

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



**Mémoire de fin d'étude présenté en  
vue de l'obtention d'un diplôme de  
Master**

Présenté par : **BOUHAMDIA Rachid**

**Option : Construction Mécanique**

=====

**Etude de l'usinage d'un acier inoxydable issu de  
la fabrication additive durant le tournage**

=====

Sous la direction de : **Pr. BELHADI. S.**  
**Pr. YALLESE. M.A**

**Année universitaire 2023/2024**

# 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 **HAROUN, TAHA, LYAZID, HICHAM, MAYA** et **SAHER**, que Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite les protèges.

À ma très chère **femme** que Dieu la protège.

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 mes Directeurs de Mémoire **Pr. BELHADI SALIM** et **Pr. YALLESE MOHAMMED ATHMANE**, La chef de 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.

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

Le choix des paramètres de coupe est très important en usinage. Dans ce travail, une étude comparative entre trois modes de lubrification à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile pure a été réalisée. L'usinage est réalisé en tournage sur l'acier inoxydable 17-4PH issu de la fabrication additive par un outil en carbure métallique revêtu (GC 2015) suivant un plan de Taguchi L9. L'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 ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $MRR$  et  $P_c$ ). L'exploitation des résultats de l'ANOVA a permis de proposer des modèles linéaires qui permettent la prédiction des paramètres de sortie pour les trois modes de lubrification. Nous avons exploité dans ce travail deux méthodes multi-objective, à savoir la méthode TOPSIS et la méthode de maximisation de la fonction de désirabilité qui exploite les modèles mathématiques des différents paramètres technologiques ( $R_q$  min,  $R_z$  min,  $F_y$  min,  $P_c$  min et  $MRR$  max) considérés et qui permet la variation des éléments du régime de coupe dans un intervalle continu.

# Abstract

Selecting cutting parameters is crucial in machining. This study compares three dry lubrication methods: MQL with soluble oil, MQL with pure oil, and dry machining. Turning experiments were conducted on additively manufactured 17-4PH stainless steel using a coated carbide tool (GC 2015) following a Taguchi L9 design. Statistical analysis using ANOVA was performed to determine the influence of input factors ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) on output parameters ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , MRR, and  $P_c$ ). ANOVA results were used to develop linear models for predicting output parameters for all three lubrication methods.

Two multi-objective methods were explored: TOPSIS and desirability function maximization. These methods utilize the mathematical models of the technological parameters ( $R_q$  min,  $R_z$  min,  $F_y$  min,  $P_c$  min, and MRR max) to optimize cutting parameters within continuous intervals.

# INDEX DES FIGURE

## Chapitre I : Etude est analyse bibliographique

<b>Figure.I.1.</b> Images de différentes opérations en tournage industrielles. ....	4
<b>Figure.I.2.</b> Images de différentes opérations en fraisage industrielles.....	5
<b>Figure.I.3.</b> Images de différentes opérations en rectification .....	5
<b>Figure I.4.</b> Rugosimètre Surfrest Sj201. ....	8
<b>Figure I.6.</b> Différent type d'acier inoxydable. ....	12
<b>Figure I.7.</b> Principaux aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel (molybdène) dérivés de la nuance de base. ....	15
<b>Figure I.8.</b> Principe de la fabrication additive .....	17
<b>Figure I.9.</b> Classification des procédés suivant l'état du matériau initial proposée par Pham et al. [10]. .....	18
<b>Figure I.10.</b> Formes des copeaux à la fin du tournage de l'acier testé. ....	20
<b>Figure I.11.</b> Le pourcentage de l'effort de coupe $F_c$ entre la recherche expérimentale et la simulation FEM obtenues en 7 points selon la méthode (PSI).....	21
<b>Figure I.12.</b> Le pourcentage de l'effort d'avance $F_f$ entre la recherche expérimentale et la simulation MEF obtenues en 7 points selon le PSI. ....	21
<b>Figure I.13.</b> Rapports signal/bruit pour (a) l'usure de l'outil, (b) la température de coupe et (c) la consommation électrique liée à l'Usure des outils, température de coupe et consommation électrique.	22

## Chapitre II : Procédure et équipement d'expérience

<b>Figure II.1.</b> Tour à charioter et à fileter modèle SN40.....	25
<b>Figure II.2.</b> L'éprouvette ont été utilisée.....	27
<b>Figure II.3.</b> Plaquette et porte plaquette utilisée .....	27
<b>Figure II.4.</b> Rugosimètre (Surfrest_SJ-210 Mitutoyo).....	28
<b>Figure II.5.</b> Dynamomètre (KISTLER9257 B).....	29
<b>Figure II.6.</b> Ordinateur d'acquisition piloté par le logiciel (DYNOWARE) .....	30
<b>Figure II.7.</b> Montage de système MQL. ....	30
<b>Figure II.8.</b> <i>VISUAL250</i> pour l'observer de copeau. ....	31

### Chapitre III : Etude de l'influence des paramètres de coupe

<b>Figure III.1.</b> Graphique des effets principaux pour (Ra).....	40
<b>Figure III.2.</b> Diagrammes de surface 3D de Rq en fonction de (Vc, f et ap).....	41
<b>Figure III.3.</b> Graphique des effets principaux pour (Fx).....	45
<b>Figure III.4.</b> Graphique des effets principaux pour (Fy).....	45
<b>Figure III.5.</b> Graphique des effets principaux pour (Fz).....	45
<b>Figure III.6.</b> Diagrammes de surface 3D de Fy en fonction de (Vc, f et ap).....	47
<b>Figure III.7.</b> Graphique des effets principaux pour (Pc).....	48
<b>Figure III.8.</b> Diagrammes de surface 3D de Pc en fonction de (Vc, ap et f =0.1).....	50
<b>Figure III.9.</b> Graphique des effets principaux pour (MRR).....	51
<b>Figure III.10.</b> Diagrammes de surface 3D de MRR.....	52
<b>Figure III.11.</b> Copeaux produits selon les deux modes de lubrification.....	54

### Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

<b>Figure IV.1.</b> Résultat optimale des paramètres étudiés.....	60
<b>Figure IV.2.</b> Valeurs des désirabilités des paramètres technologiques.....	60
<b>Figure IV.3.</b> Variation de la désirabilité en fonction des paramètres de coupe.....	61
<b>Figure IV.4.</b> Diagramme des effets principaux pour Ci.....	67

# INDEX DES TABLEAU

## Chapitre II : Procédure et équipement d'expérience

<b>Tableau II.1.</b> Propriétés physiques et thermiques.....	26
<b>Tableau II.2.</b> Composition chimique de l'acier 17-4PH.....	26
<b>Tableau II.3</b> Table orthogonale de Taguchi L9.....	32
<b>Tableau II.4.</b> Conditions de coupe utilisées.....	32

## Chapitre III : Etude de l'influence des paramètres de coupe

<b>Tableau III.1</b> Résultats des essais pour le plan de Taguchi L9.....	36
<b>Tableau III.2</b> Analyse de la variance pour le critère de rugosité (Ra).....	37
<b>Tableau III.3</b> Analyse de la variance pour le critère de rugosité (Rq).....	38
<b>Tableau III.4</b> Analyse de la variance pour le critère de rugosité (Rz).....	38
<b>Tableau III.5.</b> Analyse de la variance pour le critère l'effort de coupe (Fx).....	42
<b>Tableau III.6.</b> Analyse de la variance pour le critère l'effort de coupe (Fy).....	42
<b>Tableau III.7.</b> Analyse de la variance pour le critère l'effort de coupe (Fz).....	43
<b>Tableau III.8.</b> Analyse de la variance pour la puissance de coupe (Pc).....	47
<b>Tableau III.9.</b> Analyse de la variance pour le débit de copeaux enlevé (MRR).....	50
<b>Tableau III.10.</b> Copeaux de chaque essai.....	52

## Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

<b>Tableau IV.1.</b> Tableau des contraintes.....	57
<b>Tableau IV.2</b> Résultats des paramètres technologiques calculés (Rq, Rz, Fy, Pc, et MRR).....	59
<b>Tableau IV.3</b> Mesure des performances.....	62
<b>Tableau IV.4</b> Matrice des valeurs normalisées.....	63
<b>Tableau IV.5</b> Valeurs normalisées pondérées.....	64
<b>Tableau IV.6</b> Solutions idéales positives et solutions idéales négatives.....	65
<b>Tableau IV.7</b> Résultats TOPSIS (distances, coefficient de proximité $C_i$ et le classement pour chaque alternative).....	66
<b>Tableau IV.8.</b> Récapitulatif des combinaisons optimales.....	67

# SOMMAIRE

Dédicace.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
Résumé .....	III
Abstract.....	IV
Index des figure.....	V
Index des tableau .....	VII
SOMMAIRE.....	VIII
Nomenclature .....	XI

## Chapitre I : Etude est analyse bibliographique

Introduction générale.....	1
I.1. Généralité sur la coupe des métaux.....	2
I.1.1. Introduction .....	2
I.1.2. Définition de la coupe des métaux .....	2
I.1.3. Les procédés d'usinage.....	4
I.1.3.1. Tournage .....	4
I.1.3.2. Fraisage.....	4
I.1.3.3. Rectification .....	5
I.1.3.4. Configuration d'usinage .....	5
I.2. L'état de surface.....	6
I.2.1. Définition.....	6
I.2.2. Méthodes de mesure de la rugosité .....	7
I.3. Lubrification en usinage .....	8
I.3.1. Importance de la lubrification .....	9
I.3.2. Avantages de la lubrification.....	9
I.3.3. Lubrifiants .....	10
I.3.4. Usinage à sec .....	11
I.4. Acier inoxydable.....	11
I.4.1. Définition.....	12
I.4.2. Ordonnement des aciers inoxydables.....	12

a) Aciers inoxydables ferritiques .....	12
b) Aciers inoxydables martensitiques .....	12
c) Aciers inoxydables austénitiques .....	13
d) Aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex) .....	13
I.5. Fabrication additive .....	14
I.5.1. Historique .....	14
I.5.2. Définition de la fabrication additive .....	15
I.5.3. Classification .....	16
I.6. Système MQL .....	17
I.7. Travaux de recherche .....	18
I.8. Conclusion .....	22

## **Chapitre II : Procédure et équipement d'expérience**

II.1. Introduction .....	24
II.2. Matériels utilisés .....	25
II.2.1. Machine-outil .....	25
II.2.2. Matériau de la pièce .....	25
II.2.3. Plaquette et porte plaquette .....	27
II.2.4. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité .....	27
II.2.5. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme Kastler) .....	28
II.2.6. Système avec un minimum de quantité de lubrification (MQL) .....	29
II.2.7. Les copeaux .....	30
II.3. Planification des expériences .....	31
II.3.1. Condition de coupe .....	32
II.3.2. Débit de copeau enlevé (MRR) .....	33
II.3.3. Puissance de coupe ( $P_c$ ) .....	33
II.4. Conclusion .....	34

## **Chapitre III : Etude de l'influence des paramètres de coupe**

III.1. Introduction .....	35
III.2. Résultats des essais réalisés .....	36
III.3. Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la rugosité .....	37

III.3.1. Analyse de la variance pour la rugosité .....	37
III.3.2. Modélisation de la rugosité de surface (Ra, Rq et Rz) .....	38
III.3.3. Graphique des effets principaux pour (Ra).....	39
III.4. Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de l'effort de coupe .....	42
III.4.1. Analyse de variance pour l'effort de coupe (Fx, Fy et Fz) .....	42
III.4.2. Modélisation de l'effort de coupe (Fx) .....	43
III.4.3. Graphique des effets principaux pour (Fx, Fy et Fz).....	44
III.5. Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la puissance de coupe.....	47
III.5.1. Analyse de variance pour (Pc) .....	47
III.5.2. Graphique des effets principaux pour (Pc) .....	47
III.5.3. Modélisation de la puissance de coupe (Pc) .....	48
III.6. Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la Débit de copeaux enlevés (MRR).....	50
III.6.1. Analyse de variance pour (MRR) .....	50
III.7. Formation des copeaux .....	52
III.8. Conclusion .....	54

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

IV.1 Introduction.....	55
IV.2. Optimisation des conditions de coupe .....	56
IV.2.1. Optimisation des résultats par la fonction de désirabilité (DF).....	56
IV.2.2. Optimisation multi-objectifs des paramètres de coupe basée sur l'approche TOPSIS .....	61
IV.2.3. Comparaison des résultats d'optimisation .....	67
IV.3. Conclusion .....	68
Conclusion générale.....	69

# *Nomenclature*

FA : Fabrication additive

Vc : Vitesse de coupe (m/min).

f : Avance par tour (mm/tr).

ap : Profondeur de passe (mm).

Ra : Rugosité moyenne arithmétique ( $\mu\text{m}$ ).

Rz: Profondeur moyenne de la rugosité ( $\mu\text{m}$ ).

Fx (Fa) : Effort de coupe axial (N).

Fy (Fr) : Effort de coupe radial (N).

Fz (Ft) : Effort de coupe tangentiel (N).

P : puissance de coupe (W).

MRR : débit de copeau ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ).

D : diamètre de l'éprouvette (mm).

L : largeur de l'éprouvette (mm).

ANOVA : Analyse de la variance.

Cont % : Pourcentage de contribution.

F : Valeur de Fisher.

R<sup>2</sup> : Coefficient de détermination.

DF : Fonction désirabilité.

Des : Désirabilité.

### Introduction générale

La fabrication additive c'est un ensemble d'opérations permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique.

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans les différents domaines afin de bénéficier de leur résistance à la corrosion. Ils jouent un rôle très important dans l'industrie aéronautique, la fabrication des pièces médicales et dans l'agroalimentaire.

D'autre part, afin d'en assurer une qualité satisfaisante des produits finis, une consommation minimale d'énergie et une productivité élevée durant le processus de coupe, une attention particulière doit être portée sur la modélisation des paramètres technologiques et aussi l'optimisation des conditions de coupe permettant d'améliorer la qualité et la productivité en utilisant les méthodes statistiques pour la modélisation et l'optimisation du processus d'usinage.

La rédaction de ce mémoire est structurée en quatre chapitres :

Dans le **premier chapitre**, nous avons présenté une étude bibliographique qui concerne le tournage, les définitions des paramètres technologiques, la fabrication additive et l'état de l'art sur les différents travaux de recherche en relation avec notre sujet d'étude.

Dans le **deuxième chapitre**, nous avons présenté d'une part, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences, et d'autre part, la méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences (plan et intervalle de variation des paramètres de coupe).

Le **troisième chapitre** concerne une étude statistique, analyse de la variance ANOVA des résultats expérimentaux à l'aide d'un logiciel Design-Expert et Minitab 18. Le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_q$ , et  $R_z$ ) et les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ), puis de déterminer des modèles mathématiques qui permet la prédiction de ces paramètres.

Dans le **quatrième chapitre** l'étude d'analyse a permis de voir le degré d'influence des paramètres de coupe sur les paramètres technologiques calculé en fonction des résultats expérimentaux tels que la puissance de coupe ( $P_c$ ) et le débit de copeau (MRR). L'utilisation de différentes méthodes d'optimisation multicritères à l'aide du logiciel Design-Expert à permis d'obtenir le régime de coupe optimal des paramètres technologiques, permettant d'une part de minimiser les critères de rugosité et la puissance de coupe et d'autre part de maximiser le débit de copeau.

En fin, nous avons fait une conclusion générale sur cette étude.

# **Chapitre I : Etude et analyse bibliographique**

## **I.1. Généralité sur la coupe des métaux**

### **I.1.1. Introduction**

La coupe des métaux, procédé d'usinage dont l'origine est très ancienne, elle a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication. Malgré l'apparition de nouvelles techniques au cours des dernières années, elle reste à l'heure actuelle l'un des procédés les plus largement utilisés. Pour se convaincre de son importance économique, il suffit de considérer à titre d'exemple le volume des dépenses faites aux U.S.A pour l'usinage des métaux, il représente 5% du produit national brut ce qui énorme pour une seule technique.

La recherche d'une productivité toujours meilleure de la coupe des métaux est donc une préoccupation majeure. Cette amélioration permanente repose plus ou moins directement sur l'étude approfondie des mécanismes physiques et des lois régissant ce procédé. Celle-ci reste donc objectif essentiel. Son intérêt ne peut être éclipsé par le développement de nouveaux moyens d'usinage ou de nouvelles techniques de commande et de programmation même si ces derniers points participent aussi au développement de la fabrication à grande vitesse. La mise en œuvre rationnelle de cette technique passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le contrôlent.[1]

### **I.1.2. Définition de la coupe des métaux**

Afin de mieux situer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux intervient dans l'ensemble de procédé d'élaboration des pièces par enlèvement de matière en quantités pouvant représenter une proportion des matériaux bruts.

Cet enlèvement est alors réalisé par l'action d'un outil possédant un ou plusieurs tranchants de section convexe animé d'un mouvement relatif à la pièce appropriée. Une machine-outil fournit à la fois la puissance mécanique nécessaire et réalise le contrôle du mouvement relatif. Cet ensemble constitué un système qui doit être considéré de plusieurs points de vue cinématique, commande ...etc.

Dans ce premier chapitre nous considérons d'abord le phénomène central de la coupe. Ce processus de coupe peut être utilisé à l'état pur comme c'est ordinairement le cas ou bien avec l'assistance de techniques auxiliaires (par exemple excitation vibratoire, effet technique, etc.....) pour améliorer certaines performances. Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leur forme, adaptée à une opération d'usinage, et leur matière la partie active le plus souvent amovible (appelée plaquette) est maintenue sur le corps de l'outil par un moyen de fixation approprié. En résumé, l'usinage par enlèvement de copeaux désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de matière à l'aide d'un outil tranchant. Cette technique ancienne est souvent appelée coupe onéreuse dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux). Cependant, elle reste technique de fabrication importante est réponde. Dans la mise en forme des métaux par la coupe, le procédé de tournage, objet de notre étude représente à lui seul 33% du domaine de l'usinage par enlèvement de copeaux [2].

Le mode est en évolution perpétuelle et par conséquent le domaine de la fabrication mécanique n'échappe pas à l'exception. Les procédés de fabrication par enlèvement de matière par ses nouvelles techniques et techniques d'usinage ont permis de prendre le pas avec les autres domaines de fabrications comme : la déformation à froid, la déformation à chaud, le moulage, l'ajout de matière, etc.). L'enlèvement de matière nécessite l'emploi d'un élément physique permettant d'extraire de la matière d'un volume de base appelé brut (bloc, barre, plaque, ...) dans le but d'obtenir une pièce finie ou semi-finie. Dans cette catégorie d'opérations plusieurs techniques sont à citer :

- a. Le tournage
- b. Le fraisage
- c. La rectification
- d. L'électroérosion
- e. La découpe sciage, oxycoupage, plasma, laser, jet d'eau, ...

L'enlèvement de matière ou usinage par les procédés classiques comme le tournage, le fraisage et

la rectification ont recours très souvent à des éléments tranchants (outil de coupe) dont la résistance et la géométrie sont spécifiques et l'interaction entre la pièce et l'outil de coupe en mouvement relatif produit par arrachement du copeau.

### I.1.3. Les procédés d'usinage

L'évolution des machines-outils et l'outil de coupe ont permis d'améliorer leur rendement, leur sécurité, leur rigidité, leur dynamique (vitesse, accélération), leur puissance, et leur productivité. Dans une première partie, les bases essentielles en usinage sont de définir les différents modes obtention de pièces mécaniques. Comme on l'a présenté auparavant, il existe trois principaux types (tournage, fraisage, rectification) dont deux qui mettent en jeu des outils de coupe à partir active possédant un à plusieurs arêtes tranchantes, par contre le troisième procédé il met en action un outil abrasif (meule).

#### I.1.3.1. Tournage

Le tournage est le procédé d'usinage qui permet l'obtention de pièces de révolutions (de forme cylindrique ou/et conique) à l'aide d'outils tranchants sur des machines appelées.



**Figure.I.1.** Photographie de différentes opérations en tournage industrielles.

### I.1.3.2. Fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage où la génération de surfaces plane résulte de la combinaison du mouvement de rotation de l'outil de coupe (la fraise) et du mouvement d'avance donné à la pièce à usiner.



**Figure.I.2.** Photographie de différentes opérations en fraisage industrielles.

### I.1.3.3. Rectification

La rectification est une opération de finition de surface plane ou cylindrique afin d'améliorer l'état de surface de la pièce semi-finie. L'outil mis en action est appelé meule et la matière est extraite par abrasion.



**Figure.I.3.** Photographie de différentes opérations en rectification.

#### I.1.3.4. Configuration d'usinage

En fonction du procédé de coupe étudié, les outils mis en jeu sont différents en forme et en géométrie. Cependant, afin d'étudier la formation du copeau ou d'établir des analyses et cela quel que soit le procédé, des hypothèses simplificatrices sur la configuration d'usinage et la géométrie des outils sont établies.

Selon la géométrie de l'arête de coupe, on peut considérer deux cas de la coupe soit orthogonale soit oblique.

Conditions de coupes Pour pouvoir réaliser une pièce par enlèvement de matière trois grandeurs doivent être réunies :

1. Vitesse de coupe  $V_c$  ou  $N$  – mouvement primaire (mouvement de coupe) La vitesse de rotation la broche est donnée par l'équation suivante :

$$N = V_c \cdot 1000 / (\pi \cdot D) \quad (I.1)$$

Avec  $D$  : diamètre de la pièce pour le tournage ou diamètre de la fraise et du foret respectivement pour les opérations de fraisage et de perçage.

2. Mouvement d'avance  $f$  – mouvement secondaire.

3. profondeur de passe  $a_p$  – pénétration de l'outil en dessous de surface de travail d'original  
Pour certaines opérations, la quantité de matière enlevée peut être déterminée comme suite :

$$Q = V_c \cdot f \cdot a_p \quad (I.2)$$

Où

$V_c$  : Vitesse de coupe.

$f$  : vitesse d'avance.

$a_p$  : profondeur de passe.

## I.2. L'état de surface

### I.2.1. Définition

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce. Les mesures de rugosité peuvent s'effectuer à l'aide d'un rugosimètre 2D ou 3D. Les résultats de mesures sont alors un profil (mesure 2D) ou une surface ré construite à partir de plusieurs profils (mesure 3D). Le relief d'une surface mesuré en 2D peut-être représenté sous la forme d'une fonction  $z(x) = h$  où  $x$  est la position du point courant sur la longueur d'évaluation de la surface et  $h$  la mesure de la hauteur du défaut.[3]

Des méthodes distinctes sont utilisées en fonction du type d'irrégularité. Ainsi un filtrage par approximation polynomiale permet de supprimer les défauts du premier ordre. Le profil filtré peut être alors séparé en deux profils à l'aide d'un filtre gaussien ondulation d'une part, rugosité d'autre part. Toutes ces étapes sont normalisées [ISO 4288 96]. Ainsi, la fréquence de coupure du filtre est normalisée en fonction de la rugosité Arithmétique du profil ( $R_a$ ).

Il existe de nombreux indicateurs mais la pratique montre qu'un nombre restreint ( $R_a$ ,  $R_t$ ...) d'entre eux est utilisé. Le paramètre de rugosité le plus fréquemment utilisé est ( $R_a$ ). Il correspond à la rugosité arithmétique et représente la moyenne arithmétique des pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesurée sur une longueur d'évaluation  $l$ . Son expression est la suivante :

$$R_a = 1/l \int [y(x)] dx \quad (I.3)$$

Darwish et El-Tamimi et Choudhury et El-Baradie ont développé le modèle du fini de surface ayant la forme suivante

$$R_a = ap \cdot vn \cdot fn \quad (I.4)$$

$ap$  : Profondeur de passe (mm).

$V_c$  : la vitesse de coupe (m/min).

$f_z$  : L'avance par dents (mm/dent).

### I.2.2. Méthodes de mesure de la rugosité

Dans l'industrie le moyen le plus utilisé est l'appareil de mesure d'état de surface à palpeur, avec contact de ce dernier sur la surface à caractériser (profilomètre mécanique 2D).

Suivant son degré de perfectionnement, ce type d'équipement permet la mesure de tous ou parties des paramètres d'états de surface. En effet, l'évaluation des paramètres de profil primaire et d'ondulation nécessite une référence de guidage externe. Représente, de façon schématique, un appareil à palpeur dont les différents composants sont définis La (figure I.4.) montre le rugosimètre type Mitutoyo utilisé pour mesurer le moyen arithmétique du profil ( $R_a$ ).



**Figure I.4.** Rugosimètre SurfTest Sj201.

### **I.3. Lubrification en usinage**

La lubrification est le procédé ou la technique utilisé pour réduire le frottement et l'usure d'une ou des deux surfaces à proximité et se déplaçant l'une par rapport à l'autre en interposant entre elles une substance appelée lubrifiant. Il existe divers types de lubrifiant, qui comprend des huiles, des émulsions huile-eau, des pâtes, des gels, des aérosols (brouillards) et de l'air ou d'autres gaz. Ils peuvent être fabriqués à partir de distillats de pétrole, de graisses animales, d'huiles végétales, d'eau et d'air, ou d'autres matières premières. Selon le contexte et le type de fluide de coupe considéré, il peut être appelé fluide de coupe, huile de coupe, agent de coupe, agent de refroidissement ou lubrifiant. La lubrification en usinage dur présente des défis spécifiques. La sélection du lubrifiant approprié, la détermination des paramètres de lubrification optimaux (pression, débit, taille des gouttelettes, etc.) et l'optimisation des performances globales du processus sont des aspects cruciaux pour garantir un usinage dur efficace et de haute qualité. Différentes techniques de lubrification sont utilisées en usinage dur, notamment la lubrification par jet d'air, la lubrification par émulsion et la lubrification minimum quantité de liquide (MQL). La MQL est de plus en plus adoptée en raison de ses avantages économiques et environnementaux. Elle consiste à fournir une petite quantité de lubrifiant, sous forme d'aérosol ou de microgouttelettes, directement à la zone de coupe. Cela permet de réduire considérablement la quantité de lubrifiant utilisée tout en maintenant une lubrification efficace [4].

#### **I.3.1. 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 [4].

### **I.3.2. Avantages de la lubrification**

Ce qui est intéressant de la lubrification, c'est que les bénéfices ne s'arrêtent pas au processus de fabrication. Il y a aussi des avantages permanents pour la pièce produite. Ce procédé permet en effet de modifier avantageusement certaines de ses propriétés. Par exemple, certaines pièces faites de matières vulnérables à la corrosion seront mieux protégées contre celle-ci si un certain type de lubrifiant a été utilisé lors de leur production. Cela permet ainsi d'obtenir une espérance de vie utile supérieure. Lorsqu'une pièce mécanique est fabriquée, plusieurs composantes d'équipement peuvent être mises à contribution. Celles-ci, si la lubrification est faite de bonne façon, seront soumises à moins de résistance et à une charge de travail moins importante. Elles risquent donc moins de souffrir d'usure prématurée. Même chose pour les lames de coupe. Si elles subissent moins de friction, elles seront moins susceptibles d'être endommagées et demanderont moins d'entretien mécanique [4].

### **I.3.3. Lubrifiants**

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

- Haute absorption de chaleur pour absorber facilement la chaleur développée.
- Bonnes qualités lubrifiantes pour produire un faible coefficient de frottement.
- Point d'éclair élevé pour éliminer le risque d'incendie.
- Stabilité afin de ne pas oxyder dans l'air.
- Neutre afin de ne pas réagir chimiquement.
- Inodore afin de ne pas produire une mauvaise odeur même lorsqu'il est chauffé.
- Inoffensif pour la peau de l'opérateur.

- Inoffensif aux roulements.
- Non corrosif pour le travail ou la machine.
- Transparence afin que l'action de coupe de l'outil puisse être observée.
- Faible viscosité pour permettre le libre écoulement du liquide.
- Prix bas pour minimiser le coût de production.

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

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

#### **I.3.4. Usinage à sec**

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

- La non pollution de l'atmosphère ou de l'eau, réduisant les dangers pour la santé en particulier les problèmes de peau et respiratoires.
- L'absence de lubrifiant sur les composants usinés, réduisant les coûts de nettoyage et les énergies

associées.

-L'absence de lubrifiant sur les copeaux permettant une valorisation plus importante des déchets  
Suppression de l'achat, de la préparation, de la maintenance et du retraitement des fluides de coupe [4].

## I.4. Acier inoxydable

Les matériaux destinés à la coupe des métaux sont d'une grande diversité, selon : leur emploi, leur caractéristique, etc. Parmi ces matériaux on trouve l'acier inoxydable, qui occupe une assez bonne position dans le domaine de l'industrie vu sa résistance à la corrosion.

### I.4.1. Définition

L'acier inoxydable est un acier fortement allié dont l'élément d'alliage de base est le chrome avec une teneur de ( $Cr \geq 10,5\%$ ). ce qui lui assure une résistance aux agents oxydants (résistance à la corrosion). Ainsi que d'autres éléments d'alliages qui agissent sur l'état structural et sur la résistance à la corrosion à savoir : nickel, molybdène, cuivre, titane, niobium, etc... [5].

### I.4.2. Ordonnement des aciers inoxydables

Les fortes additions d'éléments d'alliages (Cr, Mo,..) ou (Ni, Mn) modifient profondément l'état structural d'emploi de ces aciers, et alors on distingue quatre catégories.

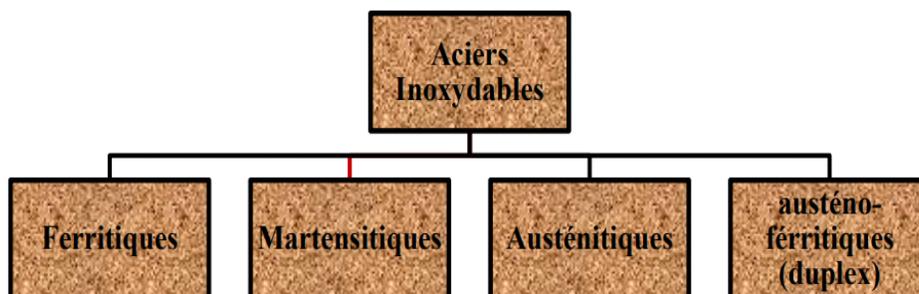


Figure I.6. Différent type d'acier inoxydable.

### **a) Aciers inoxydables ferritiques**

Ce sont des aciers dont la teneur du chrome varie (de 12 à 20 %) et on les nomme superferritiques lorsque la teneur en chrome sera ( $> 20$ ). Ils ne comportent pas d'addition de carbone et les résidus présents ( $< 0,08$  %) sont généralement fixés par du titane ou du niobium. Leur composition leur permet de rester ferritiques à toute température et de présenter donc des propriétés mécaniques intéressantes. Cet acier est surtout utilisé pour les éléments peu adaptés (-c.à.d- le niveau de résistance à la corrosion peut être qualifié de moyen, mais il devra présenter un état de surface permettant un lavage facile, afin d'éviter tout risque de conservation d'origine bactérienne). Le choix de la nuance est fonction du domaine d'utilisation.

### **b) Aciers inoxydables martensitiques**

Ce sont des aciers inoxydables dont la teneur en chrome est de 12 à 18% et celle du carbone varie de 0,1 à 1% environ. Ils sont utilisés après trempe martensitique et revenu qui leur permet d'acquérir des performances mécaniques élevées mais en contrepartie, ils ne résistent pas à l'agression de tous les milieux. Les principales nuances de cet acier sont dérivées de la nuance X12Cr13 (410). Cet acier est surtout utilisé dans le domaine de la coutellerie, où l'élément déterminant est la qualité de coupe de la lame. Pour cela un alliage martensitique dont la teneur en carbone est au moins 0.2% sera utilisé exemple (X20Cr13) ; de telle sorte qu'après un traitement de trempe, la structure obtenue sera d'une dureté suffisante pour assurer une bonne coupe.

### **c) Aciers inoxydables austénitiques**

Ce sont des aciers dont l'élément prépondérant est le chrome avec une teneur supérieure ou égale à 17% après l'élément de base " le fer " suivi par des éléments d'addition au moins 8% de nickel. La teneur en carbone est très basse et leur stabilité à toutes températures ainsi que leurs tenues aux corrosions peut être améliorée par des éléments d'addition tels que le molybdène, le cuivre, le titane, le niobium. Cet acier est le plus employé dans différents domaines, en raison de leur résistance chimique très élevée (résistance à l'oxydation), de leur ductilité comparable à celle du cuivre, et leurs caractéristiques mécaniques élevées (résistance au fluage et à la fatigue thermique). En plus de sa excellente ductilité, cet acier peut aussi être utilisé aux basses températures (jusqu'à moins 200 °C). Le choix de la nuance appropriée est fonction du domaine d'utilisation. La nuance

X2CrNi18-9 à titre d'exemple est en compétition avec les alliages légers pour la réalisation d'équipements destinés à la cryogénie.

#### **d) Aciers inoxydables austéno-férritiques (duplex)**

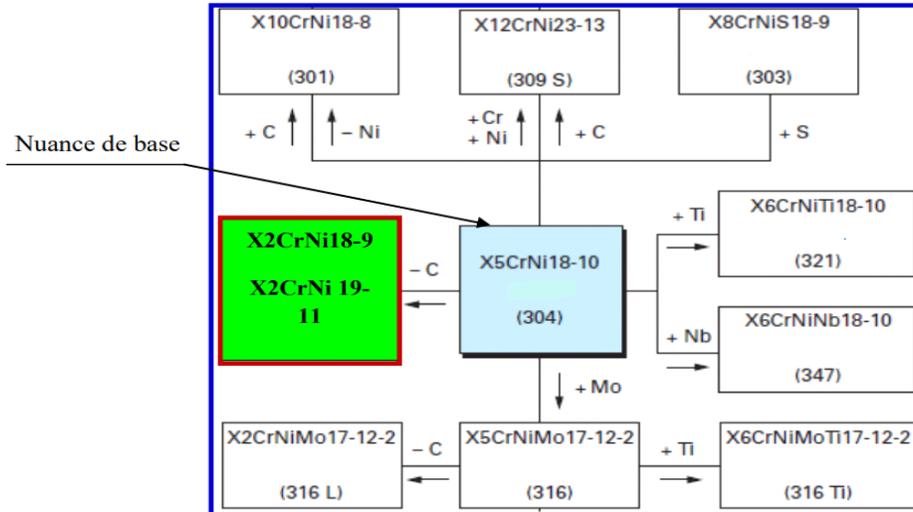
La composition de cet acier (en chrome, nickel, molybdène et silicium) notamment équilibrée, pour conserver à l'état d'emploi une structure mixte constituée d'austénite (30 à 50%) et de ferrite (70 à 50%). Cet état confère à ces aciers des performances mécaniques élevées et une résistance particulière à certains types de corrosions (inters granulaires et sous contraintes). L'alliage le plus représentatif est le X2CrNiMoN22-5-3.

#### **Remarque**

Les aciers inoxydables peuvent aussi être classés d'après leur structure cristalline qu'ils prennent après un traitement bien déterminé. De ce fait, il existe trois familles d'aciers inoxydables :

- Les aciers ferritiques (structure cubique centrée).
- Les aciers martensitiques (structure quadratique).
- Les aciers austénitiques (structure cubique à face centrée).

Le matériau prit en considération dans cette étude est l'acier inoxydable austénitique du type Fe-Cr-Ni. Cet acier représente 80% du marché mondial avec les aciers inoxydables ferritiques. Ceci est dû à leurs structures, qui leur accordent une ductilité et une ténacité exceptionnelle depuis des températures cryogéniques jusqu'à des centaines de degrés Celsius. La nuance de base est X5CrNi18-10 (304). La figure I.7 présente les principaux aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel (molybdène) dérivés de la nuance de base [6].



**Figure I.7.** Principaux aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel (molybdène) dérivés de la nuance de base.

## I.5. Fabrication additive

### I.5.1. Historique

La fabrication additive consiste à réaliser des pièces par ajouts successifs de matière à partir d'un support. Les premiers procédés utilisant ce principe sont apparus à la fin des années 1980. Il s'agit de la stéréolithographie (SL), du dépôt de fil fondu et de la fabrication à partir d'objets laminés. Au vu de leurs caractéristiques mécaniques inférieures à celles des pièces obtenues par les procédés conventionnels ces procédés étaient utilisés à des fins de prototypage rapide, généralement pour offrir un aperçu de la géométrie finale du produit (prototypes "bonne forme"). Dans la période 1990 - 2000, de nombreux autres procédés utilisant des types de mécanisme de liaison différents ont également été adoptés comme moyens de prototypage rapide. En termes de variété de matériaux utilisables, initialement limités à des plastiques ABS, du bois et du carton, le choix s'est diversifié avec l'arrivée de nouveaux procédés et l'amélioration des procédés existants. Il est aujourd'hui possible d'utiliser certains de ces moyens pour fabriquer des pièces métalliques conformes aux spécifications du concepteur, tant pour la géométrie des pièces que pour la nature et les propriétés des matériaux utilisés. Le prototypage rapide a ainsi donné naissance à la production de pièces par fabrication additive [7].

### I.5.2. Définition de la fabrication additive

La norme NF E 67-001 définit la fabrication additive comme « l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique ».[8]

Cependant, si l'acceptation de la fabrication additive (FA) est aujourd'hui normalisée, il n'est pas rare que d'autres termes soient utilisés pour parler de cette technologie de fabrication. Les plus récurrents, bien que pouvant être parfois considérés comme réducteurs, sont :

- fabrication par couches
- impression 3D
- fabrication digitale
- prototypage rapide
- production rapide.

Le principe physique sur lequel repose la FA est utilisé dès la fin du XIX e siècle dans le cadre de la photosculpture et de la topographie. Il consiste à réaliser un produit grâce à un empilement successif de strates. La préparation de la maquette numérique permet de définir les sections de l'objet 3D à réaliser par son découpage successif par des plans parallèles. La distance entre Chaque section correspond à l'épaisseur d'une couche. Pour reconstituer l'objet, les sections sont empilées séquentiellement les unes sur les autres (figure I.8).

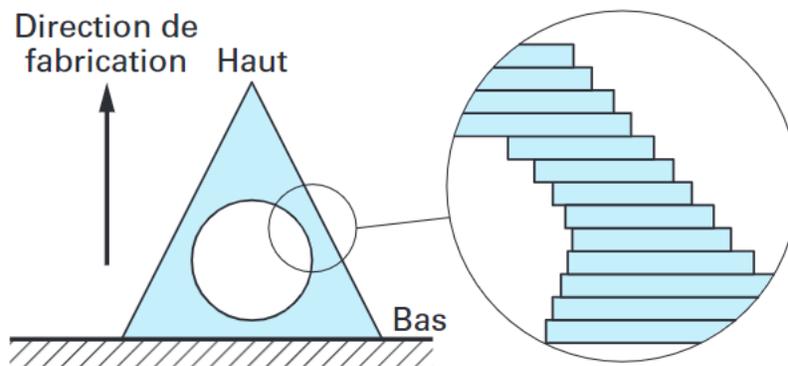
La FA est donc issue d'un processus de fabrication génératif se résumant à deux étapes réitérées jusqu'à l'obtention du produit fini :

1. Génération d'une couche de matière suivant un contour et une épaisseur fixés. La matière est déposée uniquement là où elle est nécessaire.
2. Réalisation de la nouvelle couche par addition de matière au-dessus de la couche précédente.

La fabrication peut se résumer à une fabrication dite en escalier (figure I.8).

Ainsi, du fait de ce principe d'ajout de matière, la FA bouleverse les techniques de fabrication dites traditionnelles que sont :

- les procédés par enlèvement de matière (tels que l'usinage) où le produit est réalisé à partir d'une ébauche brute sur laquelle la matière va être progressivement enlevée afin de lui conférer une forme finale.
- les procédés de formage (tels que la fonderie ou la forge à chaud) dans lesquels la matière est amenée dans un état liquide ou visqueux, puis est mise en forme par écoulement dans un moule ou par rapprochement de deux matrices.[9]



**Figure I.8.** Principe de la fabrication additive

### I.5.3. Classification

Les procédés de fabrication additive sont très nombreux et nous n'en avons jusqu'ici évoqué qu'une partie. En effet, il existe de nombreuses technologies différentes et de nombreuses dénominations constructeur. Les procédés peuvent être classés suivant la nature des matériaux utilisés : plastique, alliage métallique, polymère ou composite, ou suivant l'état sous lequel se présente le matériau initial : liquide, solide en feuilles ou solide sous forme de particules (figure I.9.).

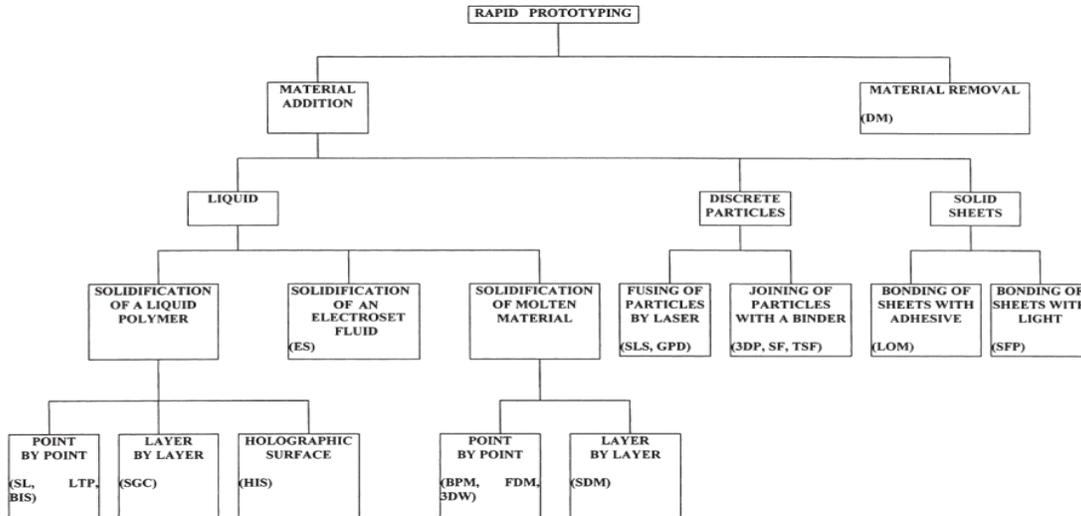


Figure I.9. Classification des procédés suivant l'état du matériau initial proposée par Pham et al. [10].

## I.6. 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 [11].

### **I.7. Travaux de recherche**

[12] et al ont réalisé une investigation sur le tournage de finition de l'acier inoxydable 17-4PH en analysant trois composantes de la force de coupe totale (l'effort de coupe  $F_c$ , l'effort d'avance  $F_f$  l'effort de pénétration  $F_p$ ) et des changements de forme des copeaux et des conditions de refroidissement à sec, avec lubrification et avec lubrification minimale MQL. L'analyse statistique des résultats obtenus a été réalisée à l'aide du logiciel Statistica-13. Les conditions de coupe utilisées étaient, une avance variable de 0,05 à 0,4 mm/tr et une profondeur de coupe variable de 0,2 à 1,2 mm avec une vitesse de coupe de 220 m/min. Les auteurs ont constaté que l'effort de coupe ( $F_c$ ) et l'effort d'avance ( $F_f$ ) dépendent de la profondeur de coupe et de l'avance, et que l'effort de pénétration ( $F_p$ ) dépend principalement de l'avance. Par rapport aux conditions de coupe à sec, une réduction de 43% et 39% de l'effort de coupe  $F_c$  a été atteint pour l'usinage à l lubrification conventionnelle (humide) et l'usinage MQL, respectivement. Quelles que soient les conditions de refroidissement, une forme de copeau favorable a été enregistrée pour  $a_p = 1$  à 1,1mm,  $f = 0,25-0,3$  mm/tr (Figure I.10).

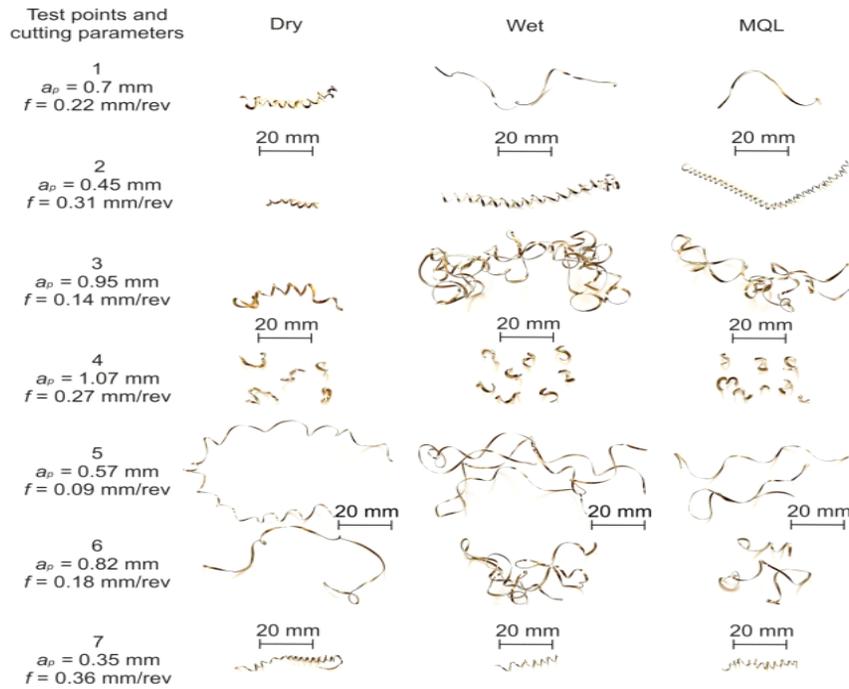


Figure I.10. Formes des copeaux à la fin du tournage de l'acier testé.

Par rapport aux études expérimentales, la simulation FEM a montré des différences de 13% pour l'effort de coupe  $F_c$  et de 36% pour l'effort d'avance  $F_f$  (Figure I.11 et 12).

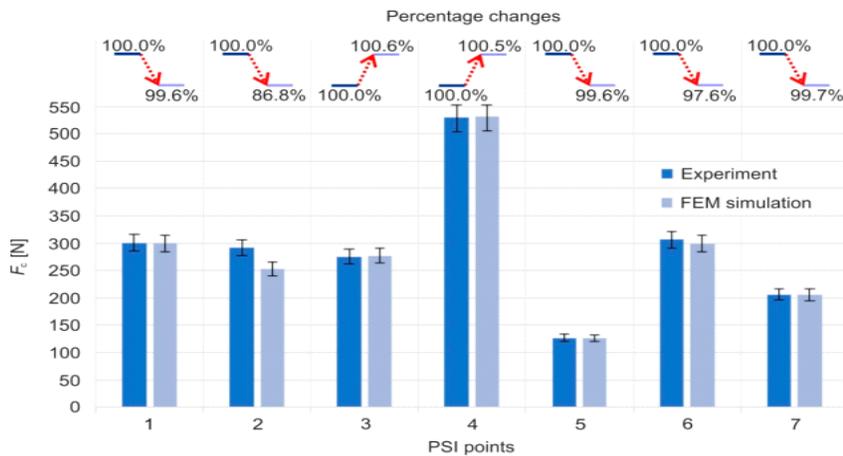
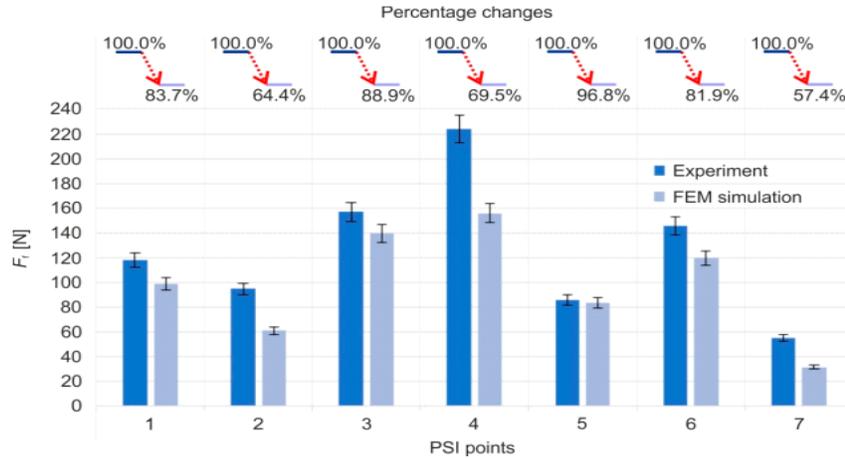


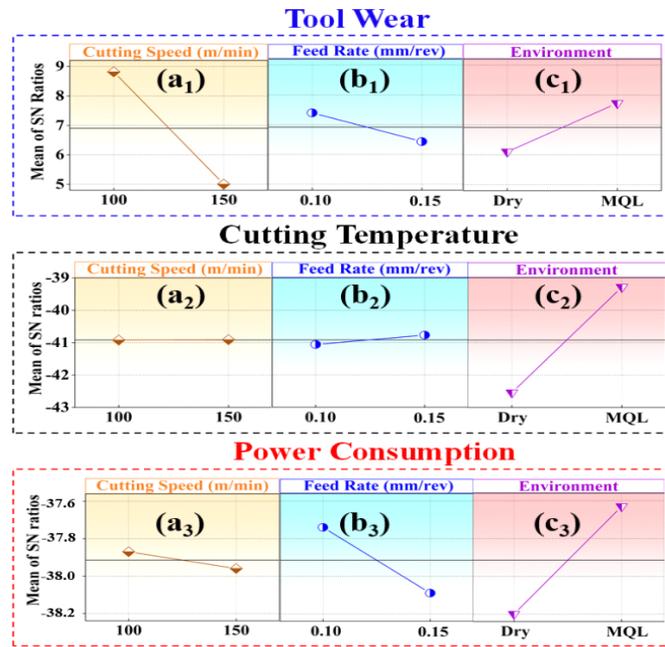
Figure I.11. Le pourcentage de l'effort de coupe  $F_c$  entre la recherche expérimentale et la simulation FEM obtenues en 7 points selon la méthode (PSI)



**Figure I.12.** Le pourcentage de l'effort d'avance  $F_f$  entre la recherche expérimentale et la simulation MEF obtenues en 7 points selon le PSI.

La lubrification en quantité minimale (MQL) est une méthode durable qui a été appliquée efficacement pour améliorer l'usinabilité de divers matériaux au cours des dernières années, tels que les aciers trempés, les superalliages, les métaux tendres et les composites. Dans ce cadre Salur et al [13] propose une étude qui concerne l'évaluation des performances des environnements MQL et à sec lors du fraisage de l'acier AISI 1040. Les auteurs ont étudié l'usure de l'outil, la température de coupe et la consommation électrique comme des réponses de qualité, tandis que la vitesse de coupe, l'avance et l'environnement d'usinage sont pris comme paramètres d'entrée. Les effets des facteurs influents ont été analysés à l'aide de l'analyse de la variance (ANOVA) et de graphiques à barres. De plus, les rapports signal/bruit (S/B) Taguchi a été aussi utilisés afin de déterminer les paramètres optimaux pour des réponses de la meilleure qualité. Les résultats trouvés ont montré que la lubrification MQL offre de meilleures performances par rapport au fraisage à sec en réduisant l'usure des outils, la température de coupe et la consommation d'énergie. Selon les résultats de l'ANOVA, l'environnement de coupe affecte la température de coupe (37 %) et la consommation électrique (94 %), tandis que la vitesse de coupe a des effets importants sur l'usure de l'outil (74 %). Aussi, les résultats de l'optimisation ont montré qu'une vitesse de coupe inférieure (100 m/min) et une avance (0,1 mm/tr) doivent être sélectionnées dans les conditions MQL pour garantir une usure d'outil et une consommation d'énergie minimales ; cependant, une

vitesse d'avance plus élevée (0,15 mm/tr) doit être sélectionnée ainsi qu'une vitesse de coupe faible et des conditions MQL pour garantir de meilleures températures (Figure I.13).



**Figure I.13.** Rapports signal/bruit pour (a) l'usure de l'outil, (b) la température de coupe et (c) la consommation électrique liée à l'Usure des outils, température de coupe et consommation électrique.

## **I.8. Conclusion**

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

# **Chapitre II : Procédure et équipement d'expérience**

### II.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'ensemble du matériel exploité pour effectuer notre projet de fin d'études. Le but est d'identifier le comportement du couple outil-matière en évaluant les différents paramètres technologiques d'usinage, tels que la rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_q$  et  $R_z$ ) et le débit du copeau enlevé (MRR) en fonction des conditions de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$ ) et le mode de lubrification (à sec, MQL avec huile soluble et MQL avec huile complète) durant le tournage de l'acier inoxydable 17-4PH. Nous présentons aussi, la démarche utilisée pour la planification des expériences et de leurs conditions de réalisation ainsi que les informations sur le couple outil/matière. Les essais de tournage sur l'acier inoxydable 17-4PH ont été effectués au niveau du Laboratoire de Mécanique et de Structure (LMS) du département de génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945 Guelma.

### II.2. Matériels utilisés

#### II.2.1. Machine-outil

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

Puissance du moteur électrique : 6.6 kW.

Vitesses de rotation possibles : 45 à 2000 tr/min.

Avance par tour en millimètres par tour : 0.08 à 6.4 mm/tr.



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

#### II.2.2. Matériau de la pièce

Le matériau utilisé dans notre étude est l'acier 17-4PH fortement allié est l'un des aciers inoxydables les plus couramment utilisés pour le durcissement par précipitation. Il contient 17 % de chrome et 4 % de nickel avec des additifs de cuivre. Cette qualité présente une structure martensitique en fines aiguilles qui, en combinaison avec une structure très dure et fragile, est due à la solidification par le traitement thermique par précipitation. La résistance à la corrosion du 17-

4PH est comparable à celle de l'acier inoxydable 304 dans la plupart des milieux. Une excellente combinaison de solidité élevée et de bonne résistance à la corrosion à des températures allant jusqu'à 316 °C rend cet acier inoxydable extrêmement polyvalent et constitue une solution efficace pour de nombreuses applications.

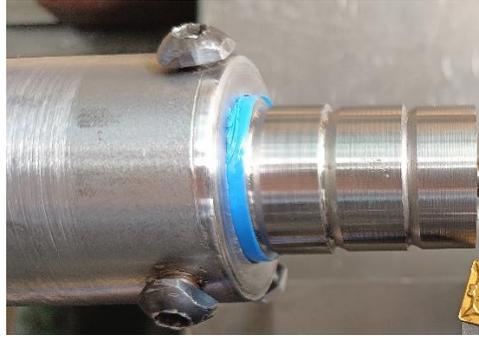
Domaines d'application du 17-4PH mécanisme de roulement, soupapes et composants de turbine, outils de moulage, installations de transformation de produits alimentaires, installations de traitement chimique, raffineries, arbres à haute résistance

**Tableau II.1.** Propriétés physiques et thermiques [19].

Densité	7,75 g/cm <sup>3</sup>
Température de fusion	1404 - 1440 °C
Conductivité thermique à 20°C	18,4 W/m · °C
Coefficient d'expansion à 21 - 93°C	10,8 µm/m · °C

**Tableau II.2.** Composition chimique de l'acier 17-4PH.

<b>Composition</b>	<b>Quantité</b>
Chrome	15-17,5 %
Nickel	3-5 %
Cuivre	3-5 %
Silicium	1 % max.
Manganèse	1 % max.
Niobium	0,15-0,45 %
Carbone	0,07 % max.
Phosphore	0,04 % max.
Soufre	0,03 % max.
Fer	bal



**Figure II.2.** L'éprouvette utilisée.

L'éprouvette utilisée possède un diamètre  $d = 32$  mm et une longueur  $l = 55$  mm avec 3 paliers de 14 mm de longueurs séparés par des gorges de 4 mm (Figure II.2).

### 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 revêtu (GC 2015), de désignation ISO 3GH0810718. 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 TIZIT Maxilock PSBNR 2525M 12.



**Figure II.3.** Plaquette et porte plaquette utilisée

### II.2.4. 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 ( $R_a$ ,  $R_q$  et  $R_z$ ) ont été mesurés instantanément après l'usinage de les (3) palliés essais à sec puis les (3) palliés essais MQL avec huile soluble et les (3) palliés essais MQL avec huile complète au moyen d'un appareil de rugosité Mitutoyo SurfTest SJ-210 muni d'une pointe en diamant de  $5 \mu\text{m}$  et se

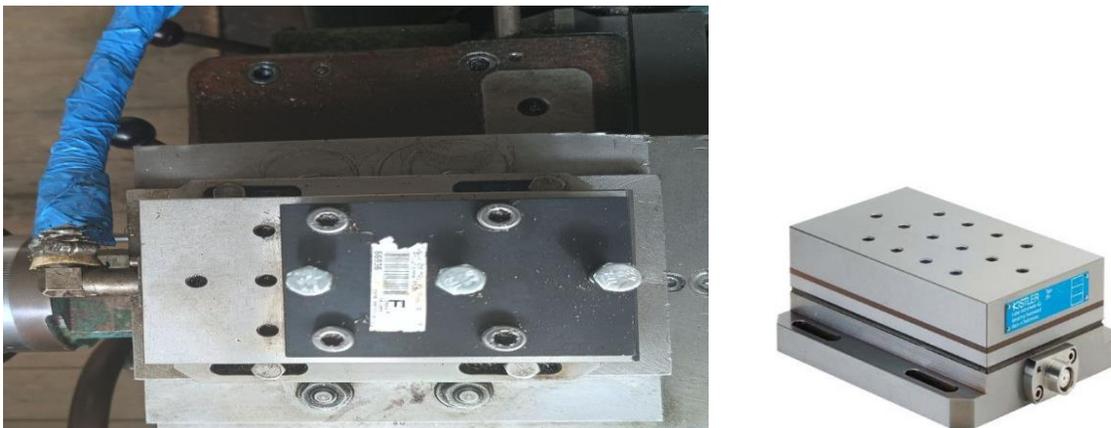
déplaçant linéairement sur la surface usinée. Les mesures de la rugosité ont été effectuées directement sur la pièce à quatre reprises à 90 degrés. Le rugosimètre 2D utilisé est présenté dans la (figure II.4.).



**Figure II.4.** Rugosimètre (Surftest\_SJ-210 Mitutoyo).

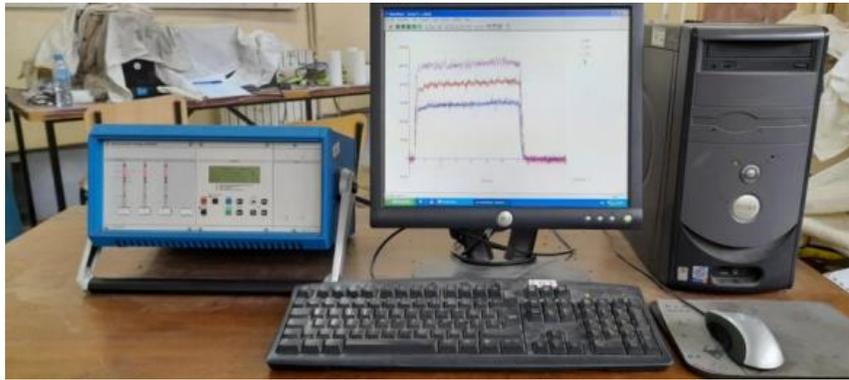
### II.2.5. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme Kastler)

On a utilisé un dynamomètre (KISTLER9257 B) (Figure II.5.) 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.5.** 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 plateforme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation. La plateforme 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.6.** Ordinateur d'acquisition piloté par le logiciel (DYNOWARE)

La (Figure II.6) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (effort axial  $F_x$ , effort radial  $F_y$  et effort tangentiel  $F_z$ ).

### **II.2.6. Système avec un minimum de quantité de lubrification (MQL)**

La (figure II.7) présente l'ensemble des équipements utilisés lors de lubrification avec le système MQL. 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. Le réservoir d'huile et ses composants (Réservoir de 24 L et débitmètre) [14].

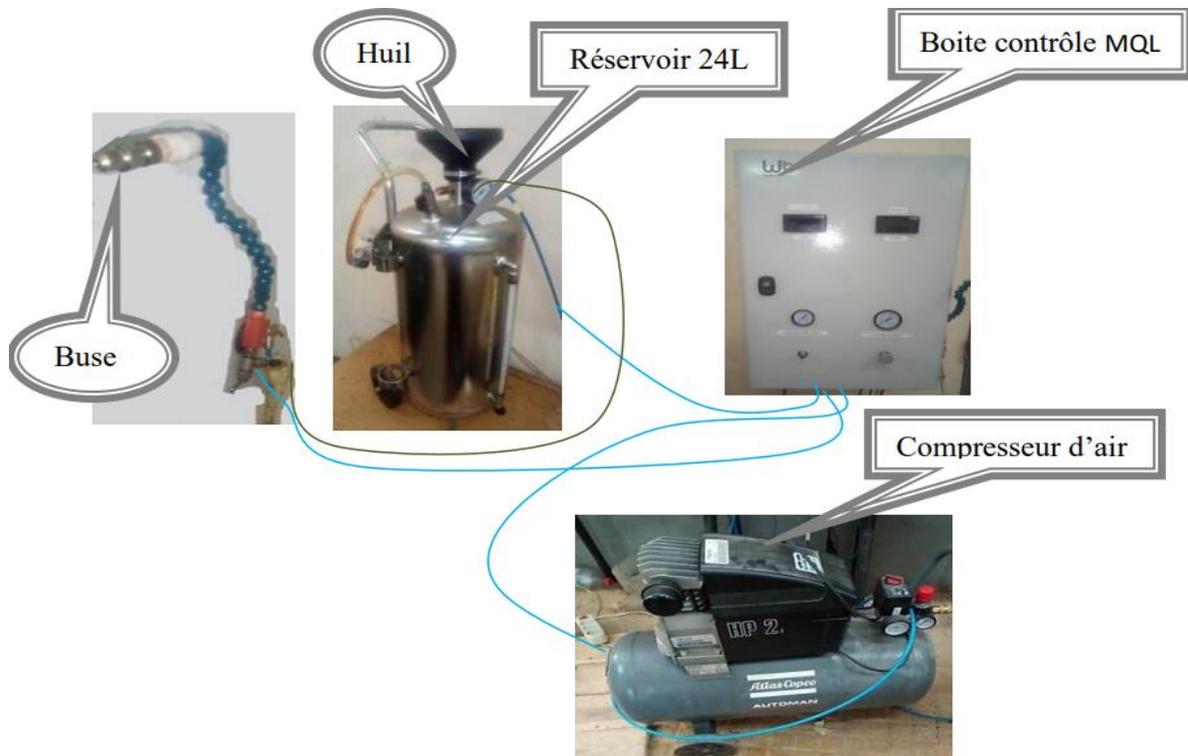


Figure II.7. Montage de système MQL.

### II.2.7. Microscope pour l'examen du copeau

Le microscope utilisé pour voir les copeaux est du type *VISUAL 250* est la réponse à une demande croissante de l'industrie pour des systèmes capables de mesurer des formes ou des matières hors d'atteinte des moyens tactiles. La nouvelle *VISUAL 250* manuelle, compacte mais sans compromis quant à ses performances métrologiques, est à même de satisfaire la demande du marché dans le domaine de la mesure 2D. Sa conception mécanique est d'une grande robustesse, ce qui permet une utilisation de la machine aussi bien en atelier que dans le laboratoire de mesure. Equipée de Visual Gage – le logiciel qui requiert moins d'un demi-jour de formation la *VISUAL 250* se révèle un moyen multitâche et multiutilisateur parfait pour la mesure sans contact. (Figure II.8).



Figure II.8. VISUAL250 pour l'observer de copeau.

### 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, le volume de copeau enlevé et la puissance de coupe, représentent les paramètres de sortie.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) et le mode de lubrification sur les diverses fonctions d'optimisation (effort de coupe, rugosité de surface, MRR et  $P_c$ ).

Dans notre cas, nous avons les facteurs de base ( $V_c$ ,  $f$ , et  $a_p$ ) et chaque facteur à 3 niveaux de variation, par contre, le mode de lubrification (à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète) a été varié trois fois. Nous avons alors L9.

Les essais ont été numérotés de 1 à 3 à sec et de 4 à 6 MQL avec huile soluble et de 7 à 9 MQL avec huile complète (Tableau II.3). En utilisant la méthodologie de surface de réponse MSR à l'aide de logiciel statistique d'optimisation Minitab 18.

**Tableau II.3** Table orthogonale de Taguchi L9.

N° d'essais	E	Vc	f	ap
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

### II.3.1. Condition de coupe

Dans notre travail quatre (04) paramètres de coupe d'entée ont été testés. Tous les facteurs de coupe (vitesse de coupe (Vc), avance (f), le mode de lubrification et la profondeur de passe (ap)) sont variés 03 fois. Les valeurs réelles choisies sont mentionnées au (Tableau II.4.). Ces conditions de coupe ont été choisi suivant les recommandations du fabricant d'outil (SANDVIK).

**Tableau II.4.** Conditions de coupe utilisées.

Paramètres de coups	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
V c (m/min)	91	127	182
f (mm/tr)	0,08	0,12	0,16
ap (mm)	0,1	0,2	0,3
Lubrification	à sec	MQL avec huile Soluble	MQL avec huile complète

### II.3.2. Débit de copeau enlevé (MRR)

Le débit d'enlèvement de matière permet de mesurer la productivité d'un d usinage, on applique le principe selon lequel la cadence de base du machin diminue à mesure de l'augmentations du débit d'enlèvement de matière. Le débit d'enlèvement de matière (MRR) désigne la quantité (volume) de la matière enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivent :

$$MMR= V_c. A. \quad (II.1)$$

MRR : débit d'enlèvement de copeaux [cm<sup>3</sup> /min].

V<sub>c</sub> : vitesse de coupe [m /min].

A : section de coupe [mm<sup>2</sup>].  $A= a_p.f \quad (II.2)$

### II.3.3. Puissance de coupe (P<sub>c</sub>)

La puissance [watts] est égale au produit de la force [newtons] par la vitesse

$$V \text{ [m/s]} : P = F \times V \quad (II.3)$$

- La puissance de coupe (P<sub>c</sub>) qui dépend principalement de la vitesse de coupe (V<sub>c</sub>) et de l'effort tangentiel de coupe (F<sub>z</sub>), Dans le cas d'un outil à charioter couder, on a la relation suivante pour la puissance de coupe : [16]

$$P_c = (F_z \times V_c) / 60 \quad (II.4)$$

### II.4. Conclusion

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

# **Chapitre III : Etude de l'influence des paramètres de coupe**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des essais réalisés suivant le plan de Taguchi L9, lors de l'usinage de l'acier 17-4PH fortement allié (issu de la fabrication additive) avec un outil carbure métallique revêtu (GC 2015). Une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée afin de quantifier les effets des paramètres d'entrée à savoir ; la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ), la profondeur de passe ( $a_p$ ) et l'environnement de lubrification (à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète) sur les paramètres technologiques de sortie à savoir ; les trois critères de rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_q$  et  $R_z$ ), les trois composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ), le taux d'enlèvement de matière (MRR) et la puissance de coupe ( $P_c$ ). La méthodologie de surface de réponse a été utilisée afin de proposer des modèles mathématiques qui permettent de faire des prédictions. En outre, ces modèles sont aussi exploités afin de faire une étude d'optimisation des conditions de coupe, en utilisant deux logiciels Minitab 18 et Design-Expert 13.

### 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 17-4PH à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète. En utilisant un outil carbure métallique revêtu (GC 2015). Les conditions de coupe ont été choisies selon les recommandations du fabricant des outils de coupe. L'analyse des résultats de ce tableau montre que les différentes sorties varient suivant le régime de coupe testé.

**Tableau III.1** Résultats des essais pour le plan de Taguchi L9.

N°	E	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	MRR (cm <sup>3</sup> /min)	Pc (W)
1	E1	91	0,08	0,1	1,45	1,84	8,12	17,69	63,24	55,48	0,728	84.14
2	E1	127	0,12	0,2	1,44	1,8	7,88	29,8	87,68	60,36	3,048	127.76
3	E1	182	0,16	0,3	1,56	1,89	7,29	51,75	101,5	88,49	8,736	268.41
4	E2	91	0,12	0,3	1,32	1,67	6,64	33,27	76,72	76,72	3,276	116.35
5	E2	127	0,16	0,1	1,9	2,34	9,43	22,17	75,83	62,01	2,032	131.25
6	E2	182	0,08	0,2	1,11	1,43	5,8	29,58	73,08	52,20	2,912	158.34
7	E3	91	0,16	0,2	1,58	1,91	7,29	31,89	71,96	64,00	2,912	97.06
8	E3	127	0,08	0,3	0,97	1,29	5,09	44	86,64	63,72	3,048	134.87
9	E3	182	0,12	0,1	1,08	1,40	5,29	16,56	55,93	38,17	2,184	115.78

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

#### III.3.1. Analyse de la variance pour la rugosité

Les tableaux (III.2, III.3 et III.4) illustrent les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface. L'analyse de ces résultats montre que les modèles trouvés sont statistiquement significatifs avec un pourcentage de contribution supérieur à 91%. Pour les critères Ra et Rq l'avance (f) est le facteur qui a le plus grand effet avec des contributions de 55,40%, 49,34%, respectivement, suivi par le mode de lubrification (E) avec des contributions de 19,06% et 20,8%. Finalement, la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap) présentent des faibles contributions. Concernant le critère Rz, l'environnement de lubrification possède la plus grande influence avec un pourcentage de contribution de 35,06%, suivi par l'avance par tour avec une contribution de 25,66%. Enfin, la vitesse de coupe et la profondeur de passe possèdent une faible influence sur le critère de rugosité Rz.

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

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
<b>Modèle</b>	5	0,63333	<b>92,34%</b>	0,63333	0,12667	7,23	0,067
<b>Linéaires</b>	5	0,63333	92,34%	0,63333	0,12667	7,23	0,067
<b>Vc, m/min</b>	1	0,06649	9,69%	0,06649	0,06649	3,80	0,147
<b>f (mm/tr)</b>	1	0,38002	<b>55,40%</b>	0,38002	0,38002	21,69	<b>0,019</b>
<b>ap (mm)</b>	1	0,05607	8,17%	0,05607	0,05607	3,20	0,172
<b>E</b>	2	0,13076	<b>19,06%</b>	0,13076	0,06538	3,73	0,154
<b>Erreur</b>	3	0,05256	7,66%	0,05256	0,01752		
<b>Total</b>	8	0,68589	100,00%				

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

Source	DL	SomCar		SomCar		Valeur F	Valeur de p
		séq	Contribution	ajust	CM ajust		
<b>Modèle</b>	5	0,77272	<b>91,64%</b>	0,77272	0,15454	6,58	0,076
<b>Linéaires</b>	5	0,77272	91,64%	0,77272	0,15454	6,58	0,076
<b>Vc, m/min</b>	1	0,09243	10,96%	0,09243	0,09243	3,93	0,142
<b>f (mm/tr)</b>	1	0,41607	<b>49,34%</b>	0,41607	0,41607	17,71	<b>0,025</b>
<b>ap (mm)</b>	1	0,08882	10,53%	0,08882	0,08882	3,78	0,147
<b>E</b>	2	0,17540	<b>20,80%</b>	0,17540	0,08770	3,73	0,153
<b>Erreur</b>	3	0,07048	8,36%	0,07048	0,02349		
<b>Total</b>	8	0,84320	100,00%				

**Tableau III.4** Analyse de la variance pour le critère de rugosité (Rz)

Source	DL	SomCar		SomCar	CM	Valeur	Valeur
		séq	Contribution	ajust	ajust	F	de p
<b>Modèle</b>	5	14,887	<b>91,66%</b>	14,887	2,9773	6,60	0,076
<b>Linéaires</b>	5	14,887	91,66%	14,887	2,9773	6,60	0,076
<b>Vc m/min</b>	1	2,595	15,98%	2,595	2,5946	5,75	0,096
<b>f (mm/tr)</b>	1	4,167	<b>25,66%</b>	4,167	4,1667	9,23	<b>0,050</b>
<b>ap (mm)</b>	1	2,432	14,98%	2,432	2,4321	5,39	0,103
<b>E</b>	2	5,693	<b>35,06%</b>	5,693	2,8467	6,31	0,084
<b>Erreur</b>	3	1,354	8,34%	1,354	0,4512		
<b>Total</b>	8	16,240	100,00%				

### III.3.2. Modélisation de la rugosité de surface (Ra, Rq et Rz)

Les relations fonctionnelles entre le paramètre de sortie pour la rugosité de surface (Ra, Rq et Rz) et les facteurs d'entrée (Vc, f et ap) ont été exprimées par des modèles mathématiques (équations linéaires). Les modèles linéaires obtenus à partir de l'analyse statistique peuvent être utilisés pour prédire la rugosité dans l'intervalle des conditions de coupe étudiés. Les équations

(III.1 III.2 III.3) expriment le modèle de la rugosité de la surface ( $R_a$ ,  $R_q$  et  $R_z$ ) avec tous les facteurs principaux pour les trois environnements de lubrification (à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète).

Critère de rugosité  $R_a$  ( $R^2 = 92,34\%$ )

$$R_{a \text{ à sec}} = 1,228 - 0,00230 V_c + 6,29 f - 0,967 a_p$$

$$R_{a \text{ MQL avec l'huile soluble}} = 1,188 - 0,00230 V_c + 6,29 f - 0,967 a_p \quad (\text{III.1})$$

$$R_{a \text{ MQL avec l'huile complète}} = 0,955 - 0,00230 V_c + 6,29 f - 0,967 a_p$$

Critère de rugosité  $R_q$  ( $R^2 = 91,64\%$ )

$$R_q \text{ à sec} = 1,658 - 0,00271 V_c + 6,58 f - 1,217 a_p$$

$$R_q \text{ MQL avec l'huile soluble} = 1,628 - 0,00271 V_c + 6,58 f - 1,217 a_p \quad (\text{III.2})$$

$$R_q \text{ MQL avec l'huile complète} = 1,348 - 0,00271 V_c + 6,58 f - 1,217 a_p$$

Critère de rugosité  $R_z$  ( $R^2 = 91,66\%$ )

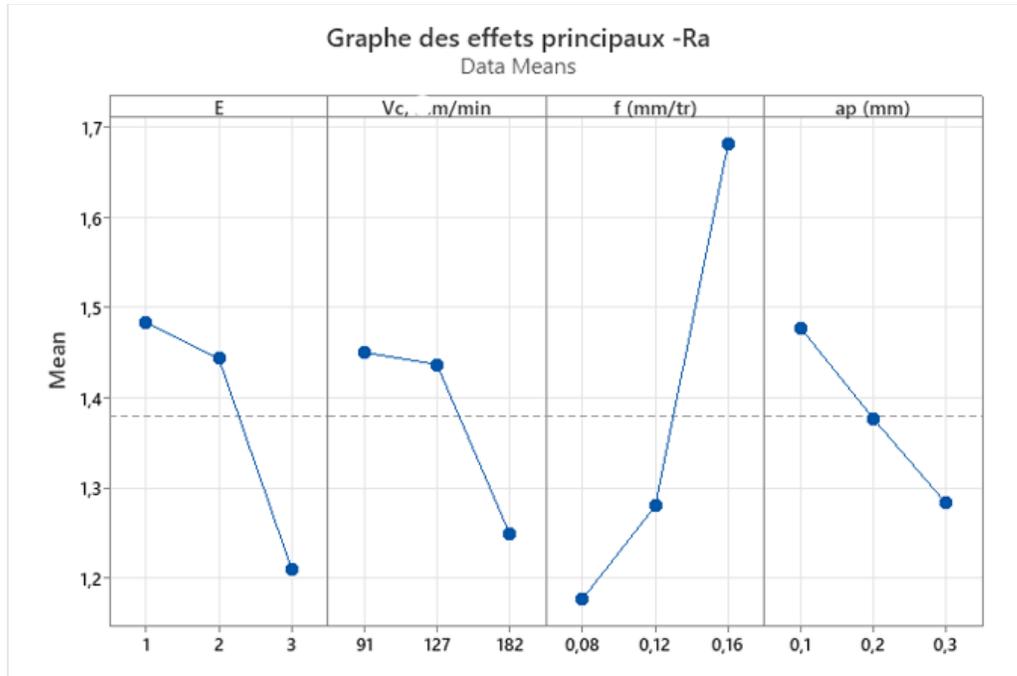
$$R_z \text{ à sec} = 8,45 - 0,01435 V_c + 20,83 f - 6,37 a_p$$

$$R_z \text{ MQL avec l'huile soluble} = 7,98 - 0,01435 V_c + 20,83 f - 6,37 a_p \quad (\text{III.3})$$

$$R_z \text{ MQL avec l'huile complète} = 6,58 - 0,01435 V_c + 20,83 f - 6,37 a_p$$

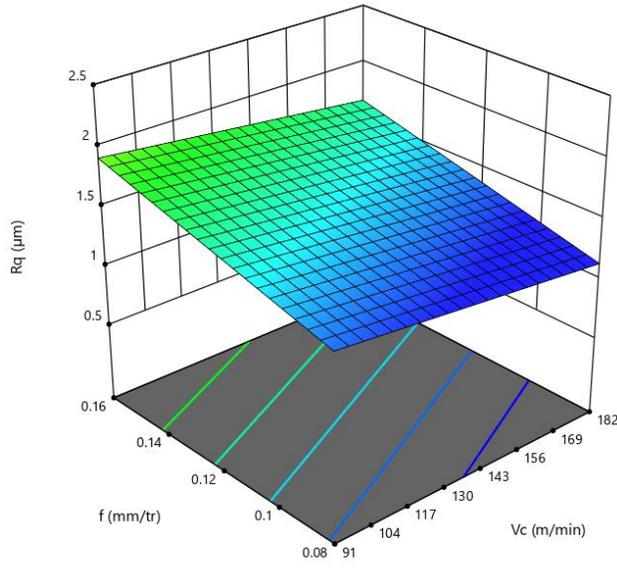
### III.3.3. Graphique des effets principaux pour ( $R_a$ )

La figure (III.1) présente les graphiques des effets principaux pour la rugosité de surface ( $R_a$ ). On remarque que l'avance ( $f$ ) affecte fortement sur la rugosité ( $R_a$ ) car elle possède la plus grande pente. Le deuxième facteur qui influence ( $R_a$ ), c'est le mode de lubrification ( $E$ ) suivie par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et en dernier lieu la profondeur de passe ( $a_p$ ). On peut voir que l'augmentation de l'avance ( $f$ ) induit une élévation de critère de rugosité ( $R_a$ ). De plus, on distingue que l'usinage avec un minimum de quantité de lubrification (MQL avec l'huile complète) contribue à une diminution de la rugosité ( $R_a$ ) par rapport à l'usinage à sec et MQL avec l'huile soluble. Des explications similaires ont été rapportées par [16].

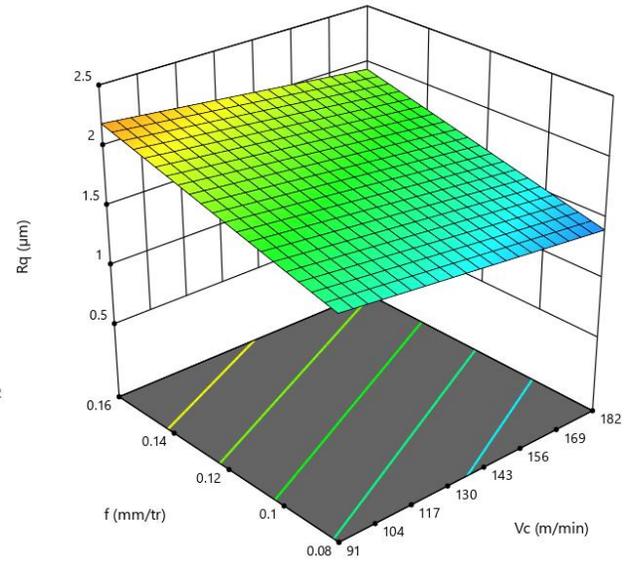


**Figure III.1.** Graphique des effets principaux pour (Ra).

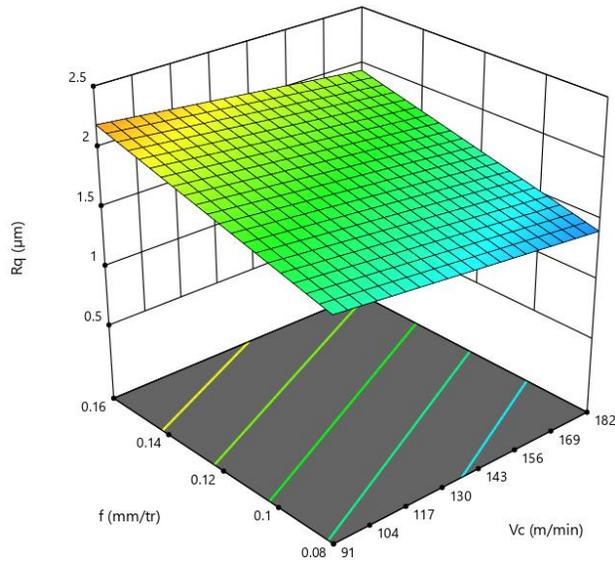
La figure III.2 présente les surfaces de réponses ainsi que les graphes de contours de Rq en fonction de (Vc), (f) pour (ap=0.2 mm), ces figures montrent d'une part, que la lubrification MQL avec l'huile complète donne les meilleures valeurs du critère de rugosité Rq, d'autre part, les faibles avances permettent aussi d'atteindre les valeurs minimales de Rq, alors que la rugosité est légèrement améliorée avec l'augmentation de Vc.



a) MQL avec l'huile complète



b) MQL avec l'huile soluble



c) á sec

Figure III.2. Diagrammes de surface 3D de  $R_q$  en fonction de ( $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ ).

### III.4. Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de l'effort de coupe

#### III.4.1. Analyse de variance pour l'effort de coupe (Fx, Fy et Fz)

Les tableaux (III.5, III.6 et III.7) illustrent les résultats de l'ANOVA pour les composantes de l'effort de coupe lors de l'usinage à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète. L'analyse des résultats montre que le facteur (ap) est le facteur le plus important qui affecte (Fx, Fy et Fz), sa contribution sur Fx est de **81,94%** (tableau III.5), pour Fy **53.22%** (tableau III.6), et pour Fz sa contribution est de **54,78%** (tableau III.7). Les facteurs (Vc), (f) et (E) ne sont pas significatifs car les valeurs de la probabilité (p) sont inférieures à 0,05.

**Tableau III.5.** Analyse de la variance pour le critère l'effort de coupe (Fx)

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
<b>Modèle</b>	5	980,83	<b>91,49%</b>	980,83	196,17	6,45	0,078
<b>Linéaires</b>	5	980,83	91,49%	980,83	196,17	6,45	0,078
<b>Vc m/min</b>	1	33,41	3,12%	33,41	33,41	1,10	0,371
<b>f (mm/tr)</b>	1	35,24	3,29%	35,24	35,24	1,16	0,361
<b>ap (mm)</b>	1	878,46	<b>81,94%</b>	878,46	878,46	28,90	<b>0,013</b>
<b>E</b>	2	33,72	3,15%	33,72	16,86	0,55	0,624
<b>Erreur</b>	3	91,19	8,51%	91,19	30,40		
<b>Total</b>	8	1072,02	100,00%				

**Tableau III.6.** Analyse de la variance pour le critère l'effort de coupe (Fy)

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
<b>Modèle</b>	5	1248.24	<b>97.47%</b>	1248.24	249.65	23.11	0.013
<b>Linéaires</b>	5	1248.24	97.47%	1248.24	249.65	23.11	0.013
<b>Vc m/min</b>	1	116.94	9.13%	116.94	116.94	10.82	0.046
<b>f (mm/tr)</b>	1	94.41	7.37%	94.41	94.41	8.74	0.060
<b>ap (mm)</b>	1	681.60	<b>53.22%</b>	681.60	681.60	63.09	<b>0.004</b>
<b>E</b>	2	355.29	27.74%	355.29	177.65	16.44	0.024
<b>Erreur</b>	3	32.41	2.53%	32.41	10.80		
<b>Total</b>	8	1280.65	100.00%				

**Tableau III.7.** Analyse de la variance pour le critère l'effort de coupe (Fz)

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
<b>Modèle</b>	5	1506,41	<b>92,23%</b>	1506,41	301,28	7,12	0,068
<b>Linéaires</b>	5	1506,41	92,23%	1506,41	301,28	7,12	0,068
<b>Vc m/min</b>	1	48,26	2,95%	48,26	48,26	1,14	0,364
<b>f (mm/tr)</b>	1	309,60	18,95%	309,60	309,60	7,32	0,073
<b>ap (mm)</b>	1	894,75	<b>54,78%</b>	894,75	894,75	21,14	0,019
<b>E</b>	2	253,80	15,54%	253,80	126,90	3,00	0,193
<b>Erreur</b>	3	126,95	7,77%	126,95	42,32		
<b>Total</b>	8	1633,36	100,00%				

### III.4.2. Modélisation de l'effort de coupe (Fx)

Les modèles de l'effort de coupe (Fx, Fy et Fz) est donné par les équations suivantes (III.4 III.5 III.6). Son coefficient de détermination ( $R^2$ ) supérieure à **91%**. Les équations expriment le modèle de l'effort de coupe (Fx) avec tous les facteurs principaux pour les trois environnements de lubrification (à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète).

Composante de l'effort Fx ( $R^2 = 91,49\%$ )

$$F_{x \text{ à sec}} = -5,3 + 0,0515 V_c + 60,6 f + 121,0 a_p$$

$$F_{x \text{ MQL avec l'huile soluble}} = -10,0 + 0,0515 V_c + 60,6 f + 121,0 a_p \quad \text{(III.4)}$$

$$F_{x \text{ MQL avec l'huile complète}} = -7,5 + 0,0515 V_c + 60,6 f + 121,0 a_p$$

Composante de l'effort Fy ( $R^2 = 97,47\%$ )

$$F_{y \text{ à sec}} = 38,08 + 0,0963 V_c + 99,2 f + 106,6 a_p$$

$$F_{y \text{ MQL avec l'huile soluble}} = 24,77 + 0,0963 V_c + 99,2 f + 106,6 a_p \quad \text{(III.5)}$$

$$F_{y \text{ MQL avec l'huile complète}} = 24,73 + 0,0963 V_c + 99,2 f + 106,6 a_p$$

Composante de l'effort Fz ( $R^2 = 92,23\%$ )

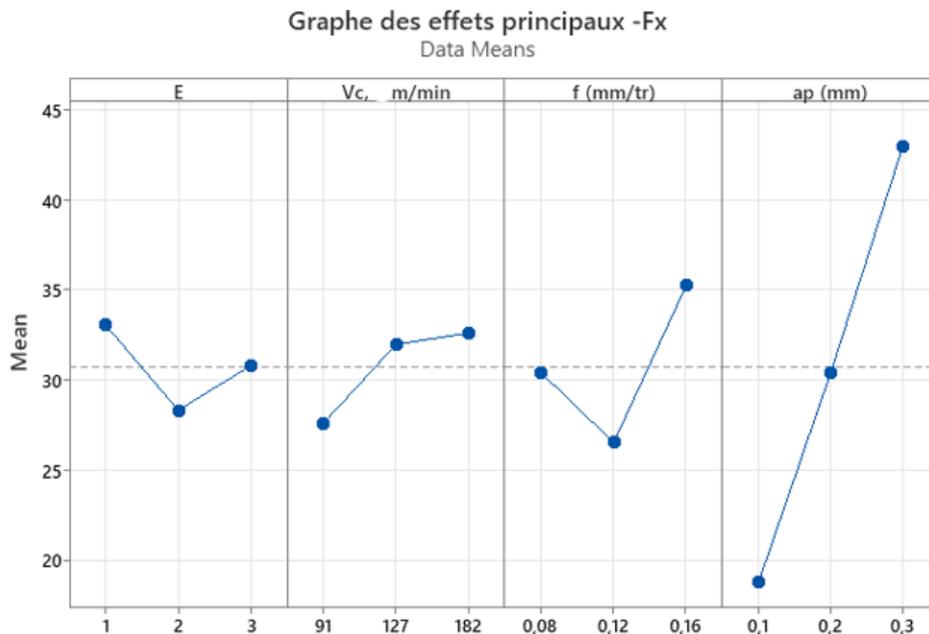
$$Fz_{\text{à sec}} = 17,6 - 0,0619 Vc + 179,6 f + 122,1 ap$$

$$Fz_{\text{MQL avec l'huile soluble}} = 25,9 - 0,0619 Vc + 179,6 f + 122,1 ap \quad (\text{III.6})$$

$$Fz_{\text{MQL avec l'huile complète}} = 30,4 - 0,0619 Vc + 179,6 f + 122,1 ap$$

### III.4.3. Graphique des effets principaux pour (Fx, Fy et Fz)

Les figures (III.3 III.4 III.5) présentent les graphiques des effets principaux pour les composantes de l'effort de coupe (Fx, Fy et Fz) On remarque que la profondeur de passe (ap) affecte fortement l'évolution de l'effort de coupe car elle possède la plus grande pente. Le deuxième facteur qui influence, c'est l'avance (f) suivie par la vitesse de coupe (Vc). On peut voir que l'augmentation de la profondeur de passe (ap) induit une élévation de critère de l'effort de coupe. De plus, on distingue que l'usinage avec un minimum de quantité de lubrification (MQL avec l'huile complète ) contribue à une diminution de l'effort de coupe par rapport à l'usinage à sec et MQL avec l'huile soluble.



**Figure III.3.** Graphique des effets principaux pour (Fx).

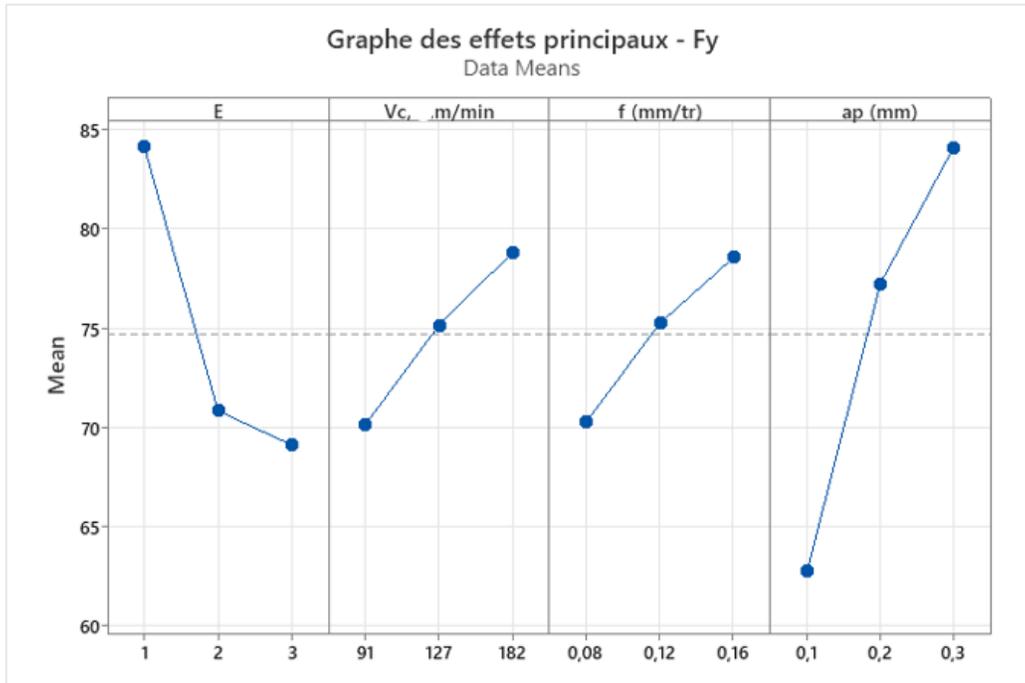


Figure III.4. Graphique des effets principaux pour (Fy).

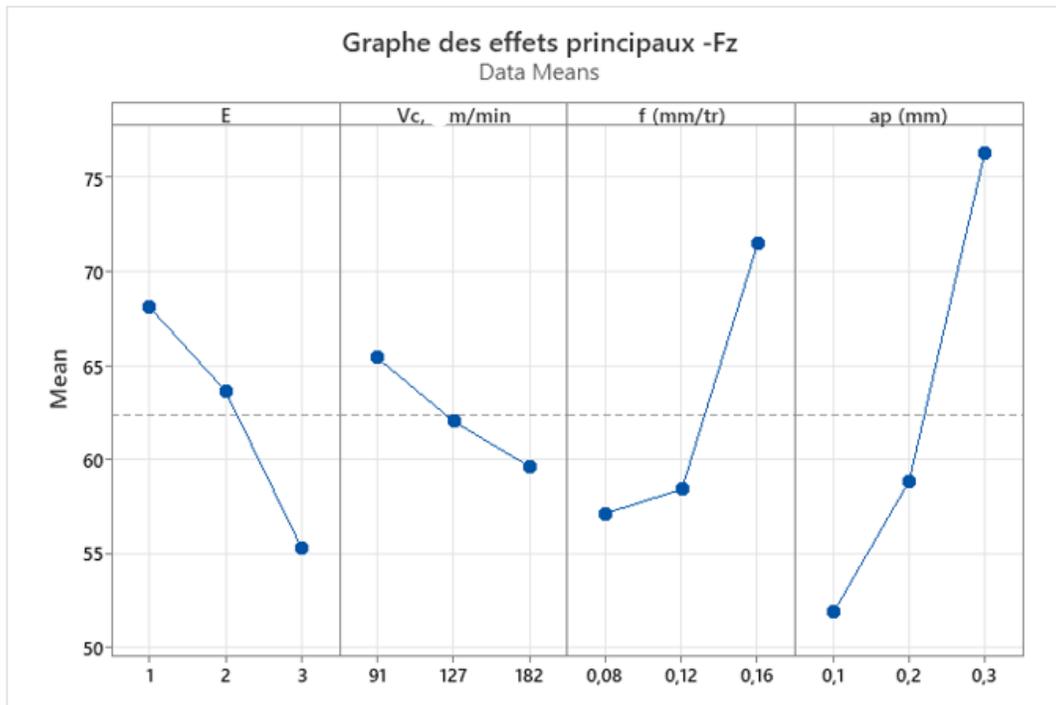


Figure III.5. Graphique des effets principaux pour (Fz).

La figure III.6 confirme l'importance de l'influence de ( $a_p$ ) sur l'évolution de  $F_y$  elle permet d'évaluer l'influence simultanée de ( $V_c$ ,  $a_p$ ) et ( $f$ ,  $a_p$ ) sur la composante de l'effort de coupe  $F_y$ . La figure indique que la profondeur de passe ( $a_p$ ) est le facteur le plus important lors de l'usinage avec la lubrification MQL avec l'huile complète.

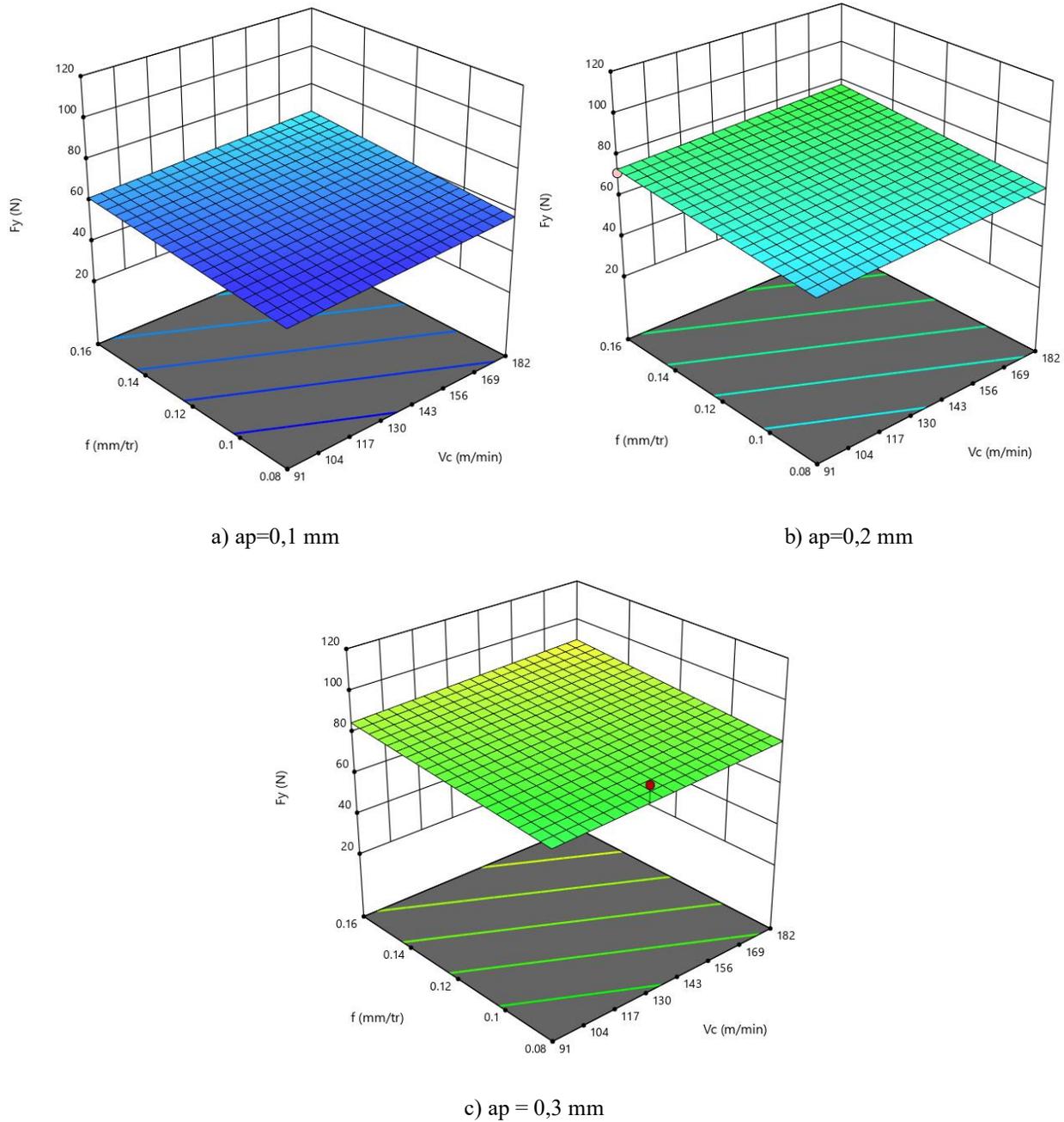


Figure III.6. Diagrammes de surface 3D de  $F_y$  en fonction de ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ).

### III.5. Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la puissance de coupe (Pc)

#### III.5.1. Analyse de variance pour (Pc)

Le tableau III.8 illustre les résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe (Pc) lors de l'usinage à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète. L'analyse des résultats montre que le facteur (Vc) est le facteur le plus important qui affecte (Pc) dans les trois environnements (à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète), sa contribution est de **43.93%**. Elle est suivie par la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 25.61%. Le dernier facteur affectant (Pc) est l'avance (f), sa contribution est 10,27%.

**Tableau III.8.** Analyse de la variance pour la puissance de coupe (Pc).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
<b>Modèle</b>	5	21394	<b>92.56%</b>	21394	4278.7	7.47	0.064
<b>Linéaires</b>	5	21394	92.56%	21394	4278.7	7.47	0.064
<b>Vc m/min</b>	1	10154	<b>43.93%</b>	10154	10154.5	17.72	<b>0.024</b>
<b>f (mm/tr)</b>	1	2375	10.27%	2375	2374.7	4.14	0.135
<b>ap (mm)</b>	1	5920	25.61%	5920	5919.8	10.33	0.049
<b>E</b>	2	2945	12.74%	2945	1472.4	2.57	0.224
<b>Erreur</b>	3	1719	7.44%	1719	573.1		
<b>Total</b>	8	23113	100.00%				

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

La figure III.7 représente les graphiques des effets principaux pour la puissance de coupe (Pc). On peut voir que la pente de la vitesse de coupe (Vc) est plus grande donc ce facteur est le plus influant sur (Pc), il est suivi par la profondeur de passe (ap) puis l'avance (f). Il est clair que l'augmentation des trois facteurs (f), (ap) et (Vc) induit une élévation de (Pc). De plus, on distingue que l'usinage avec un minimum de quantité de lubrification (MQL avec l'huile complète) contribue à une diminution de la puissance de coupe par rapport à l'usinage à sec et MQL avec

l'huile soluble, cette diminution est attribuée à la réduction des efforts lors de la lubrification MQL avec l'huile complète.

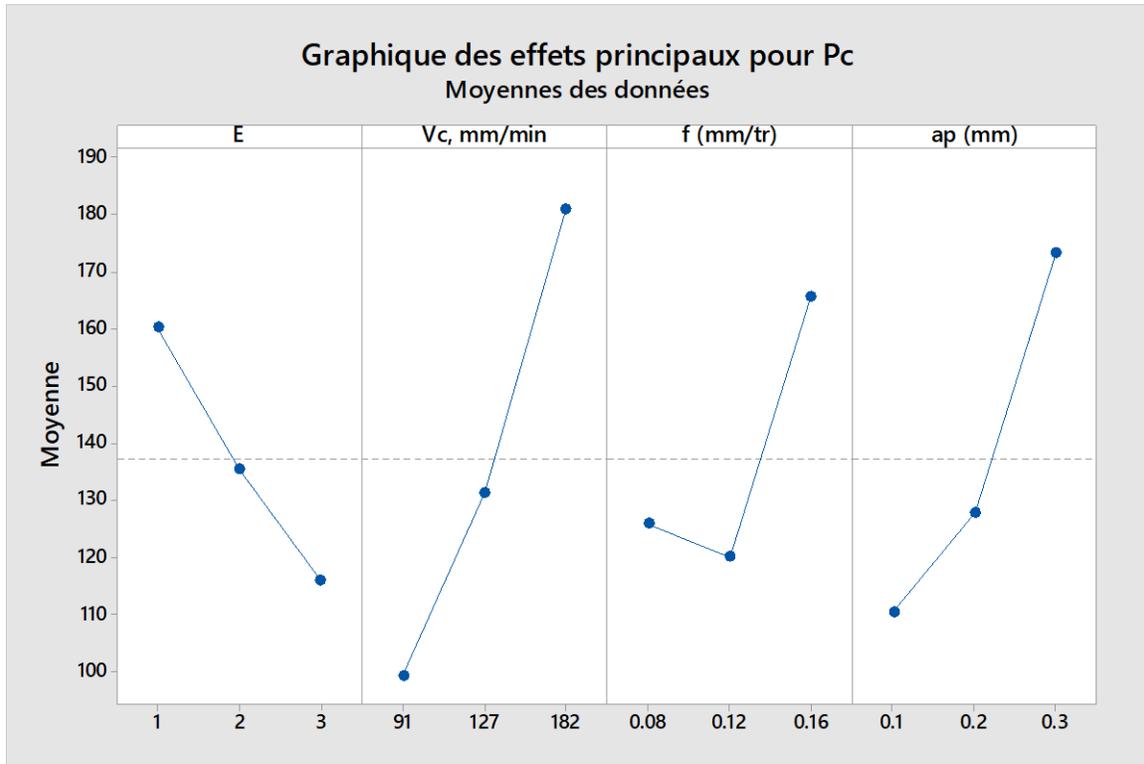


Figure III.7. Graphique des effets principaux pour (Pc).

### III.5.3. Modélisation de la puissance de coupe (Pc)

Les relations fonctionnelles entre le paramètre puissance de coupe (Pc) et les variables indépendantes étudiées (Vc, f et ap) durant l'usinage à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète ont été exprimées par des modèles mathématiques (équations linéaires) avec un coefficient de détermination (R=92.56%) 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. L'équation (III.7) exprimer le modèle de la puissance de coupe (Pc) avec tous les facteurs principaux pour les trois environnements de lubrification.

Puissance de coupe  $P_c$  ( $R^2 = 92.56\%$ )

$$P_c \text{ à sec} = -82.1 + 0.898 V_c + 497 f + 314.1 a_p$$

$$P_c \text{ MQL avec l'huile soluble} = -106.9 + 0.898 V_c + 497 f + 314.1 a_p \quad (\text{III.7})$$

$$P_c \text{ MQL avec l'huile complète} = -126.3 + 0.898 V_c + 497 f + 314.1 a_p$$

Le figure III.8 confirme l'influence de ( $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$ ) sur l'évolution de  $P_c$ .

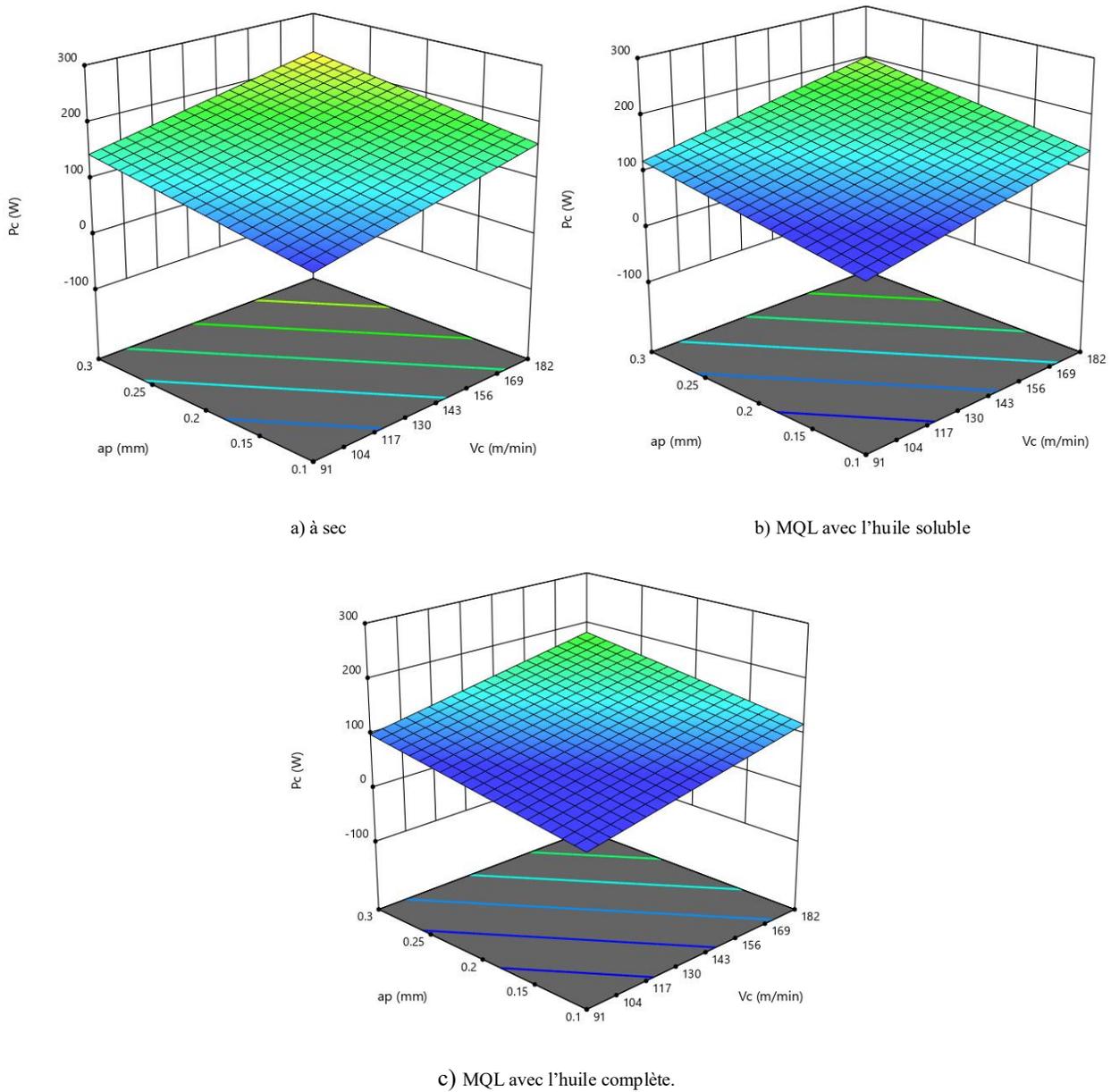


Figure III.8. Diagrammes de surface 3D de  $P_c$  en fonction de ( $V_c$ ,  $a_p$  et  $f=0.1$ )

### III.6. Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation du Débit de copeaux enlevés (MRR)

#### III.6.1. Analyse de variance pour (MRR)

Le tableau III.9 illustre les résultats de l'ANOVA pour le Débit de copeaux enlevés lors de l'usinage, L'analyse des résultats montre que le facteur (ap) est le facteur le plus important qui affecte (MRR). Elle est suivie par la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (f) avec des contributions de 21.8% et 20.70%, respectivement.

**Tableau III.9.** Analyse de la variance pour le débit de copeaux enlevé (MRR).

Source	DL	SomCar ajust	Contribution	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
<b>Modèle</b>	3	33.788	<b>85.82%</b>	11.263	10.08	0.015
<b>Linéaires</b>	3	33.788	85.82%	11.263	10.08	0.015
<b>Vc m/min</b>	1	8.584	<b>21.80%</b>	8.584	7.69	0.039
<b>f (mm/tr)</b>	1	8.148	20.70%	8.148	7.30	0.043
<b>ap (mm)</b>	1	17.056	<b>43.32%</b>	17.056	15.27	0.011
<b>Erreur</b>	5	5.584	14.18%	1.117		
<b>Total</b>	8	39.372	100.00%			

Le tracé des droites des effets principaux (Fig. III.9) confirme les résultats de l'ANOVA, où on remarque que l'augmentation des trois paramètres Vc, f et ap conduit à une augmentation du débit de copeaux, ceci est expliqué par le fait que ces facteurs sont directement proportionnels au MRR équation (II.1).

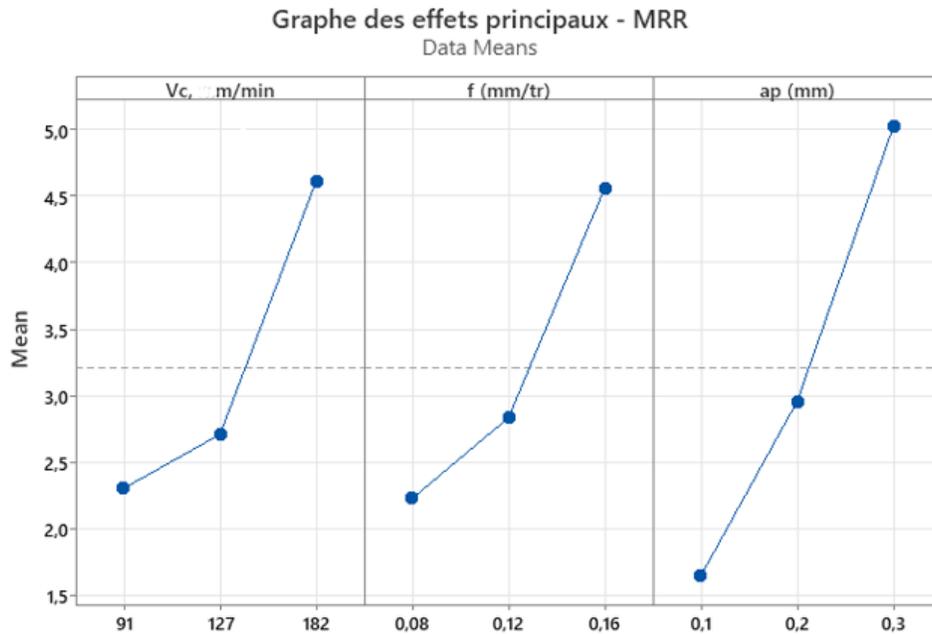
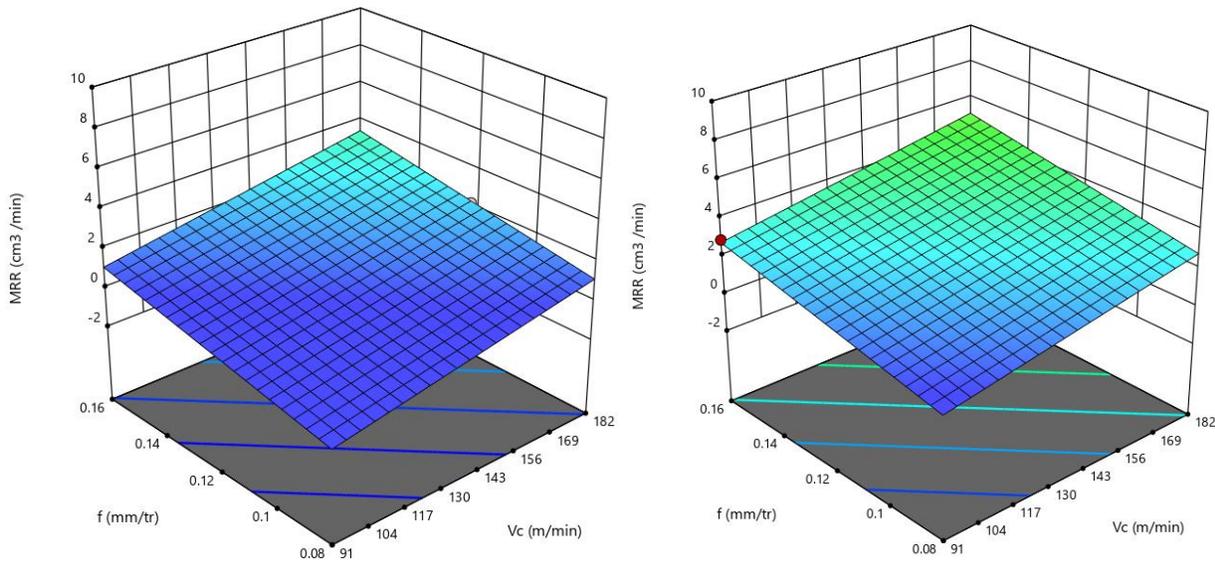


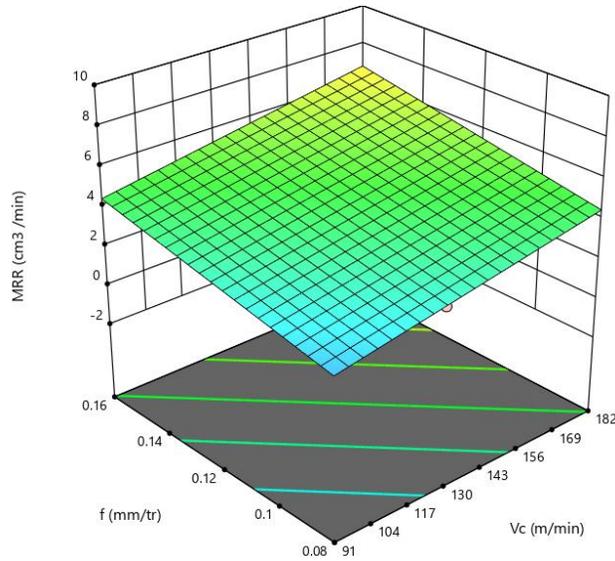
Figure III.9. Graphique des effets principaux pour (MRR).

La figure III.10 montre l'influence des trois paramètres de coupe sur le MRR, la figure indique que la profondeur de passe ( $a_p$ ) est le facteur le plus important sur le MRR.



a)  $a_p = 0.1\text{mm}$

b)  $a_p = 0.2\text{mm}$



c)  $a_p = 0.3\text{mm}$

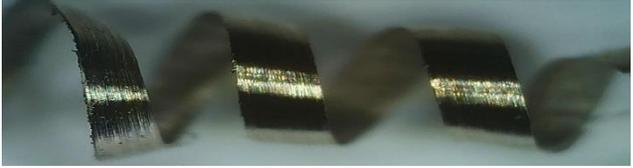
Figure III.10. Diagrammes de surface 3D de MRR

### III.7. Formation des copeaux

Le tableau III.10 présente la forme des copeaux pour les différents régimes de coupe du plan réalisé, il est remarqué que le copeau se présente sous forme hélicoïdale tubulaire et que le pas d'hélice augmente pour des faibles sections du copeau.

Tableau III.10. Copeaux de chaque essai.

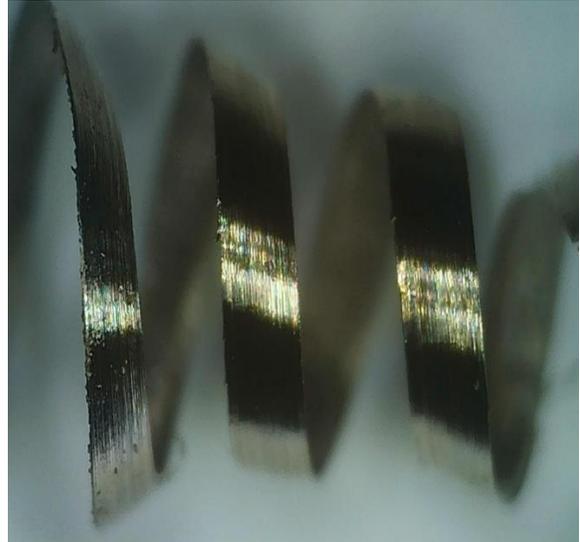
N°	E	Vc	f	$a_p$	Figure de chaque essai
1	E1	91	0,08	0,1	
2	E1	127	0,12	0,2	

3	E1	182	0,16	0,3	
4	E2	91	0,12	0,3	
5	E2	127	0,16	0,1	
6	E2	182	0,08	0,2	
7	E3	91	0,16	0,2	
8	E3	127	0,08	0,3	
9	E3	182	0,12	0,1	

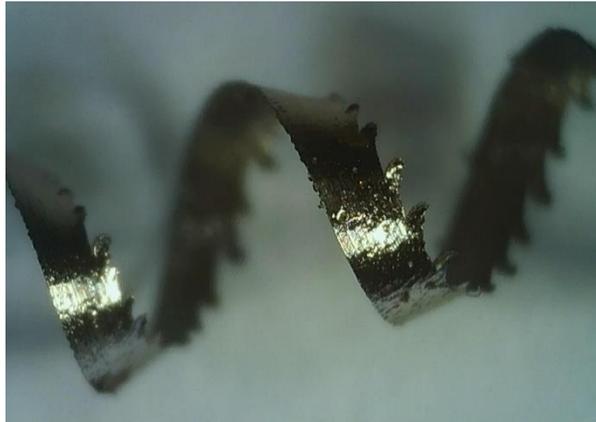
La figure III.11 montre la forme des copeaux produit par l'usinage à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète, on remarque que la forme des copeaux pour les trois modes de lubrification est semblable, on remarque aussi, que le copeau MQL avec l'huile complète garde la couleur grise du matériau d'origine par contre, les autres copeaux sont colorés avec du jaune, ce qui est probablement dû à une élévation de température dans la zone de coupe.



a) á sec ( $V_c=182$  m/min).



b) MQL avec l'huile soluble ( $V_c=91$  m/min).



c) MQL avec l'huile complète ( $V_c=91$  m/min).

**Figure III.11.** Copeaux produits selon les trois modes de lubrification.

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé de l'essais afin d'étudier l'usinage de l'acier 17-4PH. 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 ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $MRR$  et  $P_c$ ) pour une étude d'optimisation.

# **Chapitre IV :**

# **Optimisation des**

# **conditions de coupe**

### IV.1 Introduction

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif des chercheurs en général est de trouver les conditions optimales d'usinage, qui permettent d'atteindre deux types d'objectifs, soit économiques soit technologiques soit les deux à la fois. Dans notre cas d'étude nous proposons de déterminer un régime de coupe optimal permettant d'atteindre **des objectifs technologiques contradictoires**, à savoir, la rugosité de surface, l'effort de coupe radial, la puissance de coupe et le débit de copeaux enlevés. En effet, par exemple pour atteindre un débit de copeaux maximal il est demandé de travailler avec une vitesse de coupe ( $V_c$ ), une avance par tour ( $f$ ) et une profondeur de passe ( $a_p$ ) au niveau maximal, alors que si l'objectif est de minimiser la puissance de coupe il sera recommandé de travailler avec une vitesse de coupe ( $V_c$ ), une avance par tour ( $f$ ) et une profondeur de passe ( $a_p$ ) au niveau minimal.

## IV.2. Optimisation des conditions de coupe

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait les objectifs suivants :

- Bon état de surface ( $R_q$ ,  $R_z$  mini), afin d'améliorer la qualité d'usinage.
- Faible puissance de coupe ( $P_c$  mini), pour une économie d'énergie.
- Débit de copeau maximal (MRR max), pour une meilleure productivité.
- Effort de coupe radial minimal ( $F_y$  mini), afin de réduire la déformation de la pièce lors de l'usinage.

### IV.2.1. Optimisation des résultats par la fonction de désirabilité (DF)

L'optimisation des réponses multiples est une méthode permettant de faire le compromis entre diverses réponses, grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal. Les étapes impliquées dans le processus d'optimisation par la fonction de désirabilité sont détaillées comme suit [15, 16] :

**Étape 1** : La première étape consiste à calculer l'indice de désirabilité ( $d_i$ ) pour chacun des paramètres du procédé, par la fonction de désirabilité montrée dans les équations (IV.1) et (IV.2), respectivement pour les cas « plus petit est meilleur » pour le cas de  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $F_y$  et  $P_c$ , et « plus grand est meilleur » pour le cas du MRR.

$$\text{Pour plus petit c'est mieux } \mathbf{d_i} = \frac{y_{\max} - y_i}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (\text{IV.1}).$$

$$\text{Pour plus grand c'est mieux } \mathbf{d_i} = \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (\text{IV.2}).$$

Où,

$d_i$  est l'indice de désirabilité pour un niveau particulier.

$y_i$  une valeur donnée.

Ymin est le minimum de valeurs de colonne particulières (caractéristique de réponse).

Ymax est le maximum de valeurs de colonne particulières (caractéristique de réponse).

**Étape 2 :** La deuxième étape consiste à évaluer la désirabilité composite ( $D_{comp}$ ) sur la base de l'équation (IV.3).

$$D_{comp} = \sqrt[w]{d_1^{w_1} d_2^{w_2} \dots d_n^{w_n}} \quad (IV.3).$$

Où  $w_1, w_2, \dots, w_n$  sont les poids attribués. Étant donné l'importance de tous les paramètres technologiques pendant l'opération d'usinage, une pondération égale leurs est attribuée. Les poids attribués sont  $w_i=0,2$  pour les cinq réponses de sortie ( $R_q, R_z, F_y, P_c$  et  $MRR$ ).

Avec  $w = \sum_{j=1}^n w_j = 1$ .

**Étape 3 :** La troisième étape consiste à déterminer la condition d'optimalité en fonction de l'indice de désirabilité composite le plus élevé. Également le classement des paramètres de processus est estimé.

**Étape 4 :** La dernière étape consiste à calculer les valeurs du test de conformité en fonction du niveau optimal de paramètres découvert.

**Tableau IV.1.** Tableau des contraintes.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
<b>Vc</b>	is in range	91	182	1	1	3
<b>F</b>	is in range	0.08	0.16	1	1	3
<b>ap</b>	is in range	0.1	0.3	1	1	3
<b>E</b>	is in range	1	3	1	1	3
<b>Rq</b>	minimize	1.29	2.34	1	1	3

---

<b>Rz</b>	minimize	5.09	9.43	1	1	3
<b>Fy</b>	minimize	55.93	101.5	1	1	3
<b>MRR</b>	maximize	0.728	8.736	1	1	3
<b>Pc</b>	minimize	84.14	268.41	1	1	3

Les valeurs optimales des paramètres de coupe, obtenues à partir des résultats du plan d'expériences (Tab III.1) en appliquant la méthode de désirabilité en utilisant le logiciel Design-Expert 13, sont présentées dans le tableau IV.2 et les figures IV.1, IV.2, nous avons choisi les 10 meilleures solutions parmi les 100 proposées par le logiciel.

Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs minimales des critères de rugosité considérés, d'une faible puissance de coupe, d'un débit de copeau maximal, le régime de coupe à adopter correspond à une vitesse de coupe ( $V_c$ ) de 182 m/min, une avance par tour de 0.103 mm/tr et une valeur de 0.199 mm pour la profondeur de passe. Ce qui conduit à l'obtention des paramètres technologiques suivants :

La rugosité de surface  $R_q=1.290$  et  $R_z=4.840 \mu\text{m}$ .

L'effort de coupe radial  $F_y=72.115 \text{ N}$

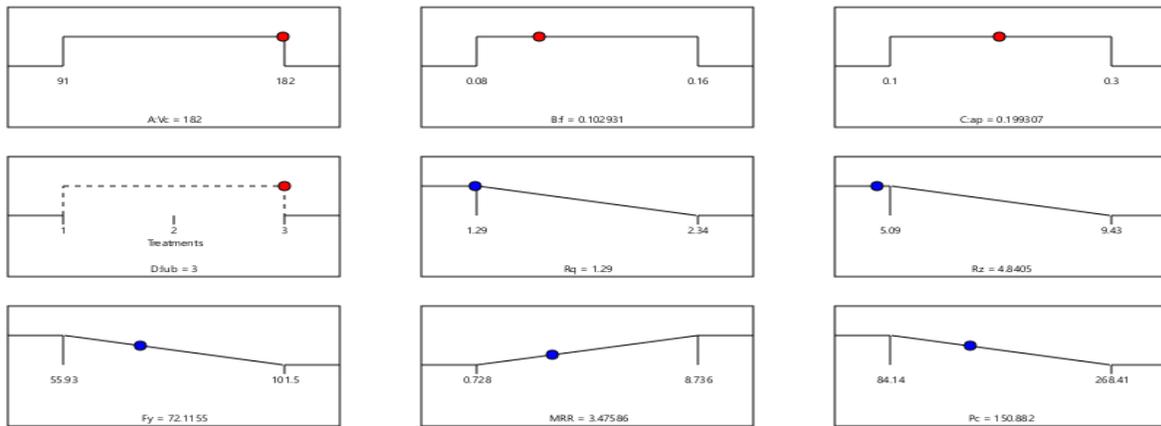
Le débit de copeaux  $MRR=3.476 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

La puissance de coupe  $P_c=150.882 \text{ W}$ .

L'analyse de la solution optimale comparativement aux valeurs des paramètres de performance montre clairement que pour  $R_q$  et  $R_z$  il a choisi la valeur la plus basse, et pour les autres paramètres ont choisi les valeurs moyennes.

Tableau IV.2 Résultats des paramètres technologiques calculés (Rq, Rz, Fy, Pc, et MRR)

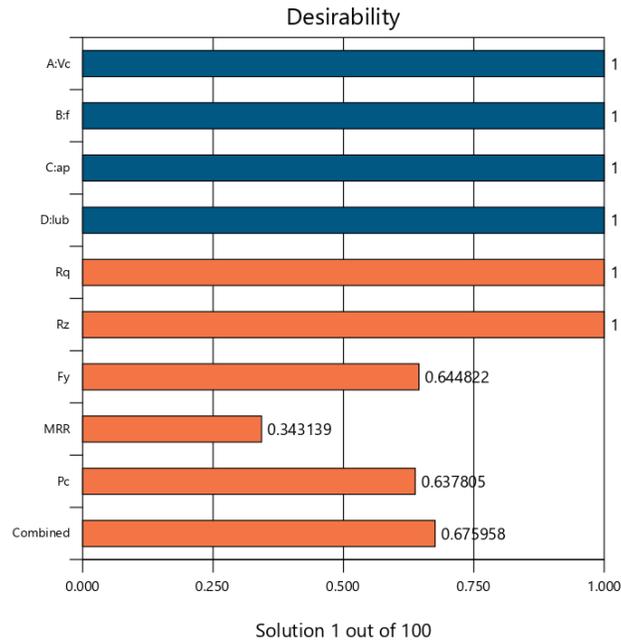
N°	Vc	f	ap	E	Rq	Rz	Fy	MRR	Pc	Désirabilité
1	182.00 0	0.103	0.199	3	1.290	4.840	72.115	3.476	150.882	0.676
2	181.99 9	0.103	0.199	3	1.290	4.842	72.018	3.460	150.592	0.676
3	181.99 9	0.103	0.200	3	1.290	4.839	72.196	3.489	151.121	0.676
4	181.99 6	0.103	0.200	3	1.290	4.839	72.215	3.492	151.173	0.676
5	182.00 0	0.103	0.198	3	1.290	4.844	71.910	3.443	150.273	0.676
6	181.99 1	0.103	0.201	3	1.290	4.837	72.333	3.511	151.519	0.676
7	181.99 7	0.103	0.197	3	1.290	4.845	71.848	3.432	150.086	0.676
8	181.99 9	0.103	0.197	3	1.290	4.846	71.801	3.425	149.946	0.676
9	181.99 5	0.103	0.202	3	1.290	4.834	72.458	3.531	151.894	0.676
10	181.62 6	0.103	0.199	3	1.290	4.843	2.0627	3.459	150.420	0.676



Desirability = 0.676  
Solution 1 out of 100

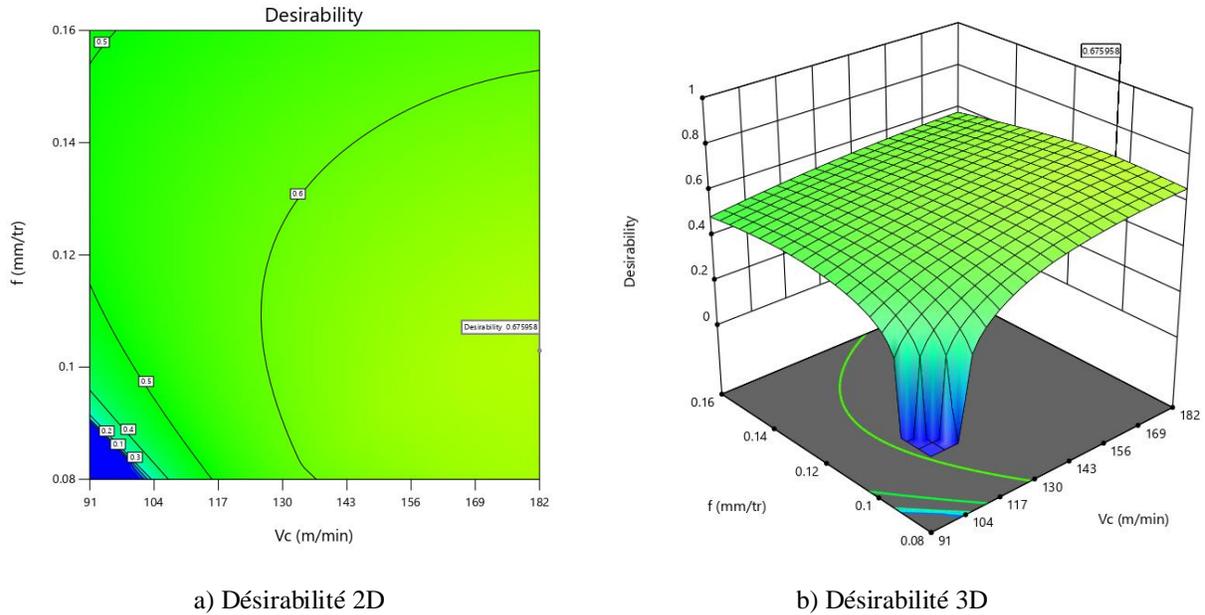
Figure IV.1. Résultat optimale des paramètres étudiés

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (**0.6759**). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation (Rq-Min, Rz-Min, Pc-Min, MRR-Max et Fy-Min).



**Figure IV.2.** Valeurs des désirabilités des paramètres technologiques.

La figure IV.3. Expose la variation de la désirabilité en fonction des paramètres de coupe (2D et 3D) vitesse de coupe ( $V_c$ ) et l'avance ( $f$ ) et pour la profondeur de passe et mode de lubrification sont fixes ( $a_p = 0.2\text{mm}$ ), ( $E = \text{MQL}$  avec huile complète).



$a_p=0.2\text{mm}$  et  $E= \text{MQL}$  avec huile complète.

Figure IV.3. Variation de la désirabilité en fonction des paramètres de coupe.

#### IV.2.2. Optimisation multi-objectifs des paramètres de coupe basée sur l'approche TOPSIS

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) est une méthode dont le but est de pouvoir classer par ordre de choix un certain nombre d'alternatives sur la base d'un ensemble de critères favorables ou dépréciés. Cette méthode s'inscrit dans les techniques utilisées dans le domaine d'aide à la décision multicritères (MCDM = prise de décision à critères multiples). Elle a été développée par Hwang et Yoon en 1981 [17]. Son principe consiste à déterminer pour chaque alternative un coefficient compris entre 0 et 1 sur la base des distances (euclidiennes) entre chaque alternative d'une part et les solutions idéales favorables et défavorables. Les étapes à suivre pas à pas sont détaillées ci-dessous. Une alternative est dite idéale favorable si elle est la plus loin de la pire alternative et la plus proche de la meilleure alternative. Une alternative est dite idéale défavorisée si elle est la plus proche de la pire alternative et le plus loin de la meilleure alternative, tout en se basant sur le calcul des « coefficients ou Facteurs de proximité »[18].

Dans notre étude l'objectif principal est d'identifier les paramètres de coupe optimaux, pour minimiser  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $F_y$ ,  $P_c$ , et maximiser le MRR de la même manière que l'approche DF. Pour atteindre cet objectif, l'approche TOPSIS a été choisie est considérée comme une décision

multicritère appropriée pour sélectionner les paramètres optimaux dans le processus d'usinage de l'acier inoxydable 17-4PH. Les étapes incluses dans l'approche TOPSIS sont décrites comme suit :

**Étape 1 :**

Construction d'une matrice de décision en utilisant toutes les données expérimentales. Dans ce cas, les essais de coupe sont l'alternative et les réponses de sortie sont les critères (Tableau IV.3)

$$Z_{mn} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (IV.4)$$

Où :  $x_{ij}$  est la mesure de la performance de  $j^{\text{ème}}$  paramètre à la  $i^{\text{ème}}$  alternative (essai).

**Tableau IV.3** Mesure des performances.

N <sup>o</sup>	Rq (µm)	Fy	MRR	Rz (µm)	Pc
1	1.84	63.24	0.728	8.12	84.14
2	1.8	87.68	3.048	7.88	127.76
3	1.89	101.5	8.736	7.29	268.41
4	1.67	76.21	3.276	6.64	116.35
5	2.34	63.21	2.032	9.43	131.25
6	1.43	73.08	2.912	5.8	158.34
7	1.91	70.96	2.912	7.29	97.06
8	1.29	74.55	3.048	5.09	134.874
9	1.4	61.86	2.184	5.29	115.78

**Étape 2 :**

Obtention d'une matrice de conception normalisée à l'aide de la formule suivante :

$$Q_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2}} \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (IV.5)$$

Où  $Q_{ij}$  est la valeur normalisée de  $x_{ij}$ .

La matrice des valeurs normalisées est présentée dans le Tableau IV.4.

**Tableau IV.4** Matrice des valeurs normalisées.

N°	Réponses				
	Q <sub>Rq</sub>	Q <sub>Fy</sub>	Q <sub>MRR</sub>	Q <sub>Rz</sub>	Q <sub>Pc</sub>
1	0.349105888	0.278524999	0.063359747	0.380728501	0.191873469
2	0.34151663	0.386164957	0.265275425	0.369475442	0.291344835
3	0.358592461	0.447031742	0.760316967	0.341811672	0.61208412
4	0.31685154	0.335648168	0.285118863	0.311334637	0.265325388
5	0.443971619	0.278392871	0.176850284	0.442151449	0.299303456
6	0.271315989	0.321862854	0.253438989	0.27194893	0.36107969
7	0.362387091	0.312525837	0.253438989	0.341811672	0.221336331
8	0.244753585	0.328337107	0.265275425	0.23865863	0.307567652
9	0.265624045	0.272447129	0.190079242	0.248036179	0.264025556

**Étape 3 :**

Une fois qu'une matrice de conception normalisée est établie, les poids des matrices de Décision (B<sub>ij</sub> ; i = 1, 2,....., m, j= 1,2, ....., n) sont calculés par l'équation (IV.6).

$$B_{ij} = w * Q_{ij} \quad (IV.6)$$

Où w présente le poids de la performance de la mesure, dans notre étude est pris égal à 0,2 pour les cinq réponses de sortie (Rq, Rz, Fy, Pc, et MRR) avec  $w = \sum_{j=1}^n$ .

La matrice des valeurs normalisées pondérées est présentée dans le Tableau IV.5.

Tableau IV.5 Valeurs normalisées pondérées.

N°	Valeurs normalisées pondérées				
	B <sub>Rq</sub>	B <sub>Fy</sub>	B <sub>MRR</sub>	B <sub>Rz</sub>	B <sub>Pc</sub>
1	0.069821178	0.055705	0.012671949	0.0761457	0.038374694
2	0.068303326	0.077232991	0.053055085	0.073895088	0.058268967
3	0.071718492	0.089406348	0.152063393	0.068362334	0.122416824
4	0.063370308	0.067129634	0.057023773	0.062266927	0.053065078
5	0.088794324	0.055678574	0.035370057	0.08843029	0.059860691
6	0.054263198	0.064372571	0.050687798	0.054389786	0.072215938
7	0.072477418	0.062505167	0.050687798	0.068362334	0.044267266
8	0.048950717	0.065667421	0.053055085	0.047731726	0.06151353
9	0.053124809	0.054489426	0.038015848	0.049607236	0.052805111

**Étape 4 :** Calculez la solution idéale positive et la solution idéale négative à l'aide des équations suivantes (IV.7) et (IV.8) :

$$B^+ = \{B_1^+, B_2^+, \dots, B_n^+\} = \{(\max B_{ij} \setminus j \in K_1), (\min B_{ij} \setminus j \in K_2, i = 1, 2, \dots, n)\} \dots (IV.7)$$

$$B^- = \{B_1^-, B_2^-, \dots, B_n^-\} = \{(\min B_{ij} \setminus j \in K_1), (\max B_{ij} \setminus j \in K_2, i = 1, 2, \dots, n)\} \dots (IV.8)$$

où B<sup>+</sup> et B<sup>-</sup> sont définis comme la solution idéale positive et la solution idéale négative, respectivement, et K<sub>1</sub> et K<sub>2</sub> sont des indices définis pour les réponses positives et négatives respectivement.

**Tableau IV.6** Solutions idéales positives et solutions idéales négatives.

N <sup>0</sup>	Solutions idéales positives					Solutions idéales négatives				
	B <sub>Rq</sub> <sup>+</sup>	B <sub>Fy</sub> <sup>+</sup>	B <sub>MRR</sub> <sup>+</sup>	B <sub>Rz</sub> <sup>+</sup>	B <sub>Pc</sub> <sup>+</sup>	B <sub>R</sub> <sup>-</sup>	B <sub>Fy</sub> <sup>-</sup>	B <sub>MRR</sub> <sup>-</sup>	B <sub>Rz</sub> <sup>-</sup>	B <sub>Pc</sub> <sup>-</sup>
<b>1</b>	0.0208705	0.001216	-0.1393	0.028414	0	-0.0189	-0.0337	0	-0.012	-0.0840
<b>2</b>	0.0193526	0.022744	-0.0990	0.026163	0.019894	-0.0205	-0.0122	0.040383	-0.014	-0.0641
<b>3</b>	0.0227678	0.034917	0	0.020631	0.084042	-0.0171	0	0.139391	-0.020	0
<b>4</b>	0.0144196	0.01264	-0.0950	0.014535	0.01469	-0.0254	-0.02228	0.044352	-0.026	-0.0693
<b>5</b>	0.0398436	0.001189	-0.1167	0.040699	0.021486	0	-0.03373	0.022698	0	-0.0625
<b>6</b>	0.0053125	0.009883	-0.10138	0.006658	0.033841	-0.0345	-0.02503	0.038016	-0.034	-0.0502
<b>7</b>	0.0235267	0.008016	-0.10138	0.020631	0.005893	-0.0163	-0.0269	0.038016	-0.020	-0.0781
<b>8</b>	0	0.011178	-0.09901	0	0.023139	-0.0398	-0.02374	0.040383	-0.040	-0.0609
<b>9</b>	0.0041741	0	-0.11405	0.001876	0.01443	-0.0357	-0.03492	0.025344	-0.0388	-0.0696

**Étape 5 :**

Calculez la distance de chaque alternative à l'idéal positif et négatif solutions utilisant les équations. (IV.9) et (IV.10)

$$Si^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Bij - B^+)^2}, i=1,2,3,\dots,m \quad (IV.9)$$

$$Si^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Bij - B^-)^2}, i=1,2,3,\dots,m \quad (IV.10)$$

Où Si<sup>+</sup> et Si<sup>-</sup> sont désignées par les solutions idéales positives et négatives, respectivement.

**Étape 6 :**

Calculez le coefficient de proximité relative pour une solution idéale individuelle en utilisant équation.  $Ci = Si^- / (Si^+ + Si^-)$ ,  $0 \leq Ci \leq 1$ . (IV.11)

**Étape 7 :**

Classez l'ensemble de toutes les alternatives de la plus élevée à la plus basse, selon les valeurs décroissantes de Ci une valeur plus élevée de Ci correspond au plus préféré.

Le tableau IV.7 présente les résultats de TOPSIS, les distances, le coefficient de proximité « Ci » et le classement pour chaque alternative. On constate que le test de coupe numéro **5** a le plus haut coefficient de proximité « Ci » de **0.635111**. Par conséquent, ce régime est considéré comme la meilleure alternative, parmi les 9 essais du plan d'expériences.

**Tableau IV.7** Résultats TOPSIS (distances, coefficient de proximité Ci et le classement pour chaque alternative).

N <sup>0</sup>	S <sup>+</sup>	S <sup>-</sup>	Ci	Classement
1	0.093326	0.143786	0.606405	2
2	0.080778	0.106672	0.56907	3
3	0.14186	0.04651	0.246907	9
4	0.092757	0.098038	0.51384	7
<b>5</b>	<b>0.074606</b>	<b>0.129856</b>	<b>0.635111</b>	<b>1</b>
6	0.083326	0.102212	0.550896	4
7	0.094579	0.106397	0.529402	6
8	0.095642	0.099637	0.51023	8
9	0.0974	0.114139	0.539565	5

Afin de trouver le niveau optimal de chacun des éléments du régime de coupe, nous avons procédé au tracé des graphiques des effets principaux pour l'indice de performance Ci. A partir de la figure IV.4, il peut être visualisé que les conditions de coupe (environnement MQL avec huile soluble, vitesse de coupe de 127 m/min, avance de 0,08 mm/tr, profondeur de coupe de 0,1 mm) sont les paramètres optimaux du processus de tournage pour obtenir des minimisations des paramètres Rq, Rz, Pc et Fy et une maximisation du MRR.

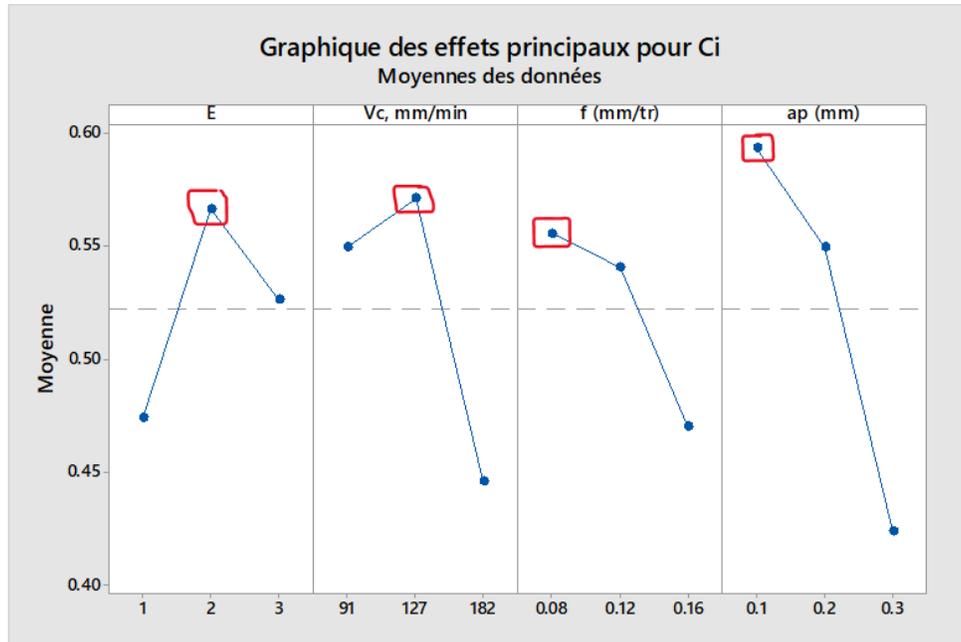


Figure IV.4. Diagramme des effets principaux pour Ci.

### IV.2.3. Comparaison des résultats d'optimisation

L'application des différentes méthodes d'optimisations multi-objectives a permis l'obtention des résultats résumés dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8. Récapitulatif des combinaisons optimales.

	E	Vc	f	ap	Rq	Rz	Fy	MRR	Pc
<b>TOPSIS</b>	E2	127	0.16	0.1	<b>2.34</b>	<b>9.43</b>	<b>75.83</b>	<b>2.032</b>	<b>131.25</b>
<b>TOPSIS Graphe des effets</b>	E2	127	0.08	0.1	<b>1,688</b>	<b>7,184</b>	<b>55,452</b>	<b>1.016</b>	<b>78,32</b>
<b>DF</b>	E3	182	0.103	0.2	1.290	4.840	72.115	3.476	150.88

Il est à remarquer, d'après les résultats présentés dans le Tableau IV.8, que les deux méthodes TOPSIS et TOPSIS Graphe des effets donnent une diminution pour toutes les réponses dans la

méthode de TOPSIS Graphe des effets et d'autre part à une réduction considérable du MRR pour la méthode TOPSIS.

La comparaison entre les méthodes TOPSIS et DF, montre que l'augmentation de la vitesse de coupe et la profondeur de passe a conduit d'une part, à une diminution de ( $F_y$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ) et une augmentation du MRR, par contre, la puissance de coupe  $P_c$  a augmenté à la valeur de 150w. Aussi, la méthode DF a privilégiée le mode de lubrification MQL avec l'huile complète.

### IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux méthodes d'optimisation multi-objectif (DF et TOPSIS) qui présente un compromis clair, si en plus nous recherchons à obtenir une rugosité minimale, et un effort de coupe minimales, d'autre part augmenter la productivité en maximisant le volume de copeau enlevé, il parait qu'il n'est pas évident de choisir ou de déterminer un régime de coupe satisfaisant tous ces objectifs à la fois.

### Conclusion générale

L'étude expérimentale de l'usinage de l'acier 17-4PH fortement allié issu de la fabrication additive, avec l'outil en carbure métallique revêtu (GC 2015) nous a permis d'étudier l'évolution des principaux paramètres technologiques dans le domaine de la fabrication par usinage à savoir ; (Ra, Rq et Rz, Fx, Fy et Fz, Pc et MRR) à travers une étude statistique, de modélisation et d'optimisation des conditions de coupe. Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- L'analyse des paramètres d'usinage permet d'étudier l'influence de chacun des paramètres de coupe sur l'amélioration des paramètres de sortie du processus de coupe, tels que les critères de rugosité et les composantes de l'effort de coupe.
- L'étude statistique montre que pour les critères de la rugosité (Ra, Rq et Rz), l'avance (f) est le facteur qui a le plus grand effet avec des contributions de 55,40%, 49,34%, 25,66%, respectivement. Il est suivi par le mode de lubrification (E) avec des contributions de 19,06%, 20,8%, 35,06%. Finalement, la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap) présentent des faibles contributions suivies par le terme linéaire.
- L'effort axial (Fx), l'effort radial (Fy) et l'effort de coupe tangentiel (Fz) sont influencés par la profondeur de passe, sa contribution est de (81,94%), (53,22%) et (54,78%) respectivement. Elle est suivie par le mode de lubrification avec (3,15%), (27,74%), (15,54%) de contribution. Par contre, la vitesse de coupe et l'avance ont des faibles effets sur l'effort de coupe.
- L'étude statistique montre aussi que le facteur (Vc) est le facteur le plus important qui affecte (Pc) dans les trois environnements (à sec, MQL avec l'huile soluble et MQL avec l'huile complète), sa contribution est de 43.93%. Elle est suivie par la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 25.61%. Le dernier facteur affectant (Pc) est l'avance (f), sa contribution est 10,27%.
- Le débit de copeau (MRR) est influencé par la profondeur de passe (43.32%), vitesse de coupe (21.80%) et avance par tour (20.70%). L'augmentation de ces paramètres permet d'augmenter le débit de copeau.

## Conclusion générale

---

- Les modèles proposés permettent d'obtenir des approximations des différents paramètres de sortie étudiés qui sont en bonne concordance avec les valeurs obtenues expérimentalement. Les différents  $R^2$  sont compris dans l'intervalle [91 et 97].
- L'optimisation des paramètres de coupe par l'application différentes méthodes d'optimisation a permis l'obtention d'une combinaison optimale des paramètres de coupe suivants :
  - **Méthode TOPSIS** : ( $V_c=127\text{m/min}$ ,  $f=0.16\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.1\text{mm}$ ), ce régime de coupe est conseillé pour les opérations d'ébauchage.
  - **TOPSIS Graphe des effets** : ( $V_c=127\text{m/min}$ ,  $f=0,08\text{mm/tr}$ , et  $a_p=0,1$ ), ce régime de coupe est conseillé pour les opérations de demi finition.
  - **Méthode DF** : ( $V_c=182\text{m/min}$ ,  $f=0,1\text{mm/tr}$ , et  $a_p=0,2\text{mm}$ ), ce régime de coupe est conseillé pour la finition dans notre cas d'étude. Il permet d'obtenir un meilleur état de surface et un débit de copeaux maximal.

## Reference bibliographique

- [1] BEDRINC, "Généralités sur la coupe des métaux," Conférences CAST, Lyon, INSA de Lyon, 1971, pp.571.
- [2] König (w), Kammandri (R), Tonshoff (H.K) et Ackershoh (G),"Machining of hard Materials of the CIRP", vol 33/02/1984, p.417-427.
- [3] AMMARI, Yassine et SENOUSSAOUI, Yahia. Etude et analyse de la rugosité de surface de l'acier AISI 1060 pendant le fraisage en utilisant la méthode de surfaces de réponse. Thèse de doctorat.
- [4] RAMDANI FAOUEZ : Modélisation et optimisation des paramètres de performance en usinage dur sous un environnement à sec et MQL, 2022/2023.
- [5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier\\_inoxydable](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier_inoxydable).
- [6] P-J.CUNAT, Aciers inoxydables, Critères de choix et structure, Technique de l'ingénieur, M 4540, (2004).
- [7] eil Hopkinson, Richard Hague et Philip Dickens : Rapid Manufactu\_ring : An Industrial Revolution for a Digital Age : An Industrial Revolutionfor the Digital Age. Wiley-Blackwell, novembre 2005.
- [8] AFNOR. – NF E67-001 : Fabrication additive –vocabulaire. Éd, p. 4 (2011).
- [9] techniques-ingenieu : Floriane LAVERNE, Frédéric SEGONDS,Patrice DUBOIS Réf.BM7017 V2 Fabrication additive -Principes généraux p3
- [10] D.T Pham et R.S Gault: A comparison of rapid prototyping technologies. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 38(10–11):1257–1287, octobre 1998.
- [11] 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

[12] Kamil Leksycki, Eugene Feldshtein , Joanna Lisowicz , Roman Chudy and Roland Mrugalski .Cutting Forces and Chip Shaping When Finish Turning of 17-4 PH Stainless Steel under Dry, Wet, and MQL Machining Conditions (3 September 2020).

[13] 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.

[14] 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

[15] VENKATESWARLU, S. et SURESH, R. K. DFA & GRA based multi objective optimization during hot machining of AISI D3 tool steel using TNMG insert. *Inter. Journal of Mech. And Prod. Eng. Resea. And Develop.*, 2019, Vol. 9 no 5, p. 771-780.

[16] <http://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/13175>

[17] <https://doi.org/10.1155/2016/6145196>

[18] Heinz Tschatsch, *Applied Machining Technology*, 2009.

[19] [Fiche technique 17-4PH | Acheter 1.4548 | S+D METALS \(sd-metals.com\)](#)