

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



Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : DJEDID MOSTAFA KHALIL

=====

***Optimisation et modélisation des conditions
opératoires lors de l'usinage d'un alliage de
nickel avec un outil en céramique***

=====

Sous la Direction de :

Dr. KADDECHE Mounia

Dr. BELHADI Salim

Année universitaire 2021/2022

Dédicaces :

Je tiens à dédier ce travail à :

Ma chère mère pour son affection

Mon père pour son encouragement

Mes frères et sœurs et leurs enfants

A toute ma famille

A tous mes amis et mes collègues

Remerciement

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

Je tiens à remercier également mon encadreur **Dr. KADDECHE Mounia**, pour le temps qu'elle a consacré et pour les précieuses informations qu'elle m'a prodigué avec intérêt et compréhension.

Je tiens à remercier **Mr., YALLESE Mohamed Athmane**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université de Guelma,

Mes remerciements vont également au membres du jury.

J'adresse aussi mes vifs remerciements à **Dr. belhadi salim** pour m'avoir aidé et encouragé.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements à **Dr. CHIHAOUI SALIM**, qui n'a épargné ni temps ni effort pour mes aider et pour répondre à mes question.

Enfin, je remercie tout le personnel technique et administratif du département de Génie Mécanique de l'université de Guelma. Je remercie tous ceux qui ont ont contribué à l'aboutissement de ce travail de loin ou de près.

Résumé

L'alliage Inconel est généralement légendaire pour sa résistance aux réactions chimiques et sa capacité à conserver son intégrité structurelle dans des atmosphères aux températures extrêmes. L'Inconel est divisé en trois catégories : les superalliages à base de nickel, les superalliages à base de fer-nickel et les superalliages à base de cobalt.

Le superalliage Inconel 718 possède des propriétés physiques et mécaniques très strictes telles qu'une ductilité élevée. Pour ces raisons, l'usinage du superalliage Inconel 718 devient très difficile et se traduit souvent par une durée de vie très limitée. Par conséquent, il serait intéressant de trouver les plaquettes de coupe les plus performantes et la gamme de paramètres d'usinage sur laquelle ces plaquettes peuvent usiner efficacement ces alliages.

Ce travail concerne le tournage de l'Inconel 718 avec un outil de coupe en céramique composite CC670 (SNGN 120408). Ce travail est divisé en deux parties. La première partie concerne la modélisation des réponses de sortie, à savoir : la rugosité de surface (R_a, R_t, R_z), les efforts de coupe (F_a, F_r, F_v) et le taux d'enlèvement de matière (MRR), en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). L'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour évaluer l'influence des paramètres de coupe, à savoir : l'influence de la vitesse de coupe (V_c), celle de l'avance (f) et de la profondeur de passe (a_p) sur les paramètres considérés. La dernière partie du travail est réservée à l'optimisation mono-objectif et multi-objectif afin de trouver des valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport à l'objectif d'optimisation désiré. Dans ce cas, trois techniques d'optimisation ont été utilisées : la méthode de Taguchi, la fonction de désirabilité (DF) et l'analyse relationnelle grise (GRA). Les résultats montrent que la méthode Taguchi est plus efficace dans le cas d'une mono-optimisation, tandis que les méthodes GRA et DF sont plus efficaces pour l'optimisation multi-objectifs.

Mots clés : Tournage, inconel 718, Plans d'expérience, ANOVA, optimisation, Taguchi, RSM, GRA, DF.

Abstract

Inconel alloy is generally legendary for its resistance to chemical reactions and its ability to maintain structural integrity in extreme temperature atmospheres. Inconel is divided into three categories: nickel-based superalloys, iron-nickel-based superalloys and cobalt-based superalloys.

Inconel 718 superalloy has very stringent physical and mechanical properties such as high ductility. For these reasons, machining Inconel 718 superalloy becomes very difficult and often results in a very limited service life. Therefore, it would be interesting to find the best performing cutting inserts and the range of machining parameters over which these inserts can effectively machine these alloys.

This work concerns the turning of Inconel 718 with a CC670 composite ceramic cutting tool (SNGN 120408). This work is divided into two parts. The first part concerns the modeling of the output responses, namely: surface roughness (R_a , R_t , R_z), cutting forces (F_a , F_r , F_v) and material removal rate (MRR), using the response surface methodology (RSM). The analysis of variance (ANOVA) was used to evaluate the influence of the cutting parameters, namely: the influence of the cutting speed (V_c), that of the feed (f) and the depth of cut (a_p) on the parameters considered. The last part of the work is reserved for the single-objective and multi-objective optimization in order to find optimal values of the cutting parameters with respect to the desired optimization objective. In this case, three optimization techniques have been used: the Taguchi method, the desirability function (DF) and the grey relational analysis (GRA). The results show that the Taguchi method is more effective for single-objective optimization, while the GRA and DF methods are more effective for multi-objective optimization.

Keywords: Turning, inconel 718, Experimental plans, ANOVA, optimization, Taguchi, RSM, GRA, DF.

Index des Figures

Chapitre 1

Etude bibliographique sur les phénomènes régissant le processus de coupe

Figure I. 1: Disposition des matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté.	4
Figure I. 2: Matériau de l'outil de coupe basé sur les paramètres de coupe	4
Figure I. 3: Géométrie des outils de coupe	5
Figure I. 4: Les principales zones de cisaillement	5
Figure I. 5: Profil de rugosité filtré avec une ligne moyenne, le pic à la vallée est de 10	7
Figure I. 6: Étapes du calcul de Ra	7
Figure I. 7: Paramètres Rt, Rp et Rv	8
Figure I. 8: Rt et Rmax Paramètres	8
Figure I. 9: Microstructures d'un superalliage à différentes échelles	9
Figure I. 10: Illustration de la distribution des matériaux utilisés dans le moteur Trent 800 .	10
Figure I. 11: Graphique des effets principaux de Fa	13
Figure I. 12: Graphique des effets principaux de Fr	13
Figure I. 13: Graphique des effets principaux de Fz	14
Figure I. 14: Tracé de surface 3D (a), (b) et tracé de contours (c), (d) pour Ra	15
Figure I. 15 : Tracé normal des résidus pour Ra	16
Figure I. 16 : Comparaison entre les valeurs de Ra expérimentales et prédites avec les modèles RSM et ANN	17
Figure I. 17: Comparaison entre les valeurs de Fv expérimentales et prédites avec les modèles RSM et ANN	17
Figure I. 18: Outil en céramique avec Vc = 100 m/min	18
Figure I. 19: L'effet du chargement thermique et mécanique sur la contrainte résiduelle (a) l'effet du flux thermique sur σ_{sub} ; (b) l'effet de la force de coupe sur σ_{sub} ; (c) l'effet du flux de chaleur sur ($\sigma_{sur}-\sigma_{com}$) ; (d) l'effet de l'effort de coupe sur σ_{com}	19
Figure I. 20: L'histogramme de (a) la micro-dureté et les paramètres de coupe, et (b) la taille moyenne des grains	20
Figure I. 21: Tracé des effets principaux des rapports S/N. (a) Puissance de coupe. (b) Puissance hydraulique. (c) MRR. (d) Rugosité de surface. (e) Température de l'outil. (f) Longueur des copeaux	22

Chapitre 2

Matériau et protocole des essais

Figure II. 1 : Tour à chariotier et à fileter modèle SN40.	24
Figure II. 2: Porte outil utilisé et représentation générique	25
Figure II. 3: Plaquette de coupe utilisée en céramique cc670	25
Figure II. 4: Une barre de l'inconel 718	26
Figure II. 5: Plateforme Kistler avec interface pour la mesure des efforts de coupe.	27
Figure II. 6: Montage du dynamomètre sur la table de la machine	27
Figure II. 7: Rugosimètre(2D).	28
Figure II. 8: Interface de logiciel MiniTAB18.	28
Figure II. 9: Interface de logiciel Design Expert 12 développé par Stat-ease.	29

Chapitre 3

Résultats expérimentaux et discussions

Figure III. 1: Graphique des effets principaux pour (Ra)	35
Figure III. 2: Diagramme d'interaction pour (Ra).....	36
Figure III. 3: Graphiques des valeurs résiduelles vs prédites pour l'ajustement du modèle pour le critère de rugosité (Ra).....	37
Figure III. 4: Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Ra).....	37
Figure III. 5: Diagramme de surface 3D pour Ra en fonction de Vc, f et ap et les graphes de contour ; a) En fonction de Vc et ap; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc.	38
Figure III. 6: expose les graphiques des effets principaux pour (Rt) en fonction de conditions de coupe (Vc, f, ap).	39
Figure III. 7: Diagramme d'interaction pour (Rt).....	40
Figure III. 8: Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l'ajustement du modèle pour (Rt).....	40
Figure III. 9: Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Rt).....	40
Figure III. 10: Diagramme de surface 3D pour (Rt) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour ; a) En fonction de Vc et ap; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc	41
Figure III. 11 : Graphiques des effets principaux pour (Rz)	42
Figure III. 12: Diagramme d'interaction pour (Rz).	43
Figure III. 13: Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l'ajustement du modèle pour (Rz).	43
Figure III. 14: Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Rz).	43
Figure III. 15: Diagramme de surface 3D pour (Rz) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour a) En de Vc et ap; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc	44
Figure III. 16: Graphiques des effets principaux pour (Fa)	45
Figure III. 17: Diagramme d'interaction pour (Fa).	46
Figure III. 18: Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l'ajustement du modèle pour (Fa).	46
Figure III. 19: Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Fa).....	46
Figure III. 20: Diagramme de surface 3D pour (Fa) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour ; a) En fonction de Vc et ap; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc.	47
Figure III. 21: Graphiques des effets principaux pour (Fr).....	48
Figure III. 22: Diagramme d'interaction pour (Fr).....	49
Figure III. 23: Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l'ajustement du modèle pour (Fr).....	49
Figure III. 24: Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Fr).....	49
Figure III. 25: Diagramme de surface 3D pour (Fr) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour ; a) En fonction de Vc et ap; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc	50
Figure III. 26: Graphiques des effets principaux pour (Fv)	51
Figure III. 27: Diagramme d'interaction pour (Fv).	52
Figure III. 28: Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l'ajustement du modèle pour (Fv).	52
Figure III. 29: Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Fv).	52
Figure III. 30: Diagramme de surface 3D pour (Fv) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour ; a) En fonction de Vc et ap; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc	53
Figure III. 31: Graphiques des effets principaux pour (MRR).....	54

Figure III. 32 : Diagramme d'interaction pour (MRR).....	55
Figure III. 33: Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l'ajustement du modèle pour (MRR).....	55
Figure III. 34: Graphique valeurs prédites et mesurer pour (MRR).....	55
Figure III. 35 : Diagramme de surface 3D pour (MRR) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour ; a) En fonction de Vc et ap; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc.....	56

Chapitre 4

Optimisation par la méthode de Taguchi, L'analyse Relationnelle Grise et la fonction Désirabilité

Figure IV. 1: Graphique des effets principaux pour rapport (signal/bruit) sur (Ra).	60
Figure IV. 2: Graphique des effets principaux pour le rapport (signal/bruit) de (Fv).	61
Figure IV. 3: Graphique des effets principaux pour rapport (signal/bruit) sur le taux d'enlèvement de matière (MRR).	62
Figure IV. 4: Valeurs de la Qualité Relationnelle Grise (GRG).....	65
Figure IV. 5: Graphe de désirabilité (Surface de contours) pour le 1 ^{er} cas.	69
Figure IV. 6: Diagramme d'optimisation des réponses multiples de la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fv) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) pour le 1 ^{er} cas.	69
Figure IV. 7: Graphe de désirabilité (Surface de contours) pour le 2 ^{eme} cas.	70
Figure IV. 8 : Diagramme d'optimisation multifactorielle de la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fv) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) pour le 2 ^{eme} cas.	70
Figure IV. 9: Graphe de désirabilité (surface de contours) pour le 3 ^{eme} cas.....	71
Figure IV. 10: Diagramme d'optimisation multiples, de la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fv) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) pour le 3 ^{eme} cas.	71

Index des Tableaux

Chapitre 1

Etude bibliographique sur les phénomènes régissant le processus de coupe

Tableau I. 1: Composition de l'alliage Inconel 718 en pourcentage massique .	10
Tableau I. 2: les valeurs des paramètres de coupe	13
Tableau I. 3 : Les valeurs des conditions de coupe	14
Tableau I. 4 : Affectation des niveaux aux facteurs	15
Tableau I. 5: Les conditions de coupe adoptées	16
Tableau I. 6: Paramètres/niveaux/conditions de coupe	17
Tableau I. 7: Les facteurs et niveaux de fonctionnement variables utilisés	19
Tableau I. 8 : Les facteurs de conception et leurs niveaux	20
Tableau I. 9: Condition du fraisage de l'Inconel 718	22

Chapitre 2

Matériau et protocole des essais

Tableau II. 1: Caractéristiques géométriques des porte outils	25
Tableau II. 2: Informations relatives aux plaquettes de coupe.....	25
Tableau II. 3: Composition chimique et caractéristiques physiques de l'Inconel 718	26
Tableau II. 4: Plan taguchi L9.....	30

Chapitre 3

Résultats expérimentaux et discussions

Tableau III. 1: Plan d'expérience de 9 essais pour l'élaboration des modèles de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage pour la céramique composite CC670.	32
Tableau III. 2: L'analyse de variance ANOVA pour le critère de rugosité (Ra)	35
Tableau III. 3: ANOVA pour le critère de rugosité (Rt)	39
Tableau III. 4 : ANOVA pour le critère de rugosité (Rz).....	42
Tableau III. 5: Analyse de variance pour (Fa)	45
Tableau III. 6: Analyse de la variance ANOVA pour (Fr)	48
Tableau III. 7 : Analyse de la variance ANOVA pour (Fv).....	51
Tableau III. 8 : Analyse de la variance ANOVA pour le taux d'enlèvement de matière (MRR)	54

Chapitre 4

Optimisation par la méthode de Taguchi, L'analyse Relationnelle Grise et la fonction Désirabilité

Tableau IV. 1: Résultats expérimentaux et valeurs du S/B pour (Ra) (Fv).et des efforts et le taux d'enlèvement de matière (MRR) de coupe	59
Tableau IV. 2 : Réponses pour les rapports signal/bruit (S/B _{Ra}).....	60
Tableau IV. 3: Réponses pour les rapports signal/bruit (S/B _{Fv}).....	61
Tableau IV. 4: Réponses pour les rapports signal/bruit (S/B _{MRR}).....	62
Tableau IV. 5: Résultats expérimentaux normalisés (x_i^* (k)).....	63
Tableau IV. 6: Valeurs des Coefficients du ξ_i (k)	64
Tableau IV. 7: Niveau relationnel gris et son ordre (Grey Relational Grade (GRG)).....	64
Tableau IV. 8: Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade).....	65
Tableau IV. 9: Réponses pour la catégorie relationnelle grise (Grey Grade)	66
Tableau IV. 10: Régime optimal obtenu	66
Tableau IV. 11: Objectifs et Gamme de paramètres d'optimisation (cas 1 ^{er}).....	68
Tableau IV. 12: Réponse de la surface de rugosité et le taux d'enlèvement de matière (cas 1 ^{er}).....	68
Tableau IV. 13: Objectifs et gamme des paramètres d'optimisation (cas 2).	69
Tableau IV. 14: Réponse de la surface de rugosité et du taux d'enlèvement de matière (cas 2).....	70
Tableau IV. 15: Objectifs et gamme de paramètres d'optimisation (3 ^{eme} cas).....	71
Tableau IV. 16: Rugosité et MRR (3 ^{eme} cas).....	71

Sommaires

2011/2012

Introduction général.....	1
Chapitre I	
I. Introduction.....	2
I.1. L'usinabilité des matériaux.	2
Les critères d'usinabilité.....	2
I.1.2. Matériaux de coupe.	2
✓ Outils en Acier à au carbone.	2
✓ Outil en acier rapide (HSS).	3
✓ Outil en carbure cémenté.....	3
✓ Outil en céramique.	3
✓ Outil en nitrure du bore cubique (CBN).	3
✓ Outil en diamant.	3
I.1.3. Description du contact copeau-outil et pièce-outil.....	4
a) Géométrie des outils	4
b) Description de la racine du copeau	5
I.1.4. Rugosité des surfaces usinées	6
I.1.4.1. Les principaux défauts des surfaces	6
I.1.4.1.1 Types de défauts.....	6
I.1.4.2. Les principaux critères de rugosité	7
(1) Rugosité moyenne (Ra).....	7
(2) La rugosité moyenne quadratique RMS	7
(3) Hauteur maximale du pic du profil (Rp)	8
(4) Rugosité totale (Rt).....	8
(5) La rugosité totale (Rmax).....	8
(6) Rugosité (Rz).....	8
(7) La rugosité (Rv).....	8
I.2. Les super alliages réfractaires (Inconel)	8
I.2.1. Définition.....	8
I.2.2. Composition l'inconel 718.....	10
I.2.3. Usinabilité de l'Inconel 718.....	10
I.2.4. La famille d'inconel	11
ALLIAGE INCONEL 600.....	11
ALLIAGE INCONEL 601.....	11
ALLIAGE INCONEL 625.....	11
ALLIAGE INCONEL 693.....	11
ALLIAGE INCONEL 706.....	11
INCONEL ALLOY 718 & 718SPF	12
ALLIAGE INCONEL X-750.....	12
ALLIAGE INCONEL 751.....	12
I.3. Travaux de Recherche réalisés sur l'usinage des Super alliages Réfractaires.....	12
I.4. Conclusion	23
Chapitre II	
II.1. Introduction	24
II.2. Equipements utilisés	24
II.2.1. Machine-outil	24

II.2.2. Outils de coupe utilisés	24
II.3. Matériau à usiner	26
II.4. Appareillages de mesure utilisés	26
a) Mesure des efforts de coupe	26
b) Mesure de la rugosité.....	28
II.4.1Autres équipements.....	28
II.5. Conditions de coupe	29
II.6. Planification des expériences	29
II.6.1. Introduction.....	29
II.6.2. Méthodologie de recherche	30
II.6.3. Méthode multifactorielle	30
II.7. Débit de copeau enlever (MRR).....	31
II.8. Conclusion.....	31

Chapitre III

III.1. Introduction.....	32
III.2. Résultats de l'évolution de la rugosité et des composantes de l'effort de coupe en fonction des paramètres d'usinage.....	32
III.3. Analyse de variance et Méthodologie des surfaces de réponse	33
III.3.1. Analyse de variance (ANOVA)	33
III.3.2. Méthodologie des surfaces de réponses	33
III.4. Analyse statistique et modélisation des paramètres technologiques	35
III.4.1. Analyse des résultats de la rugosité de surface.....	35
III.4.1.1. Analyse de la variance ANOVA pour (Ra).....	35
III.4.1.2. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Ra).....	35
▪ Effet de la profondeur de passe.....	36
▪ Effet de la vitesse de coupe	36
▪ Effet de l'avance	36
III.4.1.3. Equation de régression pour (Ra)	37
III.4.1.4. Diagramme de surface 3D et graphique de contour (Ra)	37
III.4.2. Analyse de la variance ANOVA pour (Rt)	38
III.4.2.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Rt)	39
III.4.2.2. Equation de régression pour (Rt)	40
III.4.2.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Rt)	41
III.4.3. Analyse de la variance ANOVA pour (Rz).....	42
III.4.3.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Rz)	42
III.4.3.2. Equation de régression pour (Rz).....	43
III.4.3.3 Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Rz).....	44
III.4.4. Analyse de la variance ANOVA pour (Fa).....	45
III.4.4.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Fa)	45
III.4.4.2. Equation de régression pour (Fa).....	46
III.4.4.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Fa).....	47
III.4.5. Analyse de la variance ANOVA pour (Fr)	48
III.4.5.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Fr)	48
III.4.5.2. Equation de régression pour (Fr)	49
III.4.5.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Fr)	50
III.4.6. Analyse de la variance ANOVA pour (Fv).....	51
III.4.6.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Fv)	51
III.4.6.2. Equation de régression pour (Fv).....	52
III.4.6.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Fv).....	53
III.4.7. Analyse de la variance ANOVA pour le taux d'enlèvement de matière (MRR)	54

III.4.7.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interactions pour le taux d'enlèvement de matière (MRR)	54
III.4.7.2. Equation de régression pour (MRR)	55
III.4.7.3 Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (MRR)	56
III.5. Conclusion	57

Chapitre IV

IV.1. Introduction	58
IV.2. Méthode de Taguchi	58
a) <i>Le plus grand est le meilleur (Larger - the – better)</i>	58
b) <i>Le plus petit est le meilleur (Smaller - the – better)</i>	58
c) <i>Le nominal est le meilleur (Nominal - the – best)</i>	58
IV.3. Analyse des effets moyens des niveaux des différents facteurs	59
IV.3.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface	60
• Pour le critère de la rugosité de surface (Ra)	60
IV.3.2. Analyse des effets principaux pour les efforts de coupes (F_v)	60
IV.3.3. Analyse des effets principaux sur la quantité de copeau enlevé (MRR)	61
IV.4. L'analyse relationnelle grise (GRA).....	62
▲ Étape 1: Génération relationnelle grise.....	62
▲ Étape 2: Coefficient Relationnel Gris (GRC).....	63
▲ Étape 3: Grey Relationnel Grade (GRG).....	64
IV.4. Optimisation multi-objectif par la méthode de la Fonction de Désirabilité (DF)	66
IV.4.1. Introduction	66
IV.4.2. Les cas d'optimisation étudiés	67
➤ 1 ^{er} Cas : Compromis entre rugosité et productivité	68
➤ 2 ^{eme} Cas : Rugosité minimale.....	69
➤ 3 ^{eme} Cas: Productivité maximale	70
IV.5. Conclusion.....	72
Conclusion général.....	73
Références bibliographie	76

Nomenclature

MOVEMENTS

Symbole	Unité	Désignation
Vc	[m/min]	Vitesse de coupe.
f	[mm/tr]	Avance par tour.
ap	[mm]	Profondeur de passe.
Ra	[µm]	Rugosité moyenne arithmétique.
Rt	[µm]	Rugosité totale.
Rz	[µm]	Profondeur moyenne de la rugosité.
MRR	(cm ³ /min)	Débit du copeau enlevé.
Cont%	(%)	Pourcentage de contribution.
Fa	[N]	Effort de coupe axial.
Fr	[N]	Effort de coupe radial.
Fv	[N]	
S/N	[dB]	Rapport signal sur bruit.
Symbole	Désignation	
R ²	Coefficient de détermination	
ANOVA	Analyse de variance.	
SS	Somme des carrés	
MS	Les carrés moyens	
DL	Degré de liberté	
RSM	Méthodologie de surface de réponse.	
ANN	Réseaux de neurones artificiels.	
GRA	Analyse Relationnelle Gris.	
GRC	Coefficient relationnel gris	
GRG	Grade relationnel gris	
Des	Désirabilité.	
DF	Fonction désirabilité.	

Introduction générale

Le super alliage réfractaire (**Inconel 718**) est largement utilisé dans les différents domaines de l'industrie moderne grâce à sa résistance à chaud et à la corrosion. Les applications de l'**Inconel 718** sont variées on peut citer à titre d'exemple ; les organes de moteurs à réaction, les pièces des pompes, les moteurs de fusée et inverseurs et les faisceaux spatiaux. Ce dernier présente des difficultés lors de l'usinage à cause de ses caractéristiques distinguées telles que la haute ductilité, le taux d'écaillage élevé, le coefficient de frottement élevé et la faible conductivité thermique.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'usinabilité de l'**Inconel 718**, en termes de productivité et de qualité du produit, par un outil de coupe en céramique composite **CC670**.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique de la coupe des métaux et un état d'art concernant l'usinage de l'**Inconel 718** en s'appuyant sur les divers articles et thèses. Dans ce chapitre nous avons présenté une introduction sur l'usinabilité et la coupe des métaux, suivie par les matériaux à outil et les différents phénomènes intervenant lors de la coupe. En dernier lieu nous avons cité quelques travaux de recherche sur l'usinage de l'**Inconel 718**.

Dans le deuxième chapitre, Nous présentons l'équipement et les conditions expérimentales utilisées pour mener cette étude. Les appareils de mesure et les couples outil-matériau sont présentés apportent les précisions nécessaires à l'étude expérimentale des phénomènes de coupe. Les aspects théoriques et opérationnels des méthodes mathématiques statistiques pour la conception expérimentale sont également introduits.

A travers le troisième chapitre, nous exposons les résultats expérimentaux des essais réalisés pour un plan de Taguchi (**L9**) pour l'étude de l'impact des conditions de coupe (**Vc, ap, et f**) sur la rugosité, les efforts de coupe et taux d'enlèvement de matière (**MRR**). On a utilisé la méthodologie de surface de réponse et l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (**Vc, f, et ap**) et leurs interactions sur les paramètres technologiques pour l'outil céramique composite **CC670**. Cette étude a conduit à la détermination des modèles mathématiques exprimant la relation entre les paramètres de sortie (rugosité (**Ra, Rt, Rz**), l'efforts de coupe (**Fa, Fr, Fv**) et le taux d'enlèvement de matière (**MRR**)) et les paramètres d'entrée (**Vc, ap et f**). Pour cela, nous avons utilisé deux logiciels de statistique appelé « **Design-Expert-12** » et « **Minitab-18** » pour le calcul des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation (3D) sous forme d'une surface de réponse.

Le quatrième chapitre est dédié à deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objectif, en utilisant l'analyse signal/bruit et la méthode de Taguchi pour les réponses technologiques d'usinage (**Ra**), (**Fv**) et le (**MRR**), et l'optimisation multi-objectif, en utilisant l'Analyse Relationnelle Grise (Grey Method) et l'approche de la fonction de désirabilité (**DF**) pour optimiser la productivité et la qualité de surface simultanément. Ainsi, pour chaque paramètre technique d'usinage, la valeur optimale du paramètre de coupe par rapport à l'objectif d'optimisation est calculée.

Finalement, Nous présentons une conclusion générale suivie d'une liste bibliographique.

Chapitre I

Etude bibliographique sur les phénomènes régissant le processus de coupe

I. Introduction

L'objectif de la coupe des métaux est d'étudier l'impact des diverses méthodes de coupe (tournage, fraisage, perçage, etc.) sur le comportement d'un même matériau dans différentes conditions de coupe (profondeur de passe, avance, vitesse de coupe.) tout en utilisant une multitude de compositions et géométries.

I.1. L'usinabilité des matériaux

I.1.1. Les critères d'usinabilité

Les critères d'usinabilité peuvent être différents selon les pièces à produire, parmi les suivants : durée de vie d'outil, matériau de la pièce, l'effort de coupe, l'état de surface à obtenir, la productivité, etc...

Les principaux critères d'usinabilité sont Liés à plusieurs critères [1] tels que:

- ✓ Le matériau et l'outil de coupe;
- ✓ Les additifs (par exemple ; le soufre favorise la fragmentation du copeau, le plomb (interdit) favorise l'usinabilité (action lubrifiante));
- ✓ La dureté et la résistance à la rupture. Les faibles dureté et résistance à la rupture favorisent l'usinabilité, sauf pour les matériaux très ductiles (formation de l'arrête rapportée);
- ✓ La ductilité ; une faible ductilité favorise l'usinabilité;
- ✓ La conductibilité thermique ; elle favorise l'usinabilité, sauf pour les alliages réfractaires;
- ✓ L'érouissage; un taux élevé accroît la force spécifique de coupe.

I.1.2. Matériaux de coupe

Plusieurs matériaux sont utilisés comme outils de coupe [2] tels que:

- Outils en acier à au carbone.
- Outil en acier rapide (HSS).
- Carbure cémenté.
- Outil en céramique.
- Outil en nitrure du bore cubique (CBN).
- Outil en diamant.

✓ Outils en Acier à au carbone

L'acier au carbone est un matériau de coupe métallique peu coûteux utilisé pour les opérations d'usinage à faible vitesse. Les outils de coupe en acier au carbone ordinaire ont une composition de 0,6 à 1,5 % de carbone et une très faible quantité (moins de 0,5 %) de Mn et Si. D'autres métaux comme Cr, V sont ajoutés pour modifier la dureté et la taille des grains. Les aciers à haute teneur en carbone sont résistants à l'abrasion et ont la capacité de maintenir un bord tranchant. Ils possèdent une bonne usinabilité mais ce matériau perd rapidement sa dureté à une température d'environ 250°C [2].

✓ **Outil en acier rapide (HSS)**

Il s'agit d'un acier à haute teneur en carbone avec une quantité importante d'éléments d'alliage, tels que le tungstène, le molybdène, le chrome, etc. pour améliorer la trempabilité, la ténacité et la résistance à l'usure. Il offre un taux d'enlèvement de métal plus élevé mais il perd sa dureté à une température modérée d'environ 650°C. Il faut donc utiliser un liquide de refroidissement pour augmenter la durée de vie de l'outil. Il peut être utilisé plusieurs fois par réaffûtage. Un traitement de surface est effectué sur l'acier rapide pour améliorer ses propriétés [2].

✓ **Outil en carbure cémenté**

L'outil de coupe en carbure cémenté est produit par la technique de la métallurgie des poudres. Il est constitué de carbure de tungstène, de tantale et de titane avec du cobalt comme liant (lorsque le liant est du nickel ou du molybdène, on parle alors de cermet). Les outils en carbure cémenté sont extrêmement durs ; ils peuvent supporter des opérations de coupe à très grande vitesse. L'outil en carbure ne perd pas sa dureté jusqu'à 1000° C. Un outil à haute teneur en cobalt est utilisé pour une coupe grossière tandis qu'un outil à faible teneur en cobalt est utilisé pour les opérations de finition [2].

✓ **Outil en céramique**

Les matériaux céramiques les plus courants sont l'oxyde d'aluminium et le nitrure de silicium. Les outils en céramique sont fabriqués à partir d'une poudre de matériau céramique compactée en forme d'insert, puis frittée à haute température. Ils sont chimiquement inertes et résistent à la corrosion. Ils ont une résistance élevée à la compression. Ils sont stables jusqu'à une température de 1800°C. Ils sont dix fois plus rapides que les HSS. La friction entre la face de l'outil et le copeau est très faible et possède une faible conductivité thermique, généralement aucun liquide de refroidissement n'est nécessaire. Ils fournissent un excellent état de surface [2].

✓ **Outil en nitrure du bore cubique (CBN)**

C'est le deuxième matériau le plus dur après le diamant. Il est généralement utilisé dans les machines à main. Il offre une grande résistance à l'abrasion et est utilisé comme abrasif dans les meules. Les arêtes vives ne sont pas recommandées [2].

✓ **Outil en diamant**

C'est à présent le matériau le plus dur et il est également cher. Il possède une conductivité thermique et un point de fusion très élevés. Le diamant offre une excellente résistance à l'abrasion, un faible coefficient de frottement et une faible dilatation thermique. Il est utilisé pour l'usinage de matériaux très durs tels que les carbures, les nitrures, le verre, etc. Les outils diamantés donnent un bon état de surface et une bonne précision dimensionnelle. Ils ne sont pas recommandés pour l'usinage de l'acier [2].

Les principales matières utilisées pour les outils de coupes modernes sont représentées dans la **Figure I.1**.

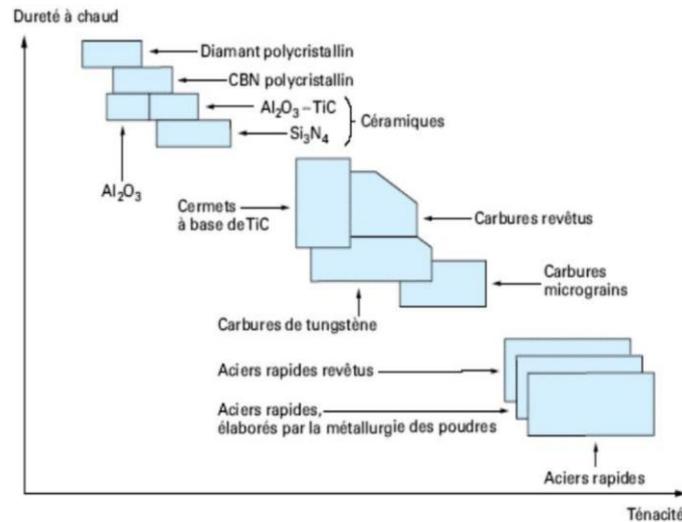


Figure I. 1: Disposition des matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté [3].

Les conditions optimales d'usinage doivent être recherchées pour un couple (outil et une pièce) donné. Cette étude ne peut être établie qu'avec un protocole expérimental très rigoureux. **La figure I.2** montre les classes d'outils coupants et leurs domaines d'application.

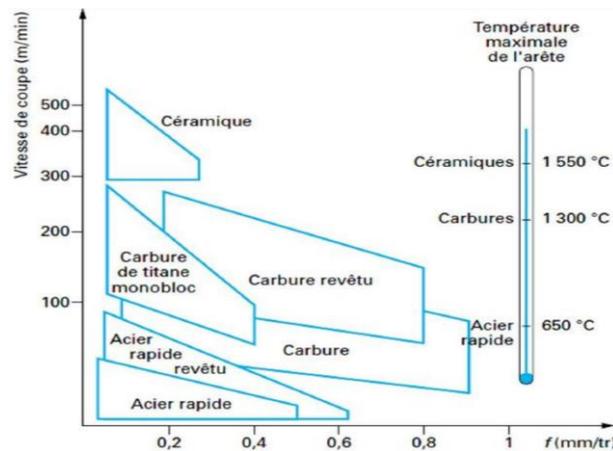


Figure I. 2: Matériau de l'outil de coupe basé sur les paramètres de coupe [4].

I.1.3. Description du contact copeau-outil et pièce-outil

a) Géométrie des outils

Quelle que soit la technique d'usinage employée, un outil comprend:

✓ *Une ou plusieurs zones tranchantes* : que l'on peut décrire comme des dièdres élémentaires définis par des **faces** A_α et A_γ et une **arête d'intersection**. La face A_α est appelée **face de dépouille** et la face A_γ **face de coupe**.

Les techniques de frittage des matériaux des outils modernes permettent d'obtenir **des faces** de coupe ayant des courbures complexes étudiées pour contrôler la géométrie des copeaux. Les performances des machines d'affûtage permettent de réaliser des faces A_α et A_γ non planes ainsi que des arêtes non rectilignes. Notons, enfin, qu'en règle générale l'outil est en contact avec la

pièce sur la *face de dépouille principale* A_γ , sur la *face de dépouille secondaire* A_α et sur la partie arrondie intermédiaire appelée *bec* (figure I.3.) [5].

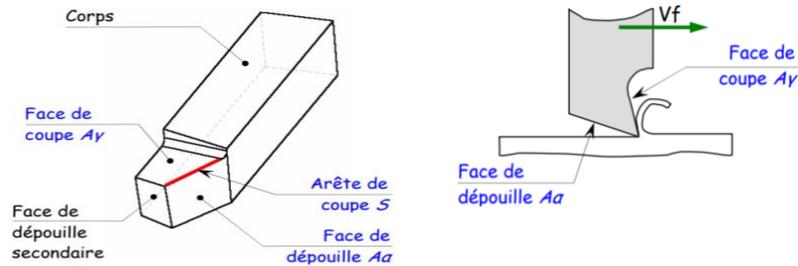


Figure I. 3: Géométrie des outils de coupe [6].

✓ *Des zones de guidage du copeau* : soit pour faciliter son évacuation, soit pour le stocker provisoirement. Ainsi, les goujures hélicoïdales d'un foret sont des chemins de passage obligés pour le copeau tant que l'outil n'est pas sorti hors du trou en cours de perçage, les espaces interdits d'une broche sont des logements conçus pour contenir le copeau [5].

✓ *Des zones assurant la résistance mécanique de l'outil* : Si l'on ne considère que le dièdre élémentaire de chaque zone tranchante, la fonction de coupe est assurée essentiellement par l'arête, la surface de la face de coupe et une très faible partie de la face de dépouille en contact avec la pièce [5].

b) Description de la racine du copeau

Il existe trois zones de cisaillement : la zone de cisaillement primaire, la zone de cisaillement secondaire et la zone de cisaillement tertiaire (Figure I.4.). Ces zones sont le siège de déformations, taux de déformations et températures élevés.

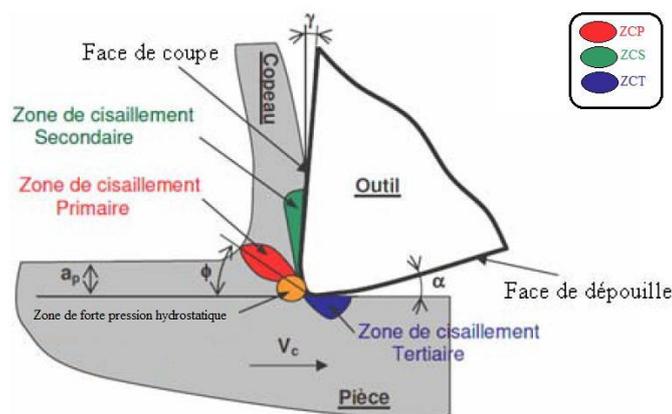


Figure I. 4: Les principales zones de cisaillement [7].

-Zone de cisaillement primaire (ZCP) : c'est le lieu d'un double cisaillement qui s'étend de la pointe de l'outil jusqu'à la face libre du copeau (zone rouge dans la Figure I.4.). La ZCP est caractérisée par une forte déformation plastique, accompagnée d'une élévation importante de la température. Cette zone est l'endroit où s'effectue un changement brutal de la direction

d'écoulement de la matière qui passe de la vitesse de coupe (V_c) à la vitesse de copeau (V_{cop}). Dans la littérature, plusieurs modèles représentent la ZCP par un plan incliné d'un angle (Φ) par rapport à la direction de coupe appelée angle de cisaillement [8].

-Zone de cisaillement secondaire (ZCS) : (zone verte dans la **Figure I.4**) le contact outil-copeau sous un frottement dynamique à l'interface outil-matière engendre des déformations plastiques intenses, principalement en cisaillement, accompagnées d'une élévation de la température. Cette zone est appelée « zone de cisaillement secondaire ». Cette ZCS est le lieu d'un frottement intense responsable souvent d'une usure prématurée de l'outil [8].

-Zone de cisaillement tertiaire (ZCT) : cette zone (zone bleu dans la **Figure I.4**) correspond au contact outil-pièce après enlèvement de matière. Il s'agit du contact entre la face de dépouille et la surface fraîchement usinée. Le contact outil-pièce provoque des déformations et des températures plus faibles par rapport à celles rencontrées dans les deux premières zones (ZCP, ZCS). La ZCT est souvent à l'origine des contraintes résiduelles d'origine thermiques et/ou mécaniques, et/ou métallurgique apparaissant dans la pièce usinée [8]. De plus, la ZCT conditionne aussi l'état micro-géométrique de la surface usinée (rugosité, défaut, etc.) et la durée de vie de l'outil.

I.1.4. Rugosité des surfaces usinées

La rugosité de surface est une mesure de la texture moyenne de la surface d'une pièce. Différents paramètres sont utilisés pour définir la rugosité de surface. L'un des plus omniprésents est R_a (Roughness average), qui est dérivé des différences entre les hauteurs et les profondeurs sur une surface. La rugosité de surface R_a est mesurée au microscope et est généralement exprimée en micromètres ($\times 10^{-6}$ m) [9].

I.1.4.1. Les principaux défauts des surfaces

Les défauts de surface sont les limites ou les plans qui séparent un matériau en région. Chaque région ayant la même structure cristalline mais une orientation différente. Les défauts de surface sont généralement formés par des méthodes de finition de surface comme le gaufrage ou par la dégradation causée par les intempéries ou la fissuration sous contrainte environnementale. Des défauts peuvent également être produits pendant le traitement et l'utilisation des métaux en service [10].

I.1.4.1.1. Types de défauts

Nous distinguons quatre types de défauts selon la référence [11]:

- **Défauts de 1er ordre :** Ce sont des défauts dus à des écarts de forme (rectitude, cylindricité, etc.) et de position (perpendicularité, parallélisme, etc.).

- **Défaut de 2ème ordre :** Défauts plus petits. Ayant l'aspect général d'une ondulation, et provenant de l'avance par tournage ou en fraisage, de vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil.

- **Défauts de 3ème ordre** : Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations haute fréquence.

- **Défauts de 4ème ordre** : Fentes et piqures dues à des marques d'outil ou à des vibration haute fréquence.

L'ensemble des défauts de 3ème et 4ème ordre constituent la rugosité de la surface.

I.1.4.2. Les principaux critères de rugosité

(1) Rugosité moyenne (Ra)

Ra est le paramètre le plus couramment spécifié aux USA. Il existe une confusion entre les valeurs Ra et RMS. Ra est développé à partir de RMS, mais ils ne sont pas identiques. Comme le montrent les figures 5 et 6, La moyenne de la rugosité est la moyenne arithmétique des valeurs absolues du profil de rugosité ordonnées.

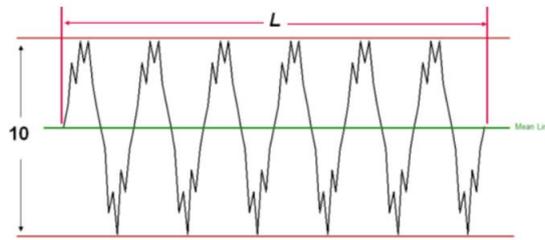


Figure I. 5: Profil de rugosité filtré avec une ligne moyenne, le pic à la vallée est de 10 [12].

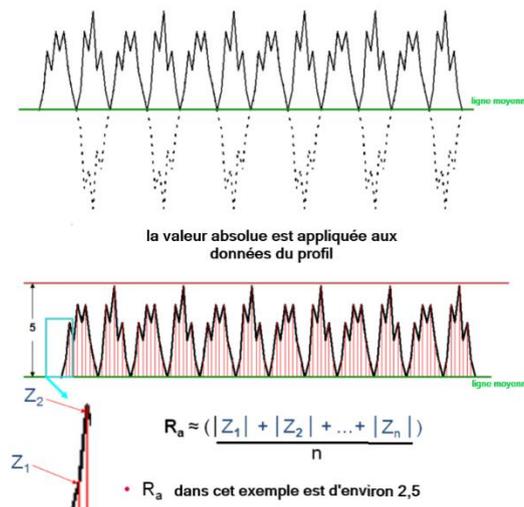


Figure I. 6: Étapes du calcul de Ra [12].

(2) La rugosité moyenne quadratique RMS

RMS est la moyenne quadratique des écarts de hauteur de profil pris dans la longueur d'évaluation et mesurés à partir de la ligne moyenne.

(3) Hauteur maximale du pic du profil (Rp)

C'est la distance entre le point le plus haut du profil et la ligne moyenne à l'intérieur de la longueur d'évaluation. R_{pi} est la distance entre le point le plus haut du profil et la ligne moyenne dans un segment de longueur d'échantillonnage étiqueté i (**figure I.7.**).

(4) Rugosité totale (Rt)

Il s'agit de la distance verticale entre les points les plus hauts et les plus bas du profil dans la longueur d'évaluation (**figure I.8.**).

(5) La rugosité totale (Rmax)

C'est la plus grande des valeurs successives de R_{ti} calculées sur la durée de l'évaluation (**figure 8**).

(6) Rugosité (Rz)

Elle représente la rugosité totale moyenne.

(7) la rugosité (Rv)

C'est la distance entre le point le plus bas du profil et la ligne moyenne dans la longueur d'évaluation (**figure 7**) [12].

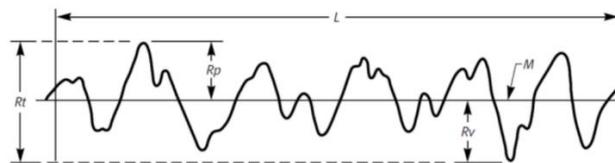


Figure I. 7: Paramètres R_t , R_p et R_v [12].

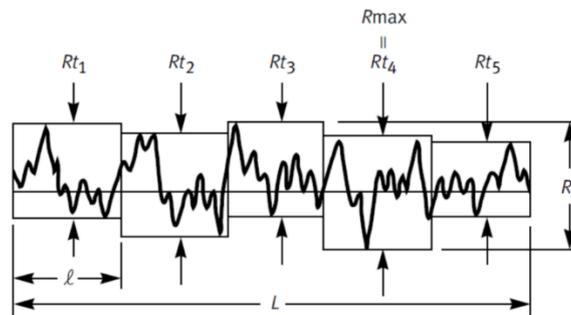


Figure I. 8: R_t et R_{max} Paramètres [12].

I.2. Les super alliages réfractaires (Inconel)

I.2.1. Définition:

Le terme « superalliage » peut s'interpréter de la façon suivante : « alliage » fait référence aux éléments autres que Ni et Al qui entrent dans la composition du matériau et « super » souligne le grand nombre d'éléments qui a été ajouté en vue d'obtenir la meilleure tenue de l'alliage à haute température [13]. Les superalliages sont des matériaux stratégiques dans le domaine de la propulsion aéronautique et spatiale [14].

Les superalliages à base de nickel doivent leurs excellentes propriétés à leur microstructure particulière. Ce sont des alliages biphasés, constitués d'une matrice austénitique cubique à faces centrées (CFC), solution solide à base de Ni (la phase γ), renforcée par des précipités cubiques de phase γ' ordonnée de type L12 **figure I.9** [13].

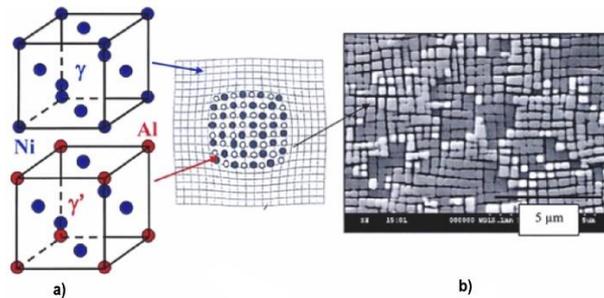


Figure I. 9: Microstructures d'un superalliage à différentes échelles ;

- a) Mailles cristallographiques
 b) Microstructure en cubes observée par microscopie électronique à balayage [13].

En 1962, le brevet de l'Inconel 718 est publié, il se distingue des autres superalliages à base de nickel par l'ajout de niobium qui lui permet de conserver une bonne résistance mécanique à haute température. De nos jours, l'Inconel 718 représente une part importante de la masse des turboréacteurs aéronautiques et fait l'objet de nombreuses publications scientifiques [15]. Le développement de l'Inconel 718 ces 60 dernières années en a fait un matériau de premier choix pour l'utilisation dans les parties chaudes des turbomachines grâce aux caractéristiques physiques suivantes :

- ✚ Résistance à la corrosion à haute température et sous atmosphère oxydante (gaz de combustion),
- ✚ Maintien de hautes caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures de 650°C (La fiche technique de l'inconel 718 TR utilisé par SAFRAN spécifie une valeur de $R_{p0.2}$ supérieure à 1035 MPa à 20°C et 860 MPa en service à 650°C).
- ✚ Bonne tenue en fluage,
- ✚ Prix abordable comparé aux autres alliages à base de nickel par l'ajout de fer.

Pour cette raison, les alliages à base de nickel sont généralement utilisés pour les composants des turbines. Dans les zones plus froides du moteur, d'autres alliages plus légers peuvent être employés, comme par exemple des alliages de titane, dont l'utilisation est limitée à environ 500 °C. **La figure I.10** montre la répartition des matériaux utilisés dans les différentes zones du moteur Trent 800 développé par Rolls-Royce [16].

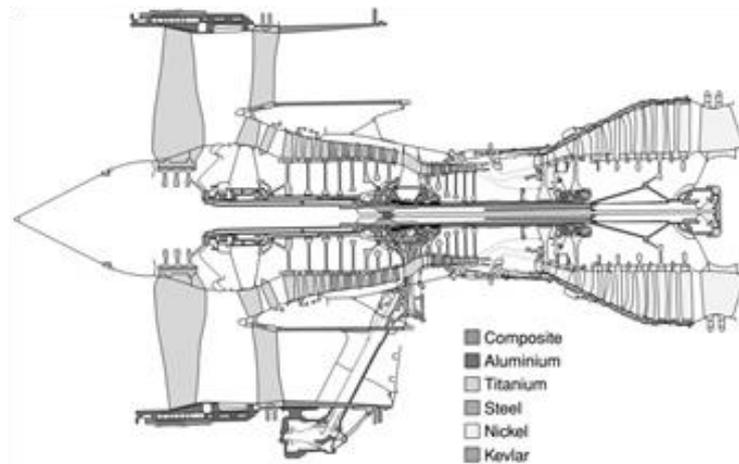


Figure I. 10: Illustration de la distribution des matériaux utilisés dans le moteur Trent 800 [16].

I.2.2. Composition l'Inconel 718

L'Inconel 718 fait partie de la famille des superalliages à base de nickel. Il peut être qualifié d'alliage réfractaire car il possède plus de 5% en masse d'éléments réfractaires (niobium, molybdène et tantale). A titre de comparaison, l'Inconel 718 conduit vingt fois moins la chaleur que l'aluminium, huit fois moins que l'acier et deux fois moins que le titane. Les matériaux réfractaires s'opposent à la conduction de la chaleur, ils constituent le bouclier thermique des fours par exemple. La notion de matériau réfractaire a évolué dans le temps avec le développement de matériaux pouvant résister à des températures de plus en plus élevées. [15]. Dans le **tableau I.1** nous présentons la composition de l'alliage de l'Inconel 718 en pourcentage massique.

Tableau I. 1: Composition de l'alliage Inconel 718 en pourcentage massique [15].

Elément	Ni	C	Cr	Fe	Nb	Ta	Mo	Ti
Mini	base	0.015	17	15	5	-	2.8	0.75
Maxi		0.040	21	21	5.5	0.1	3.3	1.15
Elément	Al	Mn, Si	B	Cu	Ca	P	Co	-
Mini	0.3	-	-	-	-	-	-	-
Maxi	0.7	0.35	0.006	0.3	0.005	0.015	1	-

I.2.3. Usinabilité de l'Inconel 718

L'Inconel 718 est réputé pour avoir une faible usinabilité. Les principales raisons sont résumées par (Ezugwu, 2005; M'Saoubi et al., 2008; Umbrello, 2013) comme étant :

- Une résistance mécanique élevée jusqu'à 650 °C,
- Une tendance à s'écrouir
- Une faible conductivité thermique,
- La présence de carbures durs et abrasifs,
- La forte réactivité chimique avec certains outils et leurs revêtements [15].

I.2.4. La famille d'inconel

ALLIAGE INCONEL 600

C'est un alliage nickel-chrome présentant une bonne résistance à l'oxydation à haute température et une résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte due aux ions chlorure, à la corrosion par l'eau ultra-pure et à la corrosion caustique. Il est utilisé pour les composants de fours, la transformation chimique et alimentaire, le génie nucléaire et les électrodes d'étincelage [17].

ALLIAGE INCONEL 601

Un alliage nickel-chrome avec un ajout d'aluminium pour une résistance exceptionnelle à l'oxydation et à d'autres formes de corrosion à haute température. Il présente également des propriétés mécaniques élevées à des températures élevées. Il est utilisé pour les fours industriels, les équipements de traitement thermique tels que les paniers, les moufles et les cornues, les équipements pétrochimiques et autres équipements de traitement, et les composants de turbines à gaz [17].

ALLIAGE INCONEL 625

Un alliage nickel-chrome-molybdène avec une addition de niobium qui agit avec le molybdène pour rigidifier la matrice de l'alliage et ainsi fournir une résistance élevée sans traitement thermique de renforcement. L'alliage résiste à un large éventail d'environnements très corrosifs et est particulièrement résistant à la corrosion par piqûre et par crevasse. Il est utilisé dans le traitement chimique, l'ingénierie aérospatiale et maritime, les équipements de contrôle de la pollution et les réacteurs nucléaires [17].

ALLIAGE INCONEL 693

Un alliage nickel-chrome-aluminium offrant la meilleure résistance à la poussière de métal de tous les alliages conventionnels disponibles. L'alliage 693 offre également une résistance exceptionnelle à l'oxydation et à la carburation à des températures allant jusqu'à 1150°C (2100°F), avec des excursions à des températures encore plus élevées. La capacité de l'alliage à résister à la poussière métallique est particulièrement utile dans les systèmes utilisés pour reformer l'hydrogène et générer du gaz de synthèse pour diverses industries, notamment la production de gaz et de carburant liquide. L'alliage 693 est protégé par le brevet américain n° 4,882,125 [17].

ALLIAGE INCONEL 706

L'alliage INCONEL 706 est un alliage nickel-fer-chrome durcis sable par précipitation qui offre une résistance mécanique élevée. Les propriétés de l'alliage sont similaires à celles de l'alliage INCONEL 718 (N07718) sauf que l'alliage 706 est plus facile à fabriquer, particulièrement par usinage. Les utilisations primaires de l'alliage sont les pièces et composants de turbines à gaz aérospatiales et terrestres, nécessitant une résistance au fluage, et à la rupture sous contrainte jusqu'à 1300°F (704°C), une résistance à l'oxydation et une bonne fabricabilité [17].

INCONEL ALLOY 718 & 718SPF

L'alliage Inconel 718 est un alliage nickel-chrome durcissable par précipitation contenant également des quantités significatives de fer, de niobium et de molybdène ainsi que des quantités moindres d'aluminium et de titane. Il combine une résistance à la corrosion et une haute résistance mécanique avec une remarquable aptitude au soudage, y compris une résistance à la fissuration après soudage. Cet alliage présente une excellente résistance au fluage-rupture à des températures allant jusqu'à 700°C (1300°F). Il est utilisé dans les turbines à gaz, les moteurs de fusée, les engins spatiaux, les réacteurs nucléaires, les pompes et l'outillage. L'alliage INCONEL 718SPF est une version spéciale conçue pour le formage superplastique [17].

ALLIAGE INCONEL X-750

Un alliage nickel-chrome similaire à l'alliage INCONEL 600 mais rendu capable de durcir les précipitations par l'ajout d'aluminium et de titane. Il présente une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation ainsi que des propriétés élevées de traction et de fluage-rupture à des températures allant jusqu'à 700°C (1300°F). Son excellente résistance à la relaxation est utile pour les ressorts et les boulons à haute température. Il est utilisé dans les turbines à gaz, les moteurs de fusée, les réacteurs nucléaires, les appareils à pression, l'outillage et les structures d'avion [17].

ALLIAGE INCONEL 751

Un alliage nickel-chrome similaire à l'INCONEL X-750 mais avec une teneur accrue en aluminium pour un meilleur durcissement par précipitation. Cet alliage a été conçu pour être utilisé comme d'échappement dans les moteurs à combustion interne. Dans cette application, l'alliage offre une résistance élevée à températures de fonctionnement, une dureté élevée à chaud pour résistance à l'usure, et une résistance à la corrosion dans les gaz d'échappement chauds contenant de l'oxyde de plomb, du soufre, du brome et du chlore [17].

I.3. Travaux de Recherche réalisés sur l'usinage des Super alliages Réfractaires

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur le tournage de l'inconel pour maîtriser son usinabilité. En effet, dans l'étude de **Frifita et al. [18]**, les auteurs ont réalisé une modélisation prédictive et une optimisation des paramètres de coupe pendant le tournage de l'Inconel 718 en utilisant la méthode Taguchi. Cette étude était dédiée à déterminer les conditions de coupe optimales pendant le tournage de l'Inconel 718 et de développer les modèles mathématiques pour les trois composantes des efforts de coupe (F_a , F_r , F_z) et pour la puissance de coupe. L'usinage a été réalisé en utilisant des plaquettes de coupe de désignation VNMG 120304 et VNMG 120308 et un porte-outil SVVNN 2020 K-12F. Les valeurs des conditions de coupe choisies sont listées dans le **tableau I.2**.

L'optimisation dans cette étude a été réalisée en utilisant la méthode Taguchi qui semble être, selon les auteurs, non seulement la méthode la plus adéquate mais aussi la plus efficace. Les expériences ont été réalisées selon un plan mixte L18 de Taguchi. Les conclusions ont été obtenues sur la base du rapport S/N et des diagrammes d'effets principaux. Les résultats de cette étude montrent que la solution optimale qui minimise les efforts de coupe correspond aux

petites valeurs du rayon du bec, la plus grande vitesse de coupe et des valeurs moyennes de l'avance. En plus, des modèles prédictifs pour les différents facteurs de réponse ont été réalisés.

Tableau I. 2: les valeurs des paramètres de coupe [18].

rayon du bec (mm)	0,4	0,8	-
vitesse de coupe (m/min)	33	47	70
vitesse d'avance (mm/tr)	0,08	0,11	0,14

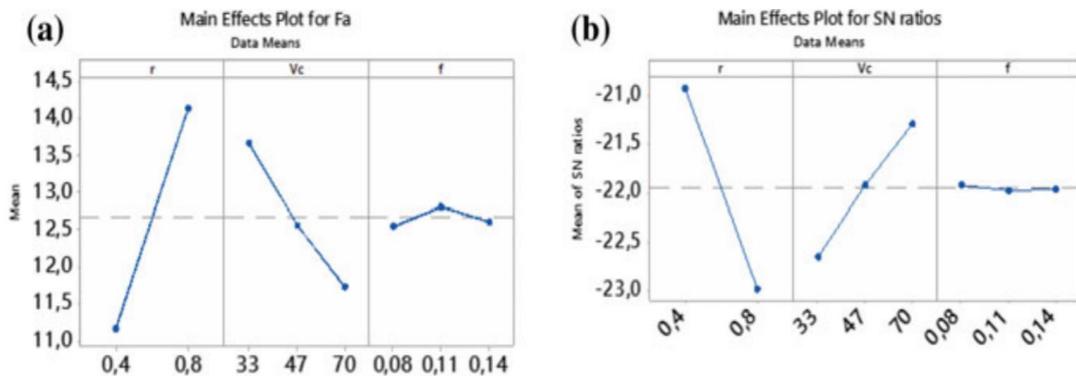


Figure I. 11: Graphique des effets principaux de Fa [18].

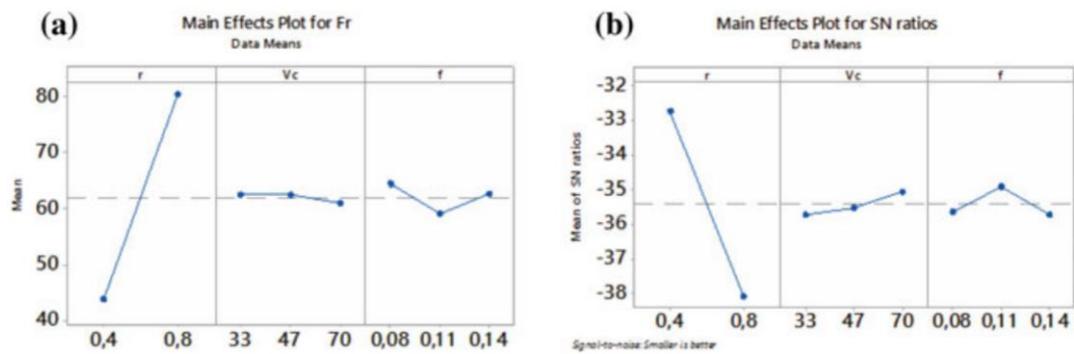


Figure I. 12: Graphique des effets principaux de Fr [18].

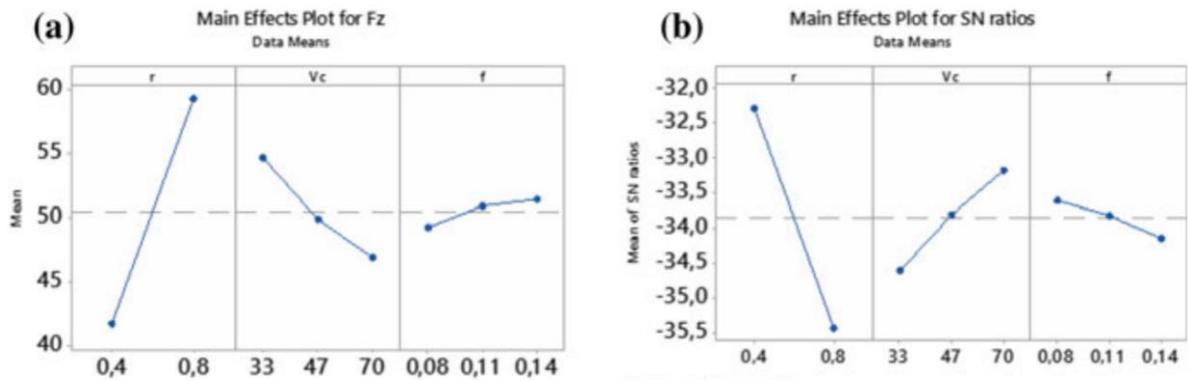


Figure I. 13: Graphique des effets principaux de Fz [18].

Lors de l'un des travaux de **Tebassi et al. [19]**, les auteurs ont investigué l'influence de différents paramètres d'usinage sur l'état de surface, les efforts de coupe, la productivité et la consommation d'énergie lors du tournage du super alliage Inconel 718, car ces derniers sont très importants pour les exigences fonctionnelles des produits finis et la productivité. L'usinage a été réalisé par un outil en carbure revêtu selon les conditions de coupe présentées sur le **tableau I.3**.

Tableau I. 3 : Les valeurs des conditions de coupe [19].

Niveau	Vitesse de coupe (Vc) (m/min)	L'avance (f) (mm/tr)	Profondeur de passe (ap) (mm)
-1	30	0.08	0.15
0	60	0.12	0.3
1	90	0.16	0.45

Les résultats trouvés dans cette étude sont listés ci-après ;

- ✓ L'avance et la vitesse de coupe ont les plus grandes influences sur la rugosité de surface qui représentent 43,58 et 23,85 %, respectivement.
- ✓ La vitesse de coupe et la profondeur de passe ont une grande influence sur la productivité avec des taux de contribution aux alentours de 37,31 %.
- ✓ Les composantes de l'effort de coupe augmentent de façon presque linéaire et proportionnelle à la profondeur de passe et à l'avance.
- ✓ La profondeur de passe a la plus grande importance sur les composantes de la force avec des valeurs de contribution entre 66% et 79% sur les composantes des efforts de coupe, suivie par l'avance.
- ✓ La vitesse de coupe et la profondeur de passe ont la plus grande importance sur la productivité avec des valeurs de contribution de 38,35 et 34,32 %, respectivement.

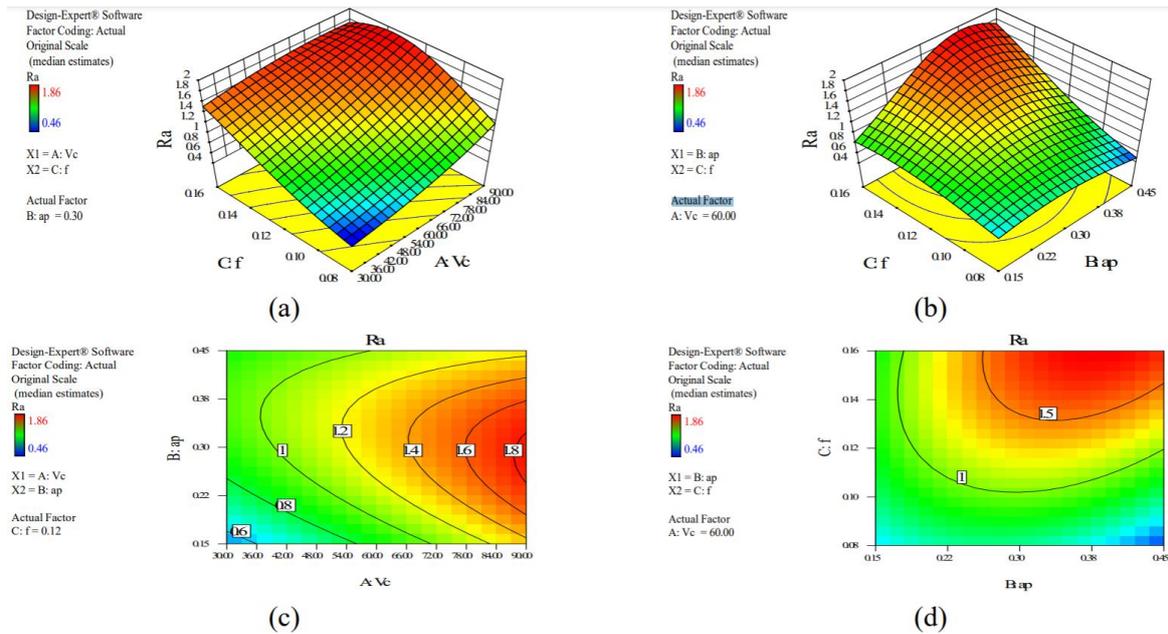


Figure I. 14 :Tracé de surface 3D (a), (b) et tracé de contours (c), (d) pour Ra [19].

Dans une deuxième étude de **Tebassi et al. [20]**, les auteurs ont investigué le rapport qualité/productivité lors du tournage de l'alliage Inconel 718 par l'approche par la méthodologie de la surface de réponse.

Les modèles mathématiques de la rugosité de surface et de la productivité ont été déterminés en fonction des différents paramètres de coupe (profondeur de coupe, l'avance, vitesse de coupe et rayon du bec). L'usinage a été réalisé par un outil céramique aux conditions de coupe suivants :

Tableau I. 4 :Affectation des niveaux aux facteurs [20].

Niveau	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	r (mm)
-1	100	0.08	0.1	0.8
0	150	0.12	0.2	1.2
1	200	0.16	0.3	1.6

Les résultats importants peuvent être résumés comme suit :

- ✓ La vitesse de coupe, l'avance et le rayon du bec de l'outil ont les plus grandes influences sur la rugosité de surface.
- ✓ La profondeur de passe a la plus grande influence sur la productivité.
- ✓ Aussi, Il a été trouvé pour le matériau testé que la combinaison optimale des paramètres de coupe pour la rugosité Ra obtenue (0.30 μm) et la productivité (8142.14 mm³/min) était pour Vc=189.51 m/min, ap=0.3 mm, f=0.15 mm/tr et r=1.6mm.
- ✓ En utilisant des conditions de coupe optimales, le gain de productivité enregistré était d'environ 160,54 %, accompagné d'une amélioration de la qualité de surface de 46,9%.
- ✓ La transformation de Box-Cox a amélioré de manière significative la normalité et a fourni une bonne corrélation pour les modèles. En effet, le R2 pour le modèle de rugosité de surface était égal à 0,9936 et pour le modèle de productivité était égal à 0,9979.

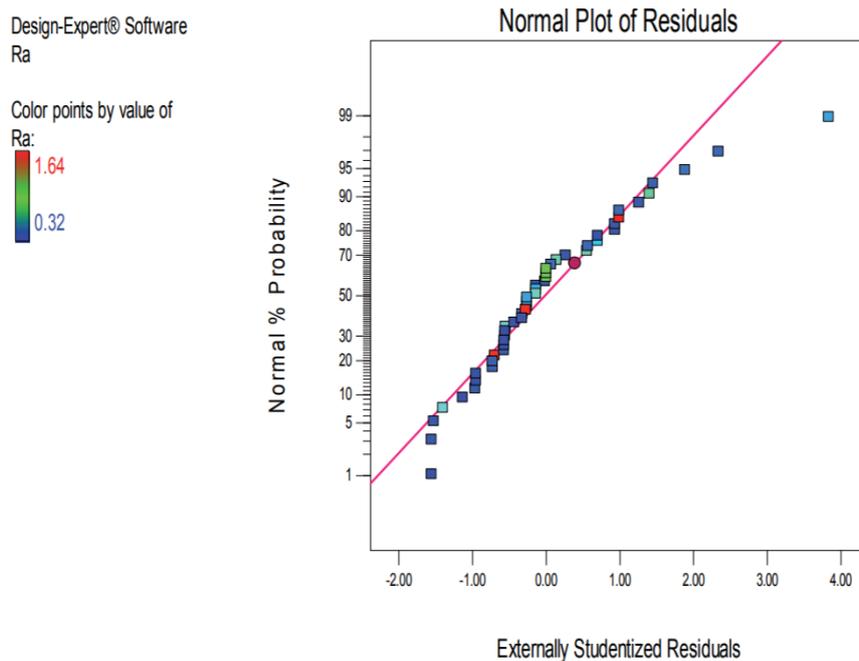


Figure I. 15 :Tracé normal des résidus pour Ra [20].

Dans l'étude une troisième étude de **Tebassi et al [21]**, les auteurs ont étudié l'évolution de l'état de surface et des efforts de coupe lors du tournage de linconel 718.

Ils ont utilisé la méthode de la surface de réponse (RSM) à 3 niveaux et 4 facteurs de type Box-Behenken (BBD). Les modèles basés sur un réseau neuronal artificiel (ANN) ont été développés pour prédire la relation entre les variables expérimentales (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) sur la rugosité de surface et l'effort de coupe. L'usinage a été réalisé par un outil en carbure revêtu. Les conditions de coupe sont listées dans le tableau I.5.

Les résultats trouvés dans cette étude sont:

- ✓ L'analyse de la variance (ANOVA) permet de conclure que la rugosité de surface est significativement affectée par l'avance et la vitesse de coupe avec une contribution de 45% et 20% respectivement. L'effort de coupe F_v est significativement affectée par la profondeur de passe, l'avance et la vitesse de coupe avec une contribution de 66%, 23% et 6% respectivement.
- ✓ Les modèles ANN sont capables de mieux prédire la rugosité de surface et les efforts de coupe par rapport à ceux obtenus par la méthode RMSE (figure I.15 et I.16.)

Tableau I. 5: Les conditions de coupe adoptées [21].

niveau	Vitesse de coupe V_c (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de passe a_p (mm)
-1	30	0.08	0.15
0	60	0.12	0.3
1	90	0.16	0.45

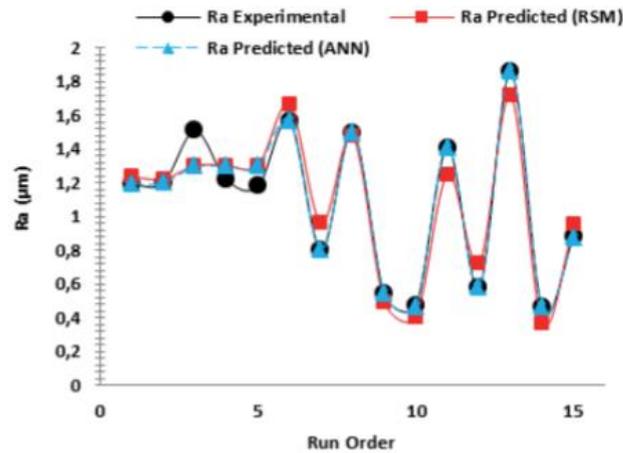


Figure I. 16 : Comparaison entre les valeurs de Ra expérimentales et prédites avec les modèles RSM et ANN [21].

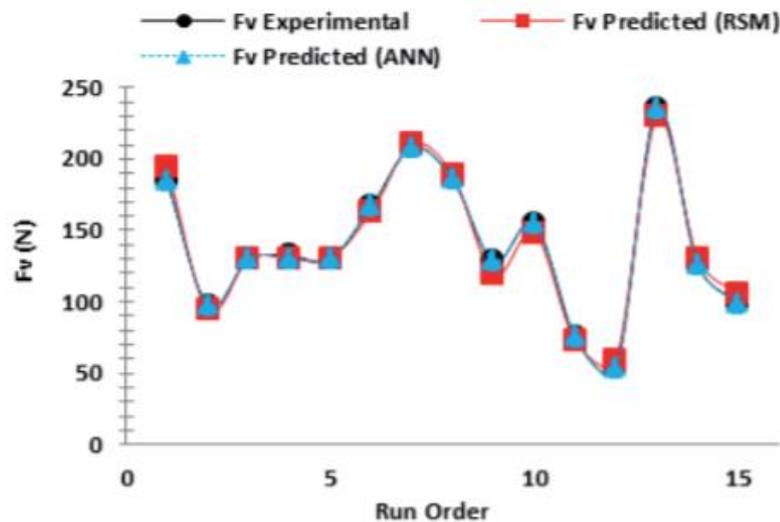


Figure I. 17: Comparaison entre les valeurs de Fv expérimentales et prédites avec les modèles RSM et ANN [21].

Dans l'étude de **Xavior et al.** [22], les auteurs ont investigué l'évolution de l'état de surface et des efforts de coupe lors du tournage de linconel 718.

Cette étude présente les problèmes d'intégrité de surface dans différentes conditions de coupe (à sec, avec une quantité minimale de lubrifiant et par immersion) avec différents matériaux d'outils de coupe (carbure, céramique et CBN).

Les conditions de coupe sont résumées dans le tableau I.6. L'avance (f) = 0,15 mm/tr et la profondeur de coupe = 0,5 mm ont été maintenues constantes tout au long des expérimentations.

Tableau I. 6: Paramètres/niveaux/conditions de coupe [22].

Paramètre	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
1. Vitesse de coupe (V_c) m/min	100	150	-
2. Matériau de l'outil (insert)	Carbure revêtu	Céramique	cBN
3. Conditions de coupe	Sec	MQL	Refroidissement par inondation

Les résultats trouvés dans cette étude :

- ✓ La température générée pendant le tournage à grande vitesse de l'Inconel 718 joue un rôle majeur dans l'usure de l'outil, qui affecte finalement la qualité de la surface de la pièce usinée.
- ✓ Les paramètres de coupe, les matériaux des outils et les environnements de coupe jouent également un rôle majeur dans les changements de la rugosité de surface.
- ✓ Il s'avère que la vitesse de coupe est le principal facteur qui influence les contraintes résiduelles induites.
- ✓ Aux faibles vitesses de coupe, les contraintes résiduelles sont des contraintes de traction sur la surface usinée et deviennent des contraintes de compression dans les profondeurs souterraines. À des vitesses de coupe plus élevées, les contraintes résiduelles induites s'avèrent être purement compressives.
- ✓ Les principaux facteurs responsables de la génération des contraintes résiduelles de compression sont la vitesse de coupe et la géométrie de l'outil.
- ✓ Les plaquettes en carbure refroidies par inondation à une vitesse de coupe de 100 m/min donnent une rugosité de surface minimale.
- ✓ Par conséquent, une vitesse de coupe de 100 m/min et un refroidissement par inondation peuvent être considérés comme les paramètres optimaux pour l'usinage de l'Inconel 718.
- ✓ Les conditions de coupe MQL ont montré des valeurs de contraintes résiduelles minimales pour tous les matériaux d'outils et toutes les vitesses de coupe. Cela indique que même une petite quantité de lubrification aide à réduire le degré de contraintes résiduelles.

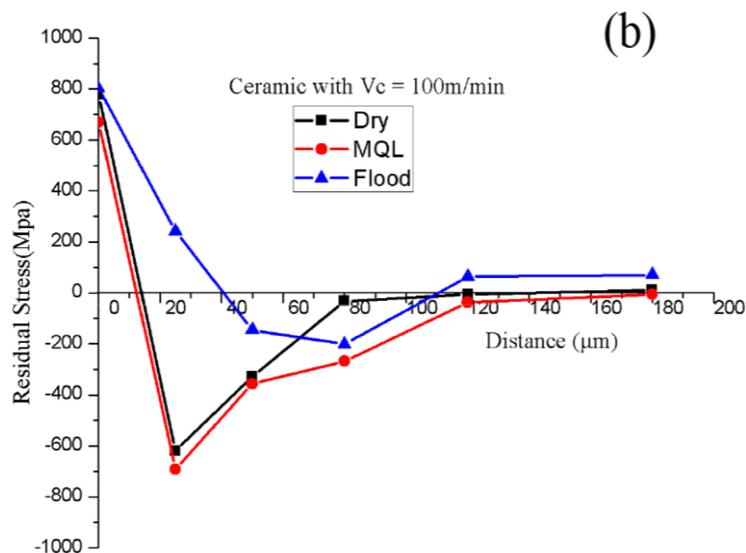


Figure I. 18: Outil en céramique avec $V_c = 100$ m/min [22].

Dans l'étude de [Xiaoping Ren et al. \[23\]](#), les auteurs ont étudié l'évolution de l'état de surface et des efforts de coupe lors du tournage de l'Inconel 718. Ce travail présente la stratégie de modélisation hybride simulant l'intégrité de la surface, y compris la contrainte résiduelle, ainsi que le changement de microstructure sur l'état la surface finale usinée lors du tournage de

l'Inconel 718 est de sa mise en œuvre. L'usinage a été réalisé par un outil en carbure revêtu conditions de coupe présentées dans le **tableau I.7**.

Tableau I. 7: Les facteurs et niveaux de fonctionnement variables utilisés [23].

Facteurs variables	Vitesse de coupe (Vc) (m/min)	Vitesse d'avance (f) (mm/tr)	Profondeur de passe (ap) (mm)
Niveaux	0.1, 0.15, 0.2	50, 70, 90	0.2

Pour prédire l'intégrité de la surface de l'Inconel 718 dans le processus de tournage, un modèle hybride couplé aux effets thermiques-mécaniques a été réalisé. Selon les résultats de la simulation, les résultats trouvés dans cette étude sont les suivants :

- La charge thermique est le facteur dominant pour la contrainte résiduelle de traction maximale σ_{sur} . Alors que pour la profondeur de la contrainte résiduelle de traction d_{sub} et la contrainte résiduelle de compression maximale σ_{com} , la charge mécanique était le facteur dominant. En plus, pour le durcissement et le grain moyen, l'aspect mécanique du processus d'usinage était la force motrice dominante des changements microstructuraux sur la surface de la pièce.
- Pour des contraintes résiduelles de traction plus faibles, une profondeur de transition plus petite et des valeurs de micro-dureté plus grandes sont recommandées pour supprimer l'initiation des fissures dans la rupture par fatigue des produits finis du de l'Inconel 718.
- La combinaison d'une vitesse de coupe plus grande et d'une vitesse d'avance plus faible a été recommandée pour optimiser la sélection afin d'obtenir une meilleure qualité de surface.

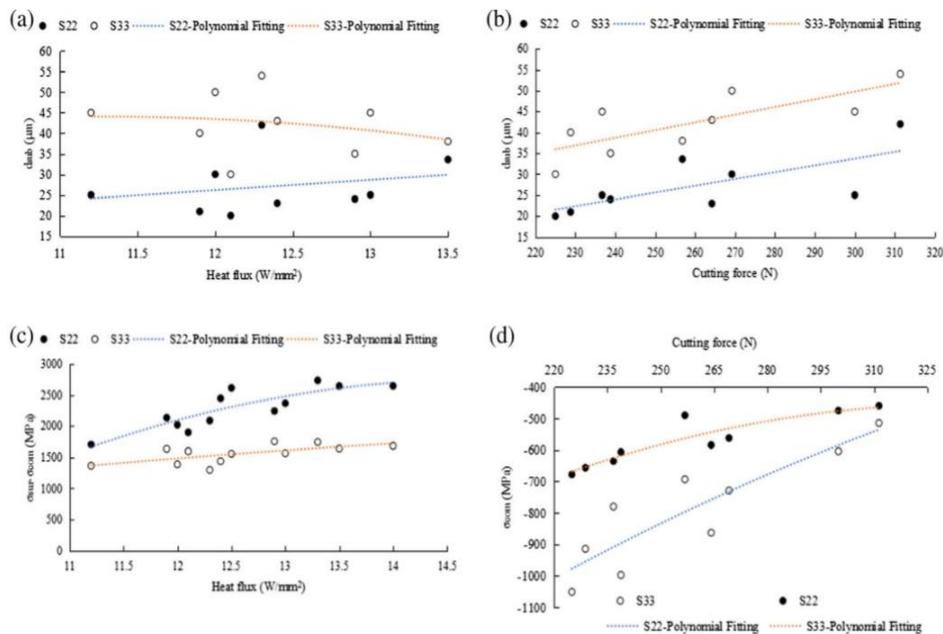


Figure I. 19: L'effet du chargement thermique et mécanique sur la contrainte résiduelle ;

(a) l'effet du flux thermique sur σ_{sub} ; (b) l'effet de la force de coupe sur σ_{sub} ; (c) l'effet du flux de chaleur sur $(\sigma_{sur} - \sigma_{com})$; (d) l'effet de l'effort de coupe sur σ_{com} [23].

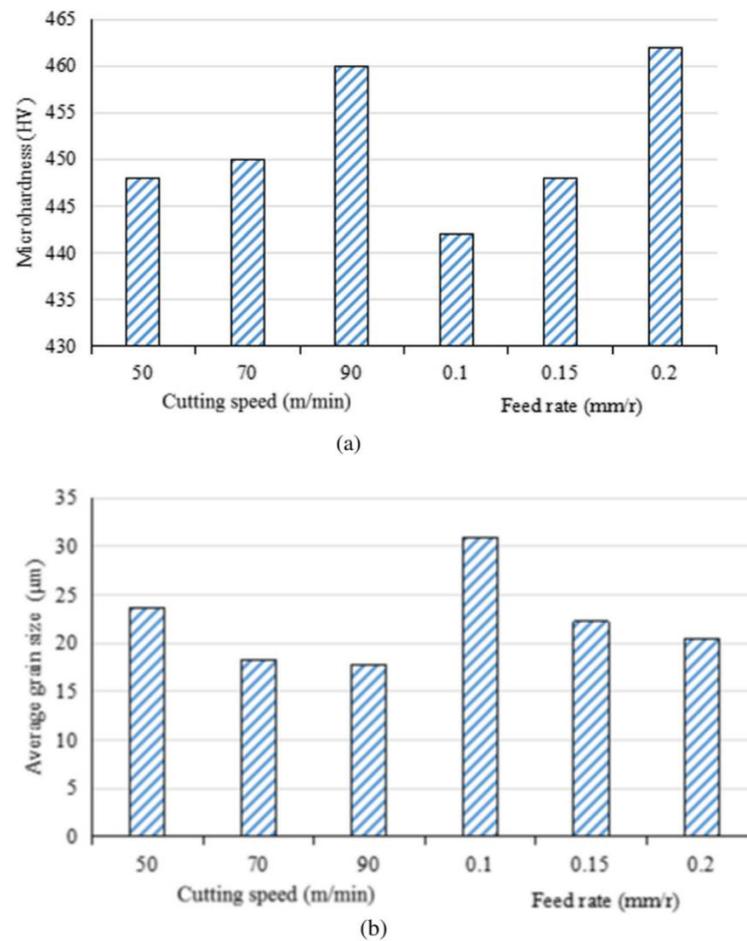


Figure I. 20: L'histogramme de (a) la micro-dureté et les paramètres de coupe, et (b) la taille moyenne des grains [23].

Dans l'étude de Djordje Cica et al. [24], les auteurs ont étudié l'évolution des états de surface et des efforts de coupe lors du tournage du linconel 718. Ainsi, cette étude propose l'investigation expérimentale et l'optimisation multi-objectif des paramètres du tournage assisté par jet à haute pression de l'Inconel 718 avec des outils en carbure revêtus. Le tableau orthogonal L27 de Taguchi a été utilisé pour la conception expérimentale. L'usinage a été réalisé par un outil en carbure revêtu. Les conditions de coupe sont listées dans le tableau I.8.

Tableau I. 8 : Les facteurs de conception et leurs niveaux [24].

Symbole	Paramètres d'usinage	Niveau		
		1	2	3
A	Diamètre de la buse, D (mm)	0.25	0.3	0.4
B	Distance entre le point d'impact du jet et l'arête de coupe, s (mm)	0	1.5	3
C	Pression du jet, p (MPa)	50	90	130
D	Vitesse de coupe, v_c (m/min)	46	57	74
E	Avance, f (mm/tour)	0.2	0.224	0.25

Les résultats sont résumés comme suit :

- L'analyse statistique des résultats montre que la puissance de coupe est principalement influencée par la vitesse de coupe, suivie par l'avance et la pression du jet.
- Selon les résultats présentés, la puissance hydraulique diminue de manière drastique lorsque la pression du jet et le diamètre de la buse diminuent, tandis que les effets des autres paramètres se sont avérés insignifiants.
- Comme prévu, la vitesse de coupe et l'avance ont un effet important et croissant sur le MRR, tandis que la rugosité de surface est fortement affectée par l'avance.
- Les résultats montrent également que l'avance, la pression du jet et le diamètre de la buse sont les facteurs les plus importants en ce qui concerne la température de l'outil de coupe.
- Les cinq paramètres d'usinage ont tous eu au moins un effet sur la longueur des copeaux dans cette étude et une réduction importante de la taille des copeaux peut être obtenue en augmentant la pression du jet.
- Dans le problème d'optimisation multi-objectif, les six caractéristiques de performance ont été considérées simultanément et A1B2C1D3E3 était le niveau optimal recommandé selon l'analyse GRA.
- L'ANOVA a révélé que la pression du jet est le paramètre le plus significatif influençant les multiples caractéristiques de performance, suivi par la vitesse de coupe et le diamètre de la buse
- L'interaction entre la vitesse de coupe et l'avance, le diamètre de la buse et la pression du jet et la distance entre le point d'impact du jet, et l'arête de coupe et la vitesse de coupe sont également des paramètres de processus significatifs avec une contribution en pourcentage de 24,3%, 2,2% et 1,2%, respectivement.
- Les contributions en pourcentage des termes carrés de la vitesse de coupe, de la pression du jet et de l'alimentation étaient respectivement de 10%, 7,7%.
- Les résultats de l'expérience de confirmation montrent que la caractéristique de performance dans le tournage HPJA de l'Inconel 718 peut être améliorée efficacement par les approches d'optimisation multi-objectifs proposées.

- Les résultats montrent que les méthodes d'optimisation multi-objectifs proposées peuvent bien résoudre les compromis malgré le fait que les fonctions objectives sont essentiellement contradictoires entre elles.

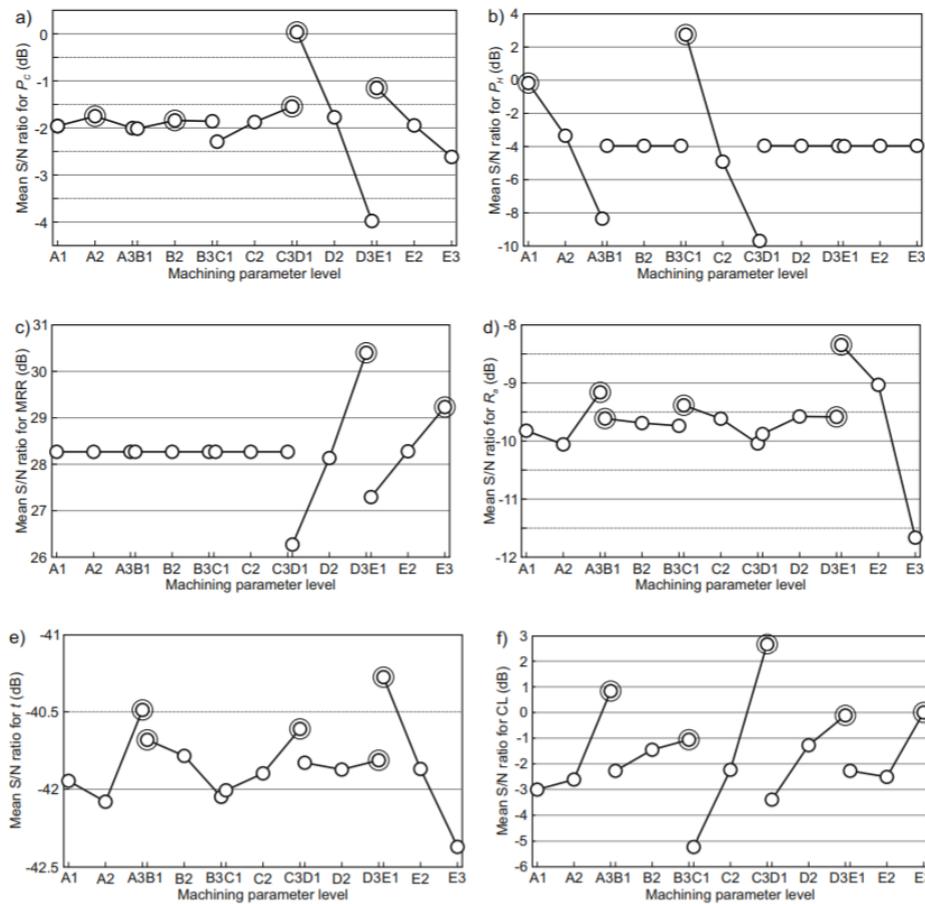


Figure I. 21: Tracé des effets principaux des rapports S/N. (a) Puissance de coupe. (b) Puissance hydraulique. (c) MRR. (d) Rugosité de surface. (e) Température de l'outil. (f) Longueur des copeaux [24].

Dans une étude de [Sadaf Zahoor et al. \[25\]](#), les auteurs ont étudié l'usinage respectueux de l'environnement de l'Inconel 718 par l'évaluation de la rugosité de surface, de l'usure des outils et du taux d'enlèvement de matière. Dans cette étude tente d'établir une alternative écologique de refroidissement par inondation, en remplaçant les fluides conventionnels par une huile synthétique biodégradable à base d'ester végétal (Mecagreen 450), pour étudier les aspects d'usinabilité de l'Inconel 718. L'usinage a été réalisé selon les conditions de coupe du tableau I.9. Le fraisage conventionnel de l'Inconel 718 a été effectué en utilisant une huile biodégradable en condition d'inondation.

Tableau I. 9: Condition du fraisage de l'Inconel 718 [25].

niveau	Facteurs de contrôle			Paramètres constants		
	Vitesse de coupe (Vc) (m/min)	Avance par dent (fz) (mm/dent)	Profondeur axiale de passe (Ap) (mm)	Profondeur radiale de coupe (mm)	Outil accrocher (mm)	Nombre de cannelures
1	65	0.10	0.20	9.7	32	2
2	80	0.15	0.30	9.7	32	2
3	95	0.20	0.40	9.7	32	2

Les résultats expérimentaux, les analyses paramétriques et microscopiques, ainsi que la discussion susmentionnée permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Afin d'obtenir de plus petites valeurs de rugosité de surface et l'usure de l'outil, Mecagreen 450 en condition d'inondation pourrait être la stratégie de refroidissement appropriée pour l'usinage de l'Inconel 718 à faible vitesse de coupe.
- En ce qui concerne la rugosité de surface, la vitesse de coupe s'est avérée être le facteur statistiquement le plus significatif, avec une contribution de 74,44%, suivie par l'avance/dent, avec une contribution de 18,79%. En outre, les tracés d'effet principal révèlent que 65 m/min vs, 0,1 mm fz, et 0,3 mm ap produisent la meilleure finition de surface, pour les conditions expérimentales étudiées.
- En ce qui concerne l'usure de l'outil, l'abrasion et l'usure par adhérence ont été observées comme les types d'usure les plus importants.
- Ces résultats sont en outre validés par des analyses SEM et EDS qui ont confirmé l'existence d'écaillage de l'outil, de rainurage, de BUE et d'usure du flanc sur les plaquettes en carbure.
- L'usure maximale du flanc (101,50 μm) a été obtenue à 10 passes de 630 mm de distance.
- Aussi, l'ANOVA prouve que la vitesse de coupe et l'avance/dent sont les variables de contrôle influentes avec une contribution de 87,5% et 9,1%, respectivement.
- Indépendamment de la vitesse de coupe, un taux d'enlèvement de matière élevé (1668,63 mm^3/min) a été atteint pour des valeurs plus élevées de fz et ap.
- L'ANOVA confirme également que l'avance par dent et la profondeur axiale de coupe sont des variables influentes avec une contribution de 34,15 % et 58,66 %, respectivement.
- Les plus petites valeurs de Ra et VB produites au cours de la présente expérimentation indiquent que la stratégie de refroidissement employée peut potentiellement être utilisée comme une méthode de refroidissement respectueuse de l'environnement pour le fraisage de l'Inconel 718.
- En ce qui concerne le futur de cette recherche, les effets de diverses huiles biodégradables intégrées à des conditions d'inondation peuvent être envisagés afin de comparer l'amélioration en termes de qualité d'usinage et de respect de l'environnement.

I.4. Conclusion :

Nous présentons dans cette étude bibliographique les bases nécessaires à la compréhension de notre sujet de recherche. Ce chapitre est divisé en trois parties, la première partie couvre le phénomène de la coupe des métaux. Une seconde partie est dédiée aux définitions et présentations du matériau de notre étude « Le nickel », de ces domaines d'utilisations et de son mode de fabrication. La seconde partie est dédiée aux alliages de l'inconel en général, leurs propriétés et leur comportement lors de l'usinage.

Après avoir étudié et discuté les travaux de recherche précédents nous pouvons conclure que l'inconel 718 est classé parmi les matériaux difficiles à usiner à cause de ces caractéristiques physiques et mécaniques. Le second chapitre présente l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

Chapitre II

Matériau et protocole des essais

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'ensemble des moyens et des techniques expérimentales utilisées pour l'élaboration des expériences afin d'examiner, modéliser et optimiser les paramètres technologiques obtenues lors du tournage et cela dans le souci d'étudier l'usinabilité du super alliage réfractaire (Inconel 718). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés qui servent au suivi de l'évolution de la rugosité des surfaces obtenues, et des efforts de coupe générés. Nous présentons également la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) du département de génie mécanique de l'université du 08 Mai 1945 de Guelma.

II.2. Equipements utilisés

II.2.1. Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque « TOS TRENCIN », modèle SN 40C de puissance sur la broche égale à 6,6 KW (fig. II.1). Les fréquences de rotation disponibles sur le tour sont : (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400 et 2000) tr/min. Les avances disponibles sur la machine sont : (0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24; 0,8... ; 6,4) mm/tr.



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

II.2.2. Outils de coupe utilisés

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil sur lequel est fixée la plaquette mécaniquement par bride. La géométrie des portes outils est la même donnée dans le **tableau II-1**. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte outil. Une calle support en carbure métallique vissé et rectifiée, protège le porte outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

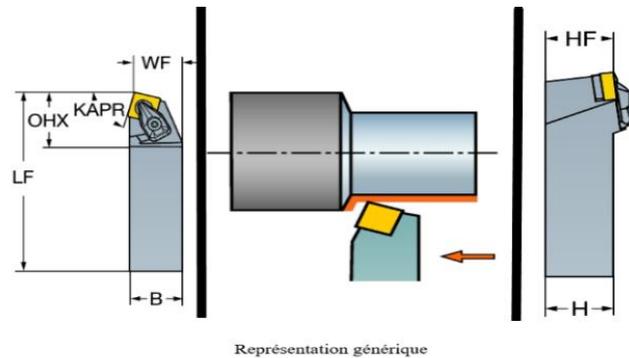
Tableau II.1: Caractéristiques géométriques des porte outils

Porte outil	Largeur fonctionnelle (WF)	Angle de l'arête de coupe de l'outil (KAPR1)	Porte-à-faux maximal (OHX)	Longueur fonctionnelle (LF)	Hauteur fonctionnelle (HF)	Largeur de queue (B)	Hauteur de queue (H)
CSBNR2525M12	22 (mm)	75°	34.3 (mm)	150 (mm)	25 (mm)	25 (mm)	25 (mm)

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée à fixation par bride. Toutes les informations relatives à ces plaquettes de coupe sont regroupées dans le **tableau II.2**.

Tableau II.2: Informations relatives aux plaquettes de coupe

Matériau de coupe	Désignation firme	Désignation ISO	Firme	Composition
Céramique composite	CC670	SNGN 120408	Sandvik	Al ₂ O ₃ + SiC

**Figure II.2:** Porte outil utilisé et représentation générique [26].**Figure II.3 :** Plaquette de coupe utilisée en céramique cc670 [27].

II.3. Matériau à usiner

L'Inconel 718 est un alliage qui doit être durci par vieillissement. Il est très résistant et convenable à des températures variant de -423° à 1300°F . La résistance à la fatigue de l'alliage 718 est élevée. En plus, l'Inconel 718 possède des propriétés excellentes contre la rupture sous tension jusqu'à 1300°F , de même qu'une résistance à l'oxydation jusqu'à 1800°F . Cet alliage offre une bonne résistance à la corrosion dans une grande variété d'environnements. La meilleure caractéristique de l'Inconel 718 est sa réaction lente au durcissement par vieillissement. La réaction lente permet au matériau d'être soudé et recuit sans durcir spontanément à moins d'être refroidi lentement. L'Inconel 718 peut également être réparé par soudure même après durcissement par vieillissement. Les applications typiques sont: moteurs à réaction; pièces de pompe et pompes; moteurs de fusée et inverseurs de poussée; vaisseaux spatiaux. Les caractéristiques physiques et chimiques de l'Inconel 718 sont données au **tableau II.3**.

Tableau II.3: Composition chimique et caractéristiques physiques de l'Inconel 718

Els	C	Mn	Sn	P	S	Ni	Cr	C	Fe	Mo	Ti	Cu	Al	Cb+ Ta
% Max	0.08	0.35	0.35	0.015	0.015	55	21	1	20	3.3	1.15	0.15	0.8	5.5
% Min	-	-	-	-	-	50	17	-	18.5	2.8	0.65	-	0.35	4.75
Dureté	36 HRC													

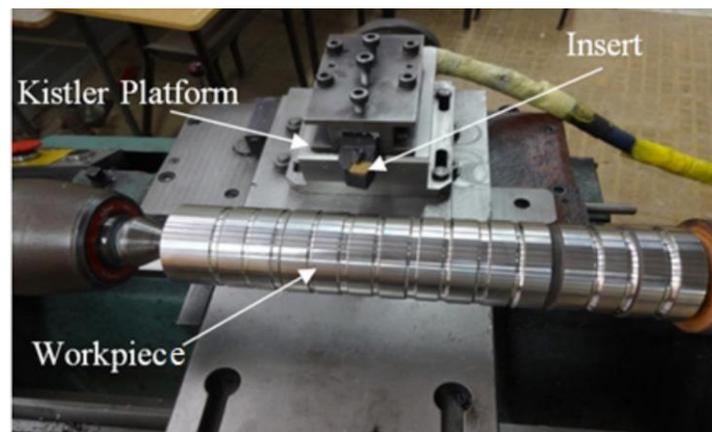


Figure II.4 : Une barre de l'inconel 718 [21].

II.4. Appareillages de mesure utilisés

a) Mesure des efforts de coupe :

Pour connaître l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne dynamomètre (KISTLER 9257 B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe (**figure II.6**).

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (**figure II.5**). Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques. Ces dernières 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 :

- Force axiale : F_x (F_a);
- Force radiale : F_y (F_r);
- Force tangentielle : F_z (F_v) ;

Le dynamomètre (9257 B) présente les caractéristiques suivantes :

- Grande rigidité, fréquence propre très élevée;
- Large gamme de mesure ;
- Bonne linéarité, sans hystérésis;
- Faible interaction (<1%) ;
- Utilisation simple (prêt à l'emploi);
- Construction compacte ;
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- Ordinateur personnel (PC).

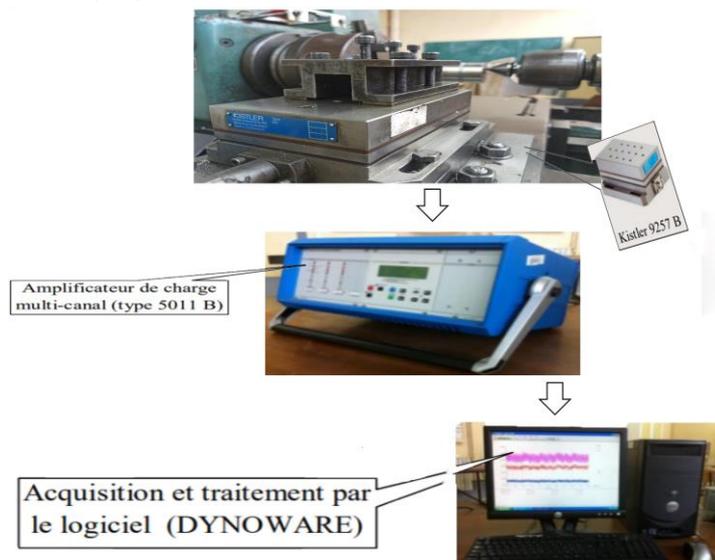


Figure II.5: Plateforme Kistler avec interface pour la mesure des efforts de coupe.

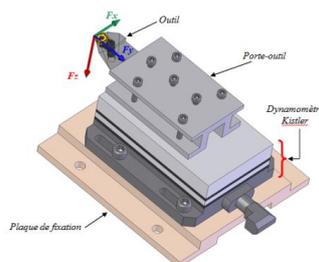


Figure II.6 : Montage du dynamomètre sur la table de la machine

b) Mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) (**figure II.7**). SurfTest 301 (Mitutoyo) avec une résolution de $0.1\mu\text{m}$, équipé d'une imprimante de profil de rugosité. Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur) avec un rayon de pointe de $5\ (\mu\text{m})$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation est de $4\ (\text{mm})$ avec une longueur de base de $0.8\ (\text{mm})$, (0.8×5) . La plage de mesure des critères de rugosité est de $(0.05\ \text{à}\ 40\ \mu\text{m})$ pour R_a et de $(0.3\ \text{à}\ 160\ \mu\text{m})$ pour R_t et R_z . À fin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce. Le rugosimètre a été étalonné avant chaque campagne d'essais sur un étalon de caractéristiques : R_a égale à $3.2\ (\mu\text{m})$.



Figure II.7: Rugosimètre (2D)

II.4.1. Autres équipements

1. Un chronomètre pour enregistrer le temps d'usinage ;
 2. Un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce ;
 3. Un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés.
- ✚ Logiciel **MiniTAB18** pour la modélisation de la rugosité de surface et le débit de copeau enlevé pour obtenir les modèles de prédiction (Figure II.8).
 - ✚ Logiciel **Design Expert 12** qui est développé par la société de Stat-ease pour effectuer l'optimisation de la rugosité et l'optimisation du débit de copeau enlevé en utilise la méthodologie de surface de réponse (RSM) (Figure II.9).

Tableau des réponses pour les rapports signal/bruit

Niveau	ap	Vc	f	Ra	Rt	Rz	Fa	Fr	Fv
1	110	0.15	0.08	0.30	1.21	1.00	30.71	82.9	74.0
2	110	0.30	0.12	0.80	3.00	2.40	74.10	151.8	158.0
3	110	0.45	0.16	1.30	5.00	3.92	111.10	232.8	239.6
4	156	0.15	0.12	0.55	1.87	2.10	29.91	93.8	69.9
5	156	0.30	0.16	1.05	3.87	3.60	82.60	152.8	161.8
6	156	0.45	0.20	0.50	1.61	1.22	89.60	195.9	183.4
7	220	0.15	0.16	1.11	3.57	2.40	38.00	89.0	84.0
8	220	0.30	0.08	0.55	1.76	1.30	50.20	109.9	118.8
9	220	0.45	0.12	1.05	4.07	2.72	96.90	203.8	202.0

Figure II.8: Interface de logiciel MiniTAB18.

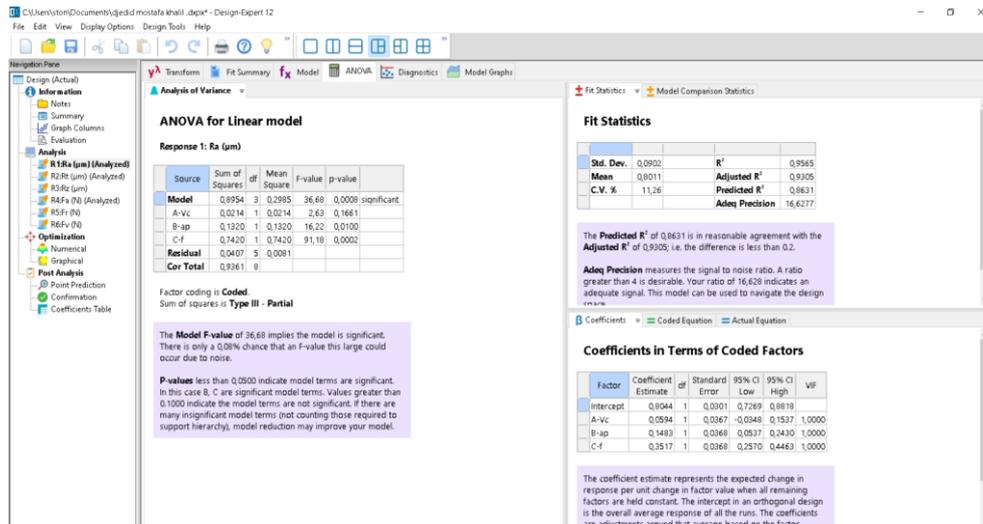


Figure II.9: Interface de logiciel Design Expert 12 développé par Stat-ease.

II.5. Conditions de coupe

Les essais d'usinage sont effectués sur le super alliage base nickel inconel 718, il est porté sur l'outil à plaquette céramique. A la fin de chaque opération d'usinage Ra, Rt, Rz et les efforts de coupe sont mesurés. Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage). La pièce est maintenue en montage mixte.

II.6. Planification des expériences

II.6.1. Introduction

Il existe plusieurs éléments intervenant sur le processus de coupe: les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (r , α , γ , λ , β , ε etc...), ainsi que les conditions de coupe (rigidité de la machine, lubrification). On peut dire que tous ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre, les efforts de coupe, l'usure (durée de vie de l'outil), la rugosité, la température de coupe représentent les paramètres de sortie. En ce qui concerne notre étude plusieurs points apparaissent importants à traiter (la géométrie de l'outil de coupe, le matériau de coupe, lubrification, etc...). Toutefois, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution des paramètres suivants:

- La rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe: Vitesse de coupe, avance et profondeur de passe;
- Les efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe: Vitesse de coupe, avance et profondeur de passe;
- La température dans la zone de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe: Vitesse de coupe, avance et profondeur de passe;
- Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure.
- Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure.
- Evolution de la température de coupe en fonction du temps.
- Evolution de l'usure en fonction du temps.

II.6.2. Méthodologie de recherche

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe. La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Considérant $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ comme paramètres d'entrée et $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ comme paramètre de sortie. L'influence d'un ou plusieurs facteurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) sur un paramètre Y [27], peut être obtenue en utilisant la méthode suivante : "Méthode multifactorielle".

II.6.3. Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y_j . C'est une relation qui a la forme :

$$Y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (1)$$

Pour déterminer le nombre d'essais nécessaire nous appliquons la formule suivante:

$$N = q^k \quad (2)$$

Où: N : Nombre d'essai;

q : Nombre de niveau de variation des facteurs de base;

k : Nombre de facteurs de base.

Dans notre étude nous avons trois facteurs ($k=3$) et chaque facteur de base à trois niveaux de variation ($q=3$). Nous avons donc un nombre d'essai $N=27$. Pour diminuer le nombre d'essais sans pour autant diminuer la précision des résultats nous avons opté pour un plan de taguchi suivant la table orthogonale standard $L_9(3)^3$. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le Tableau II.4

Tableau II.4. Plan taguchi L_9 .

N° Essai	facteur		
	Vc,(m/min)	ap,(mm)	f,(mm/tr)
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

II.7. Débit de copeau enlever (MRR)

Le débit d'enlèvement de copeaux permet de mesurer la productivité d'une d'usinage. L'on applique le principe selon lequel la cadence de base de la machine diminue à mesure de l'augmentation du débit d'enlèvement de copeaux.

Le débit d'enlèvement de copeaux (MMR) désigne la quantité (volume) de copeaux enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivante :

$$MRR = V_c \times A \quad (II.1)$$

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

V_c : Vitesse de coupe [m/min].

A : Section de coupe [mm^2] avec :

$$A = a_p \times f \quad (II.2)$$

D'où :

$$MRR = V_c \times a_p \times f \quad (II.3)$$

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. Les propriétés techniques des éprouvettes et les caractéristiques de l'outil de coupe ont été définies, les instruments de mesure utilisés, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

Chapitre III

Résultats expérimentaux et discussions

III.1. Introduction

Dans l'industrie, la qualité du produit fini est quantifiée par certains critères liés à l'intégrité de surface et à l'outil de coupe utilisé. Ces critères peuvent être traduits par le taux de productivité, l'usure, et la résistance à la coupe.

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de l'étude d'optimisation de la rugosité de surface en terme de Ra, Rt et Rz et des efforts de coupe en terme de Fa, Fr et Fv et du taux d'enlèvement de matière MRR paramètres du régime de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe à savoir la vitesse de coupe Vc, l'avance f et la profondeur de passe ap lors du tournage de l'Inconel 718.

Le traitement des résultats est réalisé en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) dans le but de déterminer les facteurs et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés et de déduire les constantes des différents modèles mathématiques. Les résultats sont obtenus en utilisant deux logiciels de statistique appelés « MINITAB 18 » et « Design Expert 12 ».

III.2. Résultats de l'évolution de la rugosité et des composantes de l'effort de coupe en fonction des paramètres d'usinage

Pour développer des modèles statistiques de rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe une série de 9 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: Plan d'expérience de 9 essais pour l'élaboration des modèles de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage pour la céramique composite CC670.

Ordre Essai	Condition de coupe			Réponses						
	Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/tr)	Ra (µm)	Rt (µm)	Rz (µm)	Fa (N)	Fr (N)	Fv (N)	MRR (cm ³ /min)
1	110	0,15	0,08	0,30	1,21	1,00	30,71	82,9	74,0	1,32
2	110	0,30	0,12	0,80	3,00	2,40	74,10	151,8	158,0	3,96
3	110	0,45	0,16	1,30	5,00	3,92	111,10	232,8	239,6	7,92
4	156	0,15	0,12	0,55	1,87	2,10	29,91	93,8	69,9	2,808
5	156	0,30	0,16	1,05	3,87	3,60	82,60	153,8	161,8	7,488
6	156	0,45	0,08	0,50	1,61	1,32	89,60	195,9	183,4	5,616
7	220	0,15	0,16	1,11	3,57	2,40	38,00	89,0	84,0	5,28
8	220	0,30	0,08	0,55	1,76	1,30	50,20	109,9	118,8	5,28
9	220	0,45	0,12	1,05	4,07	2,72	96,90	203,8	202,0	11,88

III.3. Analyse de variance et Méthodologie des surfaces de réponse

III.3.1. Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de variance (ANOVA) est utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le processus d'usinage, elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie [28]. L'ANOVA consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par P- value et F-value.

Dans le tableau d'ANOVA, P-value est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

- Si $P > 0,05$, le paramètre est insignifiant.
- Si $P < 0,05$, le paramètre est significatif.

La somme des carrés (SC) est utilisée pour estimer la carrée de la déviation de la moyenne générale. Il est exprimé par l'équation :

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{III.1})$$

Où :

$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$: La moyenne des réponses.

y_i : la réponse moyenne observée dans les expériences.

N : nombre total d'expériences.

N_{nf} : niveau de chaque facteur f.

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté.

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (\text{III.2})$$

La colonne du tableau d'ANOVA (Cont. %), montre la contribution des facteurs sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$\text{Cont. \%} = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (\text{III.3})$$

III.3.2. Méthodologie des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques mathématiques qui se basent sur la conception expérimentale pour déterminer la portée des variables d'entrée indépendantes. Cette méthode permet, grâce à des modèles mathématiques empiriques, de déterminer une relation d'approximation entre les réponses de sortie (Y), et les variables d'entrée {vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap)} pour optimiser les paramètres du procédé (dans notre cas, c'est le tournage) afin d'atteindre des réponses souhaitables. Dans cette méthode, la réponse peut s'écrire sous la forme suivante [29].

$$Y = \varphi(\mathbf{Vc.f.ap}) \quad (\text{III.4})$$

Où : φ est la fonction de réponse.

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est une procédure qui comprend six étapes

- Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées ;
- Adopter un plan de conception expérimentale ;
- Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de RSM ;
- Analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- Déterminer la situation du modèle quadratique de RSM et de décider si le modèle de RSM à besoin des variables de dépistage ou non et enfin ;
- Optimiser les paramètres d'entrée et faire les tests de confirmation afin de vérifier les performances prédites.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Y , dite variable de réponse (rugosité de la surface, effort de coupe tangentiel, effort spécifique tangentiel et puissance de coupe...), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe...), d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1} a_i X_i + \sum_{i=1} a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j \quad (\text{III.5})$$

- Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- X_i représente le niveau attribué au facteur i . C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences. Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (III.6)

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

y_i : valeur de la réponse calculée à la $i^{\text{ème}}$ expérience.

\bar{y}_i : Valeur mesurée à la $i^{\text{ème}}$ expérience.

\bar{y} : Valeur moyenne des réponses mesurées.

L'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour tester la validité du modèle, ainsi qu'examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérés statistiquement significatifs. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réelles (expérimentales) [29-30].

III.4. Analyse statistique et modélisation des paramètres technologiques

III.4.1. Analyse des résultats de la rugosité de surface

III.4.1.1. Analyse de la variance ANOVA pour (Ra)

Le **tableau III.2** présente l'analyse de variance ANOVA pour le critère de rugosité (Ra). On note que la vitesse d'avance (f) est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 79,27%, suivi par la profondeur de passe (ap) avec une contribution 14,10%, puis de la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 2,28%.

Tableau III. 2: L'analyse de variance ANOVA pour le critère de rugosité (Ra).

Source	DL	SS	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	F	P	Remarques
Modèle	3	0,89540	95,65%	0,89540	0,298466	36,68	0,001	Signifiant
Linéaires	3	0,89540	95,65%	0,89540	0,298466	36,68	0,001	Signifiant
Vc	1	0,02137	2,28%	0,02137	0,021366	2,63	0,166	Non signifiant
ap	1	0,13202	14,10%	0,13202	0,132017	16,22	0,010	Signifiant
f	1	0,74202	79,27%	0,74202	0,742017	91,18	0,000	Signifiant
Erreur	5	0,04069	4,35%	0,04069	0,008138			
Total	8	0,93609	100,00%					

$R^2=95,65\%$ R^2 (adj) =93,05%

III.4.1.2. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Ra)

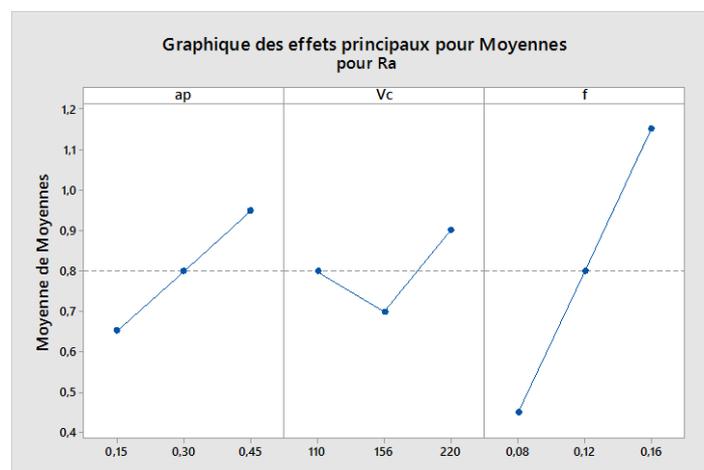


Figure III. 1: Graphique des effets principaux pour (Ra).

La **figure III.1** présente les effets principaux des paramètres de coupe sur la rugosité (Ra) en fonction des conditions de coupe.

▪ **Effet de la profondeur de passe :**

L'augmentation de la profondeur de passe implique une section du copeau plus élevée et des efforts de coupe plus importants ce qui conduit à l'apparition des vibrations au niveau de la machine-outil et de la pièce. Ces vibrations peuvent influencer l'état de surface de l'Inconel 718.

▪ **Effet de la vitesse de coupe :**

Une augmentation de la vitesse de coupe se traduit par une meilleure finition de surface. A partir de la vitesse de coupe de 156 m/min, l'état de surface commence à se détériorer. Ce phénomène est principalement causé par l'augmentation de la température dans la zone de coupe et la présence d'arête rapportée sur l'outil et de copeaux adhérent à la pièce.

▪ **Effet de l'avance :**

L'analyse des graphes montre que l'avance (f) est le facteur le plus influent sur la rugosité (Ra) car il a la plus grande pente. Ce qui signifie qu'une augmentation de l'avance entraîne une augmentation de la rugosité de surface.

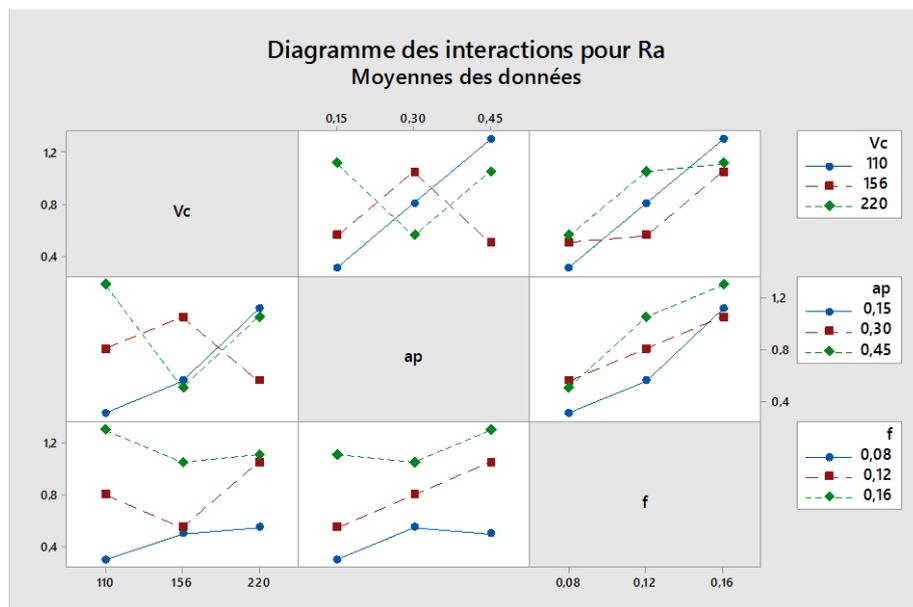


Figure III. 2: Diagramme d'interaction pour (Ra).

On utilise la matrice de diagrammes d'interactions pour visualiser l'effet des interactions sur la réponse. Dans la **figure III.2** on remarque que pour le cas de l'interaction $ap \cdot f$, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance.

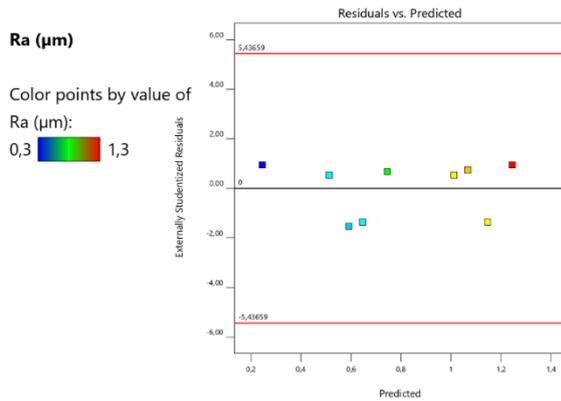


Figure III. 3: Graphiques des valeurs résiduelles vs prédites pour l'ajustement du modèle pour le critère de rugosité (Ra).

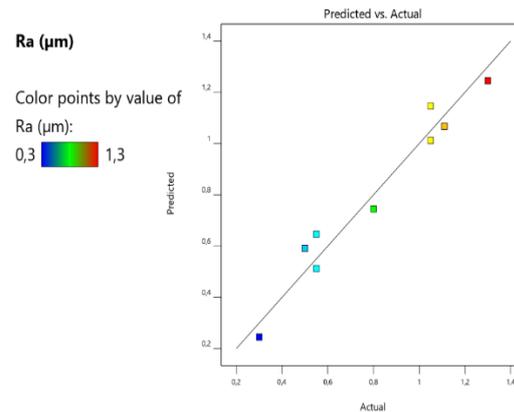


Figure III.4: Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Ra).

Dans la **figure III.3** on peut voir que les valeurs des erreurs sont incluses dans l'intervalle de la tolérance.

Dans la **figure III.4** les valeurs mesurées et celles prédites sont très proches de la ligne à 45°.

III.4.1.3. Equation de régression pour (Ra)

La relation entre la rugosité moyenne arithmétique (Ra) et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et a_p) ont été exprimées par le modèle mathématique linéaire donné par l'équation (III.7), avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 95,65\%$).

$$\mathbf{Ra} = -0,726 + 0,001080 V_c + 0,989 a_p + 8,792 f \quad \text{(III.7)}$$

III.4.1.4. Diagramme de surface 3D et graphique de contour (Ra)

La présentation 3D montre que la pente des diagrammes de l'avance est la plus importante par rapport à celles des deux autres facteurs, ce qui signifie que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité de surface (Ra). Les tracés de contour, d'autre part, permettent la visualisation de la surface de réponse. Ils sont également utilisés pour établir des valeurs de réponse et des conditions de fonctionnement idéales (voir **figure II.5**).

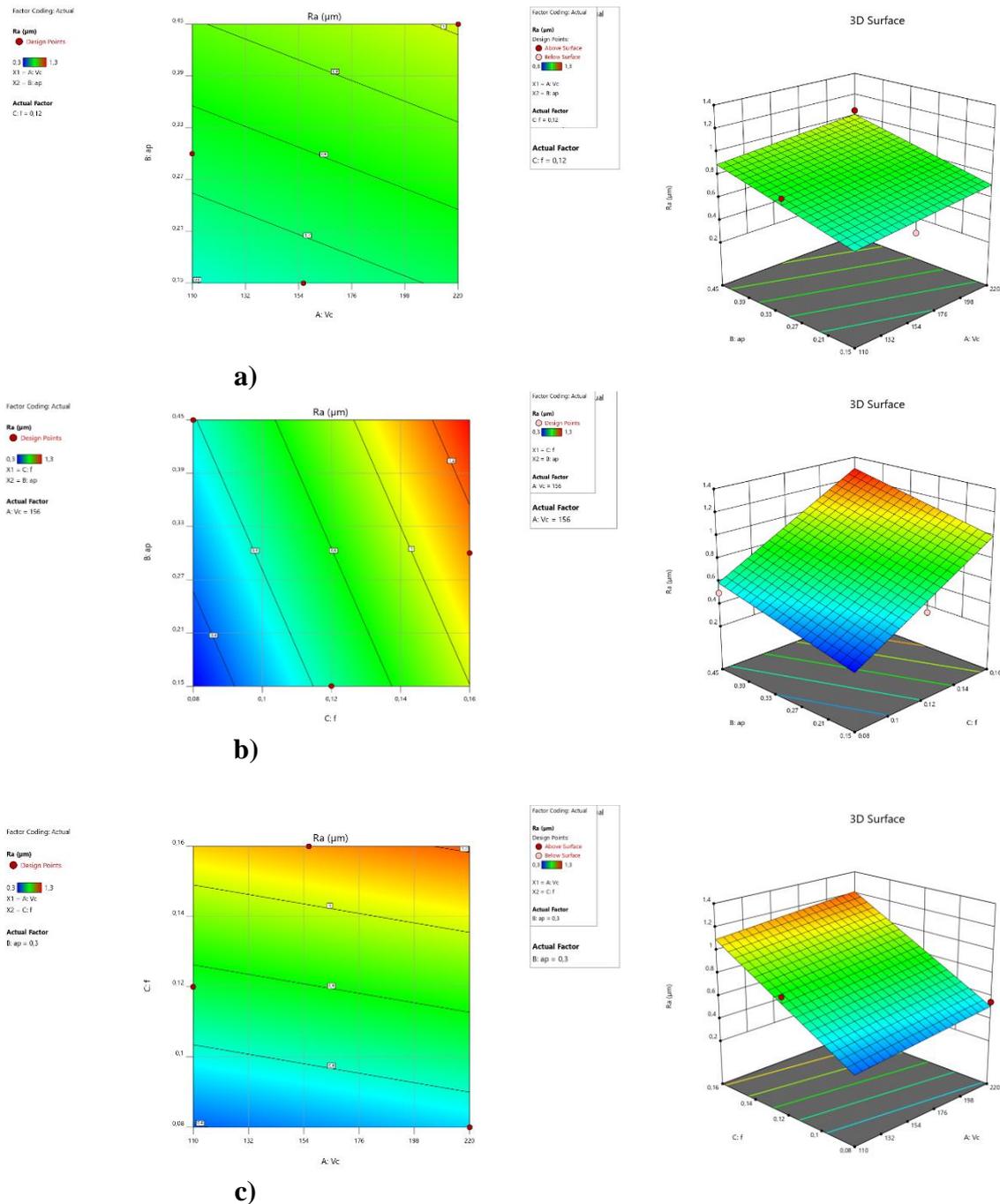


Figure III. 5: Diagramme de surface 3D pour Ra en fonction de Vc, f et ap et les graphes de contour ; a) En fonction de Vc et ap ; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc.

III.4.2. Analyse de la variance ANOVA pour (Rt)

Le tableau III.3 présente l'analyse de variance ANOVA pour le critère de rugosité (Rt). On note que la vitesse d'avance (f) est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 73,25%, suivi par la profondeur de passe (ap) avec une contribution 19,26%, puis de la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 0,19%.

Tableau III. 3: ANOVA pour le critère de rugosité (Rt).

Source	DL	SS	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	Remarques
Modèle	3	13,0303	92,69%	13,0303	4,3434	21,15	0,003	Signifiant
Linéaires	3	13,0303	92,69%	13,0303	4,3434	21,15	0,003	Signifiant
Vc	1	0,0269	0,19%	0,0269	0,0269	0,13	0,732	non Signifiant
ap	1	2,7068	19,26%	2,7068	2,7068	13,18	0,015	Signifiant
f	1	10,2966	73,25%	10,2966	10,2966	50,13	0,001	Signifiant
Erreur	5	1,0269	7,31%	1,0269	0,2054			
Total	8	14,0572	100,00%					
$R^2 = 92,69\%$				$R^2(\text{ajust}) = 88,31\%$				

III.4.2.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Rt)

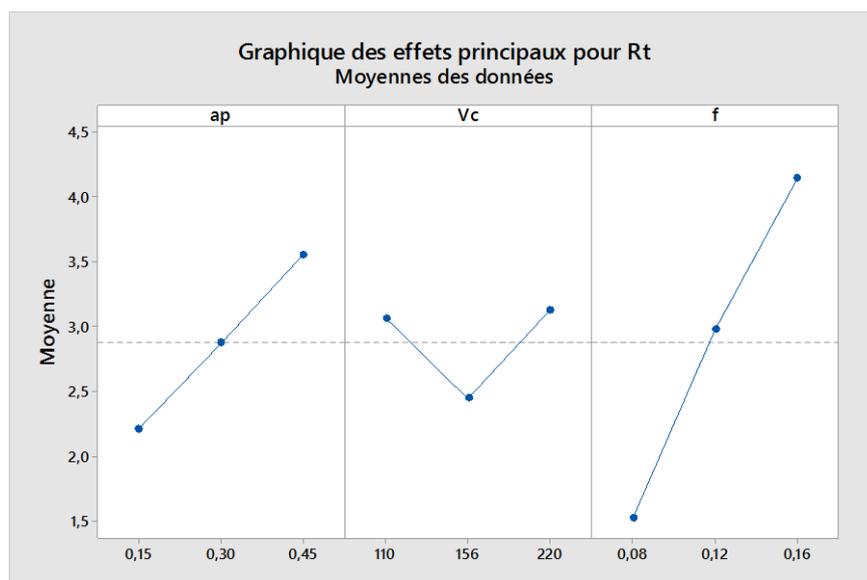


Figure III. 6: expose les graphiques des effets principaux pour (Rt) en fonction de conditions de coupe (Vc, f, ap).

La **figure III.6** expose les graphiques des effets principaux pour (**Rt**) en fonction de conditions de coupe (Vc, f, ap). L'analyse des graphes montre que l'avance (f) a la plus grande influence, suivie par la profondeur de passe (ap) puis la vitesse de coupe (Vc).

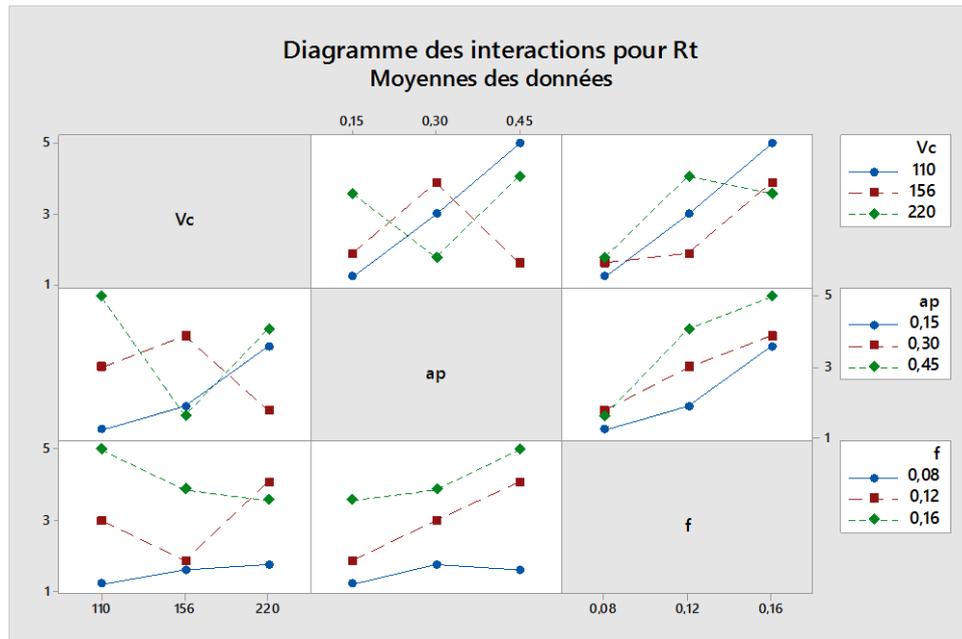


Figure III. 7: Diagramme d'interaction pour (Rt).

La figure III.7 expose le diagramme des interactions des paramètres du régime de coupe pour (Rt). On remarque que pour le cas de l'interaction entre ap et f. Les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance.

III.4.2.2. Equation de régression pour (Rt)

L'équation de régression obtenue et donnée ci-dessous par l'équation (III.8) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 92,69 \%$.

$$Rt = -2,585 + 0,00121 Vc + 4,48 ap + 32,75 f \tag{III.8}$$

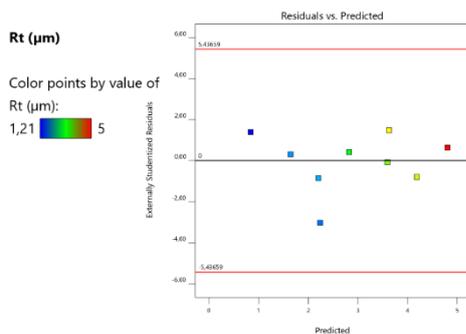


Figure III.8 : Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l'ajustement du modèle pour (Rt).

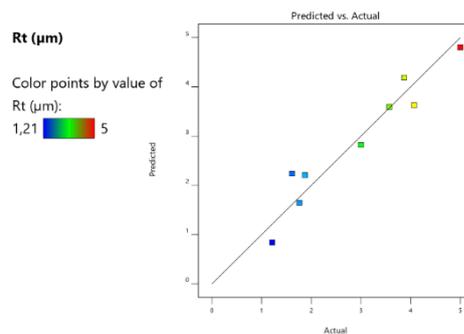


Figure III.9 : Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Rt).

La figure III.8 représente le graphique des résidus par rapport à la prédiction où la prédiction faite par le modèle est sur l'axe des x et la précision de cette prédiction est sur l'axe des y. La distance par rapport à la ligne zéro montre à quel point la prédiction est mauvaise pour une valeur donnée. Des valeurs positives des résidus sur l'axe des y signifient que la prédiction était trop faible, tandis que des valeurs négatives signifient que la prédiction était trop forte.

La **figure III.9** montre le graphique de la prédiction, par rapport à la réalité, dans lequel tous les résidus sont collectés à proximité de la ligne à 45°, ce qui montre une forte corrélation entre la prédiction du modèle et ses valeurs réelles.

III.4.2.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Rt)

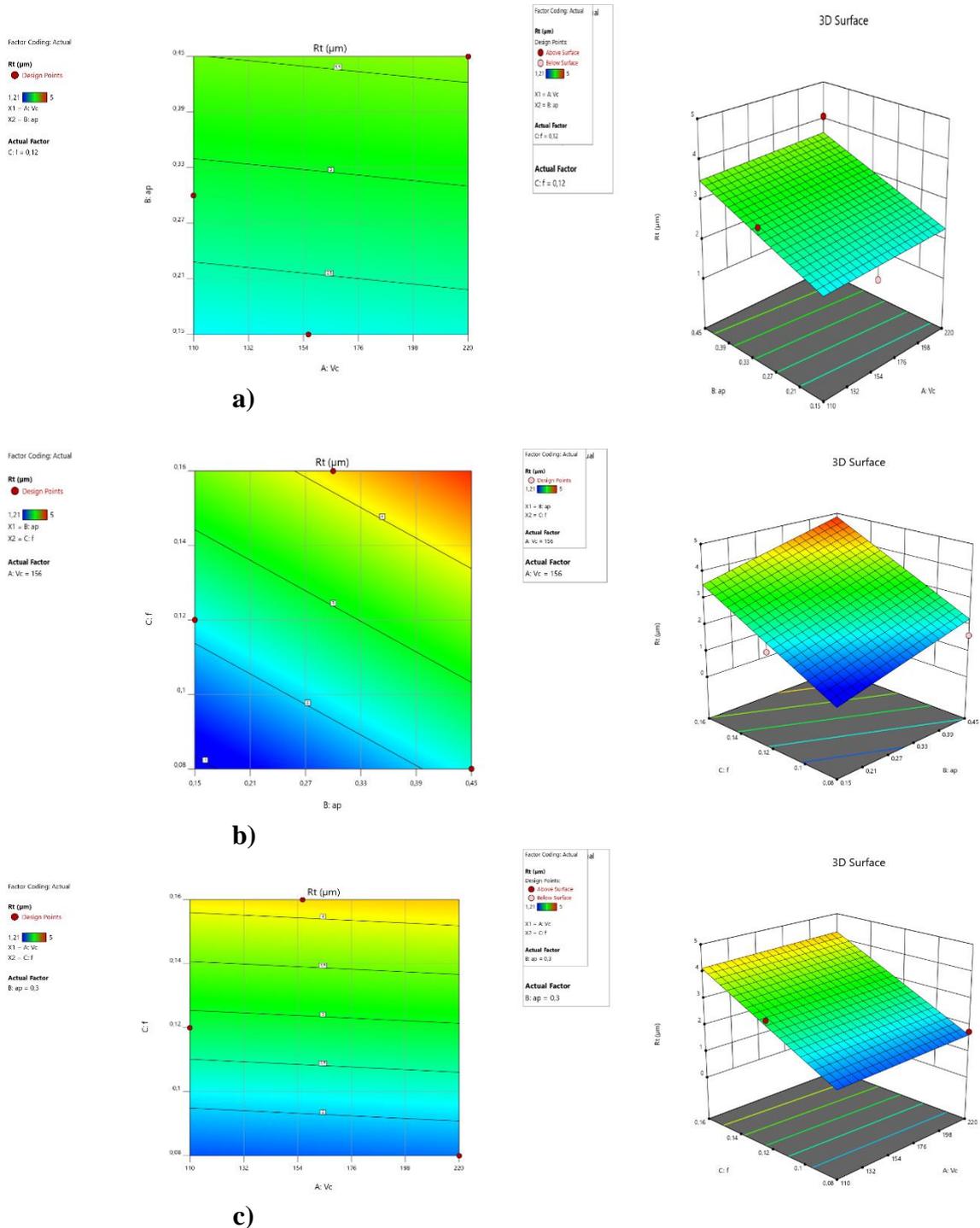


Figure III. 10: Diagramme de surface 3D pour (Rt) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour ; a) En fonction de Vc et ap ; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc.

De toute évidence, la **figure III. 10** montre que l'avance par tour (f) est le facteur le plus important affectant la rugosité de surface (Rt), suivie de la profondeur de coupe (ap), tandis que

la vitesse de coupe (V_c) n'a pas d'effet significatif sur (R_t). Le graphique précédent montre la relation entre la valeur de réponse (R_t) et les trois facteurs dans l'équation du modèle. Connectez des points avec la même réponse pour générer des contours de réponse constants.

III.4.3. Analyse de la variance ANOVA pour (R_z)

Le **tableau III.4** présente l'analyse de variance ANOVA pour le critère de rugosité (R_z). On note que la vitesse d'avance (f) est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 80,66%, suivi par la profondeur de passe (ap) avec une contribution 12,30%, puis de la vitesse de coupe (V_c) avec une contribution de 1,69%.

Tableau III. 4 : ANOVA pour le critère de rugosité (R_z).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	remarque
Modèle	3	7,7623	94,65%	7,7623	2,58744	29,50	0,001	Signifiant
Linéaires	3	7,7623	94,65%	7,7623	2,58744	29,50	0,001	Signifiant
vc	1	0,1387	1,69%	0,1387	0,13872	1,58	0,264	non Signifiant
ap	1	1,0086	12,30%	1,0086	1,00860	11,50	0,019	Signifiant
f	1	6,6150	80,66%	6,6150	6,61500	75,43	0,000	Signifiant
Erreur	5	0,4385	5,35%	0,4385	0,08770			
Total	8	8,2008	100,00%					
$R^2 = 94,65\%$			R^2 (ajust)= 91,45%					

III.4.3.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (R_z)

La **figure III.11** expose les graphiques des effets principaux pour (R_z) en fonction de conditions de coupe (V_c , f , ap) l'analyse des graphes montre que l'avance (f) a la plus grande influence, suivie par la profondeur de passe (ap) puis la vitesse de coupe (V_c).

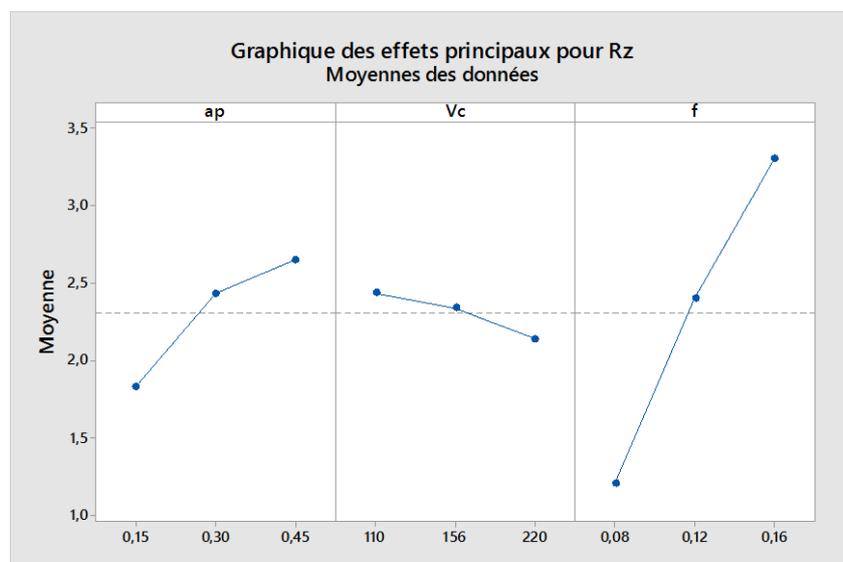


Figure III. 11 : Graphiques des effets principaux pour (R_z).

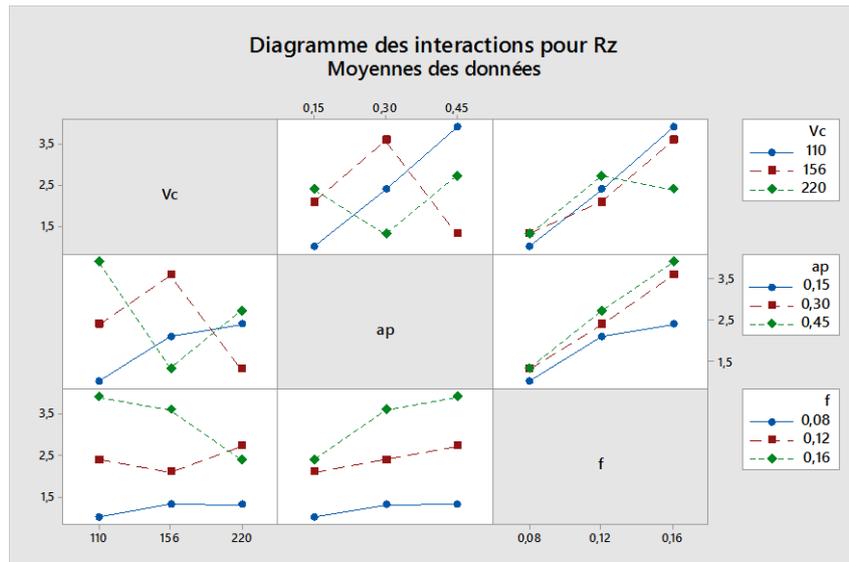


Figure III. 12: Diagramme d’interaction pour (Rz).

Sur la **figure III.12** on remarque que pour le cas de l’interaction $ap * f$, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l’existence d’une interaction entre la profondeur de passe et l’avance.

III.4.3.2. Equation de régression pour (Rz)

L’équation de régression obtenue et donnée ci-dessous par l’équation **(III.9)** avec un coefficient de corrélation $R^2 = 94,65\%$

$$Rz (\mu m) = -1,217 - 0,00275 vc + 2,733 ap + 26,25 f \tag{III.9}$$

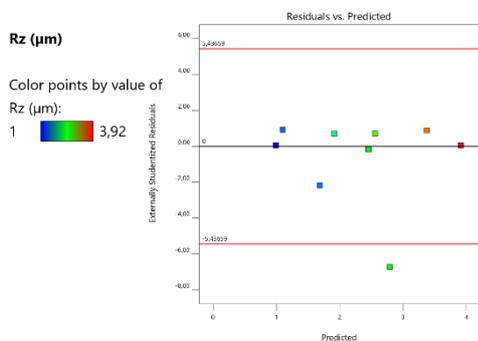


Figure III.13 : Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l’ajustement du modèle pour (Rz).

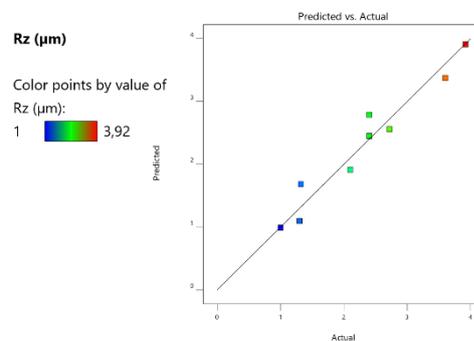


figure III.14 : Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Rz).

La **figure III.13** montre que l’hypothèse de variance constante est satisfaite par le modèle prédit, car le diagramme de dispersion aléatoire illustré à la montre la distribution des résidus sous une forme sans structure.

La **figure III.14** montre que les données réelles et les valeurs prédites par le modèle mathématique se situent sur une ligne droite à 45°, ce qui démontre l’efficacité du modèle de régression.

III.4.3.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Rz)

La figure III.15 présentée 3D montre que la pente d'avance est la plus importante par rapport à celles des deux autres facteurs, ce qui signifie que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité de surface (Rz). Les tracés de contour, d'autre part, permettent la visualisation de la surface de réponse. Ils sont également utilisés pour établir des valeurs de réponse et des conditions de fonctionnement idéales.

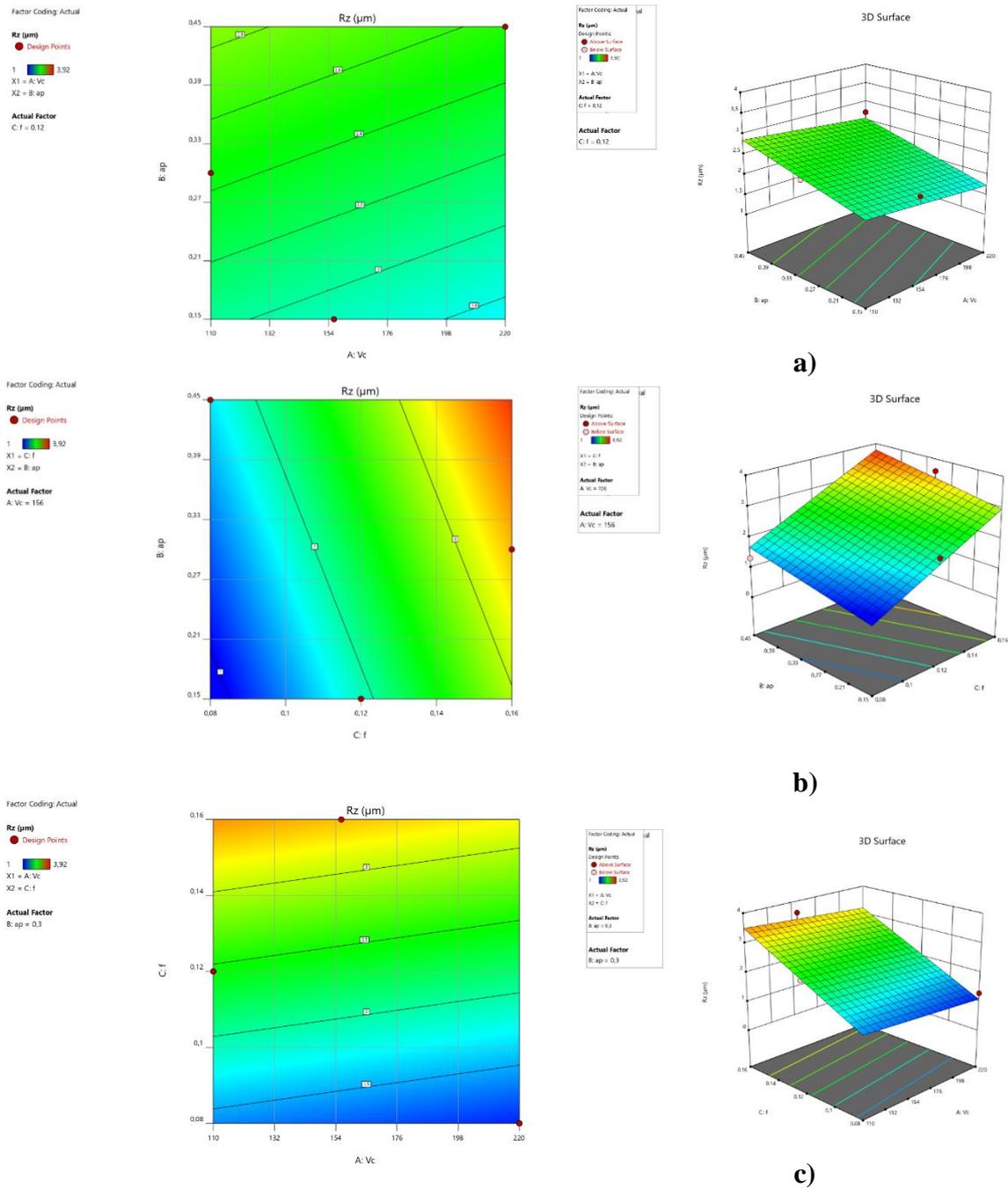


Figure III. 15: Diagramme de surface 3D pour (Rz) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour a) En de Vc et ap ; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc.

III.4.4. Analyse de la variance ANOVA pour (Fa)

Le **tableau III.5** présente l'analyse de variance ANOVA pour (Fa). On note que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 88,47%, la vitesse d'avance (f) avec une contribution 8,37%, puis de la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 2,13%.

Tableau III. 5: Analyse de variance pour (Fa).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	remarques
Modèle	3	7381,47	98,96%	7381,47	2460,49	158,24	0,000	Signifiant
Linéaires	3	7381,47	98,96%	7381,47	2460,49	158,24	0,000	Signifiant
Vc	1	158,60	2,13%	158,60	158,60	10,20	0,024	Signifiant
ap	1	6598,84	88,47%	6598,84	6598,84	424,38	0,000	Signifiant
f	1	624,04	8,37%	624,04	624,04	40,13	0,001	Signifiant
Erreur	5	77,75	1,04%	77,75	15,55			
Total	8	7459,22	100,00%					
$R^2=98,96\%$				$R^2(\text{ajust})=98,33\%$				

III.4.4.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Fa)

La **figure III.16** montre que seule la profondeur de passe a un effet significatif sur la composante (Fa). En effet, on remarque que la pente du paramètre ap est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de l'avance.

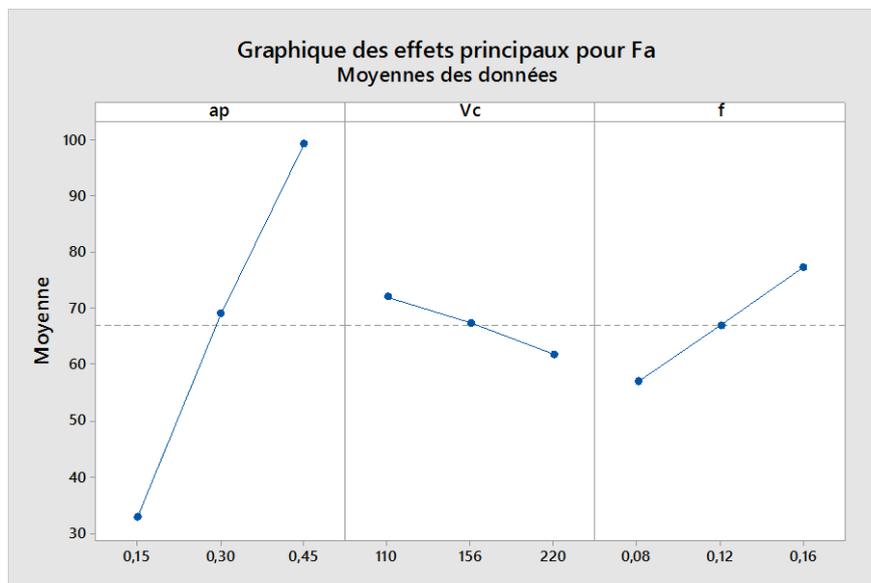


Figure III. 16: Graphiques des effets principaux pour (Fa).

La **figure III.17** présente les diagrammes des interactions des différents paramètres du régime de coupe pour la composante Fa. Notez que toutes les droites sont parallèles. Par conséquent, il n'y a pas d'interaction entre la vitesse de coupe, la profondeur de coupe et l'avance.

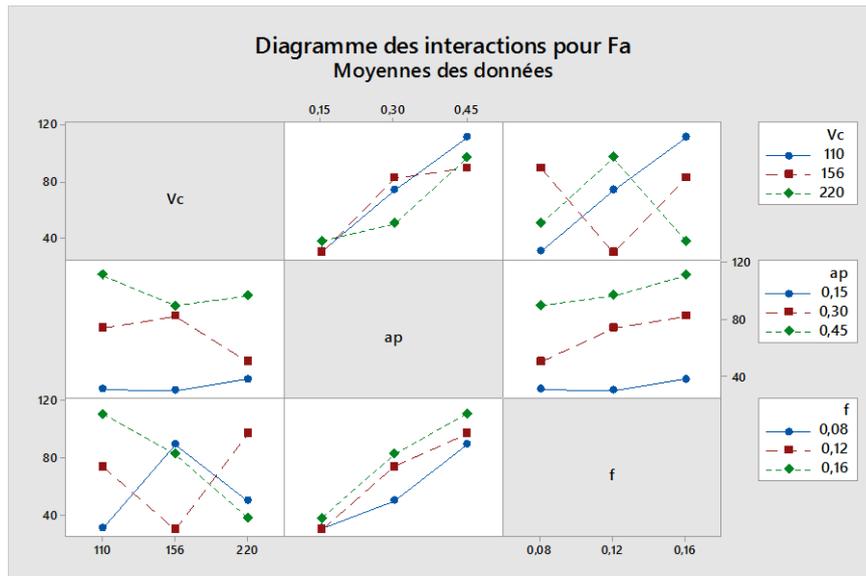


Figure III. 17: Diagramme d’interaction pour (Fa).

III.4.4.2. Equation de régression pour (Fa)

L’équation de régression obtenue et donnée ci-dessous par l’équation (III.10) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 98,96\%$

$$Fa = -14,83 - 0,0931 Vc + 221,1 ap + 255,0 f \tag{III.10}$$

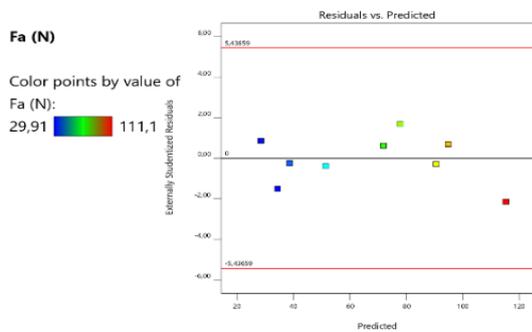


Figure III.18 : Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l’ajustement du modèle pour (Fa).

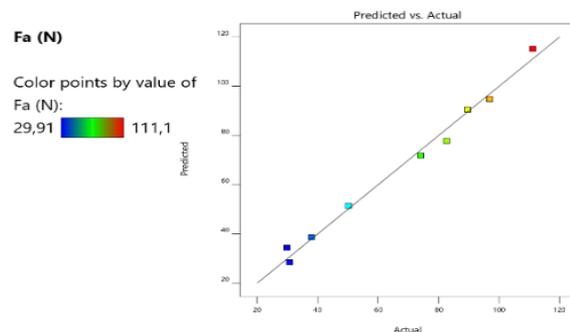


figure III.19 : Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Fa).

La figure III.18 représente le graphique des résidus par rapport à la réponse prédite, où les résidus sont dispersés de manière aléatoire, ce qui indique que la variance est constante pour toutes les expériences.

La figure III.19 montre une grande proximité entre la prédiction du modèle et les données expérimentales, ce qui signifie la validité du modèle de régression.

III.4.4.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Fa)

Dans la figure III.20 on remarque que l'influence de la profondeur de passe est plus importante, et ce à partir de la pente de la variation de l'effort (Fa) suivant l'axe ap. On remarque que l'effort augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance. Le graphe de contour montre les lignes de valeurs maximales, intermédiaires et minimales. Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (Fa) et les conditions d'exploitation souhaitables.

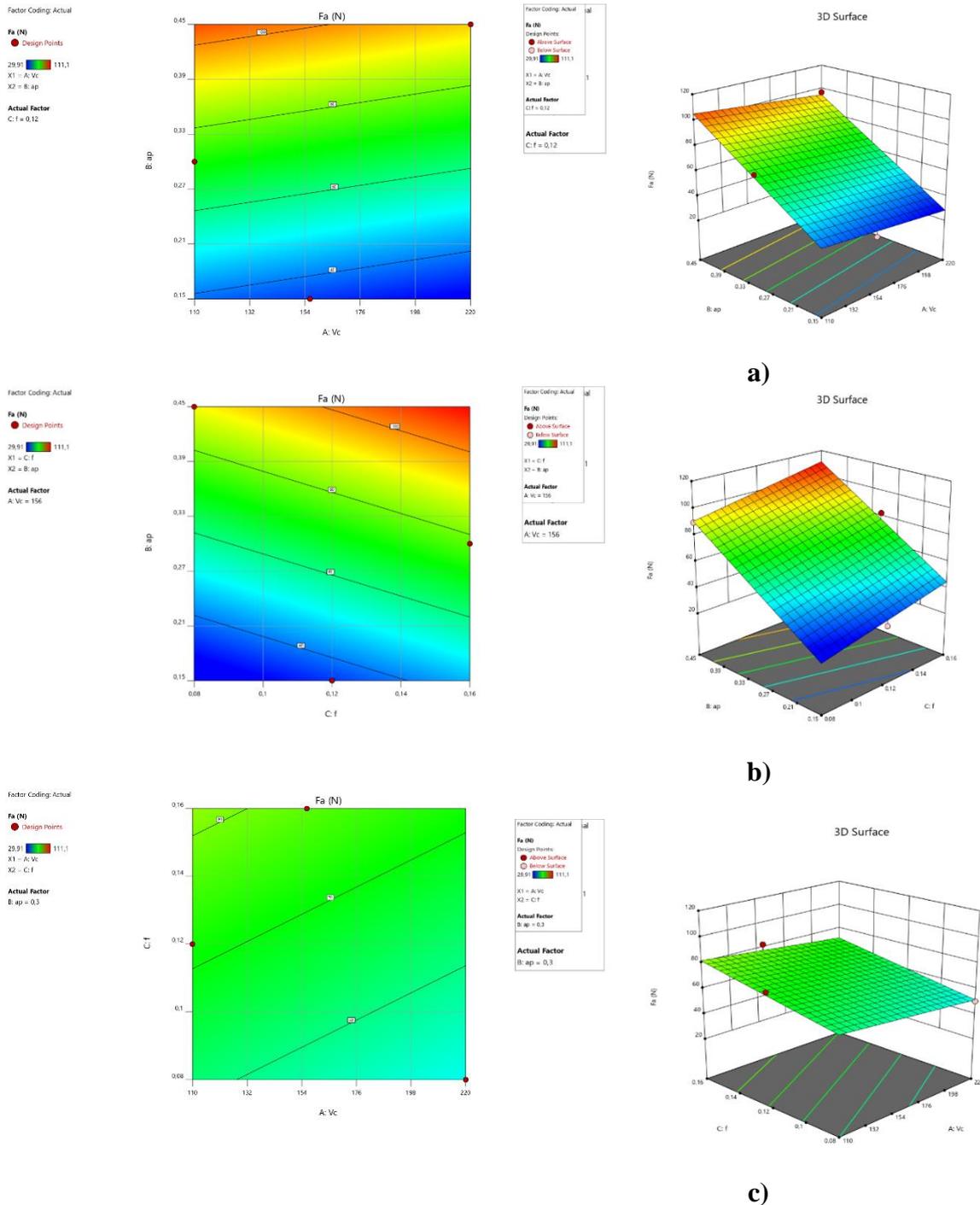


Figure III. 20: Diagramme de surface 3D pour (Fa) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour ; a) En fonction de Vc et ap; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc.

III.4.5. Analyse de la variance ANOVA pour (Fr)

Le **tableau III.6** présente l'analyse de variance ANOVA pour (Fr). On note que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 90,72%, la vitesse d'avance (f) avec une contribution 5,09%, puis de la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 2,89%

Tableau III. 6: Analyse de la variance ANOVA pour (Fr).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	remarques
Modèle	3	24395,7	98,70%	24395,7	8131,9	126,07	0,000	Signifiant
Linéaires	3	24395,7	98,70%	24395,7	8131,9	126,07	0,000	Signifiant
Vc	1	713,4	2,89%	713,4	713,4	11,06	0,021	Signifiant
ap	1	22423,7	90,72%	22423,7	22423,7	347,65	0,000	Signifiant
f	1	1258,6	5,09%	1258,6	1258,6	19,51	0,007	Signifiant
Erreur	5	322,5	1,30%	322,5	64,5			
Total	8	24718,2	100,00%					
$R^2 = 98,70\%$				$R^2 \text{ (ajust)} = 97,91\%$				

III.4.5.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Fr)

La **figure III.21** montre que la profondeur de passe à la plus grande influence sur la composante Fr, suivie de l'avance. En fait, on remarque la pente du paramètre ap Supérieure à la pente de la vitesse de coupe et à la pente de l'avance.

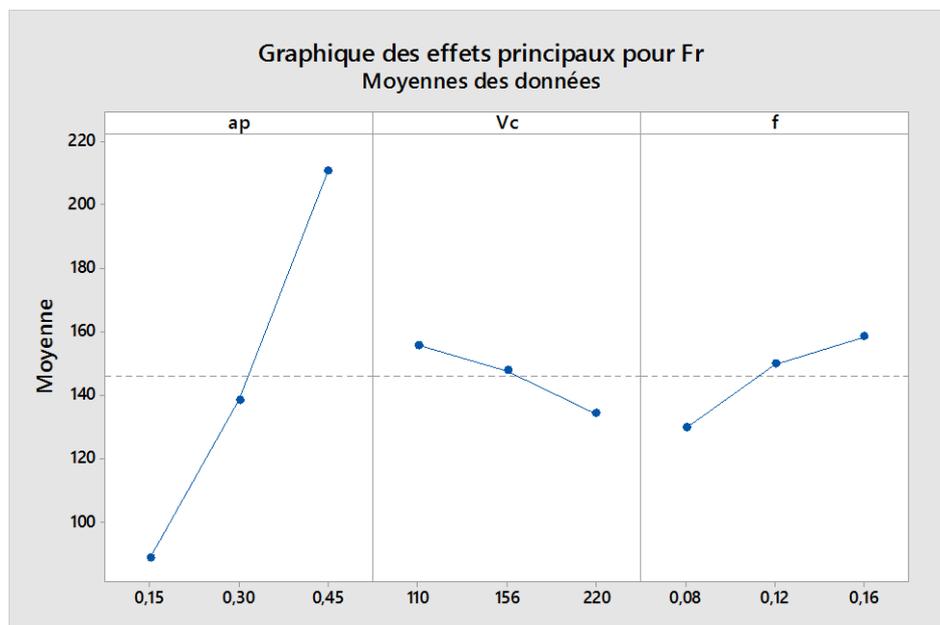


Figure III. 21: Graphiques des effets principaux pour (Fr).

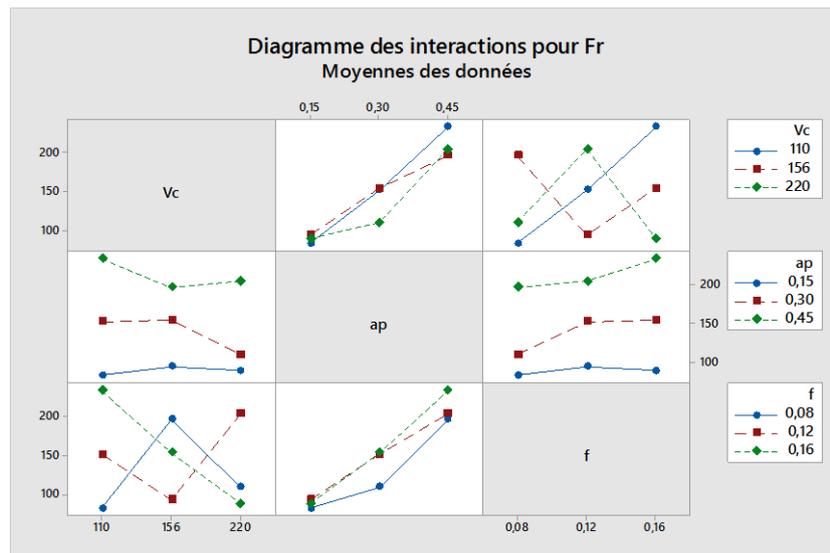


Figure III. 22: Diagramme d’interaction pour (Fr).

La figure III.22 expose le diagramme des interactions des paramètres du régime de coupe pour (Fr) On remarque que toutes les lignes sont presque parallèles, sauf (f*Vc) ne sont pas parallèles

III.4.5.2. Equation de régression pour (Fr) :

L’équation de régression obtenue et donnée ci-dessous par l’équation (III.11) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 98,70\%$

$$Fr = 12,2 - 0,1974 Vc + 407,6 ap + 362,1 f \tag{III.11}$$

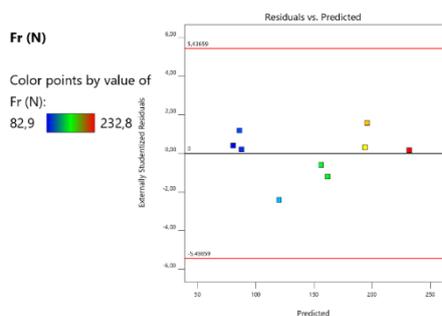


Figure III.23 : Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l’ajustement du modèle pour (Fr).

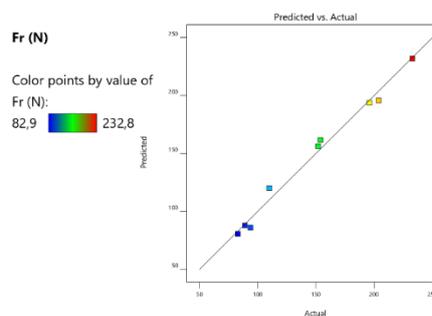


Figure III.24 : Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Fr).

La figure III.23 représente le graphique des résidus par rapport à la réponse prédite, où les résidus sont dispersés de manière aléatoire, ce qui indique que la variance est constante pour toutes les expériences.

La figure III.24 montre le graphique de la prédiction par rapport à la réalité dans lequel tous les résidus sont collectés à proximité de la ligne à 45°, ce qui montre une forte corrélation entre la prédiction du modèle et ses valeurs réelles.

III.4.5.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Fr)

Dans la figure III.25 on remarque que l'influence de la profondeur de passe est la plus importante, et cela à partir de la pente de la variation de l'effort (Fr) suivant l'axe (ap). On remarque aussi, que l'effort augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance.

Le graphe de contour montre les lignes de valeurs maximales, intermédiaires et minimales. Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (Fr) et les conditions d'exploitation souhaitables.

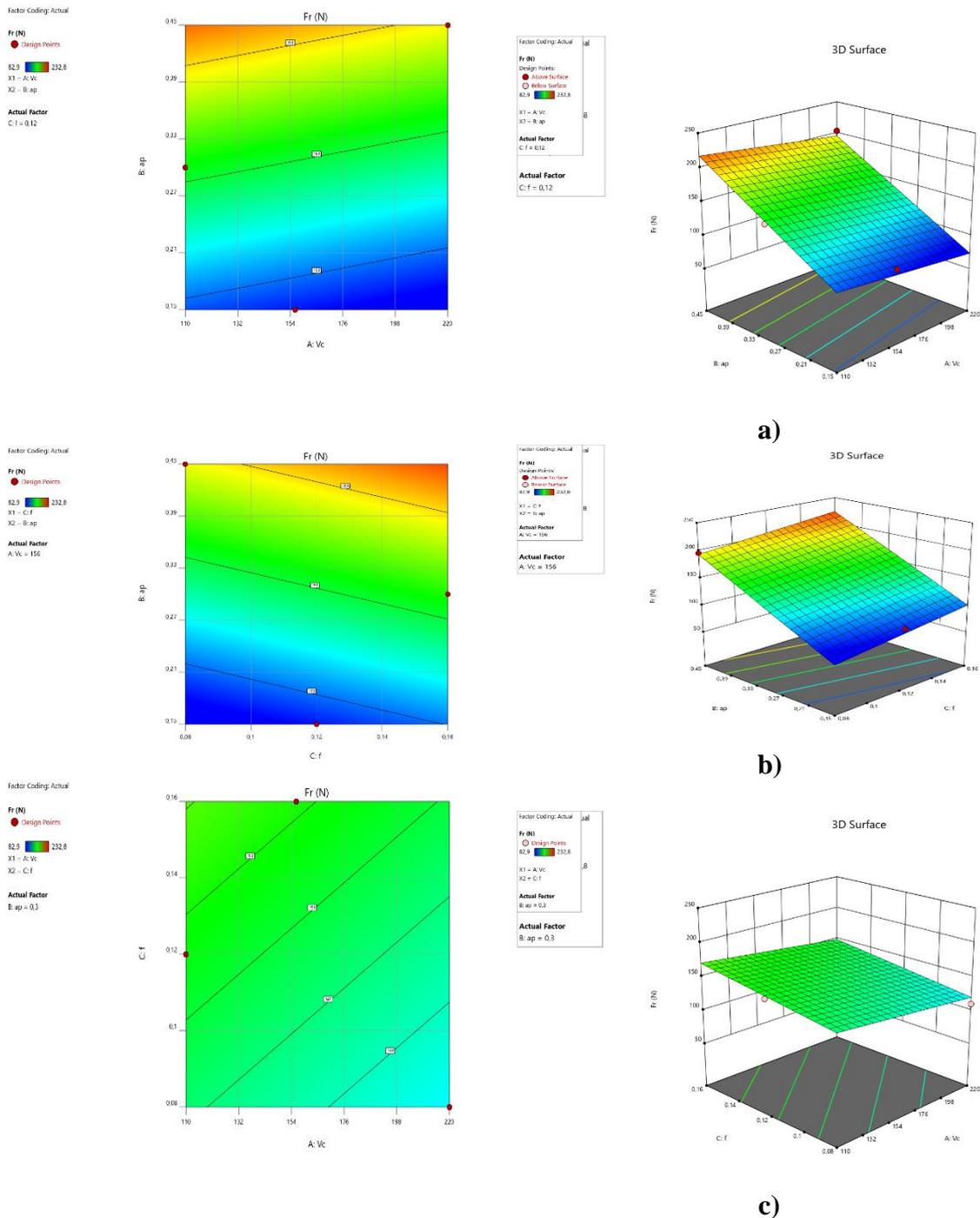


Figure III. 25: Diagramme de surface 3D pour (Fr) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour ; a) En fonction de Vc et ap ; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc.

III.4.6. Analyse de la variance ANOVA pour (Fv)

Le **tableau III. 7** présente l'analyse de variance ANOVA pour (Fv). On note que la profondeur de passe (**ap**) est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 90,03%, l'avance (**f**) avec une contribution 6,81%, puis de la vitesse de coupe (**Vc**) avec une contribution de 2,34%.

Tableau III. 7 : Analyse de la variance ANOVA pour (Fv).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	remarques
Modèle	3	28951,4	99,18%	28951,4	9650,5	200,42	0,000	Signifiant
Linéaires	3	28951,4	99,18%	28951,4	9650,5	200,42	0,000	Signifiant
Vc	1	682,6	2,34%	682,6	682,6	14,18	0,013	Signifiant
ap	1	26281,4	90,03%	26281,4	26281,4	545,81	0,000	Signifiant
f	1	1987,4	6,81%	1987,4	1987,4	41,27	0,001	Signifiant
Erreur	5	240,8	0,82%	240,8	48,2			
Total	8	29192,2	100,00%					
R²=99,18%				R² (ajust)=98,68%				

III.4.6.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction pour (Fv)

La **figure III.26** montre que la profondeur de passe à l'effet le plus significatif sur la composante Fr suivi de l'avance. En effet, on remarque que la pente du paramètre (**ap**) est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de l'avance.

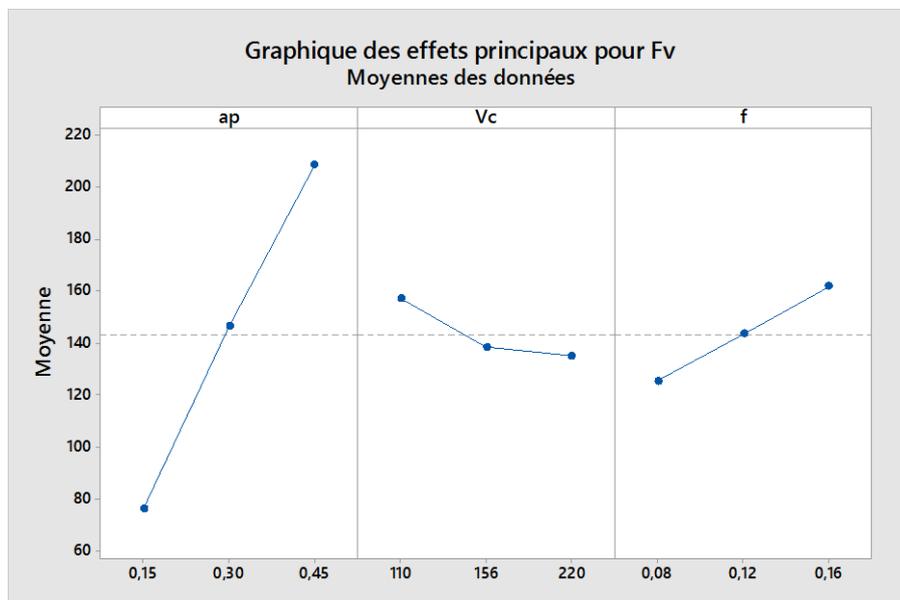


Figure III. 26: Graphiques des effets principaux pour (Fv).

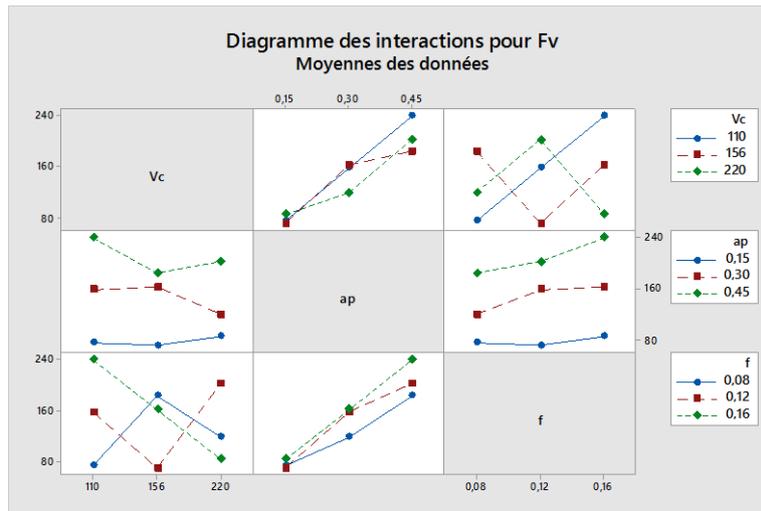


Figure III. 27: Diagramme d’interaction pour (Fv).

Dans la figure III.27 on remarque que pour le cas de l’interaction (ap *f), les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l’existence d’une interaction entre la profondeur de passe et l’avance.

III.4.6.2. Equation de régression pour (Fv) :

L’équation de régression obtenue et donnée ci-dessous par l’équation (III.12) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 99,18\%$

$$Fv = -12,2 - 0,1931 Vc + 441,2 ap + 455,0 f \tag{III.12}$$

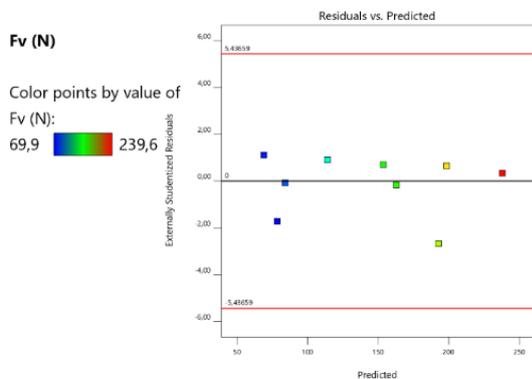


Figure III.28: Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l’ajustement du modèle pour (Fv).

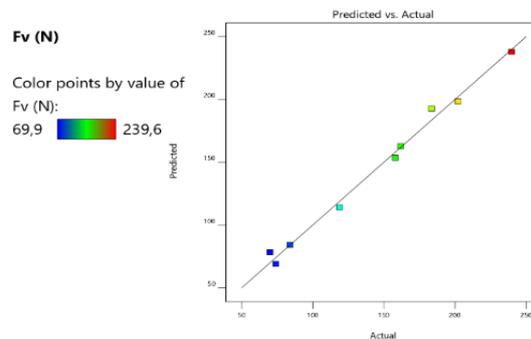


Figure III.29: Graphique des valeurs prédites et mesurer pour (Fv).

La figure III.28 représente le graphique des résidus par rapport à la prédiction où la prédiction faite par le modèle est sur l'axe des x et la précision de cette prédiction est sur l'axe des y. La distance par rapport à la ligne zéro montre à quel point la prédiction est mauvaise pour cette valeur. Des valeurs positives des résidus sur l'axe des y signifient que la prédiction était trop faible, tandis que des valeurs négatives signifient que la prédiction était trop forte.

La figure III.29 montre le graphique de la prédiction par rapport à la réalité dans lequel tous les résidus sont collectés à proximité de la ligne à 45°, ce qui montre une forte corrélation entre la prédiction du modèle et ses valeurs réelles.

III.4.6.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (Fv)

Dans la figure III.30 on remarque que l'influence de la profondeur de passe est plus importante, et ce à partir de la pente de la variation de l'effort (Fv) suivant l'axe ap. On remarque que l'effort augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance.

Le graphe de contour montre les lignes de valeurs maximales, intermédiaires et minimales. Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (Fv) et les conditions d'exploitation souhaitables.

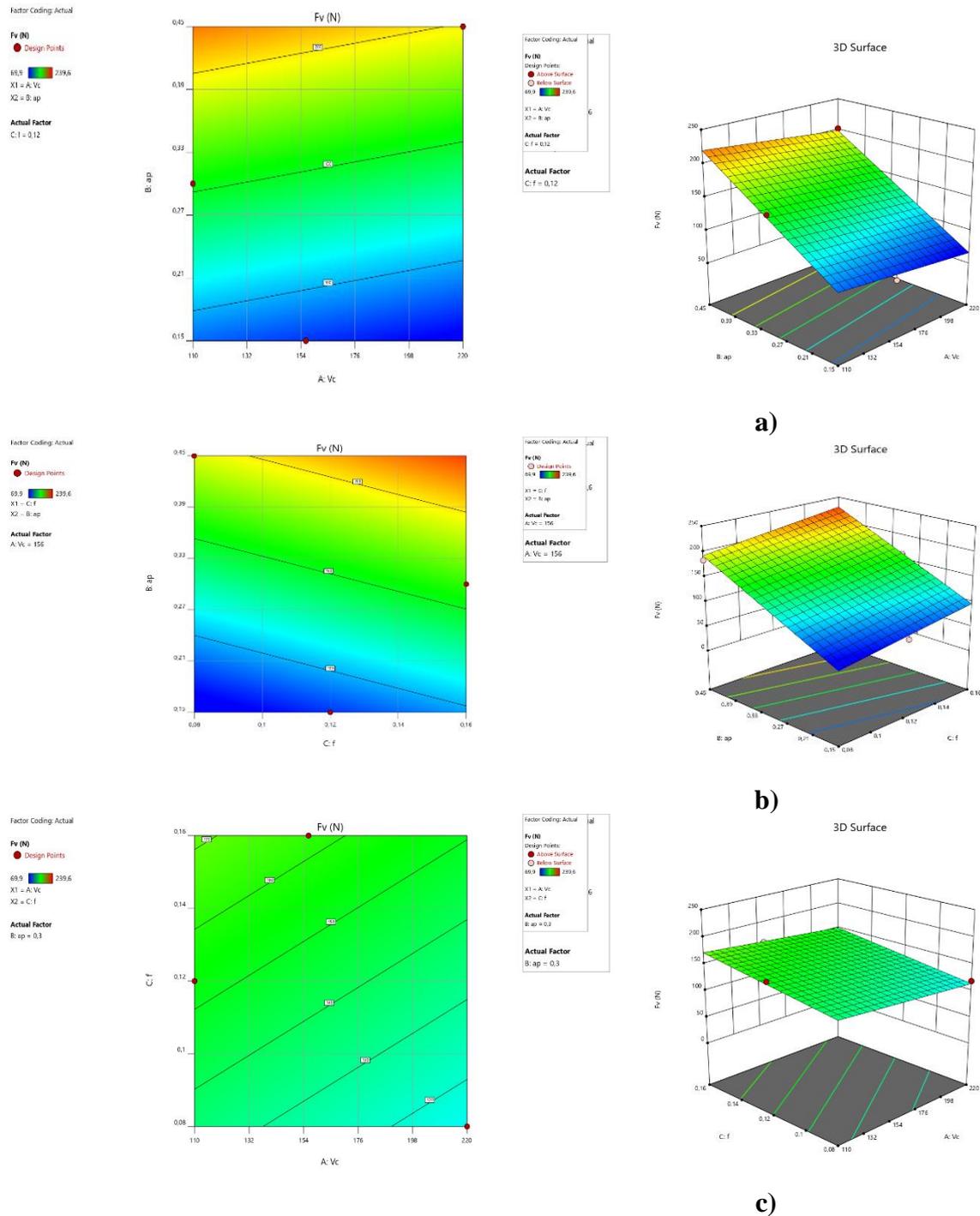


Figure III. 30: Diagramme de surface 3D pour (Fv) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour ; a) En fonction de Vc et ap; b) En fonction de f et ap ; c) En fonction de f et Vc

III.4.7. Analyse de la variance ANOVA pour le taux d'enlèvement de matière (MRR)

Le **tableau III.8** présente l'analyse de variance ANOVA pour (MRR). On note que la profondeur de passe (**ap**) est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 55,29%, la vitesse de coupe (**Vc**) avec une contribution 19,09%, puis l'avance (**f**) avec une contribution de 15,49%.

Tableau III. 8 : Analyse de la variance ANOVA pour le taux d'enlèvement de matière (MRR).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	remarques
Modèle	3	69,418	89,87%	69,418	23,139	14,78	0,006	Signifiant
Linéaires	3	69,418	89,87%	69,418	23,139	14,78	0,006	Signifiant
Vc	1	14,746	19,09%	14,746	14,746	9,42	0,028	Signifiant
ap	1	42,709	55,29%	42,709	42,709	27,28	0,003	Signifiant
f	1	11,962	15,49%	11,962	11,962	7,64	0,040	Signifiant
Erreur	5	7,828	10,13%	7,828	1,566			
Total	8	77,246	100,00%					
$R^2 = 89,87\%$		$R^2(\text{ajust})=83,79\%$						

III.4.7.1. Graphique des effets principaux et diagramme d'interactions pour le taux d'enlèvement de matière (MRR)

La **figure III.31** montre que la profondeur de passe à l'effet le plus significatif sur le taux d'enlèvement de matière (MRR) suivi de la vitesse de coupe. En effet, on remarque que la pente du paramètre (**ap**) est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de l'avance.

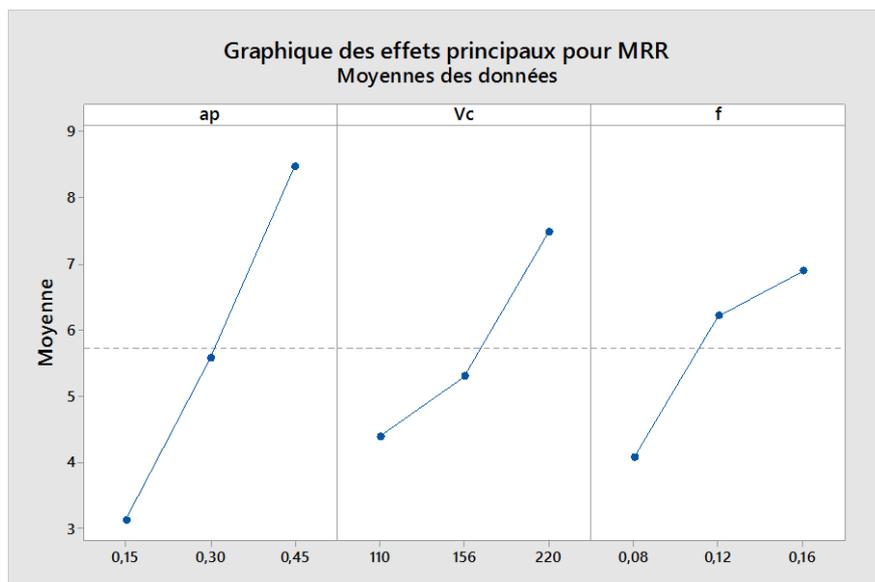


Figure III. 31: Graphiques des effets principaux pour (MRR).

La **figure III.32** expose le diagramme des interactions des paramètres du régime de coupe pour la quantité du copeau enlevé. On remarque que les lignes ne sont pas parallèles.

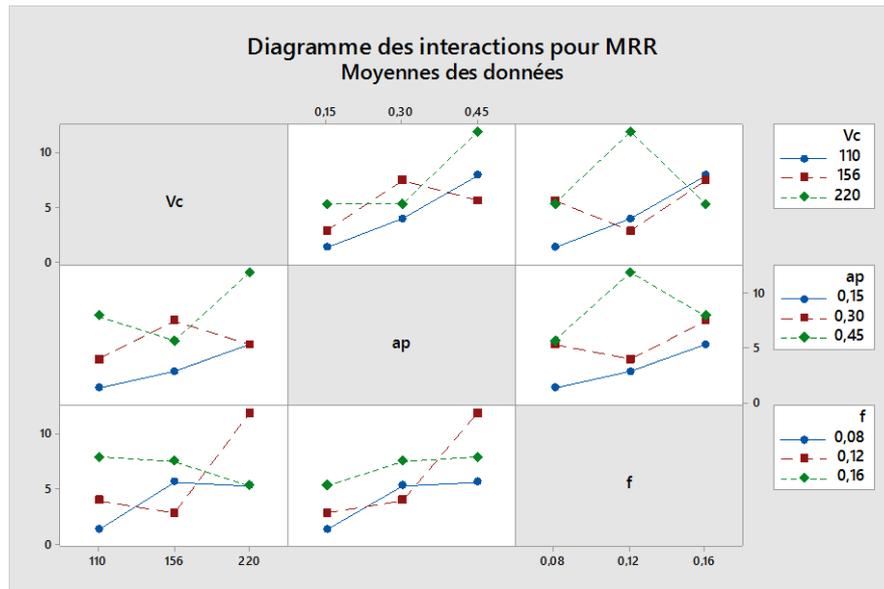


Figure III. 32 : Diagramme d’interaction pour (MRR).

III.4.7.2. Equation de régression pour (MRR)

L’équation de régression obtenue et donnée ci-dessous par l’équation (III.13) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 89,87\%$

$$MRR = -8,44 + 0,02838 Vc + 17,79 ap + 35,3 f \tag{III.13}$$

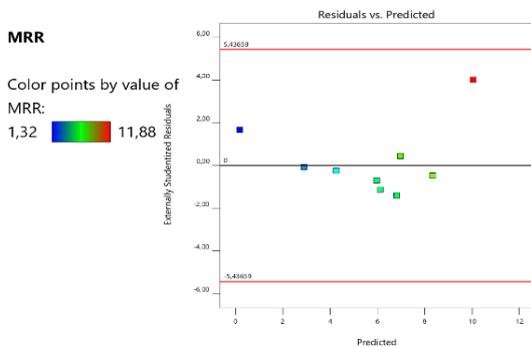


Figure III.33 : Graphique des valeurs résiduelle vs prédites pour l’ajustement du modèle pour (MRR).

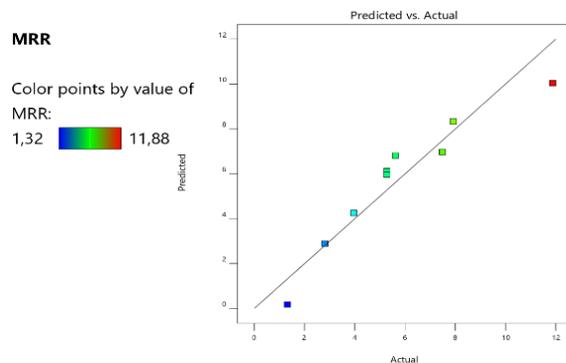


Figure III.34 Graphique valeurs prédites et mesurer pour (MRR).

La figure III.33 représente le graphique des résidus par rapport à la prédiction où la prédiction faite par le modèle est sur l’axe des x et la précision de cette prédiction est sur l’axe des y. La distance par rapport à la ligne zéro montre à quel point la prédiction est mauvaise pour cette valeur. Des valeurs positives des résidus sur l’axe des y signifient que la prédiction était trop faible, tandis que des valeurs négatives signifient que la prédiction était trop forte.

La figure III.34 les graphiques de diagnostic tels que les valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles nous aident à juger si le modèle est satisfaisant. Ces graphiques indiquent une concordance adéquate entre les données réelles et les résultats des modèles.

III.4.7.3. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (MRR)

La figure III.35 diagramme de la surface de réponse du volume de taux d'enlèvement de matière (MRR) en fonction de (V_c , f , a_p) et les graphes de contour. On remarque que MRR augmente avec l'augmentation des paramètres de coupe, l'influence de (a_p) est plus importante suivie par (V_c et f), et ce à partir de la pente de la variation de (MRR) suivant les axes (a_p , V_c et f).

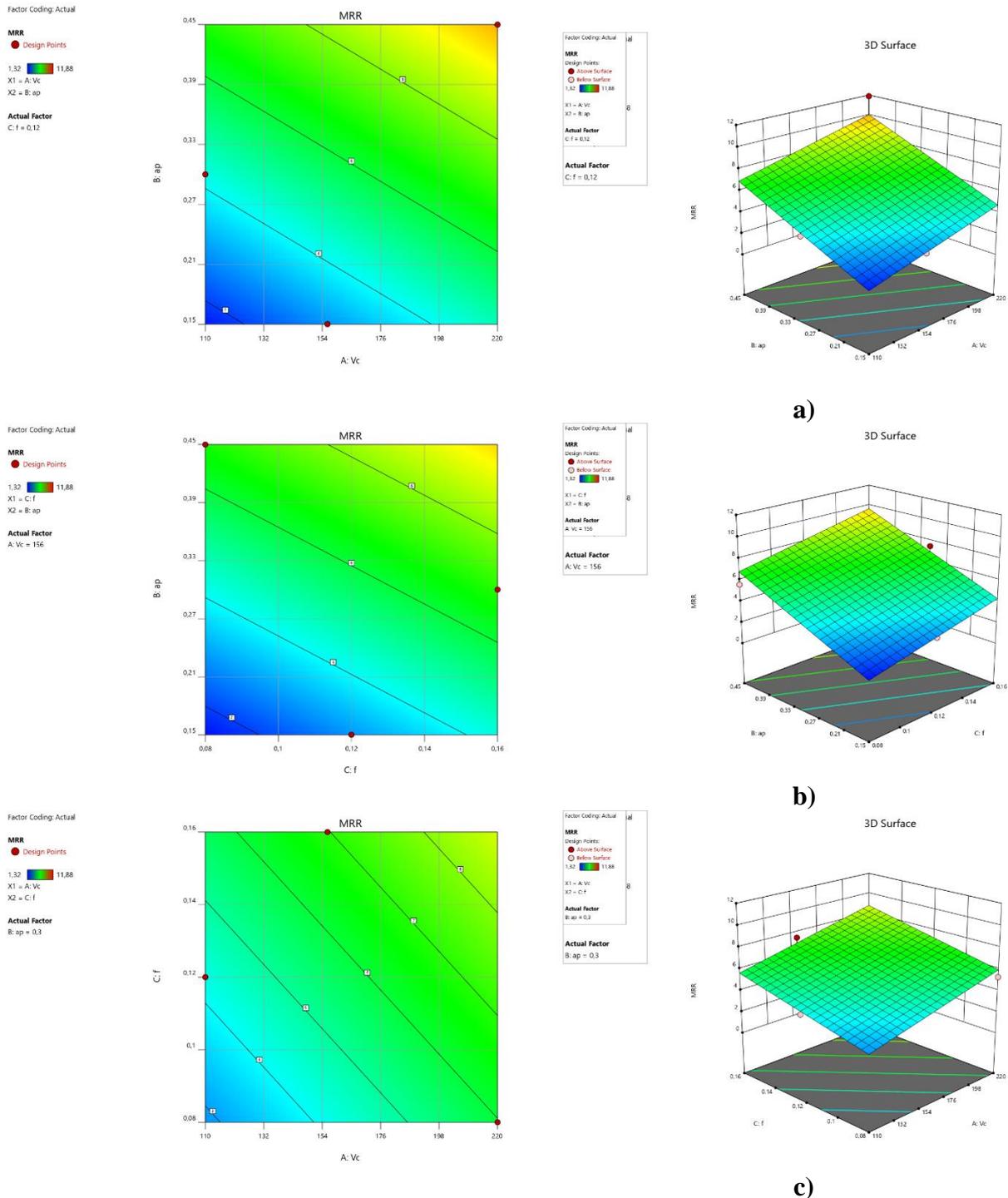


Figure III. 35 : Diagramme de surface 3D pour (MRR) en fonction de V_c , f , a_p et graphe de contour ; a) En fonction de V_c et a_p ; b) En fonction de f et a_p ; c) En fonction de f et V_c .

Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (MRR) et les conditions d'exploitation souhaitables.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté dans la première partie les résultats des essais paramétriques lors du tournage du l'inconel 718 avec un outil de coupe en céramique.

- ✓ Ces résultats montrent que l'effet de l'avance (**f**) est le plus significatif sur l'état de surface usinée, suivi par La profondeur de passe (**ap**).
- ✓ La vitesse de coupe (**Vc**) n'a pas d'influence sur les critères de la rugosité de surface (**Ra,Rt,Rz**). Aussi pour l'effort de coupe les resultats montre que l'effet de la profondeur de passe (**ap**) est le plus significatif, suivi par l'avance (**f**)
- ✓ La vitesse de coupe (**Vc**) n'a pas d'influence sur les efforts de coupe (**Fa,Fr,Fv**). D'autre part, l'augmentation des paramètres d'usinage tel que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe fait augmenter le débit de coupeau enlevé.
- ✓ La deuxième partie est consacrée à l'application de l'analyse de variance ANOVA et de l'analyse de régression, cela a permis d'obtenir des modèles mathématiques de la rugosité de surface (**Ra,Rt,Rz**), les efforts de coupe (**Fa,Fr,Fv**) et le taux d'enlèvement de matière (**MRR**): en fonction des paramètres d'usinage (**Vc, f et ap**).
- ✓ Le modèle obtenu sera utilisé pour l'optimisation multi-objectifs dans le chapitre IV, qui inclut la rugosité minimale, la productivité maximale et un compromis simultané entre la rugosité et la productivité.

Chapitre IV

Optimisation par la méthode de Taguchi, L'analyse Relationnelle Grise et la fonction Désirabilité

IV.1. Introduction

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif des chercheurs est généralement de trouver les conditions optimales d'usinage qui permettent d'atteindre des objectifs prédéfinis, soit économiques soit technologiques soit les deux à la fois.

IV.2. Méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi vient pour enrichir les méthodes des plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets. Elle a pour but de simplifier le protocole expérimental afin de mettre en évidence les effets des facteurs sur la réponse.

Cette méthode se distingue par une réduction importante du nombre d'essais, tout en gardant une bonne précision. Elle place le modèle comme un élément clef de la stratégie du plan d'expériences. L'expérimentateur choisit librement les facteurs et les interactions à étudier selon le modèle qu'il propose, en étroite adéquation avec ses objectifs. Cette analyse peut être complétée en utilisant le rapport signal sur bruit (S/N). Ce rapport dépend de la qualité des critères du processus à optimiser [31]. Les trois types de rapports S/N sont les suivants [32,33]:

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

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

Où: n = nombre de répétitions

y_{ij} = valeur observée de la réponse, Avec: $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2 \dots k$.

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

b) Le plus petit est le meilleur (Smaller - the - better):

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

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

c) Le nominal est le meilleur (Nominal - the - best):

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{Avec: } \mu = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (\text{IV.4})$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (\text{IV.5})$$

Ce type de rapport S/N est utilisé lorsque l'on cherche à minimiser l'erreur quadratique moyenne autour d'une valeur-cible spécifique. Le but de Notre étude est de minimiser les rugosités de surface et les efforts de coupe lors du tournage du l'inconel 718. Par conséquent, la caractéristique "*le plus petit est le meilleur (Smaller - the - better)*" est utilisée.

IV.3. Analyse des effets moyens des niveaux des différents facteurs

Dans l'industrie moderne nous optons à la fabrication des pièces de haute qualité avec un coût très bas et un temps minimal. L'objectif de ce travail consiste à optimiser des modèles statistiques de rugosité de surface (**Ra**) et l'efforts de coupe (**Fv**) et le taux d'enlèvement de matière (**MRR**). Ces résultats sont obtenus lors de l'usinage à sec de l'**inconel 718**, en fonction des paramètres de coupe à savoir (**Vc, f, ap**).

Tableau IV. 1: Résultats expérimentaux et valeurs du S/B pour (Ra) (Fv), et le taux d'enlèvement de matière (MRR) de coupe.

N° d'essai	Paramètres d'usinage			Réponses signal /bruit		
	Vc	ap	f	R _a S/B	F _v S/B	MRR S/B
1	110	0,15	0,08	10,45757	-37,3846	2,411479
2	110	0,3	0,12	1,9382	-43,9731	11,9539
3	110	0,45	0,16	-2,27887	-47,5897	17,9745
4	156	0,15	0,12	5,192746	-36,8895	8,967942
5	156	0,3	0,16	-0,42379	-44,1796	17,48732
6	156	0,45	0,08	6,0206	-45,268	14,98854
7	220	0,15	0,16	-0,90646	-38,4856	14,45268
8	220	0,3	0,08	5,192746	-41,4963	14,45268
9	220	0,45	0,12	-0,42379	-46,107	21,49633

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios (S/B) des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des trois paramètres d'usinage (Vc, f, ap). La moyenne des ratios (S/B) pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios (S/B) pour le même niveau du facteur, divisée par le nombre des ratios. Les valeurs relatives du rapport (S/B) les plus grandes permettront d'identifier le ou les niveaux optimaux.

On peut estimer l'effet de chaque facteur sur le rapport (S/B) en effectuant une analyse de la variance. Ainsi sont identifiés les facteurs des designs les plus importants.

IV.3.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface

- Pour le critère de la rugosité de surface (Ra)

D'après la figure IV.1 et le tableau IV.2 où on a considéré la qualité « *le plus petites le meilleur* ». Il est à noter que les paramètres d'usinage (**Vc, f, ap**) ont des effets différents sur la rugosité de surface (**Ra**). L'influence la plus significative correspond à l'avance (**f**) avec un effet de 8,427 suivie par celle de la profondeur de passe (**ap**) avec un effet de 3,809 et en dernier lieu vient la vitesse de coupe (**Vc**) avec 2,309 d'effet.

Tableau IV. 2 : Réponses pour les rapports signal/bruit (S/B_{Ra}).

Niveau	Vc	ap	f
1	3,372	4,915	7,224
2	3,597	2,236	2,236
3	1,288	1,106	-1,203
Delta	2,309	3,809	8,427
Rang	3	2	1

Selon la méthode de Taguchi, la condition optimale pour réduire la rugosité de surface (Ra) est donnée par la combinaison des niveaux (**Vc2, ap1, f1**). Les valeurs des paramètres de coupe choisis pour le régime optimal sont les suivantes : une avance f=0.08 (mm/tr). Suivie par une profondeur de passe ap=0.15 (mm) et en dernier lieu une vitesse de coupe Vc=156 (m/min) (voir la figure IV.1).

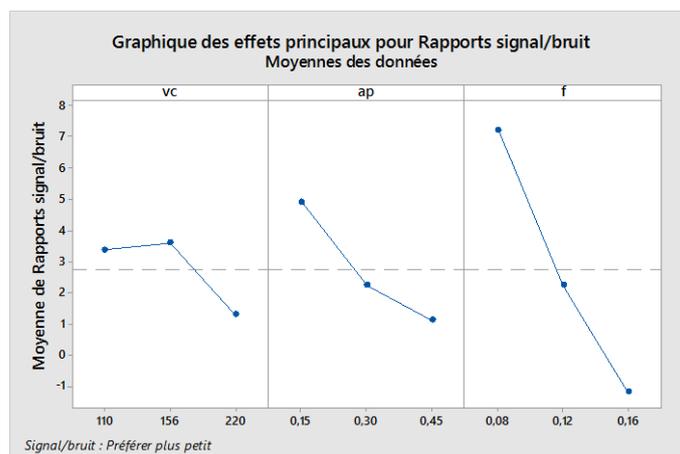


Figure IV. 1: Graphique des effets principaux pour rapport (signal/bruit) sur (Ra).

IV.3.2. Analyse des effets principaux pour les efforts de coupes (F_v)

La figure IV.2 et le tableau IV.3. Présentent les effets des différents paramètres de coupe (**Vc, f, ap**) sur la composante de l'effort de coupe (**F_v**)

Sur le **tableau IV.3**. Nous constatons que la plus importante influence correspond à celle de la profondeur de passe (**ap**) avec un effet de 8,73. Suivie par l'avance (**f**) avec un effet de 2,04 et en dernier lieu vient la vitesse de coupe (**Vc**) avec 0,95. La qualité « le plus petit est le meilleur est considérée ».

Tableau IV. 3: Réponses pour les rapports signal/bruit (S/B_{Fv}).

Niveau	Vc	ap	f
1	-42,98	-37,59	-41,38
2	-42,11	-43,22	-42,32
3	-42,03	-46,32	-43,42
Delta	0,95	8,73	2,04
Rang	3	1	2

La condition optimale pour obtenir un effort minimal (**Fv**) est donnée par la combinaison des niveaux (**Vc3, ap1, f1**).

Les valeurs des paramètres du régime de coupes correspondants au régime optimal sont les suivantes : une profondeur de passe **ap**=0.15(mm) qui a la plus importante influence, suivie par l'avance **f**=0,08 (mm/tr) et la vitesse de coupe **Vc**=220(m/min) voir (**figure IV.2**).

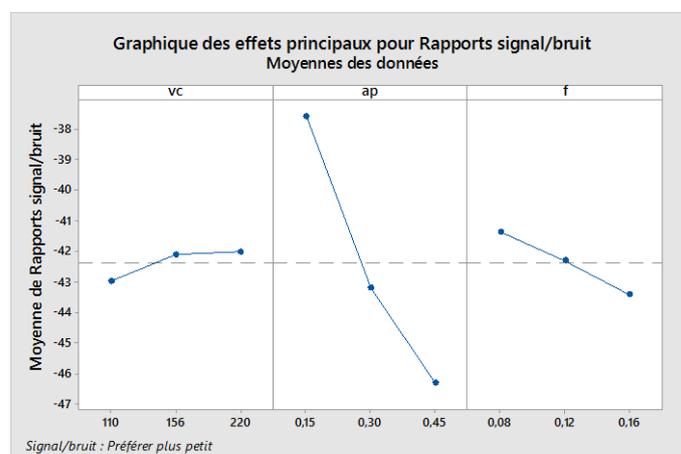


Figure IV. 2: Graphique des effets principaux pour le rapport (signal/bruit) de (Fv).

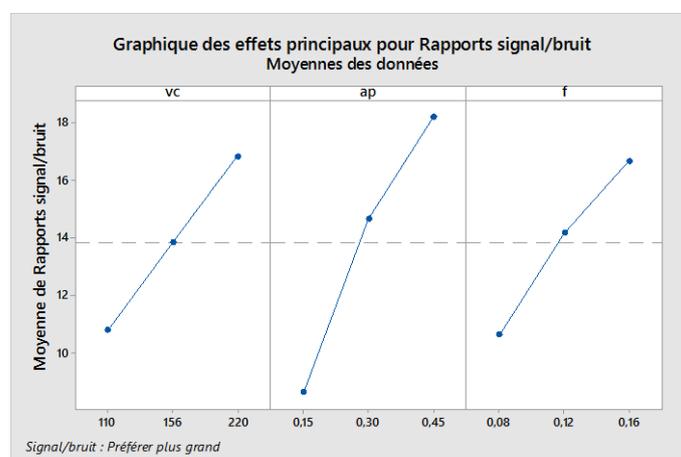
IV.3.3. Analyse des effets principaux sur la quantité de taux d'enlèvement de matière (MRR)

La **figure IV.3** et le **tableau IV.4** montrent les différents effets des paramètres de coupe (**Vc, f, ap**) sur le taux d'enlèvement de matière (**MRR**). Le **tableau IV.4**. Montre que la profondeur de passe (**ap**) est le facteur le plus prépondérant avec un effet de 9,542. Suivie par l'avance (**f**) et la vitesse de coupe (**Vc**) avec le même degré d'influence (l'effet égal à 6,021).

Tableau IV. 4: Réponses pour les rapports signal/bruit (S/B_{MRR}).

Niveau	vc	ap	f
1	10,780	8,611	10,618
2	13,815	14,631	14,139
3	16,801	18,153	16,638
Delta	6,021	9,542	6,021
Rang	2,5	1	2,5

Les conditions optimales pour un taux d'enlèvement de matière (**MRR**) maximal sont données par la combinaison des niveaux (**Vc3, f3, ap3**). Les valeurs du régime optimal sont les suivantes : une profondeur de passe **ap**=0.45mm, une avance **f**=0,16(mm/tr) et une vitesse de coupe **Vc**=220(m/min) voir (**figure IV.3**).

**Figure IV. 3:** Graphique des effets principaux pour rapport (signal/bruit) sur le taux d'enlèvement de matière (MRR).

IV.4. L'analyse relationnelle grise (GRA)

L'analyse relationnelle grise 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 [34]. L'utilisation de cette méthode contient les étapes suivantes :

▲ Étape 1: Génération relationnelle grise :

Selon l'objectif de l'optimisation prévue pour minimiser ou maximiser les résultats expérimentaux, la normalisation du rapport S/N pour les résultats expérimentaux dans la gamme entre zéro et un est nécessaire pour la génération relationnelle grise. En fonction de la fonction objective de l'optimisation, la normalisation peut être effectuée pour deux cas. Si la plus petite-la-meilleure est la caractéristique sélectionnée dans la séquence d'origine pour la minimisation, elle devrait être normalisée par l'équation (IV.6)

$$x_i^*(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{IV.6})$$

Si le plus grand-le-meilleur est la caractéristique sélectionnée dans la séquence d'origine pour la maximisation, elle devrait être normalisée par l'équation (IV.7)

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{IV.7})$$

Ou $x_i^*(k)$ est la valeur après la génération relationnelle grise (valeur normalisée), et $\max(x_i^0(k))$ et $\min(x_i^0(k))$ sont les valeurs les plus grandes et les plus petites de $(x_i^0(k))$ pour la réponse k^{th} . La plus grande valeur des résultats normalisés indique la meilleure caractéristique de performance et les meilleurs résultats normalisés seront égaux à un.

Le but de la normalisation est de rendre toutes les réponses en même grandeur, les données traitées par la normalisation sont données dans le **tableau IV.5**. Les valeurs normalisées ont été arrangées entre zéro et un.

Tableau IV. 5: Résultats expérimentaux normalisés ($x_i^*(k)$).

N° Essai. (i)	S/N			Génération relationnelle grise (La Normalisation)		
	Ra	Fv	MRR	Ra	Fv	MRR
1	10,45757	-37,3846	2,411479	1	0,953731	0
2	1,9382	-43,9731	11,9539	0,3311025	0,337993	0,5
3	-2,27887	-47,5897	17,9745	0	0	0,815465
4	5,192746	-36,8895	8,967942	0,5866327	1	0,343543
5	-0,42379	-44,1796	17,48732	0,1456514	0,318701	0,789937
6	6,0206	-45,268	14,98854	0,6516315	0,216982	0,659008
7	-0,90646	-38,4856	14,45268	0,1077544	0,85084	0,63093
8	5,192746	-41,4963	14,45268	0,5866327	0,569467	0,63093
9	-0,42379	-46,107	21,49633	0,1456514	0,138568	1

▲ Étape 2: Coefficient Relationnel Gris (GRC) :

Le coefficient relationnel gris décrit la corrélation entre les résultats expérimentaux idéaux et obtenus. La formule mathématique du coefficient relationnel gris ($\xi_i(k)$) est donnée comme suit:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \psi \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \psi \Delta_{max}} \quad (\text{IV.8})$$

$\Delta_{oi}(k)$ Est la différence absolue entre la séquence de référence $x_0^k(k)$ et le rapport S/N de la séquence mesurée $x_i^k(k)$.

$$\Delta_{oi}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{IV.9})$$

$$\Delta_{min} = \min_{j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{IV.10})$$

$$\Delta_{max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{IV.11})$$

ψ est le coefficient de distinction ($\psi \in [0, 1]$). Dans notre cas la valeur de ψ est 0.5.

Les valeurs des coefficients "Gris relationnel Coefficients" sont présentés dans le **tableau IV.6**.

Tableau IV. 6: Valeurs des Coefficients du $\xi_i(k)$.

N° Essai. (i)	Grey Relation coefficient		
	Ra	Fv	MRR
1	1	0,915299	0,333333
2	0,427753	0,43029	0,5
3	0,333333	0,333333	0,730423
4	0,547425	1	0,432355
5	0,369181	0,423263	0,704163
6	0,589367	0,389706	0,594536
7	0,359132	0,770226	0,575327
8	0,547425	0,537326	0,575327
9	0,369181	0,36726	1

▲ Étape 3: Grey Relationnel Grade (GRG) :

GRG représente la corrélation entre les séries, elle est donnée par la formule suivante:

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (\text{IV.12})$$

Ou (n) est le nombre des réponses.

Dans la méthode **Taguchi**, le terme « signal » représente la valeur souhaitable et le « bruit » représente la valeur indésirable. L'objectif de l'utilisation des S/N ratio est de mesurer les performances pour développer des produits et des processus insensibles aux facteurs de bruit [35].

Tableau IV. 7: Niveau relationnel gris et son ordre (Grey Relational Grade (GRG)).

N° Essai. (i)	GRG	Rank
1	0,749544	1
2	0,452681	9
3	0,465696	8
4	0,659927	2
5	0,498869	7
6	0,524536	6
7	0,568228	4
8	0,55336	5
9	0,578814	3

D'après la **figure IV.4** et le **tableau IV.7**, la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 1 a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que cette expérience présente la combinaison des paramètres optimaux qui donne simultanément une rugosité de surface minimal et un effort de coupe minimal.

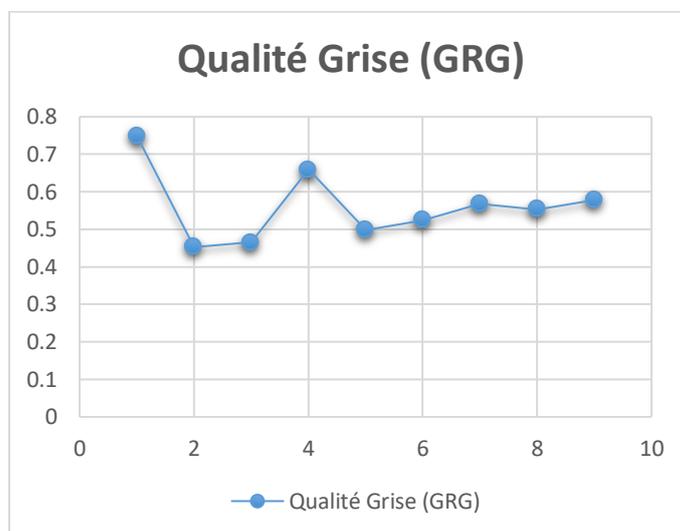


Figure IV. 4: Valeurs de la Qualité Relationnelle Grise (GRG).

La différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la valeur de grise relationnelle (**Delta = MaxMin**) est également indiquée dans le **tableau IV.8**. Le facteur avec la plus grande valeur de delta est celui qui affecte le plus la réponse.

Tableau IV. 8: Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade).

Niveau	Vc	ap	f
1	-5,342	-3,675	-4,416
2	-5,085	-6,021	-5,081
3	-4,933	-5,664	-5,863
Delta	0,409	2,347	1,446
Rang	3	1	2

La valeur maximale de la valeur delta dans le tableau est égale à 2,347; et le facteur correspondant, à savoir la profondeur de passe (**ap**) et a le plus grand effet sur la réduction de la rugosité de surface et l'effort de coupe de l'inconel 718.

Le niveau correspondant au maximum de la valeur moyenne de "la qualité relationnelle grise" est Le niveau optimal des paramètres, La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage du l'inconel 718 est affichée dans le **tableau IV.9**.

Cette combinaison correspond à :

- La Vitesse de coupe optimale (niveau 3).
- L'Avance (niveau 1).
- La Profondeur de passe optimale (niveau 1).

Tableau IV. 9: Réponses pour la catégorie relationnelle grise (Grey Grade).

Niveau	Vc	ap	f
1	110	0.15	0.08
2	156	0.3	0.12
3	220	0.45	0.16

Donc la combinaison optimale (pour les trois réponses) des paramètres est : Vc3, f1 et ap1. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : vitesse de coupe Vc = 220(m/min), avance f = 0,08 (mm/tr) et profondeur de passe ap=0.15(mm).

Sauf que ce régime ne figure pas dans le tableau L9 que nous avons choisi pour notre étude mais les valeurs des conditions de coupe appartiennent bien à notre intervalle des valeurs choisies. En effet, le régime optimal obtenu est présenté dans **le tableau IV.10**.

Tableau IV. 10: Régime optimal obtenu.

Vc(m/min),	ap(mm)	f(mm/tr)	Ra (μ m)	Fv (N)	MRR (cm^3/min)
220	0.15	0,08	0.4	54	2.64

D'après **le tableau IV.10**, il est a noté que les valeurs de Ra et Fv sont très satisfaisants alors que la valeur du MRR est plutôt intermédiaire. Si nous optons à privilégier l'état de surface et les efforts de coupe ce régime est très conseillé. Cela reste bien sur un choix à faire et un bon compromis entre la qualité et la productivité.

IV.4. Optimisation multi-objectif par la méthode de la Fonction de Désirabilité (DF)

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-objectifs réactive [36]. 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 objectif F(x) est définie comme suit [37] :

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (\text{IV.13})$$

$$F(x) = -DF \quad (\text{IV.14})$$

Où :

d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et w_i est la fonction de pondération de d_i .
Pour différent objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité d_i est définie dans différentes formes.

Si le but est de réaliser une valeur T_i spécifique, la désirabilité d_i est donnée par :

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

$$d_i = \left[\frac{y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad (\text{IV.15})$$

$$d_i = \left[\frac{y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.16})$$

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

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

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

$$d_i = \left[\frac{y_i - \text{Inf}_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.17})$$

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

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

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

$$d_i = \left[\frac{\text{sup}_i - y_i}{\text{sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.18})$$

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

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. Les cas d'optimisation étudiés

Dans cette étude, nous avons investigué trois cas d'optimisation à savoir :

(1) compromis entre rugosité et productivité ; (2) rugosité minimale ; (3) productivité maximale.

➤ **1^{er} Cas : Compromis entre rugosité et productivité :**

Le premier cas s'intéresse à une optimisation combinée entre la rugosité (**Ra**) minimale le taux d'enlèvement de matière (**MRR**) maximale avec une même importance (5+) pour les deux sorties alors qu'on a attribué à l'effort de coupe (**Fv**) le niveau (+3). Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est ; **Vc**=220,000 (m/min), **f**=0,080 (mm/tr) et **ap**=0,268 (mm). La rugosité prend une valeur minimale de **Ra**=0,480 (µm) et **Fv**=99,946 (N), le taux d'enlèvement de matière prend une valeur maximale **MRR**=5,391 (cm³/min) et la **désirabilité Des**= 0,638. Ce cas est intéressant lorsqu'une productivité élevée est demandée, avec un bon état de surface de la pièce usinée.

Le **tableau IV.11** présente le but et la gamme des paramètres pour ce cas d'optimisation. Les réponses de la surface de rugosité et le taux d'enlèvement de matière (MRR) sont présentés sur le **tableau IV.12**.

Tableau IV. 11: Objectifs et Gamme de paramètres d'optimisation (cas 1^{er}).

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:Vc	is in range	110	220	1	1	3
B:ap	is in range	0,15	0,45	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,16	1	1	3
Ra(µm)	minimize	0,3	1,3	1	1	3
Fv (N)	minimize	69,9	239,6	1	1	3
MRR (cm ³ /min)	maximize	1,32	11,88	1	1	3

Tableau IV. 12: Réponse de la surface de rugosité et le taux d'enlèvement de matière (cas 1^{er}).

Number	Vc	ap	f	Ra (µm)	Fv (N)	MRR (cm ³ /min)	Desirability
1	220,000	0,268	0,080	0,480	99,946	5,391	0,638 Selected

La **figure IV.5** représente les surfaces de réponses, le graphique de contour de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres de coupe (**Vc**, **f** et **ap**). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation (la rugosité (**Ra**) et l'effort (**Fv**) minimisé, **MRR** maximisé). La **figure IV.6** exprime le résultat du régime de coupe optimal pour une désirabilité égale à 0,638.

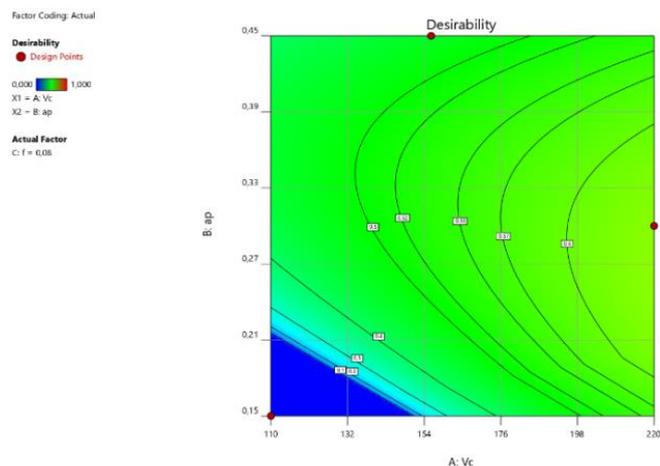


Figure IV. 5: Graphe de désirabilité (Surface de contours) pour le 1^{er} cas.

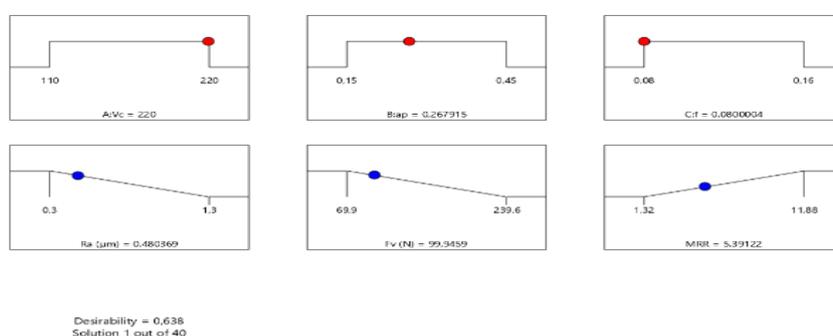


Figure IV. 6: Diagramme d'optimisation des réponses multiples de la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe (F_v) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) pour le 1^{er} cas.

➤ 2^{eme} Cas : Rugosité minimale

Pour le deuxième cas d'optimisation, la rugosité de la surface (R_a) a été jugée très importante (+5), tout en gardant l'effort (F_v) à un degré d'importance de (+3) et un taux d'enlèvement de matière (MRR) avec moins d'importance (+1). Les valeurs optimales des conditions de coupe trouvées sont les suivantes $V_c=220.000$ (m/min), $f=0,080$ (mm/tr) et $ap=0,200$ (mm). Ce régime nous a permis d'obtenir une rugosité minimale de $R_a=0,413$ (μm), un effort très bas $F_v=69,900$ (N), une valeur de MRR égale à 4,180 (cm^3/min) et la désirabilité Des égale à 0,809. Ce cas est intéressant pour un tournage de finition où la qualité est exigée (rugosité minimale).

Le tableau IV.13 présente l'objectif à atteindre la gamme de paramètres pour ce cas d'optimisation. Les réponses de la rugosité et du MRR sont présentés dans le tableau IV.14

Tableau IV. 13: Objectifs et gamme des paramètres d'optimisation (cas 2).

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:Vc	is in range	110	220	1	1	3
B:ap	is in range	0,15	0,45	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,16	1	1	3
R_a (μm)	minimize	0,3	1,3	1	1	5
F_v (N)	minimize	69,9	239,6	1	1	3
MRR (cm^3/min)	maximize	1,32	11,88	1	1	1

Tableau IV. 14: Réponse de la surface de rugosité et du taux d'enlèvement de matière (cas 2).

Number	Vc	ap	f	Ra (µm)	Fv (N)	MRR (cm ³ /min)	Desirability
1	220,000	0,200	0,080	0,413	69,900	4,180	0,809 Selected

La figure IV.7 montre les valeurs de désirabilité maximale et les valeurs des paramètres d'usinage (Vc, f et ap) pour obtenir une rugosité de surface minimale (meilleure qualité de surface). La figure IV.8 expose les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrée et de sorties étudiées et la désirabilité pour ce premier cas.

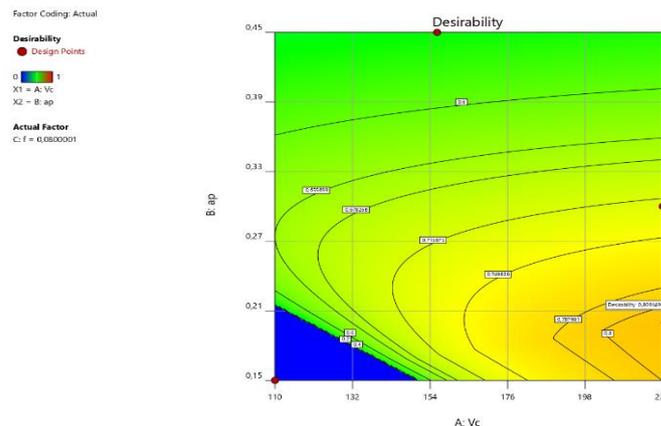


Figure IV. 7: Graphe de désirabilité (Surface de contours) pour le 2^{ème} cas.

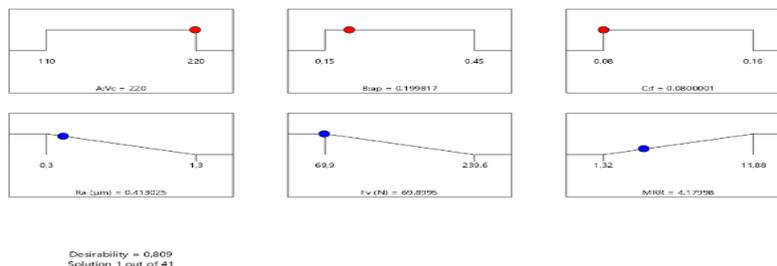


Figure IV. 8 : Diagramme d'optimisation multifactorielle de la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fv) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) pour le 2^{ème} cas.

➤ **3^{ème} Cas: Productivité maximale:**

Pour le troisième cas d'optimisation, l'effort (Fv) est considéré avec un degré d'importance égal à (+3) le taux d'enlèvement de matière (MRR) a donné une importance maximale de (+5), tout en gardant la rugosité de la surface (Ra) moins d'importance (+1). Le régime optimal des conditions de coupe trouvées est de Vc = 220,000 (m/min), f=0,104 (mm/tr) et ap=0,329 (mm). Le débit du copeau enlevé prend une valeur maximale MRR=7,325 (cm³ /min), l'effort de coupe Fv=137,920 (N), Ra=0,750 (µm) et la désirabilité Des=0,576. Ce cas d'optimisation est préféré pour les opérations d'ébauche où une production maximale est souhaitée.

Le tableau IV.15 présente les objectifs et la gamme de paramètres pour ce cas d'optimisation. Les réponses de la rugosité et du MRR sont présentés sur le tableau IV.16.

Tableau IV. 15: Objectifs et gamme de paramètres d'optimisation (3^{ème} cas).

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:Vc	is in range	110	220	1	1	3
B:ap	is in range	0,15	0,45	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,16	1	1	3
Ra (µm)	minimize	0,3	1,3	1	1	1
Fv (N)	minimize	69,9	239,6	1	1	3
MRR (cm ³ /min)	maximize	1,32	11,88	1	1	5

Tableau IV. 16: Rugosité et MRR (3^{ème} cas).

Number	Vc	ap	f	Ra (µm)	Fv (N)	MRR (cm ³ /min)	Desirability
1	220,000	0,329	0,104	0,750	137,920	7,325	0,576 Selected

La figure IV.9 présente l'espace de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres du régime de coupe (**Vc**, **f** et **ap**) pour obtenir un MRR maximal (productivité maximale). D'une autre manière La figure IV.10 expose, les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrée (**Vc**, **f** et **ap**), de même que celles des paramètres technologiques (**Ra**), (**Fv**), (**MRR**) et la désirabilité pour ce cas.

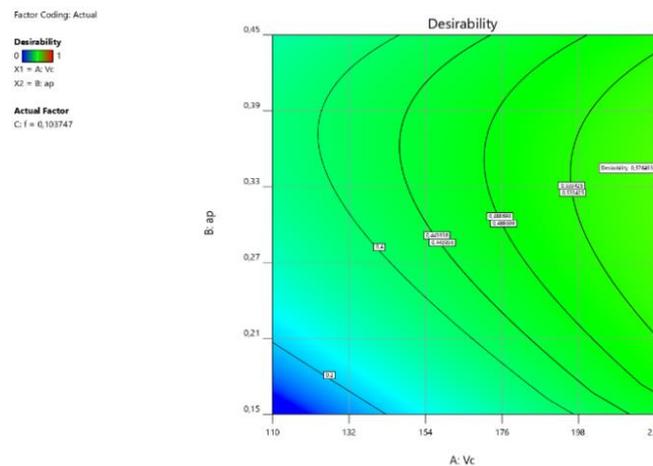


Figure IV. 9: Graph de désirabilité (surface de contours) pour le 3^{ème} cas.

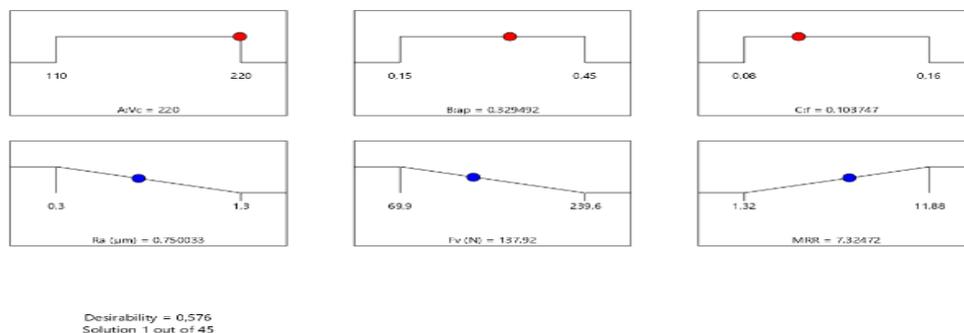


Figure IV. 10: Diagramme d'optimisation multiples, de la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fv) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) pour le 3^{ème} cas.

IV.5. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté l'application de deux méthodes d'optimisation : mono-objective, dans laquelle nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser le taux d'enlèvement de matière (MRR), l'effort et la rugosité arithmétique (Ra). Cette approche est basée sur la maximisation du rapport S/N correspondant à des caractéristiques de meilleure qualité, et l'optimisation multi-objective en appliquant deux méthodes différentes : la méthode GRA (Grey Relationnel Analysis) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF) pour optimiser le taux d'enlèvement de matière (MRR) et la rugosité arithmétique de surface (Ra) simultanément. Cette optimisation est basée sur trois critères choisis qui sont la qualité, la productivité et une optimisation combinée entre ces deux derniers en même temps.

En fin, on peut conclure que la méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse, par contre les méthodes (GRA) et (DF) sont employées pour l'optimisation multi-objective.

Conclusion général

Dans ce travail une étude expérimentale a été réalisée pour simuler les paramètres de performance de l'usinage (rugosité de surface, l'effort de coupe et taux d'enlèvement de matière) et pour optimiser les conditions de coupe (vitesse de coupe, l'avance et profondeur de passe). Les résultats obtenus conduisent aux conclusions suivantes :

L'objectif de ce travail est de proposer une modélisation des critères de la rugosité, l'effort de coupe et du taux d'enlèvement de matière (MRR) par la méthode de surface de réponse et la méthode GRA sur un plan réduit de Taguchi (L9). Les calculs et graphiques sont réalisés à l'aide du logiciel **MINITAB 18** et le logiciel **DESIGN-EXPERT**.

Les résultats de la méthodologie de surface de réponse (**RSM**) montrent que :

- Les résultats de l'ANOVA pour le critère de la rugosité de surface (**Ra**), pour un niveau de confiance de 95%, montrent que l'avance (**f**) est le facteur le plus important qui affecte (**Ra**), sa contribution est de 79,27%, suivie par la profondeur de passe (**ap**) avec 14,10% de contribution, la vitesse de coupe (**Vc**) avec 2,28% de contribution. Les autres termes peuvent être supposés non significatifs.
- Les résultats de l'ANOVA pour le critère de la rugosité de surface (**Rt**) pour un niveau de confiance de 95,65% montrent que l'avance (**f**) est le facteur le plus important qui affecte (**Rt**), sa contribution est de 73,25%, suivie par la profondeur de passe (**ap**) avec 19,26% de contribution, la vitesse de coupe (**Vc**) avec 0,19% de contribution.
- Les résultats de l'ANOVA pour le critère de la rugosité de surface (**Rz**) pour un niveau de confiance de 95,65% montrent que l'avance (**f**) est le facteur le plus important qui affecte (**Rz**), sa contribution est de 80,66%, suivie par la profondeur de passe (**ap**) avec 12,30% de contribution, la vitesse de coupe (**Vc**) avec 1,69% de contribution.
- Les résultats de l'ANOVA pour la composante de l'effort de coupe (**Fa**) montrent que la profondeur de coupe (**ap**) est le facteur le plus important affectant (**Fa**) avec une contribution de 88,47%, suivi de l'avance (**f**) 8,37%, et la vitesse de coupe (**Vc**) avec une contribution de 2,13%.
- Les résultats de l'ANOVA pour la composante de l'effort de coupe (**Fr**) montrent que la profondeur de coupe (**ap**) est le facteur le plus important affectant (**Fr**) avec une contribution de 90,72%, suivi de l'avance (**f**) 5,09%, et la vitesse de coupe (**Vc**) avec une contribution de 2,89%.

- Les résultats de l'ANOVA pour la composante de l'effort de coupe (**Fv**) montrent que la profondeur de coupe (**ap**) est le facteur le plus important affectant (**Fv**) avec une contribution de 90,03%, suivi de l'avance (**f**) 6,81%, et la vitesse de coupe (**Vc**) avec une contribution de 2,34%.
- Les modèles mathématiques basés sur la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour la rugosité de surface (**Ra,Rt,Rz**) ayant un (R^2) de 95,65% , 92,69 et **94,65%**.respectivement, pour l'effort de coupe (**Fa,Fr,Fv**) avec un coefficient de corrélation (R^2) de 98,96%, 98,70% et 99,18% , respectivement. Et (**MRR**) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 89,87\%$. Ceci a montré un bon accord avec les données expérimentales.
- Les graphes de contour déterminés dans ce travail, permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs des réponses et les conditions d'exploitation souhaitables.

I- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de l'optimisation mono-objectif basée sur la méthode de Taguchi :

Pour une rugosité minimale :

- Une vitesse de coupe $Vc=156$ (m/min)
- Une Avance $f=0.08$ (mm/tr)
- Une profondeur de passe $ap=0.15$ mm

Pour l'effort principal minimale :

- Une vitesse de coupe $Vc=220$ (m/min)
- Une avance $f=0,08$ (mm/tr)
- Une profondeur de passe $ap=0.15$ (mm)

Pour un MRR maximale :

- Une vitesse de coupe $Vc=220$ (m/min)
- Une avance $f=0,16$ (mm/tr)
- Une profondeur de passe $ap=0.45$ (mm)

II- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de l'optimisation multi-objectif est donnée par :

- 1- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de l'optimisation multi-objectif par l'Analyse Relationnelle Grise :
 - Les résultats obtenus par L'Analyse Relationnelle Grise (**GRA**) sont : vitesse de coupe (**Vc**) = 220 m/min, avance (**f**) = 0,08 mm/tr, et une profondeur passe (**ap**)=0.15 mm, pour une rugosité de surface (**Ra**), l'effort de coupe (**Fv**) et le taux d'enlèvement de matière (**MRR**) optimaux.

- 2- L'optimisation multi-objectif réalisée dans ce travail est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Les régimes optimaux obtenus par cette optimisation selon les trois critères choisis sont :
 - **1^{er} Cas : Compromis entre la rugosité (Ra) et le Volume de** taux d'enlèvement de matière (MRR)
Vc=220,000 (m/min), f=0,080 (mm/tr) et ap=0,268 (mm). Les valeurs optimisées sont les suivants (**Ra=0,480 (µm), Fv=99,946 (N) et MRR=5,391 (cm³ /min)**) avec une désirabilité de 0,638.

 - **2^{ème} Cas : Rugosité minimale (Ra)**
Vc=220.000 (m/min), f= 0,080 (mm/tr) et ap=0,200 (mm). Les valeurs optimisées sont les suivants (**Ra=0,413 (µm), l'effor Fv=69,900 (N) et le MRR=4,180 (cm³ /min)**) avec une désirabilité de 0,809.

 - **3^{ème} Cas : productivité maximale (MRR maximisé)**
Vc=220,000 (m/min), f=0,104 (mm/tr) et ap=0,329 (mm). Les valeurs optimisées sont les suivants (**MRR=7,325 (cm³ /min), l'effort de coupe Fv=137,920 (N), Ra=0,750 (µm)**) avec une désirabilité de 0,576.

- 3- La méthode de Taguchi est plus efficace dans le cas d'une seule réponse, mais les méthodes GRA et DF sont conseillées pour l'optimisation multi-objectif.
- 4- Les régimes optimaux proposés par l'analyse relationnelle de Gray (GRA) et les méthodes de la fonction de désirabilité (DF) sont proches.

- **Références bibliographie :**

[1] Ion-Cosmin GRUESCU. Préparation de production en productique mécanique-etude de fabrication et analyse d'usinage. enseignant-chercheur. IUT A Université Lille1. [En ligne] 23 février 2015. (Consulté le 26 avril 2021) Disponible à l'adresse: https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/ch4_4_5.html

[2] Mecholic is an online resource for mechanical engineers that focuses on the information needs of engineers. Copyright © 2022 Mecholic. [En ligne]. Consulté le 26 avril 2021) Disponible à l'adresse: <https://www.mecholic.com/2016/02/different-types-of-cutting-tools-materials-and-their-properties.html>

[3] https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/CM_bennegadi.pdf

[4] ALAIN PASSERON, «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997

[5] François LEROY, [techniques-ingenieur](http://www.techniques-ingenieur.fr). Description des contacts copeau-outil et pièce-outil Endommagement des outils de coupe [en ligne], Date de publication : 10 févr. 1993, (consulter le 23 mai 2022) Disponible à l'adresse: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-travail-des-metaux-assemblage-tiabt/archive-1/endommagement-des-outils-de-coupe-b7042/description-des-contacts-copeau-outil-et-piece-outil-b7042niv10001.html>

[6] Mejd Abassi. Geometrie Outils. [JPG].in : SCRIBD [en ligne]. Mai 25, 2013 [Consulté le 20 mai 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.scribd.com/document/143552049/Geometrie-Outils-Prof#fullscreen=1>

[7] Oussama Mechri. MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS DE L'USINAGE DES PIÈCES EN ALLIAGES D'ALUMINIUM AA 7175-T74. Mémoire Oussama Mechri Maîtrise en génie mécanique. Maître ès sciences (M.Sc.). Québec, Canada, 2016

[8] A. Samir (2012), « Développement d'une nouvelle approche hybride pour la modélisation des échanges thermiques à l'interface outil copeau : Application à l'usinage de l'alliage d'aluminium aéronautique AA 2024-T351 », Thèse de Doctorat, Université de LORRAINE, France.

[9] Albert Belousov et Dmitry Kafidov, Selecting right surface roughness for CNC machining Xometry Europe Ada-Lovelace-Str. 9, 85521 Ottobrunn, ALLEMAGNE, [En ligne] Date de publication: Jan 29, 2021, (consulté le 23/05/2022) page :98 , Disponible à l'adresse: <https://xometry.eu/en/selecting-right-surface-roughness-for-cnc-machining/>

[10] Terry Freeman , la construction et la maintenance, Copyright © 2022 Corrosionpedia, [en ligne], Date de publication: Mars 16, 2021 (Consulté le 26 avril 2021) Disponible à l'adresse: <https://www.corrosionpedia.com/definition/1614/surface-defects>

[11]: enseignant/bensaada , univ-biskra.dz, etat de surface ,date de publication : 2019-11-18, (consulté le 23/05/2022) page :98 , Disponible à l'adresse: <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/6%20Etat%20de%20surfaces%208%20pages.pdf>

[12] Dr. Chittaranjan Sahay P.E., Dr. Suhash Ghosh /Understanding Surface Quality: Beyond Average Roughness (Ra)/ University of Hartford/c American Society for Engineering Education, 2018/[en ligne] /Document présenté à la conférence annuelle et exposition 2018 de l'ASEE , Salt Lake City, Utah. 10.18260/1-2—31176. [Consulté le 23 mai 2022]. Disponible à

l'adresse:

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiM6siLxN3AhUwgv0HHR9sBEIQFnoECAsQAO&url=https%3A%2F%2Fpeer.asee.org%2Funderstanding-surface-quality-beyond-average-roughness-ra.pdf&usg=AOvVaw2cizLRLaGOuTR6T6NvVS1Q>

[13] Michaël ARNOUX. Etude du comportement en fluage à haute température du superalliage monocristallin à base de nickel MCNG : Effet d'une surchauffe [en ligne]. Thèse de doctorat. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, 2009. Français. Fftel-00445811. [Consulté le 23 mai 2022]. 217 p. Page :8,10. Disponible à l'adresse: [https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/445811/filename/These_M.Arnoux-Version non confidentielle.PDF](https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/445811/filename/These_M.Arnoux-Version%20non%20confidentielle.PDF)

[14] Jean-Yves Guédou, « Les Superalliages base nickel : près d'un siècle de développement de matériaux pour l'aéronautique fonctionnant à haute température », *Nacelles* [En ligne], Les Matériaux de l'aéronautique : approches historiques et patrimoniales, Dossier thématique / Thematic Section, mis à jour le : 29/05/2020, [Consulté le 23 mai 2022]. URL: <https://revues.univ-tlse2.fr:443/pum/nacelles/index.php?id=958>.

[15] Bastien Toubhans. Caractérisation et modélisation des distorsions en tournage de pièces minces en Inconel 718. Génie mécanique [physics.class-ph]. HESAM Université, 2020. Français. ffnNT : 2020HESAE059ff. Fftel-03442378f [en ligne]. Thèse de doctorat [Consulté le 23 mai 2022]. 206 p. Page: 21.24. URL: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03442378/document>

[16] R. C. Reed, *The Superalloys fundamentals and applications*. Cambridge University Press, 2006

[17] Special metals Corporation 2022. *PRODUCT HANDBOOK OF HIGHPERFORMANCE NICKEL ALLOYS*. [En ligne] consulter le 19 mai 2022. l'adresse : <https://www.specialmetals.com/documents/nickel-alloy-handbook.pdf>

[18] Frifita, W., BenSalem, S., & Yallese, M. A. (2019, March). Predictive Modeling and Optimization of Cutting Parameters during the Turning of Inconel 718 Using Taguchi Method. In *International Conference Design and Modeling of Mechanical Systems* (pp. 328-334). Springer, Cham.

[19] Tebassi, H., Yallese, M., Khettabi, R., Belhadi, S., Meddour, I., & Girardin, F. (2016). Multi-objective optimization of surface roughness, cutting forces, productivity and Power consumption when turning of Inconel 718. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 111-134.

[20] Tebassi, H., Yallese, M., Belhadi, S., Girardin, F., & Mabrouki, T. (2017). Quality-productivity decision making when turning of Inconel 718 aerospace alloy: A response surface methodology approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(3), 347-362.

[21] Tebassi, H., Yallese, M. A., Meddour, I., Girardin, F., & Mabrouki, T. (2017). On the modeling of surface roughness and cutting force when turning of Inconel 718 using artificial

neural network and response surface methodology: accuracy and benefit. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 61(1), 1-11.

[22] Xavier, M. A., Manohar, M., Patil, M. M., & Jeyapandiarajan, P. (2017). Investigation of surface integrity during turning inconel 718. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 41(3), 387-394.

[23] Ren, X., & Liu, Z. (2019). A simulation model for predicting surface integrity coupled thermal–mechanical effect in turning of Inconel 718 super alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5), 1825-1837.

[24] Cica, D., & Kramar, D. (2019). Multi-objective optimization of high-pressure jet-assisted turning of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(11), 4731-4745.

[25] Zahoor, S., Ameen, F., Abdul-Kader, W., & Stagner, J. (2020). Environmentally conscious machining of Inconel 718: Surface roughness, tool wear, and material removal rate assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(1), 303-313.

[26] Wilhelm Hanglund. [JPG].in: Sandvik Coromant. [Sandviken, Sweden](#) [en ligne]. Consulter le 10 mai 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.sandvik.coromant.com/frfr/products/pages/productdetails.aspx?c=CSBNR%202525M%2012-4>

[27] Wilhelm Hanglund. [JPG].in: Sandvik Coromant. [Sandviken, Sweden](#) [en ligne]. Consulter le 10 mai 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/products/pages/productdetails.aspx?c=SNGN120408T01020%20%20%20%20670>

[28] Suresh R, Basavarajappa S, Samuel G.L. Somestudies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer-coated carbide tool. *Measurement*, 45, pp.1872–1884 (2012).

[29] Bouzid, L., Yallese, M. A., Chaoui, K., Mabrouki, T., & Boulanouar, L. Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(1), 45-61, (2015).7

[30] Aouici, H., Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., Elbah, M., & Fnides, B. Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12), 1775-1788. (2014).

[31] Tsao C.C., Grey–Taguchi method to optimize the milling parameters of aluminum alloy, *Int J Adv Manuf Technol* 40 (2009) 41–48.

[32] Pal S., Sahoo K., Tribological performance optimization of electroless Ni–P coatings using the Taguchi method and Grey relational analysis, *Tribol Lett* 28 (2007) 191–201.

[33] 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).

- [34] 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
- [35] Ross PJ, Taguchi techniques for quality engineering. McGraw-Hill, New York (1996).
- [36] 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).
- [37] 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).