

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



Faculté : Sciences et technologies
Département : Génie Mécanique

THÈSE

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

Filière : Génie Mécanique

Présentée par

LAOUISSI Aissa

Intitulée

**Etude du comportement du couple fonte/ céramique en nitrure
de silicium (Si_3N_4) revêtue et non revêtue, en sollicitations
sévères lors du tournage -Modélisation et Optimisation-**

Devant le Jury composé de :

| | | | |
|-----------------------------------|------------|----------------------------|---------------|
| Dr Bezazi Abderrezak | Professeur | Univ. 8 Mai 1945 Guelma | Président |
| Dr Belbah Ahmed | M C A | Univ. 8 Mai 1945 Guelma | Rapporteur |
| Dr Yaltese Mohamed Athmane | Professeur | Univ. 8 Mai 1945 Guelma | Co-Rapporteur |
| Dr Boutabba Smail | Professeur | Univ. 8 Mai 1945 Guelma | Examineur |
| Dr Bey kamel | Professeur | Univ. Badji mokhtar Annaba | Examineur |
| Dr Belhadi Salim | M C A | Univ. 8 Mai 1945 Guelma | Invité |

Décembre 2019

Dédicaces

Je tiens à dédier cette thèse.

À ma très chère mère et à mon très cher père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien et de prières durant toutes mes années d'études, de leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'efforts pour mon éducation, mon instruction et pour me permettre d'atteindre ce but.

À ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.

À mes Chères Sœurs et mon Cher frère Haïder,

À toute ma famille,

À tous mes amis,

À tous mes chers collègues de MASSINISSA

UNE SPECIALE DEDICACE A UNE PERSONNE QUI M'A DONNE UN SENTIMENT SPECIAL DANS MA VIE, ET POUR QUI JE PORTE BEAUCOUP DE TENDRESSE, D'AMOUR ET DE RESPECT.

REMERCIEMENTS

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail. Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur **YALLESE Mohamed Athmane**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma et **BELBAH Ahmed**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma à qui je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour m'avoir guidé efficacement pendant ces années de recherches en me faisant ainsi profiter de ses compétences, de leurs conseils fructueux et de m'avoir permis de mener à terme cette thèse scientifique.*

*Je remercie également Monsieur le Professeur **BEZAZI Abderrezak** Professeur au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma qui m'a fait le plaisir et l'honneur de présider le jury de ma thèse.*

*J'exprime aussi ma gratitude à Messieurs **BOUTABBA Smail**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université Université 08 Mai 1945 de Guelma et **BEY kamel**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université Badji mokhtar d'Annaba, qui ont accepté d'examiner mon travail et participer au jury de thèse.*

*J'adresse également mes chaleureux remerciements et ma gratitude à Monsieur **BELHADI Salim**, Docteur au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, pour m'avoir aidé, encouragé et accepté d'examiner mon travail et participer au jury de thèse.*

*Je remercie aussi Monsieur **HADDAD Abdelkrim**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma pour son soutien et son aide pour réaliser ce travail.*

J'adresse mes remerciements à tous les membres, les thésards et les techniciens du Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) et Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM)

Résumé :

L'usinage des matériaux durcis tels que les fontes nécessite des matériaux de coupe à haute performance, parmi ces matériaux on trouve les céramiques à la base de nitrure de silicium (Si_3N_4) qui sont peu utiles dans l'usinage des fontes et notamment dans l'industrie algérienne. Cela nous a incités à s'inscrire les travaux de recherche de notre thèse de doctorat qui consiste à investiguer le comportement des outils de céramiques en nitrure de silicium et d'étudier leurs performances en sollicitations sévères lors du tournage de la fonte FGL250 en utilisant la méthodologie des plans d'expériences.

Le présent travail commence par l'étude d'influence des paramètres de coupe, soit, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, la lubrification et le temps d'usinage sur les paramètres technologiques d'usinage (efforts de coupe, rugosité de surface et usure des outils). Les résultats de l'analyse topographique des surfaces usinées en utilisant les paramètres fonctionnels sont aussi exposés. Ensuite, on s'intéresse à la modélisation de l'effort de coupe tangentiel, du critère de la rugosité de surface R_a , de l'usure en dépouille (V_b) et la puissance de coupe en fonction des paramètres de régime de coupe par la méthodologie de surface de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN), par la suite les capacités prédictives des deux modèles ANN et RSM ont été comparés en termes de leur écart absolu moyen (MAD), erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de détermination (R^2). La dernière partie de cette thèse est réservée à l'optimisation des paramètres de coupe. Nous avons appliqué l'optimisation multi objectifs, en utilisant la fonction de désirabilité, les algorithmes génétiques et la méthode d'analyse relationnelle grise (GRA) afin de trouver un compromis entre diverses réponses (V_b , F_z , R_a , P_c et MRR), ensuite on présente les régimes de coupes optimaux obtenus par les différentes méthodes utilisées.

Mots clés : Plans d'expérience ; Usure ; FGL250 ; Céramique en nitrure de silicium ; RSM ; ANN ; GRA ; GA.

Abstract:

The machining of hardened materials such as cast iron requires high-performance cutting materials, among these materials are ceramics based on silicon nitride (Si_3N_4) which are of little use in the machining of cast irons and especially in Algerian industry. This prompted us to register the research work of our doctoral thesis which consists in investigating the behavior of silicon nitride ceramic tools and to study their performances in severe stresses during the turning of the FGL250 cast iron in using the methodology of the plans of experiments.

The present work begins with the study of the influence of the cutting parameters, that is, the cutting speed, the feed rate, the depth of cut, the lubrication and the machining time on the technological parameters of machining (cutting force, surface roughness and tool wear). The results of the topographic analysis of the machined surfaces using the functional parameters are also exposed. Then, we focus on the modeling of the tangential cutting force, the surface roughness criterion R_a , the flank wear (V_b) and the cutting power as a function of the cutting regime parameters by the response surface methodology (RSM) and artificial neural Networks (ANN), subsequently the predictive capabilities of both ANN and RSM models were compared in terms of their mean absolute deviation (MAD), absolute mean absolute error (MAPE), mean squared error (RMSE) and coefficient of determination (R^2). The last part of this thesis is reserved for the optimization of cutting parameters. We applied multi-objective optimization, using the desirability function, the genetic algorithms and the gray relational analysis method (GRA) to find a compromise between various responses (V_b , F_z , R_a , P_c and MRR), then we present the optimal cutting regimes obtained by the different methods used.

Keywords: Design of experiment; Wear; FGL250; Silicon nitride ceramic; RSM; ANN; GRA; GA.

ملخص:

يتطلب تقطيع المعادن الصلبة مثل الحديد الزهر مواد تقطيع عالية الأداء، من بين هذه المواد سيراميك نيتريد السيليكون (Si_3N_4) والتي تعتبر قليلة الاستعمال خاصة في الصناعة الجزائرية. هذا دفعنا إلى تسجيل العمل البحثي لأطروحة الدكتوراه الخاصة بنا والتي تتألف من دراسة سلوك أدوات السيراميك من نيتريد السيليكون ودراسة أدائها في ضغوط شديدة أثناء خراطة الحديد الزهر FGL250 باستخدام منهجية تصميم التجارب.

يبدأ العمل الحالي بدراسة تأثير معاملات القطع، أي سرعة القطع، سرعة التغذية، عمق التمريرة، التشحيم ومجة القطع على المعاملات التكنولوجية للمعالجة الآلية (جهود قطع، خشونة السطح وتآكل أداة القطع). كما يعرض هذا العمل نتائج التحليل الطبوغرافي للأسطح المتحصل عليها باستخدام المعاملات الوظيفية. بعد ذلك، نركز على نمذجة جهود القطع، ومعيار خشونة السطح (Ra)، وتآكل أداة القطع (Vb)، واستطاعة القطع بواسطة منهجية سطح الاستجابة (RSM) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، وتمت مقارنة القدرات التنبؤية لكل من ANN و RSM باستعمال معاملات الارتياح MAD و MAPE و RMSE ومعامل التحديد R^2 . الجزء الأخير من هذه الأطروحة مخصص لتحسين عوامل القطع باستعمال التحسين متعدد الأهداف باستخدام منهجية سطح الاستجابة والخوارزميات الجينية وطريقة التحليل العلائقي الرمادي (GRA) لإيجاد حل وسط بين الاستجابات المختلفة (Vb و Fz و Ra و Pc و MRR) والحصول على أنظمة القطع المثلى.

الكلمات المفتاحية: منهجية تصميم التجارب; تآكل أداة القطع; سيراميك نيتريد السيليكون RSM; ANN; GRA; GA

Index des figures

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figure I.1 | Opérations de tournage..... | 7 |
| Figure I.2 | Opérations de base en tournage..... | 8 |
| Figure I.3 | Matériaux de coupe | 9 |
| Figure I.4 | Revêtement d'une plaquette de coupe..... | 11 |
| Figure I.5 | Usure en cratère | 14 |
| Figure I.6 | Usure en dépouille..... | 15 |
| Figure I.7 | Différentes formes d'usure..... | 15 |
| Figure I.8 | Usure par abrasion | 16 |
| Figure I.9 | Usure par adhésion..... | 17 |
| Figure I.10 | Usure par diffusion..... | 18 |
| Figure I.11 | Composantes de l'effort de coupe en tournage. | 19 |
| Figure I.12 | Pression spécifique de coupe (Ks) | 19 |
| Figure I.13 | Principaux défauts de surface | 21 |
| Figure I.14 | Critères d'état de surface | 22 |
| Figure I.15 | Critère de rugosité Ra. | 22 |
| Figure I.16 | Critère de rugosité Rz. | 23 |
| Figure I.17 | Critère de rugosité Rt. | 23 |
| Figure I.18 | profil tiré d'une mesure 3D montre l'ambiguïté possible de la mesure et de la caractérisation 2D | 24 |
| Figure I.19 | Paramètres liés à la distribution (a) et Paramètres de taux de portance (b) | 24 |
| Figure I.20 | S _{mr} est le taux de portance surfacique, p correspondant à une hauteur de section c | 25 |
| Figure I.21 | S _{mc} est taux de portance inverse, c correspondant à un rapport de matière p | 25 |
| Figure I.22 | S _{xp} défini comme la différence de hauteur entre deux S _{mc} à 2,5 et 50% | 26 |
| Figure I.23 | Construction graphique des paramètres S _k | 27 |
| Figure I.24 | Construction graphique du paramètre S _k | 28 |
| Figure I.25 | Construction graphique du paramètre S _{pk} | 28 |
| Figure I.26 | S _{vk} est la moyenne arithmétique de la profondeur des vallées..... | 29 |
| Figure I.27 | Paramètres fonctionnels de volume | 29 |
| Figure I.28 | Diagramme fer-carbone. | 31 |
| Figure I.29 | Schéma de principe d'un Algorithme Génétique. | 37 |
| Figure I.30 | Evolution d'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe et profondeur de passe..... | 40 |
| Figure I.31 | Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédite par régression et ANN..... | 40 |
| Figure I.32 | Evolution d'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe..... | 41 |
| Figure I.33 | Evolution de Ra en fonction de la vitesse de coupe..... | 41 |
| Figure I.34 | Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité moyenne Ra..... | 43 |
| Figure I.35 | Topographie de surface générée avec v _c =400 m/min, f= 0,08 mm/tour et r _ε =0,8 mm..... | 43 |
| Figure I.36 | Cartes thermiques pour la coupe orthogonale pour différentes vitesses de coupe: (a) v _c = 280 m/min, (b) v _c = 400 m/min en maintenant constante f=0,12mm tr et a _p = 3,3 mm..... | 44 |

| | | |
|----------------------|--|-----|
| Figure I.37 | Influence de la vitesse de coupe sur la température de coupe..... | 44 |
| Figure I.38 | Evolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe..... | 45 |
| Figure I.39 | Evolution de la durée de vie des outils de coupe en fonction de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe..... | 45 |
| Figure II.1 | Eprouvettes en FGL 250 utilisées..... | 50 |
| Figure II.2 | Tour parallèle modèle SN 40C..... | 50 |
| Figure II.3 | Plaquettes de coupe utilisées..... | 52 |
| Figure II.4 | Porte-outil utilisé..... | 53 |
| Figure II.5 | Plateforme KISTLER..... | 54 |
| Figure II.6 | Chaîne de mesure des efforts de coupe..... | 54 |
| Figure II.7 | Dispositif pour mesure les critères de rugosité de surface..... | 55 |
| Figure II.8 | Chaîne de mesure de la rugosité en 3D..... | 57 |
| Figure II.9 | Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250)..... | 58 |
| Figure II.10 | Méthode des plans d'expériences..... | 59 |
| Figure II.11 | Domaine de variation du facteur..... | 60 |
| Figure II.12 | Définition de l'espace expérimental..... | 60 |
| Figure II.13 | Définition du point expérimental dans l'espace expérimental..... | 61 |
| Figure II.14 | Définition du domaine d'étude ... | 61 |
| Figure II.15 | Définition de la surface de réponse | 62 |
| Figure III.1 | Influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe..... | 71 |
| Figure III.2 | Influence de la profondeur de passe sur les efforts de coupe..... | 72 |
| Figure III.3 | Influence de la vitesse d'avance sur les efforts de coupe..... | 72 |
| Figure III.4 | Influence de la lubrification sur les efforts de coupe..... | 73 |
| Figure III.5 | Influence de la vitesse de coupe sur les critères de rugosité Ra et Rz..... | 74 |
| Figure III.6 | Influence de l'avance par tour sur les critères de rugosité Ra et Rz | 75 |
| Figure III.7 | Influence de la profondeur de passe sur les critères de rugosité Ra et Rz..... | 75 |
| Figure III.8 | Influence de la lubrification sur les critères de rugosité Ra et Rz.... | 76 |
| Figure III.9 | Evolution de l'usure en dépouille des plaquettes CC6090 et CC1690 en fonction de temps d'usinage..... | 77 |
| Figure III.10 | Evolution de Fx, Fy et Fz pour CC6090 et CC1690 en fonction de temps d'usinage..... | 79 |
| Figure III.11 | Evolution de Ra et Rz pour CC6090 et CC1690 en fonction de temps d'usinage..... | 79 |
| Figure III.12 | Topographie de surface 3D..... | 81 |
| Figure III.13 | Paramètres fonctionnels 2D (Rk) et courbe d'Abbott..... | 83 |
| Figure III.14 | Diagramme en barres..... | 84 |
| Figure III.15 | Paramètres fonctionnels (Sk) et courbe d'Abbott..... | 86 |
| Figure III.16 | Paramètres volumiques..... | 88 |
| Figure IV.1 | graphes des effets principaux pour Ra, Fz, Pc et MRR..... | 97 |
| Figure IV.2 | Représentation graphique d'un ANN..... | 99 |
| Figure IV.3 | perceptrons ANN pour Ra, Fz et Pc..... | 100 |
| Figure IV.4 | 3D Response Surfaces for Ra, Fz and Pc..... | 103 |
| Figure IV.5 | Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées par RSM et ANN..... | 108 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Figure IV.6 | Comparaison entre les résidus des modèles RSM et ANN pour Ra, Fz et Pc..... | 109 |
| Figure IV.7 | Tests de validation des modèles RSM et ANN pour Ra, Fz et Pc... | 110 |
| Figure V.1 | Graphes des effet principaux pour Fz , Ra et Vb. | 118 |
| Figure V.2 | Surfaces de réponse 3D pour Fz , Ra et Vb..... | 121 |
| Figure V.3 | Comparaison entre les résultats de Fz , Ra et Vb, mesurés et estimés..... | 122 |
| Figure V.4 | Probabilités normales des résidus pour Fz , Ra et Vb..... | 124 |
| Figure V.5 | Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour Fz, Ra et Vb..... | 124 |
| Figure V.6 | Usure en dépouille de CC6090 et CC1690..... | 126 |
| Figure V.7 | Images de MEB de la plaquette CC1690..... | 127 |
| Figure V.8 | Images de MEB de la plaquette CC6090..... | 128 |
| Figure VI.1 | Schéma de principe d'un Algorithme Génétique..... | 135 |
| Figure VI.2 | Graphes de front de Pareto..... | 139 |
| Figure VI.3 | Graphes de front de Pareto..... | 144 |

Index des tables

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Table I.1 | Revêtements en CVD..... | 12 |
| Table I.2 | Revêtements en PVD. | 12 |
| Table I.3 | ANOVA pour Vb et Ra | 42 |
| Table II.1 | Composition chimique de la fonte FGL 250..... | 49 |
| Table II.2 | Informations relatives aux plaquettes utilisées..... | 51 |
| Table II.3 | Caractéristiques de porte-outil utilisé..... | 52 |
| Table II.4 | Dimensions du porte-outil utilisé..... | 53 |
| Table II.5 | Niveaux des déférents paramètres de coupe..... | 65 |
| Table II.6 | Matrice de planification pour un plan de 27 essais..... | 65 |
| Table II.7 | Matrice de planification de Taguchi L ₁₈ (1 ² x4 ³)..... | 67 |
| Table II.8 | Niveaux des déférents paramètres de coupe..... | 68 |
| Table IV.1 | Niveaux des déférents paramètres de coupe..... | 91 |
| Table IV.2 | Résultats de Ra, Fz, Pc et MRR en fonction des conditions de coupe | 92 |
| Table IV.3 | ANOVA pour Ra..... | 93 |
| Table IV.4 | ANOVA pour Fz..... | 94 |
| Table IV.5 | ANOVA pour Pc..... | 95 |
| Table IV.6 | ANOVA pour MRR..... | 96 |
| Table IV.7 | Architectures ANN adéquate pour modéliser Ra et Fz..... | 100 |
| Table IV.8 | Comparaison entre les résultats de prédiction par RSM et ANN pour CC6090..... | 104 |
| Table IV.9 | Comparaison entre les résultats de prédiction par RSM et ANN pour CC1690..... | 104 |
| Table IV.10 | Fonctions d'erreur et ses équations..... | 105 |
| Table IV.11 | Comparaison entre ANN et RSM..... | 106 |
| Table V.1 | Matrice de planification de Taguchi L ₁₈ (1 ² x4 ³) | 114 |
| Table V.2 | ANOVA pour Fz..... | 115 |
| Table V.3 | ANOVA pour Ra..... | 116 |
| Table V.4 | ANOVA pour Vb..... | 117 |
| Table V.5 | Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour Rz, Ra et Vb..... | 122 |
| Table VI.1 | Conditions d'optimisation..... | 132 |
| Table VI.2 | Résultats d'optimisation par DF..... | 133 |
| Table VI.3 | Les résultats de l'optimisation par GA..... | 140 |
| Table VI.4 | Résultats expérimentale normalisé (x _i (k))..... | 141 |
| Table VI.5 | Coefficients du $\zeta_i(k)$ | 142 |
| Table VI.6 | Qualité Rationnelle Grise (GRG)..... | 143 |
| Table VI.7 | Analyse de la variance (ANOVA) pour la qualité relationnelle grise (GRG)..... | 145 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| NOMENCLATURE | 1 |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 2 |
| <u>Chapitre I</u> | |
| I.1. Introduction | 5 |
| I.2. Usinabilité | 5 |
| I.3. Le procédé de tournage | 6 |
| I.3.1. Opérations de bases | 7 |
| I.3.2. les paramètres technologiques en tournage | 8 |
| I.3.2.1. La vitesse de coupe V_C | 8 |
| I.3.2.2. La vitesse d'avance V_f ou l'avance par tour f | 8 |
| I.3.2.3. La profondeur de passe ap | 8 |
| I.4. Matériaux de coupe | 9 |
| a) Les carbures | 9 |
| b) Les outils en céramique | 9 |
| c) Les cermets | 10 |
| d) Le nitrure de bore cubique | 10 |
| I.5. Revêtements | 10 |
| I.5.1.Type de revêtement | 11 |
| a) Revêtement – CVD | 11 |
| b) Revêtement – PVD | 12 |
| I.6. Endommagement des outils de coupe | 13 |
| I.6.1. Forme d'usure | 13 |
| a) Usure en cratère | 13 |
| b) Usure en dépouille | 14 |
| I.6.2. Mécanismes d'usure | 15 |
| a) Usure par abrasion | 15 |
| b) Usure par adhésion | 16 |
| c) Usure par diffusion | 17 |
| I.7. Les actions mécaniques en tournage | 18 |
| I.7.1 Effort de coupe | 18 |
| I.7.2. Pression spécifique de coupe | 19 |
| I.7.3. Puissance de coupe | 20 |
| I.8. Paramètres de performance d'usinage | 20 |
| I.8.2. Qualité de surface | 20 |
| Défauts du premier ordre..... | 21 |
| Défauts du deuxième ordre..... | 21 |
| Défauts du troisième ordre..... | 21 |
| Défauts du quatrième ordre..... | 21 |

| | |
|--|----|
| I.8.2.1. Paramètres caractéristiques d'état de surface..... | 21 |
| Rugosité moyenne arithmétique Ra | 22 |
| Rugosité moyenne profondeurs Rz | 22 |
| Rugosité totale Rt | 23 |
| I.9. Topographie de surface 3D et paramètres fonctionnels..... | 23 |
| I.9.1. Les paramètres fonctionnels de surface..... | 24 |
| I.9.1.1. Paramètres liés à la distribution et Paramètres de taux de portance... | 24 |
| I.9.1.2. Paramètres de taux de portance..... | 24 |
| a) Taux de portance surfacique, Smr | 24 |
| b) Taux de portance inverse, Smc | 26 |
| c) Hauteur extrême de crête, Sxp | 26 |
| I.9.1.3. Les paramètres fonctionnels Sk | 26 |
| a) Profondeur de rugosité centrale, Sk | 27 |
| b) Hauteur de crête réduite, Spk | 28 |
| I.9.1.4. Paramètres fonctionnels de volume..... | 29 |
| V_{vv} (Volume vide de vallée)..... | 29 |
| V_{vc} (Volume vide central)..... | 30 |
| V_{mp} (Volume matériel de crête)..... | 30 |
| V_{mc} (Volume matériel central)..... | 30 |
| I.10. Les fontes..... | 30 |
| I.10.1. Définition..... | 30 |
| I.10.2. Classification des fontes..... | 31 |
| I.10.2.1. Fonte grise..... | 31 |
| a) La fonte à graphite lamellaire..... | 31 |
| b) La fonte à graphite sphéroïdal..... | 31 |
| I.10.2.2. Fonte blanche..... | 32 |
| I.10.2.3. Fonte malléable..... | 32 |
| a) Fontes malléables à cœur noir..... | 32 |
| b) Fonte malléables à cœur blanche..... | 33 |
| I.10.3. Usinabilité des fontes..... | 33 |
| I.10.3.1. Fontes blanche..... | 33 |
| I.10.3.2. Fontes malléables..... | 33 |
| I.10.3.3. Fonte grise..... | 34 |
| I.11. méthodes de modélisation et optimisation en usinage..... | 34 |

| | |
|--|----|
| I.11.1. Méthode de surface de réponse MSR..... | 35 |
| I.11.2. Approche des réseaux de neurones artificiels ANN..... | 35 |
| I.11.3. Méthode de Taguchi..... | 36 |
| I.11.4. Algorithmes Génétiques..... | 37 |
| I.12. Etat de l'art..... | 38 |
| I.13. Conclusion..... | 46 |

Chapitre II

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 49 |
| II.2. Equipements utilisés..... | 49 |
| II.2.1. Éprouvettes..... | 49 |
| II.2.3. Plaquettes de coupe..... | 51 |
| a) Plaquette en céramique revêtue CC1690..... | 51 |
| b) Plaquette en céramique non revêtue CC6090..... | 51 |
| II.2.4. Porte-outils..... | 52 |
| II.2.5. Dynamomètre..... | 53 |
| II.2.6. Mesure de la rugosité de surface..... | 55 |
| II.2.6.1. rugosité 2D..... | 55 |
| II.2.6.2. rugosité 3D..... | 55 |
| a) Boîtier de contrôle Phénix..... | 56 |
| b) Télécommande externe..... | 56 |
| c) Logiciel d'acquisition Phénix..... | 56 |
| d) Logiciel d'analyse Altimap..... | 56 |
| II.2.7. Microscope pour la mesure de l'usure..... | 57 |
| II.3. Planification des expériences..... | 58 |
| II.3.1. Méthode unifactorielle..... | 58 |
| II.3.2. Méthode multifactorielle..... | 58 |
| II.3.2.1. Notion d'espace expérimental..... | 59 |
| - Facteur quantitatif..... | 59 |
| - Facteur qualitatif..... | 60 |
| II.3.2.2. Notion de surface de réponse..... | 61 |
| II.3.2.3. Modélisation mathématique de la réponse..... | 63 |
| II.3.2.4. Choix du type de plan..... | 64 |
| a) Les plans factoriels complets..... | 65 |

| | |
|--|-----|
| b) Méthode de taguchi..... | 66 |
| II.4. Conclusion..... | 68 |
| <u>Chapitre III</u> | |
| III.1. Introduction..... | 70 |
| III.2. Analyse uni factorielle..... | 70 |
| III.2.1. Influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe..... | 70 |
| a) Influence de la vitesse de coupes..... | 70 |
| b) Influence de la profondeur de passe..... | 71 |
| c) Influence de la vitesse d'avance..... | 72 |
| d) Influence de la lubrification..... | 72 |
| III.2.2. Influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface..... | 73 |
| a) Influence de la vitesse de coupes..... | 73 |
| b) Influence de l'avance par tour..... | 74 |
| c) Influence de la profondeur de passe..... | 75 |
| d) Influence de lubrification..... | 75 |
| III.3. Evolution de l'usure [Vb] en fonction de temps d'usinage..... | 76 |
| III.4. Influence de temps d'usinage sur les efforts de coupe et les critères de rugosité de surface..... | 78 |
| III.5. Analyse de la topographie des surfaces..... | 80 |
| III.5.1. Topographie de surface 3D..... | 80 |
| III.5.2. Paramètre fonctionnels 2D..... | 82 |
| III.5.3. Diagrammes en barres..... | 84 |
| III.5.4. Paramètre fonctionnels 3D..... | 85 |
| a) Les paramètres Sk..... | 85 |
| b) Paramètres volumiques..... | 87 |
| III.5. Conclusion..... | 89 |
| <u>Chapitre IV</u> | |
| IV.1. Introduction..... | 91 |
| IV.2. Analyse et discussion des résultats..... | 91 |
| IV.2.1 Analyse de la variance (ANOVA)..... | 92 |
| IV.2.2 Graphes des effets principaux..... | 96 |
| IV.2.3 Modélisation de Ra, Fz et Pc par la méthode RSM..... | 97 |
| IV.2.4. Modélisation par ANN..... | 98 |
| IV.2.5. Surface de réponse 3D..... | 102 |
| IV.2.6. Comparaison entre les modèles ANN et RSM..... | 103 |
| IV.2.7. Tests de validation..... | 109 |
| IV.3. Conclusion..... | 111 |
| <u>Chapitre V</u> | |
| V.I. Introduction..... | 114 |
| V.2. Analyse et discussion des résultats..... | 114 |
| V.2.1. Analyse de la variance (ANOVA)..... | 114 |

| | |
|--|-----|
| V.2.2. Graphes des effets principaux..... | 117 |
| V.2.3. Modélisation des paramètres de coupe..... | 119 |
| V.2.4. Surfaces de réponse 3D..... | 120 |
| V.2.5. Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés..... | 121 |
| V.3. Evolution de l'usure en dépouille..... | 125 |
| V.4. Conclusion..... | 128 |
| <u>Chapitre VI</u> | |
| VI.1. Introduction..... | 131 |
| VI.2. Optimisation des paramètres de coupes par la fonction de désirabilité..... | 131 |
| VI.3. Optimisation des paramètres de coupes par les algorithmes génétique..... | 134 |
| VI.3.1. Définition..... | 134 |
| VI.3.2. Les opérateurs des algorithmes génétiques..... | 136 |
| a) Population initiale..... | 136 |
| b) Codage des éléments de la population initiale..... | 136 |
| c) Opérateur de Sélection..... | 136 |
| d) Opérateur de Croisement..... | 136 |
| e) Opérateur de Mutation..... | 137 |
| VI.3.3. Fonction objective..... | 137 |
| VI.3.4.1. Graphes de front de Pareto..... | 137 |
| VI.3.4.2. Régimes de coupe optimaux..... | 139 |
| VI.4. Optimisation par la Méthode d'Analyse Relationnelle Grise (Grey method)..... | 140 |
| Etape 1 : La normalisation..... | 141 |
| Etape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris..... | 142 |
| Etape 3 : Calcul du GRG (Grey relational grade)..... | 143 |
| VI.4. Conclusion..... | 145 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE | 147 |
| RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE | 150 |

NOMENCLATURE

| | |
|-----------------|--|
| ANN | Réseau de neurones artificiels. |
| ANOVA | Analyse de la variance |
| <i>ap</i> | profondeur de passe (<i>mm</i>) |
| <i>Cont. %</i> | Contribution (%). |
| DF | Dégréés de liberté |
| <i>f</i> | avance par tour (<i>mm/tr</i>) |
| GA | Algorithme génétique |
| GRA | Analyse relationnelle grise |
| MC | Moyenne des carrés. |
| <i>Mr1, Mrl</i> | Taux de longueur portante |
| MSR | Méthodologie de surface de réponse |
| <i>Pc</i> | Puissance de coupe (W). |
| Prob. | Probabilité |
| R^2 | Coefficient de détermination (%). |
| <i>Ra</i> : | Profondeur de rugosité du coeu (μm) |
| <i>Rk</i> | Core Roughness depth (μm) |
| <i>Rpk</i> | Profondeur réduite des pics (μm) |
| <i>Rvk</i> | Profondeur réduite des vallées (μm) |
| <i>SC</i> | Somme des carrés |
| <i>Sk</i> | Profondeur de rugosité centrale (μm) |
| <i>Spk</i> | Hauteur de crête réduite (μm) |
| <i>Svk</i> | Hauteur de vallée éliminée (μm) |
| Vb | Usure en dépouille (<i>mm</i>). |
| <i>Vc</i> | Vitesse de coupe (<i>m/min</i>) |
| <i>Vmc</i> | Volume matériel central (<i>ml/m²</i>) |
| <i>Vmp</i> | Volume matériel de crête (<i>ml/m²</i>) |
| Vvc | Volume vide central |
| Vvv | Volume vide de vallée |

Introduction générale

Les fontes sont des alliages métalliques dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. En raison de son faible coût et de leurs propriétés mécaniques comparables à celles de certains aciers, les fontes sont utilisées dans tous les domaines de l'industrie et notamment dans l'automobile (pistons, disques de frein), la construction mécanique (convoyeurs, pompes et pignons) et la tuyauterie. Ils sont divisés en plusieurs catégories, fonte grise, fonte blanche, fonte malléable et fonte trempée. Les fontes ayant une bonne résistance à l'usure et excellente coulabilité. D'autre part ces alliages possèdent des propriétés très sévères, comme la dureté élevée et la difficulté d'usinage. L'usinage des fontes nécessite des matériaux de coupe à haute performance telle que les CBN, les céramiques et les carbures. Parmi ces matériaux on trouve les céramiques à base de nitrure de silicium (Si_3N_4) qui sont peu utilisées dans l'usinage des fontes et notamment dans l'industrie algérienne. Cela nous a incité à inscrire les travaux de recherche de notre thèse de doctorat dans le but d'étudier les performances de ces céramiques en sollicitations sévères lors du tournage de la fonte FGL250.

Cette exigence impose la connaissance de l'impact des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance (paramètres technologiques) tels que l'usure, les efforts de coupe, la rugosité de surface et la puissance de coupe, puis la modélisation du processus et la détermination des modèles mathématiques de prédiction et enfin l'obtention des conditions de coupe optimales en se basant sur les modèles déterminés, et en utilisant différentes méthodes telles que la méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN).

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse s'articulent autour de six chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'usinabilité des matériaux métalliques, les principales définitions sur le tournage, l'usure des outils de coupe, la rugosité de surface 2D et 3D, les fontes et le choix des matériaux de coupe. En suite, nous avons examiné les méthodes d'aide à la modélisation et l'optimisation des paramètres de coupe. La dernière partie de ce chapitre expose les travaux de recherche relatifs au tournage des fontes avec différents matériaux de coupe et différentes méthodes de modélisation et optimisation.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les équipements nécessaires à la réalisation des essais expérimentaux tels que la machine-outil, les éprouvettes utilisées, les matériaux de coupe

et les dispositifs de mesure. Les conditions expérimentales, les méthodes mathématiques et statistiques et les plans d'expériences utilisés sont également exposés.

Le troisième chapitre, est consacré à une étude comparative sur les performances des outils céramiques en nitrure de silicium (Si_3N_4) revêtues (CC1690) et non revêtues (CC6090) par la méthode unifactorielle. Cette étude concerne l'influence des paramètres de coupe (ap , f et Vc), le temps d'usinage et la lubrification sur les efforts de coupe et la rugosité de surface lors du tournage de la fonte FGL250. L'évolution de l'usure en dépouille (V_b) des outils en fonction du temps et l'analyse de la topographie des surfaces usinée en utilisant les paramètres fonctionnels, 2D et 3D basé sur les courbes d'Abbott- Firestone ont été établis.

Au quatrième chapitre on présente une étude comparative entre le critère de la rugosité de surface R_a , l'effort de coupe tangentiel (F_z), la puissance de coupe (P_c) et le taux d'enlèvement de matière (MRR). Les essais expérimentaux ont été planifiés suivant un plan factoriel complet de 27 essais (3^3). L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer et classer les paramètres de coupe qui sont influents sur les réponses étudiées. L'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN) et la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) ont été utilisées pour obtenir des modèles mathématiques de prédiction afin de les utiliser dans l'étape d'optimisation. Ensuite les capacités prédictives des deux modèles ANN et RSM ont été comparées en termes de leur écart absolu moyen (MAD), Erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2).

Dans le cinquième chapitre on a présenté les résultats de l'étude de l'impact des conditions de coupe (ap , f , Vc), la distance usinée et le type de matériaux (céramique en nitrure de silicium revêtue et non revêtue) sur l'usure en dépouille (V_b), effort de coupe tangentiel (F_z) et rugosité de surface (R_a) obtenues lors du tournage de la fonte FGL 250. Les essais expérimentaux sont planifiés selon le plan de Taguchi L_{18} , la modélisation des paramètres de coupe a été faite à l'aide de la technique de surface de réponse (MSR).

Le dernier chapitre est réservé à l'optimisation des paramètres de coupe étudiés dans les chapitres précédents. Nous avons appliqué l'optimisation multi-objective, en utilisant la fonction de désirabilité, les algorithmes génétiques et la méthode d'Analyse Relationnelle Grise (GRA) afin de trouver un compromis entre diverses réponses (V_b , F_z , R_a , P_c et MRR), ensuite on présente les régimes de coupes optimaux obtenus par les différentes méthodes utilisées.

En dernier lieu, la thèse de doctorat se termine par une conclusion générale suivie par les perspectives ouvertes par cette étude.

Chapitre I
Étude Bibliographique

I.1. Introduction

La fabrication est le processus de conversion des matières premières en produits finis. Elle englobe la conception et la fabrication de produits, en utilisant diverses méthodes de production, à savoir la coulée, le formage, le façonnage, l'usinage, etc. Parmi les divers procédés de fabrication, l'usinage est considéré comme très important. En fait, la majorité des produits finis nécessitent un usinage à un certain stade de leur production, allant de travaux relativement bruts ou non précis, tels que le nettoyage de fonderies ou de pièces forgées, à des travaux de haute précision impliquant des petits intervalles de tolérances avec une finition de haute qualité. Dans ce chapitre nous présenterons des notions de base sur la coupe des métaux à savoir, la définition de la coupe des métaux notamment le tournage, l'usinabilité des matériaux, les matériaux de coupes, les mécanismes d'usure des outils de coupe et les paramètres de performance en usinage. Les travaux de recherche relatifs au tournage des fontes avec différents matériaux de coupe et différentes méthodes de modélisation et optimisation ont été établis.

I.2. Usinabilité

L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème, qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre, d'autre part l'aspect mécanique du problème, comprenant les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée [1]. Donc l'usinabilité n'est pas un terme exact, selon les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux l'usinabilité est définie aussi sous différentes formes :

D'après G. Schneider [2], Le terme "usinabilité" est une mesure relative de la facilité avec laquelle un matériau peut être usiné par rapport à l'acier AISI B1112 à faible teneur en carbone. L'Institut américain du fer et de l'acier (AISI) a réalisé des tests de tournage de ce matériau à 180 m/min et comparé leurs résultats pour B1112 à plusieurs autres matériaux. Si B1112 représente une note de 100%, les matériaux dont la note est inférieure à ce niveau seraient nettement plus difficiles à usiner, tandis que ceux dépassant 100% seraient plus faciles à usiner. L'indice d'usinabilité d'un métal tient compte de la vitesse de coupe, de l'état de surface et de la durée de vie normale de l'outil. Ces facteurs sont pondérés et combinés pour aboutir à un indice d'usinabilité final. Par contre, S. Kalpakjian et S. R. Schmid [3] voient que ces aspects qualitatifs de l'usinabilité (ceux proposés par l'institut américain du fer et de l'acier) ne sont pas suffisants pour guider un opérateur de machine dans la détermination des paramètres d'usinage afin de produire une pièce acceptable de manière rentable.

D'après J T. Black et R. A. Kohser [4], L'usinabilité dépend non seulement du matériau à usiner, mais également du processus d'usinage spécifique, des conditions de ce processus (comme la vitesse de coupe) et des aspects de ce processus qui présentent le plus grand intérêt. Les couts d'usinabilité sont souvent basés sur la durée de vie relative de l'outil. Dans certaines applications, cependant, nous pourrions être plus intéressés par la facilité de coupe d'un métal ou par ses performances à des vitesses d'usinage élevées, et moins par la durée de vie de l'outil ou les états de surface résultants. La caractéristique la plus souhaitable est celle de la finition de surface ou de la formation de copeaux fins. On peut considérer que les matériaux hautement usinables pour un individu peuvent être mal usinés par une personne qui utilise un procédé différent ou des conditions de procédé différentes.

D'après ces deux chercheurs aussi, l'usinabilité d'un matériau est généralement définie en fonction de quatre facteurs :

1. Etat de surface et intégrité de surface de la pièce usinée.
2. Durée de vie de l'outil.
3. Force et puissance requises.
4. Le niveau de difficulté dans le contrôle des copeaux.

D'après V. WAGNER [5], Une des définitions envisageable de l'usinabilité peut être l'aptitude d'un matériau à subir une mise en forme par enlèvement de matière. Son amélioration peut être effectuée suivant différents axes : la durée de vie des outils, les conditions de coupe et l'état de surface.

D'après V. Songmene [6], l'usinabilité d'un matériau est la propriété qui caractérise sa faculté de se laisser tailler par un outil de coupe. C'est un indice relatif de comparaison des matériaux qui peut être caractérisé par:

- Le débit de copeau obtenu par durée de vie utile de l'outil.
- La durée de vie d'un outil travaillant dans des conditions de coupe standards.
- La puissance, L'énergie consommée ou les efforts de coupe.
- L'état de surface des pièces produites et la géométrie du copeau.

I.3. Le procédé de tournage

Le tournage est un procédé mettant en jeu des outils à arrête de coupe unique. La pièce à réaliser est animée d'un mouvement de rotation imposé par la machine-outil assimilable au mouvement de coupe, c'est généralement le mouvement principal du procédé. L'outil quant à lui est animé

d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance et permettant de définir le profil de la pièce (Figure I.1). La combinaison de ces deux mouvements permet de positionner la partie active de l'outil (arrêt tranchante de l'outil) et permet d'obtenir des formes de révolution complexes. Bien que les cinématiques du procédé et des outils soient simples, le procédé de tournage est essentiel au vu de l'importance de ses applications dans l'industrie [7].



Fig. I.1 Opérations de tournage.

I.3.1. Opérations de bases

En tournage, les pièces complexes sont facilement décomposables en profils de coupe élémentaire. Chacun de ces profils correspondant à une des quatre opérations de bases existant en tournage (Figure 1.2)

- Le tournage longitudinal ou chariotage (a), où le mouvement d'avance correspond à une translation de l'outil parallèlement à l'axe de révolution de la pièce, ce qui permet de réaliser des cylindres.
- Le dressage (b), où le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe de révolution de la pièce, ce qui permet d'ajuster la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe.
- Le tournage de cônes (c), combine les deux types d'opérations précédentes pour générer des cônes de révolution.
- Le contournage (d), consiste à imposer une trajectoire plane quelconque à l'outil, des formes de révolution quelconque peuvent alors être réalisées.

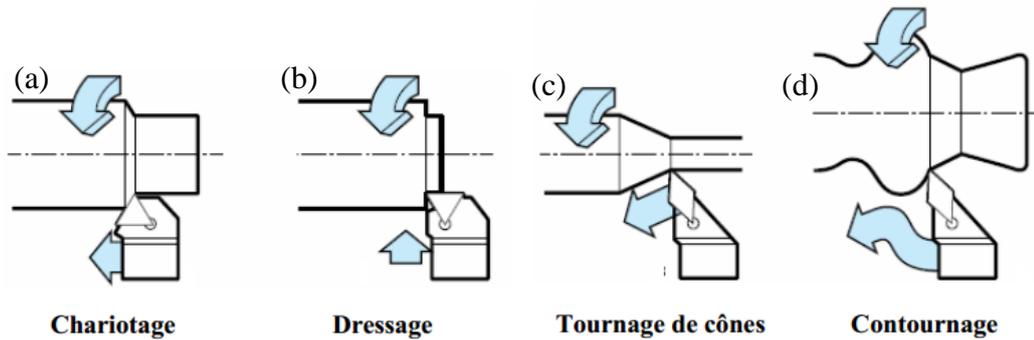


Fig. I.2 Opérations de base en tournage [7]

I.3.2. Les paramètres technologiques en tournage

I.3.2.1. La vitesse de coupe V_C

Elle constitue le premier paramètre de l'opération de tournage, car elle impose la cinématique et la dynamique du procédé, c'est-à-dire la rotation de la pièce [7]. Sur un tour, la pièce est entraînée à une certaine vitesse notée ω (en $rad.s^{-1}$) ou N (en $tr.min^{-1}$) par l'intermédiaire de la broche via le port-pièce. Cette vitesse est une donnée de réglage pour l'opération sur la machine-outil. Pour une opération donnée, le point d'usinage se situant sur un diamètre D (en m), la vitesse relative de la pièce ou vitesse de coupe V_C (en $m.min^{-1}$) en ce point se calcule de la façon suivante:

$$V_C = \frac{D}{2} \times \omega \quad (I.1)$$

La fréquence de rotation N de la pièce s'exprime alors traditionnellement avec les unités de la mécanique par :

$$N = \frac{1000 \times V_C}{\pi D} \quad (I.2)$$

I.3.2.2. La vitesse d'avance V_f ou l'avance par tour f

La vitesse d'avance notée V_f (en $mm.min^{-1}$) correspond à la vitesse de déplacement de l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour f (en $mm.tr^{-1}$) quant à elle correspond à la valeur du déplacement de l'outil ou de la pièce pour un tour de la pièce. Elle est prise comme référence car elle conditionne la qualité de la surface usinée et le chargement de l'outil [7]. L'avance influence également l'épaisseur des copeaux et leur mode de segmentation. Toutes ces données sont liées par la formule suivante :

$$V_f = f \times N \quad (I.3)$$

I.3.2.3. La profondeur de passe ap

Elle est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas selon l'arrêt de l'outil. En chariotage par exemple elle correspond à la différence de rayon entre la surface

usinée et la surface précédente. C'est un critère important pour choisir le mode de travail en ébauche ou en finition, mais il reste secondaire par rapport aux précédents. La profondeur de passe est souvent limitée technologiquement au 2/3 de la longueur utile de l'arrêt de coupe utilisé et aussi par la puissance utile disponible sur la broche [7].

I.4 Matériaux de coupe

En usinage, le choix du matériau de coupe est très important pour l'obtention des performances désirées. La tendance depuis plusieurs années, s'est penché sur l'utilisation des outils à plaquettes rapportées, vu leur gain du point de vue économique. Les matériaux utilisés dans ces plaquettes sont classés en fonction de plusieurs critères et spécialement la résistance à l'usure, la ténacité et la dureté (Figure I.3).

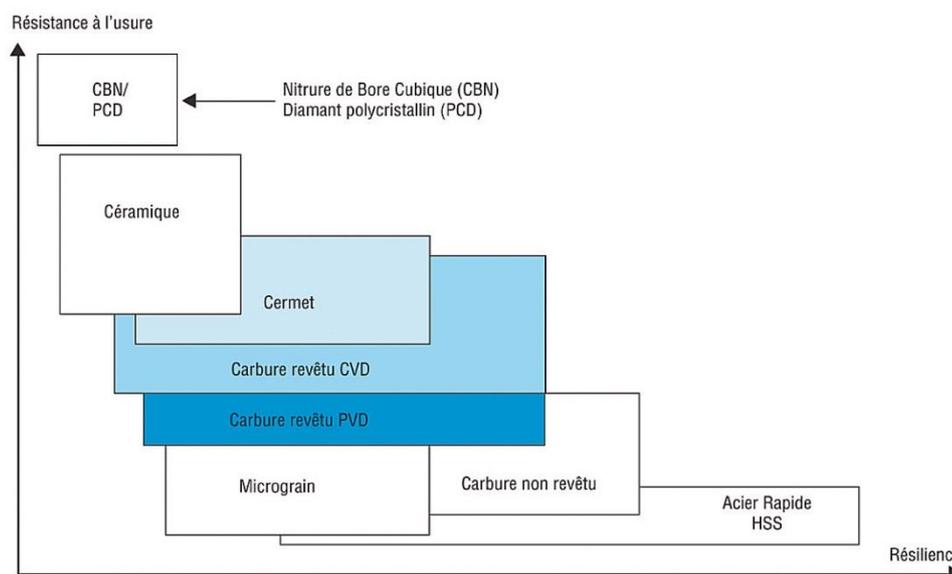


Fig. I.3 Matériaux de coupe [8]

a) Les carbures : sont des substrats obtenus par frittage de poudres métalliques sans fer. Ces matériaux sont souvent formés de carbure de tungstène WC, de titane TiN ou de silicium Si pour les plus utilisés. Afin de lier les grains de carbure entre eux, nous utilisons des éléments métalliques comme le cobalt, qui allie sa ductilité à la dureté des carbures. Nous obtenons avec ces matériaux des outils présentant des duretés variables comprises entre 1250 et 1800 HV. Il existe un grand nombre de possibilités d'usinage avec ces matériaux. Ce sont les plaquettes proposées par les principaux fabricants d'outil dans le cas de l'usinage d'alliage d'aluminium [9].

b) Les outils en céramique : sont chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevée. Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 ou de nitrure de silicium (Si_3N_4). Leur application est

principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage [10].

c) Les cermets : le mot cermet provient de la contraction des mots céramique et métal CERAmique / METal. Dans l'application qui nous intéresse ici, cermets, est le nom générique utilisé pour les carbures à base de titane, parmi lesquels figurent le carbure de titane TiC, le carbonitride de titane TiCN et le nitrure de titane TiN. Comparé aux carbures cémentés, les cermets possèdent une meilleure conductivité thermique mais au détriment de la ténacité [10].

d) Le nitrure de bore cubique (CBN) : est un matériau de synthèse dont les propriétés sont voisines de celles du graphite. Sous l'effet de températures très élevées (supérieures à 1500°C) et de pressions importantes comprises (entre 50 et 100) bars, le nitrure de bore cubique subit une transformation structurale (passage d'une structure hexagonale à une structure cubique), qui lui confère une grande dureté. Le nitrure de bore cubique est le second des matériaux les plus durs connus, juste après le diamant, il est donc plus résistant à l'usure que les céramiques ou les carbures métalliques. Le CBN ne réagit pas avec les alliages ferreux et il est thermiquement stable jusqu'à 1400°C. Le CBN peut donc usiner des alliages par contre le diamant ne peut pas, tel que les aciers à outil, les fontes trempées, les superalliages à base de nickel ou de cobalt [11].

I.5. Revêtements

Les revêtements permettent d'améliorer les conditions de coupe et la productivité. Le principe du revêtement consiste à recouvrir d'un film mince (jusqu'à 10 µm d'épaisseur) (Figure I.4) les outils de coupe pour leur donner des propriétés particulières comme la grande dureté. Selon M.W. Azizi [12] les revêtements peuvent être classés en 4 groupes.

- revêtements à base de titane (TiC, TiN, TiB₂, TiCN) ;
- revêtements céramiques ;
- revêtements de nitrure de bore cubique (CBN) ;
- revêtements autolubrifiants avec MoS₂ ou WC.

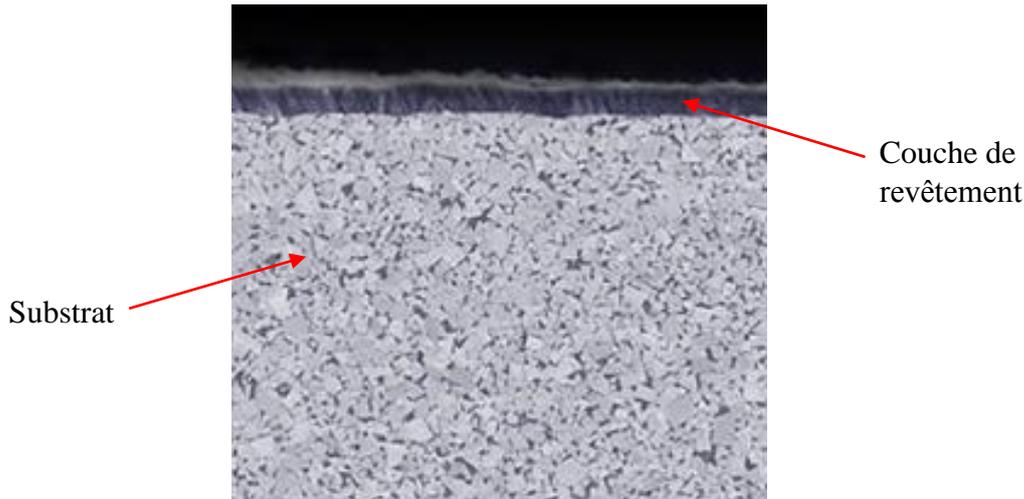


Fig. I.4 Revêtement d'une plaquette de coupe.

Les revêtements influencent sensiblement le processus d'usinage. Un choix minutieux et adapté à la tâche d'usinage, du revêtement des tranchants de l'outil permet de bénéficier des avantages suivants [1]:

- Augmentation de la durée de vie ;
- Efforts de coupe réduits ;
- Vitesses de coupe et d'avance supérieures ;
- Meilleure qualité de surface ;
- Usinage à sec amélioré ;
- Usinage dur amélioré jusqu'à 68 HRC.

I.5.1.Type de revêtement

Le choix du revêtement dépend de but recherché : résistance à l'usure et / ou à l'oxydation, tenue à la température, réduction du frottement etc. Il y a deux types de dépôt de revêtement CVD et PVD :

a) Revêtement – CVD

CVD signifie dépôt chimique en phase vapeur. Ce type de revêtement est donc créé par réaction chimique à haute température, 700 à 1050°C. Les revêtements CVD ont une grande résistance à l'usure et une forte adhérence au substrat.

Le premier revêtement de ce type était composé d'une couche unique de carbure de titane (TiC). Les revêtements d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et de nitrure de titane (TiN) sont plus récents. Les revêtements CVD de dernière génération incluent le carbonitrure de titane (MT-Ti(C,N) et MT-TiCN, aussi appelés revêtements MT-CVD). Ils ont été développés pour améliorer les propriétés des nuances, notamment grâce à leur capacité à protéger l'interface avec le substrat de la nuance.

Les revêtements CVD modernes combinent plusieurs couches MT-Ti(C,N), Al₂O₃ et TiN. Les propriétés des revêtements ont fait l'objet de recherches pour améliorer leur adhérence, leur ténacité et leur résistance à l'usure au moyen d'optimisations de la micro structure et de post traitements. Les principaux composants des revêtements CVD sont décrits en tableau I.1 [13].

Table I.1 Revêtements en CVD.

| MT-Ti(C,N) | CVD-Al ₂ O ₃ | CVD-TiN |
|--|---|--|
| Résistance à l'usure par abrasion grâce à la dureté. Usure en dépouille réduite. | Neutralité chimique avec faible conductivité thermique, résistance à l'usure en cratère. Fait office de barrière thermique améliorant la résistance à la déformation plastique. | Meilleure résistance à l'usure et facilite la détection de l'usure |

b) Revêtement – PVD

Les revêtements PVD sont obtenus par dépôt physique en phase vapeur à température relativement basse (400 à 600°C). Ce procédé consiste à faire évaporer un métal qui entre alors en réaction avec un gaz, par exemple de l'azote, pour former une couche dure de nitrure sur la surface des plaquettes.

Ces revêtements sont très durs et ils améliorent la résistance à l'usure. Leurs contraintes de compression augmentent aussi la ténacité d'arête et la résistance à l'usure en peigne.

Les principaux composants des revêtements PVD sont décrits en tableau I.2. Les revêtements modernes combinent plusieurs de ces composants sous la forme de couches successives ou de revêtements lamellaires. Les revêtements lamellaires comportent de nombreuses couches fines, de l'ordre du nanomètre, qui constituent un revêtement encore plus dur [13].

Table I.2 Revêtements en PVD.

| PVD-TiN | PVD-Ti(C,N) | PVD-(Ti,Al)N | PVD-oxyde |
|--|--|---|---|
| Le nitrure de titane a été le premier revêtement PVD utilisé. Il possède des propriétés polyvalentes et une couleur dorée. | Le carbonitrure de titane est plus dur que le nitrure de titane. Il apporte une meilleure résistance à l'usure en dépouille. | Le nitrure de titane aluminium a une grande dureté qui se combine à une résistance à l'oxydation. La résistance générale à l'usure est meilleure. | Utilisé pour sa neutralité chimique et sa meilleure résistance à l'usure en cratère |

I.6. Endommagement des outils de coupe

Selon Childs et al. [14], la dégradation des outils de coupe peut être classée en deux groupes en fonction de l'échelle de l'étude et la manière dont l'endommagement progresse: usure et rupture. Grzesik [15] a défini l'usure comme étant un phénomène continu se manifestant par de la perte de masse à l'échelle microscopique comme c'est le cas pour la diffusion, et/ou à l'échelle des aspérités ou des microcontacts. D'un autre côté et toujours selon Grzesik [15] la rupture des outils de coupe est un endommagement brutal et observable à une échelle macroscopique.

I.6.1. Forme d'usure

Les formes de dégradation sont la conséquence directe des interactions entre l'outil, la matière usinée, et le copeau sous l'effet des grandes pressions, hautes températures et grandes vitesses de glissement. Elles dépendent de la nature du contact (collant, glissant ou transitoire), des matériaux de la pièce et de l'outil ainsi que des conditions de coupe [16], on distingue deux grandes formes d'usure :

a) Usure en cratère

Localisée sur la face de coupe des outils, l'usure en cratère est due à la formation du copeau et de l'écoulement de celui-ci sur la face de coupe. Cette manifestation d'usure est souvent associée à des phénomènes physico-chimiques thermiquement activés en raison des hautes températures qui accompagnent le processus de formation de copeau [14, 15]. Deux mesures sont habituellement faites pour évaluer le niveau d'usure en cratère. La première est la profondeur du cratère K_T et la deuxième, notée K_M , est la distance entre l'arête de coupe et le point le plus profond du cratère dans une vue en coupe de l'outil (section A-A en Figure I.5). Toutefois, on est amené parfois à mesurer la progression du cratère en largeur à l'aide de deux autres paramètres qui sont K_B et K_F . La profondeur K_T du cratère reste le paramètre le plus utilisé pour la mise en place d'un critère d'usure.

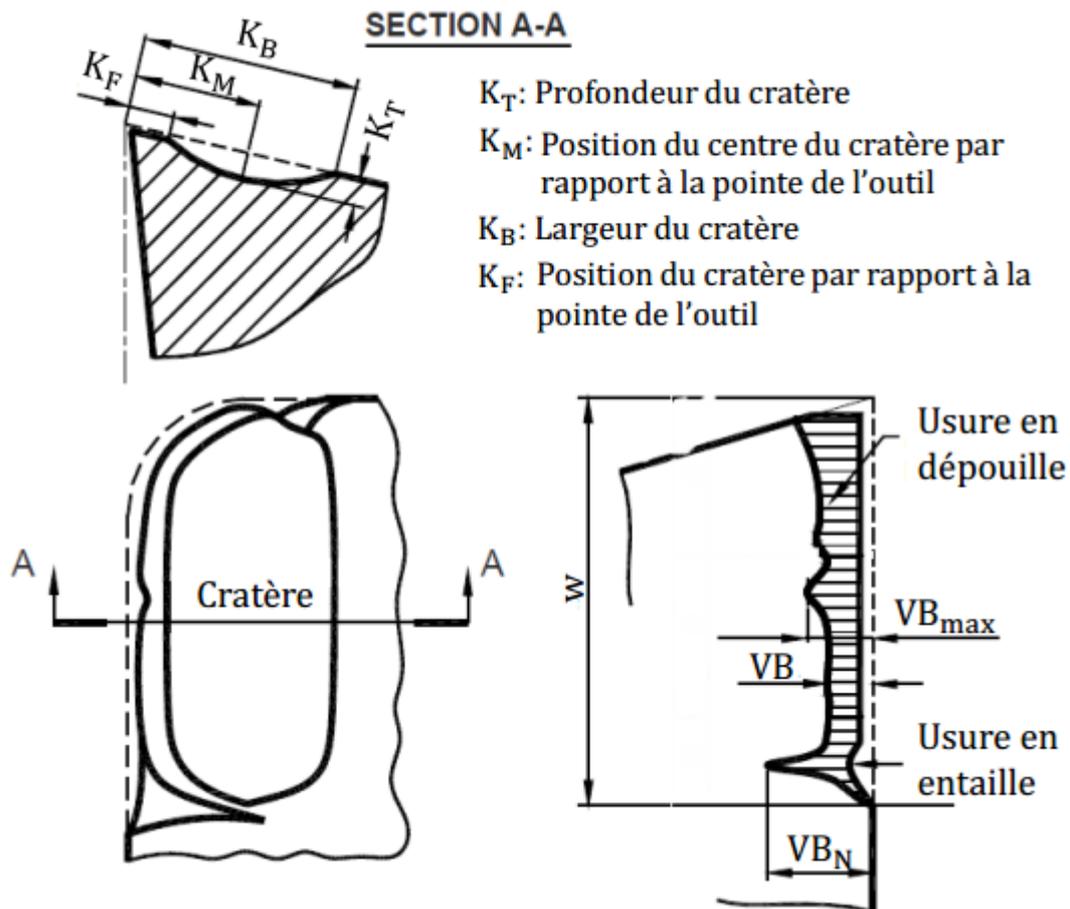


Fig. I.5 Usure en cratère [16].

b) Usure en dépouille

Appelée aussi usure frontale, l'usure en dépouille résulte du frottement entre la face de dépouille de l'outil et la pièce fraîchement usinée (Figure I.6). Ce type d'usure est dû principalement à des mécanismes purement mécaniques favorisés lors de la coupe de matériaux contenant initialement des inclusions métalliques dures. Comme conséquence, l'usure en dépouille agit directement sur l'intégrité de surface de la pièce usinée et sa précision dimensionnelle [16].

Sur la face de dépouille, la bande d'usure est caractérisée par une hauteur généralement uniforme le long de la largeur de l'outil de coupe. Cette hauteur moyenne est souvent dénotée VB . Toutefois, dans le cas où la répartition de l'usure sur la face de dépouille n'est pas homogène, un paramètre dénoté VB_{max} est introduit pour mesurer la hauteur maximale de la bande d'usure. La norme française NF E 66-505 définit un critère d'usure admissible pour une usure en dépouille VB de 0.3 mm [17].

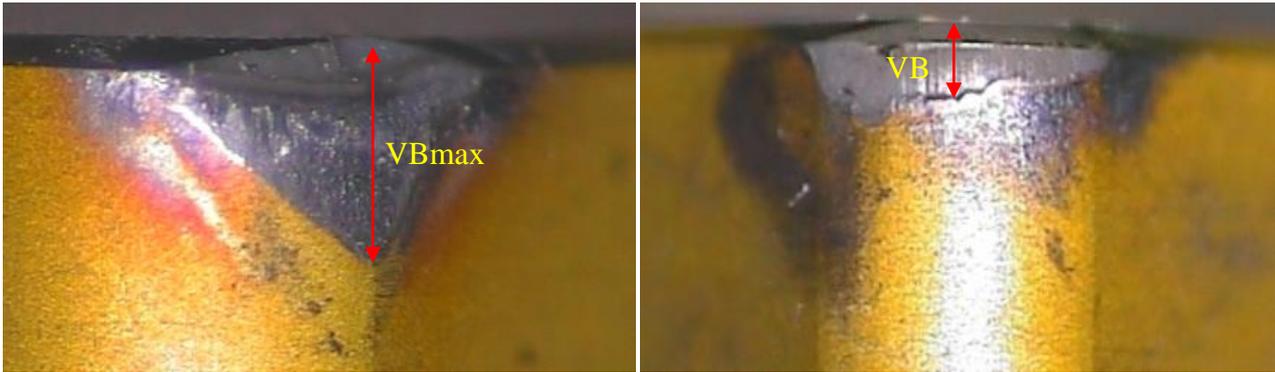


Fig. I.6 Usure en dépouille.

1.6.2. Mécanismes d'usure

Généralement les différentes manifestations de l'usure rappelées dans le paragraphe précédent sont le résultat d'un ou plusieurs modes d'usure. Ces derniers sont communément identifiés dans la littérature par : l'abrasion, l'adhésion, et la diffusion (Figure I.7). D'autres mécanismes d'usure moins importants sont aussi cités comme la fatigue et l'oxydation. Tous ces modes d'usure sont souvent classés selon deux catégories : les modes d'usure mécanique et les modes d'usure physico-chimique [16].

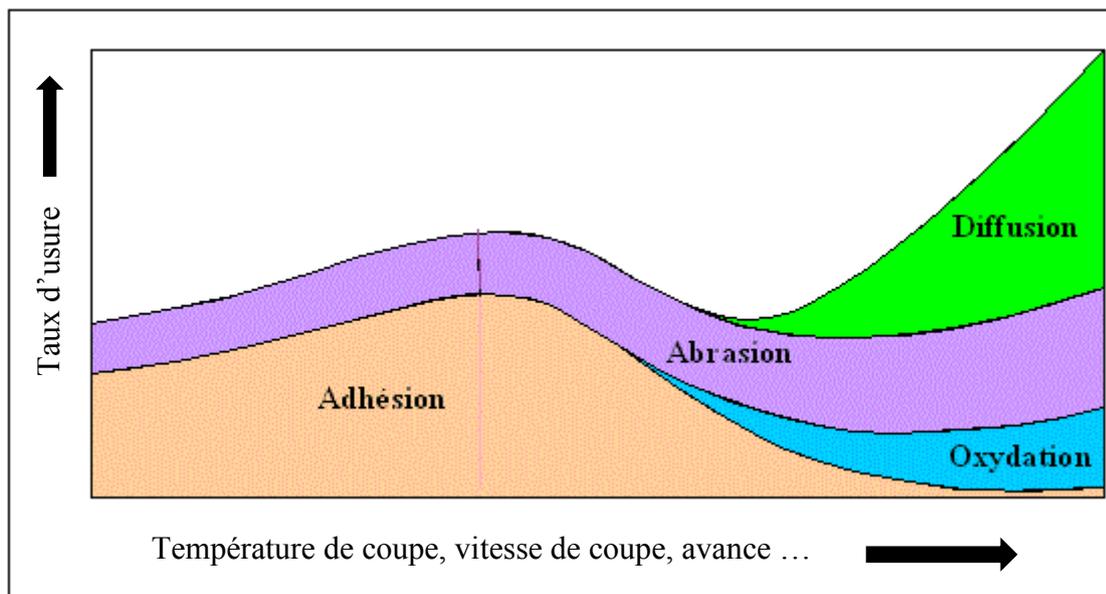


Fig. I.7 Différentes formes d'usure.

a) Usure par abrasion

L'usure par abrasion se caractérise par la formation de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou dans la direction du copeau qui glisse le long de la face de coupe. L'usure par abrasion apparaît donc à la fois sur la face de coupe et sur la face de dépouille des outils (Figure I.8). Ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure. Elles peuvent être présentes dans la pièce sous la forme d'inclusions et de précipités ou provenir

de l'outil lui-même par d'autres mécanismes d'usure telle que l'adhésion. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage. L'usure par abrasion est l'usure dominante quand le contact à l'interface outil-copeau est essentiellement du glissement [18].

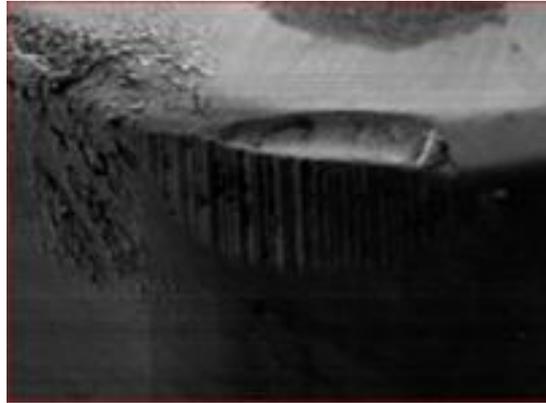


Fig. I.8 Usure par abrasion [19].

b) Usure par adhésion

L'usure par adhésion est un phénomène physico-chimique avec parfois des conséquences d'usure mécanique. En effet, compte tenu du contact intime entre la surface de l'outil et le copeau, des jonctions métalliques se créent sous l'effet du chargement thermomécanique intense à l'interface. Ces jonctions, qui constituent des microsoudures (Figure I.9), se forment par écrasement des aspérités ou dans certains cas par des phénomènes d'adsorption et de solubilité [16].

Avec le mouvement relatif du copeau et de l'outil, les jonctions créées peuvent se rompre de deux manières différentes :

- Si les microsoudures sont plus résistantes que le métal constitutif du copeau, les ruptures se produisent dans la masse du copeau, créant ainsi des fragments du copeau adhérant à l'outil et formant une couche désignée par 'Built-Up Layer' (BUL). A faibles vitesses de coupe et sous certaines conditions, les éléments du copeau collés sur la surface de l'outil s'accumulent jusqu'à former un dépôt macroscopique important que l'on appelle arête rapportée ou 'Built-up Edge' (BUE).
- Si les microsoudures sont à la fois plus résistantes que le métal du copeau et le matériau de l'outil, les ruptures se produisent en majorité dans la masse du copeau et pour quelques-unes à la surface de l'outil. Connue sous le nom d'attrition, cette usure est

encore plus néfaste vers la fin de l'usinage au moment où l'outil se désengage de la pièce et l'arête rapportée est évacuée.

L'usure par adhésion dépend de la pression appliquée au contact outil-copeau et par conséquent des caractéristiques de dureté et d'écrouissabilité du matériau usiné, de l'épaisseur du copeau et de la rigidité de la liaison formée entre les aspérités de l'outil et de la pièce. König et al. [17] ont montré que l'usure par adhésion prédomine aux faibles vitesses de coupe. L'utilisation des vitesses plus élevées permet alors souvent de limiter l'apparition de ce mode d'usure.

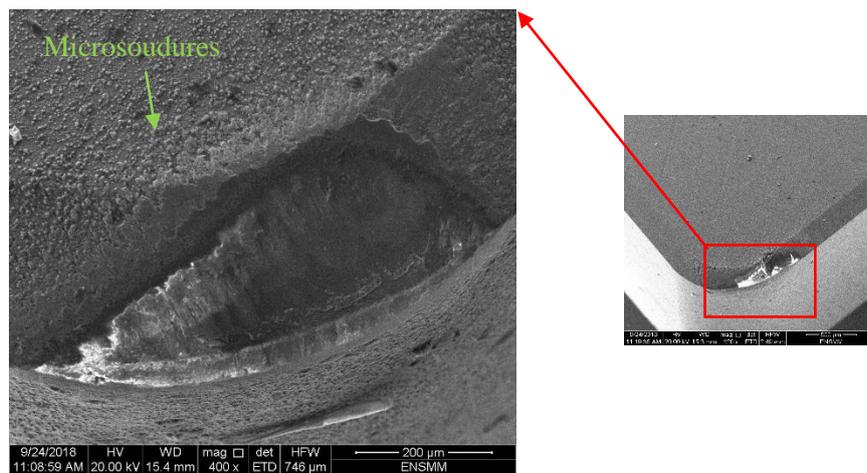


Fig. I.9 Usure par adhésion.

Les mécanismes d'usure des outils par diffusion ont fait l'objet de plusieurs études poussées. Aux grandes vitesses de coupe, le gradient de températures à la surface copeau/outil est particulièrement important. Une couche de glissement facile, se constitue avec fluage du matériau du copeau (Figure I.10). La vitesse de diffusion éventuelle d'un élément d'alliage de l'outil dans le copeau est très grande en raison des températures atteintes, d'autant plus que cet élément est absent du matériau usiné. Comme il y'a renouvellement continu du copeau, la « demande » en élément diffusant reste constante au cours de l'opération [18].

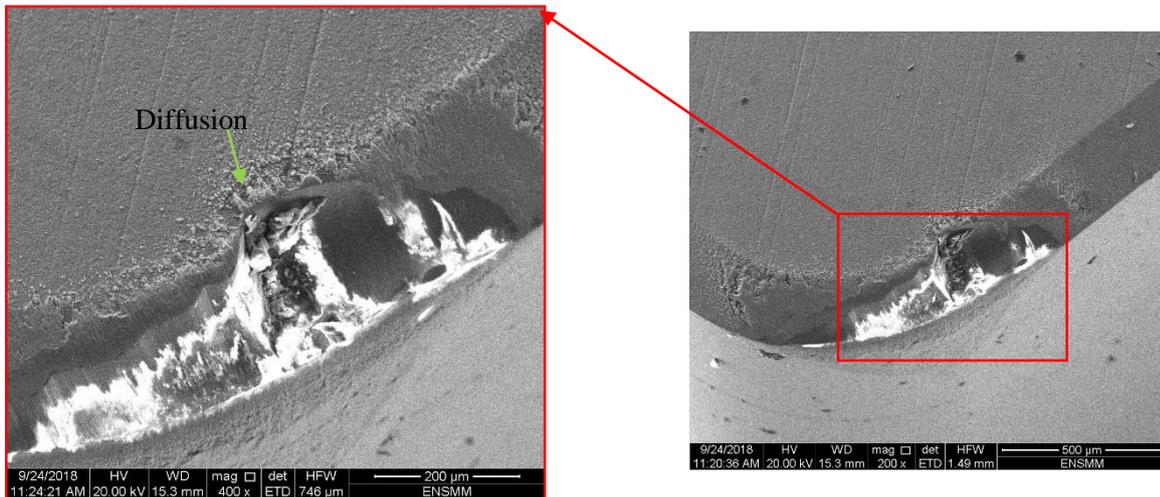


Fig. I.10 Usure par diffusion.

I.7. Les actions mécaniques en tournage

L'usinage des pièces en fabrication mécaniques est influencé par plusieurs actions mécaniques. Ces actions mécaniques sont : l'effort de coupe, la puissance de coupe et pression spécifique de coupe.

I.7.1. Effort de coupe

En Plus des paramètres technologiques qui influencent le processus de coupe tel que la rugosité de surface et l'usure des outils, l'effort de coupe est également un bon indice de l'usinabilité. La connaissance des efforts nous informe sur les déformations plastiques et la puissance mécanique nécessaire à l'enlèvement de matière. Ils servent au dimensionnement des organes de la machine-outil (boite des vitesses et des avances, bâti) et du corps de l'outil [20].

En tournage l'effort de coupe peut être décomposé suivant trois directions privilégiées (Figure. I.11). Il peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage.

Les trois composantes d'effort de coupe sont les suivantes:

- F_t ou F_z : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.
- F_a ou F_x : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial, en tournage, cette composante joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- F_r ou F_y : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial (effort de pénétration), n'a qu'une importance et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.

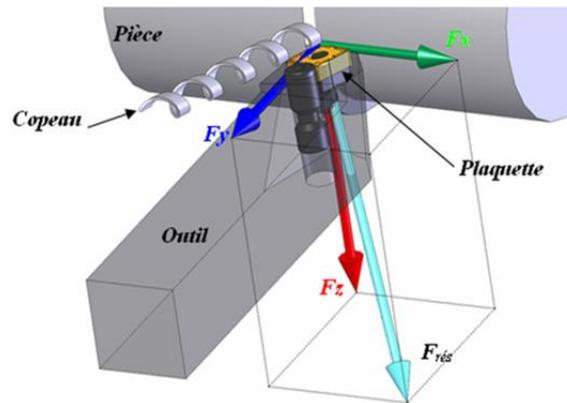


Fig. I.11 Composantes de l'effort de coupe en tournage.

I.7.2. Pression spécifique de coupe

L'effort de coupe par unité de surface peut être désigné comme « pression spécifique de coupe » dans ce point on ne s'intéresse qu'à l'effort de coupe tangentiel (F_z). Les deux autres composantes ne sont pas prises en considération car elles n'interviennent presque pas dans le calcul de la puissance nécessaire à la coupe (Figure I.12) [21]. Par définition de la pression spécifique de coupe on a :

$$K_s = \frac{F_z}{ap \times f} \quad (I.4)$$

Avec :

F_z : Effort de coupe tangentiel, [N].

K_s : Pression spécifique de coupe, [N/mm²].

ap : Profondeur de passe, [mm].

f : Avance par tour, [mm/tr].

Parmi les paramètres principaux qui influence K_s :

- Matériaux de l'outil coupant et de la pièce usinée (caractéristiques mécaniques).
- L'avance, et donc l'épaisseur nominale du copeau.
- Les angles de coupe.
- L'usure de l'outil de coupe.

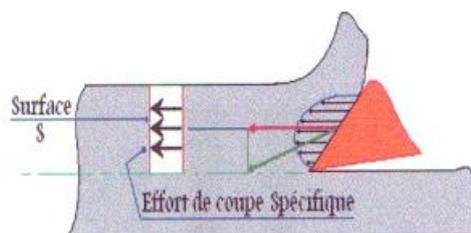


Fig. I.12 Pression spécifique de coupe (K_s) [22]

I.7.3. Puissance de coupe

La puissance de coupe est un paramètre machine. La puissance nette peut être calculée pour s'assurer que la machine en question est adaptée à la broche et à l'opération envisagée. Cette puissance est donnée par la relation :

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60} \quad (I.5)$$

Où :

F_z : Effort de coupe tangentiel, [N].

V_c : Vitesse de coupe, [m/min].

Et alors :
$$P_b = \frac{P_c}{\eta} \quad (I.6)$$

P_b : Puissance absorbée (puissance motrice), qui est un paramètre machine (W).

η : Rendement : paramètre machine.

I.8. Paramètres de performance d'usinage

I.8.1 Taux d'enlèvement de matière

Le taux d'enlèvement de matière au cours d'usinage en tournage est fonction de, la profondeur de passe, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance par unité de temps [mm^3/min].

$$MRR = a_p \times V_c \times f \times 1000 \quad (I.7)$$

D'où :

a_p : profondeur de passe, [mm].

V_c : vitesse de coupe, [m/min].

f : vitesse d'avance, [tr/min]

I.8.2. Qualité de surface

Les défauts de surface jouent un rôle important dans l'aptitude d'une pièce mécanique à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico- chimique. Dans notre cas, on ne s'intéresse qu'aux défauts géométriques. Ces derniers sont généralement sous quatre numéros d'ordre (Figure. I.13).

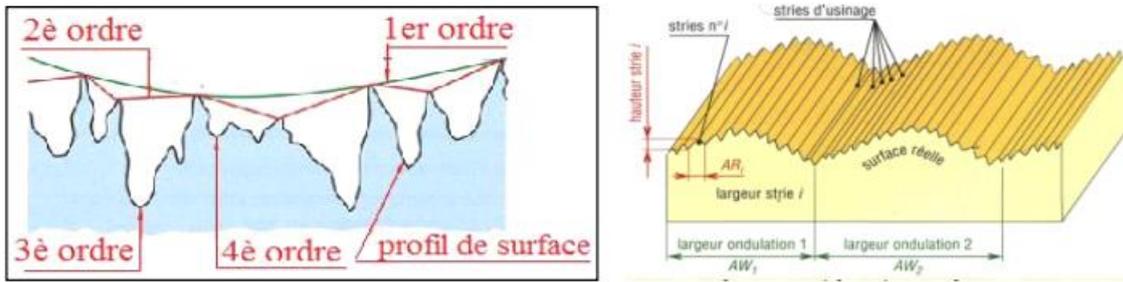


Fig.I.13 Principaux défauts de surface [23]

Défauts du premier ordre : Ce sont des défauts dus à des écarts de forme (*rectitude, cylindricité, etc.*) et de position (*perpendicularité, parallélisme, etc.*). Provenant de la déformation de la pièce pendant et après l'usinage, des défauts de bridage, de la flexion des éléments de la machine, d'un mauvais guidage des éléments mobiles ou de l'usure des organes de la machine-outil.

Défauts du deuxième ordre : Défauts plus petits. Ayant l'aspect général d'une ondulation, et provenant de l'avance par tour au tournage ou de l'avance par dent en fraisage, de vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil de coupe.

Défauts du troisième ordre : Ce sont des stries ou des sillons laissés par l'outil de coupe. Ils sont fonction de l'avance par dent de la fraise, ou à des vibrations haute fréquence.

Défauts du quatrième ordre : Ils sont constitués par des arrachements, fente et piqûre, ... etc. Ils sont dus à des marques d'outil ou à des vibrations de hautes fréquences. Ce type de défaut a un caractère aperiodique. L'ensemble des défauts de 3ème et 4ème ordre constituent la rugosité de la surface.

I.8.2.1. Paramètres caractéristiques d'état de surface

Les normes et les paramètres désignant la rugosité de surface sont nombreux, on se limite à présenter les paramètres de surface fréquemment utilisées dans le domaine de la fabrication mécanique (Figure I.14), définis selon la norme **ISO 4287** [24].

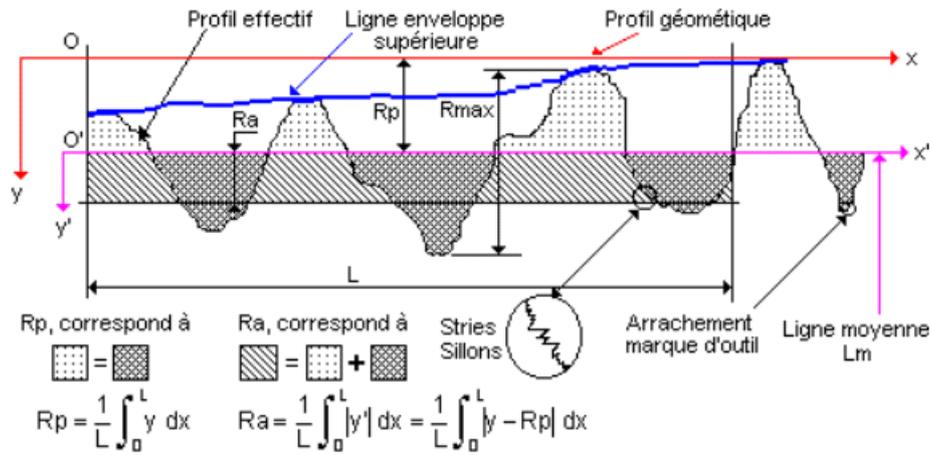


Fig. I.14 : Critères d'état de surface [25]

Rugosité moyenne arithmétique R_a : Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité, R_a mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation (Figure I.15) [26].

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| dx \tag{I.8}$$

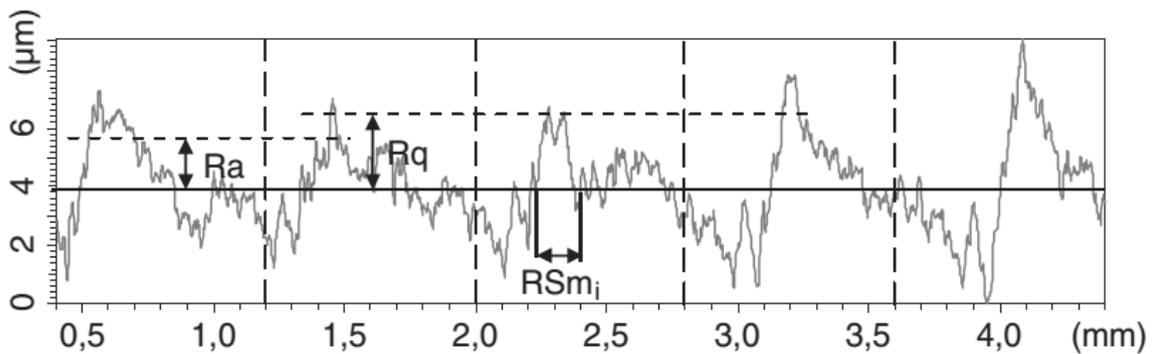
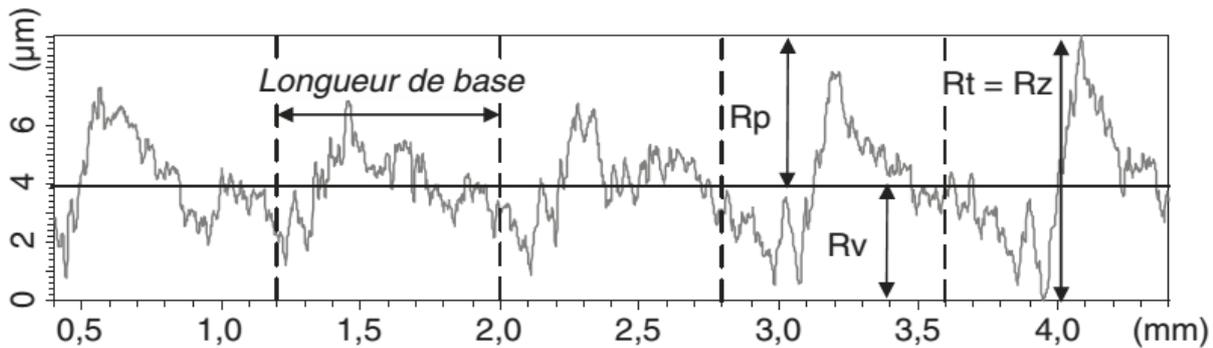


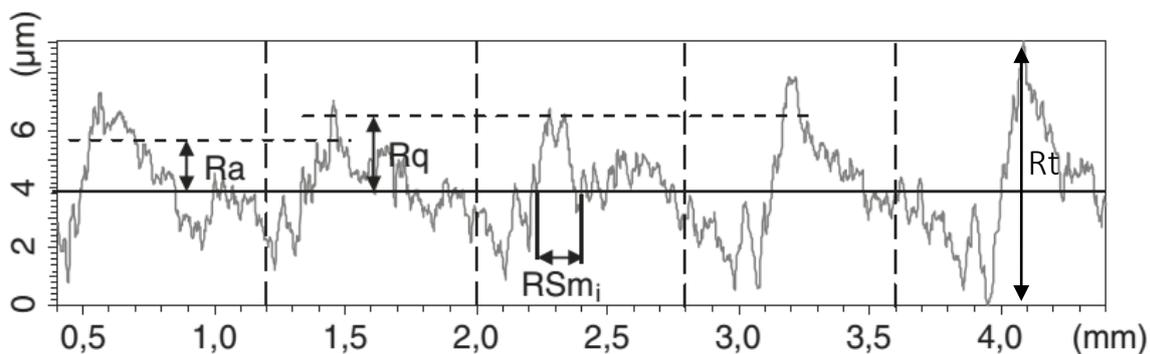
Fig. I.15 Critère de rugosité R_a .

Rugosité moyenne profondeurs R_z : Moyenne des 5 pics les plus élevés et des 5 vallées les plus basses sur une longueur d'échantillonnage (Figure I.16), pic défini comme étant le maximum local au-dessus de la ligne moyenne du profil. Vallée défini comme étant le minimum local au-dessous de la ligne moyenne du profil [26].

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{z_i} \tag{I.9}$$

Fig. I.16 Critère de rugosité R_z .

Rugosité totale R_t : Ecart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité sur la longueur totale d'évaluation (Figure I.17).

Fig. I.17 Critère de rugosité R_t .

I.9. Topographie de surface 3D et paramètres fonctionnels

La mesure et la caractérisation des surfaces à l'aide de la méthode du profil (critères de rugosité classiques R_a , R_z , R_t ...) sont effectuées dans l'industrie manufacturière depuis plus d'un siècle. Cependant, la méthode du profil peut être utile pour montrer l'évolution du processus de fabrication, une analyse de la topographie de la surface réelle permet d'obtenir des informations beaucoup plus fonctionnelles sur la surface. De plus, au cours des dernières décennies, les types de surfaces utilisées dans la fabrication ont changé. Auparavant, les surfaces stochastiques et aléatoires, ou les marques d'usinage laissées par le processus de fabrication, étaient le plus souvent utilisées pour conférer une fonctionnalité à la surface. Plus récemment, des modèles déterministes ont été utilisés pour contrôler de manière critique la fonction d'une surface [27]. De plus, avec la mesure et la caractérisation de profil, il est souvent difficile de déterminer la nature exacte d'une caractéristique topographique. La figure I.18 présente un profil et une carte surfacique de la même composante couvrant la même zone de mesure. Avec le profil seul, un creux discret est mesuré en surface. Toutefois, lorsque l'on examine la carte de surface, on constate que le creux supposé est en réalité une vallée et peut avoir beaucoup plus d'influence sur la fonction de la surface qu'une fosse discrète [27].

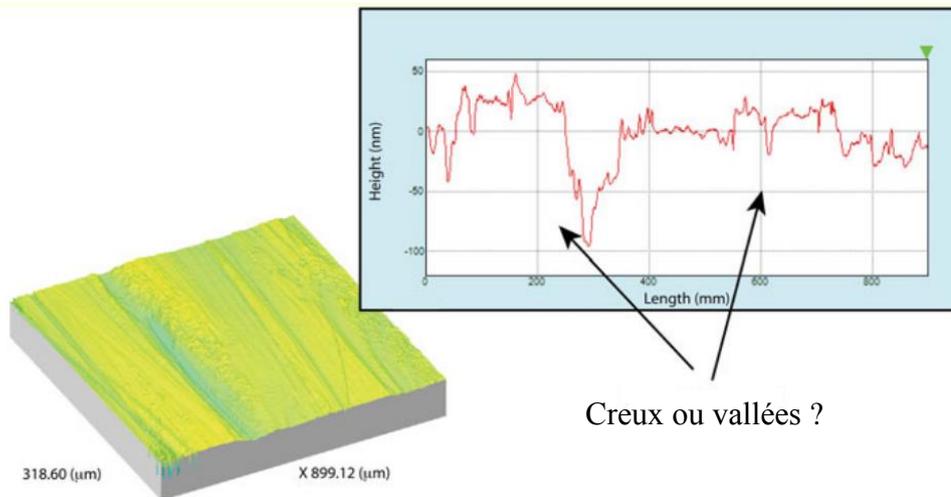


Fig. I.18 Profil tiré d'une mesure 3D montre l'ambiguïté possible de la mesure et de la caractérisation 2D [27].

Enfin, une mesure de surface aura plus de signification statistique qu'une mesure de profil équivalente, tout simplement parce qu'il y aura plus de points de données et qu'une carte de surface est une représentation plus précise de la surface réelle.

I.9.1. Les paramètres fonctionnels de surface

I.9.1.1. Paramètres liés à la distribution et Paramètres de taux de portance

La distribution de hauteur peut être représentée sous la forme d'un histogramme des hauteurs de surface qui quantifie le nombre de points sur la surface situés à une hauteur donnée. La courbe du taux de portance est la courbe cumulative de la distribution. La courbe du de taux de portance est comptée du point le plus haut de la surface (où la courbe est égale à 0%) à son point le plus bas (où la courbe atteint 100%) (Fig. I.19).

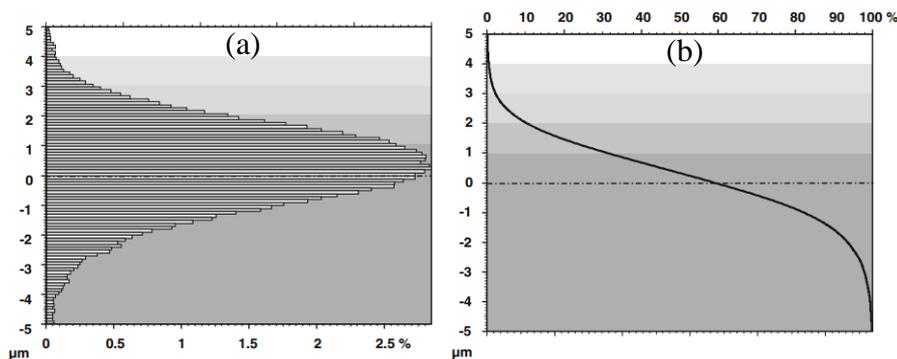


Fig. I.19 Paramètres liés à la distribution (a) et Paramètres de taux de portance (b) [27].

I.9.1.2. Paramètres de taux de portance

a) Taux de portance surfacique, S_{mr}

Le taux de portance surfacique est le rapport entre le matériau à une hauteur spécifiée c et la surface d'évaluation exprimé en pourcentage (Figure I.20). Les hauteurs sont prises à partir du plan de référence. La fonction $S_{mr}(c)$ donne le rapport de matière p correspondant à une hauteur de coupe c donnée en paramètre.

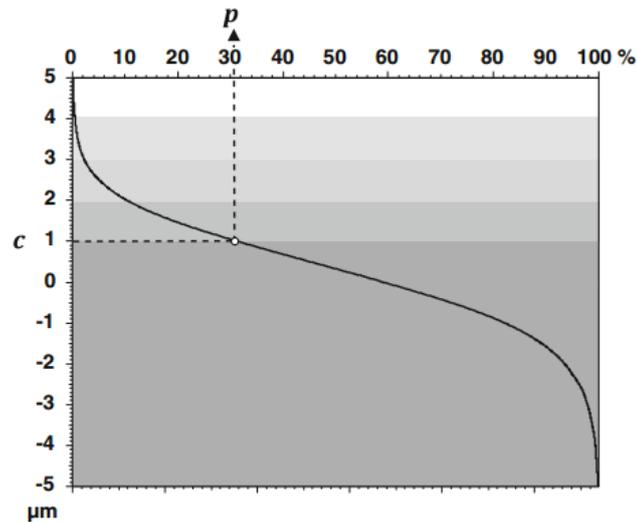


Fig. I.20 S_{mr} est le taux de portance surfacique, p correspondant à une hauteur de section c [27].

b) Taux de portance inverse, S_{mc}

La fonction $S_{mc}(p)$ évalue la valeur de hauteur c correspondant à un rapport de matériau p donné en paramètre (Figure I.21).

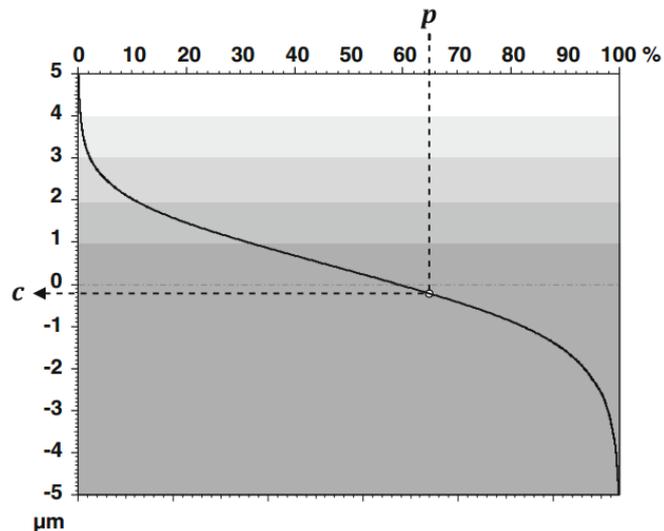


Fig. I.21 S_{mc} est taux de portance inverse, c correspondant à un rapport de matière p [27].

c) Hauteur extrême de crête, Sxp

Le paramètre Sxp (Figure I.22) vise à caractériser la partie supérieure de la surface, du plan moyen au sommet le plus élevé, sans prendre en compte un faible pourcentage des pics les plus élevés qui pourraient ne pas être significatifs.

$$Sxp = Smc (2.5\%) - Smc (50\%) \quad (I.10)$$

Les valeurs 2,5 et 50% sont définies comme valeurs par défaut (ISO 25178-3 2011) et peuvent être définies sur d'autres valeurs en fonction de l'application (elles doivent être proches de ces valeurs par défaut car ce paramètre est spécifiquement défini pour la caractérisation des pics).

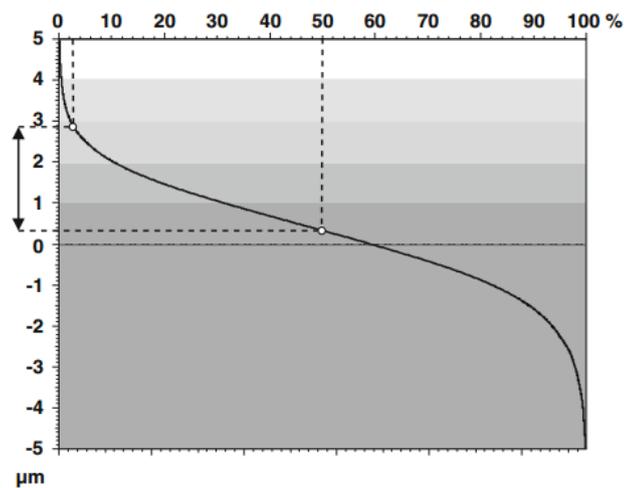


Fig. I.22 Sxp défini comme la différence de hauteur entre deux Smc à 2,5 et 50% [27].

d) Différence de hauteur portante, Sdc

Ce paramètre n'est pas strictement défini dans l'ISO 25178 partie 2 (2012), mais il s'agit d'une simple extension du paramètre Rdc qui faisait partie de l'ISO 4287 (2000)

$$Sdc = Smc (p) - Smc (q) \quad (I.11)$$

Où p et q sont deux rapports de matière qui peuvent être choisis librement en fonction de l'application.

Le paramètre Sdc peut être utilisé pour donner la hauteur maximale de la surface lorsque les pics et les creux extrêmes sont supprimés ou lorsqu'un seuil est appliqué, par exemple avec $p = 2\%$ et $q = 98\%$.

I.9.1.3. Les paramètres fonctionnels Sk

L'ISO 13565 partie 2 (1998) est basée sur la norme allemande DIN 4777 (1990) qui a été la première à introduire des paramètres fonctionnels basés sur une construction graphique sur la courbe Abbott-Firestone. Ces paramètres, R_k , R_{vk} , R_{pk} , $Mr1$ et $Mr2$, sont extraits d'une surface filtrée à l'aide d'un filtre robuste spécialement conçu pour les surfaces stratifiées. Les paramètres S_k , S_{pk} , S_{vk} , $Smr1$ et $Smr2$ sont l'équivalent surfacique des paramètres définis dans l'ISO 13565 partie 2 (les paramètres R_k) lorsque la courbe Abbott-Firestone est construite à partir d'une surface (Fig. I.23). La surface peut être filtrée avant le calcul de ces paramètres, de préférence à l'aide d'un filtre gaussien robuste (ISO / CD 16610).

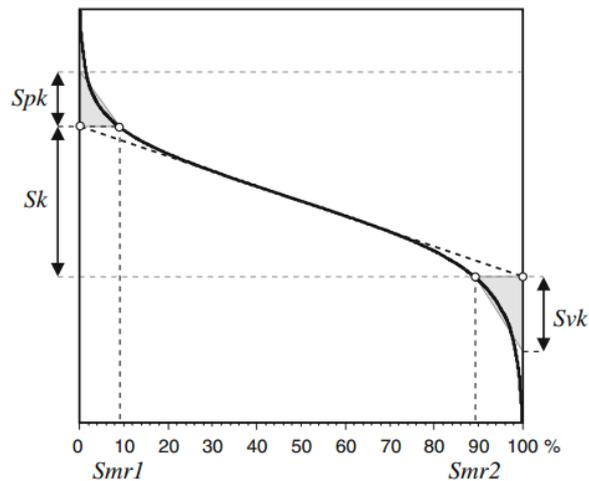


Fig. I.23 Construction graphique des paramètres S_k [27].

a) Profondeur de rugosité centrale, S_k

Ce paramètre est calculé comme la différence des hauteurs aux valeurs de rapport de matière de surface de 0% et 100% sur la ligne équivalente ; en particulier, c'est une valeur obtenue en soustrayant la hauteur minimale de la hauteur maximale de la surface centrale.

Le paramètre S_k représente la hauteur de la surface écrêtée, le paramètre $Smr1$ représente le taux de longueur portante surfacique qui sépare les pics éliminés de la surface écrêtée et le paramètre $Smr2$ représente le taux de longueur portante surfacique qui sépare les vallées éliminées de la surface écrêtée (Figure I.24).

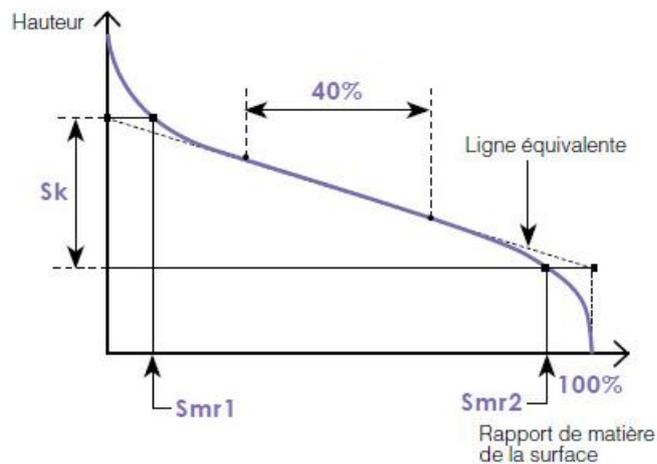


Fig. I.24 Construction graphique du paramètre S_k .

b) Hauteur de crête réduite, Sp_k

Ce paramètre représente la hauteur moyenne des crêtes au-dessus de la surface centrale (Figure I.25).

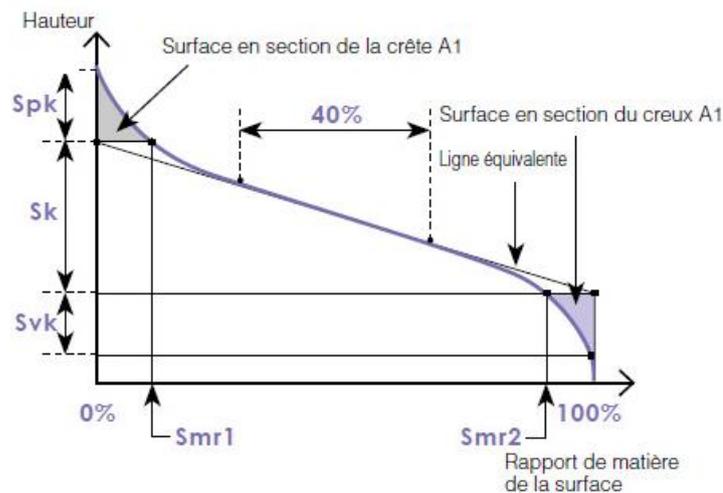


Fig. I.25 Construction graphique du paramètre Sp_k .

c) Hauteur de vallée éliminée, Svk

Ce paramètre donne la moyenne arithmétique de la profondeur de vallée éliminée de la courbe du rapport de la matière de la surface. Il s'agit en fait de la mesure de la profondeur des vallées sous la surface centrale (Figure I.26).

Ce paramètre indique la profondeur de la zone dans laquelle le fluide appliqué sur la surface s'est accumulé, une information pouvant être utilisée pour améliorer les propriétés lubrifiantes de la surface.

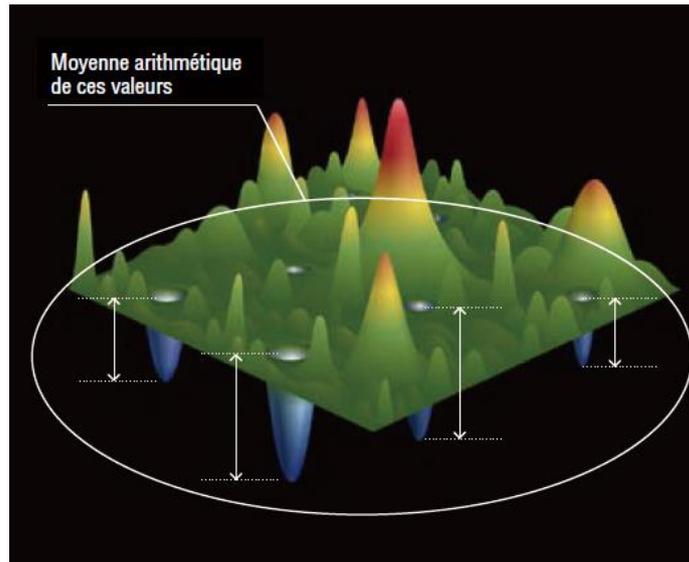


Fig. I.26 Svk est la moyenne arithmétique de la profondeur des vallées.

I.9.1.4. Paramètres fonctionnels de volume

Ces paramètres sont l'ultime évolution des indices fonctionnels et des paramètres fonctionnels S_k qui sont calculés sur la courbe d'Abbott (Figure I.27).

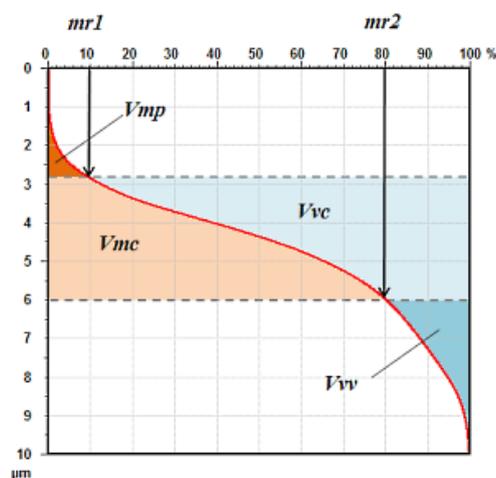


Fig. I.27 Paramètres fonctionnels de volume [Richard].

Les paramètres V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} , et V_{vv} représentent respectivement les volumes de matière des pics éliminés, de matière de la surface écrêtée, de vide de la surface écrêtée et de vide des vallées.

Afin d'utiliser les paramètres de volume, il est nécessaire de spécifier les taux de longueur portante surfacique séparant les pics éliminés et vallées éliminées de la surface écrêtée. Par défaut, les taux 10 % et 80 % sont utilisés

V_{vv} (Volume vide de vallée) : Ce paramètre représente le volume de vide des vallées pour la valeur $p\%$ du rapport de matière de surface.

V_{vc} (Volume vide central) : Ce paramètre représente la différence entre le volume de vide à la valeur p% du rapport de matière de surface et le volume de vide au rapport de matière de surface q%.

V_{mp} (Volume matériel de crête) : Ce paramètre représente le volume de matière pour la valeur p% du rapport de matière de surface.

V_{mc} (Volume matériel central) : Ce paramètre représente la différence entre le volume de matière au rapport de matière de surface q% et le volume de matière au rapport de matière de surface p%.

I.10. Les fontes

I.10.1. Définition

Les fontes sont des alliages métalliques dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2% (Figure I.28), Les éléments d'alliage sont généralement le silicium, le manganèse, le phosphore et le soufre. Il est possible d'améliorer la résistance à la corrosion et à la chaleur par l'addition de nickel, de chrome, de molybdène et de cuivre. En raison de son faible coût et de leurs propriétés mécaniques comparable à celle de certains aciers, les fontes sont utilisées dans tous les domaines de l'industrie et notamment dans l'automobile (pistons, disques de frein et blocs moteur), la construction mécanique (convoyeurs et pompes) et la tuyauterie [28]. Ils sont divisés en plusieurs catégories, fonte grise, fonte blanche et fonte malléable. Les fontes procèdent des propriétés très sévères, comme la dureté élevée et la difficulté d'usinage. Ces principaux avantages sont la bonne résistance à l'usure et l'excellente coulabilité [29].

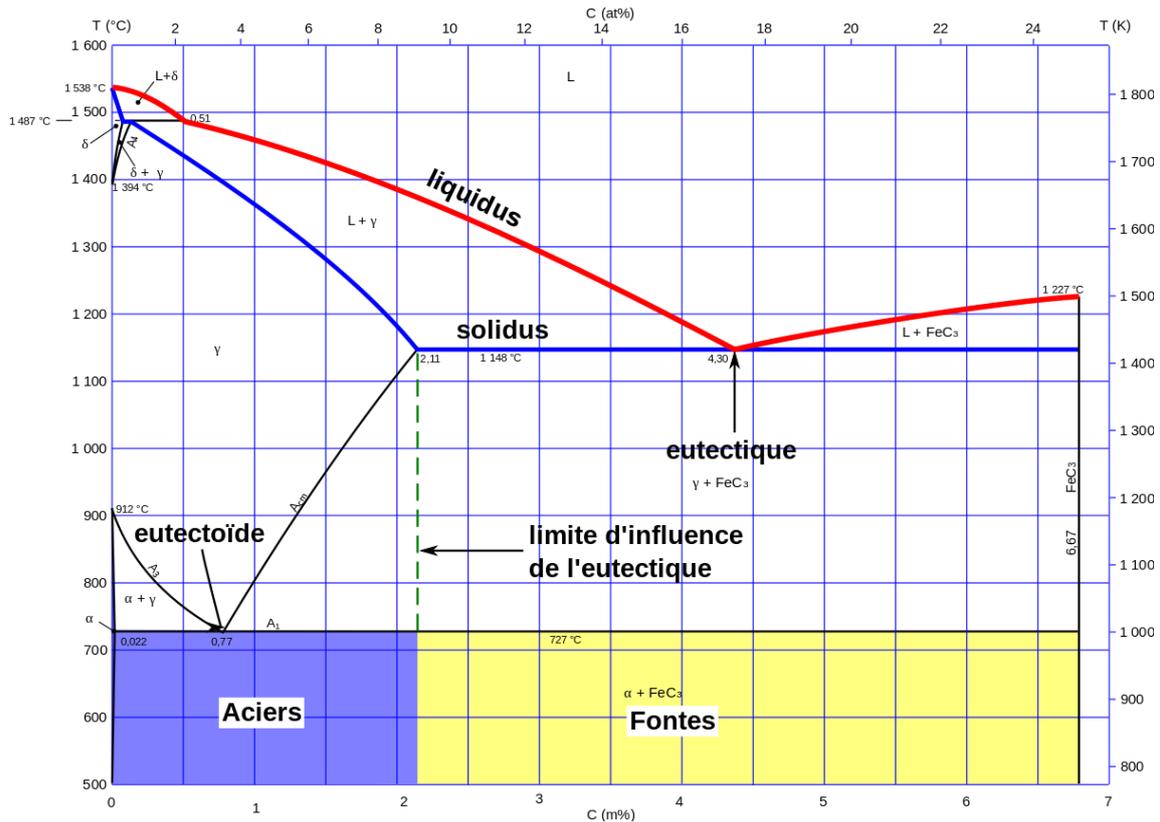


Fig. I.28 Diagramme fer-carbone.

I.10.2. Classification des fontes

Les fontes se divisent en trois grandes familles :

I.10.2.1. Fonte grise

La fonte grise est une fonte à la résistance relativement faible, très polyvalente et très usinable, utilisée pour les tuyaux, les outils agricoles et les raccords. Ce matériau tire sa couleur gris foncé de l'excès de carbone sous forme de lamelles de graphite qui lui ont donné son nom. On distingue deux types de fonte grise [30] :

- a) **La fonte à graphite lamellaire** (dite fonte grise ou GG) possède des propriétés d'amortissement exceptionnelles, mais n'est pas aussi résistante que la fonte blanche
- b) **La fonte à graphite sphéroïdal** (dite fonte sphéroïdale ou GGG) présente une capacité d'amortissement plus faible, mais est relativement bien usinable. Ces fontes sont caractérisées par un graphite de solidification sphéroïdal réparti de manière uniforme dans la matrice ferritique, ferrito-perlitique, perlitique (à l'état brut de coulée).

I.10.2.2. Fonte blanche

Les fontes blanches présentent un aspect blanc à la cassure. Le carbone qu'elles contiennent est combiné au fer sous forme de carbure (cémentite). Contrairement aux fontes grises, elles sont obtenues à partir de minerais de fer pauvres en silicium mais riche en manganèse. Les fontes blanches sont très dures et cassantes et se prêtent mal au moulage. Elles servent surtout de matière première pour la fabrication de l'acier par décarburation dans des fours spéciaux. Des traitements thermiques de la fonte blanche (chauffage et refroidissement lent) permettent de décomposer le carbure de fer en nodules fins de graphite, ce qui rend la fonte blanche plus apte au façonnage. Cette fonte utilisée pour : boulets de broyage, galets d'écrasement, pièces de pompes pour matériaux abrasifs, pièces mécaniques devant résister à l'abrasion, garniture de meules, etc...[30].

I.10.2.3. Fonte malléable

Les fontes malléables présentent une ductilité et une résistance mécanique élevées, un peu comme les aciers non alliés à faible teneur en carbone. Elles sont réalisées à partir de fonte blanche sur laquelle est appliqué un traitement thermique de recuit. Ce traitement thermique permet d'obtenir la dureté, l'allongement à la rupture et les caractéristiques en traction souhaitées.

Les fontes malléables se divisent en deux familles, fonte malléable à cœur noir appelées aussi fontes malléables à graphite nodulaire et fonte malléables à cœur blanche

a) Fontes malléables à cœur noir

Les fontes malléables à graphite nodulaire ferritique ont des résistances mécaniques inférieures à celle des fontes malléables perlitiques, mais un allongement à la rupture plus élevée, de plus de toutes les fontes, ce sont celles qui s'usinent le mieux. (De plus ces matériaux peuvent être redressés ou frappés).

Les fontes malléables à graphite nodulaire perlitiques ont une microstructure qui peut être constituée de perlite ou de martensite revenue. L'une et l'autre ces structures sont produites à l'aide du même procédé de fonderie, mais au moyen de traitements thermiques différents. La martensite revenue apporte des résistances mécaniques et l'usure exceptionnelles aux engrenages, pignons de chaînes (en bref tous éléments mécaniques travaillant en métal sur métal [30].

b) Fonte malléables à cœur blanche

Ayant suivies un traitement de décarburation, ces fontes ne doivent plus comporter de carbone combiné, ni de graphite. Leur matrice est ferritique, et elles sont proches des aciers doux. Ce type de fonte est employé pour des pièces de faibles épaisseurs (<10 mm).

I.10.3. Usinabilité des fontes

D'après le manuel d'usinage « Garant » [30], Les propriétés d'usinabilité des fontes sont fortement influencées par la quantité et la formation du graphite intégré. Les inclusions de graphite dans la fonte réduisent d'une part le frottement entre l'outil et la matière et d'autre part, interrompent la structure métallique de base. Il en résulte, comparativement à l'acier, une meilleure usinabilité, caractérisée par des copeaux courts, une réduction des efforts de coupe et une augmentation de la durée de vie des outils.

I.10.3.1. Fontes blanche : Lors de l'usinage de fonte dure (fonte blanche), l'arête de coupe est fortement sollicitée en raison du pourcentage élevé de cémentite dans la structure de la matière. Pour atteindre une durée de vie économique, la vitesse de coupe devrait être réduite et la dureté de la matière augmentée. Une diminution de la profondeur de passe réduit à cet égard la charge sur les tranchants de l'outil. L'utilisation d'outil céramique de coupe permet, comparé aux carbures, de faire passer le facteur de la vitesse de coupe de 3 à 4.

I.10.3.2. Fontes malléables : En raison de la bonne déformabilité plastique des nuances de fonte malléable, des copeaux continus indésirés se forment lors de l'usinage. Le graphite de recuit et le sulfure de manganèse intégré dans la structure de base entraînent toutefois une amélioration du bris de copeaux et donc des propriétés d'usinage. En raison de sa structure diverse.

L'usinabilité de la fonte malléable à cœur blanc suivant l'épaisseur de paroi est plus difficile pour les pièces épaisses en raison du pourcentage élevé de perlite que pour les pièces minces (la couche carbonée atteint en général une épaisseur de 7 mm). C'est la raison pour laquelle la fonte malléable à cœur blanc est essentiellement utilisée pour les pièces minces. Pour la fonte malléable à cœur noir, contrairement à celle à cœur blanc, une structure uniforme en ferrite avec graphite de recuit intégré est présente sur l'ensemble de la section de la pièce en fonte. La fonte malléable à cœur noir est ainsi généralement plus facilement usinable que celle à cœur blanc. Elle est de préférence utilisée pour les pièces épaisses, qui devront être usinées à sec ultérieurement.

I.10.3.3. Fonte grise : Pour la fonte grise à graphite lamellaire, la structure de base similaire à l'acier constituée de lamelles de graphite est coupée, ce qui engendre la formation de copeaux cisailés ou fragmentés pendant l'usinage. Cela occasionne toujours des copeaux courts (généralement copeaux en poussière). Une usure frontale extrême des faces de dépouille est ainsi évitée. En outre, l'on peut constater une diminution des efforts de coupe. Lors de l'usinage, les arêtes de la pièce peuvent présenter des éclats.

La qualité d'état de surface obtenue dépend du procédé de fabrication, des conditions de coupe ainsi que de la finesse et de l'uniformité de la structure de la fonte grise. En cas d'altération de la structure lamellaire, la durée de vie peut varier jusqu'à un facteur 10 à vitesses de coupe élevées et dans les mêmes conditions.

Dans la fonte à graphite sphéroïdal (GGG), le graphite se présente sous la forme d'inclusions globulaires. La structure de base des nuances présentant une résistance moindre et une bonne ténacité est essentiellement composée de ferrite d'excellente usinabilité. Il se forme des copeaux en vrille, qui sont toutefois légèrement cassants en raison des inclusions de graphite. Lors de l'usinage à des vitesses de coupe plus élevées, l'usure des faces de dépouille est problématique. Les copeaux présentent alors une caractéristique de cassure tenace et tendent, particulièrement lors de la coupe à sec, à former des copeaux apparents, c-à-d plastifié de la matière entre les faces de dépouille et la pièce.

I.11. Méthodes de modélisation et optimisation en usinage

L'impact économique des coûts de fabrication et des exigences techniques sur la productivité et la qualité des produits finis lors de l'usinage impose l'optimisation des systèmes de fabrication pour obtenir un compromis entre le coût et la qualité. D'autre part, le processus d'usinage est influencé par plusieurs facteurs tels que la géométrie de l'outil de coupe (rayon de bec, angles de coupe, etc.), les conditions de coupe (vitesse de coupe, avances par tour, profondeur de passe), la nature du matériau de coupe, les revêtements sur l'outil et la lubrification. Pour cela, il est nécessaire de connaître l'impact de ces facteurs sur les paramètres technologiques d'usinage (rugosité de surface, effort de coupe, usure, Taux d'enlèvement de matière, etc...) afin de choisir les conditions de coupe optimales pour atteindre les exigences ciblées. Donc la modélisation et l'optimisation des paramètres de coupe est une étape fondamentale dans les démarches de fabrication. Cela a incité beaucoup de chercheurs au cours des dernières années à établir des études de modélisation en se basant sur les plans des expériences et en utilisant différentes méthodes tels que la méthodologie de surface de réponse

(RSM) [19, 31 et 32], l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN) [33, 34] et la Neuro-Floues (ANFIS) [35, 36 et 37]. Ces méthodes permettent de modéliser le processus et déterminer des modèles mathématiques de prédiction et enfin sélectionner les conditions de coupes optimales en se basant sur les modèles déterminés

I.11.1. Méthode de surface de réponse MSR

Parmi les techniques de modélisation, la méthodologie de la surface de réponse (MSR), cette technique est largement utilisée pour examiner et optimiser les variables opérationnelles, elle est généralement utilisée pour générer une surface de réponse sur une région d'intérêt particulière, en optimisant les réponses ou pour désigner les conditions de fonctionnement afin d'atteindre des spécifications cibles imposées par les constructeurs. L'avantage majeur de cette méthode est sa capacité à identifier les paramètres et les interactions qui influents sur la réponse étudié. Mais cette méthode a un faible comportement non linéaire, et applicable que dans des domaines expérimental régulier. Cette technique comporte six étapes [38] :

1. La sélection des variables indépendantes et les réponses étudiées.
2. Le choix du plan d'expérience et la réalisation des expériences selon la matrice expérimentale choisie.
3. Le traitement mathématique-statistique des données expérimentales obtenues par l'ajustement d'une fonction polynomiale.
4. L'évaluation de l'aptitude du modèle et l'identification des paramètres influents sur la réponse étudiée (ANOVA).
5. La vérification de la nécessité et de la possibilité d'effectuer une étape dépistage.
6. L'obtention des valeurs optimales pour chacune des réponses étudiées (R_a , t et TEM).

I.11.2. Approche des réseaux de neurones artificiels ANN

En raison de limitations de la méthode MSR, d'autres méthodes plus performantes doivent être explorées. Parmi ces méthodes l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN) qui est un outil de modélisation informatique basée sur l'intelligence artificielle. Les ANN capable de modéliser de manière plus efficace les entrées et les sorties non linéaires par rapport aux autres techniques en termes de précision, robustesse, simplicité et vitesse. Ces réseaux présentent également une Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données. Les ANN se caractérisent par la caractéristique d'apprentissage, cette dernière est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. D'autre part, cette méthode présente des

inconvénients tels que l'absence d'une méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche(s) cachée(s) et les informations acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids sont inintelligibles pour l'utilisateur. Le cycle de développement d'un réseau de neurone peut être séparé en sept étapes [39] :

1. La collecte des données.
2. L'analyse des données.
3. La séparation des bases de données.
4. Le choix d'un réseau de neurones.
5. La mise en forme des données.
6. L'apprentissage.
7. La validation.

I.11.3. Méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi, également connue sous le nom de conception robuste de Taguchi, est une méthodologie pour concevoir les produits qui ont la sensibilité minima à la variation dans des facteurs incontrôlables. Cette méthode est basée sur des techniques conventionnelles, avec quelques directives pour des expériences de présentation et l'analyse de conception des résultats de ces expériences. La méthode de Taguchi utilise une conception spéciale des plans orthogonaux pour étudier l'espace entier de paramètre avec un nombre minimum d'expériences. La méthode de Taguchi (plan orthogonale) est largement utilisée dans l'analyse d'ingénierie et se compose d'un plan d'expérience avec un objectif d'acquérir les données d'une manière commandée, afin d'obtenir des informations sur le comportement d'un processus donné. Le plus grand avantage de cette méthode est de gagner l'effort de réalisation des expériences : gagner le temps de réalisation des expériences et économiser le coût. La méthode de Taguchi est un outil puissant pour la conception d'un système de haute qualité. Taguchi a considéré trois étapes pour le développement des processus et des produits : conception de système, conception de paramètre, et conception de tolérance. Dans la conception de système, l'ingénieur utilise les principes scientifiques et technologiques pour déterminer la configuration fondamentale. Dans l'étape de conception de paramètre, les valeurs spécifiques des paramètres de système sont déterminées. La conception de tolérance est employée pour déterminer les meilleures tolérances pour les paramètres. En plus, le rapport S/N et l'analyse de la variance (ANOVA) peut être utilisé pour indiquer l'impact des paramètres de processus sur les paramètres technologiques d'usinage [1].

I.11.4. Algorithmes Génétiques

Dans l'algorithme génétique, un point dans l'espace de recherche est représenté par des nombres binaires ou décimaux, connus sous le nom de corde ou chromosome. Chaque chromosome est assigné une valeur de forme physique qui indique comment étroitement il satisfait l'objectif désiré. Un ensemble de chromosomes s'appelle la population. Une population est actionnée par trois opérations fondamentales, à savoir, reproduction (pour remplacer la population avec le grand nombre de bonnes cordes ayant des valeurs élevées de forme physique), croisement (pour produire de nouveaux chromosomes en combinant les diverses paires de chromosomes dans la population), et mutation (pour la légère modification aléatoire des chromosomes). Un ordre de ces opérations constitue une génération. Les répétitions de processus jusqu'au système converge à l'exactitude exigée après beaucoup de générations. Les algorithmes génétiques ont été trouvés très puissants en découvrant le minimum global [1]. (Figure I.29)

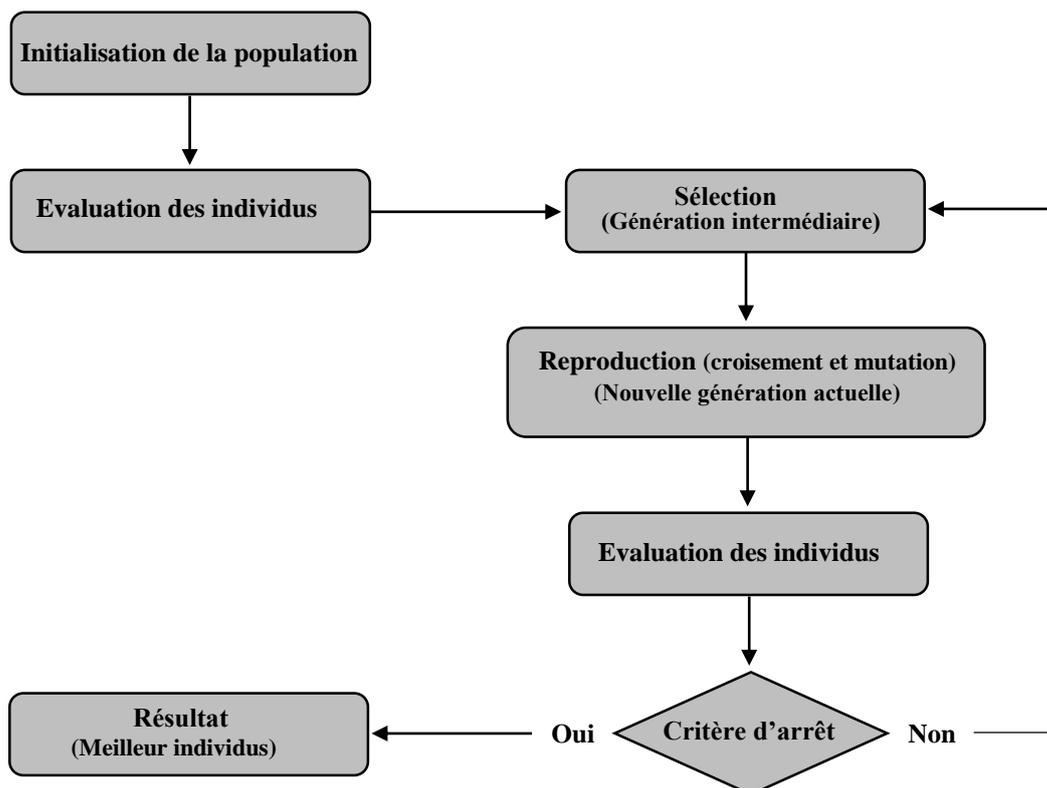


Fig.I.29 Schéma de principe d'un Algorithme Génétique.

Il y a plusieurs raisons pour choisir l'algorithme génétique. Premièrement, quand la conception de l'algorithme est faite, on a la possibilité d'utiliser n'importe quel langage informatique ou mathématique pour l'implantation. Un logiciel d'optimisation spécifique n'est pas nécessaire. Ensuite, ce type d'algorithme est reconnu pour être très robuste à l'utilisation. Cette robustesse se traduit principalement par deux caractéristiques intéressantes: il n'est pas nécessaire de

fournir un point de départ pour démarrer l'optimisation et l'algorithme résiste assez bien au blocage dans des extremums locaux. Une autre caractéristique intéressante de l'AG est qu'il améliore les solutions en cours d'optimisation. Plus on lui donne du temps, plus il s'approche de l'optimum. Mais si on a besoin d'une réponse, même s'il n'a pas eu le temps de converger, il est généralement capable de nous fournir une solution valide, même si elle n'est pas optimale, ce qui vaut toujours mieux que ne pas avoir de réponse du tout [1].

I.12. Etat de l'art

Au cours des dernières années plusieurs travaux de recherche ont été réalisés pour le bute d'étudier l'usinabilité des fontes avec divers matériaux de coupe et en utilisant de nombreuses méthodes et techniques de modélisation et optimisation.

M. Gunay et E. Yucel [28], ont examiné la rugosité de surface (R_a) et les efforts de coupe engendrés lors le tournage de deux fontes blanches avec des duretés différentes (50 et 62 HRC) par des outils en CBN et céramique. Les auteurs ont utilisé un plan de Taguchi (L18) et aussi la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour modéliser les paramètres de sortie. Les résultats trouvés montrent que l'avance (f) est le paramètre principal influençant la rugosité de surface (R_a) et que la profondeur de coupe (a_p) est le facteur le plus prépondérant sur l'effort de coupe. La meilleure rugosité trouvée est $R_a = 0,262 \mu\text{m}$ avec le couple CBN/source (50 HRC).

A.K. Ghani et al [40], ont étudié l'effet des paramètres de coupe sur la durée de vie des outils en céramique mixte (CC650) revêtues par le carbure de titane (TiC), l'état de surface et des vibrations lors de l'usinage de la fonte nodulaire.

Les chercheurs constatent que : avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe, la durée de vie de l'outil est devenue de plus en plus courte. Dans la plage de vitesse comprise entre 364 et 685 m/min , la durée de vie de l'outil était très courte. La durée de vie maximale de l'outil atteinte n'était que d'environ 1,5 minute à 364 m/min . Avec une vitesse d'avance de 0,22 $mm/tour$ et une vitesse de coupe de 500 m/min , la durée de vie de l'outil était même inférieure à 1 min . la variation de l'avance et de la profondeur de passe affectait également l'usure en dépouille, mais l'effet n'était pas aussi important que celui de la vitesse de coupe. Dans toutes les conditions de coupe, la variation de l'état de surface avec l'usure des flancs est insignifiante. Cependant, la rugosité de la surface est plus importante pour une vitesse d'avance plus élevée et une profondeur de passe plus grande.

Pour les signaux de vibration (accélération et amplitude). En général, l'amplitude de vibration augmente avec l'usure des flancs. Cependant, avec l'augmentation de la vitesse, les vibrations

diminuent à une vitesse d'alimentation et à une profondeur de passe constante, c'est-à-dire que le processus devient de plus en plus stable. Lorsque la vitesse augmente de 364 à 685 m / min, l'amplitude de vibration diminue à avance et profondeur de coupe constantes. Avec l'augmentation de l'usure des flancs, les vibrations pendant la coupe augmentent, mais le taux d'augmentation est plus faible lorsque la vitesse de coupe est élevée. Et en conclusion, il a été conclu que la céramique mixte à base d'alumine n'est pas adaptée à l'usinage de la fonte à cause de l'usure rapide de la plaquette.

D.K. Sarma et U.S. Dixit [41], ont comparé les performances d'un outil céramique à oxydes mixtes dans le tournage à sec et avec un jet d'air comprimé de la fonte grise, en utilisant une conception factorielle complète avec 3 facteurs et 2 niveaux, les expériences factorielles sont 2^3 , soit 8 expériences pour chaque condition de coupe.

Il a été observé qu'à une faible vitesse de coupe de 100 *m/min*, le refroidissement à l'air ne présentait aucun avantage. Cependant, à des vitesses de coupe plus élevées (400 *m/min* et plus), cela réduit considérablement l'usure on dépouille de l'outil et augmente sa durée de vie. Bien qu'aucune amélioration de l'état de surface n'ait été observée à une vitesse de coupe de 400 *m/min* par rapport au tournage à sec, mais à une vitesse de coupe de 480 *m/min*, où le tournage à sec fournit un très mauvais état de surface en raison de l'usure rapide, le refroidissement par air fournissait une très bonne finition de surface. Dans tous les cas, le refroidissement par air a diminué les forces de coupe par rapport aux forces correspondantes en tournage à sec. Ainsi, le tournage à refroidissement par air semble être une bonne option écologique pour le tournage à grande vitesse. Cette étude a également permis de dégager des observations intéressantes et utiles pour les recherches futures dans ce domaine. Par exemple, l'accélération des vibrations lors de la coupe ne permet pas d'établir une corrélation directe avec l'usure en dépouille ou la rugosité de la surface. D'autre part, les résultats obtenus par ce travail sont motivants pour que les travaux futurs se focalisent sur l'optimisation des paramètres de processus du tournage à refroidissement par air.

A. M. Ravi et al [42], ont les performances d'un outil de carbure multicouche à revêtement dur et l'optimisation de réponses multiples du processus de tournage pour obtenir une combinaison paramétrique optimale permettant d'obtenir des forces de coupe et de puissance d'usinage minimales avec un taux d'enlèvement de matière (MRR) maximal à l'aide de la méthode Taguchi et d'un réseau neuronal artificiel (ANN) lors du tournage de la fonte blanche. Les résultats trouvés montrent que l'effort de coupe augmente considérablement avec l'augmentation de la profondeur de passe et la vitesse d'avance, et diminue à mesure que la

vitesse de coupe augmente (Figure I.30), au cours de laquelle la chaleur maximale générée décompose le carbure primaire en petits carbures secondaires faciles à usiner. Cette étude exhibe que les meilleures performances de l'outil ont été obtenues lorsque la vitesse de coupe est variée entre 40 et 110 m/min . L'étude comparative des résultats expérimentaux et prévus obtenus à l'aide de l'approche ANN confirme que le modèle ANN formé a illustré une bonne capacité d'interpolation par rapport à celle de la régression (Figure I.31) et peut être utilisé comme un outil de prévision efficace pour déterminer les caractéristiques d'usinabilité de la fonte blanche. D'autre part, Les résultats expérimentaux ont confirmé l'utilisation de la méthode de Taguchi pour améliorer les performances de coupe et optimiser les facteurs de contrôle en usinage.

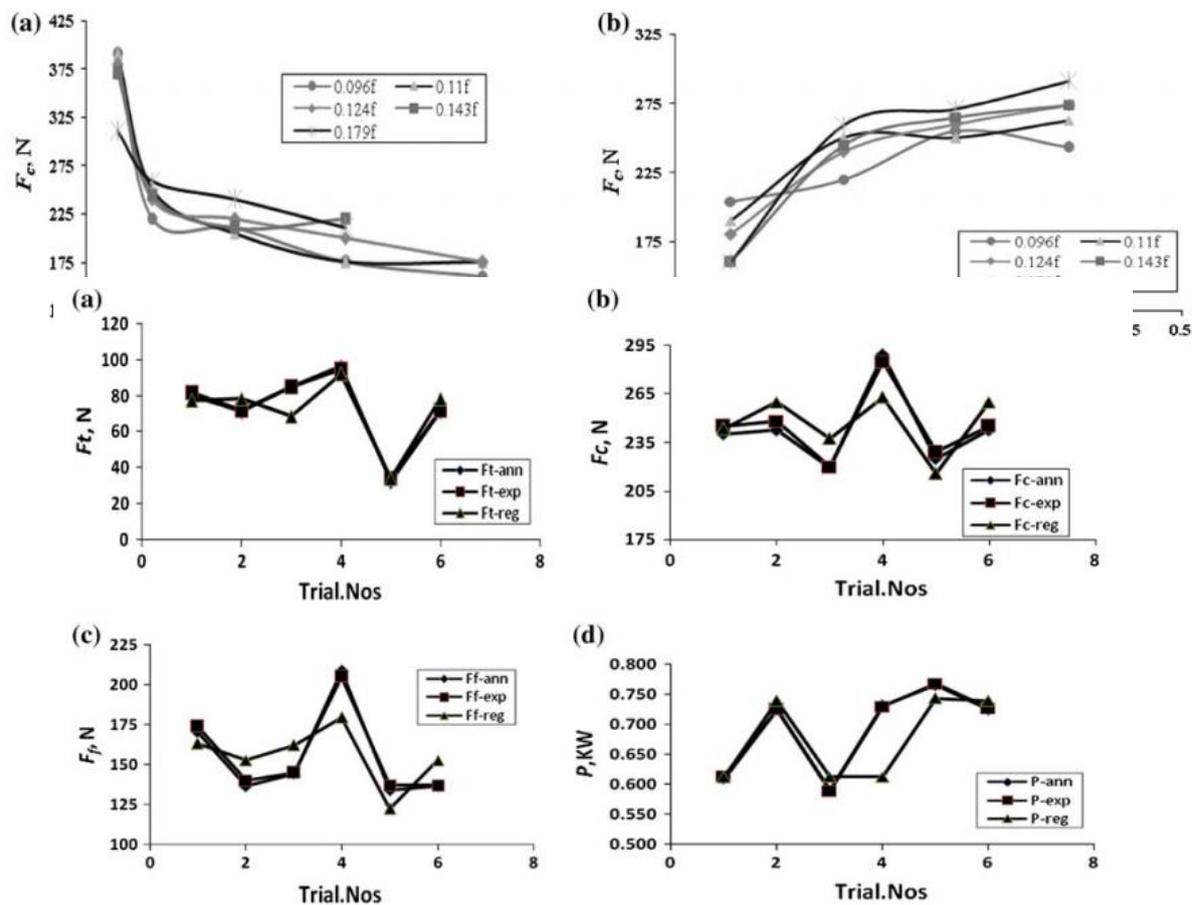


Fig.I.31 Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par régression et ANN.

W. Grzesik et al [43], ont traité les caractéristiques de coupe fondamentales obtenues lors du tournage de la fonte nodulaire de nuance EN-GJS-500-7 avec des outils en carbure revêtus d'une couche de (Ti), multicouche de (TiC/Ti) / et revêtements de Al_2O_3 / TiN , ainsi que des outils en céramiques à base de nitrure de silicium (Si_3N_4).d'après cette étude, les auteurs constatent que :

Les forces de coupe les plus élevées ont été enregistrées pour les outils céramiques en nitrure de silicium pour lesquels l'effort F_z diminue légèrement de 810 N à 740 N lorsque la vitesse de coupe augmente de 160 m/min à 320 m/min (Figure I.32). D'autre part, les forces de coupe les plus faibles ont été mesurées pour les outils revêtus multicouches pour lesquels un coefficient de frottement minimal a été calculé.

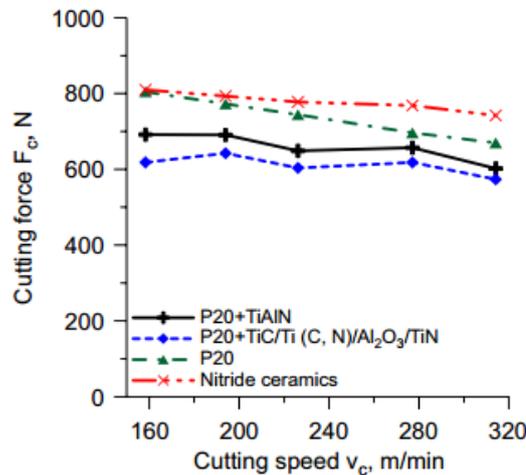


Fig.I.32 Evolution d'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe

Les outils de coupe en nitrure de silicium produisent la meilleure et la plus stable rugosité de surface dans les conditions de finition (Figure I.33). On note aussi que la vitesse d'avance est le paramètre le plus influent sur la rugosité de surface, par exemple, à une vitesse de coupe de 270 m/min , le paramètre de rugosité R_a varie de 0,44 μm à 1 μm lorsque la vitesse d'avance augmente de 0,04 mm/tr à 0,16 mm/tr , respectivement. Et dans ce dernier, il a été conclu que les outils revêtus fonctionnent mieux lors de l'usinage de la fonte nodulaire à haute température.

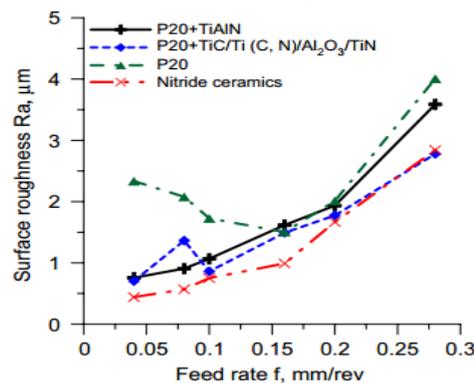


Fig.I.33 Evolution de R_a en fonction de la vitesse de coupe

B.R. Ramji et al [44], ont établi une étude expérimentale pour le but d'examiner l'usure en dépouille et la rugosité de surface lors du tournage de la fonte grise l'aide d'inserts en carbure traités cryogéniquement. Des expériences de tournage ont été réalisées avec des vitesses de coupe de 53, 85, 99, 149 m/s , des avances de 0,12, 0,16, 0,2, 0,24 $mm/tour$ et une profondeur de passe constante de 1,5 mm . Les échantillons ont été retournés en utilisant des inserts en

carbure traités et non traités au cryogène. Le cycle de traitement cryogénique a consisté à refroidir les échantillons d'essai de la température ambiante à une température cryogénique de $-178,9\text{ C}^\circ$ en 3 h, à tremper à la température cryogénique environ 24 h et à revenir à la température ambiante en environ 5 h. La structure expérimentale a été conçue sur la base de la technique du système orthogonal de Taguchi et une analyse de variance a été réalisée pour identifier l'effet des paramètres sur les variables de réponse. L'ANOVA (tableau I.3) a indiqué que le traitement cryogénique influait sur l'usure on dépouille et la rugosité de la surface avec une contribution de de 31% et 34% respectivement. La vitesse de coupe a influencé l'usure on dépouille avec une contribution de 49,77% et la rugosité de la surface avec un taux 25,88%. Considérant que l'influence de la vitesse d'avance sur le l'usure des flancs était modérée à 14,4%, par contre leur influence sur la rugosité de la surface était très significative (37,73%).

Table I.3 ANOVA pour V_b et R_a [44].

| ANOVA for flank wear | | | | | | |
|----------------------|----|-------------|--------------|--|------------------|------------------|
| SV | df | SS | MS = SS/DOF | $F_{\text{calc}} = \text{MS}/\text{MS}_{\text{error}}$ | F_{tab} | Contribution (%) |
| A | 3 | 0.5862428 | 0.1954143 | 165.61 | 3.86 | 49.77 |
| B | 3 | 0.1697466 | 5.658219E-02 | 47.95 | 3.86 | 14.41 |
| C | 1 | 0.374026 | 0.374026 | 316.99 | 5.12 | 31.75 |
| A*B | 9 | 9.7917E-03 | 1.087966E-03 | 0.922 | 3.18 | 0.55 |
| B*C | 3 | 5.5052E-03 | 1.835055E-03 | 1.555 | 3.86 | 0.30 |
| A*C | 3 | 2.1778E-02 | 7.259472E-03 | 6.1526 | 3.86 | 1.22 |
| ERROR | 9 | 1.06191E-02 | 1.179899E-03 | | | 0.59 |
| Total | 31 | 1.1777 | | | | 100 |

SV = Source of Variation

| ANOVA for surface roughness (R_a) | | | | | | |
|---------------------------------------|----|------------|-------------|--|------------------|------------------|
| SV | df | SS | MS = SS/DOF | $F_{\text{calc}} = \text{MS}/\text{MS}_{\text{error}}$ | F_{tab} | Contribution (%) |
| A | 3 | 0.2243 | 7.4770E-02 | 175.7786 | 3.86 | 25.88 |
| B | 3 | 0.3271 | 0.1091 | 256.3273 | 3.86 | 37.73 |
| C | 1 | 0.2984 | 0.2984 | 701.4933 | 5.12 | 34.42 |
| AB | 9 | 3.05E-03 | 3.3924E-04 | 0.7975 | 3.18 | 0.0035 |
| AC | 3 | 6.4844E-03 | 2.1615E-03 | 5.0816 | 3.86 | 0.0074 |
| BC | 3 | 3.6594E-03 | 1.2198E-03 | 2.8677 | 3.86 | 0.0042 |
| Error | 9 | 3.828E-03 | 4.2535E-04 | | | 0.00 |
| Total | 31 | 0.8667 | | | | 100 |

SV = Source of Variation

W. Grzesik et al [45], ont réalisé des expérimentaux sur la fonte sphéroïdal nuance EN-GJS-500-7 usinée par des outils en CBN (CB 7015 selon la désignation Sandvik). Le processus de coupe peut être classé comme une coupe à haute performance (HPC) en raison d'un taux d'enlèvement de matière relativement élevé (environ de $190\text{ cm}^3/\text{min}$). Les recherches effectuées incluent les grandeurs fondamentales du processus et les caractéristiques de la surface usinée en 2D et 3D, les efforts de coupe, énergie de coupe spécifique, valeurs moyennes et maximales de la température de coupe, répartition de la température dans la zone de coupe. La variation de la rugosité de surface R_a en fonction de la vitesse de coupe est présenté graphiquement sur la figure I.33. Pour des vitesses de coupe de 240 à 480 m/min et une vitesse d'avance de $f = 0,08\text{ mm}/\text{tour}$, la valeur R_a diminue de 0,6 à 0,38 μm , ce qui prouve l'effet significatif de la vitesse de coupe sur R_a . La valeur maximale de $R_a = 1,34\text{ }\mu\text{m}$ a été mesurée

pour une avance de $0,08 \text{ mm/tour}$ et une vitesse de coupe de $V_c = 100 \text{ m/min}$. De plus, la figure I.34 montre la topographie de surface obtenue à la vitesse de coupe maximale de 400 m/min et à faible vitesse d'avance de $0,08 \text{ mm/tour}$. En général, des surfaces avec des aspérités régulières et de bonnes propriétés de portance (valeurs S_{sk} négatives) sont générées. À une vitesse d'avance plus élevée de $0,12 \text{ mm/tr}$, les auteurs ont observé des petits cratères résultant de l'élimination des inclusions de graphite.

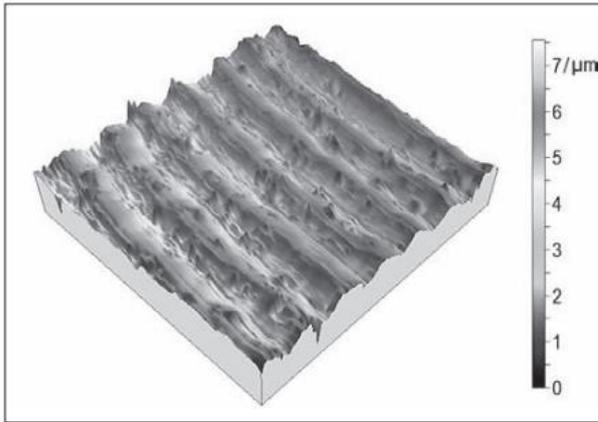


Fig.I.35 Topographie de surface générée avec $v_c = 400 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tour}$ et $r_e = 0,8 \text{ mm}$.

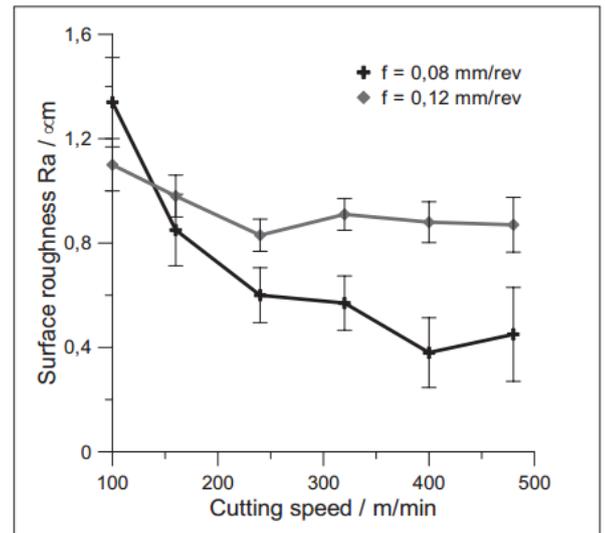


Fig.I.34 Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité moyenne R_a .

La figure I.36 présente à titre d'exemple des cartes thermiques colorées enregistrées au moyen d'une technique thermographique. Afin de localiser les champs thermiques, le copeau enlevé et l'insert CBN sont également capturés. L'analyse thermique présentée à cette figure montre notamment que les différences entre les valeurs maximales et moyennes des températures mesurées dans la zone de coupe ne sont pas distinctes. En conséquence, dans cette étude, la température de contact moyenne varie dans la plage de $t = 412$ à $512 \text{ }^\circ\text{C}$, tandis que sa valeur maximale varie entre $t_{\text{max}} = 426$ à $541 \text{ }^\circ\text{C}$. La différence maximale entre des températures maximales et moyennes d'environ $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a été enregistrée pour une vitesse de coupe maximale de $v_c = 400 \text{ m/min}$. De manière surprenante, les basses températures enregistrées dans la zone de coupe résultent de la formation de copeaux spécifique du matériau à deux phases dans lequel des inclusions de graphite facilitent sa décohésion. En fait, un flux à grande vitesse de petits copeaux s'est formé. De plus, cet effet spécifique peut résulter d'une diminution substantielle de la longueur/surface de contact de l'outil-copeau et de la concentration de chaleur dans une très petite zone (Figure I.37), l'augmentation de la vitesse de coupe de 100 à 400 m/min entraîne une augmentation linéaire de la température moyenne d'environ $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cette étude montre aussi que les forces de coupe diminuent avec des vitesses de coupe élevées cette diminution des efforts de coupe conduit à une diminution de l'énergie de coupe spécifique. Par contre, les efforts de coupe augmentent de façon non linéaire lorsque la vitesse d'avance augmente. L'usinage la fonte sphéroïdal à des vitesses de coupe élevées améliore visiblement l'état de surface. Dans cette étude, la valeur minimale du paramètre de rugosité Ra d'environ $0,4 \mu m$ a été enregistrée pour $Vc = 400 \text{ m/min}$ et $f = 0,08 \text{ mm/tr}$. Dans ces conditions d'usinage, des surfaces sans défauts avec des marques d'avance régulièrement distribuées sont produites.

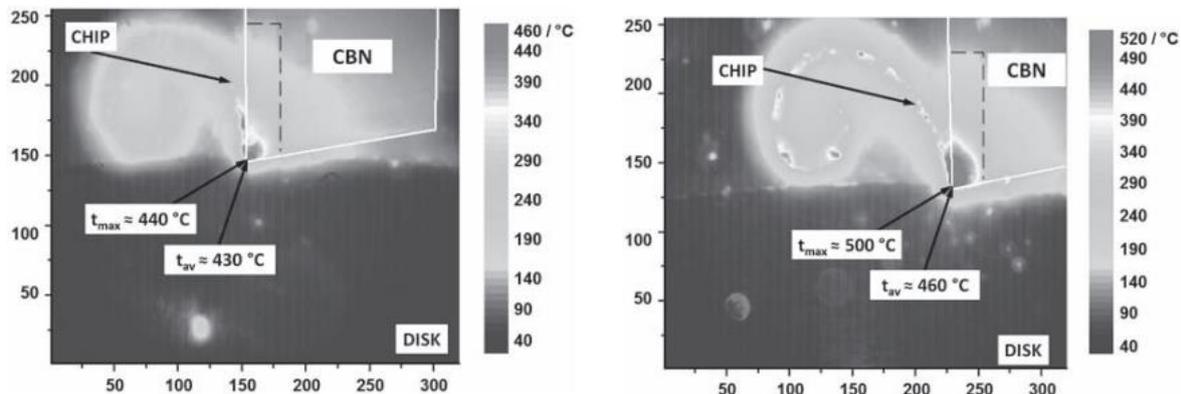


Fig.I.36 Cartes thermiques pour la coupe orthogonale pour différentes vitesses de coupe: (a) $vc = 280 \text{ m/min}$, (b) $vc = 400 \text{ m/min}$ en maintenant constante $f = 0,12 \text{ mm tr}$ et $ap = 3,3 \text{ mm}$.

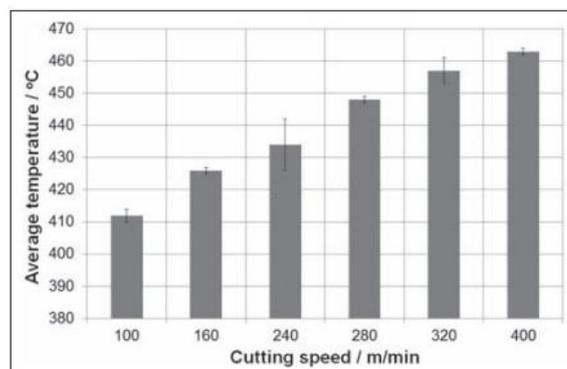


Fig.I.37 Influence de la vitesse de coupe sur la température de coupe.

P. P. Kulkarni et al [46], ont étudié l'effet du rayon de bec de l'outil dans différentes conditions de coupe et son effet sur la durée de vie de l'outil et la rugosité de la surface. Lors du tournage de la fonte grise par des outils en carbure revêtus (multicouche) de nitrure de titane (TiN) + revêtement de nitrure de titane (TiCN) + oxyde d'aluminium (Al_2O_3), ayant un rayon de bec de $0,8 \text{ mm}$ et un rayon de nez de $1,2 \text{ mm}$. Les conditions de coupe utilisées sont les suivantes : $Vc = 100 \text{ m/min}$, 125 m/min et 150 m/min ; $f = 0,20 \text{ mm/tour}$, $0,23 \text{ mm/tour}$ et $0,27 \text{ mm/tour}$, ap constant est égale à 2.5 mm . D'après les résultats expérimentaux, la rugosité de surface est très influencée par l'augmentation de la vitesse d'avance et aussi par la vitesse de coupe (Figure I.38). Il est évident que la rugosité de surface la plus faible a été obtenue à des vitesses de coupe

plus élevées dans un outil à rayon plus grand ($r\epsilon=1.2\text{ mm}$) que dans un outil à rayon plus petit ($r\epsilon=0.8\text{ mm}$).

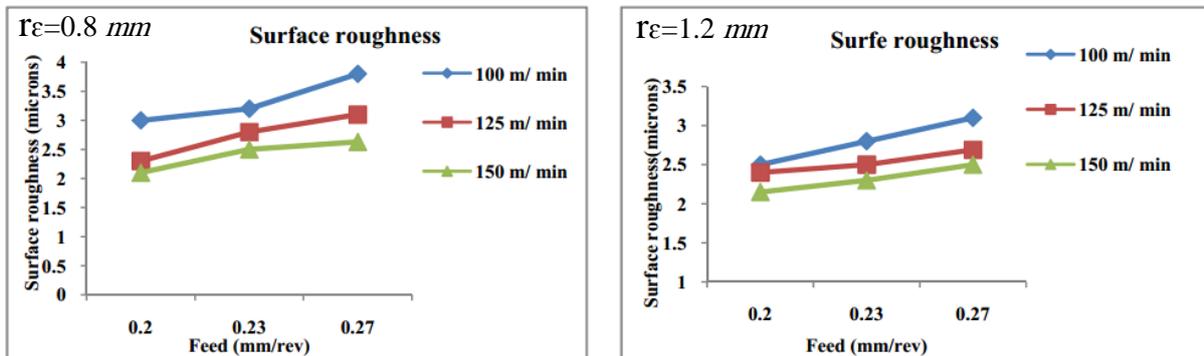


Fig.I.38 Evolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe.

La durée de vie de l'outil est influencée par la vitesse de coupe et la vitesse d'avance (Figure I.39). La durée de vie minimale de l'outil a été atteinte avec une vitesse d'avance de 0,27 mm/tour avec les deux outils de rayon de bec différents. Lorsque la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sont élevées, la durée de vie de l'outil avec un rayon de bec de 1,2 mm est excellente par rapport à celle de l'outil avec le rayon de de bec de 0,8 mm. En conclusion, les performances d'un outil à grand rayon de bec sont supérieures à celles d'un outil à rayon de bec réduit en termes de durée de vie d'outil et de finition de surface lors de l'usinage de la fonte grise.

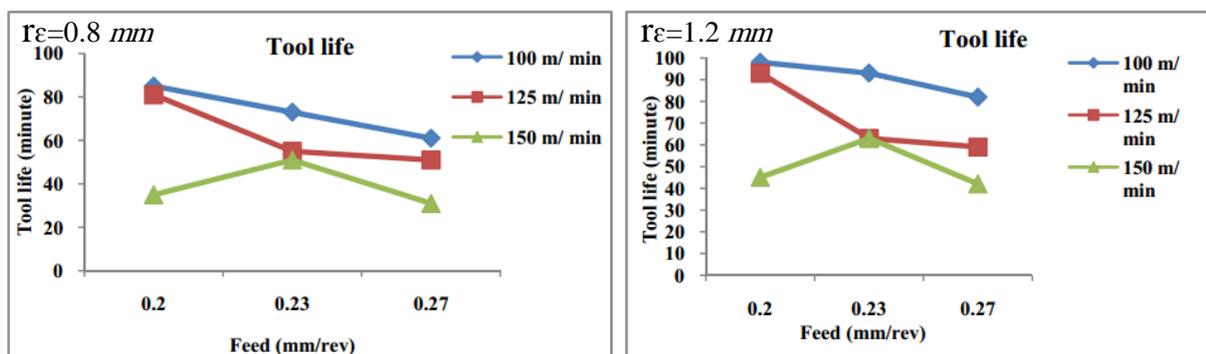


Fig.I.39 Evolution de la durée de vie des outils de coupe en fonction de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe.

J. A. Ghani et al [47], ont étudié les performances des lubrifiants industriels inorganiques et des lubrifiants écologiques à base d'huile de palme lors du tournage de la fonte ductile FCD700 par des d'outils en carbure. Deux régimes de paramètres de coupe ont été testés : vitesse de coupe de 120 m/min, vitesse d'avance de 0,3 mm/tour et profondeur de coupe de 0,6 mm, et vitesse de coupe de 220 m/min, vitesse d'avancement de 0,2 mm/tour, et profondeur de coupe de 2 mm. Les résultats obtenus montrent que la durée de vie des outils est plus longue lors du tournage de la fonte à l'aide d'un lubrifiant à base d'huile commerciale par rapport à l'huile de palme. La

durée de vie de l'outil a été considérablement réduite à une vitesse de coupe élevée de 220 m/min et à une profondeur de coupe élevée de 2 mm. Avec des faibles valeurs des conditions de coupe ($V_c = 120$ m/min, $f = 0,3$ mm/tour et $a_p = 0,6$ mm), la durée de vie de l'outil pour le lubrifiant à l'huile commerciale était environ 1,7 fois supérieure à celle du lubrifiant à l'huile de palme. Toutefois, lorsque la vitesse de coupe a augmenté à 220 m/min et à une profondeur de coupe de 2 mm, la durée de vie de l'outil pour le lubrifiant à base d'huile commerciale a été multipliée par 3 par rapport à celle du lubrifiant à base d'huile de palme.

La rugosité de surface R_a obtenue en utilisant un lubrifiant à base d'huile commerciale est plus élevé d'environ $1 \mu\text{m}$ par rapport à celle obtenue en utilisant un lubrifiant à base d'huile de palme à une faible vitesse de coupe de 120 m/min, une vitesse d'avance élevée de 0,3 mm/tr et une faible profondeur de coupe de 0,6 mm. Cela peut être dû au composé d'huile végétale qui contient de l'oxygène et crée une couche liée plus forte du lubrifiant sur la surface du métal et une bonne adhésion à la surface du métal.

En générale, Les résultats montrent que, dans les deux conditions de tournage, la durée de vie de l'outil pour le lubrifiant du commerce était plus longue que celle du lubrifiant à base d'huile de palme. Par contre la rugosité de surface obtenue avec le lubrifiant à base d'huile de palme est meilleure d'environ $1 \mu\text{m}$ par rapport à lubrifiant industriel.

I.13. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases nécessaires à la compréhension de cette étude. D'abord, nous avons introduit un rappel des bases scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux tels que : la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité des matériaux, les matériaux de coupe, les formes et mécanismes d'endommagement des outils de coupe, les actions mécanique en tournage, les paramètres de performance d'usinage et la topographie de surface 3D et les paramètres fonctionnels. Ensuite nous avons exposé les méthodes d'optimisation les plus utilisées dans le domaine d'usinage. Et enfin, on a traité l'état de l'art sur l'usinabilité des fontes et les méthodes de modélisation des conditions de coupe.

Chapitre II
Procédures expérimentales

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la procédure suivie ainsi que les équipements utilisés pour l'élaboration des expériences. Les essais de chariotage réalisés sur la FGL 250, nécessaires à la réalisation de notre travail, ont été effectués au hall de technologie (laboratoires de coupe des métaux et de tournage) et au laboratoire Mécanique et Structures (LMS) du département de génie mécanique à l'université 8 Mai 1945 de Guelma.

II.2. Équipements utilisés

II.2.1. Éprouvettes

Les opérations de chariotage relatives aux essais de la rugosité, effort de coupe et usure en dépouille ont été réalisés sur des éprouvettes en fonte de nuance FGL250, de 70-90 mm de diamètre et de 400 mm de longueur (Figure II.1). Cette fonte est largement utilisée dans l'industrie et notamment dans l'automobile (disques de frein), la construction mécanique (convoyeurs, pompes et pignons) et la tuyauterie. Ses principaux avantages sont son excellente coulabilité et usinabilité, sa bonne résistance à l'usure et sa grande capacité d'amortissement des vibrations. Cette fonte présente une dureté de 250 HB et une limite d'élasticité de 250 MPa. La composition chimique réelle de la fonte FGL250 est indiquée au tableau II.1.

Table II.1 Composition chimique de la fonte FGL 250

| Eléments | Pourcentages |
|-----------|--------------|
| Carbone | 4% |
| Silicium | 2.1% |
| Manganèse | 0.76% |
| Phosphore | 0,11% |
| Nickel | 0.03% |
| Cuivre | 0.28% |
| Chrome | 0.13% |
| Fer | 92.35% |
| Cobalt | 0.003% |
| Titane | 0.015 |

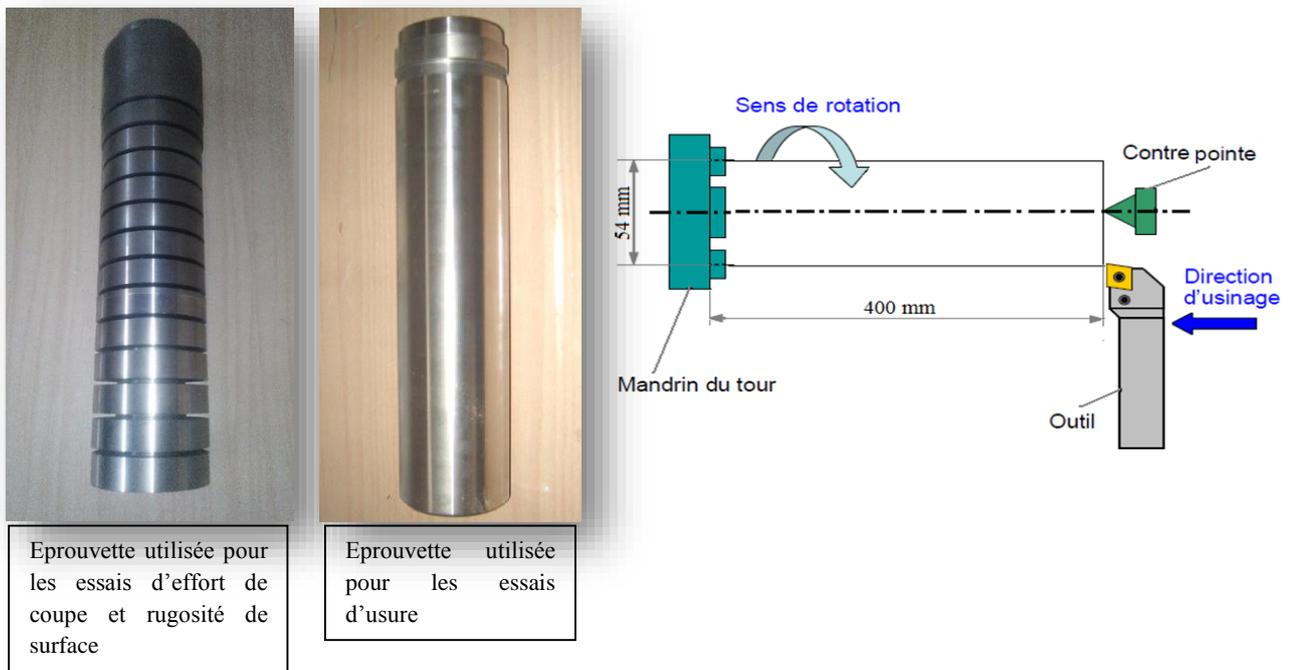


Fig. II.1 Eprouvettes en FGL 250 utilisées.

La machine-outil qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société Tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40 C de puissance sur la broche égale à 6,6KW (Figure II.2). Pour le réglage de la vitesse, nous avons fait des combinaisons entre le diamètre des ébauches et les fréquences de rotation disponibles sur la machine (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min. Les avances disponibles sont : (0.08; 0.10; 0.11; 0.12; 0.14; 0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.24...0.8) mm/tr.



Fig. II.2 Tour parallèle modèle SN 40C

II.2.3. Plaquettes de coupe

Toutes les opérations d'usinage ont été faites par deux plaquettes de coupe en céramique en nitrure de silicium revêtue (CC1690) et non revêtue (CC6090). Ces dernières sont amovibles, de forme carrée et chacune d'elles possède huit arêtes de coupe. Elles se fixent mécaniquement par bride. La figure II.3 illustre les deux plaquettes de coupe utilisées.

a) *Plaquette en céramique revêtue CC1690*

Est un substrat de nitrure de silicium avec un revêtement de nitrure de titane. Les propriétés de CC1690 en font le produit idéal pour les applications d'ébauche et de finition dans la fonte principalement pour la fonte grise. Devrait être utilisé pour des composantes telles que les disques de frein, les composantes de pompe, les vannes industrielles et les pièces automobiles.

b) *Plaquette en céramique non revêtue CC6090*

Est nuance de céramique en nitrure de silicium (Si_3Ni_4) a une résistance à l'usure améliorée et un comportement à la ténacité accrue, surpasse les autres nuances dans les applications de fonte actuellement sur le marché. Recommandé pour l'ébauche à grande vitesse jusqu'à la finition des fontes.

Les informations relatives à ces plaquettes sont mentionnées dans le tableau II.3.

Table II.2 Informations relatives aux plaquettes utilisées

| Matériau de coupe | Désignation | Marque | Géométrie | Composition | Rayon de bec (r_ϵ) |
|-----------------------|-------------|---------|------------------|---|-------------------------------|
| Céramique revêtu | CC1690 | Sandvik | SNGA 12-04-08 | Céramique en Si_3N_4 Revêtement CVD (TiN) | 0,8mm |
| Céramique non revêtue | CC6090 | Sandvik | SNGA 12-04-08 | Céramique pure à base de Si_3N_4 | 0,8mm |

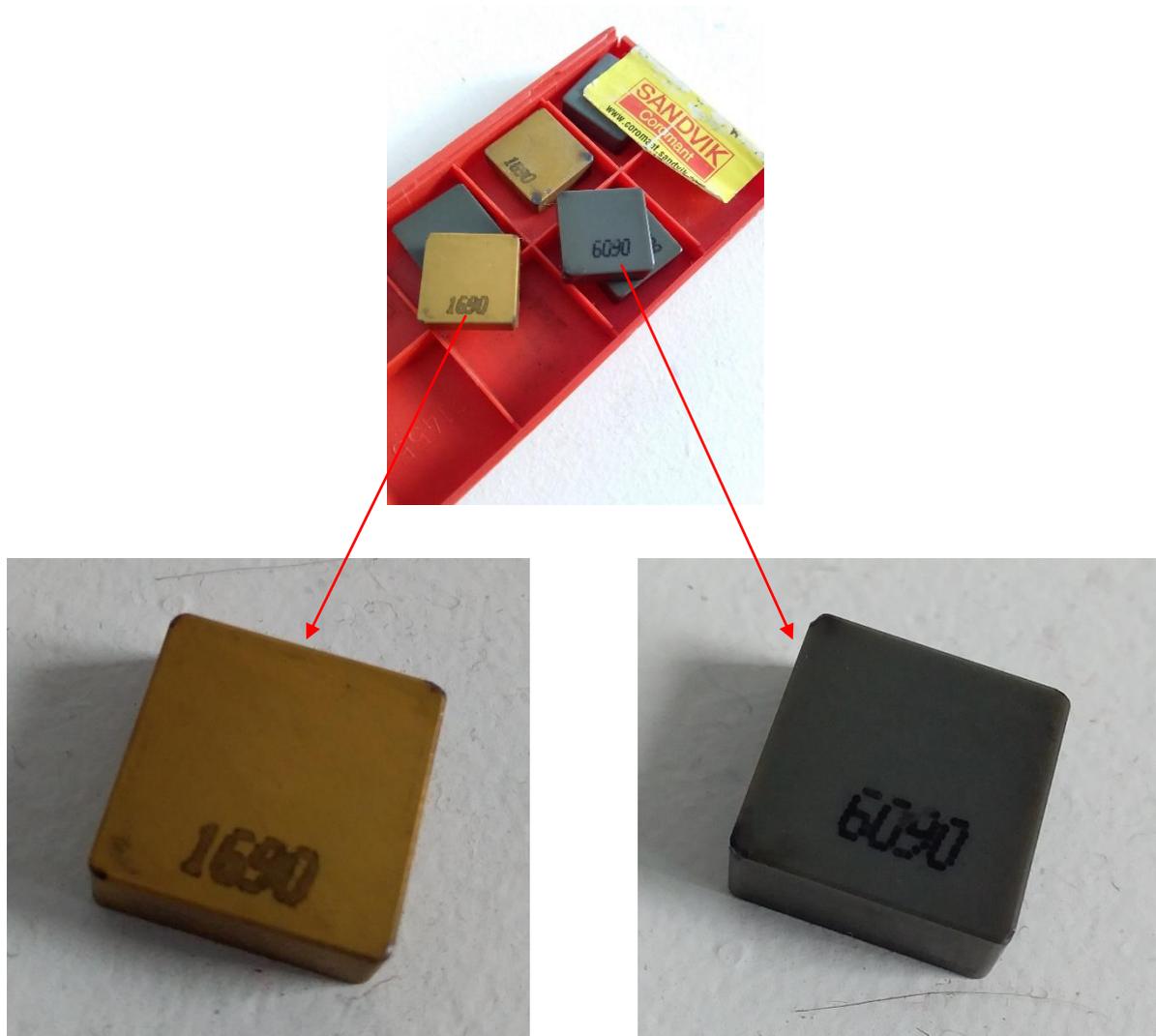


Fig. II.3 Plaquettes de coupe utilisées.

II.2.4. Porte-outils

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte-outil sur lequel se fixent les plaquettes mécaniquement par bride de serrage. Les caractéristiques de ce porte-outil sont indiquées dans le tableau II.4.

Tableau II.3 Caractéristiques de porte-outil utilisé.

| Désignation | Marque | α | γ | χ | λ |
|---------------|---------|----------|----------|--------|-----------|
| CSDNN25x25M12 | Sandvik | 6° | -6° | 45° | -6° |

La figure II.4 et le tableau II.5 présentent les dimensions du porte-outil utilisé.

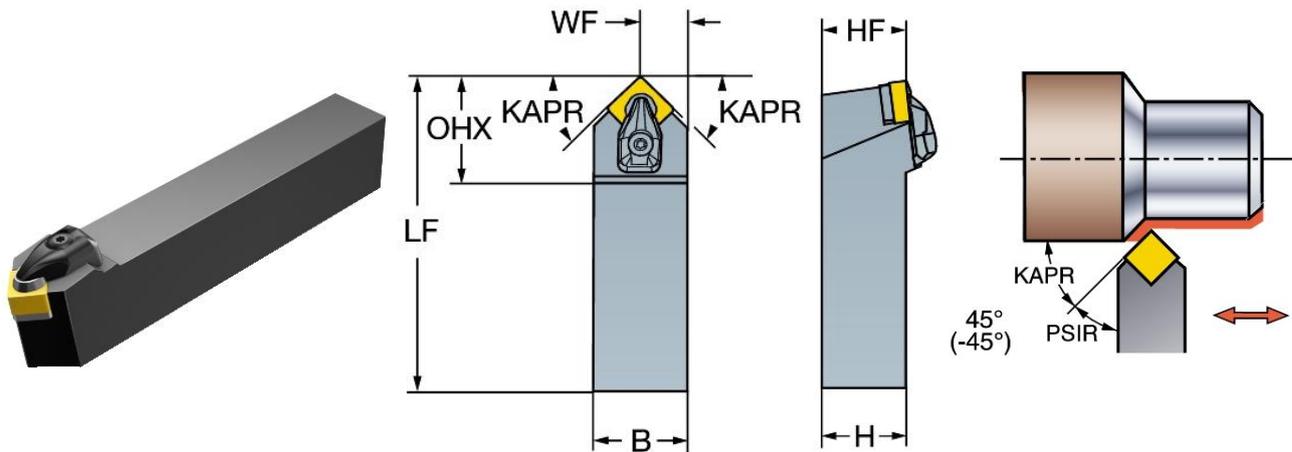


Fig. II.4 Porte-outil utilisé

Table II.4 dimensions du porte-outil utilisé.

| Hauteur de queue (H) | Largeur de queue (B) | Porte à faux maximal (OHX) | Longueur fonctionnelle (LF) | Largeur fonctionnelle (WF) | Hauteur fonctionnelle (HF) |
|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 25 mm | 25 mm | 36.5 mm | 150 mm | 12.8 mm | 25 mm |

II.2.5. Dynamomètre

Pour connaître l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne (dynamomètre KISTLER), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte une plateforme qui se connecte à un amplificateur puis un PC avec un logiciel de traitement

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (Figure II.5).

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques. Ces dernières sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.

Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes :

1. force axiale : F_x (F_a).
2. force radiale : F_y (F_r)

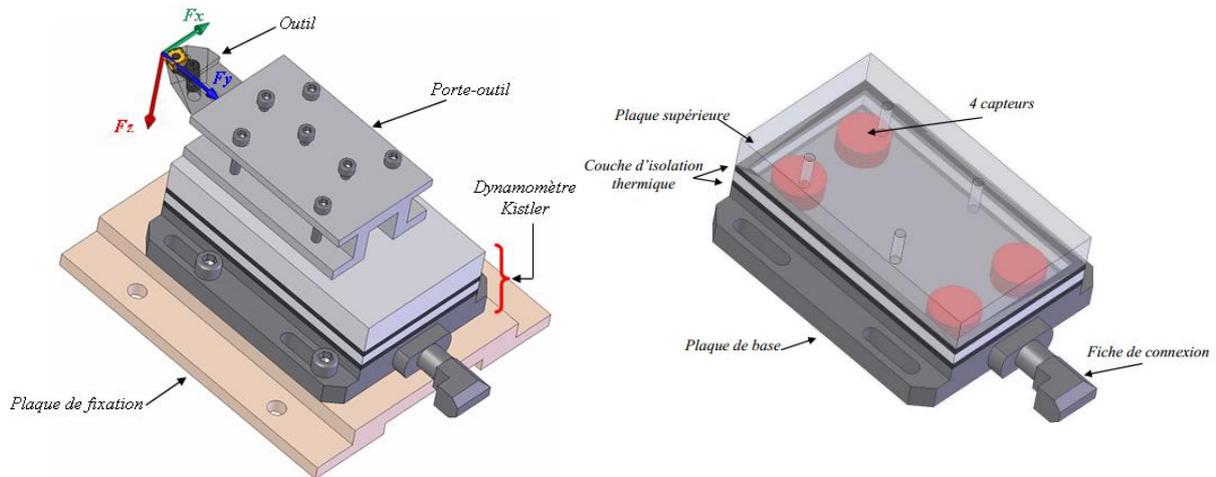
3. force tangentielle : F_z (F_t).

Fig. II.5 Plateforme KISTLER.

Le dynamomètre est à 3 composantes (9257B) : le porte-outil type 9403 vissable est employé pour des outils de tournage avec une section carrée maximale de côté 26mm. Ses principales caractéristiques sont :

- grande rigidité, fréquence propre très élevée ;
- large gamme de mesure ;
- bonne linéarité, sans hystérésis ;
- faible interaction (<1%) ;
- utilisation simple (prêt à l'emploi) ;
- construction compacte ;
- résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre).

La figure II.6 présente la chaîne de mesure des efforts de coupe.



Fig. II.6 Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II.2.6. Mesure de la rugosité de surface

II.2.6.1. Rugosité 2D

Un rugosimètre SurfTest 201 de marque Mitutoyo est utilisé pour la mesure instantanée de trois critères de rugosité 2D (R_a , R_z et R_q), pour chaque condition de coupe. Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur) avec un rayon de $5\ \mu\text{m}$ se déplaçant sur la surface usinée. Plage de mesure des critères de rugosité est de ($0,05$ à $40\ \mu\text{m}$) pour R_a et R_q , de ($0,3$ à $160\ \mu\text{m}$) pour R_z . Dans un souci d'élimination des erreurs de reprise et pour plus de précision, toutes les mesures de rugosité sont obtenues directement sur la même machine et sans démontage de la pièce comme indiqué sur la figure II.7.

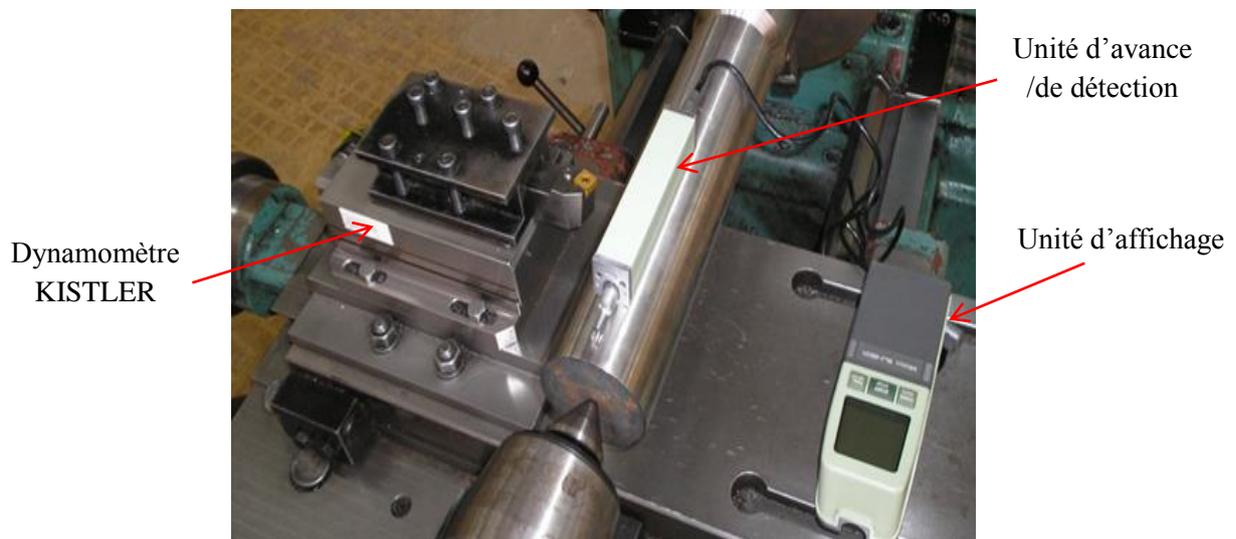


Fig. II.7 Dispositif pour mesure des critères de rugosité de surface.

II.2.6.2. Rugosité 3D

Pour mieux visionner la rugosité des surfaces usinées, nous avons utilisé un appareil de métrologie optique *AltiSurf*® 500. Ce dernier est un système multi-capteurs conçu pour lire finement les surfaces de composants. Il relève des séries de profils qui, assemblés automatiquement, permettent de reconstituer la morphologie de pièces et matériaux afin d'appliquer des paramètres d'analyse en terme de rugosité, de tribologie, de formes et de phénomènes topographiques, de dimensions.

Une station *AltiSurf*® 500 standard est composée (figure II.8):

- D'une base en granite ;
- D'un ensemble inférieur ou base de déplacement : plusieurs tables de déplacement motorisées de haute précision permettant le mouvement de l'échantillon selon les axes X et Y, éventuellement selon un ou plusieurs axes rotatifs ;

- Une plateforme rectangulaire permet de poser l'échantillon à mesurer ;
- d'un ensemble supérieur ou ensemble mesurant : une table de déplacement motorisée de haute précision commande le mouvement de l'ensemble ;
- un support multipositions accueille les différents capteurs AltiProbe optique, inductif, micro force, laser. La modularité de la station AltiSurf permet à tout moment à
- l'utilisateur d'utiliser l'un ou l'autre des capteurs disponibles ;

La chaîne de mesure de la rugosité en 3D est composée de :

a) Boîtier de contrôle Phénix

Le boîtier de contrôle phénix est l'interface entre l'intelligence située dans le PC industriel et l'AltiSurf. Il contient les alimentations et l'électronique de puissance associée aux axes de déplacement, la connectique et la mise en forme des signaux capteurs, et le cas échéant le conditionneur du capteur inductif.

b) Télécommande externe

La télécommande externe est connectée à la station, elle permet de déplacer les axes et de paramétrer une mesure sans se trouver devant l'écran principal. Elle dispose de 2 joysticks, de 5 touches de fonction, d'un écran tactile et d'un bouton d'arrêt d'urgence qui stoppe tout mouvement sur l'ensemble des axes.

c) Logiciel d'acquisition Phénix

Le logiciel Phénix est l'interface utilisateur de l'AltiSurf, il permet de configurer l'ensemble des paramètres, de programmer et d'exécuter des mesures. Il se décompose en une partie graphique et une partie serveur qui dialogue en permanence avec le matériel et fait appel à différentes cartes placées dans le PC industriel.

d) Logiciel d'analyse Altimap

AltiMap est le logiciel utilisé par défaut pour l'analyse des mesures acquises par Phénix, une aide en ligne est disponible directement dans AltiMap.

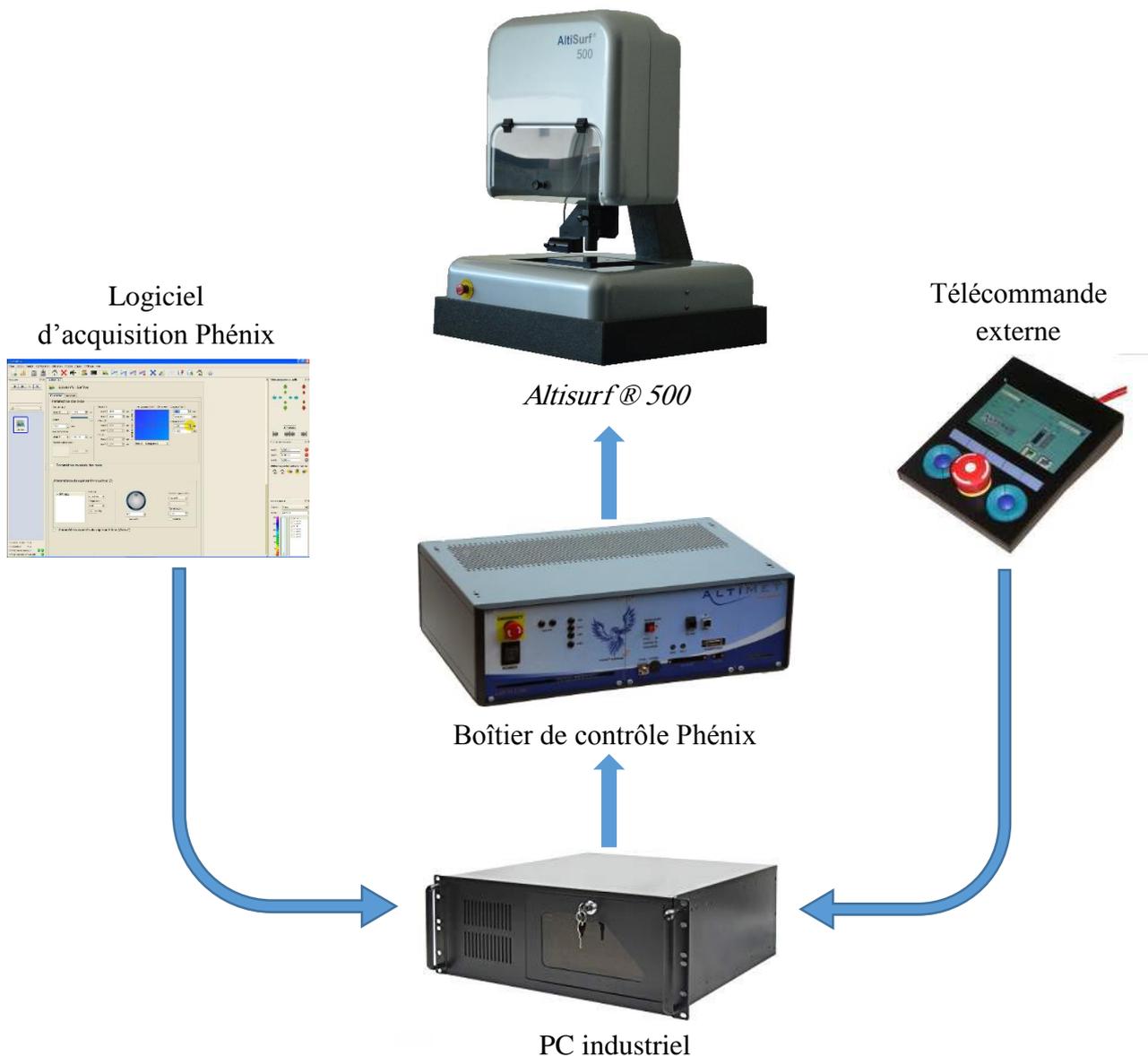


Fig. II.8 Chaîne de mesure de la rugosité en 3D.

II.2.7. Microscope pour la mesure de l'usure

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) est de marque (*Visual Gage 250*), avec un ordinateur équipé d'un logiciel *Visual Gage 2.2.0* (figure II.9). La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure.

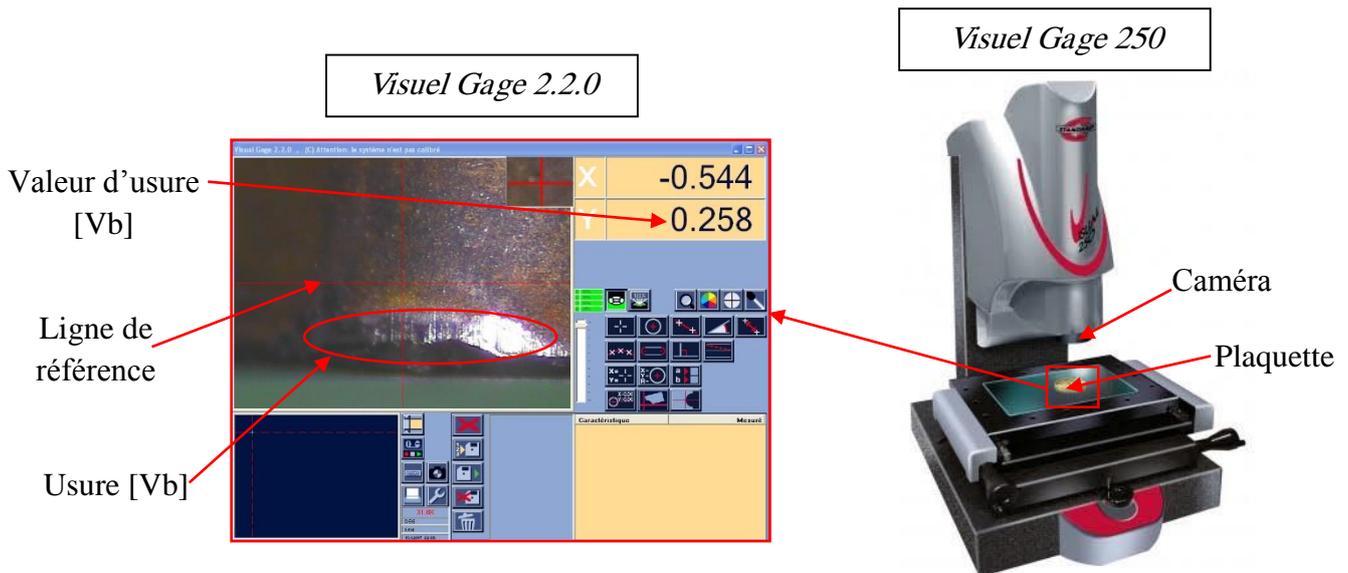


Fig. II.9 Microscope pour la mesure de l'usure (Visual Gage 250).

II.3. Planification des expériences

Afin d'étudier l'effet d'un ou plusieurs facteurs Les essais $X_1, X_2, X_i \dots, X_n$ sur un paramètre (réponse), nous avons réalisé des essais expérimentaux suivant la méthode de planification des expériences. Nous avons appliqué les méthodes suivantes [59], [60] :

- Méthode unifactorielle.
- Méthode multifactorielle (les plans d'expériences).

II.3.1. Méthode unifactorielle

On fait appel à cette méthode pour évaluer l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y . L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné X [$X_i \in \{X_{min}, X_{max}\}$], tout en maintenant tous les autres facteurs constants. Pour chaque $X = X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i , ($i = 1 : N$). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation $Y = f(X)$. Dans ce cas, on varie seulement le facteur X , tout en maintenant les autres facteurs constants. Dans notre cas cette méthode a été appliquée dans le chapitre III pour le but d'analyser la variation : des efforts de coupe, rugosité de surface et usure en dépouille, en fonction de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de passe, le temps d'usinage et le régime d'usinage (lubrifié et sec).

II.3.2. Méthode multifactorielle

Les plans d'expériences sont utiles à toutes les personnes qui entreprennent des recherches scientifiques ou des études industrielles. Ils sont applicables à toutes les disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt

(effort de coupe, rugosité de surface et usure) et des variables d'entrée (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe). Il faut penser aux plans d'expériences. Ils servent, en effet, à optimiser l'organisation des essais expérimentaux pour obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences et la meilleure précision possible sur les réponses calculées avec le modèle. Donc le but de cette méthode est l'optimisation du choix des essais et de celui de leur enchaînement au cours de l'expérimentation. Cette méthode offre de nombreux avantages parmi lesquels :

- diminution du nombre des essais, donc du coût des essais ;
- détection des interactions entre les facteurs ;
- détection des conditions de coupe optimales ;
- meilleure précision des résultats ;
- modélisation, prédiction et optimisation des résultats.

La différence capitale entre la méthode d'un facteur à la fois et la méthode des plans d'expérience tient au fait qu'on fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience. Le diagramme ci-dessous (Figure II.10) résume de manière plus simple la méthode des plans d'expériences :

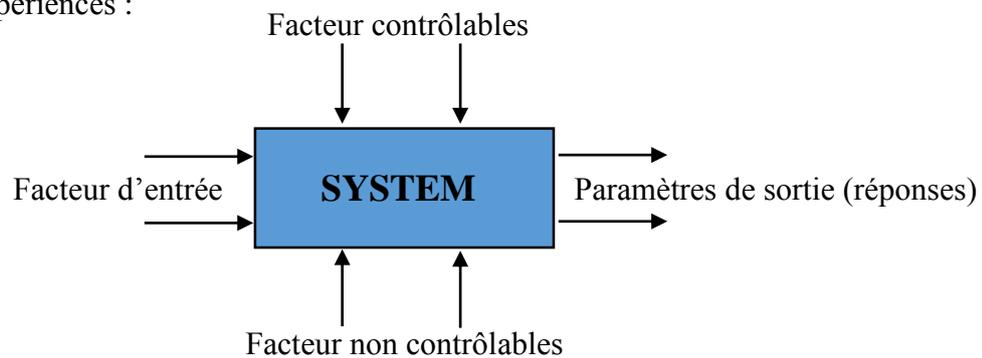


Fig. II.10 Méthode des plans d'expériences.

II3.2.1. Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot *facteur*. Ce dernier est un paramètre que l'on peut varier d'une expérience à une autre, et qui influence le résultat final (réponse). Le nombre de facteurs entrant en jeu est, couramment, supérieur à celui des réponses. Deux types de facteurs sont distingués :

- **Facteur quantitatif** : tout facteur mesurable, lorsqu'ils sont naturellement exprimés à l'aide de valeurs numériques (pression, température, durée, etc...)

- **Facteur qualitatif** : tout facteur non mesurable tel que (couleur, type de matériau, sexe, etc...)

La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure II.11). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

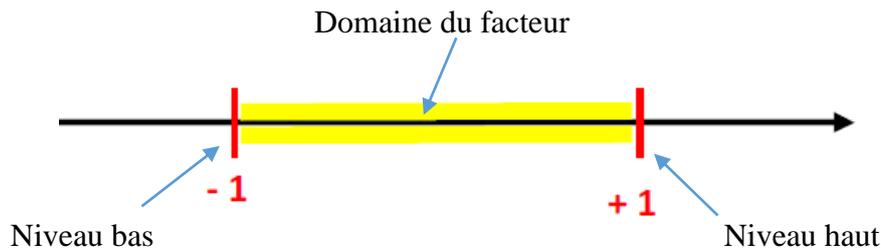


Fig. II.11 Domaine de variation du facteur [48].

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$ [48].

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

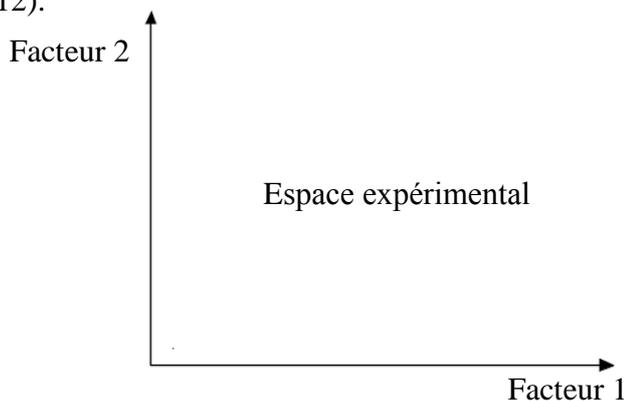


Fig. II.12 Définition de l'espace expérimental [48].

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.13). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

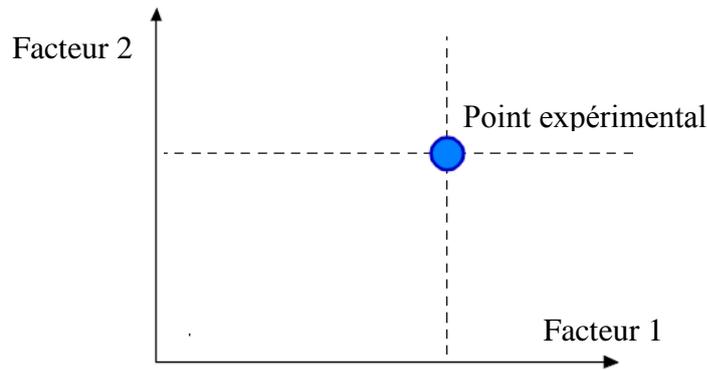


Fig. II.13 Définition du point expérimental dans l'espace expérimental [48].

Le regroupement des domaines des facteurs définit le domaine d'étude. Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure II.14) [48].

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

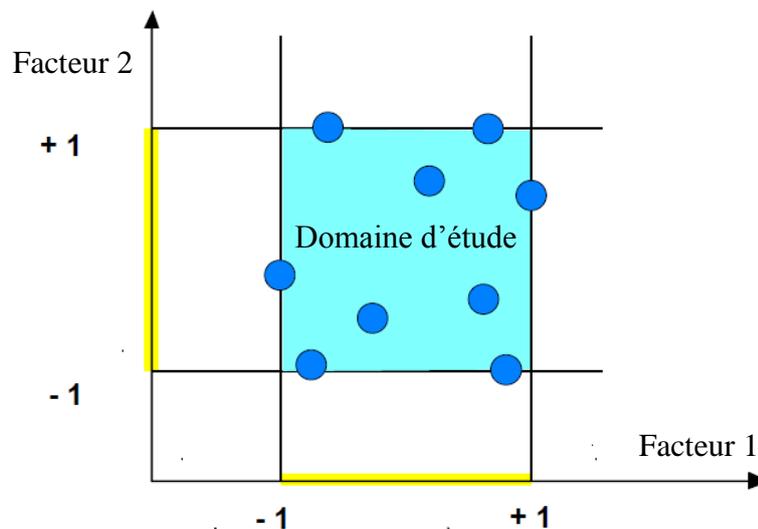


Fig. II.14 Définition du domaine d'étude [48].

II.3.2.2. Notion de surface de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux

dimensions pour les facteurs. A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure II.15).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences [48].

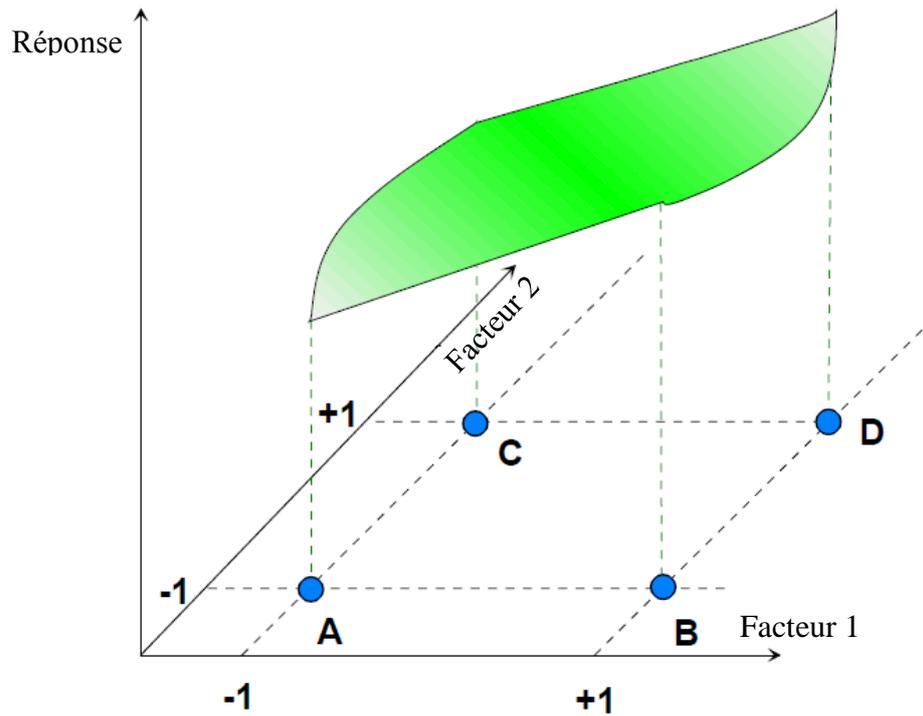


Fig. II.15 Définition de la surface de réponse [48].

Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec l'utilisation de la méthodologie de surface de réponse (MSR) qui comprend six étapes [1]:

- 1) définir les variables d'entrées indépendantes et les réponses de sorties désirées;
- 2) adopter un plan de conception expérimentale;
- 3) effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique de la Méthodologie de surface de réponse (MSR);
- 4) analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse;
- 5) déterminer la situation du modèle quadratique de MSR et de décider si le modèle de MSR a besoin des variables de dépistage ou non et enfin;
- 6) optimisation des paramètres de coupe.

II.3.2.3. Modélisation mathématique de la réponse

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Y , dite variable de réponse (Fz , Ra , Vb et Pc), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1 ; X_2 ; ... ; X_k , d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

$$\bar{Y} = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad \text{II.1}$$

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

Le coefficient de détermination R^2 est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquées par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression. Le coefficient R^2 peut s'interpréter comme le quotient des variances expliqué par la variance des réponses mesurées, d'où R^2 varie entre 0 et 1. Une valeur de R^2 proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif. Le coefficient de détermination de la régression R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (II.2).

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

Avec y_i : valeur de la réponse calculée à la i^{eme} expérience.

\bar{y}_i : valeur mesurée à la i^{eme} expérience.

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

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse des variances (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. ANOVA permet de tracer les surfaces de

réponse, étudier et classifier l'influence et l'interaction simultanées des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés.

Tous les tableaux ANOVA relatifs aux paramètres technologiques étudiés dans cette thèse montrent les degrés de liberté (df_i), la somme des carrés (SC), les carrés moyens (MC), la probabilité (Prob.) et la contribution en pourcentage ($Cont.\%$) de chaque facteur et des différentes interactions. Le 'F-value' du modèle est calculé à partir de la moyenne de la somme des carrés du modèle divisée par la moyenne de la somme des carrés des résidus, les formules de SC , MC et $Cont.\%$ sont présentées par les équations (2, 3 et 4).

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.3})$$

Où, \bar{y} la moyenne des réponses, \bar{y}_i la réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son i^{eme} niveau, N nombre total d'expériences, N_{nf} niveau de chaque facteur f .

$$MC_i = \frac{SC_i}{df_i} \quad (\text{II.4})$$

Avec df_i est le degré de liberté de chaque facteur.

$$Cont.\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (\text{II.5})$$

Où SC_f la somme carré du facteur et SC_T c'est la somme carré totale.

II.3.2.4. Choix du type de plan

Dans notre cas, nous avons réalisé deux plans d'expérience, plan de Taguchi et un plan factoriel :

- Dans un premier temps on a élaboré un plan factoriel complet de 27 essais permettant de caractériser les influences des paramètres par un modèle quadratique et de trouver les conditions de coupe optimales ; on utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR) et les réseaux de neurones (ANN).
- Dans un second temps, nous avons utilisé un plan de Taguchi réduit L_{18} de 18 essais avec 5 facteurs d'entrée (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe, distance usinée et le type de matériaux) et 3 paramètres de sortie (effort de coupe tangentielle F_z , rugosité de surface Ra et usure en dépouille Vb).

a) Les plans factoriels complets

Un plan factoriel complet est un plan pour lequel toutes les combinaisons possibles aux limites du domaine d'étude auront été réalisées : c'est le nombre maximal d'essais pour un plan d'expériences factoriel. Le nombre d'essais N se calcule d'après la formule suivante : $N = P^k$ où k est le nombre de facteurs. Ces plans permettent l'étude de k facteurs à raison de P niveaux par facteur. Ils renferment toutes les combinaisons possibles des k facteurs à leurs P niveaux. Dans notre cas nous avons utilisé un plan factoriel complet de 27 essais ($N = 3^3$). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans les tableaux II.6 et II.7.

Table.II.5 Niveaux des différents paramètres de coupe

| Niveaux | V_c (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) |
|---------|---------------|-------------|-----------|
| 1 | 260 | 0.08 | 0.25 |
| 2 | 370 | 0.14 | 0.5 |
| 3 | 530 | 0.2 | 0.75 |

Table.II.6 Matrice de planification pour un plan factoriel complet de 27 essais.

| N° | Facteurs | | | | | |
|----|-------------------|----|----|-----------------|-------------|---------------|
| | Valeurs codifiées | | | Valeurs réelles | | |
| | A | B | C | ap (mm) | f (mm/tr) | V_c (m/min) |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 0.25 | 0.08 | 260 |
| 2 | -1 | -1 | 0 | 0.25 | 0.08 | 370 |
| 3 | -1 | -1 | 1 | 0.25 | 0.08 | 530 |
| 4 | -1 | 0 | -1 | 0.25 | 0.14 | 260 |
| 5 | -1 | 0 | 0 | 0.25 | 0.14 | 370 |
| 6 | -1 | 0 | 1 | 0.25 | 0.14 | 530 |
| 7 | -1 | 1 | -1 | 0.25 | 0.2 | 260 |
| 8 | -1 | 1 | 0 | 0.25 | 0.2 | 370 |
| 9 | -1 | 1 | 1 | 0.25 | 0.2 | 530 |
| 10 | 0 | -1 | -1 | 0.5 | 0.08 | 260 |
| 11 | 0 | -1 | 0 | 0.5 | 0.08 | 370 |
| 12 | 0 | -1 | 1 | 0.5 | 0.08 | 530 |
| 13 | 0 | 0 | -1 | 0.5 | 0.14 | 260 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.14 | 370 |
| 15 | 0 | 0 | 1 | 0.5 | 0.14 | 530 |
| 16 | 0 | 1 | -1 | 0.5 | 0.2 | 260 |
| 17 | 0 | 1 | 0 | 0.5 | 0.2 | 370 |
| 18 | 0 | 1 | 1 | 0.5 | 0.2 | 530 |
| 19 | 1 | -1 | -1 | 0.75 | 0.08 | 260 |
| 20 | 1 | -1 | 0 | 0.75 | 0.08 | 370 |
| 21 | 1 | -1 | 1 | 0.75 | 0.08 | 530 |
| 22 | 1 | 0 | -1 | 0.75 | 0.14 | 260 |
| 23 | 1 | 0 | 0 | 0.75 | 0.14 | 370 |
| 24 | 1 | 0 | 1 | 0.75 | 0.14 | 530 |
| 25 | 1 | 1 | -1 | 0.75 | 0.2 | 260 |
| 26 | 1 | 1 | 0 | 0.75 | 0.2 | 370 |
| 27 | 1 | 1 | 1 | 0.75 | 0.2 | 530 |

b) Méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi vient pour enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires [1]. Elle a pour but de simplifier le protocole expérimental afin de mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. Elle permet d'obtenir des résultats en utilisant moins d'essais expérimentaux que les autres méthodes. Taguchi a montré que si ces essais expérimentaux sont choisis de manière appropriée, il n'est pas nécessaire de réaliser des expériences factorielles complètes. La méthode de Taguchi est basée sur les tableaux orthogonaux, qui montrent que les niveaux de facteur doivent être choisis chaque fois pour faire le moins de passages possibles [49]. L'idée principale est de se concentrer uniquement sur les quelques expériences qui sont essentielles pour l'analyse. Les résultats obtenus ne peuvent pas être optimaux, mais lorsque ces résultats sont mis en œuvre, le procédé est amélioré. Par conséquent, moins d'argent et de temps sont dépensés lorsque la méthode de Taguchi est employée.

Démarche de la méthode Taguchi

La démarche de Taguchi se présente en six phases [50]:

- **Phase 1** : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.
- **Phase 2** : sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif. Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.
- **Phase 3** : construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans que l'effet influence sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais.
- **Phase 4** : réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignnant les réponses dans un tableau.
- **Phase 5** : analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).
- **Phase 6** : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.).

Choix d'une table de Taguchi

Afin de choisir une table existante, il faut calculer le nombre d'essais minimum à effectuer. Ce calcul est basé sur la notion de degré de liberté (ddl) qui est défini mathématiquement comme suit :

- le ddl d'un facteur est égal au nombre de ces niveaux moins un ;
- le ddl d'une interaction est égal au produit des ddl des facteurs la composant ;
- le ddl d'un modèle est égal à la somme des ddl des facteurs et des interactions ;
- le ddl d'un plan est égal au nombre d'essais moins un.

Il s'agit alors de choisir la plus petite matrice d'expériences compatible avec le modèle choisi, c'est-à-dire le nombre de ddl du plan doit être supérieur ou égal à celui du modèle. Le tableau de Taguchi est désigné par trois symboles. Dans notre cas, la matrice (Tableau II-8) $L_{18} (1^2 \times 4^3)$ comporte 18 essais pour étudier un facteur à deux niveaux (type de matériau de coupe) et 4 facteurs à trois niveaux (vitesse de coupe V_c , avance par tour f , profondeur de passe ap et distance usinée).

Table.II.7 Matrice de planification de Taguchi $L_{18} (1^2 \times 4^3)$

| N° | Facteurs réelles | | | | |
|----|--------------------------------|----------|------------|--------------|----------------------|
| | Matériau | $ap(mm)$ | $f(mm/tr)$ | $V_c(m/min)$ | Distance usinée (mm) |
| | Valeurs codifiées des facteurs | | | | |
| | A | B | C | E | F |
| 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 4 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| 6 | -1 | 0 | -1 | -1 | 1 |
| 7 | -1 | -1 | 1 | 0 | 1 |
| 8 | -1 | -1 | 0 | -1 | 0 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 11 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 12 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 |
| 13 | 1 | 0 | 1 | 0 | -1 |
| 14 | 1 | 0 | 0 | -1 | 1 |
| 15 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 |
| 16 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0 |
| 17 | 1 | -1 | 0 | 1 | -1 |
| 18 | 1 | -1 | -1 | 0 | 1 |

Les facteurs d'entrée choisis selon le plan de Taguchi L_{18} , ainsi que leurs niveaux sont présentés dans le tableau II.9.

Table.II.8 niveaux des différents paramètres de coupe

| Niveaux | Matériau | $ap(mm)$ | $f(mm/tr)$ | $Vc(m/min)$ | Distance usinée (mm) |
|---------|----------|----------|------------|-------------|----------------------|
| 1 | CC6090 | 0.2 | 0.08 | 270 | 300 |
| 2 | CC1690 | 0.4 | 0.14 | 370 | 600 |
| 3 | - | 0.6 | 0.2 | 530 | 900 |

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé lors de la réalisation de nos travaux (machine-outil, éprouvettes, plaquette de coupe, porte-outil, dynamomètre et rugosimètre 2D et 3D). Aussi la planification des expériences et les conditions de coupe ont été aussi établies.

Chapitre III
Usinabilité de la fonte
FGL 250

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais paramétrique sur l'étude de l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe et temps d'usinage) sur les efforts de coupe, rugosité de surface et usure en dépouille (V_b) lors de tournage (chariotage) de la fonte FGL 250 par deux céramique en nitrure de silicium, revêtue et non revêtue. Aussi, une analyse topographique de surface 2D et 3D basé sur la courbe d'Abbott- Firestone a été établi.

III.2. Analyse uni factorielle

III.2.1. Influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe

a) Influence de la vitesse de coupes

La figure III.1 montre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les deux matériaux de coupe testés. La figure présente une décroissance des efforts de coupe en fonction de l'augmentation de la vitesse de coupe. On peut diviser cette figure en deux parties, dans la zone I et pour la céramique non revêtue CC6090, l'augmentation de la vitesse de coupe de 200 à 395 m/min provoque une diminution des efforts de coupe de 11.81 à 9.39 N pour F_x , de 41.23 à 31.08 N pour F_y et de 34.68 à 29.42 N pour F_z , avec un pourcentage de (20.5, 24.6 et 15.2) % successivement. Pour la céramique revêtue, une élévation de la vitesse de coupe de 200 à 395 m/min , conduit à une diminution des efforts de coupe de 11.34 à 9.39 N pour F_x , de 33.52 à 31.48 N pour F_y et de 28.7 à 27.83 pour F_z , ce qui représente un taux de diminution de (17.2, 6 et 3) % successivement. Cette réduction peut s'expliquer par les hautes températures générées pendant la coupe, à l'interface pièce-outil-copeau, qui à leur tour entraînent un adoucissement plastique important du matériau usiné et ainsi une diminution des efforts de coupe. Dans la deuxième, les efforts de coupe se stabilisent légèrement à cause de l'élévation de la vitesse de coupe de 395 à 560 m/min traduisant une stabilité relative du système usinant. Des résultats semblables ont été rapportés par H. Aouici et al [9]

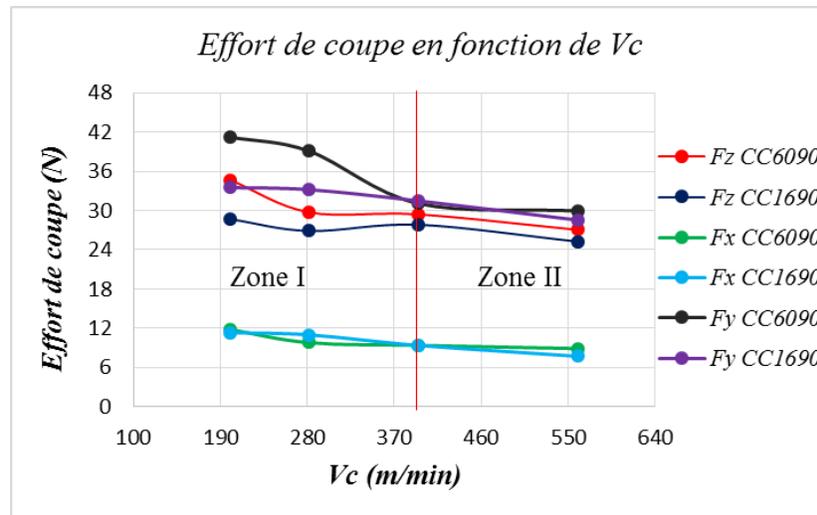


Fig. III.1 Influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe.

b) Influence de la profondeur de passe

La figure III.2 exhibe l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe à $V_c=400$ m/min et $f=0.08$ mm/tr, On remarque que toutes les courbes prennent une allure ascendante ce qui signifie que la profondeur de passe a un effet important sur les efforts de coupe. Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de la profondeur de passe sur les efforts de coupe sont comme suit : pour une augmentation de la profondeur de passe de 0.3 à 1.2 mm, on a enregistré une élévation de 13.52 à 64.61 N pour F_x , de 48.91 à 112.74 N pour F_y et de 38.8 à 130.16 N pour F_z , avec un pourcentage de (377.88, 130.5 et 235.5) % successivement pour la nuance non revêtue (CC6090). Pour la nuance revêtue CC1690, cette augmentation de la profondeur de passe provoque un accroissement des trois composantes d'effort de coupe, de 8.67 à 60.89 N pour F_x , de 32.26 à 92.69 N pour F_y et de 22.32 à 110.25 N pour F_z avec un taux de (602.3, 187.3 et 394) %. Avec l'augmentation de la profondeur de passe, l'épaisseur du copeau devient importante ce qui cause une croissance de volume du métal déformé et cela nécessite d'énormes efforts de coupe pour tailler le copeau. Des résultats similaires ont été observés par M. A. Yallese [51].

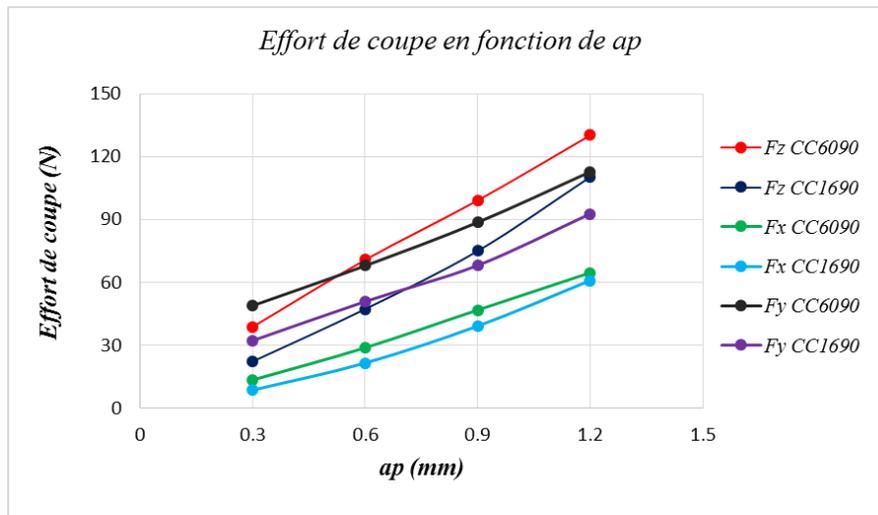


Fig. III.2 Influence de la profondeur de passe sur les efforts de coupe.

c) Influence de la vitesse d'avance

La figure III.3 illustre l'influence de l'avance par tour sur les trois composantes de l'effort de coupe et cela pour les deux matériaux de coupe testés. L'élévation de l'avance de 0.09 à 0.22 mm/tr, conduit à une élévation des efforts de coupe pour CC6090 de (61.55, 90 et 129.7) %, respectivement pour (F_x , F_y et F_z). Pour CC1690, les trois composantes F_x , F_y et F_z accroissent de (59, 99 et 127.84) %. Cette augmentation des efforts de coupe due à l'augmentation de la section du copeau cisailé et par conséquent la force demandée pour l'enlèvement de la matière s'accroît [52].

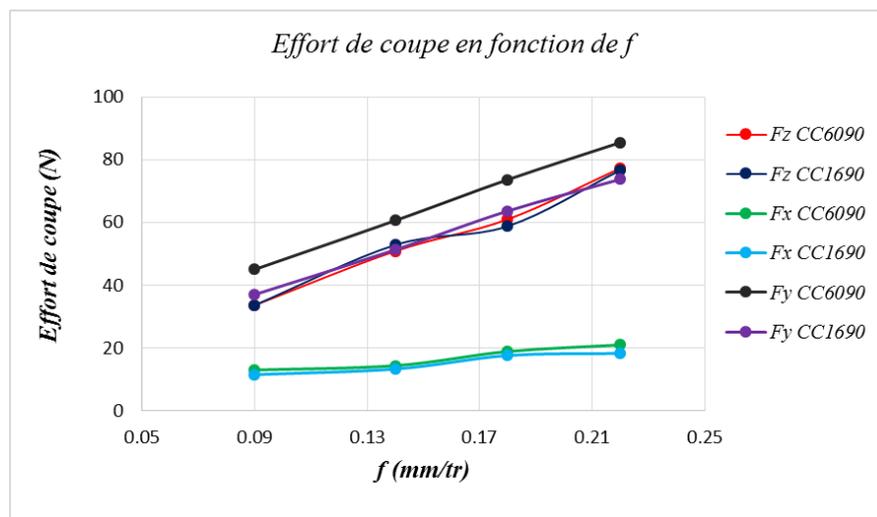


Fig. III.3 Influence de la vitesse d'avance sur les efforts de coupe.

d) Influence de la lubrification

Afin d'examiner l'effet de la lubrification sur les trois composantes de l'effort de coupe, nous avons réalisés des essais avec un régime lubrifiés et à sec pour les deux plaquettes. La figure III.4

illustre les résultats de cette expérience. Il est à remarquer que la lubrification permet une réduction des trois composantes de coupe (F_x , F_y et F_z) de (4, 3.6 et 1) % et de (2.6, 5 et 2) % pour CC6090 et CC1690 successivement. L'utilisation du liquide lubrifiant en processus de coupe permet de diminuer le coefficient de frottement, d'évacuer les chaleurs et d'empêcher la formation d'arête rapportée, toutes ces raisons font que les efforts de coupe diminuent sous l'action des lubrifiants (jusqu'à 25%). M. Nouioua et al [53].

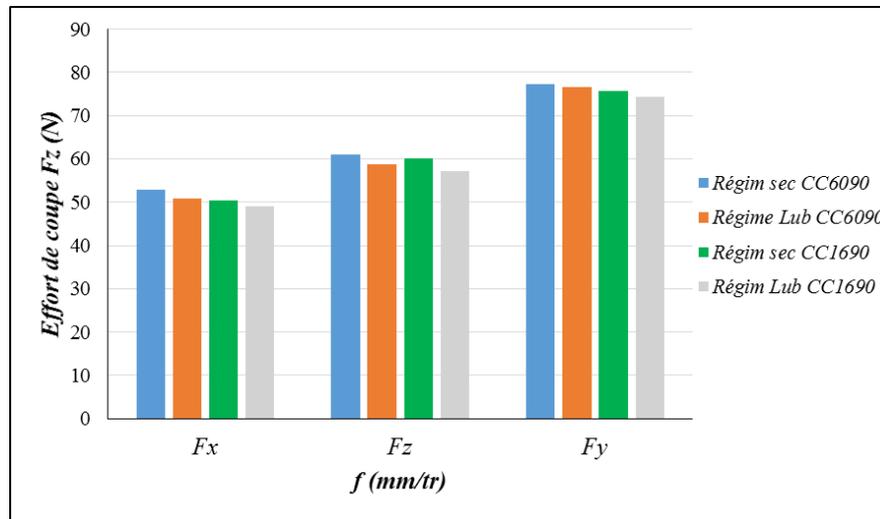


Fig. III.4 Influence de la lubrification sur les efforts de coupe.

En général, on a remarqué que l'effort radial est prépondérant par rapport aux deux autres composantes (F_x et F_z) et cela pour les deux plaquettes de coupe (CC6090 et CC1690) et toutes les conditions de coupe testées. D'autre part, en comparant les valeurs des efforts de coupe obtenues par les deux matériaux de coupe utilisés, on remarque clairement que la céramique revêtue CC1690 exhibe des efforts de coupe moins importants que la céramique non revêtue CC6090.

III.2.2. Influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface

a) Influence de la vitesse de coupe

La figure III.5 (a et b) illustre l'évolution des deux critères de rugosité (R_a et R_z) en fonction de la vitesse de coupe à $f=0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.3 \text{ mm}$ pour les deux plaquettes de coupe testées (CC6090 et CC1690). L'analyse de ces courbes montre que pendant l'usinage, la rugosité de la fonte (FGL250) diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Dans la zone I, l'augmentation de la vitesse de coupe améliore la qualité de la surface usinée. Pour des vitesses allant de 200 à 395

m/min , les critères de rugosité Ra et Rz chutent successivement de (48.9 et 44.79) % et de (53.73 et 53.60) % pour CC6090 et CC1690 respectivement. Dans la deuxième zone ($395 \leq Vc \leq 560$) m/min , la rugosité se stabilise légèrement à cause d'une stabilité relative du système usinant pour les plaquettes revêtues et non revêtues. On remarque aussi que les résultats de la plaquette revêtue CC1690 sont meilleure par rapport à la plaquette CC6090.

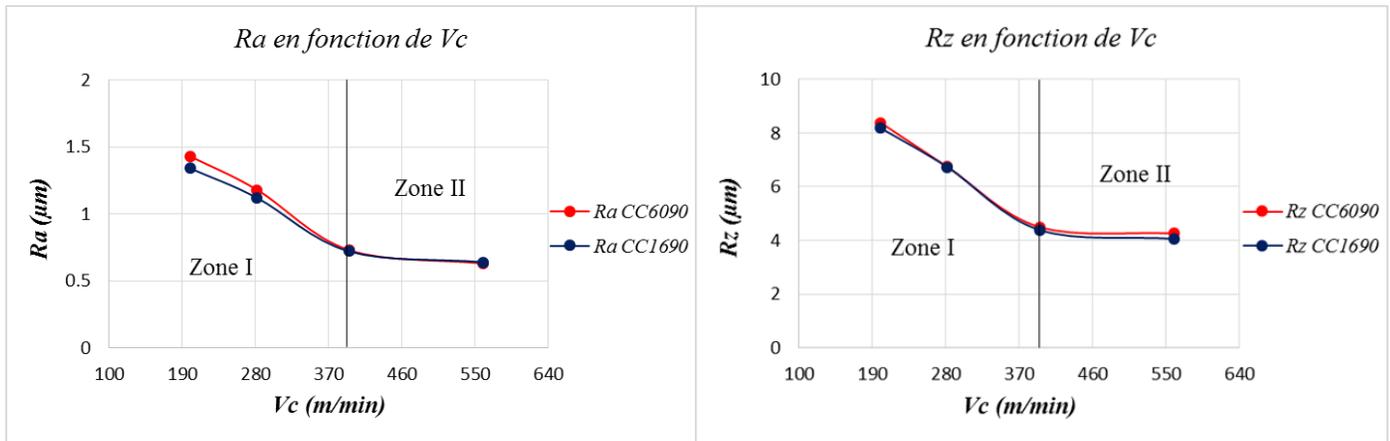


Fig. III.5 Influence de la vitesse de coupe sur les critères de rugosité Ra et Rz .

b) Influence de l'avance par tour

Les résultats obtenus sur la figure III.6 (a et b) illustrent l'évolution des deux critères de la rugosité de surface en fonction de l'avance pour les deux plaquettes. Cette figure montre que toutes les courbes de rugosité ont une allure ascendante, cette synthèse confirme que l'avance par tour a une énorme influence sur les critères de rugosité étudiés, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux causés par le mouvement d'avance et la forme de l'outil et du mouvement de rotation de la pièce. Ces sillons sont plus larges que l'avance est élevée [54]. En pratique, les conséquences de l'influence de l'avance sur la rugosité sont comme suit : l'augmentation de l'avance de (0,09 à 0,22) mm/tr , conduit à une augmentation des critères de rugosité Ra et Rz successivement de (227.63 et 111) % et de (341.17 et 275.89) % pour CC6090 et CC1690 respectivement.

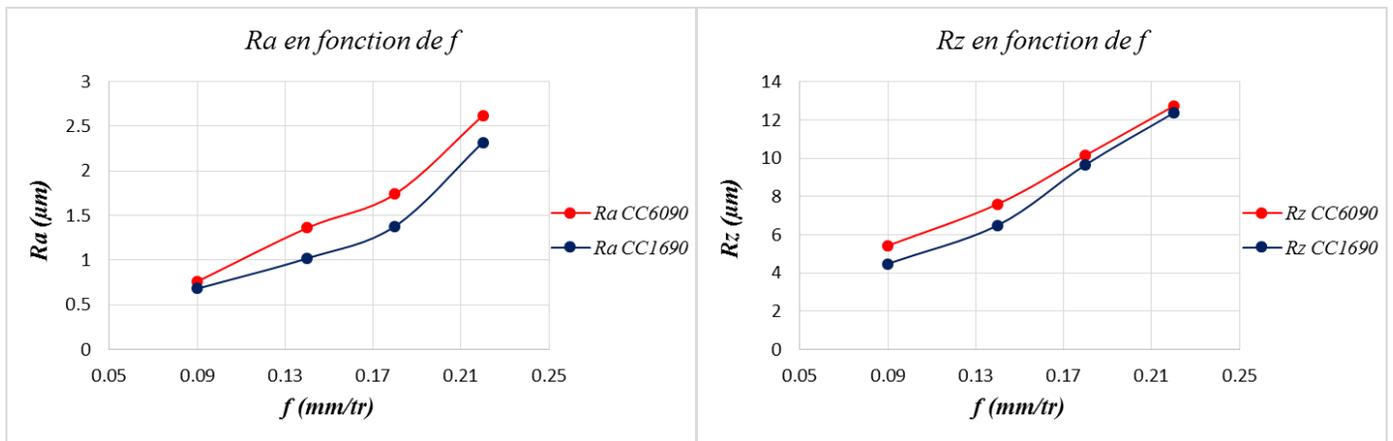


Fig. III.6 Influence de l'avance par tour sur les critères de rugosité Ra et Rz .

c) Influence de la profondeur de passe

La figure III.7 (a et b) montre l'évolution des critères de rugosité (Ra et Rz) en fonction de la profondeur de passe à $V_c = 400 \text{ m/min}$ et $f = 0.08 \text{ mm/tr}$. L'analyse des résultats montre que ce paramètre a un effet très faible par rapport à celui de l'avance par tour et la vitesse de coupe. Ceci est dû à l'augmentation de la largeur de contact entre l'outil et la pièce [10], ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe. Des résultats semblables ont été rapportés par Aouici et al [55] lors du tournage dur de l'acier X200Cr6 traité à (63HRC) en utilisant l'outil en céramique mixte revêtu CC6050.

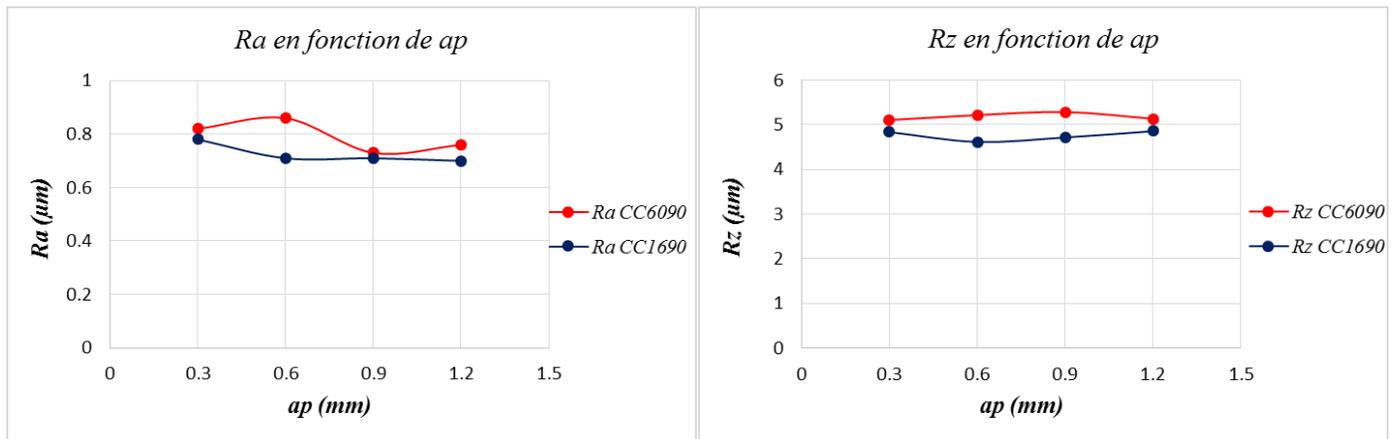


Fig. III.7 Influence de la profondeur de passe sur les critères de rugosité Ra et Rz .

d) Influence de lubrification

Afin d'étudier l'effet de la lubrification la rugosité de surface, nous avons réalisés des essais expérimentaux à régime sec et en utilisant un liquide lubrifiant pour les deux plaquettes. La figure

III.8 (a et b) illustre l'évolution des deux critères de rugosité Ra et Rz en fonction de l'avance pour les deux cas avec et sans lubrification. Les résultats confirment que l'augmentation de l'avance conduit à une augmentation des critères de rugosité. D'autre part il est à remarquer que la lubrification permet une amélioration considérable des deux critères de rugosité (Ra et Rz). Cela est expliqué par la diminution des frottements entre la pièce et l'outil de coupe, des résultats semblables trouvés par M.Nouioua et al [53].

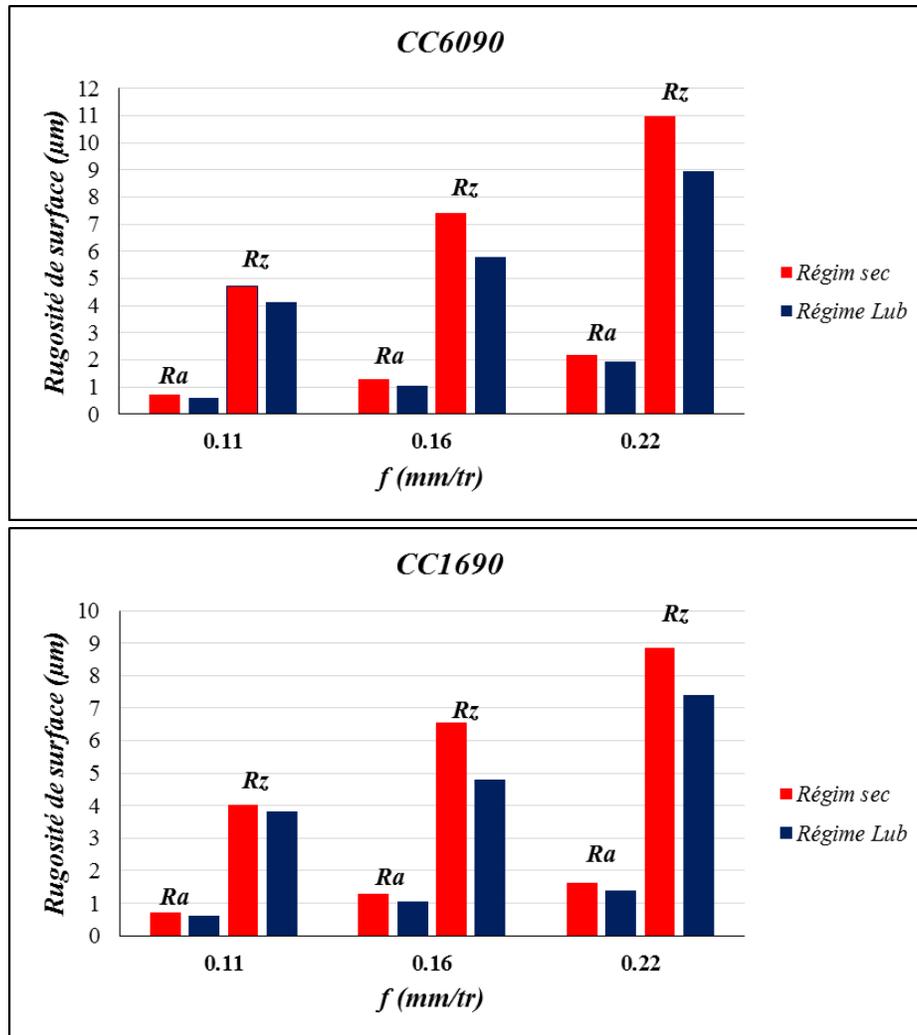


Fig. III.8 Influence de la lubrification sur les critères de rugosité Ra et Rz

III.3. Evolution de l'usure [Vb] en fonction de temps d'usinage

La figure III.9 illustre l'évolution de l'usure en dépouille (Vb) en fonction de temps d'usinage à $Vc = 400$ m/min, $f = 0.08$ mm/rev et $ap = 0.3$ mm pour les deux céramiques testées (CC1690 et CC6090). L'analyse des courbes montre que l'augmentation de temps d'usinage induit une

augmentation de l'usure (V_b) pour les deux céramiques. Au fur et à mesure que l'outil travaille, la température à l'interface outil/pièce et outil/copeau s'élève et conduit à l'accélération des mécanismes d'usure par abrasion et par diffusion [56, 57]. L'usure admissible [V_b], est représentée par une droite horizontale, l'intersection de cette droite avec la courbe d'usure conduit à la détermination de la tenue des deux céramiques. Au-delà de [V_b]=0.3 mm, l'usure augmente brusquement et l'outil perd ses qualités de coupe en affectant la rugosité et la précision dimensionnelle [51]. Par conséquent, L'outil en céramique revêtue atteint la valeur admissible de l'usure [V_b]=0.3 mm après 23.3 min d'usinage, tandis que l'outil en céramique non revêtue atteint cette valeur après 16.6 min d'usinage. Le ratio $Tenue_{CC1690}/Tenue_{CC6090} = 1.4$. La supériorité de la céramique revêtue (CC1690) réside dans la couche de revêtement (TiN), Ce revêtement joue un rôle d'une barrière qui permet d'améliorer la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi

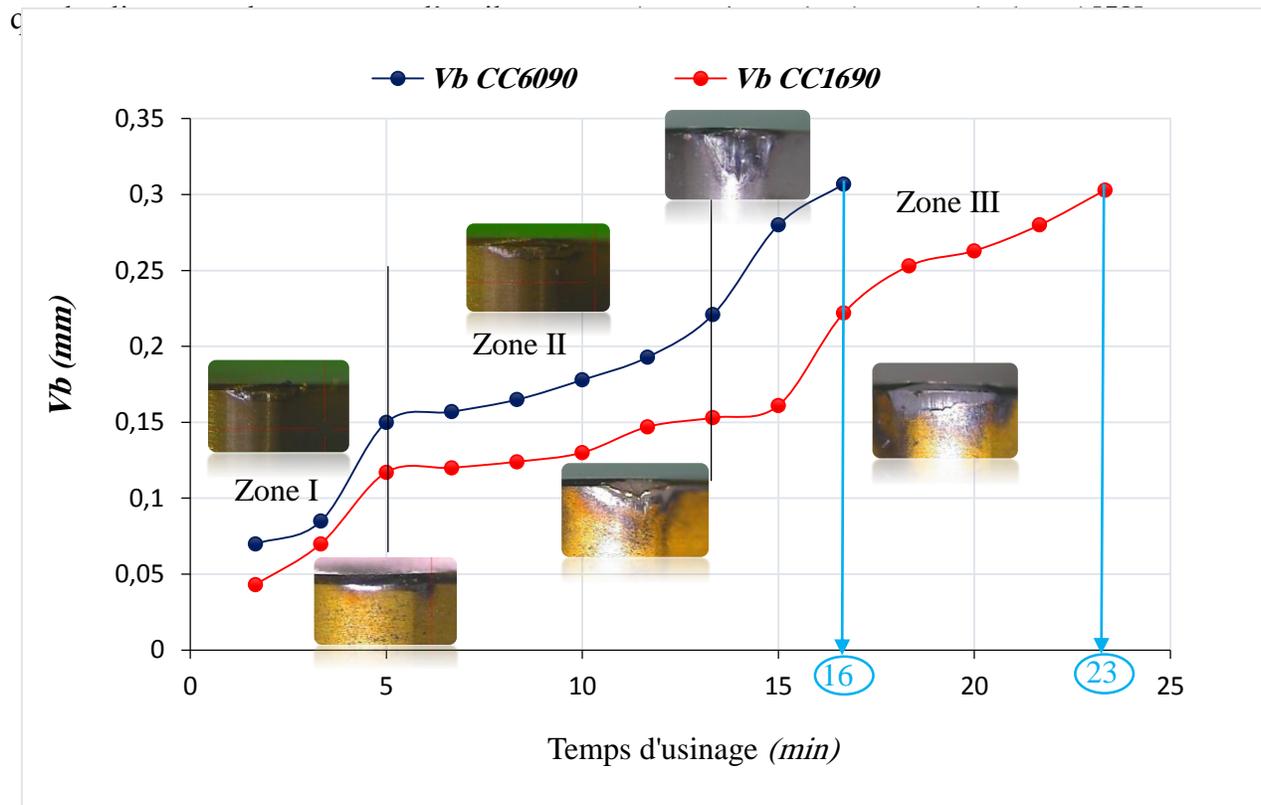


Fig. III.9 Evolution de l'usure en dépouille des plaquettes CC6090 et CC1690 en fonction de temps d'usinage.

III.4. Influence de temps d'usinage sur les efforts de coupe et les critères de rugosité de surface

Les figures III.10 et III.11 montrent l'évolution de (F_x , F_y et F_z) et (R_a et R_z) en fonction de l'évolution de l'usure (V_b) à $V_c=400$ m/min, $a_p=0.3$ mm, $f=0.08$ mm/tr. On remarque que toutes les courbes prennent une allure ascendante ce qui signifie que l'usure (V_b) a un effet important sur les efforts de coupe.

Nous pouvons diviser chacune de ces courbes en trois zones, dans la première zone (V_b) a un effet énorme sur la variation de (F_x , F_y et F_z), les valeurs de (F_x , F_y et F_z) augmentent avec un pourcentage de (80.5, 86.38 et 129) % pour la CC1690 et de (89.92, 136.3 et 110) % pour la CC6090. Dans la deuxième zone, les courbes sont plus stables, on remarque une faible augmentation de (F_x , F_y et F_z) avec un pourcentage de (32.37, 30.77 et 37) % pour la CC1690 et de (37.59, 11.28 et 11)% pour la CC6090. Dans la troisième partie, on remarque une autre augmentation significative de (F_x , F_y et F_z) avec un pourcentage de (46.88, 45.26 et 41.9) % pour la CC1690 et de (40.07, 36.33 et 43) % pour la CC6090. Pour les critères de rugosité (R_a et R_z), dans la première zone ces valeurs élèvent avec un taux de (47 et 51) % pour la CC1690 et de (49 et 59) % pour la CC6090. Dans la deuxième zone, les courbes sont plus stables, on remarque une faible augmentation de (R_a et R_z) avec un pourcentage de (5 et 23) % pour la CC1690 et de (8.9 et 11) % pour la CC6090. Dans la troisième partie, on remarque une autre augmentation significative de (R_a et R_z) avec un pourcentage de (14 et 43) % pour la CC1690 et de (15.5 et 47) % pour la CC6090.

En résumé, durant toute l'opération d'usinage et lorsque $V_b=0.3$ mm, les critères (F_x , F_y et F_z) ont augmentés de (32.82, 69.21 et 31.36) à (115.2, 245.06 et 120.23) pour la céramique CC1690 et de (31.36, 73.99 et 37.091) à (121.35, 265.3 et 121.35) pour la CC6090. Les critères (R_a et R_z) ont augmentés de (0.79 et 4.52) à (1.39 et 12.09) pour la céramique CC1690 et de (0.75 et 4.65) à (1.41 et 12.21) pour la CC6090. En effet, dans les mêmes conditions de coupe et après 17 min d'usinage, le ratio $F_{xCC1690} / F_{xCC6090} = 0.70$, $F_{yCC1690} / F_{yCC6090} = 0.70$, $F_{zCC1690} / F_{zCC6090} = 0.81$, $R_{aCC1690} / R_{aCC6090} = 0.88$ et $R_{zCC1690} / R_{zCC6090} = 0.87$.

La détérioration de qualité de surface en fonction de l'évolution de l'usure (V_B) est une conséquence de l'endommagement de l'arête tranchante de l'outil. Plus l'arête est usée, plus elle devient moins vive et des arrachements de la matière de la pièce sont plus fréquent, ce qui conduit

à la dégradation de l'état de surface. Des résultats et des commentaires comparables sont rapportés par [59, 60].

L'accroissement des efforts de coupe en fonction de l'augmentation de l'usure peut être expliqué par l'augmentation de la surface de contact entre l'outil et la pièce, ainsi les forces de frottement et par conséquent les efforts de coupe. Des résultats similaires sont rapportés [61, 62].

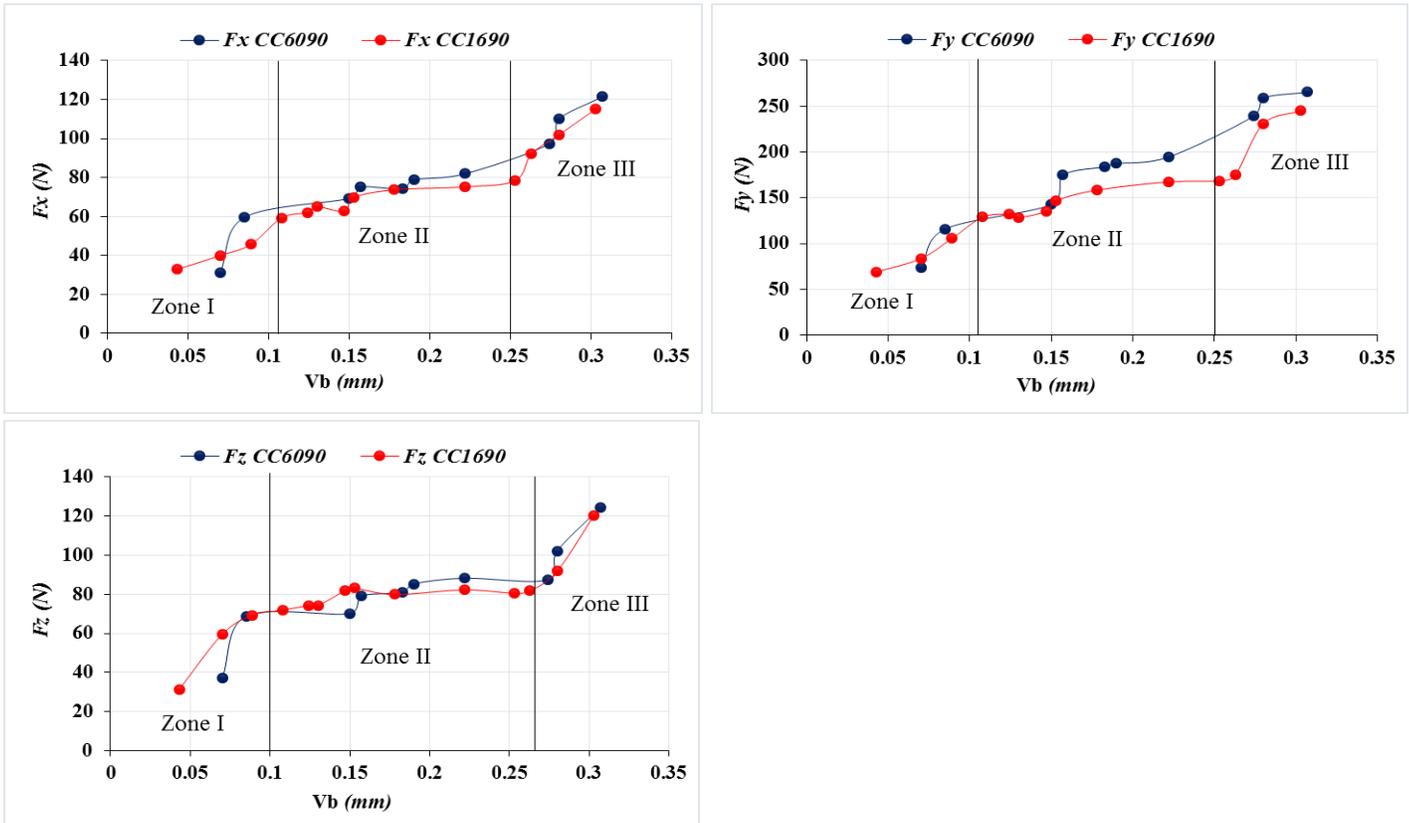


Fig. III.10 Evolution de F_x , F_y et F_z pour CC6090 et CC1690 en fonction de temps d'usinage.

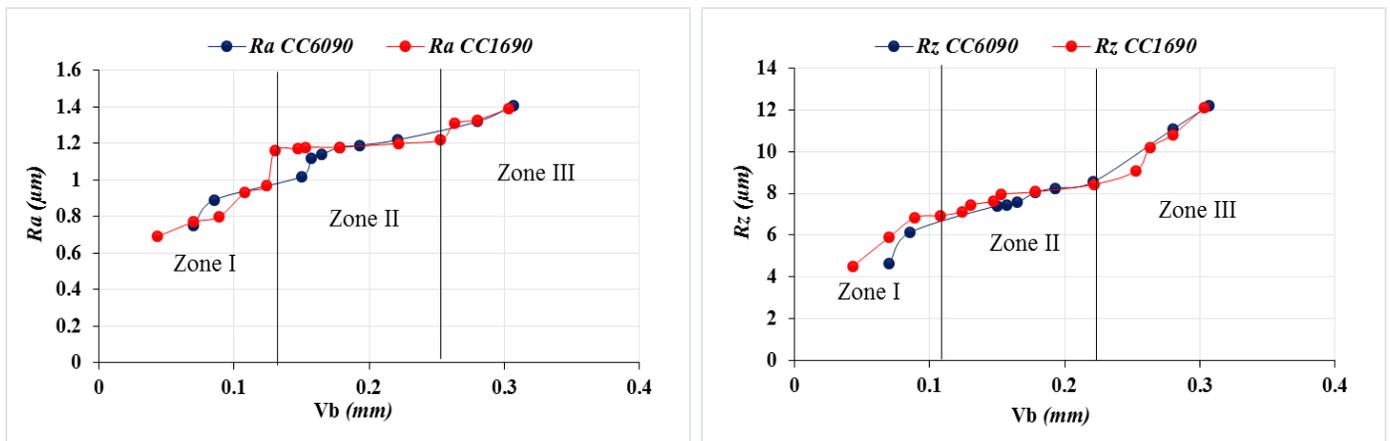


Fig. III.11 Evolution de R_a et R_z pour CC6090 et CC1690 en fonction de temps d'usinage.

III.5. Analyse de la topographie des surfaces

Pour mieux comprendre les phénomènes physiques liés à la micro géométrie de la surface et pour caractériser les défauts de surface localisés au niveau des profils usinés, une analyse topographique a été réalisée à l'aide d'un rugosimètre optique 3D de marque *AltiSurf*® 500. Dans ce cas, nous avons utilisé les paramètres fonctionnels 2D et 3D (Rk et Sk) car ils sont plus proches de la rugosité réelle mesurée que les critères de rugosité conventionnels (Ra , Rz et Rq ...etc). Ces paramètres sont calculés à partir de la courbe d'Abbott obtenue par intégration de la distribution des hauteurs sur toute la surface mesurée [63, 64]. Dans notre étude toutes les courbes et les paramètres étudiés sont obtenues en utilisant un filtre de régression gaussien robuste. Ce dernier permet d'éviter certaines limitations des autres filtres et d'obtenir un bon profil de rugosité (ISO 11562/1996) [65]. Ce filtre fonctionne en lissant les points de données par la fonction Gaussien en séparant l'ondulation et la rugosité sans distorsion ni déphasage du signal [66]. Il permet aussi de réduire les erreurs au voisinage des pics et des vallées. Plusieurs travaux de recherches proposent l'utilisation d'un filtre gaussien robuste lors de l'évaluation des surfaces usinées de manière à réduire l'influence des vallées profondes qui causent des distorsions dans le profil de rugosité [66, 67, 68].

III.5.1. Topographie de surface 3D

La représentation 3D de la topographie des surfaces produites lors du tournage de la fonte grise EN-GJL-250 avec la céramique en nitrure de silicium revêtue et non revêtue, en utilisant deux avances différentes est montrée dans la figure III.12. On remarque que les surfaces générées sont constituées par de nombreuses saillies (sommets) qui sont interrompues. Cela peut être expliqué par la présence d'une proportion élevée du carbone (4 %) sous forme de graphite lamellaire très dur qui fragilise la structure de la fonte est par conséquent toute la surface est endommagée. D'autres chercheurs ont analysé la topographie de surface 3D des éprouvettes en acier, ils ont trouvé que les profils obtenus sont continus et ne présente pas des saillies endommagés [19, 32 et 70]. Aussi, d'après cette figure on remarque que les rainures engendrées sont plus profondes et plus larges et la distance entre les pics et les vallées est importante lorsque l'avance varie de (0.08 à 0.2) mm/t. D'autre part, la nuance en céramique revêtu (CC1690) présente des faibles rugosités par rapport à la nuance en céramique non revêtu (CC6090), pour $f=0.08$ mm/tr ($Ra_{CC1690}=0.431$, $Ra_{CC6090}=0.728$), ($Rz_{CC1690}=1.89$, $Rz_{CC6090}=3.67$) et ($Rq_{CC1690}=0.523$, $Rq_{CC6090}=0.914$). La supériorité de la céramique CC1690, peut être expliquée par l'existence d'une couche de

revêtement qui diminue le coefficient de frottement entre l'outil de coupe et la pièce et par conséquent les efforts de coupe, ce qui améliore l'état de surface [71]. Des résultats similaires ont été trouvés par Sharif et al [72].

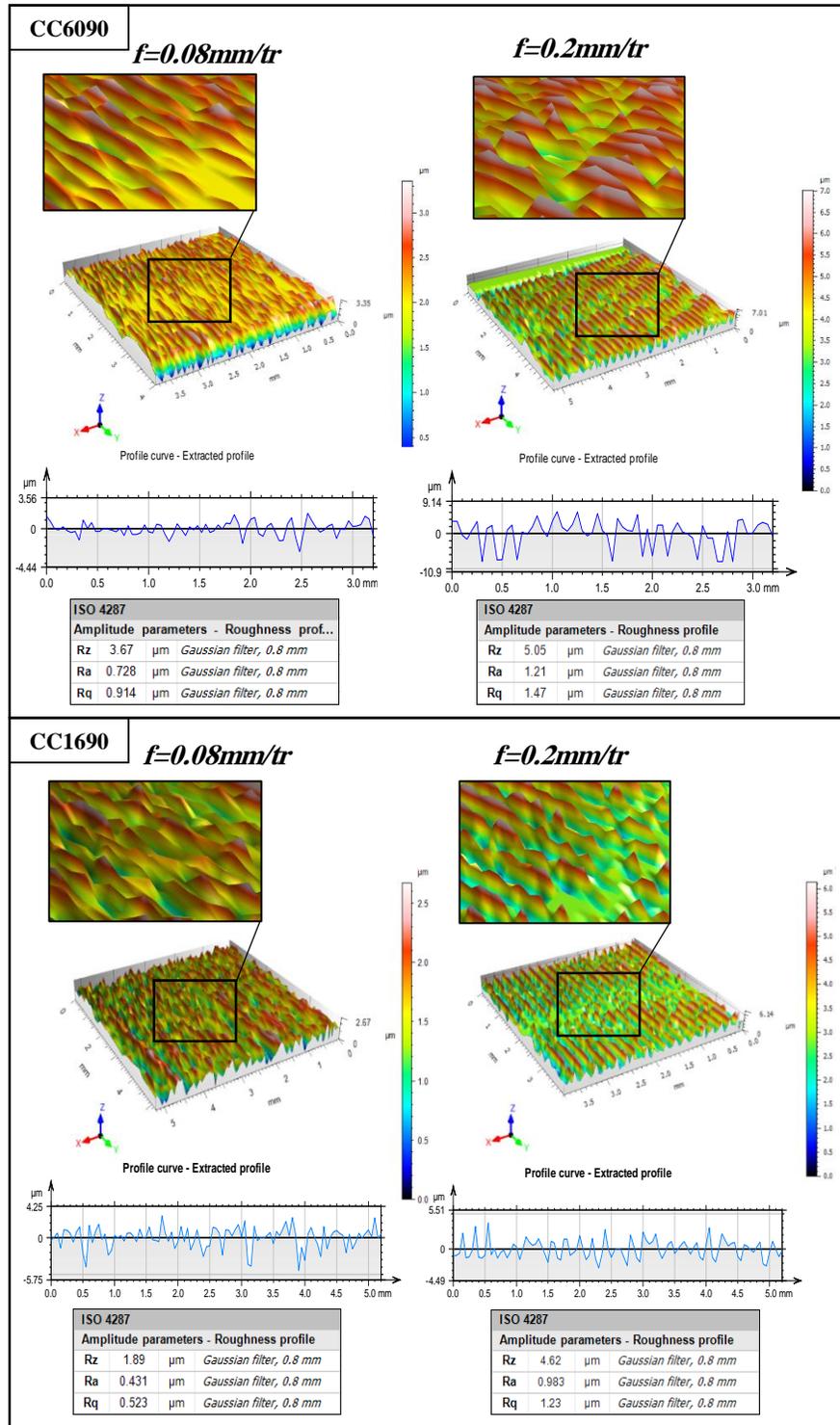


Fig. III.12 Topographie de surface 3D.

III.5.2. Paramètre fonctionnels 2D

La figure III.13 montre les cinq paramètres fonctionnels Rk (Paramètres 2D) tels que Rpk , Rk , Rvk , $Mr1$ et $Mr2$, ces paramètres permettent de définir la forme du profil de rugosité en calculant la proportion de matière à différents niveaux. Cette proportion est rapportée sur une courbe de taux de longueur portante, qui définit la forme réelle du profil (ISO 13565-2 1996) [73] et divise la texture en trois régions, à savoir les pics extrêmes, les noyaux et Vallées extrêmes [74]. Les résultats présentés dans cette figure sont obtenues pour ($f=0.08$ mm/tr et $f=0.2$ mm/tr) à une vitesse $Vc=530$ m/min et $ap=0.3$ mm. On remarque que la rugosité centrale du profil Rk , la profondeur de rugosité des pics Rpk et la profondeur de rugosité des vallées sont très influencées par la variation de l'avance et le matériau de coupe. la figure monter que pour $f=0.08$ mm/tr et avec la céramique non revêtue ($Rk=1.14$ μ m, $Rpk=0.319$ μ m et $Rvk=0.876$ μ m) et ($Rk=0.977$ μ m, $Rpk=0.486$ μ m et $Rvk=0.835$ μ m) pour la céramique revêtue, avec une avance $f=0.2$ mm/tr ($Rk=3.10$ μ m, $Rpk=3.18$ μ m et $Rvk=1.44$ μ m) pour la céramique non revêtue et ($Rk=2.29$ μ m, $Rpk=2.89$ μ m et $Rvk=0.442$ μ m) pour la céramique revêtue. On remarque aussi que le taux de la longueur portante $Mr1$ qui donne le pourcentage de matière occupée par les pics [75], augmente de 13% à 24% pour la céramique non revêtue et de 21% à 23% pour la céramique revêtue avec l'augmentation de l'avance de $f=0.08$ mm/tr à $f=0.2$ mm/tr, cette figure montre aussi que la grande partie de la matière est occupée par le profil de noyau ($Mr2$), entre 83 % et 93%

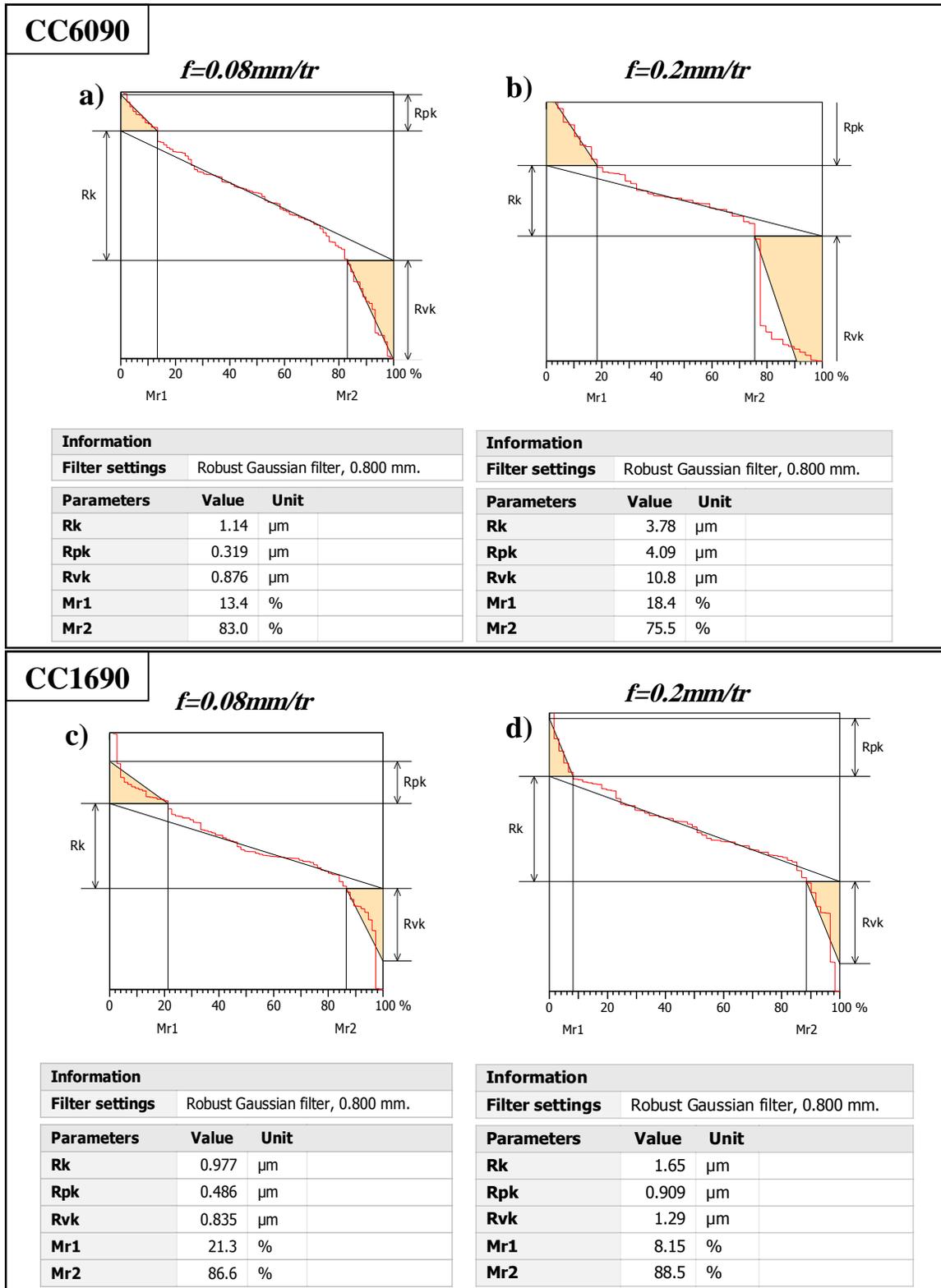


Fig. III.13 Paramètres fonctionnels 2D (Rk) et courbe d'Abbott.

III.5.3. Diagrammes en barres

La figure III.14 illustre les diagrammes des barres des pics et des vallées, ces diagrammes ressortent clairement que les fractions des pics et des vallées de la hauteur totale dépendent distinctement de l'avance en premier lieu, en suite de type du matériau de coupe. Pour les surface usinées par le nitrure de silicium non revêtue, la plupart des pics et des vallées compris entre $0.67 \mu\text{m}$ et $1.68 \mu\text{m}$ pour une avance de 0.08 mm/tr et entre $2 \mu\text{m}$ et $4.59 \mu\text{m}$ avec une avance de 0.2 mm/tr . Pour la plaquette céramique en nitrure de silicium revêtue les hauteurs des pics et des vallées sont un peu petit par rapport à celle de la céramique non revêtue, de sort que les valeurs compris entre $0.53 \mu\text{m}$ et $1.6 \mu\text{m}$ pour l'avance de 0.08 mm/tr et entre $1.46 \mu\text{m}$ et $3.65 \mu\text{m}$ pour une avance de 0.2 mm/tr .

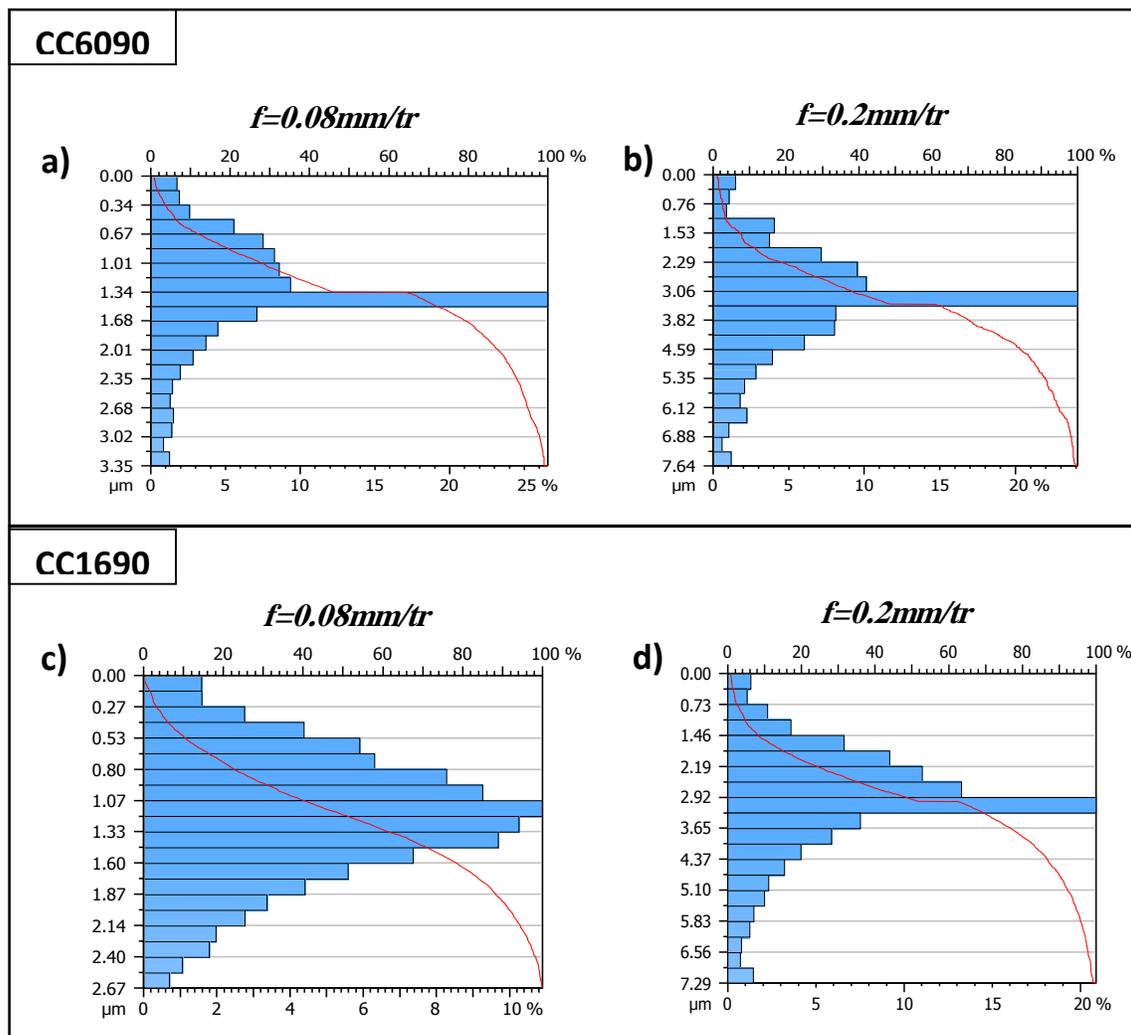


Fig. III.14 Diagramme en barres.

III.5.4. Paramètre fonctionnels 3D

a) Les paramètres S_k

La comparaison entre les valeurs des paramètres fonctionnels S_k (paramètres 3D) qui sont des extensions des paramètres 2D R_k [76] enregistrée pendant les expériences en fonction de l'avance pour les deux céramique revêtue et non revêtue est présenté dans la figure III.15. D'après cette figure, on constate que l'augmentation de l'avance de $f=0.08 \text{ mm/tr}$ à $f=0.2 \text{ mm/tr}$ provoquer une augmentation de la rugosité de noyau (S_k), la rugosité des pics (S_{pk}) et des vallées (S_{vk}) de ($S_k=1.08 \mu\text{m}$, $S_{pk}=0.445 \mu\text{m}$, $S_{vk}=0.651 \mu\text{m}$) à ($S_k=2.91 \mu\text{m}$, $S_{pk}=2.7 \mu\text{m}$, $S_{vk}=0.747 \mu\text{m}$) pour la surface usinée par la céramique non revêtue, et de ($S_k=0.569 \mu\text{m}$, $S_{pk}=0.594 \mu\text{m}$, $S_{vk}=0.777 \mu\text{m}$) à ($S_k=1.78 \mu\text{m}$, $S_{pk}=2.5 \mu\text{m}$, $S_{vk}=0.89 \mu\text{m}$) pour la surface usinée par la céramique revêtue. D'autre part la surface portante des pics (S_{rI}) augmente de 11.8 % à 19.3% pour la céramique non revêtue et de 10.6 % à 22.3 % pour la céramique revêtue.

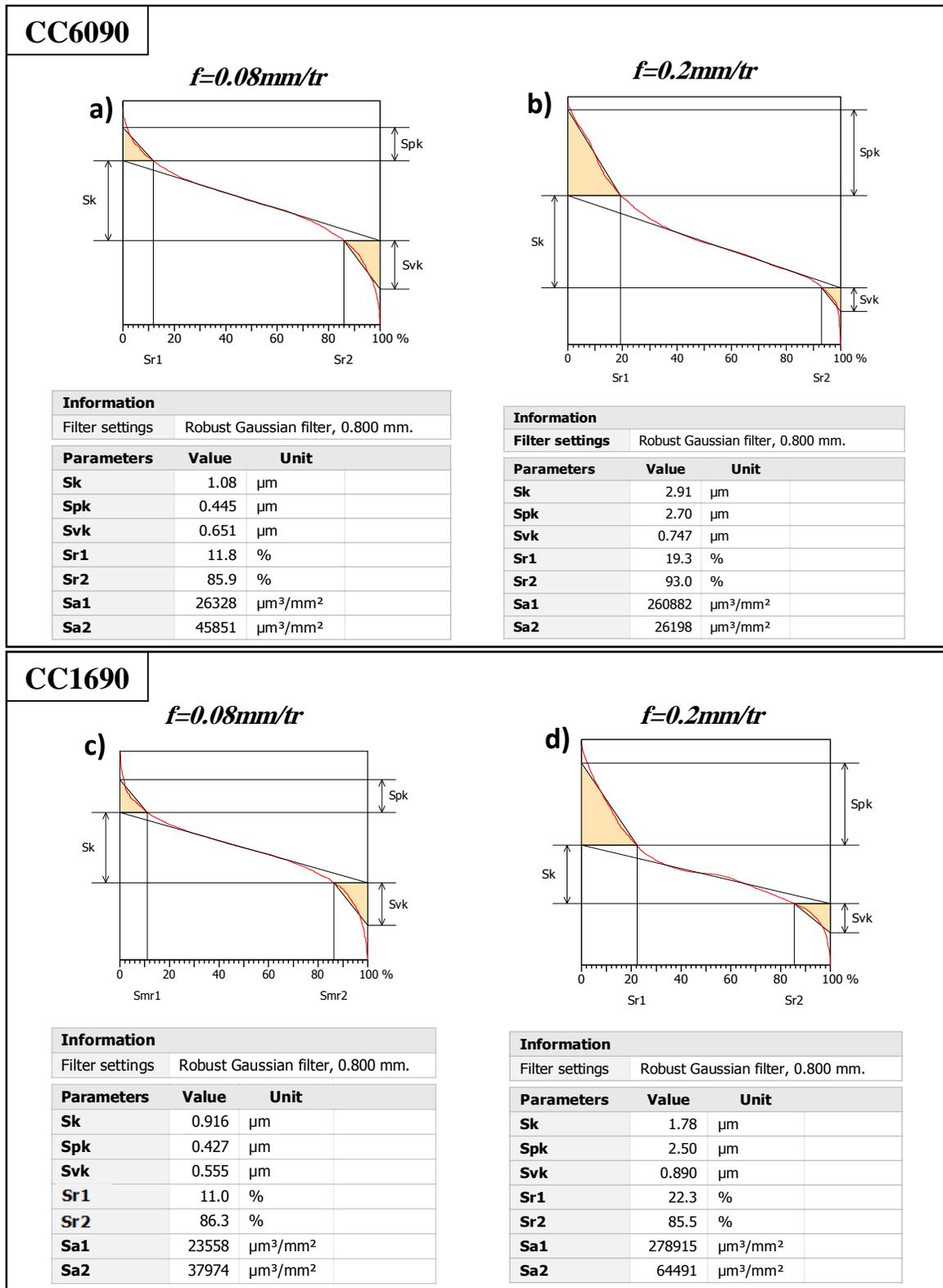
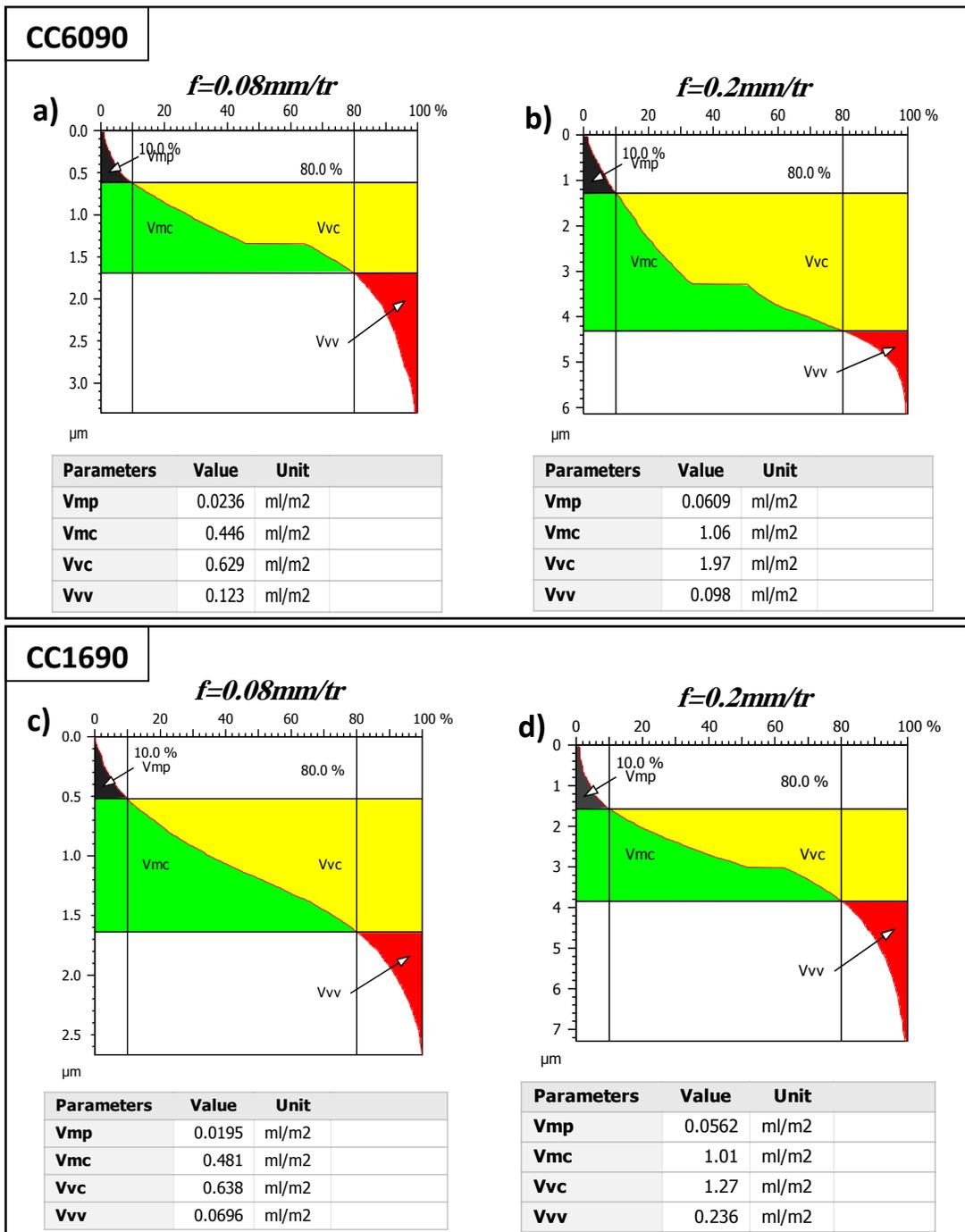


Fig. III.15 Paramètres fonctionnels (Sk) et courbe d'About.

b) Paramètres volumiques

La figure III.16 illustre les paramètres fonctionnels de volume, ces paramètres peuvent caractériser non seulement les propriétés fonctionnelles communes des surfaces, mais aussi d'interpréter l'usure et les propriétés tribologiques dans une procédure de rodage [65]. La famille de volumes a une énorme importance pratique et peut être utilisée pour évaluer numériquement le rapport de surface des matériaux et avoir des valeurs unitaires absolues de volume par unité de surface. A partir de cette figure, on remarque que on remarque que avec l'augmentation de l'avance de $f=0.08 \text{ mm/tr}$ a $f=0.2 \text{ mm/tr}$ le volume de matière des pics (V_{mp}) augmente 2.5 fois pour la céramique CC6090 et 2.8 fois pour la céramique CC1690 et le volume de matière de cœur (V_{mc}) augmentent 2.3 fois pour la céramique CC6090 et 2.1 fois pour la céramique CC1690. D'autre part les pics engendrés lors l'usinage de la fonte grise par la céramique revêtue ont des faibles volumes par rapport à celle obtenue par la céramique non revêtue.



III.6. Conclusion

Ce chapitre traite les résultats unifactoriels du couple outil-matière avec la fonte FGL250, usiné en tournage à sec par des céramiques en nitrure de silicium revêtue (CC1690) et non revêtue (CC6090). Ces essais nous ont permis d'évaluer les performances de ces outils de coupe en termes effort de coupe, rugosité de surface et usure en dépouille. Il est à noter que :

- La profondeur de passe affecte les efforts de coupe d'une manière considérable ;
- La rugosité est très sensible à la variation de l'avance ;
- La céramique revêtue (CC1690) est plus performante que la céramique non revêtue (CC6090) en terme d'effort de coupe, rugosité de surface et résistance à l'usure ;
- La plate-forme optique de métrologie modulaire est un outil d'investigation important dans la recherche de rugosité de surface. Il permet de comprendre les caractéristiques des surfaces usinées en fonte grise EN-GJL-250.
- Les paramètres fonctionnels 2D et 3D obtenue à partir de la courbe d'Abbott sont plus proches au phénomène physique mesuré (rugosité de surface) que les paramètres traditionnels.

Chapitre IV

*Modélisation des
paramètres de coupe
par ANN et RSM*

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente les résultats d'une étude comparative entre deux céramiques en nitrure de silicium (Si_3Ni_4) revêtue et non revêtue en termes de rugosité de surface Ra , l'effort de coupe tangentiel (F_z), la puissance de coupe (P_c) et le taux d'enlèvement de matière (MRR), lors de l'usinage de la fonte FGL 250. Les essais expérimentaux ont été planifiés suivant un plan factoriel complet avec 27 essais. L'analyse de la variance ANOVA a été utilisées pour déterminer et classier les paramètres de coupe que sont influents sur les réponses étudiées. L'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN) et la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) ont été utilisées pour obtenir des modèles mathématiques de prédiction afin de les utilisés dans l'étape d'optimisation. En suite les capacités prédictives des deux modèles ANN et RSM ont été comparées en termes de l'écart absolu moyen (MAD), l'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2).

IV.2. Analyse et discussion des résultats

Les essais expérimentaux effectués dans cette partie ont été planifiés suivant un plan factoriel complet 3^3 . Les facteurs d'entrée choisis ainsi que leurs niveaux sont présentés dans le tableau IV.1. Les plages des paramètres de coupe sont choisis selon les recommandations du fabricant des outils de coupe (sandvik).

Table IV.1 : niveaux des différents paramètres de coupe

| Niveaux | V_c (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) |
|---------|---------------|-------------|-----------|
| 1 | 260 | 0.08 | 0.25 |
| 2 | 370 | 0.14 | 0.5 |
| 3 | 530 | 0.2 | 0.75 |

Le tableau IV.2 présente les conditions de coupe (V_c , f et ap), et les résultats expérimentaux correspondants aux Ra , F_z et MRR suivant le plan factoriel 3^3 . Les valeurs de ce tableau sont comprise entre $0.45 \mu\text{m}$ $1.86 \mu\text{m}$ pour Ra , entre 30.73 N et 349.77 N pour F_z , entre 197.513 W et 2710.68 W pour P_c et entre $5200 \text{ mm}^3/\text{min}$ et $79500 \text{ mm}^3/\text{min}$ pour MRR .

Les résultats de puissance de coupe (P_c) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) présentés dans le tableau IV.I, sont calculés par les deux équations suivantes :

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60} \quad (\text{IV.1})$$

$$MRR = ap \times V_c \times f \times 1000 \quad (\text{IV.2})$$

Table IV.2 : Résultats de R_a , F_z , P_c et MRR en fonction des conditions de coupe

| N° | Facteurs d'entrée | | | Paramètres de sortie | | | | | | | |
|----|-------------------|----------------|------------------|-------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
| | | | | CC6090 | | | | CC1690 | | | |
| | ap (mm) | f (mm/tr) | V_c (m/min) | R_a (μm) | F_z (N) | MRR (mm^3/min) | P_c (W) | R_a (μm) | F_z (N) | MRR (mm^3/min) | P_c (W) |
| 1 | 0.25 | 0.08 | 260 | 0.82 | 68.14 | 5200 | 295.273 | 0.86 | 45.58 | 5200 | 197.513 |
| 2 | 0.25 | 0.08 | 370 | 0.77 | 54.90 | 7400 | 338.55 | 0.72 | 43.74 | 7400 | 269.73 |
| 3 | 0.25 | 0.08 | 530 | 0.72 | 57.73 | 10600 | 509.948 | 0.64 | 30.73 | 10600 | 271.448 |
| 4 | 0.25 | 0.14 | 260 | 1.29 | 100.86 | 9100 | 437.06 | 1.16 | 82.31 | 9100 | 356.677 |
| 5 | 0.25 | 0.14 | 370 | 0.91 | 78.67 | 12950 | 485.132 | 0.91 | 75.23 | 12950 | 463.918 |
| 6 | 0.25 | 0.14 | 530 | 0.83 | 75.84 | 18550 | 669.92 | 0.83 | 61.88 | 18550 | 546.607 |
| 7 | 0.25 | 0.2 | 260 | 1.53 | 111.96 | 13000 | 485.16 | 1.86 | 107.14 | 13000 | 464.273 |
| 8 | 0.25 | 0.2 | 370 | 1.39 | 96.95 | 18500 | 597.858 | 1.76 | 82.06 | 18500 | 506.037 |
| 9 | 0.25 | 0.2 | 530 | 1.18 | 93.79 | 26500 | 828.478 | 1.66 | 76.58 | 26500 | 676.457 |
| 10 | 0.5 | 0.08 | 260 | 0.75 | 127.92 | 10400 | 554.32 | 0.55 | 115.93 | 10400 | 502.363 |
| 11 | 0.5 | 0.08 | 370 | 0.73 | 93.33 | 14800 | 575.535 | 0.52 | 90.07 | 14800 | 555.432 |
| 12 | 0.5 | 0.08 | 530 | 0.7 | 99.16 | 21200 | 875.913 | 0.45 | 84.48 | 21200 | 746.24 |
| 13 | 0.5 | 0.14 | 260 | 1.35 | 202.69 | 18200 | 878.323 | 0.88 | 153.68 | 18200 | 665.94 |
| 14 | 0.5 | 0.14 | 370 | 0.88 | 195.14 | 25900 | 1203.36 | 0.81 | 143.5 | 25900 | 884.917 |
| 15 | 0.5 | 0.14 | 530 | 0.79 | 170.76 | 37100 | 1508.38 | 0.77 | 133.8 | 37100 | 1181.9 |
| 16 | 0.5 | 0.2 | 260 | 1.78 | 244.82 | 26000 | 1060.89 | 1.65 | 206.42 | 26000 | 894.487 |
| 17 | 0.5 | 0.2 | 370 | 1.43 | 230.98 | 37000 | 1424.38 | 1.65 | 183.86 | 37000 | 1133.8 |
| 18 | 0.5 | 0.2 | 530 | 1.27 | 219.40 | 53000 | 1938.03 | 1.65 | 171.16 | 53000 | 1511.91 |
| 19 | 0.75 | 0.08 | 260 | 0.93 | 193.54 | 15600 | 838.673 | 0.62 | 151.26 | 15600 | 655.46 |
| 20 | 0.75 | 0.08 | 370 | 0.85 | 192.04 | 22200 | 1184.25 | 0.54 | 146.71 | 22200 | 904.712 |
| 21 | 0.75 | 0.08 | 530 | 0.71 | 171.83 | 31800 | 1517.83 | 0.47 | 137.73 | 31800 | 1216.62 |
| 22 | 0.75 | 0.14 | 260 | 1.31 | 275.76 | 27300 | 1194.96 | 0.87 | 246.17 | 27300 | 1066.74 |
| 23 | 0.75 | 0.14 | 370 | 1.21 | 173.86 | 38850 | 1688.8 | 0.8 | 239.2 | 38850 | 1475.07 |
| 24 | 0.75 | 0.14 | 530 | 1.06 | 260.01 | 55650 | 2296.76 | 0.77 | 221.69 | 55650 | 1958.26 |
| 25 | 0.75 | 0.2 | 260 | 1.79 | 349.77 | 39000 | 1515.67 | 1.53 | 307.2 | 39000 | 1331.2 |
| 26 | 0.75 | 0.2 | 370 | 1.58 | 326.59 | 55500 | 2013.97 | 1.5 | 255.12 | 55500 | 1573.24 |
| 27 | 0.75 | 0.2 | 530 | 1.4 | 306.87 | 79500 | 2710.68 | 1.43 | 173.4 | 79500 | 1531.7 |

IV.2.1. Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode statistique utilisée pour interpréter les résultats expérimentaux. Le but d'utilisation de cette dernière est de classer les différents paramètres d'entrée selon leur influence sur les paramètres technologiques (de sorties) [77, 78].

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour R_a , F_z , P_c et MRR sont exposés dans les tableaux 4 à 7. L'analyse est effectuée pour un niveau de signification $\alpha = 0,05$ (c.-à-d. pour un

niveau de confiance de 95%). Une faible valeur de Probabilité ($\leq 0,05$) indique que les modèles obtenus sont considérés comme statistiquement significatifs [79], ce qui est souhaitable.

Le tableau IV.3 montre les résultats de l'ANOVA de la rugosité de surface Ra de la fonte FGL 250 obtenue par les deux outils en céramique (Si_3N_4) revêtue (CC1690) et non revêtue (CC6090). On remarque que l'avance est le paramètre le plus significatif, sa contribution est de 71% pour la céramique CC6090 et de 86% pour CC1690. La vitesse de coupe vient en deuxième position avec une contribution de 15.09 et 17.07% respectivement pour CC6090 et CC1690. Pour la profondeur de passe, on remarque que son influence est faible, sa contribution est de 3.53 et 3.32% pour les deux céramiques. L'interaction $f \times Vc$ pour la céramique (CC6090) et les termes carrés ap^2 et f^2 pour la céramique CC1690 sont aussi significatives avec une contribution de 2.012%, 0.37% et 6.59% respectivement. Les autres interactions et termes carrés ne sont pas significatifs car leurs probabilités sont supérieures à 0.05. Des résultats semblables ont été trouvés par d'autres chercheurs [59, 56].

Table IV.3 ANOVA pour Ra

| Source | SC | DF | MC | F-value | Prob. | Cont. % | Remarques |
|------------------|-----------|----|-----------|---------|----------|---------|------------------|
| a) CC6090 | | | | | | | |
| Model | 2.96 | 9 | 0.33 | 47 | < 0.0001 | | Signifiant |
| A : ap , mm | 0.11 | 1 | 0.11 | 15.56 | 0.001 | 3.53 | Signifiant |
| B : f , mm/tr | 2.19 | 1 | 2.19 | 312.88 | < 0.0001 | 71.11 | Signifiant |
| C : Vc , m/min | 0.46 | 1 | 0.46 | 66.41 | < 0.0001 | 15.09 | Signifiant |
| A×B | 0.02 | 1 | 0.02 | 2.86 | 0.1089 | 0.65 | Non significatif |
| A×C | 7.84E-05 | 1 | 7.84E-05 | 0.011 | 0.9168 | 0.0026 | Non significatif |
| B×C | 0.062 | 1 | 0.062 | 8.85 | 0.0085 | 2.012 | Significatif |
| A ² | 0.016 | 1 | 0.016 | 2.24 | 0.1525 | 0.509 | Non significatif |
| B ² | 0.021 | 1 | 0.021 | 3.03 | 0.0996 | 0.6897 | Non significatif |
| C ² | 0.028 | 1 | 0.028 | 4.06 | 0.0599 | 0.9235 | Non significatif |
| Résiduel | 0.12 | 17 | 6.98E-03 | | | | |
| Cor total | 3.07 | 26 | | | | | |
| b) CC1690 | | | | | | | |
| Model | 5.52 | 9 | 0.61 | 175.13 | < 0.0001 | | Signifiant |
| A : ap , mm | 0.19 | 1 | 0.19 | 53.05 | < 0.0001 | 3.3296 | Signifiant |
| B : f , mm/tr | 4.81 | 1 | 4.81 | 1373.4 | < 0.0001 | 86.2079 | Signifiant |
| C : Vc , m/min | 0.095 | 1 | 0.095 | 27.20 | < 0.0001 | 17.072 | Signifiant |
| AB | 4.408E-03 | 1 | 4.048E-03 | 1.26 | 0.2777 | 0.0789 | Non significatif |
| AC | 0.012 | 1 | 0.012 | 3.51 | 0.0783 | 0.2203 | Non significatif |
| BC | 2.262E-03 | 1 | 2.262E-03 | 0.65 | 0.4329 | 0.0404 | Non significatif |
| A ² | 0.021 | 1 | 0.021 | 6.05 | 0.0249 | 0.3796 | Signifiant |
| B ² | 0.37 | 1 | 0.37 | 105.09 | < 0.0001 | 6.5962 | Signifiant |
| C ² | 4.089E-03 | 1 | 4.089E-03 | 1.17 | 0.2952 | 0.0732 | Non significatif |
| Résiduel | 0.06 | 17 | 3.505E-03 | | | | |
| Cor total | 5.58 | 26 | | | | | |

Les résultats de l'ANOVA pour F_z sont présentés dans le tableau IV.4, ces résultats permettent de classer les trois éléments du régime de coupe (V_c , f and ap) et leurs interactions selon leur influence sur l'effort de coupe tangentiel F_z . Ce tableau montre que la profondeur de passe vient en premier lieu avec une contribution de 69.63 % pour CC6090 et 64.73 % pour CC1690, avec l'augmentation de ap , avec l'augmentation de la profondeur de passe, l'épaisseur du copeau devient importante ce qui cause une croissance de volume du métal déformé et cela nécessite d'énormes efforts de coupe pour tailler le copeau. L'avance par tour vient en deuxième position avec une contribution de 22.78 % pour CC6090 et 20.09 % pour CC1690. La vitesse de coupe a un impact sur F_z avec une contribution de 1.3 % pour CC6090 et 4.28 % pour CC1690. Les interactions $ap \times f$ sont aussi significatives avec une contribution de 3.74 % pour CC6090 et 1.45 % pour CC1690. Les autres paramètres ont une contribution inférieure à 1 %. Les résultats sont similaires avec ceux de M. Nouioua et al [53].

Table IV.4 ANOVA pour F_z

| Source | SC | DF | MC | F-value | Prob. | Cont.% | Remarques |
|-------------------|----------|----|----------|---------|----------|--------|------------------|
| a) CC6090 | | | | | | | |
| Model | 203184.1 | 9 | 22576.01 | 182.664 | < 0.0001 | | Signifiant |
| A : ap , mm | 142940.1 | 1 | 142940.1 | 1156.54 | < 0.0001 | 69.63 | Signifiant |
| B : f , mm/tr | 46766.25 | 1 | 46766.25 | 378.390 | < 0.0001 | 22.78 | Signifiant |
| C : V_c , m/min | 2690.600 | 1 | 2690.600 | 21.7698 | 0.0002 | 1.310 | Signifiant |
| A×B | 7695.761 | 1 | 7695.761 | 62.2671 | < 0.0001 | 3.748 | Significatif |
| A×C | 81.01512 | 1 | 81.01512 | 0.65550 | 0.4293 | 0.039 | Non significatif |
| B×C | 59.43121 | 1 | 59.43121 | 0.48086 | 0.4973 | 0.028 | Non significatif |
| A ² | 116.4241 | 1 | 116.4241 | 0.94199 | 0.3453 | 0.056 | Non significatif |
| B ² | 958.1120 | 1 | 958.1120 | 7.75217 | 0.0127 | 0.466 | Significatif |
| C ² | 137.5766 | 1 | 137.5766 | 1.11314 | 0.3061 | 0.067 | Non significatif |
| Residual | 2101.076 | 17 | 123.5927 | | | | |
| Cor total | 205285.1 | 26 | | | | | |
| b) CC1690 | | | | | | | |
| Model | 130875.5 | 9 | 14541.72 | 46.55 | < 0.0001 | | Signifiant |
| A : ap , mm | 88159.44 | 1 | 88159.44 | 282.2 | < 0.0001 | 64.73 | Signifiant |
| B : f , mm/rev | 27370.58 | 1 | 27370.58 | 87.63 | < 0.0001 | 20.09 | Signifiant |
| C : V_c , m/min | 5840.643 | 1 | 5840.643 | 18.69 | 0.0005 | 4.288 | Signifiant |
| AB | 1983.783 | 1 | 1983.783 | 6.351 | 0.0220 | 1.456 | Signifiant |
| AC | 976.3272 | 1 | 976.3272 | 3.125 | 0.0950 | 0.716 | Non significatif |
| BC | 1616.936 | 1 | 1616.936 | 5.176 | 0.0361 | 1.187 | Signifiant |
| A ² | 124.7312 | 1 | 124.7312 | 0.399 | 0.5358 | 0.091 | Non Significatif |
| B ² | 1731.167 | 1 | 1731.167 | 5.542 | 0.0308 | 1.271 | Signifiant |
| C ² | 42.54456 | 1 | 42.54456 | 0.136 | 0.1362 | 0.031 | Non significatif |
| Residual | 5309.746 | 17 | 312.3380 | | | | |
| Cor total | 136185.2 | 26 | | | | | |

Le tableau IV.5 montre les résultats de l'ANOVA pour P_c . On constate que tous les paramètres de coupe (V_c , f et ap) avec toutes les interactions ont une influence sur la puissance de coupe, mais la profondeur de passe a le plus grand influence avec une contribution de (57.71 et 61.87) % pour la céramique CC690 et CC1690 respectivement, car la puissance de coupe est liée directement à l'effort de coupe tangentielle qui largement affecté par la profondeur de passe. L'avance vient en seconde avec une contribution de (18.76 et 17.71) % suivi par la vitesse de coupe avec une contribution de (16.4 et 11.75) %.

Table IV.5 ANOVA pour P_c

| Source | SC | DF | MC | F-value | Prob. | Cont. % | Remarques |
|-------------------|------------|----|------------|---------|----------|---------|------------------|
| a) CC6090 | | | | | | | |
| Model | 10460715.9 | 9 | 1162301.77 | 164.53 | < 0.0001 | | Signifiant |
| A : ap , mm | 6106591.49 | 1 | 6106591.49 | 864.43 | < 0.0001 | 57.713 | Signifiant |
| B : f , mm/tr | 1985508.52 | 1 | 1985508.52 | 281.06 | < 0.0001 | 18.765 | Signifiant |
| C : V_c , m/min | 1739496.92 | 1 | 1739496.92 | 246.24 | < 0.0001 | 16.440 | Signifiant |
| A×B | 311003.702 | 1 | 311003.702 | 44.025 | < 0.0001 | 2.9393 | Significatif |
| A×C | 391571.442 | 1 | 391571.442 | 55.430 | < 0.0001 | 3.7007 | Significatif |
| B×C | 119525.056 | 1 | 119525.056 | 16.919 | 0.0007 | 1.1296 | Significatif |
| A ² | 3412.72300 | 1 | 3412.72300 | 0.4830 | 0.4964 | 0.0322 | Non significatif |
| B ² | 39473.0827 | 1 | 39473.0827 | 5.5877 | 0.0302 | 0.3730 | Significatif |
| C ² | 58.1845688 | 1 | 58.1845688 | 0.0082 | 0.9287 | 0.0005 | Non significatif |
| Residual | 120091.937 | 17 | 7064.23161 | | | | |
| Cor total | 10580807 | 26 | | | | | |
| b) CC1690 | | | | | | | |
| Model | 5497357.12 | 9 | 610817.457 | 33.142 | < 0.0001 | | Signifiant |
| A : ap , mm | 3595114.61 | 1 | 3595114.61 | 195.07 | < 0.0001 | 61.87 | Signifiant |
| B : f , mm/tr | 1029355.63 | 1 | 1029355.63 | 55.852 | < 0.0001 | 17.71 | Signifiant |
| C : V_c , m/min | 683079.836 | 1 | 683079.836 | 37.063 | < 0.0001 | 11.75 | Signifiant |
| AB | 47034.9278 | 1 | 47034.9278 | 2.5521 | 0.1285 | 0.809 | Non significatif |
| AC | 112023.743 | 1 | 112023.743 | 6.0784 | 0.0246 | 1.927 | Significatif |
| BC | 1664.37491 | 1 | 1664.37491 | 0.0903 | 0.7674 | 0.028 | Significatif |
| A ² | 8774.59291 | 1 | 8774.59291 | 0.4761 | 0.4995 | 0.151 | inSignifiant |
| B ² | 94370.7464 | 1 | 94370.7464 | 5.1205 | 0.0370 | 1.624 | Signifiant |
| C ² | 3036.79163 | 1 | 3036.79163 | 0.1647 | 0.6898 | 0.052 | Non significatif |
| Residual | 313305.997 | 17 | 18429.7645 | | | | |
| Cor total | 5810663.11 | 26 | | | | | |

Les résultats d'ANOVA pour MRR et pour les deux matériaux de coupe testés sont présentés dans le tableau IV.6. D'après ces résultats on remarque que les trois éléments de régime de coupe et leurs interactions ont tous un effet significatif sur MRR . Ceci est logique car le MRR est lié directement avec la profondeur de passe, la vitesse de coupe et à l'avance (équation V.2). Le classement des contributions des trois éléments de régime de coupe sur MRR est comme suit : la profondeur de passe vient en premier lieux avec une contribution de 41.45 % car l'augmentation

de ap provoque une augmentation de volume de copeau enlevé, suivie par f avec une contribution de 30.45 %, et cela est expliqué par l'augmentation de la section de copeau. La vitesse de coupe vient en troisième position avec une contribution de 19.48 %. Les trois interactions sont aussi significatives avec des contributions de 4.89 %, 3.28 % et 2.41 % pour $ap \times Vc$, $ap \times f$ et $Vc \times f$ respectivement. Les trois termes carrés ne sont pas significatifs.

Table IV.6 ANOVA pour MRR

| Source | SC | DF | MC | F-value | Prob. | Cont.% | Remarques |
|------------------|----------|----|----------|---------|----------|--------|------------------|
| a) CC6090 | | | | | | | |
| Model | 8.218E09 | 9 | 9.131E08 | 467.86 | < 0.0001 | | Signifiant |
| A : ap , mm | 3.421E09 | 1 | 3.421E09 | 1752.78 | < 0.0001 | 41.459 | Signifiant |
| B : f , mm/tr | 2.513E09 | 1 | 2.513E09 | 1287.76 | < 0.0001 | 30.459 | Signifiant |
| C : Vc , m/min | 1.607E09 | 1 | 1.607E09 | 823.59 | < 0.0001 | 19.480 | Signifiant |
| A×B | 4.037E08 | 1 | 4.037E08 | 206.83 | < 0.0001 | 4.8921 | Significatif |
| A×C | 2.710E08 | 1 | 2.710E08 | 138.83 | < 0.0001 | 3.2838 | Significatif |
| B×C | 1.991E08 | 1 | 1.991E08 | 102 | < 0.0001 | 2.4126 | Significatif |
| A ² | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | Non significatif |
| B ² | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | Non significatif |
| C ² | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | Non significatif |
| Residual | 3.318E07 | 17 | 1.952E06 | | | | |
| Cor total | 8.252E09 | 26 | | | | | |

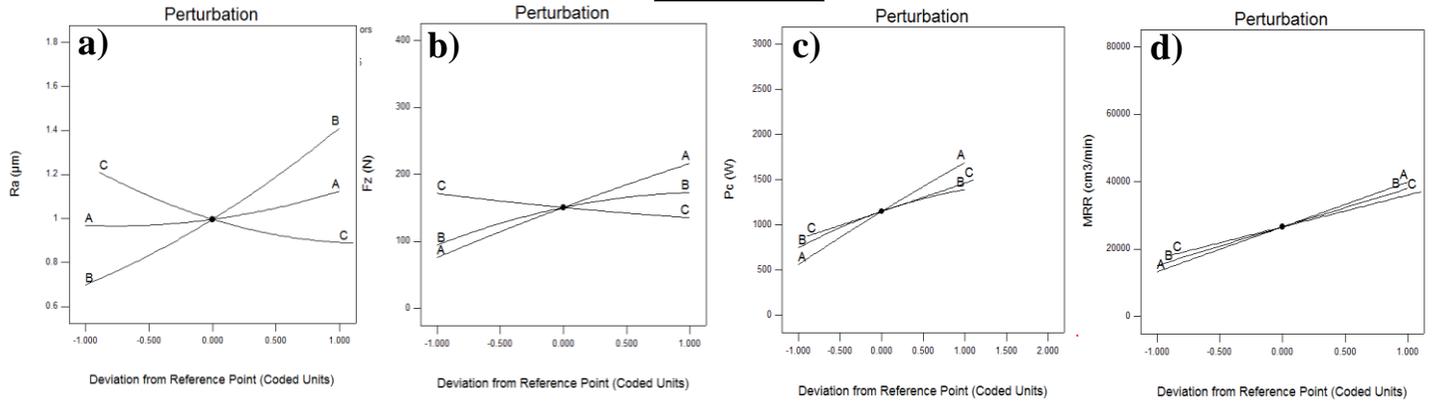
IV.2.2. Graphes des effets principaux

La figure IV.1 (a, b, c, d, e, f, g et h) illustre les graphes des effets principaux qui présente l'évolution de Ra , Fz , Pc et MRR en fonction des paramètres d'entrée (ap , f et Vc). Ces graphes confirment les résultats de l'ANOVA (tableaux IV.3 à IV.6). On constate que pour le critère Ra obtenue par les deux céramiques (CC6090 et CC1690), l'avance a la plus grande pente, ce qui montre sa plus grande influence. Car en tournage le mouvement de l'outil par rapport à la pièce engendre des sillons hélicoïdaux. Ces sillons sont plus profonds et plus larges que l'avance est élevée [60]. On remarque aussi que Ra diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe, Ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui rend le métal usiné plus plastique et par conséquent les efforts nécessaires à la coupe et les critères de rugosité diminuent. Par contre la profondeur de passe a la plus petite pente ce qui indique un très faible effet sur la rugosité de surface. Pour Fz , on remarque une augmentation de ce dernier avec la croissance de ap et f , car l'augmentation de ap provoque l'augmentation du volume de métal enlevé et aussi la section transversale du copeau augmente avec l'augmentation de f ce qui nécessite une forces de coupe significative [80]. D'autre part, l'augmentation de Vc provoque une diminution de Fz . Pour MRR

et P_c , on remarque une augmentation de ces deux derniers avec l'augmentation des trois paramètres de coupe.

Actual Factors
 A: $a_p = 0.5$
 B: $f = 0.14$
 C: $V_c = 380$

CC6090



CC1690

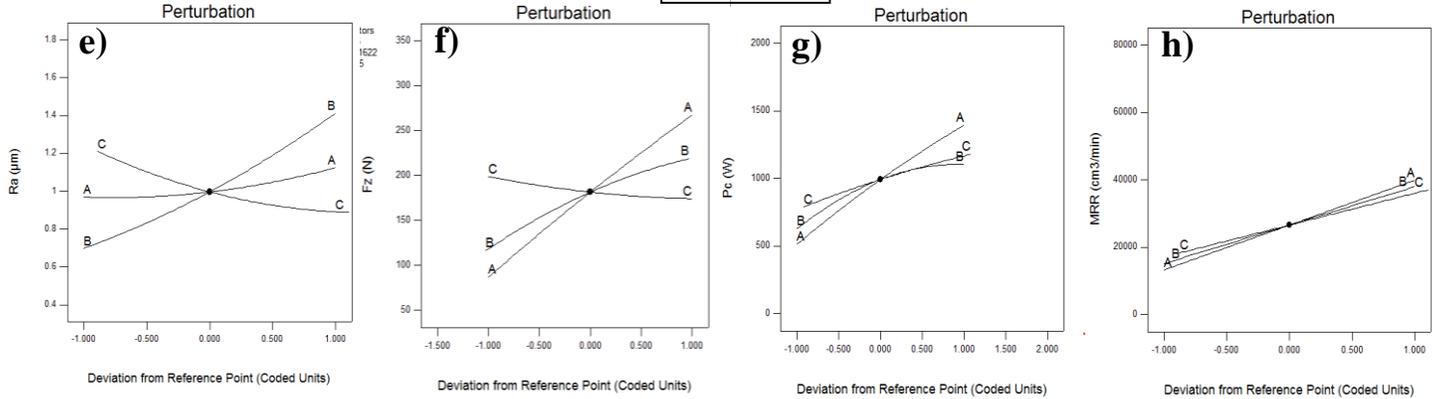


Fig.IV.1 Graphes des effets principaux pour R_a , F_z , P_c et MRR.

IV.2.3. Modélisation de R_a , F_z et P_c par la méthode RSM

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet de modéliser une variable dépendante Y , dite variable de réponse (rugosité), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k [81].

Le modèle utilisé dans cette modélisation est un modèle quadratique sous forme :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j \tag{IV.3}$$

Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.

X_i représente le niveau attribué au facteur i . C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression). a_0 , a_i , et a_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'analyse de régression de Ra , Fz et Pc en fonction du régime de coupe présenté par les équations du modèle complet (IV.4 à IV.9)

$$Ra_{CC6090} = 1.335 - 0.916ap + 3.32f - 0.003Vc + 0.8177ap \times ap + 16.512f \times f + 0.0000039Vc \times Vc + 2.72ap \times f + 0.000075ap \times Vc - 0.0088f \times Vc \quad (IV.4)$$

$$Ra_{CC1690} = 2.02 - 1.55ap - 10.65f - 2.42 \times 10^{-3}Vc + 0.95ap^2 + 68.827f^2 + 1.49 \times 10^{-6}Vc^2 - 1.27ap \times f + 9.43 \times 10^{-4}ap \times Vc + 1.68 \times 10^{-3}f \times Vc \quad (IV.5)$$

$$Fz_{CC6090} = -37.689 + 221.81ap + 1098.54f - 0.2302Vc - 70.48ap \times ap - 3510.18f \times f + 0.00027Vc \times Vc + 1688.27ap \times f - 0.0765ap \times Vc - 0.273f \times Vc \quad (IV.6)$$

$$Fz_{CC1690} = -186.28 + 338.64ap + 2107.16f + 0.0787Vc - 72.951ap \times ap - 4718.36f \times f + 0.00015Vc \times Vc + 857.16ap \times f - 265ap \times Vc - 1.424f \times Vc \quad (IV.7)$$

$$Pc_{CC6090} = 300.019 - 886.74ap + 1654.02f - 2.21Vc - 381.58ap \times ap - 22530.58f \times f + 0.00017Vc \times Vc + 10732.5ap \times f + 5.32ap \times Vc + 12.25f \times Vc \quad (IV.8)$$

$$Pc_{CC1690} = -1118.96 + 695.82ap + 11093.27f + 0.83Vc - 611.86ap \times ap - 34836.98f \times f - 0.00128Vc \times Vc + 4173.76ap \times f + 2.84ap \times Vc + 1.44f \times Vc \quad (IV.9)$$

IV.2.4. Modélisation par ANN :

Les réseaux de neurone sont l'une des méthodes d'intelligence artificielle, qui s'inspirent du comportement du cerveau humain permet de réaliser des fonctions utiles pour des applications industrielles principalement comme l'affectation des tâches d'approximation, de la classification ou de modélisation. Ce dernier est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients (poids), un ANN est constituée de trois couches connectées et chaque couche a un ou plusieurs neurones. La première couche c'est la couche d'entrée, dans cette couche chaque neurone représente une variable, la deuxième couche c'est la couche cachée, reçoit les informations de la couche d'entrée et les traite à l'aide d'une fonction de transfert, la dernière couche c'est la couche de sortie elle peut avoir un ou plusieurs sorties et ce

qui présente réellement les valeurs numériques des réponses ou variables dépendantes. [82]. Généralement un ANN est représentée graphiquement comme indiqué sur la Figure IV.2.

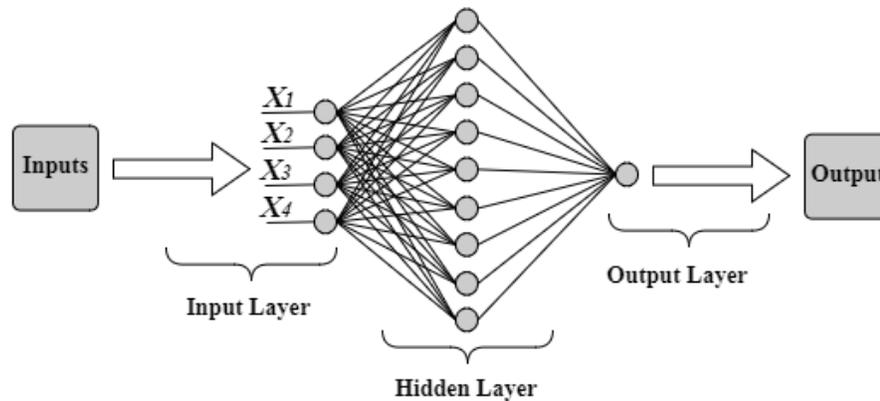


Fig.IV.2 Représentation graphique d'un ANN.

Les neurones les plus fréquemment utilisés sont ceux pour lesquels la fonction de transfert f est une fonction non linéaire (généralement une tangente hyperbolique) d'une combinaison linéaire des entrées :

$$f = \tanh \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (\text{IV.10})$$

Avec x_i sont les variables d'entrées du neurone, les w_i sont des paramètres ajustables et n le nombre de neurone.

Afin de modéliser les critères Ra , Fz et Pc nous avons employé six perceptrons multicouches (une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie), chaque perceptrons a une seule sortie car les modèles ANN avec une sortie unique donne des meilleurs résultats par rapport aux modèles avec plusieurs sorties [83]. Le plan expérimental se compose de 27 essais, dont 18 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 9 essais de validations ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones a été fait par l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant. Dans notre cas on a choisit un taux d'apprentissage $\eta = 0.1$.

Le tableau IV.7 et la figure IV.3 présentent les architectures d'ANN adéquate pour modéliser les critères Ra , Fz et Pc pour les deux matériaux testés.

Table IV.7 Architectures ANN adéquate pour modéliser Ra et Fz

| | L'architecture adéquate | |
|-----------|-------------------------|--------|
| | CC6090 | CC1690 |
| Ra | 3-12-1 | 3-4-1 |
| Fz | 3-3-1 | 3-5-1 |
| Pc | 3-4-1 | 3-3-1 |

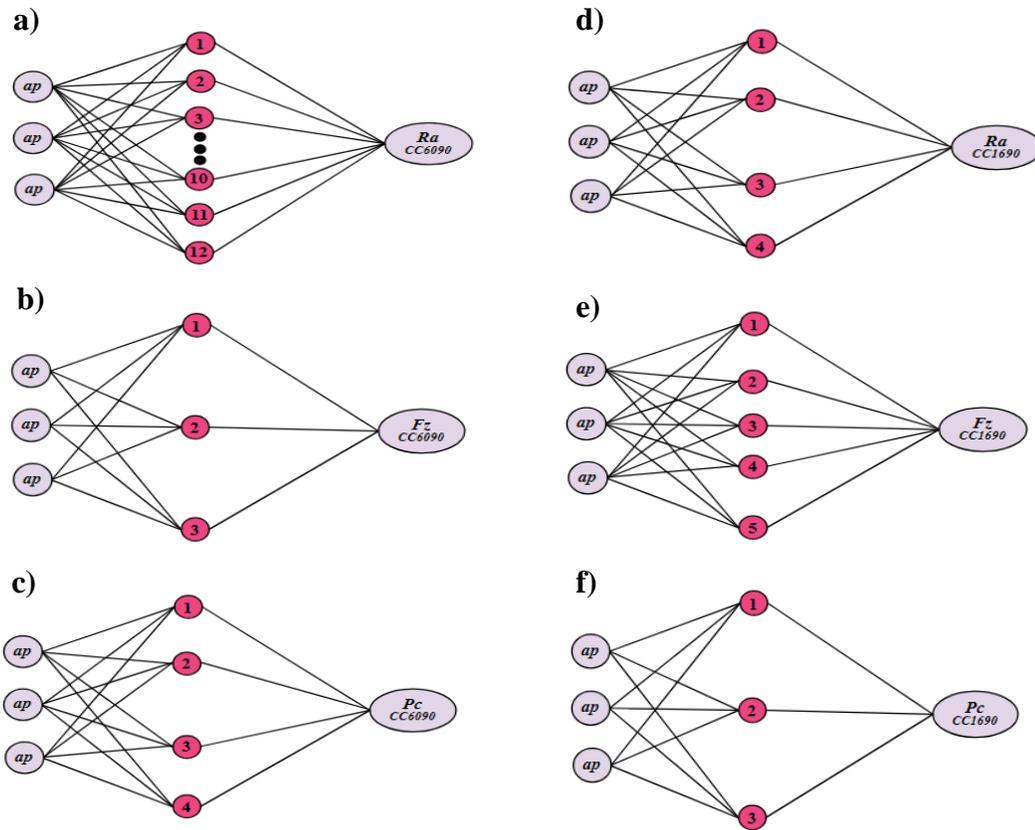


Fig.IV.3 Perceptrons ANN pour Ra, Fz et Pc

Les modèles mathématiques obtenus par la méthode ANN pour les trois critères Ra, Fz et Pc et pour les deux matériaux de coupe (CC1690 et CC6090) sont représentés par les équations suivantes :

$$Ra_{CC6090} = 0.20H_1 - 0.46H_2 - 0.38H_3 + 0.39H_4 - 0.32H_5 + 0.16H_6 - 0.09H_7 - 0.14H_8 - 0.30H_9 - 0.32H_{10} + 0.50H_{11} + 0.31H_{12} + 1.54 \tag{IV.11}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
H_1 &= \text{Tanh}(0.5(3.21ap - 33.73f - 0.016Vc + 9.13)) \\
H_2 &= \text{Tanh}(0.5(7.22ap + 37.12f - 0.009Vc - 4.94)) \\
H_3 &= \text{Tanh}(0.5(3.07ap - 23.89f - 0.003Vc + 3.13)) \\
H_4 &= \text{Tanh}(0.5(-5.13ap - 16.07f + 0.01Vc - 0.78)) \\
H_5 &= \text{Tanh}(0.5(8.48ap + 26.54f - 0.003Vc - 5.58)) \\
H_6 &= \text{Tanh}(0.5(1.84ap - 17.20f - 0.004Vc + 3.01)) \\
H_7 &= \text{Tanh}(0.5(-0.34ap + 15.73f + 0.008Vc - 7.72)) \\
H_8 &= \text{Tanh}(0.5(3.12ap + 0.49f - 0.004Vc - 2.90)) \\
H_9 &= \text{Tanh}(0.5(-7.38ap - 1.73f + 0.009Vc + 0.37)) \\
H_{10} &= \text{Tanh}(0.5(-2.74ap - 20.16f - 0.003Vc + 6.44)) \\
H_{11} &= \text{Tanh}(0.5(-2.55ap - 23.43f - 0.009Vc + 0.81)) \\
H_{12} &= \text{Tanh}(0.5(4.59ap - 14.08f + 0.01Vc - 5.02))
\end{aligned}$$

$$Ra_{CC1690} = -9.97H_1 + 16.61H_2 - 6.35H_3 + 3.86H_4 + 6.62 \quad (\text{IV.12})$$

Avec:

$$\begin{aligned}
H_1 &= \text{Tanh}(0.5(-128ap - 7.27f - 0.00074Vc + 2.24)) \\
H_2 &= \text{Tanh}(0.5(-0.076ap - 6.701f - 0.00067Vc - 1.02)) \\
H_3 &= \text{Tanh}(0.5(0.96ap - 7.998f + 0.0092Vc + 1.048)) \\
H_4 &= \text{Tanh}(0.5(-1.74ap + 3.69f + 0.0021Vc - 0.565))
\end{aligned}$$

$$Fz_{CC6090} = 112.06H_1 - 198.43H_2 - 233.97H_3 + 113.49 \quad (\text{IV.13})$$

Avec :

$$\begin{aligned}
H_1 &= \text{Tanh}(0.5(7.94ap + 11.07f - 0.0006Vc - 5.20)) \\
H_2 &= \text{Tanh}(0.5(-4.46ap + 8.90f + 0.0018Vc + 1.29)) \\
H_3 &= \text{Tanh}(0.5(4.83ap - 17.49f - 0.001Vc - 1.33))
\end{aligned}$$

$$Fz_{CC1690} = 103.61H_1 - 71.85H_2 - 107.64H_3 - 52.75H_4 - 90.45H_5 + 31.06 \quad (\text{IV.14})$$

Avec :

$$H_1 = \text{Tanh}(0.5(2.78ap + 3.26f + 0.0013Vc - 1.56))$$

$$H_2 = \text{Tanh}(0.5(3.20ap - 6.58f + 0.006Vc - 4.38))$$

$$H_3 = \text{Tanh}(0.5(-1.49ap + 27.78f + 0.0049Vc - 6.24))$$

$$H_4 = \text{Tanh}(0.5(-769ap - 20.89f - 0.0038Vc + 8.87))$$

$$H_5 = \text{Tanh}(0.5(-1.94ap - 29.85f - 0.003Vc + 6.13))$$

$$Pc_{CC6090} = 3380.41H_1 - 3624.74H_2 - 14873.51H_3 - 6461.44H_4 + 1510.29 \quad (\text{IV.15})$$

Avec :

$$H_1 = \text{Tanh}(0.5(2.24ap + 5.51f + 0.0024Vc - 3.85))$$

$$H_2 = \text{Tanh}(0.5(1.09ap - 10.27f - 0.0001Vc - 0.26))$$

$$H_3 = \text{Tanh}(0.5(0.42ap + 5.39f - 0.0008Vc - 0.45))$$

$$H_4 = \text{Tanh}(0.5(-1.81ap - 7.66f + 0.0024Vc + 0.63))$$

$$Pc_{CC1690} = -831.51H_1 - 665.87H_2 - 658.41H_3 - 455.92 \quad (\text{IV.16})$$

Avec :

$$H_1 = \text{Tanh}(0.5(1.40ap + 35.41f + 0.0023Vc - 9.59))$$

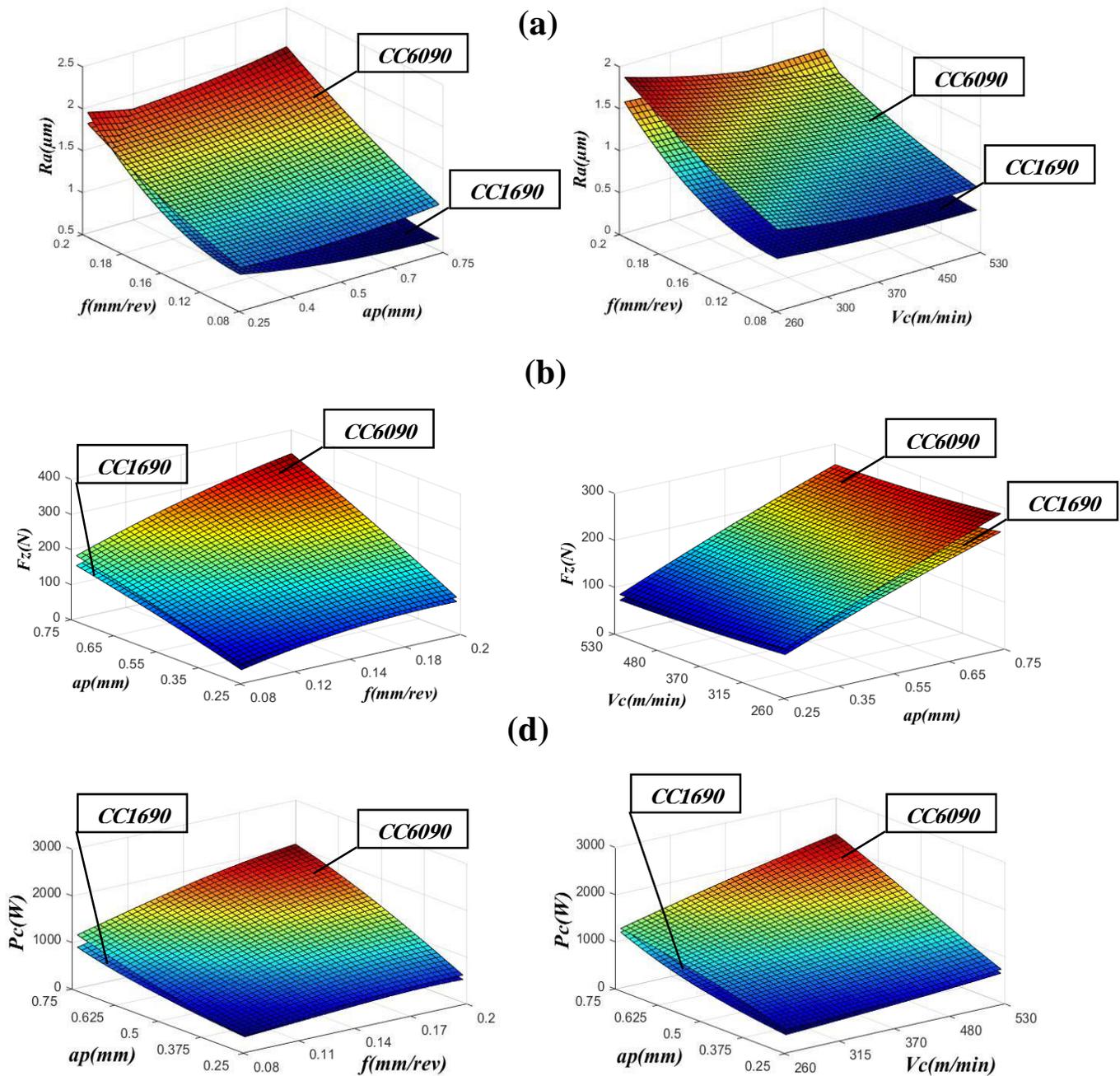
$$H_2 = \text{Tanh}(0.5(-7.44ap - 31.56f - 0.0065Vc + 12.22))$$

$$H_3 = \text{Tanh}(0.5(-2.54ap - 9.62f - 0.0027Vc + 3.51))$$

IV.2.5. Surface de réponse 3D

La figure IV.4 (a, b et d) montre les surfaces de réponse (3D) pour Ra , Fz et Pc en fonction de Vc , f et ap pour les deux céramiques testées. Les résultats montrent que Ra augmente considérablement avec l'augmentation de l'avance par tour. On remarque aussi que Ra n'est pas statistiquement influencé par la variation de la profondeur de passe. Des résultats semblables ont été également signalés par Feng et al [84], il a constaté que la profondeur de passe n'affecte pas la rugosité de surface. D'autre part, l'augmentation de la vitesse de coupe induit une diminution de la rugosité Ra .

Pour Fz et Pc on remarque qu'ils augmentent brusquement avec l'augmentation de ap et f , au contraire l'augmentation de Vc conduit à une diminution de Fz . Il est également noté que l'outil en céramique revêtu (CC1690) présente une meilleure rugosité de surface et une force et puissance de coupe inférieure à celles obtenues avec les céramiques non revêtues (CC6090).

Fig.IV.4 3D Response Surfaces for Ra , F_z and P_c .

IV.2.6. Comparaison entre les modèles ANN et RSM

Les tableaux IV.8 et IV.9 montrent les résultats de Ra , F_z et P_c prédits par les modèles RSM et ANN pour les deux céramiques (CC6090 et CC1690) avec les pourcentages de leurs erreurs de prédiction absolue. D'après ces résultats on constate que les modèles ANN fournissent de bons résultats avec de faibles erreurs par rapport aux modèles RSM, nous avons noté que pour le

matériau de coupe CC6090 les valeurs maximales de l'erreur absolu de RSM pour les critères Ra , Fz et Pc sont de (14.73, 27.05 et 29.71) % successivement, alors que les erreurs maximales des modèles ANN sont (5.89, 23.17 et 11.87) %. Pour le deuxième matériau de coupe (CC1690) les erreurs maximales de RSM sont (17.61, 27.21 et 44.56) % et (12.63, 21.79 et 21.89) % pour l'ANN.

Table IV.8 Comparaison entre les résultats de prédiction par RSM et ANN pour CC6090

| N° | Rugosité de surface (Ra) prédite | | Erreur de prédiction absolue (%) | | Effort de coupe (Fz) prédit | | Erreur de prédiction absolue(%) | | Pression de coupe (Pc) prédite | | Erreur de prédiction absolue(%) | |
|----|--------------------------------------|------|----------------------------------|------|---------------------------------|---------|---------------------------------|---------|------------------------------------|---------|---------------------------------|---------|
| | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN |
| 1 | 0,86 | 0,83 | 5,46 | 1,64 | 60.5293 | 67.4871 | 11.1691 | 0.95809 | 294.396 | 270.741 | 0.29680 | 8.30811 |
| 2 | 0,72 | 0,76 | 6,38 | 0,70 | 49.6597 | 60.2601 | 9.54500 | 9.76350 | 317.351 | 308.931 | 6.26166 | 8.74856 |
| 3 | 0,68 | 0,71 | 5,37 | 1,28 | 45.6700 | 51.7100 | 20.8903 | 10.4278 | 358.426 | 518.858 | 29.7132 | 1.74724 |
| 4 | 1,19 | 1,25 | 8,11 | 3,25 | 101.170 | 93.4031 | 0.30768 | 7.39331 | 448.343 | 461.010 | 2.58175 | 5.47981 |
| 5 | 0,98 | 0,93 | 8,05 | 2,30 | 88.4977 | 85.6598 | 12.4923 | 8.88506 | 552.157 | 521.669 | 13.8159 | 7.53148 |
| 6 | 0,86 | 0,84 | 3,51 | 0,97 | 81.8852 | 76.3153 | 7.97111 | 0.62673 | 710.845 | 704.568 | 6.10905 | 5.17204 |
| 7 | 1,62 | 1,55 | 6,20 | 1,56 | 116.537 | 112.428 | 4.08892 | 0.41827 | 440.070 | 446.566 | 9.29373 | 7.95470 |
| 8 | 1,36 | 1,38 | 1,83 | 0,82 | 102.062 | 105.024 | 5.27311 | 8.32883 | 624.743 | 587.972 | 4.49685 | 1.65349 |
| 9 | 1,16 | 1,20 | 2,05 | 1,44 | 92.8272 | 95.8299 | 1.02648 | 2.17498 | 901.045 | 817.871 | 8.75904 | 1.28022 |
| 10 | 0,85 | 0,74 | 13,09 | 1,28 | 131.558 | 126.498 | 2.84412 | 1.11096 | 561.741 | 530.068 | 1.33884 | 4.37494 |
| 11 | 0,71 | 0,72 | 3,24 | 2,04 | 118.583 | 114.961 | 27.0582 | 23.1772 | 731.050 | 643.878 | 27.0209 | 11.8747 |
| 12 | 0,67 | 0,71 | 4,30 | 0,92 | 111.531 | 99.1730 | 12.4764 | 0.01313 | 985.004 | 896.501 | 12.4545 | 2.35043 |
| 13 | 1,21 | 1,30 | 10,40 | 3,76 | 197.523 | 204.912 | 2.54904 | 1.09670 | 876.675 | 915.738 | 0.18756 | 4.25984 |
| 14 | 1,01 | 0,92 | 14,73 | 4,00 | 182.745 | 191.052 | 6.35156 | 2.09462 | 1126.84 | 1136.70 | 6.35881 | 5.53943 |
| 15 | 0,89 | 0,76 | 12,47 | 3,84 | 173.071 | 172.617 | 1.35342 | 1.08771 | 1498.41 | 1468.78 | 0.66089 | 2.62488 |
| 16 | 1,69 | 1,72 | 5,06 | 3,58 | 238.215 | 245.810 | 2.69784 | 0.40463 | 1029.39 | 1069.88 | 2.96889 | 0.84811 |
| 17 | 1,43 | 1,41 | 0,12 | 1,22 | 221.634 | 232.632 | 4.04610 | 0.71526 | 1360.41 | 1421.99 | 4.49035 | 0.16714 |
| 18 | 1,23 | 1,25 | 3,46 | 1,65 | 209.337 | 215.537 | 4.58649 | 1.76063 | 1849.59 | 1883.92 | 4.56314 | 2.79203 |
| 19 | 0,93 | 0,91 | 0,42 | 2,67 | 193.777 | 193.440 | 0.12247 | 0.05148 | 781.387 | 862.980 | 6.83052 | 2.89828 |
| 20 | 0,79 | 0,84 | 6,57 | 1,35 | 178.697 | 185.427 | 6.94794 | 3.44343 | 1097.05 | 1136.97 | 7.36301 | 3.99205 |
| 21 | 0,76 | 0,71 | 7,13 | 0,50 | 168.583 | 172.156 | 1.88948 | 0.18993 | 1563.88 | 1526.94 | 3.03406 | 0.60069 |
| 22 | 1,34 | 1,35 | 2,00 | 3,22 | 285.066 | 283.023 | 3.37479 | 2.63411 | 1257.30 | 1256.57 | 5.21769 | 5.15610 |
| 23 | 1,14 | 1,21 | 5,93 | 0,15 | 268.183 | 273.851 | 2.07280 | 0.00315 | 1653.83 | 1684.46 | 2.07080 | 0.25702 |
| 24 | 1,02 | 1,00 | 3,76 | 5,89 | 255.446 | 259.355 | 1.75496 | 0.25190 | 2238.27 | 2230.32 | 2.54606 | 2.89229 |
| 25 | 1,86 | 1,82 | 3,76 | 1,65 | 351.082 | 339.116 | 0.37518 | 3.04593 | 1571.01 | 1499.72 | 3.65126 | 1.05232 |
| 26 | 1,60 | 1,57 | 1,34 | 0,59 | 332.396 | 326.159 | 1.77786 | 0.13176 | 2048.39 | 2052.67 | 1.70909 | 1.92156 |
| 27 | 1,39 | 1,40 | 0,11 | 0,52 | 317.037 | 307.735 | 3.31320 | 0.28199 | 2750.45 | 2742.15 | 1.46706 | 1.16113 |

Table IV.9 Comparaison entre les résultats de prédiction par RSM et ANN pour CC1690

| N° | Rugosité de surface (Ra) prédite | | Erreur de prédiction absolue (%) | | Effort de coupe (Fz) prédit | | Erreur de prédiction absolue (%) | | Pression de coupe (Pc) prédite | | Erreur de prédiction absolue (%) | |
|----|--------------------------------------|------|----------------------------------|------|---------------------------------|---------|----------------------------------|---------|------------------------------------|---------|----------------------------------|---------|
| | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN |
| 1 | 0,82 | 0,87 | 4,54 | 1,51 | 33.1773 | 48.8039 | 27.2107 | 7.07313 | 109.482 | 222.090 | 44.5693 | 12.4431 |
| 2 | 0,70 | 0,75 | 3,01 | 4,84 | 32.5345 | 45.7309 | 25.6183 | 4.55185 | 203.015 | 292.103 | 24.7336 | 8.29488 |
| 3 | 0,58 | 0,61 | 8,69 | 4,94 | 38.1728 | 26.3160 | 24.2200 | 14.3635 | 283.528 | 261.593 | 4.45013 | 3.63051 |
| 4 | 1,10 | 1,11 | 5,41 | 4,40 | 87.9528 | 80.5735 | 6.85565 | 2.10962 | 400.390 | 342.973 | 12.2559 | 3.84186 |
| 5 | 0,99 | 1,00 | 8,33 | 9,44 | 77.9053 | 76.0692 | 3.55618 | 1.11559 | 503.465 | 438.240 | 8.52459 | 5.53499 |
| 6 | 0,89 | 0,84 | 6,99 | 1,29 | 69.8640 | 53.5560 | 12.9024 | 13.4517 | 597.856 | 617.989 | 9.37601 | 13.0592 |
| 7 | 1,87 | 1,83 | 0,49 | 1,45 | 108.756 | 100.318 | 1.50848 | 6.36728 | 440.472 | 362.615 | 5.12646 | 21.8960 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 8 | 1,77 | 1,77 | 0,50 | 0,44 | 89.3038 | 91.8595 | 8.82755 | 11.9418 | 553.088 | 492.468 | 9.29816 | 2.68132 |
| 9 | 1,69 | 1,66 | 1,64 | 0,26 | 67.5829 | 79.8320 | 11.7485 | 4.24658 | 661.358 | 768.055 | 2.23191 | 13.5409 |
| 10 | 0,65 | 0,57 | 17,61 | 3,35 | 104.029 | 90.6641 | 10.2651 | 21.7940 | 437.217 | 393.661 | 12.9679 | 21.6380 |
| 11 | 0,55 | 0,50 | 5,81 | 3,96 | 96.0787 | 87.3677 | 6.67119 | 3.00012 | 609.031 | 499.916 | 9.65003 | 9.99494 |
| 12 | 0,47 | 0,46 | 5,34 | 2,59 | 91.0872 | 73.1331 | 7.82107 | 13.4314 | 803.406 | 698.412 | 7.66057 | 6.40907 |
| 13 | 0,90 | 0,88 | 2,74 | 0,19 | 171.662 | 160.084 | 11.7013 | 4.16753 | 790.731 | 614.316 | 18.7380 | 7.75295 |
| 14 | 0,82 | 0,82 | 1,05 | 0,81 | 154.307 | 160.234 | 7.53103 | 11.6614 | 972.087 | 794.114 | 9.85070 | 10.2610 |
| 15 | 0,76 | 0,77 | 1,49 | 0,30 | 135.635 | 139.181 | 1.37214 | 4.02240 | 1180.34 | 1151.41 | 0.13188 | 2.57966 |
| 16 | 1,66 | 1,67 | 0,41 | 1,29 | 205.323 | 203.551 | 0.53124 | 1.38951 | 893.419 | 862.754 | 0.1192 | 3.54747 |
| 17 | 1,58 | 1,64 | 4,10 | 0,89 | 178.563 | 188.777 | 2.88093 | 2.67439 | 1084.31 | 1105.46 | 4.36463 | 2.49948 |
| 18 | 1,54 | 1,60 | 6,75 | 3,08 | 146.212 | 155.821 | 14.5756 | 8.96133 | 1306.44 | 1383.41 | 13.5896 | 8.49876 |
| 19 | 0,59 | 0,60 | 4,56 | 3,94 | 165.762 | 146.720 | 9.58804 | 3.00096 | 688.468 | 678.789 | 5.03588 | 3.55923 |
| 20 | 0,52 | 0,53 | 3,52 | 1,16 | 150.504 | 145.904 | 2.58610 | 0.54908 | 938.562 | 869.864 | 3.74163 | 3.85174 |
| 21 | 0,48 | 0,53 | 2,67 | 12,63 | 134.882 | 143.002 | 2.06725 | 3.82789 | 1246.80 | 1248.14 | 2.48113 | 2.59194 |
| 22 | 0,83 | 0,86 | 4,63 | 0,62 | 246.253 | 249.871 | 0.03388 | 1.50363 | 1104.58 | 1178.26 | 3.54843 | 10.4551 |
| 23 | 0,77 | 0,80 | 3,73 | 0,49 | 221.589 | 243.192 | 7.36209 | 1.66900 | 1364.22 | 1479.41 | 7.51432 | 0.29471 |
| 24 | 0,75 | 0,77 | 2,87 | 0,29 | 192.288 | 211.095 | 13.2622 | 4.77877 | 1686.34 | 1852.15 | 13.8857 | 5.41866 |
| 25 | 1,56 | 1,54 | 2,18 | 0,79 | 292.771 | 284.397 | 4.69670 | 7.42268 | 1269.88 | 1490.11 | 4.60608 | 11.9374 |
| 26 | 1,51 | 1,48 | 0,99 | 1,15 | 258.703 | 251.324 | 1.40460 | 1.48780 | 1539.06 | 1588.27 | 2.17247 | 0.95555 |
| 27 | 1,51 | 1,45 | 5,51 | 1,35 | 215.722 | 190.227 | 24.4076 | 9.70453 | 1875.05 | 1610.82 | 22.4167 | 5.16599 |

Afin de bien évaluer Les capacités prédictives des modèles construits par les deux méthodes RSM et ANN, une comparaison en termes d'erreur carrée moyenne (MSE), La racine moyenne des erreurs carrées (RMSE), d'erreur absolue moyenne (MAD), La moyenne absolue des erreurs en pourcentage (MAPE) et le coefficient de détermination (R^2) a été réalisés entre les résultats expérimentaux et prédites. Les formules de différents critères d'erreurs sont présentées dans le tableau IV.10.

Table IV.10 Fonctions d'erreur et ses équations.

| Fonction d'erreur | Equation |
|---|--|
| Erreur absolue moyenne | $MAD = \sum_{t=1}^n \frac{ E_t - P_t }{n} \quad (V.17)$ |
| Erreur absolue moyenne en pourcentage (%) | $MAPE = \sum_{t=1}^n \frac{ (E_t - P_t)/E_t }{n} \times 100 \quad (V.18)$ |
| Erreur quadratique moyenne | $RMSE = \sum_{t=1}^n \sqrt{\frac{(E_t - P_t)^2}{n}} \quad (V.19)$ |
| Coefficient de corrélation | $R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (P_t - E_t)}{\sum_{t=1}^n (P_t - Y_e)^2} \quad (V.20)$ |

n le nombre d'expérience, E_i la valeur expérimentale de la $i^{\text{ème}}$ expérience, P_i la valeur prédite de la $i^{\text{ème}}$ expérience, Y la réponse moyenne observée dans les expériences.

Le tableau IV.11 présente les valeurs de MAD , $MAPE$, $RSME$ et R^2 des modèles mathématiques obtenues à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'approche des réseaux de neurone artificielles (ANN) pour les trois critères de rugosité et pour les deux matériaux testés (CC6090 et CC1690)

Les résultats de ce tableau montrent clairement que les modèles issus de la méthode des réseaux de neurones (ANN) donnent des bons résultats par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse (RSM). On note que le MAPE pour les valeurs prédites par RSM était dans les limites de $\pm 9\%$ et dans les limites de $\pm 7\%$ pour les valeurs prédites par ANN, d'autre part le MAD ne dépassent pas la valeur de 61.11 pour les modèles ANN par contre il atteint la valeur de 73.6 pour les modèles RSM. Pour RSME, on constate que les modèles ANN présentent des faibles valeurs de RSME (entre 0.001 et 2.78) en comparaison des modèles RSM (entre 0.009 et 20.73). On remarque aussi que tous les modèles obtenus par l'approche ANN présentent un coefficient de détermination (R^2) très proche à l'unité ($R^2=0.99$) sauf le modèle de Pc ($R^2=0.96$), alors que les R^2 des modèles obtenus par RSM varient entre 0.94 et 0.98.

Table IV.11 Comparaison entre ANN et RSM.

| | CC6090 | | | | | | CC1690 | | | | | |
|-------------------------|--------|-------|------|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | Ra | | Fz | | Pc | | Ra | | Fz | | Pc | |
| | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN | RSM | ANN |
| MAD | 0.054 | 0.021 | 7.13 | 3.78 | 53.97 | 31.06 | 0.037 | 0.02 | 10.380 | 7.544 | 73.6 | 61.11 |
| MAPE(%) | 5.36 | 1.955 | 5.86 | 3.35 | 6.49 | 3.80 | 2.28 | 2.49 | 9.303 | 6.306 | 9.74 | 7.49 |
| RMSE | 0.012 | 0.001 | 1.69 | 0.22 | 12.83 | 1.35 | 0.009 | 0.001 | 2.96 | 0.36 | 20.73 | 2.78 |
| R^2 | 0.96 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 0.96 | 0.99 | 0.94 | 0.96 |

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de Ra , Fz , Pc et celles estimées par les modèles mathématiques obtenus par les méthodes RSM et l'ANN, est présentée graphiquement sur les figures IV.5. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées par les deux méthodes (RSM et ANN) sont très proches, mais les modèles obtenus par la méthode ANN présentent une très bonne corrélation avec les valeurs expérimentales que les modèles obtenus par la méthode RSM. Cela peut être également confirmé par la figure

IV.6 qui montre que les résidus des modèles ANN sont très inférieurs par rapport à celles de RSM. Cette supériorité de l'approche ANN par rapport à la méthode RSM peut être expliquée par sa capacité énorme à détecter des relations non linéaires. Mais nous devons indiquer qu'en termes d'identification et de classification des facteurs principaux et leurs interactions significantes dans le modèle, la méthode RSM est meilleure par rapport à l'ANN. Donc on constate qu'afin d'établir une meilleure étude statistique en termes de modélisation prédictive et pour identifier les facteurs influents sur la réponse étudiée avec ses contributions, Il est recommandé d'utiliser l'approche ANN et la méthodologie RSM car les deux méthodes sont complémentaires l'une à l'autre.

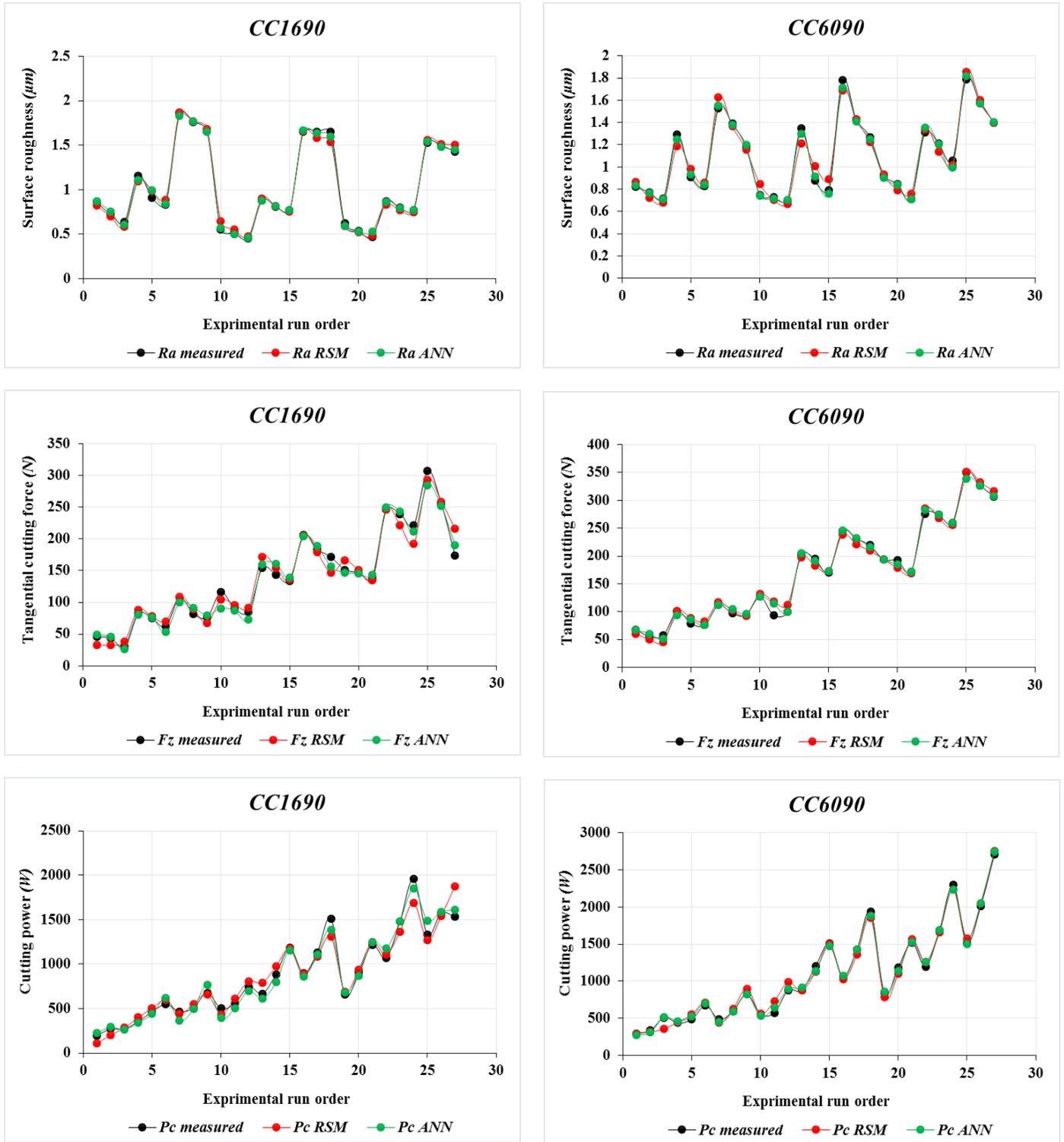


Fig.IV.5. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées par RSM et ANN

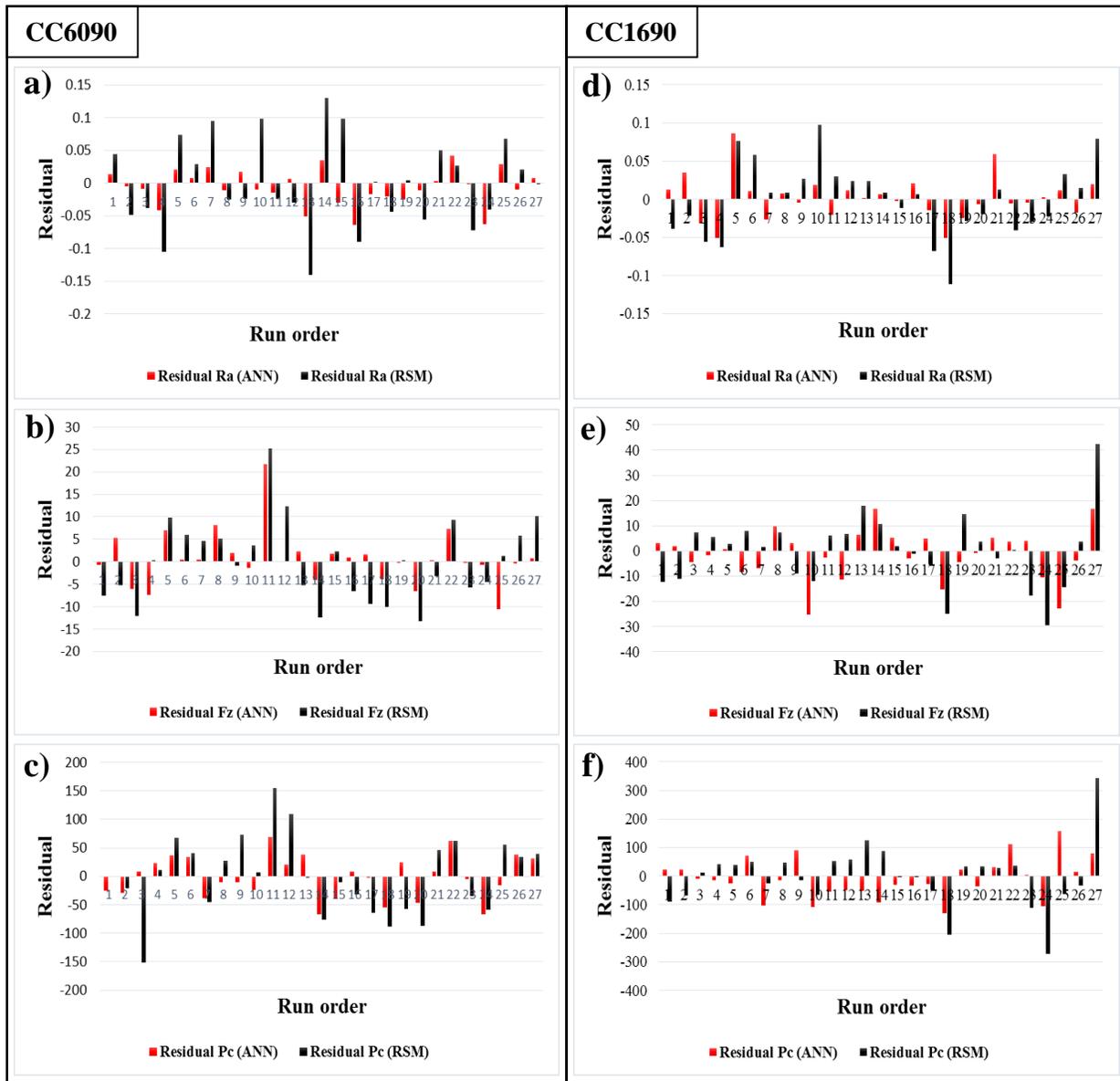


Fig.IV.6 Comparaison entre les résidus des modèles RSM et ANN pour Ra, Fz et Pc.

IV.2.7. Tests de validation

L'étape de validation est très importante pour vérifier l'adéquation des modèles mathématiques trouvés par les méthodes RSM et ANN. Pour la validation nous avons réalisé quatre essais supplémentaires avec des conditions de coupe qui sont différentes à ceux du tableau IV. 2. La figure IV.7 (a, b et c) présente les résultats de cette validation pour les deux céramiques testés. On remarque que l'écart entre les valeurs expérimentales et prédites est très faible et spécialement pour les valeurs prédites par ANN. La figure IV.7 (d, e et f) illustre les valeurs de MAPE de la méthode RSM et ANN enregistrées lors de ces tests de validation. D'après ces résultats, on remarque que les pourcentages des erreurs trouvés par RSM sont compris entre (1.28 et 12) % et

entre (0.53 et 6.13)% pour l'ANN. Ces résultats de validation nous permettent de confirmer la cohérence des modèles trouvés soit par ANN ou RSM et confirment aussi la fiabilité des modèles ANN par rapport à ceux d'RSM en termes de prédiction. Mais nous tenons à préciser que ces modèles sont valides uniquement dans la plage de variation des conditions de coupe indiquées au tableau IV.2.

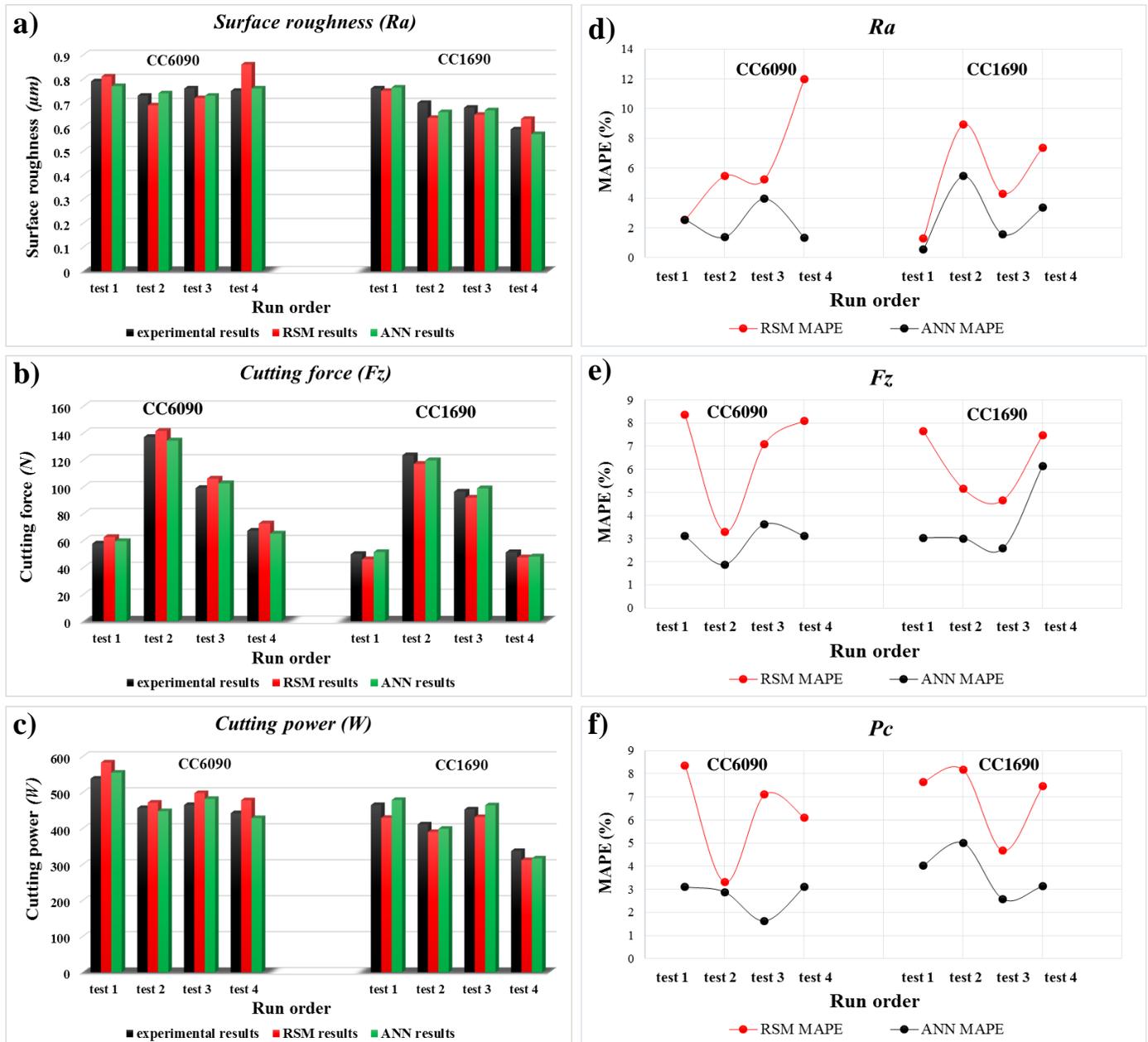


Fig.IV.7 Tests de validation des modèles RSM et ANN pour Ra, Fz et Pc.

IV.3. Conclusion

L'étude statistique et de modélisation de Ra , Fz , MRR et Pc à l'aide de la méthode RSM, ANN est permet de déterminer les modèles mathématiques, leurs coefficients de corrélation et leurs constantes relatives. Ces technique définissent le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur Ra , Fz , MRR et Pc lors du tournage de la fonte grise FGL 250 usinée par la céramique en nitrure de silicium $-Si_3N_4-$ revêtue et non revêtue (CC6090 et CC1690). L'étude débouche sur les conclusions suivantes :

- L'ANOVA montre que :
 - l'avance par tour affecte la rugosité d'une manière considérable avec des contributions entre (65 et 74)% et (73 et 86)% respectivement pour la céramique CC6090 et CC1690. Elle est suivie par la vitesse de coupe avec des contributions entre (12 et 15)% et (3 et 10)%, la profondeur de passe vient en troisième position avec des contributions entre (2.5 et 4.5)% et (3.3 et 7.7)%.
 - L'effort de coupe est largement influencé par la profondeur de coupe avec une contribution comprise entre (64,73 et 69,63)%, suivie de la vitesse d'avance avec une contribution entre (20,09 et 22,78)%, la vitesse de coupe arrive en troisième position avec une contribution entre (1.3 et 4,28)%. L'interaction $ap \times f$ est également significative avec une contribution comprise entre (1,45 et 3,74)%.
 - Tous les paramètres de coupe (Vc , f et ap) avec toutes les interactions ont une influence sur Pc , la profondeur de passe elle a le plus grand influence avec une contribution de (57.71 et 61.87) % suivi par l'avance avec une contribution de (18.76 et 17.71) %. La vitesse de coupe vient en troisième position avec une contribution de (16.4 et 11.75) %.
 - Les trois éléments de régime de coupe et leurs interactions ont tous un effet significatif sur MRR . la profondeur de passe vient en premier lieux avec une contribution de 41.45%. Suivi par Fz avec une contribution de 30.45%. La vitesse de coupe vient en troisième position avec une contribution de 19.48%.
- Les modèles mathématiques développés pour Ra , Fz et Pc à l'aide de la méthode RSM et ANN sont très utiles pour la prédiction. Une corrélation étroite entre les valeurs prédites et mesurées a été trouvée, les (R^2) varient entre (0.95 et 0.99).

- La comparaison entre les deux techniques ANN et RSM montre que l'approche ANN a une grande capacité de prédiction par rapport à la méthode RSM, par contre la RSM est très utile en termes d'identification des paramètres de coupe et leurs interactions qui influent sur les réponses étudiées.
- Les tests de validation des différents modèles de prédiction trouvés par ANN et RSM confirment que ces modèles sont capables de prédire les critères Ra , Fz et Pc .
- En général, la céramique revêtue (CC1690) génère des faibles efforts et puissance de coupe, des meilleurs états de surface par rapport à la céramique non revêtue (CC6090).

Chapitre V

*Modélisation de V_b , F_z
et R_a par la méthode
de Taguchi*

V.I. Introduction

Dans ce chapitre on présente, les résultats de l'étude de l'impact des conditions de coupe (ap , f , V_c), la distance usinée et le type de matériaux (céramique en nitrure de silicium revêtue et non revêtue) sur l'usure en dépouille (V_b), Effort de coupe tangentiel (F_z) et rugosité de surface (R_a) obtenues lors du tournage de la fonte FGL 250. Les essais expérimentaux sont planifiés selon le plan de Taguchi L_{18} , la modélisation des paramètres de coupe a été faite à l'aide de la technique MSR.

V.2. Analyse et discussion des résultats

Le tableau V.1 présente les conditions de coupe (V_c , f , ap , distance usinée et le type du matériau), et les résultats expérimentaux correspondants aux R_a , F_z et V_b suivant le plan de Taguchi L_{18} .

Table.V.1 Matrice de planification de Taguchi L_{18} ($1^2 \times 4^3$)

| N° | Facteurs d'entrée | | | | | Paramètres de sortie | | |
|----|-------------------|-----------|-------------|---------------|----------------------|----------------------|-------------------------|------------|
| | Matériau | ap (mm) | f (mm/tr) | V_c (m/min) | Distance usinée (mm) | F_z (N) | R_a (μm) | V_b (mm) |
| 1 | CC6090 | 0.2 | 0.08 | 270 | 300 | 41.06 | 0.975 | 0.14 |
| 2 | CC6090 | 0.2 | 0.14 | 370 | 600 | 50.4 | 1.352 | 0.225 |
| 3 | CC6090 | 0.2 | 0.2 | 530 | 900 | 70.2 | 2.806 | 0.364 |
| 4 | CC6090 | 0.4 | 0.08 | 270 | 600 | 134.91 | 1.11 | 0.18 |
| 5 | CC6090 | 0.4 | 0.14 | 370 | 900 | 192.25 | 1.509 | 0.291 |
| 6 | CC6090 | 0.4 | 0.2 | 530 | 300 | 142.84 | 2.208 | 0.219 |
| 7 | CC6090 | 0.6 | 0.08 | 370 | 300 | 215.5 | 0.799 | 0.195 |
| 8 | CC6090 | 0.6 | 0.14 | 530 | 600 | 230.13 | 1.203 | 0.315 |
| 9 | CC6090 | 0.6 | 0.2 | 270 | 900 | 383.23 | 3.489 | 0.314 |
| 10 | CC1690 | 0.2 | 0.08 | 530 | 900 | 64.64 | 0.869 | 0.268 |
| 11 | CC1690 | 0.2 | 0.14 | 270 | 300 | 25.11 | 1.236 | 0.069 |
| 12 | CC1690 | 0.2 | 0.2 | 370 | 600 | 40.73 | 1.626 | 0.136 |
| 13 | CC1690 | 0.4 | 0.08 | 370 | 900 | 75.17 | 1.11 | 0.211 |
| 14 | CC1690 | 0.4 | 0.14 | 530 | 300 | 75.22 | 1.25 | 0.112 |
| 15 | CC1690 | 0.4 | 0.2 | 270 | 600 | 105.66 | 1.594 | 0.121 |
| 16 | CC1690 | 0.6 | 0.08 | 530 | 600 | 128.92 | 0.697 | 0.18 |
| 17 | CC1690 | 0.6 | 0.14 | 270 | 900 | 182.63 | 1.466 | 0.183 |
| 18 | CC1690 | 0.6 | 0.2 | 370 | 300 | 110.61 | 1.441 | 0.095 |

V.2.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour R_a , F_z , et V_b sont exposés dans les tableaux V.2, V.3 et V.4. L'analyse est effectuée pour un niveau de signification $\alpha = 0,05$ (c.-à-d. pour un

niveau de confiance de 95%). Une faible valeur de Probabilité ($\leq 0,05$) indique que les modèles obtenus sont considérés comme statistiquement significatifs, ce qui est souhaitable.

Le tableau V.2 exhibe les résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe tangentiel (F_z). D'après ce tableau on peut remarquer que le modèle adopté pour cette analyse est linéaire avec interactions, car il présente une grande précision par rapport aux autres modèles. L'analyse des résultats montre que tous les facteurs d'entrée et leurs interactions sont significatifs. La profondeur de passe est le paramètre le plus significatif, sa contribution est de 48.22 %, la vitesse d'avance vient en deuxième position avec une contribution de 22.62 suivi par le type de matériau avec un taux de 5.95 %. L'influence de matériau de coupe peut être expliquée partiellement par l'existence du revêtement en TiN sur la plaquette en CC1690, ce dernier facilite l'écoulement du copeau et retarde l'usure ce qui conduit à minimiser les frottements et par conséquent les efforts de coupe [51]. La vitesse de coupe influe sur F_z avec un impact de 3.65, Car avec l'augmentation de la vitesse de coupe, les températures dans la zone de formation du copeau sont relativement grandes. Elles rendent généralement le matériau usiné plus plastique, ce qui entraîne une diminution des efforts de coupe nécessaires à la déformation du copeau d'une part et elle améliore les conditions de frottement aux interfaces outil-pièce et copeau-outil [51]. Les interactions $A \times B$, $B \times D$, $B \times E$ et $C \times D$ sont aussi significatives avec une contribution de 4.57 %, 2.45 %, 3.33 % et 2.29 % respectivement. La distance d'usinage vient en dernier lieu avec une contribution de 2.44%, l'augmentation de la distance d'usinage et par conséquent le temps d'usinage, induit une augmentation de l'usure (V_b) pour les deux céramiques. Au fur et à mesure que l'outil travaille, la température à l'interface outil/pièce et outil/copeau s'élève et conduit à l'accélération des mécanismes d'usure par abrasion et par diffusion [56, 57].

Table V.2 ANOVA pour F_z

| Source | SC | DF | MC | F-value | Prob. | Cont. % | Remarques |
|-------------------|-------------|----|-------------|----------|----------|---------|--------------|
| Model | 134899.1075 | 9 | 14988.7897 | 103.33 | < 0.0001 | | Significatif |
| A : Matériaux | 8105.798084 | 1 | 8105.798084 | 55.08 | 0.0001 | 5.957 | Significatif |
| B : a_p , mm | 6.56E+04 | 1 | 6.56E+04 | 4.73E+02 | < 0.0001 | 48.22 | Significatif |
| C : f , mm/tr | 30784.25761 | 1 | 30784.25761 | 216.08 | < 0.0001 | 22.62 | Significatif |
| D : V_c , m/min | 4978.196147 | 1 | 4978.196147 | 34.32 | 0.0003 | 3.658 | Significatif |
| E : Distance, mm | 3326.61709 | 1 | 3326.61709 | 22.94 | 0.0018 | 2.444 | Significatif |
| $A \times B$ | 6223.22446 | 1 | 6223.22446 | 42.90 | 0.0002 | 4.573 | Significatif |
| $B \times D$ | 3.34E+03 | 1 | 3.34E+03 | 23.03 | 0.0014 | 2.455 | Significatif |
| $B \times E$ | 4532.785796 | 1 | 4532.785796 | 31.24 | 0.0005 | 3.331 | Significatif |
| $C \times D$ | 3127.723955 | 1 | 3127.723955 | 21.5 | 0.0017 | 2.298 | |
| Résiduel | 1160.393627 | 8 | 145.049203 | | | | |
| Cor total | 136059.5012 | 17 | | | | | |

Les résultats de l'ANOVA pour R_a sont présentés dans le tableau V.3, ces résultats permettent de classer les trois éléments du régime de coupe (V_c , f et ap), le matériau de coupe, la distance d'usinage et leurs interactions par ordre d'influence sur la rugosité R_a . Est constaté que l'avance est le facteur déterminant de la qualité des surfaces usinées avec une contribution de 42.57%. La surface engendrée comporte des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce [51]. Ces sillons sont autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée, d'où la nécessité d'employer de faibles avances lors du tournage de finition. La vitesse de coupe vient en deuxième position avec une contribution de 11.81 %, l'augmentation de la vitesse de coupe améliore la qualité de la surface usinée car la rugosité se stabilise à cause de la diminution des efforts de coupe aux grandes vitesses traduisant ainsi une stabilité relative du système usinant [40]. La distance d'usinage affecte la rugosité de surface de 4.327 %, l'augmentation de la distance d'usinage accélère l'usure (VB) est par conséquent l'endommagement de l'arête tranchante de l'outil. Plus l'arête est usée, plus elle devient moins vive et des arrachements de la matière de la pièce sont plus fréquents, ce qui conduit à la dégradation de l'état de surface. Des résultats et des commentaires comparables sont rapportés par [59, 60]. Le matériau de coupe et l'interaction $C \times E$ sont aussi significatifs avec une contribution de 3.85 % et 2.8 % respectivement. La profondeur de passe et les autres interactions n'ont aucun effet sur la rugosité de surface car leurs valeurs de probabilités sont supérieures à 0.005. Des résultats semblables sont rapportés par M.A. Yallese et H. Bouchelaghem [59, 60].

Table V.3 ANOVA pour R_a

| Source | SC | DF | MC | F-value | Prob. | Cont.% | Remarques |
|--------------------------|------------|----|------------|------------|----------|--------|------------------|
| Model | 8.13 | 8 | 1.02 | 22.07 | < 0.0001 | | Significatif |
| <i>A</i> : Matériaux | 0.33 | 1 | 0.33 | 7.26 | 0.0246 | 3.859 | Significatif |
| <i>B</i> : ap , mm | 1.182E-004 | 1 | 1.182E-004 | 2.568E-003 | 0.9607 | 0.001 | Non significatif |
| <i>C</i> : f , mm/tr | 3.64 | 1 | 3.64 | 79.08 | < 0.0001 | 42.57 | Significatif |
| <i>D</i> : V_c , m/min | 1.01 | 1 | 1.01 | 22.01 | 0.0011 | 11.81 | Significatif |
| <i>E</i> : Distance, mm | 0.37 | 1 | 0.37 | 8.06 | 0.0194 | 4.327 | Significatif |
| $A \times C$ | 0.22 | 1 | 0.22 | 4.70 | 0.0583 | 2.570 | Non significatif |
| $B \times D$ | 6.075E-003 | 1 | 6.075E-003 | 0.13 | 0.7248 | 0.071 | Non significatif |
| $C \times E$ | 0.24 | 1 | 0.24 | 5.29 | 0.0470 | 2.807 | Significatif |
| Résiduel | 0.41 | 9 | 0.046 | | | | |
| Cor total | 8.55 | 17 | | | | | |

Le tableau V.4 expose les résultats de l'ANOVA pour l'usure en dépouille (V_b). La classification de l'impact des facteurs principaux sur l'usure en dépouille est comme suite : la vitesse de coupe est le paramètre dominant avec une contribution de 34.43 % suivi par le matériau de coupe avec

un taux de 25.31 % et en dernier lieu la distance d'usinage avec une contribution de 23.10 %. L'augmentation de la vitesse de coupe et la distance d'usinage provoque une augmentation de la température dans l'interface outil-pièce-copaux ainsi que les efforts de coupe s'intensifient, donnant lieu à un mécanisme associant l'abrasion au phénomène de la diffusion. Par conséquent, la géométries de l'arête tranchante de l'outil se modifier et l'usure en dépouille augmente [51]. L'effet du matériau de coupe sur l'usure en dépouille réside dans la présence d'une couche de revêtement en (TiN) dans la céramique CC1690. Ce revêtement jeu un rôle d'une barrière qui permet d'améliorer la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur l'outil pour son évacuation grâce à ça grande dureté (jusqu'à 3200 HV) et ça faible coefficient de frottements [85]. Les interactions $A \times D$, $A \times E$ et $D \times E$ sont aussi significatifs avec une contribution de 3.79, 1.28 et 2.66 respectivement. La profondeur de passe et autres interaction n'ont aucune influence sur l'usure en dépouille (V_b).

Table V.4 ANOVA pour V_b

| Source | SC | DF | MC | F-value | Prob. | Cont.% | Remarques |
|---------------------|------------|----|------------|---------|----------|--------|------------------|
| Model | 0.11712413 | 14 | 0.00836601 | 25.93 | < 0.0001 | | Significatif |
| A : Matériaux | 0.02989876 | 1 | 0.02989876 | 92.62 | < 0.0001 | 25.31 | Significatif |
| B : ap , mm | 0.0001926 | 1 | 0.0001926 | 0.596 | 0.496 | 0.163 | Non significatif |
| C : f , mm/tr | 6.38E-07 | 1 | 6.38E-07 | 0.001 | 0.967 | 0.0005 | Non significatif |
| D : V_c , m/min | 0.0406619 | 1 | 0.0406619 | 126.06 | < 0.0001 | 34.43 | Significatif |
| E : Distance, mm | 0.02728721 | 1 | 0.02728721 | 84.18 | < 0.0001 | 23.10 | Significatif |
| $A \times C$ | 0.00026339 | 1 | 0.00026339 | 0.816 | 0.432 | 0.223 | Non significatif |
| $A \times D$ | 0.00448111 | 1 | 0.00448111 | 13.88 | 0.003 | 3.794 | Significatif |
| $A \times E$ | 0.00151872 | 1 | 0.00151872 | 4.707 | 0.042 | 1.286 | Significatif |
| $B \times C$ | 0.00028849 | 1 | 0.00028849 | 0.894 | 0.414 | 0.244 | Non significatif |
| $B \times D$ | 4.0287E-06 | 1 | 4.0287E-06 | 0.0124 | 0.918 | 0.003 | Non significatif |
| $B \times E$ | 2.4319E-05 | 1 | 2.4319E-05 | 0.0753 | 0.801 | 0.020 | Non significatif |
| $C \times D$ | 0.00025268 | 1 | 0.00025268 | 0.783 | 0.441 | 0.213 | Non significatif |
| $C \times E$ | 0.00023899 | 1 | 0.00023899 | 0.740 | 0.452 | 0.202 | Non significatif |
| $D \times E$ | 0.003146 | 1 | 0.003146 | 9.751 | 0.0050 | 2.664 | Significatif |
| Résiduel | 0.00096787 | 3 | 0.00032262 | | | | |
| Cor total | 0.118092 | 17 | | | | | |

V.2.2. Graphes des effets principaux

La figure V.1 illustre l'effet de perturbation pour les paramètres de sortie F_z , R_a et V_b en fonction des paramètres d'entrée. Les courbes sont représentées par les différents facteurs tels que le matériau de coupe (A), la profondeur de coupe (B), l'avance par tour (C), la vitesse de coupe (D) et la distance d'usinage (D).

D'après la figure V.1.a, nous observons une augmentation de F_z avec l'accroissement de la profondeur de passe, la vitesse d'avance et la distance d'usinage, mais la droite qui représente l'évolution de F_z a la grande pente cela montre le grand impact de la profondeur de passe. D'autre part l'augmentation de la vitesse de coupe le changement de matériau de coupe de 1 à 2 (de céramique non revêtue à la céramique revêtue) provoque une diminution de l'effort de coupe tangentiel (F_z).

Pour la rugosité de surface R_a (Figure V.1.b), on remarque une élévation intensive de cette dernière avec l'accroissement de la vitesse d'avance et dans une moindre mesure avec l'augmentation de la distance d'usinage, par contre l'augmentation de la vitesse de coupe et le passage de la céramique non revêtue à la céramique revêtue provoque une diminution du critère de rugosité R_a . En outre, la rugosité de surface est strictement stable avec l'augmentation de la profondeur de passe.

Les courbes de la figure V.1.c montre un accroissement de l'usure en dépouille avec l'augmentation de la vitesse de coupe et la distance d'usinage, mais la courbe de la vitesse de coupe a la plus grande pente ce qui confirme sa grande influence. Par ailleurs, le revêtement sur le matériau de coupe provoque une grande diminution de l'usure en dépouille, par contre la variation de la profondeur de passe et la vitesse d'avance n'ont aucune influence sur l'usure V_b . Ces courbes confirment les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) précédente.

Actual Factors
 A: Matériau = 1.47297
 B: a_p = 0.383784
 C: f = 0.14
 D: V_c = 370
 E: Distance = 600

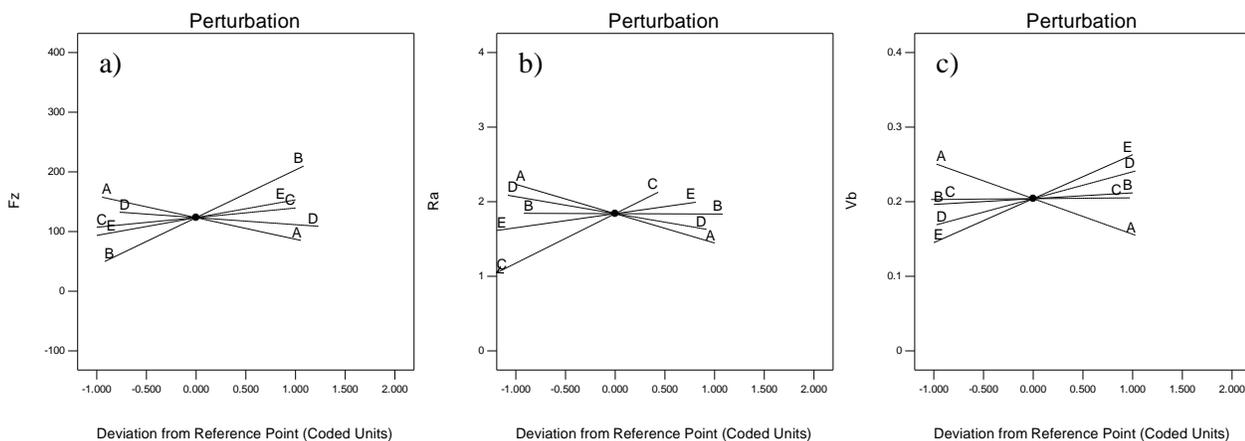


Fig. V.1 Graphes des effet principaux pour F_z , R_a et V_b .

V.2.3. Modélisation des paramètres de coupe :

L'analyse de régression de Fz , Ra et Vb en fonction de Vc , f , ap , matériau de coupe (A), et distance d'usinage (E) est donnée par les modèle (V.1, V.2 et V.3), le choix du modèle mathématique est lié principalement à la précision prédictive du modèle choisi. Les modèles adéquates pour notre cas d'étude sont linéaires avec interaction, leurs coefficients de corrélation sont les suivants : ($R^2_{Fz}=0.99$, $R^2_{Ra}=0.95$, $R^2_{Vb}=0.99$).

$$\begin{aligned} Ra = & -1,9497 + 1,6783 \times A + 3,2335 \times ap + 24,03485 \times f + 0,00147 \times Vc \\ & - 0,00177 \times E - 14,272679 \times A \times f - 0,008044 \times ap \times Vc + 0,011884 \times f \times E \end{aligned} \quad (V.1)$$

$$\begin{aligned} Fz = & -328,98556 + 5,392954 \times A \times 859,251604 \times ap \times 1595,351889 \times f \times 1,004 \times Vc \\ & - 0,187407 \times E - 246,340612 \times A \times ap - 1,15643 \times ap \times Vc + 0,54584 \times ap \times E \\ & - 3,69959 \times f \times Vc \end{aligned} \quad (V.2)$$

$$\begin{aligned} Vb = & +0,041942 + 0,060846 \times A + 0,039268 \times ap - 0,491689 \times f + 0,000308 \times Vc \\ & + 0,000047 \times E - 0,092133 \times A \times ap - 0,450453 \times A \times f - 0,000149 \times A \times Vc \\ & + 0,000024 \times A \times E + 1,41010 \times ap \times f + 0,000208 \times ap \times Vc \end{aligned} \quad (V.3)$$

Les modèles mathématiques de Fz , Ra et Vb pour chaque matériau et leurs coefficients de corrélation R^2 sont présentés par les équations (V.4 à V.9) :

$$\begin{aligned} Ra_{CC6090} = & -0.27138 + 3.23351 ap + 9.76217 f + 0.00147Vc - 0.00177 E \\ & - 0.008044 ap \times Vc + 0.011885 f \times E \end{aligned} \quad (V.4)$$

$$\begin{aligned} Ra_{CC1690} = & 1.40696 + 0.00323351ap - 0.00451051 f + 0.0014775 Vc - 0.0017714 E \\ & - 0.0080442 ap \times Vc + 0.011885 f \times E \end{aligned} \quad (V.5)$$

$$\begin{aligned} Fz_{CC6090} = & -350.83885 + 622.63393 B + 1803.29237 C + 1.10849 D - 0.20583 E \\ & - 1.23253 B \times D + 0.56445 B \times E - 4.18819 C \times D \end{aligned} \quad (V.6)$$

$$\begin{aligned} Fz_{CC1690} = & -353.69987 + 385.08796 B + 1803.29237 C + 1.10849 D - 0.20583 E \\ & - 1.23253 B \times D + 0.56445 B \times E - 4.18819 C \times D \end{aligned} \quad (V.7)$$

$$\begin{aligned} Vb_{CC6090} = & 0.012024 - 0.021507 ap - 0.25758 f + 4.83150E - 004 Vc + 4.26464E \\ & - 005 E + 1.10925 ap \times f - 7.87990E - 005 ap \times Vc - 1.09151E - 004 ap \times E \\ & - 1.29512E - 003 f \times Vc + 8.58272E - 004f \times E + 1.76547E - 007 Vc \times E \end{aligned} \quad (V.8)$$

$$\begin{aligned}
 V_{b_{CC1690}} = & 0.037693 - 0.021507 a_p - 0.60570 f + 2.83821 E - 004 V_c + 5.49936 \times 10^{-5} E \\
 & + 1.10925 a_p \times f - 7.87990 \times 10^{-5} a_p \times V_c - 1.09151 \times 10^{-4} a_p \times E - 1.29512 \times 10^{-3} f \times V_c \\
 & + 8.58272 \times 10^{-4} f \times E + 1.76547 \times 10^{-7} V_c \times E
 \end{aligned} \quad (V.9)$$

V.2.4. Surfaces de réponse 3D

La figure V.2 montre les surface de réponse 3D de F_z , R_a et V_b , ces surfaces permettent de présenté l'évolution du paramètre étudié en fonction de deux facteurs à la fois. Les résultats présentés sur cette figure montrent que l'effort de coupe tangentiel (F_z) augmente considérablement avec l'augmentation de la profondeur de passe et l'avance par tour, par contre l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une légère diminution de F_z , on remarque aussi que la céramique revêtue (matériau 2) génère des efforts de coupe faibles par rapport au céramique non revêtue (matériau 1). La figure V.2 montre les surfaces de réponse 3D pour le paramètre R_a , d'après cette figure en remarque une grande augmentation de R_a avec l'accroissement de l'avance par tour et dans une moindre mesure avec l'augmentation de la distance d'usinage. D'autre part la profondeur de passe n'a aucune influence sur la rugosité R_a , cette figure montre également que la plaquette CC1690 engendre des valeurs de R_a un peu moins par rapport aux celles de la plaquette CC6090. Les surfaces de réponse 3D pour l'usure en dépouille (V_b) sont exhibées dans la figure V.2.c, on remarque que la vitesse de coupe et la distance d'usinage sont les facteurs les plus influés sur V_b , suivi par le matériau de coupe. Par contre la profondeur de passe ne présente aucun effet sur l'usure en dépouille.

Globalement, en comparant les résultats de F_z , R_a et V_b obtenus par les deux plaquettes de coupe testées, on remarque clairement que la céramique revêtue (CC1690) plus performante que la céramique non revêtue on terme d'effort de coupe, rugosité de surface et résistance à l'usure. La supériorité de la céramique revêtue (CC1690) réside dans la couche de revêtement (**TiN**), qui présente un faible coefficient de frottement et donne au matériau de l'outil une meilleure résistance à l'usure [58].

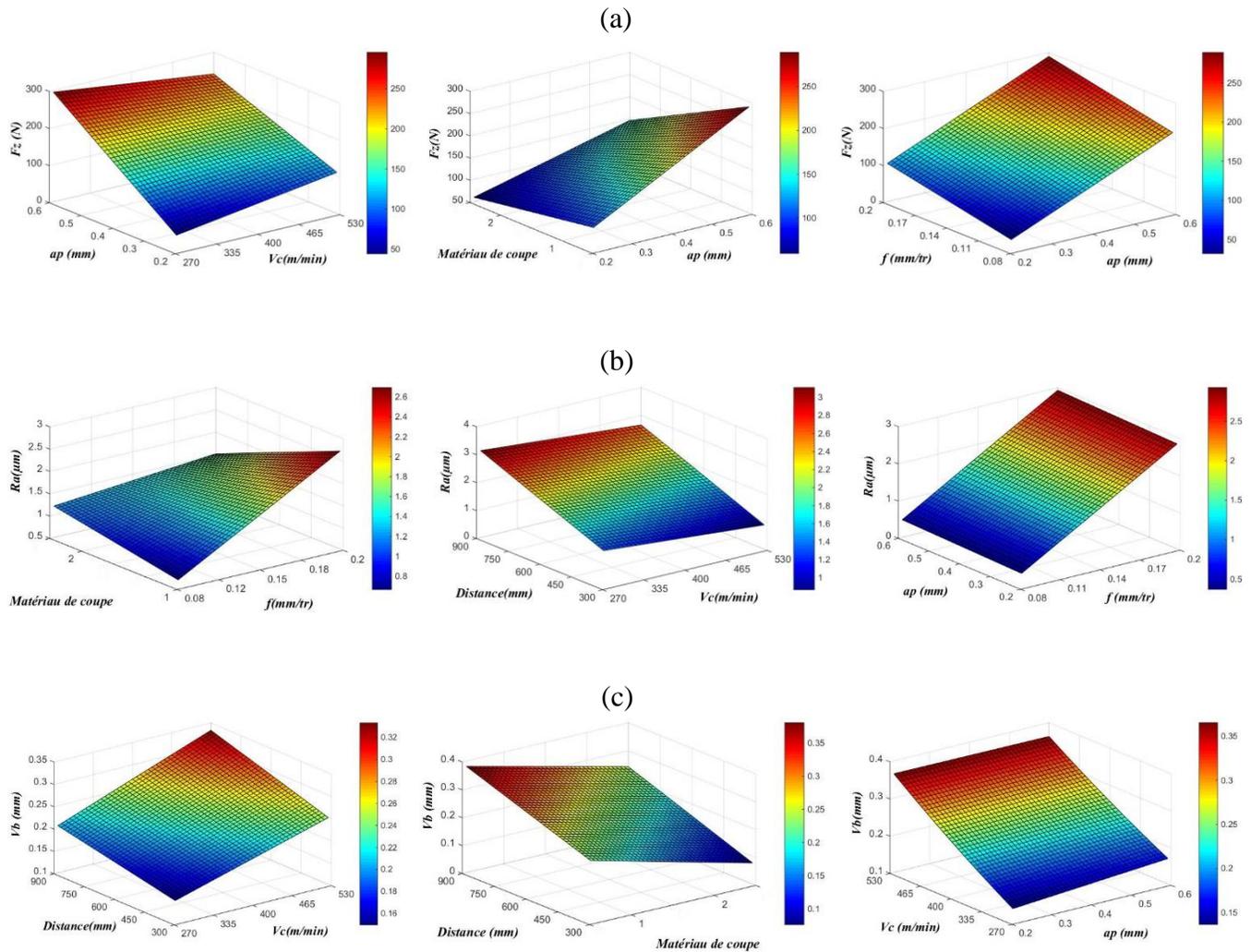


Fig. V.2 Surfaces de réponse 3D pour F_z , R_a et V_b .

V.2.5. Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'effort de coupe tangentiels (F_z), rugosité de surface (R_a), l'usure en dépouille (V_b) et celles estimées par les modèles mathématiques (linéaire) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR) en terme d'erreur absolue, est présentée dans le tableau V.5. L'analyse de résultats de ce tableau montre que les valeurs mesurées expérimentalement et celles prédites sont très proche, les valeurs des erreurs absolues maximales sont les suivant : 19.626 pour F_z , 0.277 pour R_a et 0.0014 pour V_b . La présentation graphique de cette comparaison est exposée sur les figures V.3 (a, b et c), cette figure confirme les résultats du tableau V.5, les courbes des valeurs mesurées et estimées sont presque identiques.

Table V.5 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour Rz, Ra et Vb

| Fz Exp. (N) | Fz.Pre. (N) | Erreur absolue | Ra.Exp. (μm) | Ra. Pre. (μm) | Erreur absolue | Vb.Exp. (mm) | Vb.Pre. (μm) | Erreur absolue |
|-------------|-------------|----------------|---------------------------|----------------------------|----------------|--------------|---------------------------|----------------|
| 41.06 | 31.87 | 9.191 | 0.975 | 0.875 | 0.100 | 0.14 | 0.144 | 0.0042 |
| 50.4 | 69.66 | 19.262 | 1.352 | 1.629 | 0.277 | 0.225 | 0.232 | 0.0073 |
| 70.2 | 65.03 | 5.172 | 2.806 | 2.803 | 0.003 | 0.364 | 0.368 | 0.0044 |
| 134.91 | 134.03 | 0.877 | 1.11 | 0.841 | 0.269 | 0.18 | 0.181 | 0.0015 |
| 192.25 | 181.45 | 10.802 | 1.509 | 1.648 | 0.139 | 0.291 | 0.296 | 0.0045 |
| 142.84 | 144.72 | 1.883 | 2.208 | 2.234 | 0.026 | 0.219 | 0.222 | 0.0030 |
| 215.5 | 219.06 | 3.557 | 0.799 | 0.964 | 0.165 | 0.195 | 0.188 | 0.0070 |
| 230.13 | 241.43 | 11.299 | 1.203 | 1.196 | 0.007 | 0.315 | 0.306 | 0.0093 |
| 383.23 | 373.27 | 9.957 | 3.489 | 3.262 | 0.227 | 0.314 | 0.305 | 0.0087 |
| 64.64 | 65.00 | 0.365 | 0.869 | 0.885 | 0.016 | 0.268 | 0.266 | 0.0023 |
| 25.11 | 23.78 | 1.329 | 1.236 | 1.354 | 0.118 | 0.069 | 0.063 | 0.0056 |
| 40.73 | 39.38 | 1.353 | 1.626 | 1.466 | 0.160 | 0.136 | 0.122 | 0.0140 |
| 75.17 | 74.71 | 0.456 | 1.11 | 0.957 | 0.153 | 0.211 | 0.202 | 0.0091 |
| 75.22 | 73.51 | 1.715 | 1.25 | 1.114 | 0.136 | 0.112 | 0.112 | 0 |
| 105.66 | 112.46 | 6.805 | 1.594 | 1.692 | 0.098 | 0.121 | 0.133 | 0.0123 |
| 128.92 | 120.94 | 7.977 | 0.697 | 0.719 | 0.022 | 0.18 | 0.191 | 0.0111 |
| 182.63 | 195.07 | 12.444 | 1.466 | 1.714 | 0.248 | 0.183 | 0.190 | 0.0067 |
| 110.61 | 103.83 | 6.784 | 1.441 | 1.387 | 0.054 | 0.095 | 0.096 | 0.0014 |

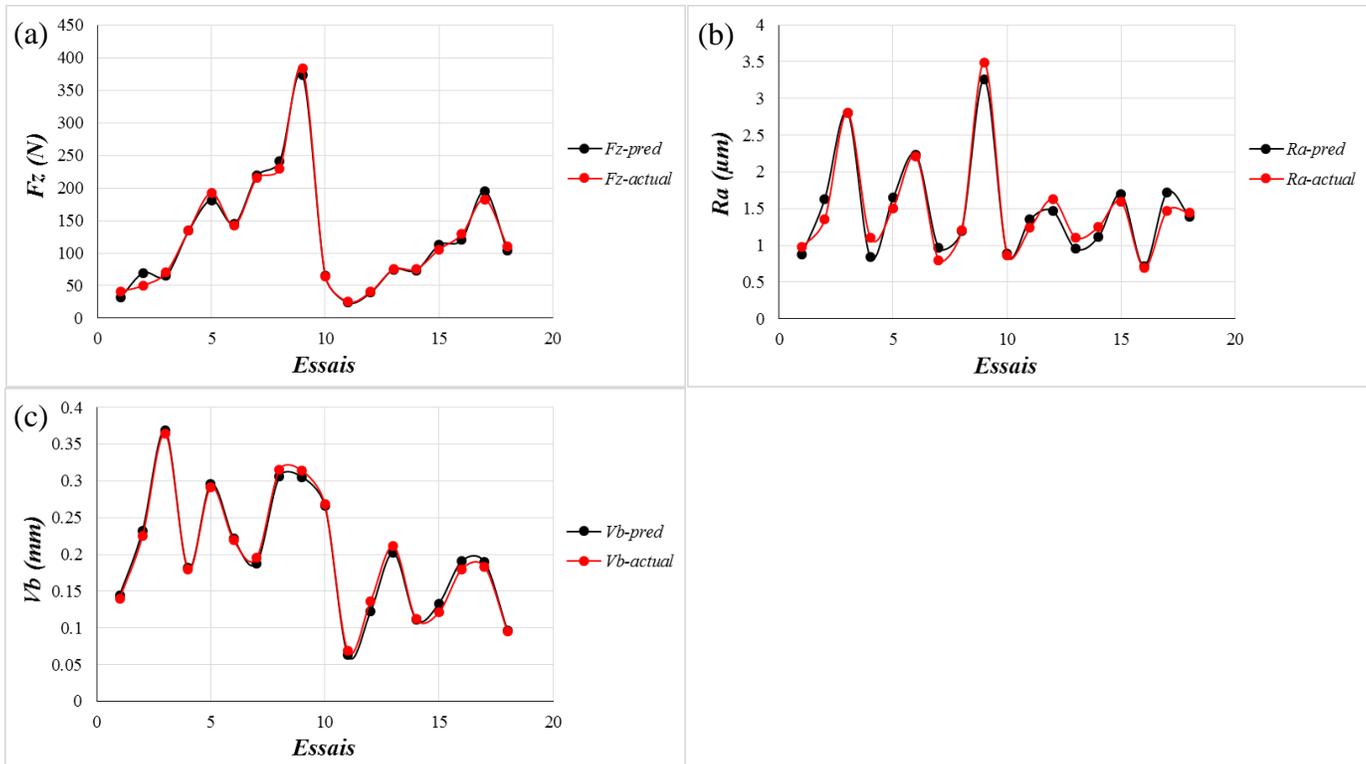


Fig. V.3 Comparaison entre les résultats de Fz, Ra et Vb, mesurés et estimés.

Les figures V.4 et V.5 montre l'analyse résiduelle pour la vérification de l'adéquation des modèles mathématiques obtenue. Sur les figures, les points en couleur indiquent les valeurs de Fz , Ra et Vb obtenues expérimentalement. L'analyse des courbes de la probabilité normale (Figure V.4) de Fz (a), Ra (b), et Vb (c) montre clairement que les résidus se trouvent très proches par rapport à la ligne droite de la normalité (sauf la valeur de l'essai 17 pour Vb), ce qui implique que les erreurs sont distribuées normalement. La figure V.5 montre les résidus par rapport aux 18 essais expérimentaux réalisés de Fz (a), Ra (b), et Vb (c). Les résidus ne présentent pas de tendance évidente et sont distribués dans les directions positives et négatives. Cela implique que la normalité semble être acceptable en plus de cela les coefficients de corrélation assez élevés ($R^2_{Fz}=0.99$, $R^2_{Ra}=0.95$ et $R^2_{Vb}=0.99$).

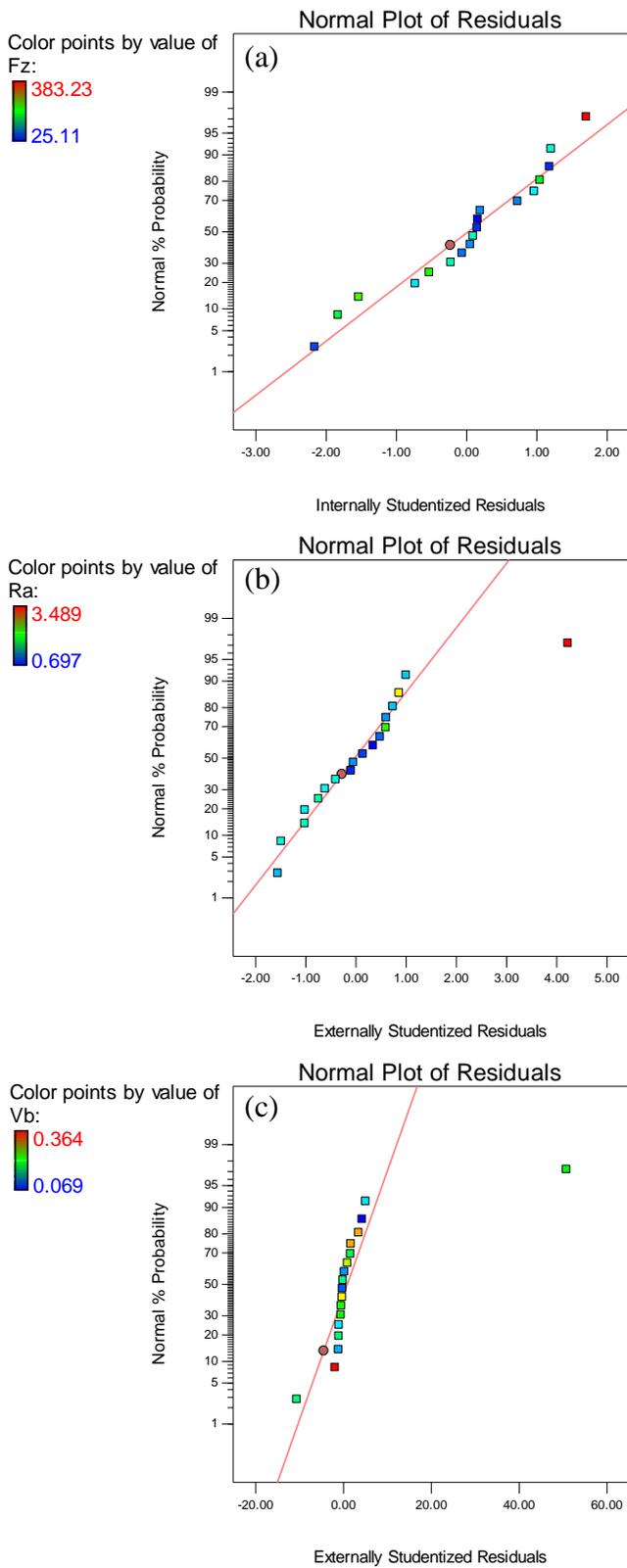


Fig. V.4 Probabilités normales des résidus pour Fz, Ra et Vb.

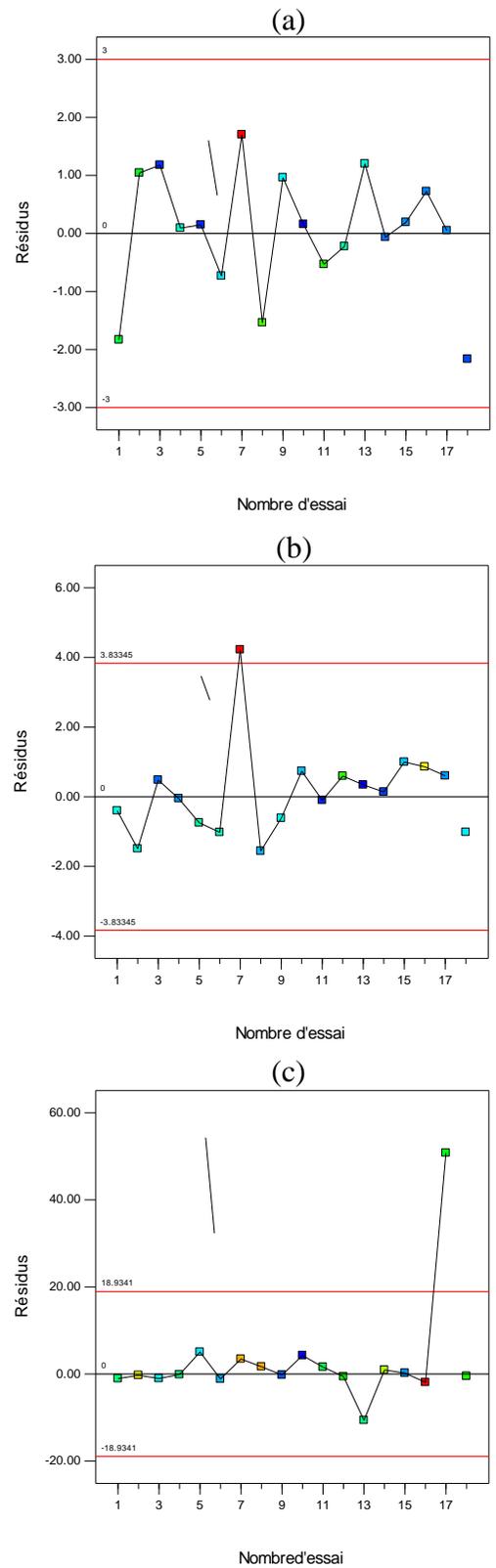


Fig. V.5 Graphiques des résidus par rapport au nombre d'expériences pour Fz, Ra et Vb.

V.3. Evolution de l'usure en dépouille

La figure V. 6 (a, b) expose la morphologie de l'usure en dépouille VB de deux céramiques en nitrure de silicium, non revêtue (CC6090) et revêtue (CC1690). On remarque que l'usure en dépouille des deux céramiques se développe suivant une bande régulière qui varie selon les conditions de chaque expérience. La comparaison des valeurs de V_b des deux plaquettes montre clairement que la céramique revêtue est plus performante que la céramique non revêtue, la valeur maximale de V_b enregistrée sur la céramique revêtue est $0.268 \mu\text{m}$ par contre l'usure en dépouille dans la céramique non revêtue dépasse la valeur d'usure admissible [$V_b=0.3 \text{ mm}$]. Ceci dans les essais 3, 8 et 9 où nous avons enregistré les valeurs suivantes : $0.364 \mu\text{m}$, $0.315 \mu\text{m}$ et $0.314 \mu\text{m}$ pour les trois essais respectivement. Globalement, on peut dire que les deux matériaux sont bien adaptés à l'usinage de la fonte FGL 250, mais aux conditions très sévères (grande vitesse de coupe et long distance d'usinage) il est préférable d'utiliser la céramique revêtue (CC1690).

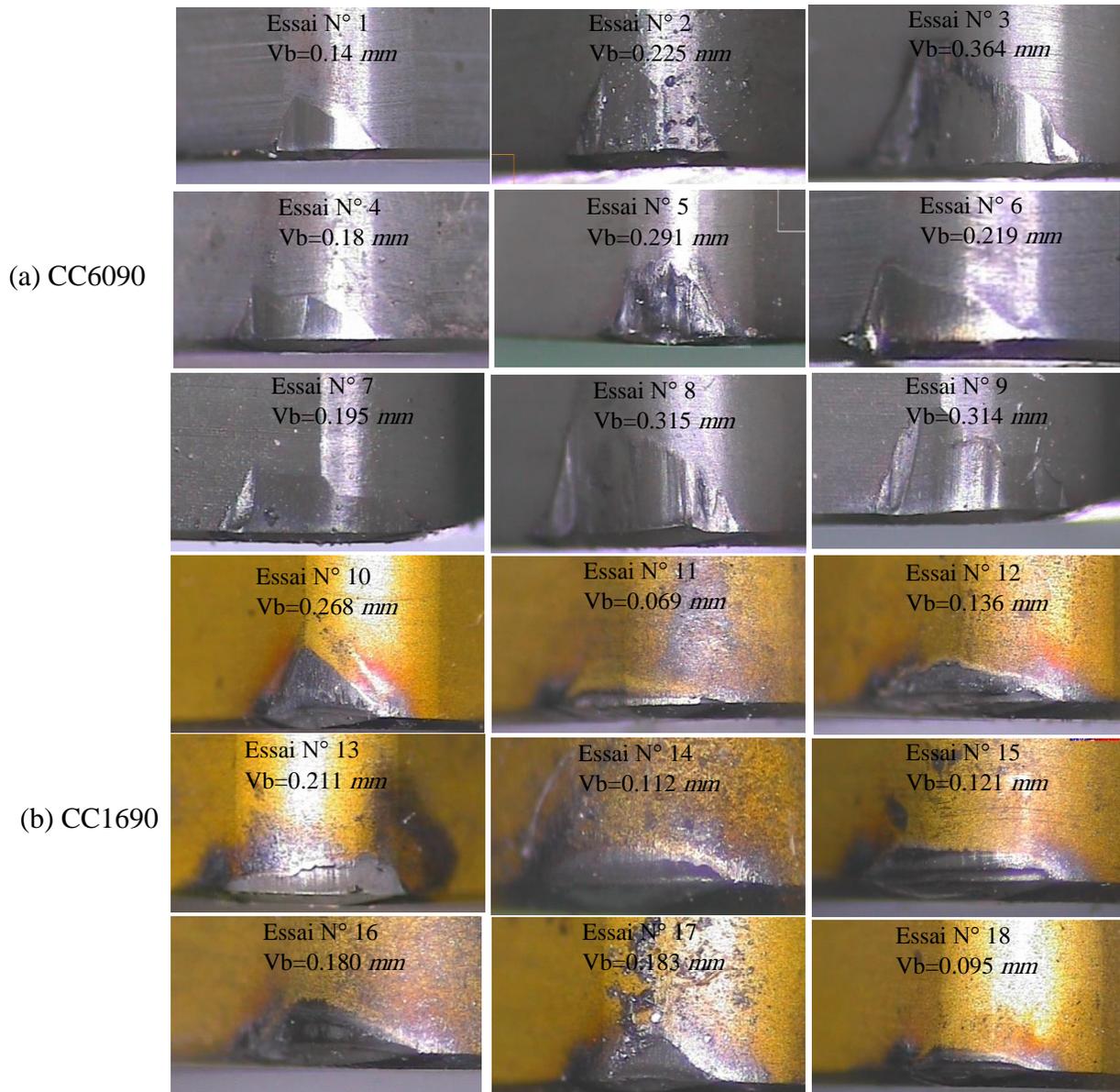


Fig. V.6 Usure en dépouille de CC6090 et CC1690.

La figure V.7 illustre la morphologie du bec de la céramique revêtue (CC1690), ces images sont obtenues à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB). Cette figure montre l'existence de plusieurs phénomènes physiques au niveau de l'arrête de l'outil, tels que l'adhésion des microsoudures provenant du copeau qui restent accrochés sur la face de l'outil de coupe. Ces microsoudures peuvent être formées sous l'effet de la pression ou par l'utilisation des faibles vitesses de coupe ce qui conduit à une accumulation des éléments du copeau de manière importante pour former un dépôt macroscopique que l'on appelle arête rapportée. Cette figure montre aussi un autre mécanisme d'usure qui est la diffusion. Aux grandes vitesses de coupe, le gradient de

températures à l'interface copeau-outil est particulièrement important menant à la fusion des couches du revêtement.

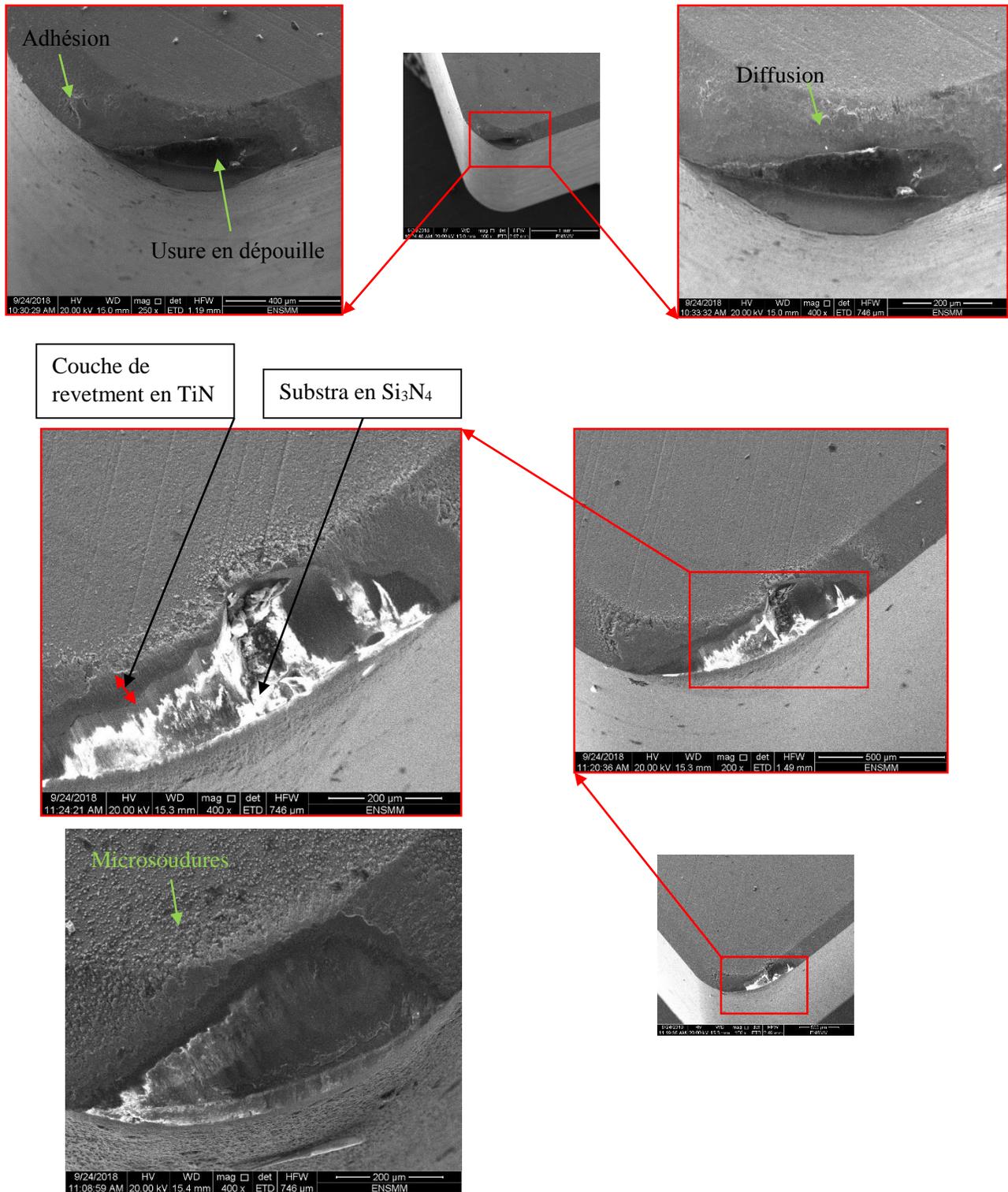


Fig. V.7 Images de MEB de la plaquette CCI690.

La figure V.8 présente la morphologie du bec d'outil de la céramique non revêtue (CC6090) obtenue par MEB, ces images sont moins claires par rapport aux celles de la céramique revêtue à cause d'un problème de non conduction car la conductivité électrique de la céramique revêtue est élevé grâce à la couche de TiN. En générale cette figure montre les mêmes phénomènes physiques et les mêmes mécanismes d'usure que la céramique revêtue.

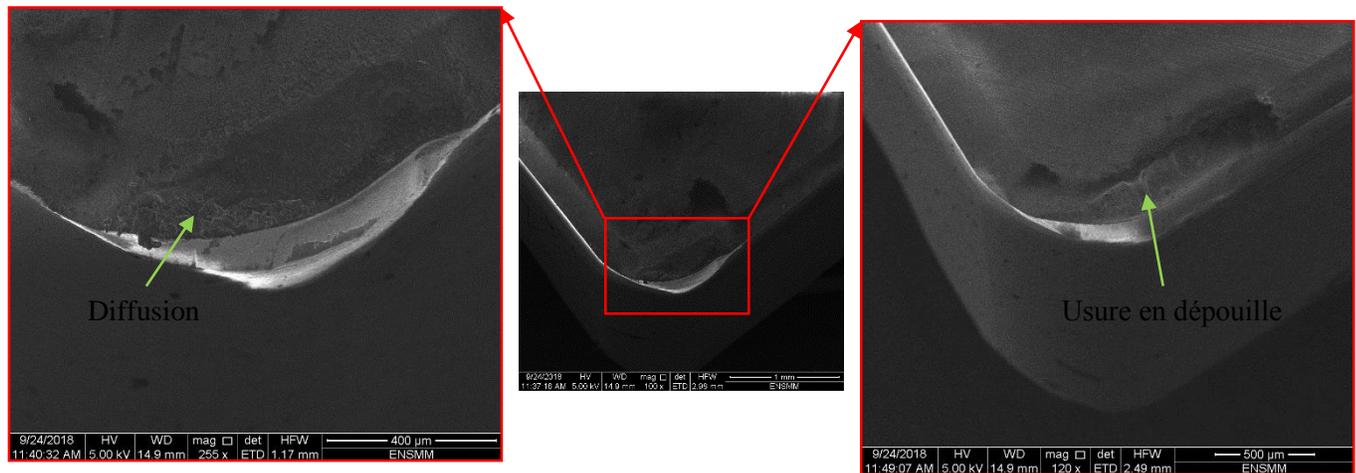


Fig. V.8 Images de MEB de la plaquette CC6090.

V.4. Conclusion

L'étude de l'impact des condition de coupe tels que a_p , f , V_c , matériau de coupe et distance d'usinage sur l'évolution de l'effort de coupe tangentiel, la rugosité de surface arithmétique moyenne (R_a) et l'usure en dépouille (V_b) suivant le plan de taguchi L_{18} lors du tournage de la fonte grise FGL 250 usinée par la céramique en nitrure de silicium -Si₃N₄- revêtue et non revêtue (CC6090 et CC1690) débouche sur les conclusions suivantes :

- Le plan Taguchi L_{18} est convenable pour analyser les phénomènes de la rugosité de surface, effort de coupe et usure en dépouille avec un nombre minimum d'essais.
- L'ANOVA montre que :
 - l'avance par tour affecte la rugosité d'une manière considérable avec une contribution de 42.57 %, la vitesse de coupe vient en deuxième position avec une contribution de 11.81 %, suivi par la distance d'usinage et le matériau de coupe avec des contributions de 4.32 % et 3.85 % respectivement.

- L'effort de coupe est largement influencé par la profondeur de coupe avec une contribution de 48.22 %, suivie par la vitesse d'avance avec une contribution de 22.62, le matériau de coupe arrive en troisième position avec une contribution de 5.95 %.
- Les paramètres affectant l'usure en dépouille son : la vitesse de coupe, le matériau de coupe et la distance d'usinage avec des contributions de 34.43 %, 25.31 % et 23.10 % respectivement.
- Les modèles mathématiques linéaires développés pour F_z , R_a et V_b à l'aide de la méthode RSM sont très utiles pour la prédiction. Une corrélation étroite entre les valeurs prédites et mesurées a été observée ($R^2_{F_z}=0.99$, $R^2_{R_a}=0.95$ et $R^2_{V_b}=0.99$).
- En général, la céramique revêtue (CC1690) génère des faibles efforts et puissance de coupe, des meilleurs états de surface par rapport à la céramique non revêtue (CC6090).
- Les morphologies d'usure obtenue à l'aide du profilomètre optique et du microscope électronique à balayage (MEB) montrent le rôle des revêtements en TiN qui rend le matériau de coupe plus résistant à d'usure.

Chapitre VI

*Optimisation des
paramètres de coupe
par DF, GA et GRA*

VI.1. Introduction

Une fois que la modélisation adéquate des paramètres de coupe est obtenue (à l'aide de l'approche RSM et ANN), il faut se pencher sur l'étape d'optimisation multi objectif. L'optimisation multi objectif implique l'optimisation simultanée de plusieurs critères même s'ils sont contradictoires et permet de trouver un compromis entre diverses réponses. L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques, tels que les méthodes, GRA, GA, PSO, DF, TLBO etc... [86, 87, 88 et 89]. Elle permet le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus. L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation des trois techniques, les algorithmes génétiques (AGs), la fonction de désirabilité et l'analyse relationnelle grise (GRA) en se basant sur les modèles mathématiques trouvés dans les deux chapitres précédents.

VI.2. Optimisation des paramètres de coupes par la fonction de désirabilité

Les fonctions de désirabilité ont été largement utilisées pour optimiser simultanément plusieurs réponses. L'idée de base de l'approche par fonction de désirabilité est de transformer un problème de multi-réponse en un problème de réponse unique au moyen de transformations mathématiques. La procédure demande d'introduire pour chaque réponse $Y_j(x)$, $j = 1, 2, \dots, m$, une fonction $d_j(Y_j(x))$ avec une plage de valeurs entre 0 et 1. La valeur de 0 (une désirabilité individuelle prenant la valeur nulle) est attribuée lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable (non désirée) et celle de 1 lorsque la réponse représente la performance maximale désirée pour les facteurs considérés [90].

L'objectif le plus important de cette étude est de trouver un régime de coupe optimal qui permet simultanément de minimiser les critères Ra , Fz et Pc et de maximiser le critère MRR.

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, $F(x)$, est définie comme suit [91] :

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

$$F(x) = -DF \quad (VI.2)$$

Où d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et w_i est la fonction de pondération de d_i . Pour différent objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité d_i est définie dans différentes formes. Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de T_i , la désirabilité d_i est :

$$d_i = 0 \text{ If } Y_i \leq \ln f_i$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \text{ If } \ln f_i \leq Y_i \leq T_i \quad (\text{VI.3})$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \text{ If } T_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i$$

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

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

$$d_i = 0 \text{ If } Y_i \geq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Inf}_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \text{ If } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{VI.4})$$

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

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

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

$$d_i = \left[\frac{\text{Sup}_i - Y_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \text{ If } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{VI.5})$$

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

Donc, pour un but de minimisation il est nécessaire de choisir un réglage optimal qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF, C'est-à-dire minimiser $F(x)$, et de faire l'inverse en cas de maximisation.

Le tableau VI.1 présente les contraintes de coupe adoptées pour notre cas.

Table VI.1 : Conditions d'optimisation

| Paramètres | Objectifs | Limite inférieure | | Limite supérieure | |
|------------------------|-----------|-------------------|--------|-------------------|--------|
| | | CC6090 | CC1690 | CC6090 | CC1690 |
| V_c (m/min) | Gamme | 260 | 260 | 530 | 530 |
| f (mm/tr) | Gamme | 0.08 | 0.08 | 0.2 | 0.2 |
| ap (mm) | Gamme | 0.25 | 0.25 | 0.75 | 0.75 |
| Ra (μm) | Min. | 0.7 | 0.45 | 1.79 | 1.86 |

| | | | | | |
|---------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|
| Fz (N) | Min. | 54.9 | 30.37 | 349.77 | 307.73 |
| Pc (W) | Min. | 295.273 | 2710.68 | 197.513 | 1958.26 |
| MRR (mm³/min) | Max. | 5200 | 79500 | 5200 | 79500 |

Le tableau VI.2 présente les résultats de l'optimisation par DF. D'après ce tableau on remarque que les valeurs de la désirabilité sont très faible et pour les deux matériaux de coupe (0.602 pour CC6090 et 0.578 pour CC1690) ce qui indésirable car ces valeurs sont un peu loin de 1 qui représente la valeur de désirabilité idéale. On remarque aussi que les valeurs optimales pour la céramique CC6090 sont comprises entre $0.823 \mu\text{m}$ et $0.838 \mu\text{m}$ pour Ra , entre 117.416 N et 118.718 N pour Fz , entre 1034.996 W et 1046.896 W pour Pc et entre $25585.21 \text{ mm}^3/\text{min}$ et $25817.66 \text{ mm}^3/\text{min}$ pour MRR. Pour la céramique CC16090 les valeurs optimales sont comme suite : entre $0.479 \mu\text{m}$ et $0.485 \mu\text{m}$ pour Ra , entre 104.934 N et 106.101 N pour Fz , entre 922.439 W et 933.027 W pour Pc et entre $24971.6 \text{ mm}^3/\text{min}$ et $25297.62 \text{ mm}^3/\text{min}$ pour MRR.

Les régimes de coupe adopter pour l'obtention de ces valeurs, correspond aux plages des conditions de coupe suivantes : ($V_c = 529.993$ et 530 m/min , $f = 0,131 - 0.135 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.362 - 0.372 \text{ mm}$) pour CC6090, et ($V_c = 529.997$ et 530 m/min , $f = 0,89 - 0.91 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.517 - 0.527 \text{ mm}$).

D'après l'analyse précédente on remarque que pour les deux plaquettes de coupe testées les régimes de coupe optimaux sont presque les même, ce qui signifie que l'utilisateur n'a pas suffisamment de choix. On note aussi que les valeurs de rugosité optimales sont très proches aux valeurs de rugosité expérimentale minimales ($0.7 \mu\text{m}$ pour CC6090 et $0.45 \mu\text{m}$ pour CC1690) et cela montre que la fonction de désirabilité dans notre cas a donné une grande importance à un paramètre par rapport aux autres, alors que nous cherchons un compromis entre les différents facteurs pour obtenir les valeurs des réponses souhaitées.

Table VI.2 : Résultats d'optimisation par DF

| N° | a_p (mm) | f (mm/rev) | V_c (m/min) | Ra (μm) | Fz (N) | Pc (W) | MRR (mm ³ /min) | désirabilité |
|---------------|------------|--------------|---------------|------------------------|----------|----------|----------------------------|--------------|
| CC6090 | | | | | | | | |
| 1 | 0.368 | 0.133 | 530.000 | 0.829 | 118.576 | 1043.068 | 25684.46 | 0.602 |
| 2 | 0.367 | 0.133 | 529.997 | 0.830 | 118.585 | 1043.326 | 25703.60 | 0.602 |
| 3 | 0.369 | 0.132 | 529.999 | 0.827 | 118.718 | 1043.787 | 25665.27 | 0.602 |
| 4 | 0.366 | 0.133 | 529.993 | 0.831 | 118.242 | 1040.685 | 25663.45 | 0.602 |
| 5 | 0.370 | 0.131 | 529.979 | 0.825 | 118.624 | 1042.332 | 25585.21 | 0.602 |
| 6 | 0.363 | 0.134 | 529.990 | 0.833 | 117.686 | 1036.549 | 25612.60 | 0.602 |
| 7 | 0.372 | 0.131 | 529.997 | 0.823 | 119.214 | 1046.896 | 25655.22 | 0.602 |
| 8 | 0.365 | 0.134 | 529.994 | 0.836 | 118.438 | 1043.545 | 25817.66 | 0.602 |

| | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|---------|-------|---------|----------|----------|-------|
| 9 | 0.361 | 0.134 | 529.995 | 0.836 | 117.416 | 1034.996 | 25631.79 | 0.602 |
| 10 | 0.362 | 0.135 | 529.996 | 0.838 | 117.889 | 1039.459 | 25767.92 | 0.602 |
| CC1690 | | | | | | | | |
| 1 | 0.523 | 0.090 | 530.000 | 0.483 | 105.799 | 931.258 | 25204.15 | 0.578 |
| 2 | 0.522 | 0.091 | 529.999 | 0.484 | 105.790 | 930.714 | 25205.34 | 0.578 |
| 3 | 0.524 | 0.090 | 529.999 | 0.482 | 105.570 | 929.639 | 25136.20 | 0.578 |
| 4 | 0.527 | 0.090 | 529.999 | 0.481 | 105.842 | 932.737 | 25208.36 | 0.578 |
| 5 | 0.521 | 0.091 | 529.998 | 0.485 | 106.101 | 933.027 | 25297.62 | 0.578 |
| 6 | 0.519 | 0.091 | 529.999 | 0.484 | 105.251 | 925.524 | 25055.64 | 0.578 |
| 7 | 0.526 | 0.089 | 529.999 | 0.480 | 105.361 | 928.722 | 25070.99 | 0.578 |
| 8 | 0.529 | 0.089 | 529.993 | 0.480 | 105.782 | 932.870 | 25186.63 | 0.578 |
| 9 | 0.517 | 0.091 | 529.997 | 0.485 | 104.943 | 922.439 | 24971.61 | 0.578 |
| 10 | 0.531 | 0.089 | 529.998 | 0.479 | 105.743 | 933.363 | 25171.46 | 0.578 |

VI.3. Optimisation des paramètres de coupes par les algorithmes génétique

VI.3.1. Définition

Les algorithmes génétiques (AGs) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Leur fonctionnement est extrêmement simple [92]. On part avec une population de solutions potentielles (*chromosomes*) initiales arbitrairement choisies. On évalue leur performance (*fitness*) relative. Sur la base de ces performances on crée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : la sélection, le croisement et la mutation. On recommence ce cycle (figure VI.1) jusqu'à ce que l'on trouve une solution satisfaisante [93].

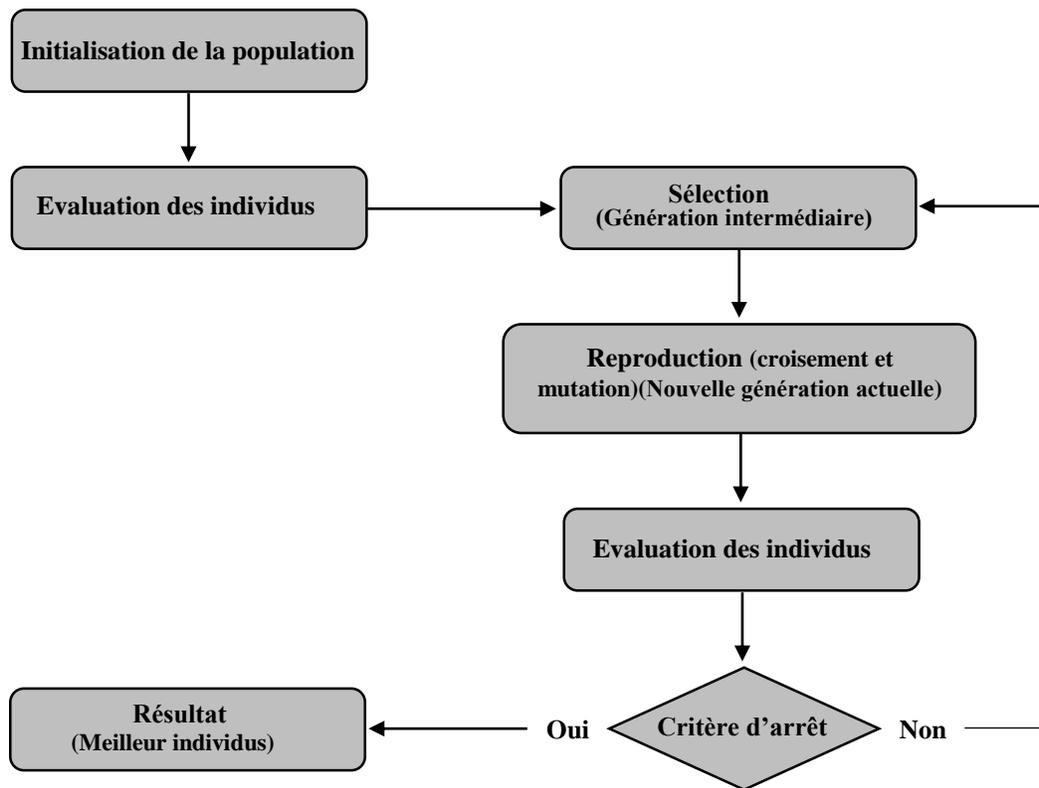


Fig . VI.1. Schéma de principe d'un Algorithme Génétique.

Un algorithme génétique est défini par :

- *Individu/chromosome/séquence* : une solution potentielle du problème ;
- *Population* : un ensemble de chromosomes ou de points de l'espace de recherche ;
- *Environnement* : l'espace de recherche ;
- *Fonction de fitness* : la fonction - positive - que nous cherchons à maximiser.

Plusieurs travaux de recherche sont en cours, qui utilisent les AGs, pour les problèmes l'optimisation multicritères. On peut résumer ce qui différencie les AGs des autres approches d'optimisation en quatre points :

- Les AGs utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes.
- Les AGs travaillent sur une population de points et non sur un point particulier. Ce qui permet la recherche sur un espace multi dimensionnel.
- Les AGs ne posent aucune condition sur la nature des fonctions à optimiser.
- Les AGs utilisent des règles de transitions probabilistes et non déterministes

VI.3.2. Les opérateurs des algorithmes génétiques

a) Population initiale :

L'AG démarre avec une population composée de N individus dans le codage retenu. Le choix des individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace de recherche est totalement inconnue, il est intéressant que la population soit répartie sur tout l'espace de recherche. Si par contre des informations à priori sur le problème sont disponibles, il paraît évident de générer les individus dans un espace particulier afin d'accélérer la convergence [94].

b) Codage des éléments de la population initiale :

Chaque individu de la population est codé par un chromosome ou génotype sous forme de chaînes de bits contenant toute l'information nécessaire à la description d'un point dans l'espace recherche. Ce type de codage a pour intérêt de permettre de créer des opérateurs de croisement et de mutation simples. C'est également en utilisant ce type de codage que les premiers résultats de convergence théorique ont été obtenus. Il existe trois principaux type de codage : binaire, gray ou réel, le choix de codage est très important car l'efficacité d'un algorithme génétique est dépende du choix de codage [95].

c) Opérateur de Sélection

Une opération de sélection est nécessaire pour pouvoir choisir les chromosomes qui garantiront une amélioration de la qualité des solutions. La sélection est un processus qui consiste à choisir parmi tous les individus de la population ceux qui vont participer à la construction d'une nouvelle génération où ce choix est basé essentiellement sur les valeurs d'adaptation de chaque individu. Un membre ayant une grande valeur de la fonction objectif aura plus de chance d'être sélectionné pour participer à la reproduction de la prochaine génération [96].

d) Opérateur de Croisement

L'opérateur de croisement permet la création de nouveaux individus selon un processus fort simple. Il permet donc l'échange d'information entre les chromosomes (individus). Tout d'abord, deux individus, qui forment alors un couple, sont tirés au sein de la nouvelle population issue de la reproduction. Puis un site de croisement est tiré aléatoirement. Enfin, selon une probabilité pc

que le croisement s'effectue, les segments finaux des deux parents sont alors échangés autour de ce site [97].

e) Opérateur de Mutation

La mutation est un changement aléatoire selon une certaine règle probabiliste qui doit être faite sur les génotypes, avec une faible probabilité P_m (fixée par l'utilisateur) de la valeur d'un ou plusieurs allèles d'un chromosome. En général, la mutation ne permet pas l'obtention de meilleures solutions, mais elle permet de garder une diversité dans l'évolution des individus et d'éviter les optimums locaux, et se protège contre une perte irrécouvrable dans les caractéristiques des individus [98].

VI.3.3. Fonction objective

Dans cette étude on cherche simultanément, à minimiser les trois critères (F_z , R_a et P_c) et à maximiser le MRR pour les deux matériaux de coupe testés (CC6090 et CC1690) à l'aide de l'approche des algorithmes génétiques en se basant sur les modèles mathématiques trouvés par l'approche ANN (car ils ont présentement une meilleure capacité de prédiction), ce que nous permet de déterminer les régimes de coupe optimaux. Les AGs suivent le principe de « la survie du plus apte », donc ils sont adaptés naturellement pour résoudre les problèmes de maximisation et pour transformer un problème de maximisation en problème de minimisation doit être utilisée une fonction de fitness $F(x)$ qui est une dérivée de la fonction objective, la fonction de fitness fréquemment utilisée est :

$$F(x) = \frac{1}{(1 + f(x))} \quad (\text{VI.6})$$

VI.3.4. Résultats de l'optimisation par GA

VI. 3.4.1. Graphes de front de Pareto

L'optimisation des problèmes d'ingénierie est très complexe et assez difficile pour l'approcher. Ils sont en général multiobjectifs et ont des paramètres ou charges qui se comportent d'une manière aléatoire. La principale difficulté d'un problème multiobjectif est qu'il n'existe pas de définition de la solution optimale et qu'elle n'est pas unique. Il est simplement possible d'exprimer le fait qu'une solution est préférable à une autre, mais il n'y a pas de solution meilleure que toutes les autres. Donc, résoudre un problème multiobjectif ne consiste pas à chercher la solution optimale, mais

l'ensemble des solutions satisfaisantes. La principale qualité d'une optimisation multi-objective est donc de rendre les décisions plus faciles et moins subjectives.

Pour les problèmes multi-objectifs, la solution peut être présentée comme un front de Pareto et l'ingénieur doit faire un compromis entre les différents critères d'optimisation. La figure VI.2 présente les graphes de front de Pareto pour notre cas d'optimisation. Dans cette figure, les étoiles violettes représentent les solutions optimales de Pareto. Elles sont indifférentes les unes des autres car on remarque les valeurs minimales de la rugosité de la surface et de la puissance de coupe correspond à des petites valeurs de taux d'enlèvement de matière. Donc il n'y a pas une seule solution optimale mais plutôt un ensemble de compromis optimaux. Aucun d'eux ne peut être identifié comme étant meilleur que les autres sans qu'une information de préférence ne soit incluse (contrainte). Donc, contrairement aux résultats de la fonction de désirabilité, il existe une variété de solutions et le choix du régime optimal est dû à l'ingénieur (utilisateur).

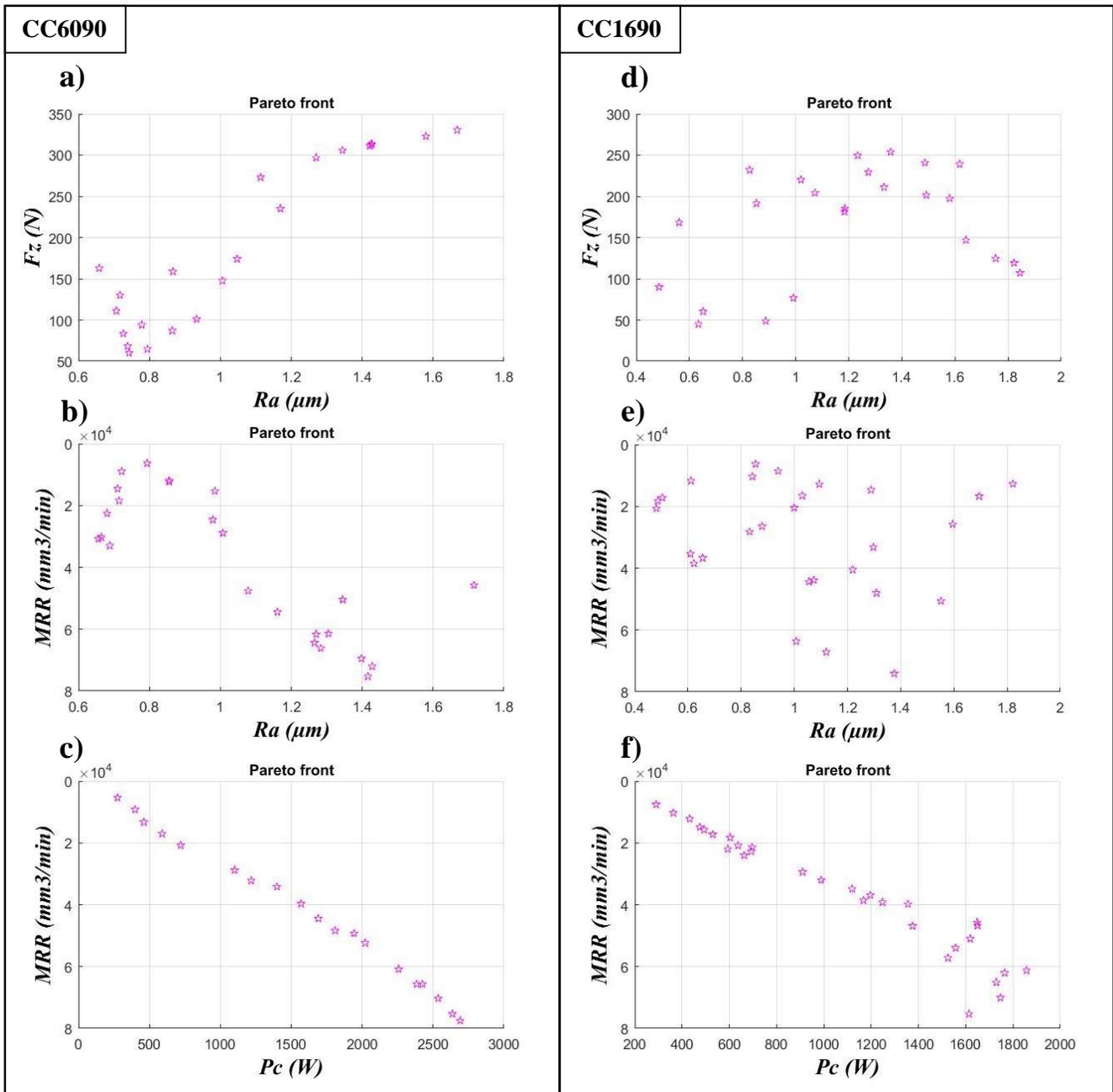


Fig. VI.2 Graphes de front de Pareto.

VI.3.4.2. Régimes de coupe optimaux

Le tableau 13 présente les résultats de l'optimisation par l'algorithme génétique de Ra , F_z , P_c et MRR pour les deux plaquettes de coupe. On remarque que les régimes de coupe adoptés pour l'obtention d'un compromis entre les valeurs de Ra , F_z , P_c et MRR , correspondent aux plages des conditions de coupe suivantes : ($V_c= 299.525 - 512.571 \text{ m/min}$, $f= 0,0.8 - 0.121 \text{ mm/tr}$, $a_p= 0,251 - 0.586 \text{ mm}$) pour les deux céramiques. Les valeurs optimales de Ra , F_z , P_c et MRR sont comme

suite : pour la céramique CC6090, Ra entre $0.660 \mu m$ et $0.814 \mu m$, Fz entre $53.048 N$ et $167.088 N$, Pc entre $286.191 W$ et $11220.959 W$ et MRR entre $6188.744 mm^3/min$ et $30325.622 mm^3/min$. Pour la céramique CC1690 les valeurs sont les suivantes : Ra entre $0.478 \mu m$ et $0.679 \mu m$, Fz entre $29.450 N$ et $153.821 N$, Pc entre $144.11 W$ et $777.387 W$ et MRR entre $8892.198 mm^3/min$ et $26004.453 mm^3/min$.

Table VI.3 : Les résultats de l'optimisation par GA.

| N° | ap (mm) | f (mm/rev) | Vc (m/min) | Ra (μm) | Fz (N) | Pc (W) | MRR (mm^3/min) |
|---------------|-----------|--------------|--------------|------------------|----------|----------|--------------------|
| CC6090 | | | | | | | |
| 1 | 0.544 | 0.107 | 503.504 | 0.660 | 156.932 | 1220.959 | 29261.621 |
| 2 | 0.563 | 0.108 | 497.728 | 0.662 | 167.088 | 1272.612 | 30325.622 |
| 3 | 0.586 | 0.087 | 500.334 | 0.692 | 141.763 | 1101.390 | 25413.204 |
| 4 | 0.501 | 0.090 | 506.141 | 0.693 | 115.586 | 945.348 | 22684.447 |
| 5 | 0.504 | 0.093 | 432.094 | 0.701 | 130.023 | 863.380 | 20356.977 |
| 6 | 0.254 | 0.080 | 511.092 | 0.708 | 53.048 | 486.909 | 10400.838 |
| 7 | 0.251 | 0.089 | 392.395 | 0.754 | 64.227 | 367.705 | 8811.109 |
| 8 | 0.268 | 0.090 | 329.573 | 0.798 | 71.250 | 353.245 | 7958.330 |
| 9 | 0.255 | 0.081 | 299.525 | 0.802 | 66.033 | 286.191 | 6188.744 |
| 10 | 0.251 | 0.089 | 323.298 | 0.814 | 68.569 | 326.842 | 7251.206 |
| CC1690 | | | | | | | |
| 1 | 0.527 | 0.080 | 465.339 | 0.478 | 85.684 | 646.531 | 19633.788 |
| 2 | 0.521 | 0.082 | 468.628 | 0.481 | 86.027 | 651.243 | 19939.381 |
| 3 | 0.573 | 0.087 | 326.649 | 0.531 | 112.310 | 561.003 | 16262.876 |
| 4 | 0.298 | 0.100 | 474.082 | 0.603 | 54.900 | 473.416 | 14152.011 |
| 5 | 0.473 | 0.118 | 467.589 | 0.605 | 117.317 | 777.387 | 26004.453 |
| 6 | 0.250 | 0.080 | 512.571 | 0.625 | 29.450 | 403.693 | 10269.728 |
| 7 | 0.262 | 0.084 | 474.501 | 0.627 | 39.070 | 391.980 | 10437.151 |
| 8 | 0.487 | 0.114 | 316.267 | 0.648 | 124.522 | 559.578 | 17560.939 |
| 9 | 0.253 | 0.081 | 435.025 | 0.666 | 41.045 | 344.110 | 8892.198 |
| 10 | 0.551 | 0.121 | 315.014 | 0.679 | 153.821 | 682.955 | 21019.595 |

VI.4. Optimisation par la Méthode d'Analyse Relationnelle Grise (Grey method)

L'analyse Relationnelle Grise est une méthode d'optimisation qui permet de réduire un problème d'optimisation multiréponse à un problème d'optimisation à une seule réponse appelé qualité relationnelle unique [86]. Dans notre cas, nous avons appliqué cette méthode afin de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui nous permet de minimiser l'effort de coupe tangentiel (Fz), la rugosité de surface (Ra) et l'usure en dépouille (Vb) simultanément. Pour atteindre cet objectif, nous suivons les étapes suivantes :

Etape 1 : La normalisation

Avant d'entamer les démarches de l'optimisation par GRA, les données doivent d'abord être normalisées pour éviter les variations d'unités. Une valeur appropriée est dérivée de la valeur d'origine pour rendre le tableau compris entre 0 et 1. Si la réponse doit être minimisée, les caractéristiques les plus petites possibles sont destinées à la normalisation afin de les redimensionner dans une plage acceptable à l'aide de la formule suivante :

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

Où $i = 1, \dots, m$; $k = 1, \dots, n$, m est le nombre de données expérimentales et n est le nombre de réponses. $x_i(k)$ désigne la séquence d'origine, $x_i^*(k)$ désigne la séquence après le prétraitement des données, $\max x_i(k)$ désigne la plus grande valeur de $x_i(k)$, $\min x_i(k)$ désigne la plus petite valeur de $x_i(k)$, et x est la valeur souhaitée.

Les données expérimentales du plan L_{18} ont été normalisées à la fois pour l'effort de coupe tangentiel (F_z), rugosité de surface (R_a) et l'usure en dépouille (V_b) en utilisant l'équation (VI.7) et sont présentés dans le tableau VI.4.

Table VI.4 Résultats expérimentale normalisé ($x_i(k)$)

| N° d'essais | F_z | R_a | V_b |
|-------------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,045 | 0,100 | 0,241 |
| 2 | 0,071 | 0,235 | 0,529 |
| 3 | 0,126 | 0,755 | 1,000 |
| 4 | 0,307 | 0,148 | 0,376 |
| 5 | 0,467 | 0,291 | 0,753 |
| 6 | 0,329 | 0,541 | 0,508 |
| 7 | 0,532 | 0,037 | 0,427 |
| 8 | 0,572 | 0,181 | 0,834 |
| 9 | 1,000 | 1,000 | 0,831 |
| 10 | 0,110 | 0,062 | 0,675 |
| 11 | 0,000 | 0,193 | 0,000 |
| 12 | 0,044 | 0,333 | 0,227 |
| 13 | 0,140 | 0,148 | 0,481 |
| 14 | 0,140 | 0,198 | 0,146 |
| 15 | 0,225 | 0,321 | 0,176 |
| 16 | 0,290 | 0,000 | 0,376 |
| 17 | 0,440 | 0,275 | 0,386 |
| 18 | 0,239 | 0,266 | 0,088 |

Étape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris

La prochaine étape consiste à calculer le coefficient relationnel gris $\zeta_i(k)$ à partir des valeurs normalisées, à l'aide de la formule suivante [86]:

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

Où :

$\Delta_{oi}(k)$ est la différence en valeur absolue entre $x_{i0}(k)$ et $x_i(k)$.

Δ_{\min} est la plus petite valeur de $\Delta_{oi}(k)$.

Δ_{\max} est la plus grande valeur de $\Delta_{oi}(k)$.

ζ est le coefficient de distinction ou d'identification et la plage se situe entre 0 et 1. En général, la valeur de ζ est définie à 0,5 [86].

À partir de l'ensemble de données normalisé du tableau VI.4, les coefficients relationnels gris ont été calculés à l'aide de l'équation (VI.8). La valeur du coefficient de distinction est prise égale à 0,5. Les résultats sont présentés dans le tableau VI.5.

Table VI.5 Coefficients du $\zeta_i(k)$

| N° d'essais | Fz | Ra | Vb |
|-------------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,918 | 0,834 | 0,675 |
| 2 | 0,876 | 0,681 | 0,486 |
| 3 | 0,799 | 0,398 | 0,333 |
| 4 | 0,620 | 0,772 | 0,571 |
| 5 | 0,517 | 0,632 | 0,399 |
| 6 | 0,603 | 0,480 | 0,496 |
| 7 | 0,485 | 0,932 | 0,539 |
| 8 | 0,466 | 0,734 | 0,375 |
| 9 | 0,333 | 0,333 | 0,376 |
| 10 | 0,819 | 0,890 | 0,426 |
| 11 | 1,000 | 0,721 | 1,000 |
| 12 | 0,920 | 0,600 | 0,688 |
| 13 | 0,782 | 0,772 | 0,509 |
| 14 | 0,781 | 0,716 | 0,774 |
| 15 | 0,690 | 0,609 | 0,739 |
| 16 | 0,633 | 1,000 | 0,571 |
| 17 | 0,532 | 0,645 | 0,564 |
| 18 | 0,677 | 0,652 | 0,850 |

Etape 3 : Calcul du GRG (Grey relational grade)

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

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

Où γ_i est la note relationnelle grise requise pour la $n^{\text{ème}}$ expérience et n est nombre de caractéristiques de réponse (dans notre cas $n=3$). La note relationnelle grise représente le niveau de corrélation entre la séquence de référence et la séquence de comparabilité et représente globalement toutes les caractéristiques de qualité. Ainsi, le problème d'optimisation à réponses multiples est converti en problème d'optimisation à réponse unique grâce à une analyse relationnelle grise associée à une approche de Taguchi. Le résultat de GRG est présenté dans le tableau VI.6 et la figure VI.3 Ce résultat est utilisé pour optimiser les réponses multiples lorsqu'il est converti en une seule note.

Selon ce tableau, la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 11 a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que l'expérience 11 est la combinaison des paramètres optimaux qui donne simultanément un effort de coupe, une rugosité de surface et une usure en dépouille minimales.

Table VI.6 Qualité Rationnelle Grise (GRG)

| N° d'essais | GRG | Ordre |
|-------------|-------|-------|
| 1 | 0,809 | 2 |
| 2 | 0,681 | 9 |
| 3 | 0,510 | 17 |
| 4 | 0,654 | 11 |
| 5 | 0,516 | 16 |
| 6 | 0,526 | 14 |
| 7 | 0,652 | 12 |
| 8 | 0,525 | 15 |
| 9 | 0,347 | 18 |
| 10 | 0,712 | 7 |
| 11 | 0,907 | 1 |
| 12 | 0,736 | 4 |
| 13 | 0,688 | 8 |
| 14 | 0,757 | 3 |

| | | |
|----|-------|----|
| 15 | 0,679 | 10 |
| 16 | 0,735 | 5 |
| 17 | 0,580 | 13 |
| 18 | 0,726 | 6 |

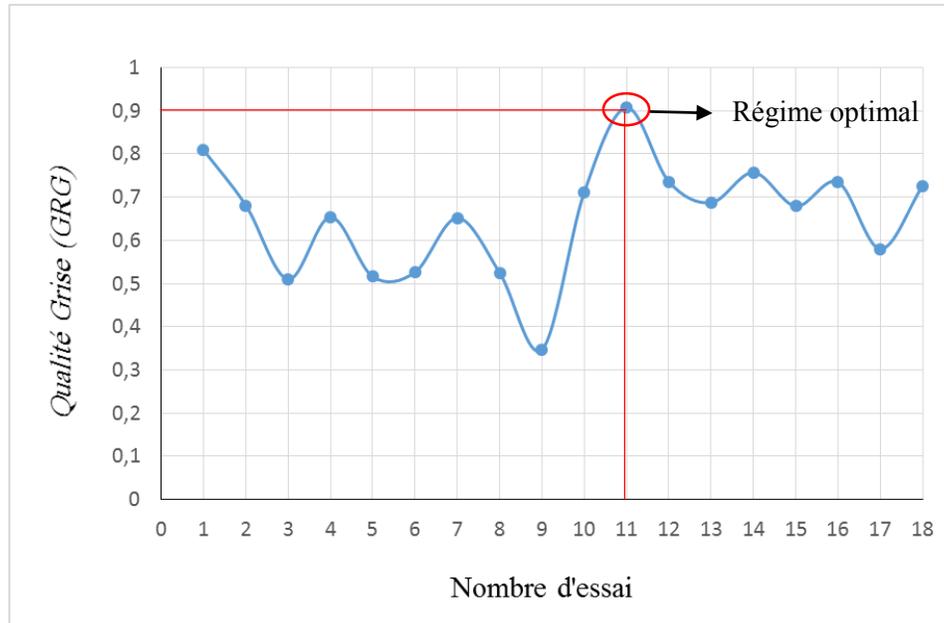


Fig. VI.3 Qualité Rationnelle Grise.

Le niveau optimal des paramètres est le niveau correspondant au maximum de la valeur moyenne de "la qualité relationnelle grise". La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage de fonte FGL 250 est obtenue à partir du tableau VI.6, elle correspond aux plages des conditions de coupe suivantes : ($V_c = 370 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.4 \text{ mm}$ et le matériau de coupe optimale c'est la céramique revêtue CC1690).

Ensuite, une table d'analyse de variance (ANOVA) (tableau VI.7) est formulée en prenant en compte la valeur de note relationnelle grise présentée dans le tableau 5. Ce tableau indique l'importance des paramètres de processus pour les réponses multiples. Il ressort du tableau ANOVA que le type de matériau de coupe est Le facteur le plus influent sur la qualité relationnelle grise avec une contribution de 32.41 % suivi par la distance d'usinage avec une contribution de 30.34 %, la profondeur de passe vient en troisième position avec un taux de 17.93 % suivi par l'avance avec une contribution de 15.17 %. La vitesse de coupe ne présente aucun effet sur GRG.

Table VI.7 Analyse de la variance (ANOVA) pour la qualité relationnelle grise (GRG)

| Source | SC | DF | MC | F-value | Prob. | Cont.% | Remarques |
|-------------------|----------|----|----------|---------|----------|--------|------------------|
| Model | 0,28 | 5 | 0,056 | 48,77 | < 0.0001 | 96,551 | Significatif |
| A : Matériaux | 0,094 | 1 | 0,094 | 81,29 | < 0.0001 | 32,413 | Significatif |
| B : ap , mm | 0,052 | 1 | 0,052 | 45,03 | < 0.0001 | 17,931 | Significatif |
| C : f , mm/tr | 0,044 | 1 | 0,044 | 37,8 | < 0.0001 | 15,172 | Significatif |
| D : V_c , m/min | 4,40E-03 | 1 | 4,40E-03 | 3,82 | 0,0744 | 1,5179 | Non significatif |
| E : Distance, mm | 0,088 | 1 | 0,088 | 75,92 | < 0.0001 | 30,344 | Significatif |

VI.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de l'optimisation des paramètres technologiques Ra , Fz , Pc et MRR par les algorithmes génétiques et la fonction de désirabilité, ainsi que les résultats de l'optimisation de Fz , Ra et Vb par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise (GRA) lors de l'usinage de la fonte grise FGL250 usinée par la céramique en nitrure de silicium - Si_3N_4 - revêtue et non revêtue (CC6090 et CC1690). Il est à noter que :

- Les résultats de l'optimisation par la fonction de désirabilité (DF) montrent que les régimes de coupe adoptés pour l'obtention des valeurs minimales des Ra , Fz , Pc et des valeurs maximales de MRR sont presque les mêmes pour chaque outil de coupe, sont correspond aux plages des conditions de coupe suivantes : ($V_c= 529.993$ et 530 m/min, $f = 0,131 - 0.135$ mm/tr, $ap= 0.362 - 0.372$ mm) pour CC6090, et ($V_c= 529.997$ et 530 m/min, $f = 0,89 - 0.91$ mm/tr, $ap= 0.517 - 0.527$ mm).
- l'algorithme génétique (GA) montrent que les régimes de coupe adoptés pour l'obtention d'un compromis entre les valeurs de Ra , Fz , Pc et MRR sont divers et correspondent aux plages des conditions de coupe suivantes : ($V_c= 299.525 - 512.571$ m/min, $f= 0,0.8 - 0.121$ mm/tr, $ap= 0,251 - 0.586$ mm) pour les deux céramiques.
- Pour un problème d'optimisation multi objectif où il existe des réponses contradictoires (maximisation et minimisation en même temps) il est préférable d'utiliser les algorithmes génétiques car ils fournissent un ensemble de compromis optimaux, cela donne à l'utilisateur plusieurs sélections.
- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de L'Analyse Relationnelle Grise est : ($V_c= 370$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $ap = 0.4$ mm et le

matériau de coupe optimale c'est la céramique revêtue CC1690), pour un effort de coupe tangentiel, une rugosité de surface Ra et une usure en dépouille optimaux ($Fz = 75.17$, $Ra = 1,11 \mu\text{m}$ et $Vb = 0.221 \text{ mm}$).

Conclusion générale

l'étude statistique et de modélisation de Ra , Fz , Vb , MRR et Pc à l'aide de la méthode RSM et ANN en se basent sur les plans des expériences et l'optimisation des paramètres de coupe par les algorithmes génétique (GA), la fonction de désirabilité (DF) et l'Analyse Relationnelle Grise (GRA), ainsi que les tests d'usure et l'analyse de la topographie de surface (3D) de la fonte grise FGL 250 usinée par la céramique en nitrure de silicium - Si_3N_4 - revêtue et non revêtue (CC6090 et CC1690), permet de dégager les principales conclusions suivantes :

- La technique des plans des expériences convient pour analyser les phénomènes de la rugosité de surface, effort de coupe et usure en dépouille avec un nombre minimum d'essais.
- D'après l'étude comparative entre les deux céramiques en nitrure de silicium (revêtue et non revêtue), il ressort que les céramiques revêtue (CC1690) présentent des performances supérieures à celles de céramiques non revêtue (CC6090), en termes d'usure, effort de coupe, tenue, puissance de coupe et rugosité de surface.
- les deux céramiques testées sont très adaptées à l'usinage de la fonte FGL 250, les résultats du tableau IV.2 montrent que le critère de rugosité Ra n'a pas dépassée la valeur de $0.93 \mu m$ pour la céramique CC6090 et $0.86 \mu m$ pour la céramique CC1690 pour $f=0.08mm/tr$ et à différents Vc et ap .
- Les résultats comparatifs de la rugosité, l'effort de coup et l'usure en fonction du temps d'usinage pour les deux céramiques (CC1690 et CC6090) montrent qu'aux mêmes conditions de coupe et après 15 min d'usinage les ratios $Ra_{CC1690}/Ra_{CC6090}=0.88$ et $Fz_{CC1690}/Fz_{CC6090}= 0.94$. D'autre part, lorsque l'usure en dépouille atteint la valeur admissible $[Vb]=0.3mm$, le ratio $Tenue_{CC1690}/Tenue_{CC6090} = 1.4$.
- L'ANOVA montre que :
 - l'avance par tour affecte la rugosité d'une manière considérable, suivie par la vitesse de coupe, la distance d'usinage et le matériau de coupe respectivement, la profondeur de passe vient en dernière position avec une faible contribution.
 - L'effort de coupe est largement influencé par la profondeur de passe, suivie de la vitesse d'avance, la vitesse de coupe et le matériau de coupe respectivement.
 - Tous les paramètres de coupe (Vc , f et ap) avec toutes les interactions ont une influence sur la puissance de coupe Pc . Mais, la profondeur de passe elle a le plus grand influence, suivi par l'avance et la vitesse de coupe.

- Les trois éléments de régime de coupe et leurs interactions ont tous un effet significatif sur MRR . la profondeur de passe vient en premier lieu suivi par l'avance par tour. La vitesse de coupe vient en troisième position.
- Les paramètres affectant l'usure en dépouille sont la vitesse de coupe, le matériau de coupe et la distance d'usinage. Les autres facteurs n'ont aucun effet sur V_b .
- Les modèles mathématiques développés pour R_a , F_z , V_b et P_c à l'aide de la méthode RSM et l'approche ANN sont très utiles pour la prédiction. Une corrélation étroite entre les valeurs prédites et mesurées a été trouvée, les (R^2) varient entre (0.95 et 0.99). Mais, l'approche ANN a une grande capacité de prédiction par rapport à la méthode RSM, par contre la RSM est très utile en termes d'identification des paramètres de coupe et leurs interactions qui influent sur les réponses étudiées.
- Les morphologies d'usure obtenue à l'aide du profilomètre optique et du microscope électronique à balayage (MEB) montrent le rôle des revêtements en TiN qui rend le matériau de coupe plus résistant à l'usure et améliore son inertie chimique et thermique, grâce à sa grande dureté et son faible coefficient de frottement.
- L'optimisation des paramètres de coupe par les méthodes DF, GA et GRA, débouche sur les conclusions suivantes :
 - Les résultats de l'optimisation par la fonction de désirabilité (DF) montrent que les régimes de coupe adoptés pour l'obtention des valeurs minimales des R_a , F_z , P_c et des valeurs maximales de MRR sont presque les mêmes pour chaque outil de coupe, sont correspondent aux plages des conditions de coupe suivantes : ($V_c= 529.993$ et 530 m/min, $f = 0,131 - 0.135$ mm/tr, $a_p= 0.362 - 0.372$ mm) pour CC6090, et ($V_c= 529.997$ et 530 m/min, $f = 0,89 - 0.91$ mm/tr, $a_p= 0.517 - 0.527$ mm).
 - l'algorithme génétique (GA) montre que les régimes de coupe adoptés pour l'obtention d'un compromis entre les valeurs de R_a , F_z , P_c et MRR sont divers et correspond aux plages des conditions de coupe suivantes : ($V_c= 299.525 - 512.571$ m/min, $f = 0,0.8 - 0.121$ mm/tr, $a_p= 0,251 - 0.586$ mm) pour les deux céramiques.
 - La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de l'Analyse Relationnelle Grise est : ($V_c= 370$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0.4$ mm et le matériau de coupe optimale c'est la céramique revêtue CC1690),

pour un effort de coupe tangentiel, une rugosité de surface Ra et une usure en dépouille optimaux ($F_z = 75.17$ N, $Ra = 1,11 \mu m$ et $V_b = 0.221$ mm).

- Pour un problème d'optimisation multi-objectif où il existe des réponses contradictoire (maximisation et minimisation en même temps) il est préférable d'utiliser les algorithmes génétiques car ils fournissent un ensemble de compromis optimaux, cela donne à l'utilisateur plusieurs sélections.
- L'analyse de la topographie des surfaces usinées en 3D montre que les paramètres fonctionnels 2D et 3D obtenues à partir de la courbe d'Abbott sont plus proches du phénomène physique mesuré (rugosité de surface) que les paramètres traditionnels et La plate-forme optique de métrologie modulaire est un outil d'investigation important dans la recherche de rugosité de surface. Il permet de comprendre les caractéristiques des surfaces usinées en fonte grise FGL 250.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- Etude de l'évolution de la température de coupe, les contraintes résiduelles et les vibrations en fonction des conditions de coupe.
- La simulation numérique de la coupe orthogonale de la fonte FGL250 par la méthode des éléments finis.
- L'application des autres méthodes de modélisation telle que (la logique floue et SVM) et autres méthodes d'optimisation (PSO et NSGAI)

- [1] **L. BOUZID**, Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13-, thèse doctorat (2015).
- [2] G. SCHNEIDER. Cutting tool applications. Tooling and Production (USA), 2001, vol. 67, no 6.
- [3] **S. KALPAKJIAN**. Manufacturing engineering and technology. Pearson Education India, 2001.
- [4] **E.P. DEGARMO, J. BLACK, R.A. KOHSER**. Materials and process in manufacturing. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.
- [5] **V. WAGNER**, Amélioration de la productivité en usinage d'un titane réfractaire : le Ti5553, thèse doctorat (2011).
- [6] **V. SONGMENE**, Usinage des composite à matrice d'alliage d'aluminium GrA – Ni, thèse doctorat (2000)
- [7] **A. MAUREL-PANTEL**, Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : Application à l'identification paramétrique des lois de comportement, thèse doctorat (2009)
- [8] **F. BAGUR**. Matériaux pour outils de coupe. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1999, no BM7080, p. BM7080. 1-BM7080. 16.
- [9] **H. Aouici, M.A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki et J.-F. Rigal**, Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: prediction model and cutting conditions optimization. Measurement 45 (2012) 344–353.
- [10] **B. Fnides**, Étude expérimentales sur le comportement des outils de coupe en tournage des aciers pour travail à chaud. Thèse de doctorat (2012).
- [11] **M. Remadna**, Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN. Thèse de doctorat de (2001).
- [12] **M.W. Azizi**, Utilisation des plans d'expériences en td pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Thèse de doctorat (2014).
- [13] Site officiel de SANDVIK Coromant, [En ligne]. <https://www.sandvik.coromant.com> [consulté le 20 mai 2019].
- [14] **T.H.C. Childs, M.I. Mahdi, G. Barrow**, On the Stress Distribution Between the Chip and Tool During Metal Turning, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 38 (1989) 55-58.
- [15] **W. Grzesik**, Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications, Elsevier, 2008.
- [16] **F. HALILA**, Modélisation analytique et caractérisation expérimentale de l'usure par abrasion des outils de coupe, thèse doctorat (2015).
- [17] AFNOR. Essai de durée de vie des outils de tournage à partie active unique. Norme Française E 66-505, 1993.
- [18] **S. Benchiheb**, Etude de l'interaction « outil - pièce » lors de l'usinage des matériaux durcis, thèse doctorat (2010).
- [19] **A. Khellaf, H. Aouici, S. Smaiah, et al.** Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, vol. 89, no 1-4, p. 333-354.

- [20] **M. Habek**, étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100cr6, thèse doctorat (2006).
- [21] **A. A. SELAIMIA** Etude de l'usinage des aciers inoxydables lors du fraisage de face, thèse doctorat (2017).
- [22] **A. BENYOUCEF**, Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécanistique, Mémoire de magister (2006).
- [23] **A. CHEVALIER**. Guide du dessinateur industriel, Hachette technique - édition - 2004.
- [24] **ISO, E. N. 4287: 2009**. Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: Profile method-Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287: 1997+ Cor 1: 1998+ Cor 2: 2005+ Amd 1: 2009)(includes Corrigendum AC: 2008 and Amendment A1: 2009).
- [25] <http://actu-imprimante3d.blogspot.com/2014/11/technique-impression-3d-rugosite-etats.html> [consulté le 10 juin 2019].
- [26] **T. R. THOMAS**, Characterization of surface roughness. Precision Engineering, 1981, vol. 3, no 2, p. 97-104
- [27] **R. LEACH**, Characterisation of areal surface texture. Springer Science & Business Media, 2013.
- [28] **M. Gunay, E. Yucel**, Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron. Measurement, vol. 46 (2013), 913–919.
- [29] **W-k. An, A-h. Cai, Y. Luo, H. Chen, W-x. Liu, T-l. Li, M. Chen**, Optimization of composition of as-cast chromium white cast iron based on wear-resistant performance. Materials and Design, vol. 30 (2009), 2339–2344.
- [30] GARANT-TOOLS, Documentations. Manuel d'usinage garant, principes de base. 2007.
- [31] **H. Bensouilah, H. Aouici, I. Meddour**, et al. Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process, Measurement, vol. 82 (2016), 1–18.
- [32] **M. Nouioua, M. A. Yaltese, R. Khettabi et al.** Comparative assessment of cooling conditions, including MQL technology on machining factors in an environmentally friendly approach, Int J Adv Manuf Technol, (2017), 1-16.
- [33] **D. Venkatesan, K. Kannan, and R. Saravanan**. A genetic algorithm-based artificial neural network model for the optimization of machining processes. Neural Computing and Applications, 2009, vol. 18, no 2, p. 135-140.
- [34] **B. Ozelik, H. Oktem and H. Kurtaran**. Optimum surface roughness in end milling Inconel 718 by coupling neural network model and genetic algorithm. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, vol. 27, no 3-4, p. 234-241.
- [35] **HO, Wen-Hsien, TSAI, Jinn-Tsong, LIN, Bor-Tsuen, et al.** Adaptive network-based fuzzy inference system for prediction of surface roughness in end milling process using hybrid Taguchi-genetic learning algorithm. Expert Systems with Applications, 2009, vol. 36, no 2, p. 3216-3222.
- [36] **KUMANAN, S., JESUTHANAM, C. P., et KUMAR, R. Ashok**. Application of multiple regression and adaptive neuro fuzzy inference system for the prediction of surface roughness. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, vol. 35, no 7-8, p. 778-788.
- [37] **MAHER, Ibrahim, ELTAIB, M. E. H., SARHAN, Ahmed AD, et al.** Investigation of the effect of machining parameters on the surface quality of

- machined brass (60/40) in CNC end milling—ANFIS modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, no 1-4, p. 531-537.
- [38] **BEZERRA, Marcos Almeida, SANTELLI, Ricardo Erthal, OLIVEIRA, Eliane Padua, et al.** Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 2008, vol. 76, no 5, p. 965-977.
- [39] **H. ZAHMANI.** Contribution à l'ordonnancement dynamique: proposition d'une approche guidée par effet de Simulation/Datamining, thèse de doctorat (2018).
- [40] **A.K. GHANI, I.A. CHOUDHURY et al.** Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 127, no 1, p. 17-22.
- [41] **D.K. SARMA et U.S. DIXIT,** comparison of dry and air-cooled turning of grey cast iron with mixed oxide ceramic tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 190, no 1-3, p. 160-172.
- [42] **A.M. RAVI, S.M. MURIGENDRAPPA, et P.G. MUKUNDA,** Machinability investigations on high chrome white cast iron using multi coated hard carbide tools. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2014, vol. 67, no 4, p. 485-502.
- [43] **W. GRZESIK, J. RECH, K. ŻAK et al.** Machining performance of pearlitic–ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, vol. 49, no 2, p. 125-133.
- [44] **RAMJI, B. R., MURTHY, HN Narasimha, et KRISHNA, M.** Analysis of roughness and flank wear in turning gray cast iron using cryogenically treated cutting tools. *Research journal of applied sciences, engineering and technology*, 2010, vol. 2, no 5, p. 414-417.
- [45] **GRZESIK, W., KISZKA, P., KOWALCZYK, D., et al.** Investigation of the machining process of spheroidal cast iron using cubic boron nitride (CBN) tools. *Metalurgija*, 2014, vol. 53, no 1, p. 33-36.
- [46] **KULKARNI, Prasanna P., KIRAN, J. O., et DEELEPKUMAR, S. G.** Effect Of Tool Nose Radius And Cutting Parameters On Tool Life, Surface Roughness In Turning Of Grey Cast Iron. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2014, vol. 6, no 3, p. 69.
- [47] **GHANI, Jaharah A., KIAN, Yeong Shoot, et HARUN, Che Hassan Che.** Performance of commercial and palm oil lubricants in turning FCD700 ductile cast iron using carbide tools. *Jurnal Tribologi*, 2015, vol. 7, p. 1-9.
- [48] **J. GOUPY.** Pratiquer les plans d'expériences. Paris : Dunod, 2005.
- [49] **G. Taguchi,** Taguchi on Robust technology development methods, ASME Press, New York, pp. 1– 40, (1993).
- [50] **G. Taguchi,** System of Experimental Design, Unipub/Kraus, International Publication, (1987).
- [51] **M.A. YALLESE.** Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, thèse doctorat (2005).
- [52] **R. Saravanan, R.S.Sankar, P. Asokan, et al.** Optimization of cutting conditions during continuous finished profile machining using non-traditional techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, vol. 26, no 1-2, p. 30-40.
- [53] **M. Nouioua, M.A. Yallese, R. Khettabi, et al.** Investigation of the performance of the MQL, dry, and wet turning by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 93, no 5-8, p. 2485-2504.

- [54] **K. BOUACHA, M.A. YALLESE, T. MABROUKI et al.** Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2010, vol. 28, no 3, p. 349-361.
- [55] **H. Aouici, H. Bouchelaghem, M. A. Yallese, M. Elbah et B. Fnides,** Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 73, 1775–1788 (2014).
- [56] **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.
- [57] **Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., Mabrouki, T., Amirat, A., & Rigal, J. F.** (2010). Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). *Machining Science and Technology*, 14(4), 471-501.
- [58] **Sahoo, A. K., & Sahoo, B.** (2012). Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts. *Measurement*, 45(8), 2153-2165.
- [59] **Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., Amirat, A., & Belhadi, S.** (2007). Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel. *Mechanics*, 65(3), 57-65.
- [60] **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.
- [61] **Özel, T., Karpas, Y., Figueira, L., & Davim, J. P.** (2007). Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. *Journal of materials processing technology*, 189(1-3), 192-198.
- [62] **Özel, T., Karpas, Y., Figueira, L., & Davim, J. P.** (2007). Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. *Journal of materials processing technology*, 189(1-3), 192-198.
- [63] **H. W. Lemke, J. Seewig, H. Bodschwina, S. Brinkmann.** Characteristic parameters of the Abbott curve for the integral evaluation of 3D measured cylinder liner surfaces, *MTZ worldwide*, 64 (2003) 34-36.
- [64] **D. Prostrednik, P. H. Osanna,** The Abbott curve—well known in metrology but not on technical drawings, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38 (1998) 741-745.
- [65] **M. Krystek,** A fast Gauss filtering algorithm for roughness measurements, *Precision Engineering*, 19 (1996) 198-200.
- [66] **S. Brinkmann,** Development of a robust Gaussian regression filter for three dimensional surface analysis, In X. *International colloquium on surfaces Chemnitz*, 122 (2000).
- [67] **S. Brinkmann, H. Bodschwina, H. W. Lemke,** Accessing roughness in three-dimensions using Gaussian regression filtering, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41 (2001) 2153-2161.

- [68] **H. Li, X. Jiang, Z. Li**, Robust estimation in Gaussian filtering for engineering surface characterization, *Precision Engineering*, 28 (2004) 186-193.
- [69] **H. Li, C. F. Cheung, X. Q. Jiang, W. B. Lee, S. To**, A novel robust Gaussian filtering method for the characterization of surface generation in ultra-precision machining, *Precision engineering*, 30 (2006) 421-430.
- [70] **I. Meddour, M. A. Yallese, R. Khattabi, M. Elbah, L. Boulanouar**, Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77 (2014) 1387-1399
- [71] **V. C. Venkatresh, C. T.YE, D. T. Quinto, D. E. Hoy**, Performance studies of uncoated, CVD-coated and PVD-coated carbides in turning and milling, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 40 (1991) 545-550.
- [72] **S. Sharif, E. A. Rahim**, Performance of coated-and uncoated-carbide tools when drilling titanium alloy—Ti-6Al4V, *Journal of Materials Processing Technology*, 185 (200) 72-76.
- [73] International Organization for Standardization (1996) ISO 13565-2. Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties. Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve.
- [74] **M. C. Malburg, J. Raja, D. J. Whitehouse**, Characterization of surface texture generated by plateau honing process, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 42 (1993) 637-639.
- [75] **L. De Chiffre, P. Leonardo, H. Trumpold, D. A. Lucca, G. Goch, C. A. Brown** . Quantitative characterisation of surface texture, *CIRP annals-manufacturing technology*, 49 (2000) 635644-642652.
- [76] **H. Songtao, H. Weifeng, L. Xiangfeng, W. Yuming**. Probe model of wear degree under sliding wear by Rk parameter set, *Tribology International*, 109 (2017) 578-585
- [77] **D. M. D'Addona, S. J. Raykar**. Analysis of surface roughness in hard turning using wiper insert geometry, *Procedia CIRP*, vol.41 (2016), 841-846.
- [78] **W. S. Lin, B. Y. Lee, C. L. Wu**. Modeling the surface roughness and cutting force for turning. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 108 (2001), 286-293.
- [79] **M. A. Yallese, L. Boulanouar, K. Chaoui**, Usinage de l'acier 100Cr6 tremp'ée par un outil en nitrure de bore cubique. *Mécanique & Industries*, vol. 5 (2004), 355–368.
- [80] **R. Saravanan, R.S.Sankar, P. Asokan**, et al. Optimization of cutting conditions during continuous finished profile machining using non-traditional techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, vol. 26, no 1-2, p. 30-40.
- [81] **M. Elbah, M.A. Yallese, H. Aouici, et al**. Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel. *Measurement*, 2013, vol. 46, no 9, p. 3041-3056.
- [82] **M. Mia, N.R. Dhar**. Response surface and neural network based predictive models of cutting temperature in hard turning. *Journal of advanced research*, 2016, vol. 7, no 6, p. 1035-1044.
- [83] **Ö. Tuğrul and K. Yiğit**. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, no 4, p. 467-479.

- [84] **C.X. Feng**. An experimental study of the impact of turning parameters on surface roughness. In: Proceedings of the industrial engineering research conference. 2001.
- [85] **S. MEKHILEF**, Etude des nouveaux matériaux de coupe et Leur aptitude à l'usinage, thèse doctorat (2007).
- [86] **A. PANDA, A. SAHOO, et R. ROUT**, Multi-attribute decision making parametric optimization and modeling in hard turning using ceramic insert through grey relational analysis: A case study. *Decision Science Letters*, 2016, vol. 5, no 4, p. 581-592.
- [87] **R.V. RAO, et V.D. KALYANKAR**, Parameters optimization of advanced machining processes using TLBO algorithm. *EPPM, Singapore*, 2011, vol. 20, p. 21-31.
- [88] **N. YUSUP, A.M. ZAIN, et S.Z.M. HASHIM**, Overview of PSO for optimizing process parameters of machining. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 29, p. 914-923.
- [89] **I. MUKHERJEE et P.K. RAY**, A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no 1-2, p. 15-34.
- [90] **Kh. KHODER**, Optimisation de composants hyperfréquences par la technique des plans à surfaces de réponses, thèse de doctorat (2011)
- [91] **R. H. Myers, D .C. Montgomery**, Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc. New York, (2002).
- [92] **R. Saravanan, R.S.Sankar, P. Asokan, et al.** Optimization of cutting conditions during continuous finished profile machining using non-traditional techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, vol. 26, no 1-2, p. 30-40.
- [93] **N. Suresh Kumar Reddy, P. Venkateswara Rao**. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, vol. 26, no 11-12, p. 1202-1210.
- [94] **C. Franci, J. BALIC**. Optimization of cutting process by GA approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2003, vol. 19, no 1, p. 113-121.
- [95] **John Henry Holland**. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press, 1992.
- [96] **P. Palanisamy, I. Rajendran and S. Shanmugasundaram**. Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 32, no 7, p. 644-655.
- [97] **P. Asokan, R. Saravanan and K. Vijayakumar**. Machining parameters optimisation for turning cylindrical stock into a continuous finished profile using genetic algorithm (GA) and simulated annealing (SA). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, vol. 21, no 1, p. 1-9.
- [98] **P.S. Sivasakthivel, R.Sudhakaran**. Optimization of machining parameters on temperature rise in end milling of Al 6063 using response surface methodology and genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67, no 9-12, p. 2313-2323.

Les résultats de cette thèse ont été présentés via plusieurs publications et communications internationales qui sont comme suit :

Publications Internationales :

Intitulé de la Publication: *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.*

Intitulé de la Revue: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology

Url de la revue/article : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-2931-8>

Auteurs : Aissa Laouissi, Mohamed Athmane Yalles, Ahmed Belbah, Salim Belhadi, Abdelkrim Haddad.

Intitulé de la Publication: *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 .*

Intitulé de la Revue: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.

Url de la revue/article : <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-019-1708-9>

Auteurs : Aissa Laouissi, Mohamed Athmane Yalles, Ahmed Belbah, Ahmed Khellaf, Abdelkrim Haddad.

Communications internationales :

1. ICM 2017, ANNBA, 26-27 Avril 2017

Modélisation et optimisation des paramètres de coupe lors de l'usinage de La fonte grise Ft25 par une céramique en Nitrure de Silicium (Si₃N₄) en utilisant les méthodes RMS et DF.

A. Laouissi, M.A. Yaltese, A. Benkhelladi, A. Belbah, S. Boutabba.

2. Le 4ème Séminaire sur les Technologies Mécaniques Avancées, Tlemcen, 14 et 15 Novembre 2017

Etude des performances de la céramique en nitrure de silicium (Si₃N₄) lors de l'usinage de la fonte grise FGL250

A. Laouissi, M.A. Yaltese, A. Belbah, A. Benkhelladi.

3. 2ème Congrès International sur les Ingénieries Civile, Mécanique et Electrique pour l'Energie CMEEE 2017 – Marrakech

Modélisation et optimisation des paramètres de coupe lors du tournage de la fonte FGL250 par la céramique en nitrure de silicium (Si_3N_4) non revêtue en utilisant l'approche ANN et la méthode PSO.

A. Laouissi, M.A. Yallese, A. Belbah, S. Belhadi, S. Boucherit et A. Benkhelladi.

4. 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2018 ICAME 2018

Analysis of the surface roughness when turning gray cast iron by coated and uncoated silicon nitride ceramic tools using 2D and 3D functional parameters.

A. Laouissi, M.A. Yallese, A. Belbah, S. Belhadi.