

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté de science et technologie
Département de génie mécanique
Laboratoire de mécanique et structures (LMS)

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT 3^{ème} CYCLE

Domaine : Science et Technologie **Filière :** Génie mécanique
Spécialité : Génie des matériaux

Présentée par

GASMI Boutheyne

Intitulée

Investigation expérimentale sur l'évaluation des performances des matériaux de coupe et du mode de lubrification lors de l'usinage compétitif et environnemental des fontes

Soutenue le : Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Dr. BELHADI Salim	Pr	Université 8 Mai 1945 Guelma	Président
Dr. YALLESE Med Athmane	Pr	Université 8 Mai 1945 Guelma	Rapporteur
Dr BOUCHERIT Septi	MCA	Université 8 Mai 1945 Guelma	Co-Rapporteur
Dr. MOKAS Nacer	Pr	Université Badji MokhtarAnnaba	Examineur
Dr. BELBAH Ahmed	MCA	Université 8 Mai 1945 Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

Je souhaite dédier cette thèse :

À ma très chère Mère et à mon cher Père, pour témoigner de ma profonde gratitude envers leur dévouement constant tout au long de mes années d'études. Leur soutien indéfectible, leurs sacrifices sans limites et leur réconfort moral ont été des sources d'inspiration inestimables, témoignant de leur engagement sans faille envers mon éducation et mon succès.

À ceux qui ont été mes sources d'inspiration et de courage, à qui je dois tant d'amour et de reconnaissance :

À ma très chère sœur *Soumia*, mes frères, ma cousine *Khaoula* et mon mari *Mouhamed*. Leur soutien inconditionnel a été un pilier solide dans les moments de doute et de difficulté. Leur amour et leur présence ont été des forces motrices essentielles dans l'accomplissement de mes objectifs.

À toute ma famille,

À tous mes collègues et amis.

Remerciement

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude envers *Allah*, notre Créateur, pour nous avoir accordé la force nécessaire et le courage pour finir ce travail de recherche.

Ce projet a été mené sous la direction éclairée du Professeur *Yaltese Mohamed Athmane*, Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour la confiance qu'il ma témoignée, ainsi que pour son soutien, ses conseils et son assistance inestimable tout au long de cette période.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers mon co-directeur de thèse, le Dr. *BOUCHERIT Septi*, pour ses efforts et son soutien continu et ses conseils précieux.

Un grand merci à Monsieur *BELHADI Salim*, Professeur au département de Génie Mécanique de l'Université de Guelma, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant la présidence de ce jury de thèse.

Je tiens à exprimer mon sincère reconnaissance envers Messieurs *MOKAS Nacer*, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, et le docteur *BELBAH Ahmed*, pour avoir accepté d'examiner notre travail de thèse et pour l'intérêt qu'ils ont manifesté.

Mes remerciements les plus chaleureux vont également à Pr. *BELHADI Salim* et Dr. *KADDECHE Mounia* pour leur soutien précieux et leurs conseils avisés tout au long de la réalisation de cette thèse de doctorat.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont aidées à divers stades de ce travail, en particulier le Dr. *CHIHAOUI Salim*, la Dr. *SAFI Khaoula*, Mr *Ourfella Rabeh* et tous les membres, thésards et techniciens du Laboratoire (LMS).

Je souhaite également remercier chaleureusement mes enseignantes du département de génie mécanique pour leur soutien constant et leurs précieux enseignements.

Résumé

Les matériaux destinés pour l'usinage revêtent un intérêt décisif dans le domaine de l'usinage, car ils exercent un impact significatif sur divers aspects tels que la qualité de la surface usinée, la durée de vie de l'outil, la productivité, la consommation d'énergie et finalement le coût de l'opération d'usinage. Par conséquent, il est primordial de rechercher des outils offrant des performances supérieures et de sélectionner les meilleurs parmi eux. Parallèlement, l'usinage MQL gagne en popularité en industrie en raison de son engagement envers la préservation de l'environnement. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de recherche, qui se divise en trois grandes parties.

La première partie vise à évaluer les performances de différents matériaux d'outils, tels que le nitrure de bore cubique (CBN7050), la céramique mixte revêtue (CC6050), la céramique blanche non revêtue (CC620) et le nitrure de silicium revêtu (1690). Cette évaluation se concentre sur la rugosité 2D et 3D, les efforts de coupe et l'usure de l'outil (V_b) lors du tournage à sec de la fonte grise EN GJL-350.

Dans la deuxième partie, une étude statistique est réalisée suivie d'une modélisation et d'une optimisation. Les expériences sont menées selon un plan de Taguchi L_{32} , en variant les paramètres de coupe (V_c, f, ap et le matériau d'outil). L'analyse (ANOVA) est utilisée pour évaluer l'impact des facteurs d'entrée sur les paramètres de sortie, notamment la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe (F_z), la puissance de coupe (P_c) et l'énergie de coupe spécifique (E_{cs}). Les méthodes (RSM) et (ANN) sont employées pour développer des modèles prédictifs des paramètres technologiques. Aussi, une optimisation multi-objective est ensuite réalisée à l'aide des approches (DF) et (GA) pour obtenir des conditions de coupe optimales. En outre, quatre méthodes de prise de décision multicritère (MCDM) - MARCOS, VIKOR, TOPSIS et GRA - basées sur le rapport signal/bruit (S/B) sont utilisées et comparées pour trouver un régime de coupe qui minimise (R_a, F_z et P_c) tout en maximisant le (MRR).

La troisième partie se concentre sur une étude comparative entre l'environnement d'usinage à sec et MQL lors du tournage de la fonte EN GJL 350 avec un outil en CBN. Une modélisation est proposée pour prédire les sorties (R_a et F_z) pour les deux environnements, en utilisant la méthode (RSM). Enfin, la méthode MOORA a été appliquée dans le but de minimiser (R_a et F_z) tout en maximisant le (MRR).

Mots-clés : Usinage, Matériau de coupe, fonte grise, MQL, Modélisation, Optimisation

Abstract

The choice of tool materials is pivotal in machining, given their substantial influence on critical factors like machined surface quality, tool life, productivity, energy consumption, and ultimately machining operation costs. Thus, it becomes imperative to prioritize tools that demonstrate superior performance and carefully evaluate and select the most suitable options available. Concurrently, Minimum Quantity Lubrication (MQL) machining is gaining popularity in the industry due to its commitment to environmental preservation. It is in this context that this research work is framed, which is divided into three main parts.

The first part aims to evaluate the performance of different tool materials, such as cubic boron nitride (CBN7050), coated mixed ceramic (CC6050), uncoated white ceramic (CC620), and coated silicon nitride (1690). This evaluation focuses on 2D and 3D roughness, cutting forces, and tool wear (Vb) during dry turning of gray cast iron EN GJL-350.

In the second part, a statistical study is conducted followed by modeling and optimization. Experiments are carried out according to a Taguchi L_{32} design, varying cutting parameters (Vc, f, ap , and tool material). ANOVA method is used to assess the impact of input factors on output parameters, including surface roughness (Ra), cutting force (Fz), cutting power (Pc), and specific cutting energy (Ecs). RSM and ANN methods are employed to develop predictive models of technological parameters. Additionally, multi-objective optimization is then performed using Desirability Function (DF) and Genetic Algorithm (GA) to obtain optimal cutting conditions. Furthermore, four Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods - MARCOS, VIKOR, TOPSIS, and GRA - based on the signal-to-noise ratio (S/B) are used and compared to find a cutting regime that minimizes (Ra, Fz , and Pc) while maximizing (MRR).

The third part focuses on a comparative study between dry machining environment and MQL during turning of gray cast iron EN GJL 350 with a CBN tool. Modeling is proposed to predict outputs (Ra and Fz) for both environments using the RSM method. Finally, the MOORA method is applied to minimize (Ra and Fz) while maximizing (MRR).

Keywords: Machining, Cutting Material, Gray Cast Iron, MQL, Modeling, Optimization

ملخص

تلعب المواد المستخدمة في أدوات القطع دورًا حاسمًا في مجال التصنيع لأنها تؤثر بشكل كبير على جوانب متعددة مثل جودة السطح المشغول، وعمر الأداة، والإنتاجية، واستهلاك الطاقة، وأخيرًا تكلفة عملية التصنيع. لذلك، من الأساسي البحث عن أدوات توفر أداءً متفوقًا واختيار الأفضل من بينها. في الوقت نفسه، يكتسب التصنيع بكميات متدنية من الزيوت (MQL) شهرة في الصناعة بسبب التزامه بالحفاظ على البيئة. في هذا السياق يتم تأطير هذا العمل البحثي، الذي ينقسم إلى ثلاثة أجزاء رئيسية.

الجزء الأول يهدف إلى تقييم أداء مواد الأدوات المختلفة، مثل النيتريد البوري (CBN7050)، والسيراميك المختلط المغلف (CC6050)، والسيراميك الأبيض غير المغلف (CC620)، والنيتريد السليكون المغلف (1690). يركز هذا التقييم على خشونة ثنائية الأبعاد وثلاثية الأبعاد، والقوى الرئيسية للقطع، وتآكل الأداة (Vb) أثناء خراطة الحديد الزهر الرمادي EN GJL-350.

في الجزء الثاني، يتم إجراء دراسة إحصائية تليها نمذجة وتحسين. تُجرى التجارب وفقًا لتصميم Taguchi L_{32} مع تغيير عوامل القطع (Vc, f, ap ومادة الأداة). يتم استخدام تحليل التباين (ANOVA) لتقييم تأثير العوامل الداخلية على المعلمات الخارجية، بما في ذلك خشونة السطح (Ra)، وقوة القطع (Fz)، واستطاعة القطع (Pc)، والطاقة الخاصة للقطع (Ecs). تُستخدم طرق استجابة السطح (RSM) والشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) لتطوير نماذج توقعية للمعلمات التكنولوجية. بالإضافة إلى ذلك، يتم بعد ذلك تنفيذ تحسين متعدد الأهداف باستخدام تقنية (DF) والخوارزمية الجينية (GA). للحصول على شروط قطع مثلى. علاوة على ذلك، يتم استخدام أربعة أساليب لاتخاذ القرار متعدد المعايير (MCDM MARCOS، VIKOR، GRA وTOPSIS) بناءً على نسبة الإشارة إلى الضجيج (S/B) ومقارنتها للعثور على نظام قطع يقلل من (Ra, Fz, Pc, Ecs) بينما يزيد من (MRR).

الجزء الثالث يركز على دراسة مقارنة بين بيئة التصنيع الجافة والتصنيع بكميات متدنية من الزيوت أثناء تصنيع الحديد الزهر الرمادي EN GJL 350 بأداة قطع CBN. يُقترح نمذجة لتوقع الإخراجات (Ra) و (Fz) للبيئتين باستخدام طريقة (RSM). وأخيرًا، تم تطبيق طريقة MOORA بهدف تقليل (Ra) و (Fz) مع زيادة (MRR).

الكلمات الرئيسية: التصنيع، مواد القطع، حديد الزهر، MQL، النمذجة، التحسين

Index des figures

Chapitre I

Étude bibliographique

Fig I Plaquette CBN	7
Fig I.2 Considération du choix d'un revêtement	8
Fig I.3 Mécanismes d'usure	9
Fig I.4 Forme d'usure des arêtes de coupe	10
Fig I.5 Paramètres d'état de surface	11
Fig I.6 Critères de la rugosité	12
Fig I.7 Composantes de l'effort de coupe	13
Fig I.8 Diagramme fer-carbone	14
Fig I.9 Structure Microscopique de la fonte grise	15
Fig I.10 Structure Microscopique de la fonte blanche	16
Fig I.11 Structure Microscopique de la fonte malléable	16
Fig I.12 Variétés de lubrifiants couramment utilisés en usinage	18
Fig I.13 Fondements essentiels de la MQL	20
Fig I.14 Système MQL mono canal	21
Fig I.15 Système MQL bi canal	21
Fig I.16 Représentation d'usure (V_b) en fonction de temps d'usinage	22

Chapitre II Procédure expérimentale

Fig II.1 Tour à chariotier e modèle SN40	28
Fig II.2 Variateur et capteur de vitesse	29
Fig II.3 Éprouvette utilisée	29
Fig II.4 Plaquettes de coupe utilisées	31
Fig II.5 Types de fixation de plaquettes sur le porte-outil	31
Fig II.6 Dynamomètre	32
Fig II.7 PC piloté par le logiciel DYNOWARE	33
Fig II.8 Exemple d'acquisition	33
Fig II.9 Rugosimètre (2D) utilisé	34
Fig II.10 Chaîne de mesure de la rugosité en 3D	35
Fig II.11 Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250)	36

Fig II.12	Boite de contrôle	37
Fig II.13	Réservoir d'huile	38
Fig II.14	Équipements pour le système MQL	38

Chapitre III

Usinabilité de la fonte grise EN GJL-350

Fig III.1	Valeurs de l'usure (V_b) a) $V_c=450$ m/min et $T_c=2.6$ min; b) $V_c=650$ m/min et $T_c=1.8$ min	45
Fig III.2	Morphologie de l'usure des différentes plaquettes a) $V_c=450$ m/min et $T_c=2.6$ min b) $V_c=650$ m/min et $T_c=1.8$ min.	47
Fig III.3	Critères de la rugosité a) $V_c=450$ m/min; $T_c=2.6$ min; b) $V_c=650$ m/min ; $T_c=1.8$ min	48
Fig III.4	Évolution des efforts de coupe a) $V_c=450$ m/min, $T_c=2.6$ min; b) $V_c=650$ m/min, $T_c=1.8$ min.	50
Fig III.5	Topographie de surface 3D pour a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 and d) CBN7050	51

Chapitre IV

Modélisation des paramètres de coupe par RSM et ANN

Fig IV.1	Graphiques des effets principaux de ; a) R_a , b) F_z , c) P_c et d) E_{cs}	59
Fig IV.2	Tracés normaux des résidus a) pour R_a , b) pour F_z , c) pour P_c , et d) pour E_{cs}	62
Fig IV.3	Graphiques 3D de R_a pour a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 et d) CBN7050	62
Fig IV.4	Graphiques 3D de F_z pour a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 et d) CBN7050	63
Fig IV.5	Graphiques 3D de P_c pour a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 et d) CBN7050	64
Fig IV.6	Graphiques 3D de E_{cs} pour a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 et d) CBN7050	65
Fig IV.7	Architectures ANN adoptées pour R_a , F_z , P_c et E_{cs}	66

Chapitre V

Optimisation multi-objective par DF, GA et les méthodes MCDM

Fig V.1 Graphiques de rampe de désirabilité pour les cas d'optimisation	81
Fig V.2 Graphiques du front de Pareto	85
Fig V.3 Graphe comparatif des critères de classement des méthodes d'optimisation	99
Figure V.4 Diagramme de comparaison des méthodes d'optimisation utilisées	100

Chapitre VI

Performances de l'outil CBN lors de l'usinage à sec et MQL de la fonte EN GJL-350

Fig VI.1 Comparaison des résultats expérimentaux de <i>Ra</i> et <i>Fz</i> pour les deux environnements (à sec et MQL)	103
Fig VI.2 Graphe des effets principaux de la rugosité (<i>Ra</i>)	106
Fig VI.3 Graphe des effets principaux de l'effort (<i>Fz</i>)	107
Fig VI.4 Surface de réponse 3D de <i>Ra</i> pour l'usinage à sec	108
Fig VI.5 Surface de réponse 3D de <i>Ra</i> pour l'usinage MQL	109
Fig VI.6 Surface de réponse 3D de <i>Fz</i> pour l'usinage à sec.	109
Fig VI.7 Surface de réponse 3D de <i>Fz</i> pour l'usinage MQL	110
Fig VI.8 Etapes de la méthode d'optimisation MOORA	112

Index des tableaux

Chapitre II

Procédure expérimentale

Tableau II.1 Composition chimique de la fonte EN GJL-350	29
Tableau II.2 Caractéristiques mécaniques de la fonte EN GJL-350	30
Tableau II.3 Informations sur les plaquettes de coupes utilisées	31
Tableau II.4 Conditions de coupe et niveaux de variation des entrées	39
Tableau II.5 Matrice de planification pour un plan de Taguchi L9	40
Tableau II.6 Matrice de planification avec valeurs réels (non codifié)	40

Chapitre III

Usinabilité de la fonte grise EN GJL-350

Tableau III.1 Résultats des essais paramétriques	43
---	-----------

Chapitre IV

Modélisation des paramètres de coupe par RSM et ANN

Tableau IV.1 Résultats expérimentaux des paramètres de performance selon Taguchi L ₃₂	55
Tableau IV.2 ANOVA pour <i>Ra</i>	57
Tableau IV.3 ANOVA pour <i>Fz</i>	57
Tableau IV.4 ANOVA pour <i>Pc</i>	58
Tableau IV.5 ANOVA pour <i>Ecs</i>	58
Tableau IV.6 Comparaison entre les résultats des prédictions RSM et ANN	69
Tableau IV.7 Comparaison entre les différents R ² des modèles RSM et ANN	71

Chapitre V

Optimisation multi-objective par DF, GA et les méthodes MCDM

Tableau V.1 Résultats expérimentaux suivant le plan de Taguchi L ₃₂	76
Tableau V.2 Objectifs et plages de paramètres pour différents cas d'optimisation	77
Tableau V.3 Résumé des solutions obtenues pour les quatre cas d'optimisation.	77
Tableau V.4 Solution obtenue pour les différents cas d'optimisation	78
Tableau V.5 Solutions optimales de Pareto	83

Tableau V.6 Résultats du S/N et la normalisation des critères de sortie.	87
Tableau V.7 Normalisation pondérée pour les paramètres de performance	88
Tableau V.8 Résultats calculés et classement des alternatives par la méthode MARCOS	89
Tableau V.9 Normalisation de la matrice de décision	91
Tableau V.10 Calcul des coefficients (GRC) et (GRG) et le classement des alternatives	92
Tableau V.11 Matrice normalisée pondérée	93
Tableau V.12 Résultats de l'optimisation par la méthode TOPSIS.	95
Tableau V.13 Résultats de l'étape de normalisation	96
Tableau V.14 Résultats calculés et classement des alternatives par la méthode VIKOR	97
Tableau V.15 Comparaison des régimes optimaux trouvés	99

Chapitre VI

Performances de l'outil CBN lors de l'usinage à sec et MQL de la fonte

EN GJL-350

Tableau VI.1 Résultats des essais pour un plan de Taguchi L ₉ à sec et MQL	102
Tableau VI.2 ANOVA pour <i>Ra</i> (usinage à sec)	104
Tableau VI.3 ANOVA pour <i>Ra</i> (usinage à MQL)	104
Tableau VI.4 ANOVA pour <i>Fz</i> (usinage à sec)	105
Tableau VI.5 ANOVA pour <i>Fz</i> (usinage à MQL)	105
Tableau VI.6 Différents résultats trouvés par la méthode MOORA (usinage à sec)	112
Tableau VI.7 Différents résultats trouvés par la méthode MOORA (usinage à MQL)	113

Nomenclature

Vc Vitesse de coupe (m/min)

ap Profondeur de passe (mm)

f Avance par tour (mm/tr)

Fx Effort de coupe axial (N)

Fy Effort de coupe radial (N)

Fz Effort de coupe tangentiel (N)

Ra Rugosité moyenne arithmétique (μm)

Rt Rugosité totale (μm)

Rz Profondeur moyenne de la rugosité (μm)

Vb Usure en dépouille (mm)

ANOVA Analyse de variance

RSM Méthodologie de surface de réponse

ANN Réseau de neurones artificiels

DF Fonction de désirabilité

MCDM Analyse décisionnelle multicritère

MARCOS Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution

TOPSIS Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

GRA Analyse Relationnelle Grise

MOORA Analyse du ratio d'optimisation multi-objectif

α Angle de dépouille principal (degré)

γ Angle d'attaque (degré)

λ Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré)

χ_r Angle de direction principal (degré)

DL Degré de liberté

R² Coefficient de détermination (%)

SS Somme des carrés

MS Moyenne des carrés

F Valeur de Fisher

P Probabilité d'obtenir du résultat par hasard

Con% Pourcentage de contribution [%]

MQL Système de lubrification minimale

Table des matières

-Dédicace	II
-Remerciement	III
-Résumé	V
-Index des figures	VIII
-Index des tableaux	XI
-Nomenclature	XII
-Table des matières	XIV
-Introduction générale	1

Chapitre I

Étude bibliographique

I.1 Introduction.....	5
I.2 Usinabilité des matériaux.....	5
I.3 Matériaux des outils de coupe	5
I.3.1 Classification des matériaux de coupe	6
I.3.1.1 Céramiques.....	6
I.3.1.2 Nitrure de bore cubique (CBN).....	6
I.4 Revêtements des outils de coupe.....	7
I.5 Endommagement des Outils de Coupe.....	9
I.5.1 Mécanisme d'usure des Outils	9
I.5.2 Formes d'usure des arêtes de coupe	9
I.6 Etat de surfaces des pièces usinées.....	10
I.6.1 Principaux critères de rugosité.....	10
I.6.2 Topographie de surface 3D.....	12
I.7 Efforts de coupe	13
I.7.1 Importance des efforts de coupe	14
I.8 Fontes	14
I.8.1 Différents Types de Fontes.....	15
I.8.2 Rôle des Éléments d'Addition.....	17
I.9 lubrification en usinage	17
I.9.1 Types de lubrifiants utilisés dans l'usinage	18
I.9.2 Impact des fluides de coupe sur l'environnement	19
I.9.3 Minimisation des effets négatifs des fluides de coupe sur l'environnement.....	19
I.9.4 Minimum quantité de lubrification (MQL).....	19
I.10 Etat de l'art.....	21
I.11 Conclusion.....	27

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction.....	28
II.2 Matériels utilisés.....	28
II.2.1 Machine-outil.....	28
II.2.2 Éprouvette Utilisée	29
II.2.3 Matériaux de coupe et porte-outils	30
II.3 Appareils de mesure utilisés pour les paramètres de sortie.....	31
II.3.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	32
II.3.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	33
a) Rugosimètre 2D.....	33

Table des Matières

b) Rugosimètre 3D.....	34
II.3.3 Mesure de l'usure.....	36
II.3.4 Système à Quantité Minimale de Lubrification (MQL).....	36
II.4 Plan d'expérience et conditions de coupe	39
II.5 Démarche scientifique	40
II.6 Conclusion.....	41
<u>Chapitre III</u>	
<u>Usinabilité de la fonte grise EN GJL-350</u>	
III.1 Introduction.....	43
III.2 Résultats et discussion	43
III.2.1 Performances des matériaux de coupe	43
III.2.1.1 Évolution de l'usure (Vb).....	44
III.2.1.2 Évolution de la rugosité de surface.....	47
III.2.1.3 Évolution des efforts de coupe.....	49
III.3 Topographie de surface 3D	50
III.4 Conclusion.....	52
<u>Chapitre IV</u>	
<u>Modélisation des paramètres de coupe par RSM et ANN</u>	
IV.1 Introduction.....	54
IV.2 Analyse statistique et modélisation.....	54
IV.2.1 Analyse de la variance (ANOVA)	54
IV.2.2 Modélisation des paramètres technologiques de performance.....	59
a) Modélisation par RSM.....	59
b) Modélisation par ANN.....	65
c) Comparaison entre les modèles RSM et ANN.....	68
IV.3. Conclusion.....	72
<u>Chapitre V</u>	
<u>Optimisation multi-objective par DF, GA et les méthodes MCDM</u>	
V.1 Introduction.....	74
V.2 Optimisation par la méthode de la fonction de désirabilité (DF).....	75
V.3 Optimisation Par l'algorithme génétique (GA).....	81
V.4 Optimisation par les méthodes MCDM.....	85
V.4.1 Méthode MARCOS.....	86
V.4.2 Méthode GRA.....	90
V.4.3 Méthode TOPSIS.....	93
V.4.4 Méthode VIKOR.....	96
V.4.5 Comparaison des méthodes.....	98
V.5 Conclusion.....	100
<u>Chapitre VI</u>	
<u>Performances de l'outil CBN lors de l'usinage à sec et MOL de la fonte EN GJL-350</u>	
VI.1 Introduction.....	102
VI.2 Analyse statistique et modélisation.....	102
VI.2.1 Analyse de la variance (ANOVA) à sec et MQL.....	104
VI.2.1.1 ANOVA pour (Ra).....	104
VI.2.1.2 ANOVA pour l'effort (Fz).....	105
VI.2.2 Graphique des effets principaux de (Ra et Fz).....	106
VI.2.3 Modélisation des paramètres technologiques de performance.....	107

Table des Matières

VI.3 Optimisation multi-objective avec la méthode MOORA.....	110
VI.4 Conclusion.....	113
Conclusion générale et perspectives.....	114
Références bibliographiques.....	118

Introduction Générale

La fabrication mécanique représente l'un des piliers fondamentaux de l'industrie moderne, où l'usinage des métaux joue un rôle central dans la production de pièces de haute précision. Les matériaux sélectionnés pour les outils de tournage revêtent une importance critique dans ce processus de fabrication. En effet, le choix du matériau de l'outil de coupe a un impact significatif sur la qualité de la pièce usinée, la longévité de l'outil, la vitesse de coupe, ainsi que sur d'autres variables d'usinage. Dans cette optique, la recherche de plaquettes de coupe offrant des performances optimales et la sélection judicieuse des variables du régime de coupe sont des éléments clés pour garantir une productivité et une efficacité accrues lors de l'usinage des pièces mécaniques.

La recherche d'une qualité de surface et d'une productivité maximale ainsi qu'une faible consommation d'énergie lors d'un processus d'usinage est un défi majeur pour les entreprises de fabrication mécanique afin d'être compétitives. Ces paramètres sont influencés par plusieurs facteurs de coupe (V_c, f et ap), la géométrie et la nuance de l'outil de coupe, les différents types de revêtements et la lubrification...etc. Le défi des industriels est le choix des conditions de coupe les plus adaptées afin d'atteindre les résultats souhaités pour les paramètres de performance étudiés.

Pour assurer le bon fini d'un produit tout en maîtrisant les coûts d'usinage et en restant compétitif sur le marché, il est crucial de modéliser les paramètres de performance et d'optimiser les conditions de coupe en usinage. Face à la complexité croissante des processus de fabrication et à la multitude de paramètres à prendre en compte, les approches traditionnelles de modélisation et d'optimisation ne suffisent plus. Dans ce contexte, il est nécessaire de développer et d'explorer des techniques avancées d'optimisation pour sélectionner au mieux les conditions d'usinage.

Aussi, l'adoption croissante de techniques telles que l'usinage à sec et la lubrification minimum quantifiable (MQL) dans l'industrie repose sur leur réputation bien établie en termes de respect des systèmes écologiques et environnementaux. Bien que cette méthode de fabrication soit encore en phase émergente, elle nécessite une expertise croissante pour être maîtrisée. Pour répondre aux normes rigoureuses en matière d'écologie, il est essentiel de sélectionner les paramètres du processus de fabrication dans des conditions optimales qui prennent en compte les exigences de lubrification tout en préservant l'environnement. Le choix des paramètres de processus optimaux revêt une importance capitale afin de réduire les coûts d'usinage et en même temps garantir le fini du produit en terme de qualité et protéger l'écosystème.

C'est dans ce contexte d'étude (performance des matériaux de coupe, optimisation, modélisation des performances et environnement d'usinage) que s'inscrit la recherche menée dans le cadre de cette thèse de doctorat, qui est articulée autour de six chapitres.

Dans le chapitre I des notions de base concernant l'usinage des métaux ont été présentés. Nous avons abordé l'usinabilité des matériaux, en mettant l'accent sur les fontes (cas spécifique d'étude), ainsi que les différents types de matériaux de coupe, les actions mécaniques impliquées en usinage et les paramètres clés permettant de déterminer les performances d'usinage, tels que l'usure des plaquettes en CBN et céramiques, la qualité de surface de la fonte utilisée, les efforts de coupe générés et le débit du copeau enlevé. De plus, nous avons décrit en détail la méthode de lubrification (MQL). Enfin, nous avons synthétisé les travaux de recherche existants sur l'usinage des fontes avec divers matériaux de coupe.

Le deuxième chapitre est consacré à la description des moyens utilisés et des conditions de coupe adoptées lors des tests. Nous présentons de manière précise le matériel de mesure ainsi que le couple outil-matière, en fournissant tous les informations essentielles pour mener un travail expérimental rigoureux robuste dans le domaine de l'usinage avec les matériaux à outils de haute performance. Les conditions expérimentales et les plans d'expérience utilisés sont aussi exposés dans ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous exposons les résultats des essais paramétriques (unifactoriels) portant sur l'influence des paramètres de coupe (V_c , f , ap et le matériau de coupe) sur les composantes des efforts de coupe, les critères de rugosité de surface et l'usure en dépouille (V_b). Ces essais de tournage ont été effectués sur de la fonte grise EN GJL350 en utilisant quatre matériaux de coupe différents. Le premier est le nitrure de bore cubique (CBN7050) avec trois types de céramiques à savoir, la céramique mixte revêtue (CC6050), la céramique blanche sans revêtement (CC620) et le nitrure de silicium Si_3N_4 revêtu (1690). De plus, nous exposons dans ce chapitre les résultats obtenus sur l'investigation de la topographie 3D des surfaces usinées en fonction des paramètres de coupe.

Le quatrième chapitre présente une étude expérimentale réalisée sur la base d'un plan Taguchi L_{32} , où les facteurs d'entrée choisis sont la nature du matériau de coupe (M), (V_c), (f) et (ap). Les essais d'usinage ont été effectués sur des barres plaines du matériau choisi dans notre étude. L'objectif est de proposer une modélisation (Ra), (Fz), (Pc) et (Ecs) afin de permettre la prédiction. Pour ce faire, nous avons utilisé les méthodes (RSM), (ANN) et (ANOVA).

Le cinquième chapitre se consacre à l'optimisation des paramètres de sortie, notamment (**MRR**, **Ra**, **Fz et Pc**) en utilisant différentes méthodes. La fonction de désirabilité (DF) a été appliquée pour réaliser une optimisation englobant simultanément les paramètres de sortie, dans le but d'obtenir des régimes de coupe optimaux pour plusieurs cas d'optimisation couramment rencontrés dans l'industrie. Dans ce chapitre, nous présentons également les résultats de l'optimisation des réponses (**MRR**, **Fz**, **Ra**, **Pc**, et **Ecs**) via l'algorithme génétique (GA). D'autre part, quatre méthodes (MCDM) - MARCOS, GRA, TOPSIS et VIKOR - basées sur le rapport signal/bruit (S/B) ont été utilisées et comparées pour sélectionner un régime de coupe optimal garantissant les objectifs souhaités lors du processus de tournage de la fonte grise EN GJL-350.

Le dernier chapitre présente une étude expérimentale comparative menée dans un environnement à sec et en utilisant la méthode de la quantité minimale de lubrification (MQL) lors de l'usinage de la fonte grise avec un outil en (CBN). L'objectif est de fournir une modélisation de (**Ra**) et (**Fz**) pour permettre la prédiction dans les deux modes de lubrification. À cette fin, la méthode (RSM) et (ANOVA) ont été employées. Aussi, la méthode d'optimisation MOORA a été appliquée aux résultats trouvés afin de proposer une combinaison optimale qui garantit une optimisation des paramètres de sortie (**MRR**, **Fz et Ra**) simultanément.

Une conclusion générale est donnée à la fin de cette thèse, elle expose une synthèse des résultats trouvés durant cette investigation, ainsi que les perspectives.

Chapitre
I

Étude bibliographique

I.1 Introduction

La fabrication mécanique représente un pilier essentiel de l'industrie contemporaine. Parmi les nombreux procédés utilisés, l'usinage des métaux se distingue comme l'une des techniques les plus influentes dans la production de pièces de haute précision [1, 2]. Ce chapitre aborde les principes fondamentaux de l'usinabilité des matériaux, ainsi que les matériaux de coupe et les paramètres clés qui impactent les performances d'usinage, tels que l'usure des outils, la qualité de surface et les efforts de coupe. En outre, une synthèse des recherches récentes sur l'usinage des fontes grises est présentée à la fin du chapitre, offrant une exploration des différents matériaux de coupe utilisés. De plus, d'autres études portant sur l'application de diverses méthodes d'optimisation aux différents procédés d'usinage sont exposées.

I.2 Usinabilité des matériaux

L'usinabilité des matériaux est un concept fondamental dans le domaine de l'ingénierie et de la fabrication. Elle se réfère à la capacité d'un matériau à être usiné de manière efficace et économique tout en maintenant des performances de coupe optimales. Cette caractéristique est essentielle dans la sélection des matériaux pour diverses applications industrielles, car elle influence directement les coûts de production, la qualité des pièces usinées et la durée de vie des outils de coupe. Comprendre l'usinabilité des matériaux nécessite une analyse approfondie de leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques, ainsi que de leur comportement lors des opérations d'usinage [3].

De nombreux facteurs influent sur l'usinabilité d'un matériau, notamment sa dureté, sa ténacité, sa ductilité, sa conductivité thermique et électrique, ainsi que la présence de contaminants et d'inclusions. Ces caractéristiques déterminent la facilité avec laquelle un matériau peut être coupé, formé ou façonné, ainsi que sa résistance à l'usure des outils de coupe [4]. L'optimisation de l'usinabilité des matériaux est un défi constant pour les ingénieurs et les fabricants, car elle nécessite une combinaison judicieuse de techniques d'usinage, de paramètres de coupe et de matériaux d'outil [5].

I.3 Matériaux de coupe

Les matériaux de coupe utilisés en usinage sont indispensables pour travailler, tailler ou transformer une pièce brute en une forme désirée en retirant de la matière. Le choix des matériaux de coupe nécessite une attention particulière, prenant en compte les propriétés des matériaux à usiner, les conditions de coupe et les performances escomptées [6].

I.3.1 Classification des matériaux de coupe

Les matériaux utilisés pour l'usinage sont catégorisés en fonction de leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Le choix du matériau idéal pour l'usinage peut varier selon l'environnement d'usinage (conditions de coupe, matériau à travailler, géométrie de l'outil et l'usage spécifique). Les fabricants d'outils cherchent à équilibrer ces caractéristiques pour assurer des performances optimales [7]. Parmi les matériaux de coupe de haute technologie on trouve les céramiques et les CBN

I.3.1.1 Céramiques

Les matériaux de coupe en céramique représentent une classe importante d'outils utilisés dans divers processus d'usinage. Contrairement aux matériaux de coupe traditionnels tels que les aciers, les céramiques sont souvent privilégiées pour leur extrême dureté, leur résistance à l'usure et leur capacité à maintenir leur tranchant à des températures élevées. Il existe plusieurs types de matériaux de coupe en céramique, chacun ayant ses propres avantages et applications spécifiques. Les oxydes de carbure de silicium (SiC), les nitrures de silicium (Si₃N₄) et les oxydes d'alumine (Al₂O₃) sont parmi les céramiques les plus couramment utilisées dans les outils de coupe.

Les oxydes de carbure de silicium sont appréciés pour leur résistance à la chaleur et leur dureté exceptionnelle, ce qui les rend adaptés à des applications haute température telles que l'usinage des alliages réfractaires. Les nitrures de silicium offrent également une résistance à la chaleur élevée ainsi qu'une bonne résistance à l'usure et à la corrosion, les rendant idéaux pour les opérations d'usinage à haute vitesse et haute précision. Les oxydes d'alumine, bien que moins durs que les deux premiers, offrent une excellente résistance à l'usure et une stabilité thermique élevée, ce qui les rend adaptés à une gamme variée d'applications d'usinage. En somme, les matériaux de coupe en céramique présentent un potentiel considérable pour améliorer l'efficacité et la qualité des processus d'usinage dans diverses industries [8]

I.3.1.2 CBN

Le CBN est un matériau synthétique composé de cristaux de nitrure de bore cubique, qui sont formés sous des conditions de haute pression et haute température. La principale caractéristique du CBN est sa dureté extrême, qui est comparable voire supérieure à celle du diamant.

Cette dureté permet aux outils de coupe en CBN de maintenir leur tranchant même lorsqu'ils sont soumis à des matériaux très abrasifs comme les aciers trempés, les fontes dures et les matériaux superalliages à haute température.

De plus, le CBN présente une excellente résistance à la chaleur, ce qui lui permet de conserver ses propriétés de coupe même à des températures très élevées générées lors de l'usinage à grande vitesse. Les outils de coupe en CBN sont largement utilisés dans des applications telles que le tournage, le fraisage, le perçage et le taillage, où une combinaison de dureté, de résistance à la chaleur et de longévité est cruciale pour obtenir des performances optimales.

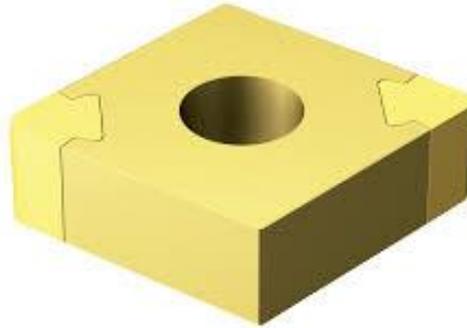


Figure I.1 Plaquette CBN

I.4 Revêtements des outils de coupe

Les revêtements appliqués aux outils de coupe jouent un rôle crucial dans l'optimisation des performances et de la durabilité des outils utilisés dans une gamme variée de processus de coupe, d'usinage ou de formage de matériaux divers tels que le métal, le bois, les plastiques et les composites. Ces revêtements offrent une multitude d'avantages, notamment la réduction de l'usure, l'amélioration de la résistance à la chaleur, la diminution des efforts de coupe et l'amélioration de la qualité de la surface usinée. Leur impact sur les performances des outils est significatif, contribuant ainsi à réduire les coûts d'usinage en prolongeant la durée de vie des outils et en améliorant l'efficacité des opérations. La Figure (I.2) illustre la considération dans le choix d'un revêtement.

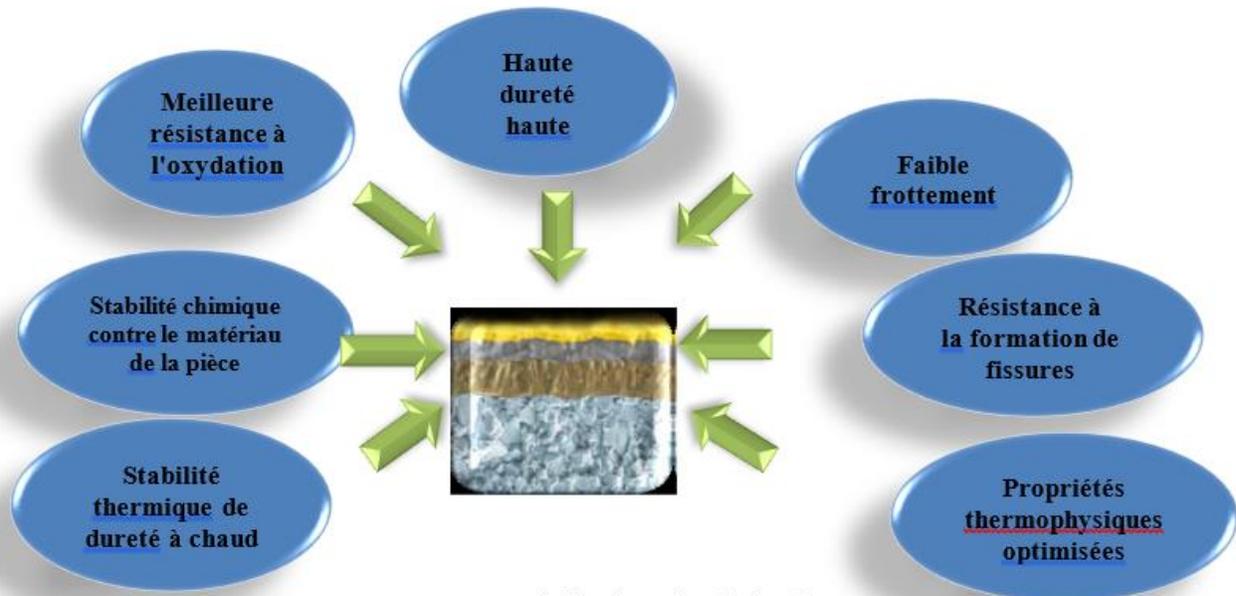


Figure I.2 Considération du choix d'un revêtement

Parmi les revêtements les plus utilisés, on trouve :

- [1] Le nitrure de titane (TiN),
- [2] Le nitrure d'aluminium (AlN),
- [3] Le nitrure de titane et aluminium (TiAlN),
- [4] Le nitrure de chrome (CrN),
- [5] Le nitrure de zirconium (ZrN),
- [6] Le nitrure de bore cubique (CBN),
- [7] Le carbure de titane (TiC),
- [8] Le carbure de tungstène (WC),
- [9] Le nitrure de titane et carbone (TiCN)
- [10] L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).

Deux méthodes principales sont utilisées pour élaborer ces revêtements : le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Ces techniques visent à améliorer la durabilité, les performances de coupe et la résistance à l'usure des outils de coupe [11].

I.5 Endommagement des outils de coupe

Les outils de coupe sont soumis à des conditions de travail sévères, telles que des températures élevées, des forces de coupe importantes et des matériaux abrasifs. Ces conditions entraînent inévitablement des dommages et de l'usure sur les arêtes de coupe des outils, ce qui peut affecter leur efficacité et leur précision.

I.5.1 Mécanisme d'usure des outils

La **Figure I.3** offre un aperçu général des mécanismes d'usure. Plusieurs mécanismes peuvent être responsables de l'usure, notamment [12] ; **l'abrasion, l'adhésion, la diffusion et la corrosion**

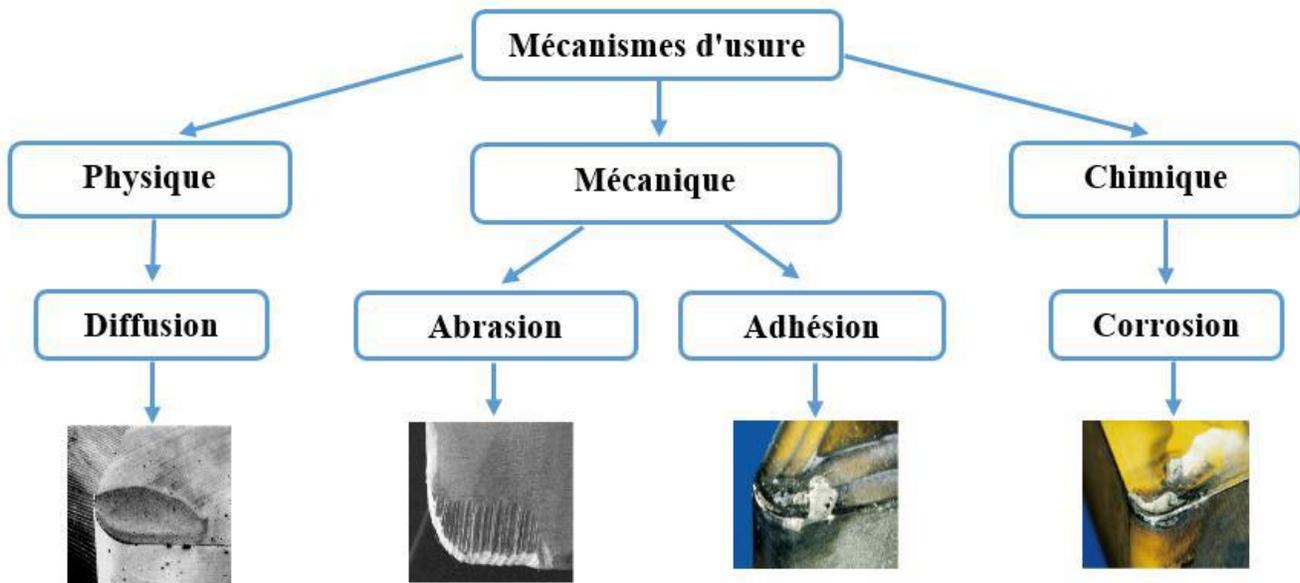


Figure I.3 Différents mécanismes d'usure.

I.5.2 Formes d'usure des arêtes de coupe

Les formes d'usure des arêtes de coupe fournissent des indications sur les mécanismes d'usure et les conditions de coupe (**Fig I.4**). Les principales formes d'usure comprennent : usure en dépouille, arête rapportée, usure en entaille, usure par déformation plastique, usure en peigne et usure en cratère [13]

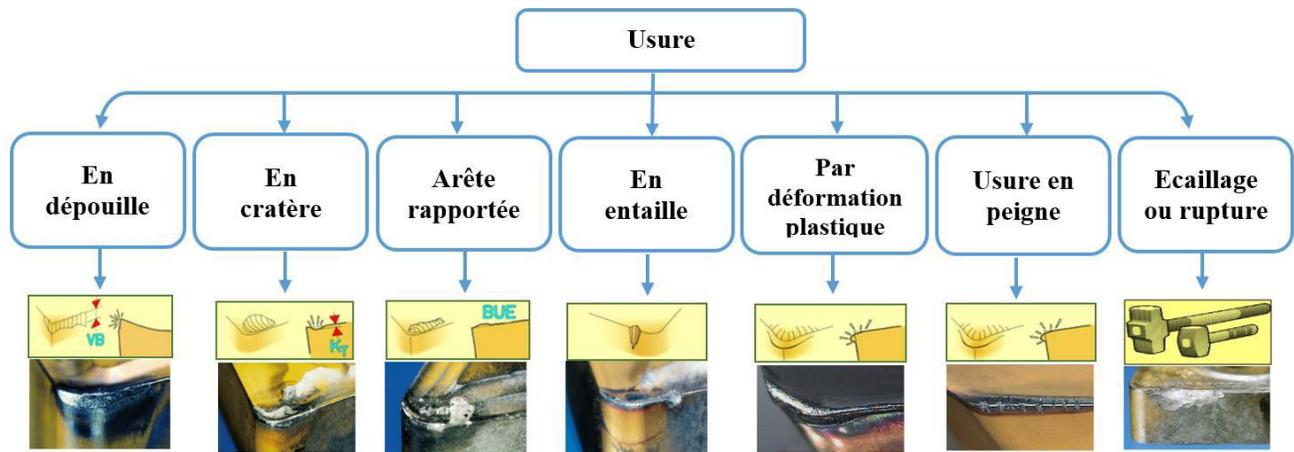


Figure I.4 Forme d'usure

La compréhension des mécanismes et des formes d'usure des outils de coupe est essentielle pour optimiser les opérations d'usinage et prolonger la durée de vie des outils. En surveillant attentivement l'état des outils et en mettant en œuvre des stratégies de gestion de l'usure, il est possible de maintenir des performances d'usinage optimales et de réduire les coûts de production.

I.6 État de surfaces des pièces usinées

L'évaluation de la qualité de surface d'une pièce mécanique concerne l'identification des imperfections telles que les rayures, les entailles ou les creux, qui peuvent survenir pendant les processus de fabrication ou de manipulation. Ces défauts peuvent être de nature géométrique ou physico-chimique, mais dans ce contexte, nous nous concentrons exclusivement sur les défauts géométriques. Leur importance est cruciale dans divers domaines tels que l'ingénierie, l'aérospatiale, l'automobile, la fabrication, la conception industrielle. Les états de surface ont un impact direct sur les performances, la fonctionnalité et l'aspect esthétique des pièces et des produits finis. [14].

I.6.1 Principaux critères de rugosité

Les critères de rugosité jouent un rôle crucial dans divers domaines industriels, où la qualité de surface est une préoccupation majeure. Pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application, différentes normes et directives sont établies, notamment par des organismes tels que l'Organisation internationale de normalisation (ISO) (**Fig I.5**). Ces normes, comme l'ISO 4287 dans le domaine de la fabrication mécanique, fournissent des protocoles précis pour mesurer la rugosité et définir les critères appropriés. La rugosité, telle que définie par ces normes, reflète la qualité de la surface d'un objet ou d'un matériau, caractérisée par ses variations irrégulières. Elle est évaluée à l'aide de divers paramètres et mesures qui décrivent les irrégularités présentes sur la surface.

Ainsi, la compréhension des principaux critères de rugosité est essentielle pour garantir des normes de qualité élevées dans les processus de fabrication et d'ingénierie (**Fig I.6**). Voici les principaux critères de rugosité [15] :

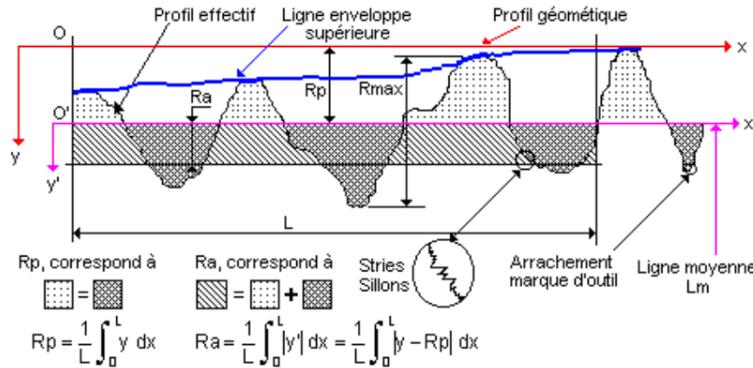


Figure I.5 Paramètres d'état de surface [15]

- **Rugosité moyenne (Ra)** est un indice de rugosité largement employé, caractérisant la valeur moyenne des altitudes des aspérités de la surface par rapport à une ligne de référence. Exprimée en micromètres (μm), cette mesure offre une évaluation générale de l'aspect rugueux de la surface.

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| \, dx \tag{I.1}$$

- **Rugosité maximale (Rz)** : représente la distance verticale entre les points culminants et les plus bas d'une surface, dans une longueur de mesure donnée. Ce paramètre offre une indication sur l'amplitude des variations extrêmes de la surface, permettant ainsi d'évaluer la régularité de celle-ci de manière plus précise

$$Rz = 1/5(Rz_1 + Rz_2 + Rz_3 + Rz_4 + Rz_5) \tag{I.2}$$

- **Hauteur maximale des aspérités (Rt)** : représente la distance verticale entre le point le plus bas et le point le plus haut le long de toute la mesure.

$$Rt = R_p + R_v = R_{p_3} + R_{v_4} \tag{I.3}$$

- **Rugosité moyenne quadratique (Rq)** : également désignée comme l'écart-type de la rugosité, évalue les variations entre les points de la surface et la ligne médiane sur une longueur de mesure donnée. La rugosité moyenne quadratique (Rq).

- **Rugosité maximale des pics (R_p) et rugosité maximale des creux (R_v)** : elles représentent respectivement les hauteurs maximales des points culminants et des points les plus bas par rapport à une ligne de référence.

$$R_p = R_{p3} \tag{I.4}$$

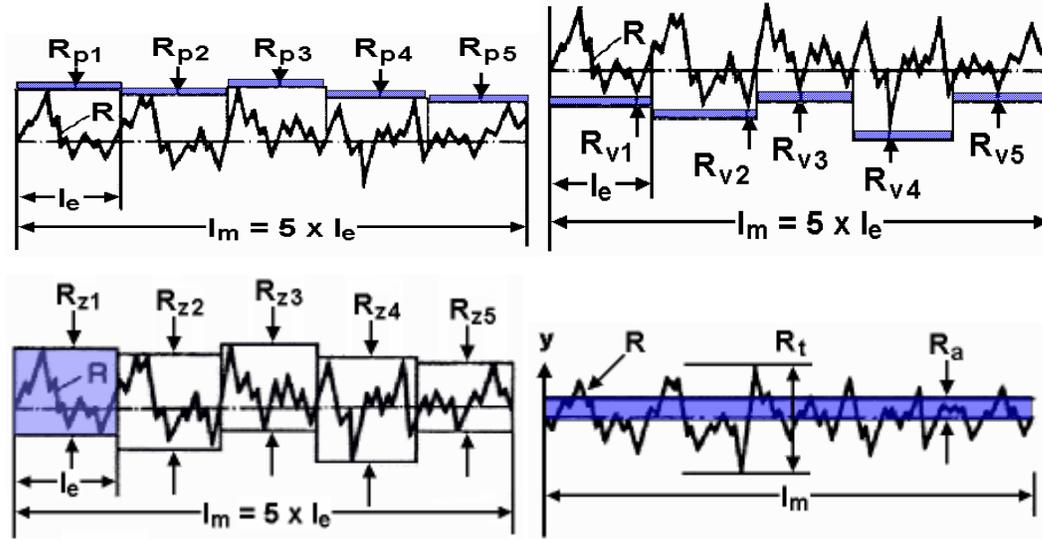


Figure I.6 Critères de la rugosité [15].

I.6.2 Topographie de surface 3D

Les caractéristiques de la surface, souvent désignées sous le terme d'états de surface ou de rugosité de surface, revêtent une importance cruciale dans la qualité et la performance des pièces mécaniques, ainsi que dans divers secteurs industriels. Elles englobent une multitude de propriétés microscopiques telles que la rugosité, la texture, la planéité, la rectitude, la circularité, et bien d'autres. Ces caractéristiques sont fondamentales pour assurer le bon fonctionnement des pièces mécaniques et leur durabilité dans des applications variées.

La rugosité de surface 3D, constitue une mesure avancée de la qualité de la surface par rapport à la rugosité de surface 2D, plus conventionnelle. Cette dernière se concentre essentiellement sur les aspects bidimensionnels de la topographie de la surface. En revanche, la rugosité de surface 3D prend en compte les caractéristiques tridimensionnelles, intégrant non seulement les variations de crêtes et de creux, mais aussi la forme et la disposition globale des irrégularités sur la surface.

Cette approche plus complète offre une vision plus précise de la qualité de la surface, permettant une évaluation plus approfondie et une meilleure compréhension de son comportement dans des conditions d'utilisation réelles [16].

I.7 Efforts de coupe

Les efforts de coupe en tournage désignent les forces physiques se réfèrent aux forces physiques exercées sur l'outil de coupe pendant le processus de rotation sur un tour. Ce procédé consiste à enlever du matériau d'une pièce en rotation pour lui donner une forme spécifique.

Selon la référence [17], une compréhension approfondie de la notion des efforts de coupe s'avère indispensable afin d'obtenir des résultats de tournage de haute qualité, de prolonger la durée de vie des outils, et d'assurer la sécurité de l'opérateur. Les efforts de coupe principaux englobent (**Fig I.7**)

- **L'effort de coupe (F_t)** : agissant perpendiculairement à la direction d'avance de l'outil, responsable de l'enlèvement de matériau.
- **L'effort radial (F_r)** : agissant radialement par rapport à l'axe de rotation de la pièce, influençant la précision dimensionnelle et la stabilité du processus de coupe.
- **L'effort axial (F_a)** : agissant le long de l'axe de rotation (direction axiale), pouvant affecter la profondeur de coupe et l'état de surface de la pièce.
- **L'effort global de coupe (F_c)** : la somme vectorielle de tous les efforts de coupe agissant sur un outil pendant l'usinage. Il est crucial pour évaluer la charge totale sur l'outil et la machine, assurant le bon déroulement de l'opération.

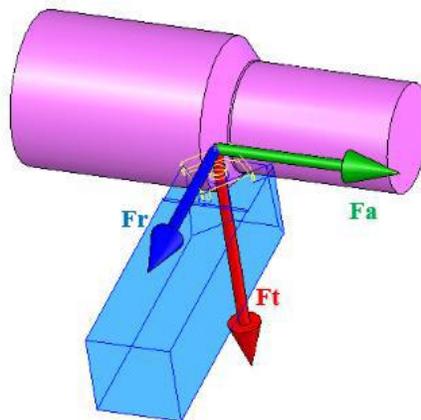


Figure I.7 Composantes de l'effort de coupe.

I.7.1 Importance des efforts de coupe

Une compréhension précise des efforts de coupe est essentielle pour plusieurs raisons :

- Optimisation des paramètres de coupe : En comprenant les facteurs influents sur les efforts de coupe, il est possible d'ajuster les paramètres de coupe pour améliorer l'efficacité et la qualité de l'usinage.
- Réduction de l'usure des outils : En minimisant les forces de coupe excessives, il est possible de prolonger la durée de vie des outils de coupe et de réduire les coûts de maintenance.
- Prévention des vibrations : Les efforts de coupe mal maîtrisés peuvent entraîner des vibrations indésirables qui affectent la qualité de la pièce usinée. Une compréhension des forces en jeu permet de minimiser ce risque.

I.8 Fontes

La fonte est un alliage composé principalement de fer et de carbone, avec une teneur en carbone dépassant 2% (**Fig I.8**) [18]. Elle présente des qualités de coulée et d'usinabilité satisfaisantes, ainsi que des propriétés mécaniques modérées. En raison de ces avantages, elle est largement employée dans l'industrie pour sa facilité de moulage, sa bonne usinabilité et sa résistance à la compression.

Les différentes catégories de fonte comprennent la fonte grise, la fonte blanche et la fonte malléable. Chacune possède des propriétés distinctes, telles qu'une dureté élevée et une usinabilité parfois difficile. Cependant, elles offrent des avantages significatifs, notamment une bonne résistance à l'usure et une excellente capacité de coulée [19].

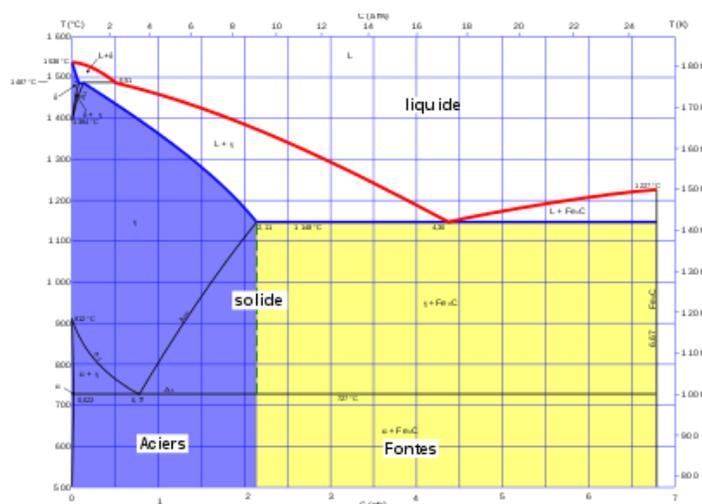


Figure I.8 Diagramme fer_carbone[19].

La composition chimique des fontes varie en fonction de leur type spécifique et de leurs applications. Cependant, elles contiennent généralement du fer (Fe) comme élément principal, ainsi que du carbone (C) et d'autres éléments d'alliage tels que le silicium (Si), le manganèse (Mn), le phosphore (P), le soufre (S) et le magnésium (Mg). La teneur en carbone est souvent utilisée pour classer les fontes en différentes catégories, telles que la fonte grise et la fonte blanche [20].

I.8.1 Différents Types de Fontes

1. **Fonte Grise** : La fonte grise est la forme la plus courante de fonte. Elle tire son nom de la couleur grise de sa fracture. Sa structure est caractérisée par la présence de graphite sous forme lamellaire, qui agit comme un lubrifiant interne, améliorant ainsi l'usinabilité de la fonte grise. Elle est utilisée dans une variété d'applications telles que les blocs-cylindres de moteurs, les boîtiers de transmission et les pièces de machines. La microstructure de la fonte grise est représentée par la **Figure (I.9)** [21].



Figure I.9 Structure Microscopique d'une fonte grise[22]

2. **Fonte Blanche** : La fonte blanche est une fonte plus dure que la fonte grise en raison de la formation de graphite sous forme de nodules. Elle est obtenue par un refroidissement plus rapide du métal fondu, ce qui empêche la formation de graphite lamellaire. La fonte blanche est utilisée dans les applications nécessitant une résistance à l'usure élevée, comme les cylindres de laminoirs et les engrenages. La microstructure de la fonte blanche est représentée par **la figure (I.10)** [23].

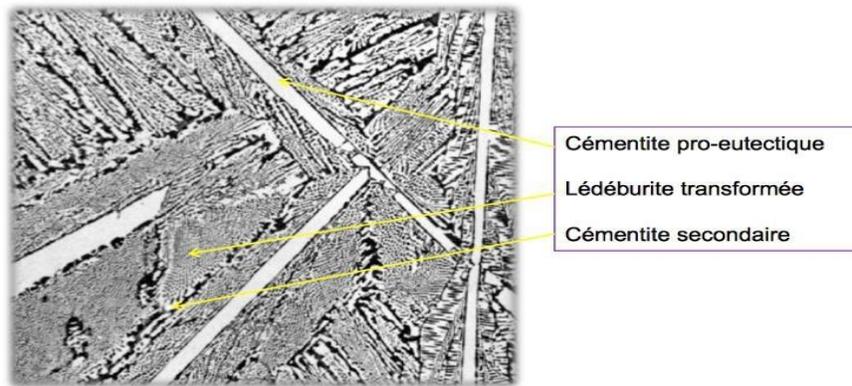


Figure I.10 Structure Microscopique d'une fonte blanche [23].

3. Fonte malléable

La fonte malléable est une fonte blanche qui a été recuite. Grâce à un traitement thermique de recuit, la structure fragile de la première coulée est transformée en une forme malléable. Par conséquent, sa composition est très similaire à celle de la fonte blanche, avec des quantités légèrement supérieures de carbone et de silicium. Fer malléable contient des nodules de graphite qui ne sont pas vraiment sphériques comme ils le sont dans la fonte ductile, car ils se forment à la suite d'un traitement thermique plutôt que lors du refroidissement de la masse fondue. La fonte malléable est fabriquée en coulant d'abord un fer blanc afin d'éviter les flocons de graphite et que tout le carbone non dissous soit sous forme de carbure de fer. La fonte malléable commence par une coulée de fonte blanche qui est ensuite traitée thermiquement pendant un jour ou deux à environ 950°C (1740°F), puis refroidie pendant un jour ou deux [23].

Ce procédé de traitement thermique permet d'atteindre les niveaux de dureté, d'allongement à la rupture et de résistance à la traction requis. Les fontes malléables démontrent des propriétés de ductilité et de résistance mécanique élevées, similaires à celles des aciers non alliés à faible teneur en carbone. La microstructure de la fonte malléable est illustrée dans la **Figure (I.11)**. [23]

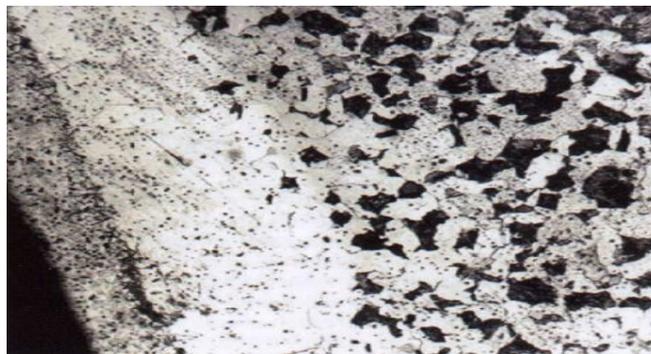


Figure I.11 Structure Microscopique d'une fonte malléable [24]

4. Fonte ductile (fonte nodulaire)

Également connue sous le nom de fonte nodulaire, acquiert ses caractéristiques distinctives grâce à l'incorporation de magnésium dans son alliage. La présence de magnésium favorise la formation de graphite sous forme de sphéroïdes plutôt que de flocons, comme c'est le cas pour la fonte grise. La maîtrise de la composition revêt une importance capitale dans le processus de fabrication, car de petites quantités d'impuretés telles que le soufre et l'oxygène peuvent réagir avec le magnésium, altérant ainsi la morphologie des molécules de graphite. La manipulation de la structure microcristalline autour des sphéroïdes de graphite permet d'obtenir différentes qualités de fonte ductile, un processus réalisé soit par coulée, soit par traitement thermique en tant qu'étape de post-production.

5. Fonte graphite compacté

La fonte à graphite compact présente une combinaison unique des caractéristiques du fer gris et du fer blanc, grâce à sa structure à base de graphite. Cette structure microcristalline se forme autour de flocons de graphite interconnectés. L'ajout d'alliages tels que le titane permet de prévenir la formation de graphite sphéroïdal. Comparée à la fonte grise, la fonte à graphite compact offre une résistance à la traction accrue et une meilleure ductilité. La microstructure et les propriétés peuvent être ajustées par traitement thermique ou par l'introduction d'autres alliages.

I.8.2 Rôle des Éléments d'Addition

Des éléments d'addition sont incorporés dans les fontes afin de modifier leurs caractéristiques mécaniques et physiques. Par exemple, l'ajout de silicium favorise la formation de graphite lamellaire dans la fonte grise, tandis que le manganèse agit en tant que désoxydant pour éliminer les impuretés telles que l'oxygène et le soufre.

Le phosphore est souvent présent en petites quantités pour améliorer la fluidité du métal en fusion, tandis que le magnésium est utilisé pour réduire la formation de graphite sous forme de nodules dans la fonte blanche [25].

I.9 lubrification en usinage

La lubrification en usinage est un aspect essentiel pour garantir des opérations d'usinage efficaces, réduire l'usure des outils, améliorer la qualité des surfaces et prolonger la durée de vie des machines-outils. Elle implique l'utilisation de lubrifiants, également appelés fluides de coupe, pour réduire les frictions et les températures élevées générées lors du processus d'usinage [26].

I.9.1 Types de lubrifiants utilisés dans l'usinage

Il existe plusieurs types de lubrifiants utilisés dans l'usinage, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages. Les principaux types comprennent (**Fig I.12**) [26] :

Huile de coupe	<ul style="list-style-type: none"> • Les huiles de coupe sont largement utilisées pour l'usinage des métaux. Elles sont formulées pour offrir une excellente lubrification et un refroidissement efficace. Les huiles de coupe minimisent la friction, réduisent l'usure des outils et contribuent à obtenir des pièces de qualité.
Émulsion	<ul style="list-style-type: none"> • Les émulsions sont des mélanges d'eau et d'huile. Elles sont utilisées pour l'usinage des métaux, des plastiques et d'autres matériaux. Les émulsions sont moins coûteuses que les huiles pures, mais elles peuvent nécessiter une surveillance constante pour maintenir la bonne concentration.
Lubrifiants solides	<ul style="list-style-type: none"> • Certains matériaux solides, tels que le graphite, le molybdène ou le disulfure de molybdène, sont utilisés comme lubrifiants solides dans des opérations spécifiques. Ces lubrifiants solides réduisent la friction et l'usure, ce qui est utile pour l'usinage de matériaux sensibles à la chaleur.
Lubrifiants spéciaux	<ul style="list-style-type: none"> • Pour des matériaux spécifiques ou des opérations particulières, des lubrifiants spéciaux peuvent être utilisés. Par exemple, des lubrifiants biodégradables peuvent être nécessaires pour des applications environnementales. Certains lubrifiants sont conçus pour l'usinage de composites, de plastiques ou d'autres matériaux spécifiques.
Graisse	<ul style="list-style-type: none"> • Les graisses sont généralement utilisées pour la lubrification des paliers et des guidages dans les machines-outils pour assurer un fonctionnement fluide.
Air comprimé	<ul style="list-style-type: none"> • Dans certaines applications, de l'air comprimé est utilisé pour souffler les copeaux et les particules de la zone de coupe, ce qui peut également servir de moyen de lubrification pour réduire la chaleur.
Lubrification par brouillard d'huile	<ul style="list-style-type: none"> • Cette méthode consiste à créer un brouillard d'huile finement pulvérisé dans la zone de coupe à l'aide d'un système d'atomisation. Cela permet une lubrification efficace tout en minimisant la quantité de lubrifiant utilisée.

Figure I.12 Variétés de lubrifiants fréquemment employés dans le domaine de l'usinage

- **Les lubrifiants à base d'huile** : Ils sont couramment utilisés dans les opérations d'usinage en raison de leur capacité à réduire efficacement les frictions et les températures de coupe. Cependant, ils peuvent avoir des impacts environnementaux significatifs s'ils sont mal gérés.
- **Les lubrifiants synthétiques** : Ils sont formulés à partir de composés synthétiques et offrent des performances supérieures en termes de lubrification et de refroidissement. Ils peuvent être moins nocifs pour l'environnement que les lubrifiants à base d'huile, mais leur fabrication peut encore entraîner des émissions de gaz à effet de serre.
- **Les lubrifiants à base d'eau** : Ces lubrifiants sont dilués dans de l'eau et sont utilisés pour réduire les frottements et les températures de coupe. Ils sont considérés comme plus respectueux de l'environnement que les lubrifiants à base d'huile, mais ils peuvent nécessiter des additifs pour prévenir la corrosion et la croissance bactérienne.

I.9.2 Impact des fluides de coupe sur l'environnement

Les fluides de coupe peuvent avoir un impact significatif sur l'environnement s'ils ne sont pas correctement gérés. Les principaux impacts comprennent la pollution de l'air, de l'eau et des sols, ainsi que la contamination des ressources naturelles et la destruction des écosystèmes.

Les émissions atmosphériques provenant de l'utilisation de lubrifiants à base d'huile peuvent contribuer à la pollution de l'air. De plus, les rejets de lubrifiants non traités dans les eaux de surface peuvent contaminer les écosystèmes aquatiques et menacer la biodiversité [27].

I.9.3 Minimisation des effets négatifs des fluides de coupe sur l'environnement

Pour minimiser les effets négatifs des fluides de coupe sur l'environnement, plusieurs mesures peuvent être prises [28]:

- Utilisation de lubrifiants respectueux de l'environnement : Les entreprises peuvent opter pour des lubrifiants synthétiques ou à base d'eau, qui sont généralement moins nocifs pour l'environnement que les lubrifiants à base d'huile
- Gestion efficace des déchets : Les entreprises doivent mettre en place des systèmes de collecte, de traitement et d'élimination des déchets de lubrifiants de manière responsable pour éviter la contamination environnementale.
- Utilisation de techniques d'usinage alternatives : Des méthodes telles que la minimum quantité de lubrification (MQL) peuvent réduire considérablement la quantité de lubrifiant utilisée pendant le processus d'usinage, réduisant ainsi les risques de pollution.

I.9.4 Minimum Quantité de Lubrification (MQL)

La MQL est une technique d'usinage qui consiste à utiliser une quantité minimale de lubrifiant pendant le processus d'usinage. Cette méthode réduit efficacement les quantités de lubrifiants utilisés tout en maintenant des performances d'usinage satisfaisantes. La MQL présente des avantages environnementaux significatifs en réduisant la consommation de lubrifiants, en minimisant les déchets et en limitant les émissions nocives dans l'environnement [29].

L'intervalle de débit de lubrifiant dans le processus de lubrification MQL (Minimum Quantity Lubrication) est hautement spécifique à chaque application et peut être soumis à une variation considérable, influencée par divers facteurs. Pour donner quelques exemples généraux d'intervalle de débit en mL/h dans des contextes d'utilisation courante, voici quelques valeurs typiques à titre indicatif : dans le cas de l'usinage de l'aluminium, l'intervalle de débit peut osciller entre 50 mL/h et 200 mL/h, en fonction de paramètres tels que la vitesse de coupe, la profondeur de coupe, entre autres.

Pour l'usinage de la fonte, l'intervalle de débit tend à être plus élevé, généralement compris entre 100 mL/h et 300 mL/h, du fait de la résistance accrue du matériau, entre autres facteurs. Les fondements de la lubrification MQL sont exposés de manière illustrative dans la **Figure (I.13)**.

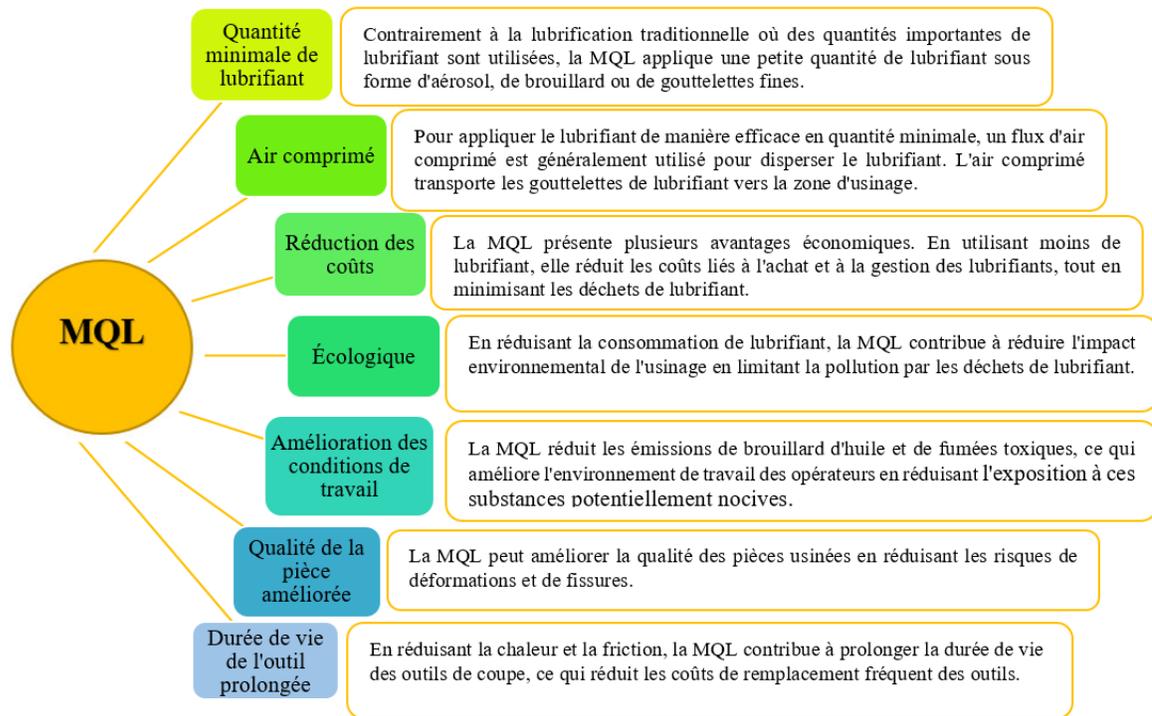


Figure I.13 Fondements essentiels de la MQL

Il existe deux types de systèmes de lubrification minimum (MQL) qui produisent un mélange d'air et d'huile, se distinguant par l'endroit où ce mélange est formé. Dans le premier système à canal unique (Fig I.14), le mélange est préparé à l'extérieur de la machine, puis acheminé jusqu'à la zone de coupe à travers un seul canal. Cependant, ce système présente des limitations en termes de réactivité lors des changements d'outils en raison de la longueur des canaux séparant l'unité principale de l'outil de coupe.

L'activation du dispositif MQL ne garantit pas immédiatement la distribution de brouillard à la pointe de l'outil. En revanche, le système à double canal permet de mélanger l'air et l'huile au plus près du corps de l'outil (Fig I.15).

Bien que la mise en place de ce système soit plus complexe, il offre une réactivité accrue. Selon [30], dans certaines applications, seul le système à double canal peut garantir une distribution optimale du brouillard d'air et d'huile, assurant ainsi une homogénéité parfaite du mélange à la pointe de l'outil.

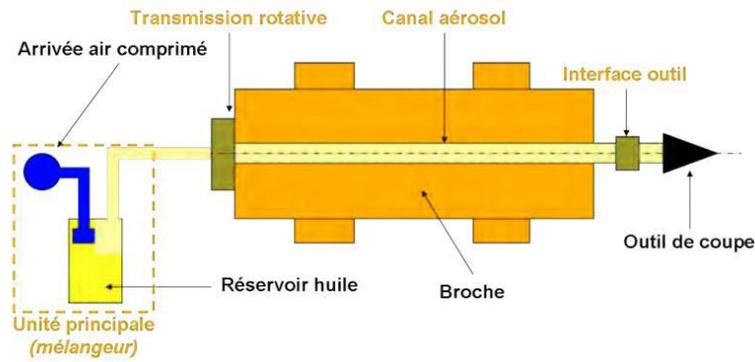


Figure I.14 Système MQL mono canal.

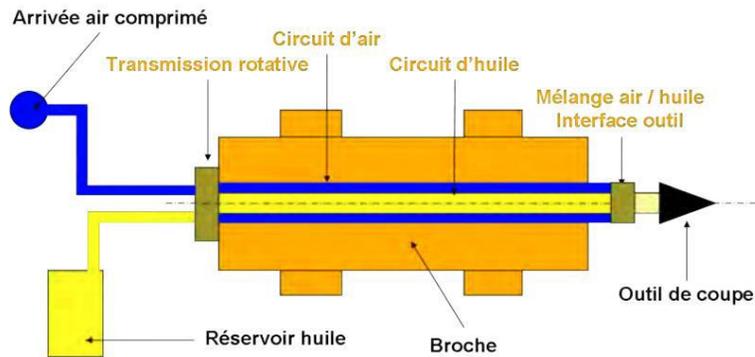


Figure I.15 Système MQL bi canal.

I.10 Etat de l'art

I.10.1 Performances des matériaux de coupe et usinabilité des fontes

L'étude menée par **Chihaoui et al** [31] se focalise sur l'évaluation des performances d'un outil CBN7050 revêtu (TiN/PVD) lors du processus de tournage de la fonte grise EN-GJL-250. Cette recherche a scruté attentivement les performances de l'outil de coupe, en se concentrant sur les paramètres technologiques tels que la durée de vie de l'outil, les efforts de coupe et l'état de surface de la pièce usinée. Les auteurs ont adopté une approche méthodique en réalisant une étude statistique basée sur la méthode de RSM, afin de déterminer des modèles prédictifs. Ces modèles ont été ensuite utilisés pour mener une optimisation multi-objective des paramètres de coupe, en appliquant l'approche de la fonction de désirabilité (DFA) pour atteindre quatre objectifs prédéfinis. Les résultats obtenus ont révélé des durées de vie de l'outil atteignant respectivement 4.15 ; 18 et 7 minutes lorsque (V_c) variait de 450, 600 et 750 m/min (**Fig I.16**).

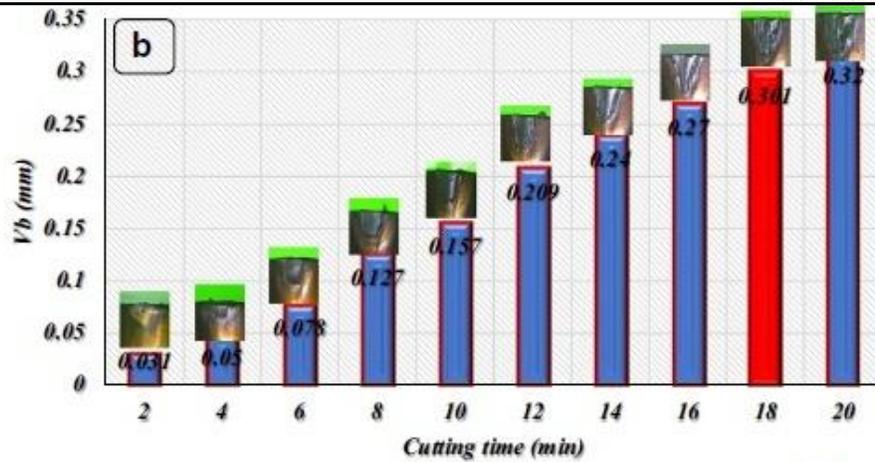


Figure I.16 Représentation d'usure (V_b) en fonction de temps d'usinage[31]

Laouissi et al [32] ont réalisé une étude comparative concernant la rugosité (R_a), l'effort (F_z), la puissance (P_c) et le (MRR) lors du tournage de la fonte EN-GJL-250 en utilisant à la fois des céramiques en nitrure de silicium (Si_3N_4) revêtues et non revêtues. La procédure expérimentale est réalisée selon le processus de conception Taguchi L_{27} . L'outil en céramique revêtue a été trouvé le plus performant pour conduire à une meilleure qualité de surface et un effort de coupe minimale par rapport à celles obtenues par la céramique non revêtue. Les tests d'usure réalisés montrent que, lorsque l'usure en dépouille atteint la valeur admissible de $[V_b] = 0,3$ mm, les ratios (durée de vie de l'outil CC1690/durée de vie de l'outil CC6090), ($R_{aCC1690}/R_{aCC6090}$) et ($F_{zCC1690}/F_{zCC6090}$) sont trouvés pour être égaux à 0,88 ; 1,4 et 0,94, respectivement.

Le travail de recherche de **Mahnraj et al** [33] présente une contribution significative en proposant des paramètres de processus optimaux qui non seulement améliorent la rugosité de surface, mais également minimisent l'usure de l'outil dans le cadre du processus de tournage de la fonte grise (ASTM-40), en utilisant une plaquette en carbure de tungstène. Cette étude offre ainsi une perspective essentielle pour les chercheurs, en leur permettant de mieux appréhender la nature complexe du phénomène d'usure de l'outil, et ce, dans un contexte spécifique d'usinage de matériaux ferreux. En outre, elle ouvre la voie à une meilleure sélection des paramètres d'usinage, favorisant ainsi la réalisation d'opérations de tournage plus stables et efficaces. Cette étude permettra aux chercheurs de comprendre la nature exacte du phénomène d'usure des outils et de sélectionner les gammes optimales de paramètres d'usinage pour effectuer des opérations de tournage stables

Dans leur étude comparative approfondie, **Moreno et al** [34] se sont penchés sur les performances des outils neufs et reconditionnés lors de l'usinage de la fonte nodulaire GGG-60 dans un environnement lubrifié.

Leur analyse a porté sur deux paramètres de coupe : la durée de vie de l'outil et les mécanismes d'usure, avec une attention particulière portée sur l'abrasion et l'adhésion. Le principal mécanisme d'usure observé est l'abrasion et l'adhésion. Les résultats montrent que la meilleure interaction statistique est obtenue avec les outils neufs.

L'étude menée par **Herwan et al** [35] s'inscrit dans une démarche ambitieuse visant à rehausser la durabilité du processus de tournage de la fonte grise, en adoptant une approche de tournage à haute vitesse et en utilisant un outil en nitrure de bore cubique (CBN). Leur investigation méticuleuse s'est concentrée sur l'exploration des effets des paramètres de coupe sur trois critères d'évaluation à savoir la consommation d'énergie (EC), le coût de l'outil (TC) et la rugosité de surface (SR), en se basant sur la méthode Taguchi.

De manière significative, cette recherche a également réalisé une optimisation multi-objective des conditions de coupe, avec pour objectif de sélectionner un régime de coupe optimal qui non seulement améliore la qualité de surface, mais aussi minimise les coûts d'usinage. Cette approche a permis de trouver un équilibre entre différents aspects de la performance du processus d'usinage, conduisant à des gains significatifs en termes d'efficacité, de qualité et de rentabilité.

Dans une étude novatrice, **Yin et al.** [36] ont exploré l'utilisation d'un outil en nitrure de bore cubique (CBN) lors du processus de tournage à sec de la fonte HT200. Leur recherche s'est penchée sur l'impact des différentes conditions de coupe sur les performances d'usinage, en se concentrant spécifiquement sur l'analyse des divers mécanismes d'usure. Les résultats de leur étude ont révélé une compréhension approfondie des mécanismes d'usure, mettant en lumière la prédominance des micro-encoches et des micro-écaillages comme composantes majeures de l'usure observée. Particulièrement significatif, l'usure adhésive s'est avérée être le principal mécanisme rencontré au cours de l'expérience. Cette constatation souligne l'importance capitale de comprendre les interactions entre les conditions de coupe et les propriétés des matériaux, dans le but d'optimiser les processus d'usinage et de prolonger la durée de vie des outils. Les résultats de cette étude fournissent ainsi des perspectives précieuses pour l'amélioration continue des techniques d'usinage, ouvrant la voie à des avancées significatives dans le domaine de la fabrication de pièces mécaniques.

I.10.2 Optimisation des paramètres de coupe

Biswal et al [37] ont conduit une étude méticuleuse axée sur l'optimisation des paramètres, notamment le taux de rugosité (R_a), le temps d'usinage et le taux d'enlèvement de matière (MRR), en utilisant la technique MARCOS lors de l'usinage EDM de deux alliages en composites d'aluminium : Al6061-WC-B4 et Al7175-WC-B4. L'objectif principal était de déterminer les valeurs des paramètres de coupe qui concilient à la fois la réduction de la rugosité de surface et l'augmentation de la productivité.

Dans une démarche similaire, **Trung** [38] a comparé cinq méthodes d'optimisation multicritère (EDAS, MARCOS, PIV, MOORA et TOPSIS) lors du fraisage de l'acier SB410. Les résultats obtenus par les méthodes PIV, MOORA et TOPSIS se sont avérés convergents. Dans une étude ultérieure, **Trung et al** [39] ont réalisé une étude comparative approfondie de quatre méthodes de MCDM (MAIRCA, EAMR, MARCOS et TOPSIS) pour déterminer quelle configuration garantissait à la fois une rugosité de surface minimale et un MRR maximal lors du tournage de l'acier SKS3. Les quatre méthodes ont convergé vers la sélection de l'essai 13 comme le meilleur régime de coupe.

Pour garantir à la fois une rugosité de surface minimale et une productivité maximale lors du processus EDM d'une pièce en acier 90CrSi, **Nguyen et al** [40] ont appliqué les méthodes MCDM (MARCOS, TOPSIS et MAIRCA). Les résultats obtenus par ces trois méthodes ont préconisé la même combinaison de paramètres pour résoudre efficacement le problème multicritère. De même, dans le contexte de l'usinage EDM de pièces en acier SKD11,

Par ailleurs, **Muhammad Younas et al** [41] ont approfondi l'étude des paramètres d'usinage optimaux requis pour le tournage de l'alliage Ti6Al4V. Ils ont optimisé les paramètres de réponse, y compris l'énergie de coupe spécifique, le taux d'usure, la rugosité de surface et le MRR, en utilisant la méthode de pondération GRA basée sur l'analyse S/N de Taguchi. Les conditions d'usinage optimisées ont entraîné une augmentation du MRR et de la durée de vie de l'outil de 34 % et 7 % respectivement, tout en réduisant l'énergie de coupe spécifique et la rugosité de surface de 6 % et 2 % respectivement.

Dans le même ordre d'idées, **Sandeep et al** [42] ont utilisé une approche d'optimisation multi-objectif combinant la méthode GRA avec l'approche de Taguchi pour améliorer les paramètres de performance, notamment la qualité de surface et la productivité, lors de l'usinage par électroérosion de l'alliage de titane (Ti-6Al-4V). De plus, **Raj et al** [43] ont exploité l'approche d'optimisation GRA pour produire un régime optimal des facteurs d'entrée lors de l'usinage de l'Inconel 690. La validation des résultats obtenus par la méthode GRA a été effectuée à travers un test de confirmation, révélant des erreurs minimales concernant les paramètres MRR et R_a , respectivement de 1.27 % et 1.41 %.

Dans le domaine du tournage, **Padhy et al**[44] ont également utilisé la méthode GRA pour déterminer un régime de coupe optimal lors du tournage de l'Inconel 625, visant à maximiser le MRR tout en minimisant les facteurs (*Ra* et *Fz*). De manière similaire, **Rathod et al** [45] ont adopté une approche combinant GRA avec l'analyse des composantes principales (PCA) basée sur le rapport S/N de Taguchi lors du tournage de l'acier AISI 304, dans le but de maximiser la qualité de surface et la durée de vie de l'outil tout en minimisant le temps d'usinage.

En outre, **Jurko et al** [46] ont fait usage de la méthode GRA pour trouver une combinaison optimale garantissant une réduction minimale de l'usure (*Vb*) et de l'écart du diamètre (Δd) lors du tournage à sec de l'acier C45. De même, **Sirsti et al** [47] ont appliqué l'approche GRA pour optimiser les performances du tournage d'un acier à carbone moyen, en se concentrant sur des paramètres tels que la température de coupe, l'effort de coupe principal, l'effort d'avance, la rugosité de surface et le coefficient de réduction du copeau.

Pour perfectionner les paramètres du processus de tournage de l'acier AISI 1040, avec pour objectif de réduire simultanément le taux d'usure de l'outil et la rugosité de surface, **Karnan et al** [48] ont opté pour une approche combinant GRA avec l'approche de Taguchi. Le régime optimal ainsi obtenu a été rigoureusement validé à travers la réalisation d'un test de confirmation, assurant ainsi sa fiabilité et son efficacité.

Parallèlement, **Abhilash et al** [49] ont exploré les approches GRA et TOPSIS pour élaborer un régime de coupe optimal lors de l'usinage de l'Inconel 718. Cependant, les résultats obtenus par ces deux méthodes d'optimisation ont conduit à des configurations de coupe différentes, soulignant ainsi l'importance de la diversité des approches pour obtenir des solutions optimales dans des contextes variés.

Répondant à un besoin croissant d'optimisation multicritère, **Kamalizadeh et al** [50] ont récemment entrepris une étude approfondie lors de l'usinage de Ti-MMCs. Ils ont choisi d'adopter la méthode de TOPSIS couplée avec l'approche de Taguchi pour définir un régime de coupe optimal visant à minimiser à la fois la rugosité de surface et l'usure de l'outil, répondant ainsi à plusieurs objectifs de performance simultanément.

Outre les approches mentionnées précédemment, d'autres méthodes MCDM ont été déployées pour la sélection des meilleures alternatives parmi divers essais de procédés d'usinage.

Par exemple, la méthode VIKOR a été appliquée par **Hoang et al** [51] afin d'améliorer la qualité et l'efficacité du processus de tournage de l'acier EN 10503, en mettant l'accent sur l'amélioration de la qualité de surface, de la productivité et la réduction de l'effort de coupe ainsi que des vibrations.

Dans un contexte similaire, **Dubey et al** [52] ont examiné trois méthodes d'optimisation MCDM, à savoir VIKOR, MOORA et TOPSIS, lors de l'usinage MQL de l'acier AISI 304. À poids égal, ces trois techniques ont produit des résultats similaires, mettant en lumière leur robustesse et leur capacité à fournir des solutions cohérentes.

Dans une démarche similaire, **Sapkota et al** [53] ont utilisé les techniques VIKOR, MABAC et CoCoSo pour réaliser une optimisation multicritère lors de l'usinage d'un composite (WC-Co). La méthode MEREC a été sollicitée pour calculer les poids de chaque critère, renforçant ainsi la précision et la pertinence des résultats obtenus.

Enfin, l'étude menée par **Singh et al** [54] s'est concentrée sur l'optimisation de deux paramètres contradictoires, à savoir le taux d'enlèvement de matière (MRR) et la rugosité de surface (Ra), lors de l'usinage de l'alliage Ti-6Al-4V.

L'utilisation de la méthode de l'entropie pour calculer les poids des facteurs a permis l'application de l'approche VIKOR pour sélectionner le régime de coupe optimal, illustrant ainsi l'importance de prendre en compte les poids relatifs des critères dans le processus d'optimisation.

I.11 Conclusion

Ce chapitre établit les fondements scientifiques nécessaires à la compréhension de notre étude. Nous avons abordé les notions fondamentales de l'usinabilité des matériaux, les matériaux de coupe, les revêtements d'outils, les fontes ainsi que l'utilisation de la lubrification MQL dans l'usinage. De plus, nous avons examiné les paramètres technologiques de l'usinage, tels que la rugosité de surface, les efforts de coupe et l'usure des outils. Une section importante est consacrée à l'état de l'art concernant l'usinabilité des fontes, les performances des matériaux de coupe ainsi que méthodes d'optimisation des conditions de coupe.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter les outils et les équipements utilisés dans notre approche expérimentale méthodique et scientifique.

Chapitre
II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les équipements et les méthodes utilisés pour conduire les expérimentations de tournage. Le matériel inclut un tour parallèle spécialement dédié aux tests de chariotage, une plateforme Kistler pour mesurer les forces de coupe, ainsi que deux rugosimètres en 2D et 3D pour évaluer la rugosité des pièces usinées. Ces dispositifs sont indispensables pour analyser l'interaction entre l'outil et la matière, ainsi que pour surveiller les paramètres technologiques au cours du processus de tournage de la fonte EN-GJL350. Parmi ces paramètres, nous examinons les forces de coupe (F_x , F_y et F_z), la puissance de coupe (P_c), la consommation d'énergie (E_{cs}), les critères de rugosité de surface (R_a , R_z et R_t), le débit de copeaux enlevés (MRR) et l'usure de l'outil (V_b). Ces expériences ont été réalisées au laboratoire de mécanique et de structure (LMS) du département de Génie Mécanique de l'Université 8 Mai 1945 à Guelma.

II.2 Matériels utilisés

II.2.1 Machine-outil

Le dispositif utilisé pour mener les essais est un tour parallèle provenant de la société tchèque "TOS TRENCIN", du modèle SN 40 C, avec une puissance sur la broche équivalente à 6,6 kW (**Fig II.1**). Ce tour offre différentes fréquences de rotation, à savoir (45, 63, 90, 125, 180, 250, 355, 500, 710, 1000, 1400, 2000) tr/min. Les avances disponibles sont les suivantes : (0,08, 0,10, 0,11, 0,12, 0,14, 0,16, 0,18, 0,20, 0,22, 0,24...0,8) mm/tr. Le tour SN 40 C est équipé d'un variateur de vitesse, permettant de régler la fréquence de rotation en fonction de la vitesse de coupe souhaitée (**Fig II.2**).



Figure II.1 Tour parallèle modèle SN 40 C



Figure II.2 Variateur et capteur de vitesse.

II.2.2 Éprouvette Utilisée

Le matériau sélectionné pour cette étude est la fonte grise EN GJL-350, présentant une dureté de 332 HB. Ce matériau offre une combinaison remarquable de résistance à la corrosion, de formabilité, d'usinabilité et de résistance à l'usure. De plus, il présente une excellente résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte. L'éprouvette utilisée consiste en une barre ronde de **100 mm** de diamètre et **400 mm** de longueur (Fig II.3). Les essais sont effectués sur des paliers de 20 mm de largeur séparés par des gorges de 5 mm de largeur. La composition chimique et les propriétés mécaniques de la fonte EN GJL-350 sont détaillées respectivement dans les tableaux II.1 et II.2.

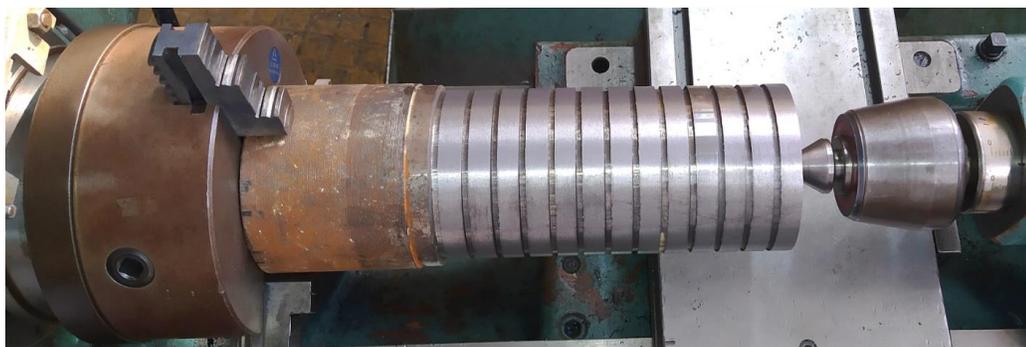


Figure II.3 Éprouvette utilisée

Le choix de ce matériau repose sur ses nombreux avantages, notamment une excellente fluidité, une bonne usinabilité, une capacité élevée d'amortissement des vibrations, et une résistance notable à l'usure. Ces caractéristiques en font un matériau adapté à une variété d'applications industrielles, en particulier dans le domaine de l'industrie automobile.

Tableau II.1 : Composition chimique de la fonte EN GJL-350

Élément	C	Si	Mn	S	Ni	P	Fe
Pourcentage(%)	3.45	2.9	0.8	0.07	0.12	0.2	Reste

Tableau II.2 : Caractéristiques mécaniques de la fonte EN GJL-350.[55]

Propriétés	Valeur
Limite d'élasticité en compression	962 - 1237 MPa
Limite d'élasticité en compression. 0,1	455 MPa
Module d'élasticité	123 - 143 GPa
Allongement	0.3 - 0.8 %
Résistance à la flexion	539 - 963 MPa
Résistance à la rupture par déformation plane	17 MPa·√m
Coefficient de Poisson	0.26 [-]
Module de cisaillement	41 GPa
Résistance au cisaillement	400 MPa
Résistance à la traction	280 - 450 MPa

II.2.3 Sélection des Matériaux de coupe et Porte-outils

Pour évaluer les performances des matériaux de coupe adaptés à l'usinage de la fonte EN GJL-350, quatre matériaux de coupe différents de haute technologie ont été sélectionnés. Le premier est le nitrure de bore cubique (CBN7050), accompagné de trois types de céramiques : la céramique mixte revêtue (CC6050), la céramique blanche sans revêtement (CC620) et le nitrure de silicium Si_3N_4 revêtu (1690). Toutes les plaquettes sont de forme carrée avec 8 arêtes de coupe (**Fig II.4**). Les plaquettes de (CC6050 et CBN7050) sont montées sur un porte-outil avec une fixation par trous central (**Fig II.5a**), tandis que les plaquettes (CC1690 et CC620) sont montées sur un autre porte-outil avec une fixation par bride (**Fig II.5b**). Les caractéristiques des plaquettes utilisées sont répertoriées dans le tableau II.3. Les deux porte outils ont la désignation : ISO PSBNR25×25M12 et présentent une géométrie représentée par $\gamma = -6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$, $\alpha = +6^\circ$, et $\chi_r = 75^\circ$.

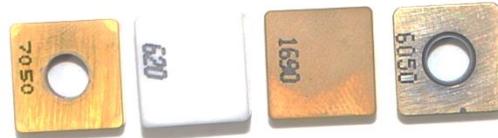


Figure II.4 Plaquettes de coupe utilisées



(a) (b)

Figure II.5. Types de fixation de plaquettes sur le porte-outil.

Tableau II.3 : Informations sur les plaquettes de coupes utilisées

<i>Matériaux de coupe</i>	<i>Désignations</i>	<i>Compositions et revêtement</i>
Céramique mixte (CC6050)	SNGA 12 04 08S01525	AL ₂ O ₃ +TiC avec revêtement PVD TiN
Nitride de silicium (CC1690)	SNGN 120408 T02520	Si ₃ N ₄ avec revêtement PVD TiN
Céramique blanche (CC620)	SNGN 120412 T02520	AL ₂ O ₃ + ZrO ₂
Nitride de bore cubique (CBN7050)	SNGA120408 T01020	CBN avec revêtement PVD TiN

II.3 Instruments de mesure utilisés pour les paramètres de sortie

Les instruments de mesure employés pour évaluer les divers paramètres de sortie tels que les efforts de coupe, les critères de rugosité et l'usure comprennent :

- Dynamomètre KISTLER 9257B pour la quantification des efforts de coupe.
- Rugosimètre 3D permettant d'observer la topographie de la surface.
- Microscope, spécifiquement le Visuel Gage 250, utilisé pour évaluer l'usure.
- Système de lubrification à quantité minimale (MQL).

II.3.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Un dynamomètre (KISTLER9257 B) (Fig II.6) a été utilisé pour mesurer l'amplitude des forces de coupe, étant l'un des dispositifs les plus fiables pour mesurer les trois composantes de ces forces. Il est composé de plusieurs éléments, notamment une plateforme, un amplificateur de signaux, un PC avec le logiciel DYNOWARE, et une imprimante pour enregistrer les courbes.



Figure II.6 Dynamomètre (KISTLER9257 B).

Le principe de mesure repose sur le phénomène piézo-électrique, où pendant l'opération d'usinage, la pièce est habituellement en rotation tandis que l'outil se déplace en translation. L'outil est fixé sur une plateforme montée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide d'une plaque de fixation. Cette plateforme revêt une importance cruciale dans le processus de mesure, étant équipée de quatre capteurs en quartz.

Les forces exercées sur la plateforme pendant la coupe sont converties en charges électriques, puis amplifiées par un amplificateur de signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite capturés par un PC via une carte d'acquisition spécialement intégrée à l'unité centrale. Le logiciel DYNOWARE analyse et traite ces signaux, permettant ainsi d'obtenir directement les composantes de la force générée pendant le processus de tournage (Fig. II.7).

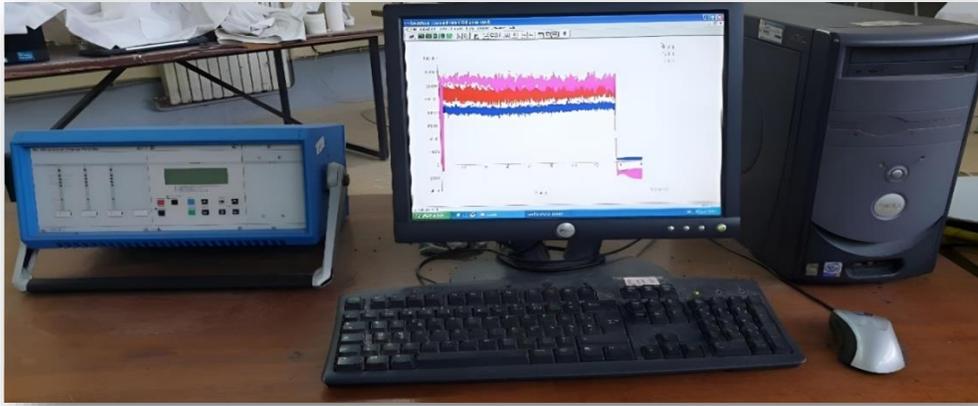


Figure II.7 PC piloté par le logiciel (DYNOWARE).



La figure II.8 illustre un exemple d'acquisition du logiciel, présentant les profils des trois composantes de l'effort de coupe, à savoir (F_x , F_y et F_z).

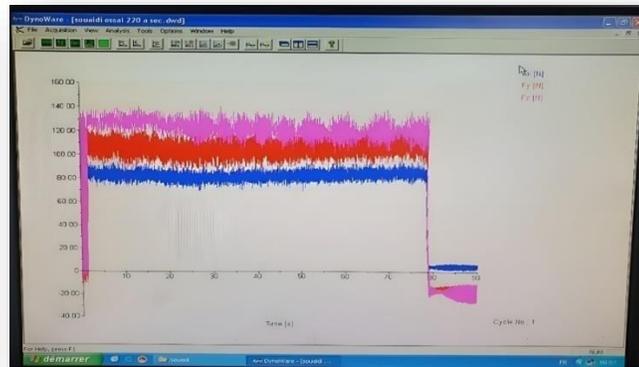


Figure II.8 Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.

II.3.2 Rugosimètres 2D et 3D

a) Rugosimètre 2D

Pour évaluer les divers critères de rugosité, notamment R_a , R_z et R_t , nous avons employé un Rugosimètre 2D, le SurfTest 210 de Mitutoyo (Fig II.9). Cet appareil est équipé d'une pointe en diamant de $5 \mu\text{m}$, se déplaçant de manière linéaire (axiale) sur la surface usinée. La longueur de palpée (Cut-off) est maintenue à 4 mm , avec une base de $0,8 \text{ mm}$ ($0,8 \times 5$). La plage de mesure des critères de rugosité s'étend de $0,05$ à $40 \mu\text{m}$ pour R_a , et de $0,3$ à $160 \mu\text{m}$ pour R_t et R_z .

Les paramètres de rugosité de surface sont obtenus immédiatement après chaque passage de l'outil (essai). Afin de réduire les erreurs de reprise et d'assurer une précision maximale, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la pièce en position de travail, évitant ainsi le démontage du tour.



Figure II.9 Rugosimètre 2D utilisé

Les mesures ont été répétées trois fois le long de trois lignes distinctes du cylindre axial, espacées de 120°. La méthode conforme à la norme ISO 4287 a été suivie pour la mesure de la rugosité de surface.

b) **Rugosimètre 3D**

Dans l'objectif d'acquérir une compréhension détaillée de la topographie en 3D de la surface de la pièce usinée, nous avons utilisé un appareil de métrologie optique à système multi-capteurs spécialement conçu pour l'analyse fine des surfaces des composants (AltiSurf® 500). Cet équipement permet des mesures optiques sur une variété de surfaces, qu'elles soient rugueuses, transparentes, noires, polies, et autres, offrant ainsi une polyvalence dans l'analyse de la topographie des surfaces. La station de métrologie satisfait les exigences en matière de mesure en laboratoire, que ce soit en raison de la diversité des matériaux à analyser (métaux, verre, textile, etc.) ou des types de contrôles réalisés (rugosité, forme, dimensionnel) [56]. Le principe de fonctionnement de cet appareil repose sur la capture de séries de profils qui, une fois assemblés automatiquement, permettent de reconstituer la morphologie des pièces et des matériaux. Cela facilite l'application de paramètres d'analyse liés à la rugosité, à la tribologie, aux formes et aux phénomènes topographiques, ainsi qu'aux dimensions.

La configuration standard de l'appareil AltiSurf® 500 comprend les éléments suivants :

- Une base en granite solide pour assurer une stabilité optimale ;
- Un ensemble inférieur ou base de déplacement, équipé de plusieurs tables de déplacement motorisées de haute précision pour permettre le mouvement de l'échantillon selon les axes X et Y, ainsi que potentiellement selon un ou plusieurs axes rotatifs. Une plateforme rectangulaire est prévue pour faciliter la mise en place de l'échantillon à mesurer ;

- Divers accessoires, comprenant quatre poignées de transport amovibles fixées sur le marbre pour faciliter le déplacement de la platine, ainsi qu'un jeu de quatre amortisseurs antivibratoires.

La chaîne de mesure de la rugosité en 3D, illustrée dans la figure II.10, est composée des éléments suivants :

- a) Boîtier de contrôle Phénix ;
- b) Télécommande externe ;
- c) Logiciel d'acquisition Phénix ;
- d) Logiciel d'analyse Altimap.

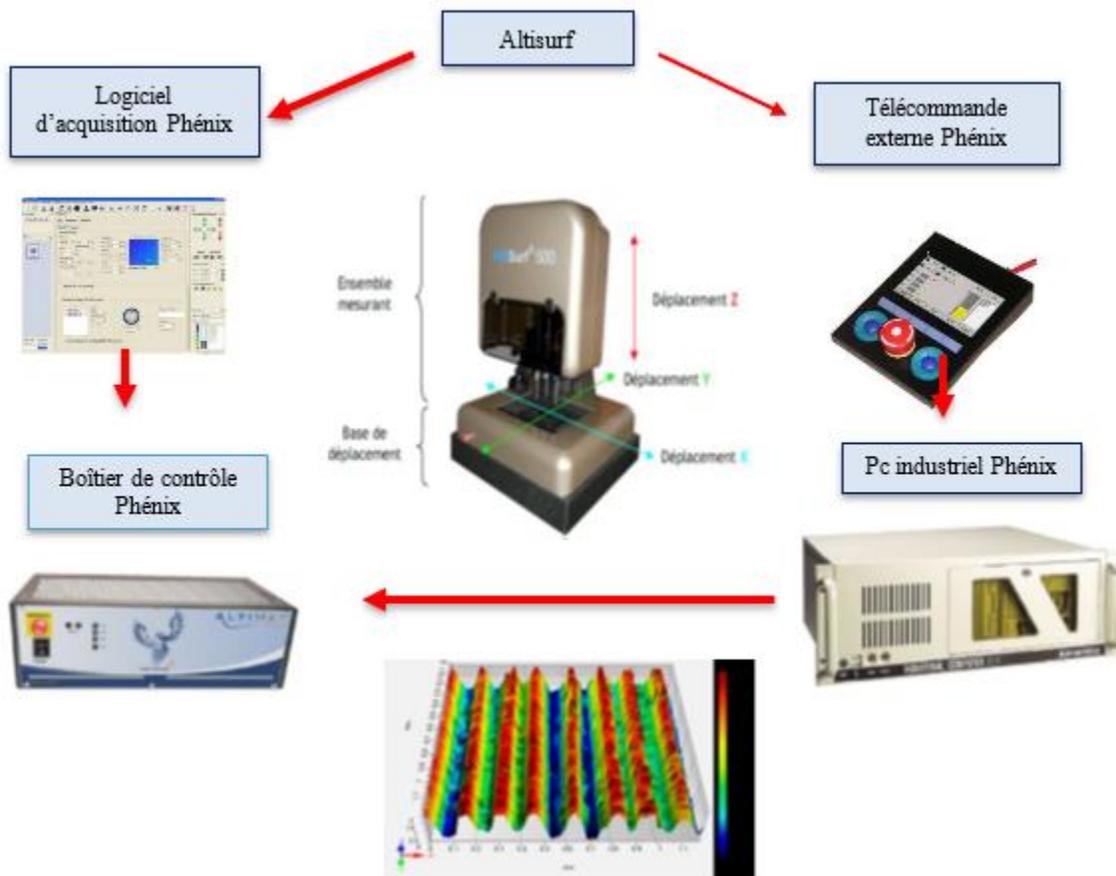


Figure II.10 Chaîne de mesure de la rugosité 3D

II.3.3 Mesure de l'usure

Pour évaluer l'usure en dépouille (V_b) des outils CC6050, CC1690, CC620 et CBN7050, le microscope de la marque Visual Gage 250 a été utilisé, accompagné d'un micro-ordinateur équipé du logiciel Visual Gage 2.2.0 (Fig II.11). La détermination des valeurs de (V_b) s'effectue de la manière suivante :

La plaquette de coupe soumise au test est placée sous l'objectif du microscope, reposant sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est alignée avec la principale arête tranchante de la plaquette, ce qui correspond à un point de référence défini dans l'interface logicielle du microscope. Ensuite, la plaquette est déplacée à l'aide des mouvements de la table (dans les directions X ou Y) jusqu'à ce qu'elle atteigne la limite supérieure de l'usure. À la fin de chaque série de travaux, la plaquette est retirée du porte-outil, nettoyée, puis positionnée sur la table du microscope pour une mesure précise des différentes dimensions de l'usure.

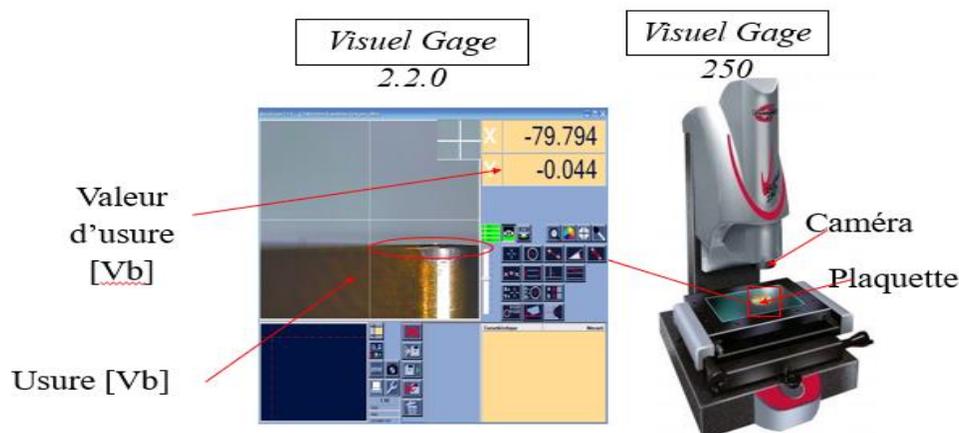


Figure II.11 Microscope pour la mesure de l'usure (Visual Gage 250)

II.3.4 Système à Quantité Minimale de Lubrification (MQL)

La figure II.12 présente la boîte de contrôle du système MQL, incluant les éléments suivants : un afficheur de débit pour l'air et l'huile, la pression du réseau d'air pulvérisé, la pression du réservoir, le réglage du débit d'air de pulvérisation et le réglage de la pression du produit. Quant à la figure II.13, elle offre un aperçu du réservoir d'huile et de ses composants, comprenant un réservoir de 24 litres et un débitmètre.

La figure II.14 présente une vue d'ensemble des équipements utilisés lors de la lubrification avec le système MQL [40], comprenant le contrôleur MQL, le réservoir, le compresseur et d'autres composants (YYY).

Le compresseur, tel qu'illustré dans la figure II.14, est un dispositif mécanique conçu pour augmenter la pression d'un gaz, et par conséquent, son énergie. Il trouve son utilité dans divers contextes industriels, notamment pour la production d'air comprimé et dans les systèmes frigorifiques. Notons que même un simple ventilateur peut être considéré comme un compresseur mécanique.

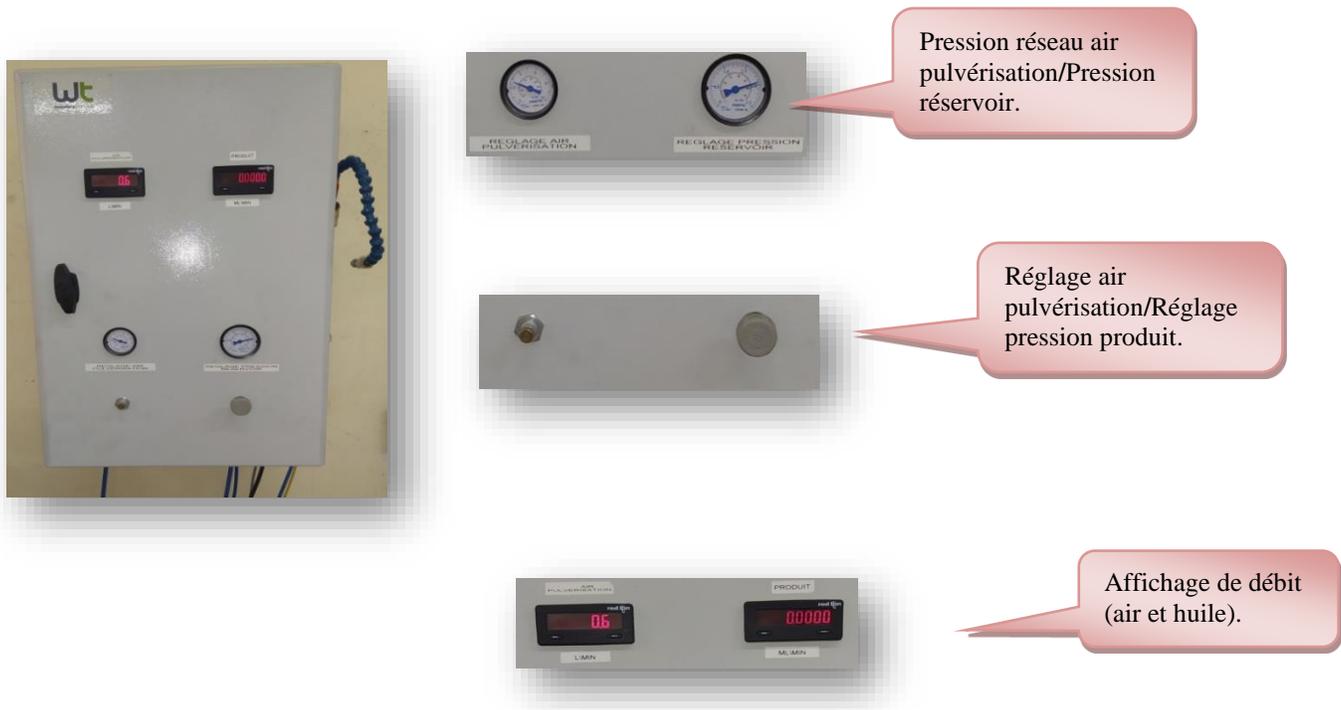


Figure II.12 Boîte de contrôle.

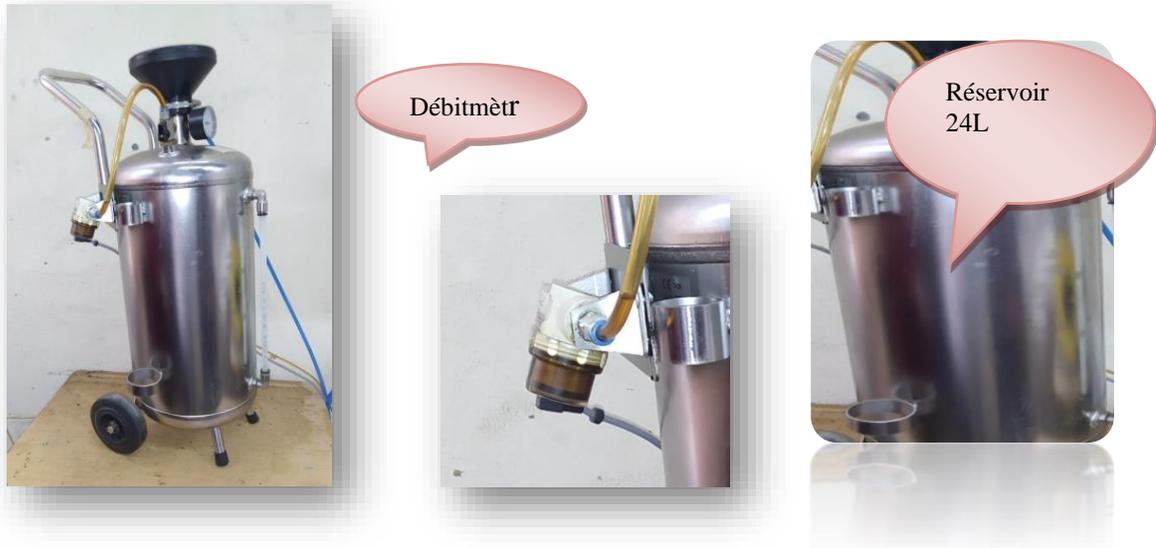


Figure II.13 Réservoir d'huile.

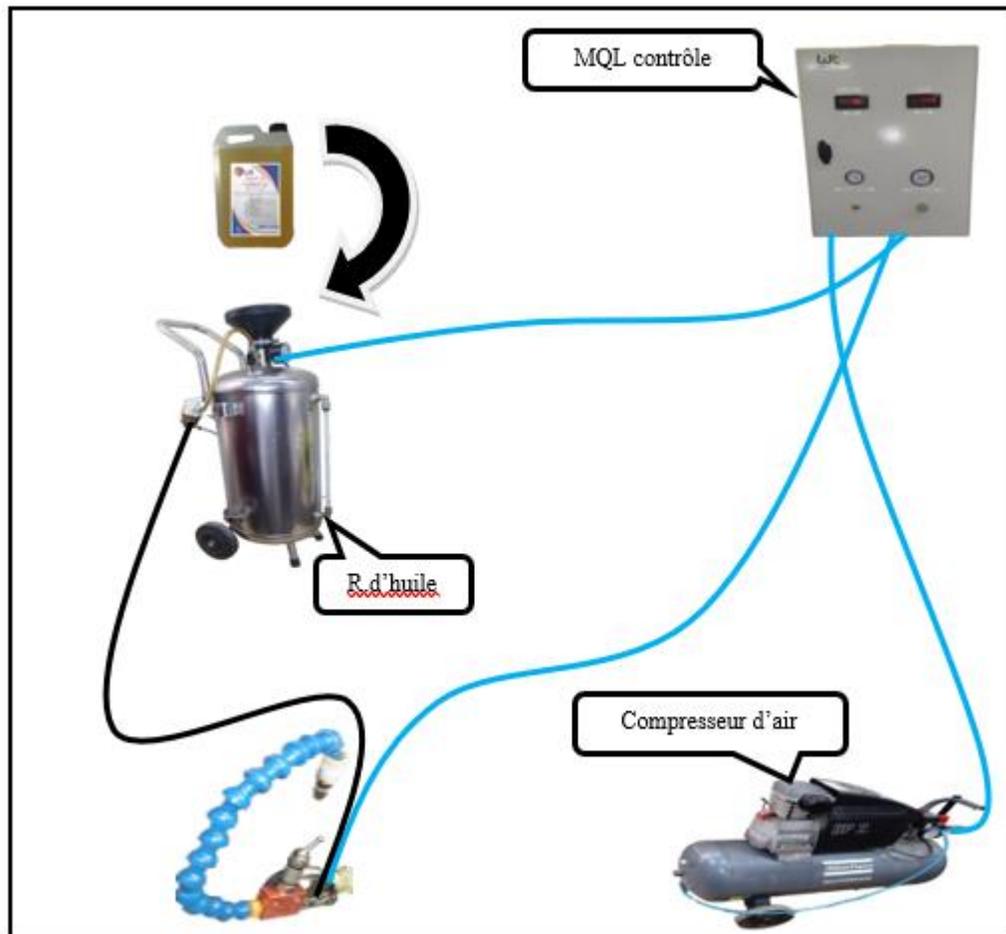


Figure II.14 Équipements pour le système MQL.

II.4 Plan d'expérience et conditions de coupe

Dans le cadre de cette étude, trois séries d'essais distinctes ont été conduites. La première série a été dédiée aux essais paramétriques visant à évaluer les performances des quatre matériaux de coupe utilisés en termes d'usure, de rugosité de surface et d'efforts de coupe. Ces essais ont été effectués avec une longueur d'usinage constante ($L = 350$ mm), une avance par tour fixe ($f = 0,08$ mm/tr), une profondeur de passe constante ($ap = 0,25$ mm) et deux vitesses de coupe différentes (450 et 650 m/min).

La deuxième série a impliqué une conception expérimentale multifactorielle de Taguchi L_{32} . Elle avait pour objectif de réaliser une analyse ANOVA et une modélisation afin de développer des modèles de prédiction des paramètres de performance. Les conditions de coupe (Vc , f et ap) ainsi que le matériau de l'outil de coupe ont été considérés comme des paramètres d'entrée, tandis que (Ra , Fz , Pc , $Ecset$ MRR) ont été identifiés comme des paramètres de sortie. Les niveaux de variation des facteurs d'entrée sont résumés dans le tableau II.4. Le matériau de coupe, (Vc) et (f) ont été déclinés en quatre niveaux, tandis que le facteur (ap) a été défini à deux niveaux. Les conditions de coupe ont été choisies en suivant les recommandations du fabricant (Sandvik).

Tableau II.4. Conditions de coupe et niveaux de variation des entrées.

Conditions de coupe	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Matériau de coupe	M1 (CC6050)	M2 (CC1690)	M3 (CC620)	M4 (CBN7050)
Vitesse de coupe (m/min)	450	520	590	660
Avance (mm/tr)	0.08	0.11	0.14	0.18
Profondeur de passe (mm)	0.2	0.4		

La troisième série a été réservée au plan d'expérience Taguchi L_9 , ce plan a été utilisé pour évaluer et comparer l'influence de lubrification MQL sur les performances technologiques telle que, la rugosité de surface et l'effort de coupe tangentiel lors de l'usinage de la fonte grise EN GJL 350. Notre étude a pris en compte l'influence de trois facteurs fondamentaux (ap , Vc , f) sur les paramètres de sortie (MRR), (Ra) et (Fz). Chaque facteur présentant trois niveaux de variation (niveau supérieur [+1], niveau moyen [0] et niveau inférieur [-1]). Les essais de tournage ont été réalisés deux fois le premier pour le tournage à sec et le deuxième pour le tournage dans un environnement de lubrification MQL. Les essais ont été numérotés de 1 à 9. La matrice de planification présente les différentes combinaisons des facteurs de base constituant les divers régimes de coupe. (Tableau II.5 et II.6).

Tableau II.5 : Matrice de planification pour un plan de Taguchi L9 (3^3).

N° d'essai	<i>Vc (m/min)</i>	<i>f (mm/tr)</i>	<i>ap (mm)</i>
	<i>Valeurs codifiées des facteurs</i>		
	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1
2	0	0	0
3	+1	+1	+1
4	0	-1	0
5	0	0	+1
6	0	+1	-1
7	+1	-1	+1
8	+1	0	-1
9	+1	+1	0

Tableau II.6 Matrice de planification avec valeurs réels (non codifié).

<i>N° d'essai</i>	<i>Valeurs des facteurs</i>		
	<i>Vc</i>	<i>f</i>	<i>ap</i>
1	400	0.08	0.15
2	400	0.14	0.3
3	400	0.2	0.45
4	500	0.08	0.3
5	500	0.14	0.45
6	500	0.2	0.15
7	600	0.08	0.45
8	600	0.14	0.15
9	600	0.2	0.3

II.5 Démarche scientifique

Les paramètres clés du processus d'usinage, tels que (*Vc*), (*f*), (*ap*), ainsi que les matériaux de l'outil de coupe (*M*), sont considérés comme des variables d'entrée.

En revanche, la rugosité de surface, l'effort de coupe, la puissance de coupe, l'énergie de coupe spécifique et le débit de copeaux enlevés sont considérés comme des variables de sortie.

Les expériences ont été menées selon la méthode des plans d'expériences. Ces plans sont utilisés pour évaluer de manière quantitative l'impact des paramètres de coupe sur les performances d'usinage.

Toutes les étapes de planification des expériences ainsi que l'analyse statistique des résultats ont été réalisées à l'aide des logiciels Design-Expert et MINITAB, spécifiquement dédiés à ces tâches.

La méthodologie suivie pour chaque type d'étude comprend les étapes suivantes :

- Clarification des objectifs des essais.
- Sélection des variables d'entrée (facteurs) et de sortie (réponses).
- Choix du plan d'expérience adapté.
- Réalisation des essais requis.
- Identification des facteurs ayant un impact significatif.
- Développement de modèles mathématiques pour estimer les réponses.
- Recherche des régimes de coupe optimaux.
- Validation des résultats obtenus.

II.6 Conclusion

Ce chapitre a exposé les équipements employés lors de nos essais expérimentaux, en fournissant des détails sur les caractéristiques des matériaux de coupe, les instruments de mesure, les conditions de coupe, ainsi que la planification des expériences selon une approche paramétrique et multifactorielle. Le prochain chapitre (chapitre III) se concentrera sur une étude portant sur l'usinabilité de la fonte grise EN-GJL-350 à travers des essais paramétriques utilisant quatre matériaux de coupe distincts (CC6050, CC1690, CC620 et CBN7050). L'objectif de ces expériences est d'évaluer différents paramètres de performance, tels que l'usure de l'outil, les efforts de coupe, ainsi que la rugosité de surface

CHAPITRE III

Usinabilité de la fonte grise EN GJL-350

III.1 Introduction

Dans cette section, nous exposons les résultats d'une recherche visant à évaluer les performances de quatre matériaux de coupe distincts lors de l'opération de chariotage sur la fonte grise EN-GJL-350, à travers une série d'essais paramétriques. Ces matériaux incluent le nitrure de bore cubique (CBN7050), ainsi que trois types de céramiques : la céramique mixte revêtue (CC6050), la céramique blanche sans revêtement (CC620) et le nitrure de silicium Si_3N_4 revêtu (1690). Les critères d'évaluation comprennent l'usure, la rugosité de surface et les efforts de coupe. Nous exposons également les résultats des essais portant sur la topographie de surface 3D générée par les différentes plaquettes de coupe testées.

III.2 Résultats et discussion

III.2.1 Performances des matériaux de coupe

Afin de comparer les performances des quatre matériaux de coupe utilisés en termes d'usure, effort de coupe et la rugosité de surface, une série d'essai paramétrique (uni factorielle) a été réalisée pour deux vitesses de coupe différentes ($V_{c1}=450$ et $V_{c2}=650$) m/min, tout en gardant $f=0.08$ mm/tr et $ap=0.25$ mm. Le tableau III.1 récapitule l'ensemble des résultats des performances d'usinage pour les 4 matériaux étudiés. Notons que le temps d'usinage à $V_c=450$ m/min est de $T_c=2.6$ min, par contre à $V_c=650$ m/min, $T_c=1.8$ min.

Tableau III.1 Résultats des essais paramétriques

<i>N° essai</i>	<i>Matériau</i>	<i>ap (mm)</i>	<i>f (mm/tr)</i>	<i>Vc (m/min)</i>	<i>Fx (N)</i>	<i>Fy (N)</i>	<i>Fz (N)</i>	<i>Ra (μm)</i>	<i>Rz (μm)</i>	<i>Rt (μm)</i>	<i>Vb (mm)</i>
1	CC6050	0.25	0.08	450	56.26	130.7	125.28	1.03	6.407	8.432	0.126
2	CC1690	0.25	0.08	450	49.4	121.9	114.59	0.961	6.378	8.165	0.147
3	CC620	0.25	0.08	450	42.18	116.2	98	0.655	4.629	6.934	0.133
4	CBN 7050	0.25	0.08	450	39.33	99.12	86.08	0.531	2.918	4.928	0.117
5	CC6050	0.25	0.08	650	72.04	193.23	141.2	1.3	8.25	9.017	0.154
6	CC1690	0.25	0.08	650	70.06	185.4	120.03	1.213	7.3	9.03	0.16
7	CC620	0.25	0.08	650	64.47	172.5	114.08	0.831	6.109	7.41	0.173
8	CBN 7050	0.25	0.08	650	62.27	162.9	111.8	0.69	3.987	5.590	0.144

III.2.1.1 Évolution de l'usure (V_b)

La **Figure III.1** montre l'évolution de l'usure en dépouille (V_b) des plaquettes de coupe (CC6050, CC1690, CC620 et CBN7050) en fonction de $V_{c1}=450$ m/min et $V_{c2}= 650$ m/min avec $f=0.08$ mm/tr et $ap=0.25$ mm. Les essais montrent clairement que l'usure (V_b) est sensible aux variations de (V_c) car l'augmentation de cette dernière induit une augmentation de l'usure (V_b) et cela est valable pour les 4 matériaux de coupe utilisés. Par exemple pour le CBN7050, à $V_c= 450$ m/min, l'usure (V_b) est de 0.117 mm pour un temps de coupe $T_c=2.6$ min. Par contre, à la vitesse de coupe $V_c=650$ m/min, l'usure en dépouille (V_b) est de 0.144 mm pour $T_c=1.8$ min. Cette augmentation de (V_b) est attribuée aux contraintes thermomécaniques sévères de l'interface outil/pièce et outil/copeau ainsi que les frottements [57].

Dans les mêmes conditions de coupe (V_c , f et ap) et pour un même temps d'usinage T_c , on constate une variation de la valeur (V_b) d'une plaquette à une autre. La valeur la plus faible de l'usure pour les deux vitesses de coupe est enregistrée avec la plaquette **CBN7050**. Pour une vitesse de coupe minimale (450 m/min), elle est suivie par la céramique mixte **CC6050** puis le nitrure de silicium **CC1690** et en dernier lieu par la céramique blanche non revêtue **CC620**. Cependant, à la vitesse de coupe maximale ($V_c = 650$ m/min), les plus faibles valeurs de l'usure en dépouille (V_b) enregistrées après le **CBN7050** sont les valeurs de la plaquette **CC6050** suivie par la céramique **CC620** et en dernier lieu la plaquette de **CC1690**. À la vitesse de 650 m/min. les ratios sont comme suit : $V_{bCC6050}/V_{bCBN}=1.06$; $V_{bCC1690}/V_{bCBN}=1.19$ et $V_{bCC620}/V_{bCBN}= 1.13$. Cette différence entre les différentes plaquettes de coupe est attribuée aux caractéristiques physico-mécaniques de chaque matériau de coupe et la couche de revêtement (TiN/PVD) qui agit comme une barrière permettant d'améliorer l'inertie chimique et thermique ainsi que la résistance à l'usure sur les surfaces en dépouille et d'attaque de l'outil. Des explications similaires sont rapportées dans la littérature par [58, 59].

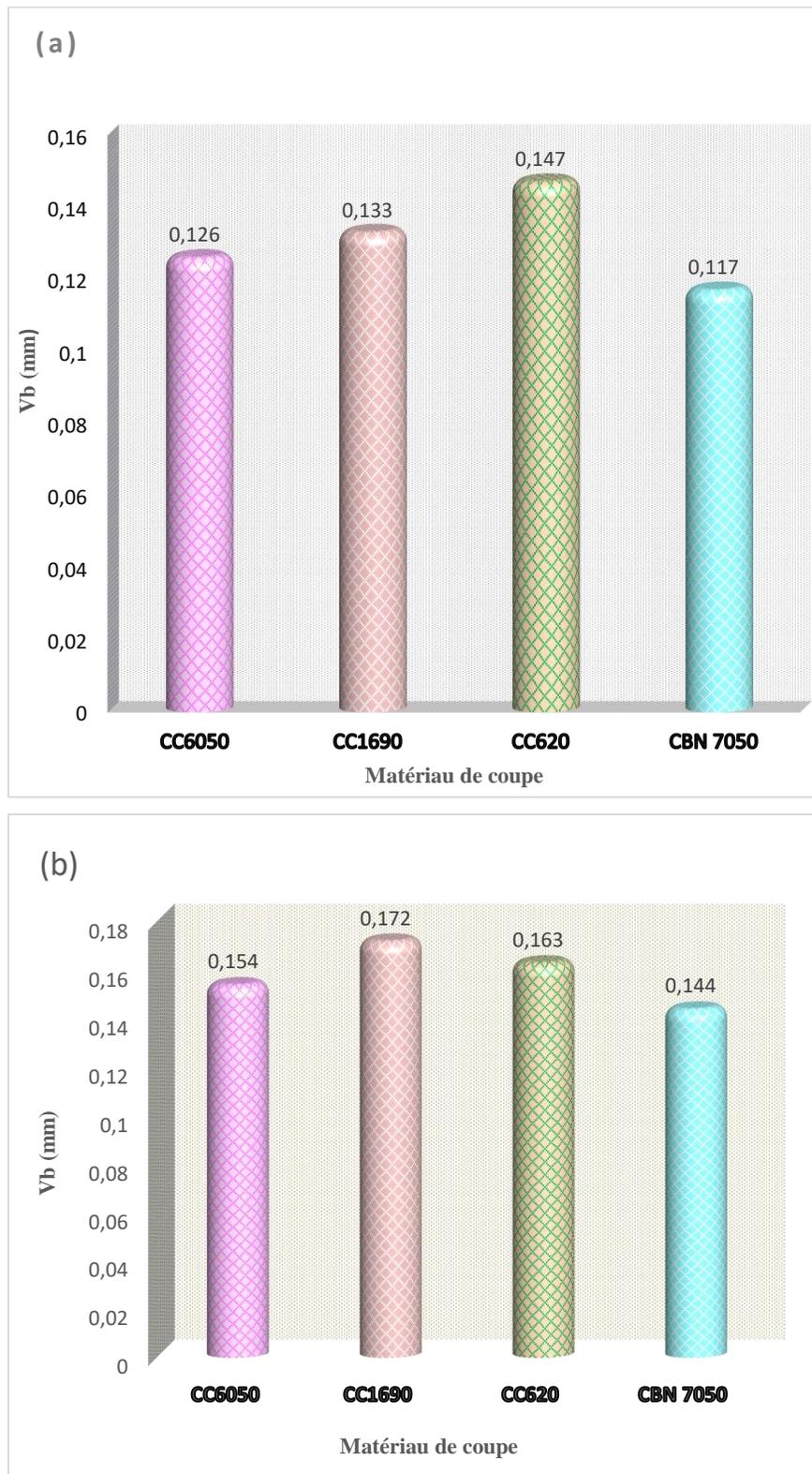
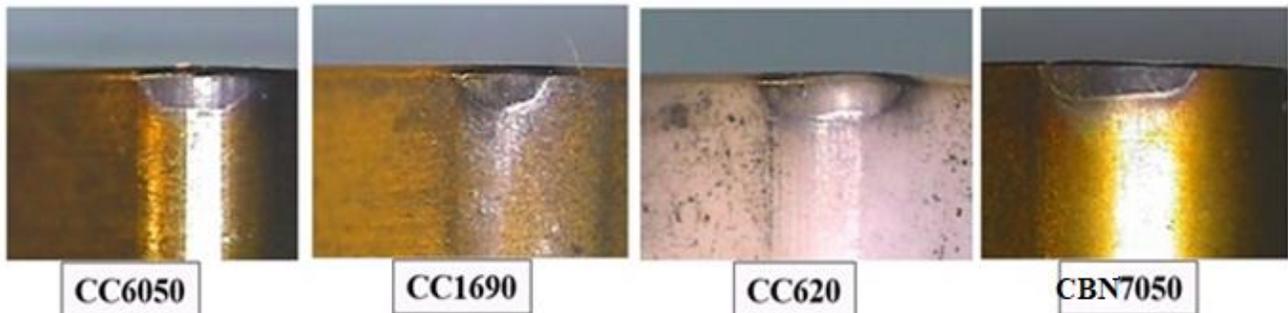


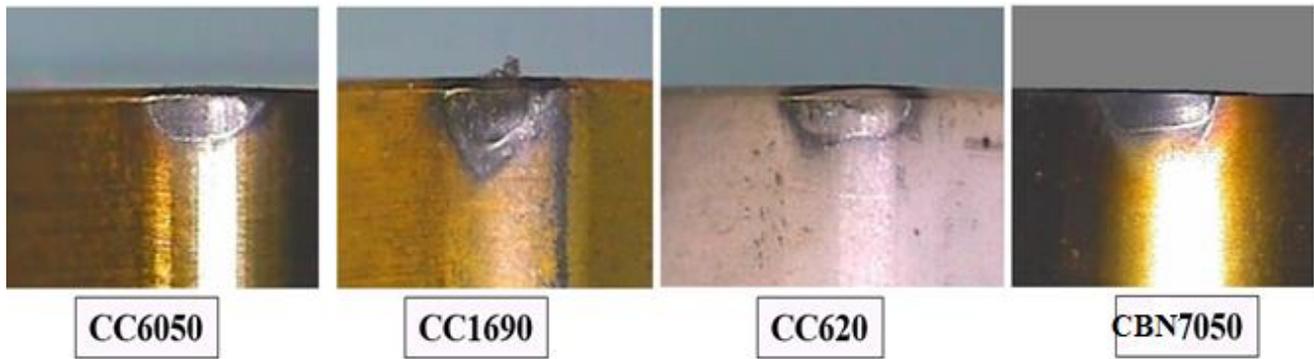
Figure III.1 Valeurs de l'usure (Vb)
a) $V_c= 450$ m/min et $T_c=2.6$ min; b) $V_c= 650$ m/min et $T_c=1.8$ min.

La figure III.2 exprime la morphologie de l'usure (V_b) des quatre plaquettes de coupe testées pour deux vitesses de coupe de (450 et 650) m/min, tout en gardant $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.25$ mm constants. L'analyse des résultats montre clairement que l'usure (V_b) est sensible à la variation de (V_c) et de la nature de matériau de coupe. Au début, l'usure en dépouille (V_b) se développe suivant une bande régulière qui s'élargit lorsque (V_c) augmente de 450 à 650 m/min, cela est valable pour les quatre matériaux de coupe. L'augmentation de (V_c) provoque une augmentation des contraintes thermomécaniques, ce qui accélère divers mécanismes d'usure des plaquettes utilisées [60].

D'après les résultats (Fig III.2a), on constate que pour $V_c = 450$ m/min, le CBN et la CC6050 accusent les plus faibles usures (V_b). Par contre pour la vitesse élevée $V_c = 650$ m/min (Fig III.2b), le CBN, la CC650 et la CC620 prennent des valeurs de (V_b) minimales. Aussi, à $V_c = 650$ m/min on remarque une formation des micro-copeaux collés sur la surface d'attaque de l'outil CC1690. Une autre observation de la morphologie de l'usure des quatre plaquettes testées, montre clairement que malgré les vitesses de coupe élevées utilisées, l'usure en dépouille est toujours régulière et se présente sous forme de bande, il n'y a pas d'effondrement du bec de l'outil comme celui des carbures métalliques à des vitesses élevées. Cette observation permet de dire que les matériaux de coupe choisies sont très résistants à l'usure ce qui a pour effet de garantir la qualité des surfaces générées et aussi la précision d'usinage.



(a)



(b)

Figure III. 2 Morphologie de l'usure des différentes plaquettes
 a) $V_c=450\text{m/min}$ et $T_c= 2.6\text{min}$ b) $V_c=650\text{m/min}$ et $T_c=1.8\text{ min}$.

III.2.1.2 Évolution de la rugosité de surface

La figure III.3a-b illustre l'évolution des (R_a , R_z et R_t) en fonction de (V_c) pour les quatre matériaux de coupe avec ($f_{et\ ap}$) maintenues constantes. L'analyse des résultats montre que (V_c) joue un rôle déterminant sur l'évolution des critères (R_a , R_z et R_t). Avec l'augmentation de (V_c), l'usure (V_b) augmente est par conséquent la qualité de la surface usinée diminue [61,62]. Les valeurs trouvées des différents critères de rugosité variées selon la nature de matériau de coupe de l'outil. À cet effet, les rugosités de surface générées par le **CBN7050** et la céramique **CC620** sont les meilleures par rapport aux deux autres matériaux de coupe testés (**CC1690** et **CC6050**). La raison de cette différence est attribuée aux caractéristiques mécaniques et la composition chimique de chaque matériau de coupe [63,64]. Bien que les matériaux utilisés aient différentes compositions chimiques et différentes caractéristiques mécaniques.

-À la vitesse de coupe (V_c)= 450 m/min, les ratios pour les différents matériaux de coupe sont comme suit :

- Pour le critère R_a ; $R_{aCC6050}/R_{aCBN}=1.93$; $R_{aCC1690}/R_{aCBN}=1.80$ et $R_{aCC620}/R_{aCBN}= 1.23$.
- Pour le critère R_z ; $R_{zCC6050}/R_{zCBN}=2.19$; $R_{zCC1690}/R_{zCBN}=2.18$ et $R_{zCC620}/R_{zCBN}= 1.58$.
- Pour le critère R_t ; $R_{tCC6050}/R_{tCBN}=1.71$; $R_{tCC1690}/R_{tCBN}=1.65$ et $R_{tCC620}/R_{tCBN}= 1.4$.

-De la même manière, à (V_c)=650 m/min, les ratios pour les différents matériaux de coupe sont comme suit :

- Pour le critère R_a ; $R_{aCC6050}/R_{aCBN}= 1.88$; $R_{aCC1690}/R_{aCBN}=1.75$ et $R_{aCC620}/R_{aCBN}= 1.20$.
- Pour le critère R_z ; $R_{zCC6050}/R_{zCBN}=2.07$; $R_{zCC1690}/R_{zCBN}=1.83$ et $R_{zCC620}/R_{zCBN}= 1.53$.

➤ Pour le critère Rt ; $Rt_{CC6050}/Rt_{CBN}=1.61$; $Rt_{CC1690}/Rt_{CBN}=1.60$ et $Rt_{CC620}/Rt_{CBN}= 1.32$.

Si on compare à titre d'exemple les rugosités obtenues par le **CBN7050** pour les deux vitesses de coupe, les ratios de : $Ra_{Vc=450}/Ra_{Vc=650}=0.76$; $Rz_{Vc=450}/Rz_{Vc=650}=0.73$ et $Rt_{Vc=450}/Rt_{Vc=650}=0.88$.

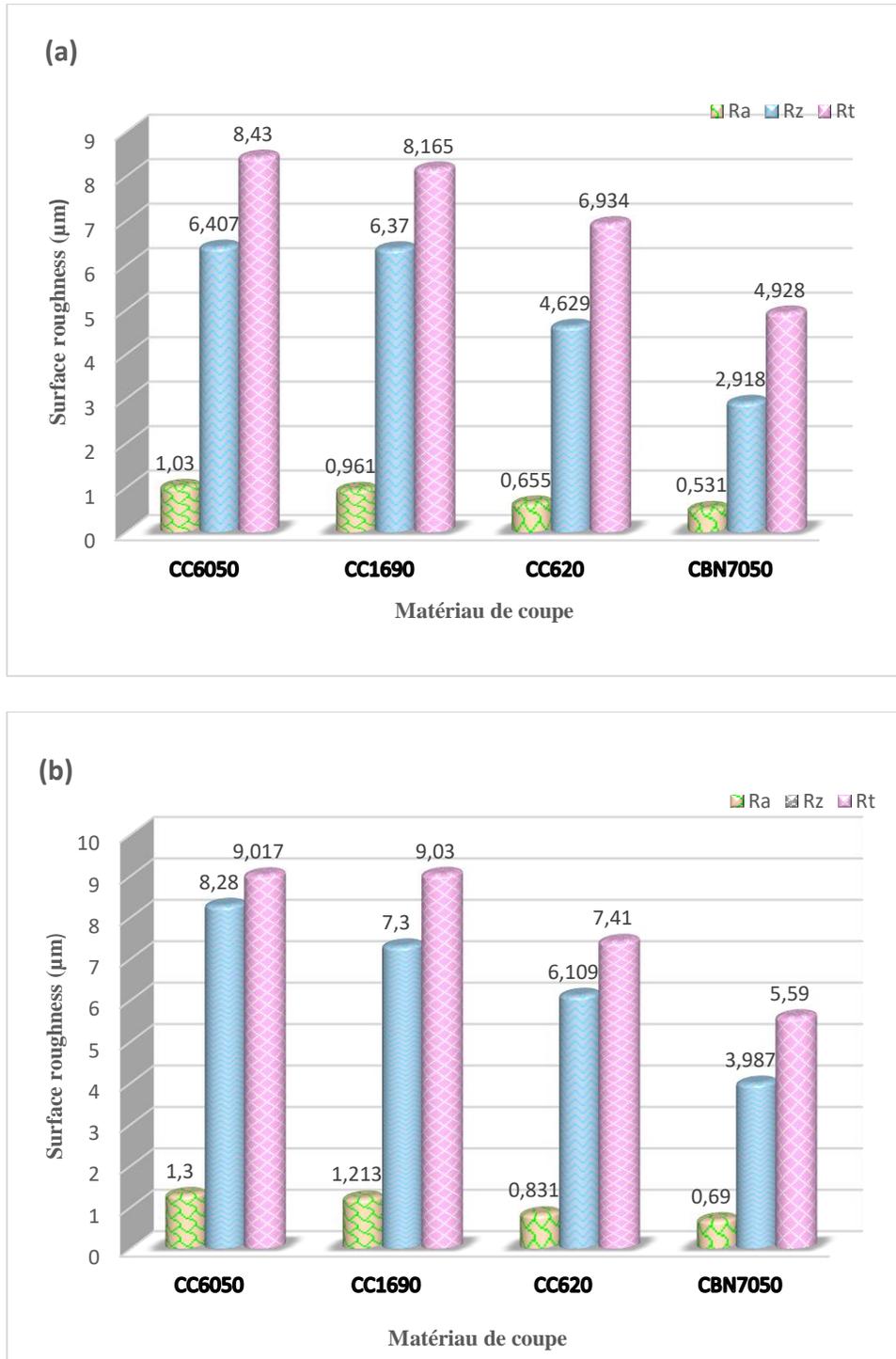


Figure III.3 Critères de la rugosité a) Vc=450m/min; Tc=2.6 min; b) Vc=650m/min ; Tc=1.8min.

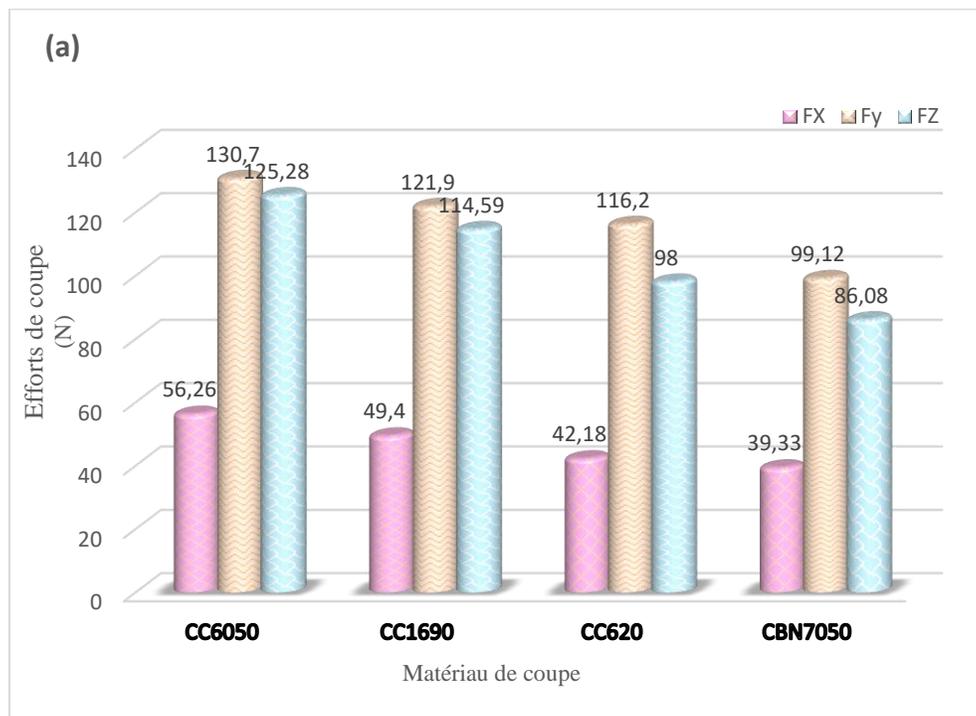
III.2.1.3 Évolution des efforts de coupe

La figure III.4a-b présente l'évolution des (F_x , F_y et F_z) en fonction de V_c pour les quatre matériaux de coupe testés. On remarque que l'effort (F_y) est prépondérant, suivi par l'effort (F_z) et en dernier lieu l'effort (F_x) pour les deux vitesses testées. L'analyse des résultats de la Figure III.4 montre que lorsque (V_c) varie de (450 à 650) m/min, on enregistre une augmentation de (F_x , F_y et F_z) pour les quatre matériaux de coupe. Cette augmentation est causée par les frottements et l'usure élevés des quatre matériaux de coupe lorsque (V_c) atteint 650m/min. Ce phénomène est évoqué dans la littérature par plusieurs auteurs indiquant que l'augmentation de l'usure induit une augmentation des efforts de coupe [65,66]. On remarque aussi, que le **CBN7050** est le matériau le plus performant comparativement aux trois autres matériaux. À cause de sa résistance à l'usure l'outil CBN a généré des efforts de coupe faibles pour les deux vitesses (450 et 650) m/min.

À titre d'exemple, les ratios pour (F_z) sont :

Pour $V_c=450$ m/min : $F_{zCC6050}/F_{zCBN}=1.45$; $F_{zCC1690}/F_{zCBN}=1.33$ et $F_{zCC620}/F_{zCBN} = 1.13$.

Pour $V_c=650$ m/min : $F_{zCC6050}/F_{zCBN}=1.26$; $F_{zCC1690}/F_{zCBN}=1.07$ et $F_{zCC620}/F_{zCBN}= 1.02$.



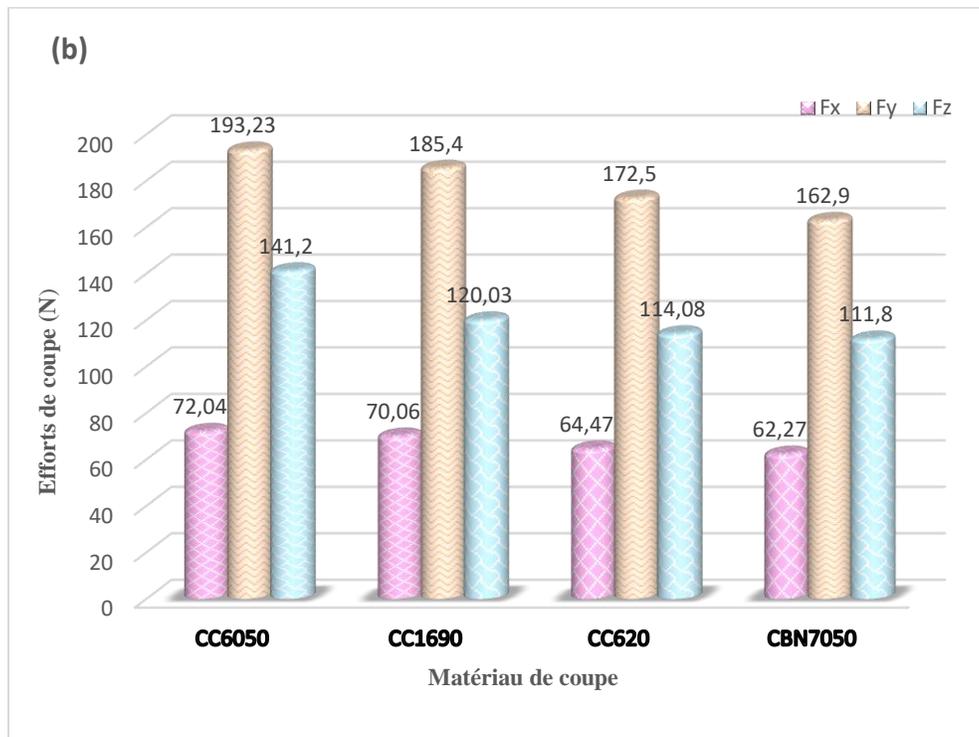


Figure III.4 Évolution des efforts de coupe
 a) $V_c=450$ m/min, $T_c=2.6$ min; b) $V_c=650$ m/min, $T_c=1.8$ min.

III.3 Topographie de surface 3D

La figure III.5 illustre les résultats de différentes topographies de surface (3D) obtenues par les quatre matériaux de coupe avec les mêmes échelles et avec les mêmes conditions de coupe $f=0.08$ mm/tr, $V_c=650$ m/min, et $ap=0.25$ mm. Une première observation importante à signaler est que les sillons des différentes topographies 3D générées par les quatre matériaux de coupe ne sont pas uniformes comparativement à ceux trouvés lors de l'usinage des éprouvettes en acier [67]. Les sillons sont endommagés et présentent des discontinuités (interruption). Cela peut être expliqué par la présence d'un pourcentage élevé du carbone (+2%) sous forme de graphite lamellaire qui fragilise la structure de la fonte et par conséquent, nous obtenons des sillons endommagés. Des résultats comparables ont été évoqués par Laouici et al [68] lors de l'usinage de la fonte EN GJL-250.

Aussi, la topographie de surface 3D obtenue par la céramique mixte **CC6050** (Fig III.5a) montre la présence des sommets de profils plus élevés comparativement aux surfaces générées par et le nitrure de silicium **CC1690** (Fig III.5b) et la céramique **CC620** (Fig III.5c). D'autre part, la topographie de surface produite par le **CBN** (Fig III.5d) présente les plus courts sommets et les plus faibles valeurs de rugosité. Ceci peut être expliqué par les performances de l'outil CBN en termes de composition chimique, caractéristiques physico-mécaniques, et la présence d'une couche de revêtement.

Les différentes valeurs des critères de rugosité de surface obtenus pour les quatre matériaux de coupe sont mentionnées dans la **Figure III.5**.

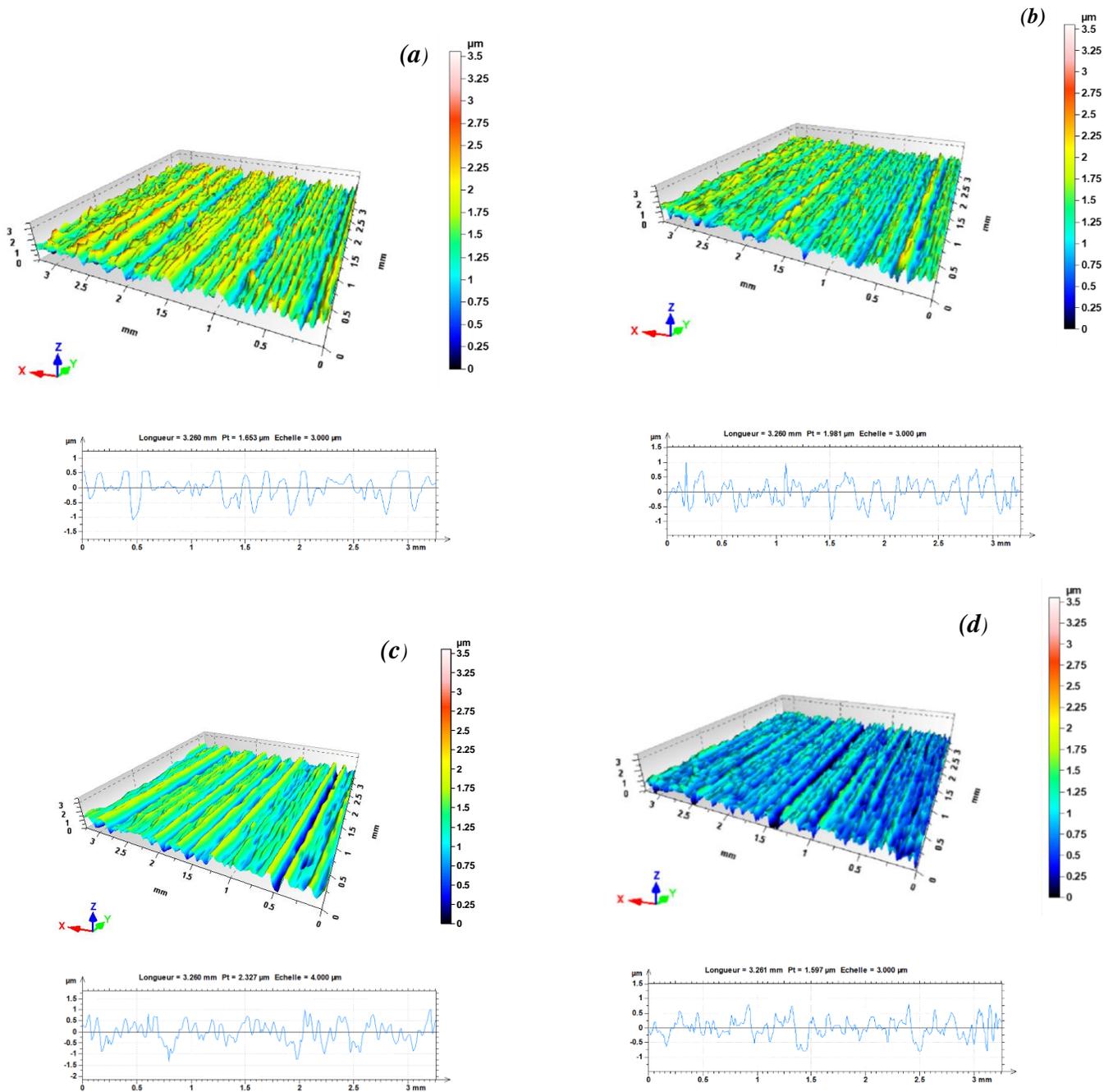


Figure III.5 Topographie de surface 3D pour a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 and d) CBN7050.

III.4 Conclusion

Ce chapitre a été conçu dans le but d'analyser l'usinabilité de la fonte grise EN-GJL-350 en utilisant quatre matériaux de coupe distincts (**CC605**, **CC1690**, **CC620** et **CBN7050**). Des expériences ont été menées pour évaluer les performances de ces matériaux en termes d'usure, de rugosité de surface en 2D et 3D, ainsi que d'effort de coupe. Les analyses des résultats montrent que le **CBN7050** est le matériau le plus performant comparativement aux trois autres matériaux, offrant des valeurs minimales d'usure (V_b), de rugosités (R_a , R_z et R_t) et efforts de coupe (F_x , F_y et F_z). Le prochain chapitre, le chapitre IV, se concentrera sur une étude de modélisation basée sur les approches RSM et ANN, dans le but d'offrir des modèles mathématiques prédictifs.

CHAPITRE
IV

***Modélisation des paramètres de coupe par RSM et
ANN***

IV.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la construction de modèles mathématiques pour le tournage lors de l'usinage de EN-GJL-350, en utilisant trois outils en céramique et un en CBN. Les modèles développés visent à établir les liens entre les paramètres du régime de coupe (ap , f et Vc), la nature du matériau de coupe, et les paramètres technologiques étudiés tels que l'effort de coupe, la rugosité de surface, la puissance et l'énergie de coupe. L'approche RSM combinée à l'analyse ANOVA a été utilisée pour quantifier l'impact de chaque paramètre d'usinage sur les paramètres étudiés et pour construire des modèles prédictifs. Parallèlement, une seconde méthode de modélisation, à savoir la méthode ANN, a été employée pour générer des modèles mathématiques alternatifs. En conclusion, ce chapitre se clôture par une comparaison entre les modèles issus des approches RSM et ANN.

IV.2 Analyse statistique et modélisation

Pour évaluer l'impact (Vc), (f) et (ap), sur divers paramètres technologiques d'usinage tels que l'effort de coupe, la rugosité de surface et la puissance de coupe, nous avons choisi d'adopter pour le plan de Taguchi (L_{32}) comportant 32 essais. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus à partir du plan de Taguchi (L_{32}) nous permettra de quantifier la corrélation entre les divers paramètres de performance étudiés et les paramètres du régime de coupe (Vc , f , ap et le matériau de l'outil). De plus, ce traitement nous permettra de dériver des modèles mathématiques statistiques pour mieux comprendre ces relations.

IV.2.1 Analyse ANOVA

L'analyse ANOVA est utilisée pour interpréter et classer les résultats expérimentaux en fonction des paramètres d'entrée (ap , f et Vc), en identifiant leur influence significative sur les paramètres de sortie. Cette analyse a été appliquée avec un niveau de signification (α) de 0.05, représentant un niveau de confiance de 95%. La pertinence statistique pour la réponse considérée est établie lorsque la valeur de la probabilité P du tableau ANOVA est inférieure à (α) [69, 70].

Le tableau **IV.1** montre les résultats expérimentaux des paramètres technologiques (Ra , Fz , Pc , MRR et Ecs) en fonction des conditions de coupe représentés par les matériaux de coupe M1, M2, M3 et M4, (Vc), (f) et (ap) selon le plan expérimental Taguchi L_{32} .

Notons ici, que la puissance de coupe est calculée grâce à l'équation **IV.1**, qui lie l'effort (Fz) mesuré et la vitesse (Vc). L'énergie spécifique (Ecs) est calculée par l'équation **IV.2** et finalement, le débit de copeaux enlevés (MRR) est calculé par l'équation **IV.3**[71].

$$Pc = Fz * \frac{Vc}{60} \cdot [W] \quad (IV.1)$$

$$Ecs = \frac{Pc}{MRR} \cdot [J/mm^3] \quad (IV.2)$$

$$MRR = (1000 * Vc * f * ap) / 60. [mm^3/s] \quad (IV.3)$$

Tableau IV.1: Résultats expérimentaux des paramètres de performance selon Taguchi L₃₂.

N° essai	Entrée				Sortie				
	ap (mm)	Matériau	Vc	f	Ra	Fz	Pc	MRR	Ecs
1	0.2	M1 (CC6050)	450	0.08	0.600	54.990	412.425	120.000	3.436
2	0.2		520	0.11	0.814	66.410	575.553	190.666	3.018
3	0.2		590	0.14	0.997	75.790	745.268	275.333	2.706
4	0.2		660	0.18	1.432	82.170	903.870	396.000	2.282
5	0.2	M2 (CC1690)	450	0.08	0.456	47.840	358.800	120.000	2.990
6	0.2		520	0.11	0.562	52.420	454.306	190.666	2.382
7	0.2		590	0.14	0.814	57.360	564.040	275.333	2.048
8	0.2		660	0.18	1.305	67.700	744.700	396.000	1.880
9	0.2	M3 (CC620)	450	0.11	0.589	51.230	384.225	165.000	2.328
10	0.2		520	0.08	0.458	29.140	252.546	138.666	1.821
11	0.2		590	0.18	1.103	88.380	869.070	354.000	2.455
12	0.2		660	0.14	0.693	58.190	640.090	308.000	2.078
13	0.2	M4 (CBN7050)	450	0.11	0.544	29.800	223.500	165.000	1.354
14	0.2		520	0.08	0.465	7.080	61.360	138.666	0.442
15	0.2		590	0.18	1.062	41.822	411.249	354.000	1.161
16	0.2		660	0.14	0.669	17.800	195.800	308.000	0.635
17	0.4	M1 (CC6050)	450	0.18	1.655	138.210	1036.570	540.000	1.919
18	0.4		520	0.14	1.064	115.370	999.873	485.333	2.060
19	0.4		590	0.11	0.785	106.290	1045.180	432.666	2.415
20	0.4		660	0.08	0.442	94.090	1034.990	352.00	2.940
21	0.4	M2 (CC1690)	450	0.18	1.378	144.960	1087.200	540.000	2.013
22	0.4		520	0.14	0.731	119.760	1037.920	485.333	2.138
23	0.4		590	0.11	0.544	101.54	998.476	432.666	2.307
24	0.4		660	0.08	0.461	89.870	988.570	352.000	2.808
25	0.4	M3 (CC620)	450	0.14	0.752	105.390	790.425	420.000	1.881
26	0.4		520	0.18	1.121	130.630	1132.126	624.000	1.814
27	0.4		590	0.08	0.562	76.960	756.773	314.666	2.405
28	0.4		660	0.11	0.644	75.320	828.520	484.000	1.711
29	0.4	M4 (CBN7050)	450	0.14	0.666	79.960	599.700	420.000	1.427
30	0.4		520	0.18	1.340	91.630	794.126	624.000	1.272
31	0.4		590	0.08	0.434	49.000	481.833	314.666	1.531
32	0.4		660	0.11	0.482	66.160	727.760	484.000	1.503

Le tableau IV.2 présente l'ANOVA pour (*Ra*). On peut voir clairement que l'avance (*f*) a l'influence la plus importante avec une cont% de 79.37 %, suivie par la nature de matériau de coupe avec une cont% de 9.42%. L'influence de l'interaction (*f* * matériau) est également significative avec une cont% de 3.42%. Le facteur (*ap*) a montré la cont% la plus faible (0.21%).

Des résultats similaires sur la prépondérance de (f) sur (Ra) lors de l'usinage des fontes EN-GJL-250 et S-G-260 ont été rapportés par [31, 72] respectivement. Aussi, Rafighi et al. [73], Al Shimaa et al. [74] ont indiqués que la nature du matériau de l'outil a aussi une influence sur la qualité de surface de la pièce usinée.

Le tableau **IV.3** montre l'ANOVA pour (Fz). On peut observer que (ap) présente l'influence la plus importante avec une cont% de 49.52%. Avec l'augmentation de (ap), l'épaisseur de la couche enlevée devient importante et entraîne une croissance en volume du métal déformé, nécessitant ainsi un effort de coupe important. La majorité des chercheurs affirment que (ap) est le principal facteur affectant (Fz) [75-77]. Le matériau de coupe (M) arrive en deuxième position avec une cont% de 24.74%, suivi par le facteur (f) avec cont% évaluée à 20.85 %. Les termes (Vc , $ap * M$ et $f * M$) sont aussi significatifs avec des cont% inférieures à 1.76%. Le tableau **IV.4** illustre l'ANOVA pour (Pc) qui est liée directement à l'effort de coupe tangentielle Fz . Encore une fois, le facteur (ap) affiche la plus grande cont% de 47.88%. Avec l'augmentation de (ap), l'effort (Fz) augmente et par conséquent (Pc) s'accroît (éq 1). Des résultats semblables ont été évoqués par Dash, L et al [78]. Le matériau de coupe (M) vient une deuxième position avec une cont% de 27.50%, il est suivi par l'avance (f) avec une cont% de 15.45%. Le facteur (Vc) est significatif avec une cont% de 3.7%. Les termes restants présentent des contributions faibles inférieures à 2%. Le tableau **IV.5** affiche l'ANOVA pour l'énergie de coupe spécifique (Ecs). Les facteurs (M) et (Vc) sont significatifs avec des cont% successives de 65.97% et 0.27%. Les interactions ($ap * M$), ($M * f$) et ($ap * f$) sont aussi significatives avec des cont% de 8.75%, 5.98% et 4.14% respectivement. Les termes restants de l'ANOVA ne sont pas significatifs car la valeur de P est inférieure de 0.005.

La figure **IV.1** expose les graphiques des effets principaux pour les paramètres de sorties étudiés (Ra , Fz , Pc et Ecs). L'analyse de ces résultats montre que le graphe qui possède la plus grande pente, a la plus grande influence sur le paramètre de sortie étudié. Les figures **IV.1a** et **IV.1b** dévoilent que le facteur (f) a la plus grande influence sur (Ra), cependant (ap) domine l'influence de l'effort (Fz). De la même manière dans la figure **IV.1c**, le facteur (ap) impose son influence majeure sur (Pc). Finalement, l'influence de matériau de l'outil sur (Ecs) surpasse les autres facteurs (**fig IV.1d**).

Tableau IV.2 : ANOVA pour R_a .

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-value</i>	<i>p-value</i>	<i>Contribution%</i>
<i>Model</i>	3.27	18	0.1816	24.71	< 0.0001	97.16%
<i>ap</i>	0.0032	1	0.0032	0.4390	0.5192	0.21%
<i>Vc</i>	9.654E-06	1	9.654E-06	0.0013	0.9716	0.30%
<i>f</i>	1.11	1	1.11	150.94	< 0.0001	80.91%
<i>material</i>	0.3659	3	0.1220	16.59	< 0.0001	10.87%
<i>ap*Vc</i>	0.0248	1	0.0248	3.37	0.0892	0.05%
<i>ap*f</i>	0.0027	1	0.0027	0.3709	0.5530	0.20%
<i>ap*material</i>	0.0001	3	0.0000	0.0051	0.9995	0.00%
<i>Vc*f</i>	0.0002	1	0.0002	0.0257	0.8751	0.00%
<i>Vc*material</i>	0.0243	3	0.0081	1.10	0.3828	0.72%
<i>f*material</i>	0.1308	3	0.0436	5.93	0.0089	3.89%
<i>Residual</i>	0.0956	13	0.0074			2.84%
<i>Cor Total</i>	3.36	31				100%

Tableau IV.3 : ANOVA pour F_z .

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>DL</i>	<i>MS</i>	<i>F-value</i>	<i>p-value</i>	<i>Contribution n</i>
<i>Model</i>	35910.54	18	1995.03	103.62	< 0.0001	99.31%
<i>ap</i>	5735.45	1	5735.45	297.90	< 0.0001	49.52%
<i>Vc</i>	324.11	1	324.11	16.83	0.0012	1.75%
<i>f</i>	3761.28	1	3761.28	195.36	< 0.0001	20.58%
<i>Material</i>	8947.04	3	2982.35	154.91	< 0.0001	24.74%
<i>ap*Vc</i>	42.70	1	42.70	2.22	0.1603	0.26%
<i>ap*f</i>	22.14	1	22.14	1.15	0.3031	0.03%
<i>ap*material</i>	294.71	3	98.24	5.10	0.0150	0.94%
<i>Vc*f</i>	40.72	1	40.72	2.12	0.1696	0.12%

<i>Vc*</i> <i>material</i>	70.99	3	23.66	1.23	0.3388	0.20%
<i>f*</i> <i>material</i>	324.19	3	108.06	5.61	0.0108	0.90%
<i>Residual</i>	250.28	13	19.25			0.70%
<i>Cor Total</i>	36160.82	31				100%

Tableau IV.4 : ANOVA pour *Pc*.

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>DL</i>	<i>MS</i>	<i>F-value</i>	<i>p-value</i>	<i>Contribution%</i>
<i>Model</i>	2354.10	18	130.78	1965.24	< 0.0001	99.04%
<i>ap</i>	577.18	1	577.18	8673.05	< 0.0001	47.88%
<i>Vc</i>	102.38	1	102.38	1538.42	< 0.0001	3.72%
<i>f</i>	458.12	1	458.12	6884.03	< 0.0001	15.54%
<i>material</i>	0.1200	3	0.0400	0.6013	0.6255	27.50%
<i>ap*Vc</i>	9.75	1	9.75	146.55	< 0.0001	1.32%
<i>ap*f</i>	44.74	1	44.74	672.37	< 0.0001	0.21%
<i>ap*</i> <i>material</i>	0.0000	3	0.0000	0.0000	1.0000	1.03%
<i>Vc*f</i>	7.94	1	7.94	119.29	< 0.0001	0.00%
<i>Vc*</i> <i>material</i>	0.0000	3	0.0000	0.0000	1.0000	0.7%
<i>f*</i> <i>material</i>	0.0185	3	0.0062	0.0924	0.9629	1.15%
<i>Residual</i>	0.8651	13	0.0665			0.96%
<i>Cor Total</i>	2354.96	31				100%

Tableau IV.5 : ANOVA pour *Ecs*.

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>DL</i>	<i>MS</i>	<i>F-value</i>	<i>p-value</i>	<i>Contribution%</i>
<i>Model</i>	13.56	18	0.7534	22.66	< 0.0001	96.91%
<i>ap</i>	0.0010	1	0.0010	0.0306	0.8637	0.17%
<i>Vc</i>	0.5152	1	0.5152	15.50	0.0017	0.27%
<i>f</i>	0.0013	1	0.0013	0.0388	0.8469	6.96%
<i>material</i>	9.23	3	3.08	92.56	< 0.0001	65.97%
<i>ap*Vc</i>	0.1423	1	0.1423	4.28	0.0590	3.82%
<i>ap*f</i>	0.7017	1	0.7017	21.11	0.0005	4.14%
<i>ap*material</i>	1.22	3	0.4077	12.26	0.0004	8.57%
<i>Vc*f</i>	0.0263	1	0.0263	0.7905	0.3901	0.22%
<i>Vc*</i> <i>material</i>	0.1135	3	0.0378	1.14	0.3700	0.81%
<i>f*</i> <i>material</i>	0.8373	3	0.2791	8.40	0.0023	5.98%

Residual	0.4322	13	0.0332			3.09%
Cor Total	13.99	31				100.00%

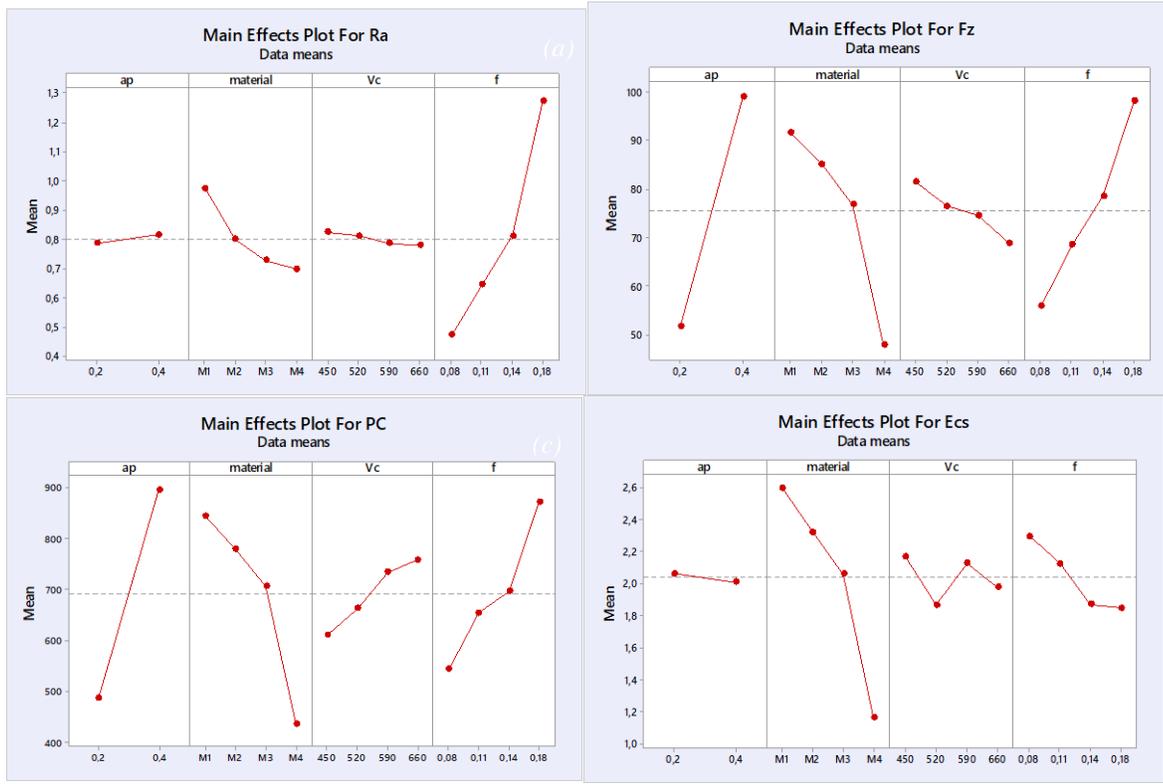


Figure IV.1. Graphiques des effets principaux de ; a) *Ra*, b) *Fz*, c) *Pc* et d) *Ecs*.

IV.2.2 Modélisation des paramètres technologiques

a) Modélisation par RSM

La modélisation des paramètres de sortie pour un processus technologique donné, représente une étape essentielle afin de proposer des modèles mathématiques qui peuvent prédire les sorties dans l'intervalle des conditions expérimentales réalisées [79]. Ces modèles de prédiction proposés ont intérêt considérable dans l'étape d'optimisation. Dans notre cas d'étude, la relation entre les facteurs d'entrées et les paramètres de sorties a été modélisée par des équations de régression de formes linéaires avec interactions.

Les modèles de (*Ra*), (*Fz*), (*Pc*) et (*Ecs*), tenant compte des effets principaux et des interactions, sont donnés par les équations de régression (Éqs IV.4-11) avec leurs coefficients de détermination (R^2).

Notons ici, que les modèles proposés peuvent être présentés sous forme d'un seul modèle globale qui tient compte des conditions de coupe (*Vc*, *f* et *ap*) et de matériau de l'outil (M) (Éqs IV.4 -7), ou sous forme de quatre modèles séparés pour chaque matériau de coupe (Éqs IV.8-11).

Les deux formes des modèles déterminés ont le même (R^2) et aboutissent aux mêmes résultats. Nous remarquons aussi, que le (R^2) de différents modèles varient de 0.96 à 0.99 ce qui montre la bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

$$Ra = 0.935 - 3.77ap - 0.00209Vc + 6.79f + 0.205M1 - 2.73M2 + 0.061M3 + 0.006M4 + 0.00612ap.Vc + 4.33ap.f - 0.008ap.M1 + 0.018ap.M2 + 0.017ap.M3 - 0.027ap.M4 + 0.00146Vc.M1 + 0.000240Vc.M2 + 0.000169Vc.M3 + 0.000211Vc.M4 + 2.467f.M1 + 1.052f.M2 - 1.819f.M3 - 1.7f.M4$$

($R^2 = 97\%$) (IV.4)

$$Fz = 3.03 + 130ap - 0.0609Vc + 9.51f + 1.94M1 + 15.6M2 - 15.9M3 - 19.2M4 + 0.254ap.Vc - 390ap.f - 22.5ap.M1 + 47.8ap.M2 - 30.7ap.M3 + 5.4ap.M4 - 0.679Vc.f + 0.0183Vc.M1 - 0.0306Vc.M2 + 0.0139Vc.M3 - 0.0015Vc.M4 - 51.4f.M1 - 25.2f.M3 + 148f.M3 - 715f.M4$$

($R^2 = 99\%$) (IV.5)

$$Pc = 41 - 694ap - 1.148Vc + 5382f + 28M1 + 68M2 - 137M3 + 41M4 + 5.83ap.Vc - 3931ap.f - 196ap.M1 + 442ap.M2 - 341ap.M3 + 96ap.M4 - 0.15Vc.f + 0.436Vc.M1 - 0.102Vc.M2 + 0.113Vc.M3 - 0.447Vc.M4 - 461f.M1 - 442f.M2 + 1502f.M3 - 599f.M4$$

($R^2 = 99\%$) (IV.6)

$$Ecs = 2.76 + 0.06ap - 0.00522Vc + 28.2f + 2.254M1 + 1.298M2 - 0.900M3 - 2.652M4 + 0.01466ap.Vc - 69.5ap.f - 2.470ap.M1 + 0.125ap.M2 - 0.709ap.M3 + 3.054ap.M4 - 0.0173Vc.f - 0.000478Vc.M1 - 0.001014Vc.M2 + 0.001072Vc.M3 + 0.000419Vc.M4 - 5.39f.M1 - 3.83f.M2 + 4.26f.M3 + 4.96f.M4$$

($R^2 = 96\%$) (IV.7)

$$Ra_{CC6050} = 1.140 - 3.776ap - 0.0027Vc + 9.256f + 0.00611ap.Vc + 4.332ap.f + 0.00146Vc.f$$

$$Ra_{CC1690} = 0.662 - 3.750ap - 0.0018Vc + 7.8414f + 0.00611ap.Vc + 4.332ap.f + 0.00146Vc.f$$

$$Ra_{CC620} = 0.996 - 3.751ap - 0.001918Vc + 4.970f + 0.00611ap.Vc + 4.332ap.f + 0.00146Vc.f$$

$$Ra_{CBN7050} = 0.941 - 3.795ap - 0.00187Vc + 5.0894f + 0.00611ap.Vc + 4.332ap.f + 0.00146Vc.f$$

($R^2 = 97\%$) (IV.8)

$$Fz_{CC6050} = 10.901 + 107.483ap - 0.042Vc + 899.922f + 0.253ap.Vc - 390.364ap.f - 0.679Vc.f$$

$$Fz_{CC1690} = 14.673 + 177.746ap - 0.091Vc + 926.153f + 0.253ap.Vc - 390.364ap.f - 0.679Vc.f$$

$$Fz_{CC620} = 46.196 + 99.257ap - 0.047Vc + 1099.344f + 0.253ap.Vc - 390.364ap.f - 0.679Vc.f$$

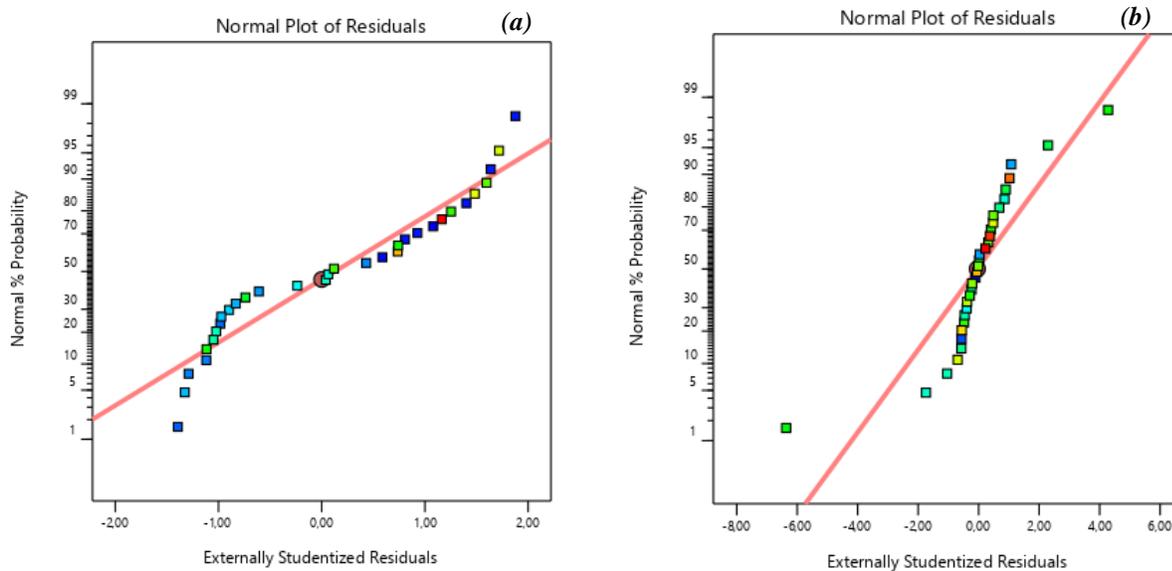
$$Fz_{CBN7050} = 49.510 + 135.367ap - 0.062Vc + 879.868f + 0.253ap.Vc - 390.364ap.f - 0.679Vc.f$$

($R^2 = 99\%$) (IV.9)

$$Pc_{CC6050} = 69.162 - 890.368ap - 0.7118Vc + 4920.833f + 5.831ap.Vc - 3931.368ap.f - 0.152Vc.f$$

$$Pc_{CC1690} = 108.593 - 251.851ap - 1.249Vc + 4939.369f + 5.831ap.Vc - 3931.368ap.f - 0.152Vc.f$$

La figure **IV.4a-d** présente le graphe de surface en 3D de (Fz) en fonction de (Vc et f) et trois (ap) différentes pour les quatre matériaux utilisés. On peut voir que toute augmentation de (ap) ou (f) entraîne une augmentation similaire de (Fz). Cette augmentation s'explique par la croissance de la section du copeau usiné ($S = f \times ap$), cela provoque une augmentation de l'effort nécessaire pour enlever la matière [76]. Par contre l'augmentation de (Vc) cause une diminution de (Fz) et cela est valable pour les quatre matériaux de coupe utilisés. On remarque également que le CBN est le matériau qui engendre des faibles efforts de coupe par rapport aux trois autres matériaux. Le graphique de surface 3D de (Pc) en fonction de (Vc et f) et matériaux de coupe est représenté dans la Figure **IV.5a-d**. L'analyse indique que l'effet de (ap) est bien visible et que l'augmentation simultanée de (Vc) et (f) provoque une augmentation notable de (Pc) [81]. L'augmentation de (ap) de 0.2 à 0.4mm pour les mêmes valeurs de $Vc = 450$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr provoque une augmentation de 30% (Pc) pour le CBN7050 et de 48% pour le CC620 et de 43% pour le CC1690 et de 53% pour le CC6050. Finalement, la Figure **IV.6a-d** expose l'évaluation de (Ecs) en fonction de (f et ap) et trois (Vc) différentes pour les matériaux de coupe utilisés. On peut observer que (Ecs) diminue avec l'augmentation de (Vc , f et ap), ce qui est bénéfique à l'outil de coupe.



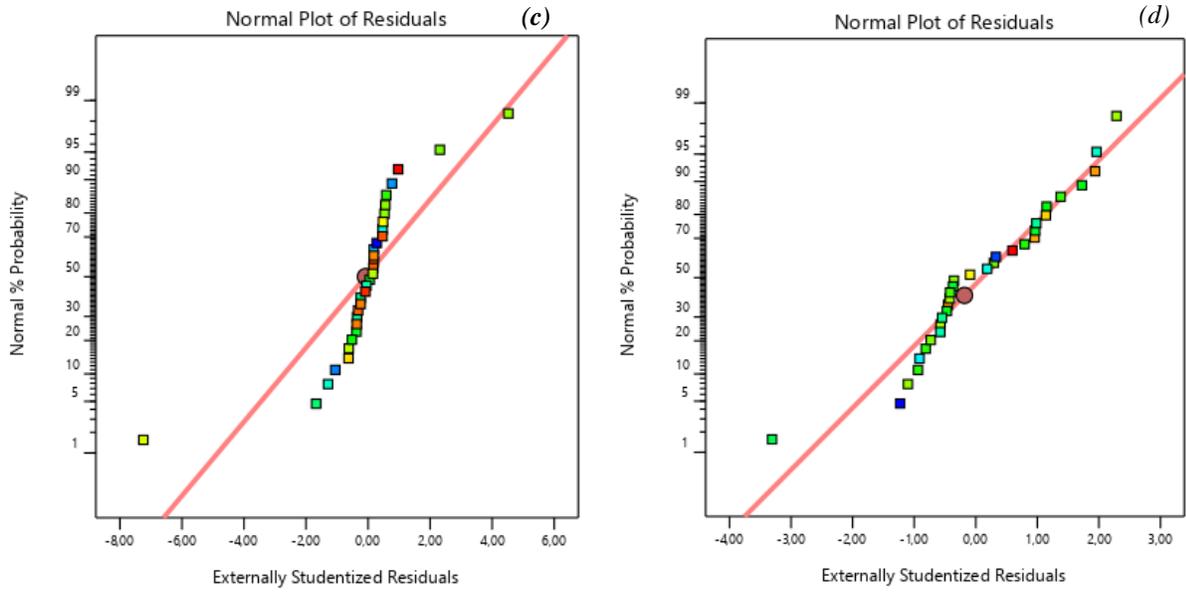


Figure IV.2 Tracés normaux des résidus a) pour Ra, b) pour Fz, c) pour Pc, et d) pour Ecs.

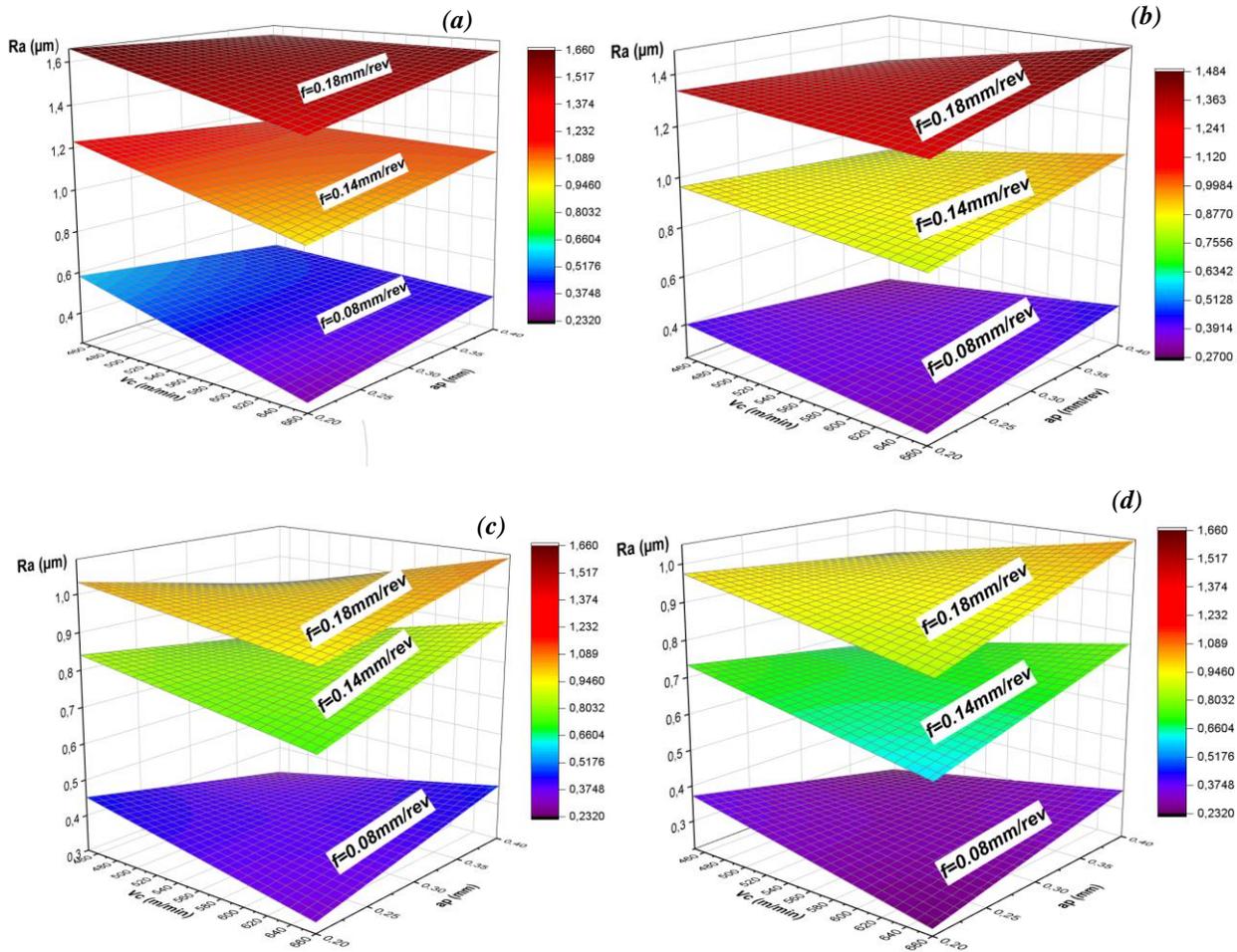


Figure IV.3. Graphiques 3D de Ra pour a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 et d) CBN7050.

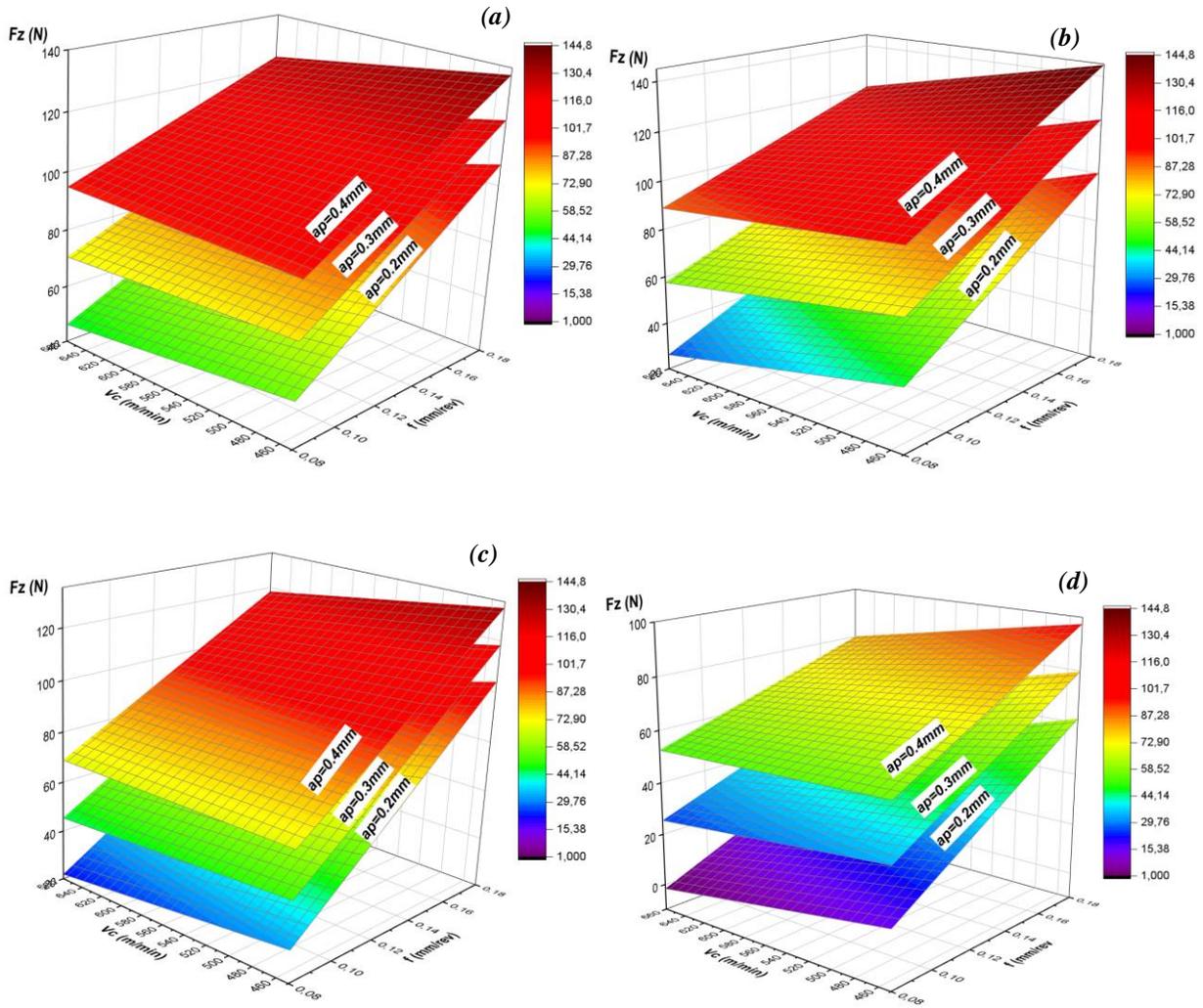


Figure IV.4. Graphiques 3D de F_z pour
 a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 et d) CBN7050.

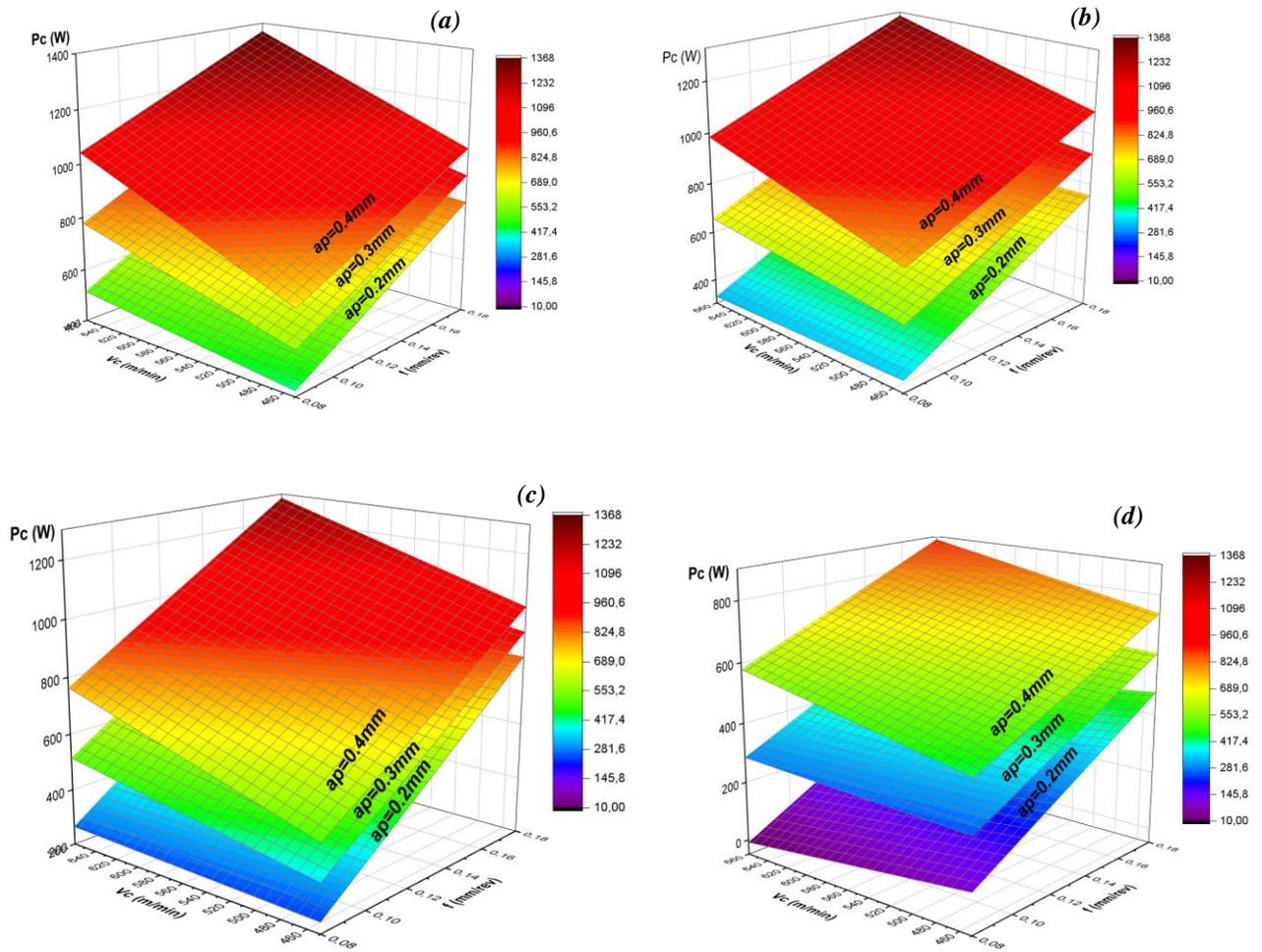


Figure IV.5. Graphiques 3D de P_c pour
 a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 et d) CBN7050.

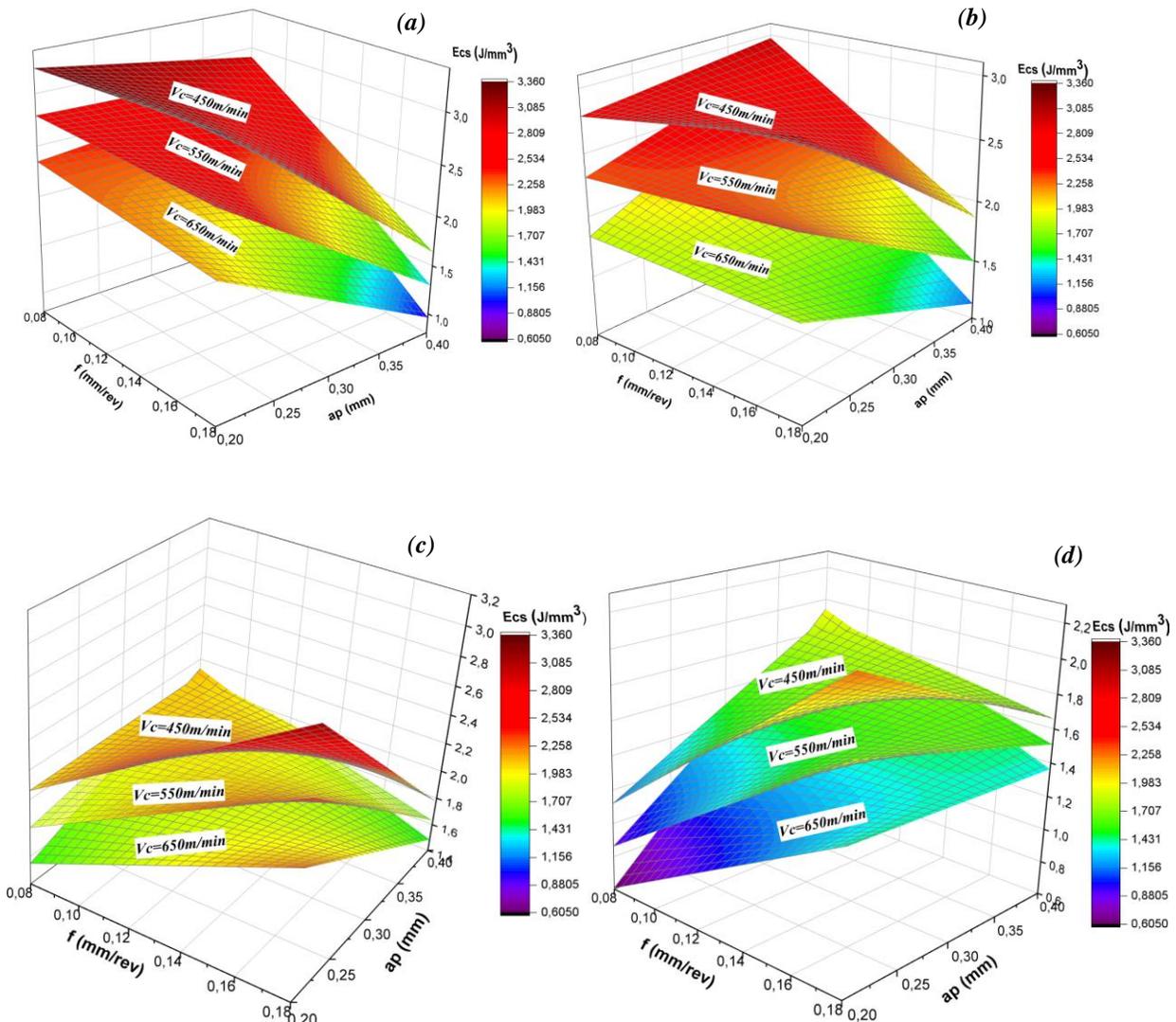


Figure IV.6. Graphiques 3D de E_{cs} pour a) CC6050, b) CC1690, c) CC620 et d) CBN7050.

b) Modélisation par ANN

Afin de modéliser les critères (Ra , Fz , Pc et E_{cs}), des perceptrons multicouches (constitués d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une couche de sortie) ont été utilisés. La formation du réseau neuronal a été réalisée avec un taux d'apprentissage de $\eta = 0,1$. La figure IV.7 présente les architectures ANN adéquates pour modéliser les critères (Ra , Fz , Pc et E_{cs}). Pour le paramètre (Ra) l'architecture (4-4-1) a été adoptée, pour le paramètre (Fz) l'architecture (4-3-1) a été choisie et enfin, l'architecture (4-5-1) a été sélectionnée pour les paramètres (Pc et E_{cs}).

Les modèles mathématiques obtenus par la méthode ANN pour les paramètres étudiés sont exprimés par les équations suivantes (équations IV.12-27). Les coefficients de détermination (R^2) pour les paramètres (Ra , Fz , Pc et Ecs) sont respectivement de (99,85, 99,81, 99,85 et 99,77).

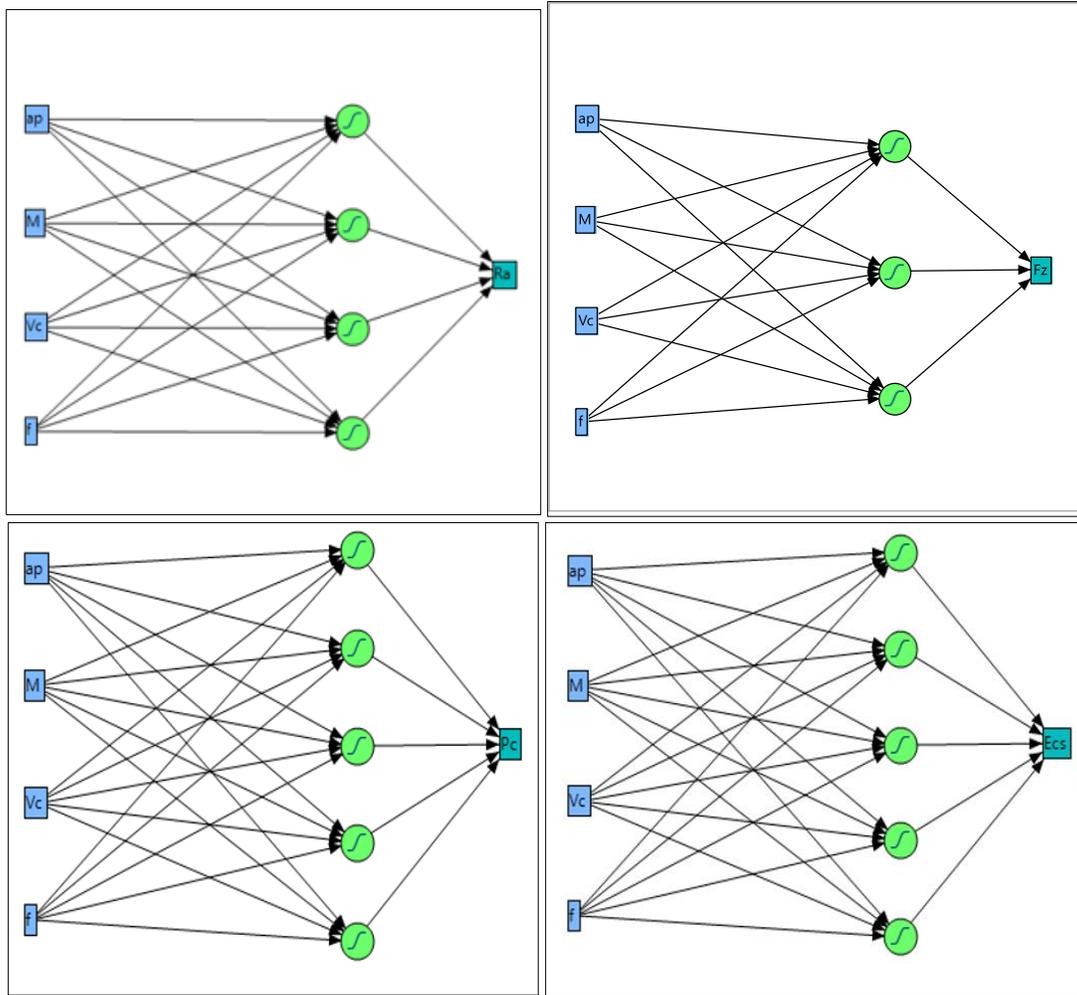


Figure. IV.7 Architectures ANN adoptées pour Ra, Fz, Pc et Ecs

$$Ra_{CC6050} = 0.3476 * H1 - 0.275 * H2 + 0.318 * H3 + 1.333 * H4 + 1.347 \quad (IV.12)$$

$$H1 = \tanh (5 * (-5.071 * ap + 0.0046 * Vc - 50.345 * f + 6.2841))$$

$$H2 = \tanh (5 * (-0.135 * ap + 0.0115 * Vc + 10.052 * f - 8.185))$$

$$H3 = \tanh (5 * (9.734 * ap + 0.00049 * Vc + 37.873 * f - 9.342))$$

$$H4 = \tanh (5 * (-0.469 * ap + 0.0071 * Vc + 23.160 * f - 3.95))$$

$$Ra_{CC1690} = 0.3476 * H1 - 0.275 * H2 + 0.318 * H3 + 1.333 * H4 + 1.347 \quad (IV.13)$$

$$H1 = \tanh (5 * (-5.071 * ap + 0.0046 * Vc - 50.345 * f + 2.663))$$

$$H2 = \tanh (5 * (-0.135 * ap + 0.0115 * Vc + 10.052 * f - 6.94))$$

$$H3 = \tanh (5 * (9.734 * ap + 0.00049 * Vc + 37.873 * f - 6.034))$$

$$H4 = \tanh (5 * (-0.469 * ap + 0.0071 * Vc + 23.160 * f - 4.09))$$

$$Ra_{CC620} = 0.3476 * H1 - 0.275 * H2 + 0.318 * H3 + 1.333 * H4 + 1.347 \quad (IV.14)$$

$$H1 = \tanh (5 * (-5.071 * ap + 0.0046 * Vc - 50.345 * f + 5.568))$$

$$H2 = \tanh (5 * (-0.135 * ap + 0.0115 * Vc + 10.052 * f - 8.50))$$

$$H3 = \tanh(5 * (9.734 * ap + 0.00049 * Vc + 37.873 * f - 7.3))$$

$$H4 = \tanh(5 * (-0.469 * ap + 0.0071 * Vc + 23.160 * f - 4.83))$$

$$Ra_{CBN7050} = 0.3476 * H1 - 0.275 * H2 + 0.318 * H3 + 1.333 * H4 + 1.347 \quad (IV.15)$$

$$H1 = \tanh(5 * (-5.071 * ap + 0.0046 * Vc - 50.345 * f + 5.284))$$

$$H2 = \tanh(5 * (-0.135 * ap + 0.0115 * Vc + 10.052 * f - 8.161))$$

$$H3 = \tanh(5 * (9.734 * ap + 0.00049 * Vc + 37.873 * f - 8.104))$$

$$H4 = \tanh(5 * (-0.469 * ap + 0.0071 * Vc + 23.160 * f - 4.343))$$

$$Fz_{CC6050} = -22.068 * H1 + 25.326 * H2 + 31.663 * H3 + 82.701 \quad (IV.16)$$

$$H1 = \tanh(5 * (11.551 * ap - 0.0017 * Vc - 35.481 * f - 1))$$

$$H2 = \tanh(5 * (0.565 * ap - 0.008 * Vc + 27.762 * f - 1.182))$$

$$H3 = \tanh(5 * (31.957 * ap + 0.0043 * Vc + 6.644 * f - 10.7))$$

$$Fz_{CC1690} = -22.068 * H1 + 25.326 * H2 + 31.663 * H3 + 82.701 \quad (IV.17)$$

$$H1 = \tanh(5 * (11.551 * ap - 0.0017 * Vc - 35.481 * f - 0.723))$$

$$H2 = \tanh(5 * (0.565 * ap - 0.008 * Vc + 27.762 * f - 0.585))$$

$$H3 = \tanh(5 * (31.957 * ap + 0.0043 * Vc + 6.644 * f - 12.917))$$

$$Fz_{CC620} = -22.068 * H1 + 25.326 * H2 + 31.663 * H3 + 82.701 \quad (IV.18)$$

$$H1 = \tanh(5 * (11.551 * ap - 0.0017 * Vc - 35.481 * f + 2.55))$$

$$H2 = \tanh(5 * (0.565 * ap - 0.008 * Vc + 27.762 * f + 0.468))$$

$$H3 = \tanh(5 * (31.957 * ap + 0.0043 * Vc + 6.644 * f - 12.02))$$

$$Fz_{CBN7050} = -22.068 * H1 + 25.326 * H2 + 31.663 * H3 + 82.701 \quad (IV.19)$$

$$H1 = \tanh(5 * (11.551 * ap - 0.0017 * Vc - 35.481 * f + 2.3))$$

$$H2 = \tanh(5 * (0.565 * ap - 0.008 * Vc + 27.762 * f - 0.172))$$

$$H3 = \tanh(5 * (31.957 * ap + 0.0043 * Vc + 6.644 * f - 12.7))$$

$$Pc_{CC6050} = 422.693 * H1 + 326.96 * H2 - 226.088 * H3 + 79.207 * H4 + 405.14H5625.486 \quad (IV.20)$$

$$H1 = \tanh(5 * (0.4 * ap - 0.0004 * Vc + 24 * f - 1.46))$$

$$H2 = \tanh(5 * (9.98 * ap - 0.0056 * Vc - 12.021 * f + 2.931))$$

$$H3 = \tanh(5 * (-17.154 * ap + 0.018 * Vc - 10.814 * f + 0.176))$$

$$H4 = \tanh(5 * (-12.823 * ap + 0.019 * Vc - 9.246 * f - 3.104))$$

$$H5 = \tanh(5 * (3.470 * ap + 0.0141 * Vc + 4.56 * f - 9.731))$$

$$Pc_{CC1690} = 422.693 * H1 + 326.96 * H2 - 226.088 * H3 + 79.207 * H4 + 405.146 * H5 + 625.486 \quad (IV.21)$$

$$H1 = \tanh(5 * (0.4 * ap - 0.0004 * Vc + 24 * f - 0.99))$$

$$H2 = \tanh(5 * (9.98 * ap - 0.0056 * Vc - 12.021 * f + 2.5))$$

$$H3 = \tanh(5 * (-17.154 * ap + 0.018 * Vc - 10.814 * f - 2))$$

$$H4 = \tanh(5 * (-12.823 * ap + 0.019 * Vc - 9.246 * f - 6.04))$$

$$H5 = \tanh(5 * (3.470 * ap + 0.0141 * Vc + 4.56 * f - 10.373))$$

$$Pc_{CC620} = 422.693 * H1 + 326.96 * H2 - 226.088 * H3 + 79.207 * H4 + 405.146 * H5 + 625.486 \quad (IV.22)$$

$$H1 = \tanh(5 * (0.4 * ap - 0.0004 * Vc + 24 * f - 2.733))$$

$$H2 = \tanh(5 * (9.98 * ap - 0.0056 * Vc - 12.021 * f - 1.571))$$

$$H3 = \tanh(5 * (-17.154 * ap + 0.018 * Vc - 10.814 * f - 4.87))$$

$$H4 = \tanh(5 * (-12.823 * ap + 0.019 * Vc - 9.246 * f - 2.6))$$

$$H5 = \tanh(5 * (3.470 * ap + 0.0141 * Vc + 4.56 * f - 7.941))$$

$$Pc_{CBN7050} = 422.693 * H1 + 326.96 * H2 - 226.088 * H3 + 79.207 * H4 + 405.146 * H5 + 625.486 \quad (IV.23)$$

$$\begin{aligned} H1 &= \tanh(5 * (0.4 * ap - 0.0004 * Vc + 24 * f - 2.22)) \\ H2 &= \tanh(5 * (9.98 * ap - 0.0056 * Vc - 12.021 * f + 1.57)) \\ H3 &= \tanh(5 * (-17.154 * ap + 0.018 * Vc - 10.814 * f - 3.535)) \\ H4 &= \tanh(5 * (-12.823 * ap + 0.019 * Vc - 9.246 * f - 6.018)) \\ H5 &= \tanh(5 * (3.470 * ap + 0.0141 * Vc + 4.56 * f - 9.841)) \end{aligned}$$

$$Ecs_{CC6050} = -0.232 * H1 - 1.081 * H2 - 0.828 * H3 + 0.982 * H4 - 0.670 * H5 + 1.954 \quad (IV.24)$$

$$\begin{aligned} H1 &= \tanh(5 * (5.987 * ap - 0.0437 * Vc - 22.975 * f + 26.82)) \\ H2 &= \tanh(5 * (7.510 * ap - 0.0313 * Vc + 12.917 * f + 2.508)) \\ H3 &= \tanh(5 * (-15.171 * ap - 0.00394 * Vc + 36.718 * f + 3.273)) \\ H4 &= \tanh(5 * (13.331 * ap - 0.0151 * Vc - 22.830 * f + 8.672)) \\ H5 &= \tanh(5 * (-4.745 * ap - 0.053 * Vc + 27.166 * f - 3.383)) \end{aligned}$$

$$Ecs_{CC1690} = -0.232 * H1 - 1.081 * H2 - 0.828 * H3 + 0.982 * H4 - 0.670 * H5 + 1.954 \quad (IV.25)$$

$$\begin{aligned} H1 &= \tanh(5 * (5.987 * ap - 0.0437 * Vc - 22.975 * f + 26.63)) \\ H2 &= \tanh(5 * (7.510 * ap - 0.0313 * Vc + 12.917 * f + 4.28)) \\ H3 &= \tanh(5 * (-15.171 * ap - 0.00394 * Vc + 36.718 * f + 4.374)) \\ H4 &= \tanh(5 * (13.331 * ap - 0.0151 * Vc - 22.830 * f + 8.1)) \\ H5 &= \tanh(5 * (-4.745 * ap - 0.053 * Vc + 27.166 * f - 4.607)) \end{aligned}$$

$$Ecs_{CC620} = -0.232 * H1 - 1.081 * H2 - 0.828 * H3 + 0.982 * H4 - 0.670 * H5 + 1.954 \quad (IV.26)$$

$$\begin{aligned} H1 &= \tanh(5 * (5.987 * ap - 0.0437 * Vc - 22.975 * f + 25.402)) \\ H2 &= \tanh(5 * (7.510 * ap - 0.0313 * Vc + 12.917 * f - 0.1)) \\ H3 &= \tanh(5 * (-15.171 * ap - 0.00394 * Vc + 36.718 * f + 1.44)) \\ H4 &= \tanh(5 * (13.331 * ap - 0.0151 * Vc - 22.830 * f + 6.5)) \\ H5 &= \tanh(5 * (-4.745 * ap - 0.053 * Vc + 27.166 * f - 2.772)) \end{aligned}$$

$$Ecs_{CBN7050} = -0.232 * H1 - 1.081 * H2 - 0.828 * H3 + 0.982 * H4 - 0.670 * H5 + 1.954 \quad (IV.27)$$

$$\begin{aligned} H1 &= \tanh(5 * (5.978 * ap - 0.0437 * Vc - 22.975 * f + 26.316)) \\ H2 &= \tanh(5 * (7.510 * ap - 0.0131 * Vc + 12.917 * f + 3.95)) \\ H3 &= \tanh(5 * (-15.171 * ap - 0.00394 * Vc + 36.718 * f + 2.093)) \\ H4 &= \tanh(5 * (13.331 * ap - 0.0151 * Vc - 22.830 * f + 7.812)) \\ H5 &= \tanh(5 * (-4.745 * ap - 0.053 * Vc + 27.166 * f - 4.983)) \end{aligned}$$

c) Comparaison RSM et ANN

Le tableau IV.6 montre les résultats de (Fz , Pc , Ecs et Ra) prédits par les techniques RSM et ANN comparativement aux essais expérimentaux ainsi que les pourcentages d'erreur. On peut constater que les modèles ANN fournissent des résultats plus précis que les modèles RSM.

À titre d'exemple, les erreurs maximales données par les modèles RSM pour les paramètres (Ra , Fz , Pc et Ecs) sont respectivement de (27,11, 22,31, 29,89 et 16,38), tandis que pour les modèles ANN elles correspondent à (7,05, 11,34, 9,86 et 7,19) %. Dans le tableau IV.7, les différents (R^2) trouvés par les approches RSM et ANN sont exposés. Il est clair que les modèles ANN prédominent sur ceux RSM en termes de précision.

Tableau IV.6 : Comparaison entre les résultats RSM et ANN

	<i>Ra</i>				<i>Fz</i>			
	<i>Predi RSM</i>	<i>Predi ANN</i>	<i>Error RSM%</i>	<i>Error ANN%</i>	<i>Predi RSM</i>	<i>Predi ANN</i>	<i>Error RSM%</i>	<i>Error ANN%</i>
1	0.563	0.606	6.249	0.918	55.551	56.429	1.021	2.618
2	0.823	0.792	1.650	2.171	66.301	64.625	0.165	2.688
3	1.063	1.022	7.348	3.240	74.355	72.748	1.894	4.013
4	1.381	1.422	3.400	0.576	83.154	84.659	1.197	3.029
5	0.358	0.455	20.438	1.012	45.929	49.920	3.995	4.348
6	0.639	0.547	14.086	2.366	54.043	55.413	3.096	5.710
7	0.898	0.773	10.896	4.626	59.461	59.372	3.663	3.508
8	1.225	1.304	5.782	0.296	65.887	66.429	2.678	1.877
9	0.632	0.573	9.017	1.254	53.471	50.671	4.375	1.091
10	0.430	0.440	4.426	2.193	30.105	26.945	3.311	7.532
11	1.009	1.095	8.260	0.419	86.323	86.104	2.328	2.575
12	0.748	0.703	8.475	1.894	57.041	59.793	1.974	2.755
13	0.625	0.543	15.670	0.608	30.326	30.230	1.766	1.443
14	0,346	0,482	24,818	4,882	13,269	14,379	22,312	15,816
15	1,051	1,114	0,831	5,092	41,624	41,262	0,469	1,333
16	0,698	0,669	5,812	1,293	21,281	19,820	19,555	11,347
17	1,621	1,637	1,786	0,785	137,404	138,939	0,583	0,527
18	1,119	1,065	5,602	0,455	117,400	116,885	1,759	1,313
19	0,763	0,759	2,222	2,642	104,620	104,471	1,571	1,711
20	0,427	0,437	2,858	0,779	94,536	93,685	0,474	0,431
21	1,266	1,371	7,608	0,050	144,457	142,671	0,347	1,579
22	0,869	0,781	19,040	7,055	119,981	118,840	0,185	0,768
23	0.605	0.526	11.960	2.574	102.993	102.105	1.431	0.556

24	0.362	0.469	21.552	1.801	88.699	89.186	1.303	0.761
25	0.779	0.765	3.569	1.794	107.180	109.271	1.699	3.682
26	1.121	1.119	0.001	0.192	129.051	129.868	1.209	0.583
27	0.455	0.566	18.994	0.649	68.152	73.228	11.446	4.849
28	0.724	0.639	12.406	0.808	83.917	78.424	11.414	4.121
29	0.804	0.674	20.679	1.155	80.872	80.377	1.140	0.522
30	1.179	1.336	12.047	0.280	90.651	92.710	1.068	1.179
31	0.327	0.422	24.654	2.717	54.462	53.123	11.147	8.415
32	0.613	0.474	27.119	1.720	60.765	61.210	8.154	7.482
	<i>Pc</i>				<i>Ecs</i>			
	<i>Predi RSM</i>	<i>Predi ANN</i>	<i>Error RSM%</i>	<i>Error ANN%</i>	<i>Predi RSM</i>	<i>Predi ANN</i>	<i>Error RSM%</i>	<i>Error ANN%</i>
1	421.051	409.363	2.093	0.741	3.374	3.354	1.633	2.224
2	573.078	566.527	0.430	1.568	3.076	3.010	2.179	0.005
3	725.839	746.265	2.606	0.135	2.717	2.700	0.616	0.004
4	917.132	904.729	1.467	0.095	2.254	2.415	1.149	5.934
5	347,794	373,484	3,068	4,092	2,827	2,990	5,456	0,002
6	462,751	447,451	1,860	1,508	2,536	2,381	6,537	0,056
7	578,443	573,817	2,554	1,733	2,184	2,038	7,044	0,084
8	732,852	752,901	1,591	1,101	1,744	1,881	7,241	0,029
9	414,483	387,163	7,877	0,766	2,329	2,320	0,387	0,019
10	256,192	256,030	1,446	1,382	1,928	1,819	5,931	0,028
11	845,552	871,208	2,706	0,246	2,435	2,369	0,627	3,314
12	629,693	639,613	1,624	0,075	1,968	2,070	4,906	0,017
13	231,317	245,547	3,497	9,864	1,366	1,366	1,168	1,183
14	103.769	136.627	29.898	7.701	0.949	1.067	11.066	0.026
15	401.915	402.353	2.267	2.161	1.177	1.160	1.495	0.028

16	241.565	193.290	23.374	1.282	0.716	0.630	13.575	0.060
17	1032.468	1039.408	0.396	0.274	1.815	1.910	4.993	0.007
18	1013.703	1000.116	1.383	0.025	2.177	2.060	5.697	0.017
19	1028.292	1049.846	1.616	0.446	2.482	2.410	2.971	0.000
20	1042.147	1050.018	0.691	1.452	2.846	2.940	3.184	0.007
21	1088.770	1077.622	0.144	0.881	1.939	2.010	3.547	0.022
22	1031.636	1044.310	0.605	0.616	2.197	2.130	3.167	0.019
23	1008.041	985.896	0.959	1.259	2.414	2.289	4.938	0.487
24	983.713	993.465	0.491	0.495	2.690	2.799	3.919	0.029
25	807.105	807.388	2.111	2.147	1.925	2.015	2.403	7.197
26	1115.415	1119.520	1.476	1.113	1.772	1.810	2.076	0.020
27	665.552	756.963	12.054	0.025	2.112	2.400	11.993	0.009
28	919.759	832.568	11.012	0.489	1.990	1.710	16.388	0.026
29	615.374	593.099	2.614	1.101	1.495	1.420	5.247	0.011
30	781.065	793.764	1.644	0.045	1.185	1.270	6.724	0.016
31	535.308	496.515	11.099	3.048	1.650	1.474	7.835	3.671
32	671.663	714.042	7.708	1.885	1.391	1.501	7.266	0.050

Tableau IV.7 : Comparaison entre les différents R^2 des modèles RSM et ANN

Sortie	Ra		Fz		Pc		Ecs	
	RSM	ANN	RSM	ANN	RSM	ANN	RSM	ANN
$R^2(\%)$	97.16	99.85	99.18	99.81	98.84	99.85	96.63	99.77

IV.3 Conclusion

Ce chapitre se penche sur l'application de diverses méthodes statistiques telles que l'analyse d'ANOVA, l'analyse de régression, ainsi que l'utilisation de réseaux de neurones, dans le processus de tournage conventionnel de la fonte grise EN-GJL-350. Les outils utilisés comprennent un outil en nitrure de bore cubique CBN7050 ainsi que trois types de céramique. L'objectif est d'établir des modèles mathématiques pour les paramètres (*Ra*, *Fz*, *Pc* et *Ecs*).

Cette étude a révélé que les modèles développés à travers la RSM et ceux obtenus par l'utilisation de l'ANN sont globalement en accord satisfaisant avec les données expérimentales. Cependant, les modèles dérivés de la méthode des réseaux de neurones artificiels se sont avérés être plus précis dans leurs prédictions. Ces modèles mathématiques revêtent une importance significative dans un contexte industriel, car ils permettent d'effectuer des prédictions avec une précision accrue

CHAPITRE

V

Optimisation multi-objective par DF, GA et les méthodes MCDM

V.1 Introduction

L'évolution des techniques d'optimisation multi-objective a marqué une avancée significative dans de nombreux domaines scientifiques, notamment en ingénierie de fabrication et en usinage. La recherche des conditions de coupe optimales dans les processus d'usinage constitue aujourd'hui l'une des préoccupations primordiales de l'industrie. En effet, la sélection de ces conditions implique la conciliation de multiples critères souvent contradictoires [82-84], tels que la qualité de la surface usinée, la durée de vie de l'outil, la productivité et les coûts. Dans ce contexte, une variété de techniques d'optimisation des paramètres d'usinage a été explorée afin de permettre un choix éclairé des conditions de travail.

Ces techniques, qui incluent des approches telles que Taguchi, GRA (Grey Relational Analysis), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), GA (Genetic Algorithm), NSGA II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), TLBO (Teaching-Learning-Based Optimization), DF (Desirability Function), PSO (Particle Swarm Optimization), etc. [85-88], parmi d'autres, ont été largement explorées et appliquées dans le domaine de l'usinage. Elles permettent d'explorer efficacement l'espace des solutions afin de trouver des compromis optimaux entre les différents objectifs à atteindre.

Le présent chapitre se focalise sur la présentation d'une démarche appliquant des méthodes d'optimisation multi-objective à un plan d'expérience Taguchi L_{32} pour le tournage de la fonte grise EN-GJL-350, en utilisant quatre types de matériaux de coupe distincts (**CC6050**, **CC1960**, **CC620** et **CBN7050**), dans le but de déterminer paramètres de coupe optimaux (V_c), (f), (ap) et le matériau de coupe). Les paramètres technologiques de sortie pris en compte sont la rugosité de surface (Ra), l'effort (Fz), la puissance (Pc) et le débit de matériau enlevé (MRR).

L'optimisation multi-objectif est réalisée à l'aide de méthodes basées sur la fonction de désirabilité (DF), en tenant compte de divers objectifs. Quatre méthodes de prise de décision multicritère (MCDM), à savoir MARCOS, GRA, TOPSIS et VIKOR, sont employées et comparées pour sélectionner un jeu de paramètres de coupe optimal répondant aux objectifs définis. Ces différentes approches d'optimisation reposent sur une matrice de décision (R) représentant les paramètres de sortie.

V.2 Optimisation par la méthode de la fonction de désirabilité (DF)

La fonction de désirabilité est un outil d'analyse utilisé dans l'optimisation des processus pour évaluer et comparer différentes réponses ou critères de performance. Elle permet de combiner plusieurs réponses en une seule mesure globale, facilitant ainsi la prise de décision lors de la recherche de solutions optimales. La méthode de la fonction de désirabilité (DF) est largement utilisée [89–91]. Comparée à d'autres techniques d'optimisation multi-objectif, elle est puissante, simple et nécessite moins d'étapes computationnelles. Les étapes suivantes sont utilisées dans (DFA) pour l'optimisation des paramètres de processus [92,93].

1^{ère} étape : L'indice de désirabilité individuel, noté "di" pour les réponses correspondantes, peut être trouvé en utilisant les équations (V.1-V.2). Selon les valeurs de la réponse, il existe 2 types de fonctions de désirabilité.

Plus grand est meilleur

Si la réponse doit être maximisée, la désirabilité individuelle est définie comme suit:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{if } Y_j \leq Y_{min} \\ \left\{ \frac{Y_j - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} \right\}^r & \text{if } Y_{min} \leq Y_j \leq Y_{max} ; r \geq 0 \\ 1 & \text{if } Y_j \geq Y_{max} \end{cases} \quad (\text{V.1})$$

Plus petit est meilleur si la réponse doit être minimisée.

$$d_i = \begin{cases} 1 & \text{if } Y_j \leq Y_{min} \\ \left\{ \frac{Y_j - Y_{max}}{Y_{max} - Y_{min}} \right\}^r & \text{if } Y_{min} \leq Y_j \leq Y_{max} ; r \geq 0 \\ 0 & \text{if } Y_j \geq Y_{max} \end{cases} \quad (\text{V.2})$$

Étape 2 : La désirabilité globale, D, peut être calculée en utilisant les valeurs 'di' de toutes les réponses.

Cela se fait en utilisant l'équation ((V.3)

$$D = \sqrt[w]{d_1^{w_1} \cdot d_2^{w_2} \dots d_i^{w_i}} \quad (\text{V.3})$$

Ici, w^j, w^{2etwi} sont les facteurs de pondération qui s'additionnent à 1. Une valeur de D plus élevée suggère un produit de meilleure qualité.

Les résultats des paramètres de sortie en fonction de la variation des facteurs d'entrée sont présentés dans le tableau V.1. Dans cette étude, quatre cas d'optimisation sont examinés. Le tableau (V.2) présente résumé les objectifs attendus pour les différents cas d'optimisation, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, les poids et l'importance accordée à chaque paramètre.

Notons également que dans ce cas d'étude (tableau V.2), les valeurs d'importance sont quantifiées, elles prennent des valeurs d'importance minimale égale à 1 et une valeur d'importance très élevée égale à 5. Le tableau (V.3) récapitule les cinq premières solutions pour chaque cas d'optimisation choisies parmi les cents (100) solutions proposées. La première solution a été choisie comme combinaison optimale, à cet effet, les régimes optimaux choisis ainsi que les sorties optimisées sont consignés dans le tableau (V.4).

Tableau V.1 Résultats expérimentaux suivant le plan de Taguchi L_{32}

N° essai	Entrées				Sorties				
	ap (mm)	Matériau	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Ra (μm)	Fz (N)	Pc (W)	MRR (mm^3/s)	Ecs (J/mm^3)
1	0.2	M1	450	0.08	0.600	54.990	412.425	120.000	3.436
2	0.2	M1	520	0.11	0.814	66.410	575.553	190.666	3.018
3	0.2	M1	590	0.14	0.997	75.790	745.268	275.333	2.706
4	0.2	M1	660	0.18	1.432	82.170	903.870	396.000	2.282
5	0.2	M2	450	0.08	0.456	47.840	358.800	120.000	2.990
6	0.2	M2	520	0.11	0.562	52.420	454.306	190.666	2.382
7	0.2	M2	590	0.14	0.814	57.360	564.040	275.333	2.048
8	0.2	M2	660	0.18	1.305	67.700	744.700	396.000	1.880
9	0.2	M3	450	0.11	0.589	51.230	384.225	165.000	2.328
10	0.2	M3	520	0.08	0.458	29.140	252.546	138.666	1.821
11	0.2	M3	590	0.18	1.103	88.380	869.070	354.000	2.455
12	0.2	M3	660	0.14	0.693	58.190	640.090	308.000	2.078
13	0.2	M4	450	0.11	0.544	29.800	223.500	165.000	1.354
14	0.2	M4	520	0.08	0.465	7.080	61.360	138.666	0.442
15	0.2	M4	590	0.18	1.062	41.822	411.249	354.000	1.161
16	0.2	M4	660	0.14	0.669	17.800	195.800	308.000	0.635
17	0.4	M1	450	0.18	1.655	138.210	1036.570	540.000	1.919
18	0.4	M1	520	0.14	1.064	115.370	999.873	485.333	2.060
19	0.4	M1	590	0.11	0.785	106.290	1045.180	432.666	2.415
20	0.4	M1	660	0.08	0.442	94.090	1034.990	352.00	2.940
21	0.4	M2	450	0.18	1.378	144.960	1087.200	540.000	2.013
22	0.4	M2	520	0.14	0.731	119.760	1037.920	485.333	2.138
23	0.4	M2	590	0.11	0.544	101.54	998.476	432.666	2.307
24	0.4	M2	660	0.08	0.461	89.870	988.570	352.000	2.808
25	0.4	M3	450	0.14	0.752	105.390	790.425	420.000	1.881
26	0.4	M3	520	0.18	1.121	130.630	1132.126	624.000	1.814
27	0.4	M3	590	0.08	0.562	76.960	756.773	314.666	2.405

28	0.4	M3	660	0.11	0.644	75.320	828.520	484.000	1.711
29	0.4	M4	450	0.14	0.666	79.960	599.700	420.000	1.427
30	0.4	M4	520	0.18	1.340	91.630	794.126	624.000	1.272
31	0.4	M4	590	0.08	0.434	49.000	481.833	314.666	1.531
32	0.4	M4	660	0.11	0.482	66.160	727.760	484.000	1.503

Tableau V.2: Objectifs et plages de paramètres pour différents cas d'optimisation.

Conditions	Objectives	Limite		Importance			
		bas	haut	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
<i>ap</i>	Dans l'intervalle-	0.2	0.4	-	-	-	-
<i>Matériau</i>	Dans l'intervalle	M1	M4	-	-	-	-
<i>Vc</i>	Dans l'intervalle	450	660	-	-	-	-
<i>f</i>	Dans l'intervalle	0.08	0.18	-	-	-	-
<i>Ra</i>	minimise	0.43	1.65	5	5	1	1
<i>Fz</i>	minimise	7.08	144.96	5	1	5	1
<i>Pc</i>	minimise	61.36	1132.126	5	1	5	1
<i>Ecs</i>	minimise	0.442	3.436	5	1	5	1
<i>MRR</i>	maximise	120	485.333	5	1	1	5

Tableau V.3 : Résumé des solutions obtenues pour les quatre cas d'optimisation.

	<i>N</i>	<i>ap</i>	<i>Vc</i>	<i>f</i>	<i>Matériau</i>	<i>Ra</i>	<i>Fz</i>	<i>Pc</i>	<i>MRR</i>	<i>Ecs</i>	<i>D</i>
Cas 1	1	0.232	660.000	0.116	M4	0.579	19.060	220.824	292.935	0.562	0.742
	2	0.231	659.997	0.116	M4	0.577	18.816	217.479	291.181	0.556	0.742
	3	0.232	660.000	0.116	M4	0.575	19.043	219.918	291.926	0.561	0.742
	4	0.231	659.999	0.117	M4	0.583	19.174	221.429	293.836	0.562	0.742
	5	0.233	659.997	0.116	M4	0.581	19.563	225.606	295.178	0.570	0.742
Cas 2	1	0.245	660.000	0.094	M4	0.434	15.030	174.760	248.780	0.517	0.841
	2	0.244	659.999	0.094	M4	0.434	14.909	173.457	248.353	0.514	0.841
	3	0.245	659.998	0.094	M4	0.434	15.285	177.507	249.679	0.524	0.841
	4	0.243	659.998	0.095	M4	0.434	14.640	170.549	247.397	0.508	0.841
	5	0.247	660.000	0.094	M4	0.434	15.571	180.591	250.689	0.531	0.841
	1	0.200	660.000	0.102	M4	0.454	5.805	75.465	217.751	0.298	0.904

Cas 3	2	0.200	659.998	0.102	M4	0.454	5.751	74.864	217.393	0.297	0.904
	3	0.200	660.000	0.102	M4	0.457	5.887	76.364	218.301	0.300	0.904
	4	0.200	659.993	0.101	M4	0.451	5.605	73.257	216.415	0.294	0.904
	5	0.200	659.998	0.101	M4	0.449	5.508	72.184	215.768	0.292	0.904
Cas 4	1	0.343	660.000	0.167	M4	1.048	62.908	701.181	624.000	0.977	0.772
	2	0.343	660.000	0.167	M4	1.048	62.919	701.295	623.999	0.977	0.772
	3	0.342	660.000	0.168	M4	1.050	62.822	700.284	623.999	0.975	0.772
	4	0.344	660.000	0.167	M4	1.045	62.997	702.117	623.996	0.979	0.772
	5	0.345	659.995	0.166	M4	1.042	63.127	703.468	623.997	0.982	0.772

Tableau V.4: Solution obtenue pour les différents cas d'optimisation.

Cas	ap	Matériau	Vc	f	Ra	Fz	Pc	Ecs	MRR
1	0.232	CBN7050	660	0.116	0.579	19.060	220.824	0.562	292.935
2	0.244	CBN7050	660	0.094	0.434	15.030	174.760	0.517	248.780
3	0.200	CBN7050	660	0.102	0.455	5.805	75.456	0.298	217.751
4	0.343	CBN7050	660	0.167	1.048	62.908	701.181	0.977	624.000

Le premier cas souhaité concerne l'optimisation simultanément des cinq paramètres de sortie (**Ra**, **Fz**, **Pc**, **Ecs** et **MRR**). Dans ce cas d'étude, l'importance est maintenue à (5). Les meilleures conditions de coupe favorisant cet objectif ont été trouvées comme suit : **ap** = 0.232 mm, matériau = CBN7050, **Vc** = 660 m/min et **f** = 0.116 mm/tr. Les valeurs optimisées des paramètres de sortie sont : **Ra** = 0.579 μ m, **Fz** = 19.06 N, **Pc** = 220.824 W, **Ecs** = 0.562 J/mm³ et **MRR** = 292.935 mm³/s avec une désirabilité = 0.742. Ce cas, est intéressant lorsque l'on recherche un compromis entre les différents paramètres de sortie, c'est-à-dire, une bonne qualité de surface et une moindre consommation d'énergie et une productivité maximale.

Pour le deuxième cas, l'objectif souhaité est de favoriser la minimisation de (Ra) en lui donnant une importance de valeur 5. Par contre, Fz , Pc , Ecs et MRR ont la même importance de valeur 1. Les conditions de coupe optimales trouvées sont : $ap = 0.244$ mm, le matériau est le CBN, $vc = 660$ m/min et $f = 0.094$ mm/tr.

La rugosité optimisée prend une valeur minimale $Ra = 0.434$ μm , cependant les autres paramètres de sorties affichent les valeurs : $Fz = 15.03$ N, $Pc = 175.760$ W, $Ecs = 0.517$ J/mm³ et MRR=248.780 mm³/s. La désirabilité trouvée prend la valeur $D = 0.841$. Ce deuxième cas est intéressant pour les opérations de finition des pièces (objectif : Qualité maximale), lorsque l'industriel souhaite une rugosité de surface minimale.

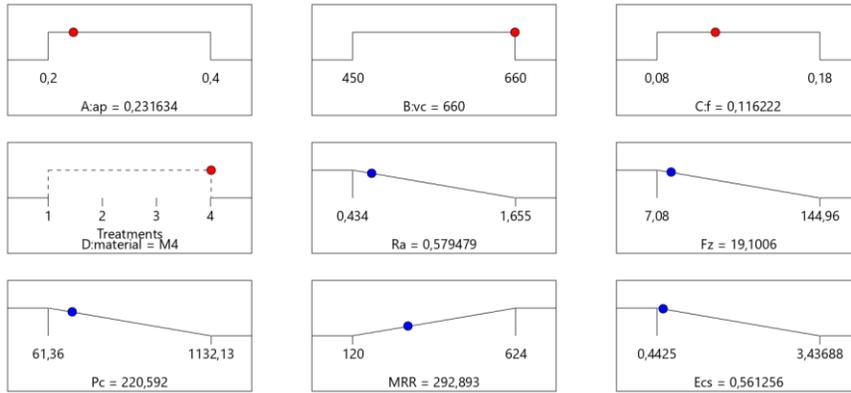
Concernant le troisième cas, l'objectif souhaité est la minimisation de (Fz , Pc et Ecs), l'importance de 5 est donnée à ces trois paramètres de sorties, tout en affectant une importance de 1 pour (Ra) et (MRR). Les conditions de coupe optimales sont : $ap = 0.2$ mm, matériau est le CBN. $vc = 660$ m/min et $f = 0.102$ mm/tr.

Les sorties optimisées prennent des valeurs suivantes : $Fz = 5.805$ N, $Pc = 75.456$ W, $Ecs = 0.298$ J/mm³, (Ra) = 0.455 μm et MRR= 217.751 mm³/s avec $D = 0.904$. Ce cas est appliqué lorsqu'on souhaite minimiser la consommation de l'énergie et réduire le coût de production.

Finalement l'objectif souhaité, est la maximisation de (MRR) pour une productivité maximale. L'importance de 5 est donnée aux (MRR) alors que l'importance des autres paramètres est maintenue à 1. Les conditions de coupe optimales trouvées sont les suivantes : $ap = 0.344$ mm, matériau = CBN, $vc = 660$ m/min et $f = 0.167$ mm/tr. Les sorties prennent les valeurs suivantes : (Ra) = 1.048 μm , (MRR)=624 mm³/s, $Fz = 62.908$ N, $Pc = 701.18$ W et $Ecs = 0.977$ J/mm³ avec une désirabilité $D = 0.772$.

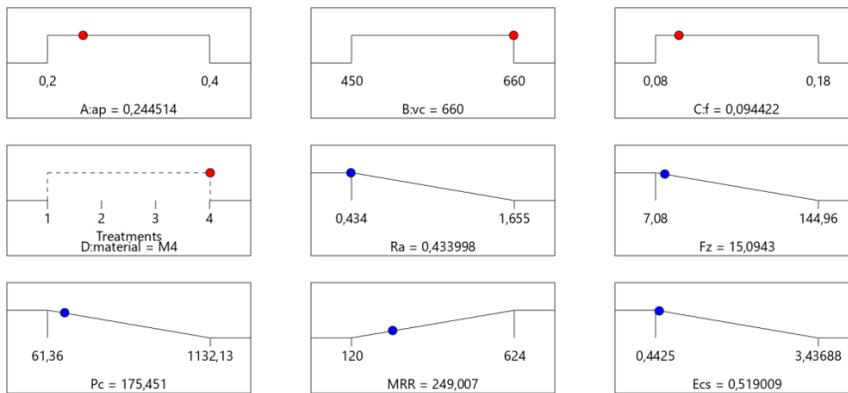
L'analyse des quatre régimes de coupe optimaux trouvés (tableau V.3) montre que les résultats changent suivant l'objectif souhaité par l'industriel. Donc, il n'existe pas un seul régime de coupe optimale, mais une variété de solutions optimales possibles correspondantes aux exigences spécifiques selon le contexte industriel [92]. La figure (V.1) illustre les schémas de rampe de désirabilité pour les quatre cas d'optimisation étudiés.

Cas 1



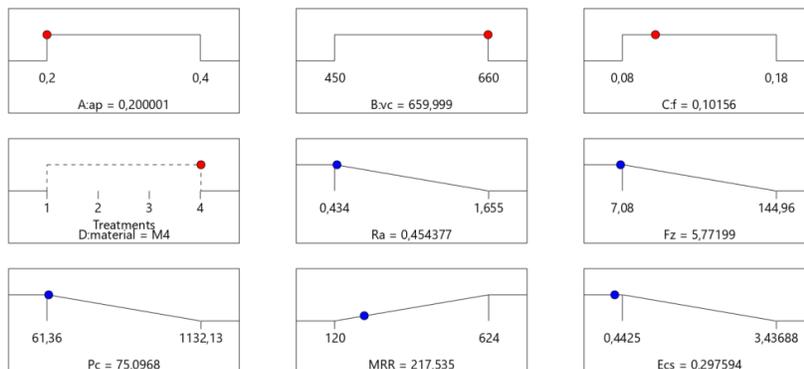
Desirability = 0,742
Solution 1 out of 100

Cas 2



Desirability = 0,841
Solution 1 out of 100

Cas 3



Desirability = 0,904
Solution 1 out of 100

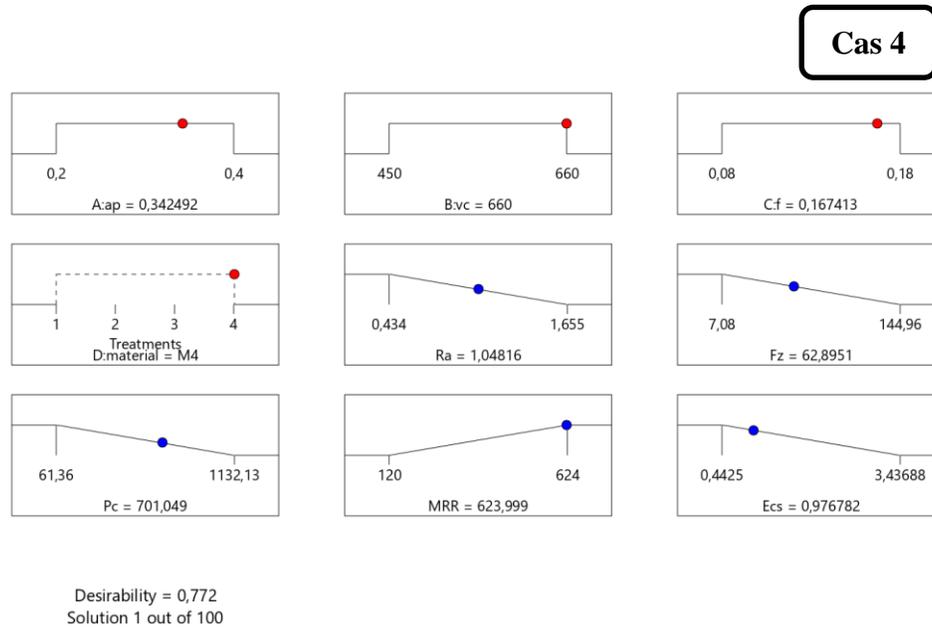


Figure V. 1 Graphiques de rampe de désirabilité pour les cas d'optimisation.

V.3 Optimisation Par l'algorithme génétique (GA)

Les algorithmes génétiques sont des méthodes d'optimisation inspirées du processus biologique de l'évolution naturelle. Ils sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation, de recherche et de simulation dans divers domaines [94].

Les étapes de cet algorithme sont les suivants :

- 1- Initialisation** : Une population initiale de solutions potentielles est générée de manière aléatoire. Chaque solution est souvent représentée sous forme de chaîne de bits ou de vecteur.
- 2- Évaluation** : Chaque individu de la population est évalué en fonction de son aptitude, c'est-à-dire à quel point il est proche de la solution optimale du problème.
- 3- Sélection** : Les individus les plus aptes sont sélectionnés pour reproduire, généralement selon un processus de sélection stochastique favorisant les individus les plus performants.
- 4- Reproduction** : Les individus sélectionnés sont combinés pour produire une nouvelle génération d'individus, en utilisant des opérateurs génétiques tels que la mutation (introduction de variations aléatoires) et le croisement (échange de matériel génétique entre individus).
- 5- Remplacement** : La nouvelle génération remplace l'ancienne, généralement selon un schéma de remplacement qui peut être générationnel (la génération précédente est entièrement remplacée) ou basé sur l'élitisme (les meilleurs individus sont conservés dans la population).

6- Critère d'arrêt : Le processus itératif de sélection, reproduction et remplacement est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, tel qu'un nombre maximal d'itérations, une convergence vers une solution satisfaisante, ou d'autres critères spécifiques au problème.

L'application de ces algorithmes pour résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectives fournit plusieurs solutions, qui seront représentées par le front de Pareto. Ce front aide les ingénieurs à naviguer entre les compromis entre différents critères d'optimisation.

L'objectif principal de cette étude est de maximiser (MRR) tout en minimisant (Ra , Fz , Pc , Ecs). Comme ces objectifs sont de nature conflictuelle, nous ajustons le premier objectif (MRR) pour nous assurer qu'il peut être minimisé. Les fonctions objectives sont décrites comme suit :

Objectif 1 : $1/MRR$

Objectif 2 : Ra

Objectif 3 : Fz

Objectif 4 : Pc

Objectif 5 : Ecs

Le tableau (V.5) présente les résultats de l'optimisation des réponses (Ra , Fz , Pc , Ecs et MRR) obtenues lors de l'usinage de l'EN GJL-350 à l'aide de l'outil de coupe CBN via un algorithme génétique (GA). Le choix de ce matériau de coupe était basé sur les résultats obtenus à partir de l'optimisation en utilisant la fonction de désirabilité dans la section précédente.

La figure (V.2) illustre les graphiques du front de Pareto pour optimiser les paramètres de performance étudiés. Il convient de noter que seule l'énergie de coupe est représentée sur le graphique en fonction de MRR, au lieu de $1/MRR$, afin de visualiser l'effet contradictoire de la variation. Sur le graphique, les points rouges représentent les 80 solutions de Pareto optimales.

Ces solutions sont indépendantes les unes des autres car atteindre des valeurs minimales pour (Ra , Fz , Pc et Ecs) correspond à des valeurs faibles de (MRR).

Par conséquent, il n'y a pas de solution optimale unique, mais plutôt un ensemble de compromis optimaux en fonction des objectifs désirés de l'industrie. Par exemple, le (Ra) est conflictuel par nature avec (MRR), la qualité de surface diminue à mesure que (MRR) augmente. Les solutions obtenues présentent également des tendances de performance similaires (FigV.2). Comme aucune des solutions dans l'ensemble optimal de Pareto ne peut être considérée comme définitivement supérieure aux autres, chacune d'entre elles peut être considérée comme une solution acceptable.

Tableau V.5 : Solutions optimales de Pareto

<i>N°</i>	<i>ap</i>	<i>Vc</i>	<i>f</i>	<i>Ra</i>	<i>Fz</i>	<i>Pc</i>	<i>Ecs</i>	<i>I/MRR</i>
1	0.3775	488.3622	0.1800	1.3959	129.4975	999.1023	1.5214	0.0301
2	0.2088	570.4676	0.0802	0.4206	23.6527	179.2074	2.4356	0.1047
3	0.3918	572.4827	0.1788	1.3019	123.6326	1158.1994	1.3384	0.0249
4	0.2858	517.1558	0.1547	0.9870	87.9986	705.1035	1.5694	0.0437
5	0.2018	504.4618	0.0806	0.4708	25.0036	117.5342	2.5017	0.1219
6	0.2016	504.4619	0.0808	0.4714	25.1054	117.5297	2.5014	0.1218
7	0.2007	487.9083	0.1799	1.3352	85.2571	485.7830	1.0001	0.0568
8	0.2022	618.3113	0.0815	0.3722	24.3715	250.7817	2.4683	0.0982
9	0.3835	563.7706	0.1798	1.3239	125.2354	1123.7778	1.3427	0.0257
10	0.2075	507.6589	0.0806	0.4692	24.7235	134.2319	2.4747	0.1177
11	0.2443	516.7646	0.1199	0.6387	49.7693	425.1641	2.0037	0.0661
12	0.2637	545.4570	0.1374	0.7693	66.0405	571.6899	1.7682	0.0506
13	0.2102	505.1885	0.1766	1.2767	83.5693	504.6869	1.0897	0.0533
14	0.3462	543.3026	0.1674	1.1672	115.9904	960.7660	1.4279	0.0318
15	0.3571	496.1196	0.1795	1.3823	127.7863	956.9476	1.4784	0.0314
16	0.3859	554.3139	0.1748	1.2634	122.2571	1110.7924	1.3540	0.0267
17	0.3224	534.2848	0.1629	1.1051	107.7737	863.0140	1.4737	0.0356
18	0.3760	504.5281	0.1446	0.9059	102.9684	945.6403	1.5381	0.0365
19	0.3947	584.3432	0.1768	1.2626	121.1480	1177.5380	1.3382	0.0245
20	0.3898	572.4845	0.1799	1.3175	124.5193	1153.9498	1.3368	0.0249
21	0.2076	562.2810	0.0864	0.4536	26.6845	190.7414	2.3890	0.0991
22	0.3715	543.5515	0.1681	1.1798	118.2406	1041.7621	1.3987	0.0295
23	0.2428	510.3213	0.1217	0.6491	51.1979	428.9635	1.9983	0.0663
24	0.2936	546.8872	0.1045	0.5650	52.0219	539.6765	1.9747	0.0596
25	0.3561	601.8156	0.0931	0.5049	68.7259	748.8720	2.1833	0.0501
26	0.2084	512.6916	0.0885	0.4961	28.6607	168.7712	2.4079	0.1057
27	0.2490	519.0976	0.1238	0.6631	53.2164	458.6747	1.9480	0.0625
28	0.3588	557.7424	0.1378	0.8115	93.7908	932.5626	1.5599	0.0363
29	0.2892	562.9395	0.1666	1.1260	97.6468	772.5860	1.4856	0.0369
30	0.2054	555.9602	0.0812	0.4378	24.2803	156.3094	2.4290	0.1078
31	0.3760	566.9753	0.1612	1.0680	111.4058	1069.3247	1.4250	0.0291
32	0.3035	581.4527	0.1043	0.5508	56.8524	594.4933	2.0447	0.0543
33	0.3404	540.5961	0.1554	1.0075	105.8884	910.1770	1.5078	0.0350
34	0.2216	516.5498	0.1288	0.6897	54.8006	383.9395	1.8983	0.0678
35	0.2635	573.5447	0.0835	0.4388	31.1028	353.9449	2.2997	0.0792
36	0.2685	563.4681	0.1300	0.7051	61.4114	569.0824	1.8735	0.0509
37	0.3661	518.9266	0.1408	0.8572	98.6958	924.8264	1.5414	0.0374
38	0.2532	520.0524	0.1709	1.2031	87.7844	634.5096	1.2853	0.0444
39	0.3034	531.5109	0.1491	0.9190	90.1397	756.0610	1.6064	0.0416
40	0.2224	512.7550	0.0922	0.5106	30.4671	227.9191	2.3310	0.0952
41	0.2097	513.7771	0.1012	0.5470	36.0855	226.7633	2.2841	0.0918

42	0.2590	560.4056	0.0912	0.4828	33.3798	360.8570	2.2141	0.0756
43	0.2855	523.5951	0.1485	0.9056	82.8078	686.6055	1.6300	0.0450
44	0.2782	505.6401	0.1711	1.2291	97.1372	717.2954	1.3587	0.0415
45	0.3046	498.8460	0.1718	1.2546	108.6744	800.0412	1.4474	0.0383
46	0.3881	546.0970	0.1376	0.8225	95.5008	1011.0918	1.4641	0.0343
47	0.3067	534.1717	0.1687	1.1833	106.8411	822.5015	1.4094	0.0362
48	0.3787	488.3641	0.1800	1.3958	129.5092	1002.1286	1.5210	0.0300
49	0.2103	505.1887	0.1786	1.3089	84.4321	509.8545	1.0617	0.0527
50	0.3779	488.3620	0.1780	1.3671	128.2326	998.0711	1.5297	0.0304
51	0.3796	578.3881	0.1608	1.0546	110.2652	1092.1483	1.4318	0.0283
52	0.2516	551.3972	0.1723	1.2014	86.9578	647.4757	1.3812	0.0418
53	0.3529	511.6392	0.1292	0.7477	88.9811	839.2172	1.6339	0.0429
54	0.3577	522.1804	0.1337	0.7857	92.4451	879.6291	1.5852	0.0400
55	0.3880	542.0906	0.1497	0.9477	104.2658	1043.9806	1.4183	0.0318
56	0.3755	527.6430	0.1718	1.2453	121.9503	1037.8161	1.4037	0.0294
57	0.3490	560.4532	0.1600	1.0553	109.8032	969.9142	1.4756	0.0319
58	0.3870	567.1979	0.1477	0.9101	101.0736	1067.9851	1.4524	0.0308
59	0.2773	553.3634	0.1442	0.8411	75.7045	651.0502	1.6951	0.0452
60	0.2022	610.7041	0.0813	0.3804	24.2393	235.0757	2.4775	0.0997
61	0.2144	540.6630	0.0872	0.4745	27.2390	191.0551	2.3652	0.0989
62	0.2492	497.6228	0.1712	1.2195	87.6826	620.0753	1.2850	0.0471
63	0.2184	522.6929	0.1348	0.7326	58.5026	397.8358	1.8000	0.0650
64	0.3931	578.0707	0.1784	1.2903	122.8439	1168.0121	1.3376	0.0247
65	0.2911	563.5820	0.1634	1.0813	96.0596	770.9465	1.5188	0.0373
66	0.3345	535.7135	0.1674	1.1706	114.2546	914.7632	1.4356	0.0333
67	0.2831	528.1865	0.1261	0.6897	63.4577	594.6772	1.8460	0.0530
68	0.2795	559.7609	0.1061	0.5624	47.9153	500.3402	2.0298	0.0602
69	0.3613	590.1120	0.1686	1.1473	115.4437	1057.7702	1.4293	0.0278
70	0.3340	567.3635	0.1278	0.7168	82.2327	809.9177	1.7158	0.0413
71	0.2020	509.3353	0.0855	0.4864	27.4077	137.2639	2.4587	0.1137
72	0.3569	556.3719	0.1291	0.7397	87.5986	891.3187	1.6128	0.0390
73	0.2229	511.3781	0.1171	0.6207	46.7054	339.2209	2.0763	0.0749
74	0.3642	568.5391	0.1461	0.8883	99.6532	989.3848	1.5226	0.0331
75	0.4000	590.1129	0.1792	1.2890	122.0657	1202.7367	1.3152	0.0236
76	0.3217	529.2968	0.1266	0.7113	78.3733	739.5364	1.7277	0.0464
77	0.2084	512.6919	0.0895	0.4999	29.2006	172.8541	2.4000	0.1046
78	0.3225	529.2968	0.1286	0.7265	80.1563	750.4192	1.7142	0.0456
79	0.2352	514.8485	0.1535	0.9414	73.1823	521.3796	1.5154	0.0538
80	0.2020	504.4176	0.1016	0.5518	37.0895	205.5291	2.3143	0.0967

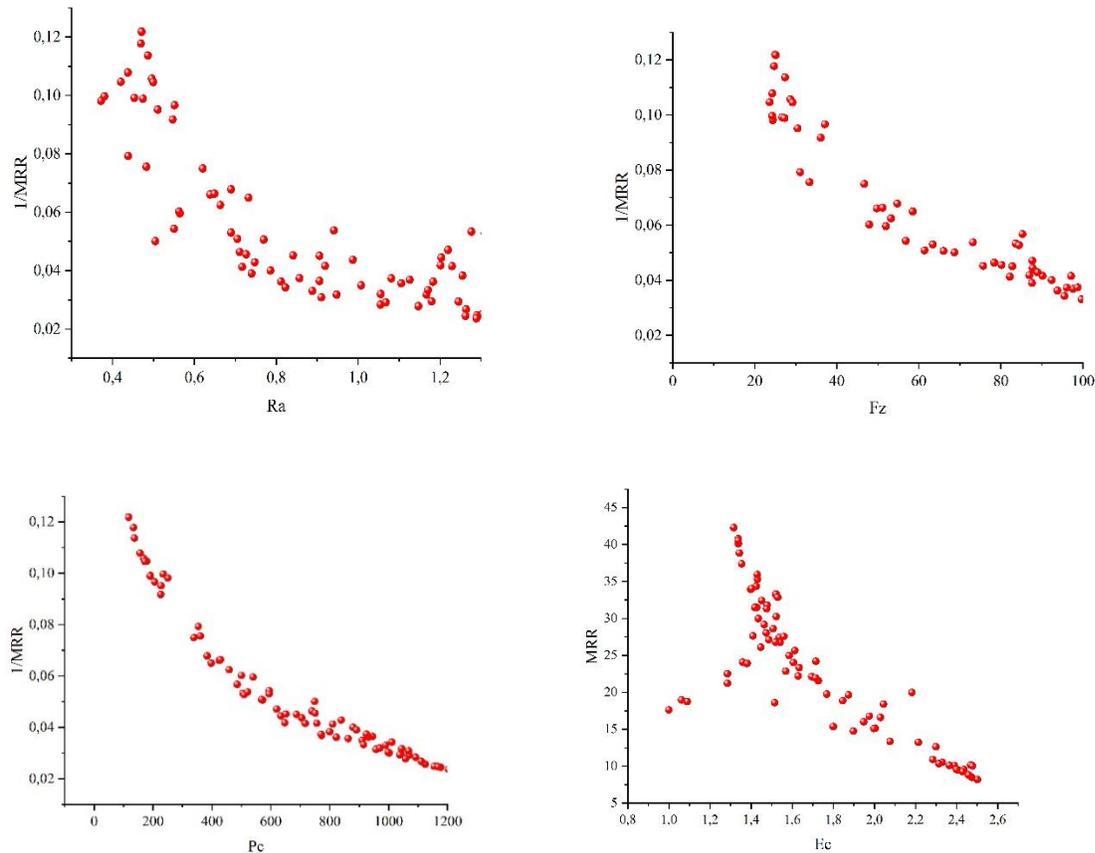


Figure V.2 Graphiques du front de Pareto

V.4 Optimisation par les méthodes MCDM

Les méthodes MCDM (Multi-Criteria Decision Making) sont des techniques utilisées pour prendre des décisions lorsque plusieurs critères doivent être pris en compte simultanément. Elles permettent de comparer et d'évaluer différentes alternatives en fonction de multiples critères souvent contradictoires [95].

Les méthodes MCDM sont largement utilisées dans de nombreux domaines, notamment en usinage [96-99], pour la sélection des paramètres intervenant lors d'un processus d'usinage.

L'utilisation du signal sur bruit de Taguchi en MCDM (Multi-Criteria Decision Making) implique l'intégration des concepts de l'analyse de Taguchi, qui est principalement utilisée pour l'amélioration de la qualité des processus. La méthode de Taguchi utilise le rapport signal sur bruit (S/N ratio) pour évaluer la performance d'un processus ou d'un produit.

Dans notre étude, le rapport signal/bruit (S/N) des paramètres technologiques (Ra , Fz , Pc et MRR) selon les équations (V.4) et (V.5) [100].

Les objectifs recherchés incluent la minimisation de la rugosité de surface (Ra) et de la consommation d'énergie (Fz et Pc), ainsi que la maximisation de la productivité (MRR) simultanément.

Plus petit est mieux (minimisation) $\frac{S}{N} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2\right)$ (V.4)

Plus grand est le mieux (maximisation) $\frac{S}{N} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)$ (V.5)

Où n est le nombre d'observations et y_i les données observées.

La mise en œuvre de ces techniques se résume comme suit :

1- **Calcul du S/N ratio** : Le rapport signal sur bruit (S/N ratio) est calculé pour chaque critère en utilisant les mesures de performance.

2-**Evaluation multi-critères** : Les S/N ratios obtenus pour chaque critère sont ensuite utilisés dans le cadre des méthodes MCDM pour évaluer et comparer les différentes solutions. Des méthodes telles que MARCOS, GRA, TOPSIS, et VIKOR sont utilisées pour sélectionner les meilleures solutions (régime de coupe) en fonction de leurs performances.

V.4.1 Méthode MARCOS

La méthode MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution) est une approche basée sur la méthode d'aide à la décision multicritères pour évaluer la meilleure solution possible. La prise de décision multicritères à l'aide de la méthode MARCOS s'effectue selon les étapes suivantes [72] :

Étape 1 : Former une matrice de prise de décision initiale :

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{V.6}$$

Où m est le numéro de l'alternative, n est le numéro du critère et x_{mn} est la valeur du rapport (S/N) du critère n de l'alternative m.

Étape 2 : Création d'une matrice initiale étendue en ajoutant une solution idéale (IA) et anti-idéale (AAI) dans la matrice de prise de décision initiale.

$$X = \begin{matrix} AAI \\ A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \\ AI \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{aa1} & x_{aan} \\ x_{11} & x_{1n} \\ x_{21} & x_{2n} \\ \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{mn} \\ x_{ai1} & x_{ain} \end{bmatrix} \tag{V.7}$$

Dans l'équation ci-dessus $AAI = \min(x_{ij})$ et $AI = \max(x_{ij})$, si le critère j est plus grand c'est mieux ; $AAI = \max(x_{ij})$ et $AI = \min(x_{ij})$ si le critère j est plus petit c'est mieux ; $i = 1, 2, \dots, M$; $j = 1, 2, \dots, N$.

Étape 3 : Normalisation de la matrice initiale étendue (X). La matrice normalisée $N = [n_{ij}]_{m \times n}$ peut être déterminée par :

$$U_{ij} = x_{AI} / x_{ij} \quad \text{Si le plus petit est meilleur (V.8)}$$

$$U_{ij} = x_{ij} / x_{AI} \quad \text{Si plus grand est meilleur (V.9)}$$

Dans le tableau (V.6) sont consignées les valeurs du S/N calculés selon les équations (V.4) et (V.5) ainsi que les résultats de la normalisation calculés selon les équations (V.8) et (V.9)

Tableau V.6 : Résultats du S/N et la normalisation des critères de sortie.

N°	S/N				Normalisation			
	Ra (dB)	Fz (dB)	Pc (dB)	MRR (dB)	Ra	Fz	Pc	MRR
1	4.436	-34.805	-52.306	17.146	0.611	2.047	1.462	0.544
2	1.784	-36.444	-55.201	21.168	0.246	2.143	1.543	0.672
3	0.026	-37.592	-57.446	24.360	0.003	2.211	1.606	0.774
4	-3.118	-38.294	-59.122	27.516	-0.430	2.252	1.653	0.874
5	6.816	-33.595	-51.097	17.146	0.940	1.976	1.428	0.544
6	5.000	-34.389	-53.146	21.168	0.689	2.022	1.486	0.672
7	1.780	-35.172	-55.026	24.360	0.245	2.068	1.538	0.774
8	-2.312	-36.611	-57.439	27.516	-0.318	2.153	1.606	0.874
9	4.590	-34.190	-51.691	19.912	0.633	2.011	1.445	0.632
10	6.782	-29.289	-48.046	18.402	0.935	1.722	1.343	0.584
11	-0.855	-38.927	-58.781	26.543	-0.117	2.289	1.643	0.843
12	3.185	-35.296	-56.124	25.334	0.439	2.076	1.569	0.805
13	5.278	-29.484	-46.985	19.912	0.728	1.734	1.313	0.632
14	6.650	-17.000	-35.757	18.402	0.917	1	1	0.584
15	-0.522	-32.428	-52.282	26.543	-0.072	1.907	1.462	0.843
16	3.484	-25.008	-45.836	25.334	0.480	1.471	1.281	0.805
17	-4.375	-42.810	-60.311	30.210	-0.603	2.518	1.686	0.960
18	-0.544	-41.241	-59.998	29.283	-0.075	2.425	1.677	0.930
19	2.094	-40.529	-60.383	28.286	0.288	2.384	1.688	0.898
20	7.091	-39.470	-60.298	26.493	0.978	2.321	1.686	0.841
21	-2.788	-43.224	-60.726	30.210	-0.384	2.542	1.698	0.960
22	2.721	-41.566	-60.323	29.283	0.375	2.444	1.687	0.930
23	5.288	-40.132	-59.986	28.286	0.729	2.360	1.677	0.898
24	6.725	-39.072	-59.900	26.493	0.927	2.298	1.675	0.841
25	2.475	-40.455	-57.957	28.028	0.341	2.379	1.620	0.890
26	-0.999	-42.320	-61.077	31.466	-0.136	2.489	1.708	1
27	5.005	-37.725	-57.579	25.520	0.690	2.219	1.610	0.811
28	3.818	-37.538	-58.366	29.259	0.526	2.208	1.632	0.929
29	3.523	-38.057	-55.558	28.028	0.486	2.238	1.553	0.890
30	-2.542	-39.240	-57.997	2.922	-0.350	2.308	1.621	0.092

31	7.250	-33.803	-53.657	25.520	1	1.988	1.500	0.811
32	6.339	-36.411	-57.239	29.259	0.874	2.141	1.600	0.929

Étape 4 : Détermination de la matrice normalisée pondérée à l'aide de l'équation suivante :

$$C_{ij} = u_{ij} \cdot w_j \tag{V.10}$$

Où w_j est le coefficient de pondération du critère j. $w_j = 0.25$

$$S_i = \sum_{j=1}^m C_{ij} \tag{V.11}$$

Le tableau (V.7) présente les valeurs normalisées pondérées pour les différents paramètres de performance, la valeur de S_i est calculée selon l'équation (V.11)

Tableau V.7 : Normalisation pondérée pour les paramètres de performance

Critères de pondération				Si
Ra	Fz	Pc	MRR	
0.1530	0.5118	0.3657	0.1362	1.167
0.0615	0.5359	0.3859	0.1682	1.152
0.0009	0.5528	0.4016	0.1935	1.149
-0.1075	0.5631	0.4134	0.2186	1.088
0.2351	0.4940	0.3572	0.1362	1.223
0.1724	0.5057	0.3716	0.1682	1.218
0.0614	0.5172	0.3847	0.1935	1.157
-0.0797	0.5384	0.4016	0.2186	1.079
0.1583	0.5028	0.3614	0.1582	1.181
0.2339	0.4307	0.3359	0.1462	1.147
-0.0295	0.5724	0.4110	0.2109	1.165
0.1098	0.5191	0.3924	0.2013	1.223
0.1820	0.4336	0.3285	0.1582	1.102
0.2293	0.2500	0.2500	0.1462	0.876
-0.0180	0.4769	0.3655	0.2109	1.035
0.1202	0.3678	0.3205	0.2013	1.010
-0.1509	0.6295	0.4217	0.2400	1.140
-0.0188	0.6065	0.4195	0.2327	1.240
0.0722	0.5960	0.4222	0.2247	1.315
0.2445	0.5804	0.4216	0.2105	1.457
-0.0961	0.6356	0.4246	0.2400	1.204
0.0938	0.6112	0.4218	0.2327	1.359
0.1823	0.5902	0.4194	0.2247	1.417
0.2319	0.5746	0.4188	0.2105	1.436
0.0854	0.5949	0.4052	0.2227	1.308

-0.0342	0.6223	0.4270	0.2500	1.265
0.1726	0.5548	0.4026	0.2028	1.333
0.1317	0.5520	0.4081	0.2325	1.324
0.1215	0.5596	0.3884	0.2227	1.292
-0.0877	0.5770	0.4055	0.2500	1.145
0.2500	0.4971	0.3751	0.2028	1.325
0.2186	0.5354	0.4002	0.2325	1.387

Étape 5 : Détermination du degré d'utilité des alternatives K_i^- et K_i^+ en :

$$K_i^- = S_i/S_{AAI} \quad (\text{V.12})$$

$$K_i^+ = S_i/S_{AI} \quad (\text{V.13})$$

Étape 6 : Calcul de la fonction d'utilité des alternatives $f(K_i)$ par :

$$F(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1-f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1-f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (\text{V.14})$$

Où $f(K_i^-)$ est la fonction d'utilité liée à la solution anti-idéale ; $f(K_i^+)$ est la fonction d'utilité liée à la solution idéale. Ces fonctions peuvent être trouvées par :

$$f(K_i^-) = K_i^+ / (K_i^+ + K_i^i) \quad (\text{V.15})$$

$$f(K_i^+) = K_i^- / (K_i^+ + K_i^i) \quad (\text{V.16})$$

Étape 7 : Classement des alternatives en fonction des valeurs finales des fonctions d'utilité pour trouver une alternative avec la valeur la plus élevée possible de la fonction d'utilité $F(K_i)$, correspondant à la combinaison optimale. Dans le tableau (V.8) sont exposés les différents résultats trouvés ainsi que la valeur la plus élevée de $f(K_i)$ correspondant à l'essai N° 14, qui indique la meilleure combinaison de paramètres d'usinage. Le régime optimal correspond à $v_c = 520$ m/min ; $f = 0.08$ mm/tr ; $ap = 0.2$ mm et le matériau M4 c'est-à-dire CBN 7050. Les sorties qui correspondent au régime optimal sont : $Ra = 0.465$ μm , $Fz = 7.08$ N, $Pc = 61.36$ W et $MRR = 8.32$ cm^3/min .

Tableau V.8 : Résultats calculés et classement des alternatives par la méthode MARCOS

N° essais	K-	K+	$f(k+)$	$f(K-)$	$f(Ki)$	Rang
1	-0.0347	0.0487	3.4853	-2.4853	-0.0125	14
2	-0.0332	0.0465	3.4853	-2.4853	-0.0120	10
3	-0.0324	0.0454	3.4853	-2.4853	-0.0117	8
4	-0.0292	0.0410	3.4853	-2.4853	-0.0105	3
5	-0.0375	0.0526	3.4853	-2.4853	-0.0135	21
6	-0.0367	0.0514	3.4853	-2.4853	-0.0132	20
7	-0.0335	0.0469	3.4853	-2.4853	-0.0121	11
8	-0.0294	0.0412	3.4853	-2.4853	-0.0106	4
9	-0.0355	0.0498	3.4853	-2.4853	-0.0128	16

10	-0.0351	0.0493	3.4853	-2.4853	-0.0127	15
11	-0.0327	0.0458	3.4853	-2.4853	-0.0118	9
12	-0.0360	0.0505	3.4853	-2.4853	-0.0130	18
13	-0.0335	0.0470	3.4853	-2.4853	-0.0121	12
14	-0.0271	0.0380	3.4853	-2.4853	-0.0098	1
15	-0.0290	0.0407	3.4853	-2.4853	-0.0105	2
16	-0.0299	0.0419	3.4853	-2.4853	-0.0108	5
17	-0.0312	0.0437	3.4853	-2.4853	-0.0112	6
18	-0.0356	0.0499	3.4853	-2.4853	-0.0128	17
19	-0.0387	0.0543	3.4853	-2.4853	-0.0140	22
20	-0.0449	0.0629	3.4853	-2.4853	-0.0162	32
21	-0.0338	0.0474	3.4853	-2.4853	-0.0122	13
22	-0.0406	0.0570	3.4853	-2.4853	-0.0147	27
23	-0.0432	0.0606	3.4853	-2.4853	-0.0156	30
24	-0.0441	0.0618	3.4853	-2.4853	-0.0159	31
25	-0.0391	0.0549	3.4853	-2.4853	-0.0141	23
26	-0.0363	0.0509	3.4853	-2.4853	-0.0131	19
27	-0.0403	0.0565	3.4853	-2.4853	-0.0145	26
28	-0.0397	0.0557	3.4853	-2.4853	-0.0143	25
29	-0.0392	0.0549	3.4853	-2.4853	-0.0141	24
30	-0.0320	0.0449	3.4853	-2.4853	-0.0116	7
31	-0.0412	0.0577	3.4853	-2.4853	-0.0149	28
32	-0.0428	0.0600	3.4853	-2.4853	-0.0154	29

V.4.2 Méthode de GRA

GRA (Grey Relational Analysis) est une technique d'optimisation multi-réponse utilisée pour déterminer une solution appropriée aux problèmes complexes et particulièrement dans le domaine industriel. Ici, les différentes réponses sont converties en une seule réponse. Les principales étapes de cette méthode sont [101-103] :

Étape 1. Normalisation des résultats expérimentaux.

Normalisation des réponses (**Ra**, **Fz**, **Pc** et MRR) dans l'intervalle [0. 1] en utilisant Eq. (V.17) pour la maximisation de **Ra**, **Fz**, **Pc** et MRR car les paramètres optimisés sont représentés par les rapports (S/N). Le tableau V.9 explore les résultats de la première étape de cette méthode.

$$\text{Maximisation} \quad x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{V.17})$$

Tableau V.9: Normalisation de la matrice de décision

<i>Normalisation</i>			
<i>Ra</i>	<i>Fz</i>	<i>PC</i>	<i>MRR</i>
0.758	0.321	0.346	0
0.530	0.259	0.232	0.281
0.379	0.215	0.143	0.504
0.108	0.188	0.077	0.724
0.963	0.367	0.394	0
0.807	0.337	0.313	0.281
0.529	0.307	0.239	0.504
0.178	0.252	0.144	0.724
0.771	0.345	0.371	0.193
0.960	0.531	0.515	0.088
0.303	0.164	0.091	0.656
0.650	0.302	0.196	0.572
0.830	0.524	0.557	0.193
0.948	1	1.000	0.088
0.331	0.412	0.347	0.656
0.676	0.695	0.602	0.572
0	0.016	0.030	0.912
0.330	0.076	0.043	0.848
0.557	0.103	0.027	0.778
0.986	0.143	0.031	0.653
0.163	0	0.014	0.912
0.498	0.063	0.030	0.848
0.731	0.118	0.043	0.778
0.955	0.158	0.047	0.653
0.589	0.106	0.123	0.760
0.291	0.034	0.000	1
0.948	0.210	0.138	0.585
0.705	0.217	0.107	0.846
0.687	0.197	0.218	0.760
0.266	0.152	0.122	1
1	0.359	0.293	0.585
0.771	0.260	0.152	0.846

Étape 2. Calcul du coefficient relationnel de Grey (GRC).

Le GRC a été calculé en utilisant l'Eq. (V.18).

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \Psi \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \Psi \Delta_{max}} \quad (\text{V.18})$$

$\Delta_{0i}(k)$ est la différence absolue entre la séquence de référence $x_0^k(k)$ et le rapport (S/N) de la séquence mesurée $x_i^k(k)$.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \tag{V.19}$$

$$\Delta_{min}(k) = \min \min \|x_0(k) - x_i(k)\| \tag{V.20}$$

$$\Delta_{max}(k) = \max \max \|x_0(k) - x_i(k)\| \tag{V.21}$$

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

Étape 3. Calcul du Grade relationnel gris (GRG). Il représente la moyenne pondérée des différents GRG (Eq(V.22)).

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \tag{V.22}$$

Où n est le nombre de résultats.

Étape 4. Détermination des paramètres de coupe optimaux selon les résultats du GRG (tableau V.10). La combinaison optimale correspond à la valeur maximale du critère (GRG) parmi les 32 essais du plan d'expérience. Le régime optimal est défini par l'essai N°14, il est semblable à la méthode MARCOS.

Tableau V.10 : Calcul des coefficients (GRC) et (GRG) et le classement des alternatives

N° essais	Séquence de déviation				Coefficient (GRC)				GRG	Rank
	Ra	Fz	Pc	MRR	Ra	Fz	Pc	MRR		
1	0.242	0.679	0.654	1.000	0.674	0.424	0.433	0.333	0.466	25
2	0.470	0.741	0.768	0.719	0.515	0.403	0.394	0.410	0.431	31
3	0.621	0.785	0.857	0.496	0.446	0.389	0.369	0.502	0.426	32
4	0.892	0.812	0.923	0.276	0.359	0.381	0.351	0.644	0.434	30
5	0.037	0.633	0.606	1.000	0.930	0.441	0.452	0.333	0.539	10
6	0.193	0.663	0.687	0.719	0.721	0.430	0.421	0.410	0.496	16
7	0.471	0.693	0.761	0.496	0.515	0.419	0.397	0.502	0.458	27
8	0.822	0.748	0.856	0.276	0.378	0.401	0.369	0.644	0.448	28
9	0.229	0.655	0.629	0.807	0.686	0.433	0.443	0.383	0.486	19
10	0.040	0.469	0.485	0.912	0.926	0.516	0.507	0.354	0.576	4
11	0.697	0.836	0.909	0.344	0.418	0.374	0.355	0.593	0.435	29
12	0.350	0.698	0.804	0.428	0.588	0.417	0.383	0.539	0.482	20
13	0.170	0.476	0.443	0.807	0.747	0.512	0.530	0.383	0.543	9
14	0.052	0	0	0.912	0.907	1	1.000	0.354	0.815	1
15	0.669	0.588	0.653	0.344	0.428	0.459	0.434	0.593	0.478	22
16	0.324	0.305	0.398	0.428	0.607	0.621	0.557	0.539	0.581	3
17	1.000	0.984	0.970	0.088	0.333	0.337	0.340	0.851	0.465	26

18	0.670	0.924	0.957	0.152	0.427	0.351	0.343	0.766	0.472	24
19	0.443	0.897	0.973	0.222	0.530	0.358	0.340	0.692	0.480	21
20	0.014	0.857	0.969	0.347	0.973	0.369	0.340	0.590	0.568	5
21	0.837	1	0.986	0.088	0.374	0.333	0.336	0.851	0.474	23
22	0.502	0.937	0.970	0.152	0.499	0.348	0.340	0.766	0.488	17
23	0.269	0.882	0.957	0.222	0.650	0.362	0.343	0.692	0.512	15
24	0.045	0.842	0.953	0.347	0.917	0.373	0.344	0.590	0.556	6
25	0.411	0.894	0.877	0.240	0.549	0.359	0.363	0.676	0.487	18
26	0.709	0.966	1.000	0.000	0.414	0.341	0.333	1.000	0.522	13
27	0.052	0.790	0.862	0.415	0.907	0.388	0.367	0.546	0.552	8
28	0.295	0.783	0.893	0.154	0.629	0.390	0.359	0.764	0.535	11
29	0.313	0.803	0.782	0.240	0.615	0.384	0.390	0.676	0.516	14
30	0.734	0.848	0.878	0.000	0.405	0.371	0.363	1.000	0.535	12
31	0.000	0.641	0.707	0.415	1.000	0.438	0.414	0.546	0.600	2
32	0.229	0.740	0.848	0.154	0.685	0.403	0.371	0.764	0.556	7

V.4.3 Méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) est une méthode très appliquée dans le domaine de l'usinage des matériaux. L'utilisation de cette méthode est donnée par les étapes suivantes [104, 105] :

Étape 1 : Formation de la matrice de prise de décision initiale (tableau 6)

Étape 2 : Détermination des valeurs normalisées K_{ij} en utilisant l'équation (V.23):

$$K_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (\text{V.23})$$

Étape 3 : Identification de la matrice de décision normalisée pondérée en :

$$I_{ij} = w_j \cdot k_{ij} \quad (\text{V.24})$$

Le tableau (V.11) correspond aux résultats trouvés des trois étapes précédentes.

Tableau V.11 : Matrice normalisée pondérée

Normalisation				Poids			
<i>Ra</i>	<i>Fz</i>	<i>Pc</i>	<i>MRR</i>	<i>wRa</i>	<i>wFz</i>	<i>wPc</i>	<i>WMRR</i>
0.1852	-0.1676	-0.1657	0.1171	0.0463	-0.0419	-0.0414	0.0293
0.0745	-0.1755	-0.1748	0.1445	0.0186	-0.0439	-0.0437	0.0361
0.0011	-0.1810	-0.1819	0.1663	0.0003	-0.0453	-0.0455	0.0416
-0.1302	-0.1844	-0.1872	0.1878	-0.0326	-0.0461	-0.0468	0.0470
0.2846	-0.1618	-0.1618	0.1171	0.0711	-0.0404	-0.0405	0.0293
0.2088	-0.1656	-0.1683	0.1445	0.0522	-0.0414	-0.0421	0.0361
0.0743	-0.1694	-0.1743	0.1663	0.0186	-0.0423	-0.0436	0.0416
-0.0965	-0.1763	-0.1819	0.1878	-0.0241	-0.0441	-0.0455	0.0470

0.1916	-0.1647	-0.1637	0.1359	0.0479	-0.0412	-0.0409	0.0340
0.2832	-0.1411	-0.1522	0.1256	0.0708	-0.0353	-0.0380	0.0314
-0.0357	-0.1875	-0.1862	0.1812	-0.0089	-0.0469	-0.0465	0.0453
0.1330	-0.1700	-0.1778	0.1729	0.0332	-0.0425	-0.0444	0.0432
0.2203	-0.1420	-0.1488	0.1359	0.0551	-0.0355	-0.0372	0.0340
0.2777	-0.0819	-0.1132	0.1256	0.0694	-0.0205	-0.0283	0.0314
-0.0218	-0.1562	-0.1656	0.1812	-0.0055	-0.0390	-0.0414	0.0453
0.1455	-0.1204	-0.1452	0.1729	0.0364	-0.0301	-0.0363	0.0432
-0.1827	-0.2062	-0.1910	0.2062	-0.0457	-0.0515	-0.0478	0.0516
-0.0227	-0.1986	-0.1900	0.1999	-0.0057	-0.0497	-0.0475	0.0500
0.0875	-0.1952	-0.1912	0.1931	0.0219	-0.0488	-0.0478	0.0483
0.2961	-0.1901	-0.1910	0.1809	0.0740	-0.0475	-0.0477	0.0452
-0.1034	-0.2082	-0.1923	0.2062	-0.0259	-0.0520	-0.0481	0.0516
0.0589	-0.2002	-0.1910	0.1999	0.0147	-0.0500	-0.0478	0.0500
0.1722	-0.1933	-0.1900	0.1931	0.0430	-0.0483	-0.0475	0.0483
0.2808	-0.1882	-0.1897	0.1809	0.0702	-0.0470	-0.0474	0.0452
0.1034	-0.1948	-0.1836	0.1913	0.0258	-0.0487	-0.0459	0.0478
-0.0414	-0.2038	-0.1934	0.2148	-0.0104	-0.0510	-0.0484	0.0537
0.2777	-0.1817	-0.1824	0.1742	0.0694	-0.0454	-0.0456	0.0436
0.1594	-0.1808	-0.1848	0.1997	0.0399	-0.0452	-0.0462	0.0499
0.1507	-0.1833	-0.1760	0.1913	0.0377	-0.0458	-0.0440	0.0478
-0.0538	-0.1890	-0.1837	0.2148	-0.0135	-0.0472	-0.0459	0.0537
0.3027	-0.1628	-0.1699	0.1742	0.0757	-0.0407	-0.0425	0.0436
0.1913	-0.1754	-0.1813	0.1997	0.0478	-0.0438	-0.0453	0.0499

Étape 4 : Trouver la meilleure alternative A^+ et la mauvaise alternative A^- par les équations suivantes :

$$A^+ = \{I_1^+ . I_2^+ \dots I_j^+ \dots I_m^+\} \tag{V.25}$$

$$A^- = \{I_1^- . I_2^- \dots I_j^- \dots I_m^-\} \tag{27}$$

où I_j^+ et I_j^- sont les meilleures et les mauvaises valeurs du critère j (j = 1. 2. n).

Étape 5 : Déterminer les valeurs des meilleures options D_i^+ et des pires options D_i^- en :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (I_{ij} - I_j^+)^2} \quad i = 1. 2 \dots m$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (I_{ij} - I_j^-)^2} \quad i = 1. 2 \dots m \tag{V.26}$$

Étape 6 : Calcul des valeurs R_i de chaque alternative en :

$$R_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad i = 1. 2 \dots m; 0 < R_i \leq 1 \tag{V.27}$$

Étape 7 : Classement de l'ordre des alternatives en maximisant la valeur de R.

Le tableau (V.12) récapitule les différents résultats trouvés ainsi que l'ordre de classement. Il est clair que l'essai N°31 correspond à la combinaison optimale qui donne le régime suivant : $V_c = 590$

m/min ; $f = 0.08$ mm/tr ; $ap = 0.4$ mm et le Matériau CBN. Cette combinaison conduit aux réponses suivantes : $Ra = 0.434$ μm ; $Fz = 49$ N ; $Pc = 481.833$ W et $MRR = 18.88$ cm^3/min

Tableau V.12 Résultats de l'optimisation par la méthodeTOPSIS.

<i>N° essais</i>	<i>s+</i>	<i>s-</i>	<i>Relative</i>	<i>Classement</i>
1	0.0457	0.0655	0.5888	15
2	0.0659	0.0474	0.4182	26
3	0.0821	0.0194	0.1914	32
4	0.1130	0.1183	0.5116	19
5	0.0341	0.0989	0.7434	4
6	0.0386	0.0658	0.6304	13
7	0.0642	0.0271	0.2966	30
8	0.1042	0.0956	0.4785	21
9	0.0418	0.1173	0.7373	5
10	0.0289	0.0417	0.5910	14
11	0.0909	0.0807	0.4704	22
12	0.0515	0.1022	0.6649	10
13	0.0334	0.1169	0.7776	2
14	0.0232	0.0550	0.7036	8
15	0.0847	0.0849	0.5007	20
16	0.0426	0.0287	0.4025	27
17	0.1268	0.0458	0.2653	31
18	0.0886	0.0707	0.4437	23
19	0.0641	0.1212	0.6542	11
20	0.0344	0.0258	0.4289	25
21	0.1082	0.0644	0.3732	29
22	0.0706	0.0911	0.5636	17
23	0.0473	0.1175	0.7129	7
24	0.0343	0.0734	0.6819	9
25	0.0602	0.0401	0.3999	28
26	0.0934	0.1177	0.5574	18
27	0.0326	0.0870	0.7274	6
28	0.0472	0.0862	0.6460	12
29	0.0487	0.0380	0.4382	24
30	0.0947	0.1239	0.5667	16
31	0.0267	0.0955	0.7814	1
32	0.0403	0.1234	0.7538	3

V.4.4 Méthode VIKOR

La méthode VIKOR est une méthode d’optimisation multi-objective répondue aussi dans différentes disciplines de la science et de la technologie [106]. L’utilisation de cette méthode passe par les étapes suivantes [107] :

Étape 1 : Déterminez la meilleure valeur y^* et la mauvaise valeur y_j^- de tous les critères

Si le critère J est positif, alors $y_j^* = \max y_{ij}$ et $y_j^- = \min y_{ij}$ (V.28)

Si le critère J est négatif, alors $y_j^* = \min y_{ij}$ et $y_j^- = \max y_{ij}$

Étape 2 : Calculez les valeurs r_{ij} , S_i , R_i selon les formules suivantes.

$$r_{ij} = (|y_j^* - y_{ij}|) / (|y_j^* - y_j^-|) \tag{V.29}$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n (|y_j^* - y_{ij}|) / (|y_j^* - y_j^-|) = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \tag{V.30}$$

$$R_i = \max [w_j (|y_j^* - y_{ij}|) / (|y_j^* - y_j^-|)] = \max [w_j r_{ij}] \tag{V.31}$$

Le tableau (V.13) présentes des résultats de l’étape de normalisation

Tableau V.13 Résultats de l’étape de normalisation

Normalisation				rij			
Ra	Fz	Pc	MRR	Ra	Fz	Pc	MRR
0.185	-0.111	-0.166	0.117	0.080	0.000	0.216	0.330
0.074	-0.176	-0.175	0.145	0.155	0.256	0.253	0.237
0.001	-0.183	-0.182	0.166	0.205	0.284	0.283	0.164
-0.130	-0.189	-0.187	0.188	0.294	0.305	0.305	0.091
0.285	-0.163	-0.162	0.117	0.012	0.205	0.200	0.330
0.209	-0.170	-0.168	0.145	0.064	0.230	0.227	0.237
0.074	-0.176	-0.174	0.166	0.155	0.254	0.251	0.164
-0.097	-0.183	-0.182	0.188	0.271	0.284	0.283	0.091
0.192	-0.165	-0.164	0.136	0.075	0.212	0.208	0.266
0.283	-0.153	-0.152	0.126	0.013	0.166	0.160	0.301
-0.036	-0.188	-0.186	0.181	0.230	0.301	0.300	0.113
0.133	-0.179	-0.178	0.173	0.115	0.268	0.265	0.141
0.220	-0.150	-0.149	0.136	0.056	0.153	0.146	0.266
0.278	-0.114	-0.113	0.126	0.017	0.012	0.000	0.301
-0.022	-0.167	-0.166	0.181	0.221	0.220	0.215	0.113
0.145	-0.146	-0.145	0.173	0.107	0.139	0.131	0.141
-0.183	-0.192	-0.191	0.206	0.330	0.320	0.320	0.029
-0.023	-0.191	-0.190	0.200	0.221	0.316	0.316	0.050
0.087	-0.193	-0.191	0.193	0.146	0.321	0.321	0.073
0.296	-0.192	-0.191	0.181	0.005	0.320	0.320	0.115

-0.103	-0.194	-0.192	0.206	0.276	0.326	0.325	0.029
0.059	-0.193	-0.191	0.200	0.166	0.321	0.320	0.050
0.172	-0.191	-0.190	0.193	0.089	0.316	0.316	0.073
0.281	-0.191	-0.190	0.181	0.015	0.315	0.315	0.115
0.103	-0.185	-0.184	0.191	0.136	0.291	0.289	0.079
-0.041	-0.195	-0.193	0.215	0.234	0.330	0.330	0.000
0.278	-0.184	-0.182	0.174	0.017	0.286	0.284	0.137
0.159	-0.186	-0.185	0.200	0.097	0.296	0.295	0.051
0.151	-0.177	-0.176	0.191	0.103	0.261	0.258	0.079
-0.054	-0.185	-0.184	0.215	0.242	0.291	0.290	0.000
0.303	-0.171	-0.170	0.174	0.000	0.237	0.233	0.137
0.191	-0.183	-0.181	0.200	0.076	0.282	0.280	0.051

Étape 3 : Calculer la valeur de Q_i

$$Q_i = v(S_i - S^*) / (S^- - S^*) + (1 - v)(R_i - R^*) / (R^- - R^*) \quad (\text{V.32})$$

Avec $0 \leq v \leq 1$ où v est le poids du groupe positif, $v = 0,5$

$(1 - v)$ est le poids du groupe négatif

$$S^* = \min S_i, S^- = \max S_i \quad (\text{V.33})$$

$$R^* = \min R_i, R^- = \max R_i \quad (\text{V.34})$$

Étape 4 : Classer les options selon le principe que l'option avec le Q_i minimum est la meilleure

Le tableau (V.14) récapitule les différents résultats trouvés (S_i , R_i et Q_i) ainsi que l'ordre de classement. Il est clair que l'essai N°16 correspond à la combinaison optimale suivante : $V_c = 660$ m/min

; $f = 0.14$ mm/tr ; $ap = 0.2$ mm et le matériau CBN. Cette combinaison conduit aux réponses suivantes :

$Ra = 0.66$ μm ; $Fz = 17.8$ N ; $Pc = 195.8$ W et $MRR = 18.84$ Cm^3/min

Tableau V.14 : Résultats calculés et classement des alternatives par la méthode VIKOR

<i>Essais</i>	<i>S_i</i>	<i>R_i</i>	<i>Q_i</i>	<i>Classement</i>
1	0.474	0.250	0.721	15
2	0.683	0.194	0.732	16
3	0.709	0.215	0.832	24
4	0.754	0.231	0.932	30
5	0.566	0.250	0.811	22
6	0.574	0.180	0.574	6
7	0.624	0.192	0.668	11
8	0.704	0.215	0.827	23
9	0.577	0.202	0.653	9
10	0.485	0.228	0.655	10
11	0.716	0.228	0.883	27
12	0.598	0.203	0.679	13

13	0.471	0.202	0.549	5
14	0.250	0.228	0.423	2
15	0.583	0.167	0.538	4
16	0.393	0.107	0.141	1
17	0.757	0.250	1.000	32
18	0.685	0.240	0.893	28
19	0.653	0.243	0.874	26
20	0.575	0.243	0.795	20
21	0.724	0.247	0.956	31
22	0.649	0.243	0.868	25
23	0.602	0.240	0.810	21
24	0.575	0.239	0.782	19
25	0.602	0.220	0.743	17
26	0.677	0.250	0.921	29
27	0.549	0.217	0.678	12
28	0.560	0.224	0.715	14
29	0.531	0.197	0.594	7
30	0.624	0.221	0.766	18
31	0.460	0.179	0.460	3
32	0.521	0.213	0.640	8

V.4.5 Comparaison des méthodes

La figure (V.3) montre un graphique comparatif des résultats trouvés pour les quatre méthodes MCDM utilisées. L'axe horizontal représente le nombre des essais réalisés et l'axe vertical représente les différentes valeurs des indexes de classement pour les quatre méthodes d'optimisation, à savoir, $f(K_i)$ pour la méthode MARCOS, GRG pour la méthode GRA, R_i pour la méthode TOPSIS et finalement Q_i pour la méthode VIKOR. À partir de ces résultats, on peut observer que l'ordre de classement des alternatives est différent pour les quatre méthodes utilisées. Aussi, les méthodes MARCOS et GRA ont conduit au même régime optimal (essai 14), par contre, les classements des autres alternatives sont différents pour ces deux méthodes. Concernant la méthode VIKOR l'essai 16 est considéré comme le régime optimal. Finalement, l'essai 31 est sélectionné comme régime de coupe optimal pour la méthode TOPSIS. Pour les régimes optimaux trouvés par les quatre méthodes, les performances du matériau CBN prédomine les trois céramiques utilisées.

Le tableau (V.15) récapitule les régimes de coupe optimaux trouvés par les quatre méthodes utilisées, les valeurs de sorties et la variation en % des différents paramètres, en se basant sur les résultats trouvés par des méthodes MARCOS et GRA comme référence, puisqu'elles donnent le même résultat (essais 14).

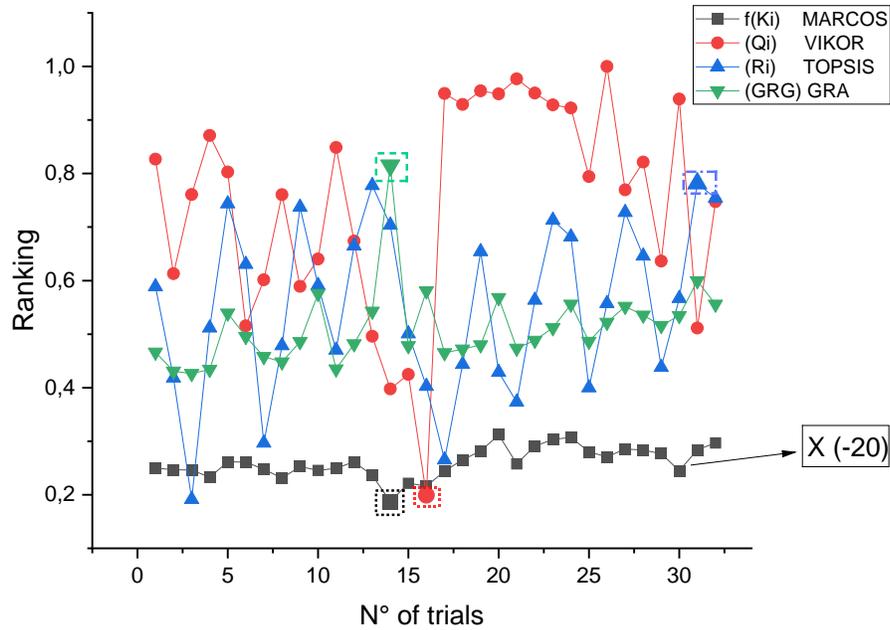


Figure V.3 Graphe comparatif des critères de classement des méthodes d’optimisation utilisées

Tableau V.15 : Comparaison des régimes optimaux trouvés

Méthode	V_c	f	ap	Matériau	Ra	Fz	P_c	MRR
MARCOS + GRA	520	0.08	0.2	CBN	0.465	7.08	61.36	8.32
VIKOR	660	0.14	0.2	CBN	0.666	17.8	195.8	18.48
Variation en %	↑+26%	↑+75%	0%	-	↓+43%	↓+151%	↓+219.1%	↑+122.11%
TOPSIS	590	0.08	0.4	CBN	0.434	49	481.833	18.88
Variation en %	↑+13.46%	0%	↑100%	-	↓-6.66%	↓+592.09%	↓+685.2%	↑+126.92%

Pour bien visualiser l’écart entre les différents résultats trouvés, la figure (V.4) a été tracée. La ligne 0 est considéré comme valeur de référence trouvée par les méthodes MARCOS et GRA, alors que la variation en (%) indiquée dans cette figure correspond aux deux autres méthodes VIKOR et TOPSIS. En se basant sur la valeur de (Ra) trouvée par les méthodes GRA et MARCOS, la méthode TOPSIS permet d’améliorée la rugosité (Ra) avec une diminution de 6.66%, par contre, la méthode VIKOR conduit à une augmentation de (Ra) de 43.22%. Concernant les valeurs de (Fz) trouvées par les méthodes VIKOR et TOPSIS, elles sont augmentées de 151% et 592.09 %, respectivement. La même tendance d’augmentation a été observée pour la puissance de coupe, où on observe des augmentations de 219.1 et 685% respectivement. Finalement, les méthodes VIKOR et TOPSIS ont permis d’améliorer la productivité MRR de 122.11% et 126.11% respectivement.

Du point de vue pratique, la méthode TOPSIS a donné la meilleure qualité de surface ($Ra = 0,434 \mu\text{m}$) et une productivité maximale ($MRR = 18.88 \text{ cm}^3/\text{min}$) par rapport aux trois autres méthodes, c'est pour cela que cette méthode est classée en première position lorsque le but est de rechercher un très bon compromis entre qualité et productivité sans se soucier de l'énergie consommée. Aussi lorsque le but est de combiner la qualité de surface et la minimisation de la consommation d'énergie sans s'occuper de la productivité, dans ce cas de figure, les méthodes MARCOS et GRA s'impose. Finalement, lorsque la productivité est recherchée en première position, tout en respectant la qualité de surface et la consommation d'énergie la méthode VIKOR prédomine.

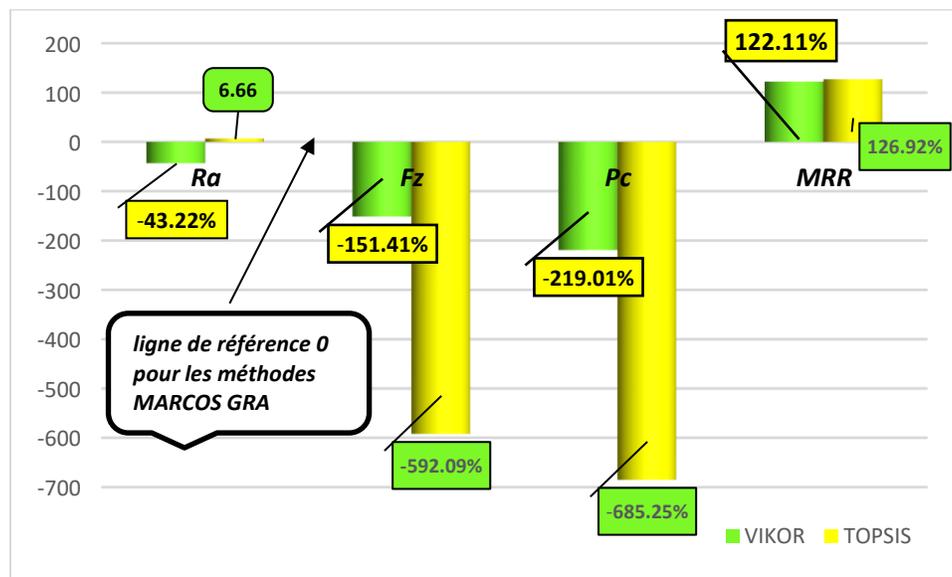


Figure V.4 Diagramme de comparaison des méthodes d'optimisation utilisées

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre des méthodes d'optimisation multi-objectifs pour maximiser le taux (MRR) tout en minimisant la puissance (Pc), la rugosité (Ra), l'effort (Fz), et l'énergie spécifique (Ecs). Nous avons utilisé la méthode de la fonction de désirabilité (DF) et l'Algorithme Génétique (GA) pour cette optimisation. De plus, nous avons exploré des approches d'optimisation multicritère (MCDM) telles que MARCOS, TOPSIS, VIKOR et GRA. L'objectif demeure constant : maximiser le MRR tout en minimisant simultanément (Pc , Ra et Fz). En fin de compte, une comparaison exhaustive des régimes optimaux obtenus par les quatre méthodes d'optimisation MCDM a été réalisée.

CHAPITRE

VI

Performances de l'outil CBN lors de l'usinage à sec MQL de la fonte EN GJL-350

VI.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur une étude expérimentale visant à analyser l'impact des paramètres de coupe et du mode de lubrification (à sec et MQL) sur les paramètres technologiques lors de l'usinage de la fonte grise EN GJL 350 en utilisant le matériau de coupe le plus performant (CBN7050) suivant l'étude réalisée au chapitre 3. L'objectif est de réaliser une analyse statistique approfondie, de développer des modèles prédictifs pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort de coupe (Fz), puis de procéder à une optimisation des conditions de coupe (Vc , f et ap). Pour atteindre cet objectif, la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été mise en œuvre afin d'analyser l'impact des facteurs d'entrée sur les résultats (Ra et Fz), ce qui a permis d'établir des modèles mathématiques prédictifs.

VI.2 Analyse statistique et modélisation

Le plan du Taguchi L_9 (3^3) a été adopté pour étudier l'usinage de EN GJL350 en utilisant un outil en CBN7050, à la fois dans un environnement à sec et MQL. Les paramètres d'entrée sélectionnés sont (ap), (f) et (Vc), chacun à trois niveaux de variation. Les valeurs de ces paramètres ainsi que les résultats des paramètres de sortie choisis (MRR, Fz et Ra ,) sont répertoriées dans le tableau VI.1.

Les résultats de ce tableau révèlent que les valeurs de (Ra) varient dans les intervalles de (0.43 à 1.425) μm et de (0.30 à 1.19) μm lors de tournage à sec et en MQL respectivement. De même, les valeurs de l'effort de coupe (Fz) en tournage à sec et en MQL varient respectivement dans les intervalles de (32.41 à 178.79) N et de (31.13 à 131.52) N.

Tableau VI.1 Résultats des essais pour un plan de Taguchi L_9 à sec et MQL.

N° d'essai	Entrées			Sorties				
				À sec		MQL		MRR (cm^3/min)
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	Ra (μm)	Fz (N)	
1	400	0.08	0.15	0.430	32.41	0.300	21.13	4.8
2	400	0.14	0.3	1.080	83.34	0.680	83.02	16.8
3	400	0.2	0.45	1.425	178.79	1.190	157.30	36
4	500	0.08	0.3	0.480	63.17	0.320	55.82	12
5	500	0.14	0.45	1.080	144.42	0.690	131.52	31.5
6	500	0.2	0.15	1.300	92.14	1.010	79.86	15
7	600	0.08	0.45	0.550	96.14	0.420	90.19	21.6
8	600	0.14	0.15	0.760	65.80	0.520	59.55	12.6
9	600	0.2	0.3	1.290	138.32	1.039	128.60	36

Les résultats des essais d'usinage révèlent une amélioration notable de la qualité de surface et une réduction significative de l'effort (F_z) lors de l'utilisation de la lubrification par MQL. La figure VI.1 montre de manière graphique la comparaison des mesures expérimentales de F_z et Ra dans différentes conditions de lubrification, à sec et avec MQL. L'impact significatif de la lubrification sur la qualité de la surface usinée et la réduction des efforts de coupe est manifeste. En effet, la technique MQL offre non seulement une amélioration de la qualité de fabrication, mais répond également aux préoccupations environnementales en limitant l'usage des huiles lubrifiantes dans les opérations requérant une lubrification.

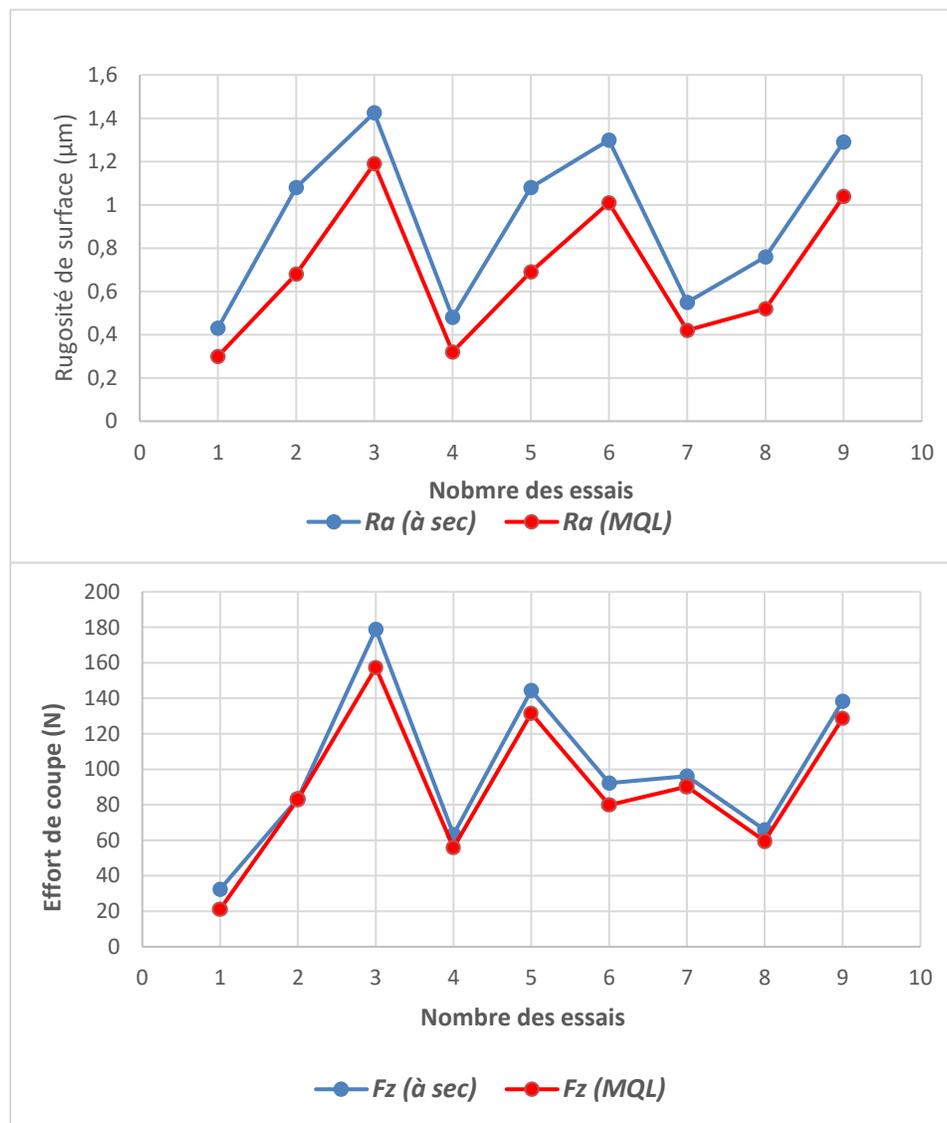


Fig VI.1 Comparaison des résultats de Ra et F_z (à sec et MQL)

VI.2.1 Analyse ANOVA à sec et MQL

Afin de conduire une étude statistique visant à évaluer l'impact et la contribution des principaux facteurs sur les paramètres de sortie, nous avons opté pour l'utilisation de la méthode (RSM) conjointement avec l'ANOVA [108]. Le traitement des résultats de l'ANOVA a été effectué avec un niveau de confiance de 95% ($\alpha = 0.05$).

VI.2.1.1 ANOVA pour Ra

Les tableaux VI.2 et VI.3 présentent les résultats de l'ANOVA, démontrant clairement que le facteur prédominant affectant (Ra) est l'avance (f), avec une contribution de 92.03% et 93.18% respectivement en usinage à sec et en utilisation la lubrification MQL. Pendant l'opération de tournage, la surface générée présente des rainures hélicoïdales résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal de l'outil-pièce généré par la machine-outil. Plus (f) augmente, plus les rainures s'approfondissent, ce qui entraîne une augmentation de (Ra) [62]. L'analyse ANOVA révèle également que (ap) est un facteur influent sur, (Ra) avec une contribution de 4.50% et 4.26% respectivement en usinage sec et en MQL. Par contre, (Vc) n'a pas d'effet significatif sur le paramètre (Ra) pour les deux environnements, puisque la valeur de (P) est supérieure à 0.05. Des résultats comparables ont été évoqués par Nouioua et al [109] et Elbah et al [110], sur les performances de la lubrification MQL sur la qualité de surface par rapport à l'usinage à sec.

Tableau VI.2 ANOVA pour Ra (usinage à sec)

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	3	1.15991	98.11%	1.15991	0.38664	86.52	0.000
Vc	1	0.01870	1.58%	0.01870	0.01870	4.19	0.096
f	1	1.08800	92.03%	1.08800	1.08800	243.48	0.000
ap	1	0.05320	4.50%	0.05320	0.05320	11.91	0.018
Erreur	5	0.02234	1.89%	0.02234	0.00447		
Total	8	1.18226	100.00%				

Tableau VI.3 ANOVA pour Ra (usinage à MQL)

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	3	0.848830	98.14%	0.848830	0.282943	87.96	0.000
Vc	1	0.006080	0.70%	0.006080	0.006080	1.89	0.228

<i>f</i>	1	0.805933	93.18%	0.805933	0.805933	250.54	0.000
<i>ap</i>	1	0.036817	4.26%	0.036817	0.036817	11.45	0.020
<i>Erreur</i>	5	0.016084	1.86%	0.016084	0.003217		
<i>Total</i>	8	0.864914	100.00%				

VI.2.1.2 ANOVA pour l'effort (F_z)

Les tableaux VI.4 et VI.5 présentent une synthèse des résultats de l'ANOVA pour (F_z) lors de tournage à sec et MQL. D'après les données du tableau VI.4, l'ANOVA pour l'usinage à sec révèle que (*ap*) occupe la première position en termes d'influence sur (F_z), avec une contribution de 51,13%, suivie de près par l'avance (*f*) avec une contribution de 46,13%. Il est à noter que l'augmentation de (*ap*) entraîne une résistance accrue de la pièce à la pénétration de l'outil dans les directions tangentielle et axiale, ce qui se traduit par une augmentation de (F_z). Ces résultats corroborent étroitement les travaux antérieurs des chercheurs [111,112].

Dans le tableau VI.5, l'analyse ANOVA pour l'usinage MQL révèle que (*ap*) est le principal facteur d'influence sur la composante de l'effort (F_z), suivie de l'avance (*f*), avec des contributions respectives de 54,00% et 44,63%. Il est également clair, d'après la valeur de (P), que (*Vc*) n'a pas une influence significative sur l'effort (F_z) dans les deux modes de lubrification.

Tableau VI.4 ANOVA pour F_z (usinage à sec)

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
<i>Modèle</i>	3	16632.2	97.29%	16632.2	5544.06	59.91	0.000
<i>Vc</i>	1	5.5	0.03%	5.5	5.45	0.06	0.818
<i>f</i>	1	7886.6	46.13%	7886.6	7886.55	85.23	0.000
<i>ap</i>	1	8740.2	51.13%	8740.2	8740.17	94.46	0.000
<i>Erreur</i>	5	462.7	2.71%	462.7	92.53		
<i>Total</i>	8	17094.8	100.00%				

Tableau VI.5 ANOVA pour F_z (usinage à MQL)

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
<i>Modèle</i>	3	14577.4	98.95%	14577.4	4859.13	156.85	0.000
<i>Vc</i>	1	47.5	0.32%	47.5	47.55	1.53	0.270
<i>f</i>	1	6575.0	44.63%	6575.0	6574.98	212.24	0.000

ap	1	7954.9	54.00%	7954.9	7954.86	256.78	0.000
Erreur	5	154.9	1.05%	154.9	30.98		
Total	8	14732.3	100.00%				

VI.2.2 Graphique des effets principaux de Ra et Fz

Les graphiques illustrant les effets principaux sur (*Ra*) sont exposés dans la figure VI.2. À partir de ces représentations graphiques, il est possible de visualiser et de comparer l'ampleur de l'influence des différents facteurs sur la variable étudiée. Une courbe présentant la pente la plus prononcée indique que le facteur associé exerce le plus grand effet sur la réponse. Il est clair que (*f*) exerce une influence significative sur (*Ra*) par rapport aux autres facteurs. De plus, le facteur (*ap*) influe sur (*Ra*), suivie par (*Vc*).

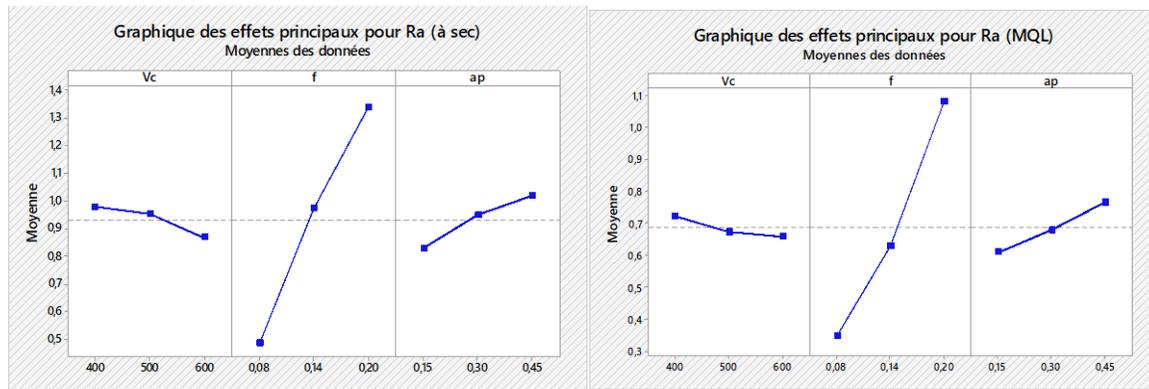


Fig VI.2 Graphe des effets principaux de la rugosité (*Ra*)

Les graphiques représentant les effets principaux sur (*Fz*) sont présentés dans la figure VI.3. À partir de ces graphiques, il est remarquable que (*ap*) exerce une influence significative sur (*Fz*), suivie de (*f*) et en dernier lieu par (*Vc*) respectivement. Une observation importante est que l'effort (*Fz*) augmente avec l'augmentation de (*f*). En outre, l'impact de (*ap*) est prépondérant, comme en témoigne sa pente plus accentuée.

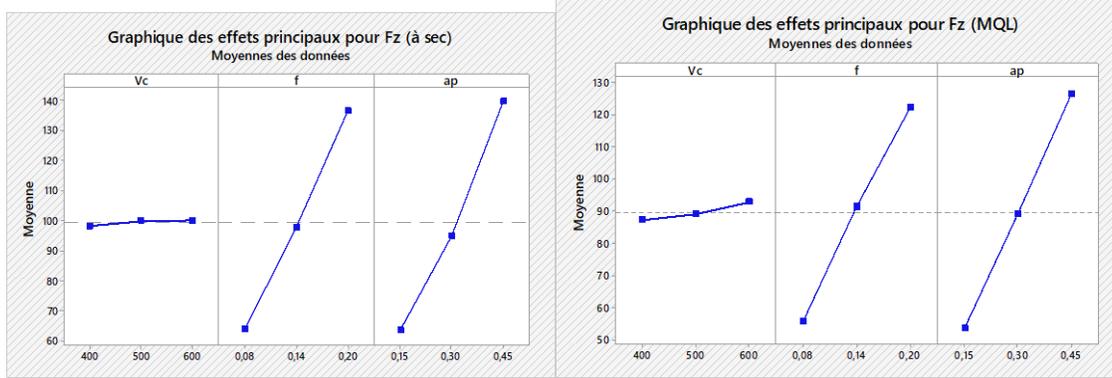


Fig VI.3 Graphe des effets principaux de la rugosité (Fz)

VI.2.3 Modélisation des paramètres technologiques

La relation entre les paramètres étudiés (Ra et Fz) et les facteurs de coupe est établie à l'aide de la RSM. Ces modèles sont utilisés pour prédire les paramètres de réponse dans les opérations d'usinage sur une plage de variation des conditions de coupe. Les modèles mathématiques utilisés dans cette étude sont fondés sur un modèle linéaire.

Les équations VI.1 et VI.2 présentent les modèles de rugosité (Ra) pour l'usinage à sec et avec MQL respectivement, avec leurs coefficients de détermination (R^2). De même, les équations VI.3 et VI.4, accompagnées de leurs coefficients de détermination (R^2), exposent les modèles mathématiques de l'effort de coupe (Fz) pour l'usinage à sec et avec MQL respectivement. Nous constatons que les valeurs des coefficients de détermination (R^2) des différents modèles obtenus varient de 0.97 à 0.98, ce qui démontre une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

$$Ra_{(\text{à sec})} = 0.03 - 0.000558 * Vc + 7.097 * f + 0.628 * ap \quad (\text{VI.1})$$

$$R^2 = 98.11\%$$

$$Ra_{(\text{MQL})} = -0.167 + 0.000318 * Vc + 6.108 * f - 0.552 * ap \quad (\text{VI.2})$$

$$R^2 = 98.14\%$$

$$Fz_{(\text{à sec})} = -66.3 + 0.095 * Vc + 604.2 * f + 254.4 * ap \quad (\text{VI.3})$$

$$R^2 = 97.29\%$$

$$Fz_{(\text{MQL})} = -74.5 + 0.0281 * Vc + 551.7 * f + 242.7 * ap \quad (\text{VI.4})$$

$$R^2 = 98.95\%$$

Les figures VI.4 et VI.5 illustrent les surfaces de réponse 3D correspondantes aux rugosité (Ra) en fonction de (Vc , ap) et trois valeurs de (f) respectivement (0.08, 0.14 et 0.2) mm/tr durant l'usinage à sec et MQL. On observe que (Ra) tendent à augmenter considérablement avec l'accroissement de (f), cette remarque est la même pour les deux cas d'usinage. Cette augmentation est expliquée par les sillons hélicoïdaux engendrés par le mouvement de l'outil et la pièce, plus (f) est élevée plus les profonds et larges de ces sillons sont importants. Des explications semblables en été évoquées par [113,114]. Par conséquent, les valeurs de (Ra) générées par le MQL sont meilleures par rapport aux générées par l'usinage à sec.

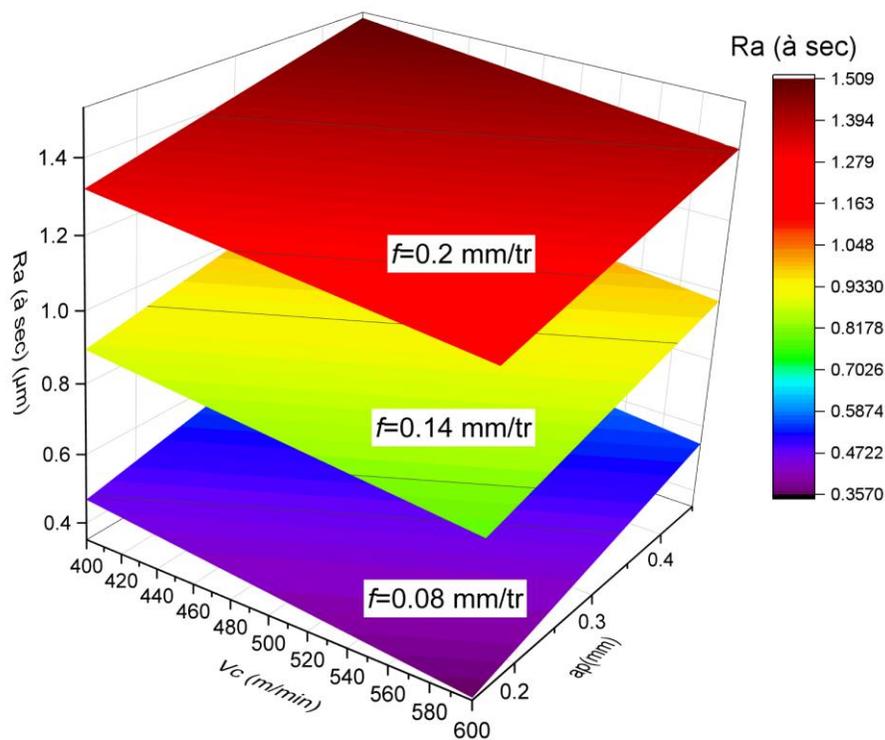


Figure VI.4 Surface de réponse 3D de Ra pour l'usinage à sec.

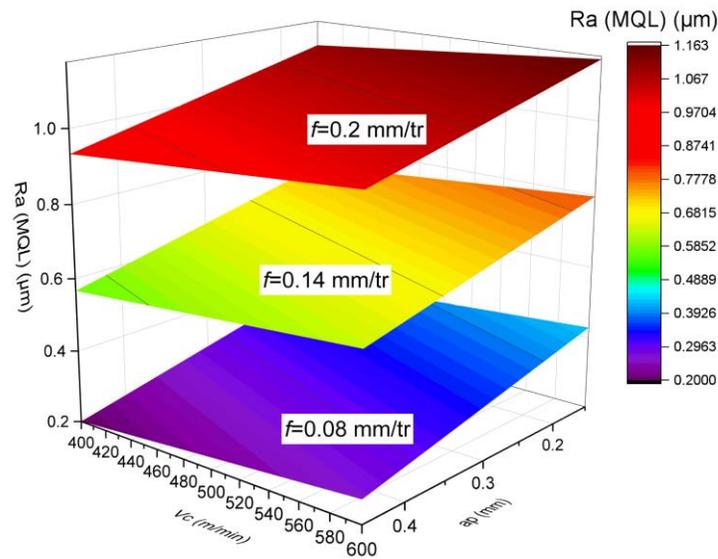


Figure VI.5 Surface de réponse 3D de Ra pour l'usinage MQL

Les figures VI.6 et VI.7 présentent les surfaces de réponse de l'effort de coupe (Fz) en fonction de la variation des paramètres (Vc , f et ap) lors de l'usinage à sec et avec MQL. L'analyse des courbes met en évidence que le paramètre (ap) exerce la plus grande influence sur l'effort de coupe (Fz) dans les deux modes d'usinage. Une augmentation de (ap) entraîne une augmentation significative de (Fz).

De plus, une augmentation de (f) et (Vc) entraîne également une augmentation de (Fz). Par conséquent, l'effort de coupe minimal est atteint pour des valeurs minimales de (ap , Vc et f). Ces résultats concordent parfaitement avec les données de la littérature [115].

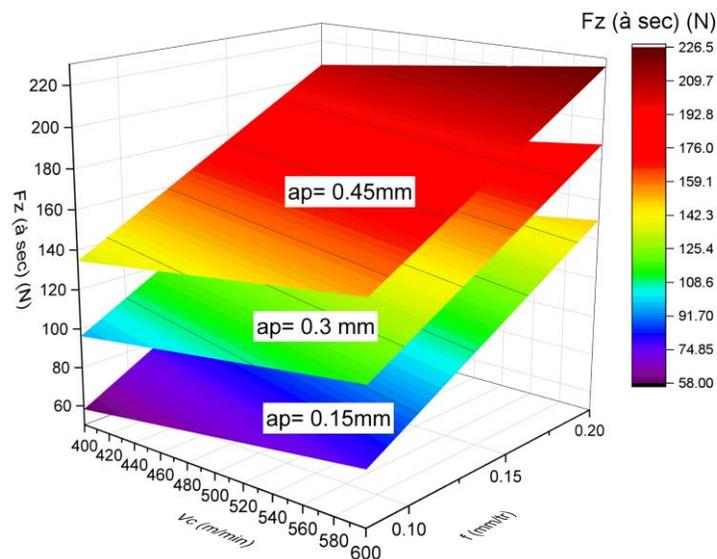


Figure VI.6 Surface de réponse 3D de Fz pour l'usinage à sec.

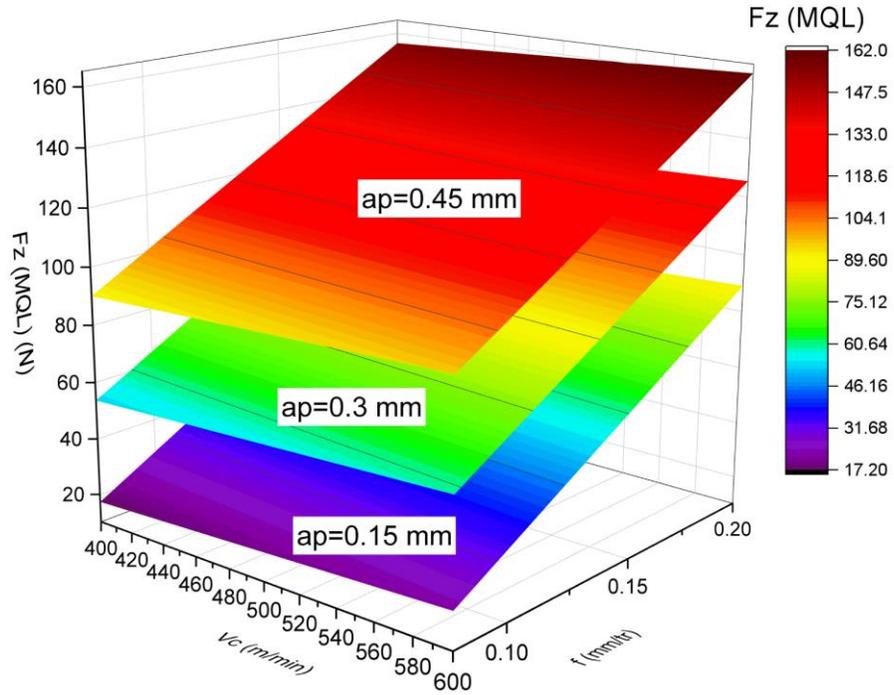


Figure VI.7 Surface de réponse 3D de F_z pour l'usinage MQL

VI.3 Optimisation multi-objective avec la méthode MOORA

La sélection des paramètres de coupe en usinage a été explorée dans plusieurs études à l'aide de différentes approches telles que les méthodes Taguchi, GRA, GA, PSO, DF, etc. [116-120]. L'objectif de ces approches est de choisir les conditions de coupe les plus appropriées afin d'atteindre les objectifs désirés en termes de paramètres technologiques. Cela a souvent un effet économique direct sur la production, notamment en influençant le temps d'usinage ou le coût total des opérations.

Dans ce travail, la méthode **MOORA** (Multiobjective optimization on the basis of ratio analysis) a été choisie pour optimiser les paramètres (Ra , F_z et MRR). L'objectif est de choisir un régime de coupe qui permet de réduire la rugosité (Ra) et l'effort (F_z) tout en maximisant la productivité (MRR) simultanément. Les étapes de cette méthode se déroulent comme suit [121]:

Étape 1 : Après avoir défini l'objectif, une matrice de décision a été élaborée pour représenter différentes caractéristiques de performance par rapport à diverses variables.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & \dots & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \tag{VI.5}$$

Où q_{mn} = mesure de performance de l'alternative m sur n réponse.

m = Nombre de variables.

n = Nombre de caractéristiques de performance.

2^{ème} étape : La matrice de décision a été normalisée pour la transformer en quantité sans dimension afin de comparer tous les composants. La normalisation a été effectuée en suivant l'équation **VI.6**.

$$q^*_{mn} = \frac{q_{mn}}{\sqrt{\sum_{i=1}^r q^2_{mn}}} \quad (\text{VI.6})$$

Où. q^*_{ij} affiche la valeur normalisée malternative sur n réponse ($0 < q^*_{ij} < 1$).

3^{ème} étape : à l'étape suivante, les valeurs normalisées ont été additionnées pour la condition bénéfique et soustraites pour la condition non bénéfique afin d'obtenir une évaluation globale des mesures de performance.

$$y_i = \sum_{n=1}^n q^*_{mn} - \sum_{n=g+1}^n q^*_{mn} \quad (\text{VI.7})$$

Habituellement, peu de réponses sont plus dominantes que d'autres, les poids correspondants ont été multipliés avec l'objectif spécifique pour lui donner plus de préférence. Valeur d'évaluation globale (Y_i) calculée comme suit :

$$y_i = \sum_{n=1}^n w_n q^*_{mn} - \sum_{n=g+1}^n w_n q^*_{mn} \quad (\text{VI.8})$$

Où w_n est le poids donné à les réponses, dans notre étude même poids a donné à toutes les réponses

Étape 4 : dans la dernière étape, les valeurs d'évaluation globales ont été classées par ordre décroissant. La valeur la plus élevée de Y_i signifie le meilleur réglage optimisé tandis que la valeur la plus basse de Y_i signifie le réglage le moins préféré. La figure **VI.8** résume les étapes de cette méthode d'optimisation

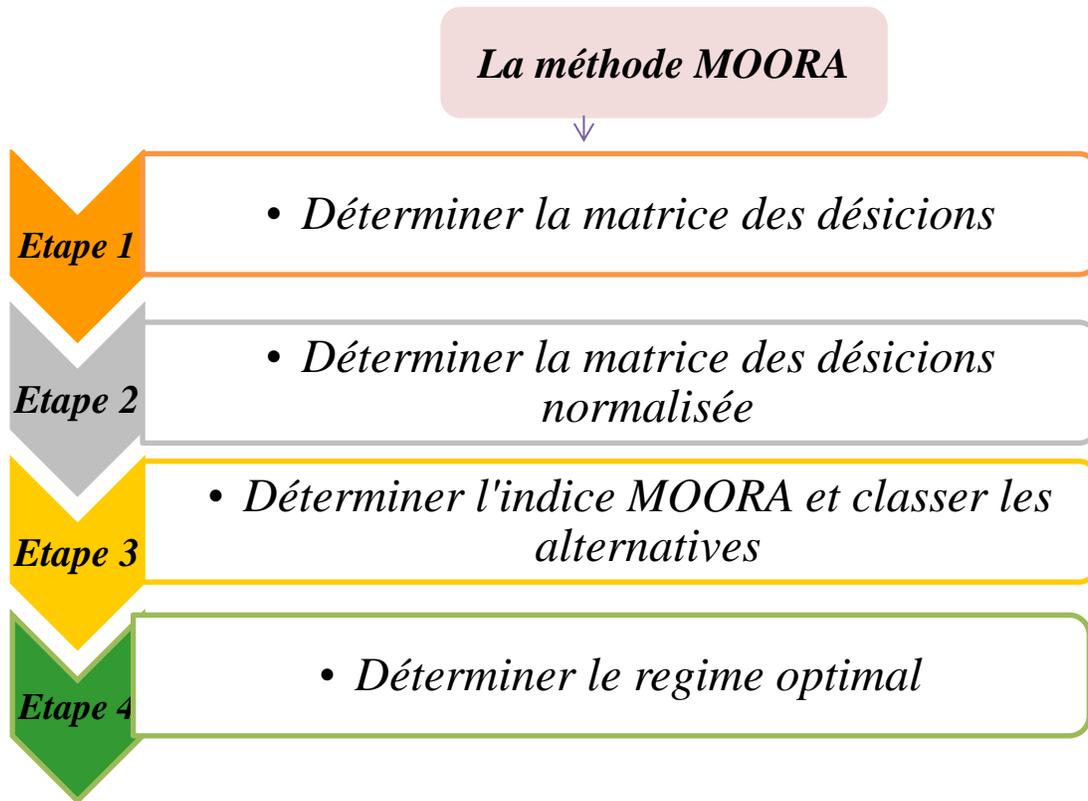


Figure VI.8 Etapes de la méthode d'optimisation MOORA

Le tableau VI.6 illustre les résultats trouvés par la méthode MOORA pour le premier cas d'optimisation (usinage à sec), le régime de coupe optimal est $V_c=400$ m/min, $f=0.08$ mm/tr et $ap=0.15$ mm qui correspond à l'essai N°1. Les sorties optimisées sont $Ra=0.430\mu\text{m}$, $F_z=32.41$ N et $MRR=4.8$ cm³/min

Pour le cas de l'usinage avec lubrification MQL, le tableau IV.7 montre les résultats d'optimisation appliquant la méthode MOORA. Dans ce cas, l'essai N°1 demeure le plus optimal, avec les valeurs optimisées des paramètres suivantes $Ra=0.3$ μm , $F_z=21.13$ N et $MRR=4.8$ cm³/min.

Tableau VI.6 Différents résultats trouvés par la méthode MOORA (usinage à sec)

	Normalisation			Poids			Somme	classement
1	0.1432	0.0995	0.0687	0.0473	0.0328	0.0227	-0.0574	1
2	0.3597	0.7081	0.3507	0.1187	0.2337	0.1157	-0.2367	5
3	0.4747	1.5191	0.4454	0.1566	0.5013	0.1470	-0.5110	9
4	0.1599	0.5367	0.3088	0.0528	0.1771	0.1019	-0.1280	2
5	0.3597	1.2271	0.4288	0.1187	0.4049	0.1415	-0.3821	7
6	0.4330	0.7829	0.3366	0.1429	0.2583	0.1111	-0.2902	6
7	0.1832	0.8168	0.3819	0.0605	0.2696	0.1260	-0.2040	4
8	0.2532	0.5591	0.3149	0.0835	0.1845	0.1039	-0.1641	3
9	0.4297	1.1752	0.4454	0.1418	0.3878	0.1470	-0.3826	8

Tableau VI.7 Différents résultats trouvés par la méthode MOORA (usinage à MQL)

	<i>Normalisation</i>			<i>Poids</i>			<i>Somme</i>	<i>classement</i>
1	0.1329	0.0716	0.0687	0.0473	0.0328	0.0227	-0.0448	1
2	0.3013	0.7243	0.3507	0.0439	0.0236	0.0227	-0.2227	5
3	0.5273	1.3723	0.4454	0.0994	0.2390	0.1157	-0.4799	9
4	0.1418	0.4870	0.3088	0.1740	0.4529	0.1470	-0.1056	2
5	0.3057	1.1474	0.4288	0.0468	0.1607	0.1019	-0.3380	7
6	0.4475	0.6967	0.3366	0.1009	0.3786	0.1415	-0.2665	6
7	0.1861	0.7868	0.3819	0.1477	0.2299	0.1111	-0.1950	4
8	0.2304	0.5195	0.3149	0.0614	0.2597	0.1260	-0.1436	3
9	0.4604	1.1219	0.4454	0.0760	0.1714	0.1039	-0.3752	8

VI.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse expérimentale est présentée, portant sur la modélisation et l'optimisation du processus de tournage de la fonte grise EN GJL350, tant dans des conditions de coupe à sec que sous lubrification MQL, en utilisant une plaquette en CBN7050.. L'analyse réalisée dans ce chapitre démontre que les modèles développés à l'aide de la méthode RSM sont hautement précis ($R^2 \leq 97\%$). Nous avons ensuite procédé à une optimisation multi-objectif des paramètres d'usinage en appliquant la méthode MOORA. L'objectif était de minimiser à la fois (Ra) et (Fz), tout en maximisant le (MRR).

Conclusion Générale

L'étude des performances des matériaux coupe (CBN et céramiques) lors du tournage de la fonte EN GJL-350, ont permis en premier lieu d'étudier l'usinabilité de la fonte grise avec quatre matériaux de coupe (CBN7050, CC6050, CC620 et 1690) en se basant sur les paramètres de sortie (efforts de coupe, rugosité des surfaces usinées, l'évolution de l'usure et l'analyse de la topographie de surface 3D). Ensuite, une étude statistique et de modélisation selon le plan de Taguchi L_{32} a permis de développer des modèles prédictifs pour les sorties telles que, (Ra , Fz , Pc et Ecs) en utilisant les méthodes (RSM) et (ANN). Aussi, une optimisation multi-objective en utilisant plusieurs approches (DF, GA, MARCOS, TOPSIS, VIKOR et GRA) a été réalisée. Finalement, une étude comparative menée dans un environnement à sec et (MQL) lors de l'usinage de la fonte EN GJL-350 avec un outil en CBN a été effectuée. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

1. La comparaison des performances des matériaux de coupe étudiés en termes d'usure (Vb) dévoile que le CBN7050 est le matériau le plus performant car il accuse une usure minimale, il est suivi par la céramique mixte (CC6050). Par contre la céramique blanche (CC620) et le nitrure de silicium (CC1690) viennent en troisième et quatrième position.
2. À $Vc=650$ m/min, les ratios de (Vb) pour les matériaux de coupe sont comme suit : $Vb_{CC6050}/Vb_{CBN}=1.06$; $Vb_{CC1690}/Vb_{CBN}=1.19$ et $Vb_{CC620}/Vb_{CBN}= 1.13$.
3. Les valeurs minimales de la rugosité de surface ainsi que les efforts de coupe sont générées par le CBN7050 suivi par la céramique (CC620). Les céramiques (CC1690 et CC6050) viennent en dernière position.
4. Les ratios de (Ra) pour les différents matériaux sont comme suit : $Ra_{CC6050}/Ra_{CBN}=1.93$; $Ra_{CC1690}/Ra_{CBN}=1.80$ et $Ra_{CC620}/Ra_{CBN}= 1.23$ à $Vc=450$ m/min et à $Vc=650$ m/min, les ratios de (Ra) sont : $Ra_{CC6050}/Ra_{CBN}= 1.88$; $Ra_{CC1690}/Ra_{CBN}=1.75$ et $Ra_{CC620}/Ra_{CBN}= 1.20$.
5. Les ratios pour (Fz) à $Vc=450$ m/min sont : $Fz_{CC6050}/Fz_{CBN}=1.45$; $Fz_{CC1690}/Fz_{CBN}=1.33$ et $Fz_{CC620}/Fz_{CBN} = 1.13$. A $Vc=650$ m/min les ratios sont : $Fz_{CC6050}/Fz_{CBN}=1.26$; $Fz_{CC1690}/Fz_{CBN}=1.07$ et $Fz_{CC620}/Fz_{CBN}= 1.02$.
6. La topographie de surface (3D) réalisée a permis de mettre en évidence l'effet de chaque matériau de coupe utilisé sur la qualité de surface. Elle confirme que le meilleur état de surface est obtenu par l'outil de CBN.

Conclusion Générale

7. L'ANOVA de (Ra), a confirmé que l'avance (f) et le matériau (m) sont les paramètres qui ont le plus grand effet avec des contributions respectives de (80.91 et 10.87) %. D'autre part, l'ANOVA de (Fz), montre que (ap), (M) et (f) sont les paramètres qui ont la plus grande influence avec des contributions respectives de (49.98, 24.09 et 20.49) %
8. L'ANOVA pour (Pc) affirme que le facteur (ap) est le plus influent sur (Pc) avec une contribution de 48.38%, suivi par (M) et (f) avec des contributions de (26.93 et 15.18) % respectivement. L'ANOVA pour (Ecs) montre que la nature de matériau de coupe a la plus grande influence sur (Ecs) avec une contribution de 66.08%.
9. Les modèles élaborés pour (Ra , Fz , Pc et Ecs) à l'aide des méthodes RSM et ANN se révèlent extrêmement bénéfiques. Une forte corrélation entre les données prédites et observées a été établie, avec des coefficients de détermination (R^2) variant entre 96,91 % et 99,18 % pour le RSM et entre 99,59 % et 99,85 % pour les modèles ANN. L'approche ANN démontre une efficacité supérieure en termes de capacité prédictive.
10. Les modèles RSM et ANN trouvés représentent un intérêt industriel important pour les utilisateurs, puisqu'ils permettent de faire des prédictions, ce qui présente un gain important en temps et en matériaux.
11. Les différents régimes de coupe obtenus par l'application de (DF) sont :
 - **1^{er}cas** : l'optimisation des cinq sorties (Ra), (Fz), (Pc), (Ecs) et (MRR) simultanément a permis d'avoir des sorties avec une importance égale. Le régime optimal obtenu est : matériau = CBN7050, $ap = 0.232$ mm, $Vc = 660$ m/min et $f = 0.116$ mm/tr. Les valeurs optimisées des paramètres de sorties sont : $Ra = 0.579$ μ m, $Fz = 19.06$ N, $Pc = 220.824$ W, $Ecs = 0.562$ J/mm³ et MRR=292.935 mm³/s avec une désirabilité = 0.742.
 - **2^{ème}cas** : Ce cas favorise la minimisation du (Ra) avec une importance maximale 5 pour une meilleure qualité de surface. Le régime optimal trouvé est : le matériau=CBN7050, $ap = 0.244$ mm, $Vc = 660$ m/min et $f = 0.094$ mm/tr. Les paramètres de sorties affichent les valeurs : $Ra = 0.434$ μ m, $Fz = 15.03$ N, $Pc = 175.760$ W, $Ecs = 0.517$ J/mm³ et MRR=248.780 mm³/s avec D= 0.841.

Conclusion Générale

- **3^{ème} cas** : Ce cas favorise la minimisation de (Fz), (Pc) et (Ecs) avec une importance maximale 5, pour réduire la consommation d'énergie. Le régime optimal obtenu est : matériau = CBN7050 $ap = 0.2$ mm, $Vc = 660$ m/min et $f = 0.102$ mm/tr. Les sorties optimisées sont : $Fz = 5.805$ N, $Pc = 75.456$ W, $Ecs = 0.298$ J/mm³, (Ra) = 0.455 μ m et $MRR = 217.751$ mm³/s avec $D = 0.904$.
- **4^{ème} cas** : Ce cas favorise une productivité (MRR) maximale. Le régime optimal est : matériau = CBN $ap = 0.344$ mm, $Vc = 660$ m/min et $f = 0.167$ mm/tr. Les sorties sont : (Ra) = 1.048 μ m, (MRR) = 624 mm³/s, $Fz = 62.908$ N, $Pc = 701.18$ W et $Ecs = 0.977$ J/mm³ avec une désirabilité $D = 0.772$.

12. L'utilisation de l'optimisation par algorithme génétique (GA) offre de nombreuses solutions pour atteindre un compromis entre la minimisation (Ra , Fz , Pc et Ecs) tout en maximisant simultanément (MRR). Cette méthode nous donne plusieurs choix de combinaisons pour la sélection d'un régime optimal parmi plusieurs solutions.

13. Les quatre méthodes d'optimisation examinées (MARCOS, TOPSIS, GRA et VIKOR) donnent trois différentes combinaisons pour minimiser (Ra , Fz et Pc) et maximiser la productivité (MRR).

- Les résultats de MARCOS et GRA montrent que le régime optimal correspondant au l'essai numéro 14 : $Vc = 520$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr, $M =$ CBN7050 et $ap = 0.2$ mm. Les valeurs optimisées des paramètres de sorties sont : $Ra = 0.465$ μ m, $Fz = 7.08$ N, $Pc = 61.36$ W, et $MRR = 8.32$ cm³/min
- La combinaison numéro 31 a été sélectionné comme une combinaison optimale par la méthode TOPSIS, $Vc = 590$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr, $M =$ CBN7050 et $ap = 0.4$ mm. Les sorties optimisées prennent des valeurs suivantes $Ra = 0.434$ μ m, $Fz = 49$ N, $Pc = 481.833$ W et $MRR = 18.8$ cm³/min.
- Le régime optimal des facteurs d'entrée obtenir par la méthode VIKOR est : $Vc = 660$ m/min, $f = 0.14$ mm/tr, $M =$ CBN7050 et $ap = 0.2$ mm correspond à $Ra = 0.66$ μ m, $Fz = 17.8$ N, $Pc = 195.8$ W et $MRR = 18.48$ cm³/min.

14. La comparaison des régimes optimaux obtenus par les méthodes (MARCOS, TOPSIS, VIKOR et GRA) montre que les résultats changent suivant la méthode appliquée et aussi suivant les objectifs souhaités.

Conclusion Générale

Par conséquent, les méthodes MARCOS et GRA favorisent la minimisation de la rugosité de surface et l'énergie consommée tandis que la méthode TOPSIS favorise la maximisation de la qualité de surface et la productivité par contre, la méthode VIKOR favorise la productivité tout en respectant la qualité de surface et la consommation d'énergie.

15. Les résultats de l'optimisation concernant les quatre méthodes utilisées confirment que le matériau de coupe CBN7050 est le matériau le plus performant comparativement aux trois céramiques utilisées.

16. Les résultats statistiques de (Ra) lors de l'usinage à sec et MQL de la fonte grise montre que le facteur (f) est le premier facteur qui affecte (Ra), avec une contribution de 92.03% et 93.18% respectivement à sec et MQL.

17. L'ANOVA de (Fz) en usinage à sec et MQL montre que l'impact du facteur (ap) sur (Fz) vient en première position avec une contribution de 51,13%, suivie par l'avance (f) avec une contribution de 46,13% en usinage à sec et de (54 et 44,63) % en usinage MQL respectivement.

18. D'après l'analyse des résultats, l'utilisation de la technique de lubrification par quantité minimale (MQL) conduit à des améliorations par rapport à l'usinage à sec. La MQL permet d'obtenir une qualité de surface supérieure tout en réduisant l'effort de coupe.

19. L'application de la méthode d'optimisation multicritères MOORA nous a permis de sélectionner le régime ; $Vc = 400$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm comme un régime de coupe optimal qui satisfait la minimisation de (Ra , Fz) et la maximisation de (MRR) simultanément.

Les perspectives de recherche qui peut être citer comme piste de recherche sont comme suit :

- Explorer des nouvelles méthodes de modélisation.
- Étudier l'utilisation de la lubrification par quantité minimale (MQL) chargée de nanoparticules (NMQL).
- Investiguer l'application d'autres méthodes d'optimisation telles que PCA, WASPAS, COCOSO, etc.

Référence Bibliographique

- [1] **Alshataif, Y. A., Sivasankaran, S., Al-Mufadi, F. A., Alaboodi, A. S., & Ammar, H. R. (2020).** Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloys: a review. *Metals and Materials International*, 26, 1099-1133.
- [2] **Cai, W., & Lai, K. H. (2021).** Sustainability assessment of mechanical manufacturing systems in the industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110169.
- [3] **Rizzo, A., Goel, S., Luisa Grilli, M., Iglesias, R., Jaworska, L., Lapkovskis, V., ... & Valerini, D. (2020).** The critical raw materials in cutting tools for machining applications: A review. *Materials*, 13(6), 1377.
- [4] **Kalpakjian, S. (2001).** Manufacturing engineering and technology. Pearson Education India.
- [5] **Wagner, V. (2011).** Amélioration de la productivité en usinage d'un titane réfractaire : le Ti5553 (Thèse de doctorat : univ-toulouse).
- [6] **Bagur, F. (1999).** Matériaux pour outils de coupe. *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique*, no BM7080, p. BM7080. 1-BM7080. 16.
- [7] **Grzesik, W. (2008).** Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Elsevier.
- [8] **Hosseini, A., & Kishawy, H. A. (2014).** Cutting tool materials and tool wear. In *Machining of titanium alloys* (pp. 31-56). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [9] **Bouزيد L. (2015).** Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13 (Thèse de doctorat : univ-guelma).

Références Bibliographiques

- [10] He, Q., DePaiva, J. M., Martins, M. M., Amorim, F. L., Torres, R. D., Arif, A. F., & Veldhuis, S. C. (2024). PVD coating strategies: Developing a combination of AlCrN and AlTiSiN for enhanced surface performance during threading of super duplex stainless steel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 106670.
- [11] Hamadi, B., & Achour, A. (2010). Etude des revêtements durs et application sur outil de coupe. (Mémoire de Magister : univ- Constantine)
- [12] List, G. (2004). Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caractérisation de l'interface outil copeau : application à l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351 (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).
- [13] Belhadi, S. (2009). Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).
- [14] Zimina, A., Senatov, F., Choudhary, R., Kolesnikov, E., Anisimova, N., Kiselevskiy, M., ... & Karyagina, A. (2020). Biocompatibility and physico-chemical properties of highly porous PLA/HA scaffolds for bone reconstruction. *Polymers*, 12(12), 2938.
- [15] Keblouti O, Boulanouar L, & AZIZI, R. B. M. (2017). Impact du revêtement et des conditions de coupe sur le comportement à l'usure des outils et sur la rugosité de la surface usinée. Vol. 79, Iss. 3 pp. 89-102.
- [16] Leach, R. (Ed.). (2013). Characterisation of areal surface texture. Springer Science & Business Media.
- [17] Kuntoğlu, M., Aslan, A., Pimenov, D. Y., Usca, Ü. A., Salur, E., Gupta, M. K., ... & Sharma, S. (2020). A review of indirect tool condition monitoring systems and decision-making methods in turning: Critical analysis and trends. *Sensors*, 21(1), 108.
- [18] <https://www.reliance-foundry.com/blog/cast-iron>

Références Bibliographiques

- [19] An W-k., Cai A-h., Luo Y., Chen H., Liu W-x., Li T-l., Chen M.(2009). Optimization of composition of as-cast chromium white cast iron based on wear-resistant performance. *Materials and Design*, vol. 30, 2339–2344.
- [20] Collini, L., Nicoletto, G., & Konečná, R. J. M. S. (2008). Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering: A*, 488(1-2), 529-539.
- [21] Callister WD, (2006). Materials science and engineering—an introduction. *Editora McGrall- Hill.*, 7^a ed., 832 p.
- [22] <https://metalblog.ctif.com/2021/03/01/les-fontes-a-graphite-lamellaire-et-spheroidal/>
- [23] <http://thomas-eyraud.e-monsite.com/pages/les-fontes-blanches.html>
- [24] Čanžar, P., Tonković, Z., and Kodvanj, J. (2012). Microstructure influence on fatigue behaviour of nodular cast iron. *Materials Science and Engineering: A*, 556, 88-99.
- [25] Jegou, S. (2009). Influence des éléments d'alliage sur la genèse des contraintes résiduelles d'aciers nitrurés (Thèse de doctorat : univ-ParisTech).
- [26] Dolatabadi, F. (2010). Étude de l'influence du mode de lubrification sur les performances d'usinage du composite à matrices d'aluminium (Thèse de doctorat : École Polytechnique de Montréal).
- [27] Boulahmi, S. (2015). Étude expérimentale des effets de l'outil de coupe, des conditions d'usinage et de lubrification sur la qualité de surface et le comportement en traction des pièces en alliages d'aluminium (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [28] Nouioua, M. (2019). Optimisation des paramètres de coupe lors de l'usinage à sec et avec quantité minimale de lubrification. (Thèse de doctorat : univ-guelma).

Références Bibliographiques

- [29] **Sharma, V. S., Singh, G., & Sørby, K. (2015)**. A review on minimum quantity lubrication for machining processes. *Materials and manufacturing processes*, 30(8), 935-953.
- [30] **Sana werda ben slima. (2016)**. Influence de la conception d'un outil de fraisage dédié à la microlubrification (MQL) sur l'interaction outil-matière-lubrifiant : études expérimentales et numériques (Thèse de doctorat : univ-tours)
- [31] **Chihaoui, S., Yallese, M. A., Belhadi, S., Belbah, A., Safi, K., & Haddad, A. (2021)**. Coated CBN cutting tool performance in green turning of gray cast iron EN-GJL-250: modeling and optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(11), 3643-3665.
- [32] **Laouissi, A., Yallese, M. A., Belbah, A., Belhadi, S., & Haddad, A. (2019)**. Investigation, modeling, and optimization of cutting parameters in turning of gray cast iron using coated and uncoated silicon nitride ceramic tools. Based on ANN, RSM, and GA optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(1), 523-548
- [33] **Mohanraj, T., & Kumar, M. D. (2019)**. The process parameter optimization for grey cast iron in turning process using response surface methodology. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9, 997-1006.
- [34] **Moreno, J. R. S., Ribeiro, A. A., & de Souza Gonçalves, J. F. (2021)**. Comparative Analysis on the Wear Performance of New and Reconditioned Ceramic Cutting Tools When Machining Nodular Cast Iron GGG-60, with Lubrication of Two Types of Fluids. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(1), 248-257
- [35] **Herwan, J., Misaka, T., Kano, S., Sawada, H., Furukawa, Y., & Ryabov, O. (2022)**. Improving Sustainability Index of Grey Cast Iron Finish Cutting Through High-Speed Dry Turning and Cutting Parameters Optimization Using Taguchi-Based Bayesian Method. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-17
- [36] **Yin, G., Shen, J., Wu, Z., Wu, X., & Jiang, F. (2022)**. Experimental Investigation on the Machinability of PCBN Chamfered Tool in Dry Turning of Gray Cast Iron. *Processes*, 10(8), 1547

Références Bibliographiques

- [37] Biswal, S., Sahoo, B. B., Jeet, S., Barua, A., Kumari, K., Naik, B., & Pradhan, S. (2023). Experimental investigation based on MCDM optimization of electrical discharge machined Al-WC-B4C hybrid composite using Taguchi-MARCOS method. *Materials Today: Proceedings*, 74, 587-594.
- [38] Trung, D. D. (2021). Application of EDAS, MARCOS, TOPSIS, MOORA and PIV methods for multi-criteria decision making in milling process. *Decis. Mak*, 4(7).
- [39] Trung, D. D., & Thinh, H. X. (2021). A multi-criteria decision-making in turning process using the MAIRCA, EAMR, MARCOS and TOPSIS methods: A comparative study. *Advances in Production Engineering & Management*, 16(4), 443-456
- [40] Nguyen, H. Q., Nguyen, V. T., Phan, D. P., Tran, Q. H., & Vu, N. P. (2022). Multi-criteria decision making in the PMEDM process by using MARCOS, TOPSIS, and MAIRCA methods. *Applied sciences*, 12(8), 3720.
- [41] Younas, M., Jaffery, S. H. I., Khan, M., Khan, M. A., Ahmad, R., Mubashar, A., & Ali, L. (2019). Multi-objective optimization for sustainable turning Ti6Al4V alloy using grey relational analysis (GRA) based on analytic hierarchy process (AHP). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 1175-1188
- [42] Sandeep, K., Dhanabalan, S., & Narayanan, C. S. (2019). Application of ANFIS and GRA for multi-objective optimization of optimal wire-EDM parameters while machining Ti-6Al-4V alloy. *SN Appl. Sci.*, 298, 1.
- [43] Raj. A., Misra. J. P., Khanduja. D., Saxena. K. K., & Malik. V. (2022). Design, modeling and parametric optimization of WEDM of Inconel 690 using RSM-GRA approach. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 1-11.
- [44] Padhy, C., & Singh, P. (2020). Use of Multi-Objective Optimization Technique (Taguchi-GRA Approach) in Dry Hard Turning of Inconel 625. *INCAS Bulletin*, 12(2), 133-142.
- [45] Rathod, N. J., Chopra, M. K., Chaurasiya, P. K., Pawar, S. H., Tiwari, D., Kumar, R., ... & Buddhi, D. (2022). Design and optimization of process parameters for hard turning of AISI 304 stainless steel using Taguchi-GRA-PCA. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-12.

Références Bibliographiques

- [46] Jurko, J., Miškov-Pavlík, M., Hladký, V., Lazorík, P., Michalík, P., & Petruška, I. (2022). Measurement of the Machined Surface Diameter by a Laser Triangulation Sensor and Optimization of Turning Conditions Based on the Diameter Deviation and Tool Wear by GRA and ANOVA. *Applied Sciences*, 12(10), 5266.
- [47] Sristi, N. A., Zaman, P. B., & Dhar, N. R. (2022). Multi-response optimization of hard turning parameters: a comparison between different hybrid Taguchi-based MCDM methods. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 16(4), 1779-1795.
- [48] Karnan, B., Kuppusamy, A., Latchoumi, T. P., Banerjee, A., Sinha, A., Biswas, A., & Subramanian, A. K. (2022). Multi-response optimization of turning parameters for cryogenically treated and tempered WC–Co inserts. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 103(1), 263-274.
- [49] Abhilash, P. M., & Chakradhar, D. (2022). Multi-response optimization of wire EDM of Inconel 718 using a hybrid entropy weighted GRA-TOPSIS method. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1-12.
- [50] Kamalizadeh, S., Niknam, S. A., Balazinski, M., & Turenne, S. (2022). The Use of TOPSIS Method for Multi-Objective Optimization in Milling Ti-MMC. *Metals*, 12(11), 1796.
- [51] Hoang, T. D., Duc, T. D., & Nguyen, N. T. (2021). Multi-objective optimization of turning process using a combination of Taguchi and VIKOR methods. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(4), 868-873.
- [52] Dubey, V., Sharma, A. K., Vats, P., Pimenov, D. Y., Giasin, K., & Chuchala, D. (2021). Study of a multicriterion decision-making approach to the MQL turning of AISI 304 steel using hybrid nanocutting fluid. *Materials*, 14(23), 7207.
- [53] Sapkota, G., Das, S., Sharma, A., & Ghadai, R. K. (2022). Comparison of various multi-criteria decision methods for the selection of quality hole produced by ultrasonic machining process. *Materials Today: Proceedings*, 58, 702-708

Références Bibliographiques

- [54] Singh, S. K., Prabhakar, S., Rao, D. K., Khare, S. K., & Kumar, J. (2022). Multi-response optimization of EDMed parameters of Ti-6Al-4 V alloy using entropy integrated-VIKOR method. *Materials Today: Proceedings*, 62, 1163-1168
- [55] Wieszala, R., & Piątkowski, J. (2016). Analysis of surface coarseness for friction node of alloy AlSi17Cu5 and cast-iron EN-GJL-350. In *Solid State Phenomena* (Vol. 246, pp. 149-152). Trans Tech Publications Ltd.
- [56] https://www.altimet.fr/?page_id=234
- [57] Yallese, M. A., Boulanouar, L., & Chaoui, K. (2004). Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique. *Mechanics & Industry*, 5(4), 355-368.
- [58] Yilmaz, N. G., Goktan, R. M., & Kibici, Y. (2011). An investigation of the petrographic and physico-mechanical properties of true granites influencing diamond tool wear performance, and development of a new wear index. *Wear*, 271(5-6), 960-969.
- [59] Grigoriev, S. N., Migranov, M. S., Melnik, Y. A., Okunkova, A. A., Fedorov, S. V., Gurin, V. D., & Volosova, M. A. (2021). Application of Adaptive Materials and Coatings to Increase Cutting Tool Performance: Efficiency in the Case of Composite Powder High Speed Steel. *Coatings*, 11(7), 855.
- [60] Aggarwal, A., & Singh, H. (2005). Optimization of machining techniques—a retrospective and literature review. *Sadhana*, 30(6), 699-711.
- [61] Yallese, M. A., Rigal, J. F., Chaoui, K., & Boulanouar, L. (2005). The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60 HRC). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219(1), 35-55.
- [62] Yallese, M. A., Chaoui, K., Zeghib, N., Boulanouar, L., & Rigal, J. F. (2009). Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Journal of materials processing technology*, 209(2), 1092-1104.

Références Bibliographiques

- [63] Badaluddin, N. A., Zamri, W. F. H. W., Din, M. F. M., Mohamed, I. F., & Ghani, J. A. (2018). Coatings of cutting tools and their contribution to improve mechanical properties: a brief review. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 13(14), 11653-11664.
- [64] Rumiantseva, Y., Melnichuk, I., Garashchenko, V., Zaporozhets, O., Turkevich, V., & Bushlya, V. (2020). Influence of cBN content, Al₂O₃ and Si₃N₄ additives and their morphology on microstructure, properties, and wear of PCBN with NbN binder. *Ceramics International*, 46(14), 22230-22238.
- [65] Aslan, A. (2020). Optimization and analysis of process parameters for flank wear, cutting forces and vibration in turning of AISI 5140: A comprehensive study. *Measurement*, 163, 107959.
- [66] Shankar, S. (2020). Tool wear prediction in hard turning of EN8 steel using cutting force and surface roughness with artificial neural network. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(1), 329-342.
- [67] Zerti, O., Yallese, M., Zerti, A., Belhadi, S., & Girardin, F. (2018). Simultaneous improvement of surface quality and productivity using grey relational analysis-based Taguchi design for turning couple (AISI D3 steel/mixed ceramic tool (Al₂O₃+ TiC)). *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(2), 173-194
- [68] Laouissi, A., Yallese, M. A., Belbah, A., Khellaf, A., & Haddad, A. (2019). Comparative study of the performance of coated and uncoated silicon nitride (Si₃N₄) ceramics when machining EN-GJL-250 cast iron using the RSM method and 2D and 3D roughness functional parameters. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(5), 1-23
- [69] Srinivasan, D., Ganesh, N., Ramakrishnan, H., Balasundaram, R., Sanjeevi, R., & Chandran, M. (2022). Investigation of surface roughness and material removal rate of WEDM of SS304 using ANOVA and regression models. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 10(2), 025014.
- [70] Bewick, V., Cheek, L., & Ball, J. (2004). Statistics review 9: one-way analysis of variance. *Critical care*, 8(2), 1-7.

Références Bibliographiques

- [71] **Trifunović, M., Madić, M., Janković, P., Rodić, D., & Gostimirović, M. (2021).** Investigation of cutting and specific cutting energy in turning of POM-C using a PCD tool: Analysis and some optimization aspects. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127043.
- [72] **Ghatge, D. A., Ramanujam, R., & Ghatge, D. (2021).** Parametric Evaluation of Lathe Boring Operation to Improve the Surface Finish of Gray Cast Iron (SG-260) Under Dry Condition. In *Advances in Industrial and Production Engineering* (pp. 897-908). Springer, Singapore.
- [73] **Das, A., Kamal, M., Das, S. R., Patel, S. K., Panda, A., Rafighi, M., & Biswal, B. B. (2022).** Comparative assessment between AlTiN and AlTiSiN coated carbide tools towards machinability improvement of AISI D6 steel in dry hard turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(6), 3174-3197.
- [74] **Abdelnasser, A. S., Barakat, A., Elsanabary, S., & Nassef, A. (2020).** Relative performance of coated ceramic and CBN inserts in hard turning of Ti6Al4V alloy. *Port-Said Engineering Research Journal*, 24(2), 114-121.
- [75] **Bhushan, R. K. (2022).** Optimisation of machining parameters for minimising cutting forces during machining of Al alloy SiC particle composites. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20(2), 372-386.
- [76] **Laouissi, A., Nouioua, M., Yallese, M. A., Abderazek, H., Maouche, H., & Bouhalais, M. L. (2021).** Machinability study and ANN-MOALO-based multi-response optimization during Eco-Friendly machining of EN-GJL-250 cast iron. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(3), 1179-1192.
- [77] **YALLESE, M. A., BOUCHERIT, S., OUELAA, N., BELHADI, S., & Salem, S. B. (2023).** Assessment of Technological Performance Parameters in Intermittent Turning and Multi-Response Optimization of Cutting Conditions using DF, MOORA, VIKOR, and NSGAI coupled with VIKOR Methods.

Références Bibliographiques

- [78] **Dash, L., Padhan, S., Das, A., & Das, S. R. (2021)**. Machinability investigation and sustainability assessment in hard turning of AISI D3 steel with coated carbide tool under nanofluid minimum quantity lubrication-cooling condition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(22), 6496-6528.
- [79] **Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2016)**. Mathematical modeling and FDM process parameters optimization using response surface methodology based on Q-optimal design. *Applied Mathematical Modelling*, 40(23-24), 10052-10073.
- [80] **Safi, K., Yallese, M. A., Belhadi, S., & Mabrouki, T. (2022)**. Tool wear, 3D surface topography, and comparative analysis of GRA, MOORA, DEAR, and WASPAS optimization techniques in turning of cold work tool steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-21.
- [81] **Nouioua, M., Laouissi, A., Brahami, R., Blaoui, M. M., Hammoudi, A., & Yallese, M. A. (2022)**. Evaluation of: MOSSA, MOALO, MOVO and MOGWO algorithms in green machining to enhance the turning performances of X210Cr12 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3), 2135-2150.
- [82] **Kuntoğlu, M., Aslan, A., Pimenov, D. Y., Usca, Ü. A., Salur, E., Gupta, M. K., ... & Sharma, S. (2020)**. A review of indirect tool condition monitoring systems and decision-making methods in turning: Critical analysis and trends. *Sensors*, 21(1), 108.
- [83] **Geier, N., Davim, J. P., & Szalay, T. (2019)**. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105552.
- [84] **Nguyen, T. T. (2019)**. Prediction and optimization of machining energy, surface roughness, and production rate in SKD61 milling. *Measurement*, 136, 525-544.
- [85] **Alsalem, M. A., Alamoodi, A. H., Albahri, O. S., Dawood, K. A., Mohammed, R. T., Alnoor, A., ... & Al-Obaidi, J. R. (2022)**. Multi-criteria decision-making for coronavirus disease 2019 applications: a theoretical analysis review. *Artificial Intelligence Review*, 55(6), 4979-5062.

- [86] **Do, D. T. (2022)**. Application of fuca method for multi-criteria decision making in mechanical machining processes. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 5(3), 131-152.
- [87] **Saravanan, K. G., Thanigaivelan, R., & Soundarrajan, M. (2021)**. Comparison of Electrochemical Micromachining Performance using TOPSIS, VIKOR and GRA for Magnetic field and UV rays heated Electrolyte. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 69(5).
- [88] **Sanghvi, N., Vora, D., Patel, J., & Malik, A. (2021)**. Optimization of end milling of Inconel 825 with coated tool: A mathematical comparison between GRA, TOPSIS and Fuzzy Logic methods. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2301-2309
- [89] **Safi, K., Yallese, M. A., Belhadi, S., Mabrouki, T., & Chihaoui, S. (2022)**. Parametric study and multi-criteria optimization during turning of X210Cr12 steel using the desirability function and hybrid Taguchi-WASPAS method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 09544062221086171.
- [90] **Sharma, V. K., Rana, M., Singh, T., Singh, A. K., & Chattopadhyay, K. (2021)**. Multi-response optimization of process parameters using Desirability Function Analysis during machining of EN31 steel under different machining environments. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3121-3126.
- [91] **Padilla-Atondo, J. M., Limon-Romero, J., Perez-Sanchez, A., Tlapa, D., Baez-Lopez, Y., Puente, C., & Ontiveros, S. (2021)**. The impact of hydrogen on a stationary gasoline-based engine through multi-response optimization: a desirability function approach. *Sustainability*, 13(3), 1385.
- [92] **Sahu, A. K., Chatterjee, S., Nayak, P. K., & Mahapatra, S. S. (2018)**. Study on effect of tool electrodes on surface finish during electrical discharge machining of Nitinol. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 338, No. 1, p. 012033). IOP Publishing.
- [93] **Zoghipour, N., Yaratan, A. F., & Kaynak, Y. (2021)**. Multi objective optimization of rough pocket milling strategies during machining of lead-free brass alloys using Desirability function and Genetic algorithms-based analysis. *Procedia CIRP*, 99, 145-150.

Références Bibliographiques

- [94] Ileberi, E., Sun, Y., & Wang, Z. (2022). A machine learning based credit card fraud detection using the GA algorithm for feature selection. *Journal of Big Data*, 9(1), 24.
- [95] Baydaş, M., Elma, O. E., & Pamučar, D. (2022). Exploring the specific capacity of different multi criteria decision making approaches under uncertainty using data from financial markets. *Expert Systems with Applications*, 197, 116755
- [96] Divya, C., Raju, L. S., & Singaravel, B. (2021). Application of MCDM methods for process parameter optimization in turning process—a review. *Recent Trends in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICIME 2020*, 199-207.
- [97] Pathapalli, V. R., Basam, V. R., Gudimetta, S. K., & Koppula, M. R. (2020). Optimization of machining parameters using WASPAS and MOORA. *World Journal of Engineering*, 17(2), 237-246.
- [98] Shah, M., Modi, Y., Bandhu, D., & Abhishek, K. (2024). Selection of Cutting Fluids for Machining Titanium Alloys Using MCDM Methods. In *Decision-Making Models and Applications in Manufacturing Environments* (pp. 147-166). Apple Academic Press.
- [99] Junankar, A. A., Kaushik, Y., & Purohit, J. K. (2024). Parametric Optimization of Steel Turning Variables under Metal and Metal Oxide Nanofluid Cooling Environment with MCDM Hybrid Method. In *Tribology in Sustainable Manufacturing* (pp. 216-228). CRC Press.
- [100] Dutta, S., & Narala, S. K. R. (2021). Optimizing turning parameters in the machining of AM alloy using Taguchi methodology. *Measurement*, 169, 108340
- [101] SASI, K. (2024). Etude statistique des performances des matériaux de coupe avec différents revêtements lors du tournage dans un environnement à sec et lubrifié. (Thèse de doctorat : univ-guelma).
- [102] Zaman, P. B., Sultana, M. N., & Dhar, N. R. (2022). Multi-variant hybrid techniques coupled with Taguchi in multi-response parameter optimisation for better machinability of turning alloy steel. *Advances in Materials and processing Technologies*, 8(3), 3127-3147.

Références Bibliographiques

- [103] **Bellubbi, S., & Mallick, B. (2022)**. Multi Response Optimization of ECDM Process Parameters for Machining of Microchannel in Silica Glass Using Taguchi–GRA Technique. *Silicon*, 14(8), 4249-4263.
- [104] **Pawanr, S., Garg, G. K., & Routroy, S. (2019)**. Multi-objective optimization of machining parameters to minimize surface roughness and power consumption using TOPSIS. *Procedia CIRP*, 86, 116-120.
- [105] **Sampath, B., Sasikumar, C., & Myilsamy, S. (2023)**. Application of TOPSIS Optimization Technique in the Micro-Machining Process. In *Trends, Paradigms, and Advances in Mechatronics Engineering* (pp. 162-187). IGI global.
- [106] **Zhou, F., & Chen, T. Y. (2021)**. An extended Pythagorean fuzzy VIKOR method with risk preference and a novel generalized distance measure for multicriteria decision-making problems. *Neural Computing and Applications*, 33(18), 11821-11844.
- [107] **Chandrasekhar, S., & Prasad, N. B. V. (2020)**. Multi-response optimization of electrochemical machining parameters in the micro-drilling of AA6061-TiB₂ in situ composites using the Entropy–VIKOR method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(10), 1311-1322.
- [108] **Chen, W. H., Uribe, M. C., Kwon, E. E., Lin, K. Y. A., Park, Y. K., Ding, L., & Saw, L. H. (2022)**. A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112917.
- [109] **Nouioua, M., Yallese, M. A., Khettabi, R., Belhadi, S., & Mabrouki, T. (2017)**. Comparative assessment of cooling conditions, including MQL technology on machining factors in an environmentally friendly approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 3079-3094.

- [110] Elbah, M., Laouici, H., Benlahmidi, S., Nouioua, M., & Yallese, M. A. (2019). Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5), 2581-2597.
- [111] ABBED, K., Kribes, N., Yallese, M. A., Chihaoui, S., & Boutabba, S. (2023). Effects of tool materials and cutting conditions in turning of Ti-6Al-4V alloy: statistical analysis, modeling and optimization using CoCoSo, MABAC, ARAS and CODAS methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(3-4), 1535-1557.
- [112] Makhfi, S., Dorbane, A., Harrou, F., & Sun, Y. (2023). Prediction of cutting forces in hard turning process using machine learning methods: a case study. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-17. Makhfi, S., Dorbane, A., Harrou, F., & Sun, Y. (2023). Prediction of cutting forces in hard turning process using machine learning methods: a case study. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-17.
- [113] Kara, F., Bayraktar, F., Savaş, F., & Özbek, O. (2023). Experimental and statistical investigation of the effect of coating type on surface roughness, cutting temperature, vibration and noise in turning of mold steel. *Journal of Materials and Manufacturing*, 2(1), 31-43.
- [114] Rao, G. S., Mukkamala, U., Hanumanthappa, H., Prasad, C. D., Vasudev, H., Shanmugam, B., & KishoreKumar, K. C. (2023). Evaluating and optimizing surface roughness using genetic algorithm and artificial neural networks during turning of AISI 52100 steel. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-10.
- [115] Kim, D. G., & Yang, S. H. (2023). Efficient analysis of CFRP cutting force and chip formation based on cutting force models under various cutting conditions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24(7), 1235-1251.
- [116] Patel, N. S., Parihar, P. L., & Makwana, J. S. (2021). Parametric optimization to improve the machining process by using Taguchi method: a review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2709-2714.

Références Bibliographiques

[117] **Anggoro, P. W., Bawono, B., Setyohadi, D. B., Ratnasari, L., Fergiawan, P. K., Tauviqirrahman, M., ... & Bayuseno, A. P. (2023)**. Optimisation of the machining time required by insole orthotic shoes for patients with clubfoot using the Taguchi and response surface methodology approach. *Heliyon*, 9(6).

[118] **Haoues, S., Yallese, M. A., Kaddeche, M., Uysal, A., & Safi, K. (2024)**. Investigation on machining of GFRP through ANOVA, DFA, and CoCoSo method combined with Taguchi approach. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 07316844241239249.

[119] **Djouambi, N., Yallese, M. A., Kaddeche, M., Belhadi, S., & Hegedűs, G. (2024)**. Predictive modeling and multi-response optimization of cutting parameters using DF, GRA and MABAC techniques while turning POM-C GF 25% composite polymer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(3), 1987-2007.

Mahraj

[120] **Khelfaoui, F., Yallese, M. A., Boucherit, S., Ouelaa, N., Belhadi, S., & Ben Salem, S. (2024)**. Assessment of performance parameters in intermittent turning and multi-response optimization of machining conditions using DF, MOORA, VIKOR, and coupled NSGAI-VIKOR methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(11), 5665-5691.

[121] **Raj, P., Biju, P. L., Deepanraj, B., & Senthilkumar, N. (2023)**. Optimizing the machining conditions in turning hybrid aluminium nanocomposites adopting teaching–learning based optimization and MOORA technique. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-13.

