ -1.43Vc \times f - 0.356Vc \times ap + 0.144Vc \times r_{\epsilon} + 2851.27f \\ \times ap + 784.71f \times ap + 48.14ap \times r_{\epsilon}$$

$$Ft_{Fluid} = -5.33 + 0.002Vc + 51.39f - 231.65ap + 154.59r_{\epsilon} \\ + 2.23Vc \times f + 1.72Vc \times ap - 1.08Vc \times r_{\epsilon} + 2830.73f \\ \times ap - 157.93f \times ap + 220.02ap \times r_{\epsilon}$$

$$Ra_{Fluid} = 0.167 + 9.05 \times 10^{-5}Vc + 6.75f - 1.34ap - 0.225r_{\epsilon} - 0.0022Vc \times f \\ - 0.0046Vc \times ap + 0.0003Vc \times r_{\epsilon} + 3.104f \times ap - 3.14f \\ \times ap + 2.15ap \times r_{\epsilon}$$

$$Ra_{Dry} = 0.048 - 0.01V_c + 9.768f + 1.07ap + 0.11r_\varepsilon + 0.054V_c \times f + 0.002V_c \times ap + 0.0055V_c \times r_\varepsilon - 6.179f \times ap - 10.27f \times ap - 0.395ap \times r_\varepsilon$$

$$Ra_{MQL} = 1.127 - 0.006V_c - 0.293f + 0.612ap - 1.411r_\varepsilon + 0.012V_c \times f - 0.002V_c \times ap - 0.006V_c \times r_\varepsilon - 0.802f \times ap + 5.10f \times ap - 0.378ap \times r_\varepsilon$$

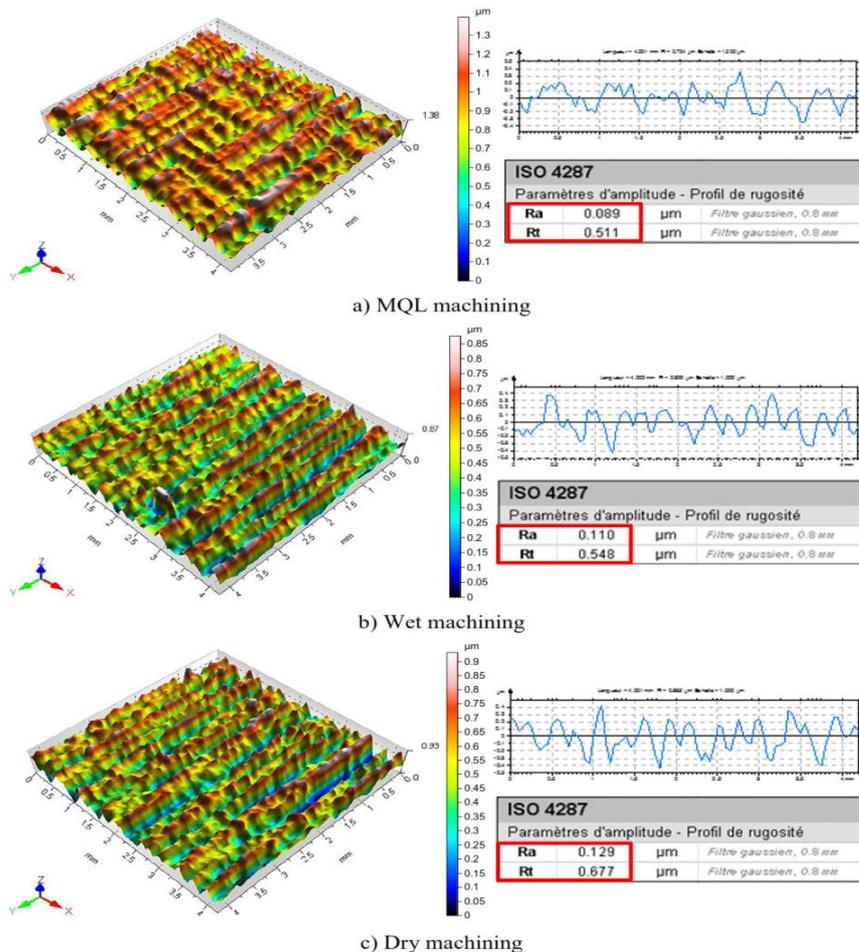


Figure I.17 topographie de surface 3D pour tourner sous a) usinage à sec b) usinage humide c) Usinage MQL

Pour : $f=0.12\text{mm/rev}$, $V_c=120\text{ m/min}$, $ap=0.15$

En général, l'utilisation de fluides de coupe est envisagée dans les applications industrielles et universitaires en raison de leur influence accrue sur de nombreux aspects tels que l'usinabilité, la durabilité et les coûts de fabrication. L'article de **Binali et al [16]** s'inscrit dans ce cadre d'étude, il aborde la perspective de l'usinabilité en examinant des indicateurs tels que la rugosité, température de coupe, usure de l'outil et morphologie des copeaux lors du fraisage de l'acier pour la fabrication des moules. Un spécial type d'acier est Nimaxm (40HRC) qui est un matériau difficile à couper en raison de sa haute résistance, ténacité, dureté et résistance à l'usure. Les auteurs ont adopté deux stratégies différentes, à savoir la lubrification sèche et la lubrification par quantité minimale (MQL), pour réaliser une analyse approfondie des performances de fraisage lors de la coupe à différentes vitesses de coupe, avances et profondeurs de coupe. Les résultats ont révélé que la technologie MQL a montré une meilleure performance que l'état sec pour obtenir de meilleures rugosités de surface sous différents paramètres de coupe. Bien que seule une petite amélioration a été obtenue en termes de température de coupe, l'usinage MQL s'est avéré efficace pour protéger l'outil de coupe contre une usure excessive et des copeaux (**figure I.18 et figure I.19**).

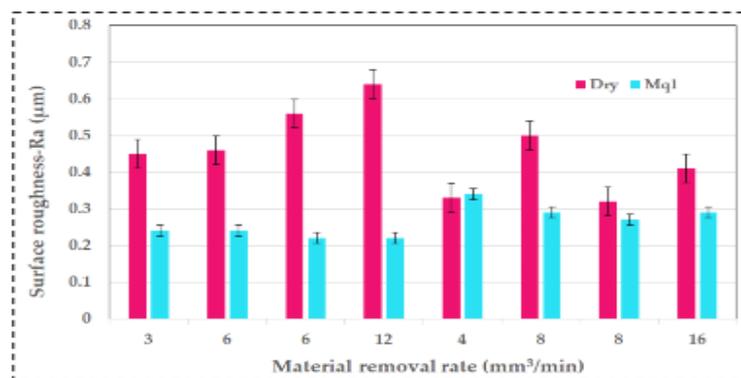


Figure I.18 Variation de la rugosité de la surface en fonction du taux d'enlèvement de matière

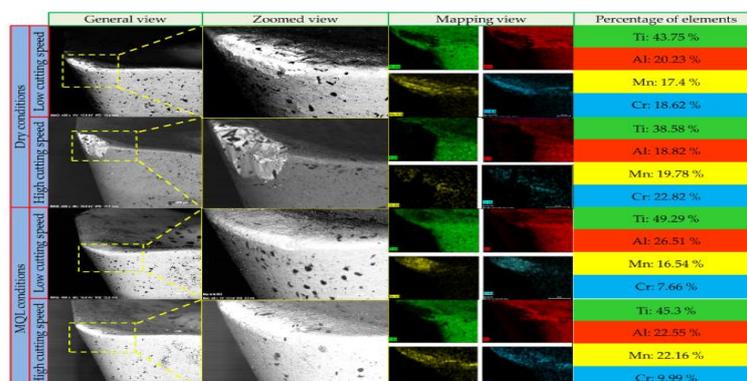


Figure I.19 Résultats EDX et cartographie des outils de coupe

Le travail réalisé par **Sampaio et al [17]** a pour but d'évaluer le processus d'usure des outils de coupe PCBN, ainsi que les efforts d'usinage, la rugosité de la surface de la pièce et la profondeur de la couche blanche, la morphologie des copeaux et la microstructure des copeaux dans le tournage dur de l'acier SAE1045 trempé par induction en utilisant l'usinage MQL et l'usinage à sec. Les résultats ont démontré que pour toutes les expériences (MQL et usinage à sec), l'usure par abrasion était le mécanisme prédominant, où les modes d'usure de l'outil étaient l'usure en flanc et l'usure en cratère. Une usure en entaille a été observée à la fois en fin de contact dans l'arête de coupe secondaire et en fin de profondeur de coupe. L'usure en entaille secondaire affecte la formation de la couche blanche et augmente la rugosité de la surface de la pièce. Après une certaine période le long du temps de coupe, une réduction de la rugosité avec une augmentation de l'usure moyenne des flancs a également été observée lors de l'utilisation de MQL. L'utilisation de MQL, malgré la réduction de l'usure moyenne des flancs, a augmenté l'usure en entaille au niveau de l'arête de coupe secondaire et, par conséquent, a augmenté la rugosité de la surface. En ce qui concerne l'usure en cratère, le MQL a réduit son occurrence. L'usinage MQL a fourni de meilleurs résultats que l'usinage à sec concernant les forces d'usinage, ainsi qu'une réduction de l'apparition de la couche blanche (**Figures I.20 a I.24**).

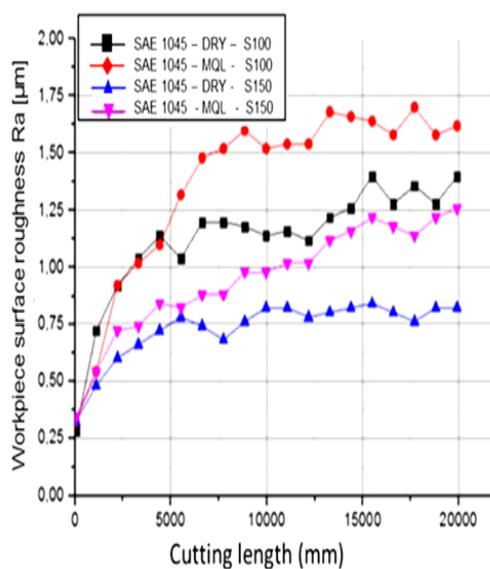


Figure I.20 Surface de la pièce avec MQL et état sec DOC=0,1 mm

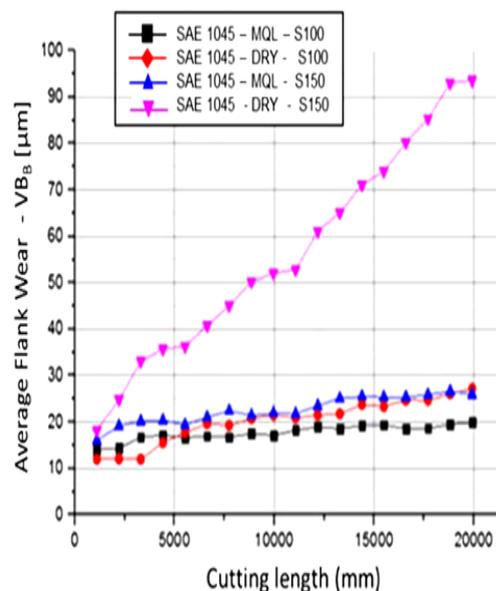


Figure I.21 Progression de l'usure moyenne des éclats (VBB) avec DOK = 0,1 mm

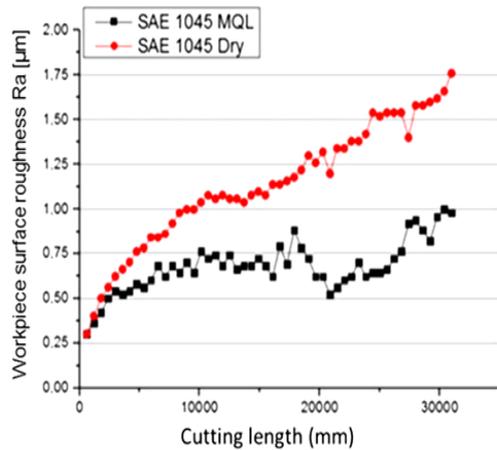


Figure I.22 Rugosité de surface SAE 1045 warkpice pour MQL et usinage à sec avec DOR=0.2mm

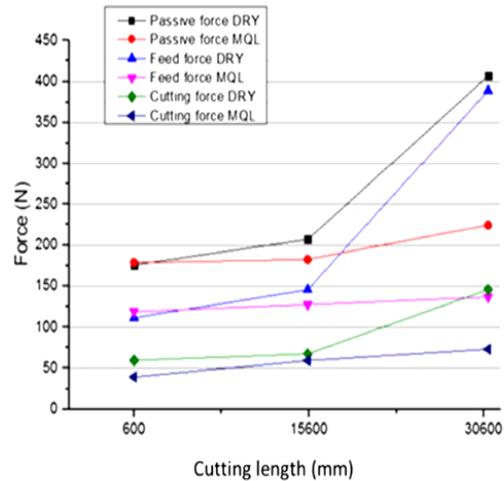


Figure I.23 forces d'usinage SAE 1045 pour usinage à sec et avec lubrification de MQL DOC=0.2 mm

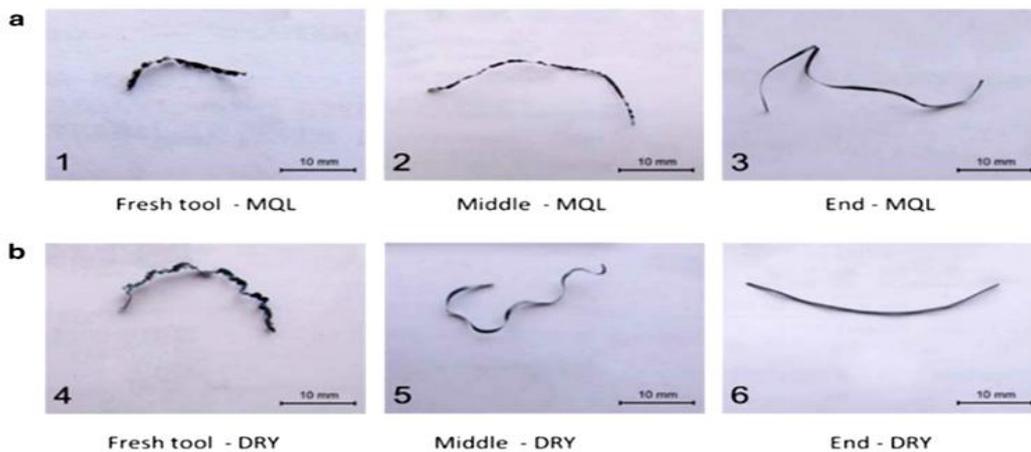


Figure I.24 morphologie de la puce (a) MQL, (b) COD sec = 0,2 mm

Dans son article **Aslan et al [18]** indique que les technologies durables attirent l'attention dans l'industrie de l'usinage grâce à leurs contributions dans de nombreux aspects tels qu'écologique, économique et technologique. La quantité minimum de lubrification (MQL) est une de ces techniques qui permet de véhiculer le fluide de coupe à haute pression vers la zone de coupe sous forme de petites particules d'huile.

L'article présente une étude qui examine la puissance de la technologie MQL versus conditions sèches sur la qualité d'usinage lors du fraisage de structures en acier Strenx 900 dans l'indice de durabilité (**figure I.25**) Les propriétés de haute résistance et de ténacité fait de cet acier un matériau difficile à usiner offrant une occasion importante de tester les performances des Environnements MQL. Les résultats des données expérimentales trouvés par les chercheurs ont démontré que l'usinage MQL est supérieur pour apporter une amélioration importante des

caractéristiques d'usinage à savoir la rugosité de surface (jusqu'à 35%), usure en dépouille (jusqu'à 94%), mécanismes d'usure, énergie de coupe (jusqu'à 28%) et températures de coupe (jusqu'à 14%). Finalement, les auteurs affirment que ce travail expérimental présente une approche comparative pour l'amélioration de l'usinabilité des matériaux industriels importants par le questionnement de l'impact des méthodes durables (**figures : I.26 à I.30**).

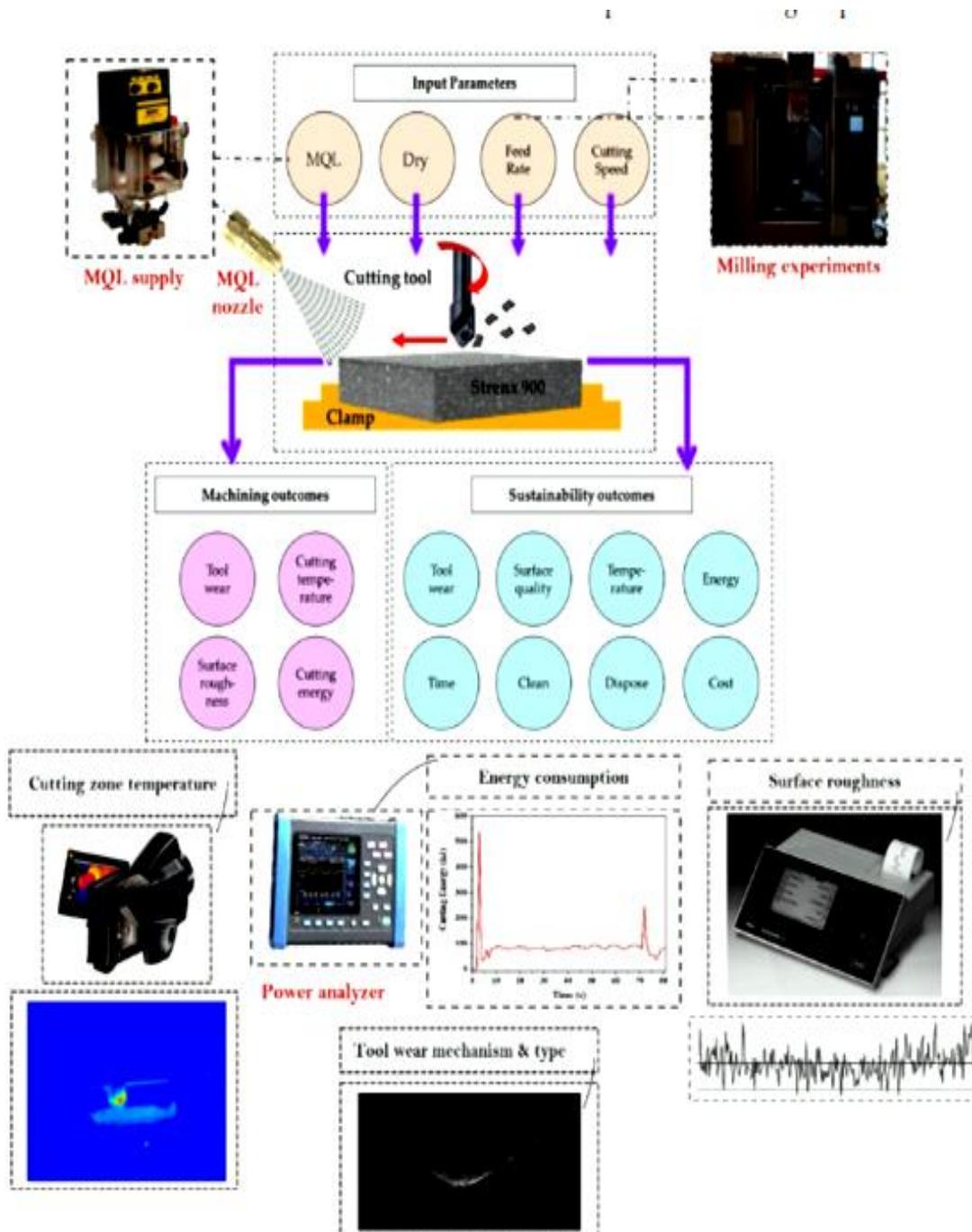


Figure I.25 illustration schématique du montage expérimental.

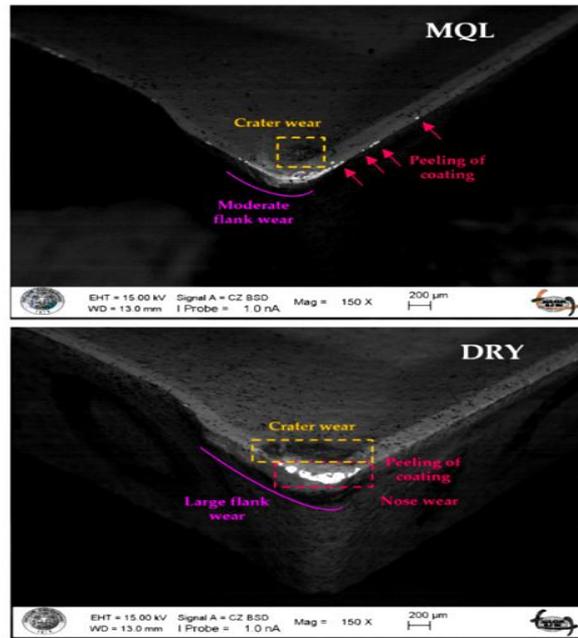


Figure I.26 Photos MEB des outils de coupe appartenant à MQL et environnement sec

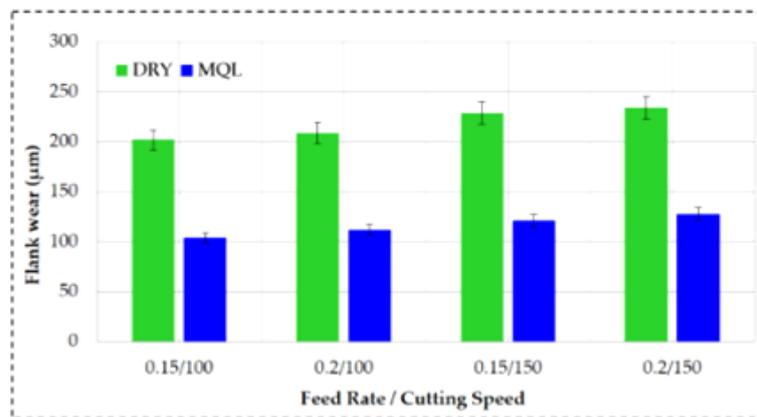


Figure I.27 Changement d'usure des planches selon différents environnements

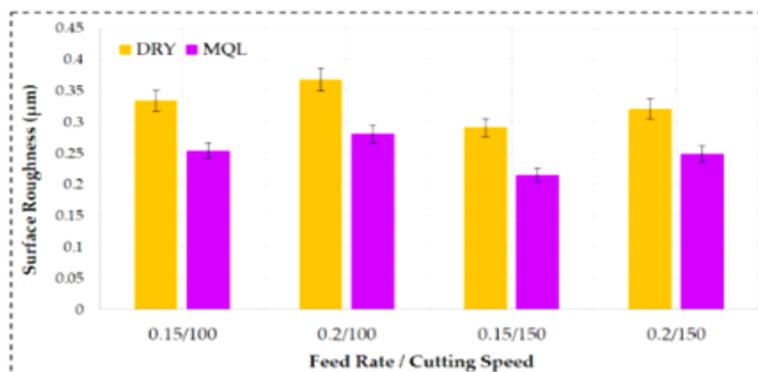


Figure I.28 la rugosité de la surface change en fonction des différents environnements

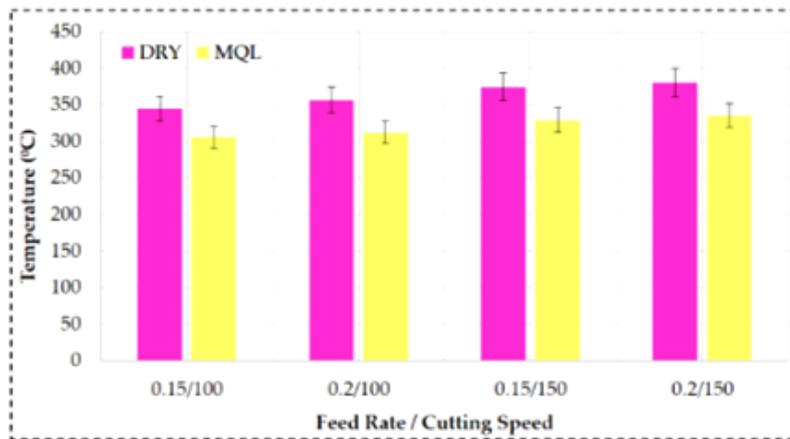


Figure I.29 Changement de température de coupe selon les environnements différents

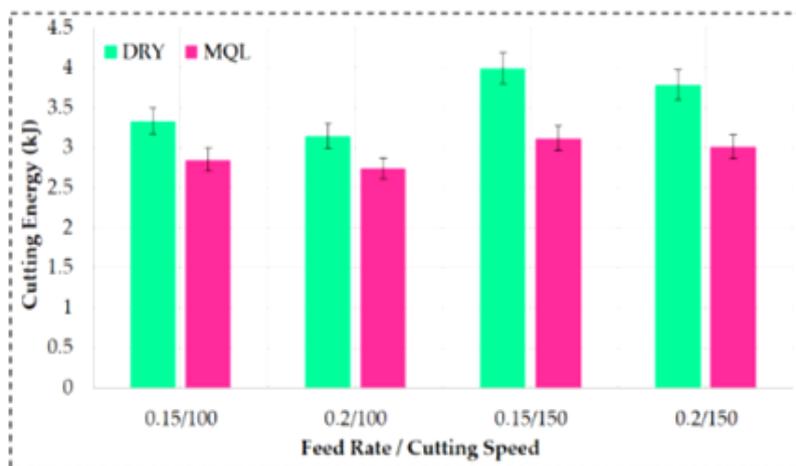


Figure I.30 Couper les changements d'énergie en fonction des différents environnements

Laouissi et al [19] ont réalisé une étude qui examine les performances de la lubrification par quantité minimale (MQL) lors du tournage de la fonte EN-GJL-250 par rapport aux méthodes de refroidissement à sec et humide. Le plan orthogonal de Taguchi L36 a été choisi pour la planification des expériences (**Tableau I.1.**) L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée après l'acquisition des données afin de définir l'effet des conditions de coupe telles que la plaquette utilisée, la profondeur de passe, l'avance par tour et la vitesse de coupe sur les facteurs de sortie étudiés. Aussi, les auteurs ont étudié d'une manière approfondie la topographie de surface (rugosité 3D) afin d'évaluer l'effet MQL (**figure I.31**). Une modélisation des paramètres de sortie a été aussi réalisée par les auteurs en utilisant l'approche des réseaux de neurones (ANN) (**figure I.32**) Cette modélisation a été utilisée dans le but de faire une optimisation multi-objective des facteurs de coupe en utilisant la méthode (MOALO). Cela permet d'obtenir le meilleur contrôle de la production.

Tableau I.1 Résultats de Fz , Ra et Pc selon les conditions de coupe

N°	Input factors					Output parameters		
	Insert	CC	Vc	f	ap	Fz (N)	Ra (μm)	Pc (W)
1	1	1	185	0.08	0.15	0.87	72.63	223.9425
2	1	2	280	0.12	0.3	0.67	128.96	601.8133
3	1	3	375	0.16	0.45	0.76	118.45	740.3125
4	1	1	185	0.08	0.15	0.87	72.63	223.9425
5	1	2	280	0.12	0.3	0.67	128.96	601.8133
6	1	3	375	0.16	0.45	0.76	118.45	740.3125
7	1	1	185	0.12	0.45	1.22	118.87	366.5158
8	1	2	280	0.16	0.15	0.64	81.41	379.9133
9	1	3	375	0.08	0.3	0.41	81.62	510.125
10	1	1	185	0.16	0.3	1.22	93.42	288.045
11	1	2	280	0.08	0.45	0.68	76.35	356.3
12	1	3	375	0.12	0.15	0.49	56.6	353.75
13	1	1	280	0.16	0.15	0.71	124.82	582.4933
14	1	2	375	0.08	0.3	0.77	36.43	227.6875
15	1	3	185	0.12	0.45	0.65	94.96	292.7933
16	1	1	280	0.16	0.3	0.63	52.07	242.9933
17	1	2	375	0.08	0.45	0.79	75.25	470.3125
18	1	3	185	0.12	0.15	0.6	96.67	298.0658
19	2	1	280	0.08	0.45	0.55	118.41	552.58
20	2	2	375	0.12	0.15	0.96	44.74	279.625
21	2	3	185	0.16	0.3	0.79	114.4	352.7333
22	2	1	280	0.12	0.45	0.77	135.37	631.7267
23	2	2	375	0.16	0.15	0.74	64.87	405.4375
24	2	3	185	0.08	0.3	0.39	93.48	288.23
25	2	1	375	0.12	0.15	0.56	71.28	445.5
26	2	2	185	0.16	0.3	0.89	105.15	324.2125
27	2	3	280	0.08	0.45	0.47	81.32	379.4933
28	2	1	375	0.12	0.3	0.55	91.3	570.625
29	2	2	185	0.16	0.45	0.81	149.33	460.4342
30	2	3	280	0.08	0.15	0.52	40.27	187.9267
31	2	1	375	0.16	0.45	0.59	136.36	852.25
32	2	2	185	0.08	0.15	0.66	82.19	253.4192
33	2	3	280	0.12	0.3	1.07	72.71	339.3133
34	2	1	375	0.08	0.3	0.58	101.25	632.8125
35	2	2	185	0.12	0.45	0.57	97.6	300.9333
36	2	3	280	0.16	0.15	1.03	92.56	431.9467

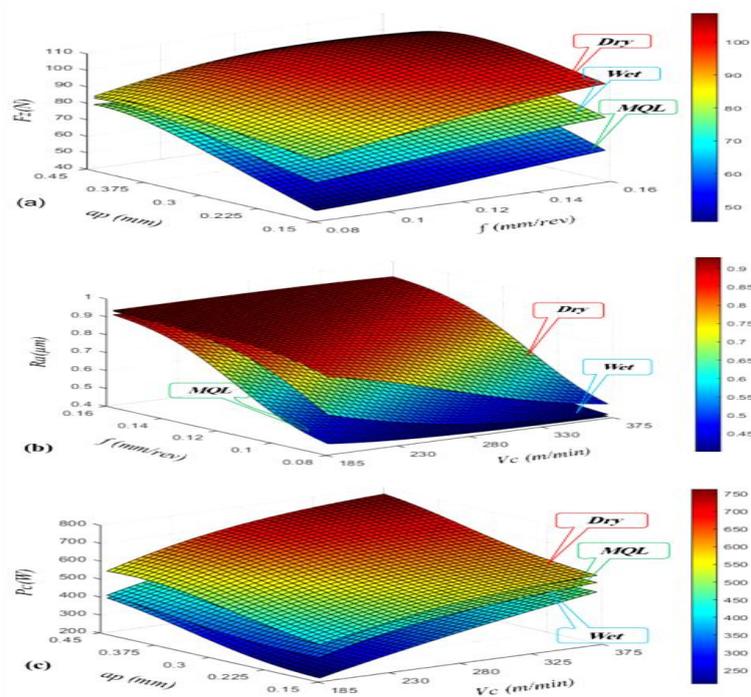


Figure I.31 surfaces de réponse 3D pour : a) Fz , b) Ra, c) Pc.

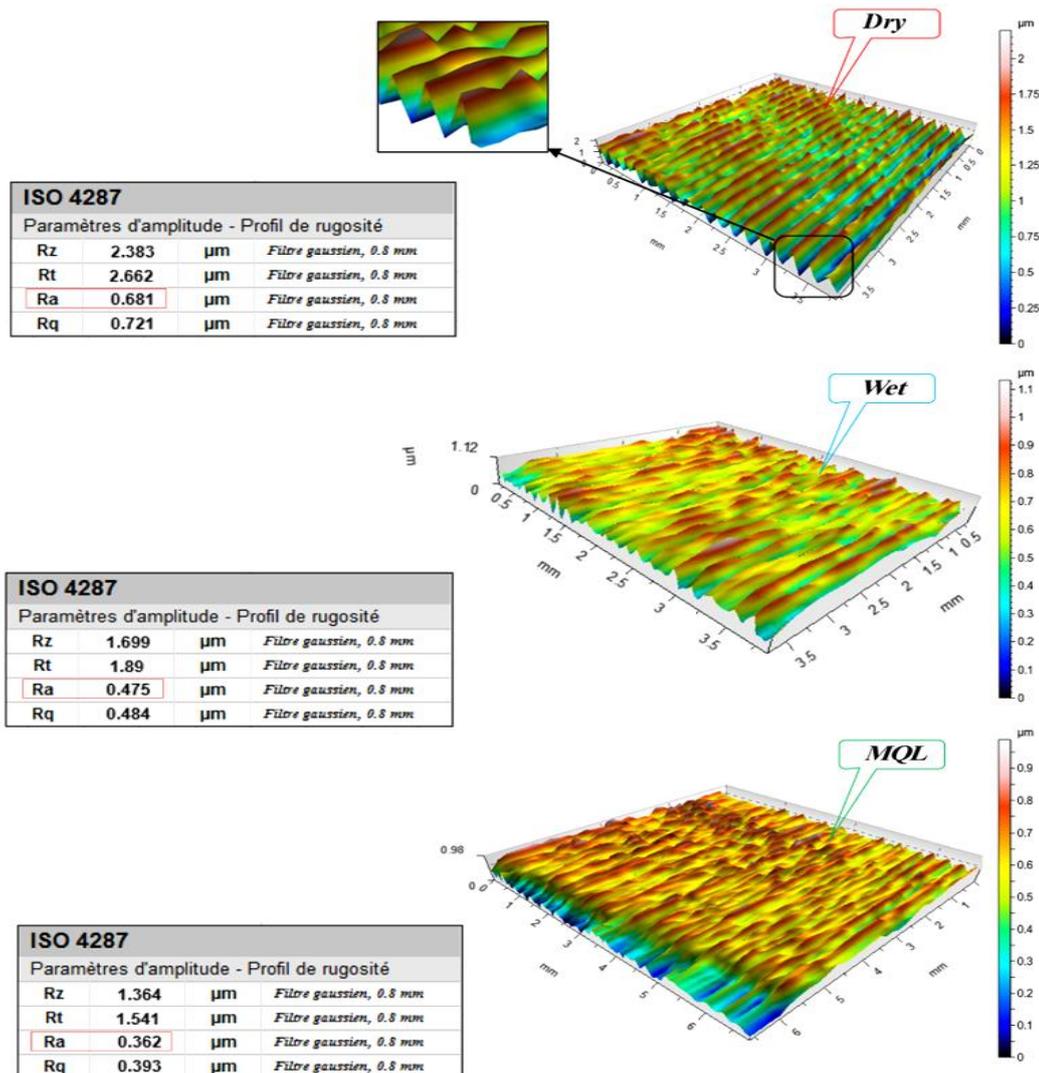


Figure I.32 Topographie de surface 3D

I.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases scientifiques nécessaires à la compréhension de cette étude. Il comporte une partie de rappel sur la théorie de coupe, les métaux de coupe et les paramètres intervenant dans le processus de coupe. Puis une partie présentant l'importance de la lubrification dans l'usinage, les avantages ainsi que les différentes techniques de lubrification. La dernière partie de cette étude bibliographique est consacrée à l'état de l'art, en tournage et particulièrement la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe sous MQL.

Chapitre II

Procédure

Expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'ensemble du matériel exploité pour effectuer notre projet de fin d'études. Le but est d'identifier le comportement du couple outil-matière en évaluant les différents paramètres technologiques d'usinage, tels que la rugosité de surface (R_a et R_z) et le débit du copeau enlevé (MRR) en fonction des conditions de coupe (V_c , a_p et f) et le mode de lubrification (à sec et MQL) durant le tournage dur de l'acier à roulement AISI 52100 (100Cr6). Nous présentons aussi, la démarche utilisée pour la planification des expériences et de leurs conditions de réalisation ainsi que les informations sur le couple outil/matière. Les essais de tournage dur sur l'acier AISI 52100 (100Cr6) ont été effectués au niveau du Laboratoire de Mécanique et de Structure (LMS) du département de génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945- Guelma.

II.2 Matériels utilisés

II.2.1 Machine-outil

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

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



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

La (**Figure II.2**) illustre la nomenclature de différentes parties du tour à charioter et à fileter modèle SN 40 utilisé durant les essais d'usinage.

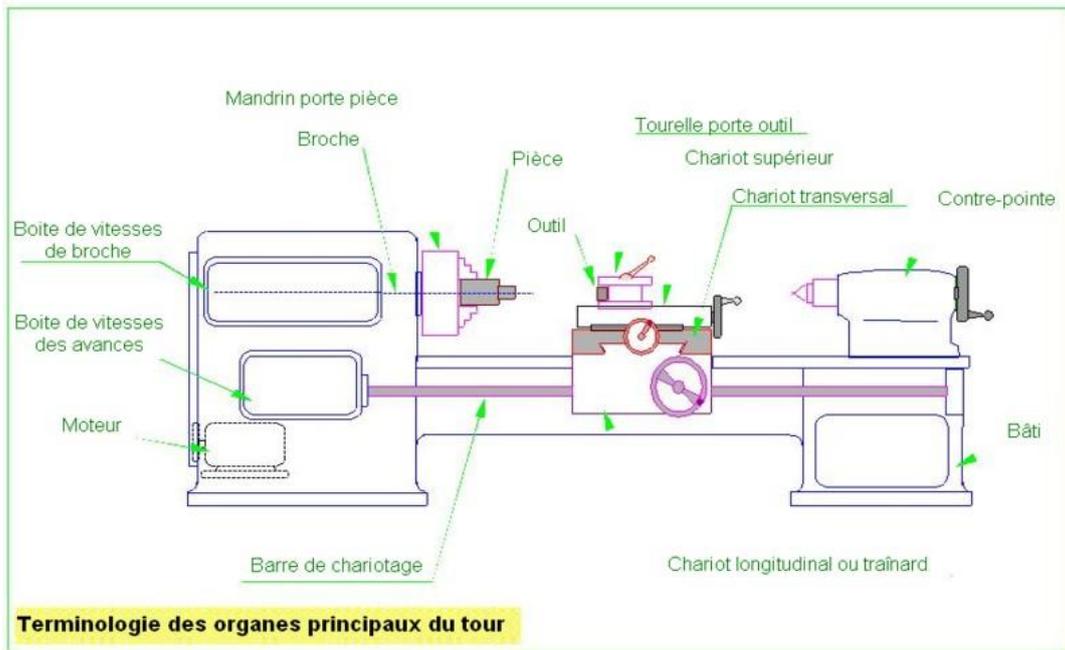


Figure II.2 Nomenclature des différents organes du tour modèle SN40

Notre tour modèle SN40 est équipé d'un variateur de vitesse modèle ABB série ACS355 (**Figure II.3**), il permet la variation du nombre de tour souhaité et qui n'existe pas dans la boîte des vitesses de rotation. La (**figure II.4**) illustre le capteur de vitesse utilisé, il permet d'indiquer le nombre de tour en temps réel lors de l'utilisation de variateur de vitesse.

Figure II.3 Capteur de vitesse



Figure II.4 Variateur de vitesse de coupe



II.2.2 Matériau de la pièce à usiner

Le matériau utilisé dans notre étude est l'acier AISI 52100 (100Cr6) traité thermiquement, avec une dureté de 58 (HRC). Il est destiné généralement à la fabrication des roulements à billes, rouleaux ou à aiguilles, butées, cames, galets, il est aussi utilisé en mécanique comme outillage : goupilles, poinçons, colonnes de guidage, limes, forets, alésoirs. Ces derniers sont des éléments souvent présents dans les systèmes mécaniques lorsqu'une fonction de rotation doit être assurée. Le tableau (II.1) représente les différentes désignations de l'acier AISI 52100. Le tableau (II.2) présente la composition chimique de l'acier AISI 52100 avec 1.05 de carbone et 1.41 de chrome. Le tableau (II.3) expose les caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 52100.

Tableau II.1 : Désignation de l'acier AISI 52100 selon les différentes normes

Norme	Désignation
AISI	52 100
NF A 35-573/4	100C6
EN 10027	100Cr6

Tableau II.2 : la composition chimique de l'acier **AISI 52100**

Eléments chimique	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
Pourcentage (%)	1.05	0.38	0.21	0.03	0.028	1.41	0.21

Tableau II.3 Caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 52100

Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	Rr (N/mm ²)	A%	Dureté après trempe
550-850	750-850	850-1250	10-13%	58 HRC

L'éprouvette utilisée (**Figure II.5**) possède un diamètre $d = 65$ mm et une longueur $l = 350$ mm avec 9 paliers de 25 mm de longueurs séparés par des gorges de 5 mm



Figure II.5 Eprouvette utilisée pour les essais

II.2.3. Plaquette et porte plaquette

Pour la réalisation des essais, toutes les opérations de tournage ont été effectuées par une plaquette en céramique noire (Sandvik) de désignation ISO SNGA120408T01020. Cette dernière est amovible, de forme carrée à fixation mécanique par trou central et elle possède huit arêtes de coupe, recommandée pour la finition sous vitesse élevées des fontes trempées en conditions stables. Le type de porte plaquette qui a été utilisé est de désignation TIZIT Maxilock PSPNR 2020 K12 (**Figure II.6**).



Figure II.6 Plaquette et porte plaquette utilisés

II.2.4. Matériels de mesure

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

a) Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Lors de nos expériences nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface. Les critères de la rugosité de surface (R_a et R_z) ont été mesurés instantanément après l'usinage de tous les (9) palliés (essais) à sec puis les (9) palliés (essais) MQL au moyen d'un appareil de rugosité Mitutoyo SurfTest SJ-210 muni d'une pointe en diamant de $5\ \mu\text{m}$ et se déplaçant linéairement sur la surface usinée. Les mesures de la rugosité ont été effectuées directement sur la pièce à trois reprises à 120° . Le rugosimètre 2D utilisé est présenté dans la (**figure II.7**).



Figure II.7 Rugosimètre (SurfTest_SJ-210 Mitutoyo).

b) Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme Kastler)

On a utilisé un dynamomètre (KISTLER9257 B) (**Figure II.8**) pour mesurer l'amplitude des efforts de coupes, il est parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe, il comporte plusieurs éléments auxquels on cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel DYNOWARE et enfin une imprimante pour tracer les courbes



Figure II.8 Dynamomètre (KISTLER9257 B)

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil a le mouvement de translation. Ce dernier est monté sur la plate-forme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation. La plate-forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz. Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes (**Figure II.9**).

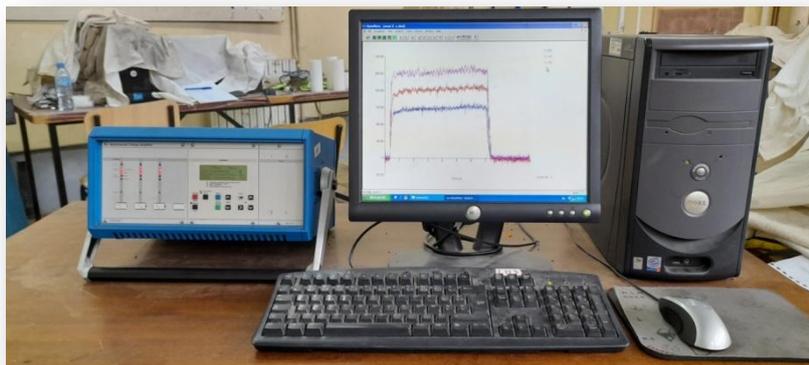


Figure II.9 Ordinateur d'acquisition piloté par le logiciel (DYNOWARE)

La (**Figure II.9**) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composants de l'effort de coupe (effort axial F_x , effort radial F_y et effort tangentiel F_z).

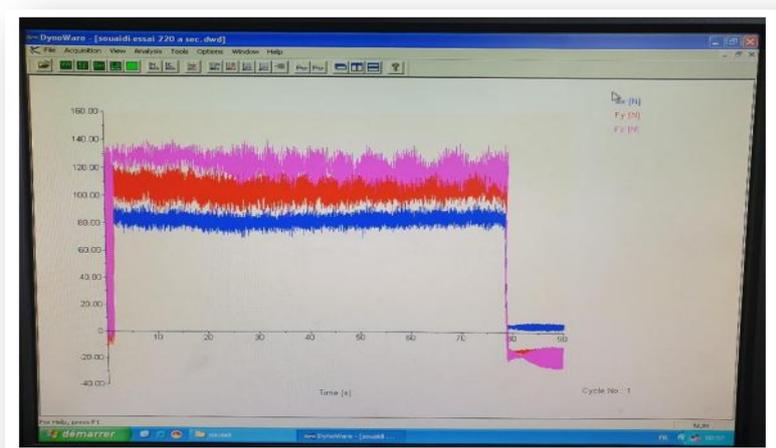


Figure II.10 Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE

II.2.5 Système avec un minimum de quantité de lubrification (MQL)

La (**figure II.11**) présente l'ensemble des équipements utilisés lors de lubrification avec le système MQL. La (**figure II.12**) montre la boîte contrôle de système MQL, elle comprend les éléments suivants : afficheur de débit (aire et huile), la pression du réseau de l'air pulvérisé, la pression du réservoir, réglage air pulvérisation et réglage pression produit. La (**figure II.13**) montre le réservoir d'huile et ses composants (Réservoir de 24 L et débitmètre).

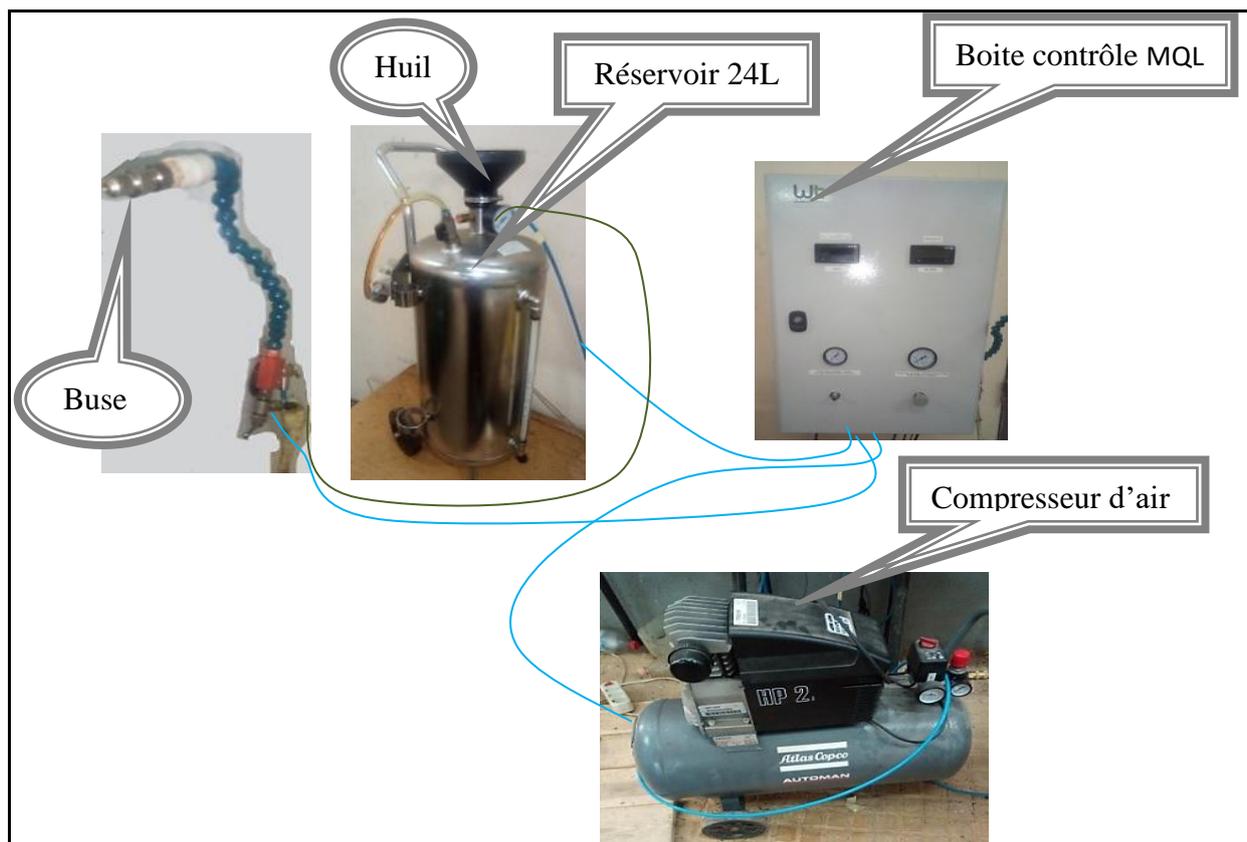


Figure II.11 Montage de système MQL

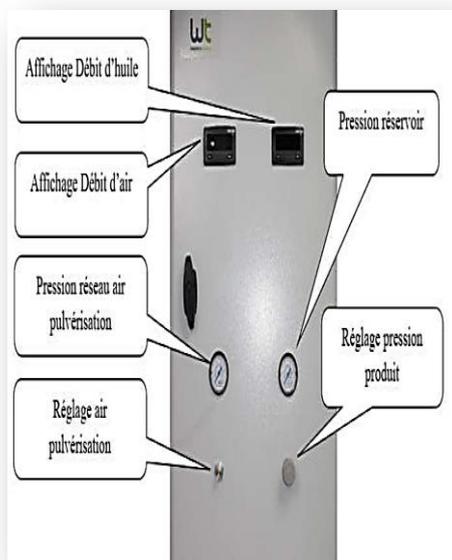


Figure II.12 boîte contrôle MQL



Figure II.13 Réservoir d'huile

II.3 Planification des expériences

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

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f , a_p) et le mode de lubrification sur les diverses fonctions d'optimisation (effort de coupe, rugosité de surface et MRR). Dans notre cas, nous avons les facteurs de base (V_c , f , et a_p) et chaque facteur à trois niveaux de variation, par contre, le mode de lubrification (à sec et MQL) a été varié 2 fois. Nous avons alors L18 ($2^1 3^3$). Les essais ont été numérotés de 1 à 9 à sec et de 10 à 18 MQL (**Tableau II.4**).

En utilisant la méthodologie de surface de réponse MSR à l'aide de logiciel statistique d'optimisation Design Expert 13 et Minitab 18.

Tableau II.4 Table orthogonale de Taguchi L18

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

II.4 Condition de coupe

Dans notre travail quatre (04) paramètres de coupe d'entrée ont été testés. Tous les facteurs de coupe (vitesse de coupe (V_c), avance (f) et profondeur de passe (a_p)) sont variés 03 fois, le mode de lubrification est varié 02 fois. Les valeurs réelles choisies sont mentionnées au (Tableau II.5). Ces conditions de coupe ont été choisi suivant les recommandations du fabricant d'outil (SANDVIK).

Tableau II.5 Conditions de coupe utilisées

Paramètres de coups	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
V c (m/min)	160	230	300
f (mm/tr)	0.08	0.14	0.2
a p (mm)	0.15	0.30	0.45
Lubrification	Sec	MQL	

II.5 Débit de copeau enlevé (MRR)

Le débit d'enlèvement de matière permet de mesurer la productivité d'un d usinage, on applique le principe selon lequel la cadence de base du machin diminue à mesure de l'augmentations du débit d'enlèvement de matière.

Le débit d'enlèvement de matière (MRR) désigne la quantité (volume) de la matière enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivent :

$$\text{MMR} = V_c \cdot A \quad (\text{II.1})$$

MRR : débit d'enlèvement de copeaux [cm^3/min].

Vc : vitesse de coupe [m/min].

A : section de coupe [mm^2].

D'où:

$$A = a_p \cdot f \quad (\text{II.2})$$

$$\text{MRR} = V_c \cdot a_p \cdot f \quad (\text{cm}^3/\text{min}) \quad (\text{II.3})$$

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos travaux. Les caractéristiques des matériaux de coupe et de la pièce, les instruments de mesure utilisés, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées. Dans le chapitre III qui suit, nous allons exposer les résultats des essais réalisés dans cette étude ainsi que la modélisation des paramètres de sortie.

Chapitre III

Etude statistique et modélisation

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des essais réalisés suivant le plan de Taguchi L18, lors de l'usinage de l'acier traité AISI 52100 (100Cr6). Une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée afin de quantifier les effets des paramètres d'entrée ; la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), la profondeur de passe (a_p) et l'environnement de lubrification (à sec et MQL), sur les paramètres technologiques de sortie à savoir ; les deux critères de rugosité de surface (R_a et R_z), et le taux d'enlèvement de matière (MRR). La méthodologie de surface de réponse est utilisée dans ce chapitre afin de proposer des modèles mathématiques qui permettent de faire des prédictions. Ces modèles seront exploités afin de faire une étude d'optimisation des conditions de coupe. Pour réaliser ces objectifs, les logiciels Mini-Tab 18 et design expert 13 ont été utilisés.

III.2 Résultats des essais réalisés

Le tableau **III.1** présente les résultats expérimentaux obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe lors de tournage de l'acier traité (AISI 52100) lors de l'usinage à sec et usinage avec minimum quantité de lubrification avec un outil en céramique mixte ($Al_2O_3 + Tic$). Les conditions de coupe ont été choisies selon les recommandations du fabricant des outils de coupe. L'analyse des résultats de ce tableau montre que les différentes sorties varient suivant le régime de coupe testé. Par conséquent, pour les différentes combinaisons du régime de coupe les valeurs de la rugosité de surface (R_a) trouvées varient dans l'intervalle $[0.268 - 1.622]$ (μm). On remarque aussi que le critère de la rugosité (R_z) obtenu varie dans l'intervalle $[2.159 - 6.624]$ (μm). Finalement, pour le taux d'enlèvement de matière (MRR), il varie dans l'intervalle $[1.92 - 20.7]$ (cm^3/min). Pour les paramètres de sortie, les critères (R_a et R_z) représentent l'indice de la qualité, alors que le taux d'enlèvement de matière (MRR) représente l'indice de la productivité.

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

N° d'essais	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Ap (mm)	Lub	Ra (µm)	Rz (µm)	MRR (cm ³ /min)
1	160	0.08	0.15	à sec	0.374	2.330	1.92
2	160	0.14	0.3	à sec	0.993	4.268	6.72
3	160	0.2	0.45	à sec	1.622	6.624	14.4
4	230	0.08	0.15	à sec	0.366	2.220	2.76
5	230	0.14	0.3	à sec	0.883	3.924	9.66
6	230	0.2	0.45	à sec	1.507	5.989	20.7
7	300	0.08	0.3	à sec	0.363	2.415	7.2
8	300	0.14	0.45	à sec	0.925	4.448	18.9
9	300	0.2	0.15	à sec	1.402	5.967	9
10	160	0.08	0.45	MQL	0.268	1.667	5.76
11	160	0.14	0.15	MQL	0.781	3.47	3.36
12	160	0.2	0.3	MQL	1.526	6.359	9.6
13	230	0.08	0.3	MQL	0.285	1.690	5.52
14	230	0.14	0.45	MQL	0.796	3.507	14.49
15	230	0.2	0.15	MQL	1.419	6.115	6.9
16	300	0.08	0.45	MQL	0.337	2.159	10.8
17	300	0.14	0.15	MQL	0.911	4.111	6.3
18	300	0.2	0.3	MQL	1.19	5.273	18

III.3 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la rugosité (Ra)

III.3.1 Analyse de la variance pour (Ra)

Le tableau III.2 illustre les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra). L'analyse des résultats montre que le modèle trouvé est significatif et que l'avance (f) est le facteur qui a le plus grand effet sur (Ra) car la valeur de la probabilité (P) est inférieure à 0,05, il possède une contribution 96.06%. Le deuxième facteur significatif sur (Ra) est le mode de lubrification (Lub) avec un pourcentage de contribution de 1.22%. Finalement, la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap) ne sont pas significatives car leur valeur

de la probabilité (P) est supérieure à 0,05. Les contributions des différents facteurs sur (Ra) sont montrés dans la figure (III.1).

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

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	4	3.77721	97.78%	3.77721	0.94430	143.05	0.000
Linéaires	4	3.77721	97.78%	3.77721	0.94430	143.05	0.000
Vc	1	0.01584	0.41%	0.01584	0.01584	2.40	0.145
f	1	3.71074	96.06%	3.71074	3.71074	562.15	0.000
ap	1	0.00340	0.09%	0.00340	0.00340	0.52	0.486
Lub	1	0.04723	1.22%	0.04723	0.04723	7.15	0.019
Erreur	13	0.08581	2.22%	0.08581	0.00660		
Total	17	3.86303	100.00%				

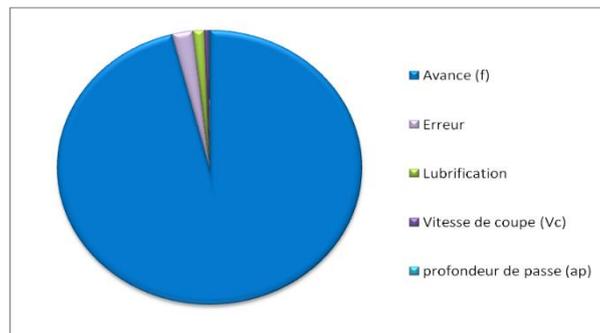


Figure III.1 Contributions des différents facteurs sur le critère (Ra)

III.3.2 Graphique des effets principaux pour (Ra)

La figure (III.2) présente les graphiques des effets principaux pour la rugosité de surface (Ra). On remarque que l'avance (f) affecte fortement sur la rugosité (Ra) car elle possède la plus grande pente. Le deuxième facteur qui influence (Ra), c'est le mode de lubrification (Lub) suivie par la vitesse de coupe (Vc) et en dernier lieu la profondeur de passe (ap). On peut voir que l'augmentation de l'avance (f) induit une élévation de critère de rugosité (Ra). De plus, on distingue que l'usinage avec un minimum de quantité de lubrification (MQL) contribue à une diminution de la rugosité (Ra) par rapport à l'usinage à sec. Concernant les facteurs (Vc) et (ap) leur influence est presque négligeable. Les résultats trouvés sont similaires à ceux trouvés dans la littérature [24] [26].

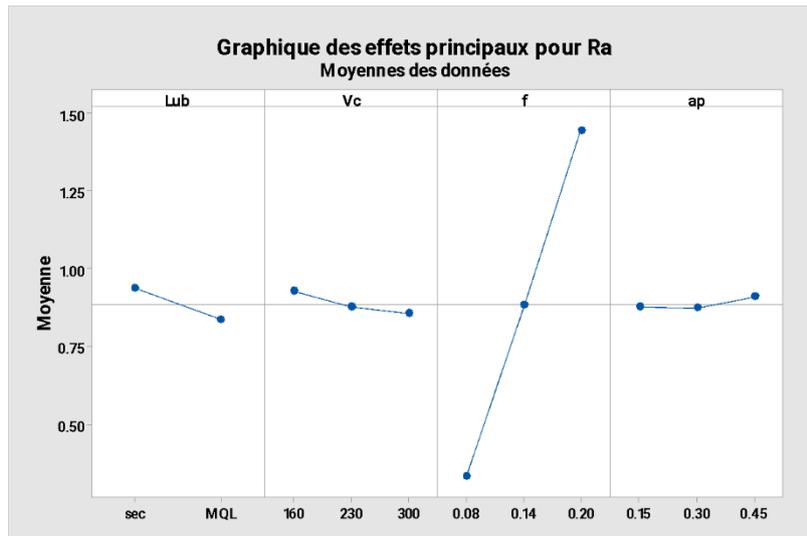


Figure III.2 Graphique des effets principaux pour (Ra).

III.3.3 Modélisation de la rugosité de surface (Ra)

Les relations fonctionnelles entre le paramètre de sortie pour la rugosité (Ra) et les facteurs d'entrée (Vc, f et ap) ont été exprimées par des modèles mathématiques (équations linéaires) avec un coefficient de détermination ($R^2 = 97.78\%$). Les modèles linéaires obtenus à partir de l'analyse statistique peuvent être utilisés pour prédire la rugosité (Ra) dans l'intervalle des conditions de coupe étudiés. Les équations (III.1 et III.2) expriment le modèle de la rugosité de la surface (Ra) avec tous les facteurs principaux pour les deux environnements de lubrification (à sec et MQL).

$$Ra_{\text{à sec}} = -0.275 - 0.000519 Vc + 9.268 f + 0.112 ap \quad (III.1)$$

$$Ra_{\text{MQL}} = -0.377 - 0.000519 VC + 9.268 f + 0.112 ap \quad (III.2)$$

III.3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Ra)

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra) est présentée dans la figure (III.3). L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches pour les deux environnements de lubrification, cela montre la précision des modèles trouvés. De plus, on remarque que les meilleures valeurs de rugosité sont enregistrées pour les essais (10, 13 et 16) durant l'usinage MQL. La validation des modèles est effectuée au moyen d'une courbe de probabilité normale. Le graphique de probabilité normale montre la proximité des points de données à la ligne ajustée (figure III.4).

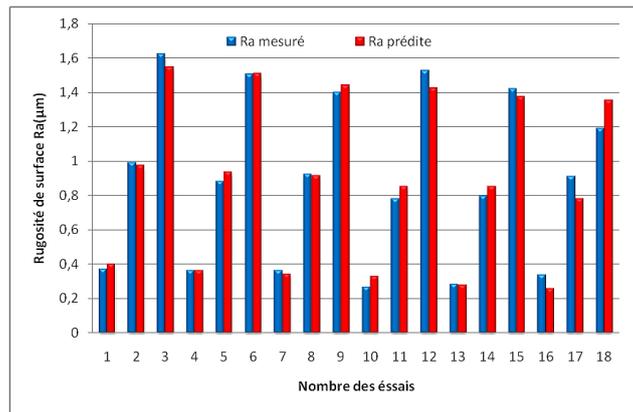


Figure III.3 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Ra)

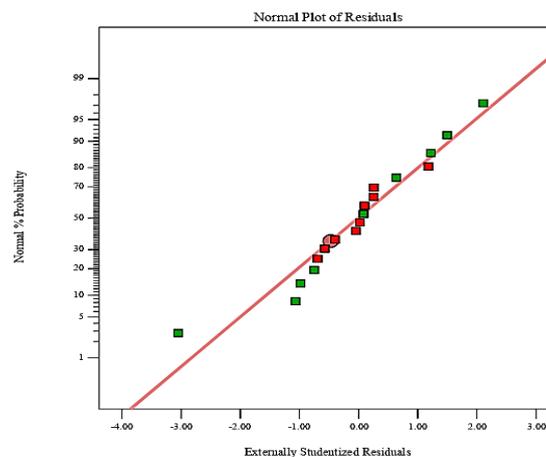


Figure III.4 Courbe de normalité pour (Ra).

III.3.5 Surface de réponse et graphique des contours pour (Ra)

La figure III.5 présente les graphes de la surface de réponse 3D et les contours en 2D de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) durant l’usinage à sec (figure.III.5a) et MQL (figure.III.5b). On remarque que la tendance des courbes est presque la même pour les deux cas étudiés. La (figure III.5a et b) illustre les surfaces de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de la variation des facteurs (V_c) et (f) où (a_p) prend leur valeur moyenne. Il est clair que l’augmentation de (f) induit une élévation de (Ra). Par contre, l’influence de (V_c) est presque négligeable sur (Ra), on remarque une très légère diminution de (Ra) lorsque (V_c) augmente et cela pour les deux modes d’usinage (à sec et MQL). Les contours 2D permettent d’estimer la valeur de la rugosité (Ra) en fonction du changement des valeurs des facteurs d’entrée dans l’intervalle des conditions des coupes utilisées. Le graphe montre que la meilleure valeur de la rugosité (Ra) est enregistrée pour ($V_c= 300$ m/min et $f= 0.08$ mm/min). L’analyse des courbes montre clairement que l’influence de l’avance (f) est

plus importante ainsi que les deux facteurs (ap) et (Vc) induisent une très légère diminution de la rugosité (Ra). La figure III.6 illustre les surfaces de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de la variation des facteurs (f) et (ap) où (Vc) prend leur valeur moyenne. Les graphes montrent que l'influence de l'avance (f) est plus importante que la profondeur de passe (ap) pour les deux cas étudié (à sec et MQL). Donc (f) est le facteur le plus significatif sur (Ra). Les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec d'autres travaux de recherche [24] [25]

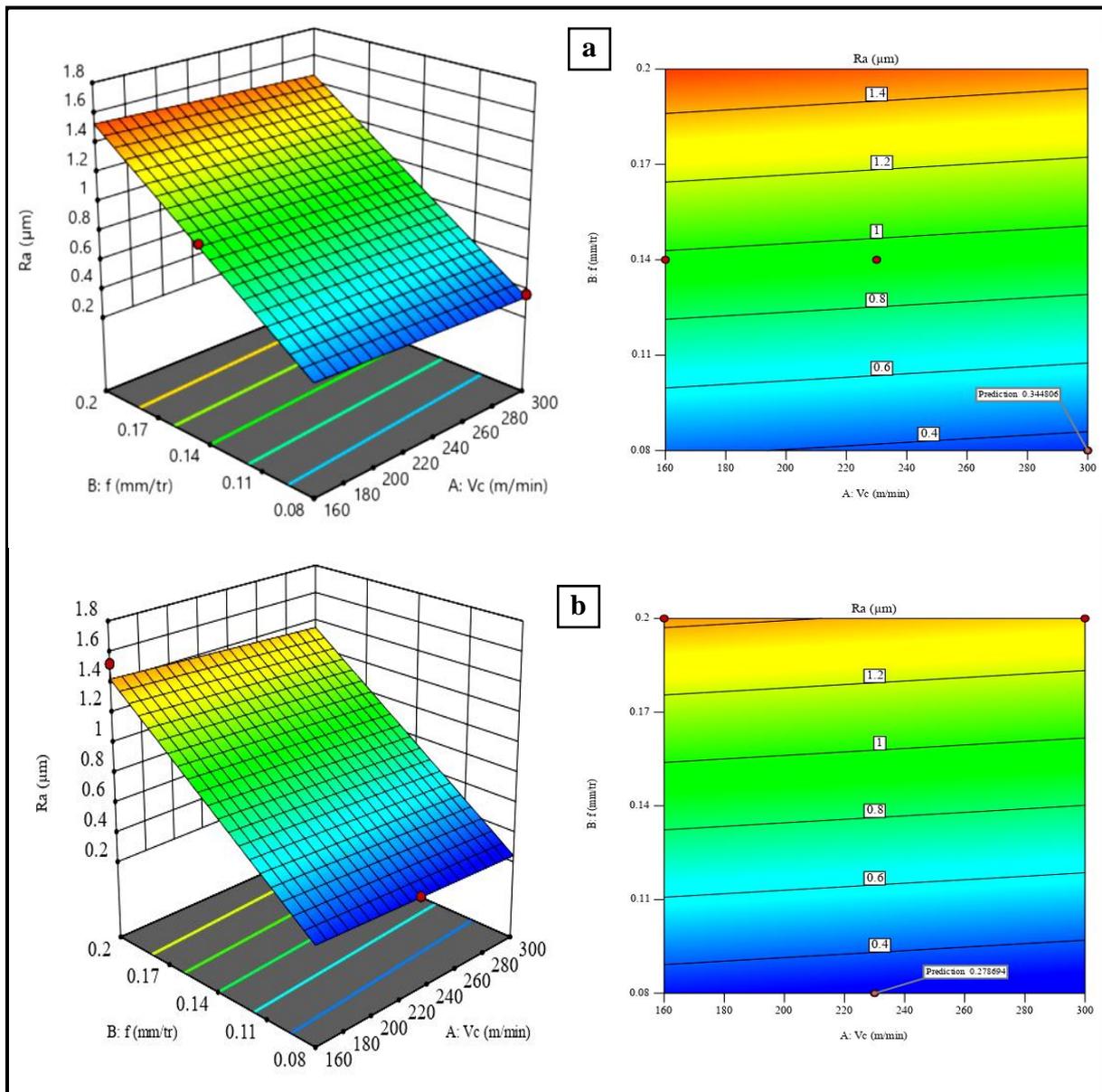


Figure III.5 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Ra) en fonction de (Vc et f)
(a) à sec et **(b)** MQL.

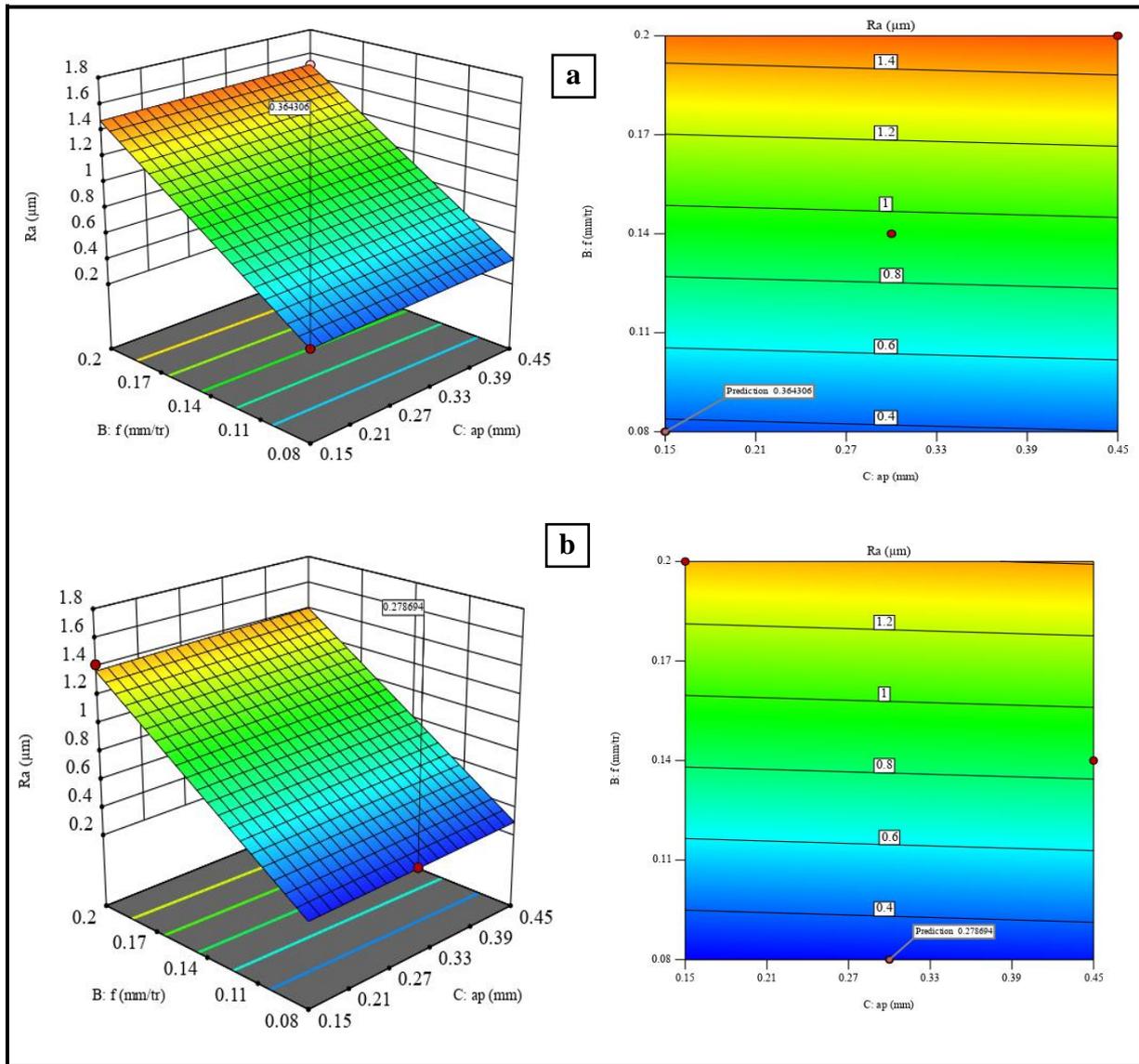


Figure III.6 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Ra) en fonction de (f et ap) (a) à sec et (b) MQL.

III.4 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la surface de rugosité (Rz)

III.4.1 Analyse de variance pour (Rz)

Le tableau III.3 illustre les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Rz) lors de l'usinage à sec et MQL. L'analyse des résultats montre aussi que le facteur (f) est le facteur le plus important qui affecte (Rz), sa contribution est de 95,14%. Il est suivi par le mode de lubrification (Lub) avec une contribution de 1,64%. Les facteurs (Vc) et (ap) ne sont pas significatifs car les valeurs de la probabilité (p) sont inférieures à 0,05. Les contributions des différents facteurs sur (Rz) sont montrés dans la figure III.7.

Tableau III.3 Analyse de la variance pour le critère de rugosité (**Rz**)

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	4	48.2153	96.81%	48.2153	12.0538	98.53	0.000
Linéaires	4	48.2153	96.81%	48.2153	12.0538	98.53	0.000
Vc	1	0.0099	0.02%	0.0099	0.0099	0.08	0.780
f	1	47.3860	95.14%	47.3860	47.3860	387.34	0.000
Ap	1	0.0027	0.01%	0.0027	0.0027	0.02	0.884
Lub	1	0.8166	1.64%	0.8166	0.8166	6.68	0.023
Erreur	13	1.5904	3.19%	1.5904	0.1223		
Total	17	49.8056	100.00%				

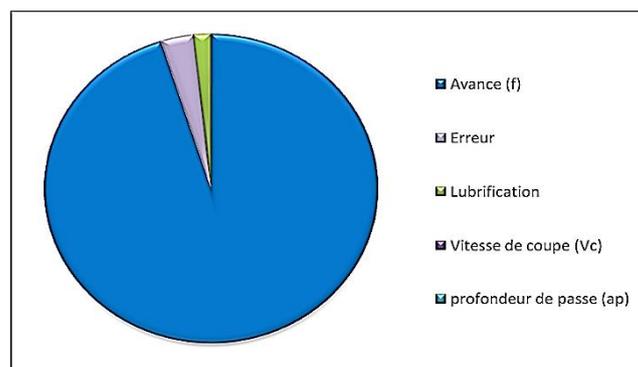


Figure III.7 Contributions des différents facteurs sur (**Rz**)

III.4.2 Graphique des effets principaux pour (**Rz**)

La figure III.8 représente les graphiques des effets principaux pour la rugosité de surface (**Rz**). On peut voir que la pente de l'avance (**f**) est plus grande, donc ce facteur est le plus influant sur (**Rz**). D'après cette figure, il est clair que l'augmentation de l'avance (**f**) induit une élévation de (**Rz**). Le deuxième facteur affectant le critère (**Rz**) est le mode de lubrification (**Lub**). Grâce à la lubrification (**MQL**), on distingue une amélioration de la qualité de surface. Concernant les facteurs (**Vc**) et (**ap**), leurs influences sont presque négligeables. Les résultats trouvés sont en bon accord à ceux trouvés dans la littérature [24] [25].

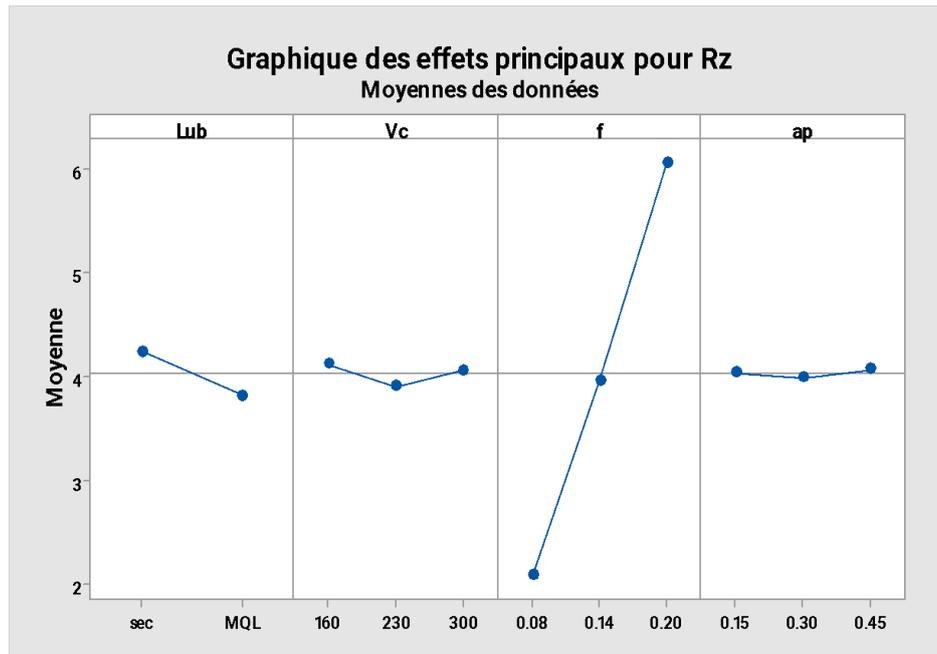


Figure III.8 Graphique des effets principaux pour (Rz).

III.4.3 Modélisation de la rugosité de surface (Rz)

Les relations fonctionnelles entre la variable dépendante pour la rugosité (Rz) et les variables indépendantes étudiées (Vc, f et ap) durant l’usinage à sec et MQL ont été exprimées par des modèles mathématiques (équations linéaires) avec des coefficients de détermination ($R^2 = 96,81\%$). Les modèles linéaires obtenus à partir de l’analyse statistique peuvent être utilisés pour prédire la rugosité de coupe (Rz) dans l’intervalle des conditions de coupe étudiés. Les équations (III.3 et III.4) expriment le modèle de la rugosité (Rz) avec tous les facteurs principaux pour les deux environnements de lubrification.

$$Rz_{\text{à sec}} = -0.330 - 0.00041 Vc + 33.12 f + 0.101 ap \quad (\text{III.3})$$

$$Rz_{\text{MQL}} = -0.756 - 0.00041 Vc + 33.12 f + 0.101 ap \quad (\text{III.4})$$

III.4.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Rz)

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Rz) est présentée dans la (figure III.9) pour l’usinage à sec et MQL. L’analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches dans les deux environnements de lubrification, cela montre la précision des modèles trouvés. De plus, on trouve les meilleures valeurs de la rugosité (Rz) pour les essais (10, 13 et 16). La (figure III.10) montre les courbes de la normalité de la distribution de l’erreur pour les deux cas étudiés.

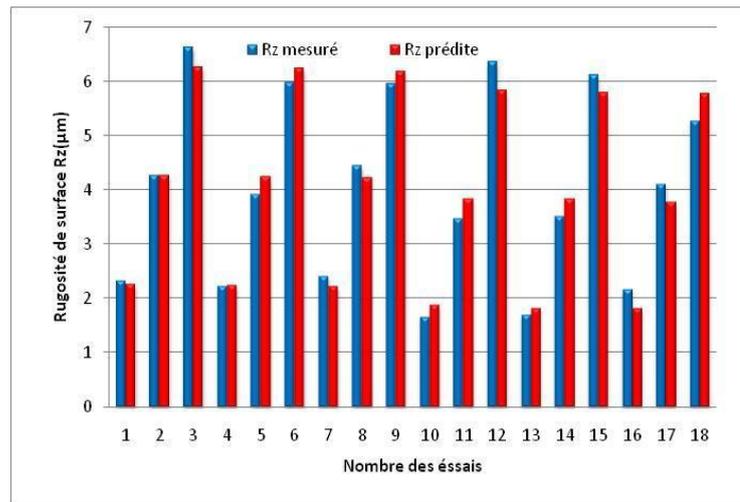


Figure III.9 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Rz)

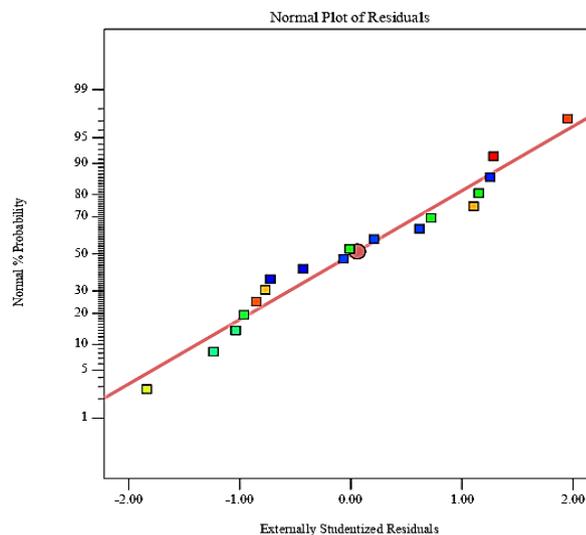


Figure III.10 Courbe de normalité pour (Rz).

III.3.5 Surface de réponse et graphique des contours pour (Rz)

La figure III.11 présente les graphes de la surface de réponse 3D et les contours en 2D de la rugosité (Rz) en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) durant l’usinage à sec et MQL. On remarque que la tendance des courbes est presque là même pour les deux cas étudiés. La figure III.11 montre la surface de réponse de (Rz) en fonction de la variation des facteurs (V_c) et (f). L’analyse des courbes indique que la rugosité de surface (Rz) augmente d’une manière importante avec l’augmentation de (f). Cependant, le facteur (V_c) induit une très légère diminution de la rugosité (Rz). Donc, il est clair que l’influence de l’avance (f) est plus importante que la vitesse de coupe (V_c). L’analyse des graphes des contours montre que la meilleur valeur (la plus basse) de la rugosité de surface (Rz) est $2.23 \mu\text{m}$ lors de l’usinage à

sec, ce qui correspond au régime de coupe suivant : ($f= 0.08$ mm/tr, $V_c= 300$ m/min et $a_p= 0.3$ mm). Par contre, l'usinage avec (MQL) génère une qualité de surface minimale où R_z prend une valeur minimale de $1.83 \mu\text{m}$, qui correspond au régime de coupe suivant : ($f= 0.08$ mm/tr, $V_c= 230$ m/min et $a_p= 0.3$ mm). La (figure III.12) expose les graphes de la surface de réponse 3D et les contours en 2D de la rugosité (R_z) en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) où (V_c) prend leur valeur moyenne ($V_c= 230$ m/min) durant l'usinage à sec et MQL. L'analyse des résultats montrent que l'avance possède une influence significative sur (R_z). Par contre, la rugosité (R_z) augmente légèrement avec l'augmentation de la profondeur de passe (a_p). Les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec d'autres travaux de recherche.

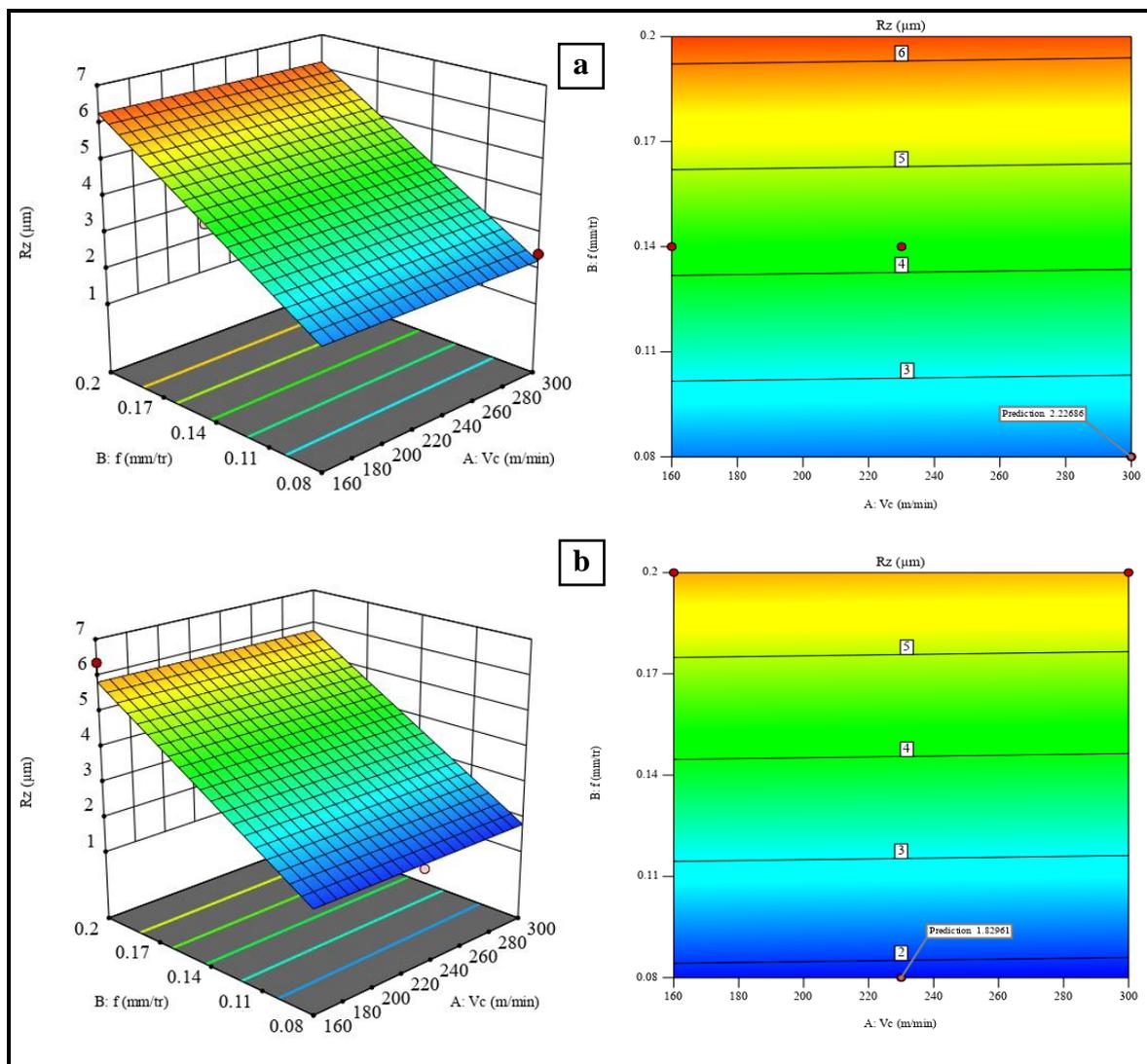


Figure III.11 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (R_z) en fonction de (V_c et f)
(a) à sec et **(b)** MQL.

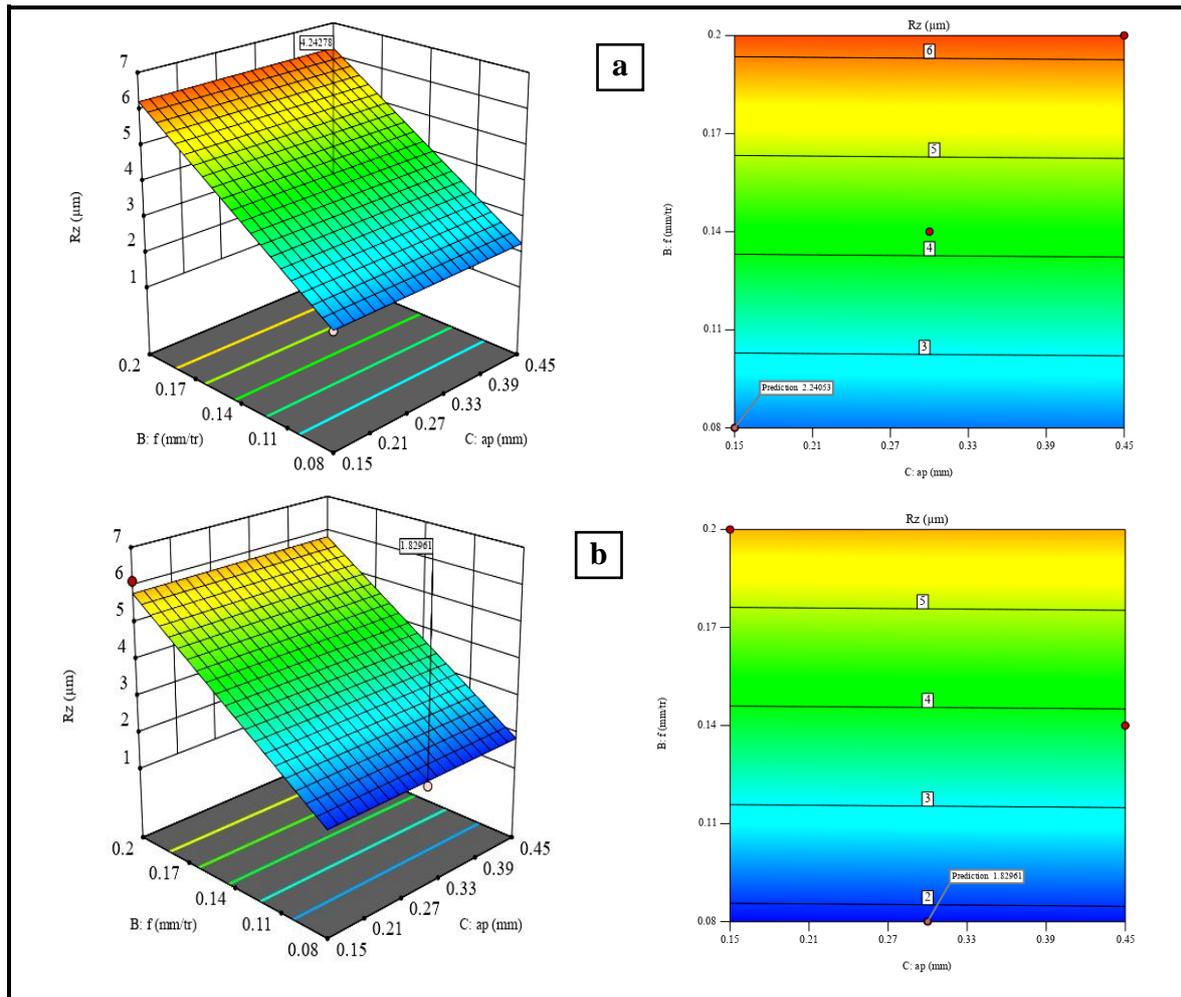


Figure III.12 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Rz) en fonction de (f et ap) (a) à sec et (b) MQL.

III.3.6 Surfaces de réponse et graphiques des contours pour le (MRR)

La (figure III.13) et 14 regroupe les graphiques de la surface de réponse 3D et les contours en 2D du taux d'enlèvement de matière (MRR) en fonction des combinaisons des éléments suivants : (V_c et f) et (f et ap) durant l'usinage à sec (figure III.13a) (figure III.14a) et MQL (figure III.13b) (figure III.14b). On remarque que la tendance des courbes est presque là même pour les deux cas étudiés (à sec et MQL). Les résultats de (MRR) (figure III.13a), montrent l'interaction entre (V_c et f). En effet on constate que pour une faible valeur de (f), la vitesse de coupe (V_c) n'a presque pas d'effet sur (MRR), alors que pour une avance importante, le (MRR) augmente considérablement avec l'augmentation de (V_c). Donc il est clair que le meilleur taux d'enlèvement de matière (MRR) est obtenu en utilisant une valeur maximale pour (f) et une valeur maximale pour (V_c). Les résultats obtenus pour le (MRR) en fonction de la variation des facteurs (f et ap) (figure III.14), montrent une pente plus grande

pour (ap et f), ce qui signifie que ces deux facteurs ont une influence remarquable sur le (MRR). La pente de (Vc) est très faible comparée à celles de (ap et f).

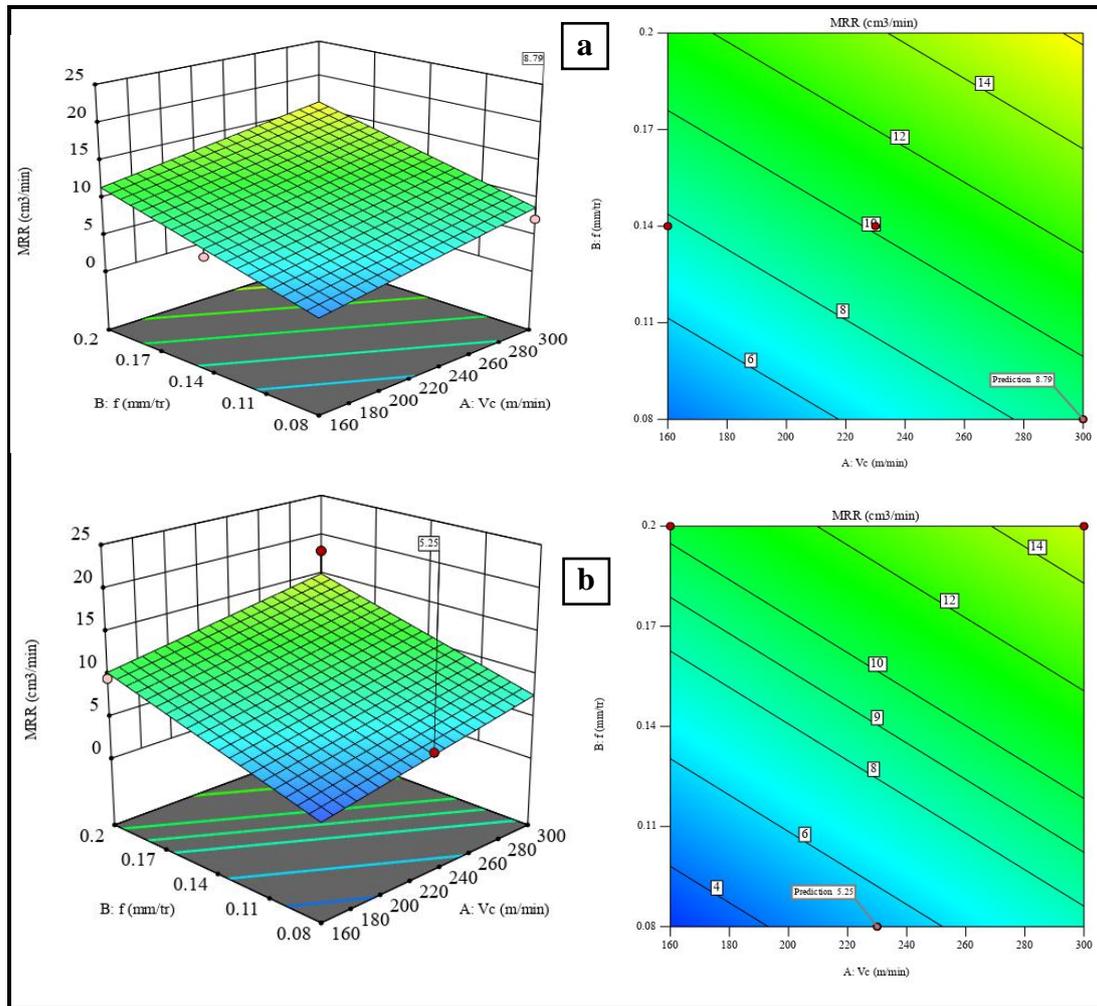
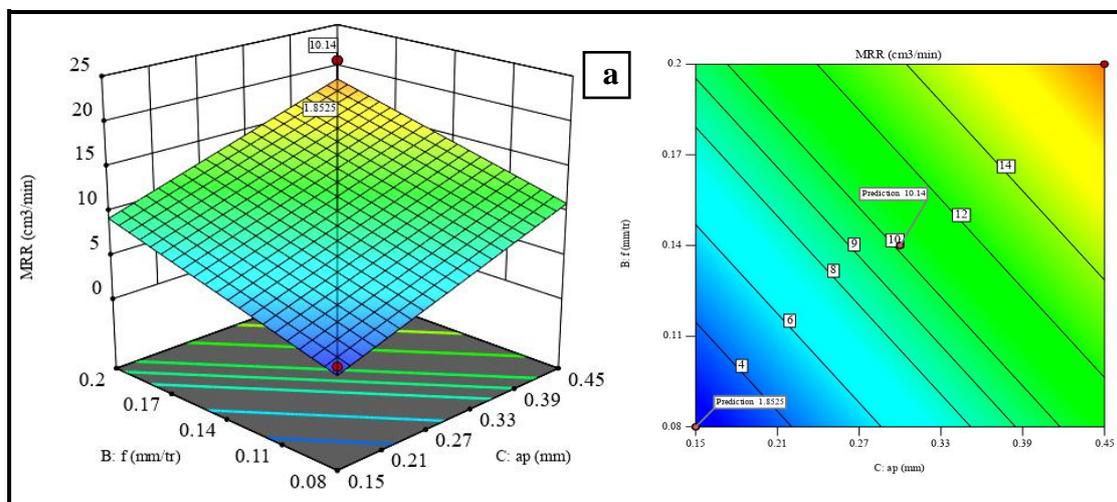


Figure III.13 Surfaces de réponse et les contours de (MRR) en fonction de (Vc et f) (a) à sec et (b) MQL.



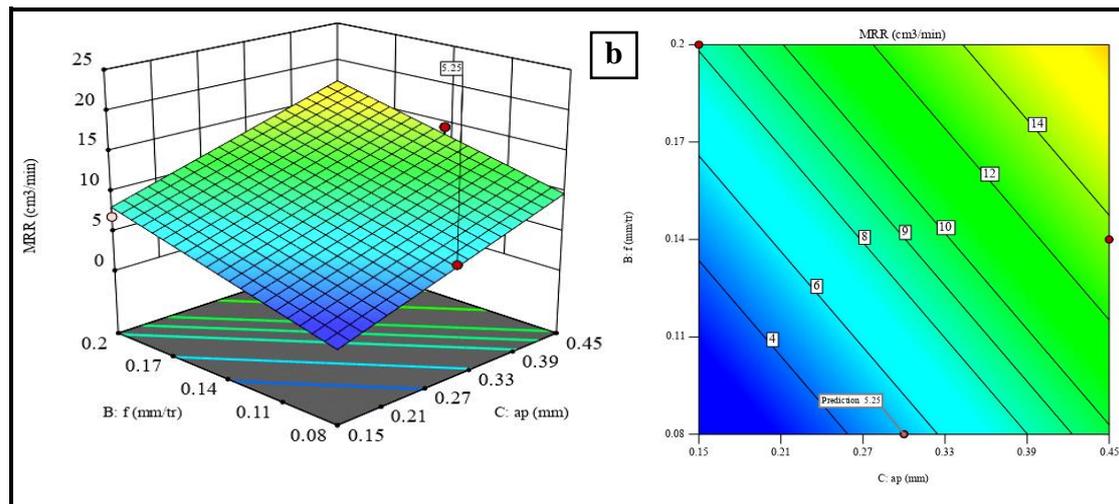


Figure III.14 Surfaces de réponse et les contours de (MRR) en fonction de (f et ap) (a) à sec et (b) MQL.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de la méthodologie de surface de réponse (RSM) en tournage de l'acier traité (AISI 52100) avec un outil de coupe en céramique mixte ($Al_2O_3 + Tic$) et cela dans un deux environnement de lubrification (à sec et MQL) a permis de faire étude statistique basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) pour les paramètres technologiques de sortie et de connaître l'influence de chaque facteur d'entrée sur les sorties. Aussi, ces résultats nous ont permis de proposer des modèles mathématiques pour la rugosité de surface (R_a et R_z) en fonction des paramètres de coupe dans les deux environnements étudiés.

Chapitre IV

Optimisation des conditions de coupe

IV Optimisation des conditions de coupe

IV.1 Introduction

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant le choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tels que le temps machine ou le coût total d'opération. Donc, l'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation multi- objective des conditions de coupe lors de l'usinage de l'acier traité AISI 52100 pour deux conditions de lubrification (à sec et MQL) respectueuses de l'environnement. Trois méthodes d'optimisation ont été exploitées dans ce chapitre :

- Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode de la fonction de désirabilité (DF);
- Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode (DEAR) avec et sans le rapport signal bruit.
- Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode (PIV) (Méthode de Valeur indexée de proximité).

IV.2 Fonction de désirabilité

Les chercheurs utilisent fréquemment l'approche de la fonction de désirabilité pour optimiser les réponses à plusieurs objectifs. En fait, sa simplicité, sa souplesse de pondération et sa disponibilité dans les logiciels statistiques expliquent son utilisation considérable.

La désirabilité est l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés, qui peut être évalué en fonction des réponses calculées par un modèle statistique [23]. Les équations (IV.1, IV.2 et IV.3) peuvent être utilisées pour calculer les désirabilités en recherchant un minimum (Eq. IV.1) ou un maximum (Eq. IV.2).

$$D(y) = \begin{cases} 0 & y < sup \\ \left(\frac{y - inf}{Tar - inf} \right)^W & inf \leq y \leq Tar \\ 1 & y > Tar \end{cases} \quad (IV.1)$$

$$D(y) = \begin{cases} 1 & y < Tar \\ \left(\frac{sup - y}{sup - Tar} \right)^W & Tar \leq y \leq sup \\ 0 & y > sup \end{cases} \quad (IV.2)$$

$$DF = (D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n)^{\frac{1}{n}} \quad (IV.3)$$

$$= \left(\prod_{i=1}^n D_i \right)^{\frac{1}{n}}$$

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

IV.2.1 Cas d'optimisation étudiés

Dans cette étude, on s'est intéressé à trois cas d'optimisation multi-objective qui peuvent être fréquemment rencontrées dans les entreprises de fabrication mécanique selon les objectifs souhaités. Les différents cas sont comme suivis :

1^{er} Cas : Rugosité minimale, pour une meilleure qualité

2^{ème} Cas : Taux d'enlèvement de matière maximale, pour une meilleure production.

3^{ème} Cas : Compromis entre les deux critères de la rugosité de surface (Ra et Rz) et le taux d'enlèvement de la matière (MRR).

Le traitement des résultats du **Tableau III.1**, a permis de présenter dans le **tableau IV.1** les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, l'importance affectée à chaque paramètre pour les trois cas d'optimisation. Les **tableaux (IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5)** illustrent les solutions correspondantes aux trois cas cités.

Tableau IV.1 Contraintes d'optimisation pour les trois cas d'étude

Facteurs	Objectif	limite inférieure	limite supérieure	poids inférieur	poids supérieure	Importance		
						1 ^{er} Cas	2 ^{ème} Cas	3 ^{ème} Cas
Vc	in range	160	300	1	1	3		
f	in range	0.08	0.2	1	1	3		
ap	in range	0.15	0.45	1	1	3		
Lub	in range	Sec	MQL	1	1	3		
Ra	Minimisé	0.268	1.622	1	1	5	1	5
Rz	Minimisé	1.667	6.624	1	1	5	1	5
MRR	Maximisé	1.92	20.7	1	1	1	5	5

➤ 1^{er} Cas d'optimisation

Dans ce cas, on a donné l'importance maximale aux deux critères de rugosité de surface (Ra et Rz) avec importance de (5), tout en gardant le taux d'enlèvement de matière (MRR) à son bas niveau (1) à celui qui a moins d'importance. Le régime optimal trouvé est de ($V_c=300$ m/min, $f=0,08$ mm/tr et $a_p=0.45$ mm) lors de l'usinage avec MQL. Les deux critères de rugosité prennent des valeurs minimales de ($R_a=0.259$ μ m et $R_z=1.816$ μ m), le taux d'enlèvement de matière ($MRR=12.188$ cm³/min) et la désirabilité est égale à 0,934. Les résultats sont présentés dans le tableau IV.2 et le graphe des rampes (**figure IV.1**). Le régime proposé suggère une vitesse de coupe et une profondeur de passe maximale, une avance (f)

minimale ainsi qu'un usinage dans un environnement MQL. Ce cas d'étude est intéressant pour un tournage de finition où la qualité est demandée en première position (minimale rugosité) comparativement au (MRR).

Tableau IV.2 Solutions de 1^{er} cas d'optimisation

N° de solution	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Lub	Ra (µm)	Rz (µm)	MRR (cm ³ /min)	Désirabilité
1	300.000	0.080	0.450	MQL	0.259	1.816	12.188	0.934
2	299.396	0.080	0.450	MQL	0.260	1.816	12.167	0.933
3	299.999	0.080	0.449	MQL	0.259	1.816	12.154	0.933
4	298.581	0.080	0.450	MQL	0.260	1.817	12.139	0.933
5	297.597	0.080	0.450	MQL	0.260	1.817	12.106	0.933
6	300.000	0.080	0.447	MQL	0.259	1.816	12.091	0.933
7	297.090	0.080	0.450	MQL	0.261	1.817	12.089	0.933
8	299.997	0.080	0.450	MQL	0.263	1.831	12.215	0.932
9	296.111	0.080	0.450	MQL	0.261	1.818	12.056	0.932
10	299.998	0.080	0.443	MQL	0.258	1.815	11.987	0.932

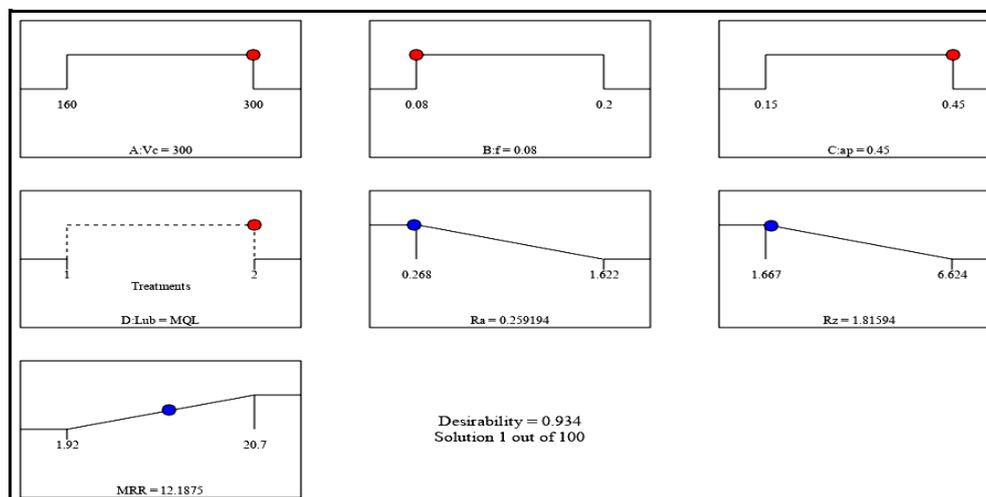


Figure IV.1 Graphe des rampes pour le 1^{er} cas d'optimisation.

La figure IV.2 montre la variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe (Vc, f, ap) et le mode de lubrification (a) à sec et (b) MQL pour le 1^{er} cas d'optimisation. On remarque que la valeur de désirabilité la plus élevée est mentionnée pour une avance minimale $f=0.08$ mm/tr, comme il est montré dans (la figure. IV.2) l'avance (f)

est le facteur qui a l'influence la plus significative sur la désirabilité. Par contre, la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (a_p) exerce une influence presque négligeable pour les deux modes de lubrification.

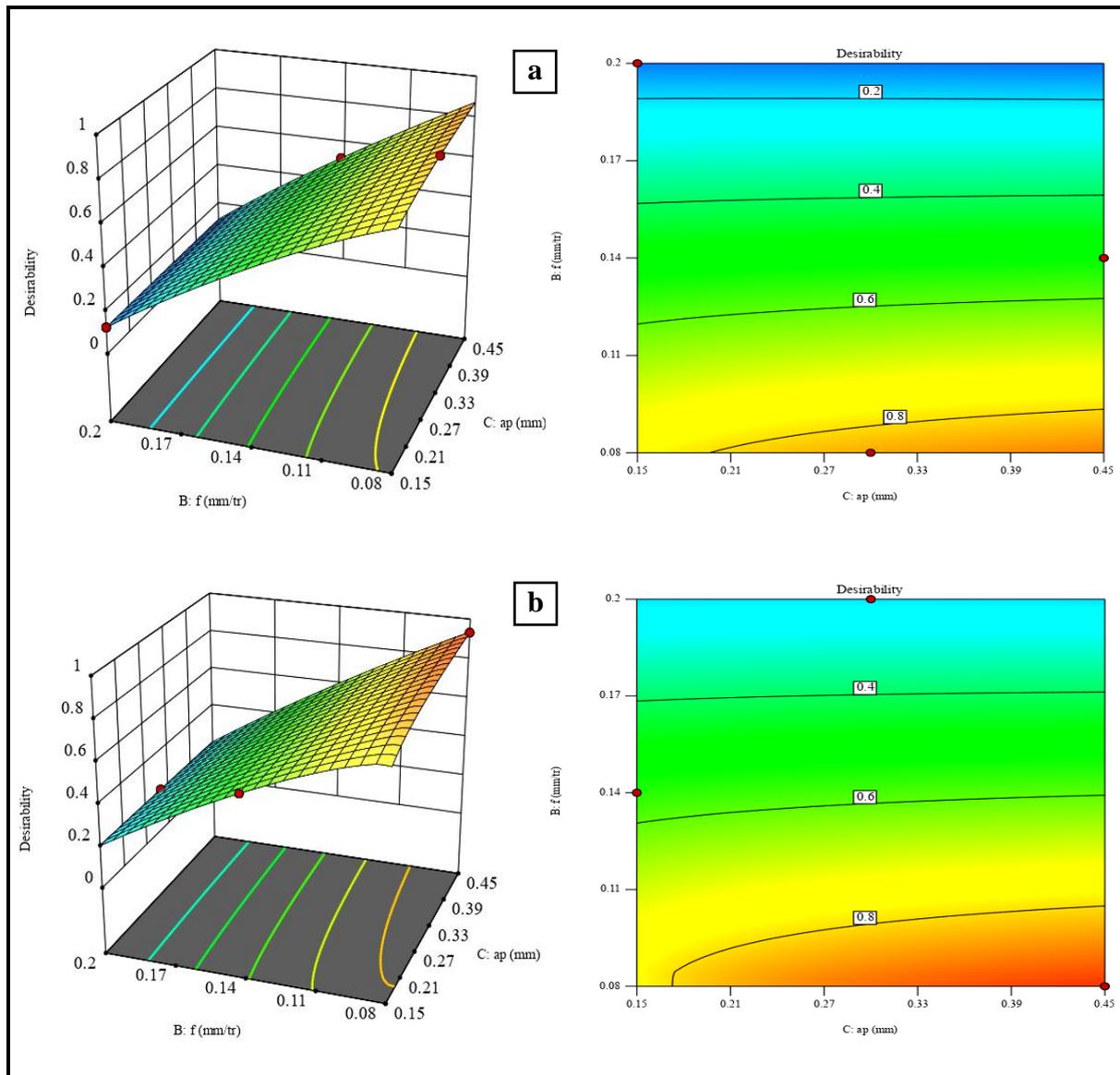


Figure IV.2 Graphe de surface de réponse 3D et contours de la désirabilité (a) à sec et (b) MQL.

➤ 2^{ème} cas d'optimisation

Dans ce cas, l'optimisation du taux d'enlèvement de matière (MRR) est devenue le paramètre le mieux considéré avec une importance de (5), tandis que la rugosité (R_a) et (R_z) ont pris un niveau minimal avec une importance de (1). Le régime optimal trouvé est de $V_c=300\text{m/min}$, $f=0,123\text{ mm/tr}$, $a_p=0,45\text{ mm}$ et avec l'environnement à sec. Le (MRR) prend une valeur de $16.03\text{ cm}^3/\text{min}$, la rugosité $R_a=0,761\text{ }\mu\text{m}$, $R_z=3.67\text{ }\mu\text{m}$, et une désirabilité de 0,710. Ce cas d'optimisation est réservé lorsque la priorité est donnée à la productivité afin

d'améliorer la production. Ce cas d'optimisation est généralement recherché lors des travaux d'ébauchages ou la productivité prime sur la qualité de surface. Les résultats sont présentés dans le **tableau IV.3** ainsi que le graphe des rampes (**figure IV.3**).

Tableau IV.3 Solutions du 2ème cas d'optimisation

N° de solution	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Lub	Ra (µm)	Rz (µm)	MRR (cm ³ /min)	Désirabilité
1	300.000	0.123	0.450	Sec	0.761	3.670	16.030	0.710
2	300.000	0.123	0.450	Sec	0.756	3.650	15.993	0.710
3	300.000	0.124	0.450	Sec	0.769	3.697	16.082	0.710
4	299.998	0.122	0.450	Sec	0.750	3.630	15.955	0.710
5	300.000	0.124	0.450	Sec	0.774	3.715	16.115	0.710
6	299.928	0.122	0.450	Sec	0.755	3.646	15.984	0.710
7	300.000	0.120	0.450	Sec	0.736	3.579	15.860	0.710
8	300.000	0.120	0.450	Sec	0.732	3.564	15.833	0.710
9	300.000	0.119	0.450	Sec	0.724	3.538	15.784	0.709
10	299.848	0.125	0.450	Sec	0.783	3.749	16.173	0.709

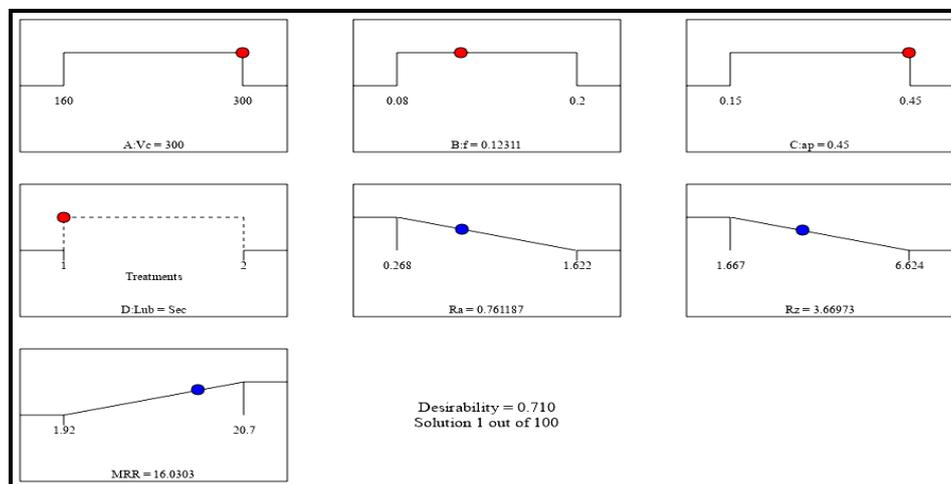


Figure IV.3 Graphes des rampes pour le 1^{er} cas d'optimisation.

La (**figure IV.4**) montre la variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe (Vc, f, ap et le mode de lubrification (a) à sec et (b) MQL, pour le 2^{ème} cas d'optimisation. L'analyse des graphiques de surface de réponse 3D ainsi que les contours améliore les résultats des régimes optimaux présentés dans le tableau IV.3. Comme il a été montré dans la (**figure IV.4**), un taux de désirabilité faible soit indiqué des valeurs basses de

(Vc) et (ap). Par contre, l'obtention d'un taux de désirabilité idéal nécessite une profondeur de passe est vitesse de coupe élevé avec une faible avance, comme il est montré dans la (figure. IV.2). La profondeur de passe (ap) est le facteur qui a l'influence la plus significatif sur la désirabilité suivie par (Vc) pour les deux modes de lubrification.

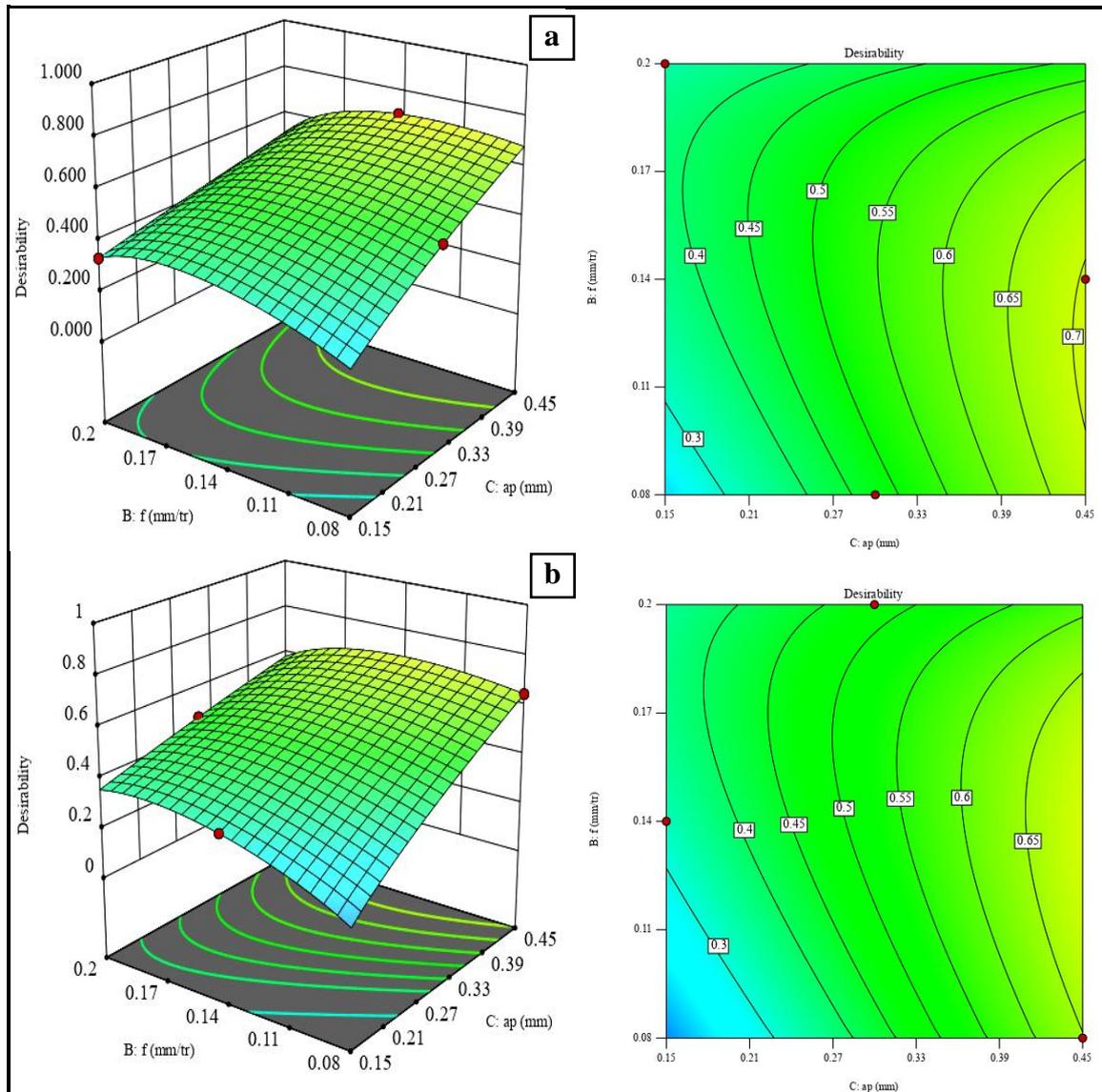


Figure IV.4 Graphe de surface de réponse 3D et contours de la désirabilité (a) à sec et (b) MQL.

3^{ème} Cas d'optimisation

Le dernier cas d'optimisation concerne la minimisation de (Ra et Rz) et la maximisation du (MRR) avec une importance de (5) pour les trois paramètres technologiques. Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de (Vc=300 m/min, f= 0.08 mm/tr, ap=0.15mm avec le mode de lubrification (MQL). Le taux d'enlèvement de matière (MRR) prend une valeur maximale de MRR=12.188 cm³/min, les deux critères de la rugosité prennent de valeurs minimales (Ra=0.259 et Rz=1.816) µm et la désirabilité 0.809. Ce cas est

intéressant lorsqu'on cherche un compromis entre une qualité de surface optimale avec une bonne productivité. L'analyse des graphiques de surface de réponse 3D ainsi que les contours (**figure. IV.6**) improuve les résultats des régimes optimaux présentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 Solutions du 3^{ème} cas d'optimisation

N° de solution	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Lub	Ra (µm)	Rz (µm)	MRR (cm ³ /min)	Désirabilité
1	300.000	0.080	0.450	MQL	0.259	1.816	12.188	0.809
2	300.000	0.080	0.450	MQL	0.259	1.816	12.188	0.809
3	299.999	0.080	0.450	MQL	0.264	1.832	12.218	0.809
4	300.000	0.081	0.450	MQL	0.268	1.849	12.249	0.809
5	299.230	0.080	0.450	MQL	0.260	1.816	12.161	0.809
6	300.000	0.081	0.449	MQL	0.268	1.848	12.215	0.808
7	299.999	0.080	0.448	MQL	0.259	1.816	12.140	0.808
8	299.997	0.082	0.450	MQL	0.274	1.870	12.289	0.808
9	298.330	0.081	0.450	MQL	0.268	1.845	12.184	0.808
10	298.107	0.080	0.450	MQL	0.263	1.828	12.145	0.808

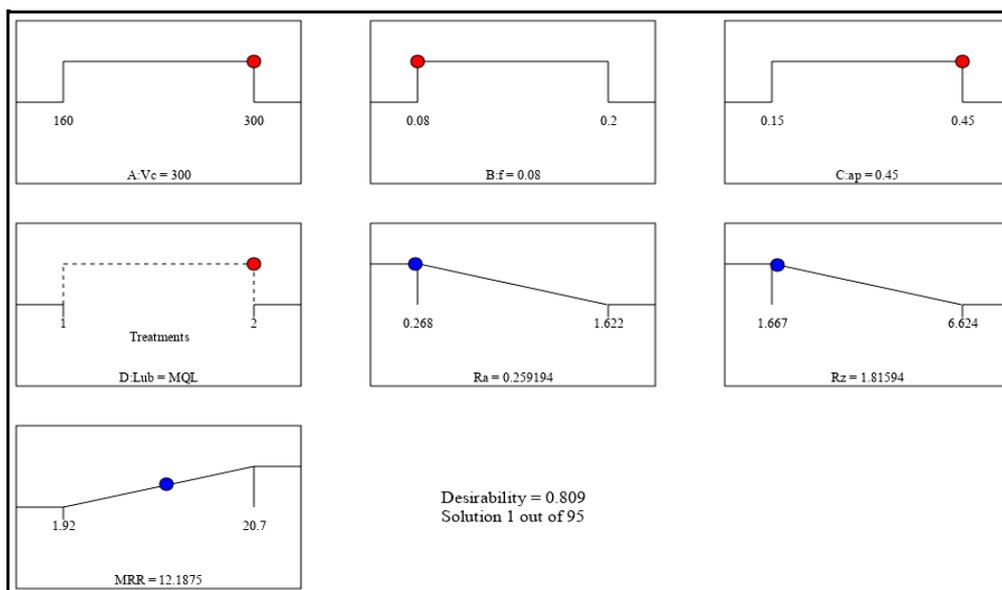


Figure IV.5 Graphes des rampes pour le 3^{ème} cas d'optimisation.

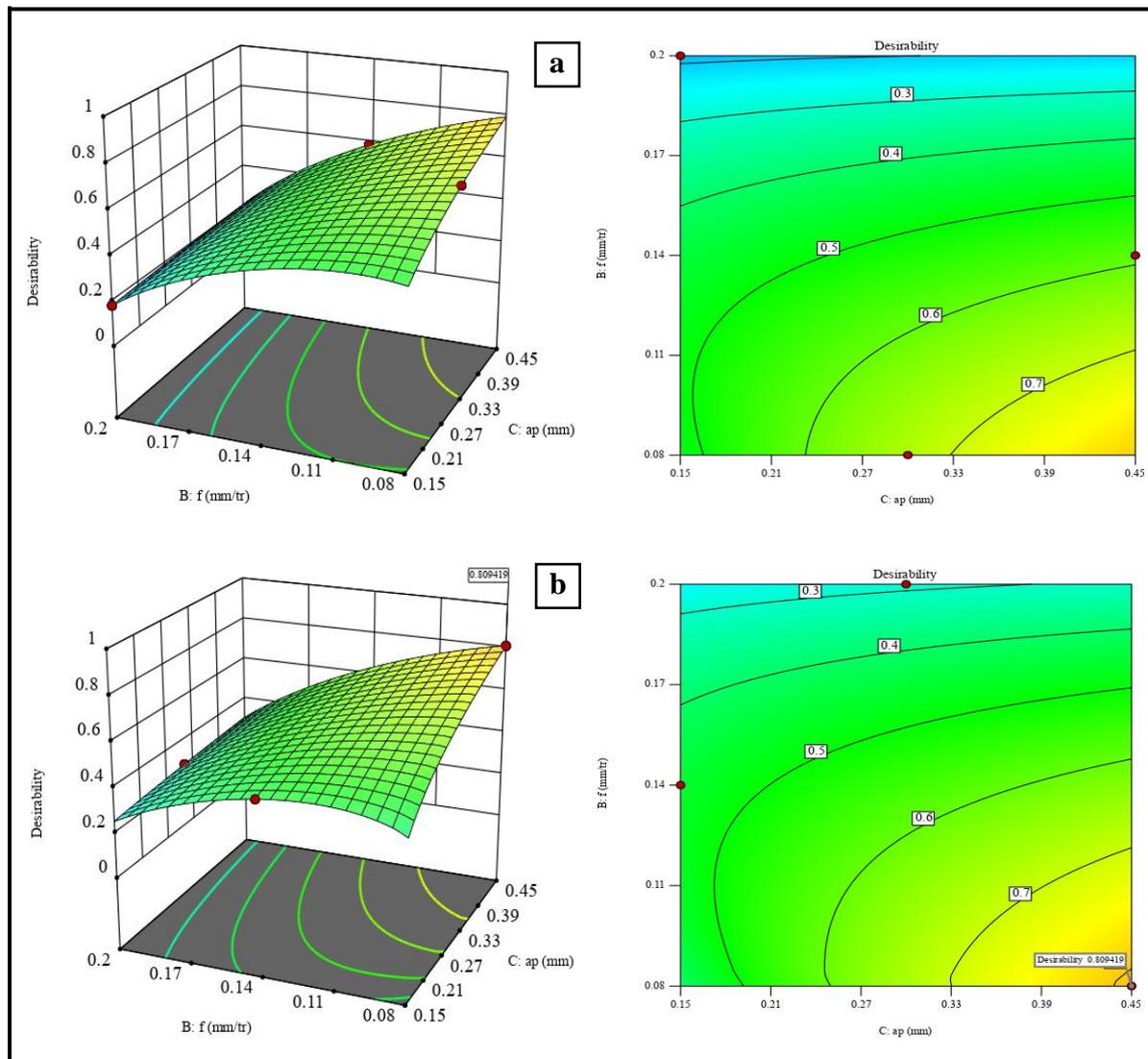


Figure IV.6 Graphe de surface de réponse 3D et contours de la désirabilité (a) à sec et (b) MQL.

Tableau IV.5 Régimes optimaux d'optimisation

N° Essai	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Lub	Ra (μm)	Rz (μm)	MRR (cm ³ /min)	Désirabilité
1 ^{er} Cas	300.000	0.080	0.450	MQL	0.259	1.816	12.188	0.934
2 ^{ème} Cas	300.000	0.123	0.450	Sec	0.761	3.670	16.030	0.710
3 ^{ème} Cas	300.000	0.080	0.450	MQL	0.259	1.816	12.188	0.809

IV.3 Optimisation par la méthode DEAR

IV.3.1 Méthode DEAR basée sur le signal bruit de Taguchi (S/N)

La méthode d'optimisation multi-objective (**DEAR**) basée sur le rapport signal/bruit (S/N) de Taguchi est utilisée dans notre cas pour analyser les résultats des expériences. Ici, (S) est le facteur de signal qui indique la valeur réelle du système et (N) est le facteur de bruit qui montre un facteur non inclus dans la conception de l'expérience. Le rapport (S/N) est calculé par les équations (IV.4 et IV.5) selon les objectifs souhaités [24], « le plus petit est le meilleur » et « le plus grand est le meilleur » respectivement.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (\text{IV.4})$$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (\text{IV.5})$$

Où : **n** : Le nombre des essais. y_i : Les données observées, Avec : $i = 1, 2, \dots, n$.

Dans notre cas, le logiciel Minitab18 a été utilisé pour calculer le rapport (S/N). L'équation (IV.4) a été utilisée pour le calcul de rapport (S/N) afin de minimiser les paramètres de sortie (Ra et Rz) individuellement, tandis que l'équation (IV.5) a été utilisée pour maximiser le (MRR). Les résultats des calculs sont indiqués dans le **Tableau IV.6**.

Tableau IV.6 Résultats du signal/bruit (S/N) pour (Ra et Rz et MRR)

N°	Résultats (S/N)		
	Ra (dB)	Rz (dB)	MRR (dB)
1	8,54256796	-7,34711842	5,66602457
2	0,06101503	-12,6044882	16,5473855
3	-4,201017	-16,4224065	23,1672498
4	8,73037829	-6,92705949	8,81818164
5	1,08078593	-11,87458	19,6995425
6	-3,56226505	-15,5470863	26,3194069
7	8,8018675	-7,6583427	17,1466499
8	0,67716535	-12,9632956	25,5292361
9	-2,93496027	-15,5151208	19,0848502
10	11,4373041	-4,438712	15,2084497
11	2,14697932	-10,8065895	10,5267855
12	-3,67109067	-16,0677765	19,6454247
13	10,9031028	-4,55773409	14,8387816
14	1,98173865	-10,8987153	23,2213677
15	-3,03964791	-15,7279292	16,7769818
16	9,44740198	-6,68505285	20,6684751
17	0,80963246	-12,2789495	15,986811
18	-1,51093923	-14,4411554	25,1054501

La méthode DEAR (classification basée sur l'analyse d'enveloppe de données) est une méthode d'optimisation multi objectif qui a été couplée avec la méthode de Taguchi en se basant sur le rapport (S/N) pour résoudre le problème d'optimisation multi-objectif [25]. L'objectif dans ce contexte est d'obtenir le régime optimal pour les caractéristiques de performance de sortie (Ra, Rz et MRR) à partir de l'indice de performance à réponse multiple (MRPI). Les étapes de cette méthode sont exprimées dans la figure IV.7.

Étape 1 : En se basant sur les résultats des expériences de S/N pour (Ra, Rz et MRR) (Tableau IV.5), l'équation (IV.6) a été utilisée pour calculer les poids ($W_{X_{ij}}$) de chaque réponse (X_{ij}) ;

$$W_{X_{ij}} = \frac{X_{ij}}{\sum_{j=1}^n X_{ij}} \quad (\text{IV.6})$$

Étape 2 : Convertir les données de sortie en données pondérées après avoir multiplié chaque valeur de sortie par son propre poids à l'aide de l'équation IV.7,

$$X_{ij}^* = X_{ij} * W_{X_{ij}} \quad (\text{IV.7})$$

Étape 3 : Détermination de l'indice de performance des réponses multiples (MRPI) pour toutes les expériences :

$$MRPI = \sum_{i=1}^m X_{ij} * W_{X_{ij}} \quad (\text{IV.8})$$

Où m: le nombre des réponses.

Étape 4 : La valeur la plus élevée de l'MRPI pour un paramètre particulier du processus indique le niveau optimal de ce paramètre (Rang).

Les résultats sont exposés au tableau IV.7 et à la figure IV.8. Le régime optimal est consigné au tableau IV.8.

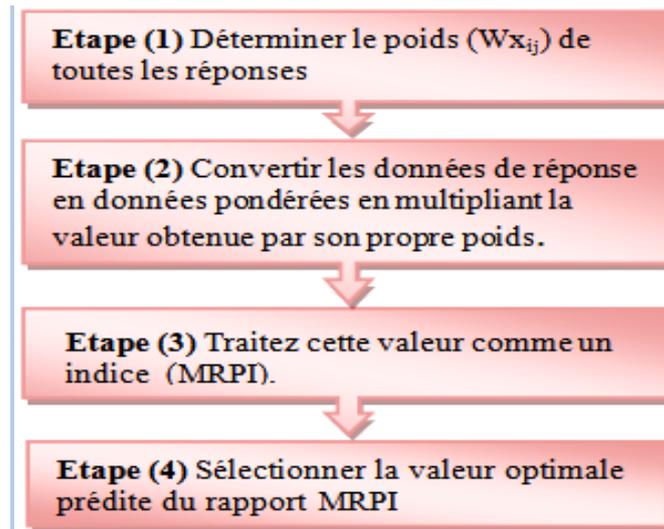


Figure IV.7 Organigramme des étapes de la méthode DEAR.

Tableau IV.7 Poids ($W_{x_{ij}}$) et le (MRPI) de chaque expérience

N°	Poids			MRPI	Rang
	Ra	Rz	MRR		
1	0,18693	0,03624	0,01749	1,42971	6
2	0,00134	0,06216	0,05108	0,06176	15
3	-0,09193	0,08099	0,07151	0,71284	11
4	0,19104	0,03416	0,02722	1,67120	5
5	0,02365	0,05856	0,06081	0,52805	12
6	-0,07795	0,07668	0,08124	1,22386	7
7	0,19260	0,03777	0,05293	2,31354	4
8	0,01482	0,06393	0,07880	1,19306	8
9	-0,06422	0,07652	0,05891	0,12561	14
10	0,25027	0,02189	0,04695	3,47921	1
11	0,04698	0,05330	0,03249	-0,13303	17
12	-0,08033	0,07924	0,06064	0,21296	13
13	0,23858	0,02248	0,04580	3,17850	2
14	0,04336	0,05375	0,07168	1,16463	9
15	-0,06651	0,07757	0,05179	-0,14897	18
16	0,20673	0,03297	0,06380	3,05127	3
17	0,01772	0,06056	0,04935	0,05968	16
18	-0,03306	0,07122	0,07750	0,96700	10

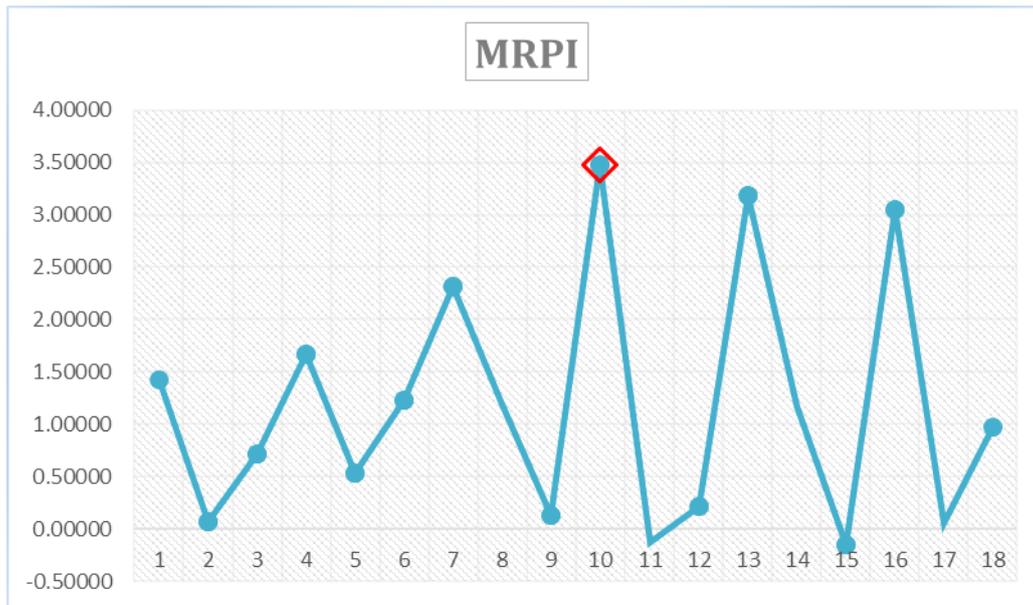


Figure IV.8 Valeurs de l'indice MRPI pour les différents essais

Tableau IV.8 Régime optimal pour la méthode DEAR couplée avec S/N

N° Essai	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Lub	Ra (µm)	Rz (µm)	MRR (cm 3/min)
10	160	0,08	0,45	MQL	0,268	1,667	5,76

IV.3.2 Méthode DEAR sans rapport signal/bruit

Dans cette méthode, une combinaison de réponses originales est transformée en un rapport, de sorte que les niveaux les plus appropriés peuvent être calculés sur la base de ce rapport. La valeur peut être considérée comme un indice de performance multi réponses (MRPI) pour calculer les combinaisons optimales des paramètres d'entrée. Les étapes suivantes sont impliquées dans la méthodologie de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données [26].

- **Étape 1 :** Déterminez les poids (w) pour chaque réponse pour toutes les expériences. Le poids de la réponse est le rapport entre la réponse à tout essai et la somme de toutes les réponses.

$$W_{MRR_i} = \frac{MRR_i}{\sum_{i=1}^n MRR_i} \quad (\text{IV.8})$$

$$W_{Ra_i} = \frac{\frac{1}{Ra_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Ra_i}} \quad (\text{IV.9})$$

$$W_{Rz} = \frac{\frac{1}{Rz_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Rz_i}} \quad (\text{IV.10})$$

- **Étape 2 :** Transformez les données de réponse en données pondérées en multipliant les valeurs expérimentales avec son propre poids.

$$MRR = MRR \times W_{MRR} \quad (\text{IV.11})$$

$$Ra = Ra \times W_{Ra} \quad (\text{IV.12})$$

$$Pc = Rz \times W_{Rz} \quad (\text{IV.13})$$

- **Étape 3 :** Divisez les données comme suit : plus c'est grand, mieux c'est, et plus c'est petit, mieux c'est.
- **Étape 4 :** Traitez cette valeur (MRPI) comme un indice de performance multi réponses.

$$MRPI = \frac{MRR}{Ra + Rz} \quad (\text{IV.14})$$

MRPI est le rapport entre la somme des données des paramètres de maximisation et la somme des données des paramètres de minimisation. Dans la présente étude, le paramètre à maximiser est le débit du copeau enlevé (MRR), par contre la rugosité de surface (Ra) et (Rz) sont les paramètres à minimiser.

La valeur de MRPI de chaque essai avec différentes combinaisons des paramètres a été calculée en utilisant l'approche Taguchi - DEAR. Une fois que l'indice de performance multi réponses (MRPI) est calculé (Tableau IV.9), la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est faite sur la base de la valeur MRPI la plus élevée qui est proche de la valeur normalisée idéale correspondant à la combinaison optimale. Dans notre cas, le (tableau IV.9) indique que le régime N°6 est classé en première position, il est considéré comme régime optimal car il possède la plus grande valeur de l'indice MRPI (13.674). Les valeurs du régime optimal ainsi que les sorties optimisées sont mentionnées dans le tableau IV.10.

Tableau IV.9 Indices de performance multi réponses MRPI

N°	W(Ra)	W (Rz)	W (MRR)	MRPI	rang
1	0.0908	0.0783	0.0111	0.15134376	18
2	0.0342	0.0427	0.0390	1.47153014	12
3	0.0209	0.0275	0.0837	6.63492578	5
4	0.0928	0.0822	0.0160	0.27648643	17
5	0.0384	0.0465	0.0561	3.00452782	7
6	0.0225	0.0304	0.1203	13.6742008	1
7	0.0936	0.0756	0.0418	1.68422684	10
8	0.0367	0.0410	0.1098	11.4051305	2
9	0.0242	0.0306	0.0523	2.61248289	9
10	0.1268	0.1095	0.0334	1.09014297	14
11	0.0435	0.0526	0.0195	0.39337793	16
12	0.0222	0.0287	0.0558	2.96774138	8
13	0.1192	0.1080	0.0320	1.00396413	15
14	0.0427	0.0520	0.0842	6.71769528	4
15	0.0239	0.0298	0.0401	1.54957241	11
16	0.1008	0.0845	0.0627	3.74701806	6
17	0.0373	0.0444	0.0366	1.29745349	13
18	0.0285	0.0346	0.1046	10.34795	3

Tableau IV.10 Régime optimal pour la méthode DEAR sans S/N

N° Essai	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Ap (mm)	Lub	Ra (μm)	Rz (μm)	MRR (cm^3/min)
6	230	0.2	0.45	à sec	1.507	5.989	20.7

IV. 4 Méthode de valeur indexée de proximité (PIV)

Les étapes pour suivre la méthode PIV sont les suivantes : [27]

Étape 1 : déterminer les valeurs de conversion conformément à la formule :

$$y'_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n Y_{ij}^2}} \quad (\text{IV.15})$$

Étape 2 : Calculez la valeur normalisée conformément à la formule.

$$Y = w_j \cdot y'_{ij} \quad (\text{IV.16})$$

Étape 3 : Évaluer l'indice de proximité pondéré selon la formule suivante.

$$u_i = \begin{cases} Y_{max} - Y_i & \text{for } C_1, C_1, \dots, C_n \in B \\ Y_i - Y_{min} & \text{for } C_1, C_1, \dots, C_n \in C \end{cases} \quad (\text{IV.17})$$

Où, B représente le critère aussi grand que possible, et C représente le critère aussi petit que possible.

Étape 4 : Déterminez la valeur de proximité globale conformément à la formule.

$$d_i = \sum_{j=1}^n u_i \quad (\text{IV.18})$$

Étape 5 : Classez les options en partant du principe que l'option avec (di) le plus petit est la meilleure.

Dans le tableau **IV.10** sont consignées les valeurs du calcul réalisé ainsi que l'indice (di). Le régime N°16 est considéré comme régime optimal car il possède la valeur la plus petite de (di), di=0.0226. Les valeurs du régime optimal ainsi que les sorties optimisées sont mentionnées dans le tableau **IV.11**.

Tableau IV.11 Résultats des valeurs indexées de proximité (PIV)

N°	Ui(Ra)	Ui(Rz)	Ui(MRR)	di	Rang
1	0.002193	0.003016	0.036033	0.041243	9
2	0.015002	0.011833	0.026824	0.053659	14
3	0.028017	0.022552	0.012088	0.062657	15
4	0.002028	0.002516	0.034422	0.038965	7
5	0.012726	0.010268	0.021183	0.044177	10
6	0.025638	0.019663	0	0.0453	11
7	0.001966	0.003403	0.025903	0.031271	6
8	0.013595	0.012652	0.003454	0.029701	4
9	0.023465	0.019563	0.022449	0.065477	16
10	0	0	0.028666	0.028666	2
11	0.010615	0.008203	0.033271	0.052088	13
12	0.026031	0.021346	0.021298	0.068675	17
13	0.000352	0.000105	0.029126	0.029583	3
14	0.010926	0.008371	0.011915	0.031212	5
15	0.023817	0.020236	0.026478	0.070531	18
16	0.001428	0.002238	0.018995	0.022661	1
17	0.013305	0.011119	0.02763	0.052054	12
18	0.019078	0.016405	0.005181	0.040664	8

Tableau IV.12 Régime optimal pour la méthode MRPI sans S/N

N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Lub	Ra (μm)	Rz (μm)	MRR (cm^3/min)
16	300	0.08	0.45	MQL	0.337	2.159	10.8

IV.5 Comparaison des méthodes d'optimisation

Le tableau IV.13 récapitule les régimes optimaux ainsi que les sorties optimisées trouvés par les trois méthodes d'optimisation (DF, DEAR et PIV). L'analyse des résultats trouvée montre que les deux méthodes d'optimisation (DF et PIV) donnent le même régime de coupe ($V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr, $a_p = 0.45$ mm avec lubrification MQL) mais les sorties sont différentes. La méthode (DF) a donné des meilleurs résultats que ceux de la méthode (PIV) en termes de qualité et de productivité. Cependant, les deux cas de la méthode (DEAR) avec et sans signal bruit (S/N) ont donné des résultats complètement différents à ceux des méthodes (DF et PIV). La méthode (DEAR) avec (S/N) donnent le régime de coupe suivant : ($V_c = 160$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr, $a_p = 0.45$ mm avec lubrification MQL). Ce régime donne une meilleure

rugosité de surface ($R_a=0.268 \mu\text{m}$ et la plus faible valeur du $MRR= 5.76 \text{ cm}^3/\text{min}$). Par contre, la méthode (DEAR) sans (S/N) a donné le régime de coupe suivant : ($V_c= 230 \text{ m/min}$, $f= 0.2\text{mm/tr}$, $a_p= 0.45 \text{ mm}$ avec usinage à sec). Ce régime a favorisé la productivité avec un $MRR= 20.7 \text{ cm}^3/\text{min}$, mais la rugosité de surface est maximale ($R_a=1.507 \mu\text{m}$). Pour conclure, la méthode (DEAR) avec (S/N) a favorisé la qualité de surface tout en négligent la productivité. Par contre, la méthode (DEAR) sans (S/N) a favorisé la productivité tout en négligent la qualité de surface.

Tableau IV.13 Comparaison des méthodes d'optimisation

Méthodes d'optimisation	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	Lub	R_a (μm)	R_z (μm)	MRR (cm^3/min)
Désirabilité	300	0.08	0.45	MQL	0.259	1.816	12.188
DEAR avec (S/N)	160	0,08	0,45	MQL	0,268	1,667	5,76
DEAR sans (S/N)	230	0.2	0.45	à sec	1.507	5.989	20.7
PIV	300	0.08	0.45	MQL	0.337	2.159	10.8

Conclusion générale

Cette étude vise à étudier l'usinage de l'acier AISI 52100 (100Cr6) dans un environnement à sec et avec minimum de quantité de lubrification (MQL) en utilisant une plaquette en céramique noire, le but est réaliser une étude statistique suivie par une modélisation et une optimisation des conditions de coupe. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

1. Les résultats de l'ANOVA pour (Ra et Rz) et (MRR) ont montré que le modèle trouvé est significatif et que l'avance (f) est le facteur qui a le plus grand effet sur (Ra) car la valeur de la probabilité (P) inférieure à 0,05, il possède une contribution 96.06%. Le deuxième facteur significatif sur (Ra) est le mode de lubrification (Lub) avec un pourcentage de contribution de 1.22%. Finalement, la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap) ne sont pas significatives car leur valeur de la probabilité (P) est supérieure à 0,05.
2. Pour le facteur (Rz), l'analyse des résultats montre aussi que le facteur (f) est le facteur le plus important qui affecte (Rz), sa contribution est de 95,14%. Il est suivi par le mode de lubrification (Lub) avec une contribution de 1,64%. Les facteurs (Vc) et (ap) ne sont pas significatifs car les valeurs de la probabilité (p) sont inférieures à 0,05.
3. Pour le (MRR) les facteurs (f et ap), montrent une pente plus grande, ce qui signifie que ces deux facteurs ont une influence significative sur le (MRR). La pente de (Vc) est très faible comparée à celles de (ap et f).
4. L'optimisation avec la fonction de désirabilité a donné les régimes de coupe optimaux suivants :
 - ✓ **1^{er} Cas** : Vc= 300 m/min, f=0.08 mm/t, ap= 0.450mm. Ra=0.259 μm , Rz=1.816 μm , MRR=12.188 cm^3/min , DF=0.934.
 - ✓ **2^{er} Cas** : Vc= 300 m/min, f=0.123 mm/t, ap= 0.450mm. Ra=0.76 μm , Rz=3.670, μm MRR=16.030, cm^3/min DF=0.710.
 - ✓ **3^{er} Cas** : Vc= 300 m/min, f=0.08 mm/t, ap= 0.450mm, Ra=0.259 μm , Rz=1.816 μm , MRR=12.188 cm^3/min , DF=0.809.
5. L'optimisation avec la Méthode (DEAR) a abouti aux régimes de coupe suivants :
 - ✓ **DEAR avec S/N (MQL)**: Vc= 160 m/min, f=0.08 mm, ap= 0.450mm, Ra=0.268 μm , Rz=1.667 μm , MRR=5.76 cm^3/min .
 - ✓ **DEAR sans S/N (sec)** : Vc= 230 m/min, f=0.2 mm, ap= 0.45 mm, Ra=1.507 μm , Rz=5.989 μm , MRR=20.7 cm^3/min

6. L'optimisation avec la Méthode (PIV) a abouti au régime de coupe suivant :
- ✓ $V_c = 300$ m/min, $f = 0.08$ mm/t, $a_p = 0.450$ mm, $R_a = 0.337$ μm , $R_z = 2.159$ μm , $MRR = 10.08$ cm^3/min .
7. La comparaison entre les différentes méthodes d'optimisation utilisées a montré que les deux méthodes d'optimisation (DF et PIV) donnent le même régime de coupe mais les sorties sont différentes. La méthode (DF) a donné des meilleurs résultats que ceux de la méthode (PIV) en termes de qualité et de productivité. La méthode (DEAR) avec (S/N) a favorisé la qualité de surface tout en négligeant la productivité. Par contre, la méthode (DEAR) sans (S/N) a favorisé la productivité tout en négligeant la qualité de surface.

Référence

- [1] Kahoul, N. (2012). Evaluation des performances des matériaux de coupe lors de l'usinage de la fonte grise Ft25 Magister 2012, Université du 8 mai 1945 Guelma.
- [2] Bouzid, L. (2015). Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13 Thèse de doctorat de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée. Université du 8 Mai 45 Guelma (2015).
- [3] Bouzid, L. (2015). Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13 Thèse de doctorat de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée. Université du 8 Mai 45 Guelma.
- [4] Berro A, Optimisation multi-objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2001.
- [5] Alexandre Mondelin, Modélisation de l'intégrité des surfaces usinées Application au cas du tournage finition de l'acier inoxydable 15-5PH. Thèse de l'université de Lyo
- [6] 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)
- [7] 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).
- [8] Wagner, V., Vissio, A., Chanal, H., & Duc, E. (2012). Etude de la relation entre les conditions de coupe et la morphologie des copeaux en fraisage de l'aluminium 2050.
- [9] Li, K.-M. & Liang, S.Y., 2007. Modeling of cutting forces in near dry machining under tool wear effect. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(7-8), pp.1292– 1301
- [10] Said, Z., Gupta, M., Hegab, H., Arora, N., Khan, AM, Jamil, M. et Bellos, E. (2019). Une revue complète sur la quantité minimale de lubrification (MQL) dans les processus d'usinage utilisant des fluides de nano-coupe. Le Journal international des technologies de fabrication avancées, 105 (5), 2057-2086
- [11] Anand, A., Behera, AK, & Das, SR (2019). Un aperçu sur l'usinage économique des aciers trempés par tournage dur et ses variables de processus. Revue de fabrication, 6, 4.
- [12] Said, Z., Gupta, M., Hegab, H., Arora, N., Khan, AM, Jamil, M. et Bellos, E. (2019). Une revue complète sur la quantité minimale de lubrification (MQL) dans les processus d'usinage utilisant des fluides de nano-coupe. Le Journal international des technologies de fabrication avancées, 105 (5), 2057-2086.

[13] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/mise-en-formedes-materiaux-par-usinage-42510210/assistance-cryogenique-en-usinage-bm7036/principe-de-lassistance-cryogenique-en-usinage-et-techniques-associees-bm7036niv10001.html> [Consulté le 1 mai 2023]

[14] Salur, E., Kuntoğlu, M., Aslan, A., & Pimenov, D. Y. (2021). The effects of MQL and dry environments on tool wear, cutting temperature and power consumption during end milling of AISI 1040 steel. *Metals*, 11(11), 1674.

[15] Elbah, M., et al. "Evaluation comparative des environnements d'usinage (sec, humide et MQL) en tournage dur de l'acier AISI 4140 avec des outils CC6050." *Le Journal international des technologies de fabrication avancées* 105.5-6 (2019): 2581-2597.

[16] Elbah, M., Laouici, H., Benlahmidi, S., Nouioua, M., & Yallese, MA (2019). Évaluation comparative des environnements d'usinage (sec, humide et MQL) en tournage dur de l'acier AISI 4140 avec des outils CC6050. *Le Journal international des technologies de fabrication avancées*, 105 (5-6), 2581-2597.

[17] Sampaio, MA, Machado, Á. R., Laurindo, CAH, Torres, RD et Amorim, FL (2018). Influence de la quantité minimale de lubrification (MQL) lors du tournage de l'acier trempé SAE 1045 : une comparaison avec l'usinage à sec. *Le Journal international de la technologie de fabrication avancée*, 98, 959-968.

[18] Aslan, A., Salur, E. et Kuntoğlu, M. (2022). Évaluation du rôle des régimes secs et MQL sur l'usinage et l'indice de durabilité de l'acier Strenx 900. *Lubrificants*, 10 (11), 301.

[19] Laouissi, A., Nouioua, M., Yallese, MA, Abderazek, H., Maouche, H., & Bouhalais, ML (2021). Étude d'usinabilité et optimisation multi-réponse basée sur ANN-MOALO lors de l'usinage écologique de la fonte EN-GJL-250. *Le Journal international des technologies de fabrication avancées*, 117 (3-4), 1179-1192.

[20] Nouioua, M., Yallese, MA, Khettabi, R., Belhadi, S., & Mabrouki, T. (2017). Évaluation comparative des conditions de refroidissement, y compris la technologie MQL sur les facteurs d'usinage dans une approche respectueuse de l'environnement. *Le Journal international des technologies de fabrication avancées*, 91 (9), 3079-3094.

[21] Nouioua, M., Yallese, MA, Khettabi, R., Belhadi, S., Bouhalais, ML et Girardin, F. (2017). Étude des performances du MQL, du tournage à sec et humide par la méthodologie de surface de réponse (RSM) et le réseau de neurones artificiels (ANN). *Le Journal international des technologies de fabrication avancées*, 93 (5), 2485-2504.

[22] Makhesana, M. A., Patel, K. M., & Mawandiya, B. K. (2018, April). Experimental investigations on the effect of process parameters with the use of minimum quantity solid lubrication in turning. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1943, No. 1, p. 020045). AIP Publishing LLC.

- [23] Tebassi, H., Yallese, M. A., & Belhadi, S. (2023). Optimization and Machinability Assessment at the Optimal Solutions, Across Taguchi OA, GRA, and BBD: An Overall View. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-29.
- [24] Haoues, S., Yallese, M. A., Belhadi, S., Chihaoui, S., & Uysal, A. (2023). Modeling and optimization in turning of PA66-GF30 % and PA66 using multi-criteria decision-making (PSI, MABAC, and MAIRCA) methods: a comparative study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(7-8), 2401-2421.
- [25] Haoues Sabrina, YALLESE Mohamed Athmane, BELHADI Salim, Alper UYSAL & CHIHAOUI Salim Optimisation mono et multi-objectif de l'usinage du polyamide (pa66-gf30%) en utilisant la methode taguchi-dear basee sur le rapport signal/bruit. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 84, Iss. 2, 2022
- [26] Safi, K., Yallese, MA, Belhadi, S. *et al.* Usure de l'outil, topographie de surface 3D et analyse comparative des techniques d'optimisation GRA, MOORA, DEAR et WASPAS dans le tournage de l'acier à outils pour travail à froid. *Int J Adv Manuf Technol* **121**, 701–721 (2022).
- [27] Seraj, M.; Yahya, SM; Badruddin, IA ; Anqi, AE ; Asjad, M.; Khan, ZA Optimisation multi-réponse du système de refroidissement de moteur à circuit intégré basé sur des nanofluides à l'aide de la méthode PIV floue. *Processus* **2020**, 8, 30.