

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



**Mémoire de Fin d'Études**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master**

Option : Construction Mécanique

Présenté par : SAADI Oussama

=====  
**Impact de l'environnement de lubrification lors de**  
**l'usinage d'un alliage réfractaire**  
=====

Sous la Direction de :

Pr. BELHADI Salim

Pr. YALLESE Mohamed Athmane

Année universitaire 2024/2025

## 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 et mes sœurs**, que Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite les protèges.

À mes chères **amies Sami, Younes, Abderrahim, Ayoub, Bahaa Eddine, Ihab et Marwan** que Dieu les protèges.

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

## Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre **DIEU**, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire. En premier lieu, je tiens, à exprimer ma gratitude à mes encadrants de Mémoire **Pr. BELHADI Salim** et **Pr. YALLESE Mohamed Athmane** professeurs au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 de Guelma. Ils m'ont guidé dans mon travail. J'ai eu le grand plaisir de travailler sous votre direction.

Ensuite, je tiens à remercier **Pr. CHELAGHMIA Mohamed Lyamine** professeur au laboratoire d'Analyses Industrielles et Génie des Matériaux (LAIGM) de l'Université 8 Mai 1945-Guelma pour leurs aides et ses conseils durant la réalisation du nano-fluide de mon projet de fin d'étude.

Enfin, Mon vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon projet de fin d'études en acceptant d'examiner mon travail et l'enrichir par leurs propositions.

# Résumé

Ce mémoire de recherche présente une étude expérimentale de l'usinage du superalliage Inconel 718, un matériau stratégique mais complexe en raison de son usinabilité difficile et de ses applications dans des environnements extrêmes. L'objectif principal de cette étude est d'optimiser le processus de tournage de l'Inconel 718 en évaluant l'impact de divers paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance et rayon du bec d'outil) et de différentes conditions de lubrification, notamment l'usinage à sec, la lubrification en quantité minimale (MQL) et la nano-lubrification en quantité minimale (nano-MQL).

Une approche expérimentale rigoureuse a été mise en œuvre, basée sur un plan d'expériences Taguchi L18. Les réponses technologiques étudiées incluent la rugosité de surface ( $R_a$ ), l'effort de coupe tangentiel ( $F_z$ ), la puissance de coupe ( $P_c$ ) et le taux d'enlèvement de matière (MRR). Les données collectées ont été analysées à l'aide de méthodes statistiques avancées, telles que l'Analyse de Variance (ANOVA) pour quantifier l'influence des paramètres d'usinage, et la Méthodologie des Surfaces de Réponse (RSM) pour établir des modèles prédictifs. Pour l'optimisation multi-objective, des techniques comme GRA et TOPSIS ont été appliquées afin d'identifier les conditions optimales permettant de faire le compromis entre les paramètres technologiques, qui sont souvent contradictoires.

Les résultats ont démontré la supériorité de la lubrification nano-MQL en termes de réduction des efforts et de la puissance de coupe, contribuant ainsi à une meilleure efficacité énergétique et à une réduction significative de l'impact environnemental. Les modèles prédictifs développés se sont avérés fiables, et les méthodes d'optimisation ont permis d'identifier des compromis efficaces entre des objectifs conflictuels, offrant des conditions de coupe qui améliorent la qualité de surface, minimisent la consommation d'énergie et optimisent la productivité. Ce travail fournit des directives précieuses pour une fabrication plus efficiente et durable des composants critiques en Inconel 718.

**Mots-clés :** Inconel 718, Usinage, MQL, Nano-MQL, Optimisation Multi-objective, Taguchi, RSM, GRA, TOPSIS, Développement Durable.

# Abstract

This research thesis presents an experimental study on the machining of Inconel 718 superalloy, a strategic yet complex material due to its difficult machinability and its applications in extreme environments. The primary objective of this study is to optimize the turning process of Inconel 718 by evaluating the impact of various cutting parameters (cutting speed, depth of cut, feed rate, and tool nose radius) and different lubrication conditions, namely dry machining, Minimum Quantity Lubrication (MQL), and nano-Minimum Quantity Lubrication (nano-MQL).

A rigorous experimental approach was implemented, based on a Taguchi L18 experimental design. The technological responses investigated include surface roughness (Ra), tangential cutting force (Fz), cutting power (Pc), and material removal rate (MRR). The collected data were analyzed using advanced statistical methods, such as Analysis of Variance (ANOVA) to quantify the influence of machining parameters, and Response Surface Methodology (RSM) to establish predictive models. For multi-objective optimization, techniques like Grey Relational Analysis (GRA) and TOPSIS were applied to identify optimal conditions that allow for a compromise between technological parameters, which are often contradictory.

The results demonstrated the superiority of nano-MQL lubrication in terms of reducing cutting forces and power, thereby contributing to better energy efficiency and a significant reduction in environmental impact. The developed predictive models proved reliable, and the optimization methods successfully identified effective compromises between conflicting objectives, providing cutting conditions that improve surface quality, minimize energy consumption, and optimize productivity. This work offers valuable guidelines for the more efficient and sustainable manufacturing of critical Inconel 718 components.

**Keywords:** Inconel 718, Machining, MQL, Nano-MQL, Multi-objective Optimization, Taguchi, RSM, GRA, TOPSIS, Sustainable Development.

# Sommaire

DÉDICACE.....	I
REMERCIEMENT.....	II
RÉSUMÉ.....	III
INDEX DES FIGURES.....	V
INDEX DES TABLEAUX.....	VIII
SOMMAIRE.....	IX
NOMENCLATURE.....	XII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre I : Étude bibliographique	
I.1. Introduction .....	4
I.2. Superalliages.....	4
I.3. Inconel 718 .....	4
I.3.1. Définition : .....	4
I.3.2. Composition et caractéristiques de l'Inconel 718 .....	5
I.3.3. Domaines d'applications .....	5
I.3.4. Usinabilité de l'inconel 718 .....	7
I.4. L'usinage des métaux.....	8
I.4.1. Généralité .....	8
I.4.2. Paramètre technologique d'usinage.....	8
I.4.2.1. Rugosité .....	8
I.4.2.2. Efforts de coupe.....	10
I.4.2.3. Puissance de coupe.....	11
I.4.2.3. Débit du copeau enlevé .....	11
I.5. Lubrification dans l'usinage .....	12
I.5.1. Types de lubrifiants utilisés dans l'usinage .....	12
I.5.2. Impact des fluides de coupe sur l'environnement.....	13
I.5.3. Minimisation des effets négatifs des fluides de coupe sur l'environnement.....	13
I.5.4. Classification des techniques de MQL .....	14
I.5.4.1. MQL conventionnelle .....	15
I.5.4.2. Nano-fluide MQL.....	16
I.5.4.3. MQL assistée par vibration ultrasonore.....	17
I.5.4.4. MQL cryogénique .....	17
I.5.4.5. RHVT MQL .....	18
I.6. Plans d'expérience .....	19

I.6.1. Terminologie (Réponses, facteurs, niveaux) .....	19
I.6.2. Notion d'espace expérimental.....	20
I.7. Etat d'art.....	22

## Chapitre II : Procédure expérimentale

II.1. Introduction .....	31
II.2. Matériels utilisés.....	31
II.2.1 Machine-outil .....	31
II.2.2. Matériau à usiner .....	31
II.2.3. Plaquette et porte-plaquette.....	33
II.2.4. Matériels de mesure .....	34
II.2.5 Système de minimum quantité de lubrification (MQL) .....	36
II.3. Préparation de nano-fluide .....	37
II.4. Planification des expériences .....	38
II.5. Condition de coupe.....	39
II.6. Conclusion .....	40

## Chapitre III : Modelisation des resultats

III.1 Introduction.....	42
III.2 Résultats des essais réalisés .....	42
III.3 Analyse de la variance (ANOVA) et modélisation de la rugosité (Ra) .....	43
III.3.1 Analyse de la variance pour (Ra).....	43
III.3.2 Graphique des effets principaux pour (Ra) .....	44
III.3.3 Modélisation de la rugosité de surface (Ra).....	44
III.3.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites .....	45
III.3.5 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Ra).....	45
III.4 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de l'effort de coupe (Fz).....	48
III.4.1 Analyse de la variance pour (Fz) .....	48
III.4.2 Graphique des effets principaux pour (Fz) .....	49
III.4.3 Modélisation de l'effort de coupe (Fz) .....	49
III.4.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites .....	50
III.4.5 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Fz).....	50
III.5 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la puissance de coupe (Pc) .....	53
III.5.1 Analyse de la variance pour (Pc) .....	53
III.5.2 Graphique des effets principaux pour (Pc) .....	54
III.5.3 Modélisation de la puissance de coupe (Pc).....	54
III.5.4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites .....	55

III.5.5 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Pc) .....	55
III.6 Graphique des effets principaux et surface de réponse pour (MRR) .....	58
III.6.1 Graphique des effets principaux pour (MRR) .....	58
III.6.2 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (MRR) .....	58
III.7 Conclusion .....	60
Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe	
IV.1 Introduction .....	63
• La conversion en signal /bruit .....	63
IV.2 Optimisation des résultats par Analyse Relationnelle Grise (GRA).....	64
• Droites des effets principaux pour GRA.....	67
IV.3 Optimisation par la méthode TOPSIS.....	67
• Droite des effets pour TOPSIS .....	71
IV.4 Comparaison entre l'optimisation avec TOPSIS et GRA .....	72
IV.5 Conclusion .....	73
Conclusion générale.....	75
Perspectives.....	77
Références bibliographiques.....	78

## Nomenclatures

Vc	Vitesse de coupe [m/min].
f	Avance par tour [mm/tr].
ap	Profondeur de passe (mm).
L	Mode de lubrification.
r	Rayon du bec d'outil.
Fx (Fa)	Effort de coupe axial [N].
Fy (Fr)	Effort de coupe radial [N].
Fz (Ft)	Effort de coupe tangentiel [N].
F <sub>rés</sub>	Effort de coupe résultant [N].
Pc	Puissance de coupe [W].
Kc	Effort spécifique (Pression de coupe) [MPa] ou [N/mm <sup>2</sup> ].
Ra	Rugosité moyenne arithmétique [ $\mu\text{m}$ ].
Rt	Rugosité totale [ $\mu\text{m}$ ].
Rq	Rugosité moyenne quadratique du profil [ $\mu\text{m}$ ].
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité [ $\mu\text{m}$ ].
ANOVA	Analyse de la variance.
Cont.%	Pourcentage de contribution.
R <sup>2</sup>	Coefficient de détermination.
S/N	Rapport signal sur bruit [dB].
MSR	Méthodologie de surface de réponse.
GRA	Analyse Relationnelle Grise.
GRC	Coefficient relationnel gris.
GRG	Grade relationnelle grise.
TOPSIS	Technique pour l'Ordre de Préférence par Similarité avec la Solution Idéale.
MQL	Lubrification en Quantité Minimale.
NMQL	Lubrification en Quantité Minimale avec nano particules.

### Introduction Générale

Dans le paysage industriel contemporain, l'exigence croissante de matériaux capables de supporter des conditions extrêmes a propulsé les superalliages au rang de composants incontournables dans des secteurs de pointe tels que l'aéronautique, l'énergie et la défense. Parmi ces matériaux d'exception, l'Inconel 718 se distingue par sa résistance mécanique élevée, sa tenue remarquable aux hautes températures et sa résistance à la corrosion, des propriétés qui le rendent indispensable pour des applications critiques. Cependant, ces mêmes qualités intrinsèques confèrent à l'Inconel 718 une usinabilité particulièrement difficile, se traduisant par une usure rapide des outils, des efforts de coupe importants et une qualité de surface compromise. Face à ces défis, l'optimisation des procédés d'usinage devient une priorité majeure, non seulement pour améliorer la productivité et réduire les coûts de fabrication, mais aussi pour s'inscrire dans une démarche de développement durable et de minimisation de l'impact environnemental. C'est pourquoi l'exploration de techniques de lubrification avancées et plus respectueuses de l'environnement, telles que la lubrification MQL et la lubrification nano-MQL, constitue un axe central de nos préoccupations.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire, dont l'objectif principal est d'apporter une contribution significative à la compréhension et à l'optimisation de l'usinage de l'Inconel 718, en explorant notamment l'impact de ces techniques de lubrification innovantes. Notre démarche s'articule autour d'une approche expérimentale rigoureuse et d'une analyse statistique approfondie, visant à établir des corrélations précises entre les paramètres d'usinage et les performances obtenues.

Ce travail est structuré en quatre chapitres principaux. Le Chapitre I pose les bases théoriques en présentant une revue exhaustive des superalliages, avec un focus détaillé sur l'Inconel 718, ses propriétés et les défis de son usinabilité, tout en introduisant les concepts fondamentaux des paramètres d'usinage et des techniques de lubrification. En fin, ce chapitre présente un état de l'art relatif au sujet traité en intégrant des résumés de travaux récents concernant ce domaine.

Le Chapitre II décrit en détail le protocole expérimental, y compris une description détaillée du matériel utilisé, les propriétés du matériau usiné ainsi que sa composition chimique, la préparation des nano-lubrifiants et en fin le plan d'expériences mis en œuvre.

Le Chapitre III est dédié à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux, mettant en lumière l'influence des différents paramètres sur les réponses technologiques clés, à travers une analyse de variance (ANOVA). En plus des modèles de régression des différents paramètres technologiques considérés sont proposés dans le but de permettre de faire des prédictions.

Enfin, le Chapitre IV aborde l'étape cruciale de l'optimisation multi-objective, en comparant deux méthodes MCDM. Il s'agit des méthodes GRA et TOPSIS, pour identifier les conditions optimales d'usinage et proposer des solutions concrètes pour une fabrication plus efficiente et durable. À travers cette investigation, nous espérons fournir des lignes directrices précieuses pour l'ingénierie des procédés dans l'industrie de pointe.