

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



# Mémoire de fin d'étude

Présenté par : Elaggoune Rayane

Master

Option : Construction Mécanique

---

*Modélisation et optimisation des facteurs d'usinage  
afin de minimiser la rugosité, l'effort et maximiser la  
productivité lors de l'usinage à sec et MQL*

---

Sous la direction de : Pr. Yallese.M.A  
Pr. Belhadi .Salim

Année universitaire 2023/2024



# Dédicace

*Je m'incline devant Dieu tout-puissant, qui m'a ouvert la porte du savoir et m'a aidé à la franchir.*

*Avec un cœur débordant d'amour et de fierté, je dédie ce travail : À l'étoile de mon ciel, celle qui a illuminé mon univers, m'a toujours entourée d'amour, soutenue et encouragée tout au long de ma vie, et m'a donné l'espoir de poursuivre ce chemin jusqu'au bout, « MA MÈRE ». Que Dieu la protège. À l'homme le plus généreux du monde, celui qui a toujours été présent, m'a enseigné les valeurs de la vie, m'a soutenu en toutes circonstances, et m'a tout donné sans cesse, « MON PÈRE ». Que Dieu le garde.*

*A ma sœur **Ritedj**, que Dieu la protège.*

*A mes frères **Bilel et Oussama**, que Dieu les protèges.*

*À mon fiancé **Mehdi** qui m'a soutenu et m'a encouragé et, m'a donné les efforts je dédie ce travail et je lui souhaite une longue belle vie.*

*À la femme de mon frère **Basma**, que Dieu la protège.*

*À mon neveu **Anes**, cher à mon cœur, joie de la famille et le plus bel ange du monde*

*A mes chères amies et mes collègues d'étude : **Nouha et Ibtissem** et mes amies **Nidhale et Ranya**.*

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

*À toutes mes amies.*

*À tous ceux qui me connaissent.*

*Et à toute la promotion Construction mécanique 2023/2024.*



# Remerciement

*Au terme de ce travail du mémoire de master, les mots justes sont difficiles à trouver pour exprimer nos remerciements à "Allah", le tout puissant, qui m'a accordé le courage afin de me permettre d'élaborer ce modeste travail.*

*A Mon encadreur monsieur le **Pr YALLESE Med Athmane** et **Dr. BELHADI Salim** Je suis très honoré de vous avoir comme promoteur de ma mémoire.*

*Je vous remercie pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail.*

*J'ai eu le grand plaisir de travailler sous votre direction.*

*Mes remerciements aux membres de jury.*

**QUE DIEU VOUS  
ACCORDE SA GRACE...**

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

*Je n'oublie pas de remercier, toutes les personnes ayant participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail.*

# Résumé

Dans cette étude, une comparaison a été effectuée entre deux méthodes de lubrification : l'usinage à sec et l'usinage avec une quantité minimale de lubrification (MQL). L'usinage a été réalisé par tournage sur l'Inconel 718 avec un outil en carbure métallique GC1105 revêtue en PVD suivant un plan de Taguchi L9. Le travail effectué dans ce mémoire de master est structuré en deux parties. La première partie présente une étude statistique basée sur l'analyse de la variance (ANOVA). L'objectif est de déterminer l'influence des facteurs d'entrée ( $E$ ,  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur les paramètres technologiques de sortie ( $R_a$ ,  $F_z$ ,  $P_c$  et  $MRR$ ). L'exploitation des résultats de l'ANOVA a permis de proposer des modèles mathématiques linéaires qui permettent la prédiction des paramètres de sortie pour les deux modes de lubrification. La seconde partie du travail se consacre à une étude d'optimisation mono et multi-objective. L'approche de Taguchi, basée sur l'analyse du rapport signal/bruit (S/N), a été employée pour proposer des régimes de coupe optimaux pour chaque paramètre de sortie individuellement. L'analyse relationnelle grise (GRA) et l'approche de la fonction de désirabilité (DF), suivant plusieurs objectifs souhaités, ont été appliquées pour identifier des régimes de coupe optimaux concernant l'optimisation simultanée des paramètres ( $R_a$ ,  $F_z$ ,  $P_c$  et  $MRR$ ).

**Mots clés :** Usinage, Inconel 718, MQL, ANOVA, MSR, GRA, DF, Optimisation

# Abstract

In this study, a comparison was made between two lubrication methods: dry machining and machining with minimal quantity lubrication (MQL). The machining was performed by turning Inconel 718 using a GC1105 carbide tool coated with PVD, following a Taguchi L9 design. The work carried out in this master's thesis is structured into two parts. The first part presents a statistical study based on analysis of variance (ANOVA). The objective is to determine the influence of input factors ( $E$ ,  $V_c$ ,  $f$ , and  $a_p$ ) on technological output parameters ( $R_a$ ,  $F_z$ ,  $P_c$ , and  $MRR$ ). The results of the ANOVA were used to propose linear mathematical models that allow the prediction of output parameters for both lubrication modes. The second part of the work focuses on a single and multi-objective optimization study. The Taguchi approach, based on signal-to-noise (S/N) ratio analysis, was used to propose optimal cutting regimes for each output parameter individually. Grey relational analysis (GRA) and the desirability function (DF) approach, following several desired objectives, were applied to identify optimal cutting regimes regarding the simultaneous optimization of the parameters ( $R_a$ ,  $F_z$ ,  $P_c$ , and  $MRR$ ).

Keywords : Machining, Inconel 718, MQL, ANOVA, MRR, GRA, DF, Optimization.

### **Chapitre I : Étude Bibliographique**

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1 Vitesse de coupe ( $V_c$ ) .....   | 6  |
| Figure I.2 Vitesse d'avance $V_f$ , Avance par tour $f$ .....   | 8  |
| Figure I.3 Profondeur de passe .....  | 8  |
| Figure I.4 Caractéristiques du profil .....   | 9  |
| Figure I.5 Profil de surface tournée .....  | 10 |
| Figure I.6 Composantes des efforts de coupe .....   | 11 |
| Figure I.7 Différents copeaux produits en usinage (a) continu, (b) segmenté, .....  | 12 |
| Figure I.8 les marches de l'Inconel.....  | 14 |
| Figure I.9 types d'alliages employés dans la fabrication des turboréacteurs.....  | 14 |
| Figure I.10 Applications industrielles de L'inconel 718 .....   | 16 |
| Figure I.11 Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut .....                | 20 |
| Figure I.12 Définition de l'espace expérimental.....  | 21 |
| Figure I.13 Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental.....   | 21 |
| Figure I.14 Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur .....   | 22 |
| Figure I.15 Définition de la surface de réponse .....   | 23 |
| Figure I.16 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites.....   | 25 |
| Figure I.17 Tracés de surface 3D de la force radiale $F_r$ en fonction de $V_c$ , $f$ , $r_\epsilon$ , et $a_p$ D'usinage à sec, lubrifié et MQL..... | 29 |

### **Chapitre II : Procédure expérimentale**

|  |    |
|--|----|
| Figure II.1 Tour à charioter et à fileter modèle SN40.....       | 31 |
| Figure II.2 Eprouvette utilisée pour les essais .....            | 32 |
| Figure II.3 Plaquette de coupe et porte plaquette utilisés ..... | 33 |
| Figure II.4 Rugosimètre 2D (Surftest SJ-210).....                | 34 |
| Figure II.5 Dynamomètre (KISTLER9257 B).....                     | 34 |
| Figure II.6 PC piloté par le logiciel (DYNOWARE) .....           | 35 |
| Figure II.7 Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE .....     | 35 |

---

*Index des figures*

---

|  |    |
|--|----|
| Figure II.8 Microscope pour la mesure de l'usure $V_b$ (Visuel Gage 250) ..... | 36 |
| Figure II.9 Montage de système MQL.....  | 37 |
| Figure II.10 boîte contrôle MQL .....  | 38 |
| Figure II.11 Réservoir d'huile.....  | 38 |

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

|   |    |
|---|----|
| Figure III.1 Contributions des différents facteurs sur ( $F_z$ ) .....                    | 43 |
| Figure III.2 Graphique des effets principaux pour.....                                    | 44 |
| Figure III.3 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour ( $F_z$ ) .....      | 45 |
| Figure III.4 Courbe de normalité pour ( $F_z$ ) .....                                     | 45 |
| Figure III.5 Surfaces de réponse et les contours de l'effort tangentiel ( $F_z$ ) .....   | 47 |
| Figure III.6 Contributions des différents facteurs sur ( $R_a$ ).....                     | 49 |
| Figure III.7 Graphique des effets principaux pour ( $R_a$ ) .....                         | 49 |
| Figure III.8 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour ( $R_a$ ) .....      | 50 |
| Figure III.9 Courbe de normalité pour ( $R_a$ ).....                                      | 51 |
| Figure III.10 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité ( $R_a$ ) .....          | 53 |
| Figure III.11 Contributions des différents facteurs sur ( $P_c$ ) .....                   | 54 |
| Figure III.12 Graphique des effets principaux pour ( $P_c$ ).....                         | 55 |
| Figure III.13 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour ( $P_c$ ) .....     | 56 |
| Figure III.14 Courbe de normalité pour ( $P_c$ ) .....                                    | 56 |
| Figure III.15 Surfaces de réponse et les contours de la puissance de coupe ( $P_c$ )..... | 58 |

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

|   |    |
|---|----|
| Figure VI.1 Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de l'effort (Fz) ..... | 62 |
| Figure VI.2 Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (Pc).....           | 63 |
| Figure VI.3 Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (Ra) .....          | 65 |
| Figure VI.4 Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (MRR).....          | 66 |
| Figure VI.5 Qualité Relationnelle Grise (GRG).....                                  | 70 |
| Figure VI.6 Diagramme des rampes pour le 1er cas d'optimisation .....               | 73 |
| Figure VI.7 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 1er cas .....     | 75 |
| Figure VI.8 Diagramme des rampes pour le 2eme cas d'optimisation.....               | 77 |
| Figure VI.9 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 2ème cas .....    | 79 |
| Figure VI.10 Diagramme des rampes pour le 3eme cas d'optimisation.....              | 81 |
| Figure VI.11 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 3ème cas .....   | 82 |
| Figure VI.12 Diagramme des rampes pour le 4émet cas d'optimisation.....             | 84 |
| Figure VI.13 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 4émet cas .....  | 86 |



### **Chapitre I : Étude Bibliographique**

|   |    |
|---|----|
| Tableau I.1 Régime optimale par la méthode DEAR, TOPSIS et GRA..... | 26 |
| Tableau I.2 plan d'expérience utilisé .....                         | 27 |
| Tableau I.3 Régime optimale .....                                   | 28 |
| Tableau I.4 plan d'expérience utilisé .....                         | 29 |

### **Chapitre II : Procédure expérimentale**

|   |    |
|---|----|
| Tableau II.1 Composition chimique de l'Inconel 718 (%) .....                    | 32 |
| Tableau II.2 Table orthogonale de Taguchi L9 .....                              | 39 |
| Tableau II.3 Plan d'expérience de Taguchi (L9) pour l'usinage à sec et MQL..... | 40 |

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

|   |    |
|---|----|
| Tableau III.1 Résultats des essais pour le plan de Taguchi L9 .....       | 42 |
| Tableau III.2 Analyse de la variance pour l'effort tangentiel (Fz) .....  | 43 |
| Tableau III.3 Analyse de la variance pour la rugosité (Ra) .....          | 48 |
| Tableau III.4 Analyse de la variance pour la puissance de coupe (Pc)..... | 54 |

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

|  |    |
|--|----|
| Tableau VI.1 Signal/Bruit des paramètres de sortie étudiées (Fz), (Pc), (MRR) et (Ra) .....                    | 61 |
| Tableau VI.2 Moyenne des ratios (S/B) de l'effort (Fz) pour chaque niveau des facteurs .....                   | 62 |
| Tableau VI.3 Conditions optimales de l'effort (Fz).....  | 63 |
| Tableau VI.4 Moyenne des ratios (S/B) de la puissance (Pc) pour chaque niveau des facteurs<br>.....            | 63 |
| Tableau VI.5 Conditions optimales de la puissance (Pc) .....   | 64 |
| Tableau VI.6 Moyenne des ratios (S/B) de la rugosité (Ra) pour chaque niveau des facteurs                      | 64 |
| Tableau VI.7 Conditions optimales de la rugosité (Ra).....   | 65 |
| Tableau VI.8 Moyenne des ratios (S/B) du débit de matière enlevé (MRR) pour chaque niveau<br>des facteurs..... | 66 |

---

*Index des tableaux*

---

|  |    |
|--|----|
| Tableau VI.9 Conditions optimales de (MRR).....  | 66 |
| Tableau VI.10 Résultats expérimentale normalisé (xi (k)).....  | 68 |
| Tableau VI.11 Coefficients du GR ( $\xi_i(k)$ ).....   | 69 |
| Tableau VI.12 Qualité Grise GRG et son ordre.....  | 70 |
| Tableau VI.13 But et gamme de paramètres pour le 1er cas d'optimisation.....                           | 72 |
| Tableau VI.14 Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 1er cas d'optimisation<br>.....   | 73 |
| Tableau VI.15 But et gamme de paramètres pour le 2ème cas d'optimisation .....                         | 76 |
| Tableau VI.16 Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 2ème cas<br>d'optimisation .....  | 77 |
| Tableau VI.17 But et gamme de paramètres pour le 3ème cas d'optimisation .....                         | 80 |
| Tableau VI.18 Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 3ème cas<br>d'optimisation .....  | 81 |
| Tableau VI.19 But et gamme de paramètres pour le 4émet cas d'optimisation .....                        | 83 |
| Tableau VI.20 Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 4èmet cas<br>d'optimisation ..... | 84 |
| Tableau VI.21 Résultats de l'optimisation par la fonction désirabilité .....                           | 87 |
| Tableau VI.22 Comparaison des deux méthodes GRA et DF .....  | 87 |

---

## *Sommaire*

---

|                          |      |
|--------------------------|------|
| Dédicace.....            | I    |
| Remerciement.....        | II   |
| Résumé.....              | III  |
| Index des figures .....  | V    |
| Index_des tableaux ..... | VIII |

### **Chapitre I : Étude bibliographique**

|  |    |
|--|----|
| I.1 Introduction .....   | 4  |
| I.2 Généralités sur la coupe des métaux.....                                     | 4  |
| I.2.1 Définitions .....  | 4  |
| I.2.2 La coupe des métaux.....   | 5  |
| I.2.2.1 Définition de l'usinabilité.....   | 5  |
| I.2.2.2 Critères d'évaluation de l'usinabilité .....                             | 6  |
| I.2.2.3 Les paramètres de coupe .....  | 6  |
| I.2.2.4 Rugosité de surface .....  | 9  |
| I.2.2.5 Efforts de coupe .....   | 10 |
| I.2.2.6 La quantité du copeau enlevée.....                                       | 12 |
| I.2.2.7 Puissance de coupe.....  | 13 |
| I.3 L'INCONEL 718.....   | 13 |
| I.3.1 Les marchés de l'Inconel 718 .....   | 14 |
| I.3.2 Evolution du marché des super alliages.....                                | 14 |
| I.3.3 L'influence des éléments d'alliage dans les superalliages base nickel..... | 15 |
| I.4 Lubrification en usinage .....   | 16 |

---

## *Sommaire*

---

|         |  |    |
|---------|--|----|
| I.4.1   | Importance de la lubrification.....              | 16 |
| I.4.2   | Avantages de la lubrification .....              | 17 |
| I.4.3   | Technique de lubrification .....                 | 17 |
| I.4.3.1 | Usinage à sec .....                              | 17 |
| I.4.3.2 | Le système MQL.....                              | 17 |
| I.4.3.3 | Cryogénie .....                                  | 18 |
| I.4.3.4 | Lubrification abondante .....                    | 18 |
| I.5     | Plans d'expériences .....                        | 19 |
| I.5.1   | Terminologie (Réponses, facteurs, niveaux) ..... | 19 |
| I.5.2   | Notion d'espace expérimental.....                | 20 |
| I.5.3.1 | Méthode de Taguchi.....                          | 23 |
| I.5.3   | Modélisation et optimisation .....               | 23 |
| I.6     | Etat de l'art .....                              | 24 |
| I.7     | Conclusion.....                                  | 29 |

## **Chapitre II : Procédure expérimentale**

|        |   |    |
|--------|---|----|
| II.1   | Introduction .....  | 31 |
| II.2   | Matériels utilisés .....  | 31 |
| II.2.1 | Machine-outil .....   | 31 |
| II.2.2 | Matériau de la pièce à usiner .....                                       | 32 |
| II.2.3 | Plaquette et porte plaquette .....  | 32 |
| II.2.4 | Matériels de mesure.....  | 33 |
| a)     | Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....                            | 33 |
| b)     | Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme kistler)..... | 34 |
| c)     | Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).....               | 36 |
| II.2.5 | Système avec un minimum de quantité de lubrification (MQL).....           | 36 |

---

*Sommaire*

---

|  |    |
|--|----|
| II.3 Planification des expériences ..... | 38 |
| II.4 Condition de coupe.....             | 39 |
| II.5 Conclusion.....                     | 40 |

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

**la puissance de coupe**

|   |    |
|---|----|
| III.1 Introduction.....   | 41 |
| III.2 Résultats expérimentaux.....  | 41 |
| III.3 Analyse de la variance (ANOVA) et modélisation de l'effort tangentiel (Fz) .....  | 42 |
| III.3.1 Analyse de la variance pour (Fz) .....  | 42 |
| III.3.2 Modélisation de l'effort de coupe (Fz).....                                     | 44 |
| III.3.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites .....                  | 44 |
| III.3.4 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Fz) .....         | 45 |
| III.4 Analyse de la variance (ANOVA) et modélisation de la rugosité (Ra).....           | 48 |
| III.4.1 Analyse de variance pour (Ra).....  | 48 |
| III.4.2 Modélisation de la rugosité de surface (Ra).....                                | 50 |
| III.4.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites.....                   | 50 |
| III.4.4 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Ra).....          | 51 |
| 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 Modélisation de la puissance de coupe (Pc) .....                                | 55 |
| III.5.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites.....                   | 55 |
| III.5.4 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Pc) .....         | 56 |
| III.6 Conclusion .....  | 58 |

**Chapitre VI : Optimisation des conditions de coupe**

|   |    |
|---|----|
| IV.1 Introduction.....  | 59 |
| IV.2 Optimisation mono-objective .....  | 59 |
| IV.2.1 Méthode de Taguchi.....  | 59 |
| IV.2 .2 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs .....                        | 61 |
| IV.2 .2.1 Analyse des effets principaux sur l'effort tangentiel (Fz).....               | 61 |
| IV.2 .2.2 Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (Pc) .....            | 63 |
| IV.2 .2.3 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra) .....           | 64 |
| IV.2 .2.4 Analyse des effets principaux sur le débit de matière enlevé (MRR).....       | 65 |
| IV.3 Optimisation multi-objectif par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise .....     | 67 |
| IV.3.1 La normalisation .....   | 67 |
| IV.4 Optimisation par la fonction désirabilité .....                                    | 70 |
| IV.4.1 Introduction .....   | 70 |
| IV.4.2 Cas d'optimisation étudiés .....   | 72 |
| IV.4.3 Récapitulative des résultats de l'optimisation par la fonction désirabilité..... | 86 |
| IV.5 Comparaison des résultats de GRA et DF .....                                       | 86 |
| IV.6 Conclusion .....   | 87 |
| <br>  |    |
| CONCLUSION GÉNÉRALE .....   | 89 |
| PERSPECTIVES .....  | 91 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....   | 92 |

# Nomenclatures

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Vc</b>            | Vitesse de coupe [m/min]                                 |
| <b>f</b>             | Avance par tour [mm/tr]                                  |
| <b>ap</b>            | Profondeur de passe [mm]                                 |
| <b>Fx (Fa)</b>       | Effort de coupe axial [N]                                |
| <b>Fy (Fr)</b>       | Effort de coupe radial [N]                               |
| <b>Fz (Ft)</b>       | Effort de coupe tangentiel [N]                           |
| <b>Frés</b>          | Effort de coupe résultant [N]                            |
| <b>Pc</b>            | Puissance de coupe [W]                                   |
| <b>Ra</b>            | Rugosité moyenne arithmétique [ $\mu\text{m}$ ]          |
| <b>Rt</b>            | Rugosité totale [ $\mu\text{m}$ ]                        |
| <b>Rq</b>            | Rugosité moyenne quadratique du profil [ $\mu\text{m}$ ] |
| <b>Rz</b>            | Profondeur moyenne de la rugosité [ $\mu\text{m}$ ]      |
| <b>ANOVA</b>         | Analyse de la variance                                   |
| <b>Cont.%</b>        | Pourcentage de contribution                              |
| <b>F</b>             | Valeur de Fisher   |
| <b>R<sup>2</sup></b> | Coefficient de détermination                             |
| <b>S/N</b>           | Rapport signal sur bruit [dB]                            |
| <b>MSR</b>           | Méthodologie de surface de réponse                       |
| <b>GRA</b>           | Analyse Relationnelle Grise                              |
| <b>GRC</b>           | Coefficient relationnel gris                             |
| <b>GRG</b>           | Grade relationnelle grise                                |

## **Introduction générale**

L’Inconel est une marque désignant divers alliages métalliques. Ce nom est utilisé comme préfixe pour environ 25 alliages, considérés par l’industrie métallurgique comme faisant partie des superalliages, c’est-à-dire des alliages contenant une grande quantité de nickel et de chrome. Les plus couramment utilisés sont l’Inconel 600, l’Inconel 625 et l’Inconel 718. Contrairement aux aciers inoxydables qui sont tous à base de fer et alliés avec du nickel et du chrome, certains Inconels sont à base de nickel et alliés avec d’autres éléments. Leurs métaux d’alliage secondaires sont principalement le niobium, le manganèse et le molybdène.

Aussi, les Inconels ont une ductilité exceptionnelle, supérieure à celle des aciers inoxydables, leur permettant de descendre à des températures de fonctionnement inférieures à (-200 °C) sans devenir fragiles. Les inconels sont fréquemment utilisés dans l’aéronautique et plus particulièrement pour les pièces des parties chaudes des réacteurs, parmi ses domaines d’utilisation on cite :

- ✓ Aéronautique (composants exposés aux températures élevées, éléments de fixation...);
- ✓ Aérospatial (pièce tournante, exposés aux températures extrêmes...);
- ✓ Marine (arbres, timonerie);
- ✓ Équipements de forage pour le pétrole outillage à chaud ;
- ✓ Réacteur nucléaire.

L’Inconel 718 est un superalliage utilisé à des températures allant de 450 à 700°C, sans que ses propriétés de résistance mécanique ne soient altérées de manière préjudiciable, même après une exposition prolongée à des températures très élevées ou très basses. En raison de ces caractéristiques, ce matériau est choisi pour la fabrication de pièces soumises à des températures extrêmes et à des environnements sévères.

Les pièces en Inconel 718 sont généralement réalisées par un procédé d’usinage : tournage, fraisage ou perçage. Les caractéristiques métallurgiques et mécaniques de l’alliage rendent ces opérations de mise en forme critiques et grâce à ses propriétés, l’alliage est connu comme étant parmi les plus difficiles à usiner.



Cette difficulté de mise en forme impose généralement l'utilisation des quantités importantes de fluides de coupe induisant un coût financier, sanitaire et environnemental non négligeable.

Considérant ces contraintes, l'industrie moderne s'oblige de s'adapter avec les caractéristiques de ce matériau et de se migrer vers l'usinage à sec ; le tournage dur et l'usinage à grande vitesse. Cependant, à cause de sa mauvaise usinabilité, les surfaces usinées sont affectées ou endommagées durant l'opération d'usinage sous l'impact de plusieurs phénomènes physiques liés principalement à une très grande déformation plastique due aux efforts de coupe et la génération d'une importante chaleur dans la zone de coupe affectant ainsi l'intégrité de surface de la pièce usinée.

Afin d'en assurer une qualité satisfaisant des produits finis, une attention particulière doit être portée sur l'optimisation des conditions de coupe permettant d'améliorer la qualité et la productivité en utilisant les méthodes statistiques. L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire de master est structuré en 4 chapitres :

**Le premier chapitre** est dédié à l'étude bibliographique. Il commence par présenter des notions de base sur l'usinabilité, les paramètres de coupe, ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation. Cette section est suivie par une discussion sur l'importance de la lubrification dans l'usinage, incluant ses avantages et ses différentes modalités. Enfin, une présentation des travaux de recherche relatifs au tournage sous MQL ou sous lubrification classique, ainsi que l'utilisation des plans d'expérience et des méthodes de modélisation et d'optimisation, est proposée.

**Le second chapitre** est dédié à la présentation des équipements nécessaires à la réalisation des essais, la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont aussi présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques et statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

**Dans le troisième chapitre**, une étude statistique a été réalisée en se basant sur l'analyse de la variance (ANOVA) des résultats obtenus, afin d'explorer l'influence des différents

paramètres de coupe. Cela a permis de déterminer les modèles mathématiques des divers phénomènes étudiés. Ces modèles ont permis d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (Environnement, vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les paramètres analysés (effort de coupe ( $F_z$ ), puissance de coupe ( $P_c$ ) et rugosité de surface ( $R_a$ ) et le débit de la matière enlevée (MRR) lors de l'usinage de l'Inconel 718 avec un outil en carbure revêtu GC1015. A cet effet, pour le tracé des surfaces de réponse en 3D (MRS) et pour le calcul des constantes des différents modèles, deux logiciels statistiques, « MINITAB 18 » et « Design Expert 12 », ont été utilisés.

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

Enfin, nous avons conclu notre mémoire par une conclusion générale, suivie des perspectives et d'une liste de références bibliographiques.

# **CHAPITRE I**

**Étude**

**Bibliographique**

## **I.1 Introduction**

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

## **I.2 Généralités sur la coupe des métaux**

### **I.2.1 Définitions**

Afin de mieux situer les techniques d'usinage, on peut affirmer que la coupe des métaux intervient dans un ensemble de procédés d'élaboration de pièces, par enlèvement de matière en quantités pouvant représenter une proportion notable du matériau brut. Cet enlèvement de matière 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.

Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leurs formes, adaptées à une opération d'usinage, et leur matière. La partie active, le plus souvent amovible (alors appelée plaquette) est maintenue sur le corps d'outil par un moyen de fixation approprié. Qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de matière à l'aide d'un outil tranchant. Cet ensemble constitue un système qui doit être considéré de plusieurs points de vue cinématique et dynamique [1].

## **I.2.2 La coupe des métaux**

Grâce aux technologies diversifiées de fabrication de pièces l'industrie mécanique s'est développée. Cependant les techniques de moulage n'arrivent pas à satisfaire les besoins mécaniques en pièces et composants spécifiques, alors qu'il est indispensable d'en citer l'usinage des métaux parmi les autres principaux procédés de fabrication mécanique qui a contribué le plus dans la fabrication et la finition des pièces de précision.

La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, etc...) sur le comportement d'un matériau en utilisant des outils différents dans la composition et la géométrie (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN). Au contraire, l'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème et l'autre part l'aspect mécanique du problème [2].

### **I.2.2.1 Définition de l'usinabilité**

L'usinabilité est la capacité d'un matériau coupé par un autre matériau. On peut déterminer l'usinabilité de chaque matériau grâce à plusieurs critères qui dépendent du rendu final voulu et aussi du type de l'opération.

L'usinabilité possède plusieurs définitions :

- ✓ Selon Bernard Gruber : l'usinabilité ou l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage. Il ne s'agit pas d'une propriété simple de la matière, elle n'est pas une grandeur mesurable, l'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité, plus ou moins grande, d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux à une forme et à des cotes fixes [3].
- ✓ Selon A. Czaplicki : L'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée [4].

### I.2.2.2 Critères d'évaluation de l'usinabilité

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre cout. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont [5] :

- ✓ La durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps.
- ✓ Les conditions de coupe.
- ✓ Les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe.
- ✓ Le fractionnement du copeau.
- ✓ L'état de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité.
- ✓ La température de coupe.
- ✓ La rugosité de la surface usinée.
- ✓ La productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités.

### I.2.2.3 Les paramètres de coupe

#### a) Vitesse de coupe ( $V_c$ )

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse  $\omega$  rad/s (soit  $N$  tr/min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via la porte pièce (figure I.1). Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre  $D$ , la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut [6].

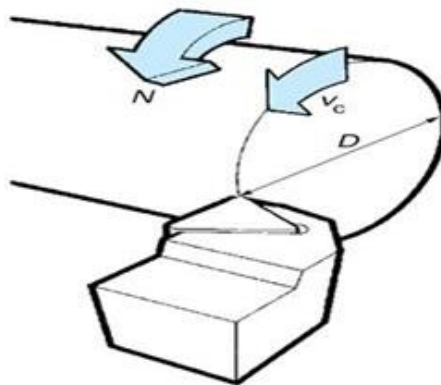


Figure I.1 Vitesse de coupe ( $V_c$ ) [6]

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \text{ (m/min)} \quad \text{(I.1)}$$

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe avec :

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

$D$  : Diamètre de la pièce (mm).

$N$  : Fréquence de rotation (tr / min).

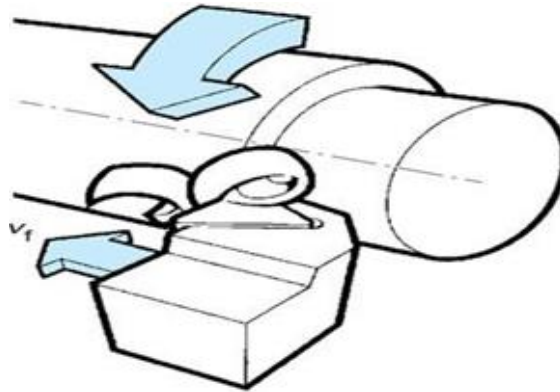
Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés. En dressage, par exemple où l'outil se déplace en direction du centre, la vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante. Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante.

Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines. La fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante. Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment [6] :

- ✓ Des matériaux de la pièce et de l'outil.
- ✓ De la lubrification.
- ✓ De la durée de vie souhaitée pour l'outil.

### **b) Vitesse d'avance ( $V_f$ )**

La vitesse d'avance  $V_f$  (mm/min) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour  $f$  (mm/ tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent (figure I.2).



**Figure I.2** Vitesse d'avance  $V_f$ , Avance par tour  $f$  [6]

$$V_f = f \times N \text{ (mm /min)}$$

(I.2)

- ✓  $V_f$ : vitesse d'avance (mm / min).
- ✓  $f$ : L'avance (mm/tr).
- ✓  $N$ : Fréquence de rotation (tr / min).

**c) Profondeur de passe ( $a_p$ )**

La profondeur de passe est la quantité de la matière que va prendre l'outil de coupe lors d'un usinage sur un tour ou bien sur un centre d'usinage (figure I.3), dépend de la surépaisseur de matière à usiner ainsi que de la nature de l'opération (ébauche ou finition). Elle varie selon la vitesse de coupe ainsi que la vitesse d'avance de l'outil [7].

|  |   |   |
|--|---|---|
| <p><b>Perçage : <math>a = D/2</math></b></p>           | <p><b>Chariotage : <math>a = (d_1 - d_2)/2</math></b></p> | <p><b>Fraisage : <math>a = H - h</math></b></p> |
| <p><b>Alésage : <math>a = (d_2 - d_1)/2</math></b></p> | <p><b>Dressage : <math>a = L - l</math></b></p>           | <p><b>Rabotage : <math>a = H - h</math></b></p> |

**Figure I.3** Profondeur de passe [2]



### I.2.2.4 Rugosité de surface

#### I.2.2.4.1 Généralités sur les états de surface

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération [8].

#### I.2.2.4.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [8]. La figure I.4 présente un profil de surface obtenue au cours d'une opération d'usinage.

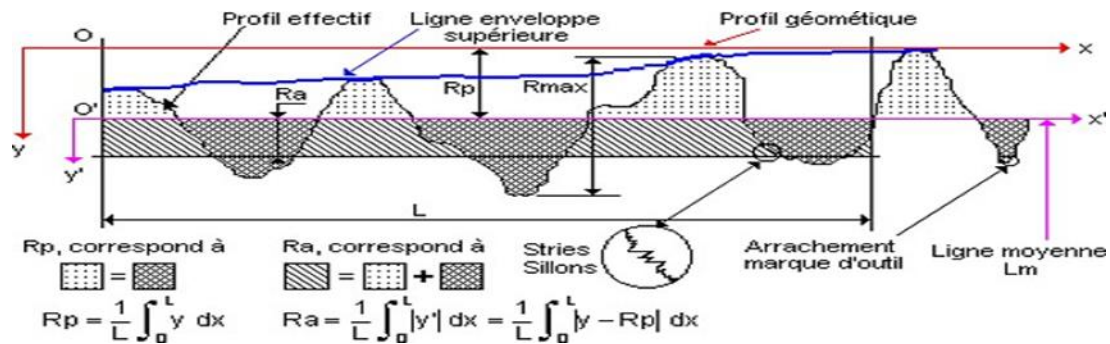


Figure I.4 Caractéristiques du profil [8]

**L** : Longueur de base du profil moyen

**R<sub>p</sub>** : Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de L'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base **L**.

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

#### I.2.2.4.3 État de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le Choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La Rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par la [figure I.5](#). Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maximale du profil de rugosité  $R_{max}$  et donné par :

$$R_{max} = \frac{f^2}{8Xr} \quad (I.3)$$

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

$f$  : l'avance en millimètre ;

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

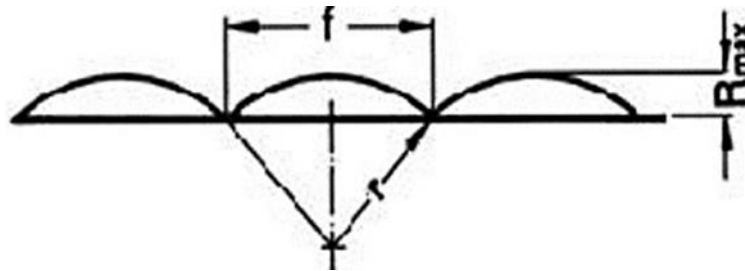


Figure I.5 Profil de surface tournée [8]

#### I.2.2.5 Efforts de coupe

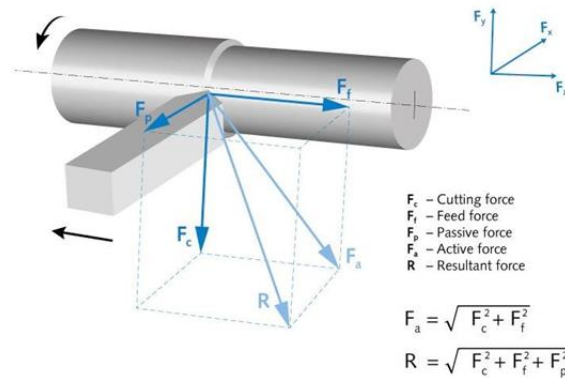
L'effort de coupe est la résistance opposée par le matériau à l'intrusion de l'outil de coupe. Les directions et amplitudes de l'effort diffèrent en fonction des procédés de coupe (tournage, fraisage, perçage, etc.) effectués sur les machines d'usinage (souvent à commande numérique). Ces efforts de coupe hautement dynamiques peuvent être mesurés et analysés en vue de l'optimisation des processus de coupe [9].

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe  $F_{rés}$ , peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes ([figure I.6](#)) [10].

- **F<sub>x</sub> ou F<sub>a</sub>** : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou

effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.

- **Fy ou Fr** : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.
- **Fz ou Ft** : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.



**Figure I.6** Composantes des efforts de coupe [10]

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe, aussi elle est nécessaire pour l'évaluation du rendement mécanique d'une machine-outil. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machine et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau. D'après la [figure I.6](#), la force de coupe résultante  $F_{rés}$ , étant une diagonale du parallélépipède elle sera donnée par l'expression :

$$F_{rés} = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \quad (\text{I.4})$$

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

$$F_a = C1 \cdot a_p^{x1} \cdot f^{y1} \cdot V_c^{n1} \cdot K_a \quad (\text{I.5})$$

$$F_r = C2 \cdot a_p^{x2} \cdot f^{y2} \cdot V_c^{n2} \cdot K_r \quad (\text{I.6})$$

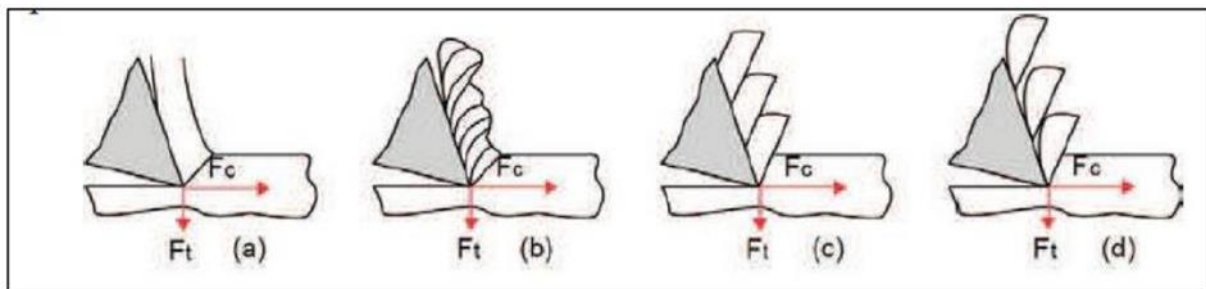
$$F_t = C3 \cdot a_p^{x3} \cdot f^{y3} \cdot V_c^{n3} \cdot K_t \quad (\text{I.7})$$

Où les coefficients  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  sont des constantes qui dépendent des propriétés mécaniques du métal à usiner et conditions de son usinage. Les coefficients  $K_a$ ,  $K_r$ ,  $K_t$  se sont les coefficients correctifs relatifs aux conditions concrètes d'usinage. Les exposants  $x_1, 2,3, y_1, 2,3, n_1, 2,3$ , caractérisent le degré d'influence des paramètres  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur les forces de coupes  $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ .

### I.2.2.6 La quantité du copeau enlevée

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

On retrouve les copeaux continus dans lesquels les sollicitations sont constantes (Figure I.7 (a) ; les copeaux segmentés qui sont des copeaux continus où apparaissent des bandes de cisaillement et dont l'épaisseur varie avec le temps (b) ; les copeaux festonnés formés dans un état de déformation plastique instable (c) ; et les copeaux discontinus obtenus quand chaque segment se brise (d)). La norme ISO/DIS 3685 prévoit de classifier les copeaux en fonction de leurs morphologies [11].



**Figure I.7** Différents copeaux produits en usinage (a) continu, (b) segmenté, (c) festonné, (d) discontinu

Le débit de matière global ( $Q$ ) est un paramètre à optimiser afin d'améliorer la productivité. Néanmoins, la variation de ce paramètre peut entraîner une augmentation des efforts de coupe, de la température de coupe, etc. Cela peut également entraîner une usure prématurée ou bien même la rupture de l'arête de l'outil de coupe, et par là même, une dégradation qualitative du composant usiné. Il faut donc veiller à appliquer une démarche de caractérisation rigoureuse, à laquelle un compromis entre productivité, durée de vie et qualité

d'usinage sera nécessaire. Le débit de matière global (MRR) s'exprime alors comme étant le volume de matière enlevée par l'outil et par unité de temps ( $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) :

$$Q = V_c \times f \times a_p \quad (\text{I.8})$$

Où  $V_c$  : Vitesse de coupe ;  $f$  : avance et  $a_p$  : profondeur de passe [11].

### **I.2.2.7 Puissance de coupe**

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

$$P = F \times V \quad (\text{I.9})$$

On distingue généralement deux puissances :

- La puissance de coupe ( $P_c$ ) qui dépend principalement de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et de l'effort tangentiel de coupe ( $F_z$ ) [12].

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

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60} \quad (\text{I.10})$$

Ou :

$$P_c = \frac{K_a \times f \times a_p \times V_c}{60} \quad (\text{I.11})$$

## **I.3 L'INCONEL 718**

Inconel, c'est la désignation commerciale donnée par Spécial Métal Corporation à un groupe d'environ 25 alliages. Parmi eux, l'Inconel 718, un superalliage avec des caractéristiques exceptionnelles. Il possède tout d'abord une excellente résistance à la corrosion, d'où son utilisation dans les secteurs maritimes et nucléaires. Ensuite, ses caractéristiques mécaniques à l'ambiante et à chaud sont très bonnes comparées aux caractéristiques mécaniques d'autres alliages. Ainsi, à l'ambiante la résistance mécanique de L'Inconel 718 est plus de deux fois supérieure à celle de l'acier CK45 et à chaud l'Inconel 718 reste rigide jusqu'à  $700^\circ\text{C}$  [13].

### I.3.1 Les marchés de l'Inconel 718

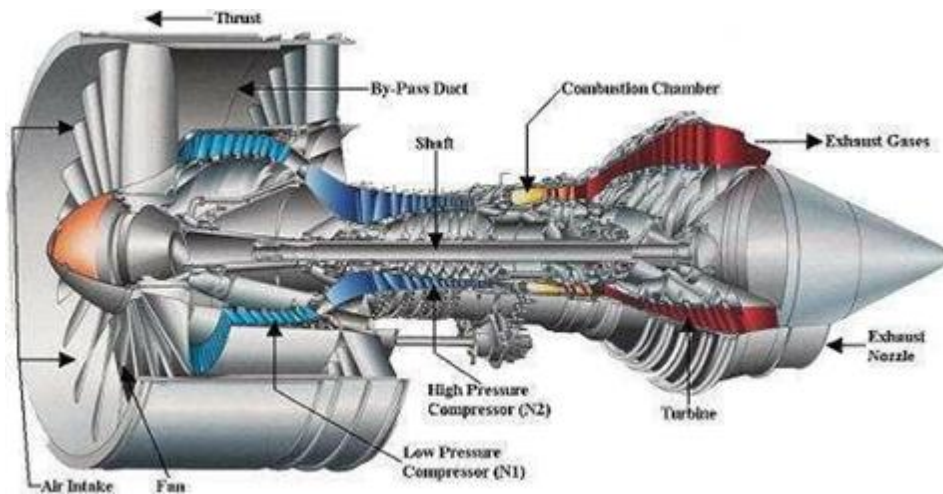
L'Inconel 718, à lui seul, représente 70% du tonnage produit des pièces en super alliages bases nickel. Il est principalement utilisé pour des marchés avec de fortes exigences techniques et de forts coefficients de sécurité comme l'aérospatial ou l'aéronautique [13].



Figure I.8 les marchés de l'Inconel [13]

### I.3.2 Evolution du marché des super alliages

Le marché mondial des super alliages devrait connaître un taux de croissance annuelle moyen de 8.9% sur les 7 prochaines années (selon une étude réalisée par la société Lucintel). Le marché passerait donc de 4.1 millions à 7.6 millions de dollars. Ce marché est donc en bonne santé et tend même à devenir de plus en plus lucratif. Le marché doublerait ainsi en faisant la part belle aux bases nickel. En 2016, les alliages base nickel représentaient ainsi la moitié du marché des superalliages. Il est prévu qu'en 2023, non seulement ils maintiennent leur dominance aéronautique, mais qu'en plus cette dernière augmente. L'écart se creusera alors avec les bases fer et les bases cobalt qui eux stagnent [13].



**Figure I.9** types d'alliages employés dans la fabrication des turboréacteurs [14]

### I.3.3 L'influence des éléments d'alliage dans les superalliages base nickel

La grande variété des nuances de superalliages base nickel vient des différents éléments d'addition possibles. Certains consolident la matrice  $\gamma$  par effet de solution solide : Fe, Co, Ni, V, Cr, Mo, W, Re, Hf, Y. D'autres, comme Al, Ti, Nb, et Ta participent à la formation de phase  $\gamma'$  ou  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{X}$ ). Pour finir les éléments B, C et Cr ségrègent aux joints de grains. Beaucoup d'alliages base nickel contiennent de petites quantités d'aluminium, de titane, de niobium, de molybdène et de tungstène pour améliorer la résistance à la corrosion des alliages.

Plus précisément : le chrome apporte également une résistance à l'oxydation, le molybdène et le tungstène forment des carbures  $\text{M}_6\text{C}$ , le niobium et le tantale précipitent de phase  $\gamma''$  et forment des carbures  $\text{MC}$ , le titane est  $\gamma'$ -gène et forme des carbures  $\text{MC}$ , l'aluminium précipite de phase  $\gamma'$ - $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  et retarde la formation de  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  et enfin le bore et le zirconium améliorent la ductilité et retardent la formation de la phase  $\eta$ . Ces éléments d'alliage, onéreux, conduisent à un coût de matière première relativement élevé, compatibles avec des applications à forte valeur ajoutée (aéronautique, spatial, ...) [13].



Figure I.10 Applications industrielles de L'inconel 718 [15]

## I.4 Lubrification en usinage

### I.4.1 Importance de la lubrification

Il y a plusieurs raisons qui poussent les machinistes à utiliser du lubrifiant lors d'un processus d'usinage. Parmi celles-ci, on compte la réduction de la friction. Lors d'une coupe à haute vitesse, le travail des métaux génère de la chaleur. Cela est dû au fait que l'outil frotte sur la pièce, ce qui dissipe de l'énergie sous forme de chaleur. Si la pièce ou même l'outil de coupe devaient atteindre une température trop élevée, elles pourraient subir une déformation thermique, ce qui peut altérer le travail ou endommager l'équipement. En réponse à ce phénomène, la lubrification permet de limiter la surchauffe de la pièce, en réduisant le



frottement et en abaissant sa température. Enfin, toujours lors de l'usinage, les fluides de coupe permettent de rincer la pièce et d'éliminer plus facilement les copeaux métalliques ou la limaille qui peut être produite. Ces copeaux peuvent ensuite être évacués vers un dispositif conçu pour les récolter. Il est primordial qu'aucun copeau n'adhère à la pièce, car cela pourrait affecter la précision de l'usinage [16].

#### **I.4.2 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 [16].

#### **I.4.3 Technique de lubrification**

##### **I.4.3.1 Usinage à sec**

L'usinage à sec est une famille de techniques de fabrication de pièces par enlèvement de copeaux dans un milieu sèche (sans lubrification). Le principe de l'usinage à sec est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision [17].

##### **I.4.3.2 Le système MQL**

Certaines opérations d'usinage nécessitent la lubrification, La solution consistant à utiliser un lubrifiant n'est pas toujours à privilégier car elle engendre des opérations de dégraissage et de recyclage, génère un surcoût d'utilisation, et pose aussi beaucoup de

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

- Externe : l'huile est transportée dans ce cas par l'intermédiaire d'une buse externe à la zone de coupe disposée au voisinage de l'outil et la pièce.
- Interne ou à travers l'outil : l'huile est acheminée à travers les trous de lubrification internes à l'outil de coupe [18].

#### **I.4.3.3 Cryogénie**

Dans l'usinage cryogénique, des fluides de coupes gazeux, gaz liquéfiés en général, sont envoyés dans la zone de coupe afin de refroidir l'outil et/ou la pièce à usiner. Le fluide cryogénique absorbe la chaleur de la zone de coupe et s'évapore dans l'atmosphère [19].

#### **I.4.3.4 Lubrification abondante**

L'usinage a lubrification est un usinage avec Un liquide de coupe, et plus généralement un fluide d'usinage, est un liquide refroidissant et lubrifiant conçu spécialement pour le travail et l'usinage des métaux, En plus du refroidissement les liquides de coupe aident l'usinage en lubrifiant l'interface entre l'outil et le copeau. En diminuant les frottements à cette interface, ils

diminuent la création de chaleur. Cette lubrification permet également de prévenir l'adhésion du copeau sur l'outil qui risquerait d'affecter l'usinage.

Dans l'industrie grande série, le liquide de coupe permet également d'évacuer les copeaux de la zone de coupe vers un dispositif de centralisation des copeaux. Parmi Les fonctions du fluide de coupe L'utilisation, lors de l'usinage par enlèvement de matière, des liquides d'arrosage composé principalement d'eau, d'huiles minérales et d'additifs chimiques, permet d'assurer les fonctions suivantes :

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

Laboratoires de recherche est toujours améliorer les huiles de coupe est proposé plusieurs gamme de produit lubrifiant qui sont le plus propre pour l'environnement. Les lubrifiants deviennent à 100 % écologiques, comme le démontrait à CleanMeca la société Expert Environnement, qui distribue en France le liquide d'arrosage SKV-02 de DPI sans huile ni solvant [18].

## **I.5 Plans d'expériences**

### **I.5.1 Terminologie (Réponses, facteurs, niveaux)**

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

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \tag{I.12}$$

Avec :

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

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

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

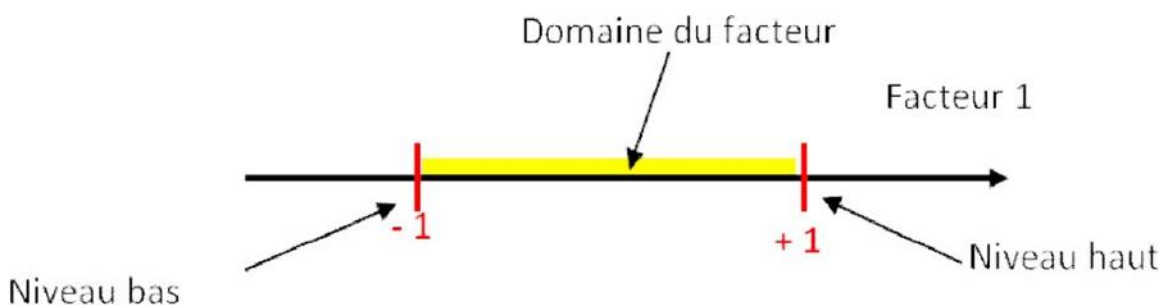
Lorsque l'on étudie un facteur  $X_i$ , par exemple l'usure en dépouille (Vb), on ne le fait pas varier dans de larges proportions. On définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par deux bornes [20].

### I.5.2 Notion d'espace expérimental

Supposons qu'un expérimentateur lance une étude. Il s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » nous emploierons le mot facteur. On dit que la réponse dépend de plusieurs facteurs [20].

Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (figure I.11). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsque l'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes :

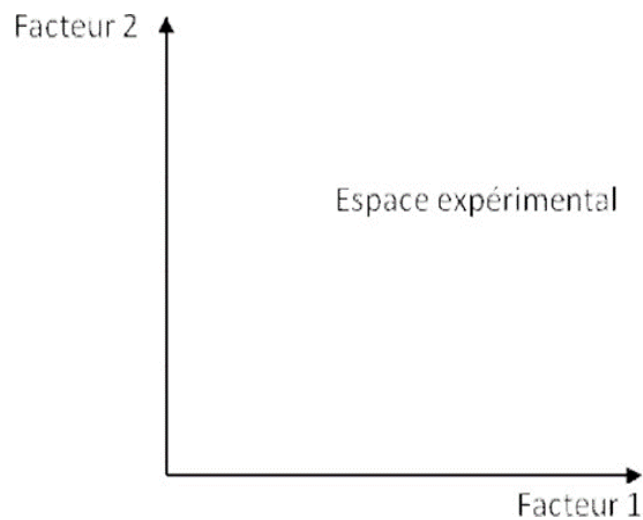
- la borne inférieure est le niveau bas ;
- la borne supérieure est le niveau haut.



**Figure I.11** Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut

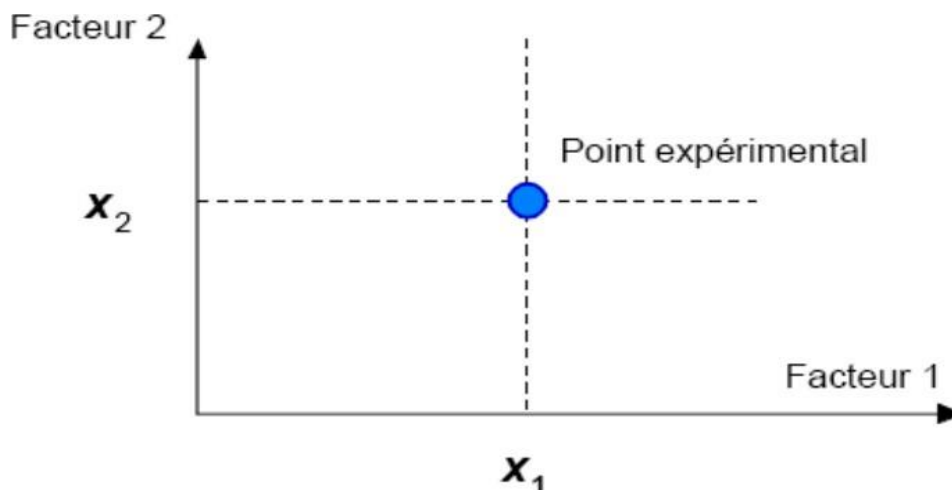
L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur, ou plus simplement, le domaine du

facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par  $-1$  et le niveau haut par  $+1$ . S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (figure I.12)



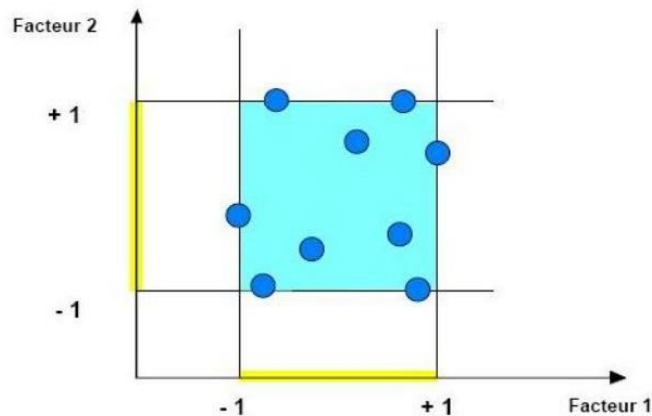
**Figure I.12** Définition de l'espace expérimental

Le niveau  $X_1$  du facteur 1 et le niveau  $X_2$  du facteur 2 peuvent être considéré comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (figure I.13). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.



**Figure I.13** Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental

La réunion des domaines de chaque facteur définit le « domaine d'étude ». Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (figure I.14)



**Figure I.14** Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur

Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude. La définition que nous venons de donner s'applique bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables qui ne sont pas continués [20].

Les niveaux  $X_i$  représentent les coordonnées d'un point expérimental et  $Y$  est la valeur de la réponse en ce point. On attribue à la réponse un axe orthogonal à l'espace expérimental. La représentation géométrique d'un plan d'expériences et des réponses associées nécessite donc un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. La représentation géométrique des résultats d'un plan à deux facteurs nécessite un espace à trois dimensions : une pour la réponse, deux pour les facteurs. À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (figure I.15).

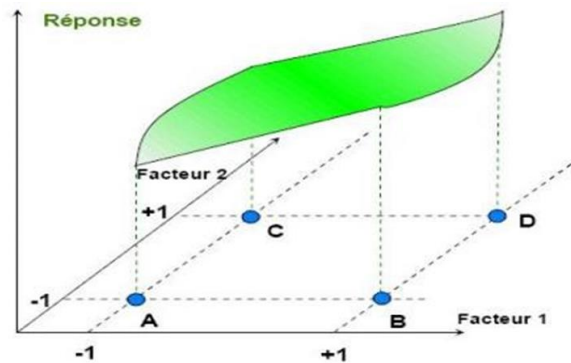


Figure I.15 Définition de la surface de réponse

### I.5.3 Modélisation et optimisation

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant le choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération. L'optimisation de processus d'usinage est habituellement difficile, où les aspects suivants sont exigés :

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

En usinage, les tâches d'optimisation sont critiques, parce qu'il comporte beaucoup de processus complexes. Habituellement, la petite variation d'un paramètre cause les changements notables des autres. D'ailleurs, quelques variables, telles que l'effort de coupe ou l'usure d'outil, dépendent fortement des conditions de coupe [21].

#### I.5.3.1 Méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi, également connue sous le nom de conception robuste de Taguchi, est une méthodologie pour concevoir les produits qui ont la sensibilité minima à la

variation dans des facteurs incontrôlables. Cette méthode est basée sur des techniques conventionnelles, avec quelques directives pour des expériences de présentation et l'analyse de conception des résultats de ces expériences. La méthode de Taguchi utilise une conception spéciale des plans orthogonaux pour étudier l'espace entier de paramètre avec un nombre minimum d'expériences. La méthode de Taguchi (plan orthogonale) est largement utilisée dans l'analyse d'ingénierie et se compose d'un plan d'expérience avec un objectif d'acquérir les données d'une manière commandée, afin d'obtenir des informations sur le comportement d'un processus donné. Le plus grand avantage de cette méthode est de gagner l'effort de réalisation des expériences : gagner le temps de réalisation des expériences et économiser le coût. La méthode de Taguchi est un outil puissant pour la conception d'un système de haute qualité. Taguchi a considéré trois étapes pour le développement des processus et des produits : conception de système, conception de paramètre, et conception de tolérance. Dans la conception de système, l'ingénieur utilise les principes scientifiques et technologiques pour déterminer la configuration fondamentale. Dans l'étape de conception de paramètre, les valeurs spécifiques des paramètres de système sont déterminées. La conception de tolérance est employée pour déterminer les meilleures tolérances pour les paramètres. En plus, le rapport (S/N) et l'analyse de la variance (ANOVA) peut être utilisé pour indiquer l'impact des paramètres de processus sur les paramètres technologiques d'usinage [22].

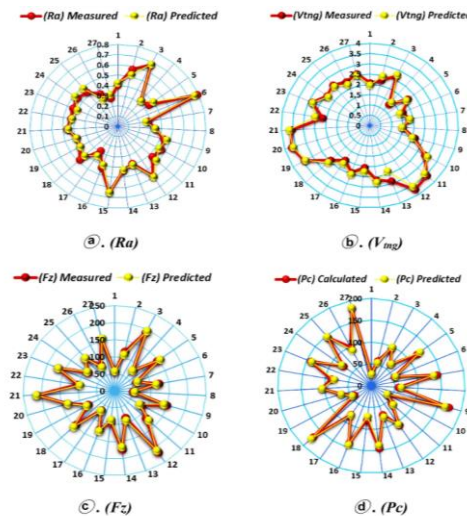
## **I.6 Etat de l'art**

Ilyas Kouahla et al [23] ont réalisé des expériences lors du tournage à sec de l'Inconel 718. Les essais ont été élaborés selon le plan de Taguchi L27 (3\*4), l'usinage est réalisé avec un outil en carbure métallique revêtu (PVD). Les auteurs indiquent que l'objectif de ce travail était de modéliser la vibration de l'outil ( $V_{tng}$ ), la rugosité de surface ( $R_a$ ), l'effort de coupe ( $F_z$ ), la consommation d'énergie ( $P_c$ ) et le taux d'enlèvement de matière (MRR). Les facteurs d'entrée étaient la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance par tour ( $f$ ), la profondeur de coupe ( $a_p$ ) et le rayon du nez de l'outil ( $r$ ). La méthodologie de la surface de réponse (RSM) et l'analyse de variance (ANOVA) ont été utilisées développer des modèles de prédiction. Aussi, Les auteurs ont utilisé les approches de la fonction de désirabilité (DF) et la méthode d'analyse relationnelle grise (GRA) afin d'optimiser les conditions de coupe. Le but final est proposer une combinaison optimale qui minimise les paramètres ( $V_{tng}$ ,  $R_a$ ,  $F_z$  et  $P_c$ ) et de maximise le (MRR). Les résultats trouvés indiquent que :

- L'ANOVA de la rugosité ( $R_a$ ) montre que l'avance par tour ( $f$ ) a la plus grande influence (23,39%), suivi de ( $V_c$ ) et du rayon ( $r$ ) (16,09% et 3,7%) respectivement, enfin, le facteur ( $a_p$ ) avec une contribution de (0,02%).



- L'ANOVA de la vibration de l'outil (Vtng) montre que le rayon (r) a le plus grande influence avec (32,41%) de contribution, (Vc) avec (31,36%), la profondeur (ap) avec (8,77%), et enfin le facteur (f) avec (1,28%).
- L'ANOVA de (Fz) montre que le facteur (ap) a la contribution le plus élevé avec (64,11%), suivi du facteur (f) avec (21,18%), puis vient (Vc) et (r) avec (3,86% et 3,46%) respectivement.
- L'ANOVA de (Pc) indique que les quatre facteurs principaux sont significatifs et que (ap) est le facteur le plus important affectant (Pc) avec (38,29%) de contribution. D'un autre côté, les facteurs (Vc, f et r) avec (36,99 %, 8,59 %, et 2,41%) respectivement. L'interaction (Vc × f) est significative avec (9,22%).
- Les modèles mathématiques des paramètres de sortie (Ra, Vtng, Fz et Pc) proposés dans cette étude étaient tous élevés avec des ( $R^2$ ) comme suit : ( $R_{Ra}^2 = 92,02$  %), ( $R_{Vtng}^2=92,96$  %), ( $R_{Fz}^2=98,32$  %) et ( $R_{Pc}^2 =98,45$  %). Ces modèles peuvent être utilisés pour les meilleures prédictions des réponses ainsi que pour l'optimisation.



**Figure I.16** Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

Boumaza et al [24] ont réalisé des expériences lors du tournage d'un alliage réfractaire (Inconel 718) selon le plan de Taguchi (L18), l'usinage est réalisé avec un outil de coupe en céramique composite (CC670). Les auteurs indiquent que l'objectif de ce travail était de trouver la meilleure combinaison des paramètres coupe représentés par la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f), la profondeur de coupe (ap) et le rayon du nez (r) qui conduit à la minimisation de la rugosité (Ra) et de l'usure (Vb) ainsi qu'à la maximisation du (MRR). Les méthodes d'optimisation

utilisées étaient, la méthode TOPSIS (Technique for Order Performance par similarité avec la solution idéale), classement DEAR- (Data Envelopment Analysis) et finalement la méthode GRA (Gray Analyse Relationnelle). Les résultats obtenus démontrent l'efficacité des trois méthodes, ils ont conduit à des résultats similaires représentés par la valeur optimale des paramètres représentés par  $V_c = 200$  m/min,  $f = 0,16$  mm/tr et  $a_p = 0,25$  mm. Cependant, en termes du rayon de bec de l'outil, l'approche DEAR a donné un rayon de nez de  $r = 1,2$  mm tandis que les méthodes TOPSIS et GRA ont conduit à  $r = 1,6$  (tableau I.1).

**Tableau I.1** Régime optimale par la méthode DEAR, TOPSIS et GRA

| Method | Optimal regime |       |      |     | Response |       |       |
|--------|----------------|-------|------|-----|----------|-------|-------|
|        | $a_p$          | $V_c$ | $f$  | $r$ | $R_a$    | $V_b$ | $MRR$ |
| DEAR   | 0.25           | 200   | 0.16 | 1.2 | 1.018    | 0.158 | 8     |
| TOPSIS | 0.25           | 200   | 0.16 | 1.6 | 0.891    | 0.197 | 8     |
| GRA    | 0.25           | 200   | 0.16 | 1.6 | 0.891    | 0.197 | 8     |

Prianka B et al [25] ont réalisé des expériences lors du tournage à (sec et MQL) de l'acier AISI 4140. Les expériences ont été réalisées suivant un plan factoriel général complet (tableau I.1). L'usinage a été effectué en utilisant un outil à plaquette en carbure (revêtu/non revêtu). Les paramètres de performance étudiés étaient la température de coupe, l'effort de coupe et la rugosité de surface. Les résultats trouvés montrent que la vitesse de coupe s'est avérée être le paramètre qui affecte plus la température de coupe, tandis que le type d'outil a été trouvé pour l'effort de coupe et la rugosité. De plus, la vitesse et les types d'outils ont un effet d'interaction significatif sur toutes les réponses. Aussi, le tournage dans des conditions MQL et une faible avance s'est avéré favorable dans tous les cas. Finalement, les modèles développés peuvent être utilisés efficacement pour estimer les valeurs de réponse concernant les variables de contrôle dans la plage et déterminer les paramètres de processus optimaux pour une meilleure usinabilité et étendre l'application de l'acier AISI 4140.

**Tableau I.2** plan d'expérience utilisé

| Run | Environment | Tool type | Cutting speed, V<br>m/min | Feed rate, f<br>mm/rev | Cutting temperature,<br>°C | Cutting force,<br>N | Surface<br>roughness,<br>µm |
|-----|-------------|-----------|---------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1   | Dry         | Uncoated  | 208                       | 0.1                    | 870                        | 750                 | 1.53                        |
| 2   | MQL         | Uncoated  | 246                       | 0.14                   | 880                        | 659                 | 1.4                         |
| 3   | Dry         | Coated    | 148                       | 0.1                    | 832                        | 436                 | 0.96                        |
| 4   | Dry         | Uncoated  | 148                       | 0.14                   | 835                        | 835                 | 1.83                        |
| 5   | Dry         | Coated    | 246                       | 0.14                   | 885                        | 474                 | 0.75                        |
| 6   | Dry         | Coated    | 104                       | 0.14                   | 826                        | 522                 | 1.5                         |
| 7   | Dry         | Uncoated  | 104                       | 0.1                    | 750                        | 862                 | 1.83                        |
| 8   | Dry         | Coated    | 148                       | 0.14                   | 835                        | 513                 | 1.2                         |
| 9   | MQL         | Uncoated  | 148                       | 0.14                   | 760                        | 750                 | 1.65                        |
| 10  | Dry         | Coated    | 104                       | 0.1                    | 813                        | 472                 | 1.35                        |
| 11  | MQL         | Uncoated  | 208                       | 0.1                    | 804                        | 665                 | 1.35                        |
| 12  | MQL         | Coated    | 246                       | 0.14                   | 872                        | 435                 | 0.7                         |
| 13  | Dry         | Uncoated  | 148                       | 0.1                    | 810                        | 832                 | 1.75                        |
| 14  | Dry         | Uncoated  | 104                       | 0.14                   | 774                        | 875                 | 1.95                        |
| 15  | MQL         | Coated    | 104                       | 0.1                    | 790                        | 410                 | 1.22                        |
| 16  | Dry         | Uncoated  | 246                       | 0.1                    | 918.1                      | 671                 | 1.4                         |
| 17  | MQL         | Uncoated  | 104                       | 0.14                   | 695                        | 785                 | 1.75                        |
| 18  | MQL         | Coated    | 246                       | 0.1                    | 858                        | 365                 | 0.6                         |
| 19  | MQL         | Coated    | 148                       | 0.1                    | 812                        | 383                 | 0.88                        |
| 20  | MQL         | Uncoated  | 148                       | 0.1                    | 737                        | 736                 | 1.55                        |
| 21  | MQL         | Uncoated  | 104                       | 0.1                    | 680                        | 750                 | 1.61                        |
| 22  | MQL         | Coated    | 104                       | 0.14                   | 811                        | 473                 | 1.38                        |
| 23  | Dry         | Coated    | 208                       | 0.14                   | 865                        | 492                 | 0.9                         |
| 24  | MQL         | Coated    | 208                       | 0.1                    | 850                        | 370                 | 0.73                        |
| 25  | MQL         | Uncoated  | 246                       | 0.1                    | 860                        | 598                 | 1.25                        |
| 26  | Dry         | Uncoated  | 246                       | 0.14                   | 939                        | 740                 | 1.55                        |
| 27  | Dry         | Uncoated  | 208                       | 0.14                   | 885                        | 780                 | 1.74                        |
| 28  | Dry         | Coated    | 208                       | 0.1                    | 865                        | 415                 | 0.8                         |
| 29  | MQL         | Coated    | 208                       | 0.14                   | 854                        | 450                 | 0.85                        |
| 30  | MQL         | Uncoated  | 208                       | 0.14                   | 825                        | 700                 | 1.57                        |
| 31  | MQL         | Coated    | 148                       | 0.14                   | 820                        | 466                 | 1.12                        |
| 32  | Dry         | Coated    | 246                       | 0.1                    | 870                        | 404                 | 0.65                        |

Behzad Eskandari et al [26] ont réalisé des expériences lors du tournage de l'Inconel 718 selon le plan composite central (CCD) de la méthodologie de surface de réponse (RSM) en utilisant le logiciel MINITAB. L'usinage est réalisé avec un outil de coupe à plaquette en carbure cémenté non revêtu. Et un porte-outil portant la désignation ISO DNGG150402 et PDJNR2020. Les auteurs indiquent que l'objectif de cette recherche était d'étudier l'efficacité de l'application d'azote liquide (LN2) et sélectionner les paramètres de coupe LN2 appropriés à l'aide de la méthodologie de réponse du surface (RSM). L'optimisation multi objectif a montré qu'une vitesse de coupe de 87 m/min, une avance de 0,06 mm/tr et une profondeur de coupe de 0,37 mm constituaient les paramètres de coupe optimaux pour atteindre la force de coupe de 78 N, usure du flanc de 58 µm, Ra de 0,49 µm et MRR de 1,97 cm<sup>3</sup>/min en condition de découpe cryogénique (tableau I.3).

**Tableau I.3** Régime optimale

| Cutting speed, $V_c$ | Feed rate, $f$ | Depth of cut, $a_p$ | Composite Desirability | Predicted values         |                         |                            |                            |
|----------------------|----------------|---------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                      |                |                     |                        | Cutting force, $F_c$ (N) | Flank wear, $VB_B$ (µm) | Surface roughness, Ra (µm) | MRR (cm <sup>3</sup> /min) |
| 87                   | 0.06           | 0.37                | 0.68                   | 78                       | 58                      | 0.49                       | 1.97                       |

M. Elbah et al [27] ont réalisé des expériences lors du tournage dur de l'acier faiblement allié à haute résistance AISI 4140 avec un outil de coupe en céramique mixte revêtu (CC6050). Les essais ont été élaborés selon le plan d'expérience de Taguchi L18. Le plan comprend 4 facteurs, la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe varient 3 fois, par contre, le rayon du bec de l'outil varie 2 fois. L'analyse de la variance a été réalisée afin d'estimer l'influence des paramètres d'entrée sur les différentes sorties. Cet article présente l'évaluation des performances des différents environnements de lubrification (technique à sec, humide conventionnelle et MQL). Les résultats trouvés indiquent que :

L'ANOVA de la rugosité ( $R_a$ ) est fortement influencée le taux d'alimentation avec des contributions entre 73,74%, 65,98% et 79,59%. Le deuxième facteur le plus important influençant  $R_a$  est la vitesse de coupe avec des contributions comprises entre 0,52%, 15,02% et 8,56%. Il est suivi le rayon du bec de l'outil avec des cotisations de 12,36%, 3,69% et 0,70 %. La profondeur de passe arrive en quatrième position avec les cotisations de 12,36%, 3,69% et 0,70 % pour les produits secs, MQL et humides processus d'usinage, respectivement. De l'optimisation multi-objective la coupe à sec à une vitesse de coupe 80 à 90 m/min, Avance de 0,08 mm/tr, profondeur de passe 0,15 mm et un rayon du bec de l'outil 0,40 mm assure une réponse minimale paramètres ( $R_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ). Ensuite, ont été constaté qu'une vitesse de coupe de 170 m/min, Avance de 0,08 mm/tr, profondeur de passe 0,15 mm et un rayon du bec de l'outil 0,40 mm est responsable des paramètres de réponse minimaux ( $R_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) dans le cadre de la technique MQL de lubrification minimale. Enfin, les meilleures combinaisons de paramètres pour optimiser le problème afin d'acquérir les paramètres de réponse minimaux ( $R_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) en usinage humide conventionnel étaient une vitesse de coupe de 80 m/min, Avance de 0,08 mm/tr, profondeur de passe 0,19 mm et rayon du bec de l'outil 0,40 mm.

Tableau I.4 plan d'expérience utilisé

| Run N° | Machining parameters |              |            |            | Response parameters     |          |           |               |          |           |           |          |           |
|--------|----------------------|--------------|------------|------------|-------------------------|----------|-----------|---------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
|        |                      |              |            |            | Dry machining machining |          |           | Wet machining |          |           | MQL       |          |           |
|        | $V_c$ (m/min)        | $f$ (mm/rev) | $a_p$ (mm) | $r_e$ (mm) | $R_a$ (N)               | $Fr$ (N) | $F_t$ (N) | $R_a$ (N)     | $Fr$ (N) | $F_t$ (N) | $R_a$ (N) | $Fr$ (N) | $F_t$ (N) |
| 1      | 80                   | 0.08         | 0.15       | 0.4        | 0.37                    | 120.85   | 72.08     | 0.50          | 105.56   | 50.13     | 0.52      | 65.03    | 62.38     |
| 2      | 80                   | 0.12         | 0.30       | 0.4        | 0.71                    | 209.94   | 224.75    | 0.60          | 249.90   | 161.84    | 0.66      | 195.44   | 163.90    |
| 3      | 80                   | 0.16         | 0.45       | 0.4        | 1.19                    | 405.07   | 334.56    | 0.83          | 288.06   | 223.75    | 0.81      | 272.54   | 284.38    |
| 4      | 120                  | 0.08         | 0.15       | 0.4        | 0.23                    | 151.41   | 71.50     | 0.32          | 146.73   | 74.84     | 0.41      | 104.29   | 52.48     |
| 5      | 120                  | 0.12         | 0.30       | 0.4        | 0.81                    | 228.97   | 176.24    | 0.41          | 287.02   | 175.71    | 0.55      | 201.20   | 155.80    |
| 6      | 120                  | 0.16         | 0.45       | 0.4        | 1.13                    | 400.53   | 324.37    | 0.68          | 385.03   | 297.07    | 0.69      | 295.01   | 282.03    |
| 7      | 170                  | 0.08         | 0.30       | 0.4        | 0.21                    | 271.95   | 138.69    | 0.29          | 250.88   | 124.05    | 0.30      | 176.25   | 123.06    |
| 8      | 170                  | 0.12         | 0.45       | 0.4        | 0.81                    | 245.61   | 224.44    | 0.32          | 343.05   | 235.30    | 0.40      | 260.40   | 221.08    |
| 9      | 170                  | 0.16         | 0.15       | 0.4        | 1.21                    | 105.45   | 100.49    | 0.85          | 277.01   | 125.83    | 0.57      | 171.56   | 91.66     |
| 10     | 80                   | 0.08         | 0.45       | 0.8        | 0.37                    | 343.75   | 189.95    | 0.49          | 360.46   | 193.45    | 0.33      | 331.85   | 193.66    |
| 11     | 80                   | 0.12         | 0.15       | 0.8        | 0.41                    | 212.36   | 107.82    | 0.59          | 280.39   | 125.70    | 0.51      | 214.93   | 99.80     |
| 12     | 80                   | 0.16         | 0.30       | 0.8        | 0.66                    | 354.92   | 222.80    | 0.87          | 430.39   | 230.26    | 0.66      | 374.13   | 234.96    |
| 13     | 120                  | 0.08         | 0.30       | 0.8        | 0.36                    | 311.43   | 135.16    | 0.34          | 384.71   | 147.54    | 0.28      | 299.57   | 142.23    |
| 14     | 120                  | 0.12         | 0.45       | 0.8        | 0.44                    | 411.41   | 238.61    | 0.49          | 483.71   | 258.73    | 0.46      | 443.01   | 262.10    |
| 15     | 120                  | 0.16         | 0.15       | 0.8        | 0.75                    | 192.41   | 74.89     | 0.63          | 316.08   | 128.92    | 0.69      | 281.15   | 127.71    |
| 16     | 170                  | 0.08         | 0.45       | 0.8        | 0.35                    | 361.74   | 169.14    | 0.31          | 414.48   | 202.09    | 0.23      | 378.98   | 192.40    |
| 17     | 170                  | 0.12         | 0.15       | 0.8        | 0.48                    | 241.02   | 55.01     | 0.51          | 236.72   | 96.08     | 0.46      | 258.38   | 104.71    |
| 18     | 170                  | 0.16         | 0.30       | 0.8        | 1.05                    | 272.06   | 132.86    | 0.75          | 454.58   | 229.54    | 0.73      | 394.20   | 224.55    |

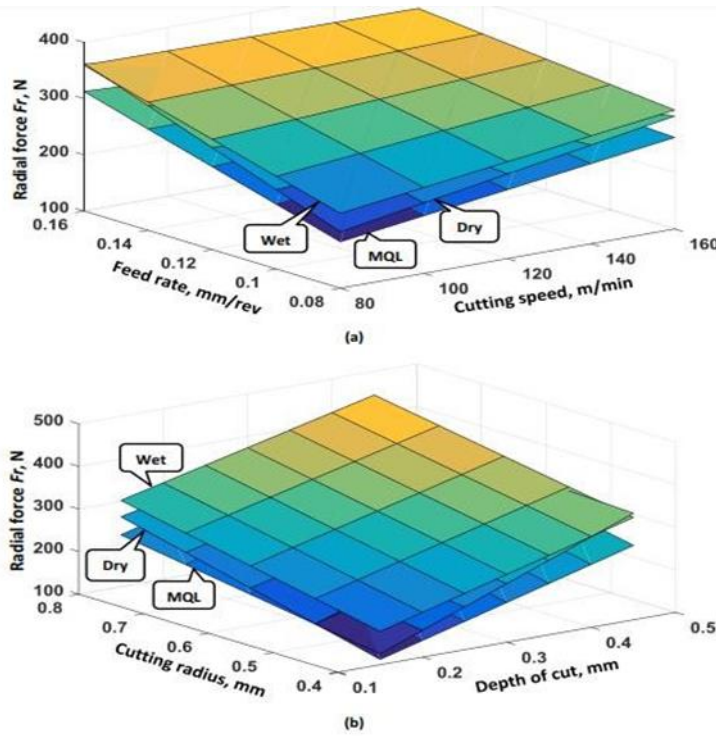


Figure I.17 Tracés de surface 3D de la force radiale  $F_r$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$ ,  $r_e$ , et  $a_p$  D'usinage à sec, lubrifié et MQL

## I.7 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 et les

---

## *Chapitre I : Etude bibliographique*

---

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 lubrification MQL.

# **Chapitre II**

**Procédure  
expérimentale**

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'ensemble du matériel exploité pour effectuer cette étude expérimentale. Le but est d'identifier le comportement du couple outil-matière en évaluant les différents paramètres technologiques d'usinage ( $R_a$ , MRR,  $F_z$  et  $P_c$ ) en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe ( $V_c$ ), profondeur ( $a_p$ ) et l'avance ( $f$ )) et l'environnement de lubrification (à sec et MQL). Nous présentons au même temps la démarche utilisée pour la planification des expériences et de leurs conditions de réalisation des expériences. Les essais de tournage sur Inconel 718, ont été effectués au niveau du Laboratoire de Mécanique et de Structure (LMS) du département de génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945- Guelma.

## II.2 Matériels utilisés

### II.2.1 Machine-outil

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

- Puissance du moteur électrique : 6.6 kW
- Nombres de tours par minute : 45 à 2000 tr/min
- Avance 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 à usiner

Le matériau utilisé dans notre étude est le superalliage réfractaire l’Inconel718. Il est ainsi choisi pour la fabrication des pièces dont les températures de service sont élevées. Il est très utilisé par les industries aéronautiques, dans les turbines à gaz, les moteurs de fusées, les réacteurs nucléaires et les pompes. Le [tableau II.1](#) présente la composition chimique de l’Inconel 718.

**Tableau II.1** Composition chimique de l’Inconel 718 (%)

|                   |       |      |        |       |      |        |       |      |
|-------------------|-------|------|--------|-------|------|--------|-------|------|
| <b>Element</b>    | C     | Co   | Mn     | Fe    | Sn   | Mo     | P     | Ti   |
| <b>Quantité %</b> | 0.08  | 1    | 0.35   | 12.29 | 0.35 | 3.3    | 0.015 | 1.15 |
| <b>Element</b>    | S     | Cu   | Ni+ Co | Al    | Cr   | Cb +Ta |       |      |
| <b>Quantité %</b> | 0.015 | 0.15 | 55     | 0.8   | 21   | 5.5    |       |      |

L’éprouvette utilisée possède un diamètre  $d = 60$  mm et une longueur  $l = 300$  mm avec 11 paliers de 14 mm de longueurs séparés par des gorges de 5 mm ([figure II.2](#)).



**Figure II.2** Eprouvette utilisée pour les essais

### II.2.3 Plaquette et porte plaquette

Pour la réalisation des essais, toutes les opérations de tournage ont été effectuées par une plaquette en carbure métallique GC 1105 revêtue en PVD, de désignation (SNMG120408 SMR). La plaquette est amovible, de forme carrée à fixation mécanique par trou centrale et elle possède huit arêtes de coupe. Le type de porte plaquette qui a été utilisé est de désignation PSBNR 25×25 M12 avec l’angle de direction principal  $\chi_r = 75^\circ$  ([figure II.3](#)).



Figure II.3 Plaquette de coupe et porte plaquette utilisés

## II.2.4 Matériels de mesure

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

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

### a) Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Lors de nos expériences nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface. Les critères de la rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ , et  $R_t$ ) ont été mesurés instantanément après chaque passage de l'outil (essai) au moyen d'un appareil de rugosité Mitutoyo SurfTest SJ-210 muni d'une pointe en diamant de  $5 \mu\text{m}$  et se déplaçant linéairement sur la surface usinée. Pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, les mesures de la rugosité ont été réalisées sur un système de mesure avec une table en granite, à trois reprises à  $120^\circ$ . Le rugosimètre 2D utilisé est présenté dans la [figure II.4](#).



**Figure II.4** Rugosimètre 2D (Surftest SJ-210)

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

Un dynamomètre (KISTLER9257 B) (figure II.5) a été utilisé 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.



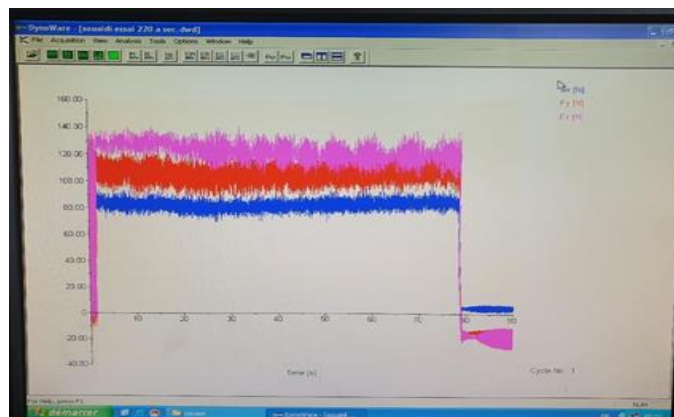
**Figure II.5** Dvnamomètre (KISTLER9257 B)

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil a le mouvement de translation. Ce dernier est monté sur la plate-forme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation. La plate-forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz. Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes (figure II.6).



**Figure II.6** PC piloté par le logiciel (DYNOWARE)

La figure II.7 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  $F_z$ ).



**Figure II.7** Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE

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

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille ( $V_b$ ) est un dispositif binoculaire de marque (Visuel Gage 250), avec un ordinateur équipé d'un logiciel **Visual Gage 2.2.0**. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (figure II.8). Notons aussi, qu'une nouvelle arête de coupe est utilisée pour chaque essai.



**Figure II.8** Microscope pour la mesure de l'usure  $V_b$  (Visuel Gage 250)

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

La figure II.9 présente l'ensemble des équipements utilisés lors de lubrification avec le système MQL. La figure II.10 montre la boîte contrôle de système MQL, elle comprend les éléments suivants : afficheur de débit (aire et huile), la pression du réseau de l'air pulvérisé, la pression du réservoir, réglage air pulvérisation et réglage pression produit. La figure II.11 montre le réservoir d'huile et ses composants (Réservoir de 24 L et débitmètre).

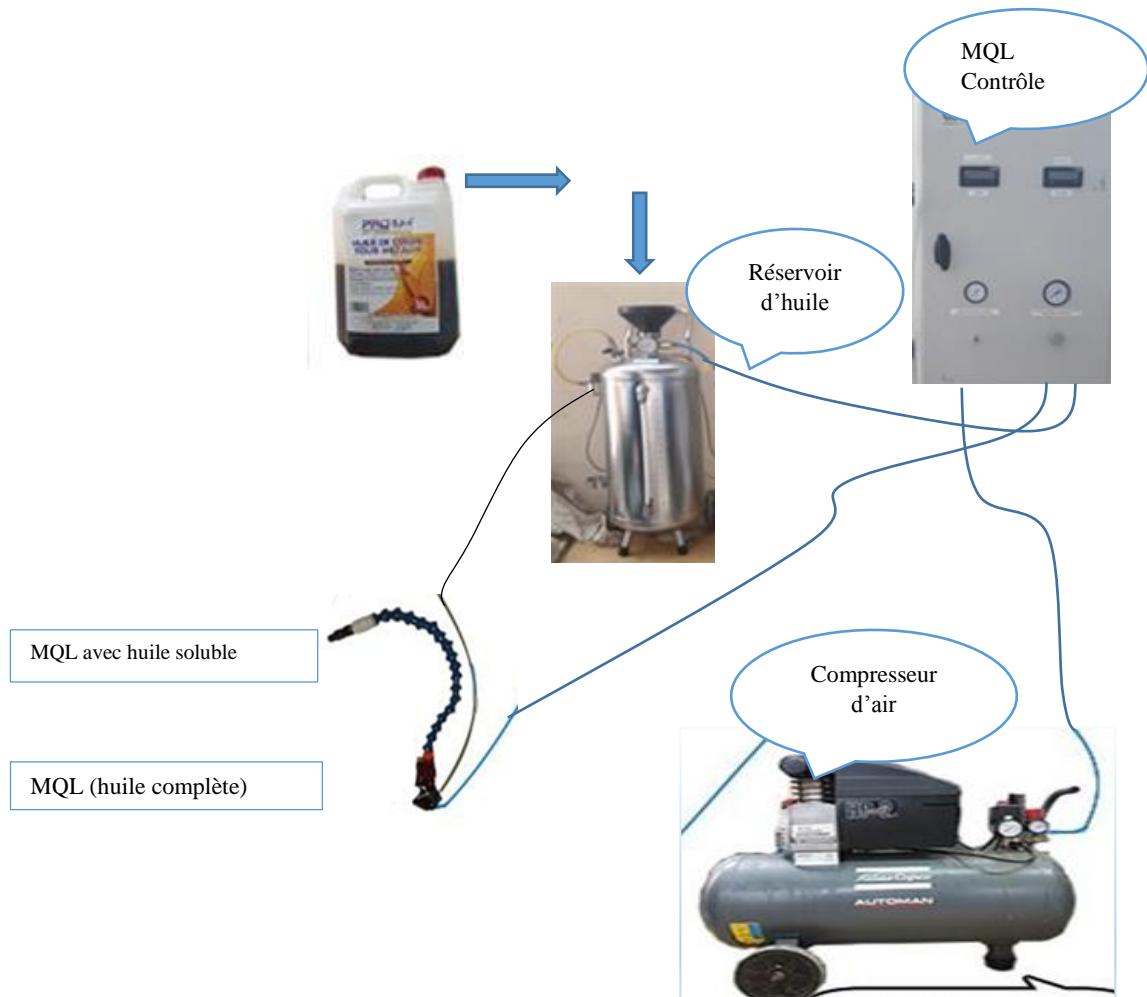


Figure II.9 Montage de système MQL



Figure II.10 boîte contrôle MQL



Figure II.11 Réservoir d'huile

### II.3 Planification des expériences

Entre le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer, à titre d'exemple, les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f$ ), ainsi que les conditions de travail

(rigidité de la machine, ...etc.), la dureté de la pièce et la géométrie de l'outil. Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. Les efforts de coupe, la rugosité, le débit du copeau enlevé et les vibrations représentent les paramètres de sortie. Dans notre étude nous avons considéré l'influence de quatre facteurs d'entrée, l'environnement de lubrification (E), la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap), sur les diverses fonctions d'optimisation (effort de coupe et rugosité de surface, le débit du copeau enlevée et la température de coupe). La méthodologie de surface de réponse (MSR) associée à l'analyse de la variance (ANOVA), ont été utilisées pour l'analyse statistique et la modélisation en utilisant le logiciel statistique d'optimisation Design Expert 12 et Minitab 18. Dans la présente étude, nous avons les facteurs de base (E, Vc, f, et ap) et chaque facteur à trois niveaux de variation, nous avons alors le plan de Taguchi L9 (3<sup>4</sup>). Les essais ont été numérotés de 1 à 9. Le [tableau II.2](#) illustre la matrice de planification de Taguchi (L9), ainsi que les valeurs des facteurs codifiés. Notons dans ce cas d'étude que les essais Taguchi L9 ont été réalisés pour un usinage à sec et avec un minimum de quantité de lubrification (MQL) en utilisant l'huile soluble dans l'eau et finalement le MQL avec une huile synthétique complète.

**Tableau II.2** Table orthogonale de Taguchi L9

| L9 | 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.4 Condition de coupe**

Dans notre travail trois (04) paramètres de coupe d'entée ont été testés. Tous les paramètres de coupe (Environnement de lubrification (E), vitesse de coupe (Vc), avance (f) et profondeur de passe (ap)) sont variés 03 fois, les valeurs réelles choisies sont mentionnées au



tableau II.3. Ces conditions de coupe ont été choisies suivant les recommandations du fabricant d'outil de coupe (SANDVIK) sur la base du couple outil/matière.

**Tableau II.3** Plan d'expérience de Taguchi (L9) pour l'usinage à sec et MQL

| N° d'essais | Paramètres d'usinage |                           |              |            |
|-------------|----------------------|---------------------------|--------------|------------|
|             | E                    | V <sub>c</sub><br>(m/min) | f<br>(mm/tr) | ap<br>(mm) |
| 1           | E1                   | 30                        | 0.08         | 0.1        |
| 2           | E1                   | 60                        | 0.14         | 0.2        |
| 3           | E1                   | 90                        | 0.2          | 0.3        |
| 4           | E2                   | 30                        | 0.14         | 0.3        |
| 5           | E2                   | 60                        | 0.2          | 0.1        |
| 6           | E2                   | 90                        | 0.08         | 0.2        |
| 7           | E3                   | 30                        | 0.2          | 0.2        |
| 8           | E3                   | 60                        | 0.08         | 0.3        |
| 9           | E3                   | 90                        | 0.14         | 0.1        |

## II.5 Conclusion

En conclusion de ce chapitre expérimental, nous avons exposé de manière détaillée la méthode adoptée pour notre étude. De plus, nous avons mis en évidence l'importance des équipements et des instruments de mesure choisis pour garantir l'exactitude de la mesure des performances visées. Cette approche solide est indispensable pour obtenir des résultats fiables et significatifs, ce qui facilite une compréhension approfondie des phénomènes étudiés. Nous sommes prêts à examiner les résultats obtenus dans le prochain chapitre pour en tirer des conclusions éclairées et répondre aux objectifs de notre recherche.

# **Chapitre III**

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

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des essais réalisés suivant le plan de Taguchi L9, lors de l'usinage de L'Inconel 718 à sec et dans un environnement de lubrification (MQL). Une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée afin de quantifier les effets des paramètres d'entrée ; la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ), la profondeur de passe ( $a_p$ ) et l'environnement de lubrification (à sec et MQL à l'huile soluble + MQL à l'huile complète) sur les paramètres technologiques de sortie à savoir ; la rugosité de surface arithmétique ( $R_a$ ), l'effort de coupe tangentiel ( $F_z$ ), la puissance de coupe ( $P_c$ ) et le débit de matière enlevée. La méthodologie de surface de réponse est utilisée dans ce chapitre afin de proposer des modèles mathématique qui permettent de faire des prédictions. Ces modèles seront exploités dans le chapitre IV afin de faire une étude d'optimisation en utilisant la fonction de désirabilité et autres méthodes.

### **III.2 Résultats expérimentaux**

Pour faire une étude statistique et développer des modèles statistiques des paramètres de sortie ( $R_a$ ,  $F_z$  et  $P_c$ ) en fonction des paramètres du régime de coupe et le mode de lubrification, une série de 09 essais a été réalisée selon le plan L9 de Taguchi. Les résultats des essais réalisés sont présentés dans le [tableau III.1](#).

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

| N | E  | Vc<br>(m/min) | f<br>(mm/tr) | ap<br>(mm) | Ra<br>(μm) | Fz<br>(N) | Pc<br>(W) | MRR<br>cm <sup>3</sup> /min |
|---|----|---------------|--------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------------------------|
| 1 | E1 | 30            | 0,08         | 0,1        | 1,150      | 65        | 32,5      | 0,24                        |
| 2 | E1 | 60            | 0,14         | 0,2        | 1,625      | 132       | 132       | 1,68                        |
| 3 | E1 | 90            | 0,20         | 0,3        | 1,996      | 160       | 240       | 5,4                         |
| 4 | E2 | 30            | 0,14         | 0,3        | 1,487      | 110       | 55        | 1,26                        |
| 5 | E2 | 60            | 0,20         | 0,1        | 1,760      | 98        | 98        | 1,2                         |
| 6 | E2 | 90            | 0,08         | 0,2        | 1,090      | 82,55     | 123       | 1,44                        |
| 7 | E3 | 30            | 0,20         | 0,2        | 1,517      | 90        | 45        | 1,2                         |
| 8 | E3 | 60            | 0,08         | 0,3        | 0,890      | 100       | 100       | 1,44                        |
| 9 | E3 | 90            | 0,14         | 0,1        | 0,937      | 72,96     | 108       | 0,84                        |

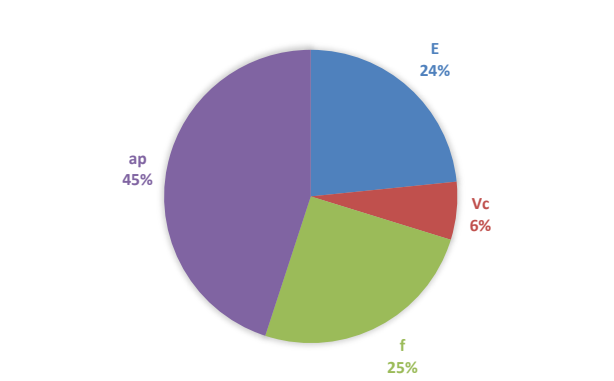
### III.3 Analyse de la variance (ANOVA) et modélisation de l'effort tangentiel (Fz)

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

Le [tableau III.2](#) illustre les résultats de l'ANOVA pour l'effort tangentiel (Fz) lors de l'usinage à sec et avec minimum quantité de lubrification (MQL). L'analyse des résultats montre que le facteur (ap) est le premier facteur qui affecte l'effort tangentiel (Fz), avec une contribution de 42,32%. On peut constater aussi que (f) a un effet significatif sur (Fz) avec une contribution de 23,76%. Le facteur suivant influençant (Fz) est l'environnement (E) avec une contribution de 22,01% et finalement la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 6,01%. La [figure III.1](#), présente les pourcentages de contribution des différents facteurs sur l'effort (Fz).

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

| Source    | DL | SomCar séq | Contribution | SomCar ajust | CM ajust | Valeur de F | Valeur de p |
|-----------|----|------------|--------------|--------------|----------|-------------|-------------|
| Modèle    | 5  | 6659,2     | 94,10%       | 6659,2       | 1331,8   | 9,58        | 0,046       |
| Linéaires | 5  | 6659,2     | 94,10%       | 6659,2       | 1331,8   | 9,58        | 0,046       |
| Vc        | 1  | 425,2      | 6,01%        | 425,2        | 425,2    | 3,06        | 0,179       |
| f         | 1  | 1681,7     | 23,76%       | 1681,7       | 1681,7   | 12,09       | 0,040       |
| ap        | 1  | 2994,5     | 42,32%       | 2994,5       | 2994,5   | 21,53       | 0,019       |
| E         | 2  | 1557,8     | 22,01%       | 1557,8       | 778,9    | 5,60        | 0,097       |
| Erreur    | 3  | 417,2      | 5,90%        | 417,2        | 139,1    |             |             |
| Total     | 8  | 7076,4     | 100,00%      |              |          |             |             |



**Figure III.1** Contributions des différents facteurs sur (Fz)

Les graphiques des effets principaux sont montrés dans la figure III.2. Il apparaît clairement que la profondeur de passe (ap) affecte fortement l'effort (Fz) car elle possède la plus grande pente [28] [29]. Elle est suivie par l'avance (f) et l'environnement (E), en dernier lieu la vitesse de coupe (Vc).

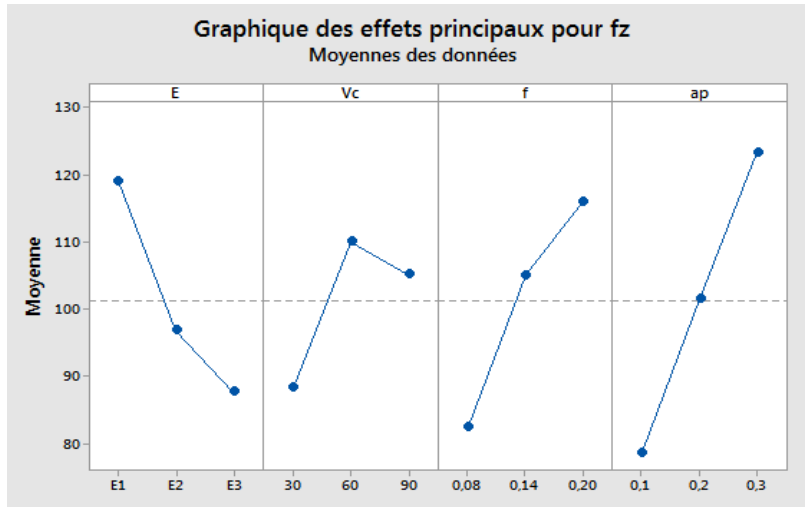


Figure III.2 Graphique des effets principaux pour

### III.3.2 Modélisation de l'effort de coupe (Fz)

Les relations fonctionnelles entre la variable dépendante pour l'effort (Fz) et les variables indépendantes étudiées (E, Vc, f et ap) ont été exprimées par le modèle mathématique (équation linéaire) avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 94.10\%$ ). Le modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire l'effort de coupe (Fz) dans l'intervalle des conditions de coupe étudiées. Les équations (III.1 III.2 III.3) expriment le modèle de l'effort tangentiel (Fz) avec tous les facteurs principaux pour les trois environnements de lubrification.

$$Fz/E1 = 18.4 + 0.281 * Vc + 279.0 * f + 223.4 * ap \quad (III.1)$$

$$Fz/E2 = -3.7 + 0.281 * Vc + 279.0 * f + 223.4 * ap \quad (III.2)$$

$$Fz/E3 = -12.9 + 0.281 * Vc + 279.0 * f + 223.4 * ap \quad (III.3)$$

}  $R^2 = 94.10\%$

### III.3.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour l'effort (Fz) est présentée dans la figure III.3. L'analyse des résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches. Cela montre la précision de modèle trouvé. La figure III.4 montre la courbe de la normalité de la distribution de l'erreur.

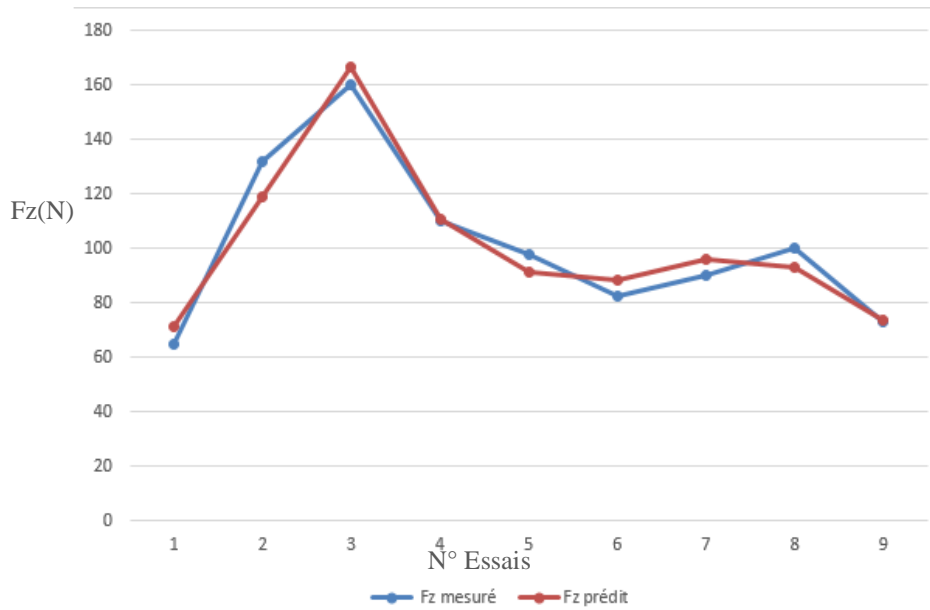


Figure III.3 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Fz)

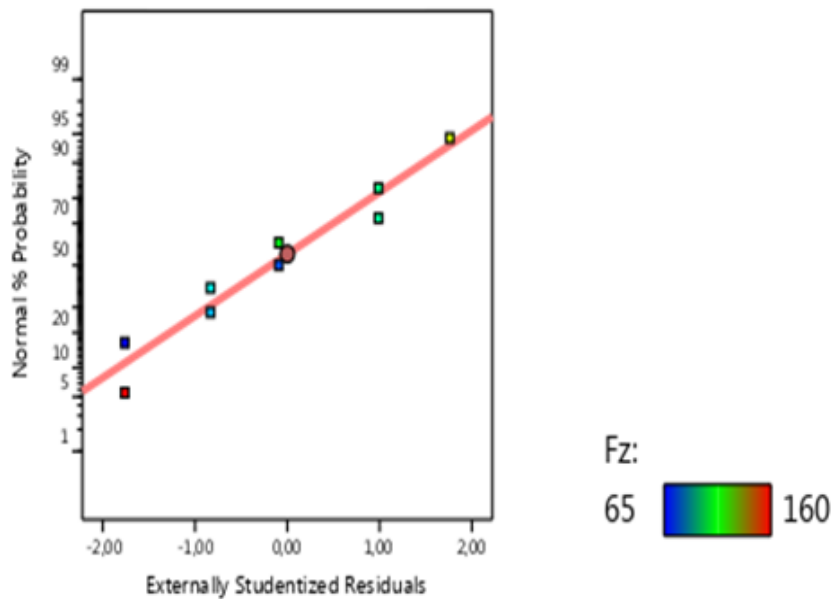


Figure III.4 Courbe de normalité pour (Fz)

### III.3.4 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Fz)

La figure III.5 représente les graphes de la surface de réponse 3D (a, b et c) et les contours en 2D (d, e, f) de l'effort (Fz) en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) durant l'usinage à sec et (MQL). La figure III.5.a montre les surfaces de réponse de l'effort (Fz) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $f$ ). Il est clair que l'augmentation de ( $f$ ) induit une

élévation de ( $F_z$ ) par contre, l'augmentation de ( $V_c$ ) induit une légère augmentation de l'effort ( $F_z$ ). La [figure III.5.b](#) présente la surface de réponse de l'effort ( $F_z$ ) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $a_p$ ). L'analyse de courbe montre clairement que le facteur ( $a_p$ ) a la plus grande influence sur l'effort ( $F_z$ ) car il possède la plus grande pente, donc, l'élévation de ce facteur cause une grande augmentation de ( $F_z$ ). L'augmentation de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) cause aussi une légère augmentation de ( $F_z$ ). La [figure III.5.c](#) illustre la surface de réponse de l'effort ( $F_z$ ) en fonction de la variation des facteurs ( $f$ ) et ( $a_p$ ). Comme il a été prévu, on remarque que l'effort tangentiel de coupe ( $F_z$ ) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe ( $a_p$ ) et de l'avance ( $f$ ). Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe ( $a_p$ ) est plus importante que l'avance ( $f$ ), les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec la littérature. La [figure III.5.d.e.f](#) expose les contours de ( $F_z$ ) en fonction de la variation des conditions de coupe. Ces contours permettent d'estimer la valeur de l'effort ( $F_z$ ) en fonction du changement des valeurs des facteurs d'entrés dans l'intervalle des conditions des coupe utilisées.

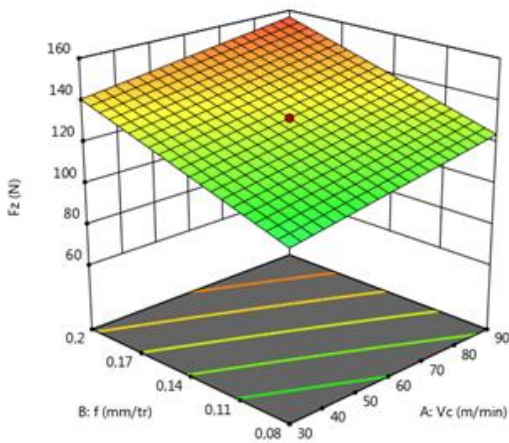


Figure III .5.a

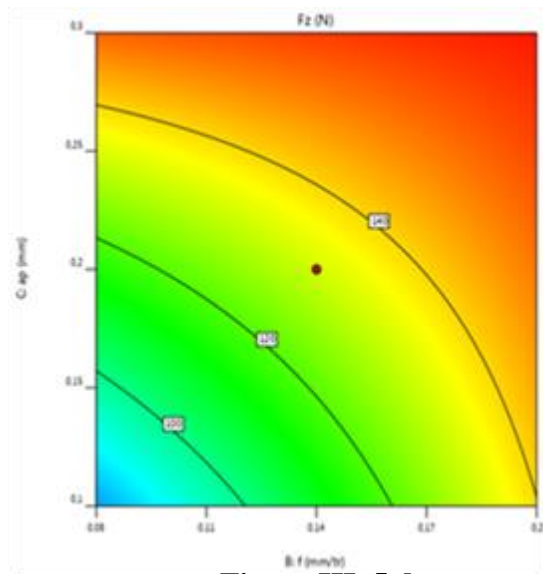


Figure III .5.d



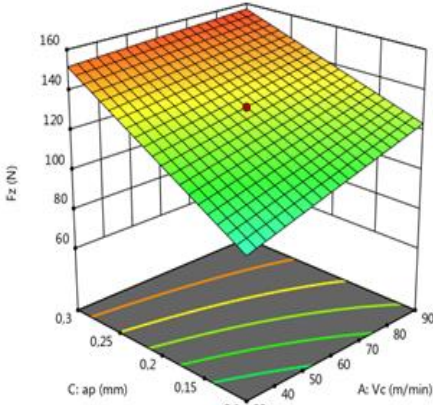


Figure III.5.b

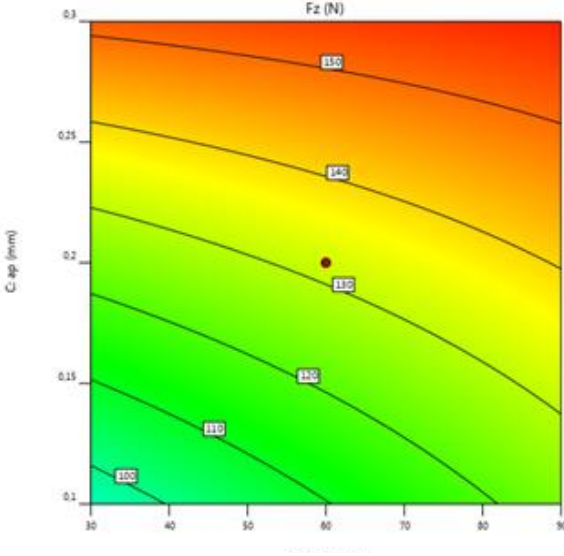


Figure III.5.e

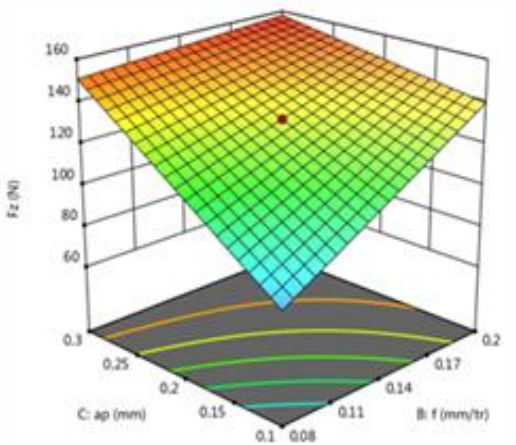


Figure III.5.c

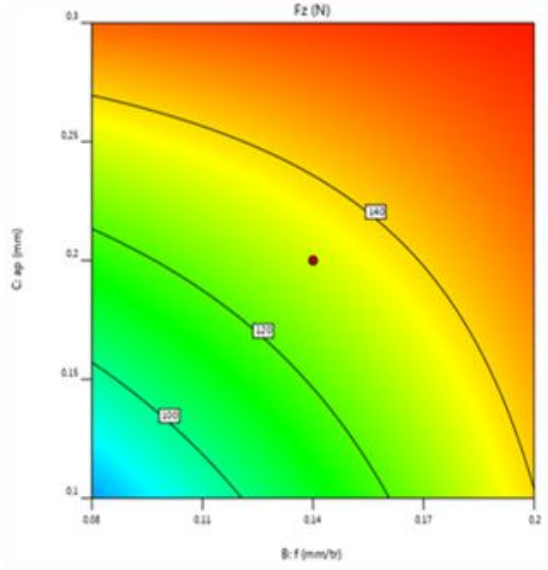


Figure III.5.f

Figure III.5 Surfaces de réponse et les contours de l'effort tangentiel ( $F_z$ )

### III.4 Analyse de la variance (ANOVA) et modélisation de la rugosité (Ra)

#### III.4.1 Analyse de variance pour (Ra)

Le [tableau III.3](#) illustre les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra) lors de l'usinage à sec et avec un minimum de quantité de lubrification (MQL). L'analyse des résultats montre que l'avance ( $f$ ) est significative puisque la valeur de (P) est inférieure à 0,05. Son influence sur la rugosité de surface (Ra) vient en première position avec une contribution 64,46%. Le deuxième facteur significatif est l'environnement (E), sa contribution de 30,05%. Le facteur suivant influençant (Ra) est la profondeur de passe ( $a_p$ ) avec une contribution de 3,88%. Finalement, la vitesse de coupe ( $V_c$ ) n'est pas significative car la valeur de la probabilité (P) est supérieure à 0,05. La contribution de ( $V_c$ ) sur la rugosité (Ra) est faible, avec une contribution de 0,24%. Les contributions des différents facteurs sur (Ra) sont montrées dans la [figure III.6](#).

**Tableau III.3** Analyse de la variance pour la rugosité (Ra)

| Source    | D<br>L | SomCar séq | Contribution | SomCar<br>ajust | CM ajust | Valeur<br>F | Valeur<br>de p |
|-----------|--------|------------|--------------|-----------------|----------|-------------|----------------|
| Modèle    | 5      | 1,17113    | 98,64%       | 1,17113         | 0,234226 | 43,36       | 0,005          |
| Linéaires | 5      | 1,17113    | 98,64%       | 1,17113         | 0,234226 | 43,36       | 0,005          |
| $V_c$     | 1      | 0,00286    | 0,24%        | 0,00286         | 0,002860 | 0,53        | 0,519          |
| $f$       | 1      | 0,76541    | 64,46%       | 0,76541         | 0,765408 | 141,70      | 0,001          |
| $a_p$     | 1      | 0,04611    | 3,88%        | 0,046113        | 0,046113 | 8,54        | 0,061          |
| E         | 2      | 0,35675    | 30,05%       | 0,178374        | 0,178374 | 33,02       | 0,009          |
| Erreur    | 3      | 0,01620    | 1,36%        | 0,005402        | 0,005402 |             |                |
| Total     | 8      | 1,18733    | 100,00%      |                 |          |             |                |

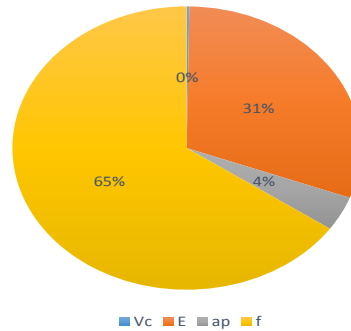


Figure III.6 Contributions des différents facteurs sur (Ra)

La figure III.7 présente les graphiques des effets principaux pour la rugosité de surface (Ra). On remarque que l'avance ( $f$ ) affecte fortement la rugosité (Ra) car elle possède la plus grande pente. Le deuxième facteur qui influence (Ra), c'est l'environnement (E) suivie par la profondeur de passe (ap). Finalement, la vitesse de coupe (Vc). On peut voir que l'augmentation de l'avance ( $f$ ) induit une élévation de (Ra), par contre, l'élévation de (Vc) contribue à une légère diminution de (Ra). Concernant le facteur (ap) son influence est presque négligeable. Les résultats trouvés sont similaires à ceux trouvés dans la littérature [30].

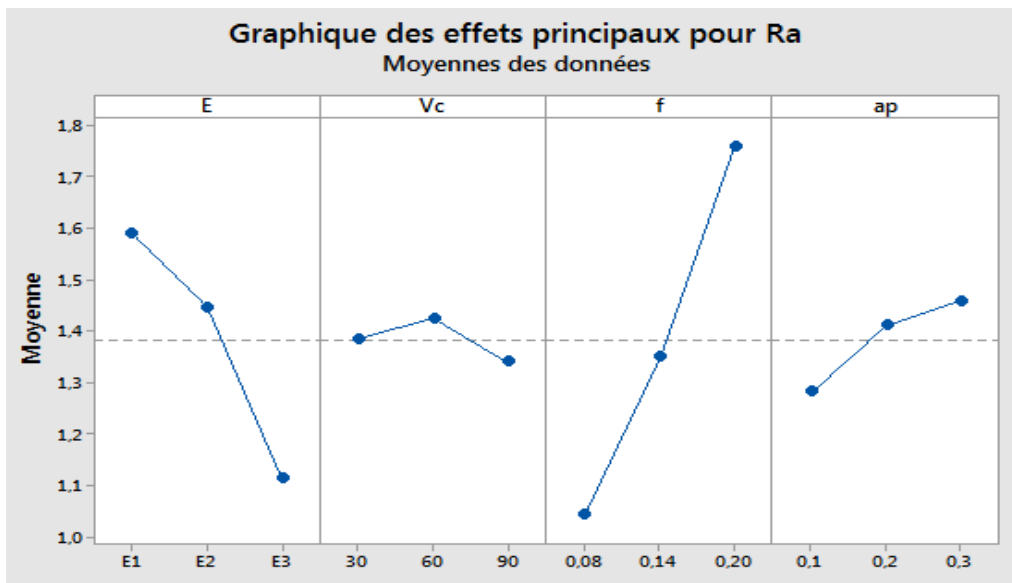


Figure III.7 Graphique des effets principaux pour (Ra).

### III.4.2 Modélisation de la rugosité de surface (Ra)

Les relations fonctionnelle entre la variable dépendante pour la rugosité (Ra) et les variables indépendantes étudiées (E, Vc, f et ap) ont été exprimées par le modèle mathématique (équation linéaire) avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 98,64\%$ ). Le modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la rugosité (Ra) dans l'intervalle des conditions de coupe étudiée. Les équations (III.4, III.5 et III.6) expriment le modèle de la rugosité de la surface (Ra) avec tous les facteurs principaux pour les trois environnements de lubrification.

$$Ra/E1 = 0.625 - 0.00073 * Vc + 5.953 f + 0.877 * ap \quad (III.4)$$

$$Ra/E2 = 0.481 - 0.00073 * Vc + 5.953 f + 0.877 * ap \quad (III.5)$$

$$Ra/E3 = 0.150 - 0.00073 * Vc + 5.953 f + 0.877 * ap \quad (III.6)$$

$(R^2 = 98,64\%)$

### III.4.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra) est présentée dans la figure III.8. L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision du modèle trouvé. La figure III.9 montre la courbe de la normalité.

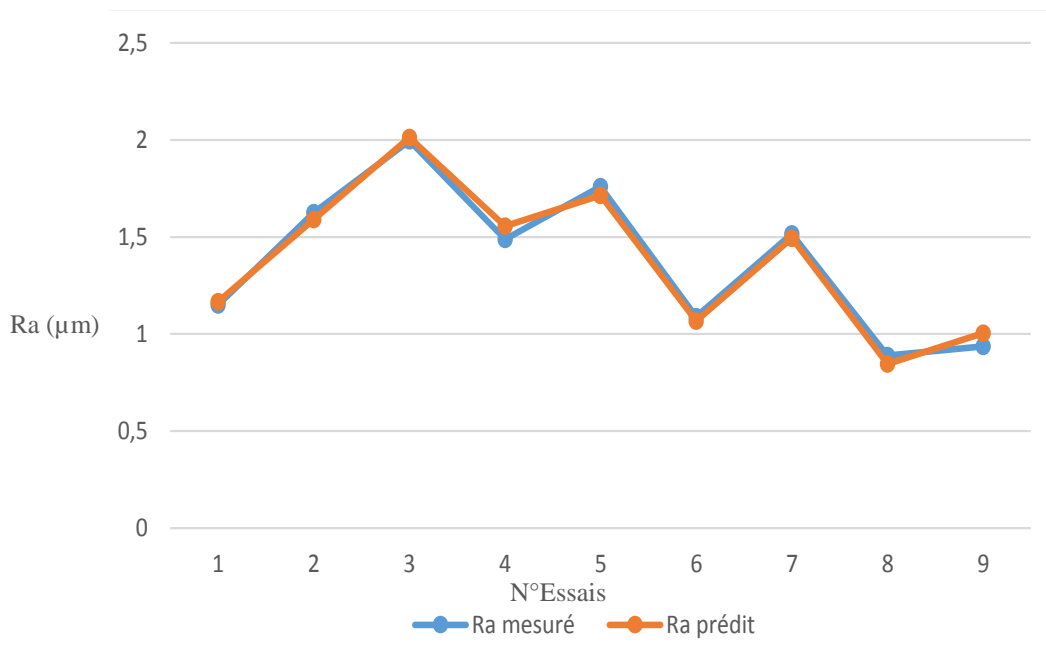
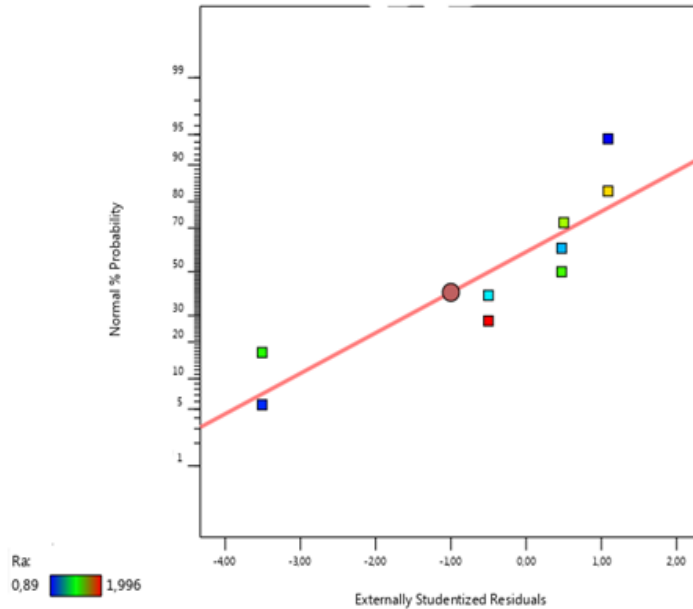


Figure III.8 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Ra)



**Figure III.9** Courbe de normalité pour (Ra).

#### III.4.4 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Ra)

La [figure III.10](#) représente les graphes de la surface de réponse 3D (a, b et c) et les contours en 2D (d, e, f) de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) durant l'usinage à sec et (MQL). La [figure III.10.a](#) illustre la surface de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $f$ ). On remarque que l'augmentation de ( $f$ ) induit une élévation de (Ra) par contre, l'augmentation de ( $V_c$ ) induit une légère diminution de la rugosité (Ra). La [figure III.10.b](#) présente la surface de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $a_p$ ). L'analyse des courbes montre clairement que les deux facteurs ( $a_p$ ) et ( $V_c$ ) induisent une très légère diminution de la rugosité (Ra). La [figure III.10.c](#) montre la surface de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de la variation des facteurs ( $f$ ) et ( $a_p$ ). Il est clair que l'influence de l'avance ( $f$ ) est plus importante que la profondeur de passe ( $a_p$ ). Les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec d'autres travaux de recherche. La [figure III.10.d.e.f](#) présente les contours de (Ra) en fonction de la variation des conditions de coupe. Ces contours permettent d'estimer la valeur de la rugosité (Ra) en fonction du changement des valeurs des facteurs d'entrée dans l'intervalle des conditions de coupe utilisées.

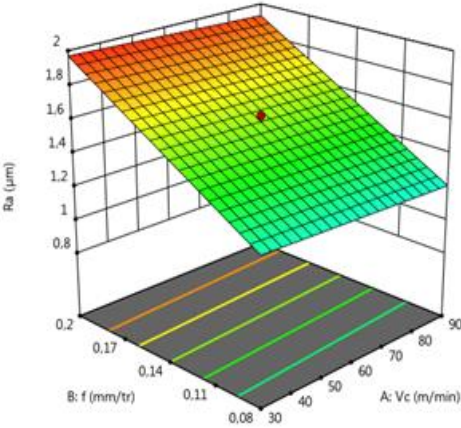


Figure III.10.a

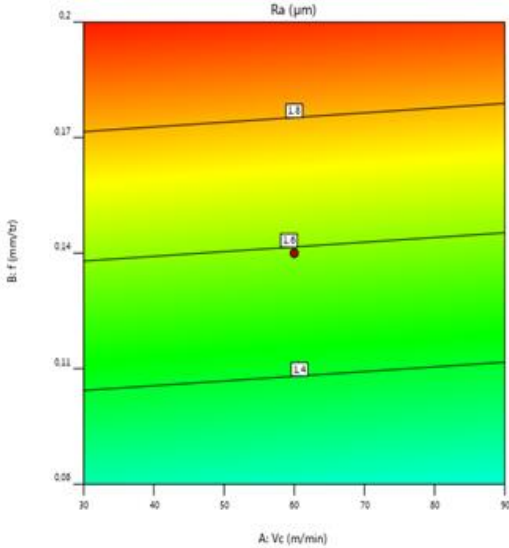


Figure III.10.d

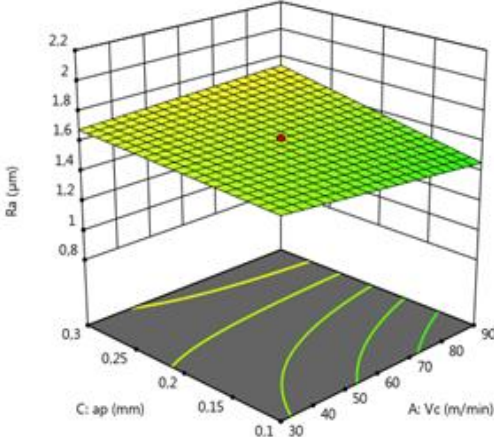


Figure III.10.b

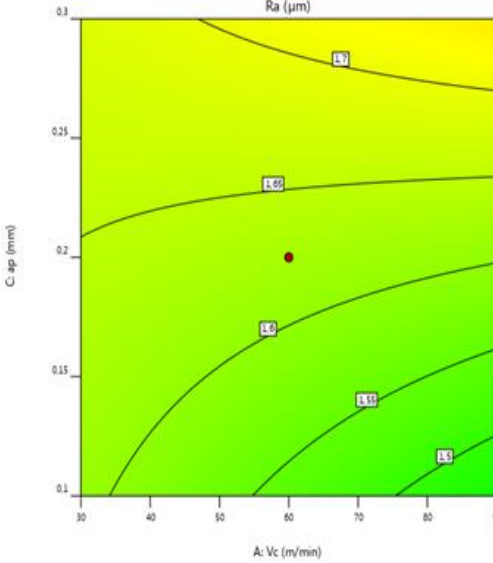


Figure III.10.e

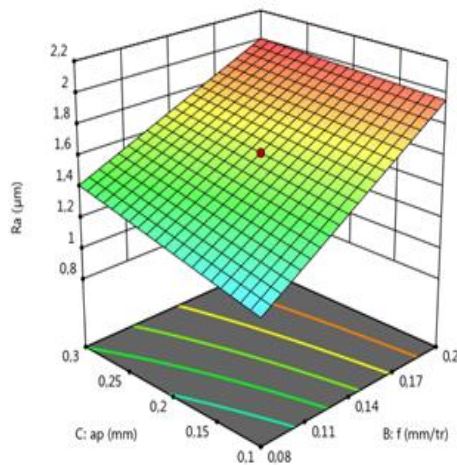


Figure III.10.c

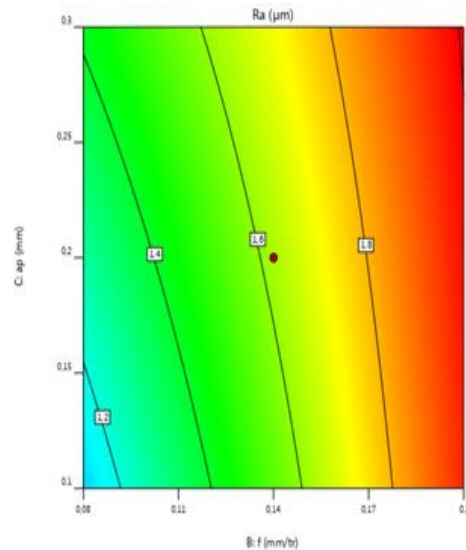


Figure III.10.f

Figure III.10 Surfaces de réponse et les contours de la rugosité (Ra)

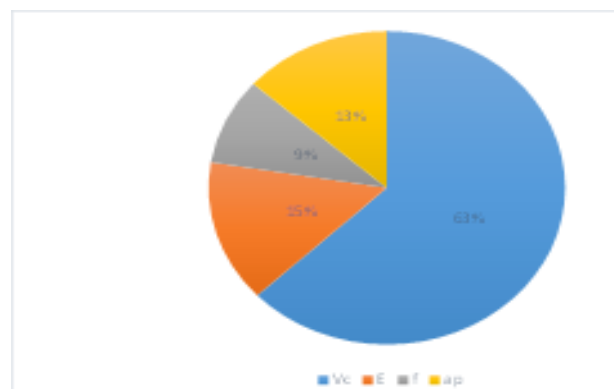
### III.5 Analyse de la variance (ANOVA) et Modélisation de la puissance de coupe (Pc)

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

Le [tableau III.4](#) illustre les résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe (Pc) lors de l'usinage à sec et avec minimum quantité de lubrification (MQL). L'analyse des résultats montre que le facteur (Vc) est le facteur le plus important qui affecte (Pc) sa contribution est de 62,20%. Elle est suivie par l'environnement (E) avec une contribution de 14,47% et la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 13,30%. Le dernier facteur affectant (Pc) est l'avance (f), sa contribution est 8,82%. Les contributions des différents facteurs sur (Pc) sont montrées dans la [figure III.11](#).

**Tableau III.4** Analyse de la variance pour la puissance de coupe ( $P_c$ )

|           | D<br>L | SomCar séq | Contribution | SomCar<br>ajust | CM ajust | Valeur<br>F | Valeur<br>de p |
|-----------|--------|------------|--------------|-----------------|----------|-------------|----------------|
| Modèle    | 5      | 30332,2    | 98,79%       | 30332,2         | 6066,4   | 49,19       | 0,004          |
| Linéaires | 5      | 30332,2    | 98,79%       | 30332,2         | 6066,4   | 49,19       | 0,004          |
| Vc        | 1      | 19097,0    | 62,20%       | 19097,0         | 19097,0  | 154,68      | 0,001          |
| f         | 1      | 2709,4     | 8,82%        | 2709,4          | 2709,4   | 21,95       | 0,018          |
| ap        | 1      | 4082,0     | 13,30%       | 4082,0          | 4082,0   | 33,06       | 0,010          |
| E         | 2      | 4443,7     | 14,47%       | 4443,7          | 2221,9   | 18,00       | 0,021          |
| Erreur    | 3      | 370,4      | 1,21%        | 370,4           | 123,5    |             |                |
| Total     | 8      | 30702,6    | 100,00%      |                 |          |             |                |



**Figure III.11** Contributions des différents facteurs sur ( $P_c$ )

La [figure III.12](#) représente les graphiques des effets principaux pour la puissance de coupe ( $P_c$ ). On peut voir que la pente de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est plus grande, donc ce facteur est le plus influant sur ( $P_c$ ), il est suivi par l'environnement (E) suivie par la profondeur de passe (ap), finalement, l'avance (f). Il est clair que l'augmentation des trois facteurs (f), (ap) et ( $V_c$ ) induisent une élévation de ( $P_c$ ). Les résultats trouvés sont similaires à ceux trouvés dans la littérature.



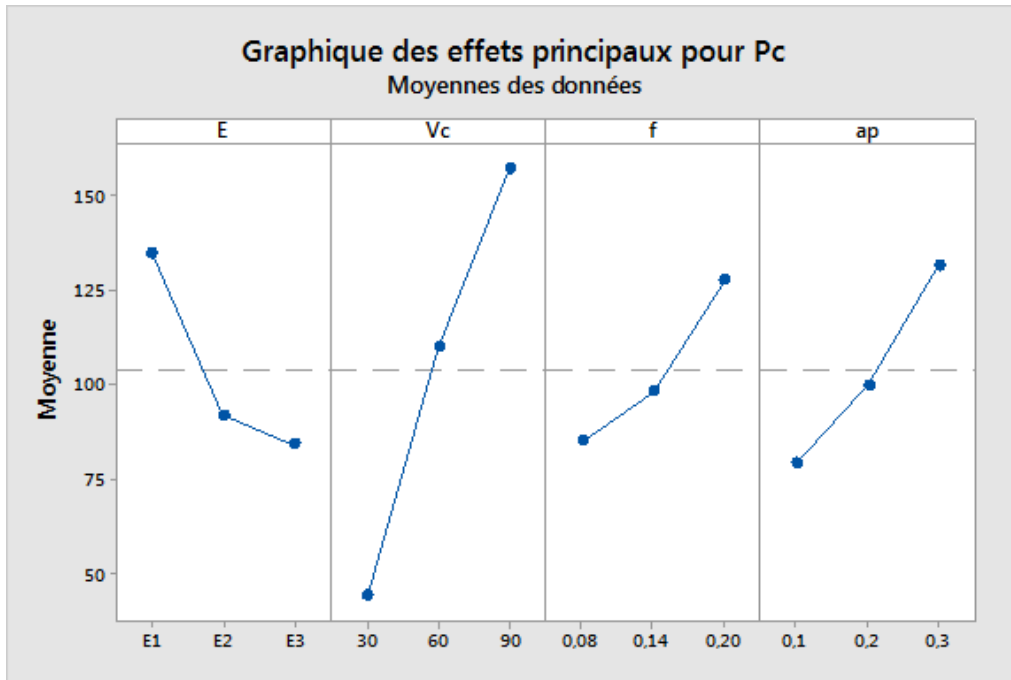


Figure III.12 Graphique des effets principaux pour (Pc).

### III.5.2 Modélisation de la puissance de coupe (Pc)

Les relations fonctionnelle entre la variable dépendante pour la puissance (Pc) et les variables indépendantes étudiées (E, Vc, f et ap) ont été exprimées par le modèle mathématique (équation linéaire) avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 96,78\%$ ). Le modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la puissance de coupe (Pc) dans l'intervalle des conditions de coupe étudiées. Les équations (III.7, III.8 et III.9) expriment le modèle de la puissance de coupe (Pc) avec tous les facteurs principaux pour les trois environnements de lubrification.

$$Pc/E1 = -79.8 + 1.881 * Vc + 354.2 * f + 260.8 * ap \quad (III.7)$$

$$Pc/E2 = -122.6 + 1.881 * Vc + 354.2 * f + 260.8 * ap \quad (III.8)$$

$$Pc/E3 = -130.3 + 1.881 * Vc + 354.2 * f + 260.8 * ap \quad (III.9)$$

$(R^2 = 96.78\%)$

### III.5.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la puissance (Pc) est présentée dans la figure III.13. L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les

valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision des modèles trouvés. La figure III.14 montre la courbe de la normalité de la distribution de l'erreur.

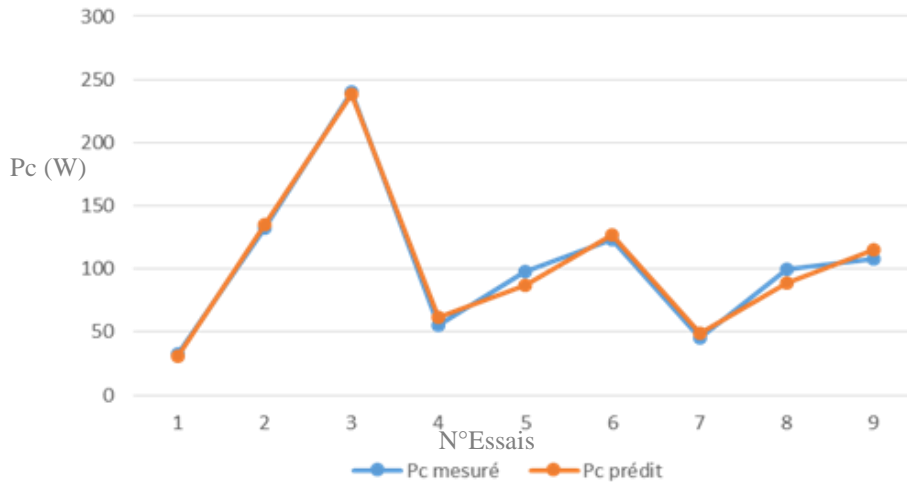


Figure III.13 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour (Pc)

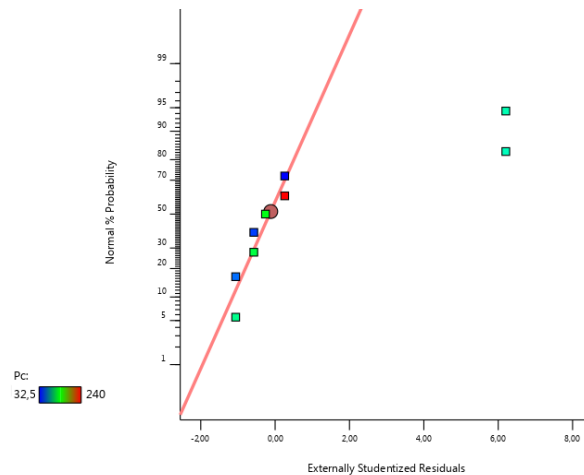


Figure III.14 Courbe de normalité pour (Pc).

### III.5.4 Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour (Pc)

La figure III.15 présente les graphes de la surface de réponse 3D (a, b et c) et les contours en 2D (d, e, f) de la puissance (Pc) en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) durant l'usinage à sec et (MQL). La figure III.15.a montre la surface de réponse de la puissance (Pc) en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ) et ( $f$ ). L'analyse des courbes indique que la puissance de coupe (Pc) augmente d'une manière importante avec l'augmentation de ( $V_c$ ) et ( $f$ ). La figure III.15.b présente la surface de réponse de la puissance (Pc) en fonction de la variation

des facteurs ( $V_c$ ) et ( $a_p$ ). Il est aussi clair que la plus grande pente est attribuée au facteur ( $a_p$ ) donc, il a la plus grande influence sur ( $P_c$ ). La figure III.15.c illustre la surface de réponse de la puissance ( $P_c$ ) en fonction de la variation des facteurs ( $f$ ) et ( $a_p$ ). On peut observer que l'augmentation des deux facteurs ( $a_p$ ) et ( $f$ ) provoquent l'élévation de la puissance ( $P_c$ ). Ces résultats sont logiques puisque l'équation (I.9) indique que la puissance de coupe est étroitement liée à la vitesse de coupe et l'effort de coupe, à son tour l'élévation de ( $F_z$ ) est liée à l'élévation de l'avance et de la profondeur de passe. C'est pour cela l'augmentation de trois facteurs ( $V_c$ ), ( $f$ ) et ( $a_p$ ) conduisent à l'élévation de la puissance ( $P_c$ ). Les résultats trouvés sont en parfaite concordance avec d'autres travaux de recherche [28].

La figure III.15.d.e.f illustre les contours de ( $P_c$ ) en fonction de la variation des conditions de coupe. Ces contours permettent d'estimer la valeur de la puissance ( $P_c$ ) en fonction de n'importe quelles valeurs souhaitées des facteurs d'entrée et cela dans l'intervalle des conditions de coupe utilisés.

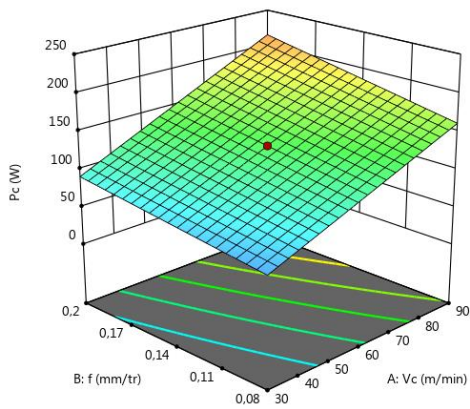


Figure III.15.a

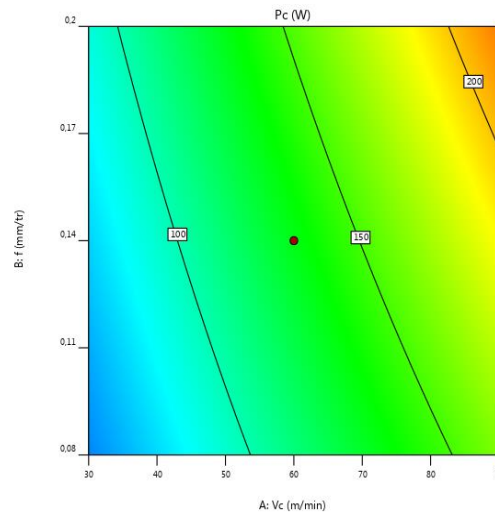


Figure III.15.d

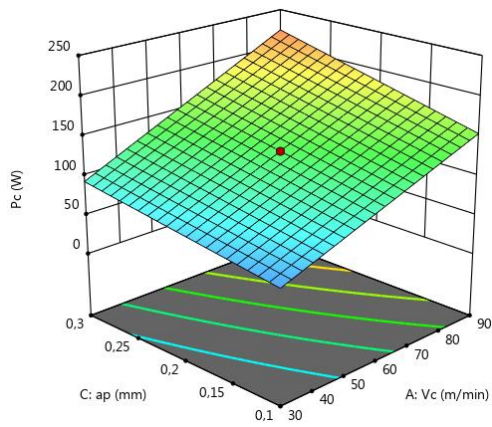


Figure III.15.b

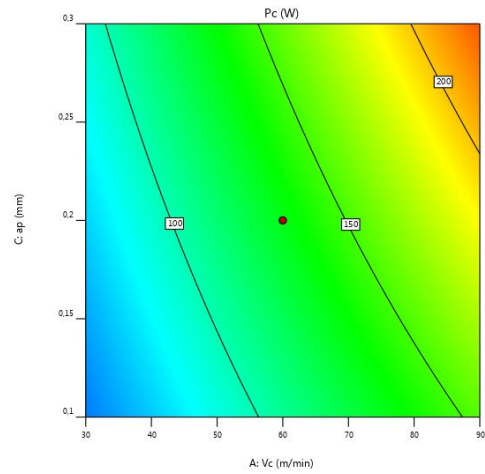


Figure III.15.e

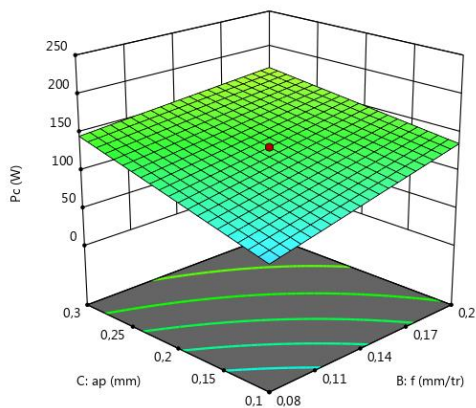


Figure III.15.c

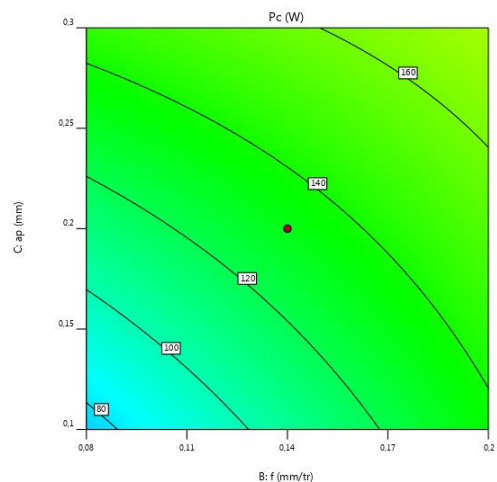


Figure III.15.f

Figure III.15 Surfaces de réponse et les contours de la puissance de coupe ( $P_c$ )

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de la méthodologie de surface de réponse (MSR) en tournage de l'Inconel 718, l'usinage est réalisé avec un outil en carbure métallique GC1105 revêtu en PVD a permis d'obtenir à la fois des modèles mathématiques pour la rugosité ( $R_a$ ), l'effort de coupe tangentiel ( $F_z$ ), la puissance de coupe ( $P_c$ ) et le débit de matière enlevé ( $MRR$ )

en fonction des paramètres de coupe. Les valeurs optimales des paramètres d'usinage ont été sélectionnées par la fonction de désirabilité.

# Chapitre IV

**Optimisation des  
condition de coupe**

## **IV.1 Introduction**

Dans ce chapitre sont présentés les résultats de l'optimisation des conditions de coupe, lors de l'usinage de l'Inconel 718 en usinage à sec et avec lubrification MQL. La première partie des résultats est réservée à l'optimisation mono-objective de Taguchi basée sur l'analyse du signal/bruit (S/N). Dans la deuxième partie, une optimisation multi-objective des conditions de coupe est réalisée en utilisant la méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA). La méthode (GRA) est suivie par une autre méthode d'optimisation, elle a pour but l'application de l'approche de la fonction de désirabilité (DF) basée sur l'utilisation des modèles mathématiques trouvés dans le chapitre précédent.

## **IV.2 Optimisation mono-objective**

### **IV.2.1 Méthode de Taguchi**

La méthode de Taguchi est une puissante technique de résolution des problèmes d'optimisation complexes (paramètres) pour améliorer les performances et la productivité des processus pendant la production du produit, par la mise en œuvre de la planification des expériences, qui sont basées sur l'utilisation des tableaux orthogonaux proposés par Taguchi. Le but est de minimiser le nombre d'essais et de se concentrer seulement sur les expériences essentielles pour l'analyse, ce qui permet de gagner du temps et de réduire les coûts [31].

L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit (S/B). Le signal représente la variable principale à l'entrée du procédé et le bruit représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie [32]. Le rapport (S/B) mesure les caractéristiques de qualité provenant des valeurs désirées. L'intérêt de la conception de Taguchi est que de multiples facteurs peuvent être considérés à la fois. Dans cette étude, la plus faible valeur de la rugosité de surface (Ra), de l'effort de coupe (Fz), la puissance de coupe (Pc) et le débit de copeau enlevé le plus élevée (MRR) est souhaitables. La caractéristique (S/B) la plus petite est la meilleure (smaller-the-better) (équation IV.1) a été utilisé pour la rugosité de surface (Ra), (Fz) et (Pc). La plus grande est la meilleure (larger-the-better) (équation IV.2) a été utilisée pour le débit du copeau enlevé (MRR) [33] [34].

- **Le plus petit est le meilleur (Nominal - the – best) :**

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

Où :

n = nombre de mesures effectuées.

yi = valeur mesurée de la réponse, Avec : i = 1, 2, ... n.

Il est appliqué dans le cas où la minimisation des critères est demandée.

- **Le plus grand est le meilleur (Larger - the – better) :**

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

Ce type est appliqué dans le cas où la maximisation des critères est demandée.

#### IV.2.1.1 Démarche de la méthode de Taguchi

La démarche de Taguchi se présente en six étapes [35] :

- **Etape 1 :** décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.
- **Etape 2 :** sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif. Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.
- **Etape 3 :** construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans que l'effet influe sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais.
- **Etape 4 :** réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignait les réponses dans un tableau.
- **Etape 5 :** Calculer le rapport S/N et analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).



- **Etape 6** : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus, sélectionnez les niveaux optimaux des paramètres du procédé et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.).

Le **tableau IV.1** expose les résultats du signal/bruit (S/B), pour les différents paramètres de performance étudiés en se basant sur les **équations IV.1** et **IV.2**.

**Tableau IV.1** Signal/Bruit des paramètres de sortie étudiées (Fz), (Pc), (MRR) et (Ra)

| N° | E  | Vc<br>(m/min) | f<br>(mm/tr) | ap<br>(mm) | S/B<br>(Ra) | S/B<br>(Fz) | S/B<br>(Pc) | S/B<br>(MRR) |
|----|----|---------------|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 1  | E1 | 30            | 0,08         | 0,1        | -1,2139     | -36,258     | -30,237     | -12,395      |
| 2  | E1 | 60            | 0,14         | 0,2        | -4,2170     | -42,411     | -42,411     | 4,506        |
| 3  | E1 | 90            | 0,20         | 0,3        | -6,0032     | -44,082     | -47,604     | 14,647       |
| 4  | E2 | 30            | 0,14         | 0,3        | -3,4462     | -40,827     | -34,807     | 2,007        |
| 5  | E2 | 60            | 0,20         | 0,1        | -4,9102     | -39,824     | -39,824     | 1,583        |
| 6  | E2 | 90            | 0,08         | 0,2        | -0,7485     | -38,334     | -41,798     | 3,167        |
| 7  | E3 | 30            | 0,20         | 0,2        | -3,6197     | -39,084     | -33,064     | 1,583        |
| 8  | E3 | 60            | 0,08         | 0,3        | 1,0122      | -40,000     | -40,000     | 3,167        |
| 9  | E3 | 90            | 0,14         | 0,1        | 0,5652      | -37,261     | -40,668     | -1,514       |

## IV.2 .2 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

### IV.2 .2.1 Analyse des effets principaux sur l'effort tangentiel (Fz)

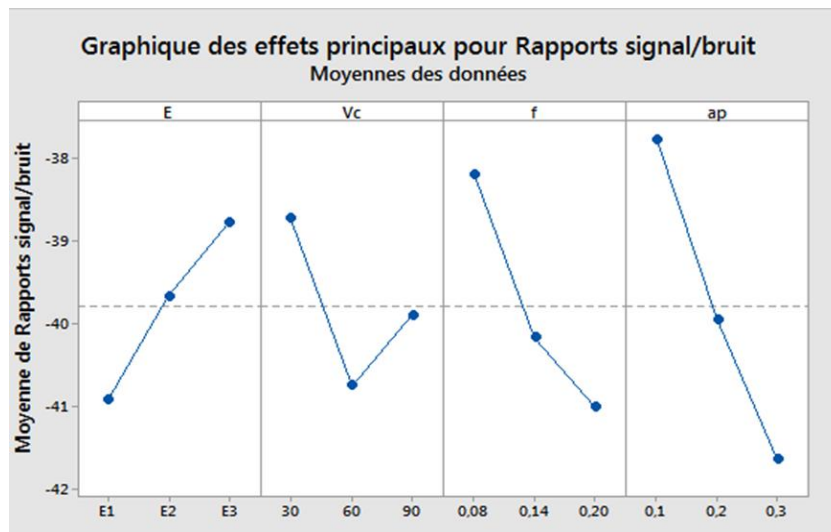
Le **tableau IV.2** montre la moyenne des ratios (S/B) de l'effort (Fz) pour chaque niveau des facteurs durant l'usinage à sec et l'environnement MQL. Delta est égal à la différence entre le maximum et le minimum de la moyenne des rapports (S/N) pour un facteur de contrôle particulier. Plus la valeur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

avec un effet de 3.86, suivie par l'avance ( $f$ ) avec un effet de 2.80, et l'environnement (E) avec un effet de 2.14. En dernier lieu, vient la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec un effet de 2.02.

**Tableau IV.2** Moyenne des ratios (S/B) de l'effort ( $F_z$ ) pour chaque niveau des facteurs

| Niveau | E      | $V_c$  | $f$    | $ap$   |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1      | -40,92 | -38,72 | -38,20 | -37,78 |
| 2      | -39,66 | -40,75 | -40,17 | -39,94 |
| 3      | -38,78 | -39,89 | -41,00 | -41,64 |
| Delta  | 2,14   | 2,02   | 2,80   | 3,86   |
| Rang   | 3      | 4      | 2      | 1      |

La figure IV.1 montre le graphique des effets principaux du rapport (S/N) pour l'effort ( $F_z$ ). La figure IV.1 montre que les niveaux optimaux des paramètres de coupe afin de minimiser l'effort tangentiel ( $F_z$ ) ont été spécifiés comme suit : (E3,  $V_{c1}$ ,  $f_1$  et  $ap_1$ ), en d'autres termes, une valeur optimale de ( $F_z$ ) est obtenu à une vitesse de coupe  $V_c = 30$  m/min, l'environnement  $E=E3$  (MQL à l'huile complet) la plus faible avance  $f= 0,08$  mm/tr et la petite profondeur de passe  $ap = 0,1$  mm. Le tableau IV.3 récapitule les conditions optimales de l'effort ( $F_z$ ).



**Figure IV.1** Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de l'effort ( $F_z$ )

**Tableau IV.3** Conditions optimales de l'effort ( $F_z$ )

| N° | $V_c$ (m/min) | $f$ (mm/tr) | $ap$ (mm) | E  |
|----|---------------|-------------|-----------|----|
| 1  | 30            | 0.08        | 0.1       | E3 |

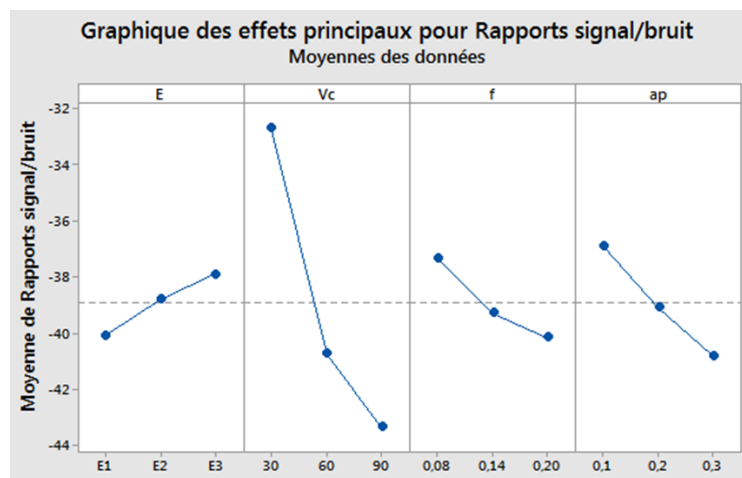
**IV.2 .2.2 Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (Pc)**

Le [tableau IV.4](#) montre la moyenne des ratios (S/B) de la puissance (Pc) pour chaque niveau. Il est clair que les paramètres d'usinage (Vc), (E), (f) et (ap) présentent des effets différents sur la puissance de coupe (Pc). Le paramètre qui influe fortement est la vitesse de coupe (Vc) avec un effet de 10.65. Le deuxième paramètre qui influe sur la puissance de coupe est la profondeur de passe (ap) avec un effet de 3.89, et l'avance de coupe (f) avec un effet de 2.82. Le dernier paramètre est l'environnement (E) avec un effet de 2.17.

**Tableau IV.4** Moyenne des ratios (S/B) de la puissance (Pc) pour chaque niveau des facteurs

| Niveau | E      | Vc     | f      | ap     |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1      | -40,08 | -32,70 | -37,35 | -36,91 |
| 2      | -38,81 | -40,75 | -39,30 | -39,09 |
| 3      | -37,91 | -43,36 | -40,16 | -40,80 |
| Delta  | 2,17   | 10,65  | 2,82   | 3,89   |
| Rang   | 4      | 1      | 3      | 2      |

La [figure IV.2](#) montre le graphique des effets principaux du rapport (S/N) pour la puissance de coupe (Pc). D'après la figure IV.2, les conditions optimales pour une puissance de coupe minimale sont la combinaison des niveaux (E3, Vc1, f1 et ap1) : la vitesse de coupe Vc= 30 m/min, l'environnement E=E3, la plus faible avance f= 0,08 mm/tr et la petite profondeur de passe ap = 0,1 mm. Le [tableau IV.5](#) montre les conditions optimales de puissance (Pc).



**Figure IV.2** Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (Pc)

**Tableau IV.5** Conditions optimales de la puissance (Pc)

| N° | Vc (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) | E  |
|----|------------|-----------|---------|----|
| 1  | 30         | 0.08      | 0.1     | E3 |

**IV.2 .2.3 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra)**

Le [tableau IV.6](#) montre la moyenne des ratios (S/B) de la rugosité (Ra) pour chaque niveau des facteurs. L'analyse des résultats du [tableau IV.10](#) montre que les paramètres d'usinage (Vc), (E), (f) et (ap) présentent des effets différents sur la rugosité de surface (Ra). La plus importante influence correspond à l'avance (f) avec 4.527. On peut constater aussi que (E) a un effet de 3,130, et la profondeur de passe avec un effet de 1.008. En dernier lieu, vient la vitesse de coupe (Vc) avec 0,69.

**Tableau IV.6** Moyenne des ratios (S/B) de la rugosité (Ra) pour chaque niveau des facteurs

| Niveau | E       | Vc      | f       | ap      |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 1      | -3,8114 | -2,7600 | -0,3168 | -1,8530 |
| 2      | -3,0350 | -2,7050 | -2,3660 | -2,8618 |
| 3      | -0,6808 | -2,0622 | -4,8444 | -2,8124 |
| Delta  | 3,1306  | 0,6978  | 4,5276  | 1,0088  |
| Rang   | 2       | 4       | 1       | 3       |

La [figure IV.3](#) montre le graphique des effets principaux du rapport (S/N) pour la rugosité (Ra). Pour la minimisation de (Ra), le régime optimal obtenu par la méthode de Taguchi est (E3, Vc3, f1, ap1) ce qui correspond à une vitesse de coupe Vc = 90 m/min, l'environnement E=E3, l'avance f =0.08 mm/tr et une profondeur de passe ap=0.1 mm. Le [tableau IV.7](#) montre les conditions optimales de la rugosité (Ra).

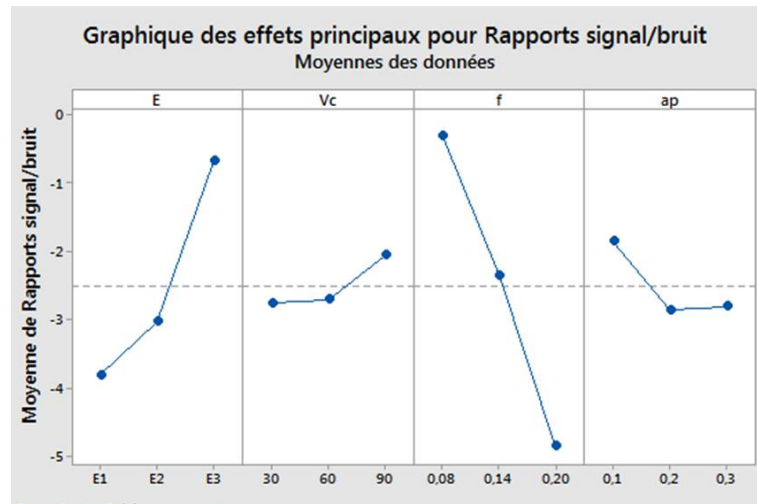


Figure IV.3 Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (Ra)

Tableau IV.7 Conditions optimales de la rugosité (Ra)

| N° | Vc (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) | E  |
|----|------------|-----------|---------|----|
| 1  | 90         | 0.08      | 0.1     | E3 |

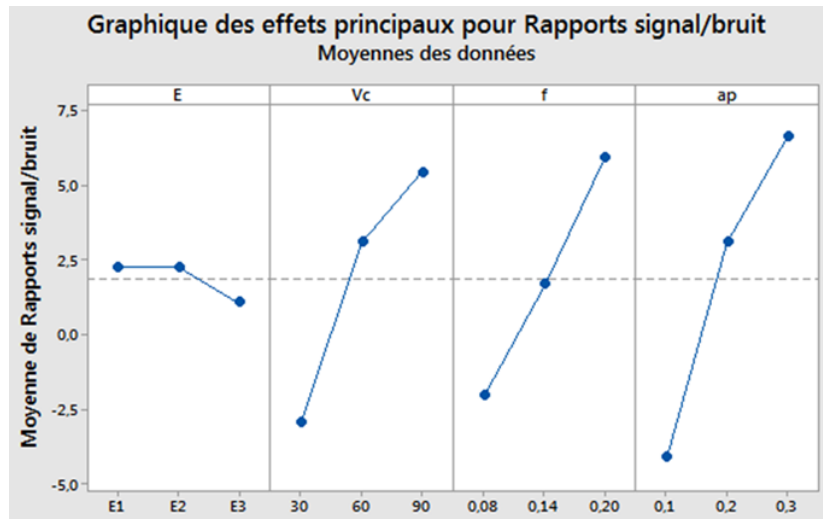
#### IV.2 .2.4 Analyse des effets principaux sur le débit de matière enlevé (MRR)

Le [tableau IV.8](#) montre la moyenne des ratios (S/B) du débit de matière enlevé (MRR) pour chaque niveau des facteurs. L'analyse des résultats du [tableau IV.8](#) montre que les paramètres d'usinage (Vc), (E), (f) et (ap) présentent des effets différents sur le débit de matière enlevé (MRR). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe avec un effet de 10,716. On peut constater aussi que (Vc) a un effet de 8,368, et l'avance avec un effet de 7,959. En dernier lieu, vient l'environnement (E) avec 1,174.

**Tableau IV.8** Moyenne des ratios (S/B) du débit de matière enlevé (MRR) pour chaque niveau des facteurs

| Niveau | E     | Vc     | f      | ap     |
|--------|-------|--------|--------|--------|
| 1      | 2,253 | -2,935 | -2,020 | -4,109 |
| 2      | 2,253 | 3,086  | 1,666  | 3,086  |
| 3      | 1,079 | 5,434  | 5,938  | 6,608  |
| Delta  | 1,174 | 8,368  | 7,959  | 10,716 |
| Rang   | 4     | 2      | 3      | 1      |

La figure IV.4 montre le graphique des effets principaux du rapport (S/N) pour le débit de matière enlevé (MRR). Pour la maximisation de (MRR), le régime optimal obtenu par la méthode de Taguchi est (E1, Vc3, f3, ap3) ce qui correspond à une vitesse de coupe Vc = 90 m/min, l'environnement E=E1, l'avance  $f=0,20$  mm/tr et une profondeur de passe  $ap=0,3$  mm. Le tableau IV.9 montre les conditions optimales de (MRR).



**Figure IV.4** Graphique des effets principaux du rapport (S/N) de (MRR)

**Tableau IV.9** Conditions optimales de (MRR)

| N° | Vc (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) | E  |
|----|------------|-----------|---------|----|
| 1  | 90         | 0.20      | 0.3     | E1 |

### IV.3 Optimisation multi-objectif par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise

L'analyse relationnelle grise (GRA) est une technique proposée pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant le multi-objectif en un objectif unique dans le but d'atteindre une combinaison optimale de niveaux de paramètres pour l'amélioration simultanée de multiples caractéristiques d'usinage [36]. Le but de la méthode d'analyse relationnelle grise est de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui nous permet de minimiser la rugosité de surface (Ra) et maximiser le débit du copeau enlevé (MRR) simultanément.

Les étapes suivantes sont considérées pour l'Analyse Relationnelle Gris (GRA) :

#### IV.3.1 La normalisation

La première étape de l'analyse relationnelle grise est de normaliser (dans l'intervalle 0 et 1) les données expérimentales selon le but de l'optimisation [34].

- ✓ Pour la minimisation du critère (rugosité de surface Ra), la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad \text{(IV.3)}$$

- ✓ Pour la maximisation du critère, et c'est le cas du débit du copeau enlevé (MRR), alors la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{x_i(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad \text{(IV.4)}$$

Où :

- ✓  $x_i(k)$  valeur normalisée de la séquence.
- ✓  $\max(x_i^0(k))$  la plus grande valeur de  $x_i^0(k)$  la  $i$ ème réponse.
- ✓  $\min(x_i^0(k))$  la plus petite valeur de  $x_i^0(k)$  la  $i$ ème réponse [35].

Le but de la normalisation est rendre toutes les réponses en même grandeur, les données traitées par la normalisation sont données dans le [tableau IV.10](#). Les valeurs normalisées ont été arrangés entre zéro et un.

**Tableau IV.10** Résultats expérimentale normalisé ( $x_i(k)$ )

| N° d'essais | Ra    | Fz    | Pc    | MRR   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 1           | 0,765 | 1,000 | 1,000 | 0,000 |
| 2           | 0,335 | 0,295 | 0,520 | 0,279 |
| 3           | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 |
| 4           | 0,460 | 0,526 | 0,892 | 0,198 |
| 5           | 0,213 | 0,653 | 0,684 | 0,186 |
| 6           | 0,819 | 0,815 | 0,564 | 0,233 |
| 7           | 0,433 | 0,737 | 0,940 | 0,186 |
| 8           | 1,000 | 0,632 | 0,675 | 0,233 |
| 9           | 0,958 | 0,916 | 0,636 | 0,116 |

### Étape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational) ( $\xi_i(k)$ ) peuvent être calculés comme suit [34] :

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi\Delta_{\max}} \quad (\text{IV.5})$$

$$0 < \xi_i(k) \leq 1$$

Où :

$\Delta_{0i}(k)$  est la différence en valeur absolue entre  $x_0^k(k)$  et  $x_i^k(k)$ ,

$\Delta_{\min}$  est la plus petite valeur de  $\Delta_{0i}(k)$

$\Delta_{\max}$  est la plus grande valeur de  $\Delta_{0i}(k)$  coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1.



$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{IV.6})$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{IV.7})$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{IV.8})$$

La valeur de  $\psi$  est en générale égale à (0,5) [37].

La valeur du coefficient  $\psi$  a été prise (0,5). Les valeurs des coefficients "Gris Rationnelle Coefficients" est présentés dans le [tableau IV.11](#)

**Tableau IV.11** Coefficients du GR ( $\xi_i(k)$ )

| N° d'essais | Ra    | Fz    | Pc    | MRR   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 1           | 0,680 | 1,000 | 1,000 | 0,333 |
| 2           | 0,429 | 0,415 | 0,510 | 0,410 |
| 3           | 0,333 | 0,333 | 0,333 | 1,000 |
| 4           | 0,481 | 0,514 | 0,822 | 0,384 |
| 5           | 0,389 | 0,590 | 0,613 | 0,381 |
| 6           | 0,734 | 0,730 | 0,534 | 0,394 |
| 7           | 0,469 | 0,655 | 0,892 | 0,381 |
| 8           | 1,000 | 0,576 | 0,606 | 0,394 |
| 9           | 0,922 | 0,856 | 0,579 | 0,361 |

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

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

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (\text{IV.9})$$

Où :  $n$  est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas  $n=4$ ).

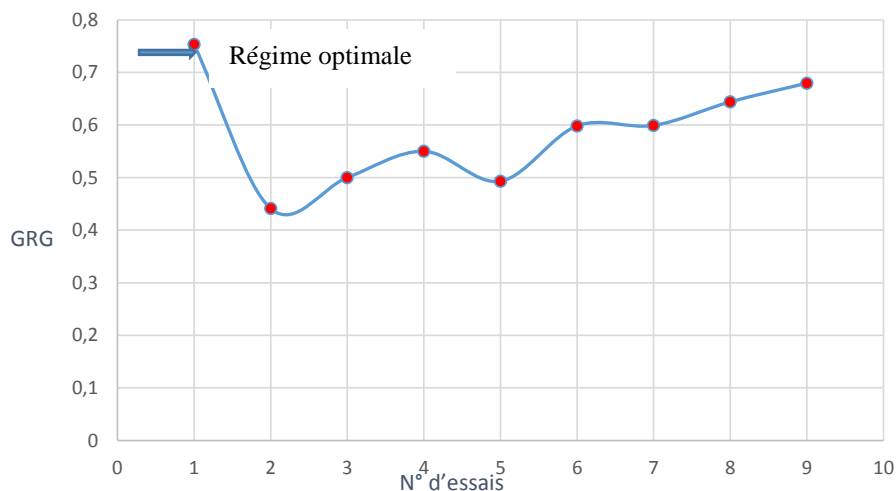
La plus grande valeur de (Grey Relational Grade) est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale ( $x_0(k)$ ) et la séquence donnée ( $x_i(k)$ ). La séquence idéale ( $x_0(k)$ ) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel

(Relational Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale.

La qualité grise (GRG) et son ordre sont donnés dans le [tableau IV.12](#). Selon le [tableau IV.12](#) et la [figure IV.5](#), la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 1 a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que l'expérience 1 est la combinaison des paramètres optimaux qui donne simultanément une rugosité de surface minimale, l'effort de coupe minimale, puissance de coupe minimale et un débit de matière enlevé maximum.

**Tableau IV.12** Qualité Grise GRG et son ordre

| N° d'essais  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>GRG</b>   | 0,753 | 0,441 | 0,500 | 0,550 | 0,493 | 0,598 | 0,599 | 0,644 | 0,680 |
| <b>Ordre</b> | 1     | 9     | 7     | 6     | 8     | 5     | 4     | 3     | 2     |



**Figure IV.5** Qualité Relationnelle Grise (GRG)

## IV.4 Optimisation par la fonction désirabilité

### IV.4.1 Introduction

En raison de sa simplicité, de sa flexibilité de pondération et de sa disponibilité dans les logiciels statistiques, la méthode de la fonction de désirabilité est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour l'optimisation multi-objective réactive [38]. La désirabilité permet

d'évaluer le pourcentage de satisfaction associé à un objectif fixé à partir des réponses calculées par un modèle statistique.

L'optimisation des réponses à l'aide de la méthode de surface de réponse (**RSM**) permet d'identifier les combinaisons de paramètres de variables d'entrée qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. L'optimisation des réponses multiples est une méthode qui permet un compromis entre différentes réponses, grâce à la fonction de désirabilité « **DF** », qui permet de collecter des données avec une fonction de désirabilité de base « **di** » variant entre 0 et 1. Normes pour différentes unités. Une valeur de désirabilité de base de 0 indique une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, tandis qu'une valeur de désirabilité de 1 indique une situation idéale. Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, la fonction objective  $F(x)$  est définie comme suit [39] :

$$DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad (\text{IV.10})$$

$$F(x) = -DF \quad (\text{IV.11})$$

Où :

**di** est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et **wi** est la fonction de pondération de di. Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité **di** est définie dans différentes formes.

Si le but est de réaliser une valeur **Ti** spécifique, la désirabilité **di** est donnée par :

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad (\text{IV.12})$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq \text{sup}_i \quad (\text{IV.13})$$

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Pour un objectif de trouver « un maximum » la désirabilité est montrée comme suite :

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.14})$$

$$d_i = 1 \text{ Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Pour un objectif de rechercher « Un minimum » la désirabilité peut être définies par les formules suivantes :

$$d_i = 1 \text{ Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{\text{sup}_i - Y_i}{\text{sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad \text{(IV.14)}$$

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Donc, l'objectif de notre étude est de choisir « un réglage optimal » qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF, C'est-à-dire minimisé F(x).

#### IV.4.2 Cas d'optimisation étudiés

Dans notre étude, on s'est intéressé à trois cas d'optimisation

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

Ce cas d'étude est réservé à une optimisation qui cherche une qualité maximale. Le [tableau IV.13](#) présente les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, l'importance affecté à chaque paramètre. On a donné l'importance maximale à la rugosité de surface (Ra) (**5+**), tout en gardant l'effort de coupe (Fz), la puissance (Pc) et le débit de matière enlevé (MRR) à un bas niveau d'importance (**1+**).

**Tableau IV.13** But et gamme de paramètres pour le 1er cas d'optimisation

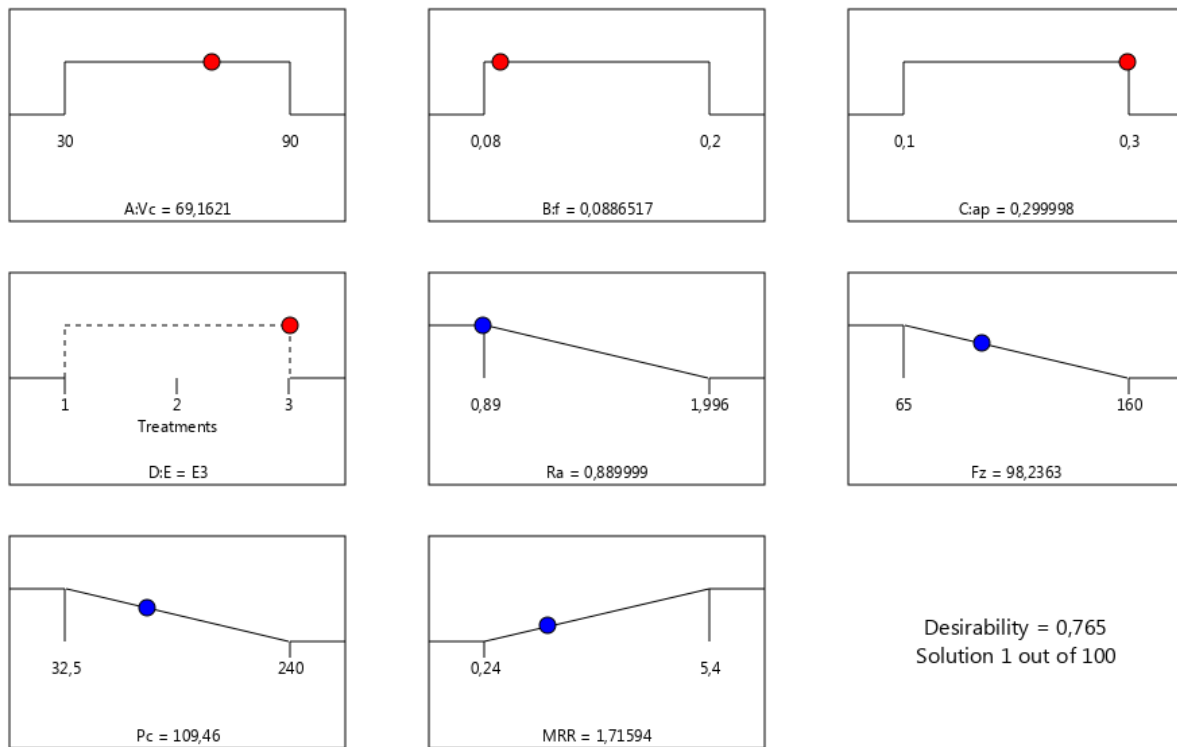
| Nome   | but                   | Limite inférieure | Limite supérieure | Poids inférieur | Poids supérieur | Importance |
|--------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------|
| A : Vc | Est dans l'intervalle | 30                | 90                | 1               | 1               | 3          |
| B : f  | Est dans l'intervalle | 0,08              | 0,2               | 1               | 1               | 3          |
| C : ap | Est dans l'intervalle | 0,1               | 0,3               | 1               | 1               | 3          |
| D : E  | Est dans l'intervalle | E1                | E3                | 1               | 1               | 3          |
| Ra     | minimiser             | 0,89              | 1,996             | 1               | 1               | <b>5</b>   |
| Fz     | minimiser             | 65                | 160               | 1               | 1               | 1          |
| Pc     | minimiser             | 32,5              | 240               | 1               | 1               | 1          |
| MRR    | maximiser             | 0,24              | 5,4               | 1               | 1               | 1          |

Le [tableau IV.14](#) et la [figure IV.6](#) présentent la solution obtenue pour ce cas d'étude. On remarque que les valeurs optimales des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe (Vc),

l'environnement (E), l'avance par tour ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ), ainsi que les réponses optimisées sont consignées avec une désirabilité de **0,765**. Le régime optimal trouvé est  **$V_c = 69,162$  m/min**,  **$E=E3$** ,  **$f = 0,089$  mm/tr** et  **$a_p = 0,300$  mm**, la rugosité prend une valeur minimale de  **$R_a = 0,890$   $\mu\text{m}$** , l'effort tangentiel  **$F_z = 98,236$  N**, la puissance  **$P_c = 109,460$  W** et le débit de matière enlevée  **$MRR = 1,716$   $\text{cm}^3/\text{min}$** . Ce cas d'optimisation est recherché lorsque la qualité de surface est demandée en premier lieu, surtout pour les opérations de finition.

**Tableau IV.14** Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 1er cas d'optimisation

|   | $V_c$  | $f$   | $a_p$ | E  | $R_a$ | $F_z$  | $P_c$   | MRR   | Désirabilité |
|---|--------|-------|-------|----|-------|--------|---------|-------|--------------|
| 1 | 69,162 | 0,089 | 0,300 | E3 | 0,890 | 98,236 | 109,460 | 1,716 | 0,765        |

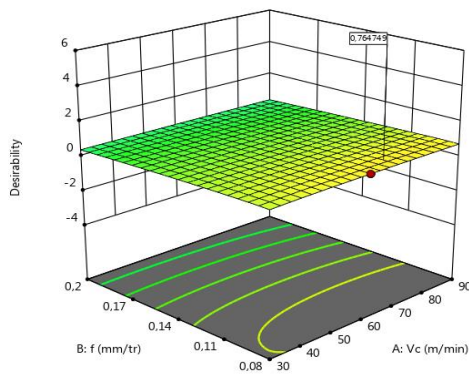


**Figure IV.6** Diagramme des rampes pour le 1<sup>er</sup> cas d'optimisation

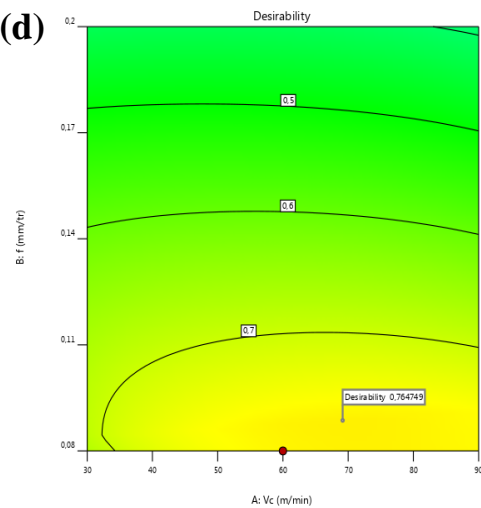
La [figure IV.7](#) (a, b, c) montre le domaine de la valeur maximale de la désirabilité en fonction de la variation des valeurs des paramètres d'usinage ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) et les contours en 2D ([d](#), [e](#), [f](#)). Ces contours permettent de trouver facilement la valeur de la désirabilité en fonction du choix de deux facteurs d'usinage. La [figure IV.7.a](#) montre le graphe 3D de la désirabilité en

fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ), ( $f$ ). Le graphique montre que la faible valeur de l'avance et la valeur entre 60 m/min et 70 m/min de la vitesse de coupe contribuent à une valeur maximale de désirabilité. La [figure IV.7.b](#) présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs ( $V_c$ ), ( $ap$ ). On remarque que la valeur maximum de désirabilité correspond à une valeur maximale de ( $ap$ ) et la valeur entre 60 m/min et 70 m/min de la vitesse de coupe. La [figure IV.7.c](#) présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs ( $f$ ), ( $ap$ ). On remarque que la valeur maximum de désirabilité correspond à une valeur minimale de ( $f$ ) et à une valeur comprise entre 0,25 mm et 0,3 mm de ( $ap$ ).

(a)



(d)



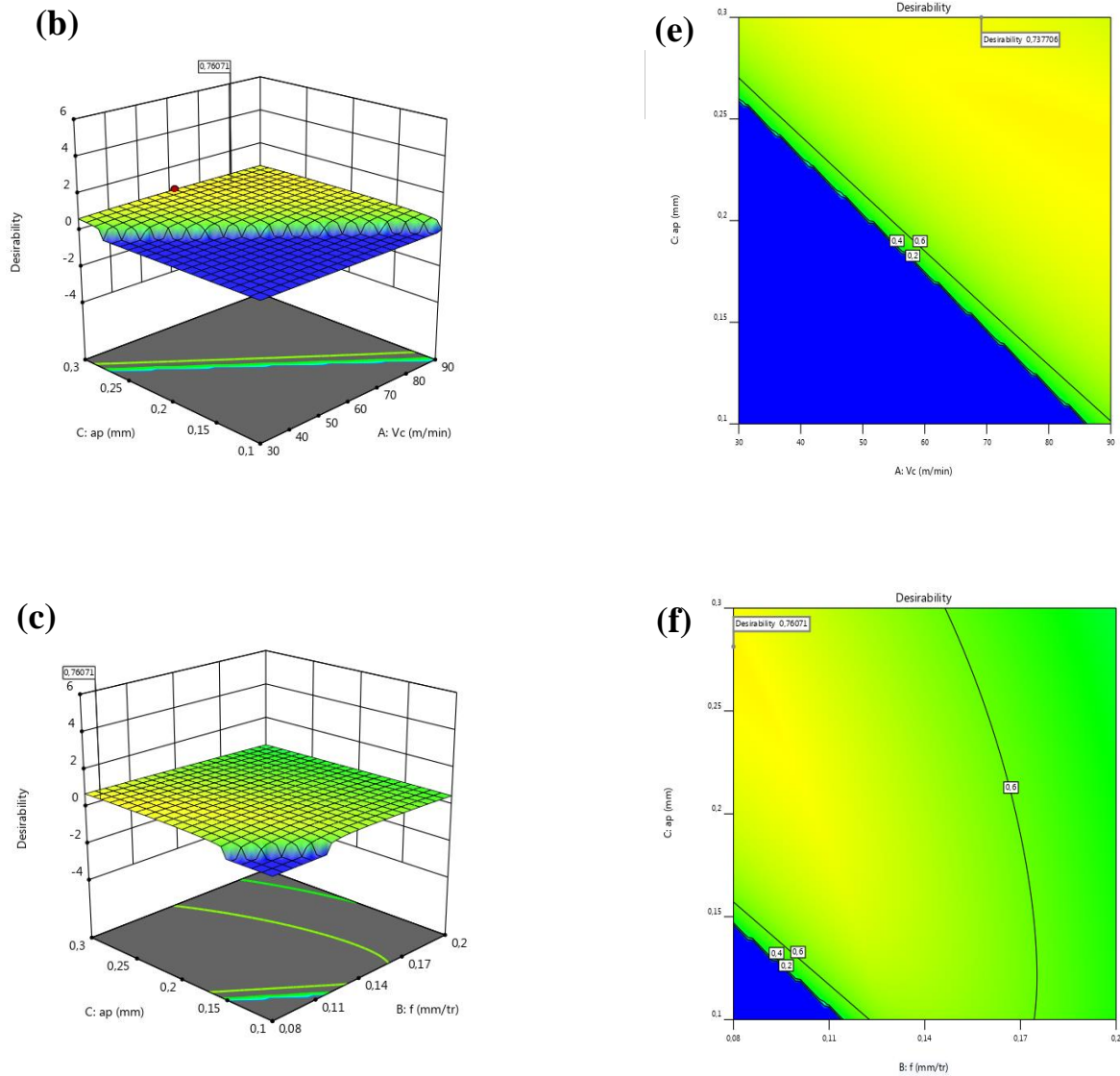


Figure IV.7 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 1er cas

## 2<sup>eme</sup> cas : Minimisation de l'effort et la consommation d'énergie

Ce cas d'étude se concentre sur une optimisation qui cherche le minimum d'effort de coupe et la puissance de coupe simultanément. Le [tableau IV.15](#) montre les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, l'importance affecté à chaque paramètre. On a donné l'importance maximale à l'effort de coupe ( $F_z$ ) et la puissance ( $P_c$ ) (**5+**), tout en gardant la rugosité de surface ( $R_a$ ) et le débit de matière enlevée ( $MRR$ ) à son bas niveau (**1+**). Ce cas d'optimisation est recherché lorsque la consommation d'énergie est demandée en premier lieu

avec un effort de coupe faible. Ce cas d'optimisation est intéressant lorsque le coût d'usinage réduit est demandé.

**Tableau IV.15** But et gamme de paramètres pour le 2<sup>ème</sup> cas d'optimisation

| Nome   | but                   | Limite inférieure | Limite supérieure | Poids inférieur | Poids supérieur | Importance |
|--------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------|
| A : Vc | Est dans l'intervalle | 30                | 90                | 1               | 1               | 3          |
| B : f  | Est dans l'intervalle | 0,08              | 0,2               | 1               | 1               | 3          |
| C : ap | Est dans l'intervalle | 0,1               | 0,3               | 1               | 1               | 3          |
| D : E  | Est dans l'intervalle | E1                | E3                | 1               | 1               | 3          |
| Ra     | minimiser             | 0,89              | 1,996             | 1               | 1               | 1          |
| Fz     | minimiser             | 65                | 160               | 1               | 1               | <b>5</b>   |
| Pc     | minimiser             | 32,5              | 240               | 1               | 1               | <b>5</b>   |
| MRR    | maximiser             | 0,24              | 5,4               | 1               | 1               | 1          |

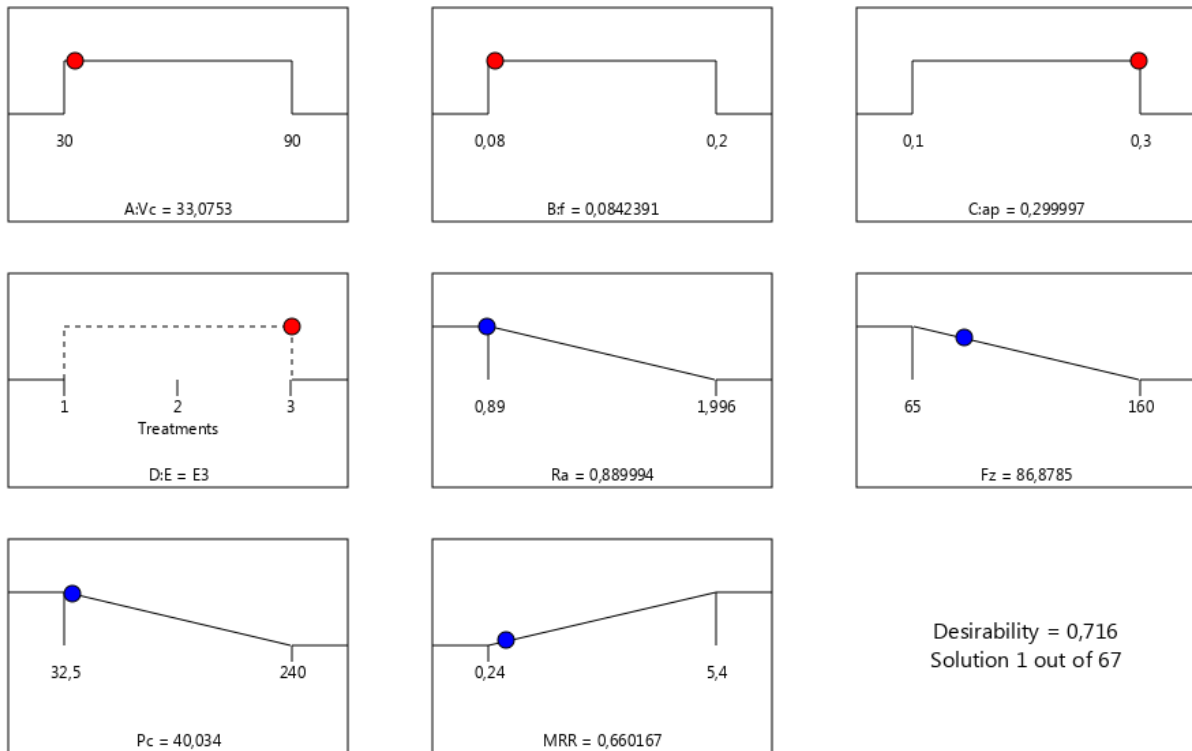
Le [tableau IV.16](#) et la [figure IV.8](#) présentent les solutions obtenues pour ce cas d'étude. Il est clair que les valeurs optimales des paramètres de coupe telles que la vitesse de coupe (Vc), l'environnement (E), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap), ainsi que les réponses optimisées sont consignées dans Le [tableau IV.15](#) et la [figure IV.7](#), avec une désirabilité de **0,716**. Le régime optimal trouvé est **Vc = 33,075 m/min, E=E3, f = 0,084 mm/tr** et **ap = 0,300 mm**. La puissance (Pc) a pris une valeur minimale de **40.034 W**, l'effort tangentiel **Fz = 86,879**



N, la rugosité a pris une valeur de **0,890  $\mu\text{m}$**  et le débit de la matière enlevée, **MRR=0,660  $\text{cm}^3/\text{min}$** .

**Tableau IV.16** Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 2<sup>ème</sup> cas d'optimisation

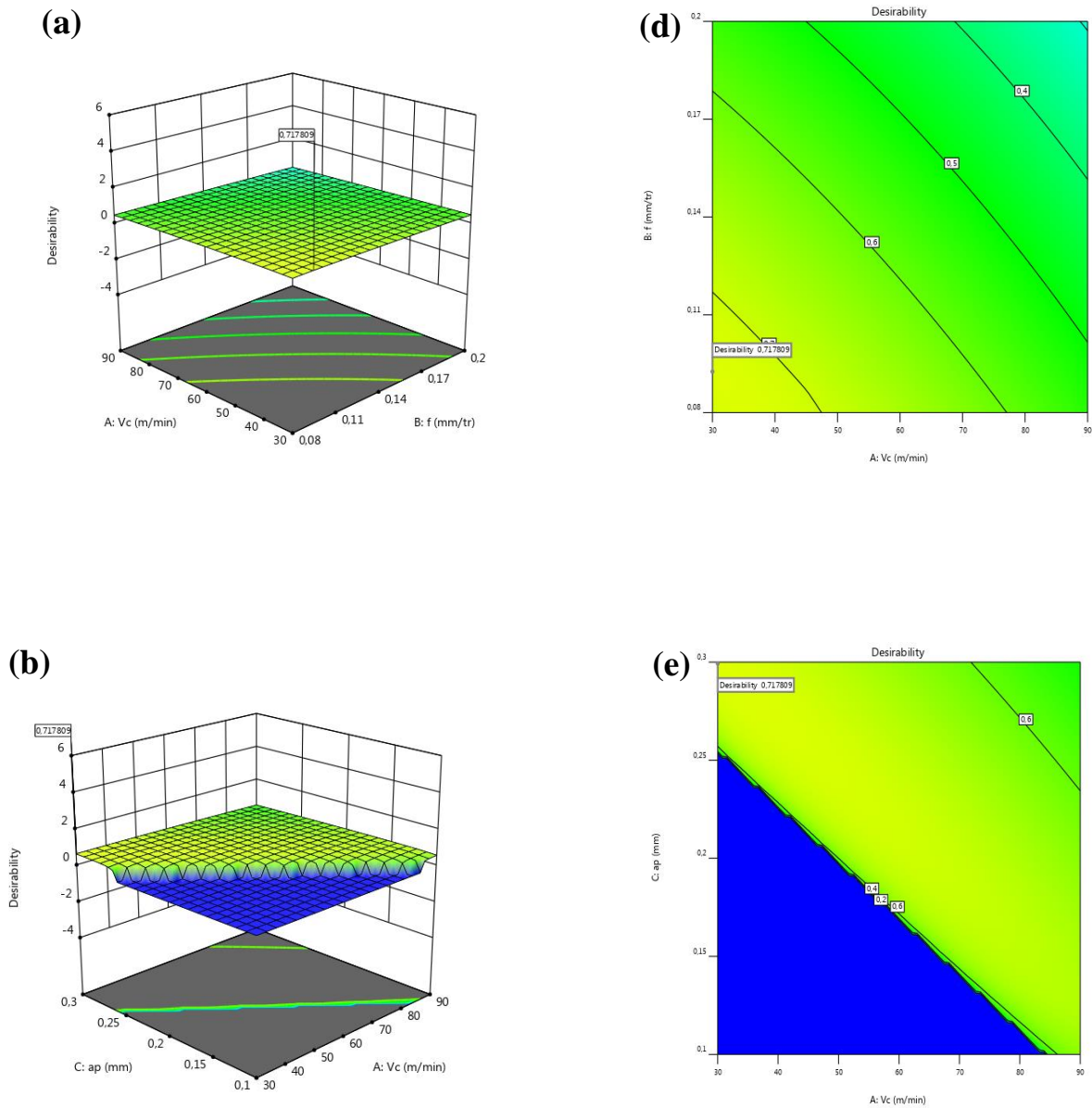
|   | Vc     | f     | ap    | E  | Ra    | Fz     | Pc     | MRR   | Désirabilité |
|---|--------|-------|-------|----|-------|--------|--------|-------|--------------|
| 1 | 33,075 | 0,084 | 0,300 | E3 | 0,890 | 86,879 | 40,034 | 0,660 | 0,716        |



**Figure IV.8** Diagramme des rampes pour le 2<sup>ème</sup> cas d'optimisation

La [figure IV.9 \(a, b, c\)](#) montre le domaine de la valeur maximale de la désirabilité en fonction de la variation des valeurs des paramètres d'usinage (Vc, f et ap) et les contours en 2D ([d, e, f](#)). Ces contours permettent de trouver facilement la valeur de la désirabilité en fonction du choix de deux facteurs d'usinage. La [figure IV.9.a](#) montre le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (Vc), (f). Le graphique montre que la faible valeur de la vitesse de coupe et la valeur entre 0.08 mm/tr et 0.11 mm/tr de l'avance de coupe contribuent à

une valeur maximale de désirabilité. La [figure IV.9.b](#) présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (Vc), (ap). On remarque que la valeur maximum de désirabilité correspond à une valeur maximale de (ap) et à une valeur minimale de (Vc). La [figure IV.9.c](#) présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (f), (ap). On remarque que la valeur maximum de désirabilité correspond à une valeur maximale de (ap) et à une valeur comprise entre 0,08 mm/tr et 0,11 mm/tr de (f).



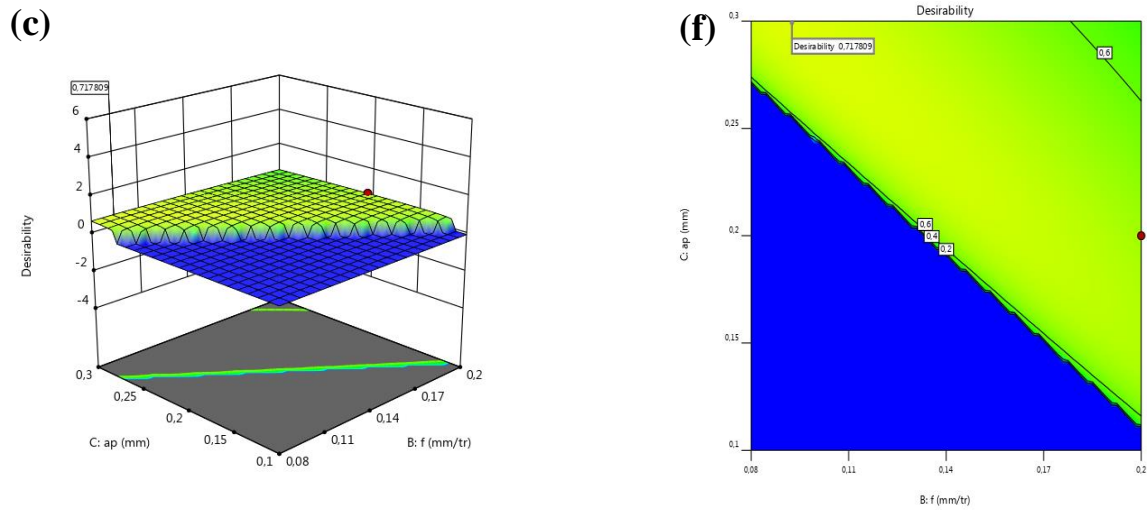


Figure IV.9 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 2<sup>ème</sup> cas

### 3<sup>ème</sup> cas : Productivité maximale

Ce cas d'étude est réservé à une optimisation qui cherche une productivité maximale. Le [tableau IV.17](#) présente les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, l'importance affecté à chaque paramètre. On a donné l'importance maximale au débit de la matière enlevée (MRR) (5+), tout en gardant l'effort de coupe (Fz), la puissance (Pc) et la vitesse de coupe (Vc) à un bas niveau d'importance (1+).

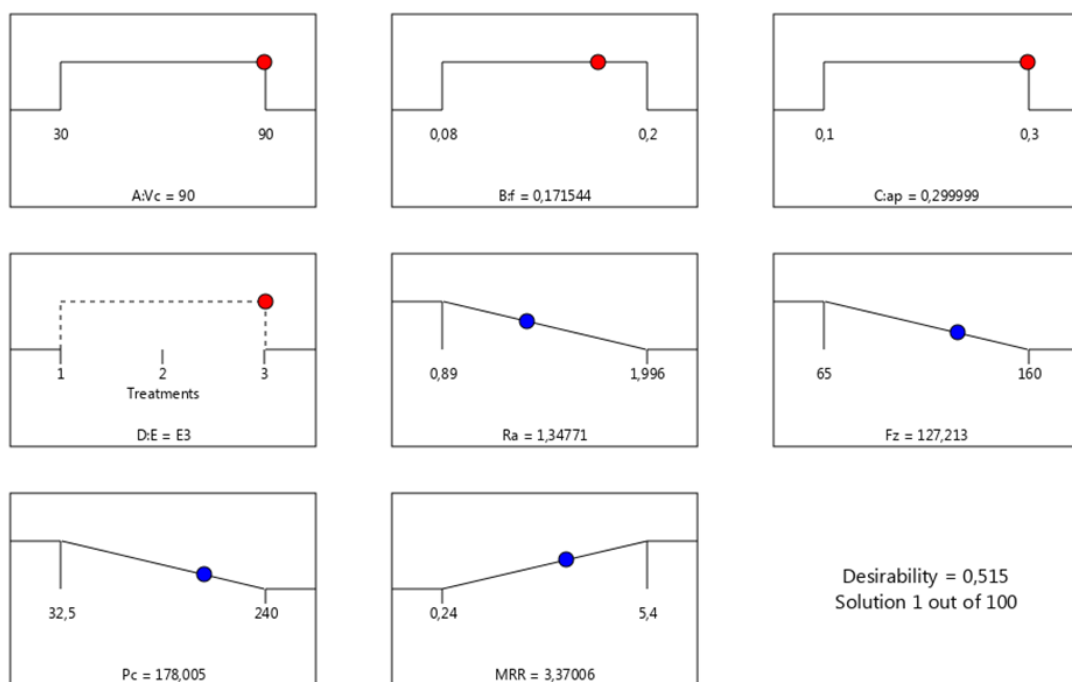
**Tableau IV.17** But et gamme de paramètres pour le 3<sup>ème</sup> cas d'optimisation

| <b>Nome</b>   | <b>but</b>            | <b>Limite inférieure</b> | <b>Limite supérieure</b> | <b>Poids inférieur</b> | <b>Poids supérieur</b> | <b>Importance</b> |
|---------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| <b>A : Vc</b> | Est dans l'intervalle | 30                       | 90                       | 1                      | 1                      | 3                 |
| <b>B : f</b>  | Est dans l'intervalle | 0,08                     | 0,2                      | 1                      | 1                      | 3                 |
| <b>C : ap</b> | Est dans l'intervalle | 0,1                      | 0,3                      | 1                      | 1                      | 3                 |
| <b>D : E</b>  | Est dans l'intervalle | E1                       | E3                       | 1                      | 1                      | 3                 |
| <b>Ra</b>     | minimiser             | 0,89                     | 1,996                    | 1                      | 1                      | <b>1</b>          |
| <b>Fz</b>     | minimiser             | 65                       | 160                      | 1                      | 1                      | 1                 |
| <b>Pc</b>     | minimiser             | 32,5                     | 240                      | 1                      | 1                      | 1                 |
| <b>MRR</b>    | maximiser             | 0,24                     | 5,4                      | 1                      | 1                      | <b>5</b>          |

Le [tableau IV.18](#) et la [figure IV.10](#) présentent les solutions obtenues pour ce cas d'étude. Il est clair que les valeurs optimales des paramètres de coupe telles que la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'environnement ( $E$ ), l'avance par tour ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $ap$ ), ainsi que les réponses optimisées sont consignées dans Le [tableau IV.6](#) et la [figure IV.5](#), avec une désirabilité de 0,515. Le régime optimal trouvé est  $V_c = 90\text{m/min}$ ,  $E=E3$ ,  $f = 0,172\text{ mm/tr}$  et  $ap = 0,300\text{ mm}$ . La puissance ( $P_c$ ) a pris une valeur minimale de 178,005 W, l'effort tangentiel  $F_z = 127,213\text{ N}$ , la rugosité a pris une valeur de  $1,348\text{ }\mu\text{m}$  et le débit de la matière enlevée,  $MRR=3,370\text{ cm}^3/\text{min}$

**Tableau IV.18** Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 3<sup>ème</sup> cas d'optimisation

|   | Vc     | f     | ap    | E  | Ra    | Fz      | Pc      | MRR   | Désirabilité |
|---|--------|-------|-------|----|-------|---------|---------|-------|--------------|
| 1 | 90,000 | 0,172 | 0,300 | E3 | 1,348 | 127,213 | 178,005 | 3,370 | 0,515        |

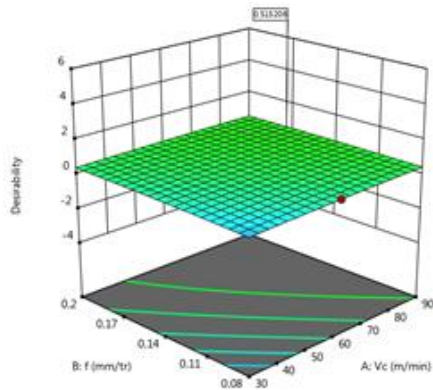


**Figure IV.10** Diagramme des rampes pour le 3<sup>ème</sup> cas d'optimisation

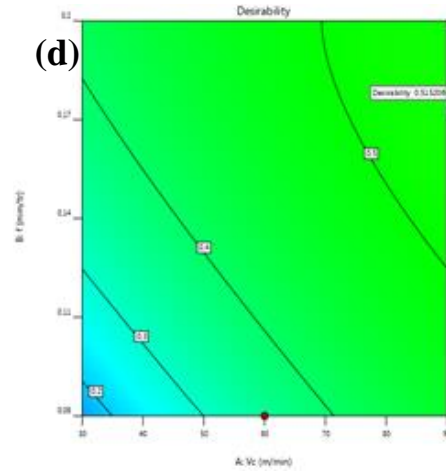
La figure IV.11 (a, b, c) montre le domaine de la valeur maximale de la désirabilité en fonction de la variation des valeurs des paramètres d'usinage (Vc, f et ap) et les contours en 2D (d, e, f). Ces contours permettent de trouver facilement la valeur de la désirabilité en fonction du choix de deux facteurs d'usinage. La figure IV.11.a montre le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (Vc), (f). Le graphique montre que la grande valeur de la vitesse de coupe 90 m/min et la valeur entre 0.17 mm/tr et 0.2 mm/tr de l'avance de coupe contribuent à une valeur maximale de désirabilité. La figure IV.11.b présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (Vc), (ap). On remarque que la valeur maximum de désirabilité correspond à une valeur maximale de (ap) et à une valeur maximale de (Vc). La figure IV.11.c présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation

des facteurs ( $f$ ), ( $ap$ ). On remarque que la valeur maximum de désirabilité correspond à une valeur maximale de ( $ap$ ) et à une valeur 0,17 mm/tr de ( $f$ ).

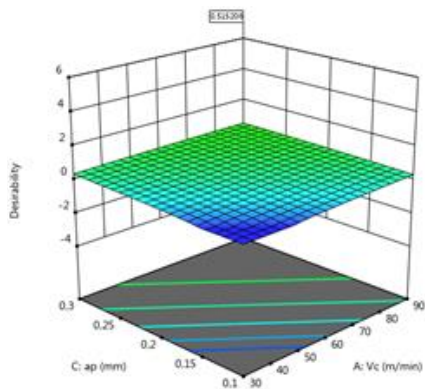
(a)



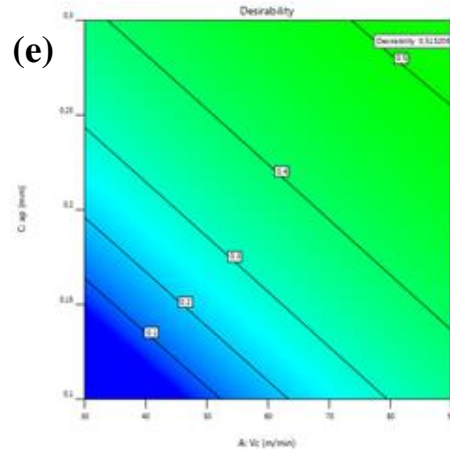
(d)



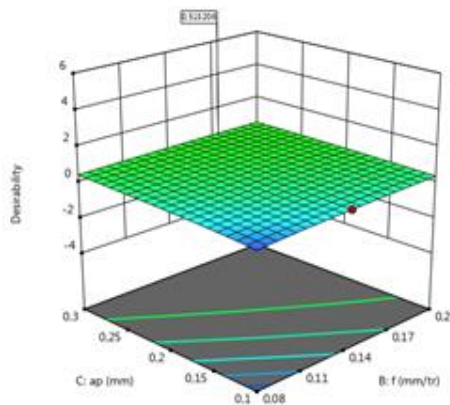
(b)



(e)



(c)



(f)

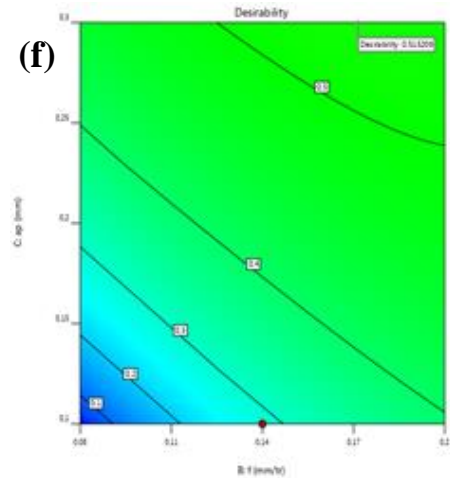


Figure IV.11 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 3<sup>ème</sup> cas

**4<sup>émet</sup> cas: Optimisation combiné**

Ce dernier cas est réservé à une optimisation combinée. Le [tableau IV.19](#) montre les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, l'importance affecté à chaque paramètre. On a donné l'importance maximale (+5) à tous les paramètres (Ra), (Fz), (Pc) et (MRR).

**Tableau IV.19** But et gamme de paramètres pour le 4<sup>émet</sup> cas d'optimisation

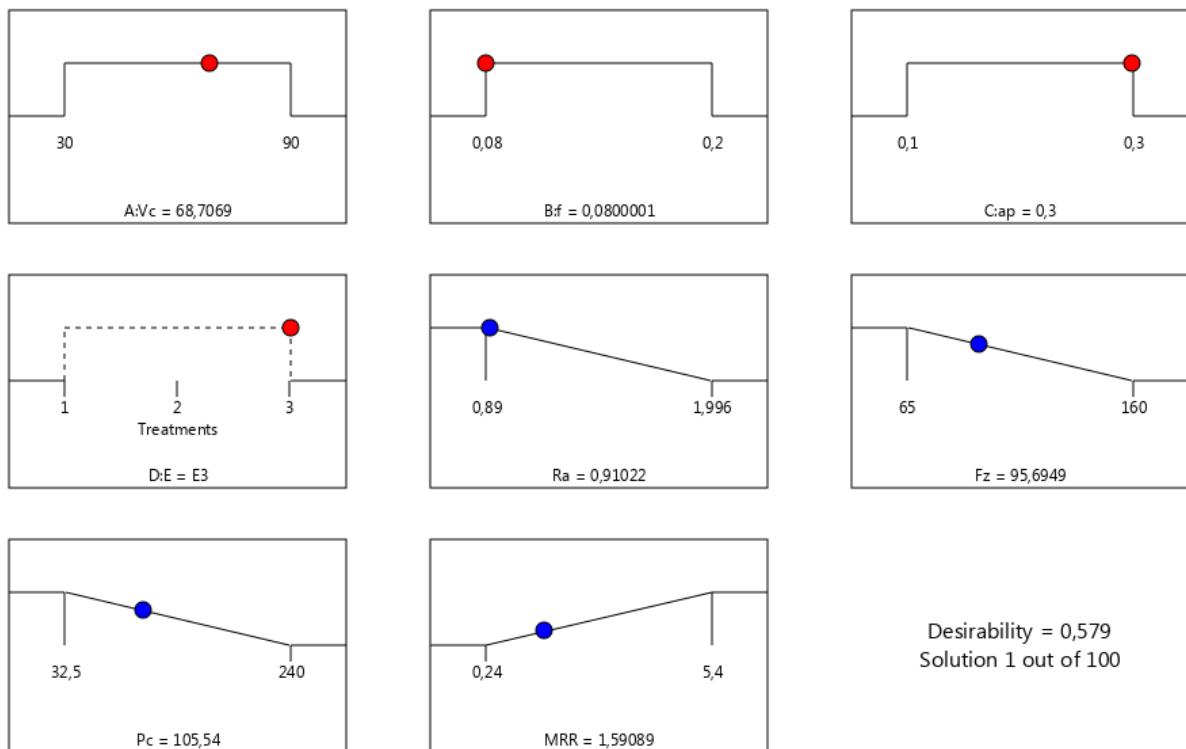
| Nome   | but                   | Limite inférieure | Limite supérieure | Poids inférieur | Poids supérieur | Importance |
|--------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------|
| A : Vc | Est dans l'intervalle | 30                | 90                | 1               | 1               | 3          |
| B : f  | Est dans l'intervalle | 0,08              | 0,2               | 1               | 1               | 3          |
| C : ap | Est dans l'intervalle | 0,1               | 0,3               | 1               | 1               | 3          |
| D : E  | Est dans l'intervalle | E1                | E3                | 1               | 1               | 3          |
| Ra     | minimiser             | 0,89              | 1,996             | 1               | 1               | <b>5</b>   |
| Fz     | minimiser             | 65                | 160               | 1               | 1               | <b>5</b>   |
| Pc     | minimiser             | 32,5              | 240               | 1               | 1               | <b>5</b>   |
| MRR    | maximiser             | 0,24              | 5,4               | 1               | 1               | <b>5</b>   |

Le [tableau IV.20](#) et la [figure IV.12](#) présentent la solution obtenue pour ce cas d'étude. On observe que les valeurs optimales des paramètres de coupe telles que la vitesse de coupe (Vc), l'environnement (E), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap), ainsi que les réponses optimisées sont consignées dans le [tableau IV.6](#) et la [figure IV.5](#) avec une désirabilité

de **0,579**. Le régime optimal trouvé est  **$V_c = 68,707$  m/min**,  **$E=E3$** ,  **$f = 0,080$  mm/tr** et  **$a_p = 0,300$  mm**, les paramètres des sorties prennent des valeurs, l'effort tangentiel  **$F_z = 95,695$  N**, la puissance  **$P_c = 105,540$  W**, la rugosité  **$R_a = 0,910$   $\mu\text{m}$**  et le débit de matière enlevée  **$MRR = 1,591$   $\text{cm}^3/\text{min}$** . Ce cas d'optimisation est recherché lorsque l'utilisateur cherche l'optimal de tous les paramètres de performance simultanément, sans aucune préférence d'un paramètre par rapport un autre.

**Tableau IV.20** Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 4<sup>ème</sup> cas d'optimisation

|   | $V_c$  | $f$   | $a_p$ | E  | $R_a$ | $F_z$  | $P_c$   | MRR   | Désirabilité |
|---|--------|-------|-------|----|-------|--------|---------|-------|--------------|
| 1 | 68,707 | 0,080 | 0,300 | E3 | 0,910 | 95,695 | 105,540 | 1,591 | 0,579        |



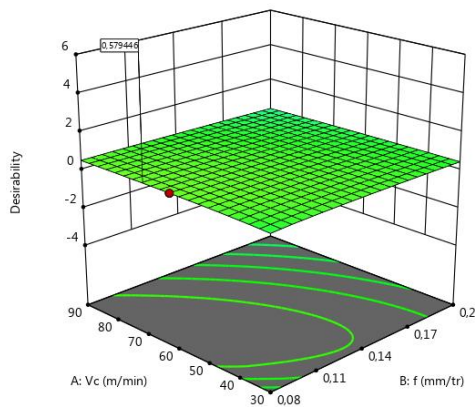
**Figure IV.12** Diagramme des rampes pour le 4<sup>ème</sup> cas d'optimisation

La figure IV.13 (a, b, c) montre le domaine de la valeur maximale de la désirabilité en fonction de la variation des valeurs des paramètres d'usinage (E,  $V_c$ , f et  $a_p$ ) et les contours en

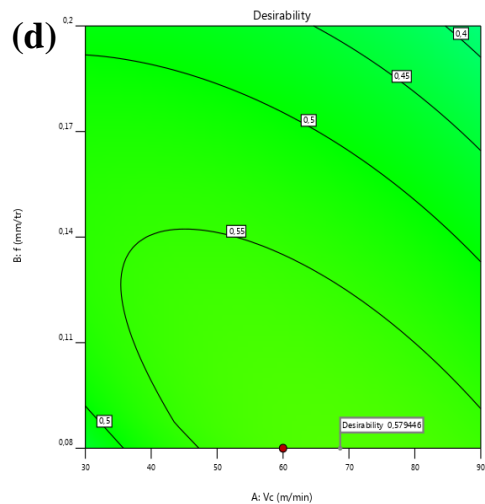


2D (d, e, f). Ces contours permettent de trouver facilement la valeur de la désirabilité en fonction du choix de deux facteurs d'usinage. La figure IV.13.a montre le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (Vc), (f). Le graphique montre que la valeur minimale l'avance et la valeur entre 60 m/min et 70 m/min de la vitesse de coupe contribuent à une valeur maximale de désirabilité. La figure IV.13.b présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (Vc), (ap). On remarque que la valeur maximum de désirabilité correspond à une valeur maximale de (ap) et à une valeur 70m/min de (Vc). La figure IV.13.c présente le graphe 3D de la désirabilité en fonction de la variation des facteurs (f), (ap). On remarque que la valeur maximum de désirabilité correspond à une valeur maximale de (ap) et à une valeur minimale de (f).

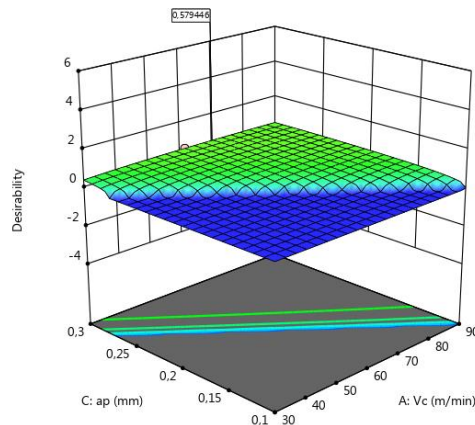
(a)



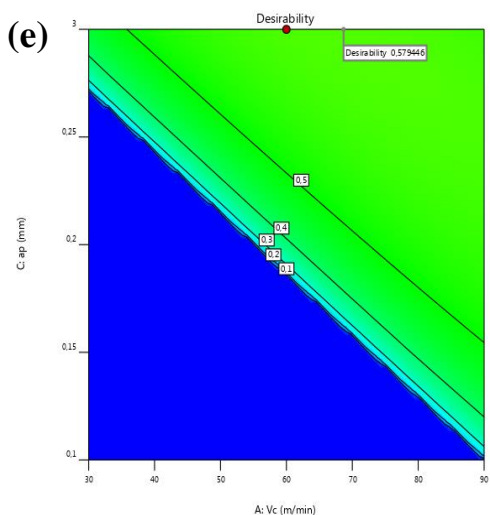
(d)



(b)



(e)



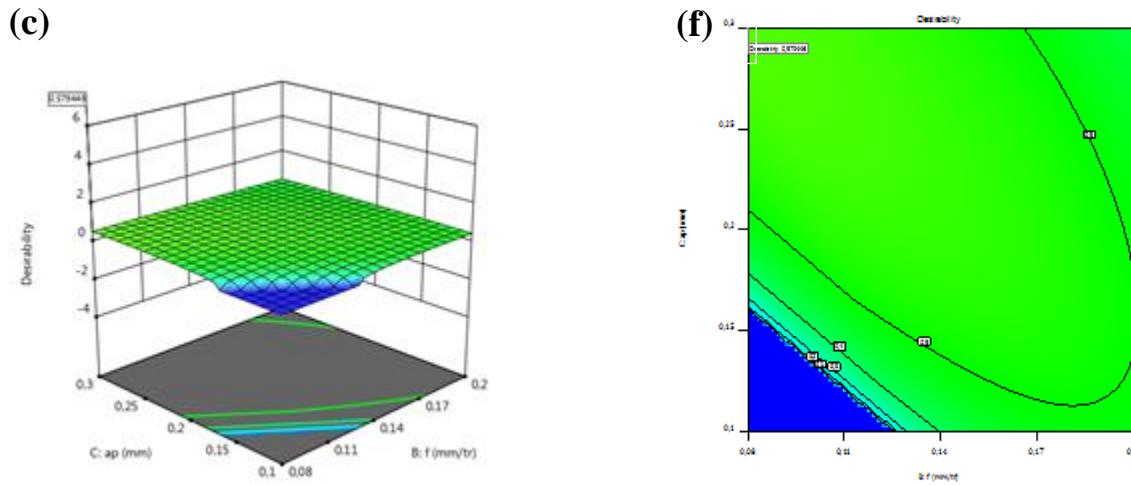


Figure IV.13 Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 4<sup>émet</sup> cas

#### IV.4.3 Récapitulative des résultats de l'optimisation par la fonction désirabilité

Le [tableau IV.21](#) récapitule les résultats de l'optimisation par la fonction désirabilité pour les quatre cas d'optimisation.

Tableau IV.21 Résultats de l'optimisation par la fonction désirabilité

|                       | Vc     | f     | ap    | E  | Ra    | Fz      | Pc      | MRR   | Désirabilité |
|-----------------------|--------|-------|-------|----|-------|---------|---------|-------|--------------|
| 1 <sup>er</sup> cas   | 69,162 | 0,089 | 0,300 | E3 | 0,890 | 98,236  | 109,460 | 1,716 | 0,765        |
| 2 <sup>éme</sup> cas  | 33,075 | 0,084 | 0,300 | E3 | 0,890 | 86,879  | 40,034  | 0,660 | 0,716        |
| 3 <sup>éme</sup> cas  | 90,000 | 0,172 | 0,300 | E3 | 1,348 | 127,213 | 178,005 | 3,370 | 0,515        |
| 4 <sup>émet</sup> cas | 68,707 | 0,080 | 0,300 | E3 | 0,910 | 95,695  | 105,540 | 1,591 | 0,579        |

#### IV.5 Comparaison des résultats de GRA et DF

Le [tableau IV.22](#) récapitule les régimes optimaux ainsi que les sorties optimisées trouvés par les deux méthodes d'optimisation (DF et GRA). L'analyse des résultats trouvée montre que les deux méthodes d'optimisation (DF et GRA) ont donné des résultats complètement différents donnent le régime de coupe suivant : (Vc= 68,707 m/min, f= 0.08mm/tr, ap= 0.3 mm pour la

méthode (DF) et  $V_c=30$  m/min,  $f=0,08$  mm/tr,  $a_p=0,1$  mm pour la méthode (GRA)). La méthode (DF) a donné des meilleurs résultats que ceux de la méthode (GRA) en termes de qualité et de productivité.

**Tableau IV.22** Comparaison des deux méthodes GRA et DF

|     | $V_c$  | $f$   | $a_p$ | E  | Ra    | Fz     | Pc      | MRR   |
|-----|--------|-------|-------|----|-------|--------|---------|-------|
| GRA | 30     | 0,08  | 0,1   | E1 | 1,150 | 65     | 32,5    | 0,24  |
| DF  | 68,707 | 0,080 | 0,300 | E3 | 0,910 | 95,695 | 105,540 | 1,591 |

#### **IV.6 Conclusion**

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

## **Conclusion générale**

L'étude expérimentale réalisée dans le cadre du projet de fin d'études porte sur l'usinage de l'Inconel 718 dans un environnement à sec et avec minimum de quantité de lubrification (MQL à l'huile soluble et MQL à l'huile complet). L'usinage a été effectué à l'aide d'une plaquette en carbure métallique GC1105 revêtue en PVD. L'objectif est de réaliser une étude statistique, de modélisation des paramètres de performances d'usinage ( $R_a$ ), ( $F_z$ ), ( $P_c$ ) et (MRR) et une optimisation des conditions de coupe. Les résultats obtenus conduisent aux conclusions suivantes :

- ✓ Les résultats de l'ANOVA montrent que l'augmentation de ( $ap$ ) et ( $f$ ) mènent à l'élévation de l'effort de coupe ( $F_z$ ) avec une contribution de **42,32%** pour ( $ap$ ) et **23,76%** pour ( $f$ ). Le facteur suivant influençant ( $F_z$ ) est l'environnement (E) avec une contribution de **22.01%**. L'augmentation de ( $V_c$ ) cause une légère diminution de ( $F_z$ ) avec une contribution de **6,01%**.
- ✓ L'analyse ANOVA de ( $R_a$ ) révèle que ( $f$ ) est le facteur le plus important qui affecte ( $R_a$ ) avec une contribution de **64,46%**. Le deuxième facteur significatif est l'environnement (E), sa contribution de **30.05%**. Il est suivi par ( $ap$ ) avec des contributions de **3,88%**. Le facteur ( $V_c$ ) a une faible contribution sur ( $R_a$ ) **0,24%**.
- ✓ Tous les paramètres de coupe (E,  $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ ) ont une influence sur ( $P_c$ ). Mais ( $V_c$ ) possède la plus grande influence avec **62,20%**. Elle est suivie par l'environnement (E) avec une contribution de **14,47%** et la profondeur de passe ( $ap$ ) avec une contribution de **13.30%**. Le dernier facteur affectant ( $P_c$ ) est l'avance ( $f$ ), sa contribution est **8,82%**.
- ✓ Les modèles mathématiques basés sur la méthode (RSM) pour les paramètres de sortie ( $F_z$ ), ( $R_a$ ) et ( $P_c$ ) sont précis et possèdent un  $R^2$  de **94.10%**; **98,64%** et **96,78%** respectivement. Ces modèles sont très utiles pour l'étape d'optimisation.
- ✓ L'optimisation mono-objective réalisée dans ce travail est basée sur la méthode de Taguchi (S/N), les régimes optimaux :
  - **Minimisation de ( $F_z$ )** : (E3,  $V_{c1}$ ,  $f_1$  et  $ap_1$ ) ; E=E3 (MQL à l'huile complet),

---

## *Conclusion générale*

---

$V_c = 30 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$  et  $a_p = 0,1 \text{ mm}$ .

- **Minimisation de (Pc)** : (E3,  $V_{c1}$ ,  $f_1$  et  $a_{p1}$ ) ; E=E3 (MQI à l'huile complet),  
 $V_c = 30 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$  et  $a_p = 0,1 \text{ mm}$ .
  - **Minimisation de (Ra)** : (E3,  $V_{c3}$ ,  $f_1$ ,  $a_{p1}$ ) ; E=E3 (MQI à l'huile complet),  $V_c = 90 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$  et  $a_p = 0,1 \text{ mm}$ .
  - **Maximisation de (MRR)** : (E1,  $V_{c3}$ ,  $f_3$ ,  $a_{p3}$ ) ; E=E1 (usinage à sec),  
 $V_c = 90 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,20 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 0,3 \text{ mm}$ .
- ✓ L'optimisation multi-objective réalisée par la méthode (GRA) montre que le régime optimal obtenu pour la minimisation de (Fz), (Pc), (Ra) et la maximisation du (MRR) simultanément correspondant à l'essai N°1, la combinaison optimale est : E=E1 (usinage à sec),  $V_c = 30 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 0,1 \text{ mm}$ .
- ✓ L'optimisation multi-objective réalisée par la fonction de désirabilité montre que les régimes optimaux obtenus pour la minimisation de (Fz), (Pc), (Ra) et la maximisation de (MRR) sont :
- **1<sup>er</sup> cas** : Qualité maximale
    - E=E3,  $V_c = 69,162 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,089 \text{ mm/tr}$  et  $a_p = 0,300 \text{ mm}$ .
  - **2<sup>ème</sup> cas** : Minimisation de l'effort et la consommation d'énergie
    - E=E3,  $V_c = 33,075 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,084 \text{ mm/tr}$  et  $a_p = 0,300 \text{ mm}$ .
  - **3<sup>ème</sup> cas** : Productivité maximale
    - E= E3,  $V_c = 90 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,172 \text{ mm/tr}$  et  $a_p = 0,300 \text{ mm}$ .
  - **4<sup>ème</sup> cas**: Optimisation combiné
    - E= E3,  $V_c = 68,707 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,080 \text{ mm/tr}$  et  $a_p = 0,300 \text{ mm}$ .

# Perspectives

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

- Faire une investigation sur les effets des différents environnements en ajoutant les nano particules au fluide de coupe sur les paramètres technologiques de sortie
- L'application des autres méthodes d'optimisation telle que (DEAR, TOPSIS, MOORA et WASPAS).

# Références bibliographiques

- [1] Rocardier. Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie, (2011).
- [2] Chabbi. A. Modélisation et optimisation des paramètres d'usinage lors du tournage du polyacétal POM, Thèse de doctorat en Mécanique, université 08 mai 1945, Guelma,(2018).
- [3] B. Gruber. Outillage et mesure. Dunod 2ème Edition, Lausanne, 51-63, (1981).
- [4] A. Czaplicki. L'usinabilité et la coupe des métaux : revue de la Société Royale Belgedes Ingénieurs et des Industries, 12, 708 – 736, (1962).
- [5] Zaidi Ahmed. Contribution A L'étude De L'usinage Des Matériaux Polymères, Mémoire Magister en Mécanique des matériaux, université 08 mai 1945, Guelma, (2013).
- [6] Alain Passeron. Tournage, Techniques de L'Ingénieur, BM7086, (1997).
- [7] Y. Schoefs, S. Fournier, and J. C. Leon. Productique mécanique. Edition Delagrave.France, (1994).
- [8] Thèse de doctorat. Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA. Présentée par : ZERTI Oussama. Directeur de thèse : Pr. YALLESE Mohamed Athmane 2018.
- [9] Regnier, T. (2018). Analyses expérimentales et modélisation de la formation de bavures dans l'alliage AISi7Mg0, 3+ 0, 5Cu–Application en coupe orthogonale et en fraisage (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).
- [10][https://www.kistler.com/fr/glossaire/terme/effort-de-coupe/#:~:text=L'effort%20de%20coupe%20est,\(souvent%20%C3%A0%20commande%20num%C3%A9rique\)](https://www.kistler.com/fr/glossaire/terme/effort-de-coupe/#:~:text=L'effort%20de%20coupe%20est,(souvent%20%C3%A0%20commande%20num%C3%A9rique).). [Consulté le 19 Mars 2022]
- [11] Wagner, V., Vissio, A., Chanal, H., & Duc, E. (2012). Etude de la relation entre les conditions de coupe et la morphologie des copeaux en fraisage de l'aluminium 2050.
- [12] Safi, K., Yallese, MA, Belhadi, S. et Mabrouki, T. (2022). Usure de l'outil, topographie de surface 3D et analyse comparative des techniques d'optimisation GRA, MOORA, DEAR et WASPAS dans le tournage de l'acier à outils pour travail à froid. Le Journal international des technologies de fabrication avancées, 1-21.

[13] <https://metalblog.ctif.com/2022/12/19/inconel/>.

[14] Revaud, M. (2013). *Optimisation métallurgique du superalliage à base de Nickel 718 Plus* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris).

[15] <https://sp.yimg.com/xj/th?id=OIP.Mba71b9b7b78cfbe27249faf01f6aa6d4o0&pid=15.1&P=0&w=300&h=300>.

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

[Consulté le 06 mai 2022]

[17] Anand, A., Behera, AK, & Das, SR (2019). Un aperçu sur l'usinage économique des aciers trempés par tournage dur et ses variables de processus. *Revue de fabrication*, 6, 4.

[18] 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.

[19] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/mise-en-formedes-materiaux-par-usinage-42510210/assistance-cryogenique-en-usinage-bm7036/principe-de-lassistance-cryogenique-en-usinage-et-techniques-associees-bm7036niv10001.html> [Consulté le 18 mai 2022]

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

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

[22] BOUZID, L. (2015). *Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13* (Doctoral dissertation).

[23] Kouahla, I., Yallese, M. A., Belhadi, S., Safi, K., & Nouioua, M. (2022). Tool vibration, surface roughness, cutting power, and productivity assessment using RSM and GRA approach



during machining of Inconel 718 with PVD-coated carbide tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(3-4), 1835-1856.

[24] Boumaza, H., "Optimization of surface roughness, tool wear and material removal rate in turning of Inconel 718 with ceramic composite tools using MCDM methods based on Taguchi methodology." *Sādhanā* 48.1 (2022) : 1.

[25] Prianka B. Zaman\*, Nazma Sultana, Nikhil Ranjan Dhar

[26] Behzad Eskandari, Sukanta Bhowmick, Ahmet Alpas et al. Turning of Inconel 718 Using Liquid Nitrogen: Multi-objective Optimization of Cutting Parameters Using RSM, 30 November 2021, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1101476/v1>].

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

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

[29] Zaman, PB, Sultana, N., & Dhar, NR (2020). Quantification des effets des conditions de refroidissement, du type d'outil et des paramètres de coupe sur l'usinabilité du tournage de l'acier AISI 4140 à l'aide d'un DOE factoriel complet. *Journal des systèmes de production et des sciences de la fabrication*, 1 (2), 23-39.

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

[31] Taguchi G, *Introduction to Quality Engineering*, Asian Productivity Organisation, Tokyo (1986).

[32] P. WIRA, *Réseaux de neurones artificiels -architectures et applications-*. Cours en Ligne, Université de Haute-Alsace, (2009).

- [33] Pal S, Sahoo K. Tribological performance optimization of electroless ni–p coatings using the Taguchi method and grey relational analysis. *Tribol let*, 28, pp. 191–201 (2007).
- [34] Noorul H.A, Marimuthu P, Jeyapaul R. Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the taguchi method. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, 37, pp. 250–255, (2008).
- [35] L. Bouzid, Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13-. Thèse de doctorat de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée. Université du 8 Mai 45 Guelma, (2015).
- [36] Dabade UA, Multi-objective Process Optimization to Improve Surface Integrity on Turned Surface of Al/SiCp Metal Matrix Composites Using Grey Relational Analysis, *Procedia CIRP*, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 7 299 – 304, 2013.
- [37] Tosun. Determination of optimum parameters for multiperformance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, 28, pp. 450–455 (2006).
- [38] M. CHAHAL, V. SINGH, R. GARG, Optimum surface roughness evaluation of dies steel H-11 with CNC milling using RSM with desirability function, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1-13 (2016).
- [39] Myers R.S, Montgomery D.C. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc.: New York, (2002).