

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



# **Mémoire de fin d'étude**

Présenté par : **GUESSIBI HEYTHEM**

**Master**

Option : **Construction Mécanique**

=====

***Modélisation et optimisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe lors de l'usinage avec la lubrification MQL***

=====

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

Année universitaire 2021/2022

# Dédicace

À ma très chère **mère**

Quoi que je fasse ou que je dise je ne serai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour effronté les différents obstacles

À mon très cher **père**

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

À mes frères **DJASSEM** et **MOUATEZ**, que Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite les protèges.

À mes chères amies **ATEF**, **ZICOU**, **AISSA**, **KARIM** et **DAYA** que Dieu les protèges.

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

# REMERCIEMENTS

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 votre direction.

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

Enfin, Mon 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 ; usinage à sec et usinage sous une quantité minimale de lubrification (MQL) a été réalisée. L'usinage est réalisé en tournage sur l'acier à roulement AISI 52100 par un outil en carbure métallique revêtu (GC 2015) suivant un plan de Taguchi L9. Le travail réalisé dans ce mémoire de master est divisé en deux parties. La première partie concerne une étude statistique basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée. Le but est de déterminer l'influence des facteurs d'entrée ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur les paramètres technologiques de sorties ( $F_z$ ,  $P_c$  et  $R_a$ ). 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. Aussi, des essais paramétriques comparatifs concernant l'usure en dépouille de l'outil, la rugosité de surface, l'effort de coupe, la température de coupe et la morphologie du copeau obtenu ont été effectués pour l'usinage à sec et MQL. La deuxième partie du travail est réservée à une étude d'optimisation mono et multi-objective. L'approche de Taguchi, basée sur l'analyse du rapport signal/bruit (S/N) a été utilisée afin de proposer des régimes de coupe optimaux pour chaque paramètre de sortie individuellement. L'analyse relationnelle grise (GRA) et l'approche de la fonction de désirabilité (DF) suivant plusieurs objectifs souhaités ont été appliquées afin de trouver des régimes de coupe optimaux concernant l'optimisation des paramètres ( $F_z$ ,  $P_c$  et  $R_a$ ) simultanément.

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

# Abstract

In this work, a comparative study between two modes of lubrication, namely: dry machining and machining under a minimum quantity of lubrication (MQL). The machining is carried out on the AISI 52100 rolling steel by a coated metal carbide tool (GC 2015) according to a Taguchi L9 plan. The work done in this master's thesis is divided into two parts. The first part concerns a statistical study based on analysis of variance (ANOVA) was carried out. The goal is to determine the influence of input factors ( $V_c$ ,  $f$  and  $a_p$ ) on the output technology parameters ( $F_z$ ,  $P_c$  and  $R_a$ ). The exploitation of the ANOVA results has made it possible to propose linear models that allow the prediction of output parameters for both lubrication modes. In addition, parametric comparison tests were carried out for dry and MQL machining on the bare tool wear, surface roughness, cutting force, cutting temperature and the resulting chip morphology. The second part of the work is reserved for a mono- and multi-objective optimization study. The Taguchi approach, based on S/N (signal to noise ratio) analysis, was used to provide optimal slice regimes for each output parameter individually. Grey Relational Analysis (GRA) and Desirability Function (DF) approach with multiple desired objectives were applied to find optimal cutting regimes for parameter optimization ( $F_z$ ,  $P_c$  and  $R_a$ ) simultaneously.

**Keywords:** Machining, AISI 52100 steel, ANOVA, RSM, GRA, DF, Optimization.

# INDEX DES FIGURES

## Chapitre I : Étude Bibliographique

Figure I. 1 représentation des différentes zones de l'usure de l'outil durant la phase de la formation de copeau .....	5
Figure I. 2 Caractéristiques du profil.....	7
Figure I. 3 Profil de surface tournée.....	8
Figure I. 4 Composantes des efforts de coupe.....	9
Figure I. 5 Différents copeaux produits en usinage (a) continu, (b) segmenté.....	12
Figure I. 6 Différentes zones de déformation lors de la formation d'un copeau.....	13
Figure I. 7 Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur.....	14
Figure I. 8 Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.....	16
Figure I. 9 Définition de l'espace expérimental.....	16
Figure I. 10 Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental.....	17
Figure I. 11 Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur.....	17
Figure I. 12 Définition de la surface de réponse.....	18
Figure I. 13 Structure typique de l'ANN.....	22
Figure I. 14 Technique de refroidissement pour le tournage.....	24
Figure I. 15 Opérations de tournage à sec .....	25
Figure I. 16 Résumé graphique.....	28
Figure I. 17 Tracés de surface 3D de la force radiale $F_r$ en fonction de $V_c$ , $f$ , $r_\epsilon$ , et $a_p$ D'usinage à sec, lubrifié et MQL.....	29
Figure I. 18 Effet des facteurs de coupe sur la rugosité de surface pour le tournage à sec, lubrifié et MQL.....	31
Figure I. 19 Structure RNA 3-n-1.....	32

## Chapitre II : Procédure expérimentale

Figure II. 1 Tour à charioter et à fileter modèle SN40.....	34
Figure II. 2 Variateur de vitesse.....	35
Figure II. 3 Capteur de vitesse.....	35
Figure II. 4 Eprouvette utilisée pour les essais.....	36

Figure II. 5 Plaquette et porte plaquette utilisés.....	37
Figure II. 6 Rugosimètre 2D (Surftest SJ-210).....	38
Figure II. 7 Dynamomètre (KISTLER9257 B).....	39
Figure II. 8 PC piloté par le logiciel (DYNOWARE).....	40
Figure II. 9 Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.....	40
Figure II. 10 Microscope pour la mesure de l'usure Vb (Visuel Gage 250).....	41
Figure II. 11 Pyromètre à infrarouge.....	42
Figure II. 12 Montage de système MQL.....	43
Figure II. 13 MQL contrôle.....	44
Figure II. 14 Réservoir d'huile.....	44

### **Chapitre III : Modélisation de l'effort de coupe, la puissance de coupe et la rugosité de surface**

Figure III. 1 Contributions des différents facteurs sur (Fz).....	51
Figure III. 2 Graphique des effets principaux pour (Fz).....	51
Figure III. 3 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Fz) à sec.....	52
Figure III. 4 Courbe de normalité pour (Fz), usinage à sec.....	53
Figure III. 5 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Fz) MQL.....	53
Figure III. 6 Courbe de normalité pour (Fz) MQL.....	54
Figure III. 7 Surfaces de réponse et les contours de l'effort tangentiel (Fz) pour l'usinage à sec.....	56
Figure III. 8 Surfaces de réponse et les contours de l'effort tangentiel (Fz) pour MQL.....	57
Figure III. 9 Contributions des différents facteurs sur (Pc).....	59
Figure III. 10 Graphique des effets principaux pour (Pc).....	59
Figure III. 11 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Pc) à sec.....	60
Figure III. 12 Courbe de normalité pour (Pc) à sec.....	61
Figure III. 13 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Pc) MQL.....	61
Figure III. 14 Courbe de normalité pour (Pc) MQL.....	62
Figure III. 15 Surfaces de réponse et les contours de la puissance de coupe (Pc) pour l'usinage à sec.....	63
Figure III. 16 Surfaces de réponse et les contours de la puissance de coupe (Pc) pour le MQL.....	64
Figure III. 17 Contributions des différents facteurs sur (Ra) .....	66
Figure III. 18 Graphique des effets principaux pour (Ra).....	67

Figure III. 19 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Ra) à sec.....	68
Figure III. 20 Courbe de normalité pour (Ra) à sec.....	68
Figure III. 21 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Ra) MQL.....	69
Figure III. 22 Courbe de normalité pour (Ra) MQL.....	69
Figure III. 23 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Ra) pour l'usinage à sec.....	71
Figure III. 24 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Ra) pour le MQL.....	72
Figure III. 25 Comparaison entre les valeurs de l'usure (Vb) à sec et MQL.....	73
Figure III. 26 Morphologie de l'usure en dépouille.....	73
Figure III. 27 Comparaison entre les valeurs de l'effort (Fz) à sec et MQL.....	74
Figure III. 28 Comparaison entre les valeurs de la rugosité (Ra) à sec et MQL.....	74
Figure III. 29 Comparaison entre les valeurs de la température (T°) à sec et MQL.....	75
Figure III. 30 Comparaison entre les valeurs de la puissance de coupe à sec et MQL.....	76
Figure III. 31 Copeaux produits selon les deux modes de lubrification.....	77

#### **Chapitre IV Optimisation des conditions de coupe**

Figure IV. 1 Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de l'effort (Fz).....	83
Figure IV. 2 Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (Pc).....	85
Figure IV. 3 Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (Ra).....	86
Figure IV. 4 Diagramme des rampes pour le 1er cas d'optimisation.....	93
Figure IV. 5 Graphes de la désirabilité 3D et les contours (2D) pour 1er cas (à sec).....	95
Figure IV. 6 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 1er cas (MQL).....	96
Figure IV. 7 Diagramme des rampes pour le 2eme cas d'optimisation.....	99
Figure IV. 8 Graphes de désirabilité 3D et les contours (2D) pour 2ème cas (à sec).....	101
Figure IV. 9 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 2ème cas (MQL).....	102
Figure IV. 10 Diagramme des rampes pour le 3eme cas d'optimisation.....	104
Figure IV. 11 Graphes de désirabilité 3D et les contours (2D) pour 3eme cas (MQL).....	105
Figure IV. 12 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 3eme cas (MQL).....	107

# INDEX DES TABLEAUX

## Chapitre I : Étude Bibliographique

Tableau I.1 Résultats expérimentaux de l'usinage de l'acier X210Cr12 .....	30
--	----

## Chapitre II : Procédure expérimentale

Tableau II. 1 Désignation de l'acier AISI 52100 selon les différentes normes .....	36
Tableau II. 2 Composition chimique de l'acier AISI 52100 .....	36
Tableau II.3 Caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 52100.....	36
Tableau II.4 Table orthogonale de Taguchi L9 .....	45
Tableau II. 5 Plan d'expérience de Taguchi (L9) pour l'usinage à sec et MQL .....	46

## Chapitre III : Modélisation de l'effort de coupe, la puissance de coupe et la rugosité de surface

Tableau III. 1 Résultats des essais pour le plan de Taguchi L9 .....	49
Tableau III. 2 Analyse de la variance pour l'effort tangentiel ( $F_z$ ). .....	50
Tableau III. 3 Analyse de la variance pour la puissance de coupe ( $P_c$ ). .....	58
Tableau III. 4 Analyse de la variance pour la rugosité ( $R_a$ ) .....	65

## Chapitre IV Optimisation des conditions de coupe

Tableau IV.1 Signal/Bruit des paramètres de sortie étudiées ( $F_z$ ), ( $P_c$ ) et ( $R_a$ ) durant l'usinage à sec et le MQL.....	81
Tableau IV.2 Moyenne des ratios (S/B) de l'effort ( $F_z$ ) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et l'Environnement MQL.....	82
Tableau IV.3 Conditions optimales de l'effort ( $F_z$ ) pour les deux modes de lubrification.....	83
Tableau IV.4 Moyenne des ratios (S/B) de la puissance ( $P_c$ ) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et l'Environnement MQL.....	84
Tableau IV.5 Conditions optimales de la puissance ( $P_c$ ) pour les deux modes de lubrification.....	85
Tableau IV.6 Moyenne des ratios (S/B) de la rugosité ( $R_a$ ) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et MQL.....	85
Tableau IV.7 Conditions optimales de la rugosité ( $R_a$ ) pour les deux modes de lubrification.....	87
Tableau IV.8 Récapitulative des résultats de l'optimisation de Taguchi basée sur (S/N).....	87
Tableau IV.9 Résultats expérimentale normalisé ( $\xi$ (k)).....	88

Tableau IV.10 Coefficients du $\xi_i(k)$ .....	89
Tableau IV.11 Qualité Rationnelle Grise (GRG).....	90
Tableau IV.12 But et gamme de paramètres pour le 1er cas d'optimisation.....	91
Tableau IV.13 Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 1er cas d'optimisation.....	92
Tableau IV.14 But et gamme de paramètres pour le 2ème cas d'optimisation.....	97
Tableau IV.15 Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 2eme cas d'optimisation.....	98
Tableau IV.16 But et gamme de paramètres pour le 3ème cas d'optimisation.....	102
Tableau IV.17 Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 3eme cas d'optimisation.....	103

DÉDICACE	I
REMERCIEMENT	II
RÉSUMÉ	III
INDEX DES FIGURES	V
INDEX DES TABLEAUX	VIII
NOMENCLATURE	X
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1

### CHAPITRE I : Étude bibliographique

I.1 Introduction .....	4
I.2 Généralité sur la coupe de métaux .....	4
I.2.1 Usinabilité .....	4
I.2.2 Paramètre technologique d'usinage .....	5
I.2.2.1 Usure des outils .....	5
I.2.2.1.1 Influence des paramètres de coupe sur l'usure .....	5
I.2.2.2 Rugosité .....	6
I.2.2.2.1 Définition .....	6
I.2.2.2.2 État de surface en tournage .....	7
I.2.2.3 Efforts de coupe .....	8
I.2.2.3.1 Définition et intérêt de leur mesure .....	8
I.2.2.4 Vibrations en usinage .....	10
a. Les effets des vibrations sur le processus de coupe .....	10
b. Comment limiter le broutement : (la recherche de la stabilité d'usinage) .....	11
1. Action sur l'outil .....	11
2. Action sur le porte outil .....	11
3. Action sur la pièce et le porte-pièce .....	11
4. Action sur la machine .....	11
I.2.2.5 La quantité du copeau enlevée .....	12
I.2.2.6 Température de coupe .....	13
I.2.2.7 Puissance de coupe .....	14

I.2.3 Plans d'expérience .....	15
I.2.3.a Terminologie (Réponses, facteurs, niveaux) .....	15
I.2.3.b Notion d'espace expérimental .....	15
I.3 modélisation et optimisation .....	18
I.3.1 Méthode de Taguchi .....	19
I.3.2. Méthodologie de surface de réponse (MSR) .....	20
I.3.3. Réseau neuronal artificiel (ANN) .....	21
I.4 Lubrification en usinage .....	23
1.4.1 Importance de la lubrification .....	23
I.4.2 Les avantages de la lubrification .....	23
I.4.2 Technique de lubrification .....	24
a. Usinage à sec .....	24
b. Le système MQL .....	25
c. Cryogénie .....	26
d. Lubrification abondante .....	26
I.5 Etat d'art .....	27
I.6 Conclusion .....	32

## **CHAPITRE II : Procédure expérimentale**

II.1. Introduction .....	34
II.2. Matériels utilisés .....	34
II.2.1 Machine-outil .....	35
II.2.2 Matériau de la pièce à usiner .....	35
II.2.3. Plaquette et porte plaquette .....	36
II.2.4. Matériels de mesure .....	37
a. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité 2D .....	37
b. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme kistler) .....	38
c. Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250) .....	40
d. Mesure de la température de coupe .....	41
II.2.5 Système avec un minimum de quantité de lubrification (MQL) .....	43

II.3 Planification des expériences .....	44
II.4 Condition de coupe .....	45
II.5 Conclusion .....	46
<b>CHAPITRE III : Modélisation de l'effort de coupe, la puissance de coupe et la rugosité de surface</b>	
III.1 Introduction .....	48
III.2 Résultats des essais réalisés .....	48
III.3 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de l'effort tangentiel ( $F_z$ ) .....	49
III.3.1 Analyse de la variance pour ( $F_z$ ) .....	49
III.3.2 Graphique des effets principaux pour ( $F_z$ ) .....	51
III.3.3 Modélisation de l'effort de coupe ( $F_z$ ) .....	51
III.3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites .....	52
III.3.5 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour ( $F_z$ ) .....	54
III.4 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la puissance de coupe ( $P_c$ ) .....	57
III.4.1 Analyse de variance pour ( $P_c$ ) .....	57
III.4.2 Graphique des effets principaux pour ( $P_c$ ) .....	59
III.4.3 Modélisation de la puissance de coupe ( $P_c$ ) .....	59
III.4.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites .....	60
III.3.5 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour ( $P_c$ ) .....	62
III.5 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la rugosité ( $R_a$ ) .....	65
III.5.1 Analyse de la variance pour ( $R_a$ ) .....	65
III.5.2 Graphique des effets principaux pour ( $R_a$ ) .....	66
III.5.3 Modélisation de la rugosité de surface ( $R_a$ ) .....	67
III.5.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites .....	67
III.3.5 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour ( $R_a$ ) .....	69
III.4 Évolution des paramètres technologiques pour les deux modes de lubrification .....	72
III.5 Conclusion .....	77

#### CHAPITRE IV : Optimisation des conditions de coupe

IV.1 Introduction .....	79
IV.2 Optimisation mono-objective de Taguchi .....	79
IV.2.1 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	80
IV.2.1.1 Analyse des effets principaux sur l'effort tangentiel (Fz).....	80
IV.2.1.2 Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (Pc).....	82
IV.2.1.3 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra) .....	84
IV.2.2 Récapitulative des résultats de l'optimisation mono-objective.....	86
IV.3 Optimisation par la Méthode d'Analyse Relationnelle Grise (GRA) .....	86
IV.4 Optimisation par la fonction désirabilité.....	89
IV.4.1 Cas d'optimisation étudiés.....	90
IV.5 Conclusion.....	105
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	106
PERSPECTIVES.....	108
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	109

## Nomenclatures

<b>Vc</b>	Vitesse de coupe [m/min]
<b>f</b>	Avance par tour [mm/tr]
<b>ap</b>	Profondeur de passe [mm]
<b>Fx (Fa)</b>	Effort de coupe axial [N]
<b>Fy (Fr)</b>	Effort de coupe radial [N]
<b>Fz (Ft)</b>	Effort de coupe tangentiel [N]
<b>F<sub>rés</sub></b>	Effort de coupe résultant [N]
<b>Pc</b>	Puissance de coupe [W]
<b>Kc</b>	Effort spécifique (Pression de coupe) [MPa] ou [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>HB</b>	Dureté Brinell
<b>Ra</b>	Rugosité moyenne arithmétique [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Rt</b>	Rugosité totale [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Rq</b>	Rugosité moyenne quadratique du profil [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Rz</b>	Profondeur moyenne de la rugosité [ $\mu\text{m}$ ]
<b>VB</b>	Usure en dépouille [mm]
<b>tc</b>	Temps d'usinage [min]
<b>ANOVA</b>	Analyse de la variance
<b>Cont.%</b>	Pourcentage de contribution
<b>F</b>	Valeur de Fisher
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficient de détermination
<b>S/N</b>	Rapport signal sur bruit [dB]
<b>MSR</b>	Méthodologie de surface de réponse
<b>RNA</b>	Réseau de neurones artificiels
<b>GRA</b>	Analyse Relationnelle Grise
<b>GRC</b>	Coefficient relationnel gris
<b>GRG</b>	Grade relationnelle grise
<b>T°</b>	Température de coupe

## 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 le 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 d'optimisation. 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, des méthodes de modélisation et d'optimisation. Cette partie est suivie un point qui concerne l'importance de la lubrification dans l'usinage, les avantages et les modes de lubrification. Enfin, une présentation des travaux de recherche relatifs au tournage sous MQL ou sous lubrification classique, l'utilisation des plans d'expérience et des méthodes de modélisation et d'optimisation utilisées 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. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont aussi présentés d'une manière précise

avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques et statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

**Dans le chapitre trois**, une étude statistique a été établie et basée sur l'analyse de la variance des résultats trouvés afin d'explorer l'influence des différents paramètres de coupe dans les deux modes de lubrification (usinage à sec et MQL) déterminant ainsi les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles ont permis d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les paramètres étudiés (effort de coupe ( $F_z$ ), puissance de coupe ( $P_c$ ) et rugosité de surface ( $R_a$ )) lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 avec un outil en carbure revêtu GC2015. En analysant les facteurs par présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (MSR), on a utilisé deux logiciels de statistique appelés « MINITAB 18 » et « Design Expert 12 ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés afin de faire des prédictions. Le chapitre se termine par une étude des essais paramétriques concernant l'usure en dépouille de l'outil, la rugosité de surface, l'effort de coupe, la température de coupe et la morphologie du copeau obtenu, afin d'étudier l'influence du mode de lubrification et particulièrement la technique MQL.

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

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

---

# **CHAPITRE I**

---

---

**Étude**

**Bibliographique**

---

## I.1 Introduction

Le principal but pour toutes les entreprises de fabrication mécanique est d'arriver à réaliser le maximum de gain possible. Ce dernier ne peut être obtenu qu'en améliorant et maximisant la production. L'augmentation de la production à son tour ne peut avoir lieu qu'avec un développement technologique sans cesse d'une part des machines-outils, d'autre part des matériaux de coupe ayant des caractéristiques élevées en termes de : dureté, résistance mécanique, résistance à l'usure, conductivité thermique, géométrie appropriée de la partie active de l'outil de coupe. Ce but peut être réalisé en poussant plus les études sur les matériaux usinés vis-à-vis des moyens utilisés. Pour stabiliser au mieux les différents paramètres de coupe.

## I.2 Généralité sur la coupe de métaux

### I.2.1 Usinabilité

L'usinabilité est la capacité d'un matériau d'être coupé par un autre. Pour déterminer l'usinabilité d'une matière, il faut généralement identifier trois paramètres principaux.

- Classe de la matière du point de vue métallurgique et mécanique.
- Géométrie de l'arête de coupe à utiliser, niveau micro et macro.
- Matériau de coupe (nuance) et ses composants corrects, notamment carbure cémenté revêtu, céramique, CBN ou PCD, etc.

Les choix ci-dessus ont une grande influence sur l'usinabilité de la matière. Les autres facteurs importants sont les conditions de coupe, les forces de coupe, les traitements thermiques que la matière a reçus, la présence d'une croûte superficielle, la présence d'inclusions métalliques, l'attachement des outils, les conditions générales d'usinage, etc.

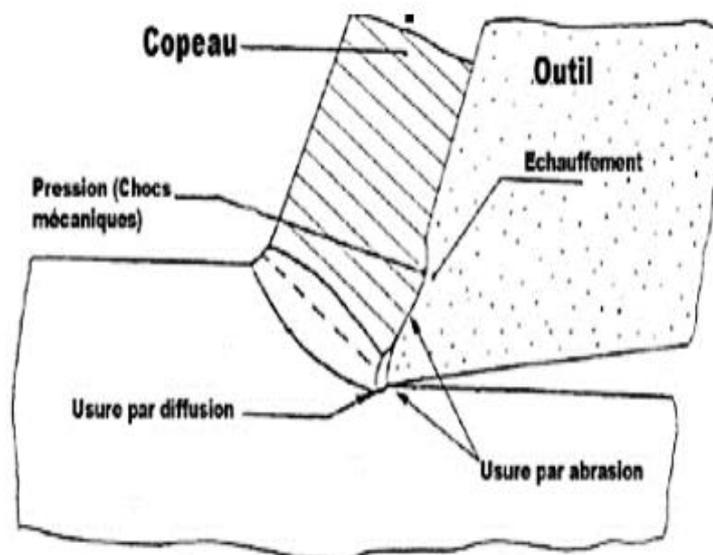
L'usinabilité n'a pas de définition formelle basée sur les nuances ou sur des chiffres. Dans son sens le plus large, l'usinabilité désigne la possibilité d'usiner une matière, l'usure qu'elle occasionne sur les arêtes de coupe et la formation des copeaux qui la caractérise. Dans ce sens, un acier bas carbone est plus facile à usiner qu'un acier inoxydable austénitique. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers inoxydables. Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une durée de vie d'outil correcte. Le plus souvent l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée

est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables [1].

## I.2.2 Paramètre technologique d'usinage

### I.2.2.1 Usure des outils

L'usure est une caractéristique utilisée souvent pour décrire l'état d'un système mécanique. Elle est une conséquence due au frottement entre deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre. Concrètement, l'usure avec ses deux composantes, l'adhésion et l'abrasion (Figure I.1). Ce phénomène peut entraîner des modifications dimensionnelles, géométriques et structurelles par une augmentation des jeux fonctionnels [2].



**Figure I.1** Représentation des différentes zones de l'usure de l'outil durant la phase de la formation de copeau [2].

#### a. Influence des paramètres de coupe sur l'usure

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et lubrification) [3]:

- **Vitesse de coupe ( $V_c$ )** : la température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure ;

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

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

### I.2.2.2 Rugosité:

#### I.2.2.2.1 Définition

La rugosité concerne les défauts micro géométriques de la surface réelle. La cotation des états de surface fait principalement référence à l'usinage par enlèvement de matière. Les défauts sont des stries et des sillons creusés par les arêtes coupantes des outils (outils de tournage, fraises, meules, etc...) [4].

- Surface géométrique

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

- Surface spécifiée

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

- Surface mesurée

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

- Surface réelle

Surface obtenue au cours de la fabrication

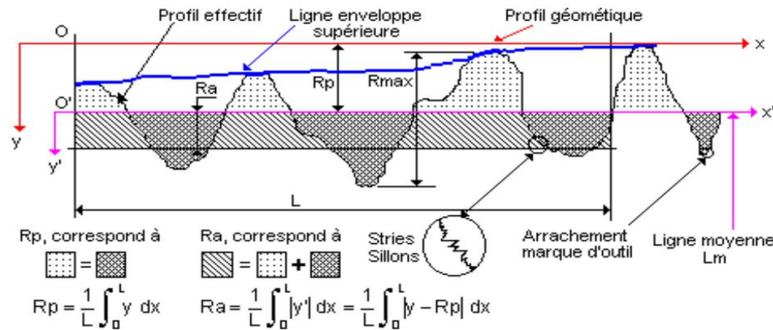


Figure I.2 : Caractéristiques du profil

- **L** : Longueur de base du profil moyen
- **R<sub>p</sub>** : 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<sub>a</sub>** : Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y'(entre chaque point de la courbe et l'axe Ox').

#### I.2.2.2.2 État de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par la Figure I.3. Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maximale du profil de rugosité  $R_{max}$  et donné par [4]:

$$R_{max} = \frac{f^2}{(8 \times r)} \tag{I.1}$$

$R_{max}$  : la rugosité maximale en millimètre;

$f$  : l'avance en millimètre;

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

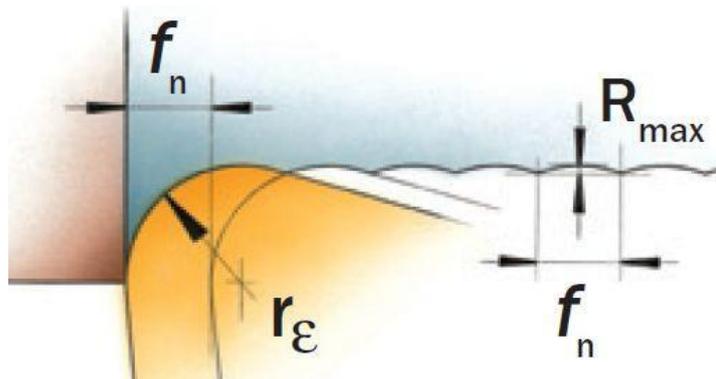


Figure I.3 : Profil de surface tournée.

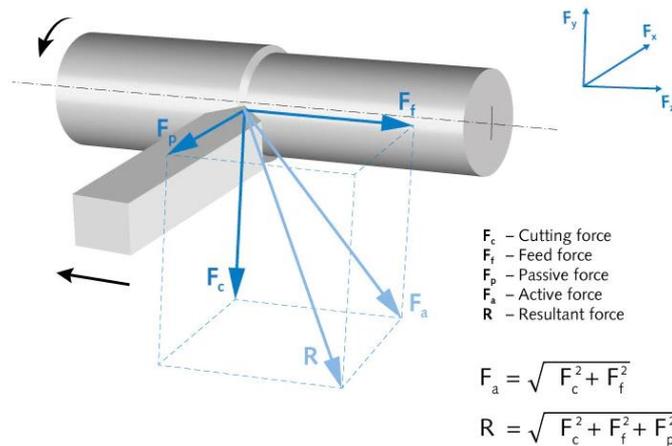
### I.2.2.3 Efforts de coupe

L'effort de coupe est la résistance opposée par le matériau à l'intrusion de l'outil de coupe. Les directions et amplitudes de l'effort diffèrent en fonction des procédés de coupe (tournage, fraisage, perçage, etc.) effectués sur les machines d'usinage (souvent à commande numérique). Ces efforts de coupe hautement dynamiques peuvent être mesurés et analysés en vue de l'optimisation des processus de coupe [5].

#### I.2.2.3.1 Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe  $F_{rés}$ , peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes (Figure I.4) [6].

- **F<sub>x</sub> ou F<sub>a</sub>** : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.
- **F<sub>y</sub> ou F<sub>r</sub>** : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.
- **F<sub>z</sub> ou F<sub>t</sub>** : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.



**Figure I.4** : Composantes des efforts de coupe [6]

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe, aussi elle est nécessaire pour l'évaluation du rendement mécanique d'une machine-outil. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machine et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau. D'après la [figure I.4](#), la force de coupe résultante  $F_{rés}$ , étant une diagonale du parallélépipède elle sera donnée par l'expression

$$F_{rés} = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \quad (I.2)$$

L'évaluation des composantes peut être donnée à travers des modèles empiriques déterminés par des méthodes statistiques à partir de résultats expérimentaux.

$$F_a = C_1 \cdot a_p^{x_1} \cdot f^{y_1} \cdot V_c^{n_1} \cdot K_a \quad (I.3)$$

$$F_r = C_2 \cdot a_p^{x_2} \cdot f^{y_2} \cdot V_c^{n_2} \cdot K_r \quad (I.4)$$

$$F_t = C_3 \cdot a_p^{x_3} \cdot f^{y_3} \cdot V_c^{n_3} \cdot K_t \quad (I.5)$$

Où les coefficients  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  sont des constantes qui dépendent des propriétés mécaniques du métal à usiner et conditions de son usinage. Les coefficients  $K_a$ ,  $K_r$ ,  $K_t$  se sont les coefficients correctifs relatifs aux conditions concrètes d'usinage. Les exposants  $x_{1,2,3}$ ,  $y_{1,2,3}$ ,  $n_{1,2,3}$ , caractérisent le degré d'influence des paramètres  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur les forces de coupes  $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ .

#### 1.2.2.4 Vibrations en usinage

Les vibrations en usinage, phénomène dit aussi broutement, du système machine-montage-outil pièce dégradant la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Un broutement important diminue la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil.

La compréhension et la maîtrise de ces problèmes ont suscité de nombreuses recherches scientifiques, principalement focalisées sur l'instabilité de la coupe dont la principale manifestation est le broutement. Elles ont permis d'identifier les causes de ces phénomènes et de proposer des modèles prédictifs. Ainsi, elles ont révélé l'existence de plages de vitesses de rotation de l'outil où le comportement vibratoire de l'usinage est satisfaisant, en particulier aux hautes vitesses et ce même pour de fortes conditions d'engagement des outils de coupe. Suivant leurs origines, elles peuvent être classées en deux types : les vibrations forcées et les vibrations auto-excitées (générées par le processus de la formation du copeau) [7].

##### a. Les effets des vibrations sur le processus de coupe

Les vibrations du système (machine- porte pièce- pièce- outil- porte outil), phénomène dit aussi de broutement, qui apparaissent lors des opérations d'usinage sont les sources de multiples difficultés.

- Ils dégradent la qualité de la surface usinée.
- Ils affectent la durée de l'outil et accélèrent son usure
- Ils conduisent à une détérioration rapide de certains organes de la machine-outil (roulements- glissières...).
- Ils peuvent entraîner des dérèglages de certains organes de la machine-outil.
- Les vibrations entre la pointe de l'outil et la surface usinée engendrent sur la pièce des défauts géométriques qui peuvent amener à rebuter la pièce (du point de vue des côtes).
- Les vibrations importantes diminuent la productivité et rendent même parfois impossible l'opération sur la machine-outil.
- Ils peuvent être aussi une source de fatigue et de gêne pour l'opérateur.

- L'augmentation des performances des outils, l'apparition de nouveaux matériaux difficilement usinables rendent ces problèmes de plus en plus aigus, les machines étant alors souvent poussées au maximum de leurs possibilités [7].

**b. Comment limiter le broutement : (la recherche de la stabilité d'usinage)**

La stabilité d'usinage est le résultat de plusieurs stabilités composées :

Pièce, machine-outil, système d'ablocage, outil, et conditions d'usinage [7].

**1. Action sur l'outil :** La stabilité de l'outil est assurée par :

- Une longueur de porte-à-faux minimale.
- Une fixation sûre et suffisante de l'outil.
- Une liaison rigide et efficace avec le porte-outil.
- Un choix de section d'outil optimale.
- Le maintien de l'arête de coupe en bon état.
- Un entretien approprié de l'outil utilisé (changement des composants endommagés, nettoyage de la surface d'assise de la plaquette etc...).
- L'utilisation d'un outil et d'un matériau de coupe adaptée de manière optimale.
- L'augmentation de l'angle d'attaque pour diminuer les efforts de coupe.
- La réduction de la longueur d'arête en prise.
- La réduction du rayon du bec de l'outil en tournage.

**2. Action sur le porte outil :**

- Choisir un porte outil assurant une trajectoire dégageant.
- Choisir un porte outil rigide.

**3. Action sur la pièce et le porte-pièce :**

- Réduire au maximum les porte-à-faux.
- Utiliser des porte-pièces rigides.
- Supporter les pièces flexibles par des vérins ou des lunettes.

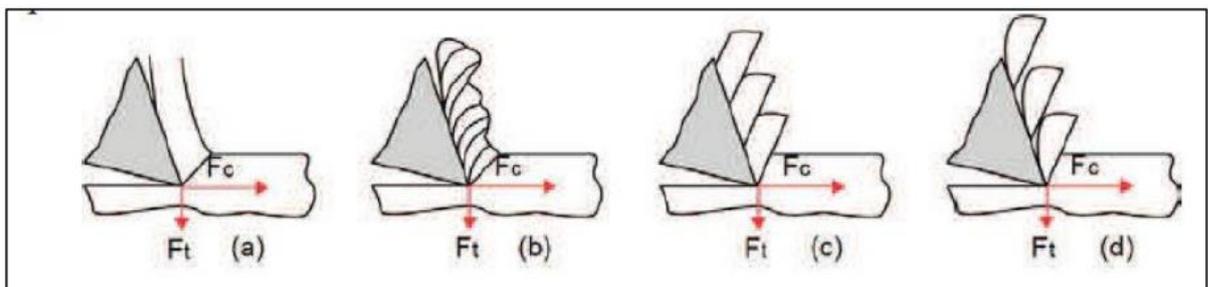
**4. Action sur la machine :**

- Réduire les jeux fonctionnels dans les broches et les glissières.
- Choisir la rigidité de la machine en fonction des conditions de travail.

### I.2.2.5 La quantité du copeau enlevée

L'étude de la formation des copeaux a débuté au début du vingtième siècle avec les premiers travaux de (Taylor 1907) et de (Mallock 1881). Depuis, de nombreux travaux se sont succédé afin d'expliquer la formation des copeaux et classifier leurs types.

On retrouve les copeaux continus dans lesquels les sollicitations sont constantes (Figure I.5 (a)); les copeaux segmentés qui sont des copeaux continus où apparaissent des bandes de cisaillement et dont l'épaisseur varie avec le temps (b); les copeaux festonnés formés dans un état de déformation plastique instable (c); et les copeaux discontinus obtenus quand chaque segment se brise (d)). La norme ISO/DIS 3685 prévoit de classifier les copeaux en fonction de leurs morphologies [8].



**Figure I.5** Différents copeaux produits en usinage **(a)** continu, **(b)** segmenté, **(c)** festonné, **(d)** discontinu

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 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) :

$$Q = V_c \times f \times a_p \quad (I.6)$$

Où  $V_c$  : Vitesse de coupe ;  $f$  : vitesse d'avance et  $a_p$  : profondeur de passe [8].

### I.2.2.6 Température de coupe

La formation du copeau dans des conditions d'UGV et l'usinage des pièces dures, met en jeu de très grandes vitesses de déformation et les matériaux sont fortement sollicités. Pour faire le lien avec l'usure des outils, les sollicitations thermiques doivent être étudiées. Depuis de nombreuses années, l'aspect thermique de la coupe a donc été largement étudié. Pourtant, à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu en usinage, il est très difficile de prédire l'intensité et la distribution des sources de chaleur. Les processus mécaniques et thermiques sont extrêmement couplés, en particulier parce que les propriétés des matériaux varient avec la température. On indique souvent que 90 à 100 % de l'énergie mécanique consommée est finalement convertie en énergie thermique [9].

Les principales sources de chaleur proviennent :

- Des déformations plastiques des zones de cisaillement primaire et secondaire
- De la dissipation du frottement générée à l'interface outil-copeau et entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée de la pièce (Figure I.6).

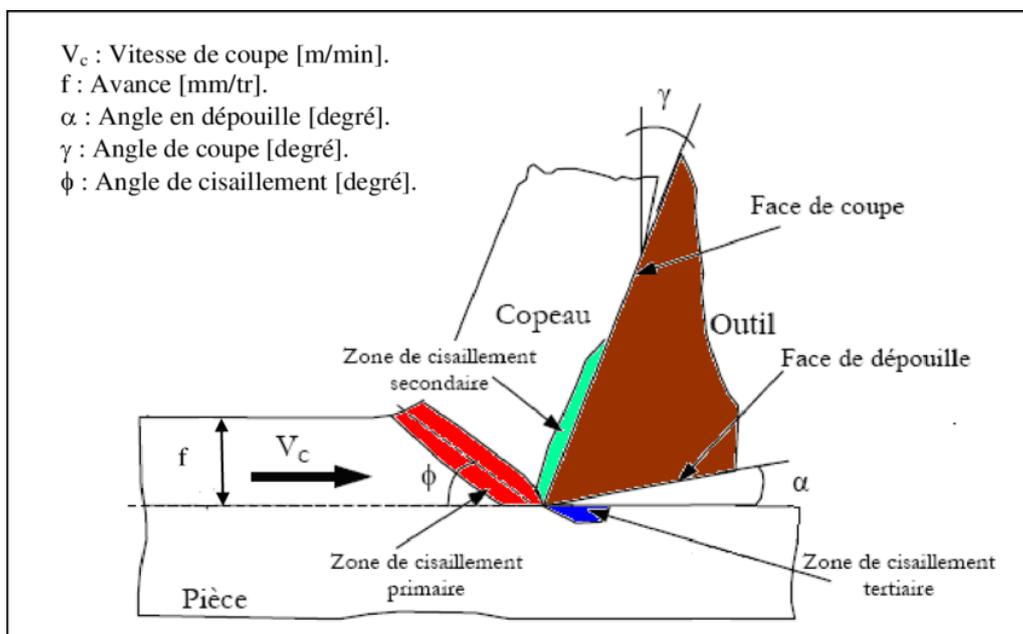
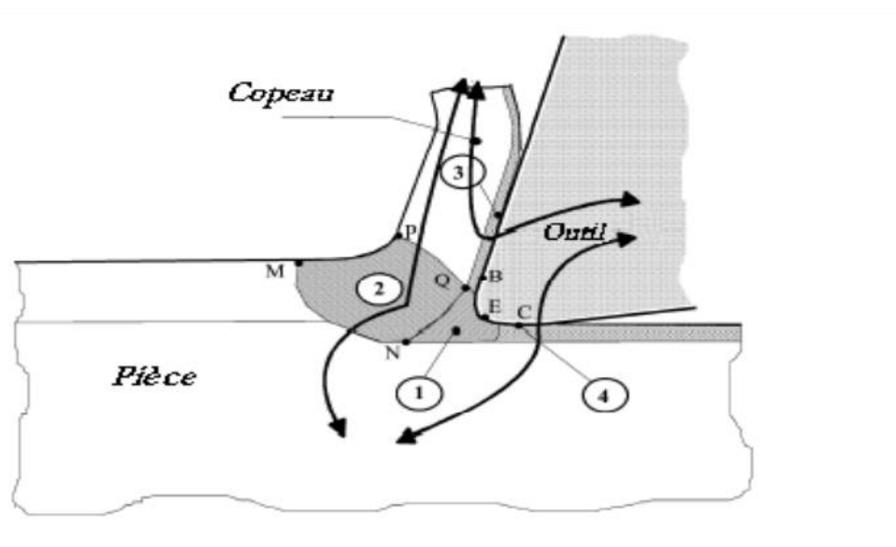


Figure I.6 Différentes zones de déformation lors de la formation d'un copeau [9]

La chaleur ainsi créée va se répartir dans les différentes parties de l'outil, de la pièce et du copeau (Figure I.7).



**Figure I.7** Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur

### I.2.2.7 Puissance de coupe

La puissance [watts] est égale au produit de la force [newtons] par la vitesse  $V$  [m/s] :

$$P = F \times V \quad (I.7)$$

On distingue généralement deux puissances :

- La puissance de coupe ( $P_c$ ) qui dépend principalement de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et de l'effort tangentiel de coupe ( $F_z$ ) ; [10]

Dans le cas d'un outil à charioter coudé, on a la relation suivante pour la puissance de coupe :

$$P_c = \frac{(F_z \times V_c)}{60} \quad (I.8)$$

Ou :

$$P_c \approx \frac{(K_a \times f \times p \times V_c)}{60} \quad (I.9)$$

### I.2.3 Plans d'expérience :

#### I.2.3.a Terminologie (Réponses, facteurs, niveaux)

Avant d'aborder l'étude des plans d'expériences, il convient de préciser le vocabulaire que nous allons utiliser. Nous nous inspirerons pour cela de la norme AFNOR X 06-080 et des usages des différentes disciplines auxquelles nous ferons appel. Un phénomène peut toujours être mis sous la forme mathématique suivante :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Avec :  $Y_i$  : grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur : cette grandeur est appelée la réponse ou la grandeur d'intérêt ;

$X_i$  : variables sur lesquelles l'expérimentateur peut agir ; ces variables peuvent être continues ou discontinues ; on les appelle les facteurs ; les plans d'expériences permettent d'étudier l'influence d'un grand nombre de facteurs sans multiplier exagérément le nombre des essais ;

$f$  : fonction mathématique qui explique le mieux les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux  $X_i$ . Dans le cas des plans d'expériences, cette fonction mathématique est souvent un polynôme dont nous préciserons la forme dans les paragraphes suivants.

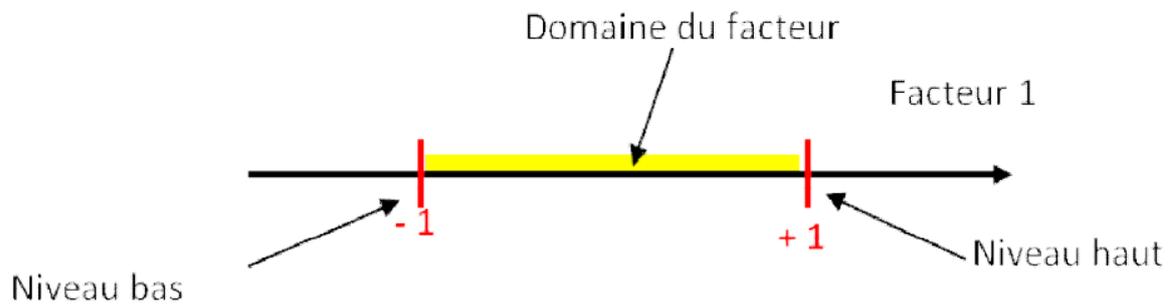
Lorsque l'on étudie un facteur  $X_i$ , par exemple l'usure en dépouille ( $V_b$ ), on ne le fait pas varier dans de larges proportions. On définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par deux bornes [11].

#### I.2.3.b Notion d'espace expérimental

Supposons qu'un expérimentateur lance une étude. Il s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » nous emploierons le mot facteur. On dit que la réponse dépend de plusieurs facteurs. [11]

Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (figure I.8). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsque l'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes :

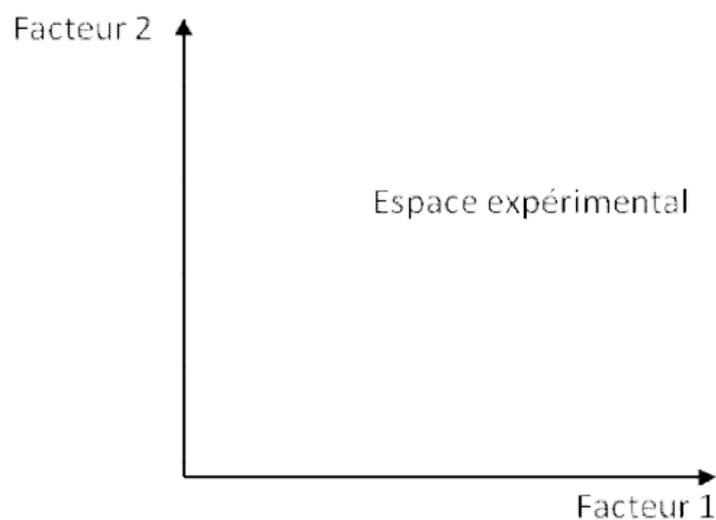
- la borne inférieure est le niveau bas ;
- la borne supérieure est le niveau haut.



**Figure I.8** Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut

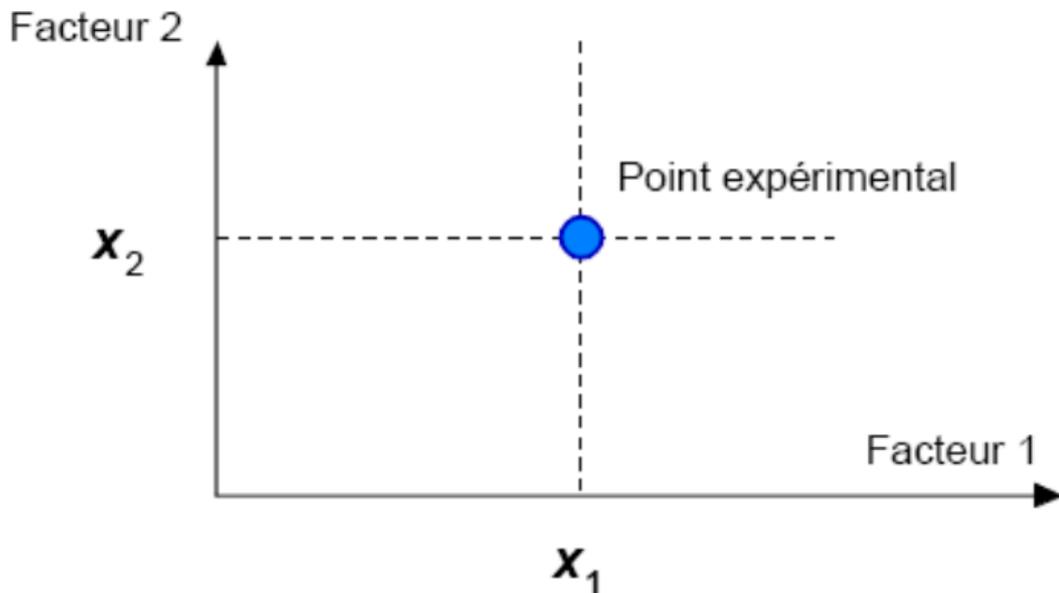
L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur, ou plus simplement, le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par  $-1$  et le niveau haut par  $+1$ .

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (figure I.9)



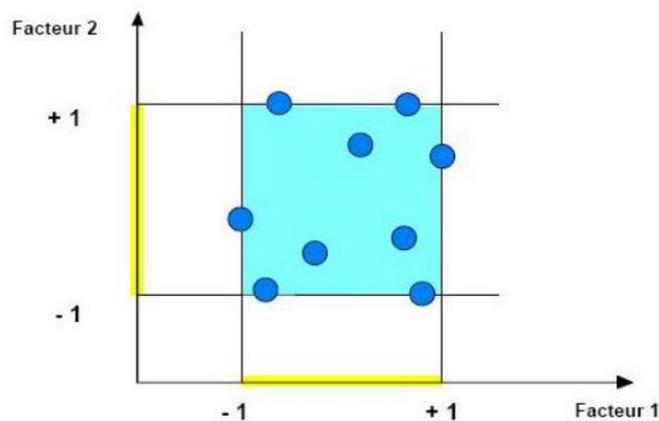
**Figure I.9** Définition de l'espace expérimental

Le niveau  $X_1$  du facteur 1 et le niveau  $X_2$  du facteur 2 peuvent être considéré comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (figure I.10). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.



**Figure I.10** Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental

La réunion des domaines de chaque facteur définit le « domaine d'étude ». Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (figure I.11)



**Figure I.11** Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur

Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude. La définition que nous venons de donner s'applique bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables qui ne sont pas continués. [11]

Les niveaux  $X_i$  représentent les coordonnées d'un point expérimental et  $Y$  est la valeur de la réponse en ce point. On attribue à la réponse un axe orthogonal à l'espace expérimental. La représentation géométrique d'un plan d'expériences et des réponses associées nécessite donc un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. La représentation géométrique des résultats d'un plan à deux facteurs nécessite un espace à trois dimensions : une pour la réponse, deux pour les facteurs.

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (figure I.12).

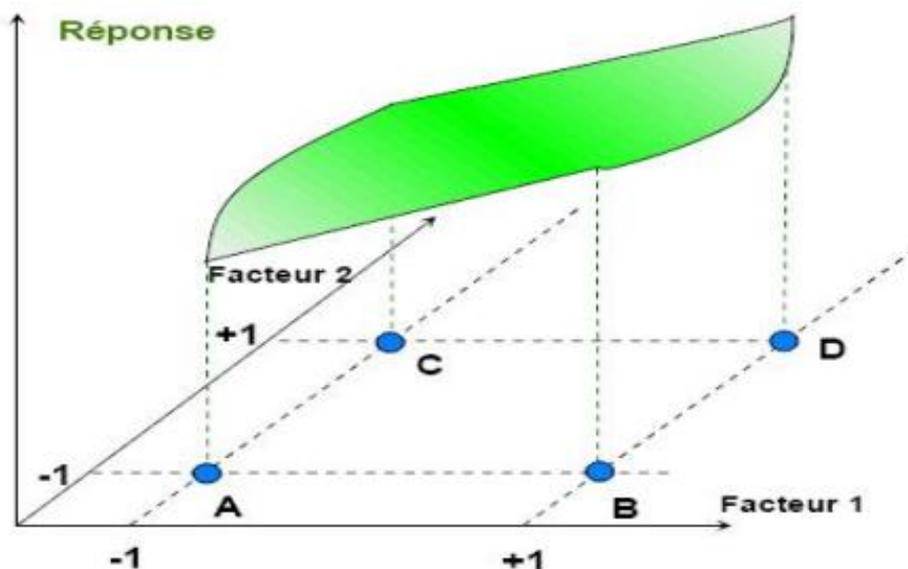


Figure I.12 Définition de la surface de réponse

### I.3 modélisation et optimisation

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 tel que le temps machine ou le coût

total d'opération. L'optimisation de processus d'usinage est habituellement difficile, où les aspects suivants sont exigés :

- La connaissance du processus de coupe ;
- Les équations empiriques reliant la vie d'outil, les forces, la puissance, etc., pour développer des contraintes réalistes
- Spécifications des possibilités d'usinage
- Développement d'un critère efficace d'optimisation
- La connaissance des techniques mathématiques et numériques d'optimisation

En usinage, les tâches d'optimisation sont critiques, parce qu'il comporte beaucoup de processus complexes. Habituellement, la petite variation d'un paramètre cause les changements notables des autres. D'ailleurs, quelques variables, telles que l'effort de coupe ou l'usure d'outil, dépendent fortement des conditions de coupe [12].

### **1.3.1 Méthode de Taguchi**

La méthode de Taguchi, également connue sous le nom de conception robuste de Taguchi, est une méthodologie pour concevoir les produits qui ont la sensibilité minima à la variation dans des facteurs incontrôlables. Cette méthode est basée sur des techniques conventionnelles, avec quelques directives pour des expériences de présentation et l'analyse de conception des résultats de ces expériences. La méthode de Taguchi utilise une conception spéciale des plans orthogonaux pour étudier l'espace entier de paramètre avec un nombre minimum d'expériences. La méthode de Taguchi (plan orthogonale) est largement utilisée dans l'analyse d'ingénierie et se compose d'un plan d'expérience avec un objectif d'acquérir les données d'une manière commandée, afin d'obtenir des informations sur le comportement d'un processus donné. Le plus grand avantage de cette méthode est de gagner l'effort de réalisation des expériences : gagner le temps de réalisation des expériences et économiser le coût. La méthode de Taguchi est un outil puissant pour la conception d'un système de haute qualité. Taguchi a considéré trois étapes pour le développement des processus et des produits : conception de système, conception de paramètre, et conception de tolérance. Dans la conception de système, l'ingénieur utilise les principes scientifiques et technologiques pour déterminer la configuration fondamentale. Dans l'étape de conception de paramètre, les valeurs spécifiques des paramètres de système sont déterminées. La conception de

tolérance est employée pour déterminer les meilleures tolérances pour les paramètres. En plus, le rapport (S/N) et l'analyse de la variance (ANOVA) peut être utilisé pour indiquer l'impact des paramètres de processus sur les paramètres technologiques d'usinage [13].

### 1.3.2 Méthodologie de surface de réponse (MSR)

La méthodologie des surfaces de réponses (MSR) est une technique visant à déterminer les variations de la réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative. Cette méthode permet de déterminer une relation d'approximation entre les variables d'entrée et les variables de sortie.

En effet, la réponse de sortie dépend de la variation des paramètres d'entrée. Ces derniers peuvent être représentés par des variables aléatoires qu'on note  $X_i$  avec  $i = 1, \dots, n$ . Ces variables aléatoires permettent de représenter les variations spatio-temporelles des paramètres d'entrée par des modèles mathématiques.

Ces derniers résument la relation d'approximation entre la réponse de sortie et la variable d'entrée. La représentation géométrique de cette relation d'approximation est appelée surface de réponse [14].

La construction des surfaces de réponses s'effectue suite à l'ajustement du modèle en utilisant des fonctions mathématiques telles les polynômes. La méthode des surfaces de réponses passe par trois étapes : la construction du plan expérimental, la modélisation de la réponse et les représentations graphiques. La modélisation de la réponse est réalisée à l'aide de techniques de régression qui permettent de relier une réponse «  $y$  » à un ensemble de facteurs «  $X_i$  » selon la relation suivante :

$$Y = (X_1, X_2, \dots, X_k)$$

On peut avoir une bonne approximation de cette relation par un polynôme de second degré qui permet de décrire les phénomènes étudiés. Ce modèle inclut les effets linéaires, les effets d'interaction et les effets quadratiques des facteurs. Le modèle de surface des réponses du second degré peut s'écrire de la manière suivante :

$$R_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_i X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad (I.10)$$

Où :  $X_i$  : variable de prédiction codée appelées facteurs ;  $a$  : coefficient de régression.

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des analyses statistiques sont à considérer : le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et le coefficient de détermination ajustée ( $R^2$  adj). Après l'étape de la modélisation, nous représentons les modèles graphiquement à l'aide des courbes des surfaces de réponse qui permettent d'observer le comportement des réponses en fonction des paramètres afin d'optimiser le système expérimental (paramètres de la réaction).

L'approche de la fonction désirabilité est largement utilisée par les chercheurs pour l'optimisation multi objective des réponses. L'utilisation considérable de cette approche est due en fait à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques [15].

La désirabilité permet d'évaluer l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés en fonction des réponses calculées par le modèle statistique. Les significations des paramètres de but sont [16] :

- Dans le cas de la recherche d'un maximum, la désirabilité est réécrite comme suit :
  - $d_i = 0$  si la réponse  $<$  la valeur basse
  - $0 \leq d_i \leq 1$  si la réponse varie entre la valeur basse et la valeur haute
  - $d_i = 1$  si la réponse  $>$  la valeur élevée - Dans le cas de la recherche d'un minimum,

La désirabilité est réécrite comme suit :

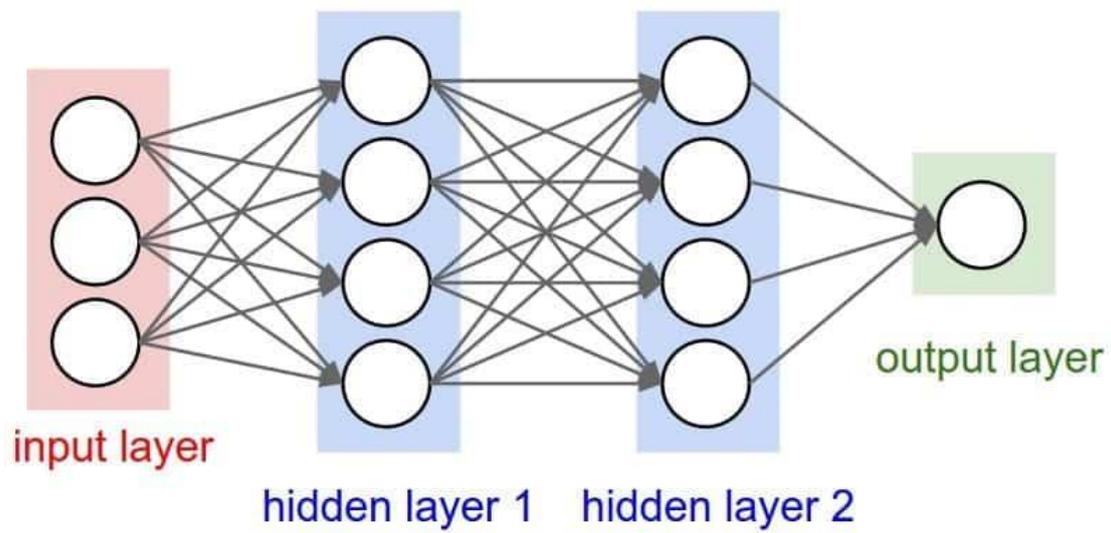
- $d_i = 1$  si la réponse  $<$  la valeur basse
- $1 \geq d_i \geq 0$  si la réponse varie entre la valeur basse et la valeur haute
- $d_i = 0$  si la réponse  $>$  la valeur élevée La fonction objective simultanée est une moyenne géométrique de toutes les réponses transformées :

$$D = (d_1 * d_2 * \dots * d_n)^{1/n} = (\prod_{i=1}^n d_i)^{1/n} \quad (\text{I.11})$$

### I.3.3 Réseau neuronal artificiel (ANN)

Analogue au principe de fonctionnement du cerveau humain, le réseau neuronal artificiel (ANN), qui repose sur l'intelligence artificielle, s'est révélé être un outil de prédiction puissant et est largement utilisé dans les industries d'usinage. La structure typique de l'ANN comprend trois couches interconnectées consécutivement comme couche d'entrée, couche cachée et couche de sortie. Les couches d'entrée et de sortie possèdent une seule couche, tandis qu'entre ces deux couches, il peut

y avoir plusieurs couches cachées en fonction de la précision souhaitée. Chaque couche contient un ou plusieurs neurones en fonction de la définition du problème [17].



**Figure I.13** Structure typique de l'ANN

## **I.4 Lubrification en usinage**

### **1.4.1 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.

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 [18].

### **1.4.2 Les 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.

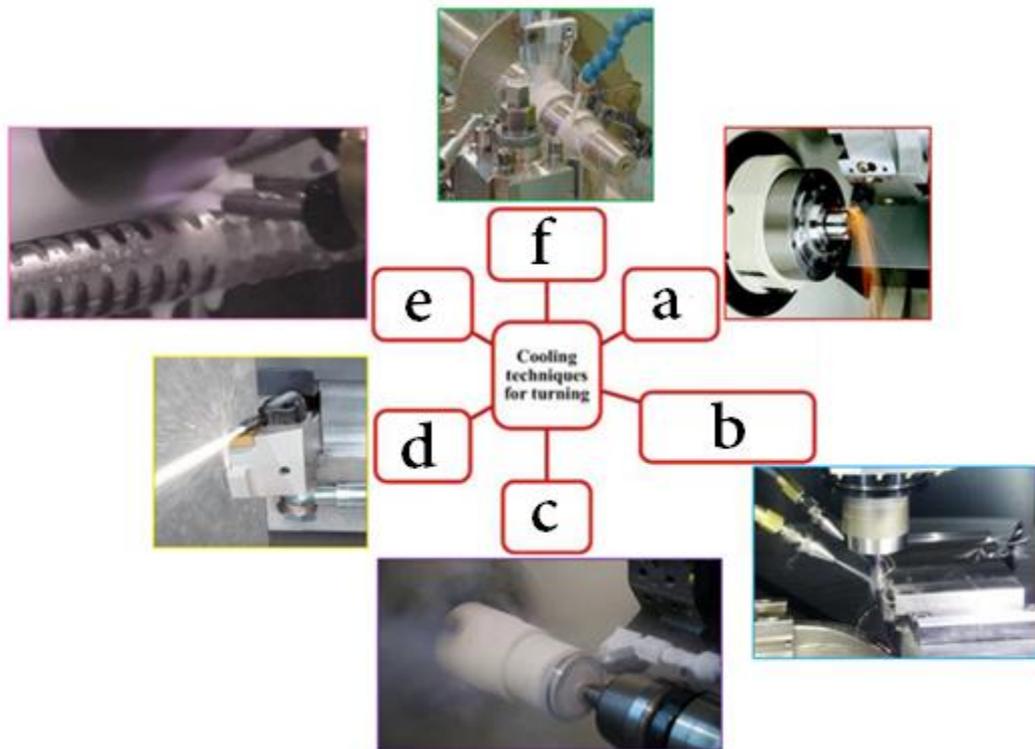
Par exemple, certaines pièces faites de matières vulnérables à la corrosion seront mieux protégées contre celle-ci si un certain type de lubrifiant a été utilisé lors de leur production. Cela permet ainsi d'obtenir une espérance de vie utile supérieure.

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 [18].

### I.4.2 Technique de lubrification

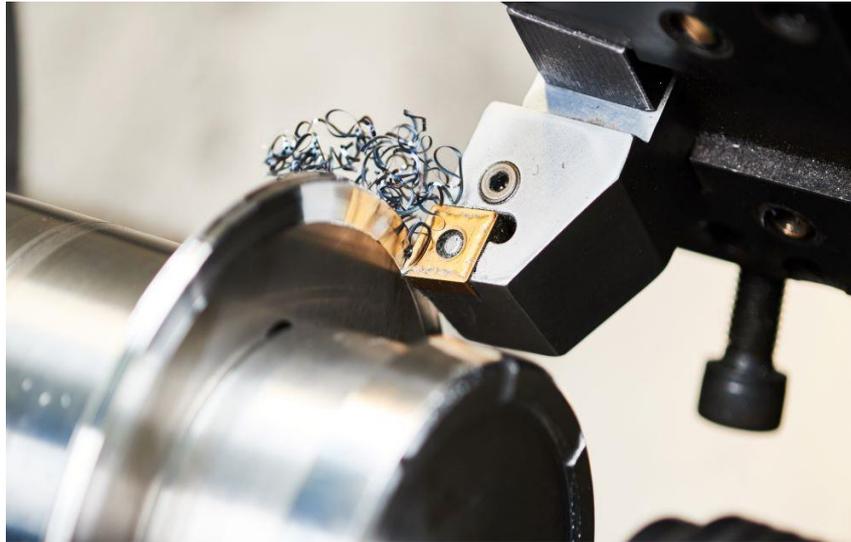
Nous pouvons le résumer dans la figure suivante :



**Figure I.14** Technique de refroidissement pour le tournage **(a)** à sec, **(b)** MQL, **(c)** Cryogénie, **(d)** lubrification à haute pression, **(e)** nano-fluide, **(f)** Lubrification abondante [19]

#### a. Usinage à sec :

L'usinage à sec (Figure I.15) est une famille de techniques de fabrication de pièces par enlèvement de copeaux dans un milieu sèche (sans lubrification). Le principe de l'usinage à sec est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision [19].



**Figure I.15** Opérations de tournage à sec

#### **b. Le 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 à 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.

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 [20].

### c. 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 [21].

### d. Lubrification abondante

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

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

Laboratoires de recherche est toujours améliorer les huiles de coupe est proposé plusieurs gamme de produit lubrifiant qui sont le plus propre pour l'environnement. Les lubrifiants deviennent à 100 % écologiques, comme le démontre à CleanMeca la société Expert Environnement, qui distribue en France le liquide d'arrosage SKV-02 de DPI sans huile ni solvant [20].

### I.5 Etat d'art

Salur et al [22] ont réalisé une étude qui se concentre sur l'évaluation des performances des méthodes de lubrification par l' MQL et l'usinage à sec lors du fraisage d'un acier AISI 1040. L'usure de l'outil, la température de coupe et la consommation d'énergie ont été considérées comme des réponses, par contre, la vitesse de coupe, l'avance et l'environnement d'usinage sont pris comme paramètres d'entrée. Pour analyser les effets des facteurs influençant le processus, les auteurs ont utilisé l'analyse de variance (ANOVA) et le diagramme de barre. Aussi, le rapport signal/bruit (S/N) de Taguchi a été utilisé pour déterminer les meilleures réponses en termes de qualité. Les résultats ont montré que le système MQL a fourni de meilleures performances par rapport au fraisage à sec a réduisant, l'usure de l'outil, la température de coupe et la consommation d'énergie. Les résultats de l'ANOVA ont montré que l'environnement de coupe affecte la température de coupe (37%) et la consommation d'énergie (94%), tandis que la vitesse de coupe a des effets importants sur l'usure de l'outil (74%). Pour garantir une usure d'outil et une consommation d'énergie minimales dans le système MQL, les auteurs proposent de maintenir une vitesse de coupe faible (100 m/min) et une avance (0,10 mm/tr). Cependant, une avance plus élevée (0,15 mm/tr) doit être sélectionné avec une faible vitesse de coupe et des conditions MQL pour assurer de meilleures températures. En dernier lieu, les auteurs ont réalisé une évaluation comparative sur l'usure de l'outil, la température de coupe, et la consommation d'énergie dans des environnements MQL et secs (Figure I.16).

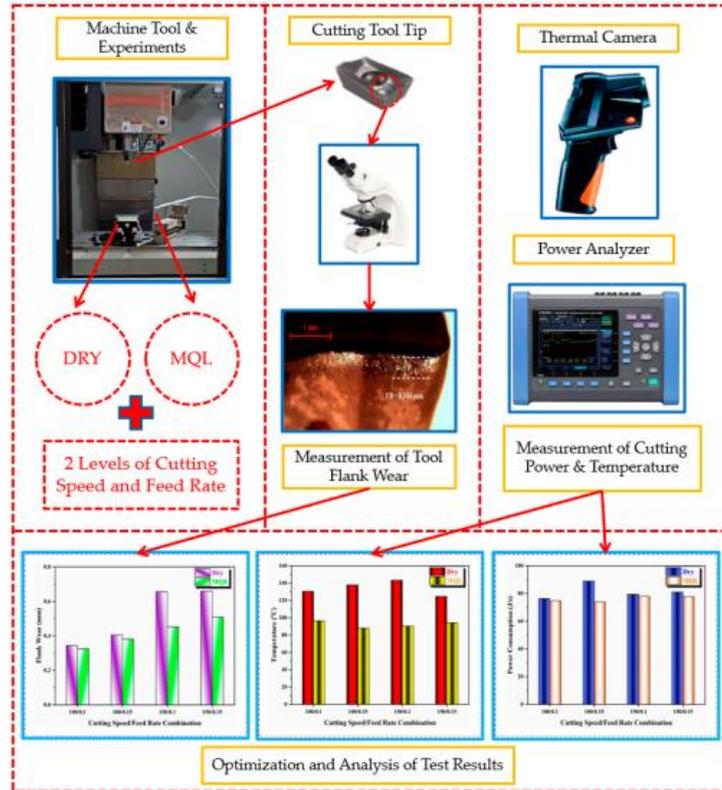
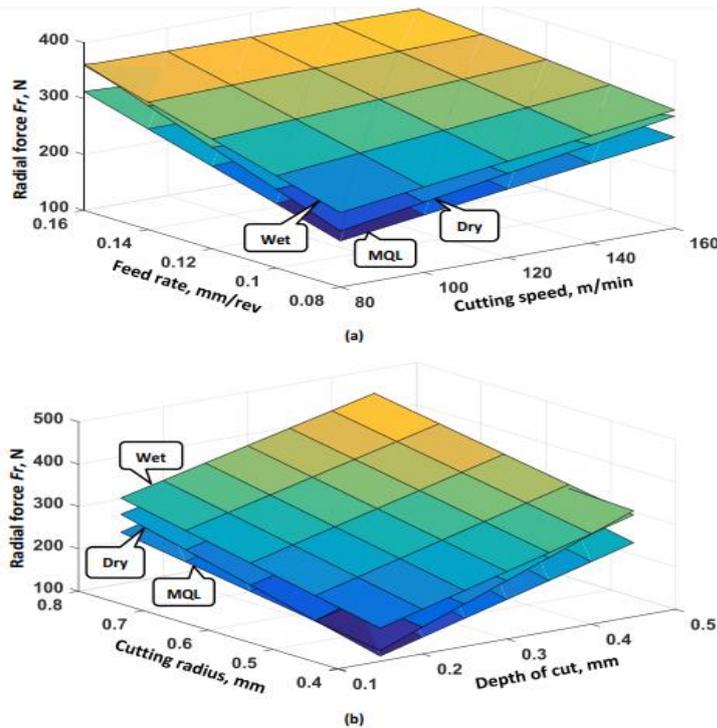


Figure I.16 Résumé graphique

Elbah et al [23]: ont présenté dans cette article l'évaluation des performances des méthode de lubrification durant le tournage dur avec un acier faiblement allié à haute résistance AISI 4140 avec une céramique mixte revêtue (CC6050). Afin d'évaluer les paramètres de sortie à savoir, la rugosité de surface, les composantes de l'effort de coupe et l'usure de l'outil, un certain nombre d'expériences d'usinage factorielles basées sur des plans d'expériences statistiques à quatre facteurs (vitesse de coupe, avance, profondeur de coupe et rayon du bec de l'outil) ont été réalisées. Les résultats ont montré que l'effort de coupe résultant obtenu avec le procédé d'usinage MQL s'est considérablement améliorée par rapport aux autres méthodes de lubrification (à sec et lubrifié). Par exemple :  $FR_{MQL} \approx 1,08 FR_{sec}$  et  $FR_{lub} \approx 1,37 FR_{sec}$ . Ensuite, le MSR a été utilisé pour définir les paramètres d'usinage optimaux. Enfin, les plages de meilleures conditions de coupe sont proposées pour une production industrielle en série (Figure I.17).



**Figure I.17** Tracés de surface 3D de la force radiale radiale  $F_r$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$ ,  $r_\epsilon$ , et  $a_p$   
D'usinage à sec, lubrifié et MQL

**Nouioua et al [24]** ont étudié l'influence de différents paramètres de coupe sur les différents facteurs d'usinage (la rugosité de surface, l'effort de coupe, la puissance de coupe, le taux d'enlèvement de copeaux et l'usure de l'outil) durant le tournage de l'acier X210Cr12 avec une plaquette en carbure de tungstène à revêtement multicouche en utilisant différentes conditions de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ), différents rayons du bec ( $r$ ) et différents environnements de lubrification (à sec, lubrifié et MQL). Les auteurs ont utilisé le tableau orthogonal de Taguchi L18 ( $21 \times 34$ ) pour concevoir les tests (Tableau I.1), déterminé l'effet des conditions de coupe à l'aide de l'ANOVA et développé des modèles mathématiques à l'aide de la méthode MSR. Les résultats trouvés par les auteurs indiquent que :

- L'avance et le rayon du bec de l'outil sont les principaux facteurs affectant la rugosité de surface, tandis que la force tangentielle et la puissance de coupe sont principalement affectées par la profondeur de coupe, suivie par l'avance et le rayon du bec.

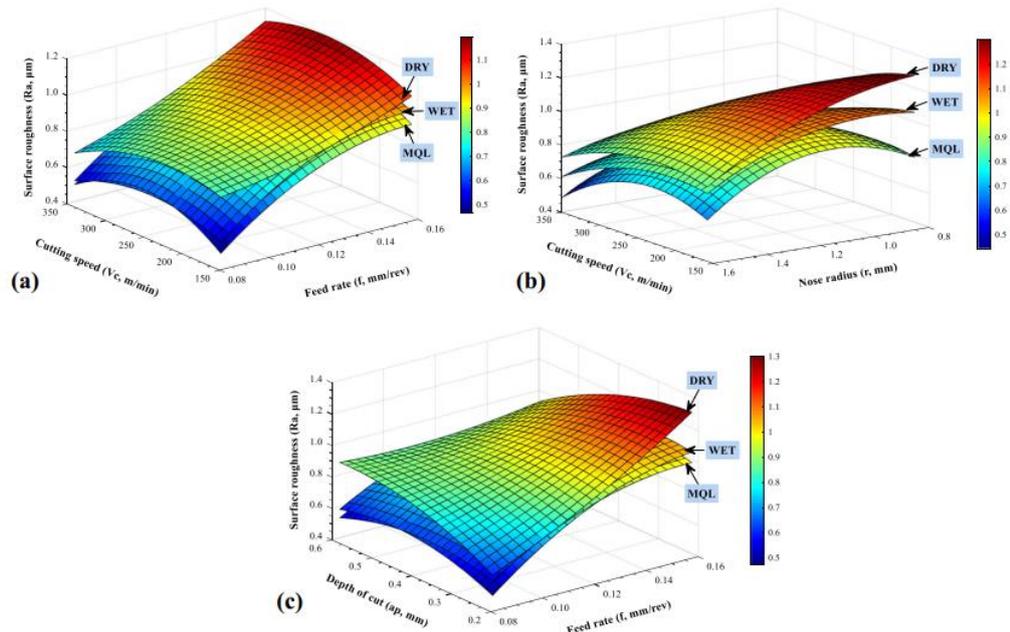
- La lubrification par quantité minimale (MQL) conduit à une amélioration importante en termes de durée de vie de l'outil de coupe par un gain de 23~40% par rapport à l'usinage à sec et lubrifié.

- Le MQL est un moyen intéressant de minimiser les coûts de lubrification et de protéger la santé des opérateurs et l'environnement tout en conservant une meilleure qualité d'usinage.

**Tableau I.1** Résultats expérimentaux de l'usinage de l'acier X210Cr12

No.	Cutting parameters					Response factors			
	ap (mm)	Vc (m/min)	f (mm/rev)	r (mm)	C	Ra (µm)	Fz (N)	Pc (W)	MRR (mm <sup>3</sup> /min)
1	0.15	180	0.08	0.4	Dry	0.87	93.02	279.06	2160
2	0.15	180	0.12	0.8	Wet	0.62	87.74	263.22	3240
3	0.15	180	0.16	1.6	MQL	0.54	93.14	279.42	4320
4	0.15	250	0.08	0.4	Wet	0.91	64.02	266.75	3000
5	0.15	250	0.12	0.8	MQL	0.77	84.67	352.79	4500
6	0.15	250	0.16	1.6	Dry	0.75	106.21	442.54	6000
7	0.15	350	0.08	0.8	Dry	0.55	62.96	367.27	4200
8	0.15	350	0.12	1.6	Wet	0.58	111.69	651.53	6300
9	0.15	350	0.16	0.4	MQL	1.29	80.57	469.99	8400
10	0.30	180	0.08	1.6	MQL	0.43	116.91	350.73	4320
11	0.30	180	0.12	0.4	Dry	1.55	113.29	339.87	6480
12	0.30	180	0.16	0.8	Wet	0.77	151.12	453.36	8640
13	0.30	250	0.08	0.8	MQL	0.51	107.57	448.21	6000
14	0.30	250	0.12	1.6	Dry	0.41	137.97	574.88	9000
15	0.30	250	0.16	0.4	Wet	1.27	140.75	586.46	12,000
16	0.30	350	0.08	1.6	Wet	0.39	95.37	556.33	8400
17	0.30	350	0.12	0.4	MQL	0.73	127.83	745.68	12,600
18	0.30	350	0.16	0.8	Dry	1.02	155.3	905.92	16,800

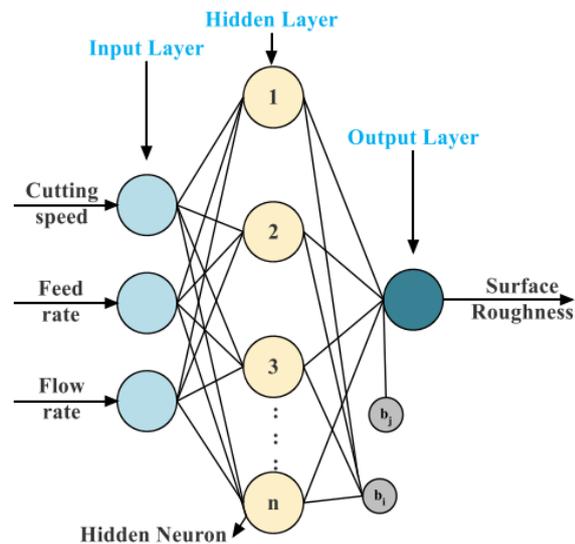
Dans un autre travail de **Nouioua et al [25]**, les auteurs ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (RSM) et les techniques de réseau neuronal artificiel (ANN) pour rechercher la prédiction optimale des facteurs d'usinage incontrôlables qui conduisent à de meilleures performances d'usinage. L'expérience a été établie à l'aide d'un plan de Box-Behnken (BBD) à 3 niveaux et 4 facteurs pour mesurer l'effort tangentiel et la rugosité de surface en fonction des combinaisons de vitesse de coupe, d'avance et de profondeur de coupe pour le tournage de l'acier X210Cr12 en usinage lubrifié, à sec et MQL. La comparaison entre les modèles ANN et RSM prouve que la méthode ANN fournit des résultats plus précis par rapport la méthode RSM, elle a prouvé son efficacité dès lors que ses coefficients de correction, ses erreurs moyennes de prédiction (MPE) et ses erreurs quadratiques moyennes sont plutôt faibles comparées à celles obtenues par la méthode RSM. En fin, les auteurs affirment qu'il pourrait être possible d'étudier l'efficacité de la technique MQL pour un usinage écologique respectueux de l'environnement ([figure I.18](#)).



**Figure I.18** Effet des facteurs de coupe sur la rugosité de surface pour le tournage à sec, lubrifié et MQL

**Mozammel Mia et al [17]** ont réalisé une étude pour l'évaluation de la rugosité de surface moyenne d'un acier trempé de 600 HB lors du tournage avec un outil en carbure métallique non revêtu sous l'application de MQL. La nouveauté du travail est que les auteurs ont utilisé une impulsion variable contrôlée dans le temps pour délivrer le liquide de refroidissement à des débits de 500-1100 ml/h avec une vitesse de coupe et une avance de 66-100 m/min et 0,18-0,25 mm/tr, respectivement. Les résultats trouvés montrent que :

- Une vitesse de coupe plus élevée et une avance plus faible contribuent à minimiser la rugosité de la surface usinée.
- En ce qui concerne la dépendance au temps, l'impulsion MQL entraînée par un intervalle de temps de 1 s induit la meilleure qualité de surface.
- Ils ont formulé un modèle ANN de la rugosité de surface capable de conserver une précision de 97,5 % (figure I.19).



**Figure I.19** Structure RNA 3-n-1

## I.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases scientifiques nécessaires à la compréhension de cette étude. Ce chapitre comporte une partie de rappel des mécanismes de la coupe des métaux tels que : la définition de l'usinabilité, des paramètres de coupe, des méthodes de modélisation et d'optimisation. Puis une partie présentant l'importance de la lubrification dans l'usinage, les avantages de la lubrification et les modes de lubrification. La dernière partie traite l'état de l'art sur l'usinabilité des aciers fortement alliés sous MQL ou sous lubrification classique ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation des conditions de coupe.

---

# Chapitre II

---

---

## Procédure expérimentale

---

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'ensemble du matériel exploité pour effectuer cette étude expérimentale. Le but est d'identifier le comportement du couple outil-matière en évaluant les différents paramètres technologiques d'usinage, tels que l'effort tangentiel ( $F_z$ ), la rugosité de surface ( $R_a$ ) et la puissance de coupe ( $P_c$ ) en fonction des conditions de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$ ) durant l'usinage à sec et le mode de lubrification MQL. Nous présentons au même temps la démarche utilisée pour la planification des expériences et de leurs conditions de réalisation. Les essais de tournage sur l'acier AISI 52100 (100Cr6) nécessaires à la réalisation de notre mémoire, 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

Le tour utilisé pour les essais est un tour parallèle de la société tchèque « TOS TRENCIN », modèle SN 40C ([Figure II.1](#)). Ce tour possède les caractéristiques suivantes :

- Puissance du moteur électrique : 6.6 kW
- Nombres de tours par minute : 45 à 2000 tr/min
- L'avance par tour : 0.08 à 6.4 mm/tr



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

Notre tour modèle SN40 est équipé d'un variateur de vitesse (**Figure II.2**), il permet de sélectionner n'importe quel nombre de tours. **La figure II.3** illustre un capteur de vitesse, il permet d'indiquer le nombre de tours en temps réel lors de l'utilisation du variateur de vitesse.



**Figure II.2** Variateur de vitesse



**Figure II.3** Capteur de vitesse

### II.2.2 Matériau de la pièce à usiner

Le matériau utilisé dans notre étude est l'acier AISI 52100 (100Cr6). 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.

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

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

**Tableau II.2** Composition chimique de l'acier AISI 52100

Éléments 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 <sup>2</sup> )	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Rr (N/mm <sup>2</sup> )	A%	Dureté après trempe
550-850	750-850	850-1250	10-13%	63-65 HRC

L'éprouvette utilisée possède un diamètre  $d = 65$  mm et une longueur  $l = 300$  mm avec 3 paliers de 25 mm de longueurs séparés par des gorges de 5 mm ([Figure II.4](#)).

**Figure II.4** 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 carbure métallique GC 2015 revêtu en CVD ( $TiCn+Al_2O_3+TiN$ ). Cette dernière

est amovible, de forme carrée à fixation mécanique par trou centrale et elle possède huit arêtes de coupe. Le type de porte plaquette qui a été utilisé est de désignation PSBNR 25×25 M12 avec l'angle de direction principal  $\chi_r=75^\circ$  (Figure II.5).



**Figure II.5** 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 suivant

- Un rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface.
- Un dynamomètre KISTLER 9257B pour la mesure des efforts de coupe.
- Un Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).
- Un Pyromètre à infrarouge pour mesurer la température.

##### 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 ( $R_a$ ,  $R_z$ , et  $R_q$ ) ont été mesurés instantanément après chaque passage de l'outil (essai) 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. Pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, les mesures de la rugosité ont été effectuées directement sur la pièce à trois

reprises à 120 degrés sans avoir recours à la démonter. Le rugosimètre 2D utilisé est présenté dans la [figure II.6](#).



**Figure II.6** Rugosimètre 2D (Surftest SJ-210)

**b. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme kistler)**

On a utilisé un dynamomètre (KISTLER9257 B) ([Figure II.7](#)) 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.7** 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.8](#)).

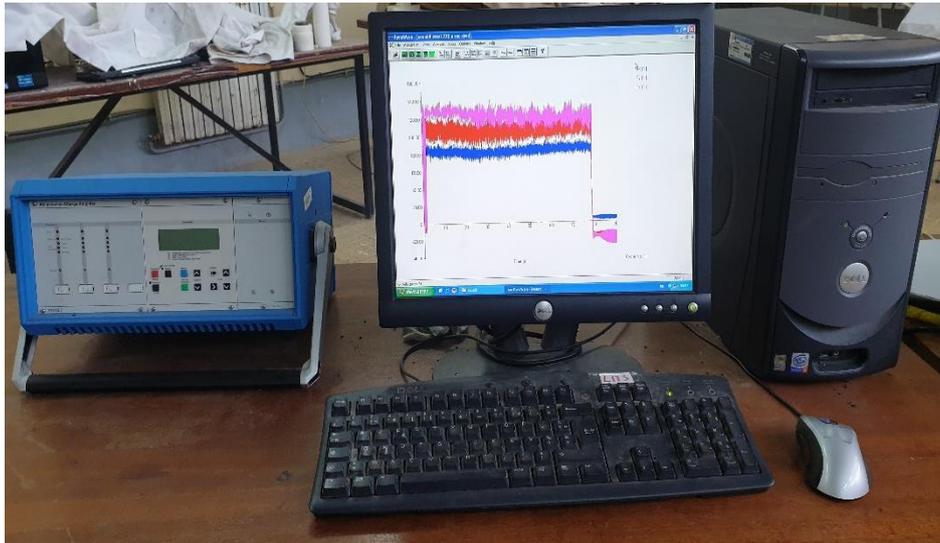


Figure II.8 PC piloté par le logiciel (DYNOWARE)

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  $F_z$ ).

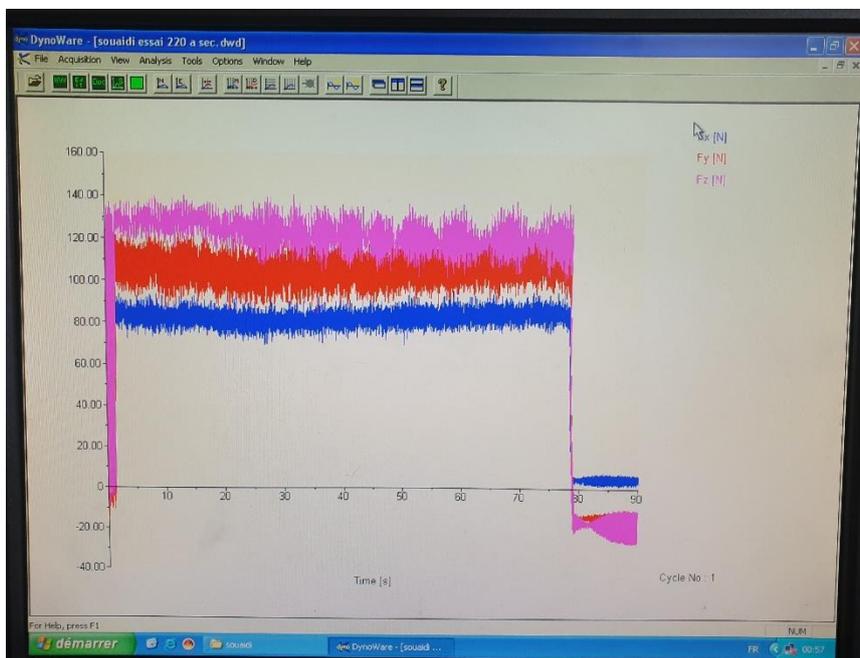


Figure II.9 Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE

### c. Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250)

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille ( $V_b$ ) est un dispositif binoculaire de marque (Visuel Gage 250), avec un ordinateur équipé d'un logiciel **Visual Gage 2.2.0**. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur

une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (**Figure II.11**). Notons aussi, qu'une nouvelle arête de coupe est utilisée pour chaque essai.



**Figure II.10** Microscope pour la mesure de l'usure Vb (Visuel Gage 250)

#### **d. Mesure de la température de coupe**

Pour mesurer la température dans la zone de coupe, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge modèle CAUTION 9U0401 (**Figure II.12**). Le pyromètre mesure les températures de surface à distance. Il concentre l'énergie infrarouge rayonnant de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (maximale, moyenne et minimale) qui seront affichées sur l'écran digital en degrés Celsius ou Fahrenheit. Une sortie analogique/digitale permet le transfert des données enregistrées. Le pyromètre à infrarouge CAUTION 9U0401 présente les caractéristiques suivantes :

- Gamme de mesure : -40 °C à 550 °C (-40°F à 1022 °F).
- Gamme spectrale : 8 à 14 microns.

- Précision :  $\pm 1 \%$  ou  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $2 \text{ }^\circ\text{F}$ ).
- Temps de réponse (95 %) : 500 ms.
- Visée : Laser mono point.



**Figure II.11** Pyromètre à infrarouge.

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

La **figure II.13** présente l'ensemble des équipements utilisés lors de lubrification avec le système MQL. La **figure II.14** 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.15** montre le réservoir d'huile et ses composants (Réservoir de 24 L et débitmètre).



Figure II.12 Montage de système MQL



Figure II.13 MQL contrôle



Figure II.14 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 ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) sur les diverses fonctions d'optimisation (effort de coupe, puissance de coupe et rugosité de surface) en utilisant la méthodologie de surface de réponse MSR à l'aide de logiciel statistique d'optimisation Design Expert 12 et Minitab 18.

Dans notre cas, nous avons les facteurs de base ( $V_c$ ,  $f$ , et  $a_p$ ) et chaque facteur à trois niveaux de variation, nous avons alors :  $L_9 (3^3)$  Les essais ont été numérotés de 1 à 9. Le [tableau II.4](#) illustre la matrice de planification de Taguchi ( $L_9$ ), ainsi que les valeurs des facteurs codifiés. Notons dans ce cas d'étude que les essais Taguchi  $L_9$  ont été réalisés pour un usinage à sec et avec un minimum de quantité de lubrification MQL.

**Tableau II.4** Table orthogonale de Taguchi  $L_9$

L9	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

#### II.4 Condition de coupe

Dans notre travail trois (03) paramètres de coupe d'entrée ont été testés. Tous les paramètres de coupe (vitesse de coupe ( $V_c$ ), avance ( $f$ ) et profondeur de passe ( $a_p$ )) sont variés 03 fois, les valeurs réelles choisies sont mentionnées au [Tableau II.5](#). Ces condition de coupe ont été choisi suivant les recommandations du fabricant d'outil (SANDVIK).

**Tableau II.5** Plan d'expérience de Taguchi (L9) pour l'usinage à sec et MQL

N° d'essais	Paramètres d'usinage		
	Vc	f	ap
1	200	0,08	0,15
2	200	0,12	0,3
3	200	0,16	0,45
4	250	0,08	0,3
5	250	0,12	0,45
6	250	0,16	0,15
7	300	0,08	0,45
8	300	0,12	0,15
9	300	0,16	0,3

➤ **Conditions de coupe utilisées pour les essais paramétriques**

- Vc= 380 m/min
- f = 0.08 mm/tr
- ap = 0.4 mm
- tc = 46 s

## II.5 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**

---

---

**Modélisation de  
l'effort de coupe, la  
puissance de coupe et  
la rugosité de surface**

---

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des essais réalisés suivant le plan de Taguchi L9, lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 (100Cr6) à sec et dans un environnement de lubrification (MQL). 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 ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ) sur les paramètres technologiques de sortie à savoir ; la rugosité de surface arithmétique ( $R_a$ ), l'effort de coupe tangentiel ( $F_z$ ) et la puissance de coupe ( $P_c$ ). 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. La fin du chapitre est réservée à une étude paramétrique sur l'évaluation des paramètres technologiques d'usinage pour deux modes de lubrification.

### 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 (AISI 52100) dans l'usinage à sec et usinage avec minimum quantité de lubrification. L'analyse des résultats de ce tableau montre que pour les différentes combinaisons du régime de coupe les valeurs de l'effort de coupe ( $F_z$ ) lors de l'usinage à sec et (MQL) sont dans les intervalles [60,95 230,43] (N) et [57,14 219,1] (N) respectivement. On remarque aussi que les critères de rugosité ( $R_{a \text{ à sec}}$ ,  $R_{a \text{ MQL}}$ ) obtenus varient dans les intervalles [0,788 1,411] ( $\mu\text{m}$ ) et [0,55 1,27] ( $\mu\text{m}$ ). Finalement, pour les puissances ( $P_{c \text{ à sec}}$ ) et ( $P_{c \text{ MQL}}$ ), elles varient selon les intervalles [203,16 776,65] (W) et [190,467 769,167] (W) respectivement.

**Tableau III.1** Résultats des essais pour le plan de Taguchi L<sub>9</sub>.

N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Fz à sec (N)	Fz MQL (N)	Pc à sec (W)	Pc MQL (W)	Ra à sec (μm)	Ra MQL (μm)
1	200	0,08	0,15	60,95	57,14	203,16	190,467	0,929	0,64
2	200	0,12	0,3	127,33	113,2	424,33	377,33	1,177	0,99
3	200	0,16	0,45	230,43	219,1	768,1	730,33	1,411	1,27
4	250	0,08	0,3	106,08	106,7	442	444,58	0,89	0,58
5	250	0,12	0,45	185,29	184,6	772,04	769,167	1,018	0,76
6	250	0,16	0,15	99,54	97,02	414,75	404,25	1,393	1,31
7	300	0,08	0,45	136,69	121,7	683,45	608,5	0,788	0,55
8	300	0,12	0,15	78,16	57,8	390,8	289	0,935	0,66
9	300	0,16	0,3	155,33	131,1	776,65	655,5	1,33	1,13

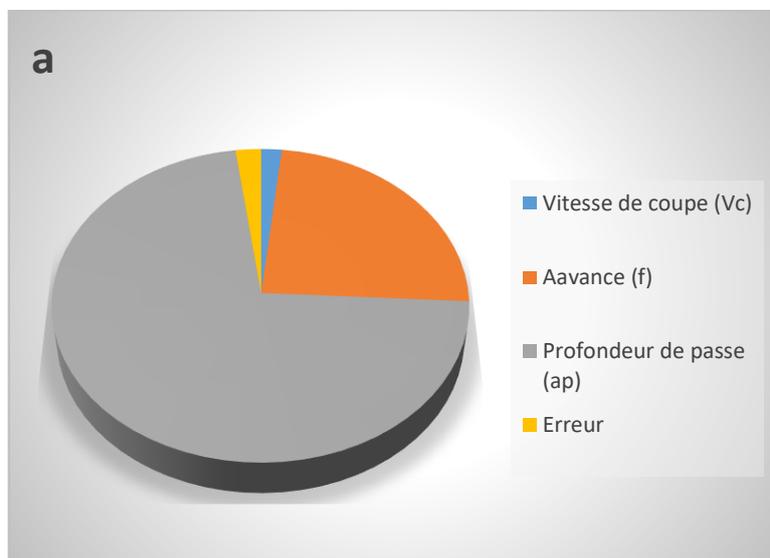
### III.3 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de l'effort tangentiel (Fz)

#### III.3.1 Analyse de la variance pour (Fz)

Le [tableau III.2](#) illustre les résultats de l'ANOVA pour l'effort tangentiel (Fz) lors de l'usinage à sec et avec minimum quantité de lubrification (MQL). L'analyse des résultats montre que le facteur (ap) est le premier facteur qui affecte l'effort tangentiel (Fz), avec une contribution de 72,02% durant l'usinage à sec et 72,18% pour l'environnement MQL. On peut constater aussi que (f) a un effet significatif sur (Fz) avec une contribution de 24,12% et 19,21% durant l'usinage à sec et MQL respectivement. Le facteur suivant influençant (Fz) est la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 1,72% lors de l'usinage à sec et 4,57% pour MQL. Les contributions des différents facteurs sur (Fz) sont montrées dans la [Figure III.1](#).

**Tableau III.2** Analyse de la variance pour l'effort tangentiel (Fz).

Usinage à sec							
Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	3	22295,3	97,87%	22295,3	7431,8	76,46	0,000
Linéaires	3	22295,3	97,87%	22295,3	7431,8	76,46	0,000
Vc	1	392,5	1,72%	392,5	392,5	4,04	0,101
f	1	5495,2	24,12%	5495,2	5495,2	56,54	0,001
ap	1	16407,6	72,02%	16407,6	16407,6	168,82	0,000
Erreur	5	486,0	2,13%	486,0	97,2		
Total	8	22781,3	100,00%				
Environnement MQL							
Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	3	21766,8	95,96%	21766,8	7255,6	39,56	0,001
Linéaires	3	21766,8	95,96%	21766,8	7255,6	39,56	0,001
Vc	1	1036,0	4,57%	1036,0	1036,0	5,65	0,063
f	1	4356,7	19,21%	4356,7	4356,7	23,76	0,005
ap	1	16374,1	72,18%	16374,1	16374,1	89,29	0,000
Erreur	5	916,9	4,04%	916,9	183,4		
Total	8	22683,7	100,00%				



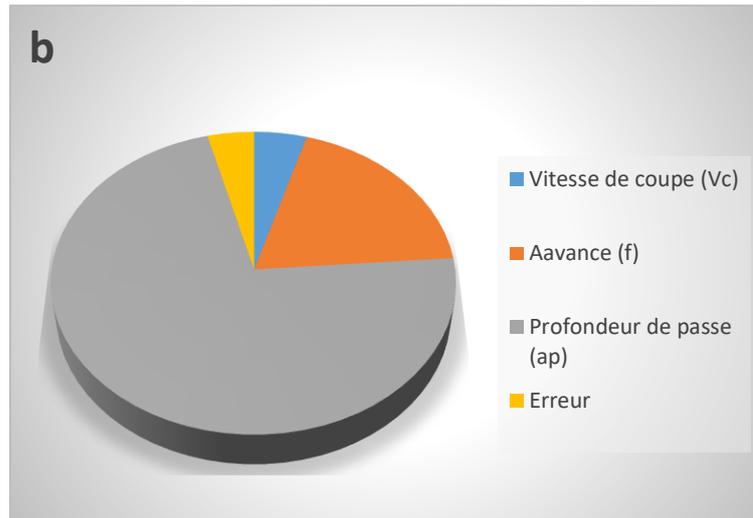


Figure III.1 Contributions des différents facteurs sur (Fz), (a) à sec (b) MQL.

### III.3.2 Graphique des effets principaux pour (Fz)

Les graphiques des effets principaux sont montrés dans la Figure III.2. Il apparaît clairement que la profondeur de passe (ap) affecte fortement l'effort (Fz) dans les deux cas à sec et MQL car elle possède la plus grande pente. Elle est suivie par l'avance (f) et en dernier lieu la vitesse de coupe (Vc). On remarque aussi, que l'augmentation des deux facteurs (ap) et (f) contribuent à l'élévation de (Fz), par contre, l'élévation de la vitesse de coupe (Vc) induit a la diminution de l'effort (Fz). La tendance des résultats trouvés est en bon accord avec ceux de [24] [27].

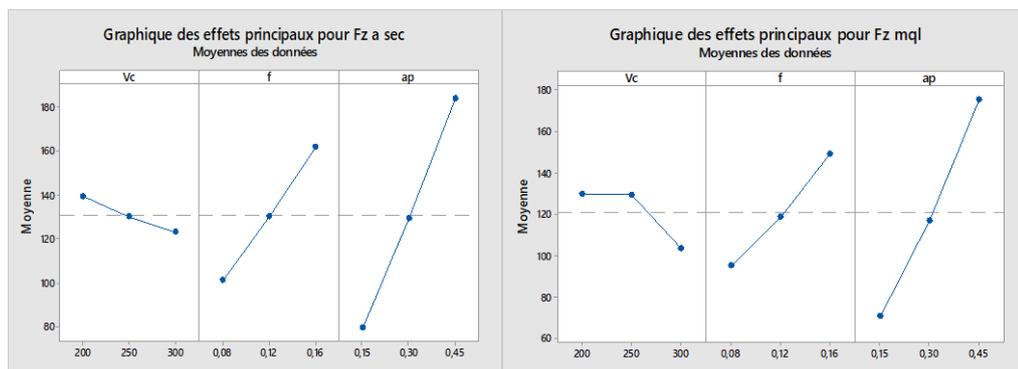


Figure III.2 Graphique des effets principaux pour (Fz).

### III.3.3 Modélisation de l'effort de coupe (Fz)

Les relations fonctionnelle entre la variable dépendante pour l'effort (Fz) et les variables indépendantes étudiées (Vc, f et ap) durant l'usinage à sec et MQL ont été exprimées par des modèles mathématique (équations linéaires) avec des coefficients de détermination ( $R^2 = 97,87\%$ ) et ( $R^2 = 95,96\%$ ) respectivement. Les modèles linéaires obtenus à partir de l'analyse statistique peuvent être utilisés pour prédire l'effort de coupe (Fz) dans l'intervalle des conditions de coupe étudiés. Les

équations (III.1 III.2) expriment le modèle de l'effort tangentiel ( $F_z$ ) avec tous les facteurs principaux pour les deux environnements de lubrification.

$$F_z \text{ à sec} = -23,8 - 0,1618 V_c + 757 f + 348,6 a_p \quad (R^2 = 97,87\%) \quad (\text{III.1})$$

$$F_z \text{ MQL} = 1,3 - 0,263 V_c + 674 f + 348,3 a_p \quad (R^2 = 95,96\%) \quad (\text{III.2})$$

### III.3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour l'effort ( $F_z$ ) est présentée dans la figure III.3 pour l'usinage à sec et la figure III.5 pour 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. Les figures III.4 et III.6 montrent les courbes de la normalité de la distribution de l'erreur pour les deux cas étudiés. [27]

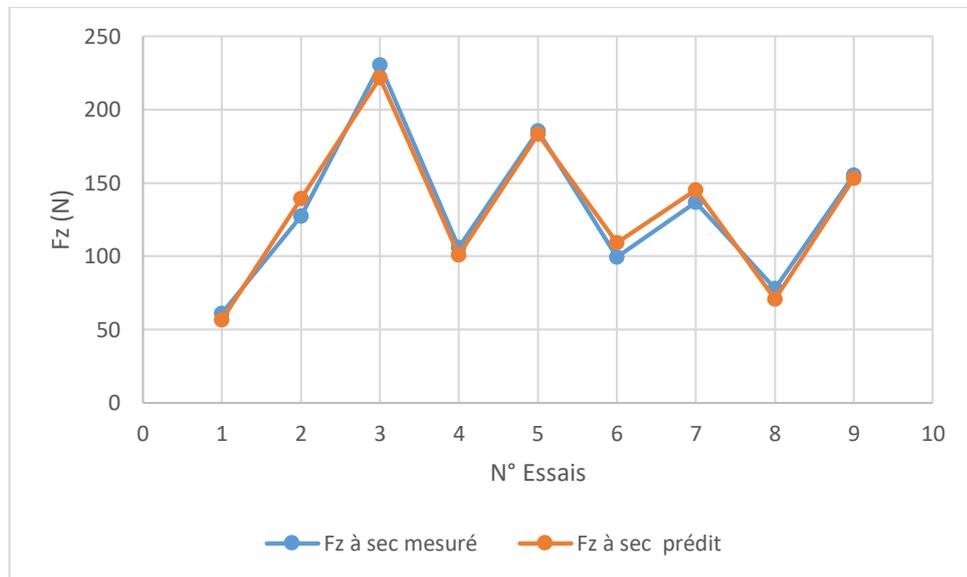


Figure III.3 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour ( $F_z$ ) à sec.

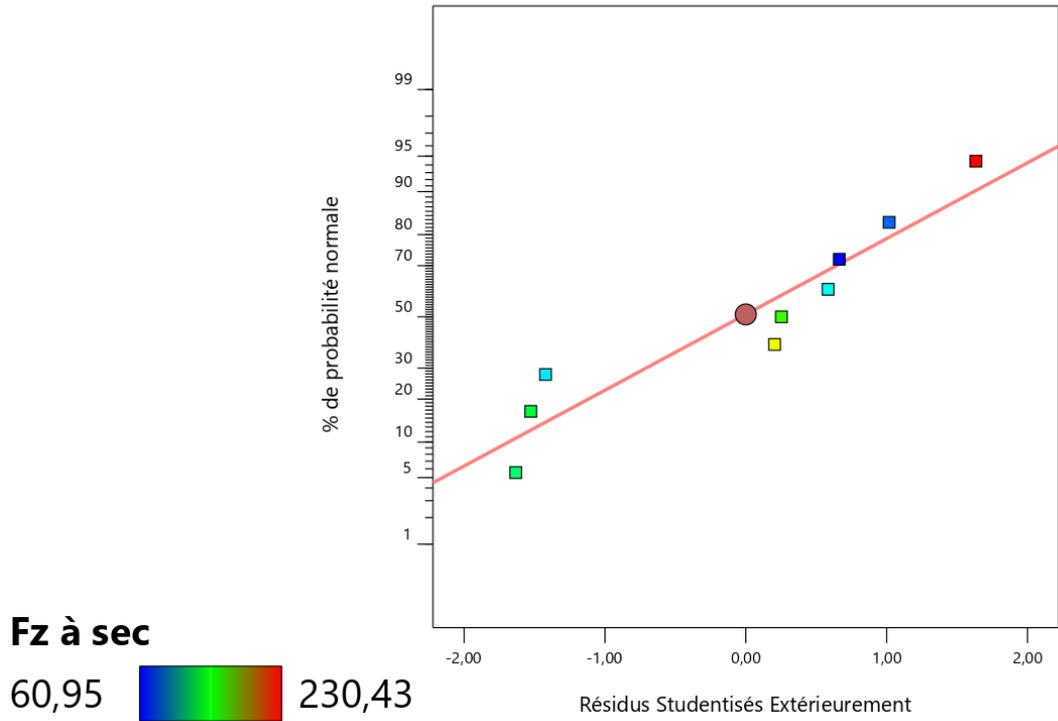


Figure III.4 Courbe de normalité pour (Fz), usinage à sec.

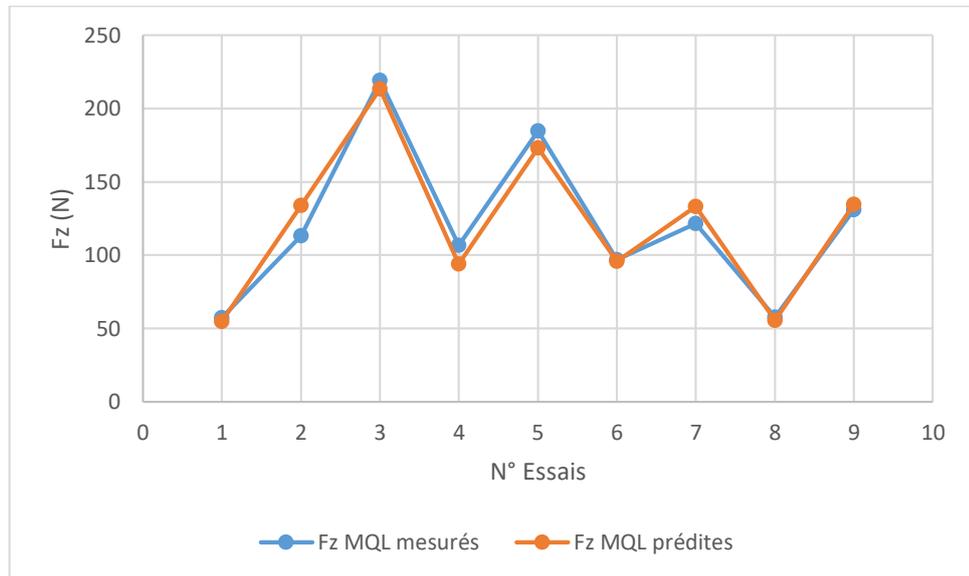


Figure III.5 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Fz) MQL.

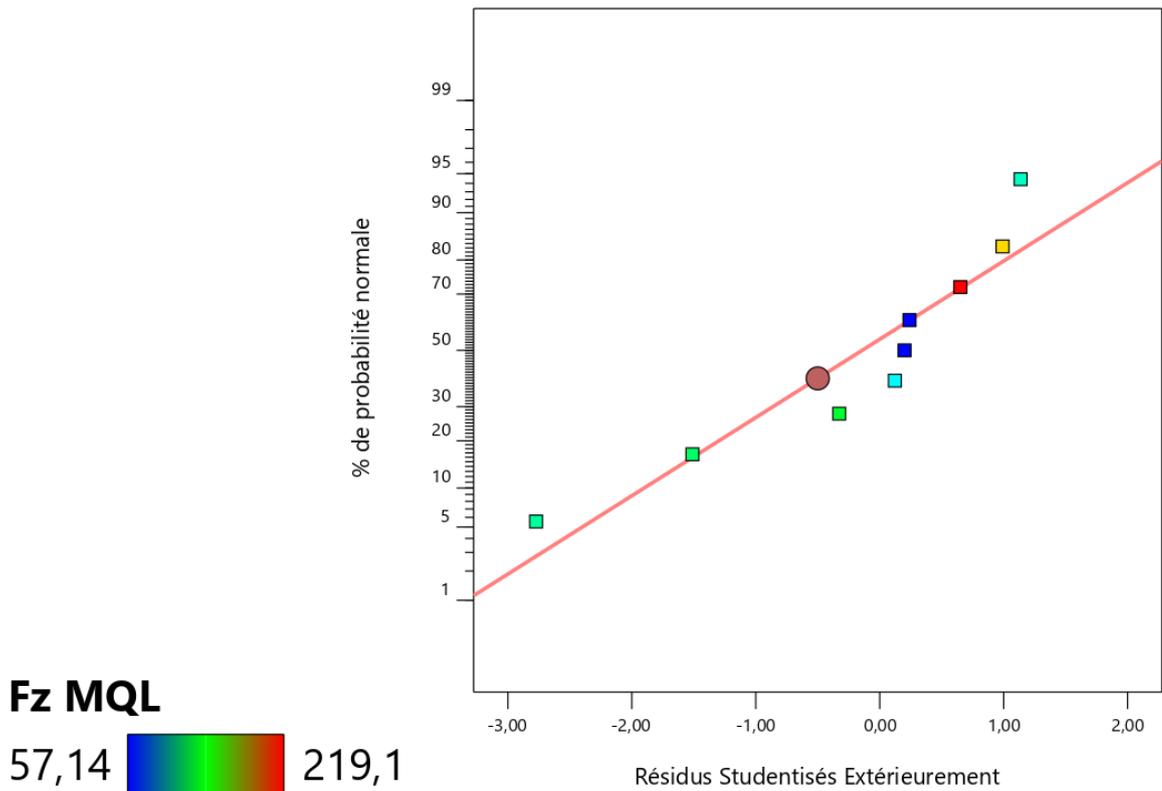


Figure III.6 Courbe de normalité pour (Fz) MQL.

### III.3.5 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Fz)

Les figures III.7 et III.8 représentent les graphes de la surface de réponse 3D (a, b et c) et les contours en 2D (d, e, f) de l'effort (Fz) 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 la même pour les deux cas étudiés. Les figures III.7.a et III.8.a montrent les surfaces de réponse de l'effort (Fz) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $f$ ). Il est clair que l'augmentation de ( $f$ ) induit une élévation de (Fz) par contre, l'augmentation de ( $V_c$ ) induit une légère diminution de l'effort (Fz). Les figures III.7.b et III.8.b présentent les surfaces de réponse de l'effort (Fz) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $a_p$ ). L'analyse des courbes montre clairement que le facteur ( $a_p$ ) a la plus grande influence sur l'effort (Fz) car il possède la plus grande pente, donc, l'élévation de ce facteur cause une grande augmentation de (Fz). L'augmentation de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) cause aussi une légère diminution de (Fz). Les figures III.7.c et III.8.c illustrent les surfaces de réponse de l'effort (Fz) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $a_p$ ). Comme il a été prévu, on remarque que l'effort tangentiel de coupe (Fz) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe ( $a_p$ ) et de l'avance ( $f$ ). Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe ( $a_p$ ) est plus importante que l'avance ( $f$ ), les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec la littérature [24].

Les figures III.7.d.e.f et III.8.d.e.f exposent les contours de ( $F_z$ ) en fonction de la variation des conditions de coupe. Ces contours permettent d'estimer la valeur de l'effort ( $F_z$ ) en fonction du changement des valeurs des facteurs d'entrés dans l'intervalle des conditions des coupe utilisées.

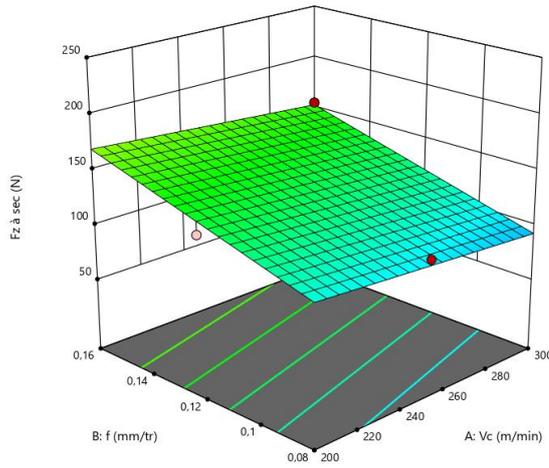


Figure (7.a)

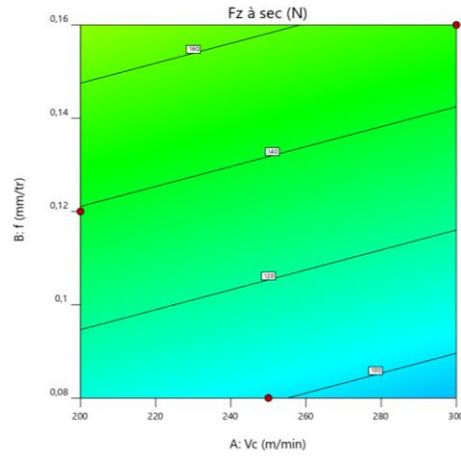


figure (7.d)

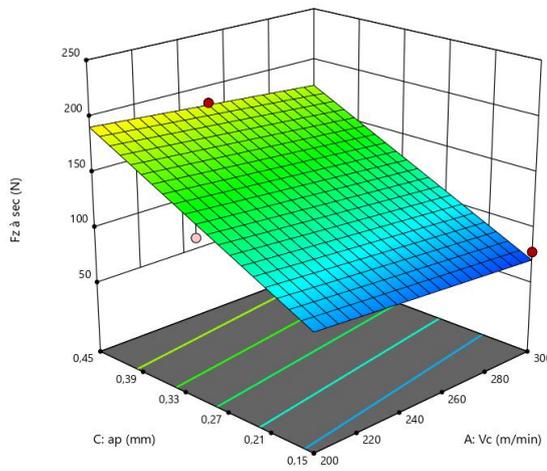


Figure (7.b)

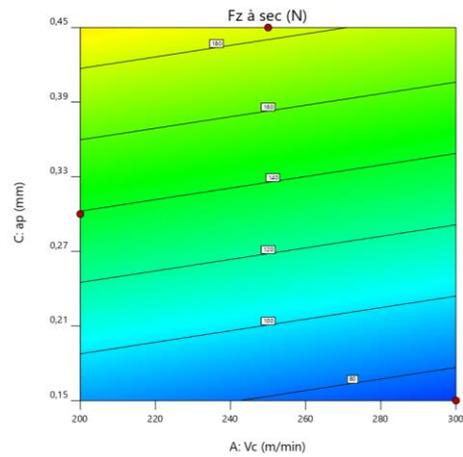


figure (7.e)

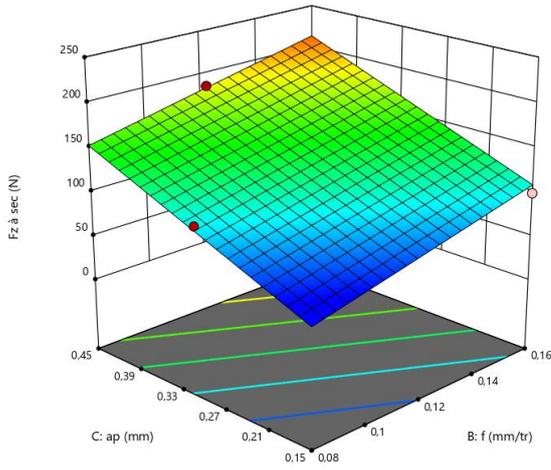


Figure (7.c)

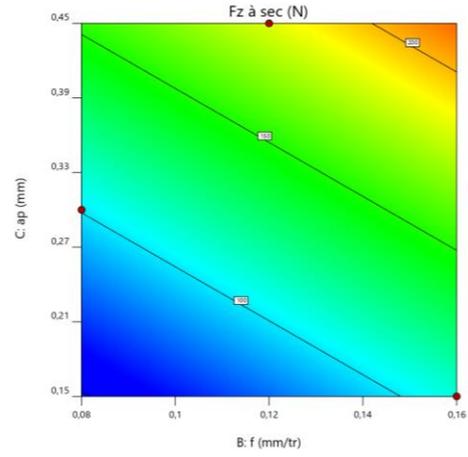


figure (7.f)

Figure III.7 Surfaces de réponse et les contours de l'effort tangentiel ( $F_z$ ) pour l'usinage à sec.

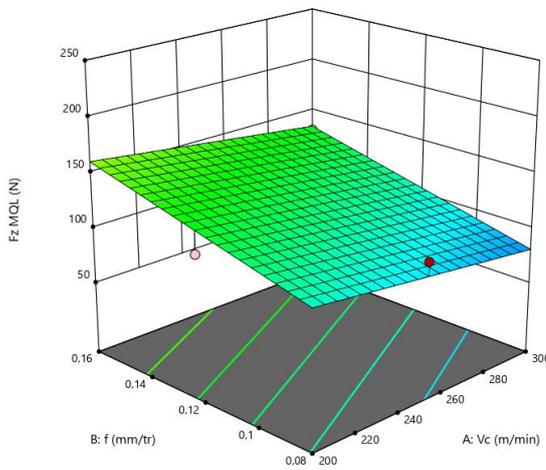


Figure (8.a)

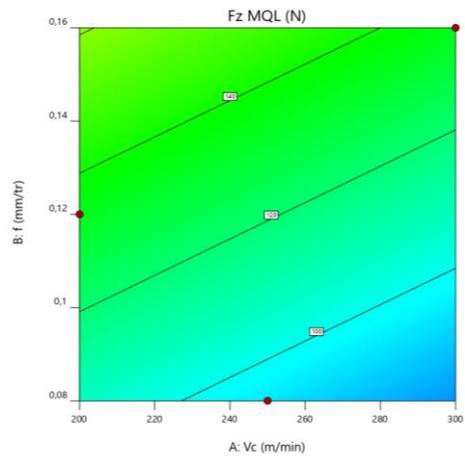


figure (8.d)

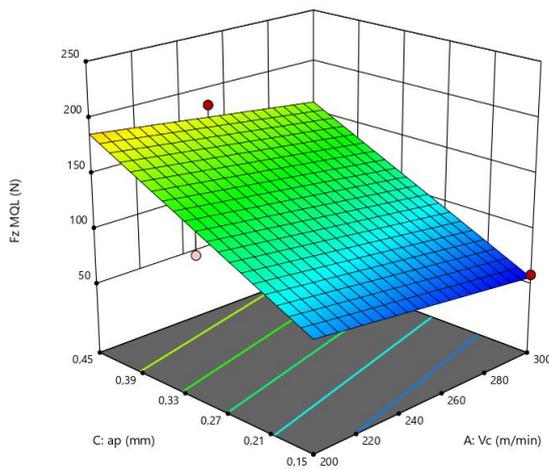


Figure (8.b)

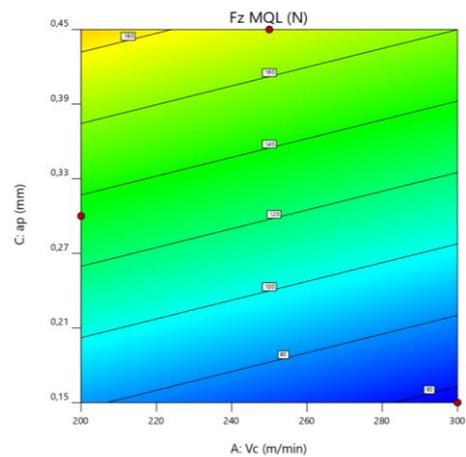


figure (8.e)

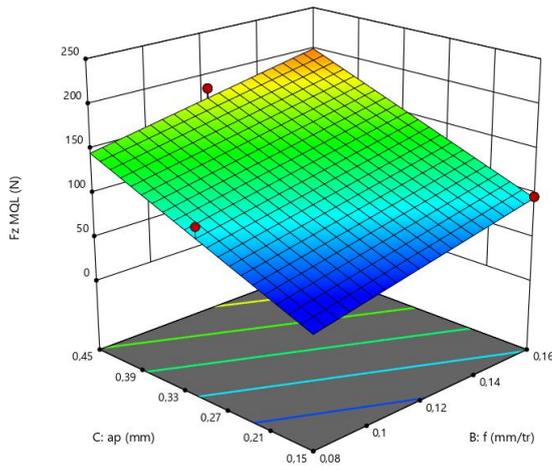


Figure (8.c)

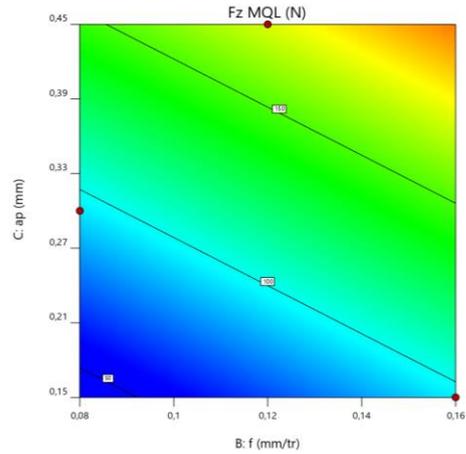


figure (8.f)

Figure III.8 Surfaces de réponse et les contours de l'effort tangentiel ( $F_z$ ) pour MQL.

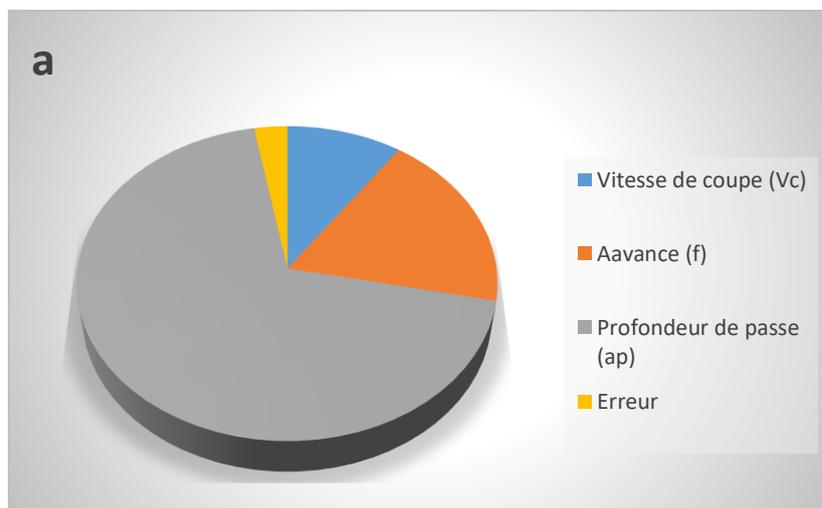
### III.4 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la puissance de coupe ( $P_c$ )

#### III.4.1 Analyse de variance pour ( $P_c$ )

Le [tableau III.3](#) illustre les résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe ( $P_c$ ) lors de l'usinage à sec et avec minimum quantité de lubrification (MQL). L'analyse des résultats montre que le facteur ( $a_p$ ) est le facteur le plus important qui affecte ( $P_c$ ) dans les deux environnements (à sec et MQL), sa contribution est de 68,94% lors de l'usinage à sec et 75,94% pour le MQL. Elle est suivie par l'avance ( $f$ ) avec une contribution de 18,59% durant l'usinage à sec et 15,13% pour le MQL. Le dernier facteur affectant ( $P_c$ ) est la vitesse de coupe ( $V_c$ ), sa contribution est 9,68% et 3,29% durant l'usinage à sec et MQL respectivement. Les contributions des différents facteurs sur ( $P_c$ ) sont montrées dans la [Figure III.9](#).

**Tableau III.3** Analyse de la variance pour la puissance de coupe (Pc).

Usinage à sec							
Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	3	346877	97,21%	346877	115626	58,14	0,000
Linéaires	3	346877	97,21%	346877	115626	58,14	0,000
Vc	1	34551	9,68%	34551	34551	17,37	0,009
f	1	66337	18,59%	66337	66337	33,36	0,002
ap	1	245989	68,94%	245989	245989	123,70	0,000
Erreur	5	9943	2,79%	9943	1989		
Total	8	356820	100,00%				
Environnement MQL							
Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	3	310420	94,36%	310420	103473	27,89	0,002
Linéaires	3	310420	94,36%	310420	103473	27,89	0,002
Vc	1	10827	3,29%	10827	10827	2,92	0,148
f	1	49783	15,13%	49783	49783	13,42	0,015
ap	1	249810	75,94%	249810	249810	67,34	0,000
Erreur	5	18548	5,64%	18548	3710		
Total	8	328968	100,00%				



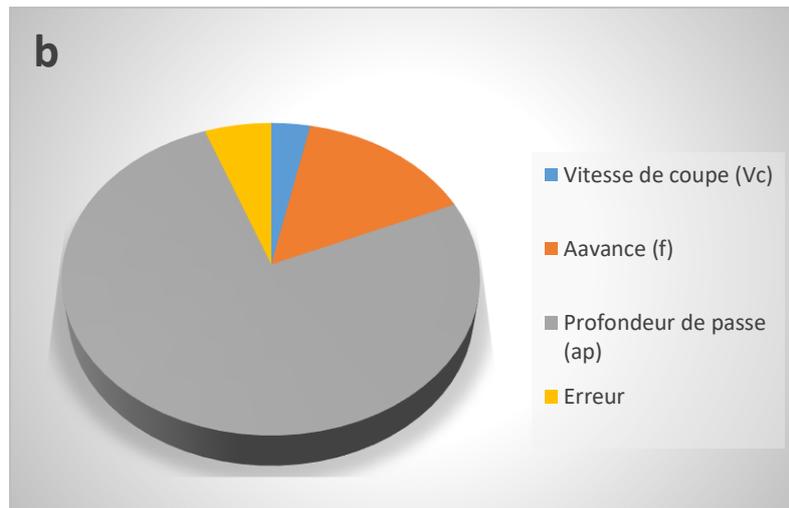


Figure III.9 Contributions des différents facteurs sur (Pc), (a) à sec (b) MQL.

### III.4.2 Graphique des effets principaux pour (Pc)

La figure III.10 représente les graphiques des effets principaux pour la puissance de coupe (Pc). On peut voir que la pente de la profondeur de passe (ap) est plus grande donc ce facteur est le plus influant sur (Pc), il est suivi par l'avance (f) puis la vitesse de coupe (Vc). Il est clair que l'augmentation des trois facteurs (f), (ap) et (Vc) induisent une élévation de (Pc). Les résultats trouvés sont similaires à ceux trouvés dans la littérature [24] [26].

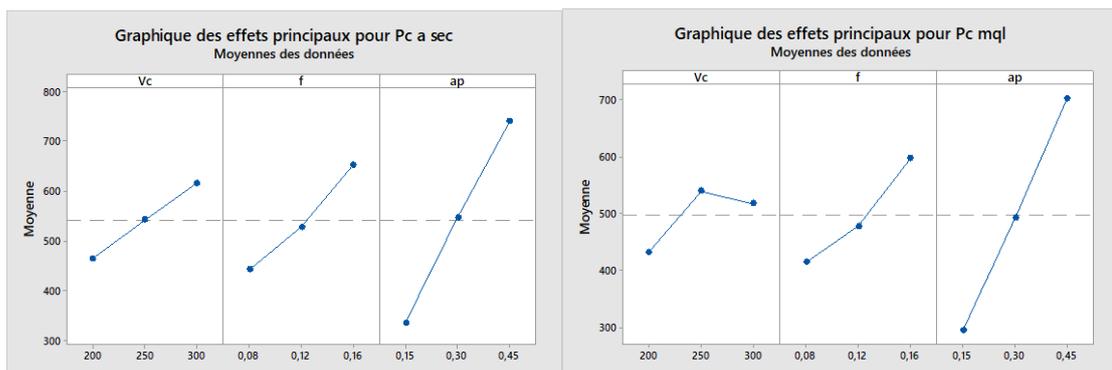


Figure III.10 Graphique des effets principaux pour (Pc).

### III.4.3 Modélisation de la puissance de coupe (Pc)

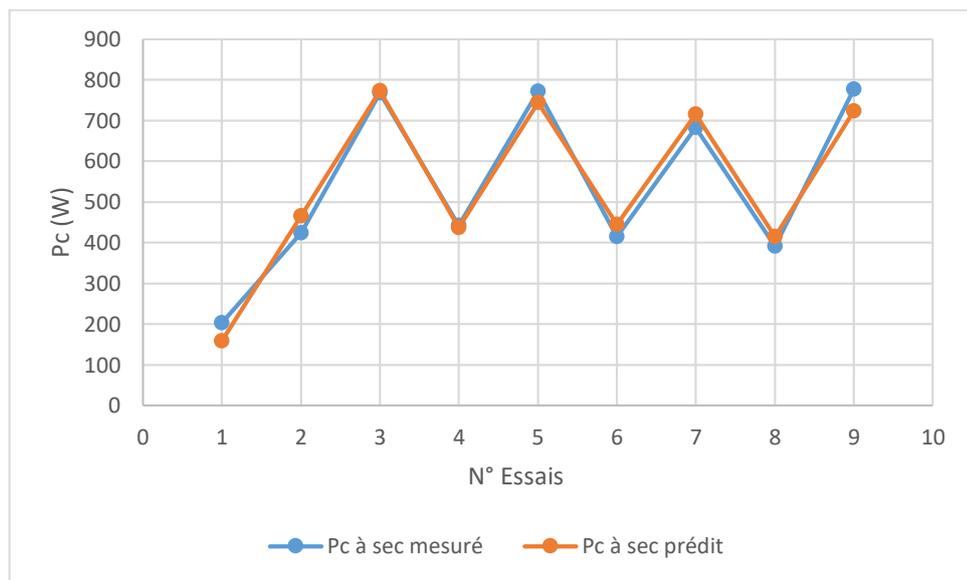
Les relations fonctionnelle entre la variable dépendante pour la puissance (Pc) et les variables indépendantes étudiées (Vc, f et ap) durant l'usinage à sec et MQL ont été exprimées par des modèles mathématiques (équations linéaires) avec des coefficients de détermination ( $R^2 = 97,21\%$ ) et ( $R^2 = 94,36\%$ ) respectivement. Les modèles linéaires obtenus à partir de l'analyse statistique peuvent être utilisés pour prédire la puissance de coupe (Pc) dans l'intervalle des conditions de coupe étudiés. Les équations (III.3 III.4) expriment le modèle de la puissance de coupe (Pc) avec tous les facteurs principaux pour les deux environnements de lubrification.

$$Pc_{\text{à sec}} = -558 + 1,518 Vc + 2629 f + 1350 ap \quad (R^2 = 97,21\%) \quad \text{(III.3)}$$

$$Pc_{\text{MQL}} = -397 + 0,850 Vc + 2277 f + 1360 ap \quad (R^2 = 94,36\%) \quad \text{(III.4)}$$

#### III.4.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la puissance ( $P_c$ ) est présentée dans la figure III.11 pour l'usinage à sec et la figure III.13 pour 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. Les figures III.12 et III.14 montrent les courbes de la normalité de la distribution de l'erreur pour les deux cas étudiés.



**Figure III.11** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour ( $P_c$ ) à sec.

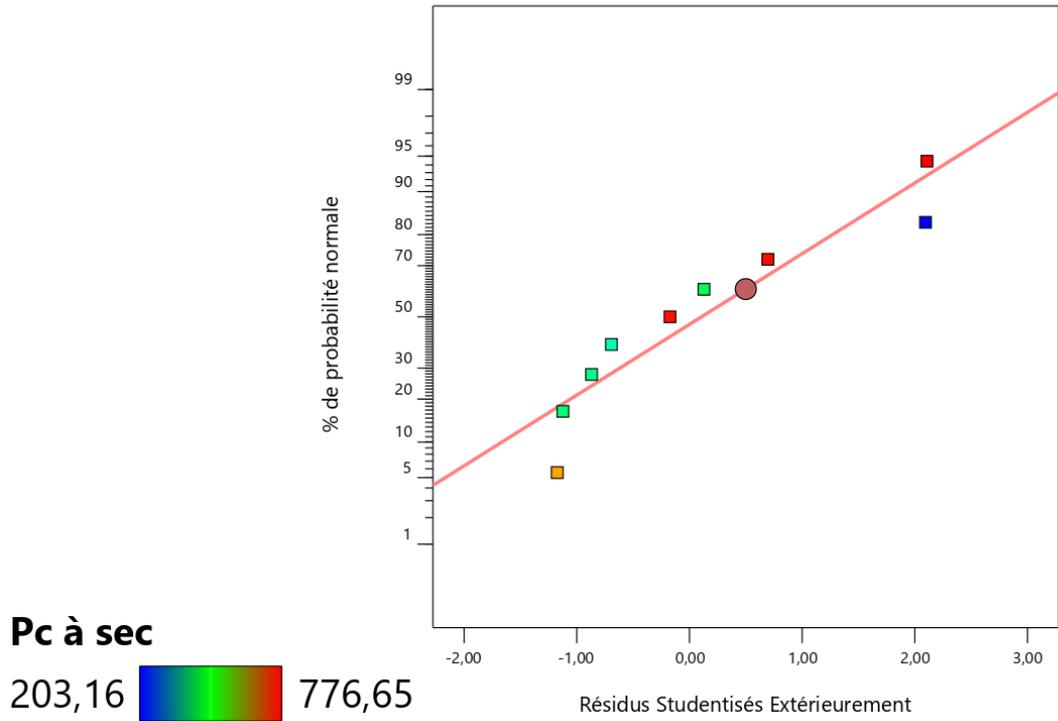


Figure III.12 Courbe de normalité pour (Pc) à sec.

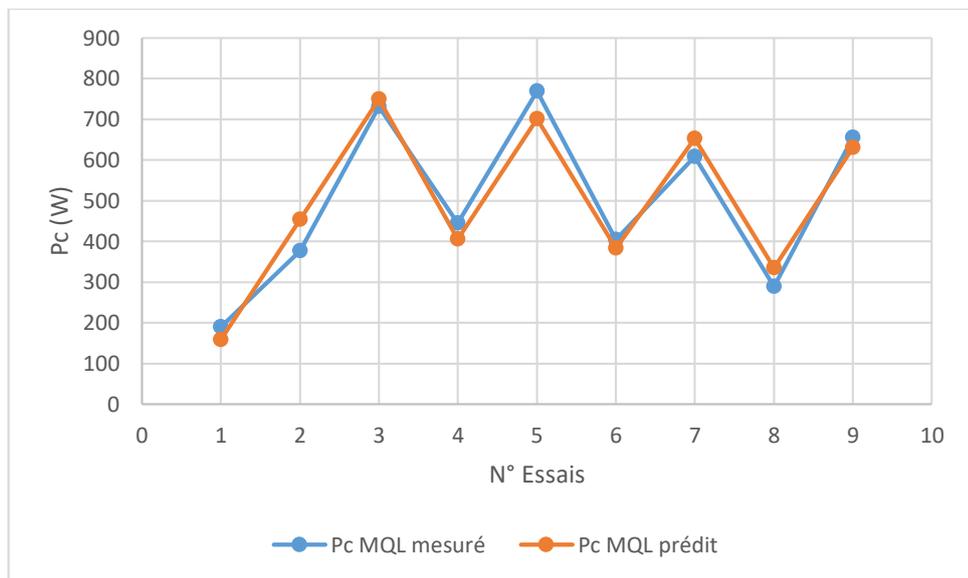


Figure III.13 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Pc) MQL.

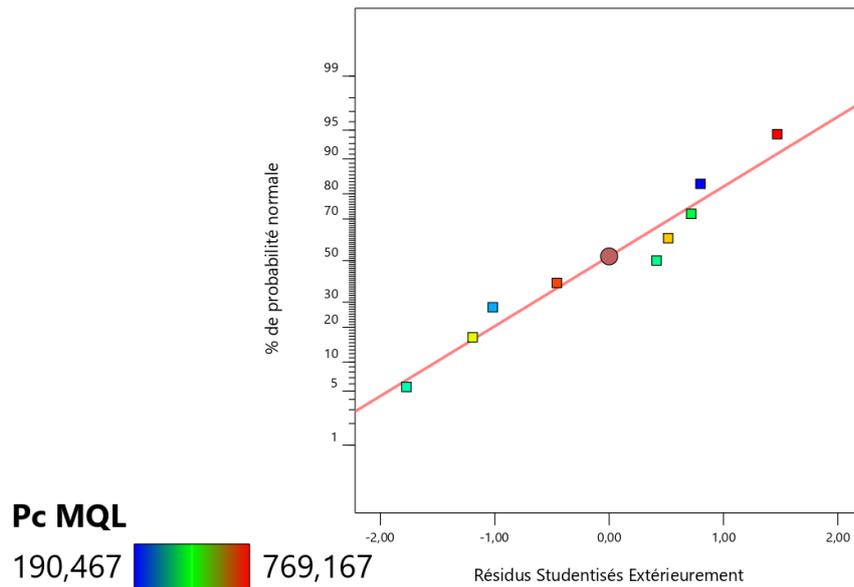


Figure III.14 Courbe de normalité pour (Pc) MQL.

### III.3.5 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Pc)

Les figures III.15 et III.16 présentent les graphes de la surface de réponse 3D (a, b et c) et les contours en 2D (d, e, f) de la puissance (Pc) 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 la même pour les deux cas étudiés. Les figures III.15.a et III.16.a montrent les surfaces de réponse de la puissance (Pc) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $f$ ). L'analyse des courbes indique que la puissance de coupe (Pc) augmente d'une manière importante avec l'augmentation de ( $V_c$ ) et ( $f$ ). Les figures III.15.b et III.16.b présentent les surfaces de réponse de la puissance (Pc) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $a_p$ ). Il est aussi clair que la plus grande pente est attribuée au facteur ( $a_p$ ) donc, il a la plus grande influence sur (Pc). Les figures III.15.c et III.16.c illustrent les surfaces de réponse de la puissance (Pc) en fonction de la variation des facteurs ( $f$ ) et ( $a_p$ ). On peut observer que l'augmentation des deux facteurs ( $a_p$ ) et ( $f$ ) provoquent l'élévation de la puissance (Pc). Ces résultats sont logiques puisque l'équation (I.9) indique que la puissance de coupe est étroitement liée à la vitesse de coupe et l'effort de coupe, à son tour l'élévation de ( $F_z$ ) est liée à l'élévation de l'avance et de la profondeur de passe. C'est pour cela l'augmentation de trois facteurs ( $V_c$ ), ( $f$ ) et ( $a_p$ ) conduisent à l'élévation de la puissance (Pc). Les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec d'autres travaux de recherche [24].

Les figures III.15.d.e.f et III.16.d.e.f illustrent les contours de (Pc) en fonction de la variation des conditions de coupe. Ces contours permettent d'estimer la valeur de la puissance (Pc) en fonction de n'importe quelles valeurs souhaitées des facteurs d'entrée et cela dans l'intervalle des conditions de coupe utilisés.

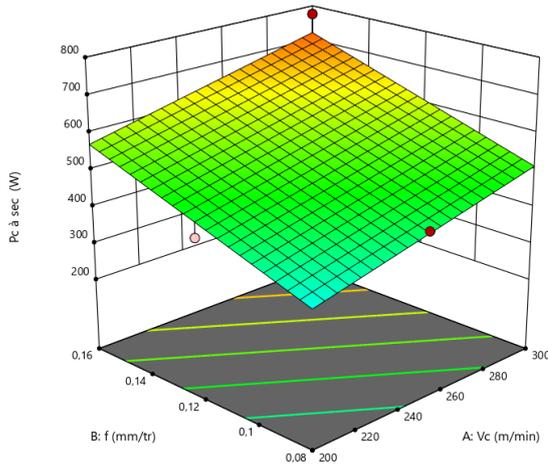


Figure (15.a)

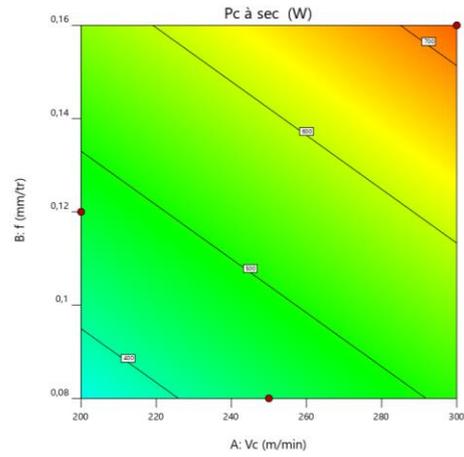


figure (15.d)

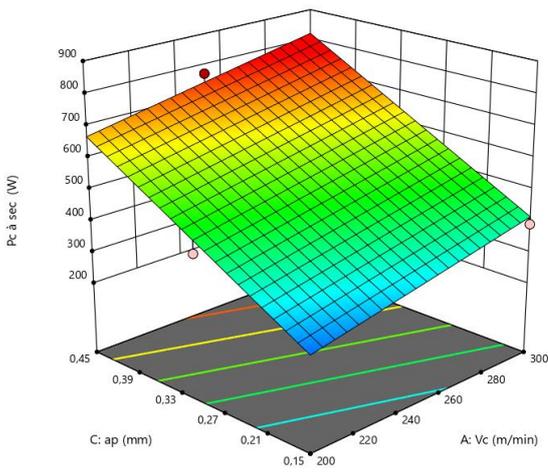


Figure (15.b)

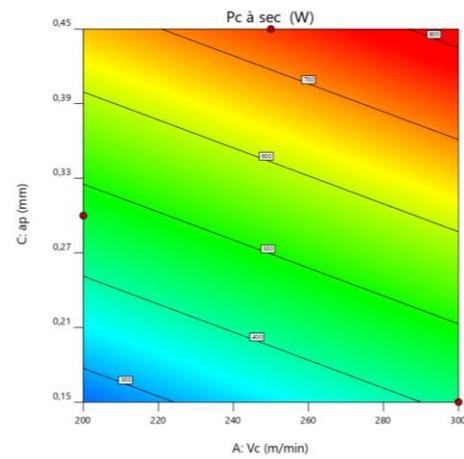


figure (15.e)

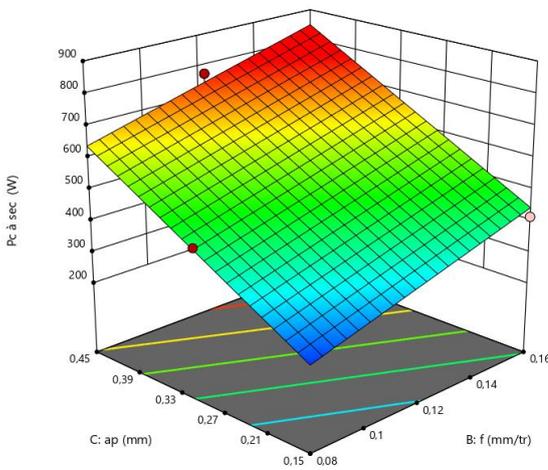


Figure (15.c)

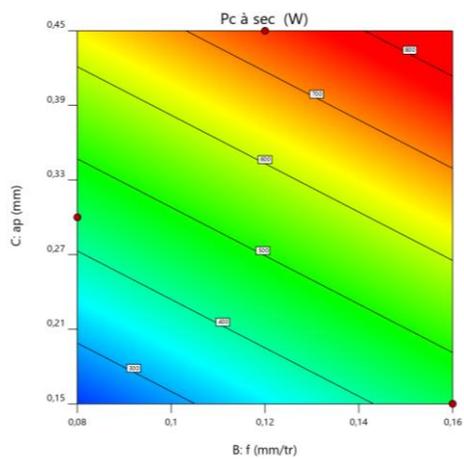


figure (15.f)

Figure III.15 Surfaces de réponse et les contours de la puissance de coupe (Pc) pour l'usinage à sec.

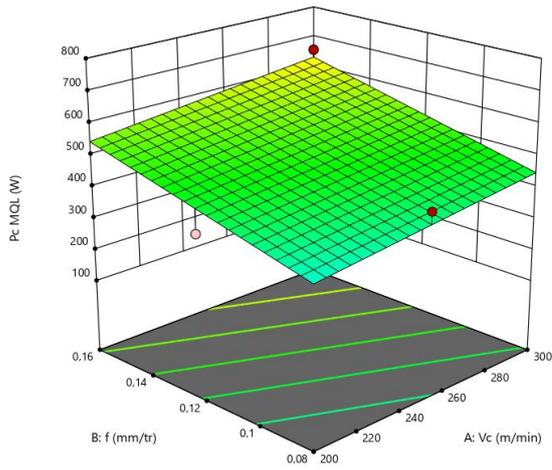


Figure (16.a)

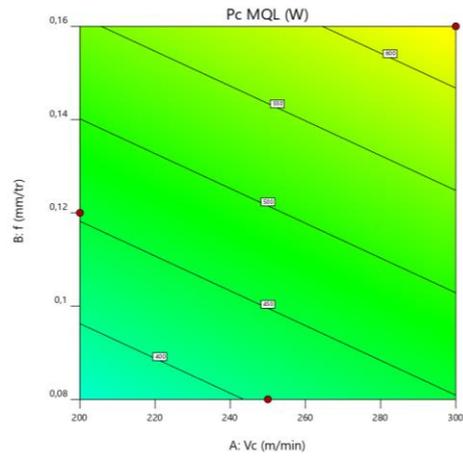


figure (16.d)

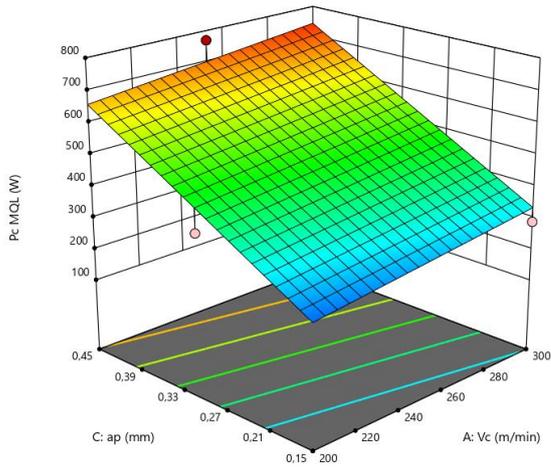


Figure (16.b)

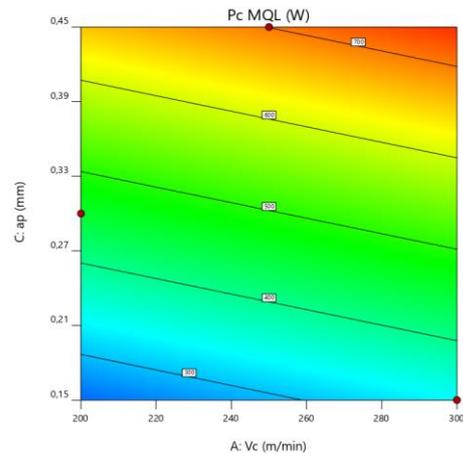


figure (16.e)

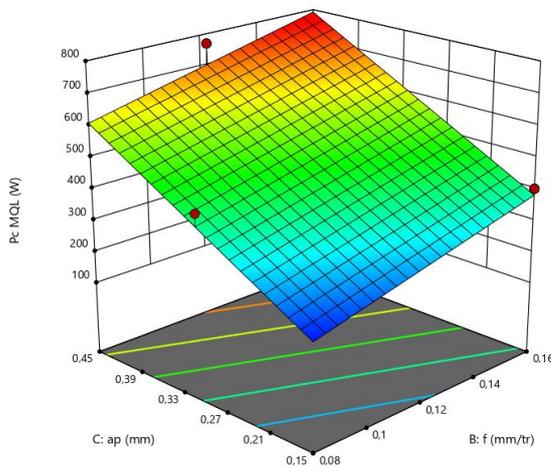


Figure (16.c)

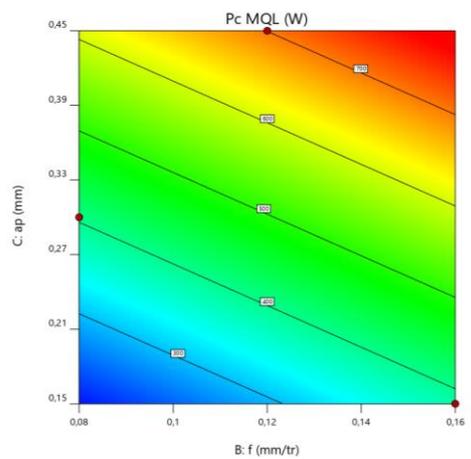


figure (16.f)

Figure III.16 Surfaces de réponse et les contours de la puissance de coupe (Pc) pour le MQL.

**III.5 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la rugosité (Ra)**

**III.5.1 Analyse de la variance pour (Ra)**

Le [tableau III.4](#) illustre les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra) lors de l'usinage à sec et avec un minimum de quantité de lubrification (MQL). L'analyse des résultats montre que l'avance (*f*) est significative puisque la valeur de (*P*) est inférieure à 0,05. Son influence sur la rugosité de surface (Ra) vient en première position avec une contribution 87,15% durant l'usinage à sec et 85,83% pour le MQL. Le deuxième facteur significatif est la vitesse de coupe (*Vc*), sa contribution lors de l'usinage à sec et MQL est de 8,05% et 7,15% respectivement. Finalement, la profondeur de passe (*ap*) n'est pas significative car la valeur de la probabilité (*P*) est supérieure à 0,05. Les contributions de (*ap*) sur la rugosité (Ra) sont faibles, avec des contributions de 0,06% et 0,02% durant l'usinage à sec et environnement MQL respectivement. Les contributions des différents facteurs sur (Ra) sont montrées dans [la Figure III.17](#).

**Tableau III.4** Analyse de la variance pour la rugosité (Ra)

Usinage à sec							
Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	3	0,424771	95,25%	0,424771	0,141590	33,44	0,001
Linéaires	3	0,424771	95,25%	0,424771	0,141590	33,44	0,001
Vc	1	0,035883	8,05%	0,035883	0,035883	8,48	0,033
f	1	0,388621	87,15%	0,388622	0,388622	91,79	0,000
ap	1	0,000267	0,06%	0,000267	0,000267	0,06	0,812
Erreur	5	0,021169	4,75%	0,021169	0,004234		
Total	8	0,445940	100,00%				
Environnement MQL							
Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	3	0,679683	93,01%	0,679683	0,226561	22,16	0,003
Linéaires	3	0,679683	93,01%	0,679683	0,226561	22,16	0,003
Vc	1	0,052267	7,15%	0,052267	0,052267	5,11	0,073
f	1	0,627267	85,83%	0,627267	0,627267	61,36	0,001
ap	1	0,000150	0,02%	0,000150	0,000150	0,01	0,908
Erreur	5	0,051117	6,99%	0,051117	0,010223		
Total	8	0,730800	100,00%				

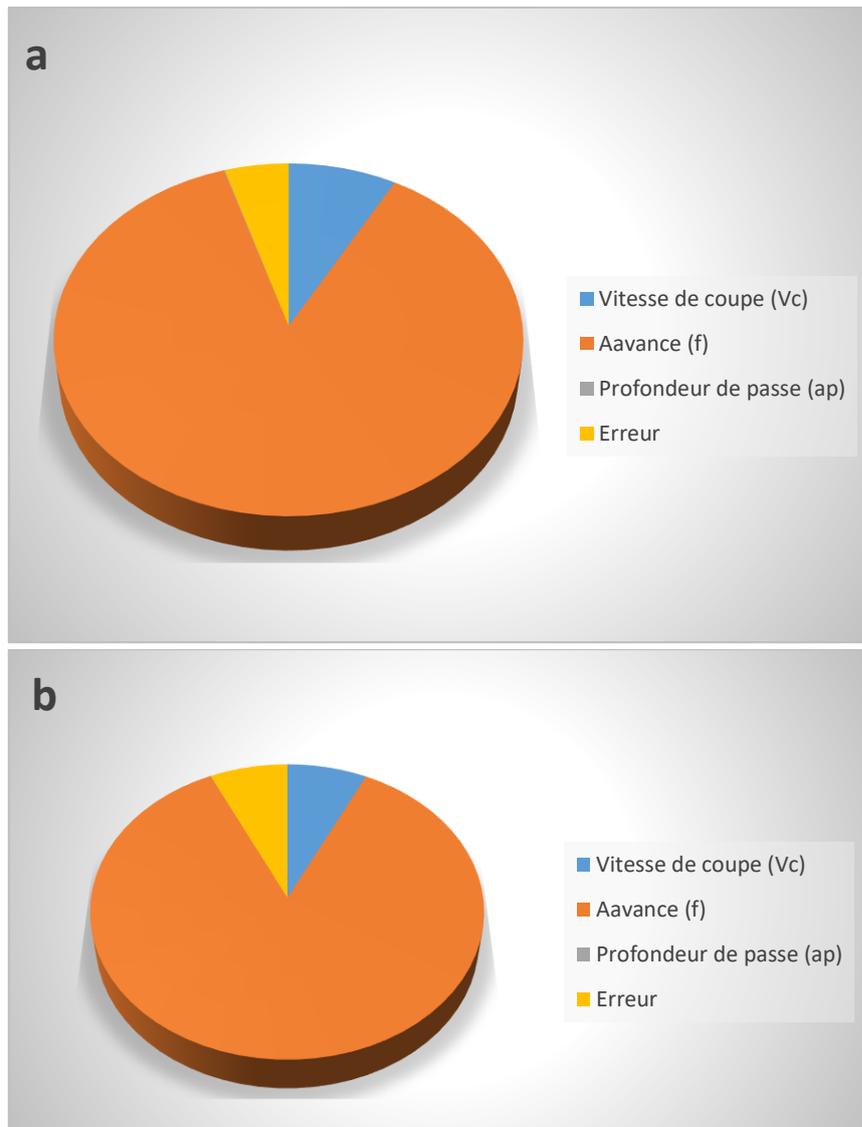


Figure III.17 Contributions des différents facteurs sur (Ra), (a) à sec (b) MQL.

### III.5.2 Graphique des effets principaux pour (Ra)

La figure III.18 présente les graphiques des effets principaux pour la rugosité de surface (Ra). On remarque que l'avance ( $f$ ) affecte fortement la rugosité (Ra) car elle possède la plus grande pente. Le deuxième facteur qui influence (Ra), c'est la vitesse de coupe suivie par la profondeur de passe ( $a_p$ ). On peut voir que l'augmentation de l'avance ( $f$ ) induit une élévation de (Ra), par contre, l'élévation de ( $V_c$ ) contribue à la diminution de (Ra). Concernant le facteur ( $a_p$ ) son influence est presque négligeable pour les deux cas d'usinage à sec et MQL. Les résultats trouvés sont similaires à ceux trouvés dans la littérature [24] [26].

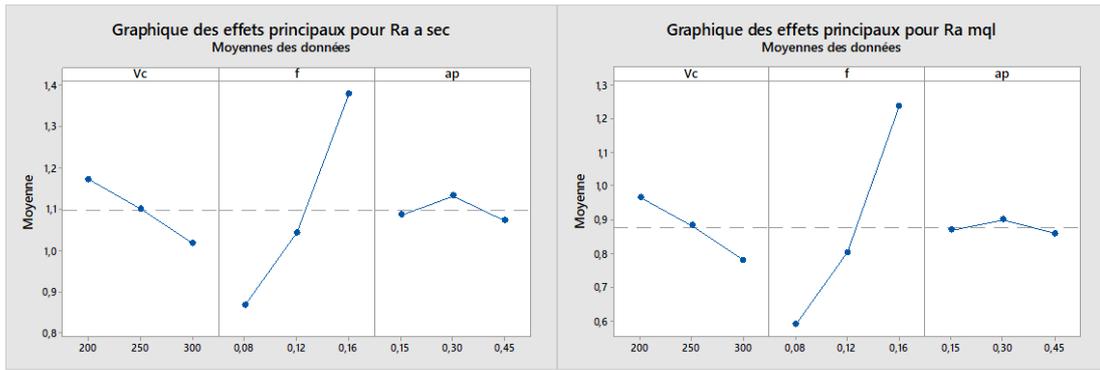


Figure III.18 Graphique des effets principaux pour (Ra).

### III.5.3 Modélisation de la rugosité de surface (Ra)

Les relations fonctionnelle entre la variable dépendante pour la rugosité (Ra) et les variables indépendantes étudiées (Vc, f et ap) durant l'usinage à sec et MQL ont été exprimées par des modèles mathématique (équations linéaires) avec des coefficients de détermination ( $R^2 = 95,25\%$ ) et ( $R^2 = 93,01\%$ ) respectivement. 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.5 III.6) expriment le modèle de la rugosité de la surface (Ra) avec tous les facteurs principaux pour les deux environnements de lubrification.

$$Ra_{\text{à sec}} = 0,733 - 0,001547 Vc + 6,362 f - 0,044 ap \quad (R^2 = 95,25\%) \quad \text{(III.5)}$$

$$Ra_{\text{MQL}} = 0,383 - 0,001867 Vc + 8,08 f - 0,033 ap \quad (R^2 = 93,01\%) \quad \text{(III.6)}$$

### III.5.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra) est présentée dans la figure III.19 pour l'usinage à sec et la figure III.21 pour 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. Les figures III.20 et III.22 montrent les courbes de la normalité pour les deux cas étudiés.

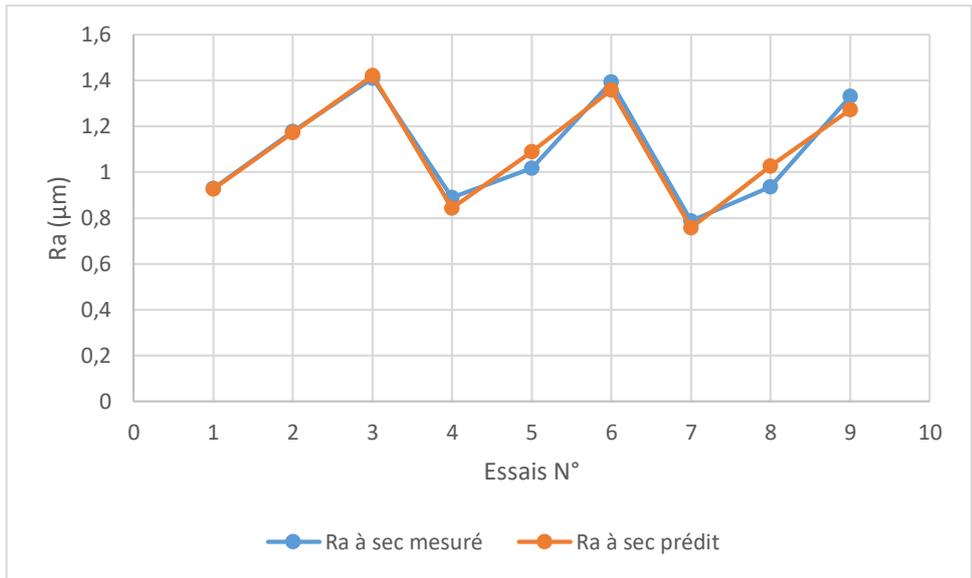


Figure III.19 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Ra) à sec.

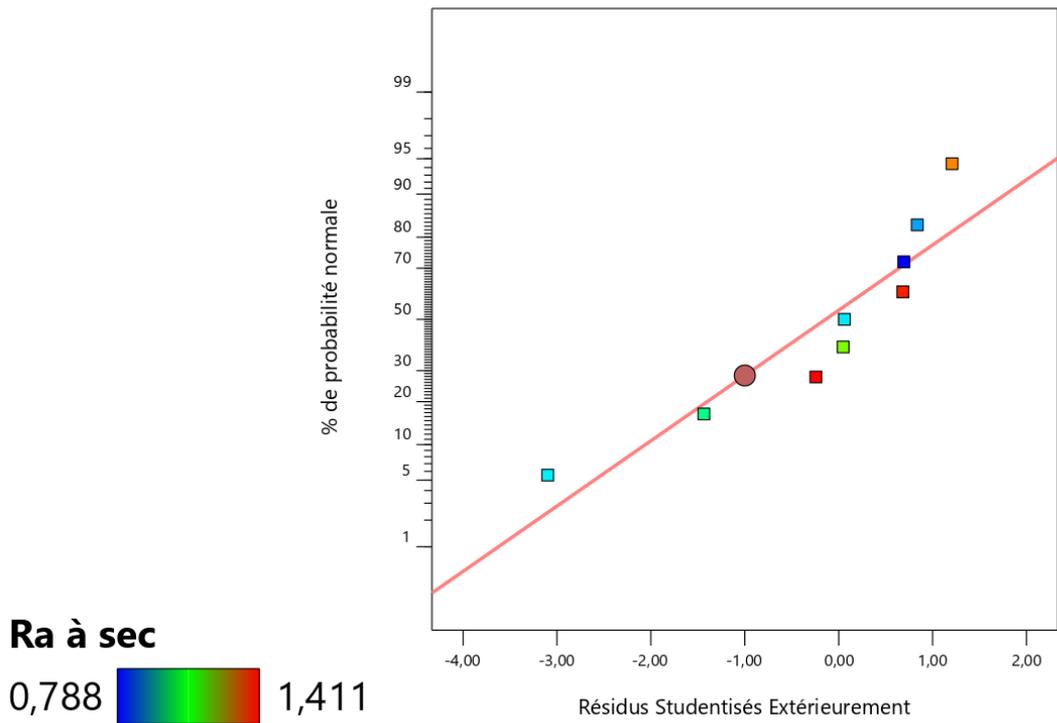


Figure III.20 Courbe de normalité pour (Ra) à sec.

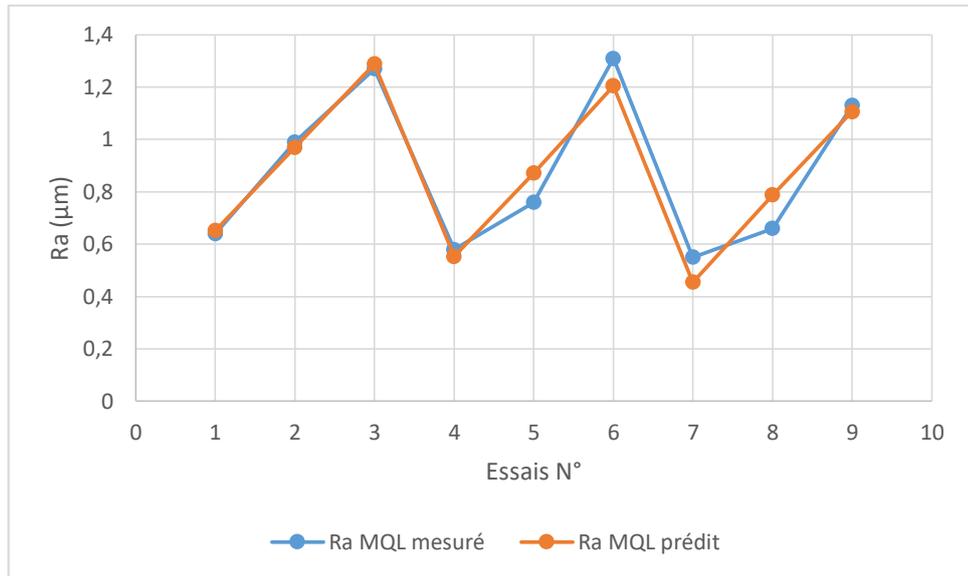


Figure III.21 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Ra) MQL.

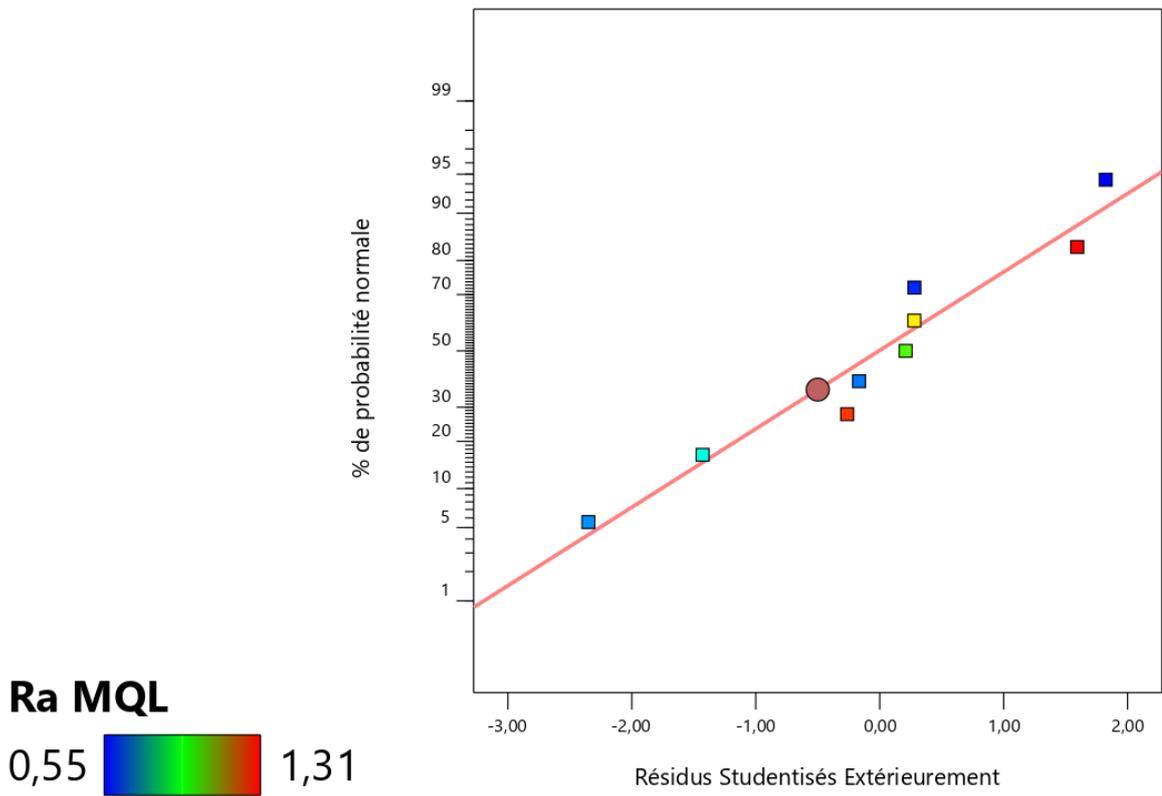


Figure III.22 Courbe de normalité pour (Ra) MQL.

### III.3.5 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Ra)

Les figures III.23 et III.24 présentent les graphes de la surface de réponse 3D (a, b et c) et les contours en 2D (d, e, f) de la rugosité (Ra) 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 la même pour les deux

cas étudiés. Les figures III.23.a et III.24.a illustrent les surfaces de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de la variation des facteurs (Vc) et (f). On remarque que l'augmentation de (f) induit une élévation de (Ra) par contre, l'augmentation de (Vc) induit une légère diminution de la rugosité (Ra). Les figures III.23.b et III.24.b présentent les surfaces de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de la variation des facteurs (Vc) et (ap). L'analyse des courbes montre clairement que les deux facteurs (ap) et (Vc) induisent une très légère diminution de la rugosité (Ra). Les figures III.23.c et III.24.c montrent les surfaces de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de la variation des facteurs (f) et (ap). Il est clair que l'influence de l'avance (f) est plus importante que la profondeur de passe (ap). Les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec d'autres expériences [24][25]. Les figures III.23.d.e.f et III.24.d.e.f présentent les contours de (Ra) en fonction de la variation des conditions de coupe. Ces contours permettent d'estimer la valeur de la rugosité (Ra) en fonction du changement des valeurs des facteurs d'entrés dans l'intervalle des conditions des coupe utilisées.

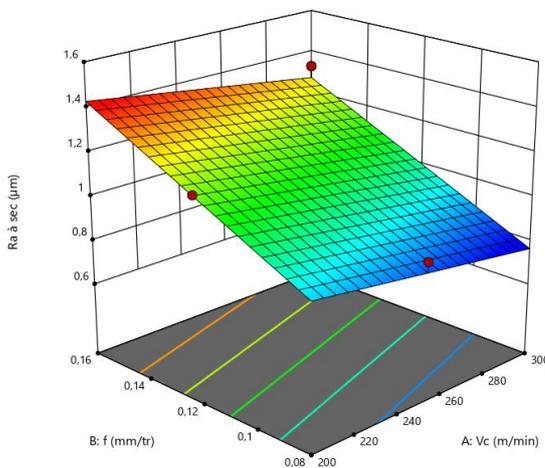


Figure (23.a)

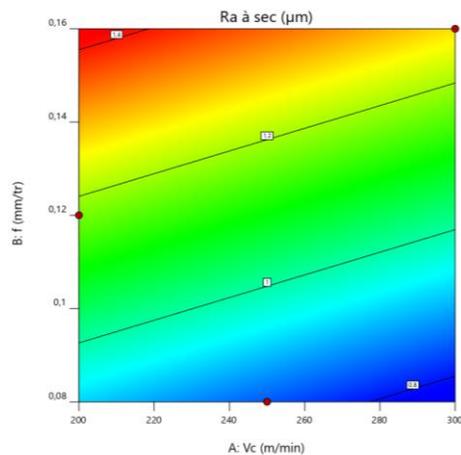


figure (23.d)

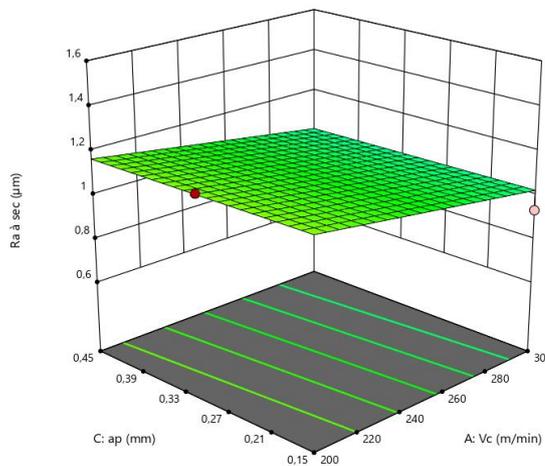


Figure (23.b)

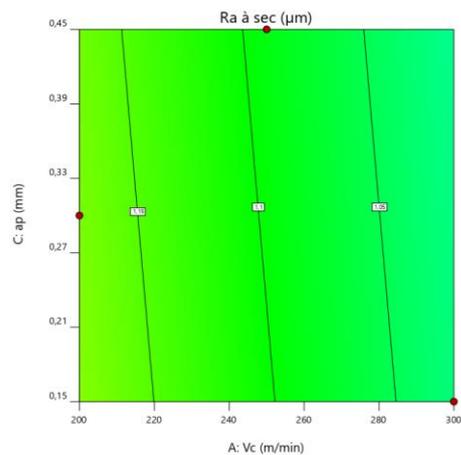


figure (23.e)

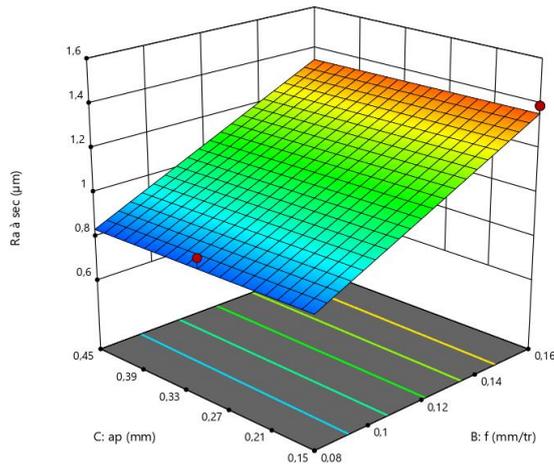


Figure (23.c)

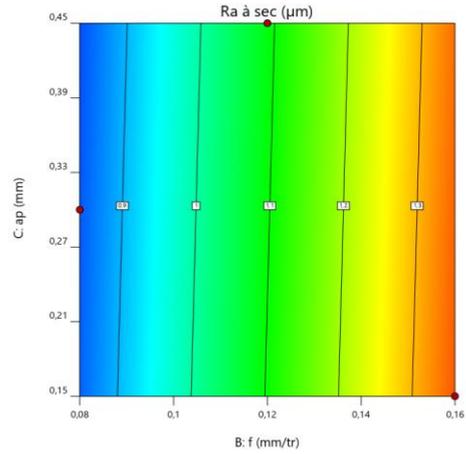


figure (23.f)

Figure III.23 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Ra) pour l'usinage à sec.

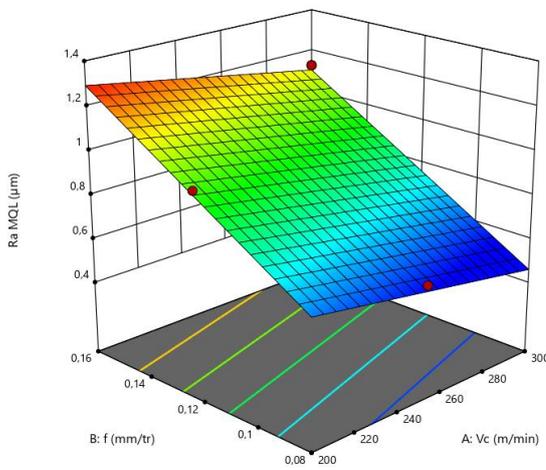


Figure (24.a)

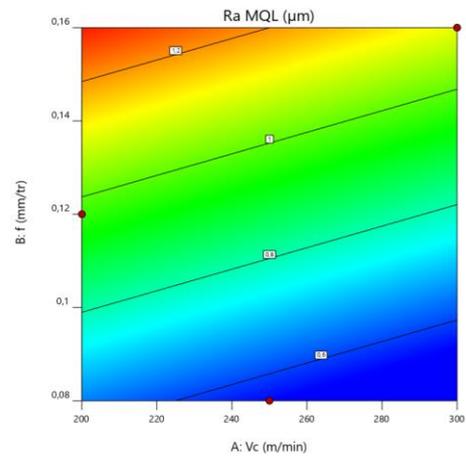


figure (24.d)

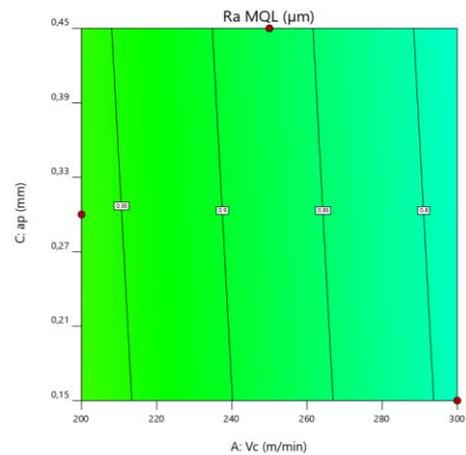
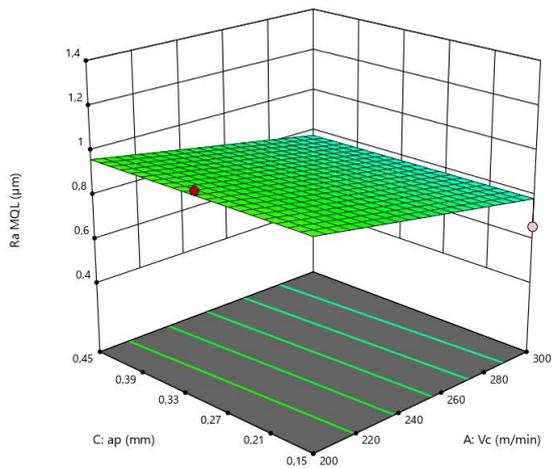


Figure (24.b)

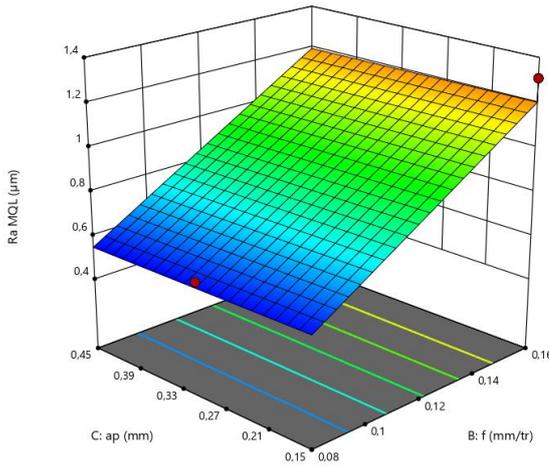


Figure (24.c)

figure (24.e)

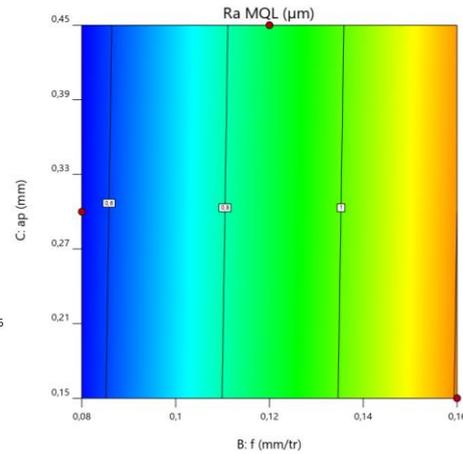


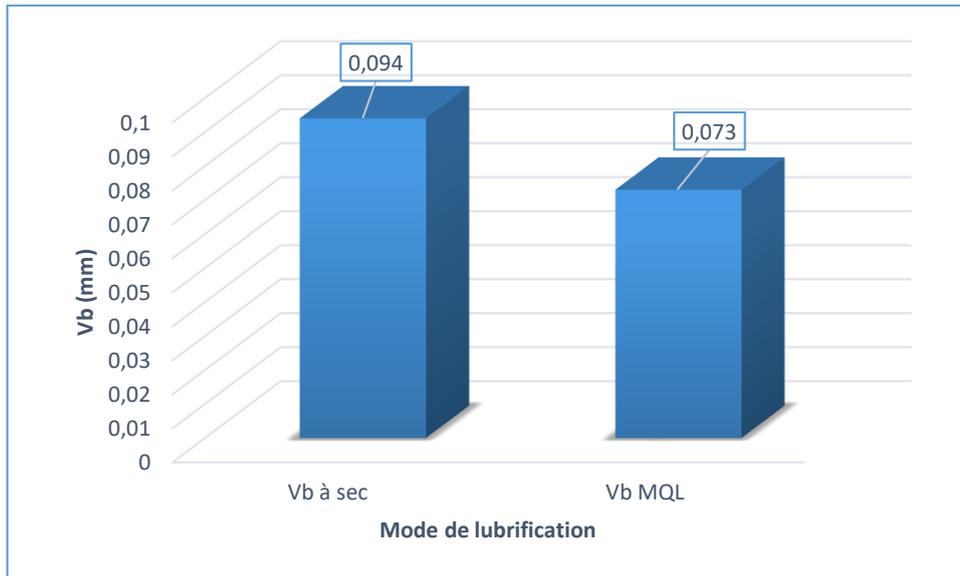
figure (24.f)

Figure III.24 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Ra) pour le MQL.

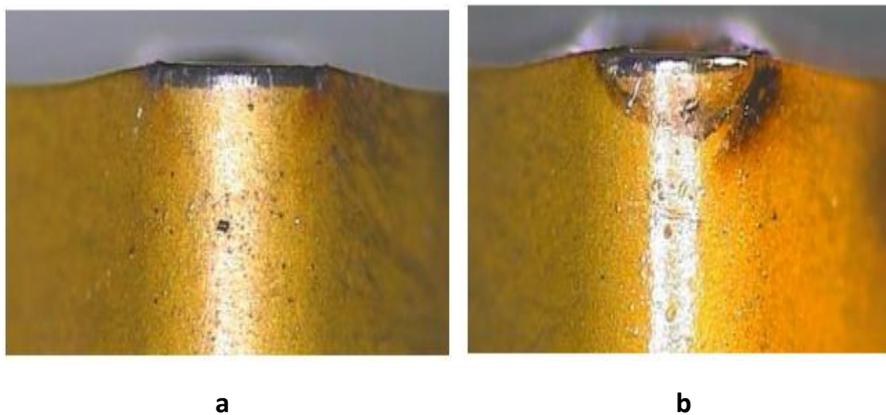
### III.4 Évolution des paramètres technologiques pour les deux modes de lubrification

Afin d'évaluer et comparer les paramètres technologiques de sortie ( $F_z$ ), ( $P_c$ ) et ( $R_a$ ) pour les deux modes de lubrification (à sec et MQL), on a réalisé des essais paramétriques concernant l'usure en dépouille de l'outil, la rugosité de surface, l'effort de coupe, la température de coupe et la morphologie du copeau obtenu. Les conditions de coupe pour réaliser ces essais sont comme suit : Une éprouvette de largeur  $L = 125$  mm de l'acier (AISI 52100),  $V_c = 380$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr,  $a_p = 0.4$  mm et  $t_c = 46$  s.

La figure III.25 présente les valeurs de l'usure en dépouille ( $V_b$ ) pour l'usinage à sec et MQL. On remarque que la valeur d'usure ( $V_b$ ) durant l'usinage à sec (0.094 mm) est plus grande que la valeur de MQL (0.073 mm), avec un rapport ( $V_b$  à sec /  $V_b$  MQL) = 1.29. La figure III.26 montre la morphologie de l'usure en dépouille de la plaquette GC 2015 durant l'usinage à sec et l'environnement MQL. On remarque que l'usure ( $V_b$ ) est régulière sous forme d'une bande pour les deux modes de lubrification. La présence de l'huile dans la lubrification MQL a fait baisser l'usure ( $V_b$ ) d'une valeur de 22,34%.

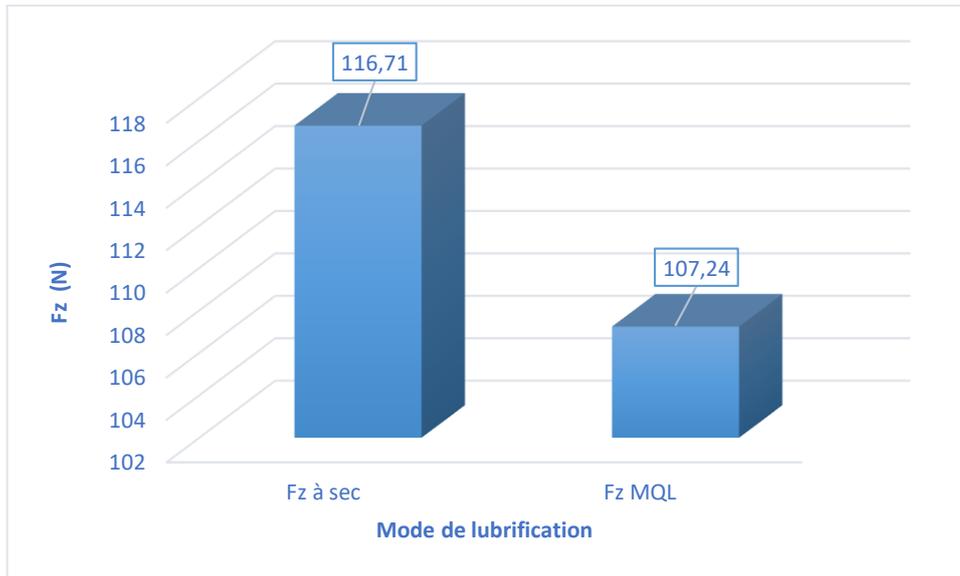


**Figure III.25** Comparaison entre les valeurs de l'usure (Vb) à sec et MQL



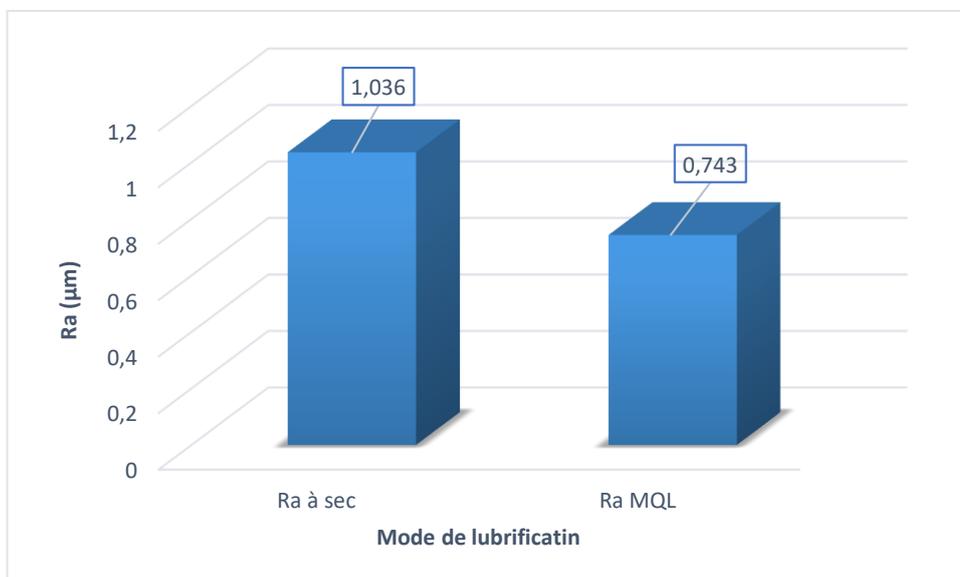
**Figure III.26** Morphologie de l'usure en dépouille, **(a)** à sec **(b)** MQL

La [figure III.27](#) montre les valeurs de l'effort (Fz) pour l'usinage à sec et l'environnement MQL. Il est clair que la valeur de l'effort (Fz) pour l'usinage à sec est supérieure que la valeur (Fz) durant le MQL, avec un rapport  $Fz_{à\ sec} / Fz_{MQL} = 1.09$ . En utilisant le MQL, on remarque que la valeur de l'effort (Fz) a chuté d'une valeur de 8.11 % par rapport à l'usinage à sec, en raison de l'effet de l'huile qui contribue à minimiser les frottements et augmenter le glissement du copeau. Ces résultats sont confirmés par d'autres recherches [\[24\]](#).



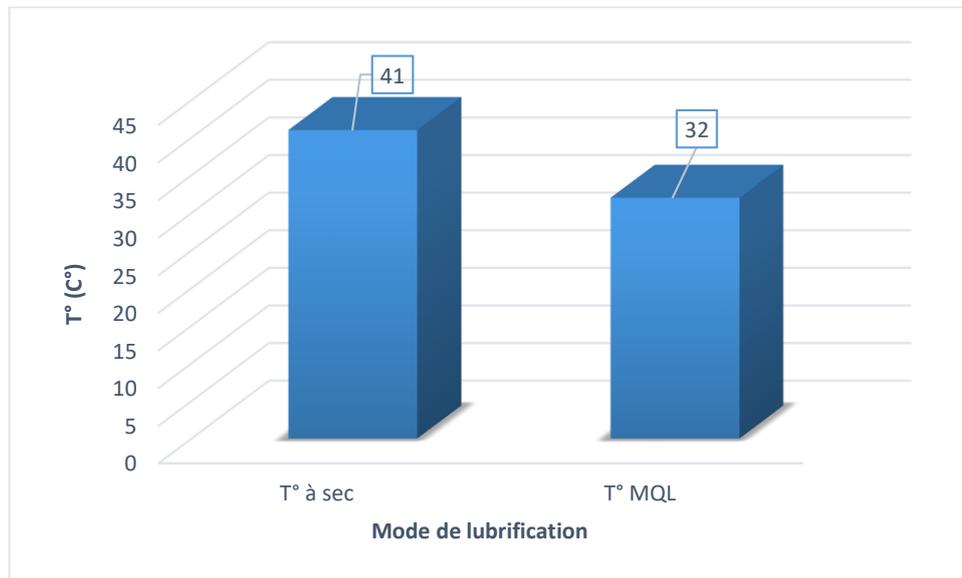
**Figure III.27** Comparaison entre les valeurs de l'effort ( $F_z$ ) à sec et MQL

La [figure III.28](#) illustre les valeurs de la rugosité ( $R_a$ ) pour l'usinage à sec et l'environnement MQL. L'analyse de résultat montre clairement que la rugosité de surface enregistrée lors de l'usinage à sec est de  $R_{a \text{ à sec}} = 1.03 \mu\text{m}$  et la que la valeur de  $R_{a \text{ MQL}} = 0.743 \mu\text{m}$  avec un rapport de 1.40. L'utilisation de la lubrification MQL a fait diminuer la rugosité de surface ( $R_a$ ) avec une valeur de 28.28 %. Les valeurs plus faibles de la rugosité de surface lors de l'usinage dans des conditions MQL pourraient être attribuées d'une part à un meilleur dégagement et de contrôle de copeau sous MQL à cause de la pression (Huile + air) exercée sur la surface de la pièce durant l'usinage, ce qui améliore l'état de surface. D'autre part, à cause de la baisse de température qui contribue à diminuer l'usure. Des explications similaires ont été rapportées par [\[24\]](#)



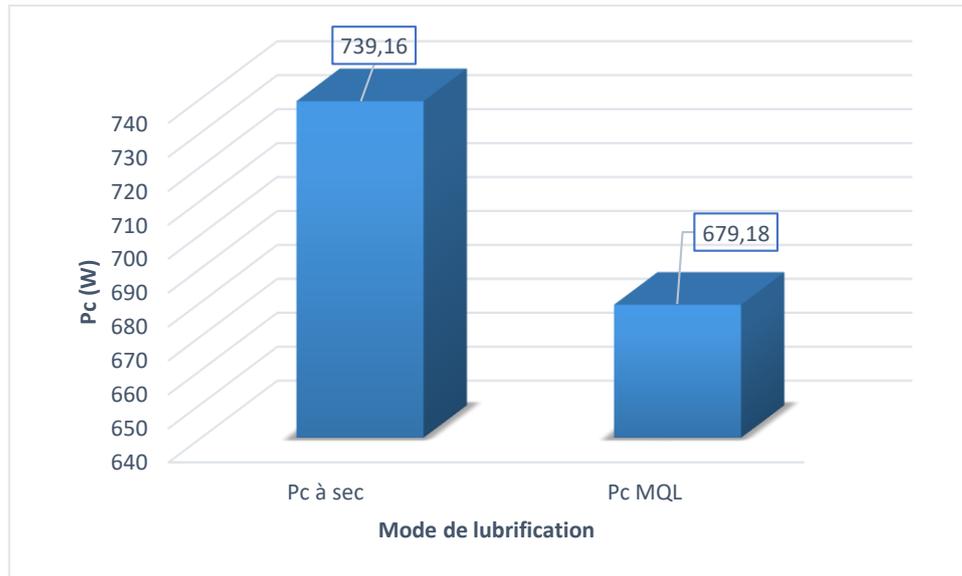
**Figure III.28** Comparaison entre les valeurs de la rugosité ( $R_a$ ) à sec et MQL

La figure III.29 présente les valeurs de la température ( $T^\circ$ ) pour l'usinage à sec et l'environnement MQL. On remarque que la valeur de  $41^\circ$  est enregistrée durant l'usinage à sec, par contre la valeur  $32^\circ$  est enregistrée durant la lubrification MQL, ce qui représente avec un rapport  $(T^\circ \text{ à sec}) / (T^\circ \text{ MQL}) = 1.28$ . Une amélioration de 21.95 % a été obtenue avec l'environnement MQL par rapport à l'environnement sec. Cette diminution de la température est causée par la diminution des frottements entre l'outil et la pièce et le frottement du copeau sur la surface d'attaque. Les résultats trouvés sont en bon accord avec [26].



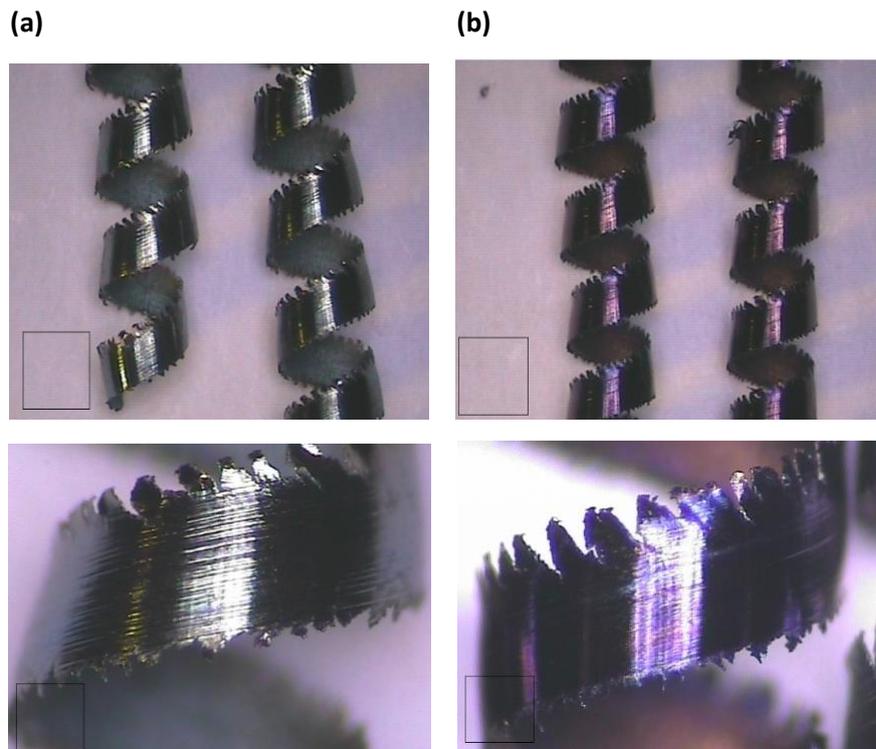
**Figure III.29** Comparaison entre les valeurs de la température ( $T^\circ$ ) à sec et MQL

La figure III.30 présente les valeurs de la puissance de coupe ( $P_c$ ) pour l'usinage à sec et l'environnement MQL. On remarque que la valeur de puissance de coupe ( $P_c$ ) durant l'usinage à sec est de (739.16 W), par contre pour le MQL, la valeur est (679.18 W), avec un rapport  $(P_c \text{ à sec} / P_c \text{ MQL}) = 1.08$ . La diminution de la puissance de coupe durant le MQL est expliquée par la diminution de l'effort de coup. La baisse de ( $P_c$ ) pour le MQL est évaluée à 8.11 %.



**Figure III.30** Comparaison entre les valeurs de la puissance de coupe à sec et MQL

La [figure III.31](#) montre la forme des copeaux produit par l'usinage à sec et MQL. On remarque que la forme des copeaux pour les deux modes de lubrification est semblable, elle se distingue sous forme de copeau hélicoïdale en rondelle. Les copeaux obtenus sur ces extrémités présentent des dentelures régulières de grande et de petite dimensions, cela est valable pour l'usinage à sec et l'environnement MQL. On remarque aussi, que le copeau obtenu à sec garde la couleur grise du matériau d'origine par contre, le copeau pour le MQL est coloré. Cela peut être expliqué par le contact de l'huile à haute pression par le copeau chaud, ce qui donne une couleur entre le bleu et le violet.



**Figure III.31** Copeaux produits selon les deux modes de lubrification, **(a)** à sec **(b)** MQL

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé deux série d'essais afin d'étudier l'usinage de l'acier à roulement AISI 52100. La première série concerne des essais suivant le plant de Taguchi L9 pour deux modes de lubrifications (à sec et MQL). Les résultats trouvés nous ont permis de faire une étude statistique afin de quantifier l'influence des facteurs d'entrée sur les paramètres technologiques de sortie. Aussi, l'exploitation des résultats a permis de proposer des modèles mathématiques des paramètres de sortie ( $F_z$ ,  $P_c$  et  $R_a$ ) pour l'usinage à sec et MQL. La deuxième série concerne la comparaison des paramètres des sorties ( $V_b$ ,  $F_z$ ,  $R_a$ ,  $T^\circ$ ,  $P_c$  et la formation de copeau) pour les deux modes d'usinage (à sec et MQL) à une vitesse de coupe  $V_c = 380$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr,  $a_p = 0.4$  mm et  $L = 125$  mm.

---

# **Chapitre IV**

---

---

## **Optimisation des conditions de coupe**

---

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les résultats de l'optimisation des conditions de coupe, lors de l'usinage de l'acier à roulement AISI 52100 en usinage à sec et avec lubrification MQL. La première partie des résultats est réservée à l'optimisation mono-objective de Taguchi basée sur l'analyse du signal/bruit (S/N). Dans la deuxième partie, une optimisation multi-objective des conditions de coupe est réalisée en utilisant la méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA). La méthode (GRA) est suivie par une autre méthode d'optimisation, elle a pour but l'application de l'approche de la fonction de désirabilité basée sur l'utilisation des modèles mathématiques trouvés dans le chapitre précédent.

### IV.2 Optimisation mono-objective de Taguchi

Dans le but de fabriquer des pièces de haute qualité avec une productivité maximale, un coût minimum et dans un bref délai ; les paramètres de coupe devraient être correctement choisis. Le but de notre tâche est d'optimiser les paramètres technologiques d'usinage, l'effort tangentiel ( $F_z$ ), la puissance de coupe ( $P_c$ ) et la rugosité de surface ( $R_a$ ) lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 (100Cr6) à sec et dans un environnement de lubrification (MQL). Les paramètres d'entrée sont la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ). Dans notre cas, la matrice de Taguchi L9 a été utilisée.

L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit (S/N). Le signal représente la variable principale à l'entrée du procédé et le bruit représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie. Le rapport (S/N) mesure les caractéristiques de qualité provenant des valeurs désirées. L'intérêt de la conception de Taguchi est que de multiples facteurs peuvent être considérés à la fois.

Dans cette étude, le minimum de l'effort tangentiel de coupe ( $F_z$ ) et la plus faible valeur de la puissance de coupe ( $P_c$ ) et la rugosité de surface ( $R_a$ ) minimale sont souhaitables. La caractéristique (S/N) la plus petite est la meilleure (smaller-the-better) a été utilisé pour ( $F_z$ ), ( $P_c$ ) et ( $R_a$ ).

L'optimum est une valeur minimale (plus petit c'est meilleur) : la valeur cible ( $m$ ) est égale à zéro, on vise la minimisation de la caractéristique de performance. La caractéristique de performance  $Y$  a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec ( $y$ ). Taguchi recommande l'utilisation de la fonction représentée par l'équation (IV.1).

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

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

$n$  = nombre de mesures effectuées.

**Tableau IV.1** Signal/Bruit des paramètres de sortie étudiées ( $F_z$ ), ( $P_c$ ) et ( $R_a$ ) durant l'usinage à sec et le MQL

N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	S/B ( $F_z$ )	S/B ( $F_z$ )	S/B ( $P_c$ )	S/B ( $P_c$ )	S/B ( $R_a$ )	S/B ( $R_a$ )
				à sec	MQL	à sec	MQL	à sec	MQL
1	200	0,08	0,15	-35,6995	-35,1388	-46,1568	-45,5964	0,63969	3,87640
2	200	0,12	0,3	-42,0986	-41,0769	-52,5541	-51,5344	-1,41553	0,08730
3	200	0,16	0,45	-47,2508	-46,8128	-57,7084	-57,2704	-2,99054	-2,07607
4	250	0,08	0,3	-40,5127	-40,5633	-52,9084	-52,9590	1,01220	4,73144
5	250	0,12	0,45	-45,3570	-45,3246	-57,7528	-57,7204	-0,15496	2,38373
6	250	0,16	0,15	-39,9600	-39,7372	-52,3557	-52,1330	-2,87902	-2,34543
7	300	0,08	0,45	-42,7147	-41,7058	-56,6941	-55,6852	2,06948	5,19275
8	300	0,12	0,15	-37,8597	-35,2386	-51,8391	-49,2180	0,58377	3,60912
9	300	0,16	0,3	-43,8251	-42,3521	-57,8045	-56,3315	-2,47703	-1,06157

#### IV.2.1 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

##### IV.2.1.1 Analyse des effets principaux sur l'effort tangentiel ( $F_z$ )

Le [tableau IV.2](#) montre la moyenne des ratios (S/B) de l'effort ( $F_z$ ) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et l'environnement MQL. Delta est égal à la différence entre le maximum et minimum de la moyenne des rapports (S/N) pour un facteur de contrôle particulier. Plus la valeur de delta est élevée, plus le facteur de contrôle est important. On remarque que les paramètres d'usinage ( $V_c$ ), ( $f$ ) et ( $a_p$ ) présentent des effets différents sur l'effort de coupe ( $F_z$ ). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe ( $a_p$ ) avec un effet de 7.27 pour l'usinage à

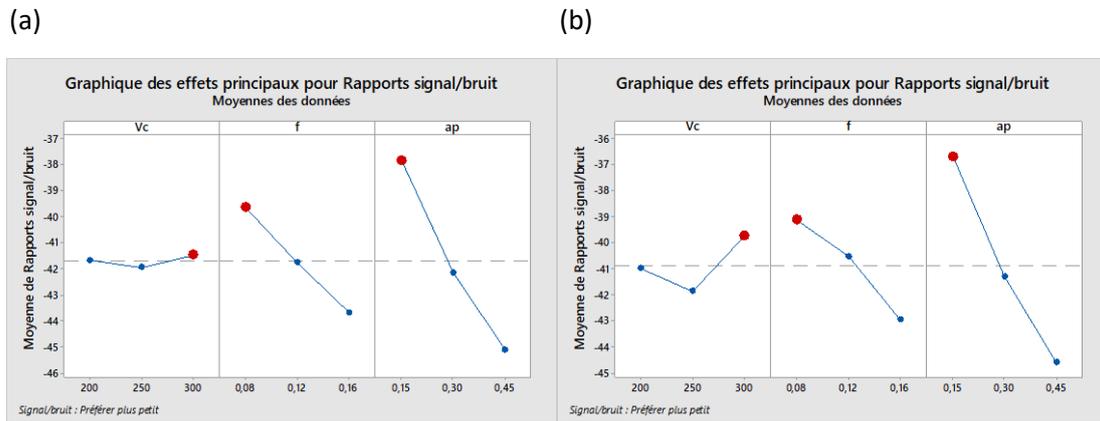
sec et 7.91 pour le MQL, suivie par l'avance ( $f$ ) avec un effet de 4.04 et 3,83 durant l'usinage à sec et MQL respectivement. En dernier lieu, vient la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec un effet de 0.48 durant l'usinage à sec et 2.11 pour l'environnement MQL.

**Tableau IV.2** Moyenne des ratios (S/B) de l'effort ( $F_z$ ) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et l'Environnement MQL

Usinage à sec			
Niveau	$V_c$	$f$	$a_p$
1	- 41,68	- 39,64	- 37,84
2	- 41,94	- 41,77	- 42,15
3	- 41,47	- 43,68	- 45,11
Delta	0,48	4,04	7,27
Rang	3	2	1
Environnement MQL			
Niveau	$V_c$	$f$	$a_p$
1	-41,01	-39,14	-36,70
2	-41,88	-40,55	-41,33
3	-39,77	-42,97	-44,61
Delta	2,11	3,83	7,91
Rang	3	2	1

La [figure IV.1](#) montre le graphique des effets principaux du rapport (S/N) pour l'effort ( $F_z$ ) durant l'usinage à sec et l'environnement MQL. La [figure IV.1 \(a et b\)](#) montre que les niveaux optimaux des paramètres de coupe afin de minimiser l'effort tangentiel ( $F_z$ ) ont été spécifiés comme suit: ( $V_c3$ ,  $f1$  et  $a_p1$ ), en d'autres termes, une valeur optimale de ( $F_z$ ) est obtenu à une vitesse de coupe  $V_c = 300$  m/min, la plus faible avance  $f = 0,08$  mm/tr et la petite profondeur de passe  $a_p = 0,15$  mm. Notons que le régime optimal en cercle rouge a été choisi parmi les niveaux les plus élevés des facteurs ( $V_c$ ,  $f$  et

ap). Le [tableau IV.3](#) récapitule les conditions optimales de l'effort ( $F_z$ ) pour les deux modes de lubrification. On remarque que le régime optimal trouvé est le même pour les deux modes d'usinage (à sec et MQL).



**Figure IV.1** Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de l'effort ( $F_z$ ), (a) à sec (b) MQL

**Tableau IV.3** Conditions optimales de l'effort ( $F_z$ ) pour les deux modes de lubrification

Environnement	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
à sec	300	0.08	0.15
MQL	300	0.08	0.15

#### IV.2.1.2 Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe ( $P_c$ )

Le [tableau IV.4](#) montre la moyenne des ratios (S/B) de la puissance ( $P_c$ ) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et l'environnement MQL. Il est clair que les paramètres d'usinage ( $V_c$ ), ( $f$ ) et ( $a_p$ ) présentent des effets différents sur la puissance de coupe ( $P_c$ ). Le paramètre qui influe fortement est la profondeur de passe ( $a_p$ ) avec un effet de 7.27 pour l'usinage à sec et 7.91 pour le MQL. Le deuxième paramètre qui influe sur la puissance de coupe est l'avance ( $f$ ) avec un effet de 4.04 et 3.83 pour l'usinage à sec et MQL respectivement. Le dernier paramètre est la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec un effet de 3.31 durant l'usinage à sec et 2.80 pour l'environnement MQL.

**Tableau IV.4** Moyenne des ratios (S/B) de la puissance (Pc) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et l'Environnement MQL

Usinage à sec			
Niveau	Vc	f	ap
1	-52,14	-51,92	-50,12
2	-54,34	-54,05	-54,42
3	-55,45	-55,96	-57,39
Delta	3,31	4,04	7,27
Rang	3	2	1
Environnement MQL			
Niveau	Vc	f	ap
1	-51,47	-51,41	-48,98
2	-54,27	-52,82	-53,61
3	-53,74	-55,24	-56,89
Delta	2,80	3,83	7,91
Rang	3	2	1

La [figure IV.2](#) montre le graphique des effets principaux du rapport (S/N) pour la puissance de coupe (Pc) durant l'usinage à sec et MQL. D'après la [figure IV.2](#), les conditions optimales pour une puissance de coupe minimale sont la combinaison des niveaux (Vc1, f1 et ap1) : la vitesse de coupe Vc = 200 m/min, la plus faible avance  $f = 0,08$  mm/tr et la petite profondeur de passe  $ap = 0,15$  mm. Le [tableau IV.5](#) montre les conditions optimales de puissance (Pc) pour les deux modes de lubrification. Il est clair que le régime optimal trouvé est le même pour les deux modes d'usinage (à sec et MQL).

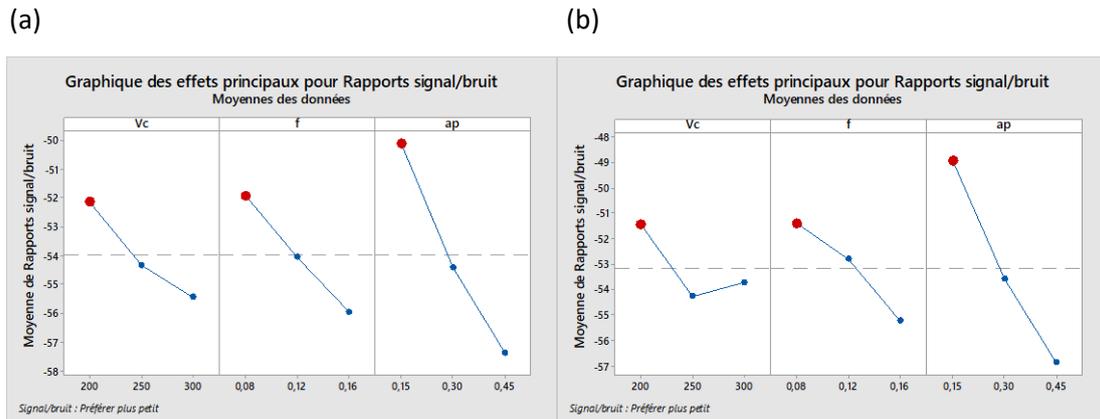


Figure IV.2 Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (Pc), (a) à sec (b) MQL

Tableau IV.5 Conditions optimales de la puissance (Pc) pour les deux modes de lubrification

Environnement	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
à sec	200	0.08	0.15
MQL	200	0.08	0.15

#### IV.2.1.3 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra)

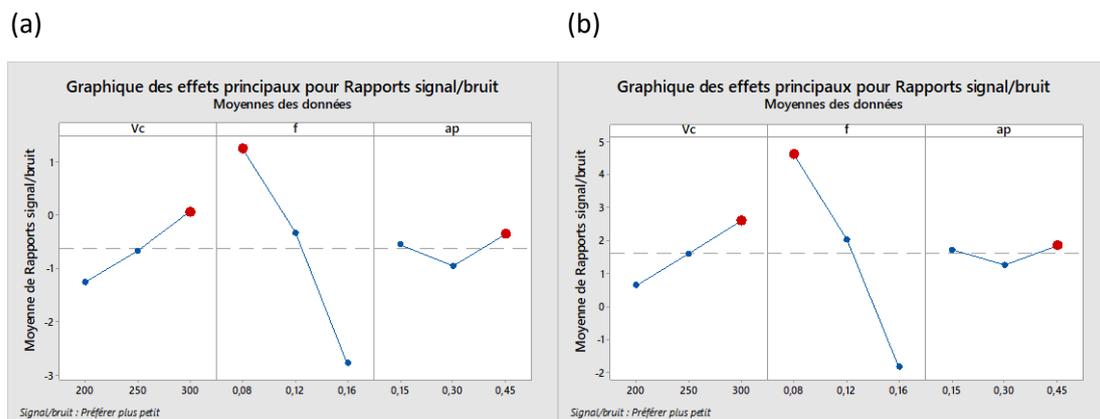
Le tableau IV.6 montre la moyenne des ratios (S/B) de l'effort (Ra) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et MQL. L'analyse des résultats du tableau IV.6 montre que les paramètres d'usinage (Vc), (f) et (ap) présentent des effets différents sur la rugosité de surface (Ra). La plus importante influence correspond à l'avance (f) avec 4,02256 et 6,4279 des effets durant l'usinage à sec et l'environnement MQL respectivement. On peut constater aussi que (Vc) a un effet de 1,31420 lors de l'usinage à sec et de 1,9509 pour le MQL. En dernier lieu, vient la profondeur de passe ap avec 0,60145 durant l'usinage à sec et 0,5811 pour le MQL.

Tableau IV.6 Moyenne des ratios (S/B) de la rugosité (Ra) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et MQL

Usinage à sec			
Niveau	Vc	f	ap
1	-1,25546	1,24045	-0,55186

2	-0,67393	-0,32891	-0,96012
3	0,05874	-2,78220	-0,35867
Delta	1,31420	4,02265	0,60145
Rang	2	1	3
<b>Environnement MQL</b>			
Niveau	Vc	f	ap
1	0,6292	4,6002	1,7134
2	1,5899	2,0267	1,2524
3	2,5801	-1,8277	1,8335
Delta	1,9509	6,4279	0,5811
Rang	2	1	3

La [figure IV.3](#) montre le graphique des effets principaux du rapport (S/N) pour la rugosité (Ra) durant l'usinage à sec et MQL. Pour la minimisation de (Ra), le régime optimal obtenu par la méthode de Taguchi est (Vc3, f1, ap3) ce qui correspond à une vitesse de coupe Vc = 300 m/min, l'avance f = 0.08 mm/tr et une profondeur de passe ap=0.45 mm. Le [tableau IV.7](#) montre les conditions optimales de la rugosité (Ra) pour les deux modes de lubrification. On remarque que le régime optimal trouvé est le même pour les deux modes d'usinage (à sec et MQL).



**Figure IV.3** Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (Ra), (a) à sec (b) MQL

**Tableau IV.7** Conditions optimales de la rugosité (Ra) pour les deux modes de lubrification

Environnement	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
à sec	300	0.08	0.45
MQL	300	0.08	0.45

#### IV.2.2 Récapitulative des résultats de l'optimisation mono-objective

Le [tableau IV.8](#) montre tous les résultats de l'optimisation mono-objective pour les deux modes de lubrification. On remarque qu'il y a une similarité entre les valeurs optimales de l'usinage à sec et le MQL pour tous les paramètres de sortie. Il est clair que la valeur de l'avance ne change pas pour tous les régimes optimaux trouvés, elle est restée inchangeable avec une valeur égale à 0.08 mm/tr. La vitesse de coupe a pris la valeur maximale (300 mm/min) pour la minimisation des deux paramètres (Fz et Ra), par contre elle a pris la valeur minimale (Vc=200 m/min) pour la minimisation de la puissance de coupe. La profondeur de passe a pris une valeur minimale (ap=0.15 mm) pour les régimes qui conduisent à la minimisation de (Fz) et (Pc), tandis que (ap) a pris la valeur (ap= 0.45 mm) pour la minimisation de (Ra).

**Tableau IV.8** Récapitulative des résultats de l'optimisation de Taguchi basée sur (S/N)

Paramètre optimisé	Combinaison optimale	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
Fz à sec	Vc3, f1, ap1	300	0.08	0.15
Fz MQL	Vc3, f1, ap1	300	0.08	0.15
Pc à sec	Vc1, f1, ap1	200	0.08	0.15
Pc MQL	Vc1, f1, ap1	200	0.08	0.15
Ra à sec	Vc3, f1, ap3	300	0.08	0.45
Ra MQL	Vc3, f1, ap3	300	0.08	0.45

#### IV.3 Optimisation par la Méthode d'Analyse Relationnelle Grise (GRA)

L'analyse Relationnelle Grise (GRA) est une méthode d'optimisation qui permet de réduire un problème d'optimisation multi réponse à un problème d'optimisation à une seule réponse appelé qualité relationnelle unique [28]. Dans notre cas, nous avons appliqué cette méthode afin de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui nous permet de minimiser

l'effort de coupe tangentiel (Fz), la puissance de coupe (Pc) et la rugosité de surface (Ra) simultanément. Pour atteindre cet objectif, nous avons suivi les étapes suivantes de la méthode GRA :

**Etape 1 : La normalisation**

Avant d'entamer les démarches de l'optimisation par (GRA), les données doivent d'abord être normalisées pour éviter les variations d'unités. Une valeur appropriée est dérivée de la valeur d'origine pour rendre le tableau compris entre 0 et 1. Si la réponse doit être minimisée, les caractéristiques les plus petites possibles sont destinées à la normalisation afin de les redimensionner dans une plage acceptable à l'aide de la formule suivante :

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

Où  $i = 1, \dots, m$ ;  $k = 1, \dots, n$ ,  $m$  est le nombre de données expérimentales et  $n$  est le nombre de réponses.  $x_i^* (k)$  désigne la séquence d'origine,  $x_i^*(k)$  désigne la séquence après le prétraitement des données,  $\max x_i (k)$  désigne la plus grande valeur de  $x_i (k)$ ,  $\min x_i (k)$  désigne la plus petite valeur de  $x_i (k)$ , et  $x$  est la valeur souhaitée.

Les données expérimentales du plan L9 ont été normalisées à la fois pour l'effort de coupe tangentiel (Fz), la puissance de coupe (Pc) et la rugosité de surface (Ra) en utilisant l'équation (IV.2) et sont présentés dans le [tableau IV.9](#).

**Tableau IV.9** Résultats expérimentale normalisé ( $x_i (k)$ )

N° d'essais	Usinage à sec			Environnement MQL		
	Fz	Pc	Ra	Fz	Pc	Ra
1	1,000	1,000	0,774	1,000	1,000	0,882
2	0,608	0,614	0,376	0,654	0,677	0,421
3	0,000	0,015	0,000	0,000	0,067	0,053
4	0,734	0,584	0,836	0,694	0,561	0,961
5	0,266	0,008	0,631	0,213	0,000	0,724
6	0,772	0,631	0,029	0,754	0,631	0,000
7	0,553	0,163	1,000	0,601	0,278	1,000
8	0,898	0,673	0,764	0,996	0,830	0,855
9	0,443	0,000	0,130	0,543	0,196	0,237

**Etape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris**

La prochaine étape consiste à calculer le coefficient relationnel gris  $\xi_i (k)$  à partir des valeurs normalisées, à l'aide de la formule suivante :

$$\xi_i (k) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{oi} (k) + \xi \Delta_{max}}$$

IV.3

Où :

$\Delta_{oi} (k)$  est la différence en valeur absolue entre  $x_{i0} (k)$  et  $x_i (k)$ .

$\Delta_{min}$  est la plus petite valeur de  $\Delta_{oi} (k)$ .

$\Delta_{max}$  est la plus grande valeur de  $\Delta_{oi} (k)$ .

$\xi$  est le coefficient de distinction ou d'identification et la plage se situe entre 0 et 1. En général, la valeur de  $\xi$  est définie à 0,5.

**Tableau IV.10** Coefficients du  $\xi_i (k)$

N° d'essais	Usinage à sec			Environnement MQL		
	Fz	Pc	Ra	Fz	Pc	Ra
1	1,000	1,000	0,688	1,000	1,000	0,809
2	0,561	0,565	0,445	0,591	0,608	0,463
3	0,333	0,337	0,333	0,333	0,349	0,345
4	0,652	0,546	0,753	0,620	0,532	0,927
5	0,405	0,335	0,575	0,389	0,333	0,644
6	0,687	0,575	0,340	0,670	0,575	0,333
7	0,528	0,374	1,000	0,556	0,409	1,000
8	0,831	0,604	0,679	0,992	0,746	0,776
9	0,473	0,333	0,365	0,523	0,384	0,396

**Etape 3 : Calcul du GRG (Grey relational grade)**

Après avoir calculé la moyenne des coefficients du relationnel gris (Grey Relational Coefficients), les  $\gamma_i$  (Grey Relational Grade) peuvent être obtenu comme suit :

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=i}^n \xi (k)$$

IV.4

n est nombre de caractéristiques de réponse. Le résultat de GRG est présenté dans le [tableau IV.11](#).

**Tableau IV.11** Qualité Rationnelle Grise (GRG)

N° d'essais	Usinage à sec		Environnement MQL	
	GRG	Rank	GRG	Rank
1	0,896	1	0,936	1
2	0,523	6	0,554	5

3	0,334	9	0,343	9
4	0,650	3	0,693	3
5	0,439	7	0,455	7
6	0,534	5	0,526	6
7	0,634	4	0,655	4
8	0,705	2	0,838	2
9	0,390	8	0,434	8

Le régime optimal obtenu par la méthode (GRA) pour la minimisation de (Fz), (Pc) et (Ra) simultanément correspondant à l'essai N°1 car il possède la plus grande valeur de (GRG), donc pour les deux modes de lubrification la combinaison optimale est : Vc=200m/min, f = 0.08 mm/tr, ap=0.15 mm.

#### IV.4 Optimisation par la fonction désirabilité

Les fonctions de désirabilité ont été largement utilisées pour optimiser simultanément plusieurs réponses. L'idée de base de l'approche par fonction de désirabilité est de transformer un problème de multi-réponse en un problème de réponse unique au moyen de transformations mathématiques. La procédure demande d'introduire pour chaque réponse Yj (x), j = 1,2, ..., m, une fonction dj (Yj(x)) avec une plage de valeurs entre 0 et 1. La valeur de 0 (une désirabilité individuelle prenant la valeur nulle) est attribuée lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable (non désirée) et celle de 1 lorsque la réponse représente la performance maximale désirée pour les facteurs considérés.

L'objectif le plus important de cette étude est de trouver un régime de coupe optimal qui permet simultanément de minimiser les critères (Fz), (Pc) et (Ra). Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, F(x), est définie comme suit [29] :

$$DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_i}} \tag{IV.5}$$

$$f(x) = -DF \tag{IV.6}$$

Où di est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et wi est la fonction de pondération de di. Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité di est définie dans différentes formes. Notre objectif est de rechercher un minimum la désirabilité peut être définies par les formules suivantes :

$$d_i = 1 \text{ if } y_i \leq inf_i$$

$$d_i = \left[ \frac{sup_i - y_i}{sup_i - inf_i} \right] \text{ if } inf_i \leq y_i \leq sup_i$$

IV.7

$$d_i = 0 \text{ if } y_i \geq sup_i$$

#### IV.4.1 Cas d'optimisation étudiés

Dans notre étude, on s'est intéressé à trois cas d'optimisation pour les deux modes de lubrification qui sont :

##### 1<sup>er</sup> cas : Qualité maximale

Ce cas d'étude est réservé à une optimisation qui cherche une qualité maximale. Le [tableau IV.12](#) présente les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, l'importance affecté à chaque paramètre pour les deux modes de lubrification. On a donné l'importance maximale à la rugosité de surface (Ra) (**5+**), tout en gardant l'effort de coupe (Fz) et la puissance (Pc) à un bas niveau d'importance (**1+**).

**Tableau IV.12** But et gamme de paramètres pour le 1er cas d'optimisation

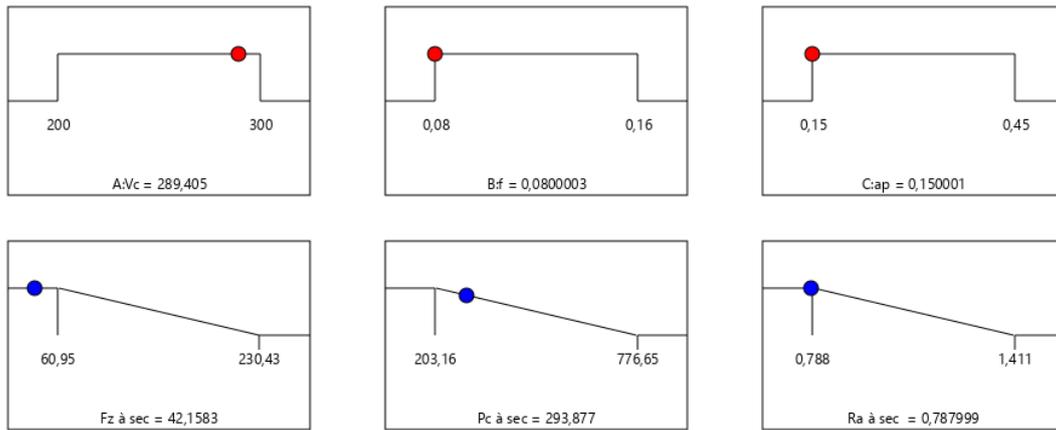
nome	but	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Poids supérieur	Importance
<b>Usinage à sec</b>						
A:Vc	Est dans l'intervalle	200	300	1	1	3
B:f	Est dans l'intervalle	0,08	0,16	1	1	3
C:ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Fz à sec	minimiser	60,95	230,43	1	1	1
Pc à sec	minimiser	203,16	776,65	1	1	1
Ra à sec	minimiser	0,788	1,411	1	1	<b>5</b>
<b>Environnement MQL</b>						
A:Vc	Est dans l'intervalle	200	300	1	1	3
B:f	Est dans l'intervalle	0,08	0,16	1	1	3
C:ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Fz MQL	minimiser	57,14	219,1	1	1	1
Pc MQL	minimiser	190,467	769,167	1	1	1
Ra MQL	minimiser	0,55	1,31	1	1	<b>5</b>

Le [tableau IV.13](#) et la [figure IV.4](#) présentent les solutions obtenues pour ce cas d'étude pour les deux modes de lubrification. On remarque que les valeurs optimales des paramètres de coupe telle que la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance par tour ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ), ainsi que les réponses optimisées sont consignées avec une désirabilité de **0,976** pour l'usinage à sec et **0.996** pour le MQL. Le régime optimal trouvé pour l'usinage à sec est  **$V_c = 289,405$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm**, la rugosité prend une valeur minimale de **0,788  $\mu\text{m}$** , la puissance  **$P_c = 293,877$  W**, l'effort tangentiel  **$F_z = 42,158$  N**. Pour l'environnement MQL, le régime optimal trouvé est  **$V_c = 254,467$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm**. L'effort tangentiel ( $F_z$ ) prend une valeur minimale de **40,569 N**, la puissance  **$P_c = 205,230$  W**, la rugosité  **$R_a = 0,55$   $\mu\text{m}$** . Pour conclure, on peut dire que les deux régimes ont la même avance et profondeur de passe alors que la vitesse de coupe diffère.

**Tableau IV.13** Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 1er cas d'optimisation.

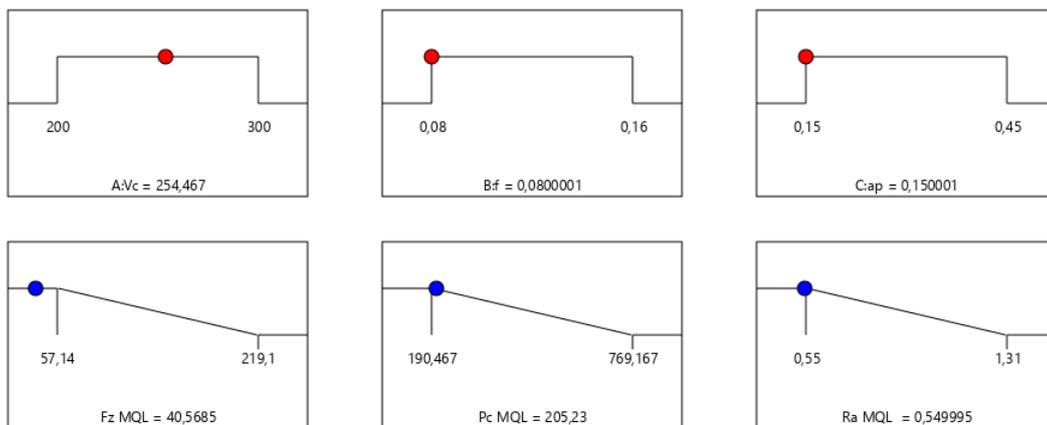
	$V_c$	$f$	$a_p$	$F_z$	$P_c$	$R_a$	Désirabilité
<b>Usinage à sec</b>	289,405	0,08	0,15	42,158	293,877	0,788	0,976
<b>Environnement MQL</b>	254,467	0,08	0,15	40,569	205,230	0,550	0,996

(a)



Desirability = 0,976  
Solution 1 out of 65

(b)

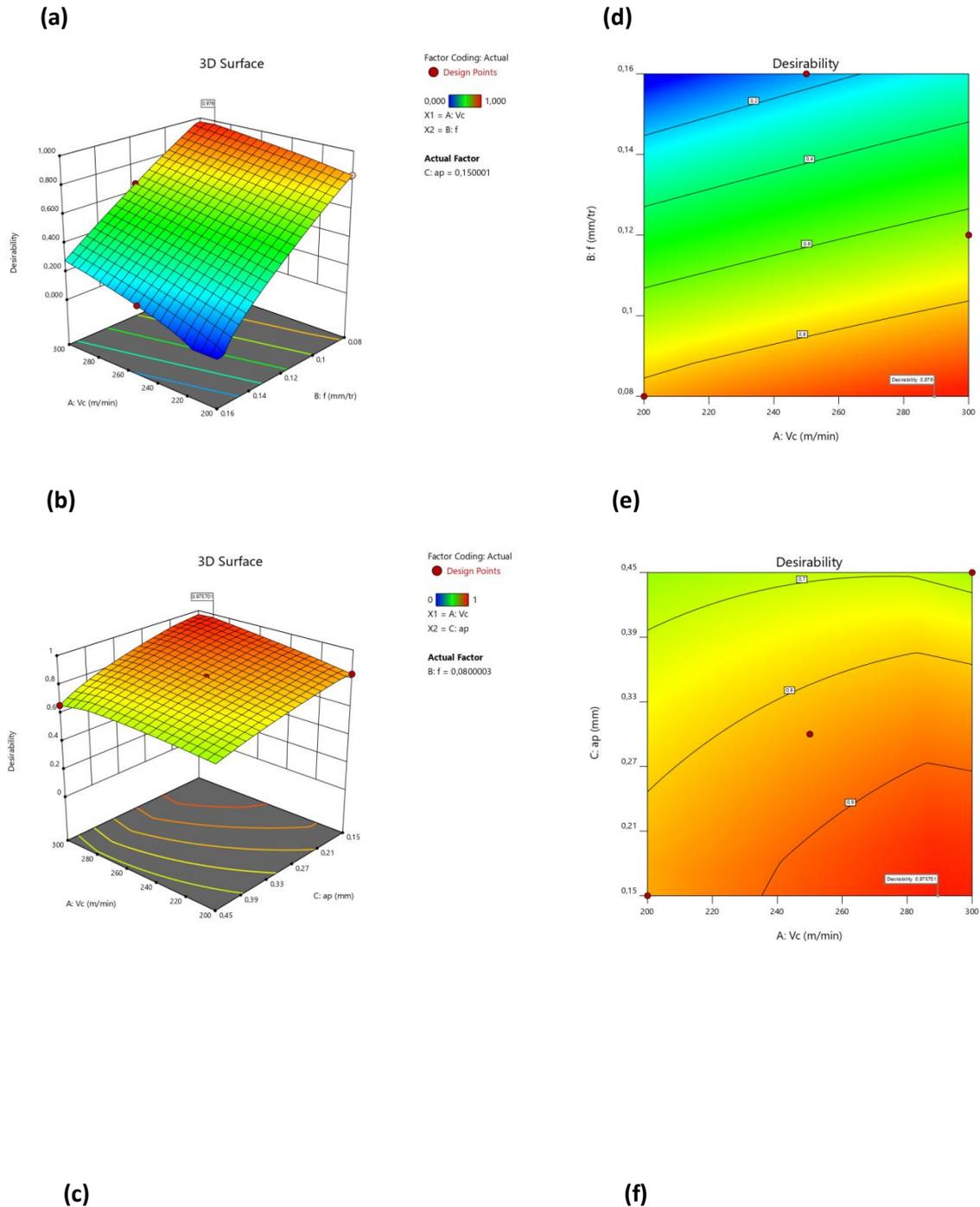


Desirability = 0,996  
Solution 1 out of 72

Figure IV.4 Diagramme des rampes pour le 1<sup>er</sup> cas d'optimisation, (a) usinage à sec, (b) MQL

Les figure IV.5 et figure IV.6 (a, b, c) montrent le domaine de la valeur maximale de la désirabilité en fonction de la variation des valeurs des paramètres d'usinage (Vc, f et ap) et les contours en 2D (d, e, f) pour l'usinage à sec et MQL respectivement. La figure IV.5.a montre le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (Vc), (f). Le graphique a révélé que la valeur faible de l'avance et la valeur entre 300 m/min et 280 m/min de la vitesse de coupe favorisent une valeur maximale de la désirabilité. La figure IV.5.b présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (Vc), (ap). Il est clair que la valeur max de la désirabilité se trouve pour une valeur minimale

de (ap) et une valeur entre 300 m/min et 280 m/min de (Vc). La [figure IV.5.c](#) illustre le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (f), (ap). On remarque que la valeur maximale de la désirabilité se trouve pour les valeurs minimales des facteurs (f) et (ap). La [figure IV.6](#) montre le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs d'entrées (Vc), (f) et (ap). On remarque que la valeur maximale de la désirabilité se trouve dans les trois graphes (a, b et c) pour les valeurs minimales des facteurs (f), (ap) et pour une valeur entre 240 m/min et 260 m/min de vitesse de coupe (Vc).



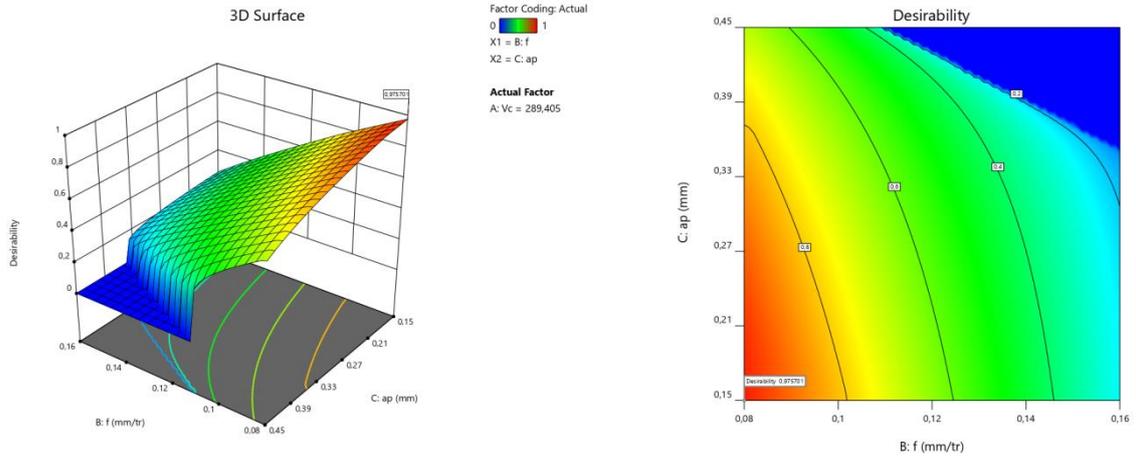
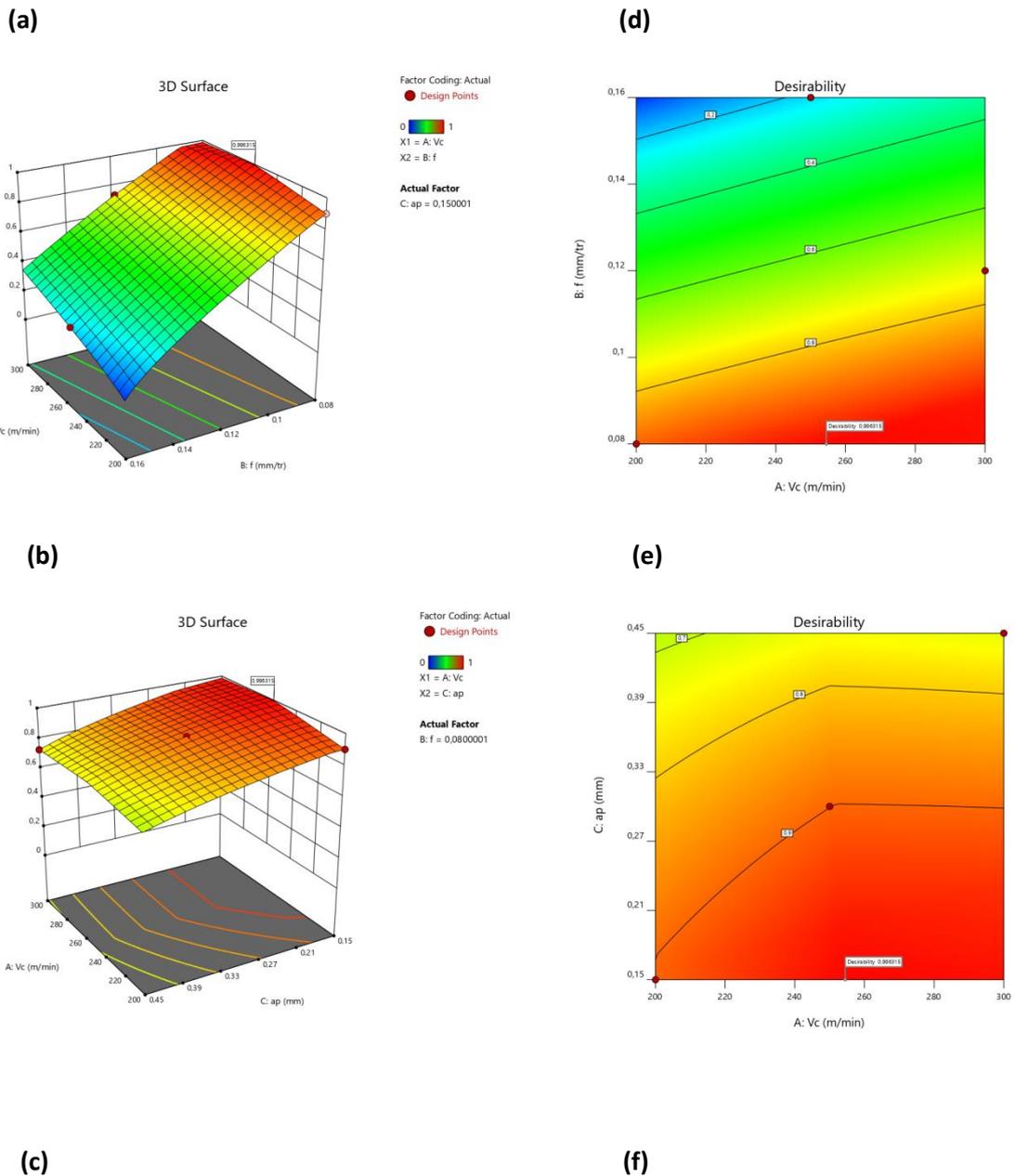


Figure IV.5 Graphes de la désirabilité 3D et les contours (2D) pour 1<sup>er</sup> cas (à sec)



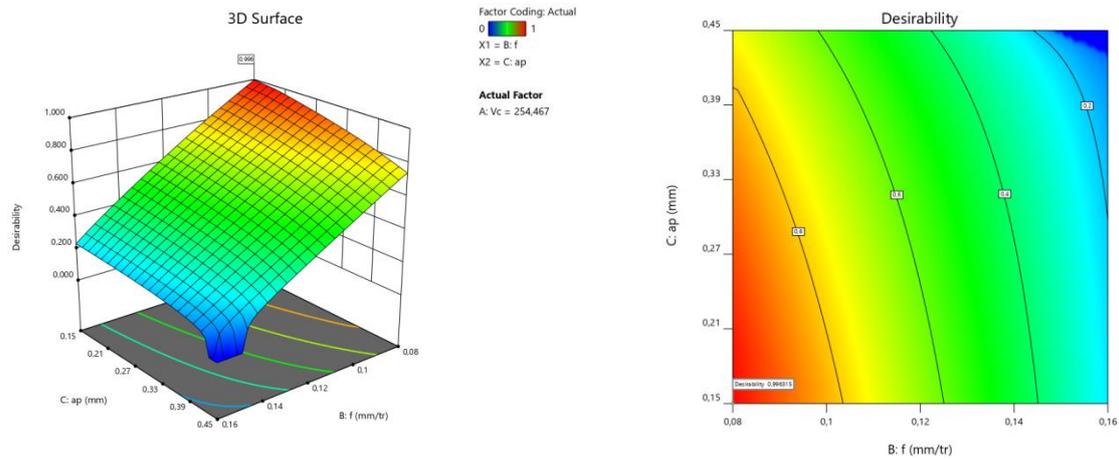


Figure IV.6 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 1er cas (MQL)

**2<sup>eme</sup> cas : Minimisation de la consommation d'énergie**

Ce cas d'étude se concentre sur une optimisation qui cherche le minimum d'effort de coupe et la puissance de coupe. Le [tableau IV.14](#) montre les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, l'importance affecté à chaque paramètre pour les deux modes de lubrification. On a donné l'importance maximale à l'effort de coupe (Fz) et la puissance (Pc) (**5+**), tout en gardant la rugosité de surface (Ra) à son bas niveau (**1+**).

Tableau IV.14 But et gamme de paramètres pour le 2<sup>ème</sup> cas d'optimisation

nome	but	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Poids supérieur	Importance
<b>Usinage à sec</b>						
A:Vc	Est dans l'intervalle	200	300	1	1	3
B:f	Est dans l'intervalle	0,08	0,16	1	1	3
C:ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Fz à sec	minimiser	60,95	230,43	1	1	<b>5</b>
Pc à sec	minimiser	203,16	776,65	1	1	<b>5</b>
Ra à sec	minimiser	0,788	1,411	1	1	1
<b>Environnement MQL</b>						
A:Vc	Est dans l'intervalle	200	300	1	1	3

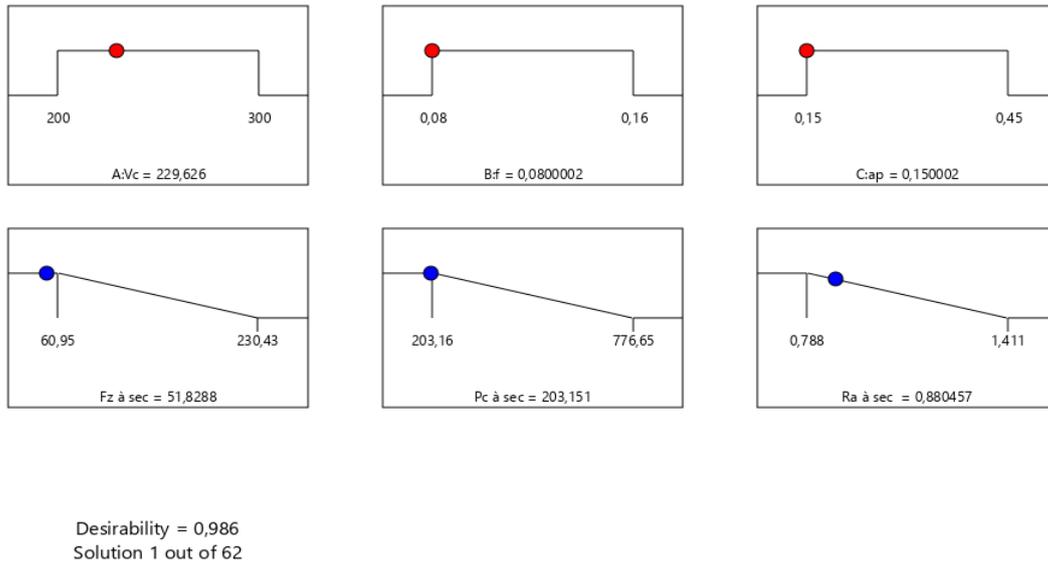
B:f	Est dans l'intervalle	0,08	0,16	1	1	3
C:ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Fz MQL	minimiser	57,14	219,1	1	1	<b>5</b>
Pc MQL	minimiser	190,467	769,167	1	1	<b>5</b>
Ra MQL	minimiser	0,55	1,31	1	1	1

Le [tableau IV.15](#) et la [figure IV.7](#) présentent les solutions obtenues pour ce cas d'étude pour les deux modes de lubrification. Il est clair que les valeurs optimales des paramètres de coupe telles que la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance par tour ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ), ainsi que les réponses optimisées sont consignées dans Le [tableau IV.15](#) et la [figure IV.7](#), avec une désirabilité de **0,986** pour l'usinage à sec et **0,996** pour le MQL. Le régime optimal trouvé pour l'usinage à sec est  **$V_c = 229,626$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm**. La puissance ( $P_c$ ) a pris une valeur minimale de **203,151 W**, l'effort tangentiel  **$F_z = 51,829$  N**, la rugosité a pris une valeur de **0,880  $\mu\text{m}$** . Pour le MQL, le régime optimal trouvé est  **$V_c = 237,090$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm**. Les paramètres des sorties ont pris des valeurs minimales : l'effort tangentiel  **$F_z = 45,136$  N**, la puissance  **$P_c = 190,467$  W**, la rugosité  **$R_a = 0,582$   $\mu\text{m}$** . En conclusion, nous pouvons dire que les deux régimes ont la même avance et la même profondeur de passe alors que la vitesse de coupe varie.

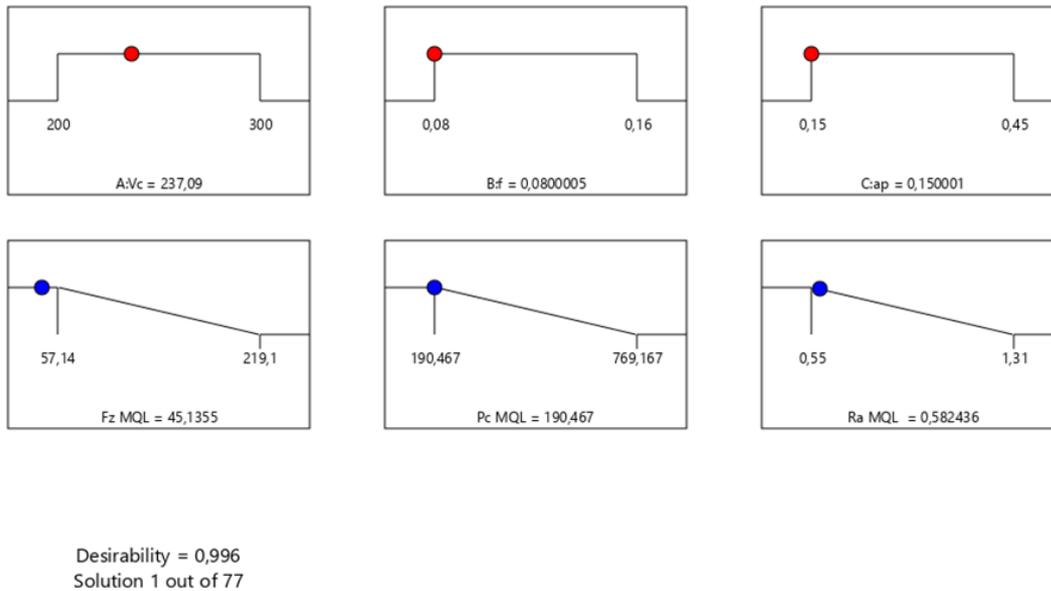
**Tableau IV.15** Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 2<sup>ème</sup> cas d'optimisation.

	$V_c$	$f$	$a_p$	$F_z$	$P_c$	$R_a$	Désirabilité
<b>Usinage à sec</b>	229,626	0,08	0,15	51,829	203,151	0,880	0,986
<b>Environnement MQL</b>	237,090	0,08	0,15	45,136	190,467	0,582	0,996

(a)



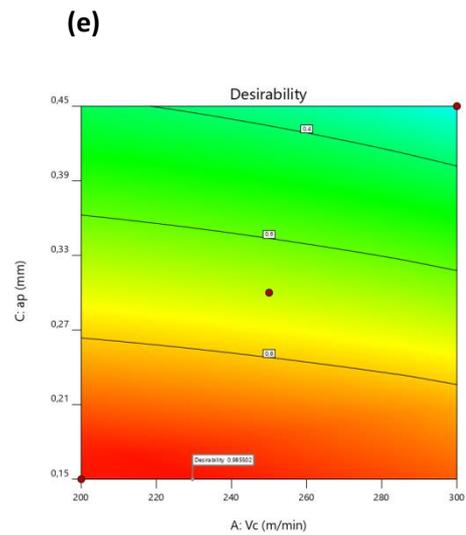
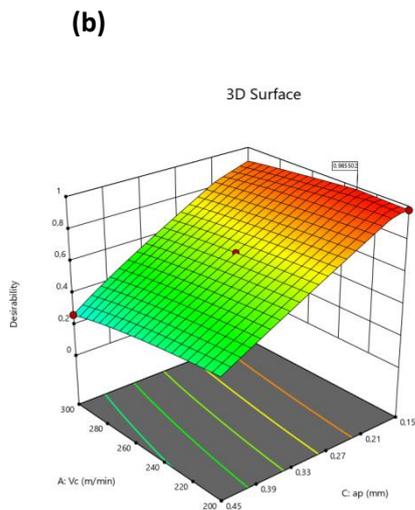
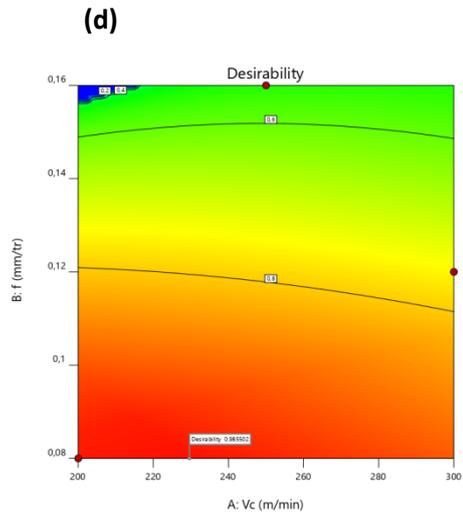
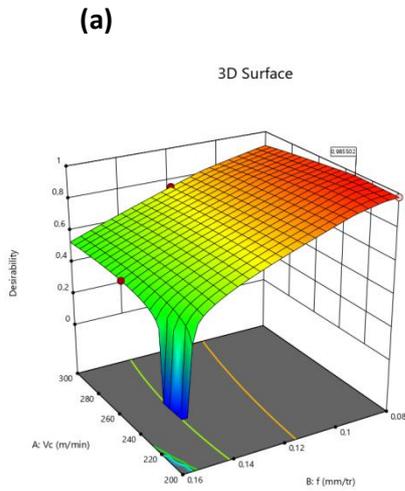
**(b)**



**Figure IV.7** Diagramme des rampes pour le 2<sup>ème</sup> cas d'optimisation, **(a)** usinage à sec, **(b)** MQL

Les figures IV.8 et IV.9 (a, b, c) montrent le domaine de la valeur maximale de la désirabilité en fonction de la variation des valeurs des paramètres d'usinage ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) et les contours en 2D (d, e, f) pour l'usinage à sec et MQL respectivement. La figure IV.8 montre le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs d'entrées ( $V_c$ ), ( $f$ ) et ( $a_p$ ). Il est clair que la valeur maximale de la désirabilité se trouve pour les trois graphes (a, b et c) pour les valeurs minimales des facteurs ( $f$ ), ( $a_p$ ) et pour une valeur entre 220 m/min et 240 m/min de ( $V_c$ ). La figure IV.9.a montre le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ), ( $f$ ). Le graphique montre que la faible

valeur de l'avance et la valeur entre 220 m/min et 240 m/min de la vitesse de coupe contribuent à une valeur maximale de désirabilité. La [figure IV.9.b](#) présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (Vc), (ap). On remarque que la valeur maximum de désirabilité correspond à une valeur minimale de (ap) et à une valeur comprise entre 220 m/min et 240 m/min de (Vc). La [figure IV.9.c](#) illustre le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (f), (ap). On remarque que la valeur maximale de la désirabilité se trouve pour les valeurs minimales des facteurs (f) et (ap).



(c)

(f)

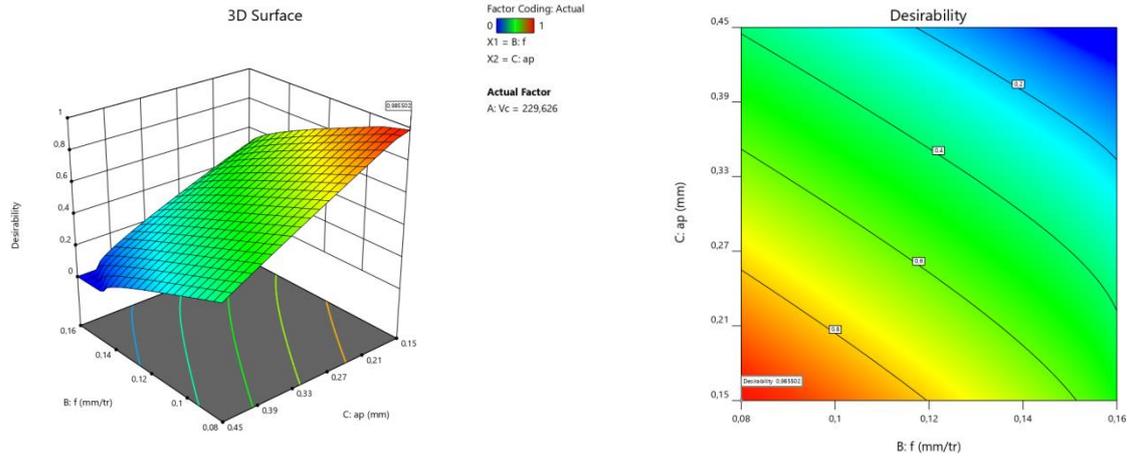
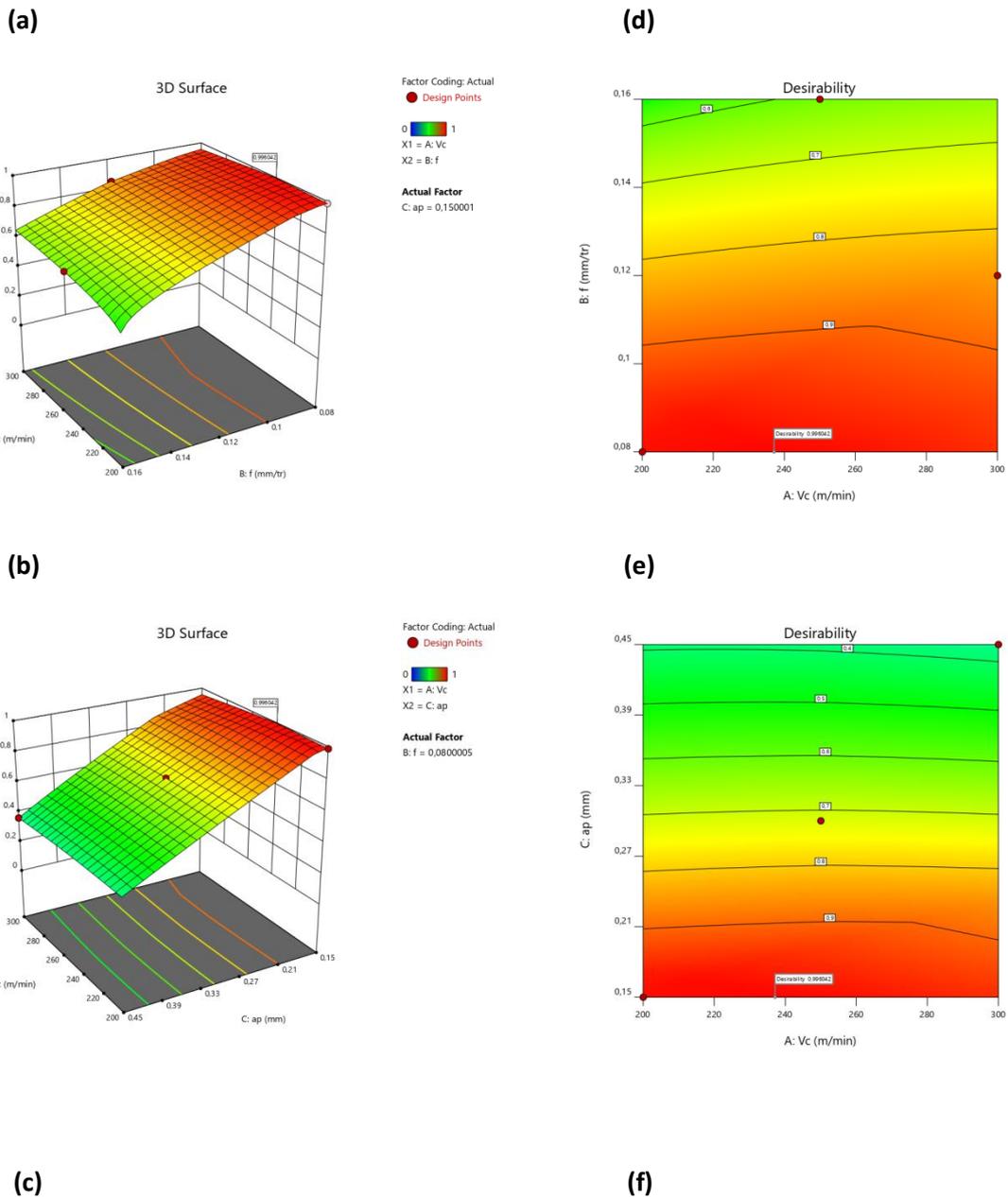


Figure IV.8 Graphes de désirabilité 3D et les contours (2D) pour 2<sup>ème</sup> cas (à sec)



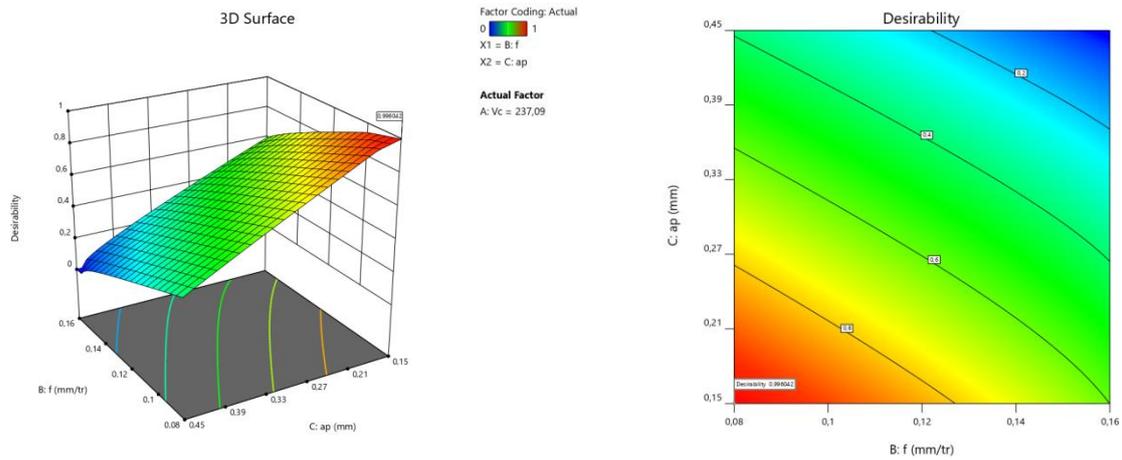


Figure IV.9 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 2<sup>ème</sup> cas (MQL)

**3<sup>ème</sup> cas : Optimisation combiné**

Ce dernier cas est réservé à une optimisation combinée. Le [tableau IV.16](#) montre les objectifs souhaités, l’intervalle de variation des paramètres de coupe, l’importance affecté à chaque paramètre pour les deux modes de lubrification. On a donné l’importance maximale **(+5)** à tous les paramètres (Fz), (Pc) et (Ra).

**Tableau IV.16** But et gamme de paramètres pour le 3<sup>ème</sup> cas d’optimisation

nome	but	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Poids supérieur	Importance
<b>Usinage à sec</b>						
A:Vc	Est dans l'intervalle	200	300	1	1	3
B:f	Est dans l'intervalle	0,08	0,16	1	1	3
C:ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Fz à sec	minimiser	60,95	230,43	1	1	<b>5</b>
Pc à sec	minimiser	203,16	776,65	1	1	<b>5</b>
Ra à sec	minimiser	0,788	1,411	1	1	<b>5</b>
<b>Environnement MQL</b>						
A:Vc	Est dans l'intervalle	200	300	1	1	3
B:f	Est dans l'intervalle	0,08	0,16	1	1	3

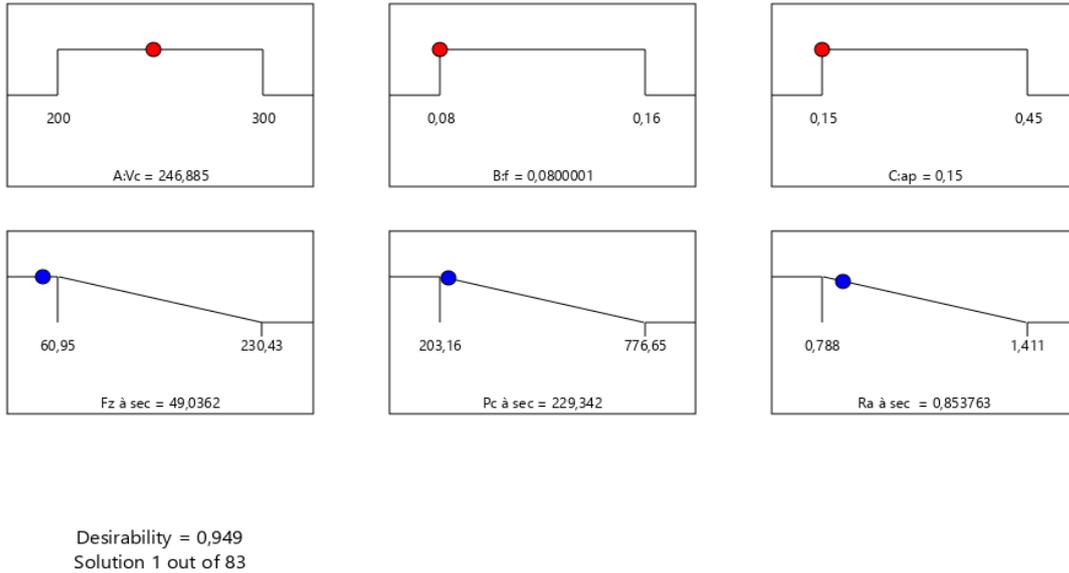
C:ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Fz MQL	minimiser	57,14	219,1	1	1	5
Pc MQL	minimiser	190,467	769,167	1	1	5
Ra MQL	minimiser	0,55	1,31	1	1	5

Le [tableau IV.17](#) et la [figure IV.10](#) présentent les solutions obtenues pour ce cas d'étude pour les deux modes de lubrification. On observe que les valeurs optimales des paramètres de coupe telles que la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance par tour ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ), ainsi que les réponses optimisées sont consignées dans le [tableau IV.17](#) et la [figure IV.10](#) avec une désirabilité de **0,949** pour l'usinage à sec et **0,991** pour le MQL. Le régime optimal trouvé pour l'usinage à sec est  $V_c = 289,405$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm, les paramètres des sorties prennent des valeurs, l'effort tangentiel  $F_z = 49,036$  N, la puissance  $P_c = 229,342$  W, la rugosité  $R_a = 0,854$   $\mu\text{m}$ . Le régime optimal trouvé pour l'environnement MQL est  $V_c = 254,462$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm. L'effort tangentiel ( $F_z$ ) prend une valeur de **40,569 N**, la puissance  $P_c = 205,225$  W, la rugosité  $R_a = 0,550$   $\mu\text{m}$ . Pour conclure, on peut dire que les deux régimes ont la même avance et profondeur de passe alors que la vitesse de coupe diffère.

**Tableau IV.17** Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 3<sup>ème</sup> cas d'optimisation.

	$V_c$	$f$	$a_p$	$F_z$	$P_c$	$R_a$	Désirabilité
<b>Usinage à sec</b>	246,885	0,08	0,15	49,036	229,342	0,854	0,949
<b>Environnement MQL</b>	254,462	0,08	0,15	40,569	205,225	0,550	0,991

(a)



(b)

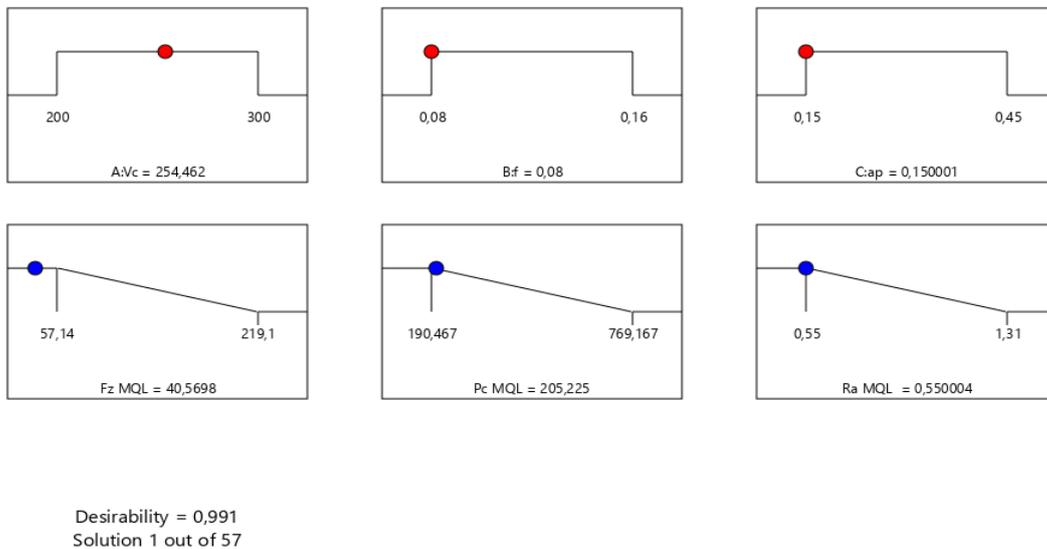
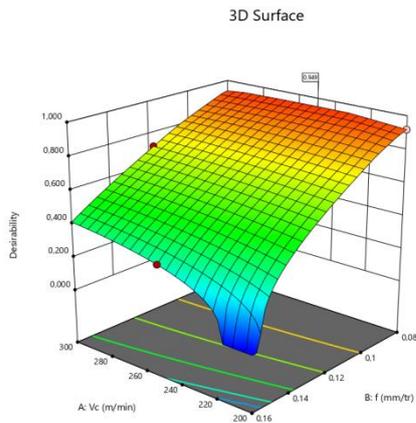


Figure IV.10 Diagramme des rampes pour le 3<sup>ème</sup> cas d'optimisation

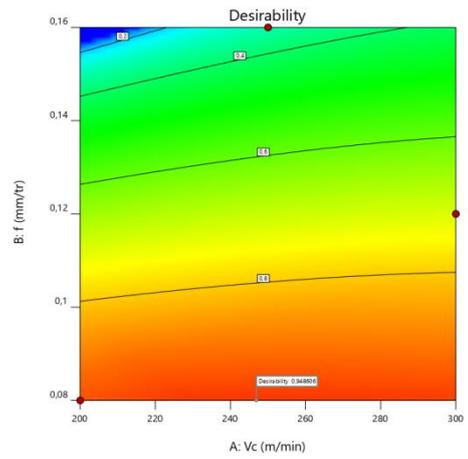
Les figure IV.11 et figure IV.12 (a, b, c) montrent le domaine de la valeur maximale de la désirabilité en fonction de la variation des valeurs des paramètres d'usinage ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) et les contours en 2D (d, e, f) pour l'usinage à sec et MQL respectivement. Concernant la figure IV.11, on remarque que la valeur maximale de la désirabilité se trouve pour les trois graphes (a, b et c) aux valeurs minimales des facteurs ( $f$ ), ( $a_p$ ) et pour une valeur plus proche à 240 m/min de ( $V_c$ ). Pour la figure IV.12, on observe que pour les trois graphiques (a, b et c), la plus grande valeur de la désirabilité est trouvée pour les valeurs minimales des facteurs ( $f$ ), ( $a_p$ ) et pour une valeur plus proche de 260 m/min de ( $V_c$ ).

(a)

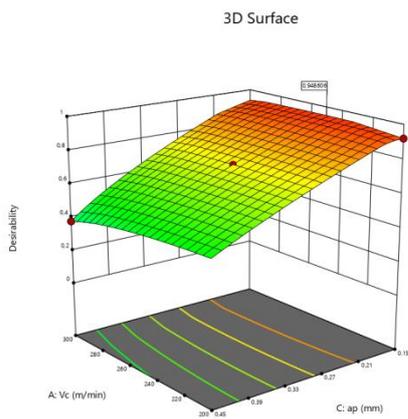
(d)



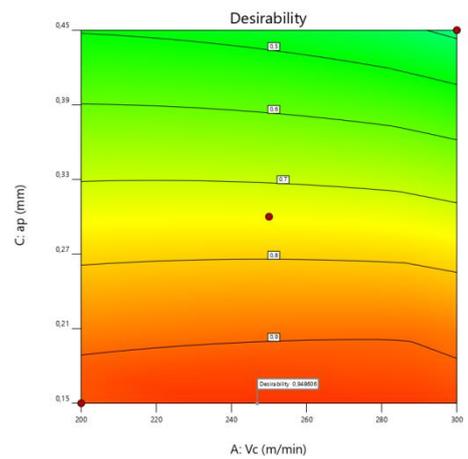
(b)



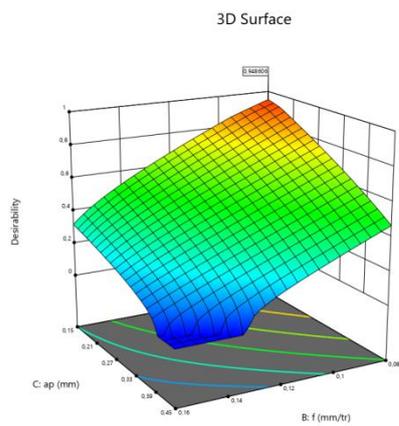
(e)



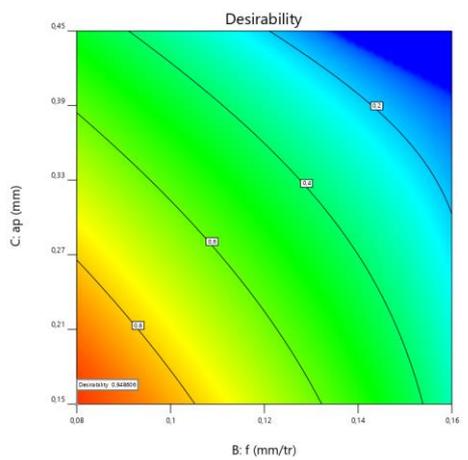
(c)



(f)



(a)



(d)

Figure IV.11 Graphes de désirabilité 3D et les contours (2D) pour 3<sup>ème</sup> cas (MQL)

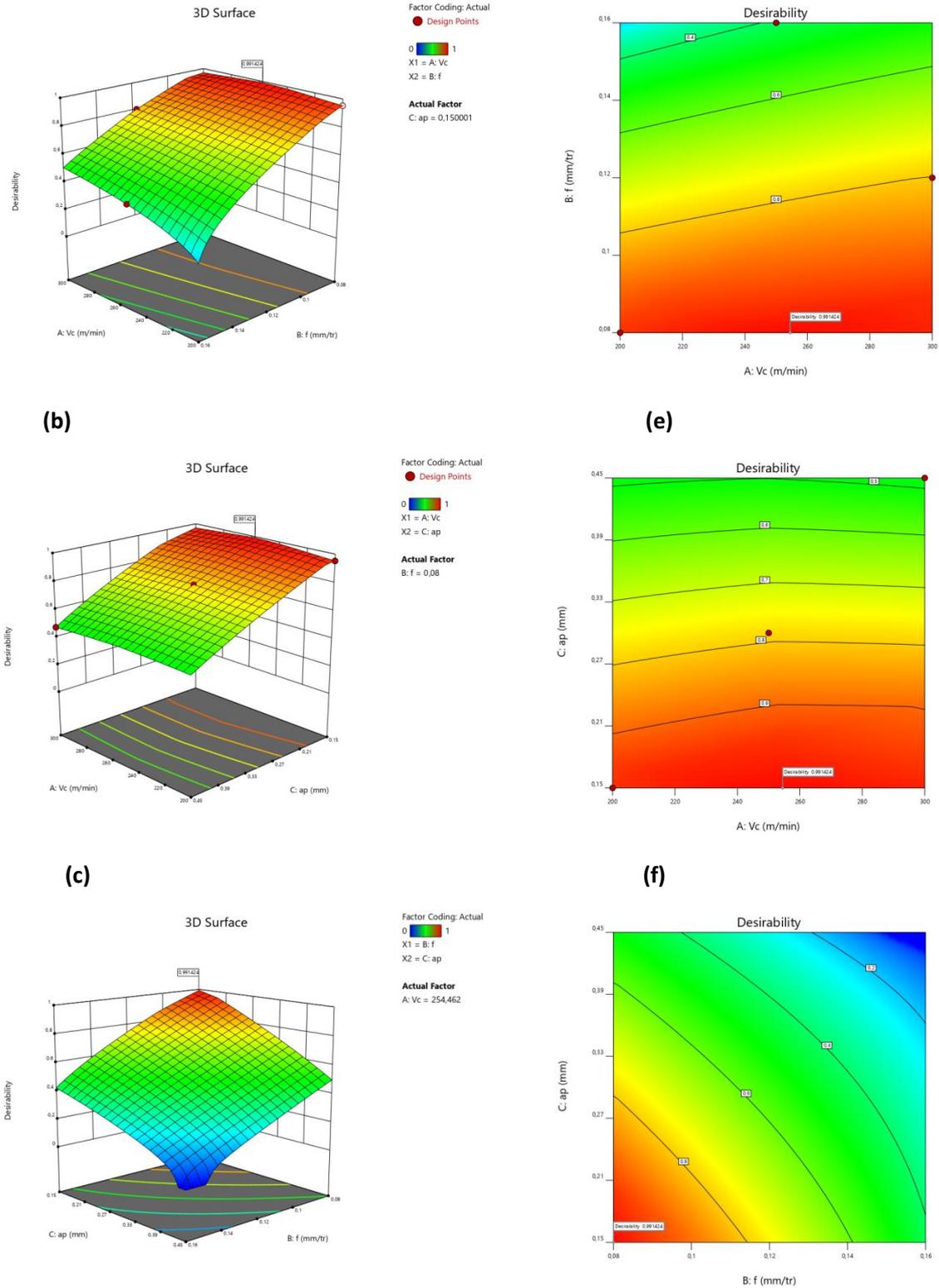


Figure IV.12 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 3<sup>eme</sup> cas (MQL)

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre deux méthodes d'optimisation ont été utilisées. La première mono-objective, basée sur l'approche Taguchi a concerné les critères de l'effort de coupe ( $F_z$ ), la puissance de coupe ( $P_c$ ) et la rugosité de surface ( $R_a$ ). Cette approche est basée sur la maximisation du rapport (S/N) correspondant à des caractéristiques de meilleure qualité. La seconde méthode concerne l'optimisation multi-objective basée sur l'analyse relationnelle grise (GRA), et aussi l'approche de la fonction Désirabilité pour optimiser l'effort tangentiel ( $F_z$ ), la puissance de coupe ( $P_c$ ) et la rugosité de surface ( $R_a$ ) suivant trois cas souhaités. D'où l'opportunité d'étudier différents cas d'optimisation selon différents contextes industriels et ainsi voir l'évolution des éléments du régime de coupe en fonction des critères d'optimisation choisis.

## Conclusion générale

L'étude expérimentale réalisée dans le cadre du projet de fin d'études concerne 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 carbure dont la nuance est GC-2015. Le but est d'aboutir à une modélisation des paramètres de performances d'usinage ( $F_z$ ), ( $P_c$ ) et ( $R_a$ ) et une optimisation des conditions de coupe pour les deux modes de lubrification (à sec et MQL). Les résultats trouvés, débouchent sur les conclusions suivantes :

- ✓ Les résultats de l'ANOVA montrent que l'augmentation de ( $f$ ) et ( $a_p$ ) mènent à l'élévation de l'effort de coupe ( $F_z$ ) avec une contribution de (72,02%) pour ( $a_p$ ) et (24,12%) pour ( $f$ ) lors de l'usinage à sec et une contribution de (72,18%) pour ( $a_p$ ) et (19,21%) pour ( $f$ ) durant le MQL. L'augmentation de ( $V_c$ ) cause une légère diminution de ( $F_z$ ) avec une contribution de (1,72%) lors de l'usinage à sec et (4,57%) pour MQL.
- ✓ Tous les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) ont une influence sur ( $P_c$ ). Mais ( $a_p$ ) possède la plus grand influence avec (68,94%) de contribution pour l'usinage à sec et (75,94%) pour le MQL. Elle est suivie par l'avance (18,59%) à sec, (15,13%) MQL et ( $V_c$ ) avec une contribution de (9,68%) et (3,29%) durant l'usinage à sec et MQL respectivement.
- ✓ L'analyse ANOVA de ( $R_a$ ) révèle que ( $f$ ) est le facteur le plus important qui affecte ( $R_a$ ) avec une contribution de (87,15%) pour l'usinage à sec et (85,83%) pour le MQL. Il est suivi par ( $V_c$ ) avec des contributions de (8,05%) et (7,15%) durant l'usinage à sec et environnement MQL respectivement. Le facteur ( $a_p$ ) a des faibles contributions sur ( $R_a$ ) pour les deux modes de lubrification (0,06%) à sec (0,02%) MQL.
- ✓ Les modèles mathématiques basés sur la méthode (MSR) pour les paramètres de sortie ( $F_z$ ), ( $P_c$ ) et ( $R_a$ ) sont précis et possède a un  $R^2$  de 97,87% ; 97,21% et 95,25% respectivement pour l'usinage à sec et 95,96% ; 94,36% et 93,01% pour le MQL respectivement.
- ✓ Les résultats de l'étude comparative pour un usinage de 46 s montre que le MQL conduit à une diminution importante de l'usure d'une valeur de 22,34% par rapport à l'usinage à sec. Cette diminution est causée par la minimisation du frottement et de la réduction de la température dans la zone de coupe dans le cas de la lubrification MQL.
- ✓ Aussi, on a enregistré une diminution durant l'usinage dans un environnement MQL des paramètres de sorties ( $F_z$ ), ( $R_a$ ), ( $T^\circ$ ) et ( $P_c$ ) avec des pourcentages 8.11%, 28.28%, 21.95% et 8.11 % respectivement par rapport à l'usinage à sec.
- ✓ La forme des copeaux obtenue n'est pas différente pour les deux modes de lubrification, mais ils sont différents en couleur où le copeau obtenu à sec garde la couleur grise du matériau

d'origine par contre, le copeau obtenu en usinage MQL se caractérise par une couleur entre le bleu et le violet.

- ✓ L'optimisation mono-objective réalisée dans ce travail est basée sur la méthode de Taguchi (S/N), les régimes optimaux trouvés pour les deux modes de lubrification sont les mêmes :
  - Minimisation de  $(F_z)$  :  $(V_{c3}, f_1$  et  $a_{p1})$  ;  $V_c = 300$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm.
  - Minimisation de  $(P_c)$  :  $(V_{c1}, f_1$  et  $a_{p1})$  ;  $V_c = 200$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm.
  - minimisation de  $(R_a)$  :  $(V_{c3}, f_1$  et  $a_{p3})$  ;  $V_c = 300$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr et  $a_p = 0.45$  mm.
- ✓ L'optimisation multi-objective réalisée par la méthode (GRA) montre que le régime optimal obtenu pour la minimisation de  $(F_z)$ ,  $(P_c)$  et  $(R_a)$  simultanément correspondant à l'essai N°1 pour les deux modes de lubrification, la combinaison optimale est :  $V_c = 200$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr,  $a_p = 0.15$  mm.
- ✓ L'optimisation multi-objective réalisée par la fonction désirabilité montre que les régimes optimaux obtenus pour la minimisation de  $(F_z)$ ,  $(P_c)$  et  $(R_a)$  sont :
  - Cas 1 (Qualité maximale) :
    - Usinage à sec :  $V_c = 289,405$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm.
    - Environnement MQL :  $V_c = 254,467$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm.
  - Cas 2 (Minimisation de la consommation d'énergie) :
    - Usinage à sec :  $V_c = 229,626$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm.
    - Environnement MQL :  $V_c = 237,090$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm.
  - Cas 3 (Optimisation combiné) :
    - Usinage à sec :  $V_c = 289,405$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm.
    - Environnement MQL :  $V_c = 254,462$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,15$  mm.

## Perspectives

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

- Faire une investigation sur les effets de différent environnement de lubrification sur les paramètres technologiques de sortie (à sec, lubrification abondante, MQL et MQL chargé).
- Evaluations des vibrations de l'outil et de la pièce lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 pour différents environnements de lubrification.
- L'application des autres méthodes d'optimisation telle que (DEAR, TOPSIS, MOORA et WASPAS).

# Références bibliographiques

[1] Définition de l'usinabilité.

[http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/materials/workpiece\\_materials/machinability\\_definition](http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition). [Consulté le 28 Avril 2022]

[2] Bencheikh, I. (2018). Simulation multi-étapes de l'usure des outils de coupe revêtus par une modélisation XFEM/Level-set (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).

[3] Khochtali, H., Zemzemi, F., & Bensalem, W. Approche analytique de prédiction des changements de microstructure durant l'usinage dur de l'acier AISI 52100: Etude de l'influence de la vitesse de coupe et de l'usure d'outil.

[4] Moradi, M., Hormozi, E., Shamohammadi, M., & Rakhshan, V. (2018). Effets de la dépose des attaches orthodontiques sur la topographie et la rugosité de surface des restaurations en composite. *International Orthodontics*, 16(4), 623-637.

[5] Regnier, T. (2018). Analyses expérimentales et modélisation de la formation de bavures dans l'alliage AISi7Mg0, 3+ 0, 5Cu—Application en coupe orthogonale et en fraisage (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).

[6] [https://www.kistler.com/fr/glossaire/terme/effort-de-coupe/#:~:text=L'effort%20de%20coupe%20est,\(souvent%20%C3%A0%20commande%20num%C3%A9rique\)](https://www.kistler.com/fr/glossaire/terme/effort-de-coupe/#:~:text=L'effort%20de%20coupe%20est,(souvent%20%C3%A0%20commande%20num%C3%A9rique)). [Consulté le 19 Mars 2022]

[7] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/mise-en-forme-des-materiaux-par-usinage-42510210/vibrations-d-usinage-bm7030/>

[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] Bouchnak, T. B. (2010). *Etude du comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique: le ti555-3* (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).

[10] Safi, K., Yallese, MA, Belhadi, S. et Mabrouki, T. (2022). 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. *Le Journal international des technologies de fabrication avancées*, 1-21.

[11] Thèse de DOCTORAT. Présenté par ZERTI OUSSAMA directeur de thèse 2018. Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA

[12] Moingeon, P. (2021, September). Applications de l'intelligence artificielle au développement de nouveaux médicaments. In *Annales Pharmaceutiques Françaises* (Vol. 79, No. 5, pp. 566-571). Elsevier Masson.

[13] 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* (Doctoral dissertation).

[14] Baroth, J., Schoefs, F., & Breysse, D. (2011). *Fiabilité des ouvrages: Sécurité, variabilité, maintenance, sécurité*. Lavoisier.

[15] Pal, S., & Gauri, S. K. (2018). A desirability functions-based approach for simultaneous optimization of quantitative and ordinal response variables in industrial processes. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 10(1), 76-87.

[16] Bouzid, L., Yallese, MA, Chaoui, K., Mabrouki, T., & Boulanouar, L. (2015). Modélisation mathématique pour le tournage de l'acier inoxydable AISI 420 en utilisant la méthodologie de réponse de surface. *Actes de l'Institution of Mechanical Engineers, partie B : Journal of Engineering Manufacture* , 229 (1), 45-61.

[17] Mia, M., Razi, MH, Ahmad, I., Mostafa, R., Rahman, S., Ahmed, DH, ... & Dhar, NR (2017). Effet des impulsions MQL contrôlées dans le temps sur la rugosité de surface en tournage dur par analyse statistique et réseau de neurones artificiels. *Le Journal international des technologies de fabrication avancées*, 91 (9), 3211-3223.

[18] <https://braidwoodgear.com/usinage-pieces-mecaniques-importance-lubrification/>

[Consulté le 06 mai 2022]

[19] 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.

[20] 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.

- [21] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/mise-en-forme-des-materiaux-par-usinage-42510210/assistance-cryogenique-en-usinage-bm7036/principe-de-l-assistance-cryogenique-en-usinage-et-techniques-associees-bm7036niv10001.html> [Consulté le 18 mai 2022]
- [22] 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.
- [23] 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), 2581-2597.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Zaman, PB, Sultana, N., & Dhar, NR (2020). Quantification des effets des conditions de refroidissement, du type d'outil et des paramètres de coupe sur l'usinabilité du tournage de l'acier AISI 4140 à l'aide d'un DOE factoriel complet. *Journal des systèmes de production et des sciences de la fabrication*, 1 (2), 23-39.
- [28] Nandagopal, M., Sivakumar, K., Velmurugan, S., Durairaj, R. B., & Mageshwaran, G. (2020). Multi-objective optimization of western bentonite (Al<sub>2</sub>H<sub>2</sub>Na<sub>2</sub>O<sub>13</sub>Si<sub>4</sub>)-blended green sand casting process parameters to improve mould quality. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 45(1), 110-119.

**[29]** LAOUISSI Aissa (2019).Etude du comportement du couple fonte/ céramique en nitrure de silicium (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) revêtue et non revêtue, en sollicitations sévères lors du tournage -Modélisation et Optimisation. Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en 3ème cycle, université 8 mai 1945 Guelma.