

République Algérienne Démocratique & populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

de

L'université de 08 Mai 1945 Guelma

Spécialité : Génie Mécanique

Option: Productive

Présentée par

HESSAINIA ZAHIA

ETUDE DE L'IMPACT DES PARAMÈTRES AFFECTANT LA RUGOSITÉ
DES SURFACES ET LES EFFORTS DE COUPE EN USINAGE DES PIÈCES
TRAITÉES THERMIQUEMENT

Directeur de thèse : Pr. Yaltese Mohamed Athmane

Devant le jury d'examen composé de :

| | | |
|---------------|--|------------|
| L. Boulanouar | Professeur, Université Annaba | Président |
| I. Amara | Professeur, Université Constantine | Examineur |
| S. Boutabba | Maître de conférences / A, Université Guelma | Examineur |
| M.A. Yaltese | Professeur, Université Guelma | Rapporteur |
| S. Belhadi | Maître de conférences / B, Université Guelma | Invité |

Dédicace

*Je dédie très spécialement ce travail à
ma famille avec tout mon amour*

REMERCIEMENTS

Avant de présenter mon travail,

Louange à Allah en lui proclamant toute ma gratitude et tous mes remerciement pour m'avoir aidé à surmonter les difficultés et de mener à terme ce travail.

Ce travail a été réalisé au laboratoire de Mécanique et de structures (LMS) du département de Génie Mécanique à l'université de 08 Mai 1945 Guelma.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur M. A. Yallese pour avoir accepté d'encadrer mon travail ainsi que pour ses précieux conseils.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur L. Boulanouar pour avoir bien voulu nous faire l'honneur de présider notre jury de thèse.

Je tiens à remercier Monsieur les membres de jury :

Le professeur I. Amara, le docteur S. Boutabba et le docteur S. Belhadi pour avoir accepté d'examiner mon travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur T. Mabrouki, J-F Rigal du Laboratoire de Mécanique des contacts et des solides (LaMCoS) INSA de Lyon.

J'adresse aussi mes vifs remerciement aux techniciens de laboratoire (LMS) : M. Aib et A. Madi sans oublier le personnel du département de génie mécanique.

Un grand merci à mes frères et ma sœur et particulièrement mes parents pour leur soutien et leurs encouragements, ainsi qu'à toutes celles et tous qui m'ont aidée et soutenue durant toute la période de la thèse.

Et pour finir, je n'ai que son prénom en tête même s'il s'est plus compliqué que facilité la tâche, c'est mon enfant **Walid**, qui est mon rayon de soleil.

RÉSUMÉ

Les outils céramiques sont considérés comme une évolution importante dans le domaine des matériaux de coupe, ils sont très utilisés en tournage des pièces traitées thermiquement. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude. Elle concerne une investigation expérimentale sur les paramètres affectant la rugosité de surface et les efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier AISI 4140 traités à 57 HRC ainsi qu'une modélisation et une optimisation.

La première partie de notre travail concerne une étude comparative entre les performances en terme de rugosité de surface, d'effort de coupe et d'usure des différentes céramiques de coupe utilisées tels que (la céramique revêtue CC6050, la céramique non revêtue CC650 et la céramique Wiper CC6050WH). La deuxième partie du travail expose les résultats d'une étude comparative entre deux céramiques revêtue et non revêtue en termes de rugosité de surface et des efforts de coupe pour un plan factoriel complet (27 Essais).

La troisième partie présente une étude statistique des résultats pour un plan de Taguchi de 18 essais et cela afin de déterminer les modèles mathématiques des différents paramètres technologiques étudiés en fonction des conditions de coupe et de la géométrie de l'outil.

La quatrième partie concerne une étude de l'influence des conditions de coupe et des vibrations de l'outil sur les critères de rugosité de surface liées à la hauteur du profil (Ra et Rt).

Les résultats de cette étude débouchent sur une modélisation et une optimisation en utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR) associés à la technique d'optimisation des réponses multiples (désirabilités) qui sont utilisés pour trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs de minimisation des critères de la rugosité de surface et des valeurs des efforts de coupe. Les modèles mathématiques déterminés, nous a permis d'en déduire le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe. Ces modèles représentent un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent la détermination des conditions d'usinage optimales et l'élaboration des abaques.

Mots clés : Tournage dur, Rugosité de surface, Efforts de coupe, Outils revêtue, Plan d'expériences, Analyse de la variance (ANOVA), Méthodologie de surface de réponse (MSR), Optimisation.

ABSTRACT

Ceramic tools are known as an important achievement in the field of cutting tools. One of the principal applications of the ceramic tools is in the machining of heat treated work piece field. In the present research project, we study an experimental investigation of parameters affecting the surface roughness and the cutting forces during machining of AISI 4140 steel treated to 57 HRC, also the modeling and optimization of different parameters are considered. The present manuscript is divided into four chapters.

In the first chapter, we present a comparative of the performance in terms of surface roughness, cutting forces and tool wear of different ceramic used as (coated ceramic CC6050, uncoated CC650). The results of the comparative study between two kinds of ceramic, the coated and uncoated ceramic in terms of surface roughness and cutting forces of a full factorial design (27 tests) are presented in the second chapter. The third chapter presents a statistical analysis of the results for a plan Taguchi 18 trials in order to determine the mathematical models of different technological parameters studied in function of cutting conditions and tool geometry. The fourth chapter concerns the study of the influence of cutting conditions and tool vibration on surface roughness criteria related to the profile height (Ra and Rt).

The results of the present study lead to a modeling and optimization by using the response surface methodology (*RSM*) coupled with the optimization of the technical multiples responses (desirability), these techniques are used to determine the optimal values of the cutting parameters in order to reach objective of minimizing the criteria of the surface roughness and values of cutting forces. The developed mathematical models allow the determination of the influence of each element of cutting regime. These models show an important industrial interest, since they allow the determination of optimal machining conditions and the preparation of abaque.

Key words: Hard turning, Surface roughness, Cutting forces, Coated tools, Plan of tests, Analysis of variance (ANOVA), response surface methodology (RSM), Optimization.

ملخص:

تعتبر أدوات الخزف بمثابة تطور عظيم في مجال مواد القطع، فهي جد مستعملة أثناء خراطة القطع المعالجة حرارياً. في هذا الإطار تستدرج هذه الدراسة .

فهي تخص دراسة تجريبية على العوامل المؤثرة على حالات السطح (الخشونة) و جهود القطع ثناء تشغيل الفولاذ (AISI 4140) المعالج حرارياً تصل صلابته الى (57 HRC) وكذلك النمذجة والعملية تحسينية (une optimisation).

القسم الأول من العمل خصص لدراسة مقارنة النتائج القياسية من حيث حالات السطح (الخشونة) ، جهود القطع وتآكل مختلف أدوات القطع المستعملة من الخزف مثل (أداة الخزف المطلات CC6050 ، الغير مطلات CC650 وأداة الخزف من نوع Wiper CC6050WH). القسم الثاني من العمل يعرض نتائج لدراسة بالمقارنة بين أداتين مطلية و غير مطلية من خلال حالة السطح (الخشونة) و جهود القطع لتصميم عاملي كامل (27 تجربة) (plan factoriel complet).

القسم الثالث يمثل دراسة احصائية لنتائج باستعمال تصميم طاكوشي (Taguchi) 18 تجربة و هذا من اجل استنتاج معادلات رياضية نموذجية لمختلف العناصر التكنولوجية المدروسة بدلالة شروط القطع والشكل الهندسي للأداة.

القسم الرابع يمثل دراسة تأثير شروط القطع واهتزازات الاداة على معايير خشونة السطح المرتبطة بارتفاع الجانبية (profil) (Ra et Rt).

النتائج المحصل عليها لهذه الدراسة تجرنا الى انجاز نمذجة (une modélisation) و تحسين (une optimisation) باستعمال الطريقة الاحصائية تسمى بمساحة الاجوبة (MSR) مشتركة مع تقنية العملية التحسينية المتعددة الاجوبة (désirabilités) التي استعملت للحصول على القيم الحسنى لشروط القطع التي ينتج عنها قيم دنيا لخشونة السطح و جهود القطع. المعادلات الرياضية النموذجية الموجودة تسمح لنا باستنتاج مدى تأثير كل عنصر من شروط القطع على النتائج.

تمثل المعادلات النموذجية مصلحة عظمية للصناعة، لأنها تسمح لنا باستنتاج الشروط الحسنى للتشغيل و اعداد جداول خاصة لهذا الاخير.

الكلمة المفتاحية: الخراطة الصلدة، خشونة السطح، جهود القطع، الادوات المطلية، تصميم التجارب، تحسين

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| DÉDÉCACE..... | 1 |
| REMERCIEMENTS..... | 2 |
| RÉSUMÉ (français)..... | 3 |
| ABSTRACT..... | 4 |
| RÉSUMÉ (arabe)..... | 5 |
| TABLE DES MATIÈRE..... | 6 |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS..... | 13 |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 14 |
| CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE | 17 |
| I.1 GÉNÉRALIÉS SUR LA COUPE DES MÉTAUX..... | 18 |
| I.1.1. Introduction..... | 18 |
| I.1.2. La définition de la coupe..... | 18 |
| I.1.3. Définitions de l'aptitude à l'usinage..... | 19 |
| I.2. L'USINAGE DES MÉTAUX DURS..... | 19 |
| I.2.1. Généralité..... | 19 |
| I.2.2. Les nouvelles stratégies de fabrication..... | 21 |
| I.2.3. L'usinabilité des aciers..... | 21 |
| I.2.3.2. Définition et techniques..... | 22 |
| I.2.3.4. La formation du copeau des aciers..... | 22 |
| I.3. L'USINAGE DUR..... | 23 |
| I.4. MATÉRIAUX USINÉS EN TOURNAGE DUR..... | 25 |
| I.5. EVOLUTION DES MATÉRIAUX A OUTILS..... | 26 |
| I.5.1. Introduction..... | 26 |
| I.5.2. Evolution des matériaux des outils de coupe..... | 26 |
| I.5.3. Texture des outils de coupe modernes..... | 27 |
| I.5.3.1. Les substrats..... | 28 |
| I.5.3.2. Les revêtements..... | 29 |

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| I.5.4. Les procédés de fabrication des revêtements..... | 30 |
| a) LE DÉPOT CVD..... | 31 |
| b) LE DÉPOT PVD..... | 31 |
| I.5.5. Rôle présumé des revêtements..... | 32 |
| I.6. CARACTÉRISTIQUE DES SURFACES USINÉES..... | 32 |
| I.6.1. Etats de surface des pièces usinées..... | 32 |
| I.7. USURE ET DÉFAILLANCE DES MATÉRIAUX DE COUPE..... | 35 |
| I.7.1. Généralités..... | 35 |
| I.7.2. Influence des paramètres de coupe sur l'usure..... | 37 |
| I.7.3. Usure des outils de coupe..... | 38 |
| I.7.4. Différentes manifestations de l'usure de l'outil..... | 38 |
| I.7.4.1. Formes d'usures..... | 38 |
| • Usure en dépouille où usure frontale..... | 39 |
| • Usure en cratère..... | 39 |
| • Entaille..... | 40 |
| • Usure par déformation plastique..... | 40 |
| • Ebréchures et fissuration d'arête | 41 |
| I.7.4.2. Mécanismes d'usure des outils de coupe..... | 41 |
| • L'usure par abrasion..... | 41 |
| • L'usure par adhésion..... | 41 |
| • L'usure par diffusion..... | 41 |
| I.8. TEMPÉRATURE DE COUPE..... | 42 |
| I.8.1. Sources de chaleur..... | 42 |
| I.8.2. Evolution de la température dans le processus de coupe..... | 43 |
| I.8.3. Mesure de la température..... | 44 |
| I.9. EFFORTS ET DYNAMIQUE DE LA COUPE..... | 46 |
| I.9.1. Efforts de coupe | 46 |
| I.9.2. Vibrations en coupe..... | 47 |

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| A) Les vibrations forcées..... | 47 |
| B) Les vibrations auto excitées (broutement)..... | 48 |
| I.10. ETAT DE L'ART..... | 48 |
| I.11. CONCLUSION..... | 72 |
| CHAPITRE II : APPROCHE EXPÉRIMENTALE | 73 |
| II.1. INTRODUCTION..... | 74 |
| II.2. EQUIPEMENT ET PREPARATION DES EXPÈRIENCES..... | 74 |
| II.2.1. Machine outil..... | 74 |
| II.2.2. Matériau à usiner..... | 74 |
| II.2.3. Outils de coupe utilisés..... | 77 |
| II.2.4. Enregistrement des efforts de coupe..... | 78 |
| II.2.5. Caractérisation de la surface de la pièce..... | 80 |
| II.2.6. Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille VB..... | 80 |
| II.2.7 Enregistrement des effets des vibrations..... | 81 |
| II.3. PROCEDURES D'ESSAIS..... | 82 |
| II.3.1. Eléments considérés lors des essais..... | 82 |
| II.3.2. Méthodologie d'essais..... | 82 |
| II.3.2.1 Méthode uni factorielle..... | 83 |
| II.3.2.2 Méthode des plans d'expériences..... | 85 |
| II.3.2.2.1 Présentation des plans d'expériences..... | 85 |
| II.3.2.2.2 Plan d'expérience..... | 85 |
| II.3.2.2.3 Choix du type de plan..... | 87 |
| II.4. CONCLUSION..... | 91 |
| CHAPITRE III : ETUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DES CÉRAMIQUES | 92 |
| III.1. INTRODUCTION..... | 93 |
| III.2. DÉTERMINATION DE LA PRESSION SPÉCIFIQUE..... | 93 |
| III.3. DÉTERMINATION DU DOMAINE DE VALIDITÉ..... | 94 |
| a) Pression de coupe..... | 94 |

| | |
|--|------------|
| b) Avances de l’outil de coupe..... | 96 |
| c) Profondeur de coupe..... | 97 |
| III.4. EVOLUTION DES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES PARAMÈTRES DU RÉGIME DE COUPE..... | 98 |
| III.4.1. Effet de la vitesse de coupe..... | 98 |
| III.4.2. Effet de l’avance..... | 100 |
| III.4.3. Effet de la profondeur de coupe..... | 101 |
| III.5.ÉVOLUTION DE LA RUGOSITÉ EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE..... | 103 |
| III.5.1. Effet de la vitesse de coupe..... | 103 |
| a) Effet du revêtement sur la rugosité R_a | 105 |
| b) Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité R_a | 105 |
| III.5.2. Effet de l’avance..... | 107 |
| III.5.3. Effet de la profondeur de coupe..... | 107 |
| III.6. RÉSULTAT DE L’INFLUENCE DE DIFFÉRENTES NUANCES DE PLAQUETTES SUR LA RUGOSITÉ, EFFORTS DE COUPE ET L’USURE EN DÉPOUILLE À LA FIN DE LA PASSE..... | 109 |
| III.7. ANALYSE DES RÉSULTATS..... | 111 |
| III.7.1. Analyse des qualités des surfaces obtenues..... | 111 |
| III.7.2. Analyse des efforts de coupe..... | 112 |
| III.8. CONCLUSION..... | 112 |
| CHAPITRE IV : MODÉLISATION ET OPTIMISATION DE LA RUGOSITÉ ET DES EFFORTS DE COUPE POUR DEUX CÉRAMIQUE REVÊTUE ET NON REVÊTUE | 114 |
| IV.1. INTRODUCTION..... | 115 |
| IV.2. MÉTHODOLOGIE DES PLANS D’EXPÉRIENCE UTILISÉE POUR L’ÉTUDE DES DEUX CÉRAMIQUES (CC6050 ET CC650)..... | 115 |
| IV.3. DESCRIPTIF DE LA MÉTHODOLOGIE DES SURFACES DE RÉPONSE.... | 116 |
| IV.4. TESTES DE VALIDITÉ DES MODÈLES..... | 117 |
| IV.5. OPTIMISATION..... | 119 |
| IV.6. MODÉLISATION DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE ET LES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE COUPE (CAS DE LA CÉRAMIQUE REVÊTUE CC6050)..... | 121 |
| IV.6.1. Analyse et discussion des résultats expérimentaux réalisée par la céramique revêtue (CC6050)..... | 121 |

| | |
|--|----------------|
| IV.6.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra) : Modèle quadratique complet pour la céramique revêtue (CC6050)..... | 122 |
| IV.6.3. Régression de la surface de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de Vc , f et ap pour la céramique revêtue (CC6050)..... | 125 |
| IV.6.4. Comparaison entre le critère de la rugosité (Ra) expérimentale et estimés pour la céramique revêtue CC6050..... | 126 |
| IV.6.5. Analyse de la variance (ANOVA) des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) : Modèle quadratiques complets pour la céramique revêtue (CC6050)..... | 128 |
| IV.6.6. Régression de la surface de réponse des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction de Vc , f et ap pour la céramique revêtue (CC6050)..... | 131 |
| IV.6.7. Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et estimés pour la céramique revêtue CC6050..... | 135 |
| IV.6.8. Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité arithmétique (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) pour la céramique revêtue (CC6050)..... | 138 |
| IV.7. MODÉLISATION DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE ET LES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE COUPE (CAS DE LA CÉRAMIQUE NON REVÊTUE CC650). | 139 |
| IV.7.1. Analyse et discussion des résultats expérimentaux réalisés par la céramique non revêtue (CC650)..... | 139 |
| IV.7.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra) : Modèle quadratique complet pour la céramique non revêtue (CC650)..... | 140 |
| IV.7.3. Régression de la surface de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de Vc , f et ap pour la céramique non revêtue (CC650)..... | 142 |
| IV.7.4. Comparaison entre le critère de la rugosité (Ra) expérimentale et estimés pour la céramique non revêtue CC650..... | 144 |
| IV.7.5. Analyse de la variance (ANOVA) des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) : Modèle quadratiques complets pour la céramique non revêtue (CC650)..... | 145 |
| IV.7.6. Régression de la surface de réponse des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction de Vc , f et ap pour la céramique non revêtue (CC650)..... | 149 |
| IV.7.7. Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et estimés pour la céramique non revêtue CC650..... | 152 |
| IV.7.8. Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité arithmétique (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) pour la céramique non revêtue (CC650)..... | 155 |
| IV.8. CONCLUSION | 156 |
| CHAPITRE V: MODÉLISATION DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE ET LES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE ET LA GÉOMÉTRIE DE L'OUTIL | 158 |
| V.1. INTRODUCTION | 159 |
| V.2. DÉTERMINATION DU MODÈLE DE LA RUGOSITÉ Ra EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE COUPE ET LA GÉOMÉTRIE DE L'OUTIL | 159 |
| V.2.1. Résultats des essais de la rugosité selon le plan de Taguchi..... | 159 |
| V.2.2. Analyse de la variance pour la rugosité Ra : Modèle linéaire complet..... | 160 |
| V.2.3. facteurs influents..... | 161 |
| V.2.4. Analyse de régression de la rugosité (Ra) en fonction en fonction du régime de coupe (Vc , f et ap) et la géométrie de l'outil (γ_r , r)..... | 163 |
| V.2.5. Analyse de la surface de réponses..... | 164 |
| V.2.6. Comparaison entre le critère de la rugosité expérimentale et estimée..... | 165 |
| V.3. DÉTERMINATION DES MODÈLES DES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE COUPE ET LA GÉOMÉTRIE DE L'OUTIL | 167 |

Table des matières

| | |
|---|-----|
| V.3.1. Résultats des expériences..... | 167 |
| V.3.2. Analyse des variances (ANOVA) des efforts de coupe : Modèles linéaires complets. | 168 |
| V.3.3. Facteurs influents..... | 170 |
| V.3.4. Analyses de régression des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction en fonction du régime de coupe (V_c , f et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r)..... | 173 |
| V.3.5. Analyse de la surface de réponses..... | 174 |
| V.3.6. Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et prédites : (a) F_a , (b) F_r et (c) F_t | 179 |
| V.4 CONCLUSION | 181 |
| CHAPITRE VI : MODÉLISATION ET OPTIMISATION DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE ET DES | 183 |
| VI.1. INTRODUCTION | 184 |
| VI.2. MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES CRITÈRES DE LA RUGOSITÉ (R_a ET R_t) | 184 |
| VI.2.1. Analyse des critères de la rugosité (R_a et R_t) par la méthode de la surface de réponse (MSR)..... | 185 |
| VI.2.2. Analyse et discussion des résultats expérimentaux des critères de la rugosité réalisés par la céramique non revêtue (CC650) selon le plan de Taguchi L_{27} ; $N=3^3$ | 187 |
| VI.2.3. Analyse de la variance (ANOVA) pour les critères de la rugosité (R_a et R_t) en fonction de V_c , f , ap , V_y et V_z : Modèles quadratiques complets..... | 189 |
| VI.2.4. Analyse de régression des critères de la rugosité (R_a et R_t) en fonction en fonction du régime de coupe (V_c , f et ap) et les effets des vibrations (V_y , V_z)..... | 192 |
| VI.2.5. Comparaison entre les critères de la rugosité (R_a et R_t) expérimentales et estimés... .. | 194 |
| VI.2.6. Analyse de la surface de réponses 3D..... | 197 |
| VI.2.7. Optimisation..... | 199 |
| VI.3. CONCLUSION | 202 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE | 207 |
| PERSPECTIVES | 209 |
| REFERENCES | 217 |
| LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS | 218 |
| ANNEXE | 219 |
| ANNEXE N°1 | 220 |
| ANNEXE N°2 | 221 |
| ANNEXE N°3 | 222 |
| ANNEXE N°4 | |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

| | |
|-----------------------------|---|
| CC6050 | céramique revêtue |
| CC6050WH | céramique revêtue Wiper |
| CC650 | céramique non revêtue (mixte) |
| CVD | dépôt chimique en phase vapeur |
| PVD | dépôt physique en phase vapeur |
| r | rayon de bec de l'outil [mm] |
| α | angle de dépouille [degré] |
| χ_r | angle de direction principale [degré] |
| γ | angle de coupe [degré] |
| λ | angle d'inclinaison d'arête [degré] |
| Vc | vitesse de coupe [m/min] |
| f | avance [mm/tr] |
| ap | profondeur de passe [mm] |
| L | longueur d'usinage [mm] |
| l | largeur [mm] |
| h | hauteur [mm] |
| P | Puissance [Kw] |
| t | temps d'usinage [min] |
| H | dureté Rockwell [HRC] |
| Fa | Effort de coupe, composante dans la direction d'avance [N] |
| Ft | efforts de coupe, composante dans la direction de coupe [N] |
| Fr | effort de coupe, composante dans la direction de la profondeur de passe [N] |
| Vy | accélération dans la direction de la force de coupe radial en [m/s ²] |
| Vz | accélération dans la direction de la force de coupe tangentielle en [m/s ²] |
| R² | coefficient de détermination |
| Ra | écart arithmétique moyen [μ m] |
| Rt | écart total de la rugosité [μ m] |
| Rz | hauteur moyenne de profil [μ m] |
| VB | usure en dépouille [mm] |
| MSR | méthodologie de surface de réponse |
| ANOVA | analyse des variances |
| SeqSS | somme des carrés |
| Adj MS | moyenne des carrés |
| P | probabilité d'obtenir du résultat par hasard |
| α | niveau de signification |
| DL | degrés de libertés |
| Con% | pourcentage de contribution [%] |
| MSE | erreur quadratique moyenne |
| TD | tournage dur |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les stratégies d'optimisation actuelles reposent sur l'augmentation de la productivité, la qualité, ou la diminution du coût en cherchant à :

- augmenter les taux d'enlèvement de matière,
- améliorer la qualité des pièces (précision de la finition),
- fabriquer au plus près des formes et des côtes (moins d'opérations et moins d'enlèvement de matière),
- introduire de séquences machines plus efficaces et avec une plus grande flexibilité.

Le tournage dur englobe toutes ces stratégies en substituant une opération intermédiaire (la rectification). Ceci n'est réalisable qu'avec l'introduction de nouveaux concepts de fabrication et de nouveaux matériaux de coupe qui se composent de matériaux de plus en plus performant (allant des aciers rapides, des carbure, des céramiques, des CBN, voire des diamants....), sur lesquels sont déposés des revêtements toujours plus performants, facilitant l'écoulement du copeau et formant une protection thermique de l'outil (TiCN, TiAlN, Al_2O_3 , HFN, CrN....),

En vue d'appréhender la maîtrise de l'opération de tournage dur, le travail présenté dans cette thèse s'articule de la façon suivante :

Le 1^{er} chapitre, dans un 1^{er} temps traite l'étude bibliographique, présente l'état des connaissances sur l'usinage par tournage, les outils de coupe, les revêtements utilisés et les phénomènes d'usure des outils. Dans un 2^{ème} temps les travaux marquants dans le domaine de l'usinage dur sont présentés et analysés.

Le 2^{ème} chapitre concerne l'expérimentation. Il présente les premières expérimentations faites ayant conduit à une nouvelle expérimentation sur la base des plans d'expériences. Les diverses techniques de mesures utilisées y sont décrites ainsi que le choix des outils et des matériaux d'usinages. Il intègre l'élaboration et la structuration du plan d'expériences et le choix de ces paramètres d'entrée et de ces variables de sortie.

Le 3^{ème} chapitre est consacrée à l'interprétation et à la discussion des résultats obtenus en terme de variation de la rugosité de surface, Les efforts de coupe et l'usure à la fin de la passe qui se rapportent à plusieurs aspects de l'usinage (céramique revêtue CC6050, non revêtue CC650 et Wiper CC6050WH) par comparaison de leurs comportements et de leurs rôles.

Le 4^{ème} chapitre, l'apport de la méthodologie des plans d'expériences est appliquée pour étudier l'influence des paramètres de coupe à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de coupe (ap) sur les différentes performances mesurés, rugosité arithmétique (R_a) et les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t). L'étude est élaborée aux moyens de deux céramiques (revêtue CC6050 et non revêtue CC650) sous même condition d'usinage.

Pour se faire un plan factoriel complet de Taguchi L_{27} (27 essais) est menée à cette étude. L'analyse est effectuée au moyen de la méthodologie de la surface de réponse. L'optimisation des paramètres d'entrées sur les réponses étudiés est effectuée simultanément grâce à la notion de désirabilité.

Le 5^{ème} chapitre traite l'influence des paramètres de coupe : la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), la profondeur de coupe (ap) et la géométrie de l'outil : angle de direction principal (χ_r), rayon du bec (r). Un plan de Taguchi 18 essais est alors mise en œuvre expérimentalement pour étudier les effets des réponses (rugosité arithmétique Ra et les efforts de coupe Fa , Fr et Ft) au moyen de la notion de l'analyse de variance (ANOVA), graphes des (effets, interactions) et les tracés de la surface de réponse en (2D "l'aire" et 3D).

Le 6^{ème} chapitre illustre le potentiel de la méthodologie de surface de réponse. Un plan factoriel complet de Taguchi L_{27} (27 essais) est adoptée pour étudier l'influence des paramètres de coupe (V_c , f et ap) et les effets des vibrations dans la direction de la force de coupe principale (V_z) et de la force de coupe radiale (V_y) sur les paramètres de la rugosité liés à la hauteur des profils (Ra et Rt), l'optimisation des paramètres d'entrées sur les réponses étudiés s'effectués simultanément grâce à la notion de désirabilité.

La dernière partie présente les conclusions de ce travail et les perspectives ouvertes par cette étude.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

I.1 GÉNÉRALIÉS SUR LA COUPE DES MÉTAUX

I.1.1. Introduction

La coupe de métaux, procédé d'usinage dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication. Malgré l'apparition de nouvelles techniques au cours des dernières années, elle reste à l'heure actuelle l'un des procédés les plus largement utilisés. Pour se convaincre de son importance économique, il suffit de considérer le volume des dépenses faites aux U.S.A. pour l'usinage des métaux, il représente 5% du produit national brut, ce qui est énorme pour une seule technique [1], [2].

La recherche d'une productivité toujours meilleure de la coupe des métaux est donc une préoccupation majeure. Cette amélioration permanente repose, plus ou moins directement sur l'étude approfondie des mécanismes physiques et des lois régissant ce procédé. Celle-ci reste donc un objectif essentiel. Son intérêt ne peut être éclipsé par le développement de nouveaux moyens d'usinage ou de nouvelles techniques de commande et de programmation même si ces derniers points participent aussi au développement de la fabrication à grande vitesse. La mise en œuvre rationnelle de ces techniques passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le contrôlent.

I.1.2. La définition de la coupe

A fin de mieux situer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux intervient dans un ensemble de procédés d'élaboration de pièces, par enlèvement de matière en quantités pouvant représenter une proportion notable du matériau brut. Cet enlèvement est alors réalisé par l'action d'un outil possédant un ou plusieurs tranchants de section convexe animé d'un mouvement relatif à la pièce appropriée. Une machine outil fournit à la fois la puissance mécanique nécessaire et réalise le contrôle du mouvement relatif. Cet ensemble constitue un système qui doit être considéré de plusieurs points de vue: cinématique, dynamique, commande,...etc. Dans ce premier chapitre, nous considérons d'abord, le phénomène central de la coupe.

Ce processus de la coupe peut être utilisé à l'état pur comme c'est ordinairement le cas, ou bien avec l'assistance de techniques auxiliaires (par exemples excitations vibratoires, effet thermique, etc....) pour améliorer certaines performances.

Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leurs formes, adaptées à une opération d'usinage, et leur matière. La partie active, le plus souvent amovible est alors appelée plaquette, est maintenue sur le corps d'outil par un moyen de fixation approprié.

En résumé, l'usinage par enlèvement de copeaux désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de matière à l'aide d'un outil tranchant. Cette technique ancienne est souvent appelée coupe onéreuse dans la mesure où la mise en

forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux). Cependant elle reste une technique de fabrication importante et répandue. Dans la mise en forme des métaux par la coupe, le procédé de tournage, objet de notre étude, représente à lui seul 33% du domaine de l'usinage par enlèvement de copeaux [1].

I.1.3. Définitions de l'aptitude à l'usinage

L'usinage est exclusivement une opération de mise en forme par outil coupant avec formation de copeaux. Il a pour but de fabriquer des pièces avec une précision macro géométrique et micro géométrique imposée. Pour un prix de revient minimal [3], la solution adoptée en pratique, sera toujours une affaire de compromis car, en dehors des progrès techniques, toute précision n'est accrue qu'en augmentant le prix de revient. Ceci permet de définir deux premiers critères caractérisant l'aptitude à l'usinage et qui seraient donc :

- La précision de cotes macro et micro géométrique.
- Le prix de revient.

D'autres facteurs qui définissent l'aptitude à l'usinage sont développés dans le paragraphe I.2.2

- L'état de surface.
- Les efforts de coupe.
- La durée de vie de l'outil (endommagement des outils).
- La morphologie du copeau.

I.2. L'USINAGE DES MÉTAUX DURS

I.2.1. Généralité

Lors de l'usinage des métaux une fine couche de métal, le copeau, est arrachée à la pièce à usiner par le biais d'un outil. L'opération d'usinage impose des exigences très élevées au matériau constituant l'outil de coupe. Il s'agit en particulier de la capacité à résister à des contraintes mécaniques élevées. La durée de vie des outils dépend de la capacité du matériau de coupe à résister aux différentes charges mécaniques et thermiques auxquelles il est soumis. La charge mécanique sur l'outil comprend des composantes à la fois statiques et dynamiques. La composante statique en relation avec la rigidité conditionne la précision des cotes à réaliser. La composante dynamique provient du processus de formation du copeau et usuellement, il est considéré que les fréquences associées sont supérieures à 100 Hz. Peuvent s'y ajouter, des composantes dynamiques dont la fréquence est inférieure et qui proviennent par exemple, d'une coupe intermittente.

La charge thermique provenant de la génération de chaleur dans les zones de contact sur les faces de coupe et de dépouille de la plaquette est considérable figure I (1 et 2). La composante

thermique dépend du temps de refroidissement en usinage intermittent et de l'utilisation ou non d'un liquide de coupe.

Le développement général des technologies en conception de produit, contraint à utiliser des matériaux de plus en plus performants (aciers à haute résistance, titane ou alliages réfractaires base nickel). Ces matériaux à hautes caractéristiques mécaniques ont un point commun; ils sont difficiles à usiner.

En tournage, des solutions à ces difficultés sont recherchées par l'exploitation du développement des outils en céramiques (revêtue ou non revêtue) et en nitrure de bore cubique (CBN).

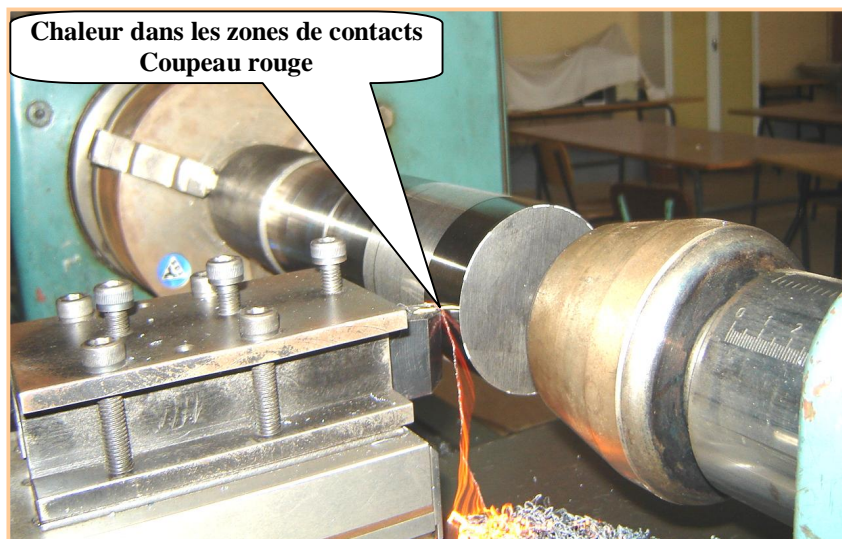


Figure I.1: Usinage par la céramique non revêtue CC650 (tournage dur) photo prise lors de la réalisation d'essai d'usure au laboratoire LMS (Régime de coupe : $V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.15$ mm)

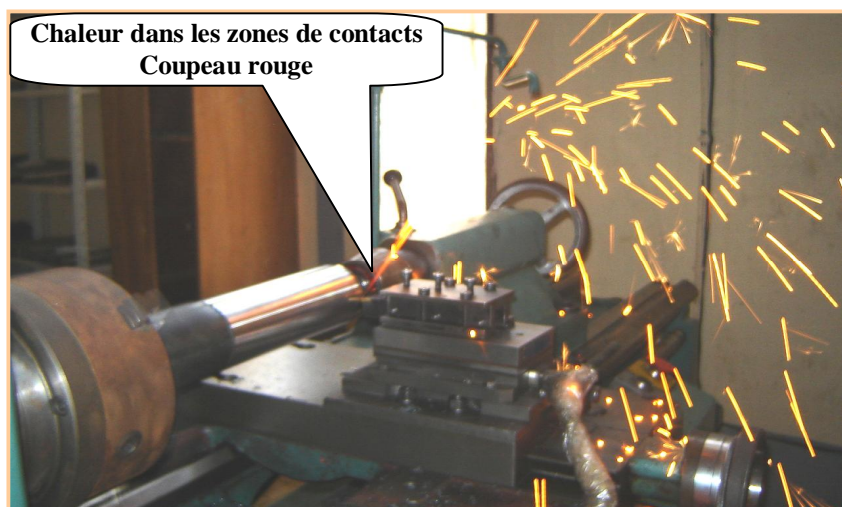


Figure I.2: Usinage par la céramique revêtue CC6050 (tournage dur) photo prise lors de la réalisation d'essai d'usure au laboratoire LMS (Régime de coupe : $V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.15$ mm)

I.2.2. Les nouvelles stratégies de fabrication

La concurrence et la demande en produits exigeants et complexe par leur forme, leur taille, leur matière,... ont conduit les industriels à adapter de nouvelles stratégies pour optimiser l'usinage.

Lors du processus de fabrication d'un produit, les phases intervenant sont de nature variées: usinage, formage, coupe, traitement thermique et procédés de finition. Certains de ces procédés peuvent être évités ; tout dépend des formes initiales et des exigences requises par le produit fini. En général, on peut diminuer le temps de chaque phase en:

- utilisant les avancées technologiques,
- diminuant le temps total de fabrication par l'élimination d'une ou de plusieurs étapes, ou par substitution ou combinaison de plusieurs phases entraînant un gain de coût et de temps.
- augmentant les taux d'enlèvement de matière,
- améliorant la qualité des pièces (précision de la finition),
- augmentant la complexité des pièces pour réduire le nombre des éléments pour l'assemblage,
- fabricant au plus près des formes et des cotes pour réduire le nombre d'opérations et réduire l'enlèvement de matière,
- introduisant des séquences machine plus efficaces et de plus grande flexibilité.

Les différentes stratégies actuelles pour optimiser le processus de fabrication en vue d'augmenter la productivité, la qualité, et de réduire les coûts. Dans ce contexte, des progrès sont envisageables par les possibilités qu'offre l'usinage d'aciers durs ou très résistant sans avoir recours à des traitements thermiques ultérieurs à l'usinage, des opérations de rectification, ou en éliminant les opérations d'ébauche. Le tournage dur amène des changements dans les étapes de production, soit en les substituant, soit en les combinant ou en les éliminant [4].

I.2.3. L'usinabilité des aciers

I.2.3.1. Introduction

Les sidérurgistes ont toujours été préoccupés par les propriétés physiques ou les caractéristiques mécaniques des aciers produits et plus tard, par leurs capacités de résistance à la corrosion. Le paramètre d'usinabilité est longtemps apparu accessoire, mais il s'est avéré lors de leur apparition que les aciers inoxydables étaient difficilement usinables, en particulier les nuances austénitiques.

Le développement de l'industrie du décolletage apporte un éclairage particulier sur cette notion d'usinabilité. Les progrès technologiques dans le domaine de l'industrie mécanique (tours multibroches, tour à commandes numériques, centre d'usinage, outils de coupe en carbure revêtu, cermet ou céramique) permettent le lancement en fabrication de pièces usinées

en moyennes et grandes séries. La concurrence est très vive dans l'industrie de l'usinage et il importe de limiter les frais de transformation, notamment en diminuant les temps d'utilisation de machine. Pour ce faire, les professionnels de l'usinage ont à cœur de choisir les machines adaptées à leur fabrication, les outils les plus performants... et les aciers " les moins difficiles à usiner". L'aptitude à l'usinage (définie de manière générale en paragraphe I.1.3) ou l'usinabilité apparaît bien comme un facteur essentiel.

I.2.3.2. Définition et techniques

L'usinabilité d'un matériau est définie comme son aptitude à subir une opération d'usinage. Elle ne peut être évaluée par un critère universel. Comme nous l'avons vu en (§ I.1.3), son appréciation dépend du type d'opération réalisée et des différents critères que peut retenir l'usineur. La notion d'usinabilité est indissociable de celle de production à moindre coût. Les principaux critères d'usinabilité pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité des aciers, sont:

- La durée de vie des outils et des outillages, l'évolution de l'usure au cours du temps.
- Les efforts de coupe définissant la résistance à la coupe ou la puissance de coupe,
- La fragmentation du copeau,
- La macro géométrie et l'état de surface obtenus sur la pièce usinée (précision dimensionnelle, forme, rugosité,...).

I.2.3.4. La formation du copeau des aciers

Il y a quelques temps encore, les métallurgistes et plus encore les sidérurgistes n'avaient qu'une faible idée de l'importance de la fragmentation du copeau en usinage. Pour l'usineur, le tournage d'une barre d'acier inoxydable se traduit par une production de copeaux longs, touffus et enchevêtrés. Ils s'enroulent autour de l'outil et ils rayent la surface de la pièce. Ils mobilisent l'opérateur de la machine à l'extraction continue et dangereuse de cet écheveau. Cette situation inacceptable a motivé de nombreuses études sur les mécanismes de la formation du copeau (figure I.3). Elles ont pu mettre en évidence les points suivants:

- La déformation du métal et le fortement de la matière usinée sur l'outil sont à l'origine de l'échauffement.
- Le comportement lors de l'érouissage des aciers constituant les pièces brutes influence fortement les températures produites et donc la tenue des cotes.
- S'il existe une zone écrouie en surface de la pièce usinée, les profondeurs de passe devront être suffisantes afin de ne pas endommager la pointe des outils.
- Les températures à l'interface outil copeau dépendent de la conductivité thermique qui varie fortement selon les catégories d'aciers.
- Le contrôle des inclusions qui favorisent le glissement et le fractionnement du copeau constituent l'un des moyens les plus efficaces pour améliorer l'usinabilité.

La formation du copeau pendant l'usinage se fait par cisaillement de la matière dans une petite zone très proche de l'arête de coupe. Trois zones principales de sollicitations sévères peuvent être distinguées lors de l'usinage, (figure I.3): la zone de cisaillement primaire (Z1), la zone de cisaillement secondaire (Z2) et la zone de cisaillement tertiaire (Z3).

- ap : profondeur de passe
- tu : épaisseur du copeau non déformé (avance)
- tc : épaisseur du copeau
- V_c : vitesse de coupe
- D_{av} : direction d'avance
- r_ε : rayon de l'arête
- Z1: zone de cisaillement primaire
- Z2: zone de cisaillement secondaire
- Z3: zone morte
- V_c : vitesse de coupe

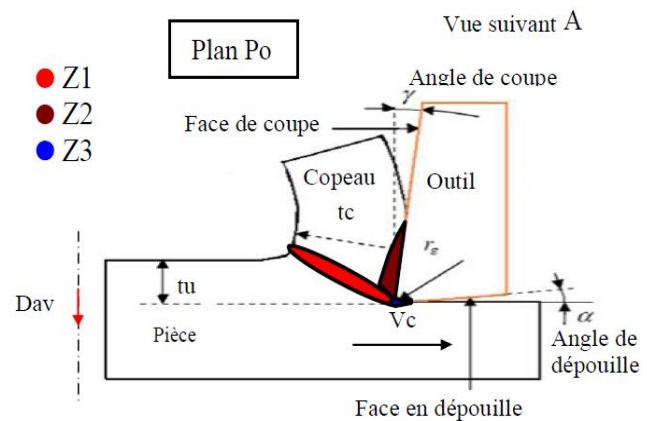


Figure I.3: Formation du copeau en coupe

Zone de cisaillement primaire (Z1) : la formation du copeau se fait principalement dans cette zone sous l'effet du changement de la direction d'écoulement de la matière. Elle est lieu de grandes déformations plastiques et d'échauffements. Le comportement de cette zone définit la nature géométrique des copeaux.

Zone de cisaillement secondaire (Z2) : le copeau formé dans la zone Z1 vient frotter sur la face de coupe de l'outil. Pour les matériaux fortement écrouissables, comme dans le cas des alliages d'aluminium ou des aciers ductiles, il apparaît une forme de contact collant dans une petite zone à l'interface outil/copeau. Cette zone est localisée très près de l'arête de coupe et ce comportement est responsable de l'arête rapportée. Le copeau est glissant sur le reste du contact, à l'interface outil/copeau. L'ensemble de ces zones, appelé zone de cisaillement (Z2), est le siège d'un frottement intense conduisant à une forte élévation de température et à une modification des propriétés mécaniques et physico-chimiques de l'outil.

Zone de cisaillement tertiaire (Z3) : elle correspond au frottement entre la face en dépouille de l'outil de la surface usinée. Un phénomène de cisaillement est aussi identifié dans cette zone

I.3. L'USINAGE DUR

L'usinage dur, c'est-à-dire l'usinage des métaux durs, se définit comme une opération d'usinage sur des aciers traités et durcis thermiquement, d'une dureté de 45 HRC à 68 HRC.

L'usinage dur, est un procédé récent dans son utilisation [2]. Il se présente comme une alternative à la rectification conventionnelle, souvent longue et coûteuse lors de l'usinage de pièce de précision. Il vise soit à la remplacer, soit à la compléter. On espère qu'ainsi le

tournage dur éliminera ce qui est un des goulots d'étranglement des ateliers. Ce procédé remet en cause la méthodologie appliquée à une gamme de fabrication.

Le principal avantage démontré et/ou attendu de l'usinage dur réside dans le fait qu'il est possible de réaliser sur la même machine et donc avec une seule prise de pièce, des usinages dont la tolérance dimensionnelle atteint 0.01 mm. De ce fait, tout en améliorant la qualité de la géométrie, et en éliminant les imprécisions engendrées par les montages / démontages des pièces, il est possible de réaliser des gains de productivité importante.

D'autre part, du point de vue énergétique, l'usinage dur présente un meilleur rendement: il engendre 5 fois moins d'énergie qu'en rectification, donc moins de calories. De plus, en tournage dur, les calories sont évacuées par les copeaux. L'outil et la pièce ne chauffent pratiquement pas.

En résumé, l'usinage des métaux dur est prometteur. Il intéresse de nombreux industriels pour les gains de productivité qu'il doit permettre de réaliser. Avec les méthodes d'usinage traditionnelles, les pièces étaient d'abord usinées puis traitées thermiquement pour atteindre les duretés souhaitées, et enfin rectifiées pour respecter les spécifications notifiées par les plans. Ceci impliquait des montages et des démontages des pièces qui deviennent inutiles avec le tournage dur. Avec des outils capables d'usiner directement des aciers traités, toutes les phases peuvent être réalisées sur le même centre d'usinage, sans démontage et avec un nombre de changement d'outil minimal. Des gains substantiels de productivité peuvent être obtenus par la suppression de la phase de rectification.

Les matériaux durs sont caractérisés par un pouvoir abrasif élevé, une grande dureté, une faible ductilité et un rapport entre la dureté et le module d'élasticité élevée. Lors de l'usinage de ces matériaux, il faut s'assurer que les valeurs pratiques des profondeurs de passes et des avances sont faibles de façon à limiter les efforts de coupe et les déformations.

Pour usiner ces matériaux, on fait appel à des outils coupants de qualité. Les plaquettes utilisées en usinage dur sont des plaquettes carbures, des céramiques et des diamants synthétiques. Les plus utilisées sont celles à base de Nitrure de Bore Cubique (C.B.N) pour leurs bonnes comptabilités avec les aciers. C'est le matériau le plus dur après le diamant. C'est un matériau de synthèse produit sous haute pression et température. Pour prévenir l'écaillage de l'arête de coupe un chanfrein de protection est utilisé, ce qui conduit à un angle de coupe très négatif.

Nous avons vu que l'objectif de l'usinage dur (TD) est que les pièces en acier de dureté élevée soient finies en tournage et sans rectification. Le tournage dur permet d'obtenir de bons états de surface. Les premières appréciations montrent que la rugosité peut descendre jusqu'à des Ra de 0.15 μm , approchant les valeurs obtenues en rectification (inférieur à 0.15 μm). Les tolérances dimensionnelles peuvent atteindre des qualités 6 avec des tolérances géométriques très précises. Des défauts de circularités inférieures à 1 μm peuvent être observés. Les facteurs principaux pour l'obtention de ces caractéristiques sont la machine et l'outil [4]. Pour notre part, nous considérerons en TD, un insert CBN ayant un rayon de bec assez grand, sur une machine à priori très rigide et une vitesse de coupe élevée. Pour quantifier ce procédé il

est important d'identifier la formation du copeau, et de qualifier les surfaces obtenues (Dimension, forme, état de surface, état métallurgique,...) au regard des fonctions qu'elles doivent remplir.

I.4. MATÉRIAUX USINÉS EN TOURNAGE DUR

Les métallurgistes élaborent de nouveaux matériaux répondant à des demandes aval (meilleure usinabilité, plus grande dureté et résistance mécanique,...). La figure I.4, expose les différents matériaux usinés en TD et la (figure I.5), montre la répartition et l'utilisation des aciers traités en France.

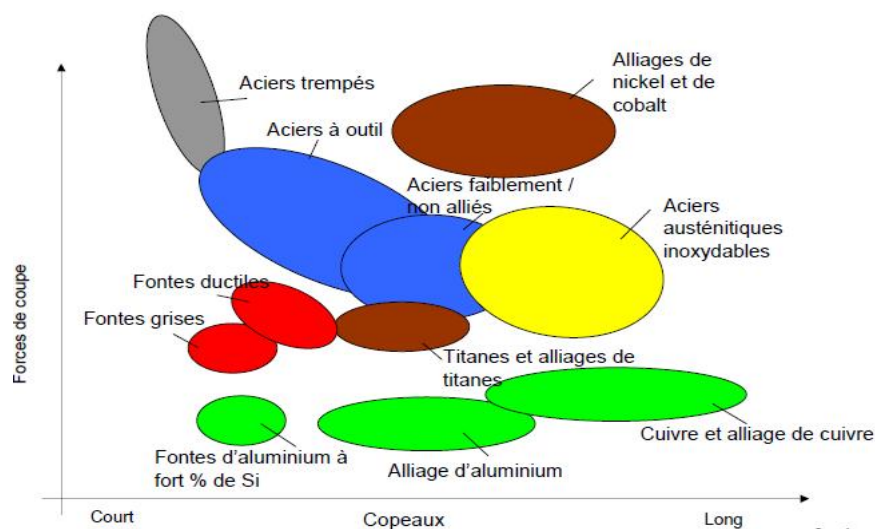


Figure I.4 : Les matériaux à usinés en tournage dur

- Les aciers de construction pour traitement thermique,
- Les aciers d'outillages à froid (X200Cr12, X160CrMoV12,.....),
- Les aciers d'outillages à chaud (X40CrMoV5-1, 40NiCrMo16, 35CrNiMo4.....),
- Les aciers à roulement (100Cr6 où AISI52100),
- Les aciers rapides (HS 6-5-2, HS 2-9-1-8),
- Les aciers de cémentation (16MnCr5, 10CrNi6, C10, 18CrMo4.....)
- Les fontes,
- Les alliages réfractaires à base de nickel (Inconel 718).

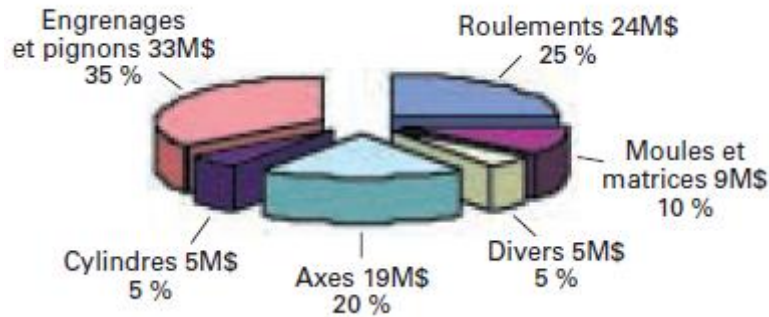


Figure I.5: Répartition et utilisation des aciers traités en France (1996)

I.5. EVOLUTION DES MATÉRIAUX A OUTILS

I.5.1. Introduction

L'usinage des aciers durcis par trempe (tournage dur) nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro grains revêtus, les céramiques, céramique revêtu les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie.

Les conditions optimales d'usinage pour un couple outil matière donné ne sont pas faciles à déterminer. Elles doivent être établies par une série de tests rigoureux. Dans la suite, et dans un premier temps, les matériaux des outils sont présentés pour une exploitation pour le tournage des matériaux durs. En outre, les outils sont également caractérisés par leur géométrie. Une partie de notre travail a consisté à analyser les résultats fournis par la céramique revêtu et non revêtu (à différentes géométries).

I.5.2. Evolution des matériaux des outils de coupe

D'un point de vue technique: les matériaux utilisés sont très divers allant de l'acier rapide aux céramiques (a) figure I.6 en passant par le nitrure de bore cubique (b) (figure I.6).

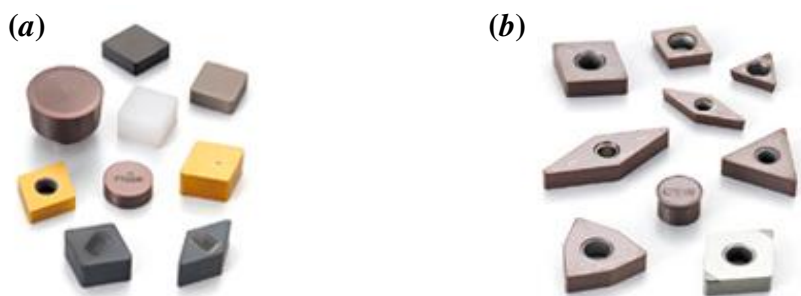


Figure I.6: Classification des matériaux de coupe

L'évolution des matériaux constituant les outils de coupe a été une source de productivité très importante pour l'industrie (figure I.7). Elle a entraîné, au cours du XX^{ième} siècle, un doublement de la productivité tous les dix ans [5].

Cette amélioration de la productivité résulte d'un accroissement important des vitesses de coupe permises, grâce à l'amélioration des performances des matériaux des outils figure I.6 [6]. Elle résulte aussi des études et travaux à la fois techniques et fondamentaux portant sur les propriétés suivantes des matériaux [7] :

- La dureté : pour combattre l'usure,
- La résistance mécanique à chaud pour supporter les échauffements à grande vitesse,
- La ténacité pour encaisser les chocs dus aux interruptions d'usinage ou aux vibrations
- L'inertie chimique pour éviter les dégradations de l'outil par diffusion d'impuretés en provenance de la pièce usinée.

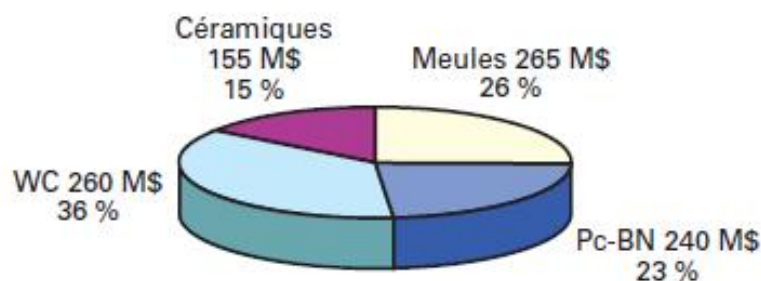


Figure I.7: Répartition des matériaux utilisés comme matériaux de coupe

I.5.3. Texture des outils de coupe modernes

Les outils de coupe modernes sont composés de deux parties distinctes afin d'augmenter leurs performances et leurs durées de vie (figure I.8) :

- un substrat : qui a pour rôle d'encaisser les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage (haute résistance à la pression et à la flexion et ténacité suffisante)
- un revêtement qui a pour fonction d'améliorer la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur l'outil pour son évacuation.

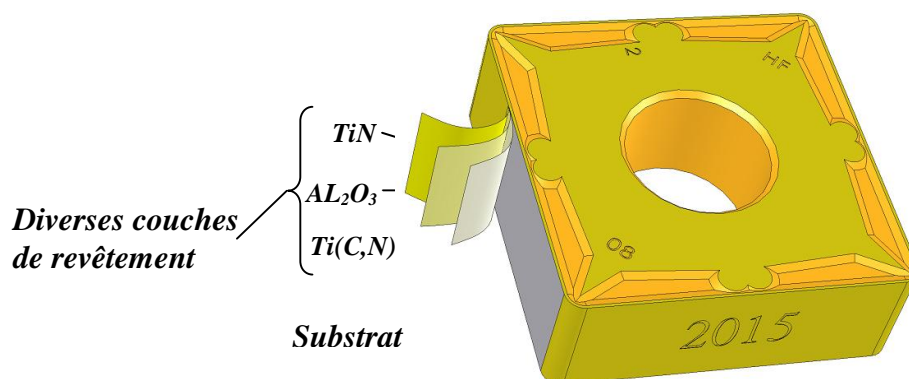


Figure I.8 : Plaquette de coupe revêtue

I.5.3.1. Les substrats

Les substrats actuels appartiennent à des familles de matériaux très diverses :

- *Les aciers rapides* : substrats obtenus par frittage de poudres métalliques avec une prédominance du fer. Ces poudres sont fortement chargées en carbone 0.7 à 1.6 % mais aussi en éléments tels que le Tungstène (12 à 20 % pour le type T) ou le Molybdène (3.5 à 10% pour le type M) qui caractérisent des familles différentes possédant des propriétés différentes (Type T : arête de coupe résistante à l'abrasion ou Type M : grande résistance à la chaleur). D'autres éléments en additifs viennent renforcer les propriétés de ces matériaux (Chrome, Vanadium ou Cobalt par exemple). On obtient avec ces matériaux des duretés de l'ordre de 740 à 1000 HV. Ils sont beaucoup utilisés [8] pour :

- le tournage (10% du marché),
- le perçage (80% du marché),
- le fraisage (40% du marché).

- *Les carbures cémentés* : substrats obtenus par frittage de poudres métalliques sans fer. Ces matériaux sont souvent formés de carbure de tungstène, de titane ou de silicium pour les plus utilisés. Afin de lier les grains de carbure entre eux on utilise des éléments métalliques comme le cobalt, qui allie sa ductilité à la dureté des carbures. On obtient avec ces matériaux des outils présentant des duretés variables comprises entre 1250 et 1800 HV. Ils sont utilisés pour usiner des matériaux durs car ils possèdent une ténacité accrue par rapport aux aciers rapides. Il existe un grand nombre de possibilités d'usinage avec ces matériaux. En effet, selon les proportions de carbure et de liant, les propriétés et les capacités de l'outil changent beaucoup.

- *Les cermets* : sont des carbures, des nitrures, des carbonitrures ou des borures liés par un métal ou un alliage ferreux. Les liants sont donc de plusieurs types (cobalt, nickel, nickel fer, nickel chrome, etc.). La dénomination de cermets est peu utilisée dans l'industrie car souvent ils sont assimilés à des carbures cémentés. On obtient avec ces matériaux des outils pouvant avoir des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Leur dureté à chaud permet de faire des usinages dans des conditions extrêmes (1000°C). Les cermets ont des applications très diverses (tournage, fraisage, etc.), et ont une très bonne résistance mécanique [9], une faible conductivité thermique et une bonne résistance à la diffusion et à l'usure. Ils sont donc souvent utilisés en tournage de semi finition ou de finition des aciers.

- *Les céramiques* : sont des matériaux frittés à base de céramiques : alumines, nitrures de siliciums, etc. Ce sont des matériaux qui ont une très grande dureté et une très grande résistance à l'usure. En contre partie, ce sont les outils les plus fragiles. Les céramiques sont très utilisées pour l'usinage des fontes par exemple.

On choisit les substrats en fonction de leurs propriétés mais aussi en référence au rapport prix / rentabilité d'usinage / qualité d'usinage. En effet, le prix des outils peut varier de 1.5 à 2.3 euros pour des plaquettes en aciers rapides à plusieurs dizaines d'euros pour certains cermets.

I.5.3.2. Les revêtements

Les revêtements sont, depuis quelques années, un nouvel axe de recherche dans le monde industriel afin d'améliorer les conditions de coupe et la productivité. Ils prennent une place de plus en plus importante dans le monde de l'usinage, puisqu'en 2001, 90% des outils carbures fabriqués sont revêtus [10].

Le principe consiste à recouvrir d'un film mince (jusqu'à 10 μm d'épaisseur) les outils en matériaux ayant des propriétés particulières comme par exemple une très grande dureté (2000 à 3200 HV) ou des coefficients de frottements faibles.

Comme nous pouvons le voir sur la (figure I.9), le rôle recherché pour le revêtement est complexe. Il doit à la fois protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), faire office de barrière thermique, résister à la fissuration et tout ceci grâce à un dépôt d'épaisseur très faible [11].

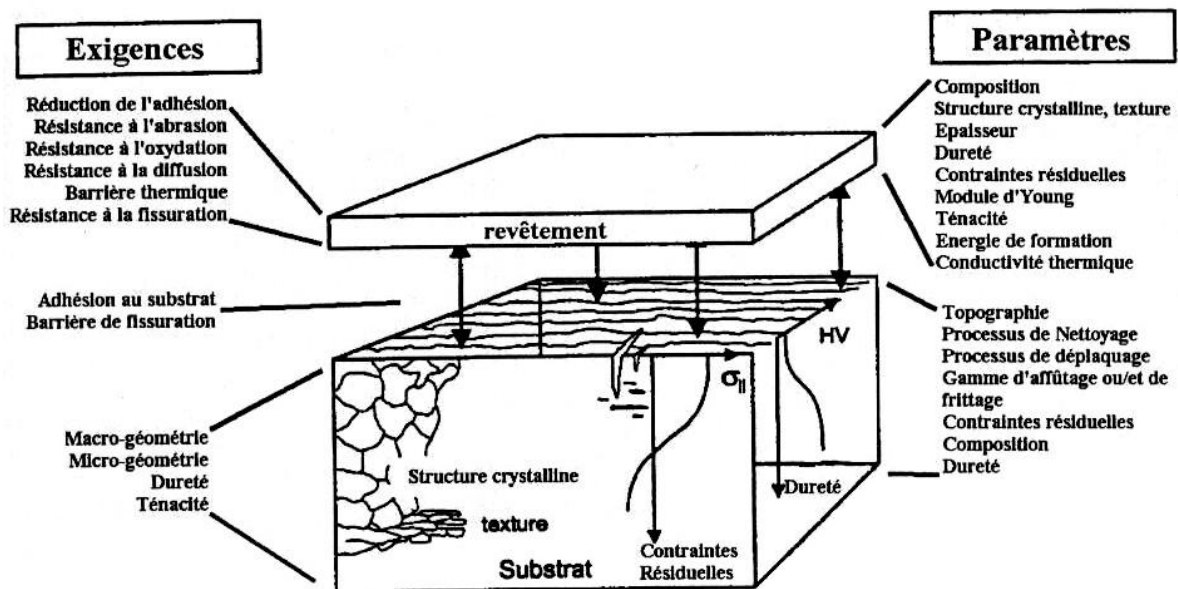


Figure I. 9: Représentation des exigences envers les revêtements et des paramètres à maîtriser pour répondre aux exigences

Actuellement, les revêtements les plus couramment utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane (TiN), les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al_2O_3). Le dépôt choisi dépend du but recherché : résistance à l'usure et/ou à l'oxydation, tenue à la température, réduction du frottement, etc.

Des dépôts plus durs sont désormais utilisés, comme les nitrures de bore cubique (CBN) ou les dépôts diamants. Dans ces cas là, c'est la dureté qui est recherchée afin de faciliter la résistance à l'usure.

Le dépôt peut être monocouche ou multicouche. L'intérêt du multicouche est de pouvoir cumuler les propriétés de chaque dépôt et d'avoir une meilleure résistance à la fissuration [12]. Le principe du dépôt multicouche permet aussi d'envisager des revêtements plus complexes, comme par exemple des revêtements composés de métaux et métalloïdes comme le (Ti, Cr)N, le (Ti,V)N ou le Ti(B, N).

De nombreux revêtements sont mis au point, car l'évolution des outils de coupe est, aujourd'hui, davantage basée sur l'évolution des revêtements que sur celle des substrats. L'évolution des revêtements est devenue très rapide, alors qu'elle était quasiment inexistante il y a 20 ans. Cela est dû en grande partie à l'évolution de l'usinage à grande vitesse et à sec [13].

Actuellement, environ 90% des outils carbure en vente sont désormais revêtus [14]. Les outils complexes comme les forêts sont revêtus par le procédé CVD (Chemical Vapor Deposition) et les outils de type plaquette carbure sont plutôt revêtus par le procédé PVD (Physical Vapor Deposition).

Les coûts de revient des revêtements ont beaucoup baissé et sont désormais assez faibles par rapport aux autres facteurs intervenant dans l'usinage [15]:

- pièce produite,
- frais d'immobilisation du matériel et d'amortissement des machines,
- coût de la main d'oeuvre.

I.5.4. Les procédés de fabrication des revêtements

Les revêtements utilisés industriellement pour l'usinage se partagent en deux familles principales qui se différencient par le mode de déposition (CVD ou PVD) du revêtement sur le substrat [16, 17]. Les propriétés qui en découlent sont différentes : dureté, adhésion, cristallisation, comportement mécanique, etc. [18]

Quel que soit le mode de déposition, il est nécessaire de suivre scrupuleusement le processus suivant [19, 20] :

1. le substrat doit être parfaitement décapé, afin de faire disparaître toute trace de graisse, hydrocarbure ou dépôt organique. La première étape consiste donc en une opération de nettoyage dans des bains successifs de solvants organiques : trichloréthylène, acétone, alcool.

2. le substrat ne doit pas être pollué en surface par des éléments métalliques. En effet, ces derniers pourraient créer localement des hétérogénéités néfastes à la bonne résistance et à l'adhérence du dépôt. La deuxième étape consiste alors en un bain oxydant (acide sulfurique), puis un bain réducteur (acide fluorhydrique) et enfin un bain permettant un dépôt d'oxyde natif protecteur pour éviter toute re-contamination (acide chlorhydrique).

3. par précaution, un troisième nettoyage sous argon sera réalisé dans l'enceinte même du four de déposition.

4. dans l'enceinte du four sous vide, une vaporisation du revêtement à déposer est réalisée. Cette vaporisation va bien sûr dépendre du procédé (évaporation, pulvérisation, plasma, etc.)

5. le dépôt du revêtement sur le substrat se déroule par croissance continue de la couche déposée (coalescence). Le mode d'adhésion du revêtement sur le substrat dépend de la nature de l'interface : mécanique, de diffusion, de pseudo diffusion ou chimique.

Le choix du mode de déposition doit se faire en fonction des caractéristiques du dépôt et du mode de déposition [21].

a) LE DÉPOT CVD

Le dépôt de type CVD est apparu dès les années 1960, mais il est réservé aux substrats de type carbure résistants aux hautes températures. En effet, le procédé impose un revenu élevé au substrat. Les dépôts CVD permettent des épaisseurs de l'ordre de quelques microns (5 à 12 en moyenne).

Les éléments déposés en CVD sont généralement des revêtements :

- de la famille du Titane : TiN, TiC, Ti (C, N) par exemple,
- de type céramique : Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄ par exemple,
- de type diamant : Diamant, DLC (Diamant Like Carbon).

Les dépôts CVD sont basés sur l'obtention d'un dépôt par vaporisation à haute température à l'intérieur du four sous vide. Ce procédé comporte des avantages et des inconvénients :

- grande dureté des dépôts,
- grande variété des matériaux déposés,
- forte épaisseur (12 µm) qui permet d'obtenir une durée de vie importante, mais qui peut modifier la géométrie des outils (acuité d'arête),
- possibilité de dépôt sur des pièces complexes,
- bonne adhérence (en particulier sur substrat de type carbure),
- température de dépôt élevée ce qui peut provoquer une modification de l'état du substrat (structure métallurgique et état des contraintes).

b) LE DÉPOT PVD

Industrialisé depuis 1978, cette technique présente les avantages suivants :

- dépôt d'une grande variété de matériaux inorganiques (métaux, alliages, etc.) à cause de son extrême versatilité,
- faible température du dépôt qui permet de garder l'intégrité physique du substrat
- possibilité de faire des revêtements multicouches,
- possibilité de faire varier la température du substrat dans de très larges limites, depuis des températures inférieures à 0°C, jusqu'à de très hautes températures,
- très haute dureté des dépôts,
- faible épaisseur des dépôts, ce qui permet d'assurer la constance de la géométrie des outils,
- excellente liaison avec le substrat.

Comme tout procédé industriel, il a aussi ses inconvénients :

- vitesse de dépôt faible,
- nécessité de revêtir des formes simples.

I.5.5. Rôle des revêtements

Le rôle recherché dans l'application des revêtements sur les outils est de limiter l'usure des outils [16] durant l'opération d'usinage.

Le dépôt étant d'épaisseur très faible (quelques microns), on ne peut envisager que le revêtement :

- apporte des caractéristiques de résistances mécaniques,
- permette de « protéger » le substrat par une couche indestructible.

L'apport du revêtement doit avoir un rôle plus subtil. Les propriétés recherchées sont de type protection thermique ([22] : formation du copeau, frottement du copeau) ou de barrière chimique ([23, 24] : oxydation ou affinité chimique). De fait actuellement les fabricants spécialisés ont tendance à rechercher les caractéristiques suivantes [25] :

- bonne adhésion au substrat,
- propriétés mécaniques permettant de résister aux pressions superficielles importantes,
- faible conductivité thermique (barrière thermique),
- faible affinité chimique avec les éléments constitutifs du matériau usiné,
- bonne résistance à l'oxydation à haute température,
- bon coefficient de frottement pour éviter l'usure par le frottement du copeau.

Les revêtements nouveaux sont à base de :

- carbure (titane, hafnium, zirconium, niobium, etc.)
- nitrure (bore, aluminium, chrome, titane, etc.)
- titane (bore, carbone, etc.)
- diamant.

Ils permettent d'atteindre les caractéristiques physiques suivantes [26] :

- dureté comprise entre 1800 à 4500 HV
- conductivité thermique de l'ordre de 11 à 35 W m⁻¹K⁻¹
- module d'Young compris entre 300 et 600 daN/mm²

I.6. CARACTÉRISTIQUE DES SURFACES USINÉES

I.6.1. Etats de surface des pièces usinées

Dès le début de l'usinage industriel, il a fallu définir la qualité de la surface usinée. Outre les aspects dimensionnels, il est aussi nécessaire de définir l'état de rugosité de la surface. Le critère le plus couramment utilisé dans le milieu industriel [27, 28 et 29] est le paramètre statistique Ra (figure I.10) défini par l'expression I.1.

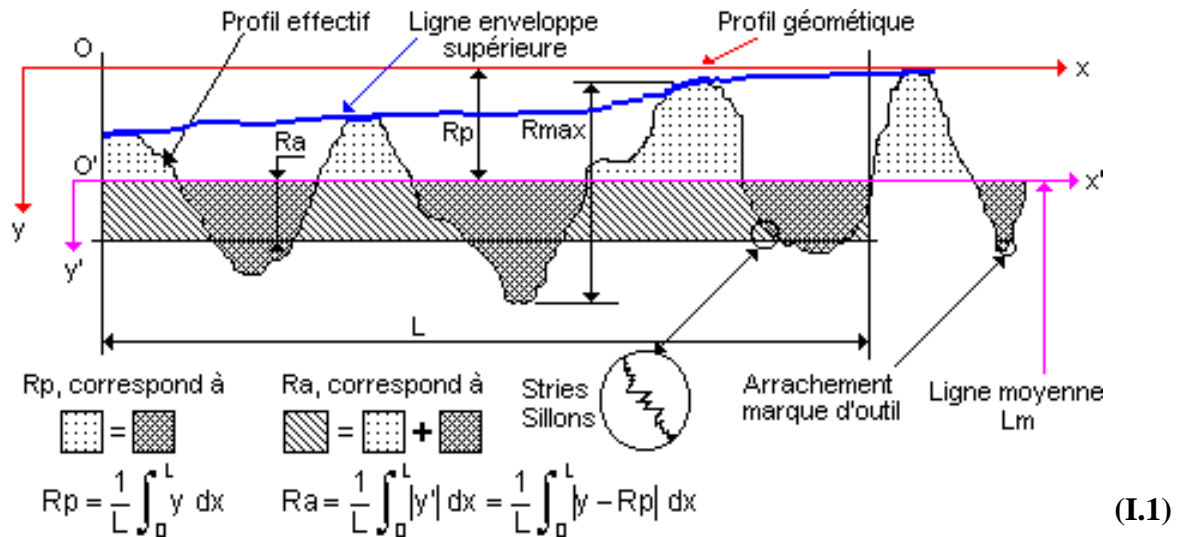


Figure I.10: Caractéristiques du profil

Ce critère est contesté par les chercheurs [30, 31 et 32].

Le critère RP est généralement retenu par les entreprises du secteur automobile.

Donc le terme état de surface englobe à la fois:

- L'état géométrique de la surface défini par l'ensemble des écarts géométriques de la pièce réalisée en fabrication par rapport à celle géométriquement idéale.
- L'état physico chimique défini par les diverses caractéristiques de la couche superficielle (structure et texture superficielle, absorption, etc...). Le contrôle de cet état physico-chimique, dont le changement de structure est fonction du matériau, des traitements thermiques et des procédés et conditions d'usinage ne relève pas de la métrologie, il est en effet du domaine de la métallurgie et ne peut être étudié que par des procédés tels que la cristallographie, microscope électronique ou à balayage électronique.

Nous nous intéressons dans notre étude uniquement à l'état géométrique des surfaces.

Les irrégularités superficielles de nature géométrique sont décomposées en deux catégories [33, 34].

- **Les irrégularités d'ordre macrogéométrique:** comprenant des écarts de grande amplitude. Elles sont dues aux défauts de la machine génératrice.
- **Les irrégularités d'ordre microgéométrique:** comprenant des écarts de plus faible amplitude. Elles sont dues à l'action directe de l'élément générateur (outil, abrasif,.....etc.) et aux vibrations de la machine [33, 34].

Les écarts ou irrégularités de surfaces sont classées conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (figure I.11) dans la normalisation française (NORME AFNOR NF E 05-015).

- 1^{er} ordre: écarts de forme ou de position
- 2^{ème} ordre: ondulations
- 3^{ème} ordre: stries et sillons
- 4^{ème} ordre: arrachements, marques d'outil, fentes, piqûres.

Les irrégularités de 3^{ème} et 4^{ème} ordre sont désignés par le terme général de rugosité.

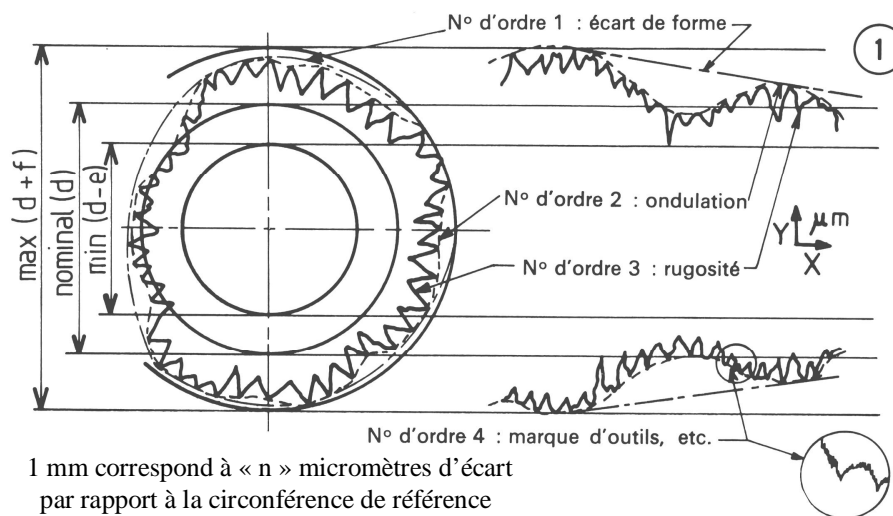


Figure I.11: Défauts géométriques de la surface usinée.

Les défauts de 1^{er} et 2^{ème} ordre (écarts de forme, ondulation) (figure I.11) [35], Ces défauts affectent la forme ou la position et provenant des défauts de la machine-outil (mauvais guidage, équilibrage et également isolement vibratoire insuffisant), ou des conditions d'usinage (échauffement notamment) [36].

Les défauts de 3^{ème} et 4^{ème} ordre sont dus à de nombreux facteurs [35, 36] tels que :

- les éléments cinématiques du mouvement outil – pièce (vitesse de rotation, avance),
- les flexibilités dynamiques du système machine – outil – pièce,
- les jeux des organes de la machine et ses imperfections mécaniques (dentures d'engrenages, usure des glissières,...),
- géométrie et qualité d'affûtage,
- hétérogénéité du matériau,
- condition de lubrification.

Les principaux critères d'état de surface étudiés sont classés en quatre familles (figure I.12).

- Les paramètres de rugosité liés à la hauteur des profils: R_a , R_z , R_t et R .
- Les paramètres de rugosité liés à la périodicité des profils: AR et RSM
- Les paramètres de rugosité liés à la portance (appelés aussi paramètre de rodage): R_k , Rpk et Rvk .
- Les paramètres d'ondulation : W , Wa et Wt

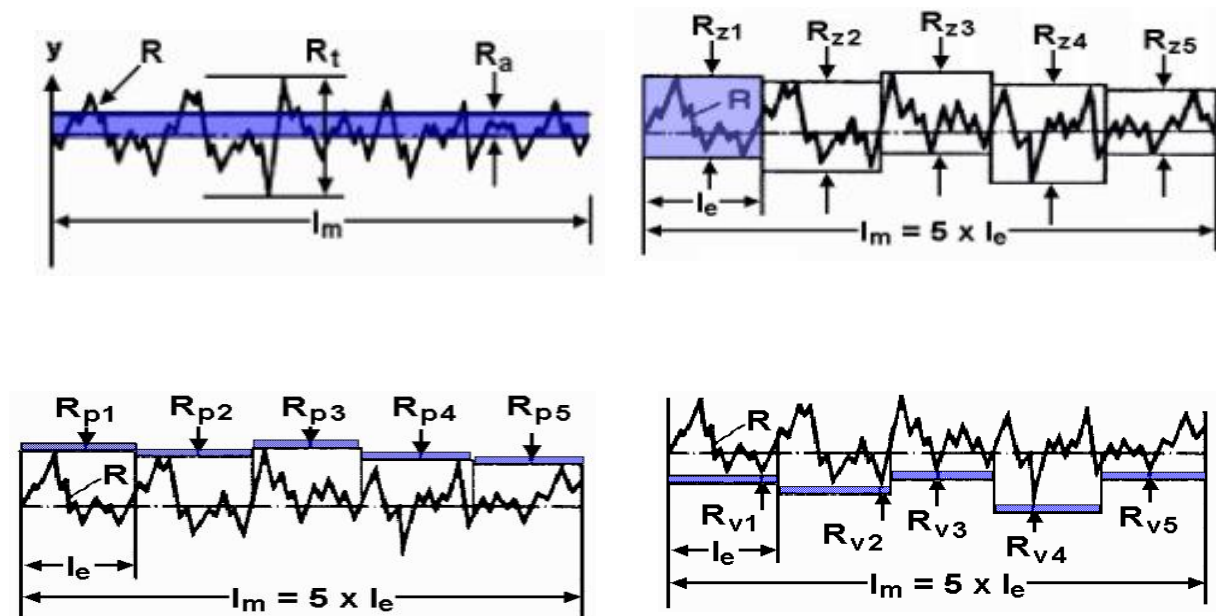


Figure I.12: Les critères de la rugosité

En ce qui concerne les critères de rugosité (3^{ème} et 4^{ème} ordre), les plus usités sont: les critères physiques R_t et les critères statistiques R_a et R_z . Un seul critère est insuffisant pour caractériser à lui seul un état de surface. La norme NF E 05-015 n'indique pas le critère préférentiel. La pratique quand à elle a développé l'utilisation des critères R_a et R_z .

I.7. USURE ET DÉFAILLANCE DES MATÉRIAUX DE COUPE

I.7.1. Généralités

Le choix des meilleures conditions d'usinage vis-à-vis de l'usure, que ce soit avec des vitesses conventionnelles ou à grande vitesse, consiste à trouver les conditions de coupe en tournage, en établissant un compromis entre la vitesse de coupe et la durée de vie des outils. La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure. Le coût de l'usinage, qui intéresse en définitive l'entreprise, est une conséquence de la tenue des outils à l'usure. Les méthodes pour la recherche des conditions opératoires d'un Couple Outil Matière mettent en évidence la nécessité d'établir la capacité d'usinabilité avant toute autre mesure de ces caractéristiques.

La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure. L'importance de cette usure a une influence directe sur :

- la qualité et la précision dimensionnelle de la surface obtenue,
- la tenue de l'outil dans le temps,
- la puissance nécessaire à la coupe.

La définition de la durée de vie T d'un outil selon la norme ISO 3685 : « C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique ».

Il faudra donc maîtriser cette durée de vie ainsi que son évolution par rapport aux paramètres d'usinage. Dans la pratique, on pourra ramener cette durée de vie à des éléments plus concrets sur le poste de travail comme :

- un volume de copeau produit entre deux changements d'arêtes,
- un nombre de pièces usinées entre deux changements d'arêtes,
- une longueur d'usinage entre deux changements d'arêtes.

L'analyse du mécanisme de la coupe montre l'importance des phénomènes de déformation plastique et de fissuration au sein du matériau usiné, mais aussi celle des phénomènes inter faciaux qui déterminent les actions réciproques de l'outil et du copeau.

Dans l'usinage des métaux, on constate que la forme géométrique et l'état physique de l'outil sont modifiés par l'action combinée des forces de coupe et par la température atteinte par le tranchant. Ces modifications qui augmentent progressivement avec la durée d'usinage, sont couramment regroupées sous le terme usure de l'outil.

L'usure de l'outil découle des sollicitations sévères que subit le tranchant à l'interface outil-copeau. Celles-ci sont d'abord de nature mécanique. Il s'agit de contraintes permanentes ou cycliques et d'actions de frottement en surface. Ceci exige pour l'outil des qualités de dureté et de ténacité remarquables.

Les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et, corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, se traduisent par des modifications d'aspect visible à l'œil nu à l'aide d'un microscope. Ces manifestations macroscopiques permettent d'apprécier objectivement l'évolution de l'usure en fonction de divers paramètres géométriques mesurables.

Cette usure se manifeste sous plusieurs formes, dont les principales sont : l'usure en dépouille, l'usure en cratère et la fissuration de l'arête coupante suivie par la chute partielle ou totale de l'arête même.

Le travail fourni pour créer un copeau est presque intégralement transformé en chaleur (figure I.13). L'élévation de température qui en résulte est l'une des causes majeures de l'endommagement de l'outil, (voir paragraphe notée ci-dessous, §.I.8.1).

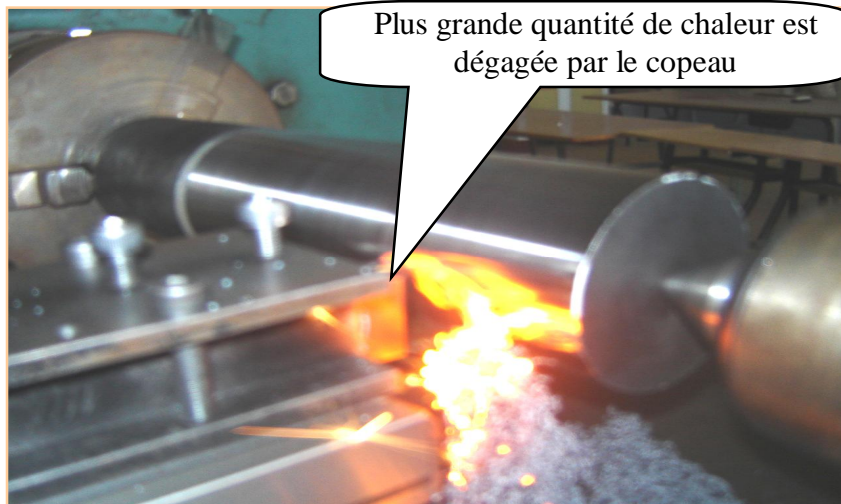


Figure I.13: Opération de tournage dur avec une céramique Wiper revêtu (CC6050WH) lors de la réalisation d'essai d'usure (Régime de coupe : $V_c = 180$ m/min $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm). Photo prise au laboratoire L.M.S

I.7.2. Influence des paramètres de coupe sur l'usure

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe.

- Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de coupe et lubrification).

- Vitesse de coupe: la température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure.
- Avance: les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et ces efforts font en sortie de diminuer la durée de vie de l'outil.
- Profondeur de coupe: la variation de la profondeur de coupe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure.
- Matériau usiné: son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductivité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition).
- Lubrification: son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil.

- Le second groupe est formé par les paramètres physiques et mécaniques de l'outil (géométrie et composition du matériau de l'outil, dureté, efforts et propriétés thermiques). Des chercheurs comme [37] et [38] ont observé que les différents mécanismes de l'usure interviennent pour différentes plages de vitesses. L'usure par abrasion est la plus forte à basse vitesse, mais lorsque la vitesse augmente, l'usure adhésive devient de plus en plus dominante et l'effet d'abrasion diminue ou disparaît. La température en fonction de la vitesse, l'excès de chaleur catalyse le phénomène d'usure. Diminuer la chaleur dans le système d'usinage est une

méthode naturelle pour contrôler la vitesse et le niveau d'usure. Comme les propriétés thermiques sont supposées constantes, la seule manière de changer les conditions thermiques est d'agir par des moyens extérieurs au système.

I.7.3. Usure des outils de coupe

Le développement des matériaux d'outil de coupe était associé à l'absence d'une complète compréhension du phénomène d'usure. L'expérience a montré que dans plusieurs cas les matériaux durs possèdent une meilleure résistance à l'usure. Cette observation a laissé croire que les matériaux durs sont dans tous les cas plus résistants à l'usure. Seulement dans ces dernières années, on a réalisé que cette simple corrélation entre la résistance à l'usure et la dureté n'était pas valide à des vitesses de coupe élevées. Quand la dureté de l'outil de coupe excède 4.5 fois la dureté de matériau à usiner, l'usure de l'outil ne dépendra pas de la dureté mais de la stabilité chimique du matériau de l'outil de coupe qui engendrera une usure en cratère (à partir de certaine valeur de vitesse de coupe) [39].

I.7.4. Différentes manifestations de l'usure de l'outil

L'usure est définie par la matière qui sort définitivement du contact outil – pièce. L'usure de l'outil est la conséquence directe des sollicitations très sévères que subissent les faces de coupe et de dépouille. Ces sollicitations sont d'abord de nature mécanique (contraintes permanentes ou cycliques, actions de frottement...), ce qui exige pour, les outils des qualités de dureté et de ténacité remarquables. La sévérité de ces sollicitations se trouve accentuée par les effets thermiques qui tendent à dégrader les qualités de résistance du matériau coupant [40]. Par ailleurs, ces effets peuvent donner naissance à des réactions physico-chimiques inter – faciales qui peuvent aggraver l'usure de l'outil.

- Inter diffusion entre les éléments de l'outil et du copeau.
- Phénomènes thermoélectriques pouvant donner lieu à des transferts ioniques.

I.7.4.1. Formes d'usures

Les formes d'usure d'outils de coupe dépendent des paramètres essentiels (couple outil – matière, conditions d'usinage) on répertorie globalement quatre zones principales d'usure (figure I.14). Nous pouvons rencontrer les formes suivantes [41]

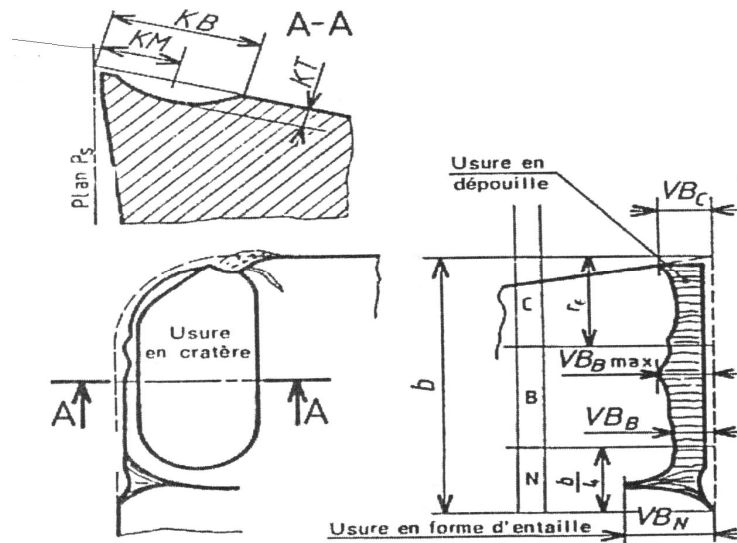


Figure I.14: Les formes d'usure d'outils de coupe.

- **Usure en dépouille ou usure frontale :** Elle est due au frottement de la pièce sur la face en dépouille principale de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête de coupe. Elle se caractérise par une largeur moyenne VB (figure I.15). Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer, puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce à usiner et la précision dimensionnelle (figure I.14).

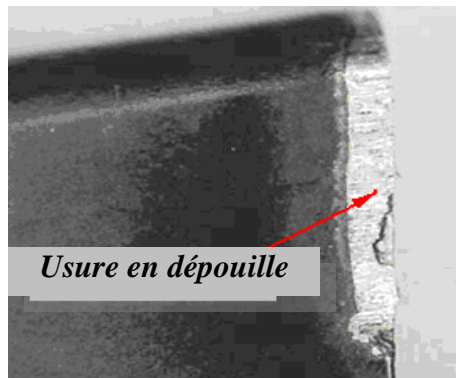


Figure I.15 : Usure en dépouille

- **Usure en cratère :** Elle est caractérisée par une cuvette formée sur la face d'attaque de l'outil par frottement du copeau. Au cours de l'usure, les dimensions du cratère ainsi que sa position évoluent et influent particulièrement sur le rayon d'enroulement du copeau. Le flanc arrière du cratère peut jouer le rôle de brise-copeaux naturel. Cette forme d'usure est due à l'existence de température élevée au contact copeau – outil provoquant une diffusion importante. Elle se manifeste essentiellement dans le cas de l'utilisation des outils en carbure.

La forme du cratère est définie par sa profondeur maximale K_T et le rapport de cratérisation K_T/K_M ou par l'angle de cratérisation γ_c (figure I.16).

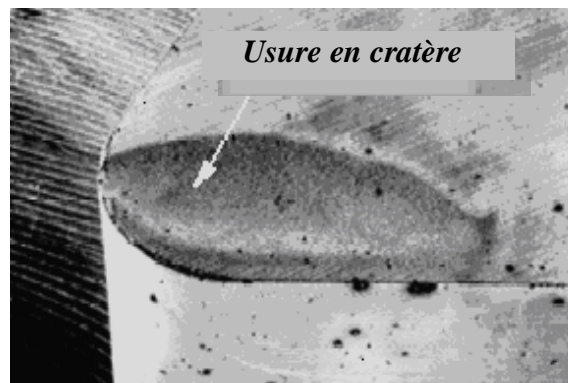


Figure I.16: Usure en cratère

- **Entaille :** Dans le cas des outils en acier rapide et des outils carbures et dans certaines conditions de coupe, il se produit une entaille sur l'arête tranchante, à la hauteur du diamètre périphérique de la pièce, due à l'écroutissage de celle-ci, ou au mode d'évacuation de l'arête rapportée. Au niveau de cette entaille, les conditions de coupe devenant mauvaises, le refoulement de matière sur le périphérique de la pièce provoque une auto accélération du phénomène d'usure. L'entaille peut alors atteindre une valeur V_N importante (figure I.14) par rapport à la valeur de l'usure V_B et par suite affaiblir considérablement le bec de l'outil. Dans le cas des outils en carbure, elle se manifeste lors de l'usinage des métaux ductiles aux faibles vitesses de coupe.
- **Usure par déformation plastique :** La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions régnant dans la zone de coupe (figure I.17). Cette déformation se traduit par un affaissement plastique de la pointe de l'outil, une déformation permanente et un refoulement sur les faces de dépouille.

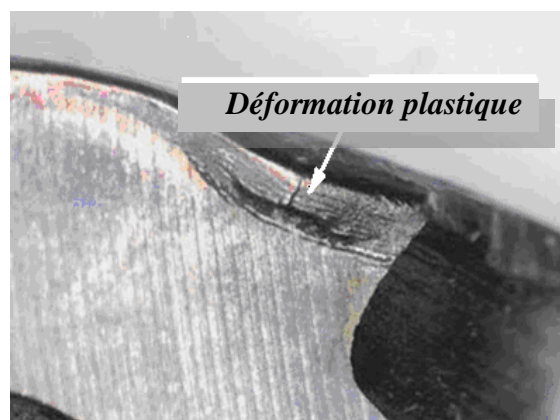


Figure I.17 : Usure par déformation plastique

• **Ebréchures et fissuration d'arête** : Dans le cas d'usinage avec chocs mécaniques (figure I.18) ou thermiques (figure I.19) ou avec des variations périodiques des efforts, provoqués par une coupe discontinue ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures ou d'ébréchures sur l'arête de coupe qui diminuent considérablement la vie de l'outil. Cette forme d'usure se manifeste dans le cas de l'usinage des alliages réfracteurs [42].

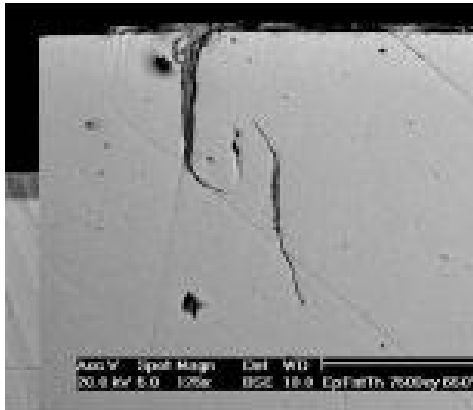


Figure I.18: Fissuration par choc mécanique

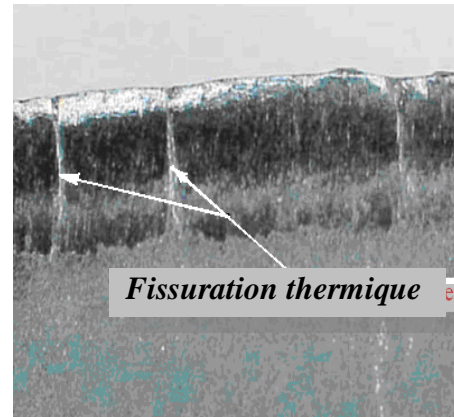


Figure I.19: Fissuration par choc thermique

I.7.4.2. Mécanismes d'usure des outils de coupe

Les derniers développements des matériaux d'outils de coupe n'étaient pas complets à cause de l'absence d'une bonne compréhension du mécanisme d'usure qui était basée sur l'intuition et l'empirisme. Les mécanismes d'usure les plus importants sont : l'usure par abrasion, l'usure par adhésion et l'usure par diffusion :

- **L'usure par abrasion** : résulte de l'arrachement sur leur surface de micro copeaux produit par des particules souvent angleuses et de grande dureté qui peuvent être contenues dans le matériau à usiner (inclusions). Ces particules sont toujours renouvelées, les produits d'abrasion sont éliminés en continu avec les copeaux. La vitesse d'usure abrasive croît avec la quantité de particules abrasives qui entrent en contact avec l'outil par unité de temps [43].
- **L'usure par adhésion** : dépend de la pression appliquée au contact copeau outil et par conséquent des caractéristiques de dureté et d'écrouissabilité du matériau usiné, de l'épaisseur de copeau et de la rigidité de liaison outil – pièce. L'usure par adhésion dépend aussi de la vitesse de coupe, un accroissement de la vitesse de coupe provoque une moindre résistance à l'écrasement des aspérités du copeau mais aussi une moindre résistance au cisaillement des jonctions établies par effets thermiques. L'usure par adhésion est caractéristique des usinages à vitesse de coupe modestes (généralement inférieures à 50 m/min).
- **L'usure par diffusion** : aux grandes vitesses de coupe, le gradient de température à l'interface copeau – outil est particulièrement important: une couche de glissement facile se

constitue avec fluage du matériau du copeau. 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.

I.8. TEMPÉRATURE DE COUPE

I.8.1. Sources de chaleur

La température a des effets importants sur les efforts de coupe et l'usure des outils à travers des phénomènes tels que l'abrasion, l'adhésion et la diffusion. Elle joue un rôle déterminant sur la nature du frottement à l'interface et change de manière significative les propriétés physiques et mécaniques des matériaux constituant l'outil. Son importance dans l'étude de l'usure des outils avait déjà été reconnue par Edward Herbert [44] qui a énoncé le premier la loi qui porte son nom : « L'usure de l'arête de l'outil n'est fonction que de la température de coupe ». L'aspect thermique de la coupe a donc été largement étudié depuis de nombreuses années. Pourtant, à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu en usinage, il est très difficile de prédire l'intensité et la distribution des sources de chaleur. Les processus mécaniques et thermiques sont extrêmement couplés, en particulier parce que les propriétés des matériaux varient avec la température.

On a cru, pendant longtemps, qu'une partie de l'énergie de coupe était emmagasinée dans le métal écroui. Les expériences systématiques effectuées au Laboratoire Central de l'Armement, en Belgique, ont prouvé que 90 à 100 % de l'énergie mécanique consommée est finalement convertie en énergie thermique [45], [46].

Les principales sources de chaleur proviennent :

- des déformations plastiques des zones de cisaillement primaire et secondaire ;
- de la dissipation du frottement générée à l'interface outil copeau et entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée de la pièce.

La chaleur ainsi créée va se répartir dans les différentes parties de l'outil, de la pièce et du copeau (figure I.20). Le transfert de chaleur dans le copeau et dans la pièce s'effectue majoritairement par transport alors que dans l'outil le transfert s'effectue principalement par diffusion. De fait, la répartition des flux ne se fait pas de manière équivalente et dépend bien sûr des conditions de coupe et des propriétés thermiques des matériaux. Seul un faible pourcentage de la chaleur générée est transmis à l'outil et la pièce, la majorité étant évacuée par le copeau, [47], [48].

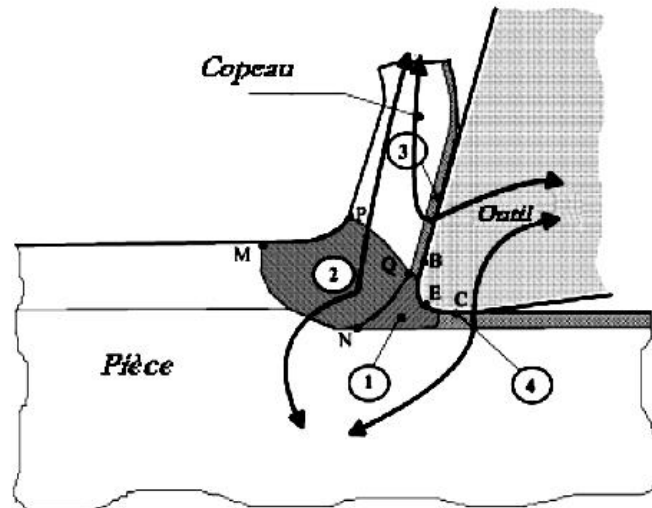


Figure I.20 : Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur [49]

I.8.2. Evolution de la température dans le processus de coupe

L'analyse calorimétrique de la coupe a permis de donner la répartition de la chaleur entre outil, copeau et pièce usinée, (figure. I.21).

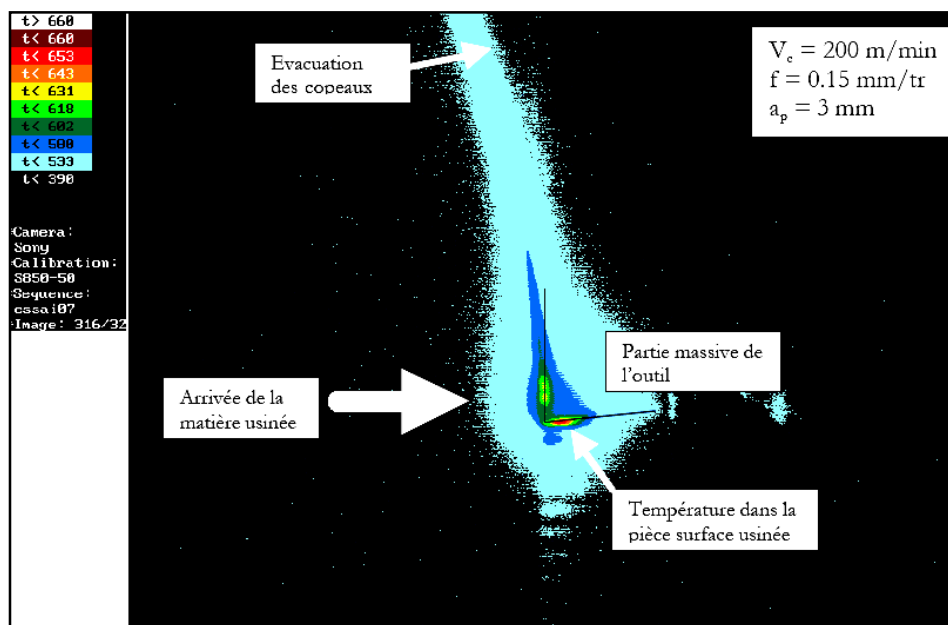


Figure I.21 : Carte de température en usinage, essai avec plaquette en carbure non revêtu sur acier 42CrMo4 [50].

L'observation du champ de température et des échelles associées permet de voir que la chaîne d'acquisition donne des informations entre 533 °C et 660 °C. Il est possible de distinguer deux zones plus chaudes correspondant à la zone de cisaillement secondaire outil/copeau et à la zone de frottement outil/pièce. Ces deux zones avaient déjà été décrites par les créateurs du dispositif [51]. La zone de cisaillement secondaire atteint une température maximale comprise entre 618 et 631 °C en retrait de la pointe de l'outil, alors que la face de dépouille atteint une température de l'ordre de 643 à 653 °C. L'important niveau de température localement atteint sur la face de dépouille est un élément qui peut expliquer que les outils ont tendance à s'user plus rapidement dans cette zone. Par contre, la très faible surface en contact en dépouille, comparativement à la surface en contact sur la face de coupe, entraîne que la majeure partie du flux de chaleur transmis dans la partie massive du substrat est issue de la face de coupe. Cette interprétation est également soutenue par [51].

Les conditions calorifiques dans la zone de déformation et la couche de glissement présentent un caractère nettement adiabatique, au moment de la coupe. La transformation du système s'effectue sans échange de chaleur avec l'extérieur. En effet, le temps de passage de la zone de déformation par cisaillement ou le long de la zone de contact, est extrêmement bref, pour les vitesses habituellement utilisées, et ceci encore plus vrai dans le cas de l'UGV. Les échanges par conduction ou rayonnement restent donc lents par rapport aux vitesses de transformation de matière. Le cisaillement adiabatique a été nettement identifié en 1954 par Shaw et Bicke. Dans le cas du titane et du tournage dur, cette considération semble dépassée [52]. Lorsque la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f) augmentent, la formation du copeau s'explique par fissuration plutôt que par transfert de chaleur. La question est alors de savoir s'il est possible de corréliser la résistance mécanique de l'outil et de la matière usinée avec la vitesse de coupe.

Sur la pièce, la chaleur se génère par l'écaillage du métal usiné, L'importance de cet écaillage est fonction de la vitesse de coupe et de l'avance : aux grandes vitesses de coupe, la couche écaillée a une épaisseur très faible et inférieure à l'avance de coupe, alors qu'aux faibles vitesses de coupe, cette couche peut avoir une épaisseur égale à l'avance dans un acier extra doux par exemple. La chaleur ainsi produite s'introduit dans la pièce par conductibilité [53]

I.8.3. Mesure de la température

Actuellement, la température de la coupe est considérée comme un facteur très important dans les opérations d'usinage et elle est causée par la croissance de la vitesse d'usinage. Il existe un temps minimum de génération de chaleur dans la pièce et l'outil qui fait que la dureté de l'outil soit affectée. Il y a de nombreuses méthodes pour mesurer la température. La principale difficulté rencontrée provient de la petite dimension de la zone de contact qui abrite de forts gradients thermiques. La forme du profil peut être différente selon les conditions de coupe et la nature des matériaux considérés, mais les différentes méthodes de mesure

s'accordent sur le fait que le maximum de la température n'est atteint qu'à une certaine distance de la pointe de l'outil.

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer l'élévation de température en usinage, [54] : l'utilisation de thermocouples, la thermographie infrarouge, l'analyse métallographique, l'utilisation de poudres fines à température de fusion constante et l'emploi de peintures thermosensibles.

Appliquée à l'usinage, la technique des thermocouples s'utilise de deux façons différentes :

- avec des thermocouples de faibles dimensions insérés dans l'outil de coupe,
- en utilisant le thermocouple naturel formé par la pièce et l'outil eux-mêmes.

Bien qu'assez simples d'utilisation, les techniques des thermocouples restent imprécises et ne permettent d'obtenir qu'une température moyenne à l'interface outil copeau. Pour avoir une information complète sur la distribution de la température d'autres techniques doivent être envisagées.

Il est possible de remonter à la distribution de température dans l'outil à partir d'analyses métallographiques effectuées sur l'outil après usinage (figure. I.22). La méthode s'appuie sur la relation qui existe entre la dureté, la microstructure et la température qui a été atteinte dans les différents endroits de l'outil. Cette méthode permet de mesurer des températures avec une précision de $\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais elle est difficile et longue à mettre en oeuvre et n'est employée que pour des outils en acier rapide.

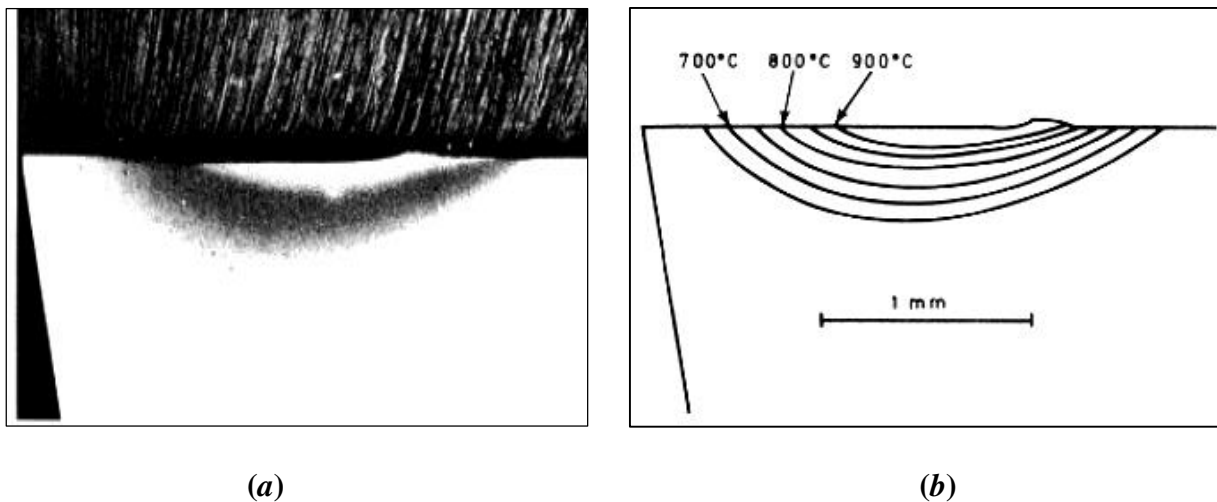


Figure I.22 : Détermination du champ de température par la méthode métallographique (a) Micrographie d'un outil en acier rapide après usinage d'une pièce en fer, $V_c = 182.8$ m/min, $f = 0,25$ mm/tr, $ap = 1,25$ mm. (b) Distribution de la t° dans l'outil [55].

I.9. EFFORTS ET DYNAMIQUE DE LA COUPE

I.9.1. Efforts de coupe

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage (Figure. I.14). La résultante de coupe F_c peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes, à noter que les symboles sont en accord avec les travaux du groupe ISO/TC29/GT20 (géométrie des angles et faces d'outil) [44]:

- F_t : Composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort longitudinal ou effort principal de coupe, est la composante ayant la plus grande valeur absolue ;
- F_a : Composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe ;
- F_r : Composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres composantes, appelée effort de refoulement ou effort radial. Elle n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale pure.

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine - outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe (figure. I.23). La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et à prévoir les déformations des pièces. A savoir, l'intérêt de F_t est le calcul de la puissance du moteur électrique, ainsi le calcul des conditions de résistance et la rigidité de l'outil et de la pièce, la composante F_a permet de calculer les éléments de la boîte des avances enfin, la composante F_r sert au calcul du bâti. Les efforts de coupe interviennent alors dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations auto excitées ou bien broutage, et indirectement, dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal et le processus de formation de copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur l'usinabilité du matériau usiné [44].

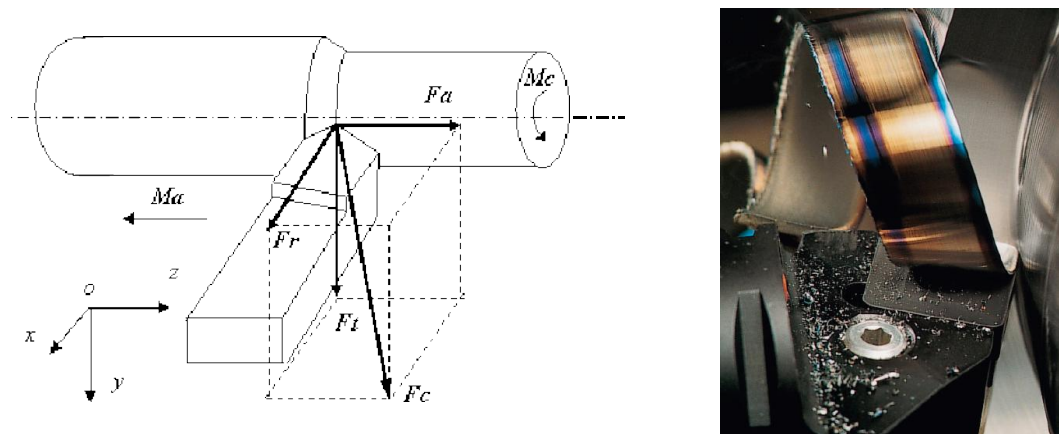


Figure I.23 : Décomposition de l'effort de coupe pendant l'opération de chariotage [56]

I.9.2. Vibrations en coupe

Les vibrations, phénomène dit aussi broutement, du système machine- montage- outil pièce dégradant la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Un broutement important diminue la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil.

La compréhension et la maîtrise de ces problèmes ont suscité de nombreuses recherches scientifiques, principalement focalisées sur l'instabilité de la coupe dont la principale manifestation est le broutement. Elles ont permis d'identifier les causes de ces phénomènes et de proposer des modèles prédictifs. Ainsi, elles ont révélé l'existence de plages de vitesses de rotation de l'outil où le comportement vibratoire de l'usinage est satisfaisant, en particulier aux hautes vitesses et ce même pour de fortes conditions d'engagement des outils de coupe. Suivant leurs origines, elles peuvent être classées en deux types : les vibrations forcées et les vibrations auto excitées (générées par le processus de la formation du copeau) [44].

A) Les vibrations forcées

Les vibrations forcées sont propres à la coupe discontinue comme le fraisage, mais elles peuvent éventuellement apparaître lors du tournage de pièces n'ayant pas de symétrie de révolution. Provoquées par une source dans la machine-outil ou en dehors, mais agissant indépendamment de l'opération de coupe. Ce genre apparaît sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par :

- la variation des forces qui s'exercent sur le système, variation due à la coupe intermittente (tournage d'un arbre à rainure longitudinale par exemple) ou à une surépaisseur variable,
- les forces centrifuges d'inertie (effets de balourds) dues au manque d'équilibre des masses en rotation (ébauche, mandrin, poulies, rotors des moteurs électriques, de roulements défectueuxetc.),
- la transmission d'ébranlements vibratoires par les machines avoisinantes,
- les chocs dus aux vibrations ou à la précision insuffisante des surfaces actives des pièces des organes de transmission (usure des pièces d'un mécanisme, manque de précision des engrenages), aux engagements et aux changements de régimes brusques.

Il est à noter qu'il existe d'autres sources de vibrations forcées au sein même de la coupe, on peut citer entre autres : l'hétérogénéité de la matière usinée, les irrégularités géométriques de la surface à usiner, Mais ces causes sont la plupart du temps du second ordre par rapport à la cause première qu'est la discontinuité de la coupe. La répercussion sur la qualité de l'usinage est dans ce cas gênante, mais on peut y remédier par une installation adéquate de la machine-outil, par des équilibrages mieux exécutés par une construction plus rigide du bâti de la machine, etc.....

Les vibrations forcées sont à l'origine de mauvais usinages quand la fréquence d'excitation est égale à ou un sous-multiple de fréquence propre de la structure. La valeur du coefficient d'amortissement est alors déterminante pour limiter l'amplitude de vibration.

B) Les vibrations auto-excitées (broutement)

Les vibrations auto-excitées, aussi appelées auto-vibrations ou vibrations régénératives, provenant du phénomène de coupe lui-même. Ces vibrations, néfastes pour la coupe, sont la principale cause du broutement. Elles sont à éviter absolument en usinage car elles dégradent fortement la qualité de la surface usinée et peuvent induire des efforts de coupe élevés. Ces vibrations apparaissent quand le système usinant n'a plus la capacité de suivre la dynamique imposée par la coupe. Ses causes essentielles sont :

- la variation de la force de frottement du copeau glissant sur l'outil et de l'outil taillant l'ébauche,
- l'écroûissage irrégulier de la couche enlevée suivant son épaisseur,
- les variations dimensionnelles de l'arête rapportée qui modifient en cours d'usinage l'angle de coupe et la surface de la section droite de la tranche cisailée,
- le contact avec frottement sur la face de dépouille de l'outil et de la variation de l'épaisseur de matière enlevée. Ces variations excitent le mouvement vibratoire de la structure qui en retour, entretient les fluctuations de ces phénomènes.

L'intensité des vibrations auto-excitées est définie par le métal en oeuvre et ses propriétés mécaniques, les facteurs mécaniques d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil et la raideur du système machine-montage-outil-pièce. Les difficultés d'application des bases théoriques pour prévoir complètement les conditions d'apparition du broutage; viennent d'abord de la complexité des systèmes mécaniques réels qui possèdent un grand nombre de degrés de liberté et qui se modifient au cours du travail de la machine-outil (déplacements des chariots, usure des outils, échauffements des paliers,.. .) En outre, les structures des machines comportent des non linéarités (des pièces en contact discontinu, frottements solides, variation des efforts avec l'amplitude de déplacement) et des variations de caractéristiques dans le temps (amortissements, serrages ...) qui s'échappent au calcul.

Le perçage vibratoire auto-excités [57, 58] constitue une exception car, dans cette technologie les vibrations sont mises à profit pour fragmenter les copeaux et faciliter ainsi leur évacuation.

I.10. ETAT DE L'ART

Dans ce point, nous présentons les résumés de quelques travaux de recherche en usinage dur réalisés durant les vingt dernières années et qui concernent, l'usure en TD, les rugosités de surface en TD, les efforts de coupe générés en TD, les vibrations en usinage, la modélisation du processus de coupe et l'optimisation des conditions de coupe.

La dynamique de l'usinage est influencée par la dynamique de la structure de la machine-outil et la dynamique du processus de coupe. Dès le début, le comportement dynamique des machines-outils a été admis comme compris et maîtrisé grâce à la théorie bien établie et validée de la dynamique des structures. Les études sur la coupe se sont donc principalement attachées à chercher dans la coupe même les différents mécanismes à l'origine du broutement. Une des raisons majeures du broutement a été avancée dès 1956 par **Doi et Kato [59]**, qui ont analysé le broutement en tournage en considérant la structure comme un système à un seul degré de liberté soumis à un effort horizontal. Ils ont conclu que les vibrations auto-excitées résultaient d'un déphasage entre la variation des efforts de coupe et le mouvement vibratoire. Le phénomène de broutement a été avancé par **Gurney et Tobias [60]**, **Trusty et Polacek [61]** et Merrit [62]. Ces chercheurs montrent que ce phénomène résulte de l'interaction d'une arête coupante de l'outil avec la surface formée lors d'un précédent passage d'une arête coupante.

Wu [63], **Arfaoui [64]**, ont démontré que le comportement vibratoire de l'outil de coupe en tournage dépend principalement de l'angle d'attaque, l'angle de dépouille, l'avance, la profondeur de passe et la vitesse de coupe.

Beauchamp et al [65] ont collecté et analysé les résultats de la rugosité superficielle et la vibration de l'outil lors du tournage de l'acier au carbone à différents niveaux de vitesse d'avance, profondeur de coupe, rayon de l'outil, porte à faux de l'outil et la longueur de la pièce. L'analyse des vibrations a révélé que la force dynamique, liée à la variation d'épaisseur de copeau agissant sur l'outil, est liée à l'amplitude des vibrations de l'outil à sa fréquence naturelle pendant la coupe.

Luo et autres [66] ont étudié le comportement à l'usure lors du tournage de l'acier allié durci 35NCD6 [AISI 4340] avec une dureté de (35 – 55) HRC. Ils ont utilisé des outils en CBN (liants TiC et Al₂O₃) et des outils en céramique (Al₂O₃ et TiC). Ils ont trouvé que le principal mécanisme d'usure pour les outils CBN a été montré comme une abrasion du liant du matériau par les dures particules en carbure de la pièce, alors que pour les outils en céramique, l'usure est dominée par l'adhésion et l'abrasion. Ils ont trouvé aussi que l'usure des outils en céramique et en CBN a diminué avec une augmentation de la dureté, mais aux environs de 50HRC l'usure commence à augmenter.

Cheung et Lee [67] ont examiné les vibrations de coupe entre l'outil et la pièce et ils ont montré que la rugosité de surface usinée présente des composantes particulières dans la plage de fréquence inférieure qui sont étroitement liées aux fréquences propres du système de la broche de la pièce dans la gamme des hautes fréquences.

Trent [68] indique que l'usure en cratère est un phénomène activé qui reste prédominant jusqu'à 800°C, et qu'au-delà de cette température, c'est plutôt un phénomène de déformation plastique qui devient prépondérant. En conséquence, il est important de noter que l'élévation de la température de l'outil, combinée avec des sollicitations mécaniques, provoque d'autres mécanismes d'usure comme la déformation, la fissuration ou l'écaillage, surtout pour les outils revêtus.

Gegonde et Subramanian [69] ont mené une étude pour caractériser le phénomène de diffusion des éléments chimiques de l'outil dans le copeau. L'étude a été réalisée en usinant les aciers C45 (AISI 1045) et C20 (AISI 1020) avec un outil en carbure fritté avec ou sans revêtement de TiN/TiC. Les auteurs indiquent que pour une vitesse de coupe inférieure à 100 m/min, il y a une adhésion de la matière usinée sur la face de coupe de l'outil et que cette adhésion est immédiatement évacuée à cause d'une faible force d'adhésion au niveau des jonctions. Par contre, à partir de la vitesse de coupe de 100 m/min, la force d'adhésion au niveau des jonctions est élevée.

Younes [70], s'est intéressé à l'étude de l'influence de la vitesse de coupe sur les vibrations de broutage de l'outil dans le but de proposer une étude analytique par analogie avec le modèle de Vander Pol, qui suppose qu'une composante de l'effort de coupe est en phase avec la vitesse de vibration.

Benga et al [71] ont étudié l'usinabilité de l'acier à roulement 100Cr6 (62 à 64) HRC pendant le tournage dur continu et à sec, avec des matériaux de coupe différents, céramique mixte, céramique renforcée dénommée Whiskers et le nitrure de bore cubique. Le plan de travail choisi était basé sur la méthode multifactorielle. Les paramètres de coupe examinés étaient comme suit : la vitesse de coupe varie de (70 à 210) m/min et l'avance varie de (0.08 à 0.28) mm/tr. La durée de vie et l'état de la surface ont été évalués.

Les auteurs ont abouti aux résultats expérimentaux suivants :

- Les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'outil de PCBN, suivi par la céramique mixte et en dernier par la céramique renforcée dénommée Whiskers,
- Les graphiques de surface pour la rugosité montrent que l'avance est le facteur le plus influent. Mais la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur la durée de vie (pour tous les matériaux d'outil de coupe utilisés),
- Les outils de coupe de PCBN fournissent une plus longue durée de vie que la céramique, lors de tournage de l'acier à roulement 100Cr6, pour une gamme de vitesse de coupe entre 100 et 180 m/min et l'avance entre 0.06 et 0.22 mm/tr.

G. Poulachon et al [72] ont étudié l'évolution de l'usure en dépouille lors du tournage de différents matériaux : acier fortement allié pour travail à froid X155CrMoV12 [AISI D2], acier faiblement allié pour travail à chaud X38CrMoV5 [AISI H11], acier pour résilience 35NiCrMo15 et l'acier faiblement allié (à roulement) 100Cr6 [AISI 52100]. Cette étude a permis de comprendre les mécanismes d'usure de l'outil CBN lors de l'usinage des différents matériaux avec des microstructures différentes. Les matériaux ayant une microstructure grossière (les matériaux à grande pourcentage de carbone AISI D2 et 100Cr6) génèrent une usure très rapide. Par contre, les matériaux ayant une microstructure fine (AISI H11 et 35NiCrMo15), génèrent des taux de l'usure moins rapides (figure I.24).

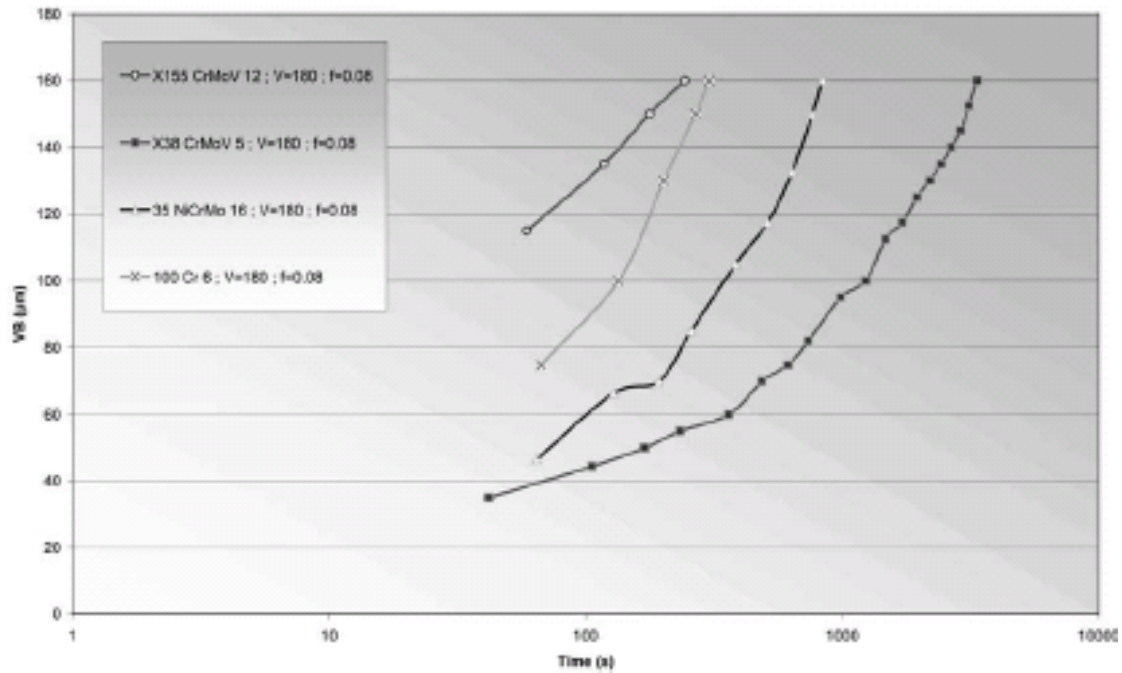


Figure I.24 : Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps, de la vitesse de coupe et du matériau usiné

Noordin et al [73] ont exploré les performances d'un outil en carbure de tungstène multicouche lors de l'usinage de l'acier AISI 1045, utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR). Les résultats expérimentaux ont indiqué que l'avance est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface et la force tangentielle. Cependant, il y a d'autres facteurs qui fournissent les contributions secondaires aux indicateurs de performance (tableau I.1).

| Source | Sum of squares | d.f | Mean square | F | Prob. > F |
|----------------|----------------|----------------------|-------------|--------|------------------------|
| Model | 9.71 | 9 | 1.08 | 35.59 | 0.0002 significant |
| A | 0.080 | 1 | 0.080 | 2.62 | 0.1564 |
| B | 8.77 | 1 | 8.77 | 289.44 | <0.0001 |
| C | 0.038 | 1 | 0.038 | 1.24 | 0.3075 |
| A ² | 0.050 | 1 | 0.050 | 1.66 | 0.2449 |
| B ² | 0.018 | 1 | 0.018 | 0.60 | 0.4678 |
| C ² | 0.16 | 1 | 0.16 | 5.43 | 0.0586 |
| AB | 0.065 | 1 | 0.065 | 2.16 | 0.1922 |
| AC | 0.0028 | 1 | 0.0028 | 0.091 | 0.7729 |
| BC | 0.24 | 1 | 0.24 | 7.86 | 0.0310 |
| Residual | 0.18 | 6 | 0.030 | | |
| Lack-of-fit | 0.18 | 5 | 0.036 | 181.67 | 0.0563 not significant |
| Pure error | 0.0002 | 1 | 0.0002 | | |
| Cor. total | 9.89 | 15 | | | |
| S.D. | 0.17 | R ² | 0.9816 | | |
| Mean | 2.20 | Adj. R ² | 0.9540 | | |
| CV | 7.91 | Pred. R ² | 0.7502 | | |
| PRESS | 2.47 | Adeq. precision | 19.16 | | |

Tableau I.1 : Table (ANOVA) pour le modèle quadratique de surface de réponse (réponse : rugosité de la surface. Ra)

Wanigarathne et al. [74] ont étudié l'usure progressive d'un outil de coupe en carbure fritté revêtu (revêtements : TiN/TiCN/TiC) et comportant des brises –copeau. Leur étude a eu pour objectif d'analyser, aux échelles macroscopique et microscopique, l'usure des outils en fonction de la température. L'étude menée a été réalisée en coupe orthogonale de l'acier C45 (AISI 1045) avec des vitesses de coupe de 200, 250 et 300 m/min, des vitesses d'avance de 0.15 et 0.2 mm/tr et une largeur de coupe de 3 mm. Les auteurs ont montré, par cette étude que la température de la face de coupe augmente en fonction de la vitesse de coupe. L'augmentation de la température induit une usure de l'outil plus sévère.

Selon Özel et al [75], indiquent que la micro géométrie d'arête, la dureté de la pièce, l'avance et la vitesse de coupe sont les paramètres qui influent sur les efforts de coupe et sur la rugosité de surface. Ces résultats sont issus d'une opération de tournage sur un acier durci. Les efforts de coupe sont dépendants des conditions de coupe, de la géométrie d'arête et de la dureté de surface de la pièce.

Les auteurs ont trouvé que les duretés de surface les moins élevées et les petits rayons d'arête génèrent des forces tangentielles et radiales plus faibles. Ils ont démontré que plus le rayon d'arête est grand et plus il génère de tensions en compression. Ils ont observé que la formation des couches blanches, (couche superficielle trempée par l'air ambiant, martensite dans le cas des aciers) est favorisée lors de l'accroissement du rayon. En général, les contraintes résiduelles sont en compression et leur valeur augmente avec la dureté de surface.

Kumar et al [76] ont étudié l'évolution de l'usure et la durée de vie d'un outil en céramique mixte à base d'alumine lors de l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC. Les auteurs ont élaboré des modèles de durée de vie de l'outil en fonction de l'usure. Ils ont conclu que l'usure en dépouille affecte la durée de vie de l'outil à des faibles vitesses de coupe, cependant, l'usure en cratère ou l'usure d'entaille affecte la durée de vie aux vitesses élevées, au-dessus de 200 m/min (figure I.25).

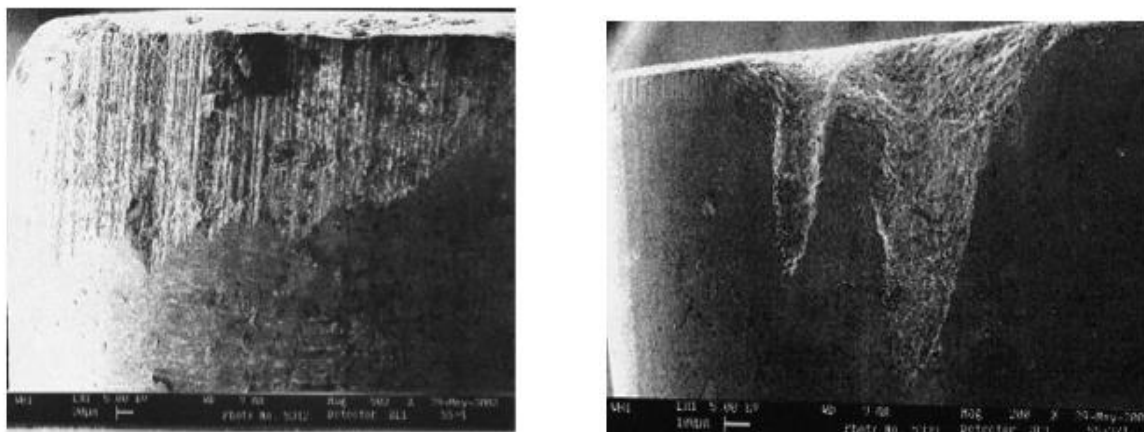


Figure I.25: Usure en dépouille d'une céramique mixte à base d'alumine lors de l'usinage D'un acier inoxydable martensitique durci à 60 HRC [76]

Kirby et Chen [77] ont collectés les vibrations (accélérations des signaux) dans les directions positive et négative le long de l'axe d'échantillonnage, puis les transformés en valeurs absolues. Cette méthode a permis de calculer l'amplitude moyenne de vibration à l'aide des accélérations

Davim et Figueira [78] ont étudié l'usinage de l'acier à outil AISI D2 en utilisant des techniques expérimentales et statistiques. L'opération de tournage dur a été réalisée sur un matériau ayant une dureté de 60 HRC, les essais sont effectués en utilisant la vitesse de coupe, l'avance et le temps comme paramètres principaux. Les auteurs ont étudié l'influence des paramètres de coupe, l'usure en dépouille, la force de coupe spécifique et la rugosité de surface sur l'évaluation de l'usinabilité avec des outils en céramiques en utilisant l'analyse de variance (ANOVA). Les résultats trouvés ont permis de faire une modélisation du processus.

Ozel et al [79] ont effectué une étude expérimentale détaillée sur la rugosité de surface et les forces de coupe lors du tournage dur de finition de l'acier AISI 13 en utilisant l'analyse de variance ANOVA. Les résultats trouvés par les auteurs indiquent que les effets de la dureté de la pièce, la géométrie de coupe, la vitesse d'avance et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface sont statistiquement significatifs.

Les travaux de recherche réalisés par **S. Benchiheb et L. Boulanouar [80]** ont pour but d'évaluer les performances du matériau à outils de coupe CBN7020 lors de l'usinage de l'acier à roulement 100Cr6 trempé. La méthode retenue pour la réalisation de ces essais est celle des plans d'expériences dans le but de déterminer l'influence des éléments du régime de coupe sur sa tenue et sur l'état de surface produit. Les résultats expérimentaux obtenus à la vitesse de coupe $V_c = 120$ m/min montrent que l'outil CBN7020 a conduit à un meilleur rendement en termes de durée de vie et de productivité et que les modes d'usures observés sont ceux de l'abrasion et de la diffusion. Par ailleurs, le CBN7020 a donné lieu à des états de surfaces ($Ra = 0.38$ à 1.04 μm) comparables à ceux de la rectification ($Ra = 0.2$ à 1.1 μm). Le traitement statistique des résultats a permis aux auteurs d'établir des modèles mathématiques permettant de prédire la durée de vie de ce matériau ainsi que la rugosité attendue, nécessaires pour l'optimisation et l'exploitation industrielles. L'étude menée sur la tenue du matériau de coupe (CBN 7020) et sur l'état de surface produit lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 a permis de tirer les principales conclusions suivantes :

- L'acier 100Cr6 trempé (60HRC) est très difficile à usiner, d'où la nécessité d'un matériau à outil de coupe ayant des capacités de coupe très élevées. Les modes d'usures observés sont ceux d'abrasion et la diffusion,
- L'analyse des courbes de l'usure en fonction du temps montre que l'allure de cette dernière obéit à la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique. A la vitesse de coupe 120 m/min, le CBN7020 a conduit à un meilleur rendement en terme de durée de vie,
- L'influence de l'avance et celle de la profondeur de passe sur la tenue sont peu significatives par rapport à la vitesse de coupe,

- Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la rugosité de la surface usinée diminue tout d'abord rapidement puis lentement tout en se stabilisant aux grandes vitesses,
- L'avance est le facteur prépondérant sur la qualité de la surface usinée, tandis que la profondeur de passe a exprimé une influence peu significative. Par conséquent, si on veut augmenter la productivité, il est préférable d'augmenter la profondeur de passe au lieu de l'avance tout en gardant les mêmes valeurs de la rugosité,
- Le CBN 7020 permet d'obtenir des états de surfaces : ($Ra = 0.38$ à $1.04 \mu\text{m}$) compris dans les limites de la rugosité obtenue par la rectification ($Ra = 0.2$ à $1.1 \mu\text{m}$).

Al-Ahmari et al [81] ont élaboré des modèles empiriques de la durée de vie de l'outil, la rugosité de surface et la force de coupe pour les opérations de tournage. Les paramètres de coupes utilisées dans l'étude étaient la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le rayon du bec de l'outil. Ils ont utilisé deux méthodes pour l'élaboration des modèles mathématiques. La première est la méthodologie de surface de réponse (MSR) et la deuxième est les réseaux de neurones (NN).

Vikram Kumar et al [82] ont comparé la performance des outils revêtus TiCN et TiAlN lors de l'usinage de l'acier AISI 4340 trempé. L'usinage est réalisé en utilisant la technique de la quantité de fluide minimum (MQL) et l'usinage à sec. Les résultats expérimentaux explorés par les auteurs montrent que, l'application du fluide minimum donne un meilleur résultat par rapport à l'usinage à sec. Cependant, la performance de l'outil revêtu TiAlN meilleure en se référant à l'usure et la finition de surface.

Fnides et al [83, 84] ont étudié l'évolution de la rugosité et de la température, en tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50HRC et usiné par une céramique mixte (70% Al_2O_3 + 30% TiC). Cet acier est destiné pour le travail à chaud. Il est employé pour la fabrication des matrices, des coquilles, des moules et inserts de coulée sous pression fortement sollicité avec durée de vie élevée. Les essais de chariotage ont été effectués selon la méthode de planification des expériences. Les résultats obtenus ont permis aux auteurs d'étudier l'influence des variables de coupe (l'avance par tour, la vitesse de coupe et la profondeur de passe) sur la rugosité et la température dans la zone de coupe. L'impact de l'usure en dépouille (VB) sur la rugosité a été mis en évidence. Les auteurs ont proposé des modèles mathématiques pour exprimer le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les paramètres technologiques étudiés. Ainsi, les plages de conditions de coupe les mieux adaptées, ont été déterminées. L'étude élaborée par les auteurs a débouché sur les conclusions qualitatives suivantes :

- L'effort axial est très sensible à la variation de la profondeur de passe et que cette dernière affecte les efforts de coupe d'une manière considérable ;
- La rugosité est très sensible à la variation de l'avance et que la vitesse de coupe affecte la température d'une manière considérable. L'usure en dépouille intervient d'une manière significative sur l'évolution des critères de rugosité ;

• Les modèles mathématiques établis ont défini le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les paramètres technologiques étudiés. Ainsi, les plages de conditions de coupe les mieux adaptées, ont été déterminées.

K.V.B.S. Kalyan Kumar, S.K. Choudhury [85] ont fait une étude expérimentale sur l'effet de l'arrosage cryogénique sur l'usure de l'outil et les efforts de coupe dynamiques à haute fréquence produits pendant l'usinage à grande vitesse de l'acier inoxydable (figure I.26). Ils ont effectué des expériences pour des conditions à sec et cryogéniques selon un plan d'expériences de 20 essais et cela pour comprendre l'avantage relatif offert par l'arrosage cryogénique. Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

- L'arrosage cryogénique était efficace en réduisant les températures de coupe qui a été attribué pour la réduction substantielle de l'usure en dépouille (37.39%).
- La consommation de l'azote liquide était haute, ce qui amène à une augmentation du coût global d'usinage.
- L'effort de coupe enregistré lors de l'usinage cryogénique est inférieur à celui enregistré lors de la coupe à sec, mais la réduction de l'effort de coupe est moins prévue, ils ont observé l'avantage seulement de 14.83% de réduction offerte par l'usinage cryogénique.
- Les auteurs ont conclu de, que l'arrosage cryogénique est une réponse possible pour l'usinage à grande vitesse (usinage écologique) (Eco-amical).
- Le traitement des résultats du plan d'expérience a permis la détermination des modèles mathématiques de l'usure pour les deux types d'usinage.

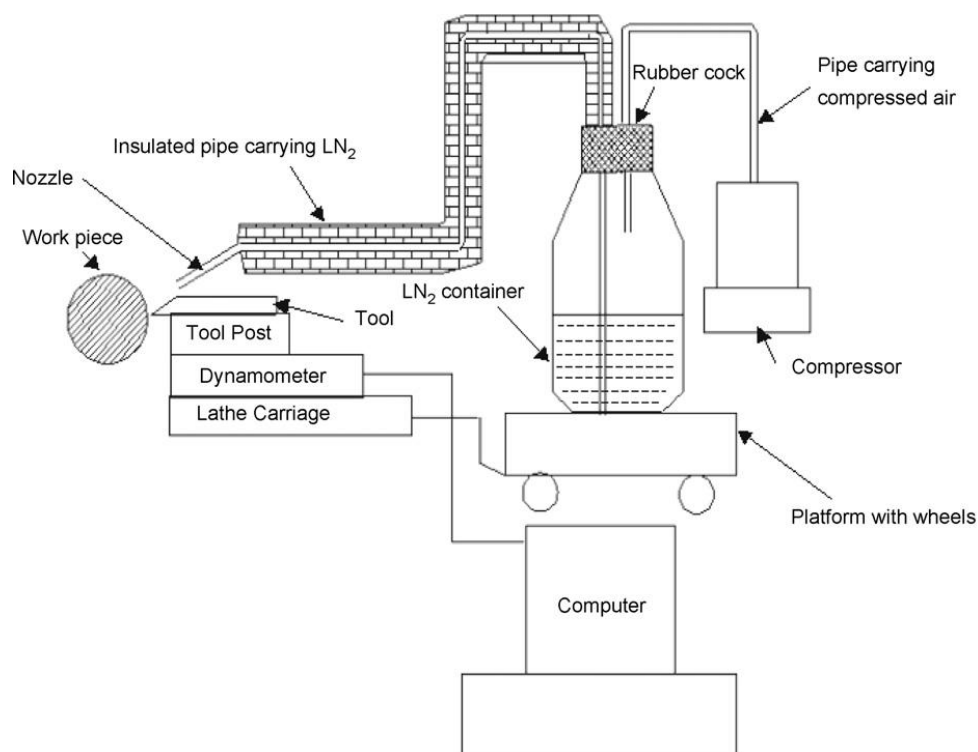


Figure I.26 : Schéma de principe du dispositif expérimental

Dureja et al [86] ont étudié la modélisation de l'usure de l'outil et la rugosité de la surface, par la méthodologie de surface de réponse (MSR) lors du tournage dur de l'acier AISI H11 avec des plaquettes céramiques mixtes revêtues de TiN. L'effet des paramètres de coupe, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce sur les facteurs de réponse, tels que l'usure en dépouille et la rugosité de surface, ont été étudiés en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA). Les auteurs ont proposé un modèle quadratique, et la fonction de désirabilité a été employée pour l'optimisation multiple des facteurs de réponse. Ils indiquent aussi des tests de confirmation pour vérifier la validité des modèles développés. Les résultats de ce travail indiquent que l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce ont un impact statistiquement significatif sur l'usure en dépouille, par contre l'avance et la dureté de la pièce sont les facteurs significatifs affectant la rugosité de surface. L'usure de l'outil a été observée par un microscope, et la caractérisation d'usure de certaine plaquette a été effectuée par un microscope électronique à balayage et une analyse par rayon X. D'après les auteurs, l'outil semble être usé par l'abrasion, l'usure en entaille et l'écaillage de la surface d'outil dû au frittage et à l'impact des particules dures dans le matériau de coupe ce qui provoque une usure adhésive [figures (I.27, I.26, I.27, I.28)].

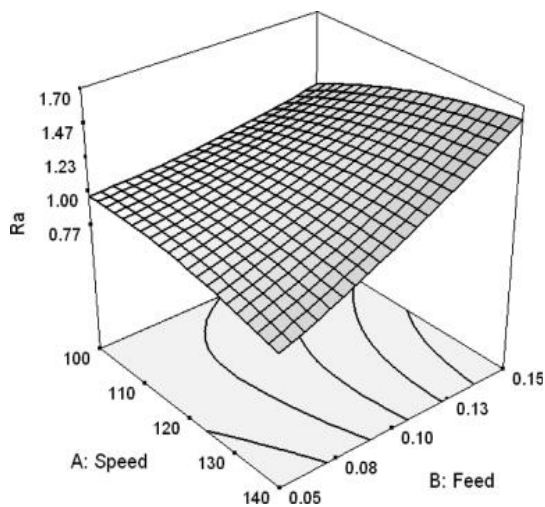


Figure I.27 : Interaction effet de la vitesse de coupe, l'avance sur la rugosité Ra

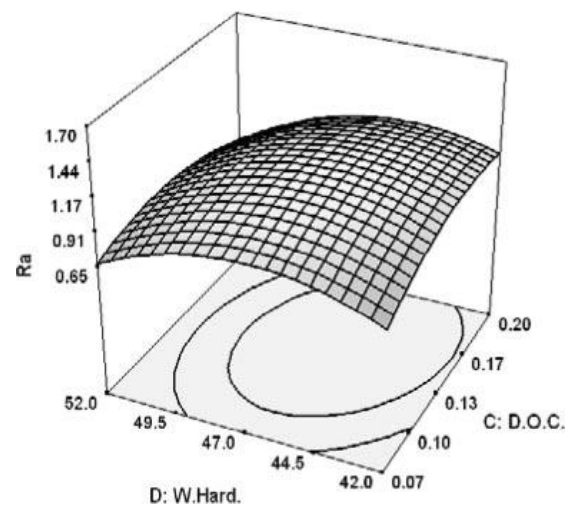


Figure I.26: Interaction effet de la dureté, profondeur de coupe sur la rugosité Ra

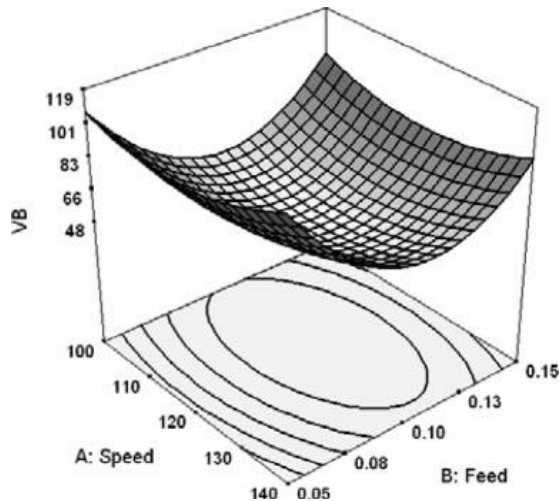


Figure I.27 : Interaction effet de l'avance, vitesse de coupe sur l'usure en dépouille VB

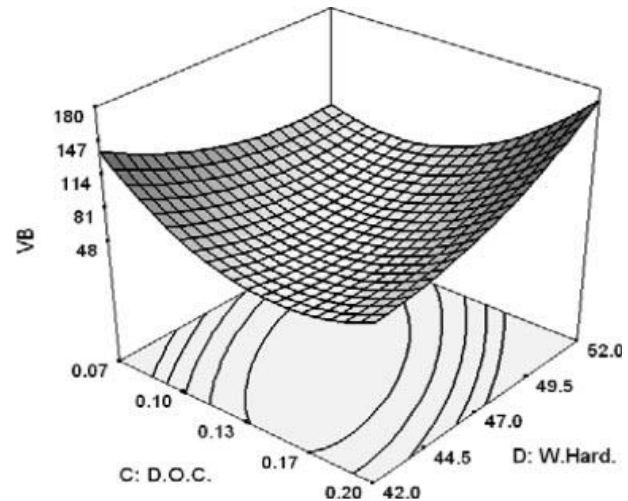


Figure I.28: Interaction effet de la dureté, profondeur de coupe sur l'usure en dépouille VB

Arizmendi et al [87] ont observé dans cette étude que la vibration de l'outil pendant le processus de coupe est l'un des facteurs qui influence plus la surface usinée et peut détériorer la qualité de la surface. Les auteurs ont investigué l'influence de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et le temps d'usinage sur les aspects d'usinabilité tels que la force de coupe spécifique, la rugosité de surface et l'usure de l'outil lors du tournage dur de l'acier AISI D2. Les auteurs ont proposé des modèles mathématiques en utilisant la méthodologie de surface de réponse MSR.

V.N. Gaitonde et al [88] ont indiqué que le tournage dur avec l'outil de coupe en céramique a plusieurs avantages par rapport au processus de rectification, tel que l'élimination du fluide de refroidissement, des coûts de traitement réduits, des propriétés améliorées de matériau, de la puissance d'énergie réduite et de la productivité accrue. En dépit de ses avantages significatifs, les auteurs ont affirmé aussi que le tournage dur ne peut pas remplacer toute la rectification due au manque de données au sujet de qualité de surface et de l'usure de l'outil. Par conséquent les auteurs ont montré qu'il y a un besoin d'étudier les caractéristiques d'usinabilité de ce procédé (tournage dur). Dans cette étude, les auteurs ont présenté des résultats en tournage dur d'un acier à outil pour le travail à froid (AISI D2) avec les plaquettes en céramique de CC650, de CC650WG et de GC6050WH sur les aspects d'usinabilité de la force d'usinage (F_t), la puissance de coupe (P), l'effort de coupe spécifique (K_s), la rugosité de la surface (R_a) et l'usure de l'outil (V_c). Les expériences ont été réalisées suivant un plan factoriel complet (FFD) (tableau I.2). L'objectif de cette étude est de voir les écarts de performance des différentes plaquettes céramiques étudiées et par suite de proposer des modèles de prédiction des paramètres technologiques étudiés (figure I.29).

Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

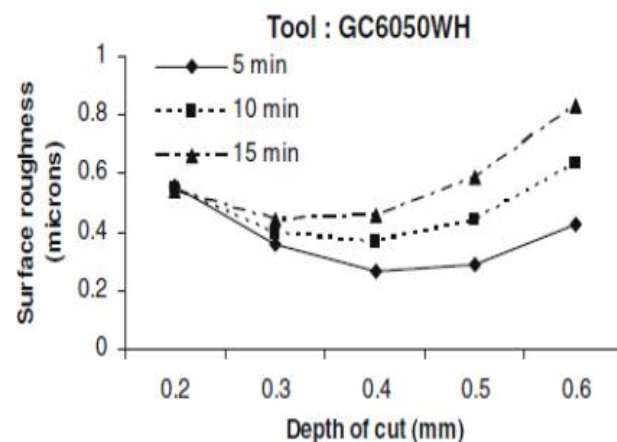
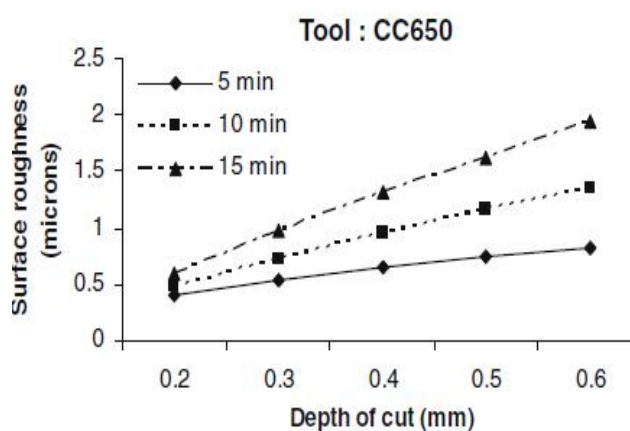
- L'effort de coupe et la puissance d'usinage sont extrêmement sensibles au temps d'usinage à des valeurs plus élevées de profondeur de passe. L'effort de coupe et la puissance augmentent linéairement avec la profondeur de passe pour l'usinage avec plaquettes en céramique CC650WG et de GC6050WH Wiper. D'autre part, l'usinage de l'acier AISI D2 avec la nuance céramique conventionnelle CC650, l'effort de coupe et la puissance augmentent avec l'augmentation en profondeur de passe jusqu'à 0.45 millimètre puis diminuent soudainement au delà de 0.45 millimètre.

- L'effort de coupe spécifique est très sensible à la profondeur de passe en cas de tournage dur avec la plaquette CC650 conventionnelle par rapport aux plaquettes en céramique de CC650WG et de GC6050WH Wiper. L'effort de coupe spécifique diminue avec l'augmentation de la profondeur de coupe en cas de la CC650 et de CC650WG, alors que les augmentations d'effort spécifiques de coupe au delà de 0.45 millimètre de profondeur de passe en cas d'usinage avec la céramique GC6050WH.

- La rugosité de la surface est minimale à des valeurs plus basses de profondeur de passe et de temps d'usinage en cas des plaquettes CC650 et de CC650WG, alors que la rugosité de la surface minimum se produit à 0.4 millimètre de profondeur de coupe avec la plaquette de GC6050WH.

- L'usure de l'outil diminue avec l'augmentation de profondeur de passe jusqu'à 0.4 millimètre et puis soudainement, elle augmente en cas des plaquettes CC650 et GC6050WH. . D'autre part, l'usure de l'outil augmente linéairement avec la profondeur de coupe en cas de la céramique CC650WG.

- La plaquette en céramique Wiper CC650WG a des performances meilleures concernant la rugosité de la surface et l'usure de l'outil, alors que la plaquette CC650 en céramique conventionnelle est utile pour réduire au minimum la force d'usinage, la puissance et l'effort de coupe spécifique.



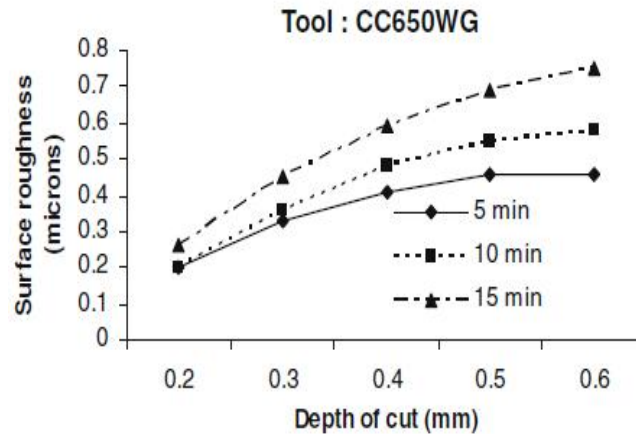


Figure I.29: Influence de la profondeur de coupe et du temps d'usinage sur la rugosité de la surface pour chaque outil céramique

| Trial no. | Machining force, F_m (N) | | | Power, P (kW) | | | Specific cutting force, K_s (MPa) | | | Surface roughness, R_a (microns) | | | Tool wear, VC (mm) | | |
|-----------|----------------------------|--------|--------|-----------------|------|------|-------------------------------------|---------|---------|------------------------------------|------|------|----------------------|-------|-------|
| | CC650 | | GC60 | CC650 | | GC60 | CC650 | | GC60 | CC650 | | GC60 | CC650 | | GC60 |
| | WG | 50WH | | WG | 50WH | | WG | 50WH | | WG | 50WH | | WH | 50WH | |
| 1 | 135.22 | 181.48 | 272.33 | 0.11 | 0.13 | 0.18 | 3951.91 | 4884.21 | 6803.49 | 0.39 | 0.17 | 0.53 | 0.086 | 0.053 | 0.077 |
| 2 | 223.67 | 249.79 | 262.7 | 0.16 | 0.17 | 0.18 | 6149.04 | 6299.24 | 6876.04 | 0.52 | 0.23 | 0.57 | 0.134 | 0.083 | 0.111 |
| 3 | 244.44 | 289 | 277.99 | 0.18 | 0.19 | 0.19 | 6667.59 | 7308.82 | 7218.18 | 0.57 | 0.26 | 0.55 | 0.19 | 0.113 | 0.164 |
| 4 | 222.13 | 349.39 | 279.23 | 0.18 | 0.26 | 0.19 | 3446.71 | 4939.46 | 3559.46 | 0.63 | 0.4 | 0.3 | 0.06 | 0.078 | 0.045 |
| 5 | 322.47 | 414.22 | 396.9 | 0.24 | 0.27 | 0.3 | 4575.2 | 5028.03 | 5542.4 | 0.95 | 0.56 | 0.4 | 0.097 | 0.108 | 0.082 |
| 6 | 352.56 | 485.68 | 362.26 | 0.25 | 0.29 | 0.29 | 4710.34 | 5485.92 | 5449.47 | 1.34 | 0.52 | 0.39 | 0.13 | 0.147 | 0.107 |
| 7 | 142.06 | 393.04 | 399.21 | 0.08 | 0.35 | 0.3 | 1035.78 | 4345.32 | 3748.04 | 0.86 | 0.5 | 0.43 | 0.07 | 0.095 | 0.041 |
| 8 | 264.44 | 551.12 | 540.34 | 0.18 | 0.37 | 0.42 | 2219.41 | 4657.04 | 5281.68 | 1.33 | 0.47 | 0.58 | 0.163 | 0.152 | 0.077 |
| 9 | 394.31 | 881.99 | 810.52 | 0.27 | 0.51 | 0.63 | 3349.97 | 6406.29 | 7922.52 | 1.94 | 0.82 | 0.88 | 0.249 | 0.178 | 0.178 |

Tableau I.2 : Tableau des résultats expérimentaux de l'acier AISI D2 lors de l'usinage avec des outils en céramiques (CC650, CC650WG et CC650 WH).

Yallese et al [89] ont présenté les résultats d'une recherche expérimentale sur l'usure d'un outil en nitrure de bore cubique (CBN) lors du tournage de l'acier X210Cr12 traité à 60HRC. En premier lieu, des essais d'usure de longue durée ont été planifiés par les auteurs pour élucider l'effet de la vitesse de coupe sur les différentes formes d'usure de l'outil CBN [figure I (30, 31, 32 et 33)] ainsi que l'étude des conséquences de l'usure sur la productivité. Ensuite, une seconde série d'expériences a été dédiée à l'étude de l'impact de l'usure (VB) sur l'évolution de la rugosité des surfaces usinées. Les résultats trouvés par les auteurs montrent que :

- Le CBN présente une bonne résistance à l'usure malgré l'agressivité de l'acier 100C6 traité à 60 HRC
- L'usure en dépouille est principalement due à l'abrasion, elle est attribuée aux rapports entre la dureté des composants de l'acier 100Cr6 et celle des composants durs du CBN.
- Le bilan thermique lors de l'usinage de l'acier trempé 100C6 avec le CBN montre que la coupe est caractérisée par un écoulement de copeau ayant une couleur rouge. Bien que la température du copeau augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la température de la pièce ne varie presque pas. La grande quantité de chaleur produite lors de l'usinage est en effet évacuée par le copeau, les échanges thermiques avec la pièce sont minimes.
- D'après les résultats, on constate que l'avance est le facteur déterminant de la rugosité et malgré l'augmentation de l'avance de 2,5 fois, les rugosités obtenues, restent toujours acceptables.
- L'évolution de l'usure de l'outil CBN influe sur les valeurs des rugosités. En effet, avec l'augmentation de la vitesse de coupe, l'usure augmente et conduit directement à la dégradation de l'état de surface. Malgré l'évolution de l'usure jusqu'à la valeur admissible 0,3 mm, la rugosité Ra n'a pas dépassé la valeur de $1\mu\text{m}$ pour la plupart des vitesses utilisées

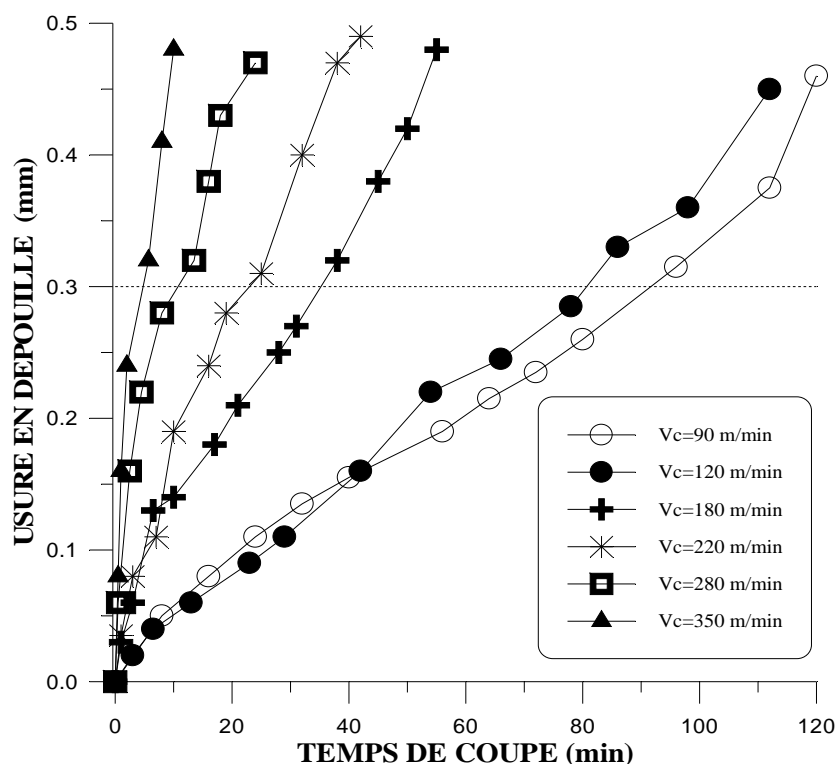


Figure I.30 : Usure en dépouille (VB) du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6

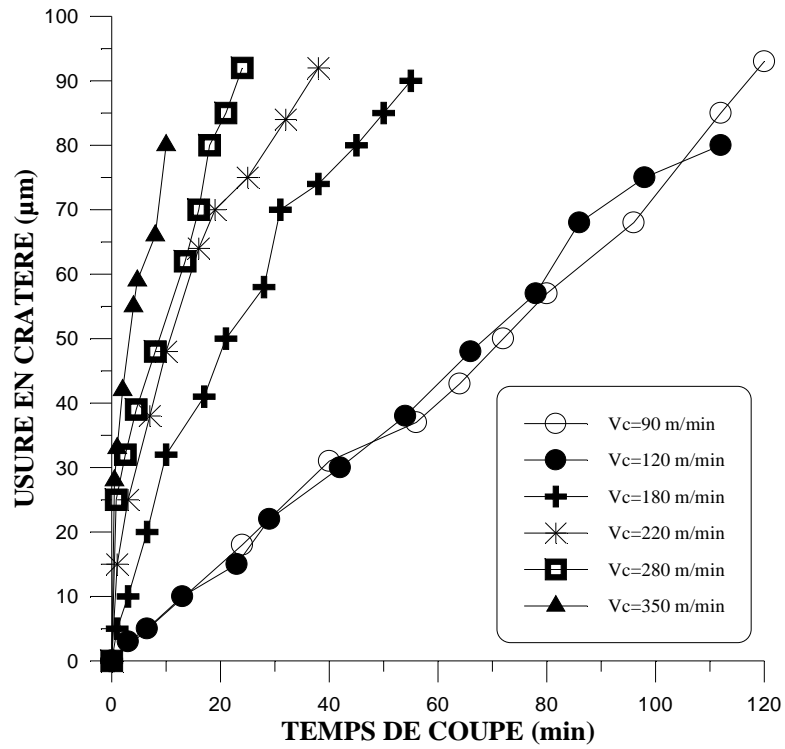


Figure I.31: Usure en cratère (*KT*) du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6

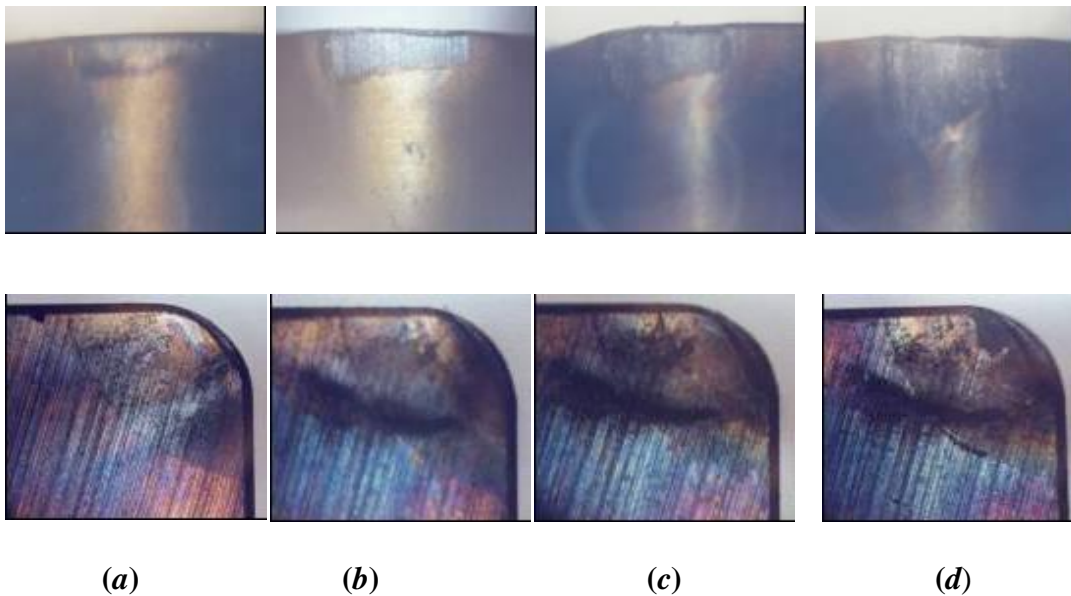


Figure I.32 : Micrographies de l'usure *VB* et *KT* du CBN à $V_c = 90$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm, Temps d'usinage : *a)* 8min, *b)* 40min, *c)* 56min et *d)* 80min.



Figure I.33 : Aspect final de l'usure en cratère KT du CBN : *a)* début d'usinage, *b)* après 80 min d'usinage à $V_c = 120$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.5$ mm

L'influence des conditions de coupe et de la dureté de la pièce sur les efforts de coupe ont été étudiées par **Bouacha et al [90]** lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 par un outil CBN. Les auteurs ont montré que le paramètre le plus influent sur les efforts de coupe est la dureté de la pièce. Ceci implique que le choix de la vitesse de coupe et la dureté de la pièce sont deux paramètres à considérer (figure I.34).

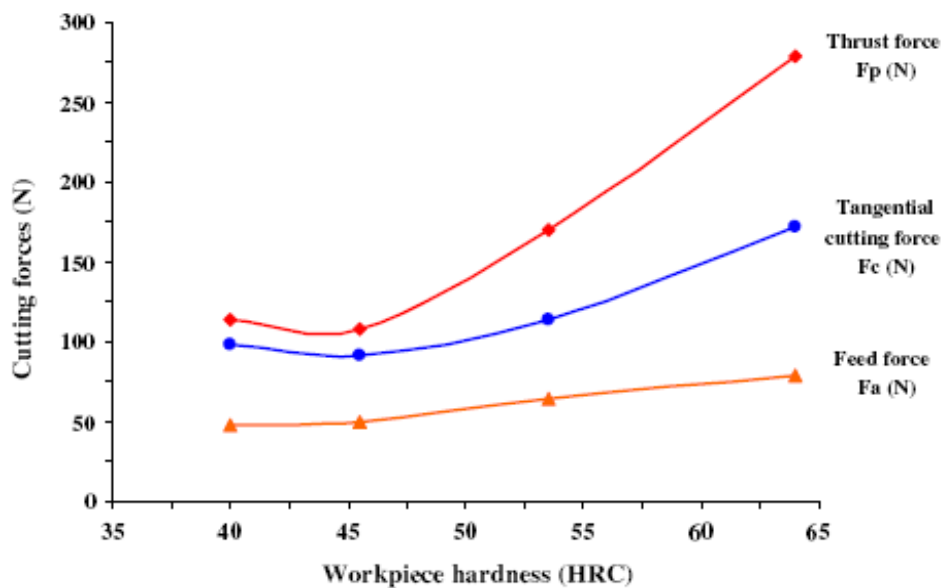


Figure I.34 : Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté de la pièce [93]

Bouchlaghem et al [91] ont conduit une recherche expérimentale pour déterminer l'influence des variables de coupe tels que, la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la rugosité, l'effort de coupe, la durée de vie et la température dans la zone de coupe, lors du tournage dur de l'acier AISI D3 (60HRC) avec des plaquettes en CBN. Les auteurs ont montrés dans cette étude, que la rugosité de surface est très sensible à la variation de l'avance et aussi ils ont trouvé que le principal mécanisme d'usure pour les outils

CBN est l'abrasion du liant du matériau CBN par les particules dures en carbure de la pièce. En plus, les résultats montrent que l'effort axial est très sensible à la variation de la profondeur de passe.

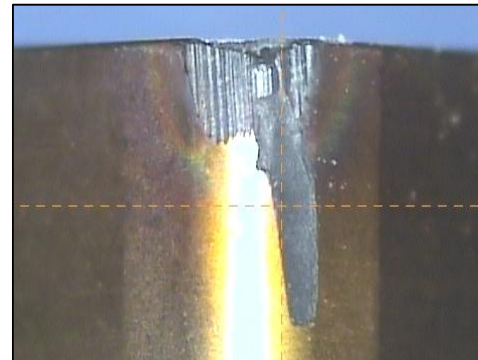
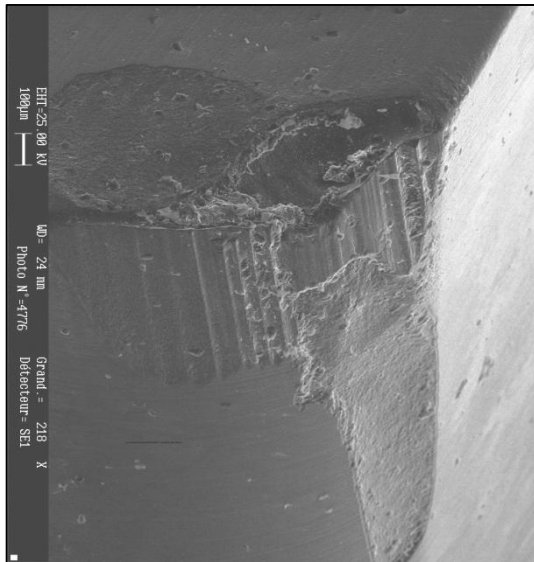
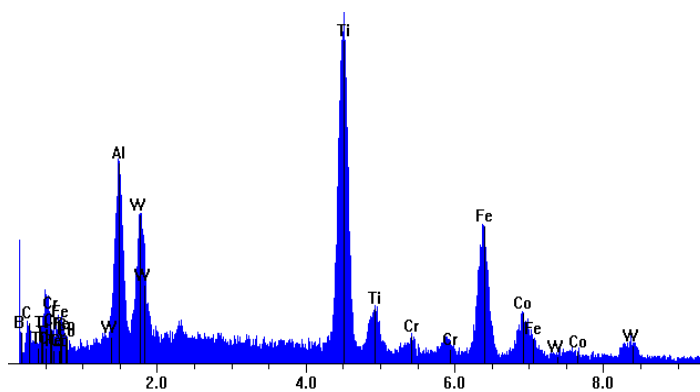


Figure I.35: Photo par MEB de l'usure en de dépouille et en cratère d'un outil de coupe en CBN.



| Element | Wt% | At% |
|---------|--------|--------|
| C | 10.86 | 8.34 |
| Al | 9.91 | 8.34 |
| Ti | 23.34 | 11.05 |
| Cr | 0.92 | 0.40 |
| Fe | 14.38 | 5.84 |
| Co | 4.88 | 1.88 |
| W | 11.63 | 1.44 |
| B | 24.08 | 50.54 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

Figure I.36: Exemple de l'analyse par rayon X sur la surface de dépouille d'un outil de coupe en CBN.

Daniavi et al [92] ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (MSR) afin de développer un modèle empirique pour la prédiction de la rugosité de surface et de choisir les conditions de coupe optimales lors du tournage dur. Les auteurs ont montré que l'avance a un impact significatif sur la rugosité de surface. L'analyse de variance (ANOVA) a été appliquée et a montré que l'influence de la profondeur de coupe sur la rugosité de surface est faible par rapport à l'avance et la vitesse de coupe.

Sahoo et saho [93] ont mené une étude sur le tournage dur de l'acier AISI 4340 (47 HRC) avec une plaquette en carbure revêtu (revêtement multicouche ZrCN). Les auteurs ont utilisé la méthode Grey et Taguchi pour développer des modèles mathématiques pour la rugosité de surface et l'usure en dépouille et l'optimisation du processus d'usinage. Les modèles mathématiques proposés sont statistiquement significatifs et adéquats en raison de leur valeur R^2 (coefficient de corrélation) élevée.

Asittük et Akkus [94] ont effectué une expérience qui concerne la rugosité de surface en tournage dur avec des outils revêtu en carbure de tungstène sur l'acier AISI 4140 durci (51 HRC) en utilisant la méthode de Taguchi. Les résultats de cette étude indiquent que la vitesse a l'effet le plus significatif sur les critères Ra et Rt . D'autre part, les effets des interactions des facteurs ($f \times Vc$) et ($ap \times Vc$) semblent importants. Cependant, d'autres caractéristiques d'usinabilité comme l'usure, la durée de vie de l'outil, la force de coupe, la morphologie des copeaux et la température de coupe n'ont pas été retenues pour cette étude.

Neseli et al. [95] ont appliqué la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour optimiser l'effet des paramètres géométriques de l'outil sur la rugosité de la surface dans le cas du tournage dur de l'acier AISI 1040 avec un outil en carbure métallique P25.

Aouici et al [96] ont fait une étude expérimentale sur l'effet de la vitesse de coupe, l'avance, la dureté de la pièce et la profondeur de coupe sur la rugosité de surface et les composantes de l'effort de coupe lors du tournage dur. L'acier choisi pour l'étude est l'acier AISI H11 avec différentes duretés (40, 45 et 50) HRC. L'outil de coupe utilisé est le nitrure de bore cubique (CBN 7020 de la société Sandvik) qui est constitué essentiellement de 57% et 35% CBN TiCN. Les auteurs ont choisi un plan d'expérience de 29 essais (Box–Behnken (BBDs)), composé de quatre facteurs (vitesse de coupe, avance, la dureté et la profondeur de coupe) et trois niveaux. Le traitement statistique des résultats basé sur l'analyse de la variance (ANOVA) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) ont permis de proposer des modèles mathématiques de la rugosité de surface et des composantes de l'effort de coupe.

Les résultats trouvés montrent que les composantes de l'effort de coupe sont influencées principalement par la profondeur de coupe et la dureté de la pièce. D'autre part, l'avance et la dureté de la pièce ont un impact significatif sur la rugosité de surface. En dernier lieu les auteurs proposent une optimisation des conditions de coupe pour une production industrielle de série.

Modèles proposés :

$$Ra = -9.872 - 0.0106Vc + 2.758f + 0.4908ap + 0.496H + 0.0334Vc \times f + 1.111 \times 10^{-3}Vc \times ap + 2.416 \times 10^{-4}Vc \times H + 14.583f \times ap - 0.337f \times H - 0.01334ap \times H - 1.143 \times 10^{-5}Vc^2 + 20.364f^2 - 2.829ap^2 - 5.596H^2$$

(I.2)

$$F_a = 605.064 - 1.237V_c + 182.867f + 1719.057ap - 31.705H + 0.0198V_c \times f - 2.030V_c \times ap + 8.4 \times 10^{-3}V_c \times H + 67.083f \times ap + 4.15f \times H - 30.756ap \times H + 3.955 \times 10^{-3}V_c^2 - 377.135f^2 + 476.07ap^2 + 0.42H^2$$

(I.3)

$$F_v = 1963.62 + 0.426V_c + 1952.79f + 1952.79ap - 109.311H - 2.609V_c \times f - 5.116V_c \times ap - 0.0247V_c \times H + 1645.833f \times ap + 29.487f \times H - 19.37ap \times H + 6.877 \times 10^{-3}V_c^2 - 4313.07f^2 - 14.374ap^2 + 1.382H^2$$

(I.4)

$$F_r = 5421.406 - 4.194V_c + 2737.7f + 1922.746ap - 249.924H - 1.945V_c \times f - 1.642V_c \times ap + 0.0365V_c \times H - 2047.916f \times ap - 46.225f \times H - 25.28ap \times H + 8.676 \times 10^{-3}V_c^2 + 4534.32f^2 - 22.559ap^2 + 2.961H^2$$

(I.5)

R. Suresh et al [97] ont fait une étude sur les performances des revêtements durs multicouche (TiC/TiCN/Al₂O₃) sur le substrat de carbure cimenté employant la déposition en phase vapeur (CVD) pour l'usinage de l'acier durci AISI 4340 en tournage à sec. L'objectif était d'établir une corrélation entre les paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe avec les efforts de coupe, la puissance, l'effort de coupe spécifique, l'usure de l'outil et la rugosité de la surface. Les auteurs ont utilisé la technique de Taguchi et ils ont validé les modèles de régression linéaire en utilisant des essais de confirmation (figure I.37, I.38, I.39 et I.40).

Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

- Le choix de la combinaison optimale de la basse avance par tour et la basse profondeur de passe avec la vitesse de coupe élevée est souhaitable pour réduire les efforts de coupe.
- Les valeurs plus élevées des avances par tour sont nécessaires pour réduire au minimum l'effort de coupe spécifique.
- La puissance de coupe et l'usure de l'outil de coupe augmentent presque linéairement avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance par tour.
- La combinaison de la basse avance par tour et de la vitesse de coupe élevée est nécessaire pour réduire au minimum la rugosité de la surface. L'abrasion était le mécanisme d'usure observé à toutes les conditions de coupe.

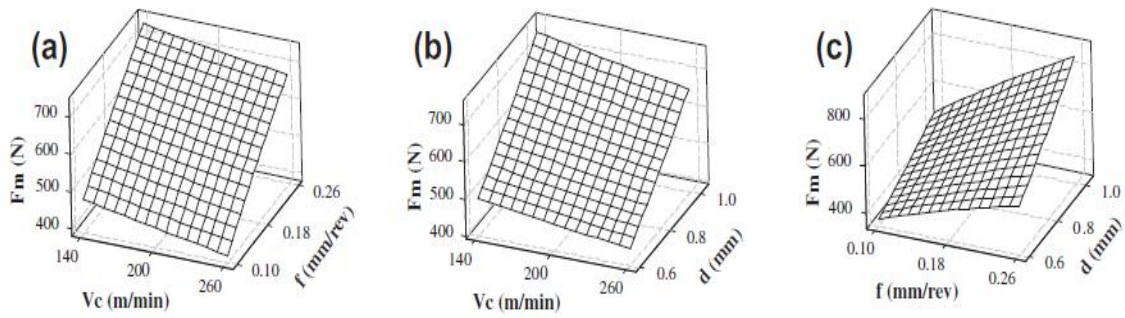


Figure I.37 : (a) Surface de réponse 3D pour les effets de l'interaction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, (b) vitesse de coupe et profondeur de coupe et (c) vitesse d'avance et profondeur de coupe sur la force d'usinage.

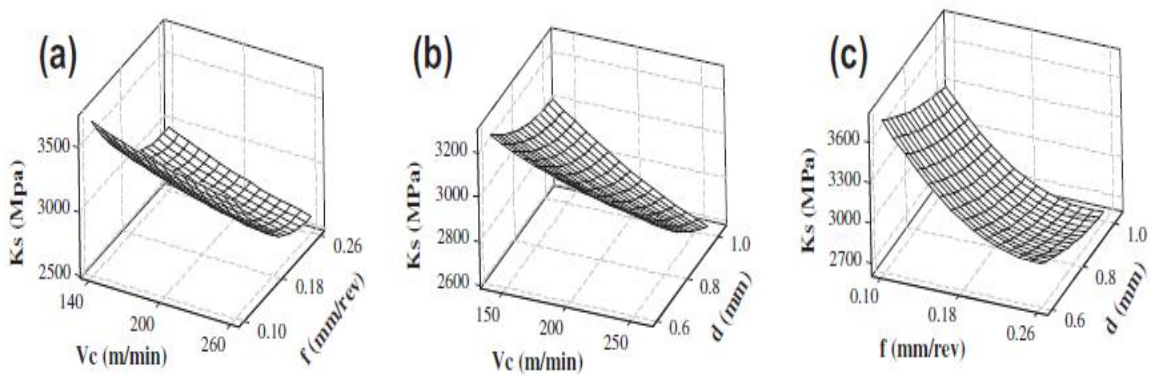


Figure I.38 : (a) Surface de réponse 3D pour les effets de l'interaction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, (b) vitesse de coupe et profondeur de coupe et (c) vitesse d'avance et profondeur de coupe sur l'effort de coupe spécifique.

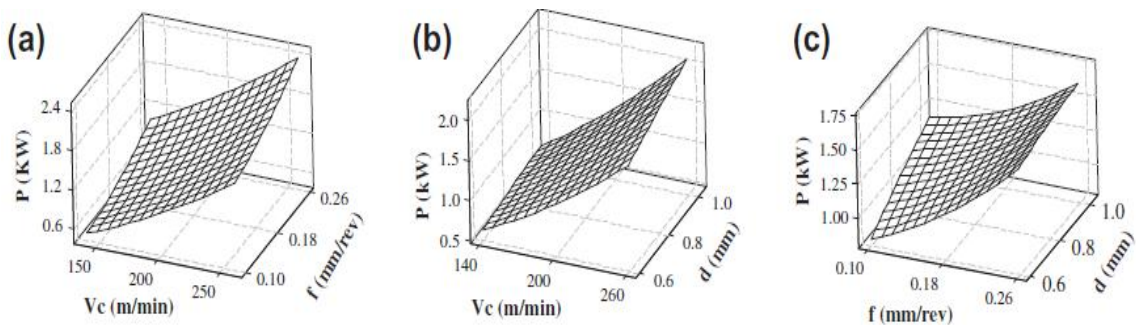


Figure I.39 : (a) Surface de réponse 3D pour les effets de l'interaction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, (b) vitesse de coupe et profondeur de coupe et (c) vitesse d'avance et profondeur de coupe sur la puissance de coupe.

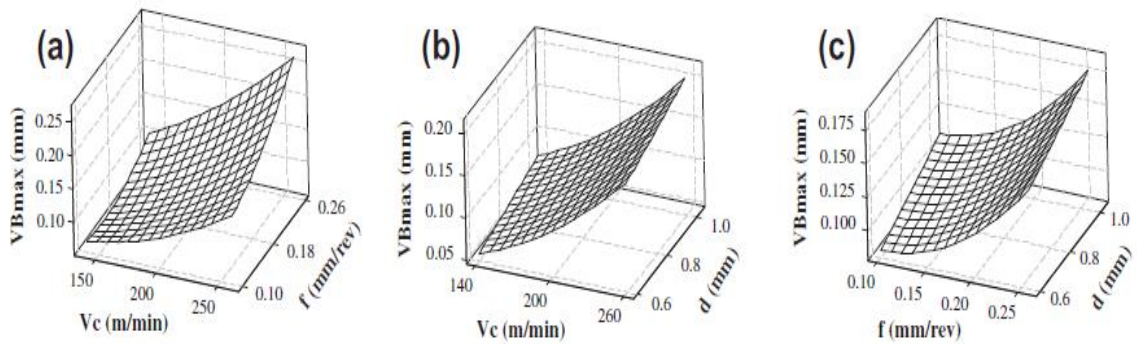


Figure I.40 : (a) Surface de réponse 3D pour les effets de l'interaction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, (b) vitesse de coupe et profondeur de coupe et (c) vitesse d'avance et profondeur de coupe sur l'usure en dépouille.

Vikas Upadhyay et al [98] ont fait une tentative pour utiliser des signaux de vibration pour la prédiction de la rugosité de surface pendant la l'usinage de l'alliage Ti-6Al-4V (figure I.41). L'étude a été réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, seule l'amplitude de l'accélération des vibrations de l'outil dans la direction axiale, radiale et tangentielle a été utilisé pour développer des modèles de régressions multiples. Le premier et le deuxième modèles de régression ainsi développés n'étaient pas trouvés assez précis.

Modèle du premier ordre (*FOM*)

$$Ra = 1.84 - 2.05Vx + 0.124Vy + 0.084Vz$$

$$R^2 = 52.8\%$$

(I.6)

Modèle du second ordre (*SOM*)

$$Ra = -27.6 + 171Vx + 0.43Vy - 1.1Vz - 247Vx^2 - 0.0167Vy^2 + 0.47Vz^2 + 0.24Vx \times Vy - 0.126Vy \times Vz - 0.7Vx \times Vz$$

$$R^2 = 70.5\%$$

(I.7)

Dans la deuxième étape, les auteurs ont proposé un modèle où l'avance et la profondeur de passe coupe ont été incluse en tant que paramètres d'entrée mis à part les accélérations dans la direction radiale et tangentielle. Le modèle trouvé est comme suit, avec un $R^2=93,2\%$.

$$Ra = -0.035 + 7.96 \times s + 0.116 \times t + 0.0455 \times Vy - 0.0351 \times Vz$$

$$R^2 = 93.2\%$$

(I.8)

Le modèle trouvé fournit une bonne précision de prédiction (erreur maximale inférieure à 7,45%) de la rugosité de surface. Finalement, les auteurs ont développé un modèle de réseau neuronal artificiel car il peut être facilement intégré dans un environnement de fabrication.

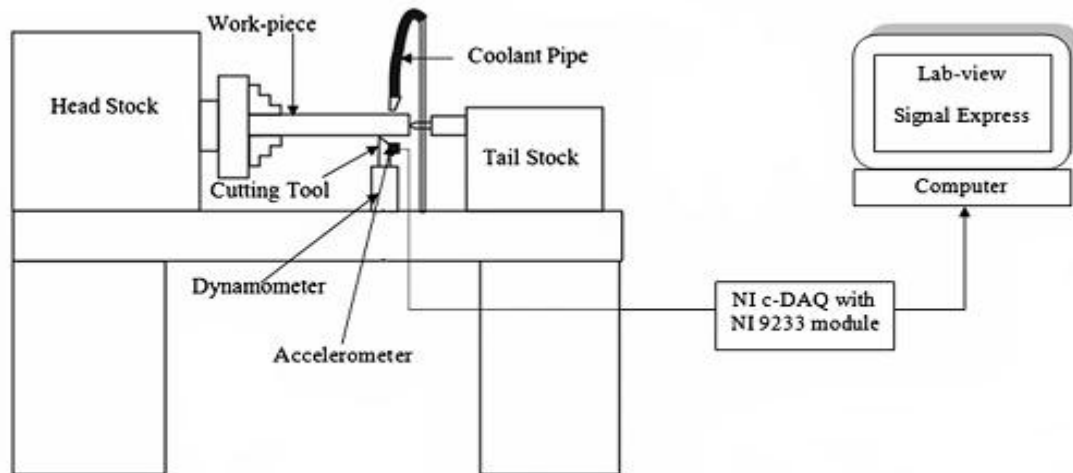


Figure I.41 : Configuration de l'expérimentation

Subramanian et al [99] ont développé un modèle statistique pour prévoir l'amplitude des vibrations en fonction des paramètres géométriques de l'outil tels que l'angle d'inclinaison radial, le rayon de bec de l'outil et les paramètres d'usinages tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe. Les auteurs ont réalisé des expériences suivant un plan de 32 essais et ils ont utilisé la technique de la méthodologie de surface de réponse. Le matériau choisi pour l'usinage, est en aluminium (Al 7075-T6) et l'outil utilisé est une fraise en acier rapide supérieur (HSS) avec différentes géométries. Deux accéléromètres piézo-électriques ont été utilisés pour mesurer l'amplitude de vibration (figure I.42). Les auteurs ont proposé un modèle mathématique du second degré en fonction des paramètres d'usinage pour prédire l'amplitude de vibration. L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour vérifier la précision du modèle proposé. D'autres investigations sur l'effet direct et interactif du paramètre de processus avec les d'amplitude de vibrations ont été réalisées pour la sélection du paramètre de processus de telle sorte que l'amplitude des vibrations est maintenue à un minimum ce qui assure la stabilité du processus de fraisage de finition. Les valeurs optimales obtenues à partir de processus d'usinage de finition sont, un angle d'attaque radial 12° , un rayon de 0,8 mm, une vitesse de coupe de 115 m/min, une vitesse d'avance de 0,04 mm/dent et une profondeur de coupe axiale de 2,5 mm. L'amplitude de vibration a montré le rapport négatif avec l'angle d'attaque et le rayon du bec. Les facteurs dominants sur l'amplitude de vibration sont le débit d'alimentation et la profondeur de coupe. Ainsi, il est prévu que les modèles prédictifs dans cette étude pourraient produire des valeurs de l'amplitude des vibrations à proximité des lectures expérimentales avec un intervalle de confiance de 95%.

- Modèles trouvés :

Canal 1 – direction axial (spindle) mm/s²

$$\begin{aligned}
 &= 28.8324 - 2.697\gamma - 5.0831R + 1.200Vc \\
 &+ 5.3488f_z + 3.247ap - 3.4271R^2 + 5.562Vc^2 \\
 &+ 8.175a_p^2 + 2.2112\gamma f_z - 1.045\gamma a_p - 3.2777Rf_z \\
 &- 3.4404Ra_p - 10.6599Vcf_z - 4.9561Vca_p + 3.3218f_z a_p
 \end{aligned}$$

(I.8)

Canal II – direction d’avance (Vice) mm/s²

$$\begin{aligned}
 &= 23.0548 - 3.7552\gamma - 9.0934R + 28.3159f_z \\
 &- 3.4178a_p + 7.9736\gamma^2 + 57.9326f_z^2 + 26.8553a_p^2 \\
 &+ 7.8909\gamma R + 9.8269\gamma R + 9.8269\gamma a_p - 17.1036Rf_z - 14.4851Ra_p
 \end{aligned}$$

(I.9)

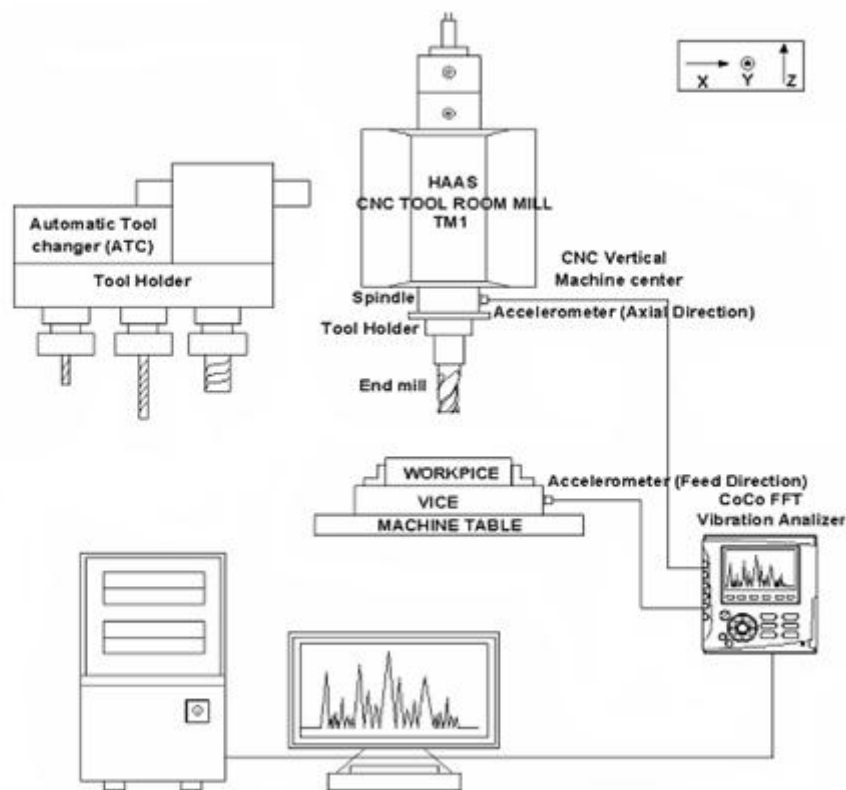


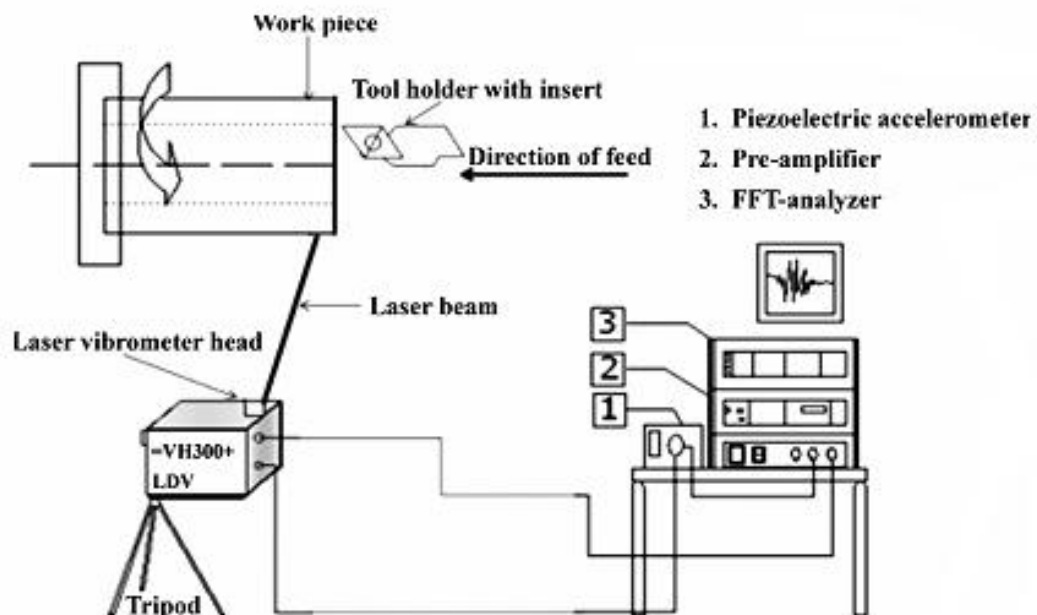
Figure I.42: Configuration expérimentale

La vibration est l'un des problèmes intenses dans le processus d'alésage. L'usinage et l'usure de l'outil sont affectés énormément par la vibration de l'outil due à la longueur de la barre

d'alésage. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail de recherche élaboré par **Venkata Rao et al [100]**. Le travail a pour but d'estimer l'effet des paramètres de coupe sur les vibrations de la pièce à usiner, la rugosité de surface et le volume de métal enlevé lors de l'alésage de l'acier (AISI 1040). Les auteurs ont utilisé un laser à effet Doppler vibromètre (LDV) pour l'acquisition des données en ligne et un analyseur à grande vitesse de FFT a été aussi utilisé pour la vibration de la pièce (figure I.43 (a et b)). Les auteurs ont préparé un plan d'expérience de huit expériences avec deux niveaux de coupe des paramètres tels que la vitesse de rotation de la broche, l'avance par tour et le rayon de bec de l'outil. La méthode de Taguchi a été employée pour optimiser les paramètres de coupe et une analyse de régression multiple est faite pour obtenir la relation empirique de durée de vie de l'outil, la rugosité de la surface usinée, le volume de métal coupé et l'amplitude des vibrations de la pièce usinée.

Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

- Les amplitudes de vibration de la pièce se trouvent augmentées avec la progression de l'usure de l'outil.
- Le rayon du bec avec une contribution de (45.81%), est le paramètre le plus significatif qui affecte l'amplitude de vibration de la pièce usinée.
- L'avance par tour avec une contribution de (55.57%) est le paramètre le plus significatif qui affecte la rugosité de la surface de la pièce.
- L'avance par tour avec une contribution de (51.26%) est le paramètre le plus significatif qui affecte le volume de métal enlevé.



(a)



(b)

Figure I.43 : (a), (b) Configuration expérimentale

L'étude élaborée par **El bah et al [101]** a pour but de faire une comparaison entre les critères de rugosité de la surface (Ra , Rz et Rt) des plaquettes wiper avec les plaquettes conventionnelles pendant le tournage dur de l'acier AISI 4140 (60 HRC). Les expériences réalisées par les auteurs sont basées sur le tableau orthogonal de Taguchi (L27). La méthodologie de surface de (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) ont été employées pour vérifier la validité des modèles de régression quadratique trouvés et pour déterminer les paramètres significatifs affectant la rugosité de la surface usinée. Les résultats indiquent que la qualité de surface obtenue avec les plaquettes en céramique wiper sont sensiblement améliorée en comparaison avec la plaquette en céramique conventionnelle avec un rapport de 2.5. Les mesures de rugosité montrent une dépendance à l'égard de l'usure de la céramique wiper CC6050WH et que malgré l'augmentation de l'usure jusqu'à l'usure en dépouille admissible de la valeur 0.3 millimètre, le critère de rugosité Ra n'a pas excédé $0.88 \mu\text{m}$ pour la céramique wiper CC6050WH et $0.99 \mu\text{m}$ pour la céramique conventionnel CC6050. En dernier lieu, les auteurs ont proposé une modélisation des différents critères de rugosité et cela pour les deux céramiques testées ainsi qu'une optimisation des conditions de coupe.

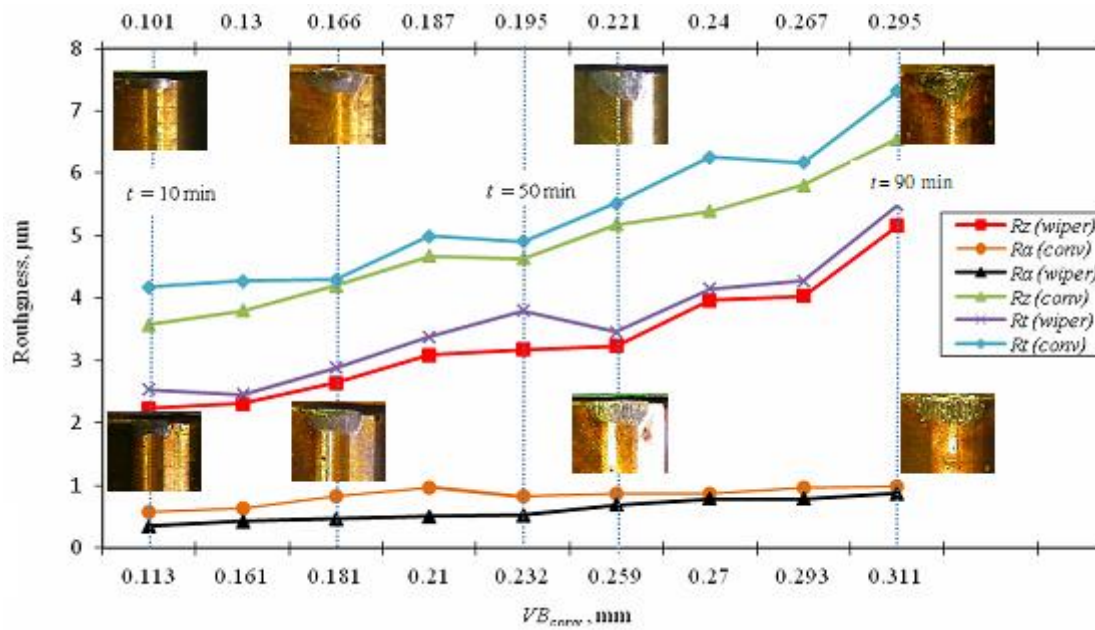


Figure I.44: Effet de l'usure en dépouille sur la rugosité à $V_c = 160\text{m/min}$, $f = 0.08\text{ mm/tr}$, $ap = 0.2\text{ mm}$

I.11 CONCLUSION

Nous avons présenté dans cette recherche bibliographique les bases nécessaires à la compréhension de cette étude. Ce chapitre est divisé en deux parties, la première expose un rappel des bases scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux tels que:

La définition de la coupe des métaux, l'usinage des pièces durs; les matériaux usinés en TD, l'évolution des matériaux à outils, l'usure et la défaillance des outils de coupe, la température de coupe et en dernier lieu les efforts et les vibrations en usinage.

La seconde partie de cette étude traite l'état de l'art sur la technique du tournage dur. A cet effet, nous avons présenté un résumé sur les différents travaux scientifiques de recherche publiés ces vingt (20) dernières années (43 articles).

Le prochain chapitre présente l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

CHAPITRE II

Approche expérimentale

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique pour caractériser le comportement de nouveaux outils céramiques lors de l'usinage de l'acier AISI 4140 durci à 57 HRC à différentes conditions de coupe.

Notre travail repose à la fois sur l'obtention des résultats expérimentaux selon la méthode unifactorielle, les plans factoriels complets (PFC) et aussi l'utilisation des plans d'expérience de Taguchi. L'approche expérimentale va consister en une présentation du matériel qui sert à l'étude des efforts de coupe, rugosité, usure et le phénomène de vibration ainsi que les conditions de coupe et les plans d'expériences utilisés.

II.2. EQUIPEMENT ET PREPARATION DES EXPÉRIENCES

Pour la réalisation des expériences concernant l'étude envisagée, il est nécessaire de préparer les équipements et les moyens suivants :

II.2.1. Machine outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour à charioter et à fileter de la société Tchèque «TOS TENCIN» modèle SN 40 d'une puissance de 6.6KW sur la broche, ayant une gamme de vitesse de 45 à 2000 tr/min et d'avances de 0.08 à 6.4 mm/tr.

II.2.2. Matériau à usiner

C'est un acier faiblement allié de nuance AISI 4140 selon la norme Européenne, destiné généralement à la fabrication des pièces de transmission à titre d'exemple (arbre, vérin, pignon, couronne etc...). Il se classe parmi les aciers résistant aux chocs thermiques du fait de la présence du chrome, molybdène et du vanadium.

- Le chrome augmente la trempabilité de l'acier, diminue le grossissement du grain lors de l'austénitisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température. Il forme, également des carbures qui contribuent à la résistance à l'abrasion.

- Le vanadium permet de générer des carbures de très haute dureté (3000 HV). De petites additions supérieures à (0.2% en masse) sont très efficaces pour éviter le grossissement du grain lors du traitement thermique. Dans les aciers à outils, il est très utilisé avec le chrome, le molybdène et le tungstène. Sa mauvaise résistance à l'oxydation au-delà de 600°C est compensée par la présence de chrome. Par ailleurs, la teneur en carbone de l'acier est étroitement liée à la teneur en vanadium. Cette dernière se trouve limitée par des problèmes de trempabilité, de forgeabilité après trempe et revenu.

- Le molybdène confère à l'acier une très bonne résistance à l'usure à chaud via la présence de carbure très dur de 1500 (M6C) à 2000 HV (M2C), et ralentit l'adoucissement.

Les éprouvettes utilisées pour la réalisation des essais de rugosité, efforts de coupe et d'usure sont préparées sous forme de rondin de 74 mm de diamètre et de 380 mm de longueur, avec un trou de centrage pour assurer un montage mixte. Sur les figures (II.1 et II.2) sont représentés les montages d'usinage utilisés pour les essais de courte durée (Effort de coupe, Rugosité et Vibration) et des (Essai d'usure).

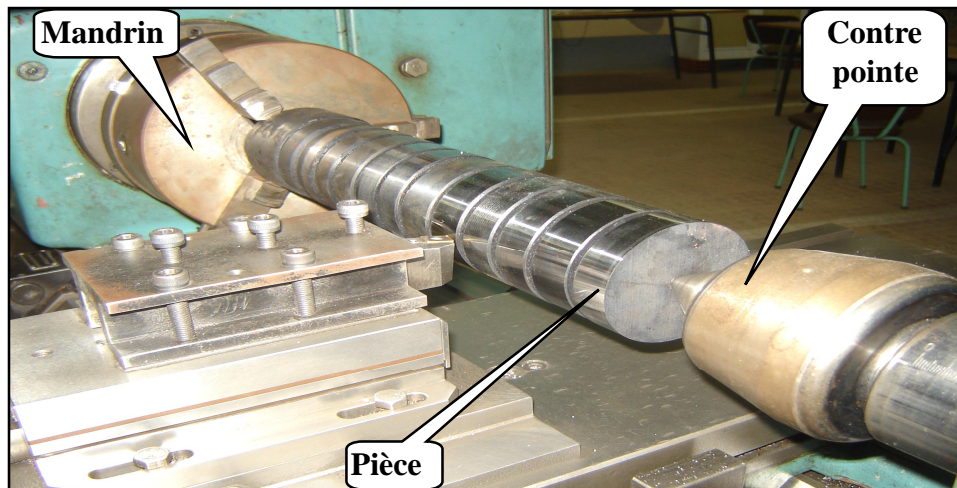


Figure II.1 : Représentation (éprouvette en montage d'usinage des essais des efforts de coupe et rugosité sur un tour SN 40).

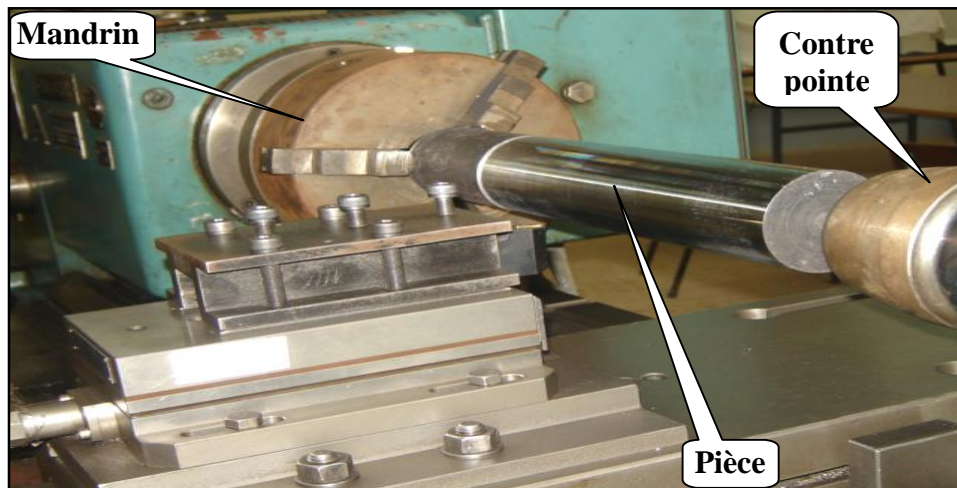


Figure II.2: Représentation (éprouvette en montage d'usinage des essais d'usure sur un tour SN 40).

La composition chimique ainsi que les caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 4140 sont représentées dans le tableau II.1.

| C | Cr | Mn | Si | P | Cu | Mo | Ni | S | V | Fe | Rm |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| 0.42 | 1.08 | 0.68 | 0.25 | 0.013 | 0.022 | 0.209 | 0.021 | 0.018 | 0.004 | 96.95 | 870N/mm ² |

Tableau II.1 : Composition chimique et mécanique de l'acier AISI 4140 (%)

Cette analyse a été faite au laboratoire du complexe sidérurgique « EL-HADJAR ».

Le traitement thermique est réalisé dans un four électrique pour atelier (figure II.3). Les caractéristiques de ce four sont citées dans le tableau II.2.

| Marque | Dimensions (mm) | | | Puissance (KW) | T°max |
|--------|-----------------|--------------|-------------|----------------|-------|
| | Largeur (l) | Longueur (L) | Hauteur (H) | | |
| B 180 | 330 | 500 | 280 | 14 | 1200° |

Tableau II.2: Caractéristique du four électrique



Figure II.3 : Four à chambre électrique pour le traitement thermique des éprouvettes

Les opérations de traitement thermique des éprouvettes sont représentées dans la (figure II.4) (a, b et c).



(a) Chauffage de l'éprouvette

(b) Transport de la pièce

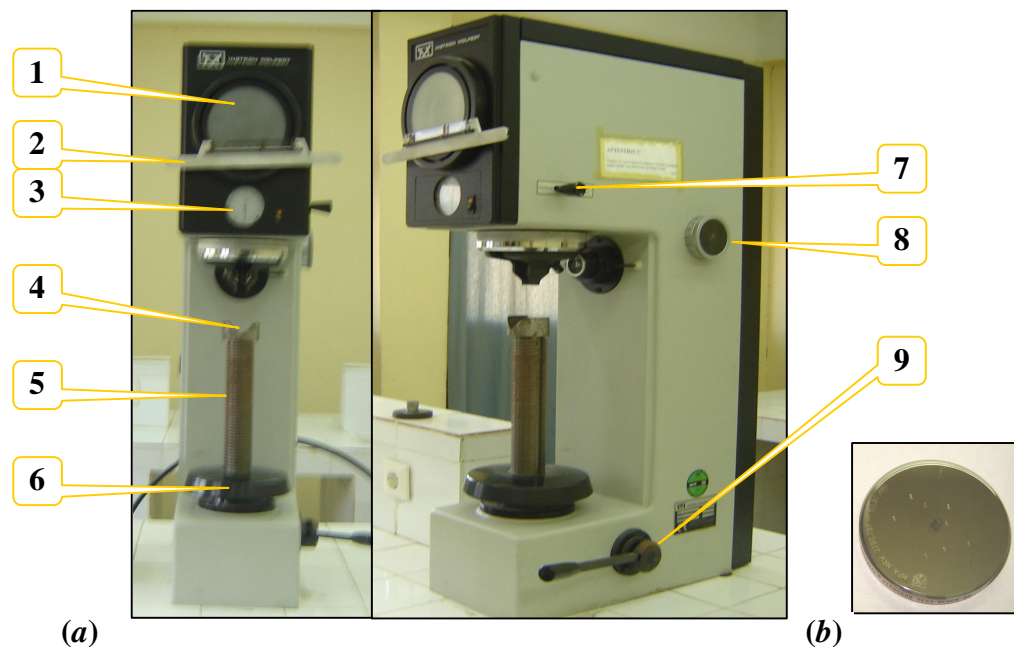
(c) Trempe à l'huile

Figure II. 4: Opération de traitement thermique

Ce traitement thermique s'est déroulé dans les conditions suivantes :

- température d'échauffement 850°,
- temps de maintien 45min,
- refroidissement à l'huile.

Les éprouvettes ont subi une trempe, qui a permis d'élever leur dureté de 29 HRC à 57 HRC. Les diverses mesures de dureté avant et après trempe de l'acier AISI 4140 ont été prises sur l'appareil de contrôle de dureté de 206RT, d'AFFRI Company (figure II.5.a). Ayant une précision de 0,5 HR (Normes de conformation d'exactitude EN-ISO 6506-2/6507-2/6508-2/ASTM-E18), le duromètre 206RT a une charge initiale de 98.07 N et des charges d'essai pour : Rockwell 588-980-1471 N, Vickers 98.07-588-980 N et Brinell 612-1225-1839 N. Le duromètre a été étalonné à l'aide d'un étalon de dureté moyenne 63.5 HRC (figure II. 5. b).



1. Vitre dépolie; 2. Echelle ; 3. Compteur Rockwell; 4. Mise en place de l'éprouvette; 5. Colonne à vis; 6. Volant ; 7. Levier commutateur Rockwell/Vickers, Brinell ; 8. Bouton de réglage de la charge d'essai ; 9. Levier de manœuvre (charge d'essai).

Figure II.5: *a)* duromètre 206 RT pour la mesure de la dureté des pièces usinées, *b)* étalon d'étalonnage du duromètre (63.5 HRC)

II.2.3. Outils de coupe utilisés

Les outils céramiques utilisés sont amovibles de formes carrée et rhombique à fixation par trou central (voir leur spécification dans les paragraphes suivants). Ces outils supportent des contraintes d'usinage dues à la dureté de la pièce usinée. L'utilisation de ce genre de matériau

nécessite des valeurs d'angle de coupe fortement négatives permettant ainsi d'augmenter les protections d'arêtes compatibles avec une tenue correcte de celles-ci. L'addition des phases dispersées telles que TiC ou TiN pour la CC650 non revêtue améliore la conductivité thermique, la résistance, la dureté et la résistance à la rupture.

Les céramiques revêtues (CC6050) et (CC6050WH), de part leurs propriétés notamment leurs duretés à chaud très élevées, leurs très grandes stabilités thermiques et chimiques, leurs hautes résistances à la chaleur sont très appropriées pour le tournage dur. Le revêtement permet de compenser l'absence de refroidissement. Il est ainsi particulièrement recommandé pour toutes les opérations d'usinage à grande vitesse et à sec.

Les plaquettes ont un revêtement PVD (à base de nitrure de titane).

- Dépôt: Base TiN
- Dureté (HV): 2100
- Coefficient de frottement (acier à sec): 0.5. - Epaisseur: 3-7 μ m
- Température max d'utilisation en °C : 700

Ils permettent d'atteindre les caractéristiques physiques suivantes:

- Dureté comprise entre 1800 à 4500HV
- Conductibilité thermique de l'ordre de 11 à 35 $Wm^{-1}K^{-1}$
- Module de Young compris entre 300 et 600 daN/mm².

Ces plaquettes sont caractérisées par leur géométrie de pointe de type T et S voir tableau II (4, 11 et 12).

II.2.4. Enregistrement des efforts de coupe

Le système d'acquisition de base des efforts est composé: (figure II.6)

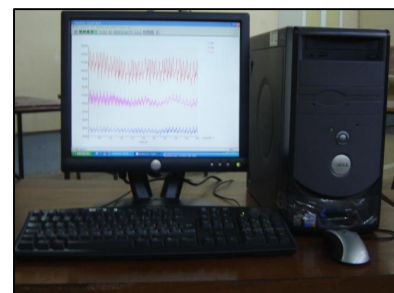
- d'une table de mesure dynamométrique kistler à capteurs piézo-électriques,
- des amplificateurs de signaux kistler,
- d'une carte d'acquisition permettant de transformer un signal analogique en signal numérique de marque national instrument,
- d'un programme de mesure permettant d'effectuer les mesures et de les exploiter. Ce programme a été fait sur la base du logiciel dynoware.



Table Kistler



Amplificateur Kistler



Acquisition numérique

Figure II.6: Chaîne d'acquisition des efforts avec le dynamomètre

L'ensemble dynamométrique se compose de quatre capteurs permettant de mesurer trois composantes orthogonales (X, Y et Z), mais il ne permet pas d'enregistrer les couples. Ses références sont les suivantes :

- type 9257 B N° série 87069
- nombre de capteur, capteurs piézo-électriques 4
- charge admissible des capteurs : +- 5 KN
- sensibilité : -7,92 pC/N pour Fx, -7,91 pC/N pour Fy et -3,80 pC/N pour Fz
- linéarité : $\pm 0,3 \leq \% \text{FSO}$
- rigidité : $>1 \text{ kN}/\mu\text{m}$
- seuil de réponse : $< 0,01$
- gamme de température d'utilisation 0 à 70°C
- fréquence propre : en 3,5 kHz

Le signal de sortie fourni par les capteurs piézo-électriques est de type analogique en termes de variations de potentiel dans une plage de + ou - 1 volt. Il est donc nécessaire de l'amplifier pour pouvoir le mesurer commodément. Pour cela, nous avons utilisé des amplificateurs **kistler** de type (5011B) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- tension de sortie : $\pm 10\text{V}$
- courant de sortie : $\pm 5 \text{ mA}$
- gamme de fréquence : 0 à 200 kHz
- impédance : 10Ω
- erreur : $\pm 3\%$
- linéarité : $\leq \pm 0,05 \% \text{Fs}$

Pour l'acquisition, nous avons opté pour une carte (référence PCI-MOI-16E-4 série ADA77F). Elle a comme caractéristiques :

- nombre d'entrées – sorties : 16
- vitesse d'acquisition : 500 000 points/s pour chaque entrée
- résolution 12 bits
- signal acceptable : $\pm 10 \text{ volts}$, - bande passante : 0 – 600 kHz

Le montage de la table d'acquisition Kistler avec vue du porte outil est visible sur la (figure II.7).

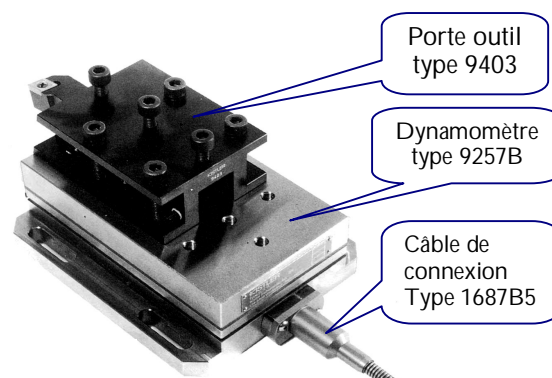


Figure II.7: Montage du dynamomètre Kistler avec vue du porte outil

I.2.5. Caractérisation de la surface de la pièce

La caractérisation de la topographie de surface de la pièce usinée est effectuée in situ avec un rugosimètre portable 201 de marque **Mitutoyo** (figure II.8) dont la précision est de $0.1\mu\text{m}$. Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation est de 4 mm c'est-à-dire (avance utilisée: 0.5 et filtre utilisé: 0.8). La mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage pour garantir la précision de la pièce.

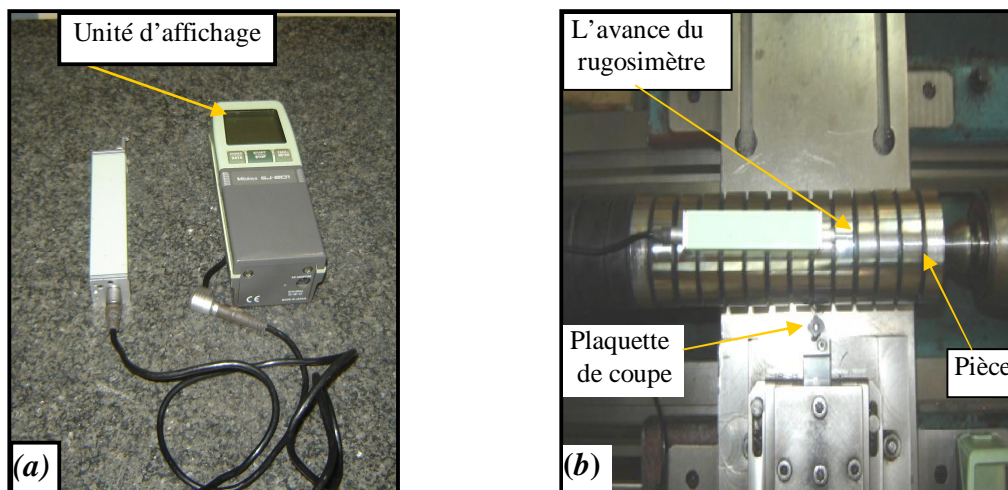


Figure II.8: (a) Rugosimètre SurfTest 201 Mitutoyo, (b) Mesure de topographie in situ avec le rugosimètre sans démontage de la pièce

II.2.6. Microscopie pour la mesure de l'usure en dépouille VB

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure à la fin de la passe est un dispositif binoculaire et son ordinateur équipé du logiciel "**Visual Gage**" (figure II.9). Cet ensemble s'est avéré bien adapté à la connaissance de l'usure et au suivi de sa progression car il permet :

- de stocker les images en mémoire,
- d'inclure sur les images sauvegardées les renseignements suivants : références de l'arête utilisée, références de la focale et du grossissement, échelle, et l'ensemble des mesures et traitements effectués avec le logiciel,
- de faire des mesures de distance, on peut donc connaître l'évolution des grandeurs attachées à la zone d'usure :
 - l'usure en dépouille,
 - du rayon de plaquette permettant d'observer le recul d'arête,
 - des angles pour vérifier la géométrie de la plaquette, etc...

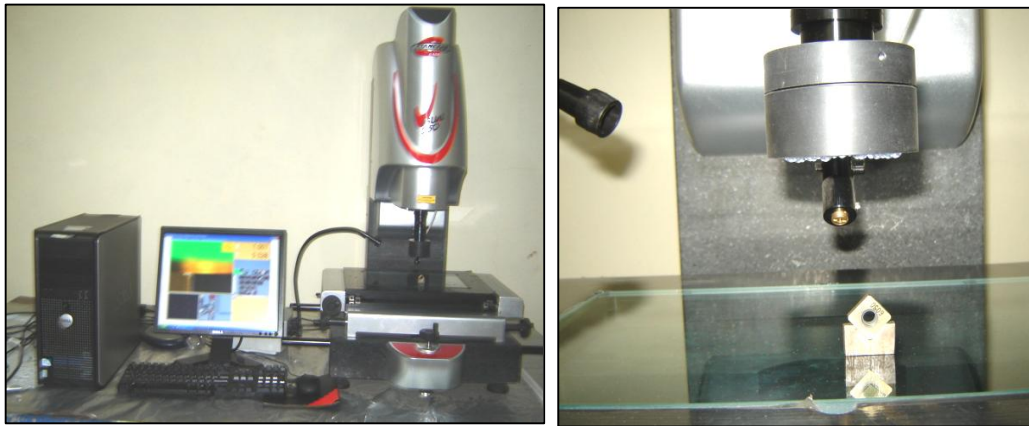
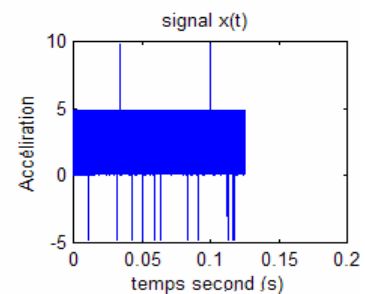


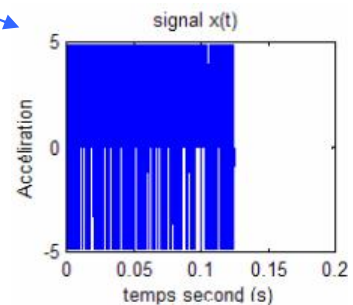
Figure II.9 : Mesure de l'usure avec logiciel

II.2.7 Enregistrement des effets des vibrations

Un analyseur de vibration type **BK2035** figure II.10, permet d'enregistrer les effets de vibration dans les deux directions de la force de coupe principale et la force de coupe radiale. Les vibrations ont été mesurées à l'aide de deux accéléromètres fixés sur le support de l'outil et les paramètres employés pour faire la corrélation avec les paramètres de rugosité liés à la hauteur des profils (Ra et Rt) étaient l'accélération des signaux. Ces signaux sont extrapolés par un programme en **MATLAB**.



$$V_z \text{ à } \begin{cases} V_c = 180 \text{ tr/min} \\ f = 0.08 \text{ mm/tr} \\ ap = 0.15 \text{ mm} \end{cases}$$



$$V_y \text{ à } \begin{cases} V_c = 180 \text{ tr/min} \\ f = 0.08 \text{ mm/tr} \\ ap = 0.15 \text{ mm} \end{cases}$$

Figure II.10 : Analyseur de vibration **BK2035** avec exemple d'acquisition des effets de vibration à $V_c = 180\text{m/min}$, $f = 0.08\text{mm/tr}$ et $ap = 0.15 \text{ mm}$.

II.3 PROCEDURES D'ESSAIS

II.3.1. Eléments considérés lors des essais

La technique du tournage dur étant récente et la connaissance du comportement du procédé et encore limitée, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous nous sommes limités à un ensemble de point à explorer:

Paramètres testés :

- vitesse de coupe,
- vitesse d'avance,
- profondeur de passe,
- plaquettes (géométrie, revêtement).

Résultats à observer:

- rugosité des surfaces usinées,
- effort de coupe,
- vibration de l'outil,
- usure des plaquettes,

Le but du travail consiste à établir et à quantifier les modes d'évolution de ces résultats en fonction de l'ensemble des paramètres recensés.

II.3.2. Méthodologie d'essais

Le matériau des éprouvettes utilisées durant ces essais est un acier faiblement allié (§ II.2.2). Les éprouvettes ont été prises en mors doux épaulés figure II (1 et 2). Les deux faces ont été dressées et un chariotage extérieur a été effectué pour éliminer la couche superficielle de la pièce.

Les essais ont été menés avec les plus grandes précautions. La démarche générale des essais est la suivante :

- mise en position de l'éprouvette sur le tour,
- réglage de l'avance, de la profondeur de passe et choix de la plage de vitesse,
- acquisition à vide des efforts a été effectuée après une remise à zéro des amplificateurs de charge entre chaque mesure,
- usinage de l'éprouvette selon les conditions imposées par la compagnie d'essais avec des paramètres de coupe fixés,
- acquisition des efforts de coupe,
- mesure de la rugosité de surface,
- démontage de la plaquette,

- observation au microscope de la plaquette à la fin de la passe,
- traitement des données,
- analyse des résultats.

Lorsque nous voulons savoir l'action d'un ou de plusieurs facteurs $X_1, X_2, X_i, \dots, X_M$ sur un paramètre Y_j , nous nous servons, en pratique, des méthodes suivantes :

- Méthode uni factorielle
- Méthode des plans d'expériences

II.3.2.1 Méthode uni factorielle

A fin de déterminer l'action d'un seul facteur X_i sur un paramètre Y_j .

Il s'agit de déterminer une relation de type :

$$Y_j = f(X_i) \quad (\text{II.1})$$

Pour cela, nous varions le facteur X_i tout en maintenant tous les autres facteurs constants (Tableau II.3).

| N° | Facteurs | Paramètres |
|----|----------|------------|
| | | X_i |
| 1 | X_{i1} | Y_{j1} |
| 2 | X_{i2} | Y_{j2} |
| .. | .. | .. |
| N | X_{iN} | Y_{jN} |

Tableau II.3 : Réalisation d'essais d'après la méthode unifactorielle

L'objectif de la méthode unifactorielle est l'analyse comparative du comportement de la rugosité, efforts de coupe et l'usure en fonction des paramètres de coupe (V_c, f et ap). C'est pourquoi, nous avons opéré avec des plaquettes rigides de forme rhombique forme C (figure II.11) à fixation par trou central.

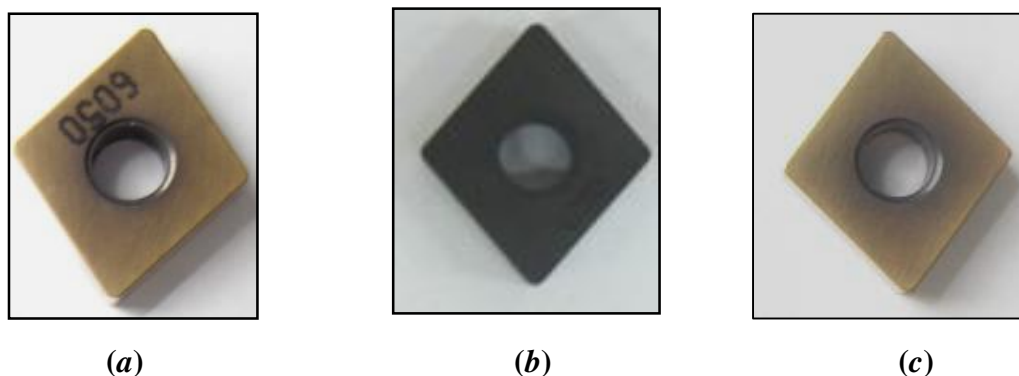


Figure II.11 : Vue d'ensemble des plaquettes céramiques CNGA 12 04 08
a) CC6050 revêtue, *b)* CC650 non revêtue, *c)* CC6050WHWiper

Toutes les informations relatives aux plaquettes de coupe sont regroupées dans le (tableau II.4) notée ci-dessous.

| Matériau de coupe | Désignation | Géométrie | Marque | Composition |
|-------------------|-------------|----------------------|---------|--|
| Céramique mixte | CC650 | CNGA 12 04 08 S01525 | Sandvik | 70% Al ₂ O ₃ + 30% TiC |
| Céramique revêtue | CC6050 | CNGA 12 04 08 S01525 | Sandvik | 70% Al ₂ O ₃ +30%TiC +TiN |
| Céramique Wiper | CC6050WH | CNGA 12 04 08 S01525 | Sandvik | 70% Al ₂ O ₃ +30%TiC + TiN |

Tableau II.4 : Informations relatives aux plaquettes utilisées

Le mode d'usinage en tournage est de type « chariotage ». Le choix du porte plaquette s'est orienté sur un porte outil de référence PCLNR 25×25M12 (figure II.12) dont les caractéristiques géométriques sont : $\chi_r = 95^\circ$, $\gamma = -5$, $\lambda = -4$



Figure II.12: porte outil

Nota : Le porte outil joue un double rôle :

- il permet de maintenir la plaquette en position rigide pendant l'usinage ;
- il oriente la plaquette dans l'espace. En effet, il contribue à la géométrie de coupe de l'outil. Dans ce cas, la plaquette ne comporte aucun angle de coupe ni angle de dépouille. Les angles de coupe et de dépouille sont ainsi directement dépendants de la position de l'outil dans l'espace donc du porte outil.

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les tableaux II.5 et II.6. Tous les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification.

| Les paramètres constants | Valeurs | Les paramètres variables | Valeurs |
|--------------------------|---------|--------------------------|------------------------------|
| V_c (m/min) | 110 | f (mm/tr) | 0.08, 0.12, 0.14, 0.16, 0.20 |
| ap (mm) | 0.2 | ap (mm) | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 |
| V_c (m/min) | 110 | | |
| f (mm/tr) | 0.08 | V_c (m/min) | 60, 80, 110, 160, |
| ap (mm) | 0.2 | | |
| f (mm/tr) | 0.08 | | |

Tableau II.5 : Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité

| Conditions de coupe | V_c (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) |
|---------------------|---------------|-------------|-----------|
| | 180 | 0.08 | 0.2 |

Tableau II.6 : Conditions de coupe pour les essais d'usure à la fin de la passe

II.3.2.2 Méthode des plans d'expériences

Dans cette partie, nous allons présenter les plans d'expériences, afin de montrer quelle peut être leur utilité et ce qu'ils peuvent apporter dans le domaine de la coupe. Nous présenterons ensuite les deux grandes catégories de plans qui existent et nous choisirons les plans que nous utiliserons lors de nos travaux. Nous verrons enfin, comment faire une étude multicritères avec la méthodologie des plans d'expériences.

II.3.2.2.1 Présentation des plans d'expériences

Les plans d'expériences sont issus des méthodes mathématiques et statistiques appliquées à l'expérimentation. Les premiers scientifiques à s'être posés le problème de l'organisation des essais sont des agronomes. Ils avaient, en effet, beaucoup de paramètres à étudier et n'avaient pas la possibilité de multiplier le nombre d'expériences. De plus, la durée des expériences constituait une contrainte supplémentaire forte. C'est Fisher, [102] et [103], qui, pour la première fois en 1925, proposa une méthode avec laquelle on étudiait plusieurs facteurs à la fois. Cette méthode fut reprise puis développée par des statisticiens et des mathématiciens qui définirent des tables d'expériences permettant de réduire considérablement le nombre d'expériences à effectuer sans diminuer la pertinence de la campagne d'essais. Les grandes entreprises se sont, ensuite, intéressées à cette méthodologie dans le cadre de l'approche qualité à la suite des travaux du Docteur Taguchi, [104]. Il a fortement contribué à l'expansion de l'utilisation des plans d'expériences au milieu industriel au Japon dans les années 1960. Au cours de ces dernières années, cette méthodologie, du fait de la pertinence des informations apportées, s'est développée dans la plupart des secteurs d'activités et surtout dans le domaine de la mécanique.

II.3.2.2.2 Plan d'expérience

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc

de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats.

Une propriété peut toujours être décrite par une expression mathématique : [105] telle que :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (\text{II.2})$$

avec :

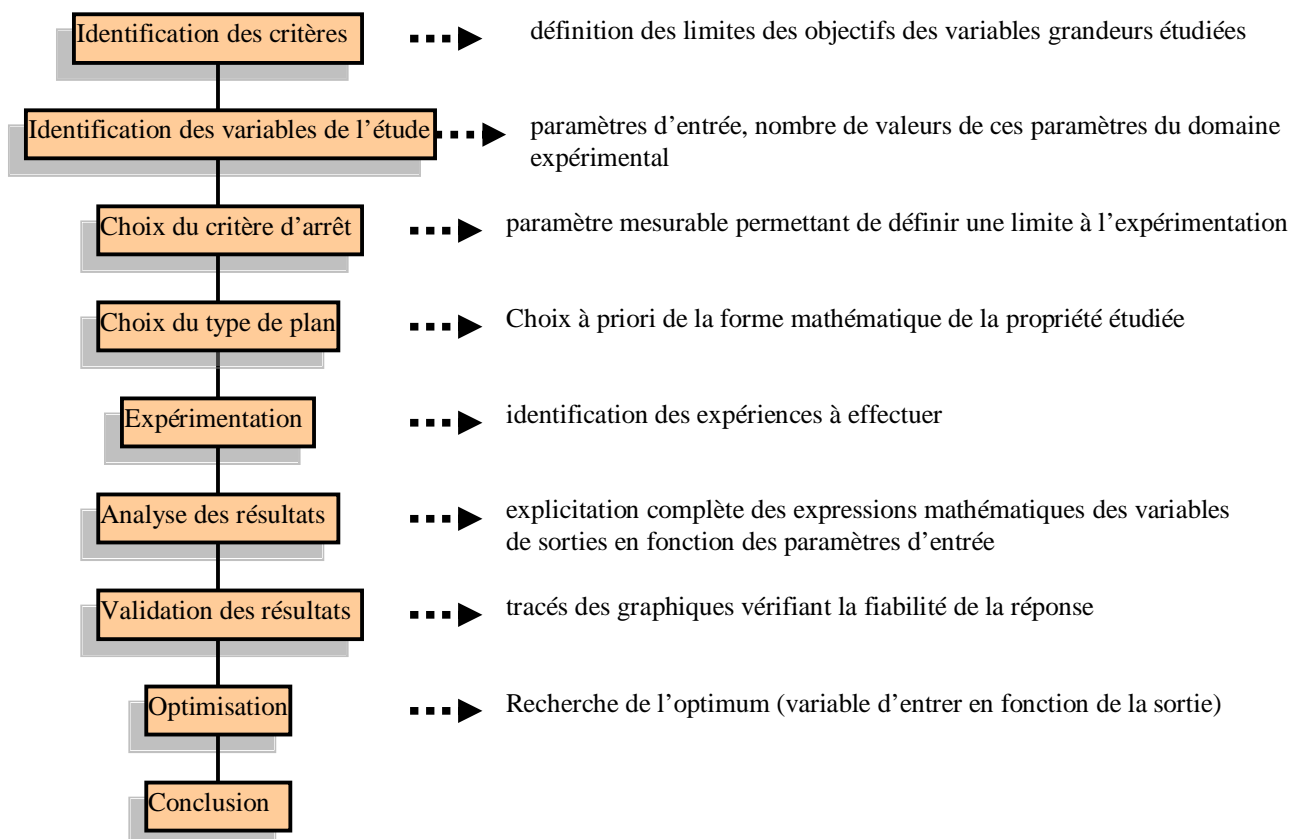
- Y grandeur (ici appelé **variable de sortie**) qui « exprime » la propriété à laquelle s'intéresse l'expérimentateur
- X_i variable (ici appelé **paramètre d'entrée**) choisie par l'expérimentateur qui en maîtrise les valeurs et dont il peut rechercher les corrélations avec ses homologues X_j .

Les plans d'expériences permettent de déterminer les coefficients des différents paramètres de cette forme analytique d'une propriété (parfois d'un phénomène), en la validant par les outils statistiques sur lesquels est fondée la méthode.

Pour parvenir à cette forme mathématique, selon le type de plan, on peut par exemple partir :

- d'une matrice d'expérience (planification Taguchi [104]) pour l'expérimentation,
- d'une étude de la variance pour l'analyse statistique (test de Fisher [103]) permettant de définir les effets et les interactions entre les paramètres d'entrées par l'intermédiaire des coefficients de ces derniers.

La mise en place d'un plan d'expérience demande donc de suivre le processus d'élaboration suivant :



La forme mathématique recherchée pour décrire les variables de sortie influe sur le type de plan à adopter, donc sur le nombre et la répartition des expériences à effectuer. A ce stade, on distingue plusieurs familles types de plans d'expériences. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers [106] :

- les plans factoriels complets à 3 niveaux « $3k$ », qui permettent d'étudier toutes les combinaisons des différents paramètres et ainsi de déterminer les facteurs prépondérants.
- les plans factoriels fractionnaires à deux niveaux « $2k-p$ » qui permettent d'étudier les effets d'un paramètre indépendamment des autres.
- les plans de second degré (plans composites, plans hybrides ou quadratiques) qui permettent d'étudier les effets d'un paramètre indépendamment des autres avec une modélisation des variables de sortie de type polynomiale ou quadratique.

Nous nous limiterons ici à décrire et justifier le plan adopté, en fonction des contraintes de notre étude.

II.3.2.2.3 Choix du type de plan

Les types des plans choisis sont donc : (le plan de Taguchi et le plan factoriel complet), son intérêt dans le cadre de notre étude est de pouvoir :

- dans un premier temps, faire une recherche de corrélation entre les différents paramètres par l'intermédiaire d'un plan de 18 essais afin de caractériser leur influence par un modèle linéaire en minimisant le nombre d'essai
- dans un second temps, évoluer vers un plan factoriel complet de 27 essais permettant de caractériser les influences des paramètres par un modèle quadratique.

Notre choix c'est avéré, pour la plupart de l'étude, vers les plans factoriels complets ce sont les plus utilisés car les plus simples et les rapides à mettre en œuvre.

Comme tout plan d'expérience, le plan adopté implique le choix des **paramètres d'entrée** et l'identification des **variables de sortie**.

Les paramètres d'entrée sont ceux qui changent suivant les essais. Leur nombre définit le nombre total d'essais du plan d'expérience. Les variables de sortie constituent l'ensemble des réponses.

Dans cette étude, la table orthogonale standard $L_{27} (3^{13})$ de Taguchi [107] est adoptée comme plan expérimentale tableau II (9, 10). Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau II (7, 8):

| Niveau | Vitesse de coupe V_c (m/min) | Avance f (mm/tr) | Profondeur de coupe ap (mm) | Rayon de bec de l'outil r (mm) | L'angle de direction principale χ (degré) |
|--------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|
| 1 | 100 | 0.08 | 0.1 | 0.8 | 75° |
| 2 | 150 | 0.12 | 0.2 | 1.2 | 45° |
| 3 | 200 | 0.16 | 0.3 | 1.6 | |

Tableau II.7 : paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 18 essais

| Niveau | Vitesse de coupe V_c (m/min) | Avance f (mm/tr) | Profondeur de coupe ap (mm) |
|--------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 1 | 90 | 0.08 | 0.15 |
| 2 | 120 | 0.12 | 0.30 |
| 3 | 180 | 0.16 | 0.45 |

Tableau II.8 : paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 27 essais

| $L_{27}(3^{13})$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 7 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 8 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 12 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 13 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 |
| 14 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 17 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 |
| 18 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 19 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 20 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 21 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 22 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 |
| 23 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 |
| 24 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 |
| 25 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 26 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 27 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 |

Tableau II.9 : Plan d'expérience : table orthogonale de Taguchi pour un plan de 27 [107]

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 |

Tableau II.10 : Plan d'expérience de Taguchi pour un plan de 18

• **L'objectif de ces deux matrices**

- Dans un 1^{er} temps, une étude comparative du comportement de la rugosité arithmétique (Ra) et les composantes de l'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction des paramètres de coupe (Vc , f et ap). L'usinage a été réalisé par deux céramiques citées ci-dessous :

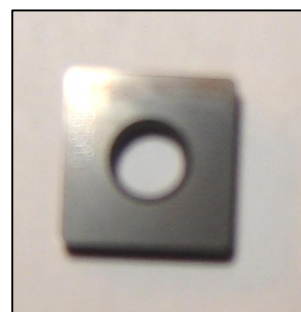
- La céramique CC650 sans revêtement.
- La céramique CC6050 avec revêtement PVD.

C'est pourquoi, il a été choisi une forme d'outil porte plaquette fixe et adapté aux conditions de tournage [figure II.14 (a)] ayant la géométrie suivante : $\chi_r = 75^\circ$, $\gamma = -6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$

Les plaquettes de coupe (figure II.13) choisies sont réversibles, de marque Sandvik comportant 8 arêtes de coupe par plaquette. Leurs informations sont répertoriées dans le (tableau II.11).



(a)



(b)

Figure II.13: Plaquettes céramiques SNGA 12 04 08 : **a)** céramique revêtue CC6050, **b)** céramique non revêtue CC650

| Plaquette de | Désignation | Géométrie | Marque | Composition |
|-------------------|-------------|----------------------|---------|--|
| Céramique Mixte | CC650 | SNGA 12 04 08 T01020 | Sandvik | 70% Al ₂ O ₃ + 30% TiC |
| Céramique revêtue | CC6050 | SNGA 12 04 08 T01020 | Sandvik | 70% Al ₂ O ₃ + 30% TiC+TiN |

Tableau II.11 : Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées

- Dans un 2^{ème} temps, un plan de Taguchi (18 essais) permettant l'étude de l'impact de la géométrie de l'outil (χ , r) et les paramètres de coupe (V_c , f et ap) sur les différentes réponses (rugosité, efforts de coupe). C'est pourquoi, on a choisi deux géométries d'outils porte plaquettes figure II. 14 (a et b) et qui ont les désignations suivantes.

a) SDNN 25×25 M12 ayant la géométrie suivante:

$$\chi_r = 75^\circ, \quad \gamma = -6^\circ, \quad \lambda = -6^\circ$$

b) PSBNR 25×25 M12 matérialiser par la géométrie suivante:

$$\chi_r = 45^\circ, \quad \gamma = -6^\circ, \quad \lambda = -6^\circ$$

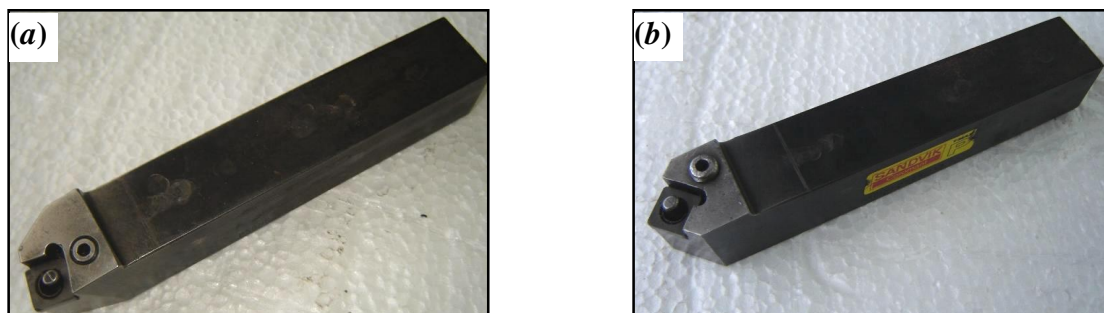


Figure II.14 : Outils utilisés a) SDNN 25×25 M12 et b) PSBNR 25×25 M12

Les plaquettes de coupe choisies sont réversibles, de forme carrée de marque Sandvik comportant 8 arêtes de coupe par plaquette (figure II. 15).

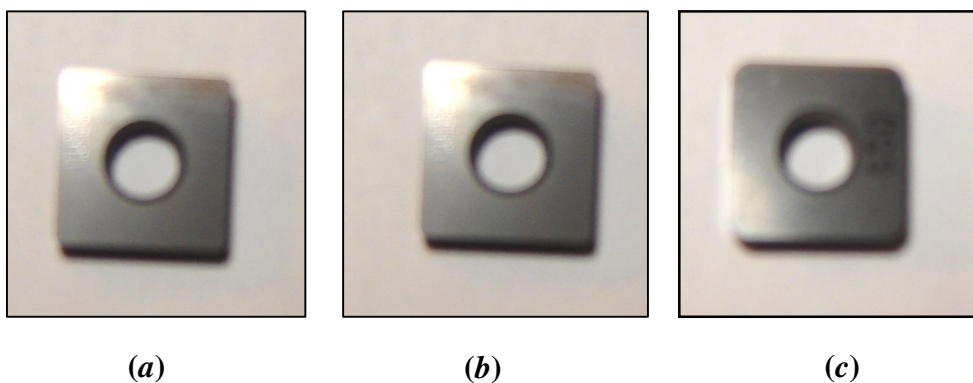


Figure II.15 : Plaquettes céramiques utilisées, SNGA 12 04 08 (sans revêtement) à différents rayons de bec a) $r = 0.8$ mm, b) $r = 1.2$ mm et c) $r = 1.6$ mm

Les informations relatives aux plaquettes de coupe (figures II.14) sont répertoriées dans le (tableau II.12).

| Plaquette de coupe | Désignation | Géométrie | Marque | Composition |
|--------------------|-------------|--------------------------|---------|--|
| Céramique Mixte | CC650 | a) SNGA 12 04 08 T 01020 | Sandvik | 70% Al ₂ O ₃ + 30% TiC |
| | | b) SNGA 12 04 12 T 01020 | | |
| | | c) SNGA 12 04 16 T 01020 | | |

Tableau II.12: Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées

- Dans un 3^{ème} temps, un plan factoriel complet de 27 essais permettant de mettre la corrélation entre les effets des vibrations (accélérations des signaux) dans la direction de la force de coupe radiale et tangentielle (V_y et V_z) et les paramètres de coupe (V_c , f et ap) sur les paramètres de la rugosité liés à la hauteur du profil (R_a et R_t). C'est pourquoi, on a choisi une forme d'outil porte plaquette fixe et adapté aux conditions de tournage figure II.14 (a). Les informations relatives à la plaquette de coupe utilisée sont répertoriées dans la [figure II.15 (a) et le tableau II.12 (a)].

II.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos travaux. Les caractéristiques des matériaux de coupe, la composition chimique du matériau usiné, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désigné. Dans le chapitre III qui suit, nous présentons les résultats de l'évolution des efforts de coupe, rugosité de surface et l'usure à la fin de la passe en fonction des paramètres de coupe et cela pour différentes nuances de plaquettes céramiques.

CHAPITRE III

Etude comparative des performances des céramiques

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous avons effectué des essais de performance sur l'acier AISI 4140, traité à 57 HRC, usiné à sec par les matériaux de coupe (forme rhombique) suivants: la céramique CC6050, la céramique revêtue Wiper CC6050WH et la céramique mixte sans revêtement CC650 (figure II.9 et tableau II.5). Les écarts de performance ont été étudiés suivant les paramètres technologiques (efforts de coupe, rugosité des surfaces usinées et l'usure de l'outil) en fonction des différentes conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et la profondeur de coupe). Les résultats obtenus permettent de définir les performances des matériaux de coupe utilisés et les conditions de coupe adéquates pour optimiser le processus de coupe relatif à cet acier. Nous avons aussi étudié dans ce chapitre l'évolution de l'effort spécifique de coupe, appelé aussi pression de coupe. Cette grandeur est définie comme étant l'effort de coupe ramené à la section du copeau non déformé. L'étude de la pression de coupe sur la pointe de l'outil permettra de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant utilisé dans la matière retenue. Cette démarche inspirée du concept industriel de couple outil matière [108, 109 et 110], dans le quel on ne conçoit pas séparément l'outil et la matière pour adopter des conditions de coupe.

III.2. DÉTERMINATION DE LA PRESSION SPÉCIFIQUE

Les valeurs des efforts de coupe K_c extraites des mesures de puissances sont définies comme suit:

P_c : puissance consommée par la coupe,

P_t : puissance totale consommée par la coupe,

P_v : puissance à vide de la machine avant le départ du cycle d'usinage.

$$P_c = P_t - P_v = F_c \times V_c + F_f \times V_f + F_p \times V_p \quad (\text{III.1})$$

Et comme on est en chariotage $V_p = 0$,

et comme $V_f \ll V_c$:

le terme $E_f \cdot V_f$ devient négligeable devant $F_c \times V_c$.

Quand aux formules :

$$P_c = F_c \times V_c = K_{c_{\text{puissance}}} \times f \times a_p \Rightarrow K_{c_{\text{puissance}}} = \frac{P_c}{f \times a_p} = \frac{60 \times (I_u - I_v) \times U_v}{V_c \times f \times a_p} \quad (\text{III.2})$$

Donc :

$$F_c = K_{c_{force}} \times f \times ap \Rightarrow K_{c_{force}} = \frac{F_c}{f \times ap} \quad (\text{III.3})$$

III.3. DÉTERMINATION DU DOMAINE DE VALIDITÉ

Cette recherche est effectuée en étudiant l'évolution de la pression de coupe en fonction des trois paramètres principaux de coupe qui sont la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de coupe (ap) l'étude des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de coupe est faite en parallèle.

a) Pression de coupe

L'objectif de cette expérimentation est, avant tout, de rechercher la limite basse de la vitesse de coupe afin de poursuivre les essais ultérieurs dans une plage de vitesse de coupe adaptée. Comme points de départ, il est nécessaire de choisir une profondeur de coupe et une avance bien connues, dans notre cas ($ap = 0.2$ et $f = 0.08$ mm/tr) qui permettent un usinage correct de la pièce (bon état de surface, pas d'usure brutale et bonne forme de copeau). Par la suite, une série d'essais couvre une large gamme de vitesse à choisir. Les figures III.1 (*a*, *b* et *c*) présentent respectivement l'évolution des pressions de coupe (K_a , K_r et K_t) en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.2$ mm. Les essais sont réalisés par les matériaux de coupe suivants, à savoir la céramique non revêtue (CC650), la céramique revêtue (CC6050) et la céramique Wiper (CC6050WH). La vitesse de coupe est le paramètre qui contrôle majoritairement l'énergie fournie au système et qui endommage l'outil de coupe. Le bon contrôle de cette plage de vitesse de coupe permet donc une meilleure maîtrise de processus de coupe. La figure III.1a montre la variation des pressions spécifiques axiales (K_a) en fonction de la vitesse de coupe (V_c) pour les trois nuances testées. Il ressort que l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution et puis une stabilisation des pressions de coupe. A cet effet, on distingue deux périodes d'évolution différentes.

- La première période (zone I) [$V_c = 60$ à 90] m/min est caractérisée par une diminution importante de la pression spécifique qui correspond à un chargement important de l'arête de coupe. Les pressions enregistrées dans cette zone (I) sont élevées. A titre d'exemple, à $V_c = 60$ m/min, on enregistre une pression (K_a) de (2960.62, 3826.87 et 2455) MPa respectivement aux différentes nuances de coupe (CC650, CC6050 et CC6050WH). La fin de cette période (zone I) conduit à la détermination de la vitesse minimale ($V_{c_{min}}$) du domaine d'utilisation du couple - outil- matière.
- La deuxième période (zone II) [$V_c = 90$ à 180] m/min est caractérisée par une plage où la pression de coupe K_a se stabilise un peu. En pratique, cette zone constitue la plage optimale d'utilisation de l'arête de coupe, qui se termine par la détermination de la vitesse de coupe maximale. A $V_c = 180$ m/min, la pression spécifique est à son bas niveau pour toutes les plaquettes, ce qui est préférable à l'outil. On enregistre une pression de 1961.25 MPa pour la

céramique non revêtue CC650, et de 3403,75 MPa pour la céramique revêtue CC6050 et de 1889,37 MPa pour la céramique Wiper CC6050WH. Cela a pour effet de minimiser les contraintes qui provoquent la rupture brusque de l'arête de coupe. Mais à ce stade, il faut faire un compromis entre les pressions basses à grande vitesse de coupe et aussi l'usure de l'outil aux vitesses de coupe élevées.

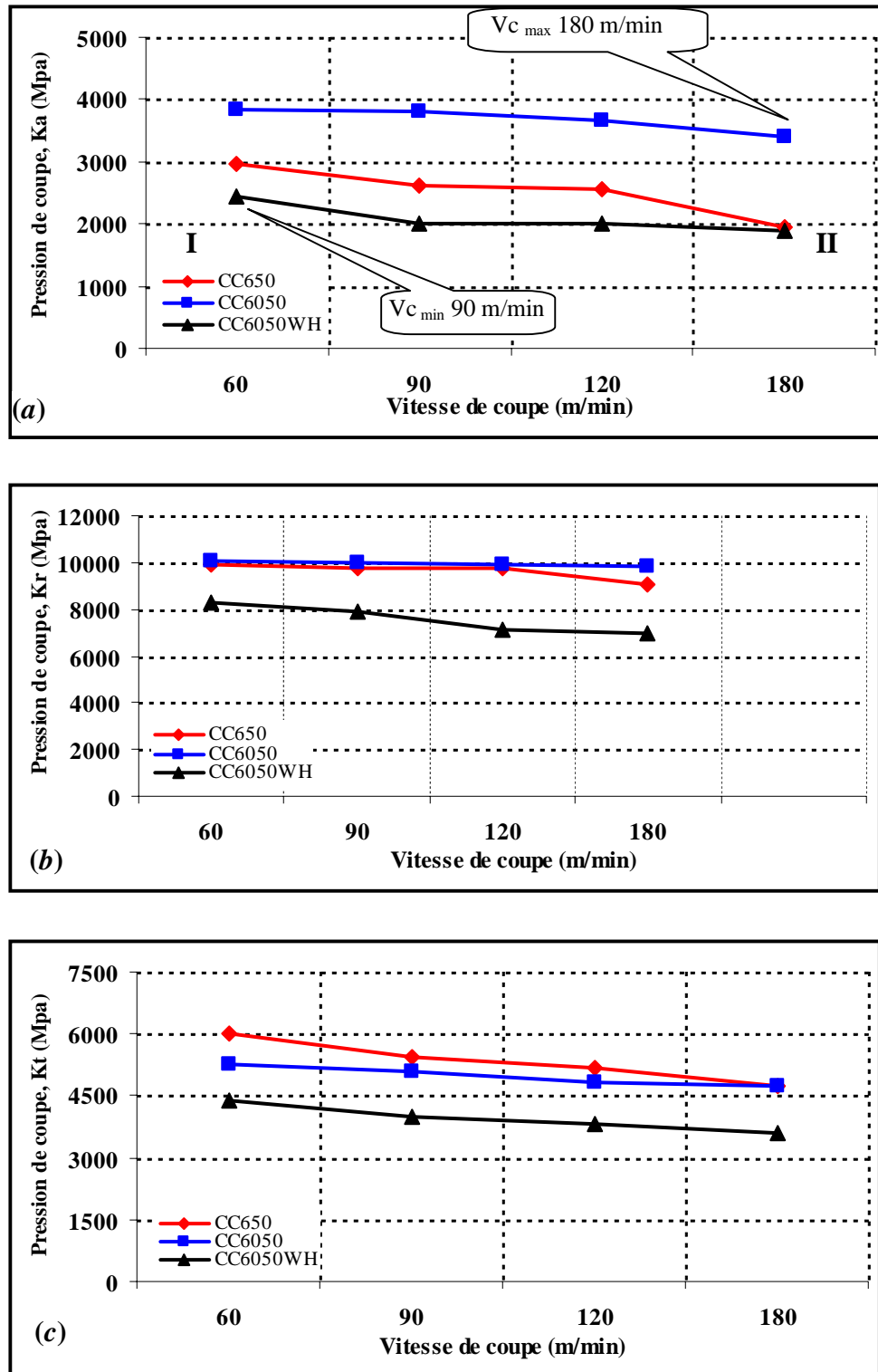


Figure III.1: Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0.08$ mm/tr, $ap = 0.2$ mm pour les outils : CC650, CC6050 et CC6050WH

Les vitesses de coupe acceptables ainsi obtenues pour chaque couple outil/matière sont rassemblées dans le tableau III. I.

| Plaquette / Matière | AISI 4140 |
|---------------------|----------------------|
| Non revêtue CC650 | 90 m/min / 180 m/min |
| Revêtu CC6050 | 90 m/min / 180 m/min |
| Wiper CC6050WH | 90 m/min / 180 m/min |

Tableau III.I: Valeurs des vitesses de coupe optimales en fonction des outils testés et de la matière usinée

En vérifiant la possibilité d'usiner le matériau dans ces conditions, on a constaté qu'il était possible de garder les mêmes vitesses de coupe pour un même matériau quelque soit la géométrie du matériau de coupe utilisé.

b) Avances de l'outil de coupe

Comme nous l'avons déjà annoncé, cette étude se situe dans le cadre de l'usinage dur (sec), ce qui impose de limiter les vitesses d'avance de l'outil. En effet, dans le cas d'un usinage de finition, le critère d'état de surface est primordial industriellement. Nous savons que la rugosité Ra peut se déterminer en fonction de la géométrie de l'outil, de l'avance et de la profondeur de coupe, conformément au schéma de la figure III.2.

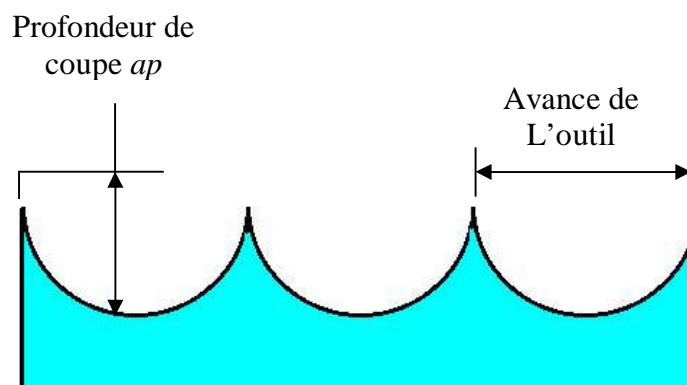


Figure III.2: Lien entre état de surface, avance de l'outil et profondeur de coupe

Afin d'avoir un état de surface acceptable et de ne pas dégrader le paramètre (Ra), il est nécessaire d'avoir une avance minimale. Cependant, il est aussi important de tenir compte d'une vitesse minimum d'avance exigée par la formation d'un copeau d'épaisseur suffisante non nulle. Afin de situer, autant que possible, ces essais dans des conditions optimales, les valeurs d'avances suivantes ont été retenues tableau III.2 :

| Plaquette / Matière | AISI 4140 |
|---------------------|-------------------------|
| Non revêtue CC650 | 0.08 mm/tr - 0.16 mm/tr |
| Revêtu CC6050 | 0.08 mm/tr - 0.16 mm/tr |
| Wiper CC6050WH | 0.08 mm/tr - 0.16 mm/tr |

Tableau III.2: Valeurs d'avance (f) en fonction des outils testés et de la matière usinée

En vérifiant la possibilité d'usiner le matériau dans ces conditions, on a constaté qu'il était possible de garder les mêmes avances par tour pour un même matériau quelque soit la géométrie du matériau de coupe utilisé.

c) Profondeur de coupe

A fin de préserver le critère d'état de surface primordial, dans les conditions d'usinage dur (sec), on se doit de limiter aussi les profondeurs de coupe et de respecter la condition $ap < rp$ (rayon imposé de la plaquette) selon le schéma de la figure III.3.

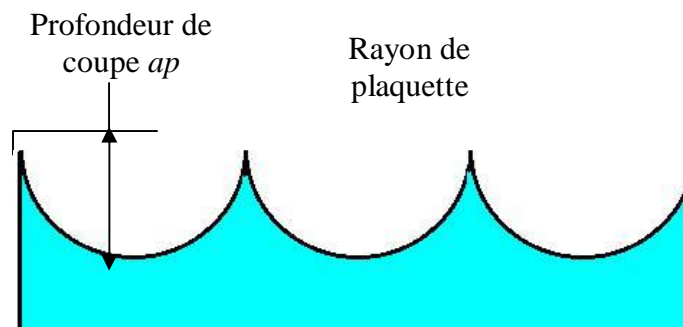


Figure III.3: Lien entre état de surface et profondeur de coupe

Dans notre cas, les plaquettes CNMA 12 04 08 ont un rayon de 0.8 mm, ce qui impose de limiter la profondeur de coupe à 0.8 mm. Donc les valeurs de la profondeur de coupe ont été retenues tableau III.3.

| Plaquette / Matière | AISI 4140 |
|---------------------|------------------------|
| Non revêtue CC650 | 0.1 mm/tr - 0.45 mm/tr |
| Revêtu CC6050 | 0.1 mm/tr - 0.45 mm/tr |
| Wiper CC6050WH | 0.1 mm/tr - 0.45 mm/tr |

Tableau III.3: Valeurs de profondeur de coupe ap en fonction des outils testés et de la matière usinée

Comme on peut le constater, il est possible de garder les mêmes valeurs de profondeur de coupe pour un même matériau quelque soit la géométrie du matériau à outil utilisé.

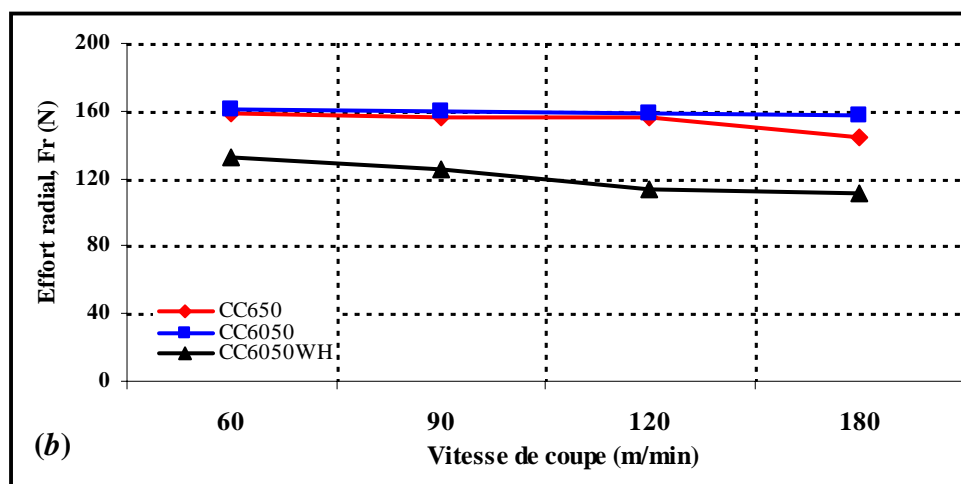
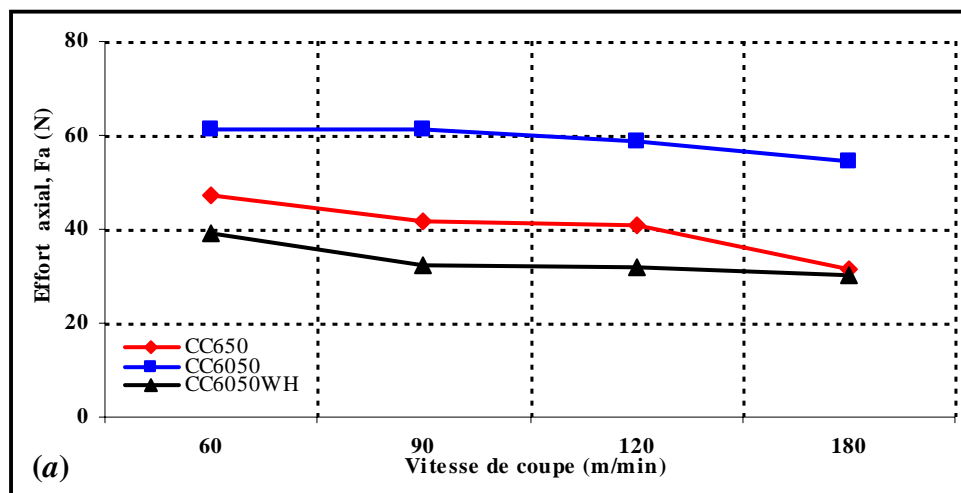
Nota :

L'ensemble de ces règles a été respecté pour déterminer les vitesses de coupe, les avances et les profondeurs de coupe des plans d'expériences.

III.4. EVOLUTION DES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES PARAMÈTRES DU RÉGIME DE COUPE

III.4.1. Effet de la vitesse de coupe

La figure III.4 (a, b et c) illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les trois matériaux de coupe testés (CC650, CC6050 et CC6050WH) à $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.2$ mm. Les résultats présentés dans la figure III.4a montrent qu'une augmentation de la vitesse de coupe conduit généralement à une diminution des composantes de l'effort 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 diminuent [111, 112 et 113].



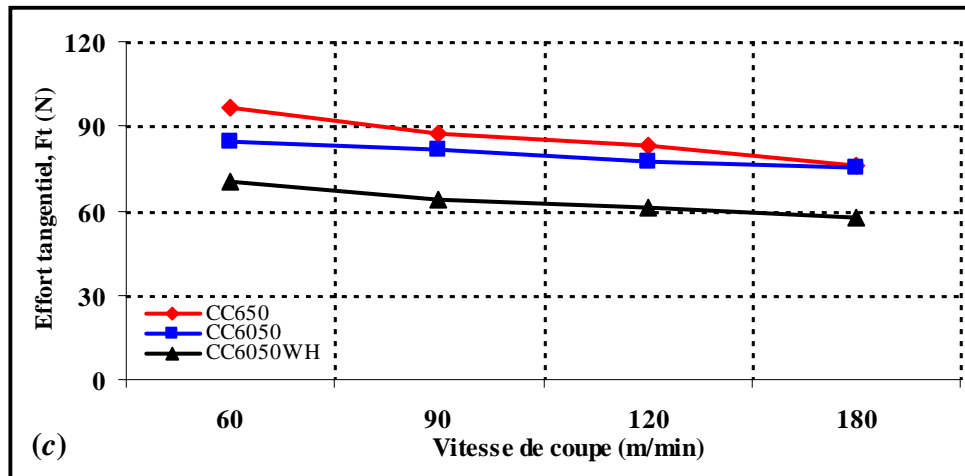
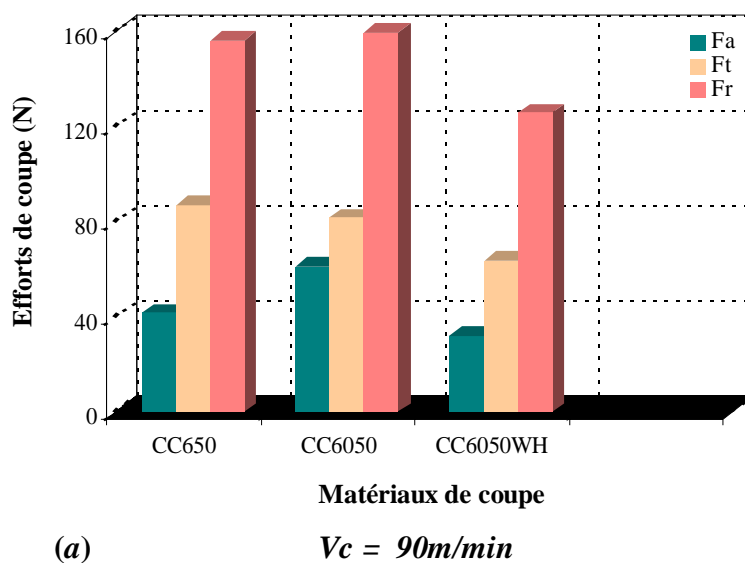


Figure III.4: Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0.08$ mm/tr, $ap = 0.2$ mm pour les outils : CC650, CC6050 et CC6050WH

L'analyse des résultats montre que la céramique revêtue (CC6050) engendre des efforts plus élevés suivi par la céramique non revêtue (CC650) et en dernier lieu la céramique wiper (CC6050WH).

La figure III.5 (a et b), illustrent la différence des efforts de coupe pour les trois matériaux de coupe testés. L'analyse des résultats montre que la céramique revêtue (CC6050) et la céramique non (CC650) pour les valeurs des vitesses de coupe de (90 et 180) m/min engendre un effort radial (Fr) plus élevée par rapport à la céramique Wiper (CC6050WH).



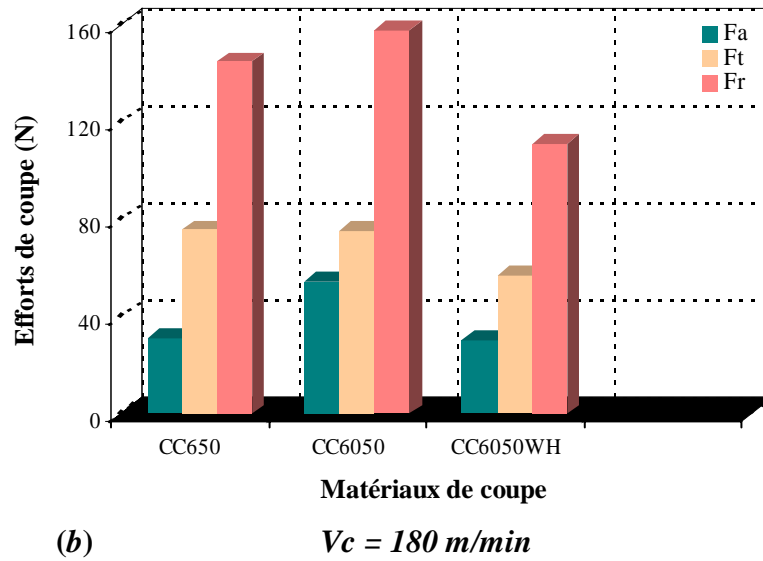
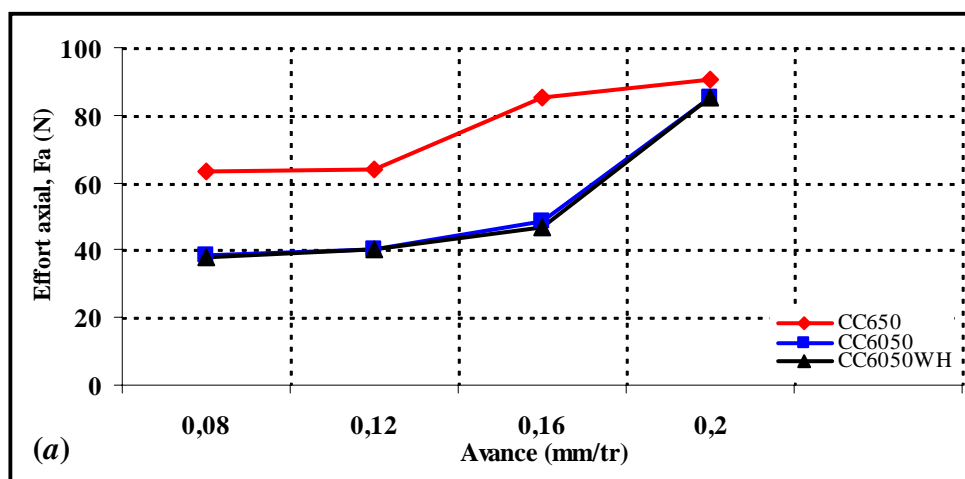


Figure III.5 : Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés à $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$ pour les outils : CC650, CC6050 et CC6050WH

III.4.2. Effet de l'avance

La figure III.6 (a, b et c), présentent l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction de l'avance par tour pour les matériaux de coupe testés suivants: la céramique non revêtue (CC650), la céramique revêtue (CC6050) et la céramique Wiper (CC6050WH) à $V_c = 120 \text{ m/min}$ et $a_p = 0.2 \text{ mm}$. On remarque que toutes les courbes prennent une allure ascendante ce qui signifie qu'avec l'augmentation de l'avance la section du copeau cisailé accroît, d'où le métal résiste plus à la rupture et nécessite des efforts plus grands pour l'enlèvement du copeau. Pour une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.20 mm/tr, on enregistre une élévation de (47.80, 122.93 et 126.76) % de l'effort axial, (52.42, 55.16 et 50.17) % de l'effort radial, (182.21, 131.87 et 96.40) % de l'effort tangentiel, respectivement aux différents matériaux de coupe (CC650, CC6050 et CC6050WH).



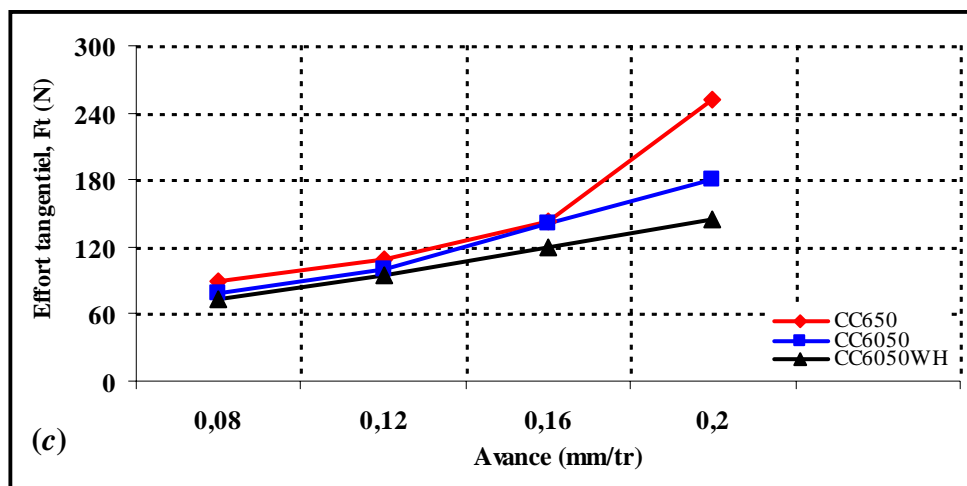
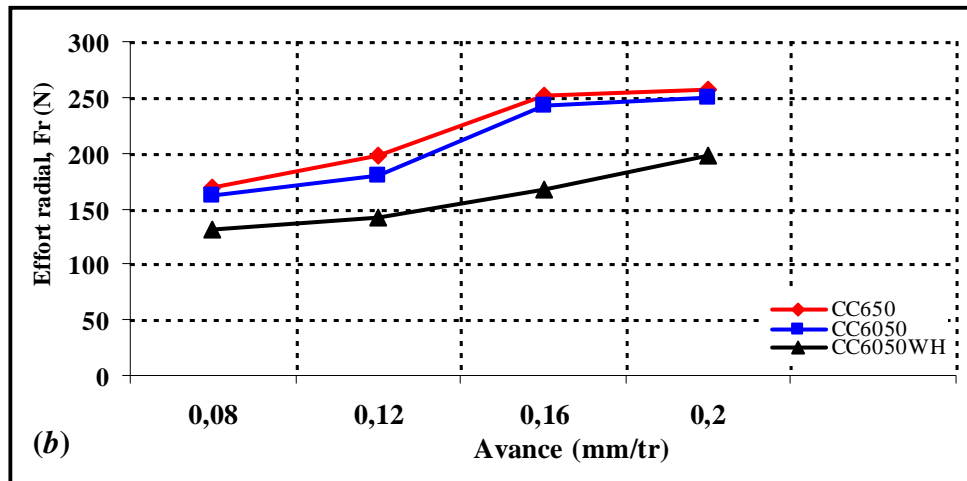


Figure III.6: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance à $V_c = 120$ m/min, $ap = 0.2$ mm pour les outils : CC650, CC6050 et CC6050WH

III.4.3. Effet de la profondeur de coupe

Les résultats présentés dans la figure III.7 (a, b et c), qui correspondent à chaque nuance de coupe, montrent la variation des efforts de coupe en fonction de la profondeur de coupe pour les outils de coupe suivants: la céramique non revêtue (CC650), la céramique revêtue (CC6050) et la céramique wiper (CC6050WH) à $f = 0.08$ mm/tr et $V_c = 120$ m/min. Avec l'augmentation de cette dernière, l'épaisseur du copeau devient très importante ce qui conduit à une augmentation du volume de métal à déformer et cela nécessite des efforts de coupe importants pour l'enlèvement du copeau. Pour une augmentation de la profondeur de coupe de (0.1 à 0.4) mm, on a enregistré un taux d'élévation pour les trois composantes (F_a , F_r et F_t) respectivement de (343.99, 108.24, 195.45) % pour la céramique non revêtue (CC650),

(348.59, 91.53, 253.72) % pour la céramique revêtue (CC6050WH) et de (245.47, 122.67, 1315.39) % pour la céramique Wiper CC6050WH.

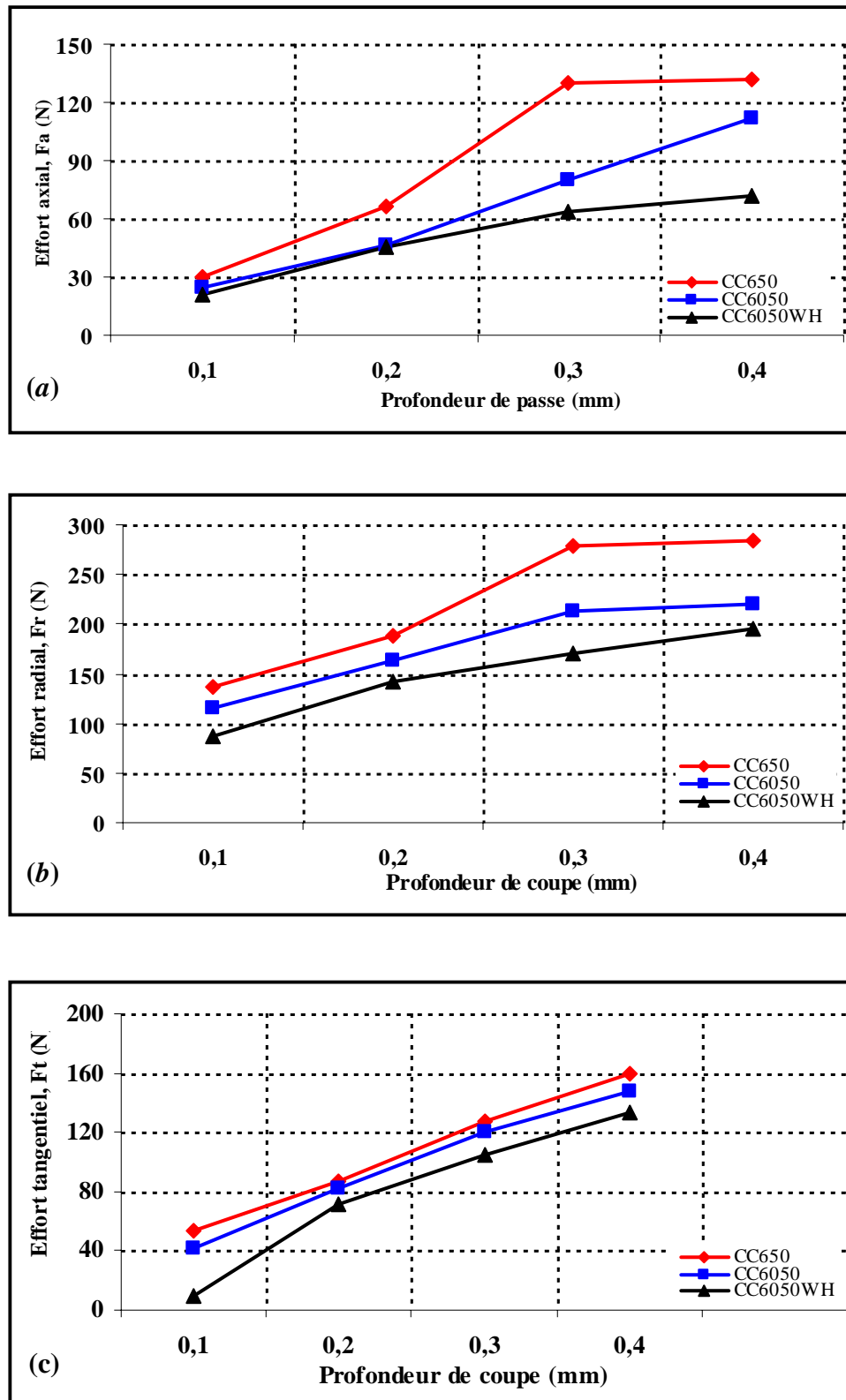


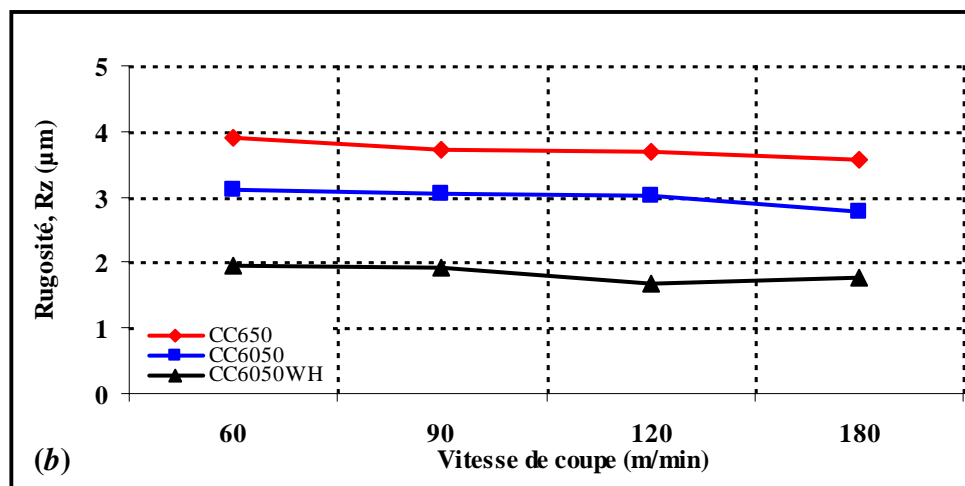
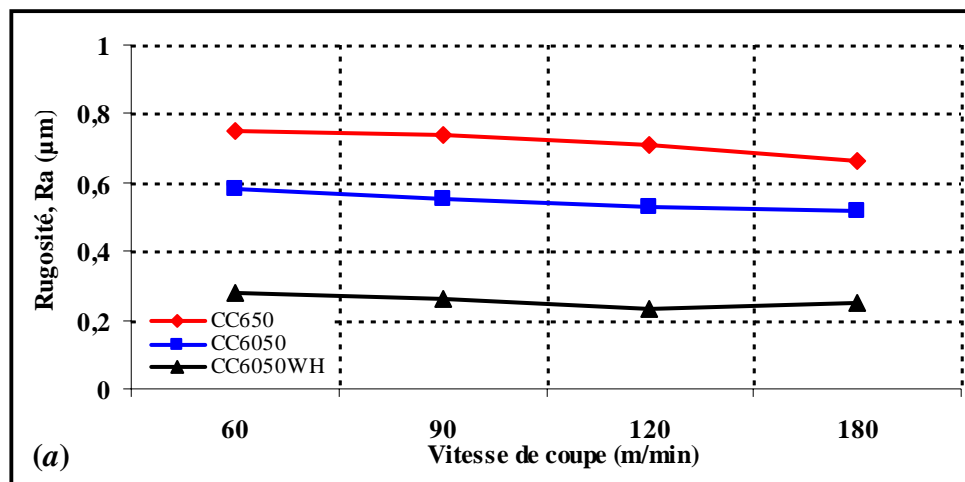
Figure III.7: Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de coupe : à $V_c = 120$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr pour les outils : CC650, CC6050 et CC6050WH

III.5. EVOLUTION DE LA RUGOSITÉ EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE

A la fin de chaque essai, des mesures de rugosité ont été réalisées sur les surfaces usinées a fin d'analyser l'effet de la variation des conditions de coupe (V_c , f et ap). Les mesures sont effectuées à l'aide d'un rugosimètre « Surftest 201 Mitutoyo » (figure II.8).

III.5.1. Effet de la vitesse de coupe

La caractérisation de la qualité de la surface usinée a été limitée aux critères de la rugosité liées à la hauteur du profiles: écart arithmétique moyen (R_a), écart total de la rugosité (R_t), et la hauteur moyenne de profil (R_z). La figure III.8 (a, b et c), illustre l'influence de la vitesse de coupe sur les différents critères de la rugosité lors de l'usinage dur de l'acier AISI 4140. L'analyse des résultats montre que pendant l'usinage, la rugosité de l'acier trempé (57 HRC) diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et cela pour les trois nuances de céramique testées (CC650, CC6050 et CC6050WH).



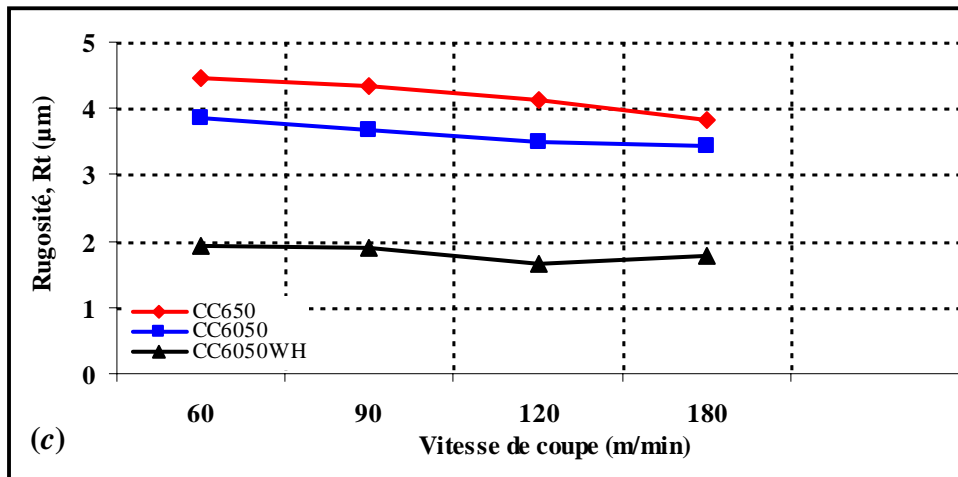


Figure III.8 : Evolution des rugosités en fonction de la vitesse de coupe à $f = 0.08$ mm/tr, $a_p = 0.2$ mm pour les outils: CC650, CC6050 et CC6050WH

Cette diminution est due aux bonnes conditions de frottement aux interfaces pièce-outil-copeau. Le métal usiné est peu ductile (acier trempé) et les vitesses de coupe choisies sont élevées, ce qui ne favorise pas la formation de l'arête rapportée ou copeau adhérent. Donc nous n'avons pas de dégradation de l'état de surface par l'adhésion de particules ou fragments du copeau sur la surface usinée par exemple.

La figure III.9 (a et b), montre la différence enregistrée entre les rugosités obtenues lors de l'usinage de l'acier trempé AISI 4140 avec la céramique non revêtue (CC650), la céramique revêtue (CC6050) et la céramique Wiper (CC6050WH) à différentes vitesses de coupe. L'analyse des résultats montre que l'augmentation de la vitesse de coupe améliore légèrement la rugosité. En comparant les valeurs des rugosités obtenues par les trois matériaux de coupe testés, on remarque clairement que la céramique Wiper (CC6050WH) donne des qualités de surface meilleures et cela pour toutes les vitesses de coupe testées (faibles et élevées) suivie par la céramique revêtue (CC6050) et en dernier lieu la céramique non revêtue (CC650). Ceci est justifié par la présence du revêtement qui modifie les conditions de coupe et facilite l'évacuation des copeaux de la zone de coupe et cela de manière très importante comme nous l'avons vu aux essais réalisés par la céramique revêtue (CC6050) (Figure I.2, § I.2) et la céramique Wiper (CC6050WH) (Figure I.11, § I.7). La contribution se manifeste aussi dans la modification des échanges thermiques au sein du système outil – pièce – copeau, pendant l'usinage. La barrière de conduction thermique des céramiques déposées sur les outils préserve ces derniers en diminuant leur échauffement. Elle tend à confiner la chaleur produite dans le copeau et lui confie l'essentiel de son évacuation c'est-à-dire le revêtement jouant un rôle de barrière thermique, la chaleur du système localisée dans le copeau doit s'évacuer principalement par ce copeau. Par conséquent la pièce usinée ne sera pas affectée thermiquement et elle ne subira pas de dilatation qui peut endommager la précision macro et micro géométrique de la pièce

En effet aux même condition de coupe (V_{c_i} , $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.2$ mm), les ratio moyen des essais sont :

Rt_{CC650} / Rt_{CC6050} est de 1.80 pour $V_c = 90$ m/min et de 1.11 pour $V_c = 180$ m/min, le ratio $Rt_{CC650} / Rt_{CC6050WH}$ est de 1.26 pour $V_c = 90$ m/min et de 1.24 pour $V_c = 180$ m/min. Globalement, les outils de coupe considérés donnent lieu à des rugosités comparables à celles de la rectification.

Cette étude nous permet d’analyser les points suivants :

a) Effet du revêtement sur la rugosité Ra : Le tableau III (4 et 5) illustre l’impact du revêtement sur la rugosité.

| Vitesse de coupe (m/min) | Rugosité obtenue par la céramique | | Impact du revêtement sur (Ra) |
|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| | Non revêtue ($CC650$) | Revêtue ($CC6050$) | |
| 60 | 0.75 | 0.58 | -29.91 |
| 90 | 0.74 | 0.55 | -34.54 |
| 120 | 0.71 | 0.53 | -33.96 |
| 180 | 0.66 | 0.52 | -26.92 |

Tableau III.4 : Impact du revêtement sur la rugosité Ra obtenue avec la céramique non revêtue ($CC650$) et revêtue ($CC6050$)

| Vitesse de coupe (m/min) | Rugosité obtenue par la céramique | | Impact du revêtement sur (Ra) |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| | Non revêtue ($CC650$) | Revêtue ($CC6050WH$) | |
| 60 | 0.75 | 0.28 | -167.85 |
| 90 | 0.74 | 0.26 | -184.61 |
| 120 | 0.71 | 0.23 | -208.69 |
| 180 | 0.66 | 0.25 | -164 |

Tableau III.5 : Impact du revêtement sur la rugosité Ra obtenue avec la céramique non revêtue ($CC650$) et revêtue ($CC6050WH$)

On remarque que l’amélioration de l’état de surface pour les vitesse de coupe (90, 120) m/min est presque la même. Par contre pour la vitesse de coupe de 180 m/min l’amélioration est plus importante.

b) Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité Ra

1. Céramique non revêtue ($CC650$) :

L’augmentation de la vitesse de coupe de 66 % engendre une amélioration de l’état de surface Ra égale à 13.63%.

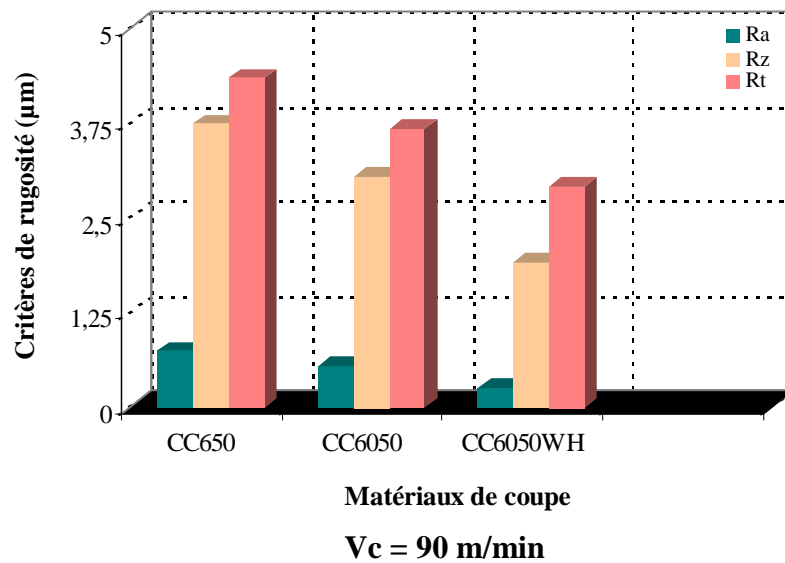
2. Céramique revêtue ($CC6050$) :

L'augmentation de la vitesse de coupe de 66 % engendre une amélioration de l'état de surface Ra égale à 12%.

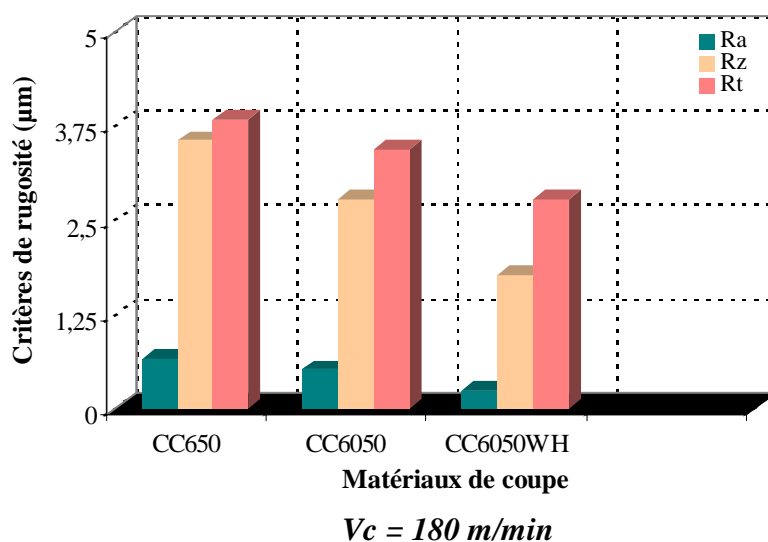
3. Céramique Wiper (CC6050WH) :

L'augmentation de la vitesse de coupe de 66 % engendre une amélioration de l'état de surface Ra égale à 11.53%.

Finalement on peut conclure que, le revêtement à un impact positif sur l'état de surface généré lors de la coupe. Ces résultats sont en bonne accord avec ceux trouvés par [101, 111, 113].



(a)

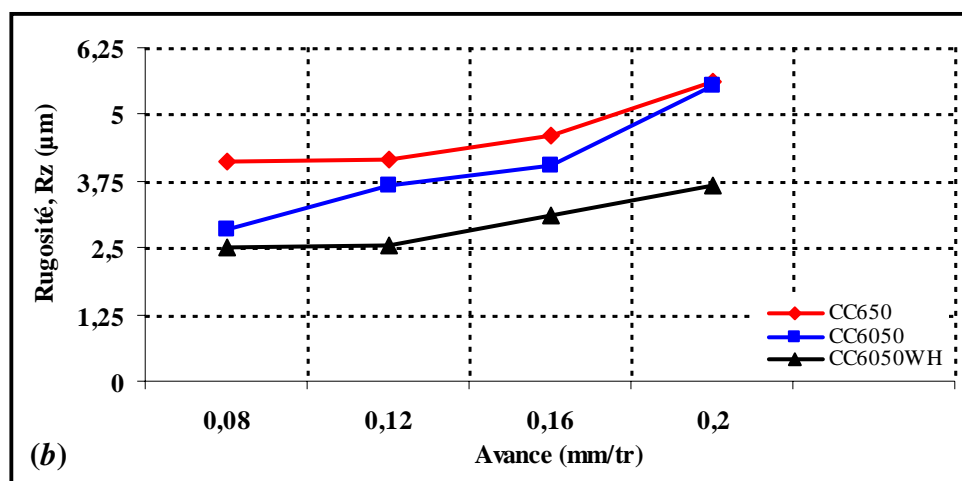
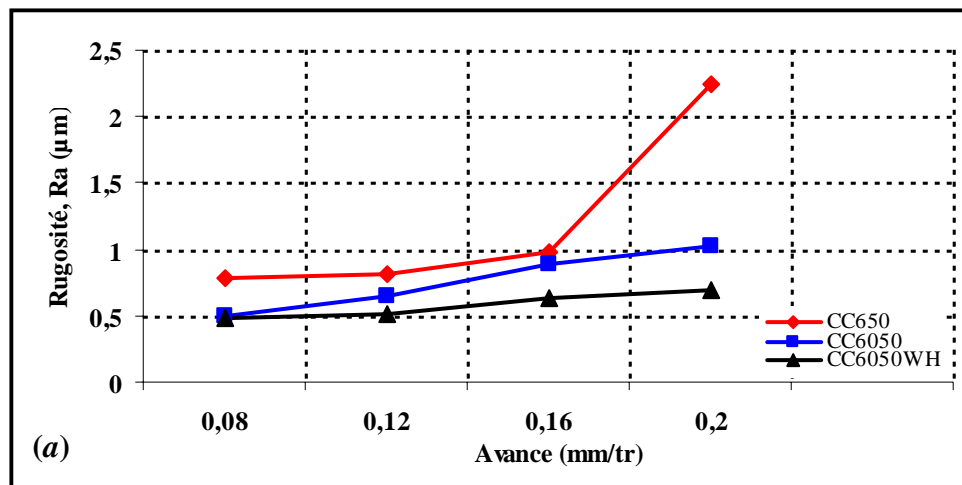


(b)

Figure III.9 : Comparaison entre les rugosités enregistrées à $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.2 \text{ mm}$ pour les outils : CC650, CC6050 et CC6050WH

III.5.2. Effet de l'avance

Les résultats des variations des critères d'état de surface (critères de rugosité) Ra , Rz et Rt en fonction de l'avance (f) sont indiqués dans la figure III.10 (a, b et c). L'analyse des résultats de cette figure montre qu'avec l'augmentation de l'avance (f), la qualité de l'état de surface obtenue se dégrade d'une manière assez significative. L'avance est l'un des paramètres de coupe dont l'effet est le plus sensible sur l'état de la surface usinée. Néanmoins, les qualités des surfaces obtenues dans la plage des avances étudiées sont encore assez bonnes et peuvent être comparées à ceux de la rectification. A titre d'exemple, pour une avance de 0,16 mm/tr, les rugosités enregistrées sur la pièce avec les trois céramiques pour le critère Ra , n'ont pas dépassées le 1 μm (figure III.10 a). Cela prouve les performances de ces matériaux de coupe et leur capacité à usiner les pièces dures. Les conséquences sur le plan pratique, de l'influence de l'avance (f) sur la rugosité sont comme suit: L'augmentation de l'avance de (0,08 à 0,2) mm/tr, conduit à une augmentation des critères de rugosité (Ra , Rz et Rt) successivement de (183.54, 36.98, 82.48) % pour la céramique mixte CC650, (108.16, 94.71, 84.02) % pour la céramique revêtue CC6050 et de (45.83, 46.03, 57.80) % pour la céramique Wiper CC6050WH.



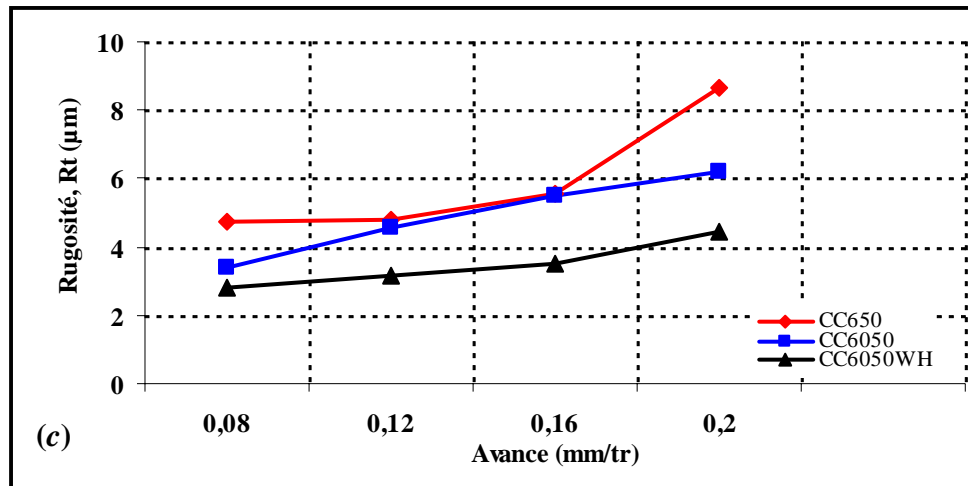
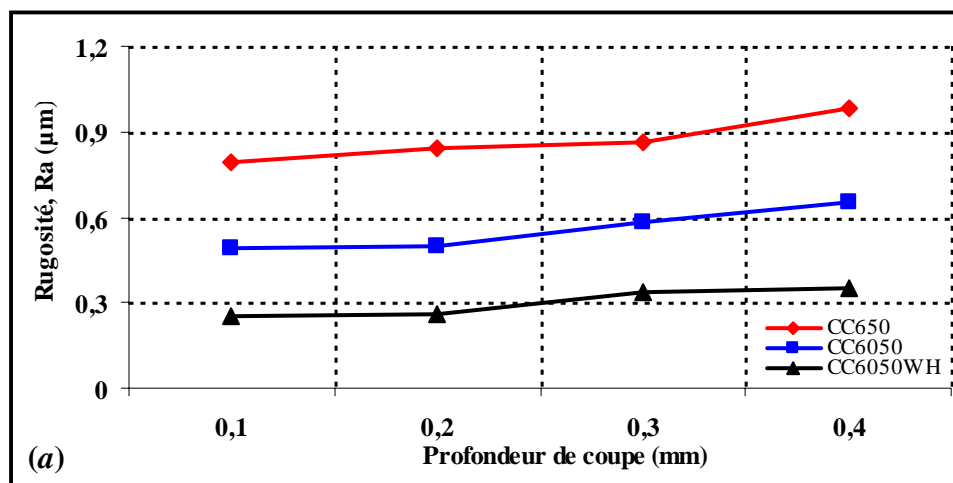


Figure III.10 : Evolution de la rugosité en fonction de l'avance à $V_c = 120$ m/min, $a_p = 0.2$ mm pour les outils: CC650, CC6050 et CC6050WH

III.5.3. Effet de la profondeur de coupe

Les résultats des variations des critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) en fonction de la profondeur de coupe (a_p) pour les outils suivants : CC650, CC6050 et CC6050WH à $V_c = 120$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr sont regroupés dans la figure III.11 (a, b et c). On peut facilement constater sur cette figure que la profondeur de coupe (a_p) ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité des surfaces usinées. Avec son augmentation, on observe un léger accroissement des valeurs des critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) pour les matériaux de coupe testés. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la largeur de contact entre l'outil et la pièce [114, 115] qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur de la zone de coupe. Ce constat permet de recommander qu'il est toujours préférable d'augmenter la profondeur de coupe au lieu de l'avance, si l'on veut augmenter le débit de copeau tout en gardant la même valeur de la rugosité. Globalement, les trois outils de coupe considérés donnent lieu à des rugosités comparables à celles de la rectification ce qui permet de réduire les temps des opérations et les erreurs de reprise [115].



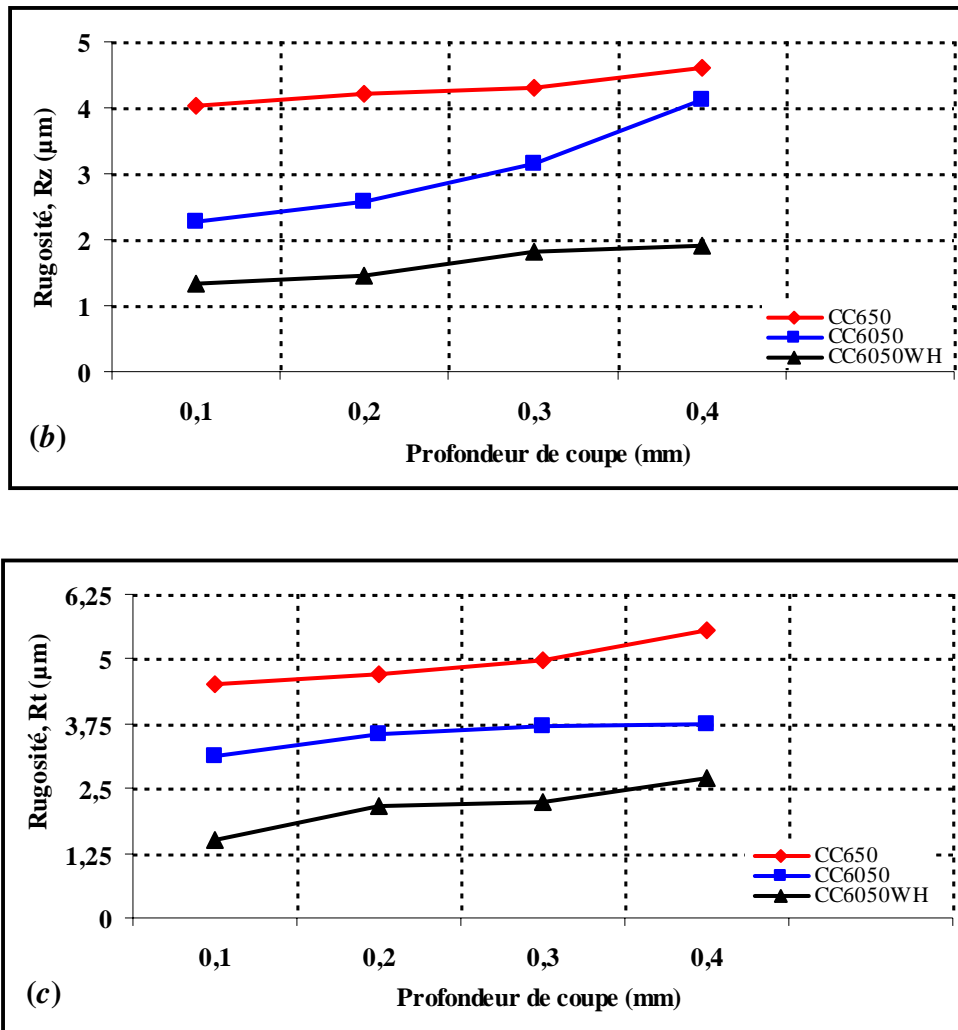


Figure III.11 : Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de coupe à $V_c = 120$ m/min, $a_p = 0.2$ mm pour les outils: CC650, CC6050 et CC6050WH

III.6. RÉSULTAT DE L'INFLUENCE DE DIFFÉRENTES NUANCES DE PLAQUETTES SUR LA RUGOSITÉ, EFFORTS DE COUPE ET L'USURE EN DÉPOUILLE À LA FIN DE LA PASSE

Cette partie de l'étude est réservée à la présentation des résultats de l'influence de la nuance de l'outil sur la rugosité, effort de coupe et l'usure en dépouille à la fin de la passe, lors de l'usinage de l'acier AISI 4140 à 57 HRC par les trois matériaux de coupe (forme rhombique) testées qui sont : la céramique non revêtue (CC650), la céramique revêtue (CC6050) et la céramique Wiper (CC6050WH), sous les mêmes conditions d'usinage : $V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.2$ mm. L'étude a été limitée au critère d'état de surface liée à la hauteur du profil (R_a), l'effort radial (Fr) et l'usure en dépouille (VB).

Sur la figure (III.12) est illustrée l'évolution de la rugosité (Ra) pour les trois nuances d'outils : la céramique non revêtue (CC650), la céramique revêtue (CC6050) et la céramique Wiper (CC6050WH). L'analyse de ces courbes montre que l'état de surface générée par la CC6050WH et la CC6050 sont bien meilleur par rapport à la CC650.

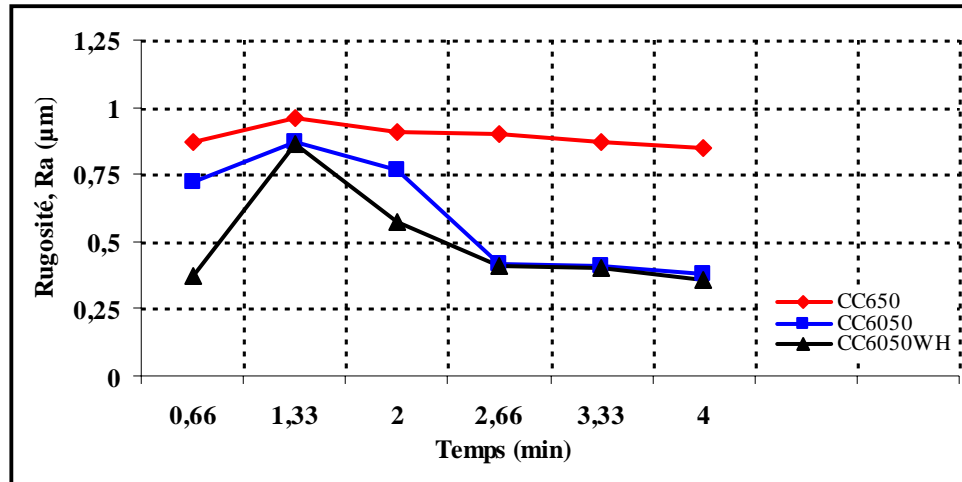


Figure III.12: Evolution de la rugosité (Ra) en fonction du temps à $V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.2$ mm pour les outils : CC650, CC6050 et CC6050WH

Les courbes de la figure (III.13), montrent la différence enregistrée entre l'évolution de l'effort de coupe radial (Fr) en fonction du temps pour les trois nuances d'outil testées. L'analyse de ces courbes montre que la céramique Wiper (CC6050WH) engendre des efforts inférieure par rapport à la céramique revêtue (CC6050) et la céramique non revêtue (CC650).

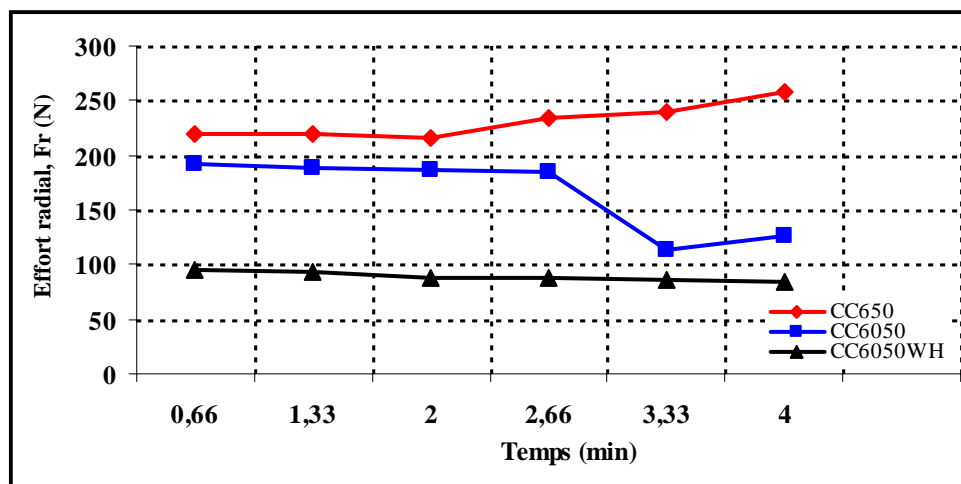


Figure III.13: Evolution de l'effort de coupe radial Fr en fonction du temps à $V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.2$ mm pour les outils : CC650, CC6050 et CC6050WH

A la lumière des observations effectuées de la figure (III.14) lors du suivi de l'usure en dépouille (VB) obtenue à la fin de la passe pour un temps de coupe de 4 minutes et pour un régime de coupe de: la vitesse de coupe 180 m/min, l'avance par tour 0.08 mm/tr et une profondeur de coupe de 0.2 mm, pour les trois nuances de coupe telles que la céramique non revêtue (CC650), la céramique revêtue (CC6050) et la céramique Wiper (CC6050WH). L'analyse des résultats montre que l'usure la plus forte se rencontre pour la (CC650) suivi par la (CC6050) et l'usure la plus faible se rencontre pour la (CC6050WH). Ceci peut être justifié par les figures I (2 et 11), la plus grande quantité de chaleur produite pendant l'usinage est évacuée principalement par le copeau.

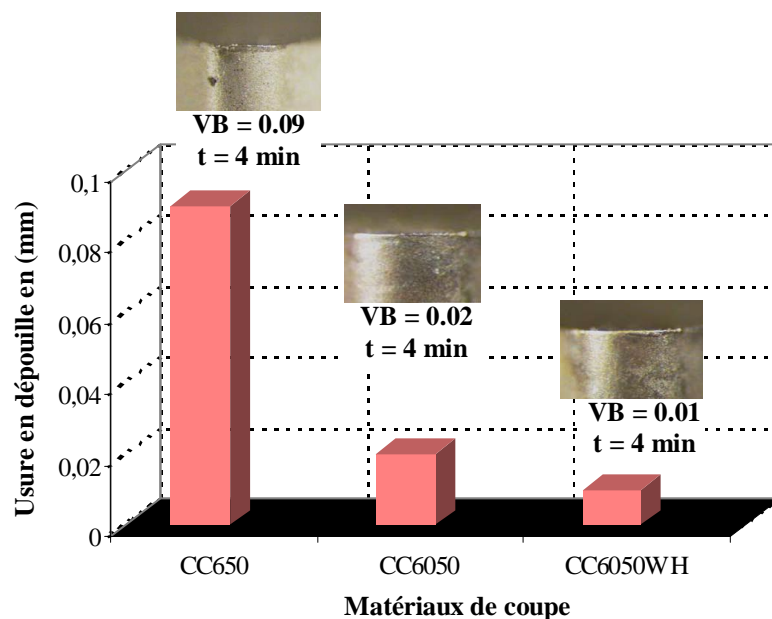


Figure III.14 : Evolution de l'usure en dépouille à la fin de la passe à $V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.2$ mm pour les outils : CC650, CC6050 et CC6050WH

III.7. ANALYSE DES RÉSULTATS

III.7.1. Analyse des qualités des surfaces obtenues

D'après les résultats de nos expériences, nous constatons que, pour un matériau et un outil donnés, l'avance est la caractéristique prédominante et déterminante de la qualité de l'état de surface des pièces usinées. Avec son accroissement, on assiste à une dégradation significative de la rugosité de surface. L'explication se trouve dans la génération de la surface à usinée en tournage en général.

La surface engendrée en tournage n'est pas parfaitement cylindrique mais comporte des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil – pièce. Ce mouvement hélicoïdal résulte de la somme du mouvement circulaire de la pièce (mouvement de coupe avec vitesse de coupe V_c) et du mouvement linéaire de l'outil (mouvement d'avance avec une vitesse d'avance f). Ces sillons seront d'autant plus profonds et d'autant plus larges que l'avance est élevée (l'avance est égale au pas de l'hélice) ; d'où l'emploi de faibles avances lors du tournage de finition. Il est à signaler que l'effet défavorable des faibles avances sur la rugosité de la surface, connu en tournage conventionnel (copeau adhérent ou arête rapportée), ne se pose pas puisqu'on usine des matériaux dur et à des vitesses de coupe relativement élevées. La vitesse de coupe et la profondeur de coupe ont des influences inverses sur la qualité de l'état de surface. L'augmentation de la vitesse de coupe améliore légèrement la rugosité. Par contre, avec l'accroissement de la profondeur de coupe, nous obtenons une faible dégradation de la rugosité. Mais dans les deux cas, les variations des critères de rugosité R_a , R_z et R_t sont minimales comparées aux variations dues à l'avance. Les revêtements permettent d'améliorer de manière significative les performances de l'usinage. Cet apport incontestable est surtout dû à l'amélioration des conditions de frottement créées par les revêtements.

III.7.2. Analyse des efforts de coupe

L'influence de la vitesse de coupe est relativement minime sur les efforts de coupe. Ceux-ci tendent à diminuer lorsqu'elle augmente, ce qui est du point de vue mécanique assez avantageux.

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 fait diminuer les efforts nécessaires à la déformation du copeau d'une part elles améliorent les conditions de frottement aux interfaces outil – pièce (face de dépouille) et copeau – outil (face d'attaque). Par contre, l'avance et la profondeur de coupe ont une influence plus importante sur les efforts de coupe. Avec leur accroissement les efforts de coupe augmentent. On notera toutefois que la profondeur semble être le facteur prépondérant [114]. Ceci est ainsi, la coupe négative, caractérisée par un angle d'attaque $\gamma = -5^\circ$, d'autre part un matériau à l'état trempé s'oppose à toute pénétration extérieure, ce qui augmente l'effort de pénétration.

III.8. CONCLUSION

A partir des résultats du suivi de l'évolution de la rugosité et les efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et du temps d'usinage, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats des efforts de coupe et de la pression de coupe en fonction des conditions de coupe (V_c , f et ap) permettent de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant face à l'acier étudié. Cette démarche appelée couple outil - matière, permet de définir un domaine de fonctionnement correct de l'outil.
- Les conditions de coupe (V_c , f et ap) ont une influence considérable sur la qualité de la surface usinée. En effet, l'influence la plus pertinente sur la rugosité pour les outils de coupe : (CC650, CC6050 et CC6050WH) est attribuée à l'avance, suivie par la vitesse de coupe et enfin la profondeur de coupe.
- Les résultats des essais de rugosité montrent que la céramique Wiper (CC6050WH) donne des meilleurs états de surface par rapport à la céramique revêtue (CC6050) et la céramique non revêtue (CC650) et cela dans toutes les conditions de coupe testés.
- L'analyse des courbes de l'évolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe montre que les efforts de coupe générés par la céramique (CC6050) sont minimales, par rapport à la céramique non revêtue (CC650)
- La céramique Wiper (CC6050WH) présente les meilleurs critères de l'évaluation de l'usinabilité : rugosité et effort de coupe (matériaux à outils de faibles coefficients de conductivité thermique).
- L'effort radial est prépondérant par rapport aux deux autres efforts et cela presque dans toutes les conditions de coupe testées (usinage dur).
- Les revêtements permettent d'améliorer de manière significative les performances de l'usinage, ceci est surtout dû à l'amélioration des conditions de frottement créées par les revêtements.
- La contribution se manifeste aussi dans la modification des échanges thermiques au sein du système outil – pièce - copeau, pendant l'usinage. La barrière de conduction thermique des céramiques déposées sur les outils préserve ces derniers en diminuant leur échauffement. Elle tend à confiner la chaleur produite dans le copeau et lui confie l'essentiel de son évacuation.

CHAPITRE IV

Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

IV.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques de la rugosité de surface arithmétique (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) pour deux nuances de céramique, la céramique revêtue (CC6050) et la céramique non revêtue (CC650). Ces modèles permettent de mettre en évidence la relation entre les éléments du régime de coupe à savoir la (vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe) et les réponses étudiées (Rugosité arithmétique, Efforts de coupe) ensuite les résultats ont été traité statistiquement afin de proposer un régime de coupe optimal. Pour atteindre ces objectifs, on a fait appelle à la méthodologie de surface de réponse (MSR).

IV.2. MÉTHODOLOGIE DES PLANS D'EXPÉRIENCE UTILISÉE POUR L'ÉTUDE DES DEUX CÉRAMIQUES (CC6050 ET CC650)

La méthodologie classiquement utilisée pour étudier l'influence des paramètres opératoires sur une variable d'intérêt consiste à modifier la valeur d'un paramètre tout en maintenant les autres fixes. L'exploitation des résultats et l'étude expérimentale peuvent être fortement simplifiées en utilisant la méthodologie des plans d'expérience. Cette technique permet de créer un modèle statistiquement significatif d'un phénomène qui intègre les interactions entre les variables tout en optimisant le nombre d'essais.

Dans cette recherche, le tableau orthogonal standard de Taguchi L_{27} est adopté comme conception expérimentale. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau II.8 (voir § II.3.2.2.3). Le tableau orthogonal standard de Taguchi L_{27} [107] à 27 lignes correspondre au nombre d'essais (26 degrés de liberté) à 13 colonnes à trois niveaux (tableau II. 9). Les facteurs et les interactions sont assignés aux colonnes. La première colonne du tableau a été assignée à la vitesse de coupe (Vc), la seconde à l'avance (f), la cinquième à la profondeur de passe (ap) et le reste a été assigné aux interactions.

Selon la norme ISO 3534-3 [108], un arrangement orthogonal est un ensemble de combinaisons de traitements tel que pour chaque paire de facteurs, chaque combinaison de traitements survient un même nombre de fois pour tous les niveaux possibles des facteurs. Un dispositif expérimental orthogonal est facile à construire, à partir de simples règles de permutation circulaire. Celui-ci offre une incertitude minimale pour l'estimation des inconnues d'un problème, en particulier parce que les combinaisons retenues dans sa structure sont parfaitement équilibrées. Toutes les modalités apparaissent un même nombre de fois pour chacun des facteurs.

En utilisant le tableau orthogonal standard de Taguchi L_{27} les résultats expérimentaux des essais de chariotage sur des rondins en acier AISI 4140 de dureté de 57 HRC avec un outil en céramique revêtue CC6050 et en céramique non revêtu CC650, sont illustrés dans les tableaux

IV.1 et IV.10. Une planification aléatoire des essais a été utilisée pour éliminer les erreurs systématiques. Ces plans ont été développés pour établir des modèles descriptifs des efforts de coupe et les rugosités des surfaces arithmétiques liés à la hauteur des profils.

IV.3. DESCRIPTIF DE LA MÉTHODOLOGIE DES SURFACES DE RÉPONSE

La méthodologie des surfaces de réponse (MSR) appliquée dans cette étude est une technique statistique empirique utilisée pour l'analyse de régression multiple des données quantitatives obtenues à partir des expériences statistiquement conçues en résolvant les équations multi variables simultanément. La représentation graphique de ces équations s'appelle surfaces de réponse, et permet de décrire l'effet individuel et cumulatif des variables d'essai sur la réponse et de déterminer l'interaction mutuelle entre les variables d'essai et leur effet sur la réponse [116, 117].

La méthodologie de surface de réponse est une procédure visant à déterminer une relation entre les paramètres indépendants du processus d'entrée et les données de sortie (réponse du procédé). Cette procédure comprend 6 [118] étapes et qui sont citées ci-dessous :

1. définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées,
2. adopter un plan de conception expérimentale,
3. effectuer une analyse de régression avec le modèle quadratique de (MSR),
4. effectuer une analyse statistique de la variance (ANOVA) des variables d'entrées indépendantes afin de trouver les paramètres les plus significatifs qui affectent la réponse,
5. déterminer la situation du modèle quadratique de (MSR) et enfin,
6. Optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédites.

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. Dans la présente étude, la relation entre les paramètres d'entrées (conditions de coupe) à savoir la vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (f) et la profondeur de coupe (ap) et les paramètres de sorties (Efforts de coupe, Rugosité) sont donnés par l'équation notée ci-dessous :

$$Y = f(V_c, f, ap) + e_{ij} \quad \text{(IV.1)}$$

Où :

Y = paramètres de sortie (Efforts de coupe, Rugosité arithmétique)

On peut ainsi écrire le modèle mathématique du second ordre, basé sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

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

Où Y est la réponse observée (Efforts de coupe, Rugosité arithmétique), a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} représentent respectivement les termes constants, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Les X_i représentent les variables indépendantes, ou bien variables codées qui correspondent à des paramètres de coupe étudiés.

Les variables codées X_i , $i = 1, 2, 3$ sont obtenues à partir des équations de transformation suivantes :

$$X_1 = \frac{Vc - Vco}{\Delta Vc} \quad (\text{IV.3})$$

$$X_2 = \frac{f - fo}{\Delta f} \quad (\text{IV.4})$$

$$X_3 = \frac{ap - apo}{\Delta ap} \quad (\text{IV.5})$$

Où X_1 , X_2 et X_3 sont les valeurs codées des paramètres Vc , f et ap respectivement. Vco , fo et apo au niveau zéro. ΔVc , Δf and Δap sont les valeurs de Vc , f , et ap , respectivement.

IV.4. TESTE DE VALIDITÉ DES MODÈLES

Afin de tester la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance (ANOVA) : est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et les efforts de coupe. Comme les facteurs sont en général exprimés dans des unités différentes, leurs effets ne soient comparables que s'ils sont codés.
- Coefficients d'ajustement des modèles : Le coefficient de détermination R^2 est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée 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 expliquées 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 (IV.6).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{Erreur}}}{SS_{\text{Total}}} \quad (\text{IV.6})$$

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

• Graphiques des valeurs résiduelles : Les graphiques des valeurs résiduelles utiles pour vérifier les hypothèses des modèles et peuvent être affichés pour tous les plans et ils sont déterminées par l'évaluation de l'équation (IV.7) [119].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (\text{IV.7})$$

Où :

y_{ij} : l'observation correspondante des valeurs non ajustées.

\hat{y}_{ij} : l'observation des valeurs ajustées.

- Graphique des valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles
- Test de normalité d'Anderson Darling : le test d'Anderson Darling est utilisé pour tester si un échantillon de données est issu d'une population ayant une distribution spécifique. Ce test est une alternative au test de chi carré ou de Kolmogorov-Smirnov. Il est basé sur ce dernier mais il est plus puissant. Le test Anderson Darling est défini comme suit :
 - L'hypothèse nulle H_0 : Les données proviennent d'une population distribuée normalement.
 - L'hypothèse alternative H_1 : Les données ne proviennent pas d'une population distribuée normalement.

La statistique du test d'Anderson Darling est donnée par :

$$A^2 = -N - S \quad (\text{IV. 8})$$

Où : N est la taille de l'échantillon.

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\log F(Y_i) + \log(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad (\text{IV. 9})$$

Où :

F est la fonction de répartition de la distribution spécifiée.

Les valeurs critiques dépendent des distributions (normale, log-normale, exponentielle...). Les valeurs de P sont souvent utilisées dans les tests d'hypothèses dans lesquels on peut ou non rejeter une hypothèse nulle. La valeur de P représente la probabilité de faire une erreur de type 1, ou de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. Plus la valeur de P est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. Une valeur limite de 0.05 est utilisée. Autrement dit, rejetez l'hypothèse nulle si la valeur de P est inférieure à 0.05. Pour prendre une décision, on choisit le niveau de signification, α (alpha), avant le test :

- Si P est inférieur ou égal à α , on rejette H_0 .
- Si P est supérieur à α , on ne rejette pas H_0 .

IV.5. OPTIMISATION

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (MSR) a été étudié à trois niveaux différents. Le choix de trois niveaux pour chaque variable est exigé par cette conception afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à La fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors q'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface (Ra) et les composantes de la force de coupe (Fa , Fr et Ft) souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) pour la céramique revêtue (CC6050) et la céramique non revêtue (CC650).

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, $F(x)$, est définie comme suit [120]:

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

$$F(x) = -DF$$

Où d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et w_i est la fonction de pondération de d_i . Pour different 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 :

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

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

$$di = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{T_i - Inf_i} \right] \quad \text{Si } Inf_i \leq Y_i \leq T_i \quad \text{(IV.11)}$$

$$di = \left[\frac{Y_i - Sup_i}{T_i - Sup_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq Sup_i$$

$$di = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq Sup_i$$

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

$$di = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad \text{Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad \text{(IV.12)}$$

$$di = 1 \quad \text{Si } Y_i \geq Sup_i$$

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

$$di = 1 \quad \text{Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[\frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad \text{Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad \text{(IV.13)}$$

$$di = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq Sup_i$$

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

IV.6. MODÉLISATION DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE ET LES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE COUPE (CAS DE LA CÉRAMIQUE REVÊTUE CC6050)

IV.6.1. Analyse et discussion des résultats expérimentaux réalisée par la céramique revêtue (CC6050).

Le tableau IV.1 présente les conditions de coupe (la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de coupe (ap) et les résultats expérimentaux correspondants à la rugosité arithmétique (Ra) et les efforts de coupe tels que : l'effort axial (F_a), l'effort radial (F_r) et l'effort tangentielle (F_t).

Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe. Le traitement statistique des résultats du tableau V.1 a été réalisé en trois phases. La première phase portait sur l'analyse de la variance et de l'effet des facteurs et des interactions. La deuxième phase a permis d'obtenir des modèles mathématiques des paramètres étudiés (régression quadratique). Enfin, une optimisation des conditions de coupe et des réponses qui a permis de proposer un régime optimal grâce à la fonction de désirabilité.

L'analyse des résultats du tableau IV.1, montre que les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) sont principalement influencés par la profondeur de coupe comparativement à l'influence de l'avance et de la vitesse de coupe. Ces résultats indiquent aussi, qu'à mesure que la profondeur de coupe et l'avance augmentent, les efforts de coupe augmentent également. Cette augmentation des efforts, est la conséquence de l'accroissement de la section du copeau. Notons aussi que l'effet de l'avance sur les efforts de coupe est significatif pour des avances supérieures à 0.12 mm/t. Par contre, aux avances inférieures à cette valeur (0.12 mm/tr) les efforts de coupe demeurent presque constants. La même chose est observée pour des vitesses de coupe élevée (supérieures à 120 m/min). Les valeurs des efforts de coupe sont presque identiques pour une plage de vitesses de coupe entre 120 et 180 m/min. Néanmoins, l'effet de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe est significatif pour des vitesses inférieures à 120 m/min.

Les résultats montrent aussi que l'avance est la caractéristique prédominante et déterminante de la qualité de l'état de surface (Ra), avec son accroissement on assiste à une dégradation signifiante de celle-ci. Le deuxième paramètre qui influe sur la rugosité de surface est la vitesse de coupe, mais son augmentation contribue à l'amélioration de l'état de surface usinée. En effet avec l'augmentation de la vitesse de coupe les efforts de coupe et la rugosité décroissent ceci est justifiée par les différentes combinaisons des paramètres du régime de coupe du tableau IV.1. Le facteur le moins influant sur l'état de surface est la profondeur de coupe, ceci est dû à l'élargissement de la zone de contact (outil – pièce) et à l'augmentation de la section du copeau qui évacue facilement la quantité de chaleur générée par la coupe.

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| N° Essai | Valeurs codées | | | Valeurs réelles | | | Réponses (rugosité, efforts de coupe) | | | |
|-------------|-------------------|-------|-------|-----------------|-----------------|-------------|--|------------|------------|------------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | V_c ,(m/min) | f_s ,(mm/rev) | a_p ,(mm) | Ra ,(μ m) | F_a ,(N) | F_r ,(N) | F_t ,(N) |
| 1 | -1 | -1 | 1 | 90 | 0.08 | 0.45 | 0.35 | 134.47 | 223.2 | 169.8 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 180 | 0.12 | 0.45 | 0.38 | 110.91 | 179.04 | 137.45 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 90 | 0.12 | 0.30 | 0.46 | 89.39 | 197.95 | 139.90 |
| 4 | -1 | 0 | -1 | 90 | 0.12 | 0.15 | 0.44 | 36.46 | 140.86 | 73.87 |
| 5 | -1 | -1 | -1 | 90 | 0.08 | 0.15 | 0.32 | 34 | 130.08 | 64.14 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 180 | 0.16 | 0.30 | 0.47 | 72.02 | 206.47 | 143.52 |
| 7 | 1 | -1 | 0 | 180 | 0.08 | 0.30 | 0.24 | 59.43 | 153.16 | 88.06 |
| 8 | 0 | -1 | 0 | 120 | 0.08 | 0.30 | 0.31 | 70.02 | 174.88 | 118.39 |
| 9 | -1 | 1 | 1 | 90 | 0.16 | 0.45 | 0.63 | 146.38 | 278.41 | 219.13 |
| 10 | 0 | -1 | 1 | 120 | 0.08 | 0.45 | 0.32 | 110.01 | 203.18 | 152.07 |
| 11 | -1 | 1 | -1 | 90 | 0.16 | 0.15 | 0.60 | 38.78 | 156.37 | 100.58 |
| 12 | 0 | 1 | 0 | 120 | 0.16 | 0.30 | 0.50 | 79.88 | 207.49 | 157.92 |
| 13 | 1 | -1 | 1 | 180 | 0.08 | 0.45 | 0.26 | 88.8 | 165.58 | 98.15 |
| 14 | 1 | -1 | -1 | 180 | 0.08 | 0.15 | 0.23 | 32.08 | 120.97 | 43.03 |
| 15 | 1 | 1 | -1 | 180 | 0.16 | 0.15 | 0.45 | 38.81 | 142.18 | 78.84 |
| 16 | 1 | 0 | -1 | 180 | 0.12 | 0.15 | 0.34 | 31.55 | 120.97 | 41.8 |
| 17 | -1 | 0 | 1 | 90 | 0.12 | 0.45 | 0.47 | 141.94 | 238.14 | 215.15 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 120 | 0.12 | 0.30 | 0.40 | 78.39 | 183.05 | 129.65 |
| 19 | 0 | -1 | -1 | 120 | 0.08 | 0.15 | 0.26 | 33.09 | 123.62 | 52.06 |
| 20 | 1 | 0 | 0 | 180 | 0.12 | 0.30 | 0.37 | 68.59 | 167.67 | 110.53 |
| 21 | 1 | 1 | 1 | 180 | 0.16 | 0.45 | 0.49 | 120.84 | 274.23 | 179.05 |
| 22 | 0 | 0 | 1 | 120 | 0.12 | 0.45 | 0.42 | 126.42 | 221.16 | 202.84 |
| 23 | 0 | 1 | -1 | 120 | 0.16 | 0.15 | 0.47 | 39.68 | 145.37 | 89.49 |
| 24 | -1 | -1 | 0 | 90 | 0.08 | 0.30 | 0.34 | 70.5 | 179.65 | 124.31 |
| 25 | 0 | 0 | -1 | 120 | 0.12 | 0.15 | 0.37 | 36.44 | 133.63 | 73.08 |
| 26 | 0 | 1 | 1 | 120 | 0.16 | 0.45 | 0.53 | 136.35 | 278.17 | 210.92 |
| 27 | -1 | 1 | 0 | 90 | 0.16 | 0.30 | 0.62 | 94.07 | 214.85 | 170.44 |

Tableau IV.1 : Résultats de la rugosité de surface (Ra) et les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction des paramètres du régime de coupe pour la CC6050 (le tableau orthogonal standard de Taguchi L_{27} : $N = 3^3$)

IV.6.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra) : Modèle quadratique complet pour la céramique revêtue (CC6050)

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité de surface (Ra) en utilisant le Seq SS pour les tests ainsi que les coefficients de régression estimés sont exposés dans le tableau IV.2. L'analyse est effectuée pour un niveau de signification $\alpha = 0.05$ (c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95%) [107]. Dans ce tableau sont mentionnés les valeurs des degrés de liberté (DL), la somme des carrés des écarts (Seq SS), les carrés moyens (MS), la valeur de la probabilité (P) indiquant le niveau de signification des paramètres pour chaque source de variation. La valeur de P inférieur à 0.05

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

pour n'importe quel facteur à un impact significatif sur la réponse mesurées [121], la propriété statistique (F) et la contribution en pourcentage (PC %) de chaque facteur et des différentes interactions. L'analyse a été effectuée en utilisant des données non codées. En outre, la dernière colonne du tableau montre la contribution en pourcent (PC %) de chaque facteur et des différentes interactions, indiquant le degré d'influence sur les résultats. Plus le pourcentage de contribution (PC %) est grand plus le facteur à un effet sur les paramètres étudiées.

| 1 Coefficients de régression estimés pour Ra | | | 2 Analyse de variance pour Ra | | | | | | |
|--|--------------|------|---------------------------------|----|----------|----------|-------|-------|-------|
| Terme | Coefficients | P | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | 0.44554 | 0.00 | Vc | 1 | 0.050060 | 0.007511 | 25.59 | 0.000 | 15.47 |
| Vc | -0.005841 | 0.00 | f | 1 | 0.252050 | 0.001908 | 6.50 | 0.021 | 77.92 |
| f | 2.90060 | 0.00 | ap | 1 | 0.007606 | 0.000331 | 1.13 | 0.303 | 2.35 |
| ap | 0.242804 | 0.00 | $Vc \times f$ | 1 | 0.001419 | 0.001419 | 4.39 | 0.051 | 0.43 |
| $Vc \times f$ | -0.004662 | 0.11 | $Vc \times ap$ | 1 | 0.000002 | 0.000002 | 0.01 | 0.942 | 0.00 |
| $Vc \times ap$ | 0.000317 | 0.67 | $f \times ap$ | 1 | 0.000008 | 0.000008 | 0.03 | 0.868 | 0.00 |
| $f \times ap$ | -0.138889 | 0.87 | Vc^2 | 1 | 0.007163 | 0.007163 | 24.40 | 0.000 | 2.21 |
| Vc^2 | 0.0000195 | 0.00 | f^2 | 1 | 0.000150 | 0.000150 | 0.51 | 0.484 | 0.04 |
| f^2 | 2.43056 | 0.59 | ap^2 | 1 | 0.000150 | 0.000150 | 0.51 | 0.484 | 0.04 |
| ap^2 | -0.271605 | 0.40 | Erreur résiduelle | 17 | 0.004990 | 0.000294 | | | 1.54 |
| | | | Total | 26 | 0.323467 | | | | 100 |

Tableau IV.2 : (1) Régression de la surface de réponse, (2) Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité (Ra) pour la CC6050 en fonction de : Vc , f et ap (Modèle quadratique complet)

L'analyse présentée sur le tableau IV.2(1 et 2), montre que la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f), la profondeur de coupe (ap) et l'interaction de la vitesse de coupe (Vc^2) ont des effets statistiquement significatifs sur le critère de la rugosité (Ra) pour un niveau de confiance de 95%. Le facteur déterminant de la rugosité (Ra) est l'avance (f), ce qui explique la contribution de 77.92%. Ceci peut être expliqué par les effets de trempe. En effet la matière à usiner après trempe devient plus dure, et sa microstructure plus fine. Ceci freine le mécanisme de la formation du copeau par arrachement et favorise celui de l'amorçage de la rupture du copeau par fissuration. Des résultats similaires ont été trouvés par [122, 123]. Par contre la vitesse de coupe (Vc), la profondeur de coupe (ap) et l'interaction de la vitesse de coupe (Vc^2) ont des contributions successivement de (15.47%, 2.35% et 2.21%). Notons bien que l'erreur associée dans le tableau le tableau IV.2.2 est d'environ 1.54%, les interactions ($Vc \times f$), ($Vc \times ap$), ($f \times ap$), (f^2), (ap^2) ne présentent pas de signification physique ((PC % < à l'erreur associé)

Dans l'ordre, pour étudier l'influence des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de coupe) sur le critère de la rugosité de surface (Ra), les

graphiques des interactions des facteurs pour chaque surface de réponse sont tracés dans la figure IV.1 (a, b et c), les variables non représentées sont tenues constantes (au niveau médian).

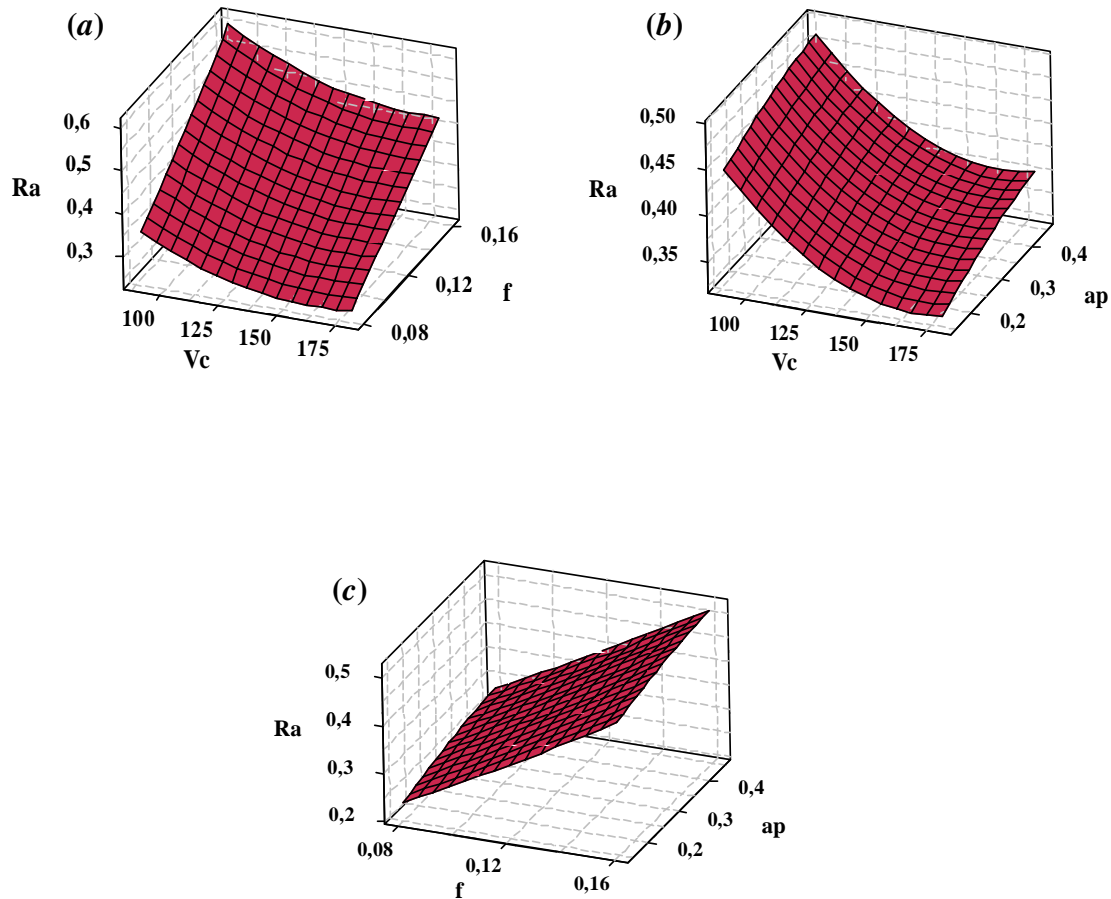


Figure IV.1: surface de réponse 3D pour les effets des interactions (a) la vitesse d'avance et la vitesse de coupe, (b) la profondeur de coupe et la vitesse de coupe et (c) la profondeur de coupe et la vitesse d'avance sur la rugosité de surface Ra .

La figure IV.1a illustre l'effet de l'interaction de la surface de réponse 3D en fonction de la vitesse de coupe et l'avance par tour sur la rugosité (Ra) en maintenant la profondeur de coupe au niveau moyen ($ap = 0.3$ mm). On peut observer que, pour une vitesse de coupe donnée, la rugosité de surface augmente fortement avec l'augmentation de la vitesse d'avance. D'une part, la rugosité (Ra) a tendance de ce réduire avec l'augmentation de la vitesse de coupe à vitesse d'avance constante. La figure IV.1b illustre les effets de l'interaction entre la profondeur de coupe et la vitesse de coupe en maintenant la vitesse d'avance au niveau médian ($f = 0.12$ mm/tr). On peut constaté à travers cette figure que la rugosité de surface est très sensible à la vitesse de coupe, une augmentation de cette dernière

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

diminue fortement la rugosité de surface. Cependant, cette réduction devient de plus en plus minime avec des valeurs plus élevées de la profondeur de coupe. La figure IV.1c présente la surface de réponse 3D pour les effets de l'interaction de la profondeur de coupe et l'avance par tour, en maintenant la vitesse de coupe au niveau moyenne ($V_c = 135$ m/min). Cette figure indique que pour une profondeur de coupe donnée, l'augmentation de la rugosité est enregistrée avec l'augmentation de la vitesse d'avance.

D'après l'analyse du tableau IV.1 et les effets des interactions des figures IV.1 (a, b et c) des surfaces de réponses 3D, on constate que la combinaison d'une vitesse de coupe élevée avec de faible valeur de la profondeur de coupe et de l'avance par tour conduisent généralement à une diminution de la rugosité. Donc la valeur de la rugosité $Ra = 0.23\mu\text{m}$ est enregistrée pour les conditions de coupe suivantes : $V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm (Essai N° 14).

IV.6.3. Régression de la surface de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de V_c, f et ap pour la céramique revêtue (CC6050)

L'analyse de régression obtenue à partir de la méthodologie de surface de réponse (MSR) de la rugosité de surface (Ra) en fonction de V_c, f et ap donne l'équation du modèle complet (IV. 14). Les coefficients de régression sont mentionnés dans le tableau IV.2a.

$$Ra = 0.4455 - 5.84 \times 10^{-3} V_c + 2.90 f + 2.4 \times 10^{-1} ap - 4.66 \times 10^{-3} V_c f + 3.17 \times 10^{-4} V_c ap - 1.38 \times 10^{-1} f ap + 1.95 \times 10^{-5} V_c^2 + 2.43 f^2 - 2.71 \times 10^{-1} ap^2 \quad (\text{V.14})$$

Le modèle est réduit en éliminant les termes qui n'ont aucun effet significatif sur la réponse (Ra), le modèle réduit donne l'équation (IV.15).

$$Ra = 0.4455 - 5.84 \times 10^{-3} V_c + 2.90 f + 2.4 \times 10^{-1} ap + 1.95 \times 10^{-5} V_c^2 \quad (\text{V.15})$$

L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité (Ra) est calculée afin d'examiner l'hypothèse nulle de la régression qui est présenté dans le tableau IV.3. Le résultat indique que le modèle estimé par la procédure de régression de la surface de réponse est significatif au niveau (P valeur < 0.05)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| Source | DF | Seq SS | CM ajust | F | P | Remarque |
|-------------------|----|----------|----------|--------|---------|------------|
| Regression | 9 | 0.318477 | 0.035386 | 120.56 | < 0.000 | Signifiant |
| Erreur résiduelle | 17 | 0.004990 | 0.000294 | | | |
| Total | 26 | 0.323467 | | | | |
| R^2 | | | | | | 98.5 % |
| R^2 ajusté | | | | | | 97.5 % |

Tableau IV.3 : Tableau (ANOVA) du modèle ajusté de la rugosité (R_a) pour la céramique revêtue (CC6050)

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de la rugosité (R_a) est : $R^2 = 98.5\%$. Cette valeur indique que 98.5% d'une simple variation du critère de la rugosité (R_a) est expliquée par les variables. La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une haute signification du modèle et un bon ajustement de ce derniers aux données expérimentales.

Pour valider ce modèle, il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différence entre les valeurs expérimentales de la rugosité (R_a) et celles obtenues à partir du modèle de prédiction). La distribution des résidus est déterminée par l'évaluation de l'équation (IV.7) [115]. Le test de la normalité (d'Anderson - Darl) de cette distribution doit suivre la loi normale (figure IV.2a).

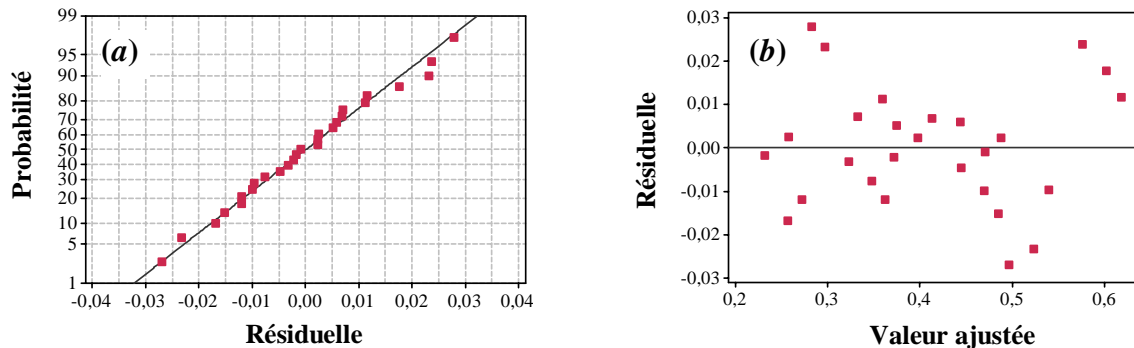


Figure IV.2 : Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour la rugosité (R_a) : (a) test de normalité de la distribution des résidus, (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustées pour la (CC6050)

IV.6.4. Comparaison entre le critère de la rugosité (R_a) expérimentale et estimés pour la céramique revêtue CC6050

La comparaison entre les valeurs expérimentales de la rugosité (R_a) et celles estimées par le modèle obtenu par la méthodologie de surface de réponse (MSR) est présentée dans le tableau IV.4 et sur la figure IV.3. L'analyse de cette comparaison montre que l'erreur minimale est de (-0.6 %), enregistrée à l'essai N° 25, et que l'erreur maximale est de (8.97%),

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

enregistrée à l'essai N° 8. Il est clair d'après cette comparaison que le modèle issu de la (MSR) donne un très bon résultat.

| N° essais | Valeurs expérimentales de Ra (µm) | Valeurs prédites de Ra (µm) | Erreur % |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------|----------|
| 1 | 0.35 | 0.36202 | -3.43 |
| 2 | 0.38 | 0.37484 | 1.35 |
| 3 | 0.46 | 0.47000 | -2.17 |
| 4 | 0.44 | 0.44476 | -1.08 |
| 5 | 0.32 | 0.32321 | -1 |
| 6 | 0.47 | 0.47091 | -0.19 |
| 7 | 0.24 | 0.25686 | -7.02 |
| 8 | 0.31 | 0.28218 | 8.97 |
| 9 | 0.63 | 0.61845 | 1.83 |
| 10 | 0.32 | 0.29682 | 7.24 |
| 11 | 0.60 | 0.57631 | 3.94 |
| 12 | 0.50 | 0.52337 | -4.67 |
| 13 | 0.26 | 0.27198 | -4.60 |
| 14 | 0.23 | 0.23174 | -0.75 |
| 15 | 0.45 | 0.44412 | 1.30 |
| 16 | 0.34 | 0.33293 | 2.07 |
| 17 | 0.47 | 0.48523 | -3.24 |
| 18 | 0.40 | 0.39777 | 0.55 |
| 19 | 0.26 | 0.25754 | 0.94 |
| 20 | 0.37 | 0.35888 | 3.00 |
| 21 | 0.49 | 0.48769 | 0.47 |
| 22 | 0.42 | 0.41325 | 1.60 |
| 23 | 0.47 | 0.49706 | -5.75 |
| 24 | 0.34 | 0.34761 | -2.23 |
| 25 | 0.37 | 0.37230 | -0.62 |
| 26 | 0.53 | 0.53968 | -1.82 |
| 27 | 0.62 | 0.60238 | 2.84 |

Tableau IV.4 : Comparaison entre le critère de la rugosité (Ra) expérimentale et estimé pour la céramique revêtue (CC6050)

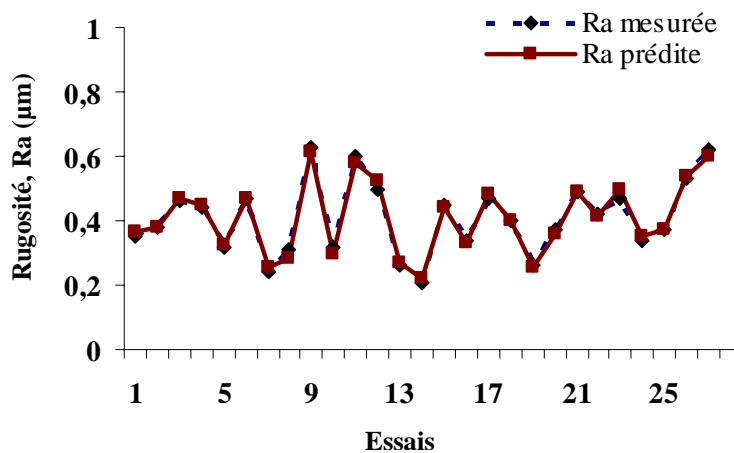


Figure IV.3 : Courbe du critère de la rugosité (Ra) expérimentale et estimé pour la céramique revêtue (CC6050)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

IV.6.5. Analyse de la variance (ANOVA) des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) : Modèle quadratiques complets pour la céramique revêtue (CC6050)

L'analyse des variances pour les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en utilisant la Seq SS pour les tests ainsi que les coefficients de régression estimés sont présentés sur les tableaux IV.5 (a , b et c). L'analyse est effectuée en utilisant des données non codées pour un niveau de signification $\alpha = 0.05$ c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95% [107]. les tableaux IV.5 (a , b et c) prouvent que les effets principaux de la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de coupe (ap) sur les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) ont des effets statistiquement significatifs. En effet, les tableaux IV.6.1 (a et c) prouvent que les interactions ap^2 , $V_c \times ap$ et $f \times ap$ ont des effets significatifs sur l'effort de coupe tangentiel (F_t)

| 1 Coefficients de régression estimés pour F_a | | | 2 Analyse de la variance pour F_a | | | | | | |
|---|-----------|------|-------------------------------------|----|---------|----------|-------|-------|-------|
| Terme | Coeff | P | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | 1.650183 | 0.00 | V_c | 1 | 1425.6 | 18.7 | 1.32 | 0.267 | 3.66 |
| V_c | -0.291353 | 0.00 | f | 1 | 1018.7 | 11.9 | 0.84 | 0.373 | 2.61 |
| f | 228.933 | 0.00 | ap | 1 | 35132.8 | 339.8 | 23.90 | 0.000 | 90.22 |
| ap | 250.139 | 0.00 | $V_c \times f$ | 1 | 13.3 | 13.3 | 0.94 | 0.346 | 0.03 |
| $V_c \times f$ | 0.773512 | 0.20 | $V_c \times ap$ | 1 | 743.3 | 743.3 | 50.95 | 0.000 | 1.90 |
| $V_c \times ap$ | -1.13730 | 0.00 | $f \times ap$ | 1 | 227.0 | 227.0 | 15.97 | 0.000 | 0.58 |
| $f \times ap$ | 724.86 | 0.00 | V_c^2 | 1 | 33.7 | 33.7 | 2.37 | 0.142 | 0.08 |
| V_c^2 | 0.001258 | 0.15 | f^2 | 1 | 29.6 | 29.6 | 2.08 | 0.167 | 0.07 |
| f^2 | -1526.74 | 0.12 | ap^2 | 1 | 91.9 | 91.9 | 6.46 | 0.021 | 0.23 |
| ap^2 | 173.90 | 0.02 | Erreur résiduelle | 17 | 214.7 | 14.2 | | | 0.62 |
| | | | Total | 26 | 38938.5 | | | | 100 |

(a)

| 1 Coefficients de régression estimés pour F_r | | | 2 Analyse de variance pour F_r | | | | | | |
|---|----------|------|----------------------------------|----|---------|----------|-------|-------|-------|
| Terme | Coeff | P | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | 244.296 | 0.00 | V_c | 1 | 2957.0 | 72.4 | 0.83 | 0.376 | 5.01 |
| V_c | -0.57097 | 0.00 | f | 1 | 10235.0 | 1196.0 | 13.64 | 0.002 | 17.36 |
| f | -2297.17 | 0.00 | ap | 1 | 39861.7 | 493.3 | 5.63 | 0.030 | 67.64 |
| ap | 301.37 | 0.00 | $V_c \times f$ | 1 | 445.6 | 445.6 | 4.63 | 0.046 | 0.75 |
| $V_c \times f$ | 3.17258 | 0.07 | $V_c \times ap$ | 1 | 561.0 | 561.0 | 6.40 | 0.022 | 0.95 |
| $V_c \times ap$ | -9.92646 | 0.03 | $f \times ap$ | 1 | 2397.0 | 2397.0 | 27.34 | 0.000 | 4.06 |
| $f \times ap$ | 2355.56 | 0.00 | V_c^2 | 1 | 11.2 | 11.2 | 0.13 | 0.725 | 0.01 |
| V_c^2 | 0.00151 | 0.53 | f^2 | 1 | 839.5 | 839.5 | 9.58 | 0.007 | 1.42 |
| f^2 | 7393.06 | 0.01 | ap^2 | 1 | 167.8 | 167.8 | 1.91 | 0.184 | 0.28 |
| ap^2 | -215.259 | 0.26 | Erreur résiduelle | 17 | 1490.3 | 87.7 | | | 2.52 |
| | | | Total | 26 | 58926.2 | | | | 100 |

(b)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| 1 Coefficients de régression estimés pour F_t | | | 2 Analyse de variance pour F_t | | | | | | |
|---|----------|------|----------------------------------|----|---------|----------|-------|-------|-------|
| Terme | Coeff | P | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | -40.5591 | 0.00 | V_c | 1 | 7727 | 13.7 | 0.15 | 0.699 | 10.37 |
| V_c | 0.24773 | 0.00 | f | 1 | 10872.7 | 1.4 | 0.02 | 0.900 | 14.60 |
| f | 77.2646 | 0.00 | ap | 1 | 51699.3 | 2408.6 | 27.12 | 0.000 | 69.44 |
| ap | 665.94 | 0.00 | $V_c \times f$ | 1 | 179.9 | 179.9 | 2.03 | 0.173 | 0.24 |
| $V_c \times f$ | 3.10446 | 0.04 | $V_c \times ap$ | 1 | 1334.1 | 1334.1 | 14.68 | 0.001 | 1.79 |
| $V_c \times ap$ | -1.51201 | 0.00 | $f \times ap$ | 1 | 565.8 | 565.8 | 6.37 | 0.022 | 0.76 |
| $f \times ap$ | 1144.44 | 0.06 | V_c^2 | 1 | 62.4 | 62.4 | 0.70 | 0.414 | 0.08 |
| V_c^2 | -0.00223 | 0.29 | f^2 | 1 | 1.5 | 1.5 | 0.02 | 0.900 | 0.00 |
| f^2 | -387.153 | 0.86 | ap^2 | 1 | 522.5 | 522.5 | 5.88 | 0.027 | 0.70 |
| ap^2 | -414.743 | 0.01 | Erreur résiduelle | 17 | 1509.7 | 88.8 | | | 2.02 |
| | | | Total | 26 | 74444.9 | | | | 100 |

(c)

Tableau IV.5 : (1) Coefficient de régression de la surface de réponse, (2) Analyse de la variance pour les efforts de coupe : (a) F_a , (b) F_r et (c) F_t en fonction de V_c , f et ap , en utilisant les valeurs non codées (modèles quadratiques complets)

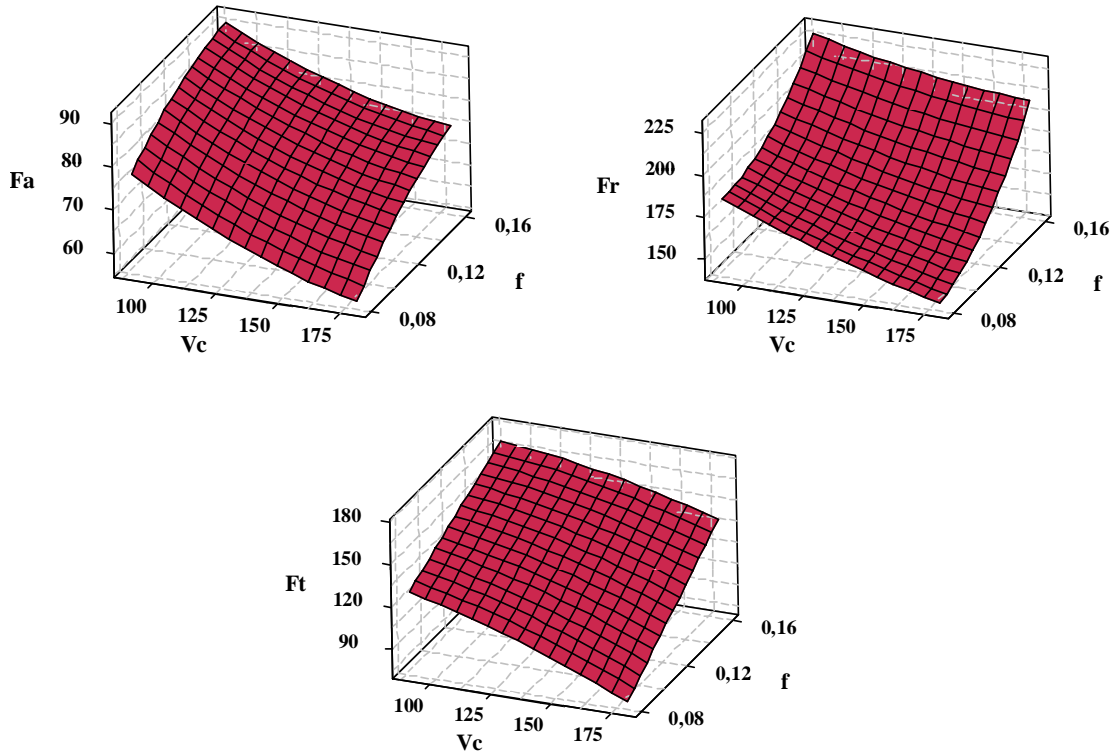
et l'effort axial (F_a). D'autres part, les résultats du tableau IV.6.2 (b) montrent que les interactions $V_c \times f$, $V_c \times ap$ et $f \times ap$ ont des effets statistiquement significatifs sur l'effort radial (F_r). La profondeur de coupe (ap) a l'influence principale sur les composante de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) avec les contributions : 90.22%, 67.64% et 69.44% respectivement, suivi par l'avance de (2.61%, 17.36% et 14.60%) et de la vitesse de coupe de (3.66%, 5.01% et 10.37%).

Notons bien que l'erreur associée à la variance (ANOVA) des tableaux IV.6.2 (a, b et c) pour l'effort axial (F_a) est de 0.62%, pour l'effort radial (F_r) est de 2.25% et pour l'effort tangentiel est de 2.02%. Les interactions pour F_a (V_c^2 , f^2 , ap^2 , $V_c \times f$, $f \times ap$), pour F_r (V_c^2 , f^2 , ap^2 , $V_c \times f$, $V_c \times ap$) et pour F_t (V_c^2 , f^2 , ap^2 , $V_c \times f$, $V_c \times ap$, $f \times ap$) ne présentent pas de signification physique (pourcentage de contribution (%) < à l'erreur associée).

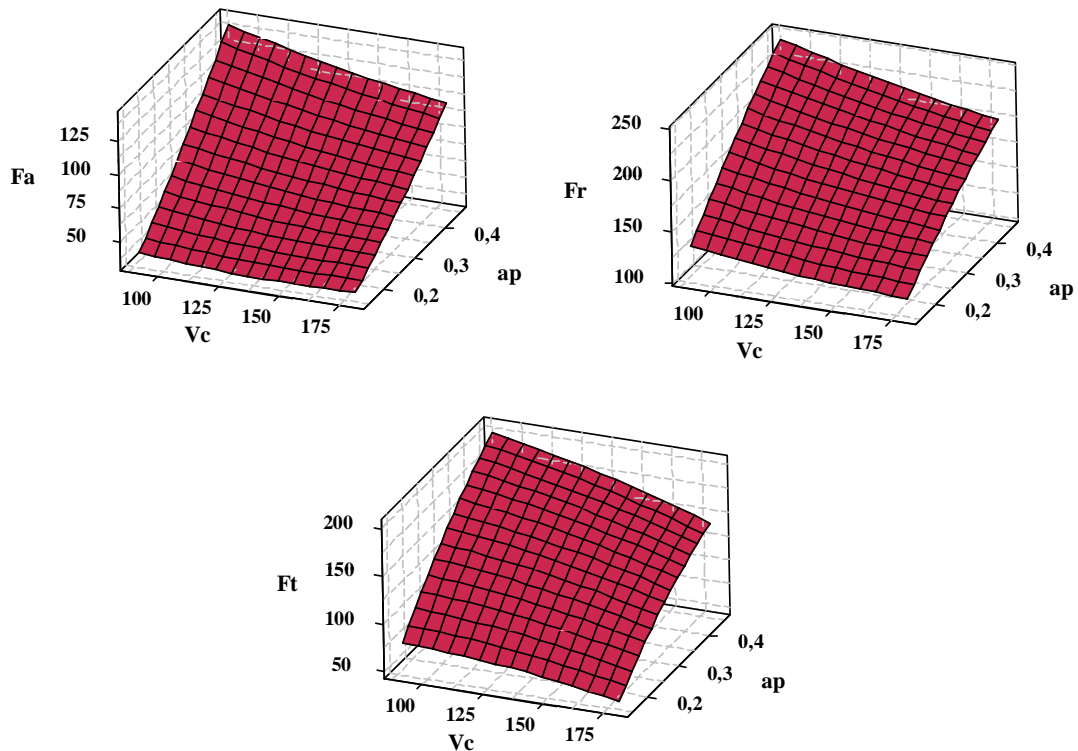
La figure IV.4 (a, b et c) synthétise les effets des interactions des surfaces de réponse 3D estimées pour les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction de la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de coupe. Pour chaque surface de réponse, les variables non représentées sont maintenues constantes (au niveau médian). La figure V.4a, met en évidence l'impact de la vitesse de coupe (V_c) et de l'avance (f) sur les efforts de coupe, alors que la profondeur de coupe (ap) est maintenue au niveau moyenne ($ap = 0.3\text{mm}$). L'effet de l'interaction de la profondeur de coupe (ap) et la vitesse de coupe (V_c) sur les efforts de coupe est présentée sur la figure IV.4b, cependant l'avance (f) est maintenue au niveau médian ($f = 0.12 \text{ mm/tr}$). La figure IV.6c présente la surface de réponse estimée des efforts de coupe par rapport à la profondeur de coupe (ap) et l'avance (f), cependant la vitesse de coupe (V_c) est maintenue au niveau médian ($V_c = 135 \text{ m/min}$). En effet, les courbes en 3D

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

de la surface de réponse montrent que les efforts de coupe sont plus sensibles à l'augmentation de la profondeur de coupe qu'aux autres paramètres (la vitesse de coupe, l'avance par tour) et qu'ils sont inversement proportionnels à l'évolution de la vitesse de coupe.



(a)



(b)

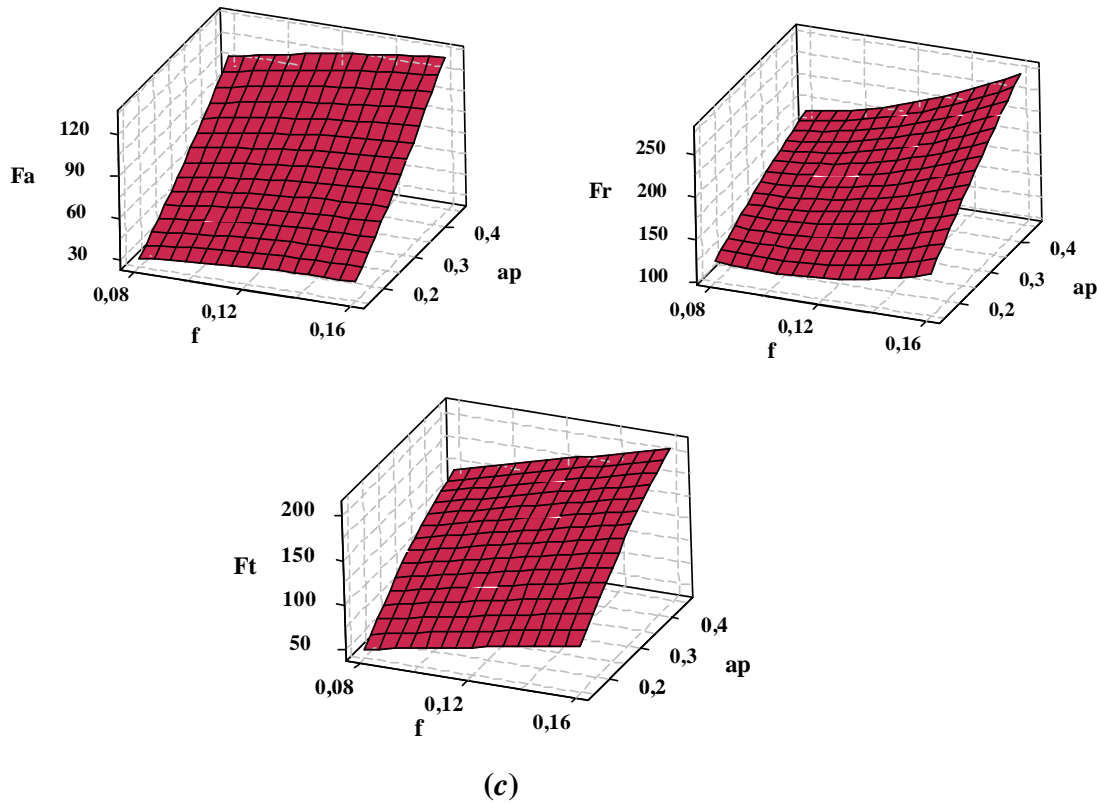


Figure IV.4: surface de réponse 3D pour les effets des interactions (a) la vitesse d’avance et la vitesse de coupe, (b) la profondeur de coupe et la vitesse de coupe et (c) la profondeur de coupe et la vitesse d’avance sur les efforts de coupe pour la CC6050.

D’après cette analyse, la composante de l’effort de coupe radiale (Fr) est habituellement la plus grande suivie par la composante de l’effort de coupe tangentiel (Ft) et en dernier lieu la composante de l’effort de coupe axial (Fa). Ceci peut être justifié par l’augmentation de la résistance à la pénétration du matériau à usiner sous l’effet de l’augmentation de sa dureté après trempe. Les résultats similaires ont été trouvés par plusieurs études [88, 124].

IV.6.6. Régression de la surface de réponse des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction de Vc , f et ap pour la céramique revêtue (CC6050)

L’analyse de régression obtenue à partir de la méthodologie de surface de réponse (MSR) des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction (Vc , f et ap) en incluant tous les paramètres et leurs interactions donne les équations des modèles complets IV (16, 17 et 18). Les coefficients de régression sont mentionnés dans les tableaux IV.1 (a, b et c).

$$Fa = 1.6501 - 2.91 \times 10^{-1} Vc + 228.93 f + 250.13 ap + 1.25 \times 10^{-3} Vc^2 - 1526.74 f^2 + 173.90 ap^2 + 77.35 \times 10^{-1} Vc f - 1.13 Vc ap + 724.86 f ap$$

(IV.16)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

$$Fr = 244.296 - 5.7 \times 10^{-1} Vc - 2297.17 f + 301.37 ap + 1.51 \times 10^{-3} Vc^2 + 7393.06 f^2 - 215.25 ap^2 + 3.17 Vcf - 9.9 \times 10^{-1} Vcap + 2355.56 fap$$

(IV.17)

$$Ft = -40.5591 + 2.4 \times 10^{-1} Vc + 77.26 f + 665.94 ap - 2.23^{-3} Vc^2 - 387.15 f^2 - 414.74 ap^2 + 3.10 Vcf - 1.51 Vcap + 1144.44 fap$$

(IV.18)

Les modèles sont réduits en éliminant les termes qui n'ont aucun effet significatif sur les réponses. Cela permet de déduire les facteurs principaux et les interactions correspondants, et éliminer ceux ayant le moins d'influence sur la qualité du modèle initial. Les modèles réduits des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction des conditions de coupe (Vc , f et ap) donnent les équations des modèles IV (19, 20 et 21).

$$Fa = 1.6501 - 2.91 \times 10^{-1} Vc + 228.93 f + 250.13 ap + 173.90 ap^2 - 1.13 Vcap + 724.86 fap$$

(IV.19)

$$Fr = 244.296 - 5.7 \times 10^{-1} Vc - 2297.17 f + 301.37 ap + 7393.06 f^2 + 3.17 Vcf - 9.9 \times 10^{-1} Vcap + 2355.56 fap$$

(IV.20)

$$Ft = -40.5591 + 2.4 \times 10^{-1} Vc - 77.26 f + 665.94 ap - 414.74 ap^2 + 3.10 Vcf - 1.51 Vcap$$

(IV.21)

L'analyse des variances des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction de (Vc , f et ap) sont calculées afin d'examiner l'hypothèses nulles des régressions qui sont présentées dans les tableaux IV.6 (a , b et c). Les résultats indiquent que les modèles estimées par la procédure de régression de la surface de réponse (MSR) sont significatifs aux niveau ($\alpha = 0.05$).

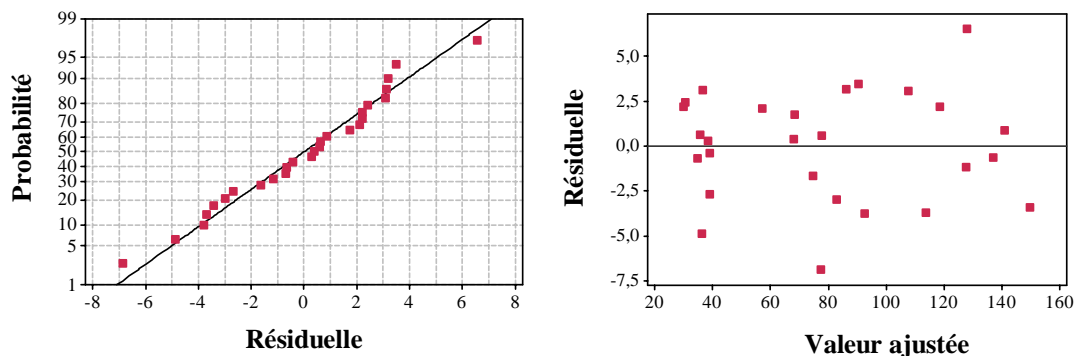
Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | Remarque |
|---|----|---------|----------|--------|---------|------------|
| (a) Analyse de la variance pour le modèle ajusté pour F_a | | | | | | |
| Régression | 9 | 3869.6 | 4299.7 | 302.48 | < 0.000 | Signifiant |
| Erreur résiduelle | 17 | 241.7 | 14.2 | | | |
| Total | 26 | 38938.5 | | | | |
| R^2 | | | | | | 99.4% |
| R^2 ajusté | | | | | | 99.1% |
| (b) Analyse de la variance pour le modèle ajusté pour F_r | | | | | | |
| Régression | 9 | 57435.9 | 6381.8 | 72.80 | < 0.000 | Signifiant |
| Erreur résiduelle | 17 | 1490.3 | 87.7 | | | |
| Total | 26 | 58926.2 | | | | |
| R^2 | | | | | | 97.5% |
| R^2 ajusté | | | | | | 96.1 % |
| (c) Analyse de la variance pour le modèle ajusté pour F_t | | | | | | |
| Régression | 9 | 72935.2 | 8103.9 | 91.25 | < 0.000 | Signifiant |
| Erreur résiduelle | 17 | 1509.7 | 88.8 | | | |
| Total | 26 | 74444.9 | | | | |
| R^2 | | | | | | 98.0% |
| R^2 ajusté | | | | | | 96.9 % |

Tableau IV.6 : Tableau (ANOVA) pour les modèles ajustés des efforts de coupe :
(a) F_a , (b) F_r et (c) F_t pour la céramique revêtue (CC6050)

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) sont $R^2 = 99.4\%$, R^2 ajusté = 99.1% ; $R^2 = 97.5\%$, R^2 ajusté = 96.1% ; $R^2 = 98\%$, R^2 ajusté = 96.9% respectivement. Ces valeurs indiquent que 99.4% , 97.5% et 98% d'une simple variation des composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) sont expliquées par les variables. Les valeurs des coefficients de détermination sont élevées suggérant une haute signification des modèles et un bon ajustement de ces derniers aux valeurs expérimentales.

Pour valider ces modèles figure IV.5 (a et b), il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différences entre les valeurs expérimentales des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) respectivement et celles obtenues à partir des modèles de prédictions).



F_a

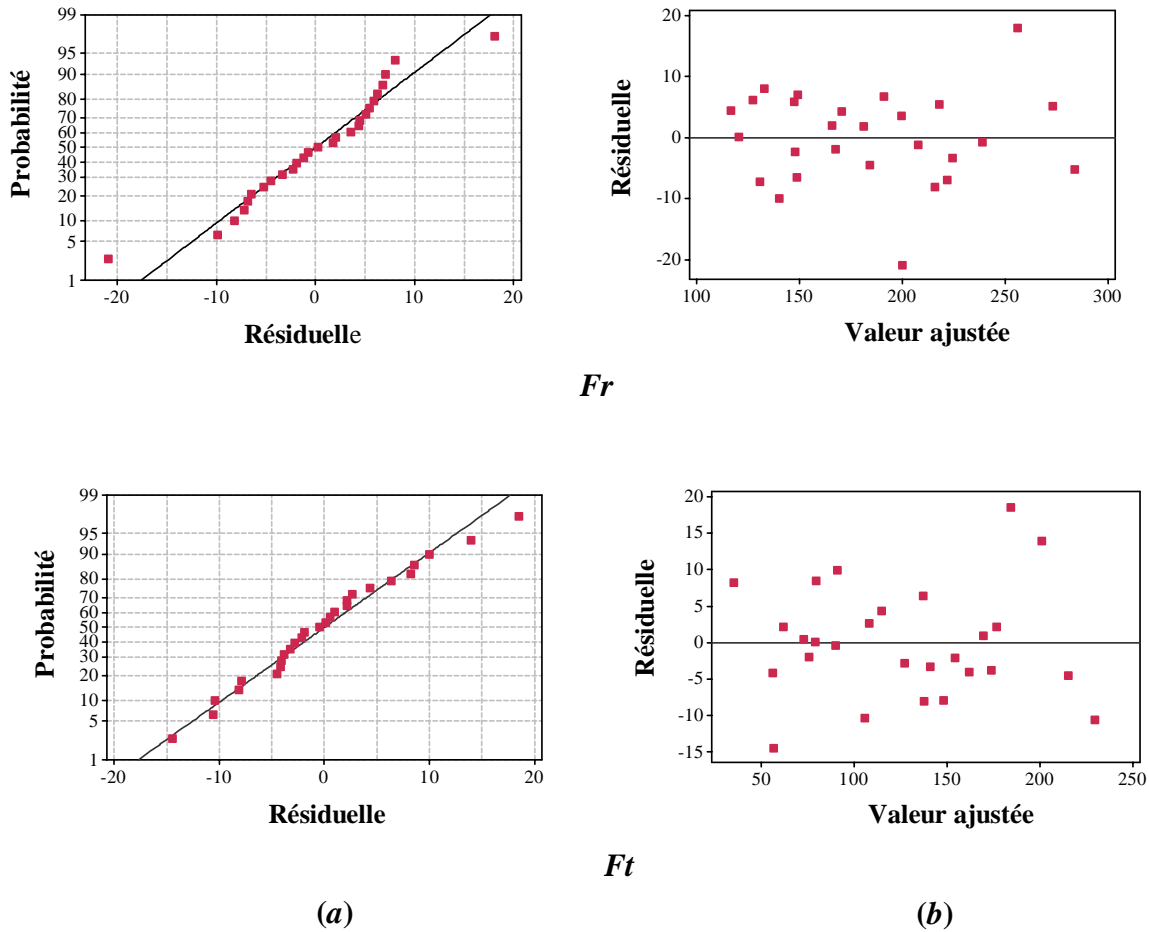


Figure IV.5 : Graphiques des valeurs résiduelles pour l’ajustement des modèles des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t): **(a)** Tests des normalités de la distributions des résidus, **(b)** Valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustées pour la CC6050

La valeur de la probabilité (P) du test de la normalité (d’Anderson - Darl), pour un intervalle de confiance de 95% (α inférieurs à P), prouve que les données montrent une forte tendance à suivre une loi normale (figure IV.5a) [125].

Les tracés des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées sont illustrés dans la (figure IV.5b), l’analyse montre que la structure comparative de distribution des points au dessus et au dessous de l’axe des abscisses (valeurs ajustées) montre que l’erreur est indépendamment distribuée et la variance est constante. Des résultats semblables ont été rapportés par Montgomery et Runger [126].

IV.6.7. Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et estimés pour la céramique revêtue CC6050

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) et celles estimés par les modèles mathématiques (modèles quadratiques) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR) sont présentées dans les tableaux IV.7 (a, b et c) et graphiquement sur les figures IV.6 (a, b et c). D'après les trois figures, les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont proches. Donc on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse donnent des résultats fiables.

| N° essais | Valeurs expérimentales de F_a (N) | Valeurs prédites de F_a (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 134.47 | 127.907 | 4.88 |
| 2 | 110.91 | 107.824 | 2.78 |
| 3 | 89.39 | 86.204 | 3.56 |
| 4 | 36.46 | 39.156 | -7.39 |
| 5 | 34.00 | 34.682 | -2 |
| 6 | 73.02 | 74.661 | -2.24 |
| 7 | 59.43 | 57.315 | 3.55 |
| 8 | 70.02 | 68.279 | 2.48 |
| 9 | 146.38 | 149.809 | -2.34 |
| 10 | 110.01 | 113.717 | -3.36 |
| 11 | 38.78 | 39.189 | -1.05 |
| 12 | 79.88 | 82.864 | -3.73 |
| 13 | 88.80 | 92.581 | -4.25 |
| 14 | 32.08 | 29.874 | 6.87 |
| 15 | 38.81 | 38.522 | 0.74 |
| 16 | 31.55 | 36.418 | -15.42 |
| 17 | 141.94 | 141.078 | 0.60 |
| 18 | 78.39 | 77.792 | 0.76 |
| 19 | 33.09 | 30.666 | 7.32 |
| 20 | 68.59 | 68.209 | 0.55 |
| 21 | 120.84 | 118.626 | 1.83 |
| 22 | 126.42 | 127.579 | -0.91 |
| 23 | 39.68 | 36.553 | 7.88 |
| 24 | 70.50 | 77.381 | -9.76 |
| 25 | 36.44 | 35.830 | 1.67 |
| 26 | 136.35 | 137.001 | -0.47 |
| 27 | 94.07 | 90.586 | 3.70 |

(a)

| N° essais | Valeurs expérimentales de F_r (N) | Valeurs prédites de F_r (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 223.2 | 217.804 | 2.41 |
| 2 | 179.04 | 199.980 | -11.69 |
| 3 | 197.95 | 191.140 | 3.44 |
| 4 | 140.86 | 132.825 | 5.70 |
| 5 | 130.08 | 140.017 | -7.63 |
| 6 | 206.47 | 207.687 | -0.58 |
| 7 | 153.16 | 147.309 | 3.82 |
| 8 | 174.88 | 170.508 | 2.5 |
| 9 | 278.41 | 283.613 | -1.86 |
| 10 | 203.18 | 199.638 | 1.74 |
| 11 | 156.37 | 149.292 | 4.52 |

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| | | | |
|----|--------|---------|-------|
| 12 | 207.49 | 215.622 | -3.91 |
| 13 | 165.58 | 167.487 | -1.15 |
| 14 | 120.97 | 116.556 | 3.64 |
| 15 | 142.18 | 148.667 | -4.56 |
| 16 | 120.97 | 120.783 | 0.15 |
| 17 | 238.14 | 238.880 | -0.31 |
| 18 | 183.05 | 181.256 | 0.98 |
| 19 | 123.62 | 130.803 | -5.81 |
| 20 | 167.67 | 165.669 | 1.19 |
| 21 | 274.23 | 256.131 | 6.59 |
| 22 | 221.16 | 224.519 | -1.51 |
| 23 | 145.37 | 147.690 | -1.59 |
| 24 | 179.65 | 184.198 | -2.53 |
| 25 | 133.63 | 127.417 | 4.64 |
| 26 | 278.17 | 273.058 | 1.83 |
| 27 | 214.85 | 221.740 | -3.20 |

(b)

| N° essais | Valeurs expérimentales de F_t (N) | Valeurs prédites de F_t (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 169.8 | 173.606 | -2.24 |
| 2 | 137.45 | 140.717 | -2.37 |
| 3 | 139.90 | 147.818 | -5.65 |
| 4 | 73.87 | 75.794 | -2.60 |
| 5 | 64.14 | 61.955 | 3.40 |
| 6 | 143.52 | 137.124 | 4.45 |
| 7 | 88.06 | 79.520 | 9.69 |
| 8 | 118.39 | 114.532 | 3.25 |
| 9 | 219.13 | 229.734 | -4.83 |
| 10 | 152.07 | 154.201 | -1.40 |
| 11 | 100.58 | 90.616 | 9.90 |
| 12 | 157.92 | 161.996 | -2.58 |
| 13 | 98.15 | 105.540 | -7.25 |
| 14 | 43.03 | 34.836 | 19.01 |
| 15 | 78.84 | 78.707 | 0.16 |
| 16 | 41.80 | 56.280 | -34.64 |
| 17 | 215.15 | 201.178 | 6.49 |
| 18 | 129.65 | 137.772 | -6.26 |
| 19 | 52.06 | 56.199 | -7.95 |
| 20 | 110.53 | 107.830 | 2.44 |
| 21 | 179.05 | 176.877 | 1.21 |
| 22 | 202.84 | 184.308 | 9.13 |
| 23 | 89.49 | 89.930 | -0.49 |
| 24 | 124.31 | 127.112 | -2.25 |
| 25 | 73.08 | 72.573 | 0.69 |
| 26 | 210.92 | 215.399 | -2.12 |
| 27 | 170.44 | 169.507 | 0.54 |

(c)

Tableau IV.7 : Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et estimés : (a) F_a , (b) F_r et (c) F_t estimées pour la céramique revêtue (CC6050)

L'analyse de cette comparaison, montre que l'erreur minimale pour les trois composantes (F_a , F_r et F_t) est de (-0.47%, 6.59% et 9.90%) est enregistrée aux essais N° (26, 21 et 11) respectivement. L'erreur maximale pour les trois composantes (F_a , F_r et F_t) est de (7.88%, -

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

0.31% et -1.40%) est enregistrée aux essais N° (23, 17 et 10) respectivement. Les figures IV.6 (a, b et c), montrent aussi que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches. Donc on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donnent des résultats fiables.

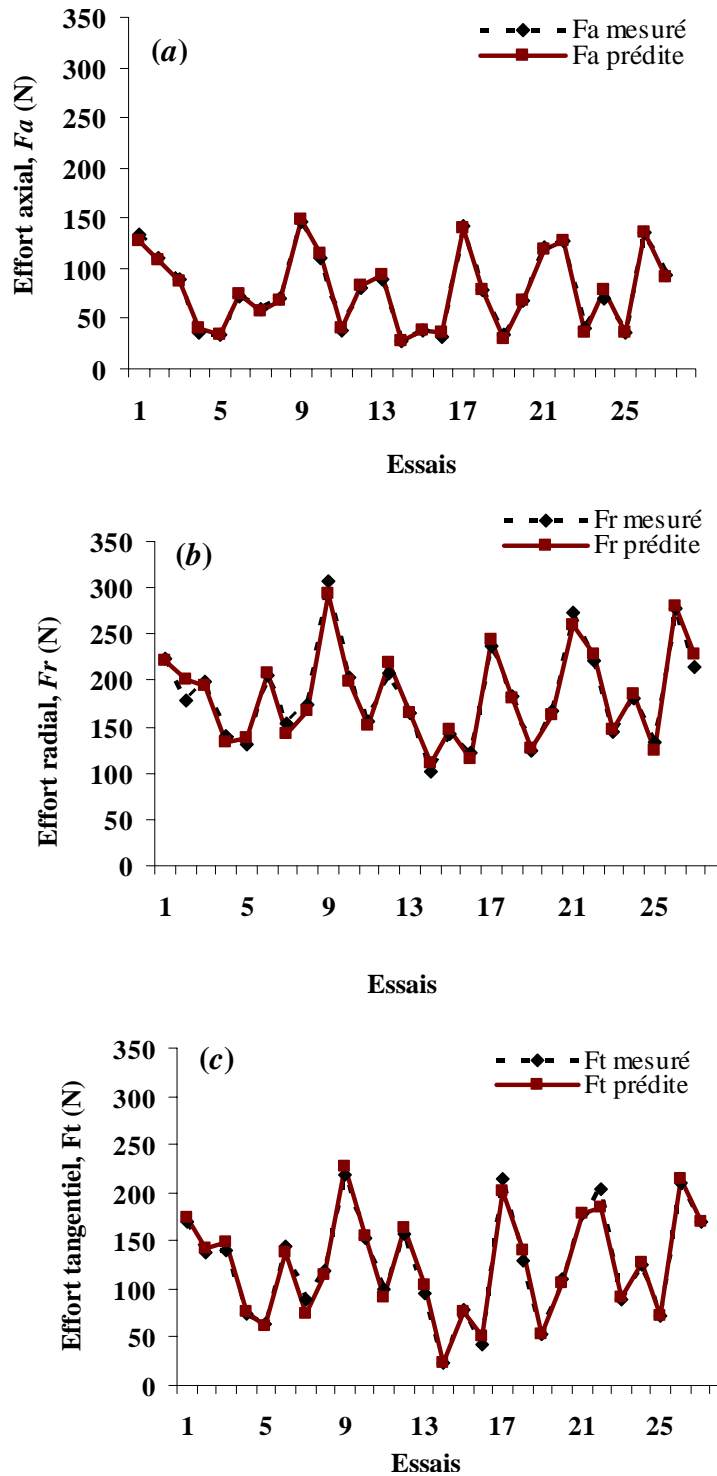


Figure IV.6 : Courbe des efforts de coupe expérimentaux et estimés : (a) F_a , (b) F_r et (c) F_t pour la céramique revêtue (CC6050)

IV.6.8. Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité arithmétique (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) pour la céramique revêtue (CC6050)

Le tableau IV.8, présente les conditions d'optimisations des paramètres de coupe lors de l'usinage dur de l'acier AISI 4140 avec la céramique revêtue (CC6050), sur la rugosité de surface (Ra) et sur les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft). Donc, l'objectif est de choisir un réglage optimal qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF, C'est-à-dire minimisé $F(x)$. La désirabilité est définie par la formule IV.13, (§ IV.5).

| Conditions | Objectifs | Limite inférieure | Limite supérieure |
|--------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|
| Vitesse de coupe, Vc (m/min) | Gamme | 90 | 180 |
| Avance, f (mm/tr) | Gamme | 0.08 | 0.16 |
| Profondeur de coupe, ap (mm) | Gamme | 0.15 | 0.45 |
| Ra (μm) | minimiser | 0.23 | 0.63 |
| Fa (N) | minimiser | 32.08 | 146.38 |
| Fr (N) | minimiser | 120.97 | 278.41 |
| Ft (N) | minimiser | 43.03 | 219.13 |

Tableau IV.8 : Conditions d'optimisations

Le tableau IV.9 et la figure IV.7 montrent les résultats de l'optimisation par la méthodologie de la surface de réponse (MSR) de la rugosité (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft). Les paramètres de coupe optimaux s'avèrent : la vitesse de coupe (Vc) de 180 m/min, l'avance par tour (f) de 0.08 mm/tr et la profondeur de coupe (ap) de 0.15 mm. La rugosité de surface optimisée est $Ra = 0.23 \mu\text{m}$, les efforts de coupe optimisés sont : $Fa = 29.87\text{N}$, $Fr = 116.55\text{N}$ et $Ft = 34.83\text{N}$.

| Vc (m/min) | f (mm/tr) | ap | Rugosité de surface | Les efforts de coupe | | |
|-------------------------------|-------------|------|---------------------|----------------------|----------------|----------------|
| | | | $Ra, \mu\text{m}$ | Fa, N | Fr, N | Ft, N |
| 180 | 0.08 | 0.15 | 0.23 | 29.87 | 116.5 | 34.83 |
| Désirabilité | | | 0.99 | 1 | | |
| Désirabilité composite = 0.99 | | | | | | |

Tableau IV.9 : Résultats de l'optimisation de la rugosité (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) pour la céramique revêtue (CC6050)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

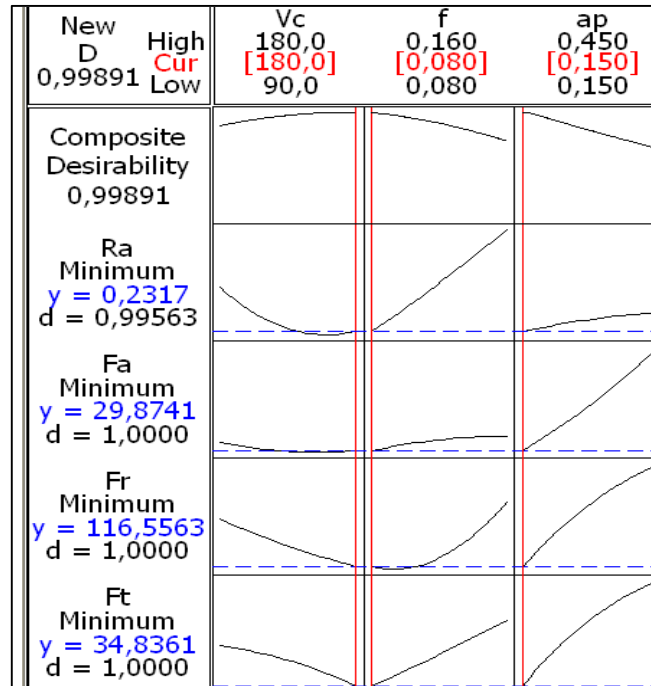


Figure IV.7: Diagramme d'optimisation des réponses multiples de la rugosité (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft)

IV.7. MODÉLISATION DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE ET LES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE COUPE (CAS DE LA CÉRAMIQUE NON REVÊTUE CC650)

IV.7.1. Analyse et discussion des résultats expérimentaux réalisés par la céramique non revêtue (CC650).

Les valeurs de la rugosité (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) présentées dans le tableau IV.10, sont obtenus selon la matrice de planification des expériences L_{27} pour un plan de 27 essais ; $N=3^3$ (plan de Taguchi), lors de tournage dur de l'acier AISI 4140 (57 HRC) par un outil en céramique non revêtue (CC650).

L'analyse des résultats du tableau IV.10 montre que les valeurs maximales de la rugosité (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) sont obtenues pour le régime de coupe suivant : $Vc = 90$ m/min, $f = 0.16$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm (Essai N° 9). Alors que les valeurs minimales sont enregistrées pour les conditions de coupe suivantes : $Vc = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm (Essai N°14). On constate que l'augmentation de la vitesse de coupe (Vc) avec de faibles valeurs de l'avance par tour (f) et la profondeur de coupe (ap) conduisent généralement à une diminution de la rugosité (Ra) et des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft).

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| N° Essais | Facteurs codés | | | Valeurs réelles | | | Réponses (rugosité, efforts de coupe) | | | |
|--------------|----------------|-------|-------|-----------------|-----------------|-------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | $V_c, (m/min)$ | $f_s, (mm/rev)$ | $a_p, (mm)$ | $R_a, (\mu m)$ | $F_a, (N)$ | $F_r, (N)$ | $F_t, (N)$ |
| 1 | -1 | -1 | 1 | 90 | 0.08 | 0.45 | 0.43 | 143.36 | 184.18 | 152.60 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 180 | 0.12 | 0.45 | 0.49 | 130.29 | 175.89 | 126.59 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 90 | 0.12 | 0.30 | 0.66 | 90.70 | 163.12 | 141.67 |
| 4 | -1 | 0 | -1 | 90 | 0.12 | 0.15 | 0.64 | 36.67 | 113.92 | 81.84 |
| 5 | -1 | -1 | -1 | 90 | 0.08 | 0.15 | 0.39 | 34.57 | 84 | 79.84 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 180 | 0.16 | 0.30 | 0.53 | 75.27 | 152.85 | 163.89 |
| 7 | 1 | -1 | 0 | 180 | 0.08 | 0.30 | 0.32 | 58.20 | 104.75 | 100.30 |
| 8 | 0 | -1 | 0 | 120 | 0.08 | 0.30 | 0.35 | 60.42 | 118.30 | 119.37 |
| 9 | -1 | 1 | 1 | 90 | 0.16 | 0.45 | 0.78 | 155.80 | 224.92 | 220.22 |
| 10 | 0 | -1 | 1 | 120 | 0.08 | 0.45 | 0.37 | 118.90 | 164.16 | 134.87 |
| 11 | -1 | 1 | -1 | 90 | 0.16 | 0.15 | 0.72 | 42.22 | 129.14 | 108.60 |
| 12 | 0 | 1 | 0 | 120 | 0.16 | 0.30 | 0.63 | 81.13 | 167.19 | 164.85 |
| 13 | 1 | -1 | 1 | 180 | 0.08 | 0.45 | 0.34 | 114.10 | 143.15 | 128.72 |
| 14 | 1 | -1 | -1 | 180 | 0.08 | 0.15 | 0.30 | 31.96 | 64.90 | 59.03 |
| 15 | 1 | 1 | -1 | 180 | 0.16 | 0.15 | 0.51 | 40.45 | 114.95 | 86.87 |
| 16 | 1 | 0 | -1 | 180 | 0.12 | 0.15 | 0.46 | 33.20 | 105.17 | 66.18 |
| 17 | -1 | 0 | 1 | 90 | 0.12 | 0.45 | 0.68 | 151.36 | 204.25 | 175.56 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 120 | 0.12 | 0.30 | 0.54 | 79.70 | 148.22 | 131.22 |
| 19 | 0 | -1 | -1 | 120 | 0.08 | 0.15 | 0.33 | 33.62 | 77.54 | 67.04 |
| 20 | 1 | 0 | 0 | 180 | 0.12 | 0.30 | 0.47 | 71.39 | 132.84 | 144 |
| 21 | 1 | 1 | 1 | 180 | 0.16 | 0.45 | 0.55 | 130.26 | 214.83 | 180.53 |
| 22 | 0 | 0 | 1 | 120 | 0.12 | 0.45 | 0.56 | 135.84 | 187.27 | 163.25 |
| 23 | 0 | 1 | -1 | 120 | 0.16 | 0.15 | 0.62 | 41.32 | 118.14 | 97.51 |
| 24 | -1 | -1 | 0 | 90 | 0.08 | 0.30 | 0.41 | 60.90 | 123.07 | 125.29 |
| 25 | 0 | 0 | -1 | 120 | 0.12 | 0.15 | 0.51 | 36.65 | 106.09 | 81.05 |
| 26 | 0 | 1 | 1 | 120 | 0.16 | 0.45 | 0.64 | 145.77 | 218.30 | 191.98 |
| 27 | -1 | 1 | 0 | 90 | 0.16 | 0.30 | 0.74 | 95.32 | 179.71 | 172.21 |

Tableau IV.10 : Résultats de la rugosité de surface (R_a) et des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction des paramètres du régime de coupe pour la céramique non revêtue CC650 (le tableau orthogonal standard de Taguchi L_{27} ; $N = 3^3$)

IV.7.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (R_a) : Modèle quadratique complet pour la céramique non revêtue (CC650)

Le tableau IV.11 expose les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) en utilisant la Seq SS pour les tests ainsi que les coefficients de régression estimés. L'analyse est effectuée en utilisant des données non codées. Cette analyse est réalisée pour un niveau de signification $\alpha = 0.05$, c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95% [107].

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| 1 Coefficients de régression estimés pour Ra | | | 2 Analyse de variance pour Ra | | | | | | |
|--|----------|------|---------------------------------|----|----------|----------|--------|--------|-------|
| Terme | Coeff | P | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | -0.04382 | 0.00 | Vc | 1 | 0.111772 | 0.009133 | 67.62 | < 0.00 | 22.02 |
| Vc | -0.00645 | 0.00 | f | 1 | 0.007400 | 0.047711 | 353.27 | < 0.00 | 67.32 |
| F | 14.5089 | 0.00 | ap | 1 | 0.007200 | 0.000114 | 0.85 | 0.371 | 1.45 |
| Ap | 0.14497 | 0.00 | $Vc \times f$ | 1 | 0.011877 | 0.011877 | 87.94 | < 0.00 | 2.34 |
| $Vc \times f$ | -0.01716 | 0.00 | $Vc \times ap$ | 1 | 0.000057 | 0.000057 | 0.42 | 0.52 | 0.01 |
| $Vc \times ap$ | -0.00031 | 0,52 | $f \times ap$ | 1 | 0.000000 | 0.000000 | 0.0000 | 1.00 | 0.00 |
| $f \times ap$ | 1.54E-15 | 1.00 | Vc^2 | 1 | 0.011813 | 0.011813 | 87.47 | < 0.00 | 2.32 |
| Vc^2 | 0.000025 | 0.00 | f^2 | 1 | 0.020807 | 0.020807 | 154.07 | < 0.00 | 4.09 |
| f^2 | -36.8056 | 0.00 | ap^2 | 1 | 0.000007 | 0.000007 | 0.05 | 0.818 | 0.00 |
| ap^2 | 0.04938 | 0.81 | Erreur résiduelle | 17 | 0.002296 | 0.000135 | | | 0.45 |
| | | | Total | 26 | 0.507519 | | | | 100 |

Tableau V.11 : (1) Régression de la surface de réponse, (2) Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité (Ra) en fonction de : Vc , f et ap pour la céramique non revêtue CC650 (Modèle quadratique complet)

L'analyse des résultats montre que l'avance par tour (f), la vitesse de coupe (Vc), la profondeur de coupe (ap), l'interaction à deux niveaux de la vitesse de coupe (Vc^2), la vitesse de coupe et l'avance ($Vc \times f$) ont des effets significatifs sur la rugosité (Ra). L'avance est le facteur le plus influant avec une contribution de 67.32% suivie par la vitesse de coupe avec une contribution de 22.02%. Les interactions (ap^2), ($Vc \times ap$) et ($f \times ap$) ne présentent pas de signification physique car le pourcentage de contribution (%) est < à l'erreur associé. Des résultats similaires ont été rapportés par plusieurs études [115, 127].

Dans l'ordre, pour étudier l'influence des paramètres de coupe (la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de coupe (ap)) sur le critère de la rugosité de surface (Ra), les graphiques des interactions des facteurs pour chaque surface de réponse sont tracés dans la figure IV.8 (a, b et c). Les variables non représentées sont tenues constantes (au niveau médian). La figure IV.8a, met montre l'impact de la vitesse de coupe (Vc) et de l'avance (f) sur le critère de la rugosité surface (Ra), alors que la profondeur de coupe (ap) est maintenue au niveau moyen ($ap = 0.3$ mm). On peut observer à travers cette figure que pour une vitesse de coupe donnée, la rugosité augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance. D'une part, elle a tendance a diminué avec une augmentation de la vitesse de coupe à vitesse d'avance constante. La figure IV.8b, montre l'interaction des effets entre la profondeur de coupe et la vitesse de coupe, tandis que l'avance par tour et maintenue au niveau médian, On constate que l'augmentation de la vitesse de coupe diminue la rugosité de surface. Cependant cette réduction devient de plus en plus minime avec des valeurs de profondeur de coupe faible. Généralement, la profondeur de coupe est le facteur le moins influant sur la rugosité (Ra). Ceci peut être expliqué par l'élargissement da la zone de contact (outil - pièce) et à l'augmentation de la section du copeau qui évacué facilement la quantité de

chaleur générée par la coupe. Des observations semblables ont été également signalées par [32]. La figure IV.8c présente la surface de réponse estimée de la rugosité (Ra) par rapport à la profondeur de coupe et l'avance par tour. Pour une profondeur de coupe donnée, la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de l'avance par tour. D'autre part, la profondeur de coupe a une influence moindre sur la rugosité de surface (Ra).

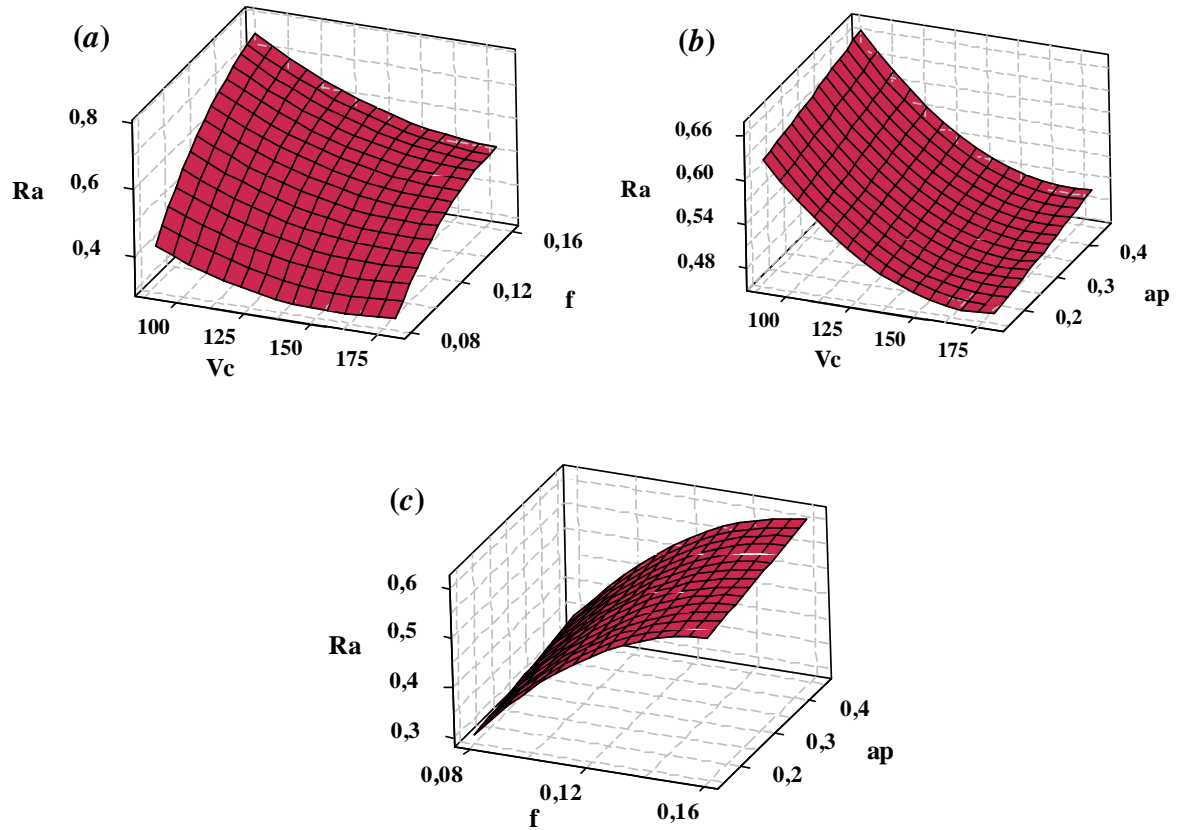


Figure V.8: surface de réponse 3D pour les effets des interactions (a) la vitesse d'avance et la vitesse de coupe, (b) la profondeur de coupe et la vitesse de coupe et (c) la profondeur de coupe et la vitesse d'avance pour la CC650 sur la rugosité de surface.

IV.7.3. Régression de la surface de réponse de la rugosité (Ra) en fonction de V_c , f et ap pour la céramique non revêtue (CC650)

L'analyse de régression obtenue à partir de la méthodologie surface de réponse (MSR) de la rugosité de surface (Ra) en fonction de V_c , f et ap donne l'équation du modèle complet (IV.22). Les coefficients de régression sont mentionnés dans le tableau IV.11a

$$Ra = -0.043822 - 6.45 \times 10^{-3} V_c + 14.50 f + 1.44 \times 10^{-1} ap + 2.51 \times 10^{-5} V_c^2 - 36.80 f^2 + 4.93 ap^2 - 1.71^{-2} V_c f - 3.17 \times 10^{-4} V_c ap + 1.54^{-15} f ap$$

(IV.22)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif sur la réponse (Ra), le modèle réduit donne l'équation (IV.23)

$$Ra = -0.043822 - 6.45 \times 10^{-3} Vc + 14.50f + 1.44 \times 10^{-1} ap + 2.51 \times 10^{-5} Vc^2 - 36.80f^2 - 1.71^{-2} Vcf \quad (IV.23)$$

L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité (Ra) est calculée afin d'examiner l'hypothèse nulle de la régression qui est présentée dans le tableau IV.12. Le résultat indique que le modèle estimé par la procédure de régression de la surface de réponse est significatif au niveau (P valeur < 0.05)

| Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | Remarque |
|-------------------|----|----------|----------|--------|-----------|-------------|
| Régression | 9 | 0.505223 | 0.05613 | 415.66 | < 0.000 | Signifiante |
| Erreur résiduelle | 17 | 0.002296 | 0.000135 | | | |
| Total | 26 | | | | | |
| R^2 | | | | | | 99.5 % |
| R^2 ajustée | | | | | | 99.3 % |

Tableau IV.12: Tableau (ANOVA) du modèle ajusté de la rugosité (Ra) pour la CC650

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de la rugosité (Ra) est : $R^2 = 99.5\%$. Cette valeur indique que 99.5% d'une simple variation du critère de la rugosité (Ra) est expliquée par les variables indépendants. La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une haute signification du modèle et un bon ajustement de ce derniers avec les valeurs expérimentales.

Pour valider ce modèle, il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de la rugosité (Ra) et celle obtenue à partir du modèle de prédiction). La distribution des résidus est déterminée par l'évaluation de l'équation (IV.7) [115]

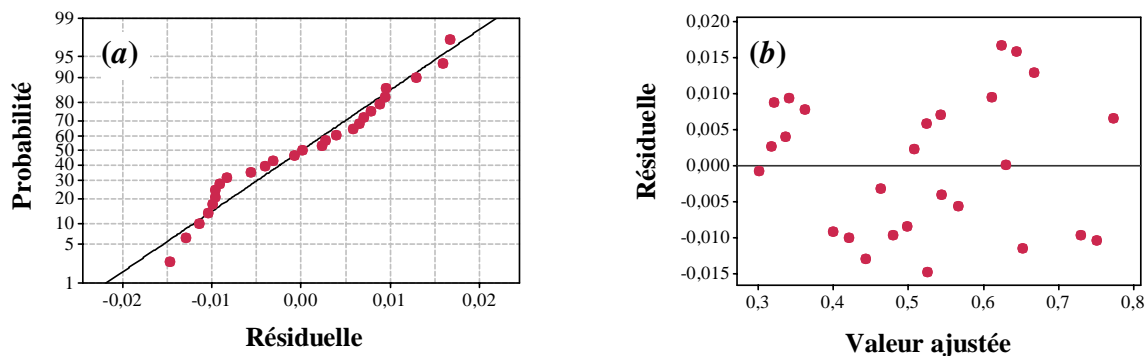


Figure IV.9: Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement du modèle pour la rugosité (Ra) : (a) test de normalité de la distribution des résidus, (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustée pour la (CC650)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

La valeur de la probabilité (P) du test de la normalité (d'Anderson - Darl), pour un intervalle de confiance de 95% (α inférieurs à P), prouve que les données montrent une forte tendance à être une loi normale (figure V.9a) [125].

Les tracés des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées sont illustrés dans la (figure V.9b), l'analyse montre que la structure comparative de distribution des points au dessus et au dessous de l'axe des abscisses (valeurs ajustées) montre que l'erreur est indépendamment distribué et la variance est constante des résultats semblables ont été rapportés par Montgomery et Runger [126].

IV.7.4.Comparaison entre le critère de la rugosité (R_a) expérimentale et estimés pour la céramique non revêtue CC650

La comparaison entre les valeurs expérimentales de la rugosité (R_a) et celles estimées par le modèle est présentée dans le tableau IV.13 et sur la figure IV.10.

| N° essais | Valeurs expérimentales de R_a (N) | Valeurs prédites de R_a (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 0.43 | 0.44296 | -3.01 |
| 2 | 0.49 | 0.49836 | -1.70 |
| 3 | 0.66 | 0.64407 | 2.41 |
| 4 | 0.64 | 0.62328 | 2.61 |
| 5 | 0.39 | 0.39915 | -2.34 |
| 6 | 0.53 | 0.52419 | 1.09 |
| 7 | 0.32 | 0.31728 | 0.85 |
| 8 | 0.35 | 0.34054 | 2.70 |
| 9 | 0.78 | 0.77343 | 0.84 |
| 10 | 0.37 | 0.36213 | 2.12 |
| 11 | 0.72 | 0.72963 | -1.33 |
| 12 | 0.63 | 0.62982 | 0.02 |
| 13 | 0.34 | 0.33601 | 1.17 |
| 14 | 0.30 | 0.30078 | -0.26 |
| 15 | 0.51 | 0.50768 | 0.45 |
| 16 | 0.46 | 0.46312 | -0.67 |
| 17 | 0.68 | 0.66709 | 1.89 |
| 18 | 0.54 | 0.54407 | -0.75 |
| 19 | 0.33 | 0.32117 | 2.67 |
| 20 | 0.47 | 0.47963 | -2.04 |
| 21 | 0.55 | 0.54292 | 1.28 |
| 22 | 0.56 | 0.56566 | -1.01 |
| 23 | 0.62 | 0.61046 | 1.53 |
| 24 | 0.41 | 0.41994 | -2.42 |
| 25 | 0.51 | 0.52470 | -2.88 |
| 26 | 0.64 | 0.65141 | -1.78 |
| 27 | 0.74 | 0.75042 | -1.40 |

Tableau IV.13 : Comparaison entre le critère de la rugosité (R_a) expérimentale et estimée pour la céramique non revêtue (CC650)

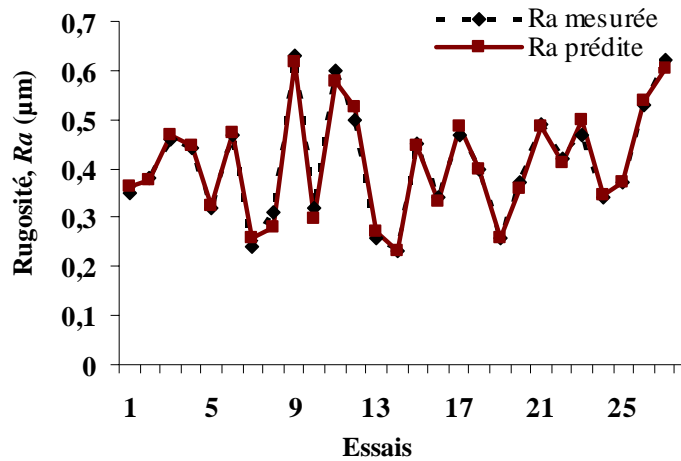


Figure IV.10 : Courbe du critère de la rugosité (Ra) expérimentale et estimée pour la céramique non revêtue (CC650)

L'analyse de cette comparaison montre que l'erreur minimale est de (-0.06%) enregistrée à l'essai N°14, et que l'erreur maximale est de (2.70%) enregistrée à l'essai N° 8. Il est clair d'après cette comparaison que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donne de très bon résultat.

IV.7.5. Analyse de la variance (ANOVA) des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) : Modèle quadratiques complets pour la céramique non revêtue (CC650)

L'analyse des variances pour les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) en utilisant la Seq SS pour les tests ainsi que les coefficients de régression estimés sont présentés sur les tableaux IV.14 (a, b et c). L'analyse est effectuée en utilisant des données non codées pour un niveau de signification $\alpha = 0.05$, c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95% [107].

| 1 Coefficients de régression estimés pour Fa | | | 2 Analyse de variance pour Fa | | | | | | |
|--|----------|------|---------------------------------|----|---------|----------|-------|------|-------|
| Terme | Coeff | P | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | -1.87812 | 0.00 | Vc | 1 | 804.2 | 42.5 | 1.57 | 0.22 | 1.65 |
| Vc | -0.44024 | 0.00 | f | 1 | 1275.3 | 120.5 | 4.44 | 0.05 | 2.63 |
| f | 729.024 | 0.00 | ap | 1 | 44503.4 | 24.9 | 0.92 | 0.35 | 91.80 |
| ap | 67.6558 | 0.00 | $Vc \times f$ | 1 | 16.6 | 16.6 | 0.61 | 0.44 | 0.03 |
| $Vc \times f$ | -0.64206 | 0.44 | $Vc \times ap$ | 1 | 338.3 | 338.3 | 12.47 | < | 0.69 |
| $Vc \times ap$ | -0.77238 | 0.00 | $f \times ap$ | 1 | 83.4 | 83.4 | 3.08 | 0.09 | 0.17 |
| $f \times ap$ | 439.306 | 0.09 | Vc^2 | 1 | 90.6 | 90.6 | 3.34 | 0.08 | 0.18 |
| Vc^2 | 0.00219 | 0.08 | f^2 | 1 | 85.7 | 85.7 | 3.16 | 0.09 | 0.17 |
| f^2 | -2362.15 | 0.09 | ap^2 | 1 | 838.8 | 818.8 | 30.21 | < | 1.73 |
| ap^2 | 519.210 | 0.00 | Erreur résiduelle | 17 | 460.8 | 27.1 | | | 0.95 |
| | | | Total | 26 | 48477.1 | | | | 100 |

(a)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| 1 Coefficients de régression estimés pour Fr | | | 2 Analyse de variance pour Fr | | | | | | |
|--|----------|------|---------------------------------|----|---------|----------|-------|--------|-------|
| Terme | Coeff | P | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | 35.2484 | 0.00 | V_c | 1 | 2066.4 | 162.8 | 5.74 | 0.02 | 4.09 |
| V_c | -0.86106 | 0.00 | f | 1 | 11551 | 262.4 | 9.25 | < 0.00 | 22.88 |
| f | 1075.92 | 0.00 | ap | 1 | 35831.6 | 285.1 | 10.05 | < 0.00 | 70.97 |
| ap | 229.12 | 0.00 | $V_c \times f$ | 1 | 72.8 | 72.8 | 2.57 | 0.12 | 0.14 |
| $V_c \times f$ | 1.34365 | 0.12 | $V_c \times ap$ | 1 | 113.2 | 113.2 | 3.99 | 0.06 | 0.22 |
| $V_c \times ap$ | -0.44674 | 0.06 | $f \times ap$ | 1 | 78.9 | 78.9 | 2.78 | 0.11 | 0.15 |
| $f \times ap$ | 427.361 | 0.11 | V_c^2 | 1 | 89.7 | 89.7 | 3.16 | 0.09 | 0.17 |
| V_c^2 | 0.00218 | 0.09 | f^2 | 1 | 158.2 | 148.2 | 5.22 | 0.03 | 0.34 |
| f^2 | -3106.25 | 0.03 | ap^2 | 1 | 47.6 | 47.6 | 1.68 | 0.21 | 0.09 |
| ap^2 | 125.185 | 0.21 | Erreur résiduelle | 17 | 482.2 | 482.2 | | | 0.95 |
| | | | Total | 26 | 50481.7 | | | | 100 |

(b)

| 1 Coefficients de régression estimés pour Ft | | | 2 Analyse de variance pour Ft | | | | | | |
|--|----------|------|---------------------------------|----|---------|----------|-------|--------|-------|
| Terme | Coeff | P | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | 71.2415 | 0.00 | V_c | 1 | 2152 | 116.8 | 1.62 | 0.22 | 4.54 |
| V_c | -0.72940 | 0.00 | f | 1 | 9781.3 | 181.3 | 2.52 | 0.13 | 20.65 |
| f | -894.500 | 0.00 | ap | 1 | 30947.4 | 2572.2 | 35.68 | < 0.00 | 65.34 |
| ap | 688.192 | 0.00 | $V_c \times f$ | 1 | 0.4 | 0.4 | 0.01 | 0.94 | 0.00 |
| $V_c \times f$ | 0.09861 | 0.94 | $V_c \times ap$ | 1 | 225.0 | 225.0 | 3.12 | 0.09 | 0.47 |
| $V_c \times ap$ | -0.62989 | 0.09 | $f \times ap$ | 1 | 686.1 | 667.1 | 9.25 | < 0.00 | 1.44 |
| $f \times ap$ | 1242.64 | 0.00 | V_c^2 | 1 | 111.2 | 111.2 | 1.54 | 0.23 | 0.23 |
| V_c^2 | 0.00243 | 0.23 | f^2 | 1 | 317.8 | 317.8 | 4.41 | 0.05 | 0.67 |
| f^2 | 4548.61 | 0.05 | ap^2 | 1 | 1935.8 | 1935.8 | 26.86 | < 0.00 | 4.08 |
| ap^2 | -798.32 | 0.00 | Erreur résiduelle | 17 | 1225.4 | 72.1 | | | 2.58 |
| | | | Total | 26 | 47363.4 | | | | 100 |

(c)

Tableau IV.14 : (1) Coefficient de régression de la surface de réponse, (2) Analyse de la variance pour les efforts de coupe : (a) F_a , (b) F_r et (c) F_t en fonction de V_c , f et ap pour la CC650. en utilisant les valeurs non codées (modèles quadratiques complets)

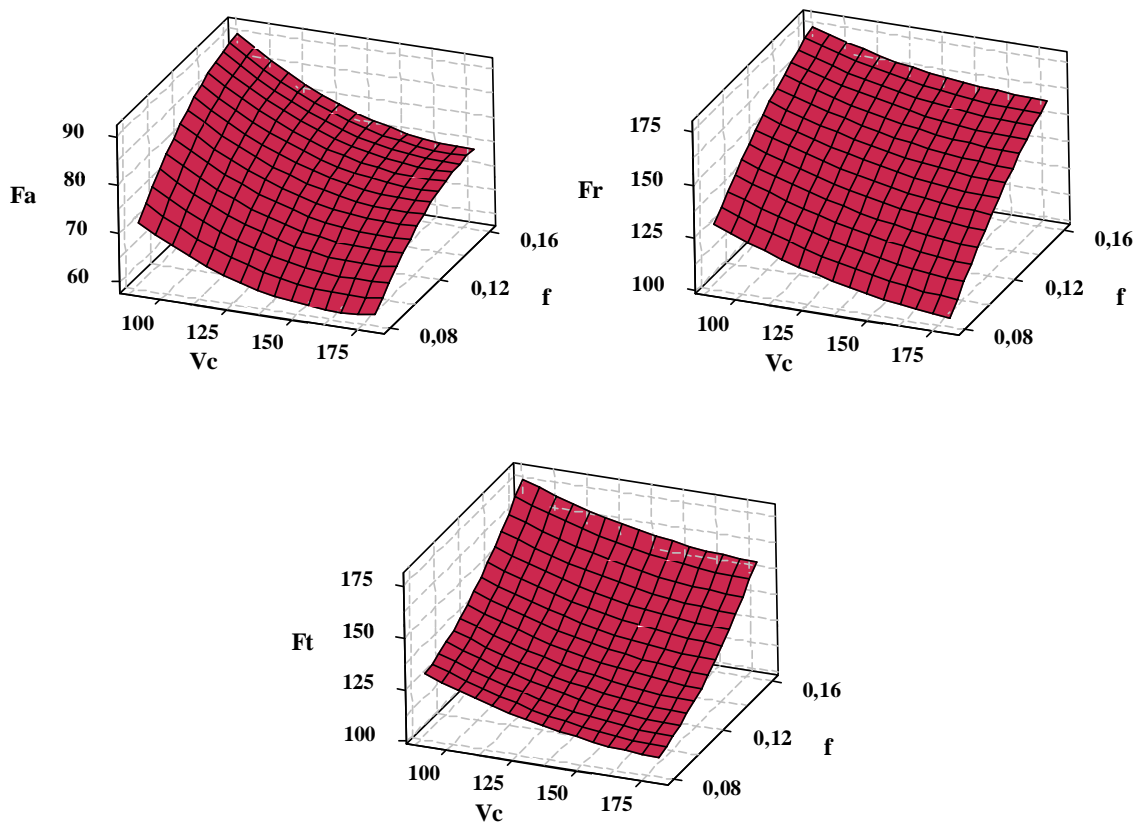
les tableaux IV.14 (a, b et c) prouvent que les effets principaux de la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de coupe (ap) sur les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) ont des effets statistiquement significatifs. Les interactions ap^2 , $V_c \times ap$ ont des effets significatifs sur l'effort de coupe axial (F_a). L'interaction f^2 a un effet significatif sur l'effort de coupe radial (F_r) et les interactions ap^2 et $f \times ap$ ont des effets statistiquement significatifs sur l'effort tangentielle (F_t). La profondeur de coupe à l'influence principale sur les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) avec des contributions de 91.80%, 70.97% et 65.34% respectivement, suivie par l'avance avec des contributions de

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

2.63%, 22.88% et 20.65% respectivement et en dernier lieu par la vitesse de coupe avec des contributions de 1.65%, 4.09% et 4.54%.

On constate que les erreurs associées à la variance (ANOVA) des tableaux IV.14.2 (a, b et c), pour les efforts de coupe sont d'environ (0.95%, 0.95% et 2.58%) respectivement, les interactions Vc^2 , f^2 , $(Vc \times f)$, $(Vc \times ap)$ et $(f \times ap)$ pour l'effort de coupe axial (Fa) et l'effort de coupe tangentielle (Ft), les interactions Vc^2 , f^2 , ap^2 , $(Vc \times f)$, $(Vc \times ap)$ et $(f \times ap)$ pour l'effort de coupe radial (Fr) ne présentent pas de signification physique sur les efforts de coupe (% de contribution < l'erreur associée).

La figure IV.11 (a, b et c) synthétise les effets des interactions des surfaces de réponse 3D estimées pour les composantes de l'effort de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction de la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de coupe. Pour chaque surface de réponse, les variables non représentées sont maintenues constantes (au niveau médian). La figure IV.11a, met en évidence l'impact de la vitesse de coupe (Vc) et de l'avance (f) sur les efforts de coupe, alors que la profondeur de coupe (ap) est maintenue au niveau moyen ($ap = 0.3\text{mm}$). L'effet



(a)

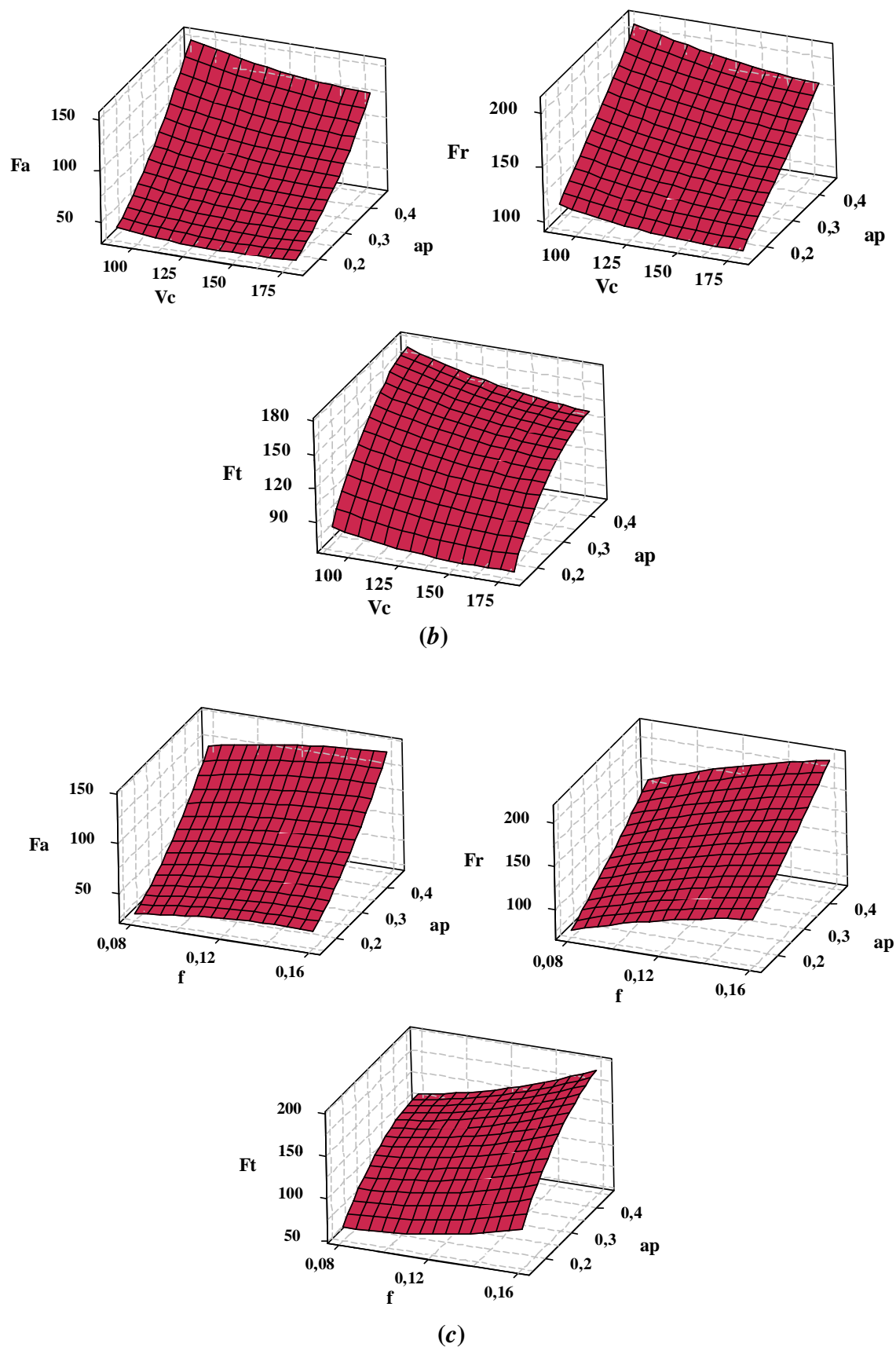


Figure IV.11: surface de réponse 3D pour les effets des interactions (a) la vitesse d'avance et la vitesse de coupe, (b) la profondeur de coupe et la vitesse de coupe et (c) la profondeur de coupe et la vitesse d'avance sur les efforts de coupe pour la CC650.

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

de l'interaction de la profondeur de coupe (ap) et la vitesse de coupe (V_c) sur les efforts de coupe est présentée sur la figure IV.11b, cependant l'avance (f) est maintenue au niveau médian ($f = 0.12$ mm/tr). La figure IV.11c présente la surface de réponse estimée des efforts de coupe par rapport à la profondeur de coupe (ap) et l'avance (f), cependant la vitesse de coupe (V_c) est maintenue au niveau médian ($V_c = 135$ m/min).

On remarque sur les figures IV.11 (a et b), pour une vitesse de coupe donnée les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) augmentent fortement avec l'augmentation de la vitesse d'avance et la profondeur de coupe. La figure IV.11 (c), montre que l'augmentation de la profondeur de coupe entraîne également une augmentation des efforts de coupe cette augmentation est supérieur à celle de l'avance. Donc, la profondeur de coupe est le facteur prépondérant sur les efforts de coupe. Des résultats similaires ont été trouvés par [76, 128 et 95].

V.7.6. Régression de la surface de réponse des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction de V_c , f et ap pour la céramique non revêtue (CC650)

L'analyse de régression obtenue à partir de la méthodologie de surface de réponse (MSR) des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction de (V_c , f et ap) en incluant tous les paramètres et leurs interactions donnent les équations des modèles complets IV (22, 23 et 24). Les équations de régression sont mentionnés dans les tableaux IV.14.1 (a, b et c).

$$F_a = -1.8781 - 4.40 \times 10^{-1} V_c + 729.02 f + 67.65 ap + 2.19 \times 10^{-3} V_c^2 - 2362.15 f^2 + 519.21 ap^2 - 6.42 \times 10^{-1} V_c f - 7.72 \times 10^{-1} V_c ap + 439.30 f ap \quad (\text{V.22})$$

$$F_r = 35.2484 - 8.61 \times 10^{-1} V_c + 1075.92 f + 229.12 ap + 2.18 \times 10^{-3} V_c^2 - 3106.25 f^2 + 125.18 ap^2 + 1.34 V_c f - 4.46 \times 10^{-1} V_c ap + 427.36 f ap \quad (\text{V.23})$$

$$F_t = 71.2415 - 72.94 \times 10^{-1} V_c - 894.50 f + 688.19 ap + 2.43 \times 10^{-3} V_c^2 + 4548.61 f^2 - 798.32 ap^2 + 9.86 \times 10^{-2} V_c f - 6.29 \times 10^{-1} V_c ap + 1242.64 f ap \quad (\text{V.24})$$

En introduisant seulement les facteurs qui ont des effets significatifs sur les réponses (F_a , F_r et F_t), les modèles réduits donnent les équations V (25, 26 et 27).

$$F_a = -1.8781 - 4.40 \times 10^{-1} V_c + 729.02 f + 67.65 ap + 519.21 ap^2 - 7.72 \times 10^{-1} V_c ap \quad (\text{V.25})$$

$$F_r = 35.2484 - 8.61 \times 10^{-1} V_c + 1075.92 f + 229.12 ap - 3106.25 f^2$$

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

(V.26)

$$F_t = 71.2415 - 72.94 \times 10^{-1} V_c - 894.50 f + 688.19 ap - 798.32 ap^2 + 1242.64 fap$$

(V.27)

L'analyse des variances des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction de (V_c , f et ap) sont calculées afin d'examiner l'hypothèse nulle des régressions qui sont présentées dans les tableaux IV.14 (a, b et c). Les résultats indiquent que les modèles estimés par la procédure de régression de la surface de réponse (MSR) sont significatifs aux niveau ($\alpha = 0.05$).

| Source | DF | Seq SS | CM ajust | F | P | Remarque |
|---|----|----------|----------|--------|---------|------------|
| (a) ANOVA table for the fitted models (F_a) | | | | | | |
| Regression | 9 | 48016.3 | 5335.1 | 196.85 | < 0.000 | Signifiant |
| Erreur résiduelle | 17 | 460.8 | 27.1 | | | |
| Total | 26 | 48477.11 | | | | |
| R^2 | | | | | | 99.5% |
| R^2 ajusté | | | | | | 98.31% |
| (b) ANOVA table for the fitted models (F_r) | | | | | | |
| Regression | 9 | 49999.4 | 5555.5 | 195.84 | < 0.000 | Signifiant |
| Erreur résiduelle | 17 | 482.2 | 88.3 | | | |
| Total | 26 | 50481.7 | | | | |
| R^2 | | | | | | 99.0% |
| R^2 ajusté | | | | | | 98.5 % |
| (c) ANOVA table for the fitted models (F_t) | | | | | | |
| Regression | 9 | 46137.9 | 5126.4 | 71.12 | < 0.000 | Signifiant |
| Erreur résiduelle | 17 | 1225.4 | 72.1 | | | |
| Total | 26 | 47363.4 | | | | |
| R^2 | | | | | | 97.4 % |
| R^2 ajustée | | | | | | 96.6% |

Tableau IV.14 : Tableau (ANOVA) pour les modèles ajustés des efforts de coupe :
(a) F_a , (b) F_r et (c) F_t pour la céramique non revêtue (CC650)

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) sont $R^2 = 99.5\%$, R^2 ajusté = 99.31% ; $R^2 = 99\%$, R^2 ajusté = 98.5% ; $R^2 = 97.4\%$, R^2 ajusté = 96% respectivement. Ces valeurs indiquent que 99.4%, 97.5% et 98% d'une simple variation des composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) sont expliquées par les variables. Les valeurs des coefficients de détermination sont élevées suggérant une haute signification des modèles et un bon ajustement de ces derniers aux valeurs expérimentales.

Pour valider ces modèles, il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différences entre les valeurs expérimentales des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) respectivement et celles

obtenues à partir des modèles de prédictions) figure IV.12 (a et b). La distribution des résidus est déterminée par l'évaluation de l'équation (IV.7) [115]

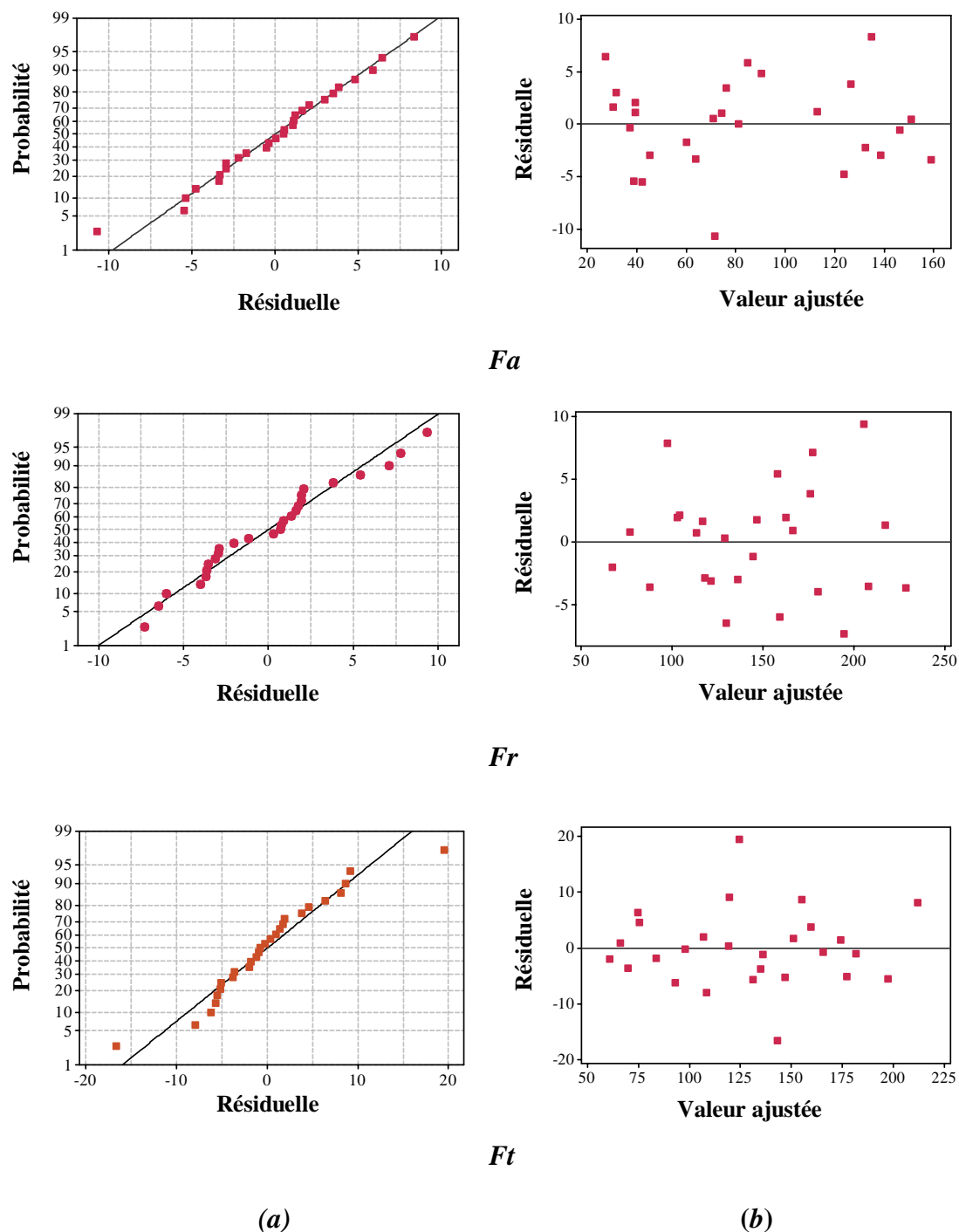


Figure IV.12 : Graphiques des valeurs résiduelles pour l'ajustement des modèles des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t): (a) tests des normalités de la distributions des résidus, (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustées pour la CC650

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

La valeur de la probabilité (P) du test de la normalité (d'Anderson - Darl), pour un intervalle de confiance de 95% (α inférieurs à P), prouve que les données montrent une forte tendance à suivre une loi normale (figure IV.12a) [125].

Les tracés des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées sont illustrés dans la (figure IV.12b), l'analyse montre que la structure comparative de distribution des points au dessus et au dessous de l'axe des abscisses (valeurs ajustées) montre que l'erreur est indépendamment distribué et la variance est constante des résultats semblables ont été rapportés par Montgomery et Runger [126].

IV.7.7.Comparison entre les efforts de coupe expérimentaux et estimés pour la céramique non revêtue CC650

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) et celles estimés par les modèles mathématiques (régressions quadratiques) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR) sont présentées dans les tableaux IV.15 (a, b et c) et graphiquement sur les figures IV.13 (a, b et c). L'analyse de cette comparaison, des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) montrent que l'erreur minimale est de (-0.36%, -0.02% et -0.24%) enregistrées aux essais N° (26, 23 et 23) respectivement, et que l'erreur maximale est de (19.10%, 7.42% et 13.56%) enregistrées aux essais N° (19, 16 et 20) respectivement.

| N° essais | Valeurs expérimentales de F_a (N) | Valeurs prédites de F_a (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 143.36 | 135.012 | 5.82 |
| 2 | 130.29 | 126.469 | 2.93 |
| 3 | 90.70 | 84.831 | 6.47 |
| 4 | 36.67 | 42.156 | -14.96 |
| 5 | 34.57 | 31.568 | 8.68 |
| 6 | 75.27 | 74.210 | 1.40 |
| 7 | 58.20 | 59.943 | -2.99 |
| 8 | 60.42 | 63.761 | -5.52 |
| 9 | 155.80 | 159.172 | -2.16 |
| 10 | 118.90 | 123.690 | -4.02 |
| 11 | 42.22 | 45.185 | -7.02 |
| 12 | 81.13 | 81.109 | 0.02 |
| 13 | 114.10 | 112.920 | 1.03 |
| 14 | 31.96 | 30.331 | 5.09 |
| 15 | 40.45 | 39.325 | 2.78 |
| 16 | 33.20 | 38.608 | -16.28 |
| 17 | 151.36 | 150.871 | 0.32 |
| 18 | 79.70 | 76.215 | 4.37 |
| 19 | 33.62 | 27.197 | 19.10 |
| 20 | 71.39 | 70.856 | 0.74 |
| 21 | 130.26 | 132.458 | -1.68 |
| 22 | 135.84 | 138.779 | -2.16 |
| 23 | 41.32 | 39.274 | 4.95 |
| 24 | 60.90 | 71.608 | -17.58 |
| 25 | 36.65 | 37.015 | -0.99 |
| 26 | 145.77 | 146.309 | -0.36 |
| 27 | 95.32 | 90.497 | 5.05 |

(a)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| N° essais | Valeurs expérimentales de F_r (N) | Valeurs prédites de F_r (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 184.18 | 177.089 | 3.85 |
| 2 | 175.89 | 179.888 | -2.27 |
| 3 | 163.12 | 157.692 | 3.32 |
| 4 | 113.92 | 113.212 | 0.62 |
| 5 | 84 | 87.624 | -4.31 |
| 6 | 152.85 | 158.855 | -3.92 |
| 7 | 104.75 | 102.816 | 1.84 |
| 8 | 118.30 | 116.694 | 1.35 |
| 9 | 224.92 | 228.583 | -1.62 |
| 10 | 164.16 | 162.233 | 1.17 |
| 11 | 129.14 | 128.860 | 0.21 |
| 12 | 167.19 | 166.284 | 0.54 |
| 13 | 143.15 | 144.335 | -0.82 |
| 14 | 64.90 | 66.931 | -3.12 |
| 15 | 114.95 | 117.842 | -2.51 |
| 16 | 105.17 | 97.356 | 7.42 |
| 17 | 204.25 | 207.806 | -1.74 |
| 18 | 148.22 | 146.459 | 1.18 |
| 19 | 77.54 | 76.788 | 0.96 |
| 20 | 132.84 | 135.806 | -2.23 |
| 21 | 214.83 | 205.502 | 4.34 |
| 22 | 187.27 | 194.562 | -3.89 |
| 23 | 118.14 | 121.249 | -0.02 |
| 24 | 123.07 | 129.540 | -5.25 |
| 25 | 106.09 | 103.989 | 1.98 |
| 26 | 218.30 | 216.951 | 0.61 |
| 27 | 179.71 | 175.905 | 2.11 |

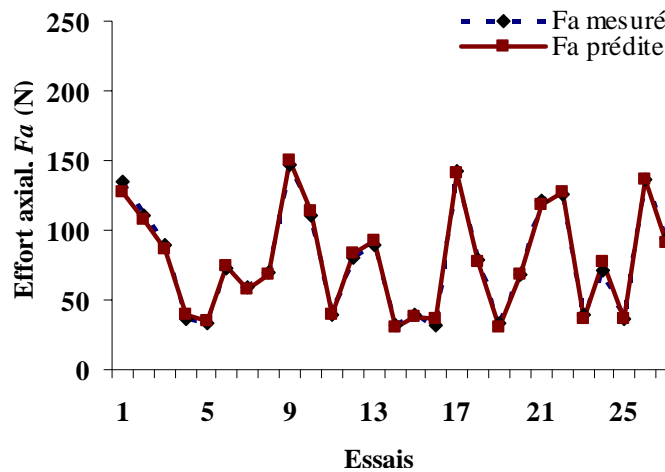
(b)

| N° essais | Valeurs expérimentales de F_t (N) | Valeurs prédites de F_t (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 152.60 | 150.832 | 1.15 |
| 2 | 126.59 | 143.247 | -13.15 |
| 3 | 141.67 | 146.882 | -3.67 |
| 4 | 81.84 | 83.676 | -2.24 |
| 5 | 79.84 | 75.256 | 5.74 |
| 6 | 163.89 | 155.255 | 5.26 |
| 7 | 100.30 | 108.238 | -7.91 |
| 8 | 119.37 | 119.034 | 0.28 |
| 9 | 220.22 | 212.050 | 3.70 |
| 10 | 134.87 | 136.025 | -0.85 |
| 11 | 108.60 | 106.651 | 1.79 |
| 12 | 164.85 | 165.577 | -0.44 |
| 13 | 128.72 | 119.560 | 7.11 |
| 14 | 59.03 | 60.991 | -3.23 |
| 15 | 86.87 | 93.096 | -7.16 |
| 16 | 66.18 | 69.766 | -5.41 |
| 17 | 175.56 | 174.163 | 0.79 |
| 18 | 131.22 | 135.027 | -2.90 |
| 19 | 67.04 | 66.118 | 1.37 |
| 20 | 144 | 124.469 | 13.56 |
| 21 | 180.53 | 181.488 | -0.53 |
| 22 | 163.25 | 159.474 | 2.31 |
| 23 | 97.51 | 97.750 | -0.24 |
| 24 | 125.29 | 131.006 | -4.56 |
| 25 | 81.05 | 74.656 | 7.88 |
| 26 | 191.98 | 197,480 | -2.86 |
| 27 | 172.21 | 177,313 | -2.96 |

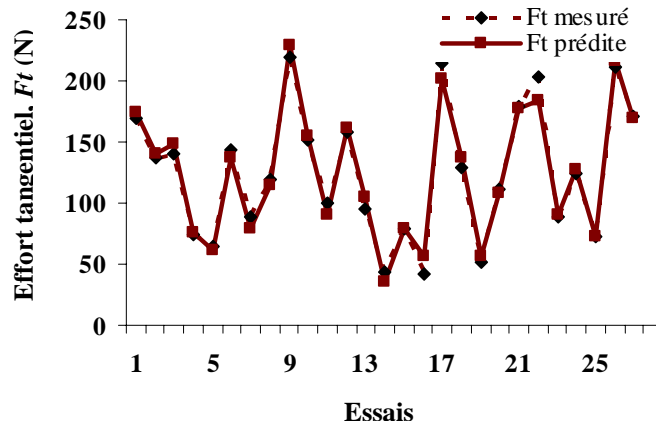
(c)

Tableau V.15 : Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et estimés : (a) F_a , (b) F_r et (c) F_t estimées pour la céramique non revêtue (CC650)

Les figures IV.13 (a, b et c), montrent aussi que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches. Donc on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donnent des résultats fiables.



(a)



(b)

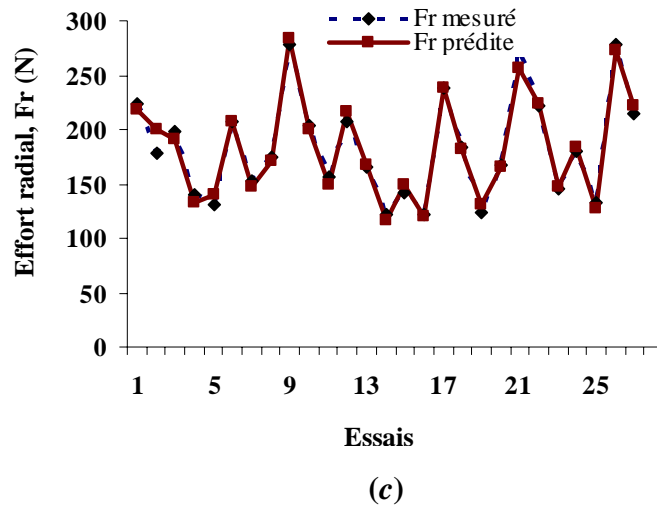


Figure IV.6 : Courbe des efforts de coupe expérimentaux et estimés : (a) F_a , (b) F_r et (c) F_t pour la céramique revêtue (CC6050)

IV.7.8. Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité arithmétique (R_a) et les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) pour la céramique non revêtue (CC650)

Le tableau IV.16, présente les conditions d'optimisations des paramètres de coupe lors de l'usinage dur de l'acier AISI 4140 avec la céramique non revêtue (CC650), sur la rugosité de surface (R_a) et sur les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t). Donc, l'objectif est de choisir un réglage optimal qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF, C'est-à-dire minimisé $F(x)$. La désirabilité est définie par la formule IV.13, (§ IV.5).

| Conditions | Objectifs | Limite inférieure | Limite supérieure |
|---------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|
| Vitesse de coupe, V_c (m/min) | Gamme | 90 | 180 |
| L'avance par tour, f (mm/tr) | Gamme | 0.08 | 0.16 |
| Profondeur de coupe, a_p (mm) | Gamme | 0.15 | 0.45 |
| R_a (μm) | Minimiser | 0.30 | 0.78 |
| F_a (N) | Minimiser | 31.96 | 155.80 |
| F_r (N) | Minimiser | 64.90 | 224.92 |
| F_t (N) | Minimiser | 59.03 | 220.22 |

Tableau IV.16 : Conditions d'optimisations

Le tableau IV.17, présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) de la rugosité (R_a) et les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) par ordre décroissant de niveau de désirabilité. La rugosité de surface optimisée (R_a) est (0.30 à 0.497) μm et les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) optimisées sont [(30.33 à 70.01) N; (66.60 à 143.99) N, et de (60.99 to 131.28)] N, respectivement. Donc, le régime de coupe optimal choisi est de : $V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.15$ mm.

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des condition de coupe pour deux céramique revêtue et non revêtue

| Essais N° | Vc (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) | Efforts de coupe | | | Rugosité | |
|--------------|---------------|--------------|------------|------------------|--------|--------|----------|--------------|
| | | | | Fa, N | Fr, N | Ft, N | Ra, μm | Desirability |
| 1 | 90 | 0.08 | 0.16 | 34.55 | 91.60 | 82.53 | 0.401 | 0.850 |
| 2 | 90 | 0.08 | 0.17 | 35.89 | 93.31 | 85.50 | 0.402 | 0.850 |
| 3 | 90 | 0.08 | 0.22 | 47.54 | 106.69 | 106.03 | 0.409 | 0.771 |
| 4 | 160.21 | 0.12 | 0.30 | 70.01 | 143.29 | 131.28 | 0.497 | 0.575 |
| 5 | 180 | 0.16 | 0.15 | 39.32 | 117.84 | 93.09 | 0.508 | 0.728 |
| 6 | 180 | 0.08 | 0.15 | 30.33 | 66.93 | 60.99 | 0.30 | 0.993 |

Tableau IV.17 : Résultats de l'optimisation de la rugosité (*Ra*) et les efforts de coupe (*Fa*, *Fr* et *Ft*) pour la céramique non revêtue (CC650)

IV.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, l'application de la méthodologie de surface de réponse (MSR) en tournage dur de l'acier AISI 4140 avec la céramique revêtue (CC6050) et la céramique non revêtue (CC650) ont permis d'obtenir à la fois des modèles mathématiques pour la rugosité (*Ra*) et les efforts de coupe (*Fa*, *Fr* et *Ft*) en fonction des paramètres de coupe. Les valeurs optimales des paramètres d'usinage ont été étudiées et calculées. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- En règle générale, plus la dureté du matériau est élevée, l'effort radial présente des valeurs plus élevées suivi par l'effort tangentielle et en dernier lieu l'effort axial.
- Les composantes de l'effort de coupe augmentent presque linéairement avec l'augmentation de la vitesse d'avance et la profondeur de coupe.
- La vitesse d'avance et la profondeur de coupe ont la plus grande influence sur la rugosité de la surface et les efforts de coupe, respectivement.
- L'analyse de la variance (ANOVA), cas de la céramique revêtue (CC6050) montre que l'avance est le facteur le plus dominant sur la rugosité de surface et elle représente une contribution de 77.92%, suivie de la vitesse de coupe avec une contribution de 15.47% et de la profondeur de coupe de 2.35%. Les efforts de coupe (*Fa*, *Fr* et *Ft*) sont fortement affectés par la profondeur de coupe et représentent des contributions de 90.22%, 67.64% et 69.44%, respectivement.
- L'analyse de la variance (ANOVA), cas de la céramique non revêtue (CC650) montre que l'avance a une plus grande influence sur la rugosité de surface et elle explique une contribution de 67.32%, suivie de la vitesse de coupe de 22.02%, et de la profondeur de coupe de 1.45%. Les efforts de coupe (*Fa*, *Fr* et *Ft*) sont fortement affectés par la profondeur de coupe et représentent des contributions de 91.80%, 70.97% et 65.34%, respectivement.
- Les efforts de coupe générés par la céramique revêtue (CC6050) sont plus élevés que ceux générés par la céramique non revêtu (CC650). Les rugosités obtenues par la céramique revêtue (CC6050) sont bien meilleures que ceux générés par la céramique non revêtue (CC650) (Le revêtement a un impact positif sur l'état de surface généré lors de la coupe)

Chapitre IV : Modélisation et optimisation de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe pour deux céramiques revêtue et non revêtue

- Les qualités des états de surface obtenues à l'aide de la céramique revêtue (CC6050) et la céramique non revêtue (CC650) sont comparables à ceux obtenues en rectification même avec des avances et des profondeurs de coupe élevées.
- Les régressions quadratiques ont été utilisées pour prédire la rugosité de surface et les efforts de coupe.
- Les valeurs des coefficients de détermination trouvés sont élevées suggérant une haute signification des modèles et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.
- Le régime de coupe optimal trouvé dans cette étude pour les deux céramiques est comme suite : $V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm. Les réponses optimisées :
Cas de la céramique revêtue (CC6050) sont $Ra = 0.23\mu\text{m}$; $Fa = 29.87\text{N}$, $Fr = 116.55\text{N}$ et $Ft = 34.83\text{N}$.
Cas de la céramique non revêtue (CC650) sont $Ra = 0.30\mu\text{m}$; $Fa = 30.33\text{N}$, $Fr = 69.93\text{N}$ et $Ft = 60.99\text{N}$.

CHAPITRE V

Modélisation de la rugosité de surface
et les efforts de coupe en fonction des
conditions de coupe et la géométrie
de l'outil

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

V.1.INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse appliquée à un plan d'expérience de Taguchi afin de faire une étude sur l'effet des cinq paramètres d'entrée à savoir, les éléments du régime de coupe [vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), profondeur de coupe (ap)] et la géométrie de l'outil [angle de direction principal (χ_r) et le rayon du bec de l'outil (r)] sur les différentes réponses (la rugosité et l'effort de coupe). Le traitement des résultats permettra de faire une modélisation du processus de coupe en tenant compte des conditions de coupe et la géométrie de l'outil.

Le plan de Taguchi choisi permet de réduire le nombre d'essais par rapport au plan factoriel complet (PFC). Mais ce dernier doit être choisi judicieusement afin de permettre d'obtenir le maximum de renseignements. Dans notre cas, l'attribution des facteurs « paramètres de coupe, géométrie de l'outil » et leurs niveaux ont été faites selon le tableau II.7 et le plan de Taguchi tableau II.10.

V.2. DÉTERMINATION DU MODÈLE DE LA RUGOSITÉ R_a EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE COUPE ET LA GÉOMÉTRIE DE L'OUTIL

V.2.1.Résultats des essais de la rugosité selon le plan de Taguchi

Dans le tableau V.1, sont présentées les valeurs expérimentales du critère de la rugosité arithmétique (R_a). Ces valeurs sont obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de 18 essais avec cinq facteurs de 2 et 3 niveaux (plan de Taguchi). Le matériau de coupe utilisé dans ce plan est la céramique non revêtue (CC650) à différents rayons du bec de l'outil ($r = 0.8, 1.2$ et 1.6) mm.

La remarque principale quand peut déduire à travers la lecture de ce tableau, c'est que les états de surfaces générés par l'angle de direction principale ($\chi_r = 45^\circ$) sont bien meilleurs que ceux générés par l'angle de direction ($\chi_r = 75^\circ$). Ceci peut être justifié par l'augmentation de la longueur de contact ($\chi_r = 45^\circ$) entre l'outil et la pièce, réduisant ainsi la pression d'usinage dans la matière, On peut dès alors envisager que cela modifié la répartition des contraintes qui provoquent la rupture du matériau usiné et améliore les conditions d'évacuations de la chaleur de la zone de coupe. Par contre l'élévation de la température dans la zone de coupe entraînant une mauvaise évacuation de la chaleur (concentration de contrainte dans la zone de coupe suite à la diminution de la longueur de contact ($\chi_r = 75^\circ$)).

On constate aussi que, l'amélioration de la rugosité arithmétique (R_a) obtenu par un rayon à bec arrondi $r = 1.6$ mm est plus importante par rapport à $r = 1.2$ mm et $r = 0.8$ mm. Ceci est justifiée que le bec arrondi intervient dans le grand échauffement et dans l'évacuation de la chaleur de la zone de coupe, supportant des contraintes d'usinages dues à la dureté du matériau de la pièce usinée. Le grand rayon du bec écrase les aspérités laissées par l'usinage, et de cette façon il contribue à diminuer la rugosité et améliorer l'état de surface [129].

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

| N° Essai | χ_r (°) | V_c (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) | r (mm) | Ra (µm) |
|----------|--------------|---------------|-------------|-----------|----------|-----------|
| 1 | 75 | 100 | 0.08 | 0.1 | 0.8 | 0.3 |
| 2 | 75 | 100 | 0.12 | 0.2 | 1.2 | 0.72 |
| 3 | 75 | 100 | 0.16 | 0.3 | 1.6 | 0.99 |
| 4 | 75 | 150 | 0.08 | 0.1 | 1.2 | 0.33 |
| 5 | 75 | 150 | 0.12 | 0.2 | 1.6 | 0.56 |
| 6 | 75 | 150 | 0.16 | 0.3 | 0.8 | 0.75 |
| 7 | 75 | 200 | 0.08 | 0.2 | 0.8 | 0.37 |
| 8 | 75 | 200 | 0.12 | 0.3 | 1.2 | 0.45 |
| 9 | 75 | 200 | 0.16 | 0.1 | 1.6 | 0.75 |
| 10 | 45 | 100 | 0.08 | 0.3 | 1.6 | 0.36 |
| 11 | 45 | 100 | 0.12 | 0.1 | 0.8 | 0.53 |
| 12 | 45 | 100 | 0.16 | 0.2 | 1.2 | 0.67 |
| 13 | 45 | 150 | 0.08 | 0.2 | 1.6 | 0.35 |
| 14 | 45 | 150 | 0.12 | 0.3 | 0.8 | 0.48 |
| 15 | 45 | 150 | 0.16 | 0.1 | 1.2 | 0.89 |
| 16 | 45 | 200 | 0.08 | 0.3 | 1.2 | 0.29 |
| 17 | 45 | 200 | 0.12 | 0.1 | 1.6 | 0.65 |
| 18 | 45 | 200 | 0.16 | 0.2 | 0.8 | 0.79 |

Tableau V.1. Résultats de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres du régime de coupe (V_c, f , et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r, r)

L'analyse des résultats de ce tableau montre que la valeur minimale de la rugosité de surface (Ra) a été trouvée suivant les conditions de l'essai N° 16, c'est-à-dire pour les conditions de coupe suivante (45° , 200 m/min, 0.08 mm/tr, 0.3 mm et 1.2 mm), et la valeur maximale a été observée avec l'essai N° 3 (75° , 100 m/min, 0.16 mm/tr, 0.3 mm, 1.6 mm).

V.2.2. Analyse de la variance pour la rugosité Ra : Modèle linéaire complet

L'analyse de la variance pour le critère de la rugosité (Ra) ainsi que les coefficients de régression estimés sont présentées sur le tableau V.2. L'analyse est effectuée en utilisant des données non codées. Dans ce tableau sont mentionnés les valeurs des degrés de liberté (DL), la somme des carrés des écarts (Seq SS), les carrés moyens (CM ajust), la probabilité (Prob) et la contribution en pourcentage (PC%) de chaque facteur et des différentes interactions.

L'analyse ANOVA présentée sur le tableau V.2, montre que les termes $V_c, f, ap, \chi_r, r, \chi_r \times V_c, \chi_r \times ap, V_c \times ap, V_c \times r, f \times ap$ ont un effet significatif sur le critère de la rugosité Ra . Le facteur déterminant de la rugosité (Ra) et la vitesse d'avance (f) [94, 95], ce qui explique une contribution de 84.39%. Dans le même contexte, l'interaction ($\chi_r \times V_c$) vient en deuxième position avec un taux de contribution de 3.89%, le rayon du bec (r) de 2.12%, ($f \times ap$) de 1.68%, ($\chi_r \times ap$) de 1.55%, ($\chi_r \times r$) de 1.40%, l'angle de direction principale (χ_r) de 0.30%, la vitesse de coupe (V_c) de 0.75% et la profondeur de coupe (ap) de 0.17%. Il ressort d'après cette analyse que l'effet de la profondeur de coupe (ap) sur la rugosité est faible.

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

| Coefficients de régression estimés pour Ra | | Analyse de la variance pour Ra | | | | | | |
|--|--------------|----------------------------------|----|--------|----------|------|------|-------|
| Termes | Coeff | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | -0.547755 | χ_r | 1 | 0.0024 | 0,0008 | 1.19 | 0.39 | 0.30 |
| χ_r | -0.005455 | Vc | 1 | 0.0060 | 0,0075 | 10.2 | 0.08 | 0.75 |
| Vc | 0.010644 | f | 1 | 0.6721 | 0.0872 | 119. | 0.00 | 84.39 |
| f | -0.272959 | ap | 1 | 0.0014 | 0.0066 | 9.04 | 0.09 | 0.17 |
| ap | 0.353061 | r | 1 | 0.0169 | 0.0002 | 0.34 | 0.61 | 2.12 |
| r | 0.566497 | $\chi_r \times Vc$ | 1 | 0.0310 | 0.0363 | 49.6 | 0.02 | 3.89 |
| $\chi_r \times Vc$ | -8.61678E-05 | $\chi_r \times f$ | 1 | 0.0000 | 0.0026 | 3.62 | 0.19 | 0.00 |
| $\chi_r \times f$ | 0.060714 | $\chi_r \times ap$ | 1 | 0.0124 | 0.0198 | 27.0 | 0.03 | 1.55 |
| $\chi_r \times ap$ | 0.049342 | $\chi_r \times r$ | 1 | 0.0000 | 0.0007 | 1.07 | 0.40 | 0.00 |
| $\chi_r \times r$ | 0.001984 | $Vc \times f$ | 1 | 0.0002 | 0.0001 | 0.26 | 0.66 | 0.02 |
| $Vc \times f$ | 0.005850 | $Vc \times ap$ | 1 | 0.0273 | 0.0004 | 0.67 | 0.50 | 3.42 |
| $Vc \times ap$ | -0.006217 | $Vc \times r$ | 1 | 0.0112 | 0.0040 | 5.50 | 0.14 | 1.40 |
| $Vc \times r$ | -0.005105 | $f \times ap$ | 1 | 0.0134 | 0.0060 | 8.25 | 0.10 | 1.68 |
| $f \times ap$ | -13.7925 | $f \times r$ | 1 | 0.0001 | 0.0011 | 1.62 | 0.33 | 0.01 |
| $f \times r$ | 2.38946 | $ap \times r$ | 1 | 0.0011 | 0.0011 | 0.00 | 1.62 | 0.13 |
| $ap \times r$ | -1.16837 | Error | 2 | 0.0014 | 0.0014 | | | 0.17 |
| | | résiduelle | | | | | | |
| | | Total | 17 | 0.7964 | | | | 100 |

Tableau V.2: Régression de la surface de réponse pour le critère de rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe (Vc , f , et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r) en utilisant les valeurs non codées (modèle linéaire complet)

V.2.3. facteurs influents

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse de variances, un graphique des effets principaux à cinq facteurs est présenté sur la figure V.1. Ce graphique affiche la moyenne pour le critère de la rugosité Ra pour chaque niveau de chaque facteur, trié par valeur. Une ligne horizontale représente la moyenne générale. Les effets sont les différences entre les moyennes et cette ligne de référence. L'importance de la pente relative de chaque paramètre donne une information sur l'importance de l'influence de ce paramètre. L'analyse des graphes de la figure V.1 montre le graphe des effets principaux des paramètres du régime de coupe (Vc , f , et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r) et leurs degrés d'influence sur l'évolution du critère de la rugosité Ra . Il est clairement observé que la vitesse d'avance (f) a une incidence croissante et affecte fortement le critère de la rugosité Ra (pente grande). Cette tendance est en accord avec la relation mathématique de la rugosité basée sur la géométrie de l'usinage et qui prédit que la rugosité théorique est proportionnelle au carré de l'avance. L'effet de la vitesse de coupe est significatif. En effet, une augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de la surface, la valeur de Ra diminue légèrement lorsque Vc passe de 150 à 200 alors que la profondeur de coupe, l'angle de direction et le rayon du bec ont un très faible effet (pente très faible).

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

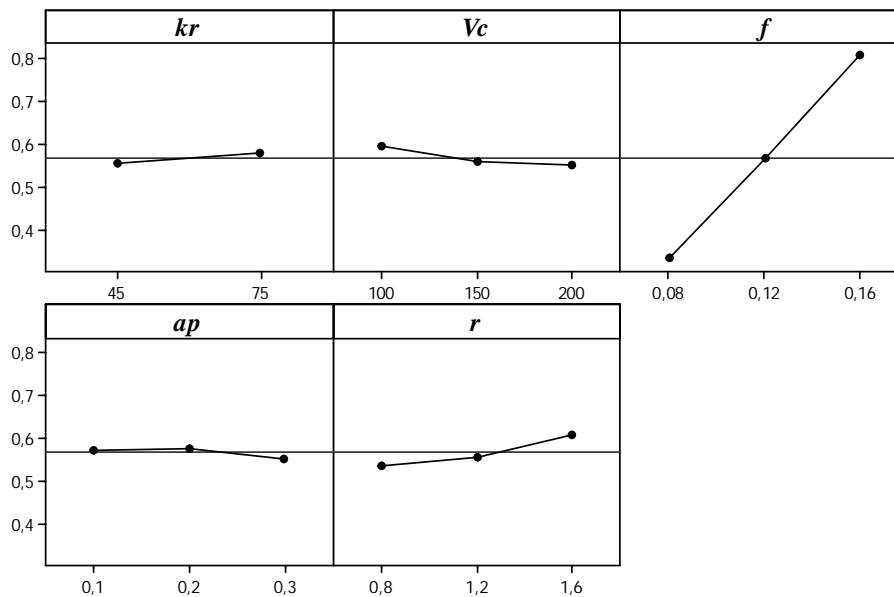


Figure V.1: Graphique des effets principaux pour le critère de la rugosité (Ra) en fonction de V_c , f , ap , χ_r et r

Un diagramme des interactions (figure V.2) est un diagramme des moyennes pour chaque niveau d'un facteur. Ces diagrammes sont utiles pour juger la présence d'interactions. Une interaction est présente si la réponse pour un niveau d'un facteur dépend du ou des niveaux d'autres facteurs. Dans un diagramme des interactions, les droites parallèles indiquent l'absence d'interaction. Plus les droites s'écartent de la parallèle, plus le degré d'interaction est élevé. Pour qu'il soit possible d'utiliser un diagramme des interactions, il faut que les données pour toutes les combinaisons de niveaux existent.

Les diagrammes des interactions à cinq facteurs affichent des diagrammes d'interactions à quatre facteurs combinés pour toutes les combinaisons de quatre facteurs. Sur la figure V.2, les interactions entre l'angle de direction principale / vitesse d'avance ($\chi_r \times f$), vitesse de coupe / vitesse d'avance ($V_c \times f$) présentent des lignes parallèles, ce qui met en évidence l'absence d'une interaction entre ces paramètres.

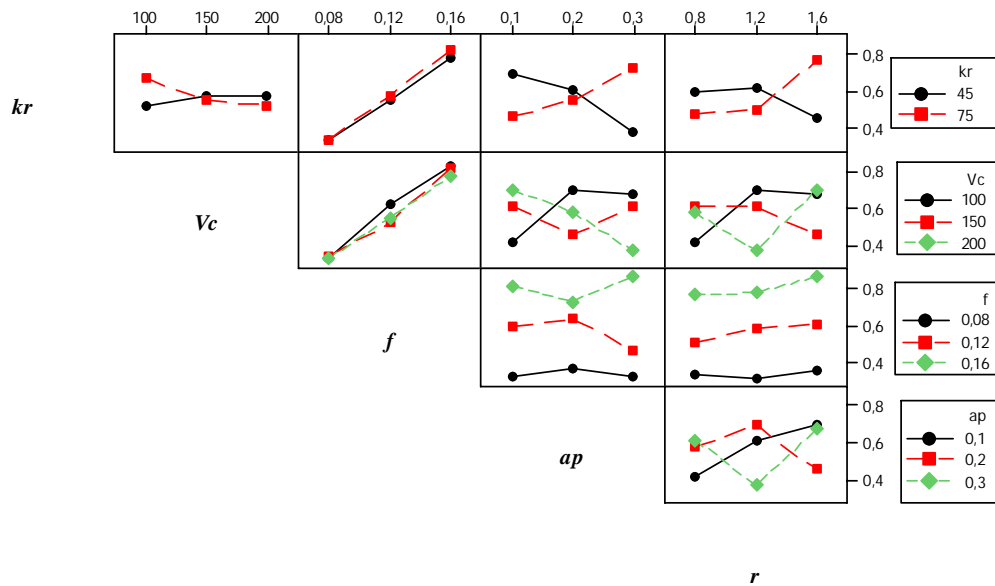


Figure V.2: Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la rugosité (Ra) en fonction de Vc, f, ap, χ_r , et r

V.2.4. Analyse de régression de la rugosité (Ra) en fonction du régime de coupe (Vc, f et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r, r)

L'analyse de régression de la rugosité Ra en fonction de Vc, f, ap, χ_r , et r donne l'équation du modèle complet (V.1). Les coefficients des modèles mathématiques de la rugosité Ra sont mentionnés dans le tableau V.2.

$$Ra = -0.5477 = 5.4 \times 10^{-3} \chi_r + 1.06 \times 10^{-2} Vc + 2.72 \times 10^{-1} f + 3.53 \times 10^{-1} ap + 5.6 \times 10^{-1} r - 8.61 \times 10^{-5} \chi_r Vc + 6.07 \times 10^{-2} \chi_r f + 4.93 \times 10^{-2} \chi_r ap + 1.98 \times 10^{-3} \chi_r r + 5.85 \times 10^{-3} Vc f - 6.21 \times 10^{-3} Vc ap - 5.10 \times 10^{-3} Vc r - 13.79 f ap + 2.38 f r - 1.16 a p r \quad (V.1)$$

En introduisant seulement les facteurs et les interactions qui ont un effet significatif, le modèle réduit de la rugosité Ra en fonction de Vc, f, ap, χ_r , et r donne l'équation (V.2)

$$Ra = -0.5477 - 5.4 \times 10^{-3} \chi_r + 1.06 \times 10^{-2} Vc - 2.72 \times 10^{-1} f + 5.6 \times 10^{-1} r - 8.61 \times 10^{-5} \chi_r Vc + 4.93 \times 10^{-2} \chi_r ap + 6.21 \times 10^{-3} Vc ap - 5.10 \times 10^{-3} Vc r - 13.79 f ap \quad (V.2)$$

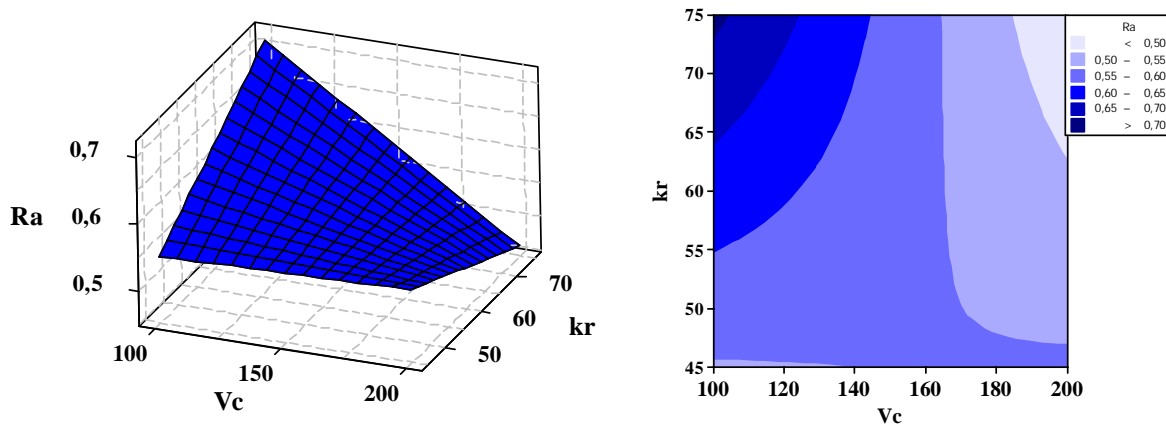
La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de la rugosité Ra est : $R^2 = 99.82\%$, R^2 (ajust) = 98.44 %. Cette valeur indique que 98.44% d'une simple variation de la rugosité Ra est expliquée par les variables indépendants. La valeur du coefficient de détermination est

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

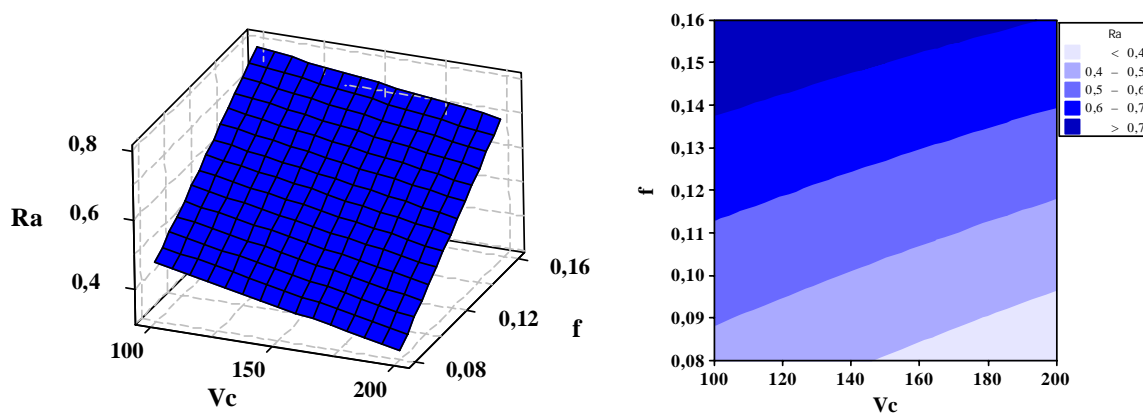
élevée suggérant une signification du modèle et un bon ajustement de ce dernier aux valeurs expérimentales.

V.2.5. Analyse de la surface de réponses

La figure V.3 (a, b, c, et d), présente les surfaces de réponse en 3D et les graphes de contour estimés pour le critère de la rugosité Ra en fonction de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe, l'angle de direction principale et le rayon du bec de l'outil. Les graphes des contours permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables à partir de l'équation du modèle (V.1). Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes. La figure V.3a, met en évidence l'impact de l'angle de direction principale (χ_r) et la vitesse de coupe (V_c). L'influence de l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c) sont présentées sur la figure V.3b. La figure V.3c, présente la surface de réponse estimée de la rugosité Ra par rapport à la vitesse d'avance (f) et la profondeur de coupe (ap). L'interaction effet du rayon de bec (r) et la profondeur de coupe (ap) sur la rugosité Ra sont présentées sur la figure V.3d. En effet, ces courbes prouvent que l'avance par tour est le facteur déterminant de l'état de surface.



(a)



(b)

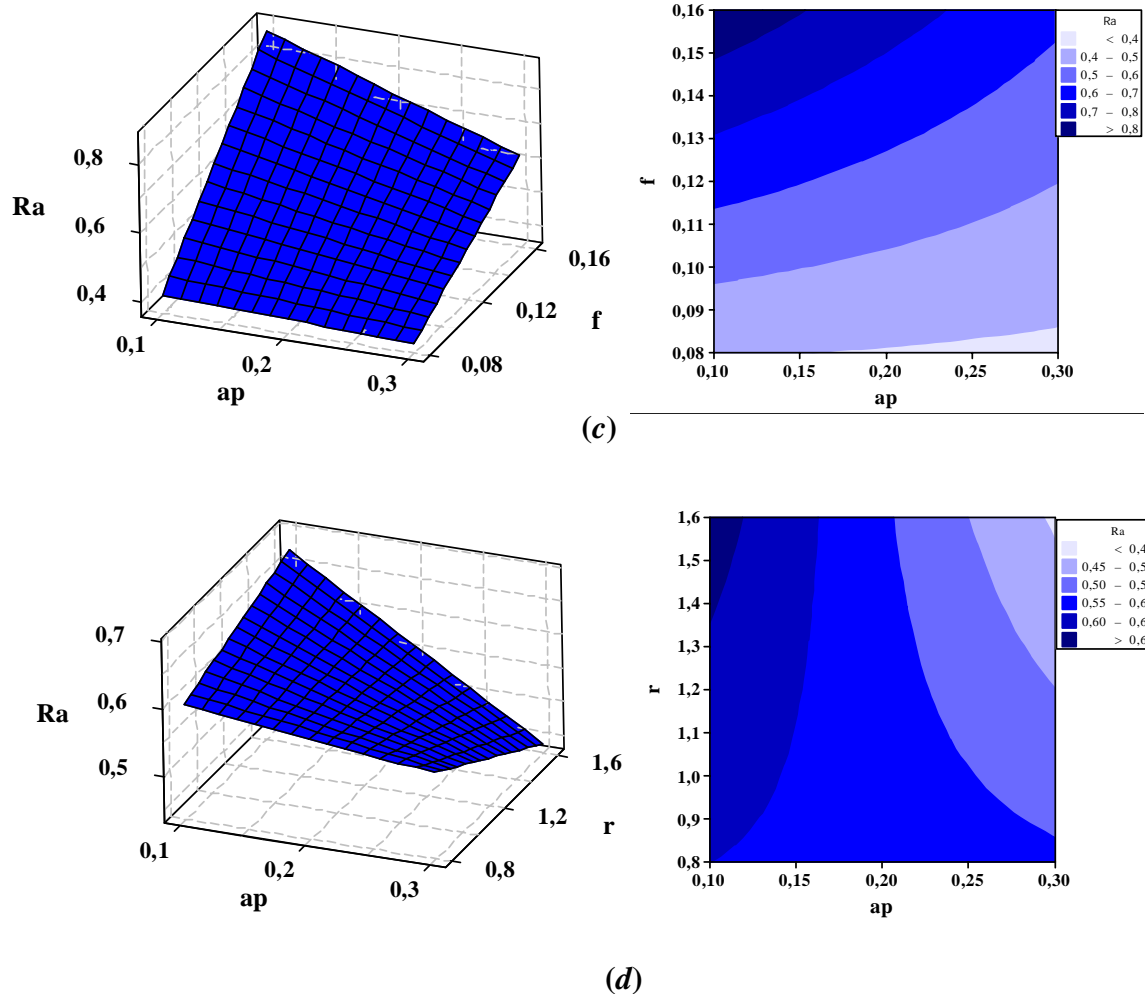


Figure V.3 : Surface de réponse estimée pour le critère de la rugosité Ra en fonction de V_c, f, a_p, χ_r , et r et graphes de contour

V.2.6. Comparaison entre le critère de la rugosité expérimentale et estimée

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites pour le modèle de la rugosité Ra pour le plan de Taguchi (tableau V.1) obtenue par la méthodologie de surface de réponse, est présentée dans le tableau V.3 et graphiquement sur la figure V.4. Le tableau V.3, illustre le pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites de la rugosité de surface Ra . Le pourcentage d'erreur est calculé de la façon suivante :

$$\%d'erreur = \frac{\text{Valeur expérimentale} - \text{valeur prédite}}{\text{valeur expérimentale}} \quad (\text{V.3})$$

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

L'analyse de ce résultat montre que l'erreur minimale est de - 0.08%. Elle est enregistrée à l'essai N°17, alors que l'erreur maximale est de 5.02%, enregistrée à l'essai N°4. La figure V.4, montre que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches. En effet, ces résultats prouvent la précision élevée du modèle.

| N° essais | Valeurs expérimentales de Ra (μm) | Valeurs prédites de Ra (μm) | Erreur % |
|-----------|--|--|----------|
| 1 | 0.30 | 0.30666 | -2.22 |
| 2 | 0.72 | 0.70993 | 1.39 |
| 3 | 0.99 | 0.98585 | 0.41 |
| 4 | 0.33 | 0.31340 | 5.03 |
| 5 | 0.56 | 0.58666 | -4.76 |
| 6 | 0.75 | 0.75503 | -0.67 |
| 7 | 0.37 | 0.37829 | -2.22 |
| 8 | 0.45 | 0.43666 | 2.96 |
| 9 | 0.75 | 0.74748 | 0.33 |
| 10 | 0.36 | 0.35891 | 0.30 |
| 11 | 0.53 | 0.53054 | -0.10 |
| 12 | 0.67 | 0.67217 | -0.32 |
| 13 | 0.35 | 0.35217 | -0.62 |
| 14 | 0.48 | 0.47891 | 0.22 |
| 15 | 0.89 | 0.88564 | 0.48 |
| 16 | 0.29 | 0.28891 | 0.37 |
| 17 | 0.65 | 0.65054 | -0.08 |
| 18 | 0.79 | 0.79177 | -0.22 |

Tableau V.3: Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour Ra en fonction de $V_c, f, ap, \chi_r, et r$.

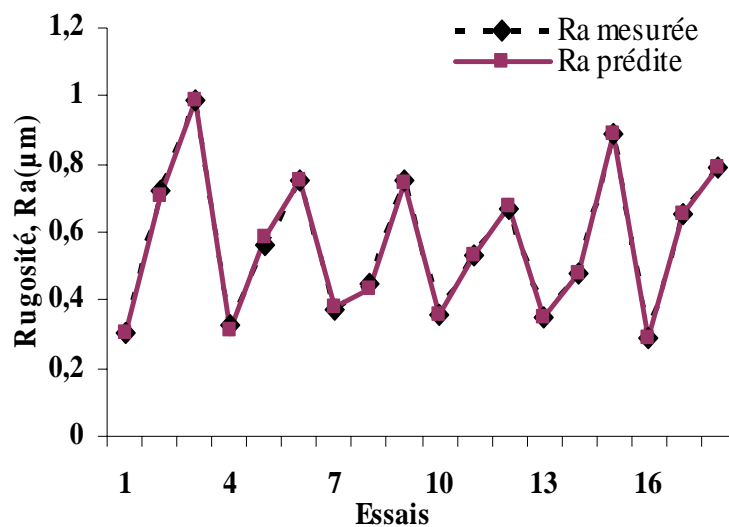


Figure V.4: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité Ra

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

V.3. DÉTERMINATION DES MODÈLES DES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE COUPE ET LA GÉOMÉTRIE DE L'OUTIL.

V.3.1. Résultats des expériences

Le tableau V.4 présente les éléments du régime de coupe (la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de coupe (ap)) et la géométrie de l'outil (angle de direction principale (χ_r), rayon du bec (r)) adoptés durant les essais ainsi que les résultats expérimentaux correspondants aux efforts de coupe à savoir; l'effort de coupe axial (F_a), l'effort de coupe radial (F_r) et l'effort de coupe tangentiel (F_t). Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe et la géométrie de l'outil, selon un plan d'expérience 18 essais (L18) avec cinq facteurs de 2 et 3 niveaux (plan de Taguchi).

| N° essai | χ_r (degré) | V_c (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) | r (mm) | F_a (N) | F_r (N) | F_t (N) |
|----------|---------------------|------------------|----------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 75 | 100 | 0,08 | 0,1 | 0,8 | 4.32 | 28 | 14,66 |
| 2 | 75 | 100 | 0,12 | 0,2 | 1,2 | 11.52 | 52,38 | 46,75 |
| 3 | 75 | 100 | 0,16 | 0,3 | 1,6 | 10.37 | 74,71 | 65,03 |
| 4 | 75 | 150 | 0,08 | 0,1 | 1,2 | 7.04 | 36 | 15,68 |
| 5 | 75 | 150 | 0,12 | 0,2 | 1,6 | 30.85 | 96,76 | 93,85 |
| 6 | 75 | 150 | 0,16 | 0,3 | 0,8 | 10.77 | 74,71 | 65,03 |
| 7 | 75 | 200 | 0,08 | 0,2 | 0,8 | 14.55 | 63,68 | 44,7 |
| 8 | 75 | 200 | 0,12 | 0,3 | 1,2 | 13.96 | 88,81 | 61,51 |
| 9 | 75 | 200 | 0,16 | 0,1 | 1,6 | 14.75 | 47,41 | 29,41 |
| 10 | 45 | 100 | 0,08 | 0,3 | 1,6 | 70.74 | 257,4 | 250,39 |
| 11 | 45 | 100 | 0,12 | 0,1 | 0,8 | 14.07 | 62,74 | 48,74 |
| 12 | 45 | 100 | 0,16 | 0,2 | 1,2 | 35.76 | 62,87 | 32,96 |
| 13 | 45 | 150 | 0,08 | 0,2 | 1,6 | 39.38 | 143,76 | 131,06 |
| 14 | 45 | 150 | 0,12 | 0,3 | 0,8 | 56.31 | 104,49 | 158,28 |
| 15 | 45 | 150 | 0,16 | 0,1 | 1,2 | 24.21 | 97,26 | 77,32 |
| 16 | 45 | 200 | 0,08 | 0,3 | 1,2 | 31.25 | 150,39 | 120,82 |
| 17 | 45 | 200 | 0,12 | 0,1 | 1,6 | 39.71 | 106,35 | 98,64 |
| 18 | 45 | 200 | 0,16 | 0,2 | 0,8 | 48.57 | 124,81 | 117,91 |

Tableau V.4 : Résultats des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction des paramètres du régime de coupe (V_c , f , et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r)

On constate que les efforts de coupe augmentent en fonction de la profondeur de coupe et diminués avec l'augmentation de la vitesse de coupe pour différentes angles de directions principales. Avec l'augmentation de la profondeur de coupe on assiste à un accroissement important. La nette augmentation est logique (l'épaisseur du copeau devienne importantes). Donc, avec la diminution de l'angle de direction principal les composantes de l'effort de coupe se trouvent alors augmentées et cela pour tous les régimes de coupe du plan [79].

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

V.3.2. Analyse des variances (ANOVA) des efforts de coupe : Modèles linéaires complets

L'analyse des variances pour les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) ainsi que les coefficients de régression estimés sont présentés sur le tableau V.5. L'analyse a été effectuée en utilisant des données non codées.

| Coefficients de régression estimés pour F_a | | Analyse de la variance pour F_a | | | | | | |
|---|-----------|-----------------------------------|----|---------|----------|------|------|-------|
| Termes | Coeff | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC |
| Constant | -25.5146 | χ_r | 1 | 3250.06 | 405.23 | 3.82 | 0.19 | 54.15 |
| χ_r | 0.334432 | Vc | 1 | 21.36 | 0.16 | 0.00 | 0.97 | 0.35 |
| Vc | -0.328091 | f | 1 | 43.51 | 148.97 | 1.41 | 0.35 | 0.72 |
| f | 516.526 | ap | 1 | 669.54 | 364.80 | 3.44 | 0.20 | 11.15 |
| ap | 666.059 | r | 1 | 272.75 | 19.50 | 0.18 | 0.71 | 4.54 |
| r | -27.5021 | $X_r \times Vc$ | 1 | 27.27 | 8.29 | 0.08 | 0.80 | 0.45 |
| $\chi_r \times Vc$ | 0.001300 | $\chi_r \times f$ | 1 | 154.48 | 198.68 | 1.87 | 0.30 | 2.57 |
| $\chi_r \times f$ | -16.6119 | $\chi_r \times ap$ | 1 | 414,77 | 0.11 | 0.00 | 0.97 | 6.91 |
| $\chi_r \times ap$ | -0.118776 | $\chi_r \times r$ | 1 | 5.25 | 67.80 | 0.64 | 0.50 | 0.08 |
| $\chi_r \times r$ | 0.583135 | Vc \times f | 1 | 521.98 | 91.10 | 0.86 | 0.45 | 8.69 |
| Vc \times f | 4.07480 | Vc \times ap | 1 | 338.58 | 77.69 | 0.73 | 0.48 | 5.64 |
| Vc \times ap | 0.209051 | Vc \times r | 1 | 23.87 | 6.75 | 0.06 | 0.82 | 0.39 |
| Vc \times r | 0.209051 | f \times ap | 1 | 16.49 | 8.99 | 0.08 | 0.79 | 0.27 |
| f \times ap | -531.990 | f \times r | 1 | 31.52 | 6.06 | 0.06 | 0.83 | 0.52 |
| f \times r | -170.548 | ap \times r | 1 | 2.54 | 2.54 | 0.02 | 0.89 | 0.04 |
| ap \times r | -170.548 | Erreur résiduelle | 2 | 212.01 | 106 | | | 3.53 |
| | | Total | 17 | 6000.98 | | | | 100 |

(a)

| Coefficients de régression estimés pour F_r | | Analyse de la variance pour F_r | | | | | | |
|---|--------------|-----------------------------------|---|---------|----------|------|------|-------|
| Termes | Coefficients | Source | D | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Consta | -600.729 | χ_r | 1 | 14320.5 | 1.8 | 1.8 | 0.96 | 30.96 |
| χ_r | 5.66220 | Vc | 1 | 152.1 | 1283.1 | 1.72 | 0.32 | 0.32 |
| Vc | 0.782643 | f | 1 | 2102.0 | 709.0 | 0.95 | 0.43 | 4.54 |
| f | 7766.24 | ap | 1 | 11578.5 | 4731.27 | 6.33 | 0.12 | 25.03 |
| ap | 2004.75 | r | 1 | 4382.3 | 418.6 | 0.56 | 0.53 | 9.47 |
| r | -424,388 | $X_r \times Vc$ | 1 | 183.3 | 347.4 | 0.46 | 0.56 | 0.39 |
| $\chi_r \times Vc$ | -0.008420 | $\chi_r \times f$ | 1 | 2.6 | 1094.8 | 1.46 | 0.35 | 0.00 |
| $\chi_r \times f$ | -38,9948 | $\chi_r \times ap$ | 1 | 175.1 | 0.1 | 0.00 | 0.99 | 0.37 |
| $\chi_r \times ap$ | -0,103197 | $\chi_r \times r$ | 1 | 422.9 | 17.31 | 0.02 | 0.89 | 0.91 |
| $\chi_r \times r$ | 0,294623 | Vc \times f | 1 | 5572.5 | 24.6 | 0.03 | 0.87 | 12.05 |
| Vc \times f | -2,11641 | Vc \times ap | 1 | 776.0 | 2426.9 | 3.25 | 0.21 | 1.67 |
| Vc \times ap | -13,8428 | Vc \times r | 1 | 1048.4 | 1125.6 | 1.51 | 0.34 | 2.26 |
| Vc \times r | 2,69772 | f \times ap | 1 | 1868.2 | 3322.1 | 4.44 | 0.17 | 4.03 |
| f \times ap | -10223,6 | f \times r | 1 | 35.7 | 1730.4 | 2.31 | 0.26 | 0.07 |
| f \times r | -2880,93 | ap \times r | 1 | 2129.6 | 2129.6 | 2.85 | 0.23 | 4.60 |

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

| | | | | | | | | |
|---------------|---------|--------------------------|--------------|--------|---------|-------|--|------|
| $ap \times r$ | 1563,55 | Erreur résiduelle | 2 | 1495.1 | 1495.1 | 747.5 | | 3.33 |
| | | | Total | 17 | 46244.8 | | | |

(b)

| Coefficients de régression estimés pour F_t | | Analyse de la variance pour F_t | | | | | | |
|---|-----------|-----------------------------------|----|---------|----------|------|------|-------|
| Termes | Coeff | Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | PC% |
| Constante | 612.406 | χ_r | 1 | 21821.0 | 3868.78 | 4.98 | 0.15 | 35.17 |
| χ_r | -8.28506 | V_c | 1 | 17.4 | 640.9 | 4.98 | 0.45 | 0.02 |
| V_c | -0.774284 | f | 1 | 3979.4 | 4953.2 | 6.38 | 0.12 | 6.40 |
| f | -6118,54 | ap | 1 | 15885.7 | 1177.9 | 1.52 | 0.34 | 25.60 |
| ap | 763,169 | r | 1 | 5054.4 | 354.3 | 0.46 | 0.56 | 8.14 |
| r | 303,131 | $\chi_r \times V_c$ | 1 | 1.3 | 21.4 | 0.03 | 0.88 | 0.00 |
| $\chi_r \times V_c$ | -0,002092 | $\chi_r \times f$ | 1 | 326.9 | 156.6 | 0.20 | 0.69 | 0.52 |
| $\chi_r \times f$ | 14,7460 | $\chi_r \times ap$ | 1 | 462.8 | 1555.8 | 2.00 | 0.29 | 0.74 |
| $\chi_r \times ap$ | 13,8306 | $\chi_r \times r$ | 1 | 124.5 | 367.34 | 0.47 | 0.56 | 0.20 |
| $\chi_r \times r$ | 1,35734 | $V_c \times f$ | 1 | 8531.4 | 3202.8 | 4.13 | 0.17 | 13.75 |
| $V_c \times f$ | 24,1606 | $V_c \times ap$ | 1 | 2897.2 | 3.5 | 0.00 | 0.95 | 4.67 |
| $V_c \times ap$ | -0,522558 | $V_c \times r$ | 1 | 233.9 | 540.3 | 0.70 | 0.49 | 0.37 |
| $V_c \times r$ | -1,86898 | $f \times ap$ | 1 | 341.1 | 114.0 | 0.15 | 0.73 | 0.54 |
| $f \times ap$ | -1894,12 | $f \times r$ | 1 | 258.7 | 130.8 | 0.17 | 0.72 | 0.41 |
| $f \times r$ | 792,049 | $ap \times r$ | 1 | 607.5 | 607.5 | 0.78 | 0.47 | 0.97 |
| $ap \times r$ | -835,112 | Erreur résiduelle | 2 | 1552.7 | 766.36 | | | 2.50 |
| | | Total | 17 | 62035.8 | | | | 100 |

(c)

Tableau V.5 : Régression de la surface de réponse pour les efforts de coupe: (a) F_a , (b)

F_r et (c) F_t des paramètres du régime de coupe (V_c , f , et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r) en utilisant les valeurs non codées (modèle linéaire complet)

Les tableaux V.5 (a, b, et c) présentent l'analyse des variances (ANOVA) des trois composantes de l'effort de coupe. Ces tableaux prouvent que les effets principaux de l'angle de direction principale (χ_r), la vitesse de coupe (V_c) l'avance par tour (f), la profondeur de coupe (ap), le rayon du bec (r) sur les composantes de l'effort de coupe radial (F_r) et tangentiel (F_t) sont significatives car le pourcentage de contribution est supérieur à l'erreur associé, alors que la vitesse de coupe (V_c) n'a pas d'effet significatif sur l'effort de coupe axial.

En effet, le tableau V.2a montre que les interactions ($\chi_r \times ap$, $V_c \times f$ et $V_c \times ap$) sont significatives sur l'effort de coupe axial, Le tableau V.2b montre que les interactions ($V_c \times f$, $f \times ap$ et $ap \times r$) sont significatives sur l'effort de coupe radial. En outre, les résultats du tableau V.2c, montrent que les interactions ($V_c \times f$, et $V_c \times ap$) ont des effets significatifs sur l'effort tangentiel.

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

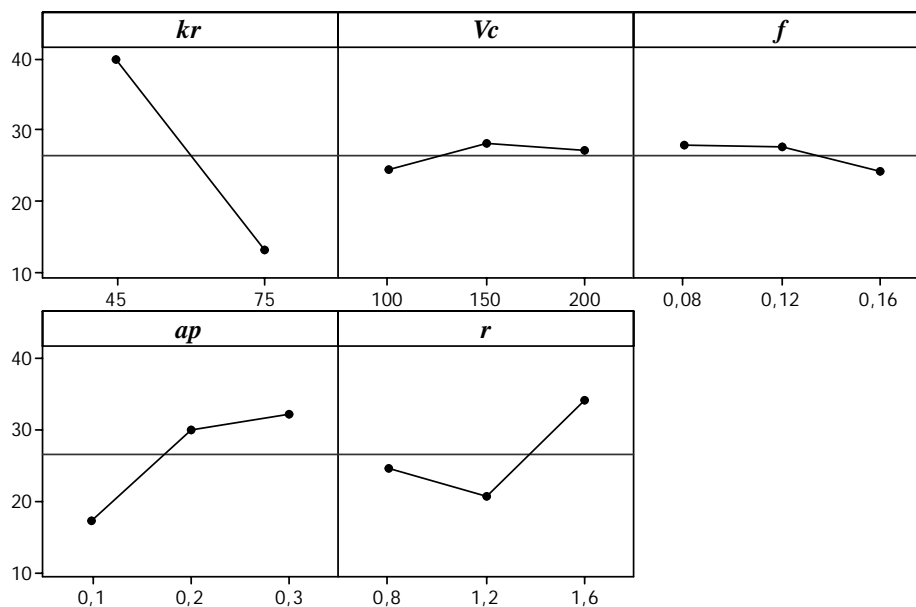
L'angle de direction (χ_r) à une influence principale sur les composantes de l'effort de coupe F_a , F_r et F_t avec des contributions : 54.15%, 30.96% et 35.17% respectivement, suivi par la profondeur de coupe de (11.15%, 25.03% et 25.60%), de l'interaction entre la vitesse de coupe et l'avance ($V_c \times f$) de (8.69%, 12.05% et 13.75%) et le rayon du bec avec des contributions de (4.54%, 9.47% et 8.14%), respectivement.

Dans le tournage dur, l'effort radial F_r est habituellement la composante la plus grande, puis l'effort de coupe tangentiel F_t et enfin l'effort axial F_a . Ceci peut être justifié par l'augmentation de la résistance à la pénétration du matériau à usiner sous l'effet de l'augmentation de sa dureté après trempe.

V.3.3. Facteurs influents

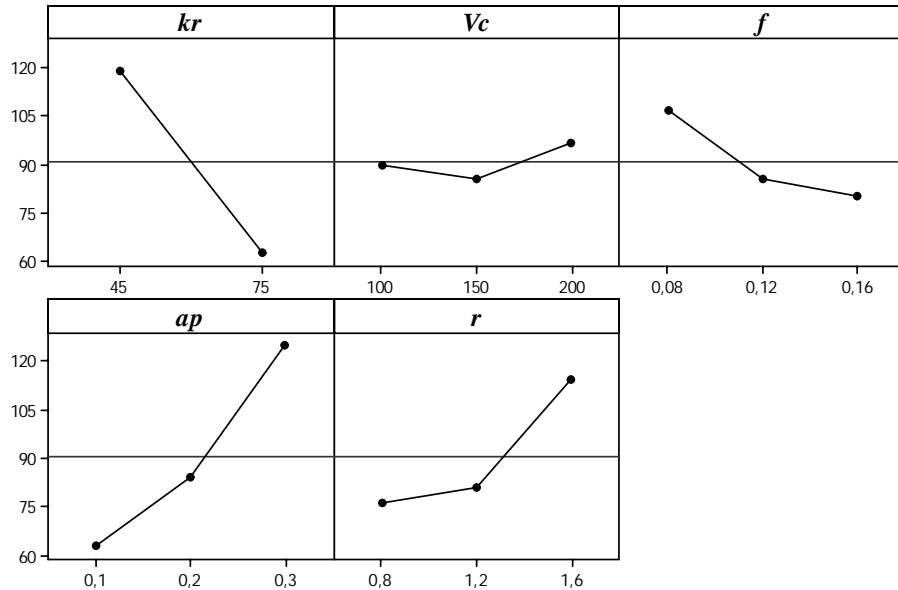
Les Graphiques des effets principaux à cinq facteurs sont présentés sur les figures V.5 (a, b et c). Ces graphiques affichent les moyennes des efforts de coupe pour chaque niveau de chaque facteur. Une ligne horizontale représente la moyenne générale. Les effets sont les différences entre les moyennes et cette ligne de référence. L'importance de la pente relative figure V.5 (a, b et c) de chaque paramètre donne une information sur l'importance de l'influence de ce paramètre.

Les effets sur les efforts de coupe dus à la variation de la profondeur de coupe et à l'angle de direction principale sont importants comparativement à ceux de la vitesse de coupe, l'avance et le rayon du bec. Ces graphiques indiquent qu'à mesure que la profondeur de coupe augmente, les efforts de coupe augmentent également.

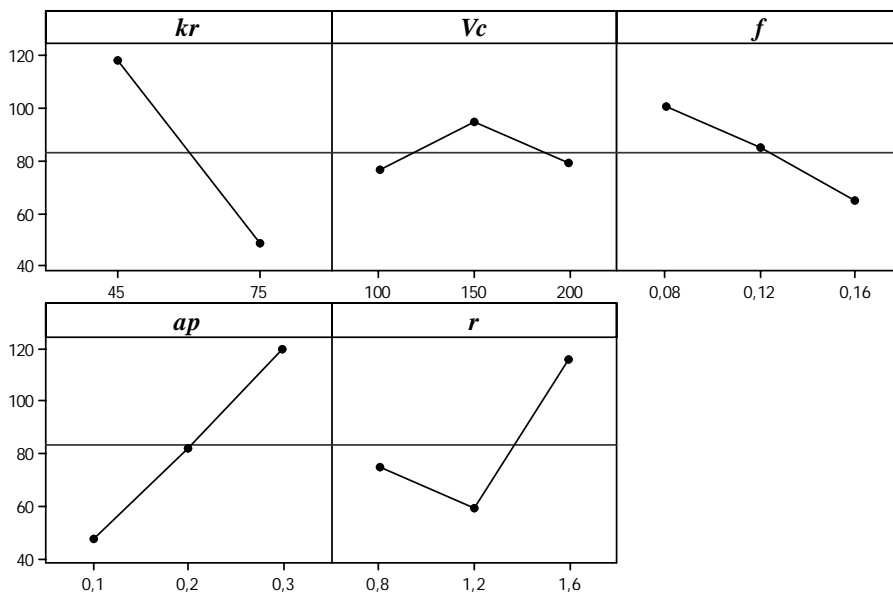


(a)

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil



(b)



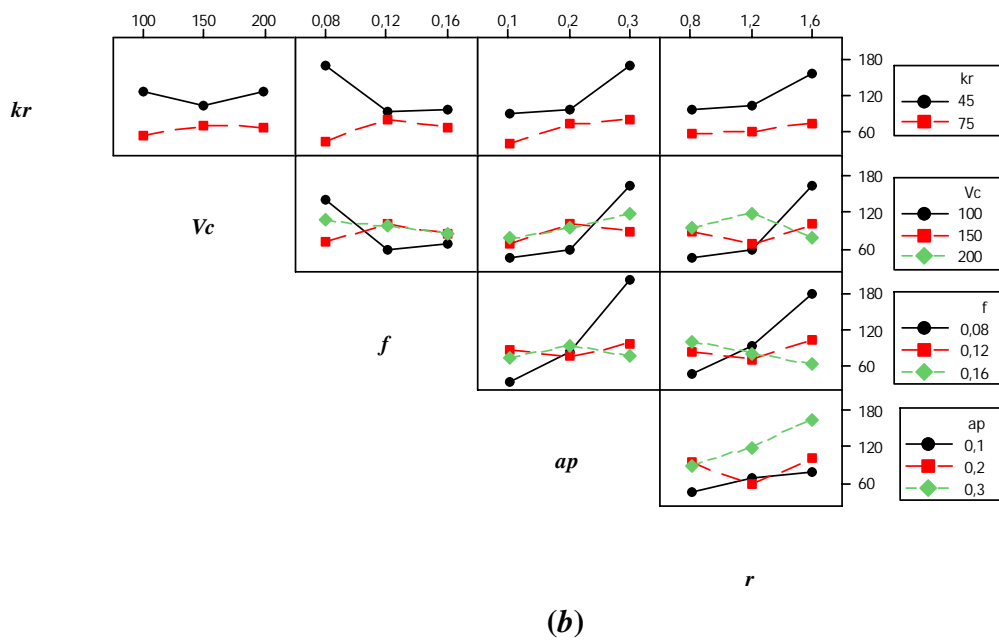
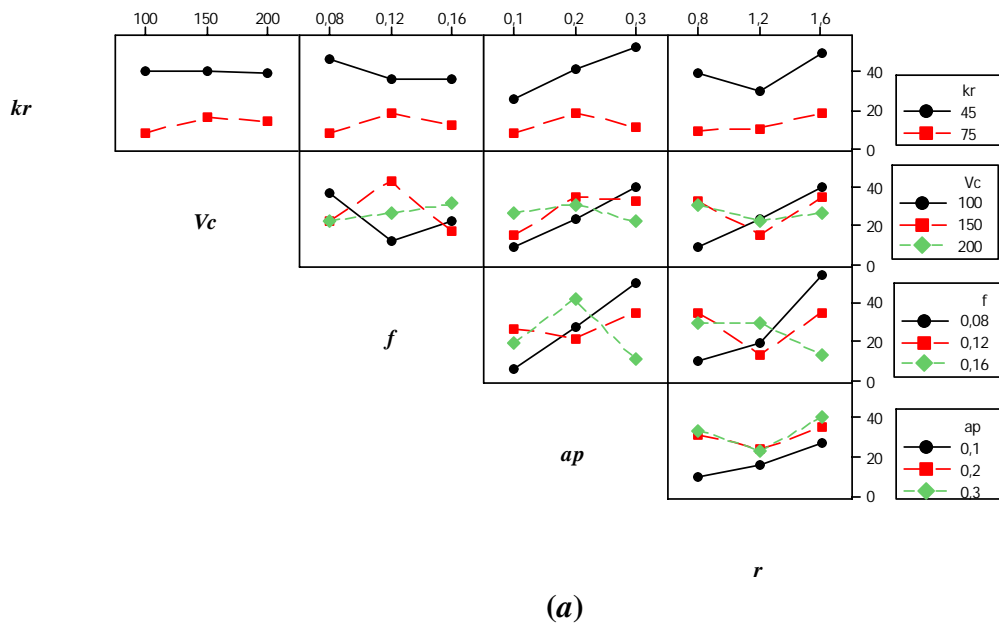
(c)

Figure V.5: Graphique des effets principaux des efforts de coupe : a) F_a , b) F_r et c) F_t en fonction de V_c , f , ap , χ_r , et r

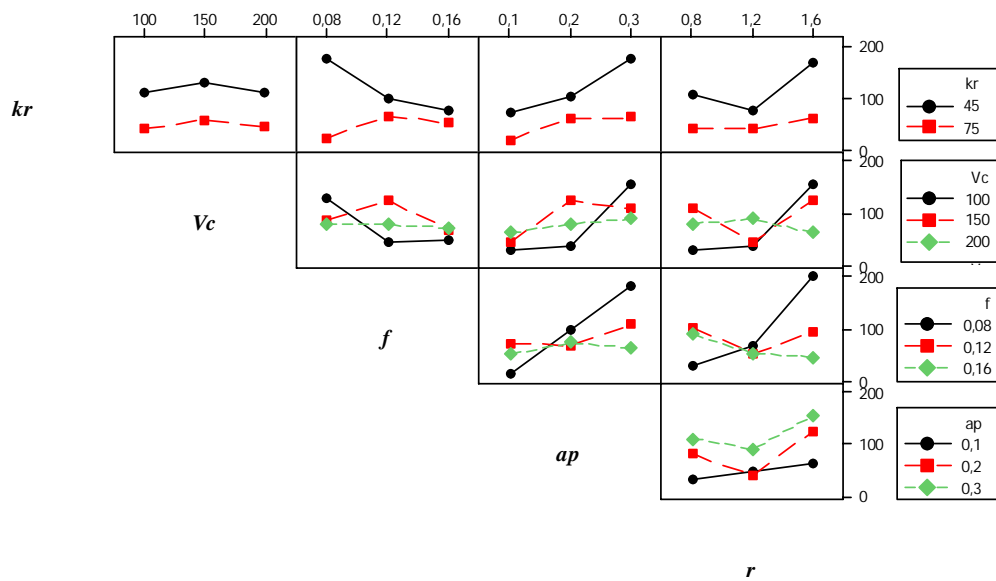
Les diagrammes des interactions à cinq facteurs affichent des diagrammes d'interactions à quatre facteurs combinés pour toutes les combinaisons de quatre facteurs. Sur la figure V.6 (a, b et c) la moyenne des interactions est calculée en fonction de tous les niveaux du rayon du bec. Les digrammes angle de direction principale / vitesse de coupe, angle de direction principale / profondeur de coupe, vitesse de coupe / profondeur de coupe, vitesse de coupe /

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

rayon du bec, vitesse d'avance / profondeur de coupe, et profondeur de coupe / rayon du bec présentent des lignes parallèles ce qui met en évidence l'absence d'une interaction entre ces paramètres.



Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil



(c)

Figure V.6: Graphique des interactions des efforts de coupe : a) F_a , b) F_r et c) F_t en fonction de V_c , f , ap , χ_r , et r

V.3.4. Analyses de régression des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction en fonction du régime de coupe (V_c , f et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r)

L'analyse de régression des efforts de coupe (effort axial F_a , effort radial F_r et effort tangentiel F_t) en fonction du régime de coupe (V_c , f , et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r) donnent les équations des modèles complets V (4, 5 et 6). Les coefficients des modèles mathématiques de l'effort axial F_a , effort radial F_r et effort tangentiel F_t) sont mentionnés dans le tableau V.5 (a, b et c)

$$\begin{aligned}
 F_a = & -25,5146 + 3.34 \times 10^{-1} \chi_r - 3.28 \times 10^{-1} V_c + 516.52 f - 27.50 r + 666.05 ap + \\
 & 1.30 \times 10^{-3} \chi_r V_c - 16.61 \chi_r f + 5.83 \times 10^{-1} \chi_r r - 1.18 \times 10^{-1} \chi_r ap + 4.07 V_c f + 2.09 V_c r - \\
 & 2.47 V_c ap - 170.54 fr - 531.99 fap - 54.05 rap
 \end{aligned}
 \tag{V.4}$$

$$\begin{aligned}
 F_r = & -600.729 + 5.66 \chi_r + 7.82 \times 10^{-1} V_c + 7766.24 f + 2004.75 ap - 424.38 r - \\
 & 8.42 \times 10^{-3} \chi_r V_c - 38.99 \chi_r f - 1.03 \times 10^{-1} \chi_r ap + 2.94 \chi_r r - 2.11 V_c f - 13.84 V_c ap + \\
 & 2.69 V_c r - 10223.6 fap - 2880.93 fr + 1563.55 apr
 \end{aligned}
 \tag{V.5}$$

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

$$\begin{aligned} Ft = & 612.406 - 8.28\chi_r - 7.74 \times 10^{-1}Vc - 6118.54f + 763.16ap + 303.13r - \\ & 2.09 \times 10^{-3} \chi_r Vc + 14.74\chi_r f + 13.83\chi_r ap + 1.35\chi_r r + 24.16Vcf - 5.22 \times 10^{-1}Vcap - \\ & 1.86Vcr - 1894.12.fap + 792.04.fr - 835.11apr \end{aligned} \quad (\text{V.6})$$

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, les modèles réduits des efforts de coupe (l'effort axial Fa , l'effort radial Fr et l'effort tangentiel Ft) en fonction du régime de coupe (Vc , f , et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r) donnent les équations des modèles réduits V (7, 8 et 9) respectivement.

$$Fa = -25,5146 + 666.05ap - 27.50r - 1.18 \times 10^{-1} \chi_r ap + 4.07Vcf + 2.47Vcap \quad (\text{V.7})$$

$$\begin{aligned} Fr = & -600.729 + 5.66\chi_r + 7.82 \times 10^{-1}Vc + 7766.24f + 2004.75ap - 424.38r - \\ & 2.11Vcf - 10223.6.fap + 1563.55apr \end{aligned} \quad (\text{V.8})$$

$$Ft = 612.406 - 8.28\chi_r - 6118.54f + 763.16ap + 303.13r + 24.16Vcf - 5.22 \times 10^{-1}Vcap \quad (\text{V.9})$$

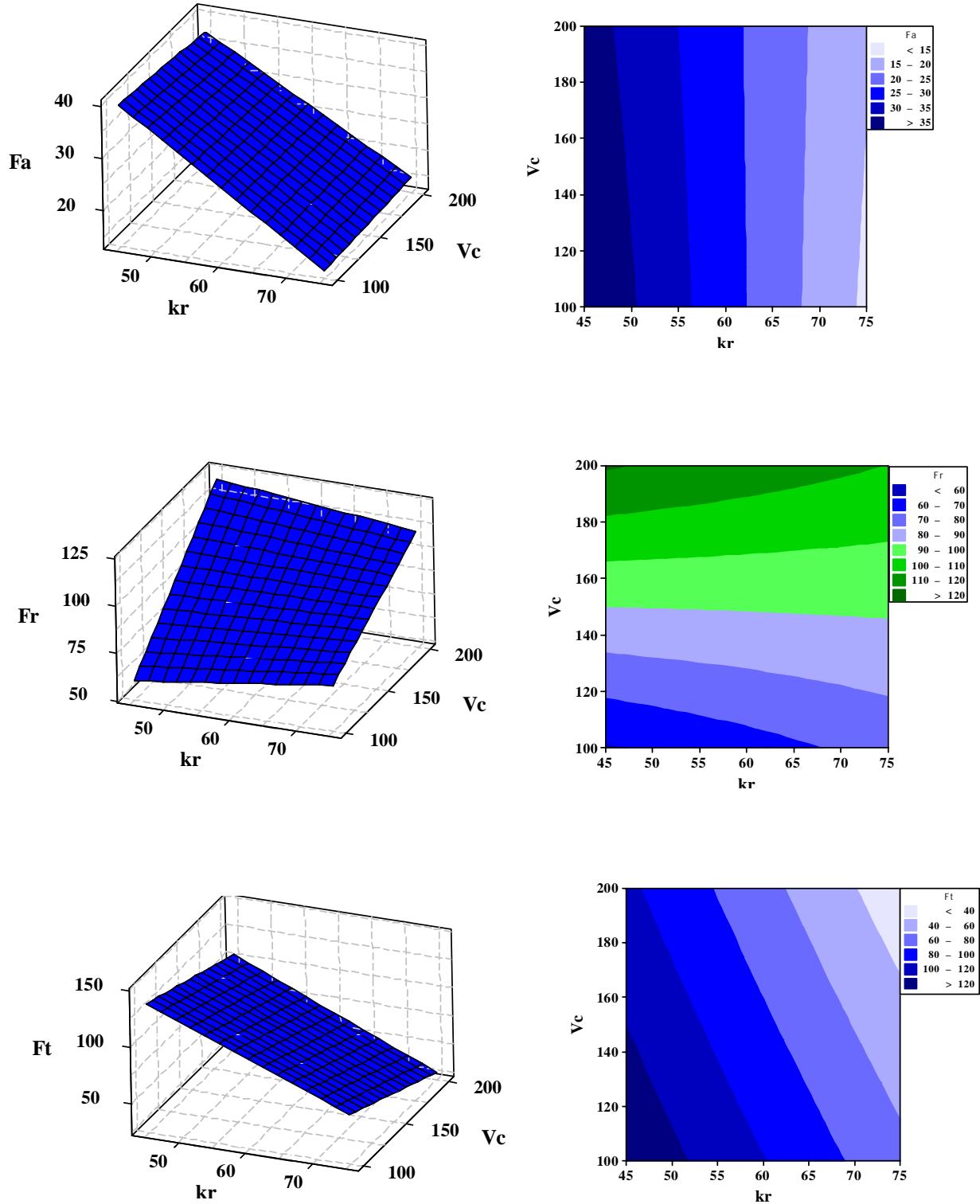
Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des composantes de l'effort de coupe : Fa , Fr et Ft sont $R^2 = 96.47\%$, $R^2 = 96.77\%$ et $R^2 = 97.50\%$ respectivement. R^2 (ajust) = 69.97% , R^2 (ajust) = 72.52 et R^2 (ajust) = 78.73% respectivement. Les valeurs du coefficient de détermination sont élevés, ce qui prouve que les modèles relativement significatifs et en bonne adéquation avec les résultats expérimentales.

V.3.5. Analyse de la surface de réponses

La figure V.7 (a, b, c, et d), synthétise les surfaces de réponse en 3D et les graphes de contour estimées pour les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) respectivement, en fonction de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe, l'angle de direction principale et le rayon du bec de l'outil. La figure V.7a, met en évidence l'impact de la vitesse de coupe (Vc) et de l'angle de direction principale (χ_r) sur les efforts de coupe. L'influence de l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc) sur les efforts de coupe sont présentées sur la figure V.7b. La figure V.7c présente la surface de réponse et graphique de contour estimée des efforts de coupe par rapport à la profondeur de coupe (ap) et l'avance (f). La figure V.7d, met en évidence l'impact du rayon du bec (r) et la profondeur de coupe (ap) sur les efforts de coupe. Les courbes en 3D confirment les résultats de l'analyse des graphiques des effets principaux et des graphiques des interactions figures (V.5, V.6). En effet, les courbes de la surface de réponse montrent que

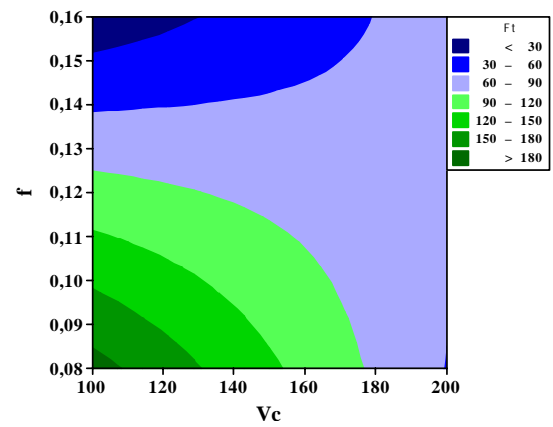
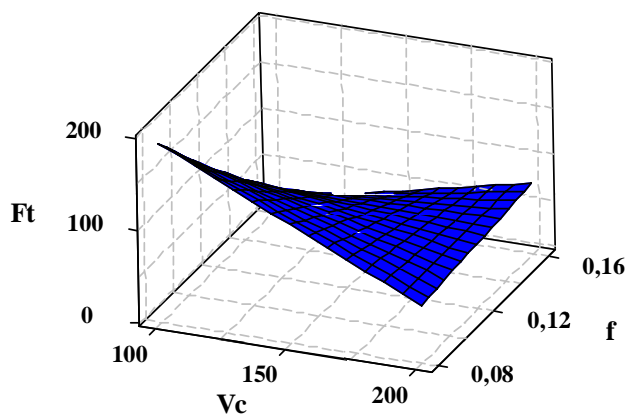
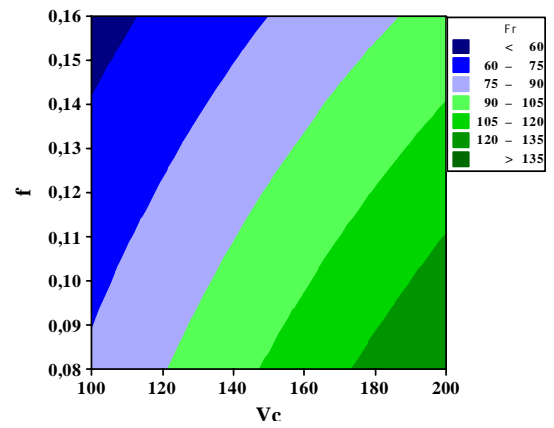
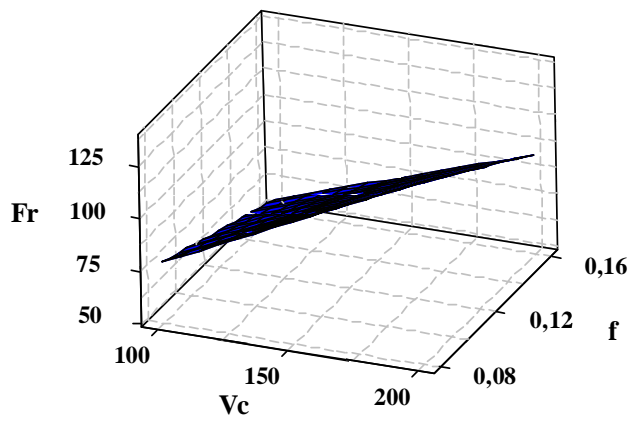
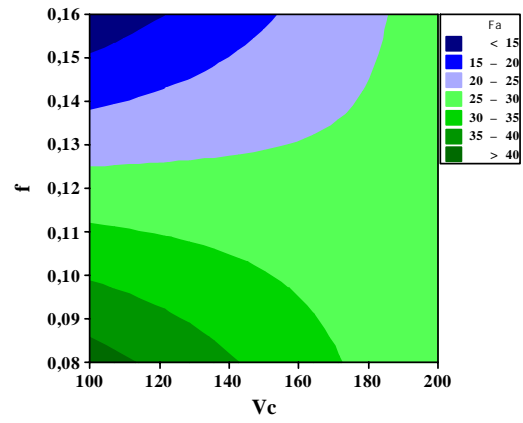
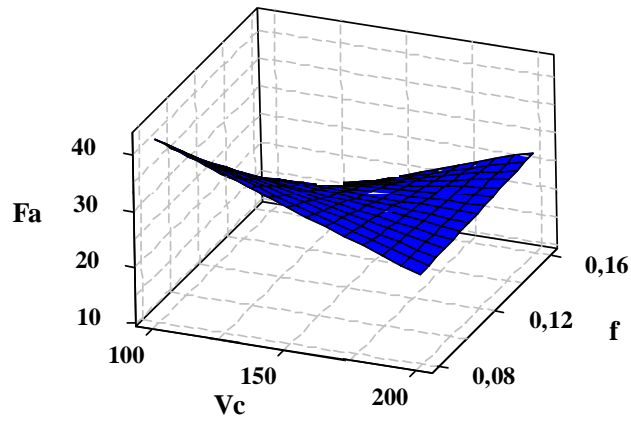
Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

les efforts de coupe sont plus sensibles à l'augmentation de la profondeur de coupe et à l'angle de direction principale qu'aux autres paramètres (vitesse de coupe, l'avance par tour et rayon du bec).



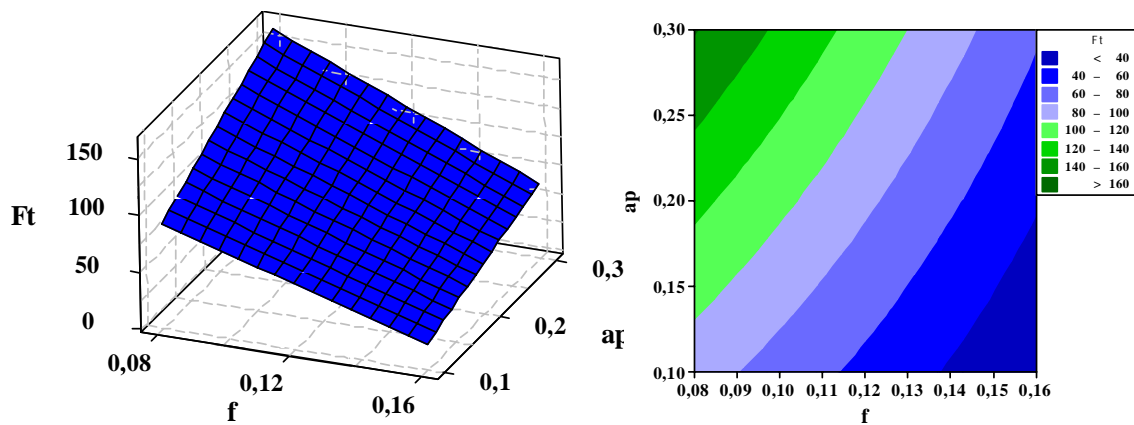
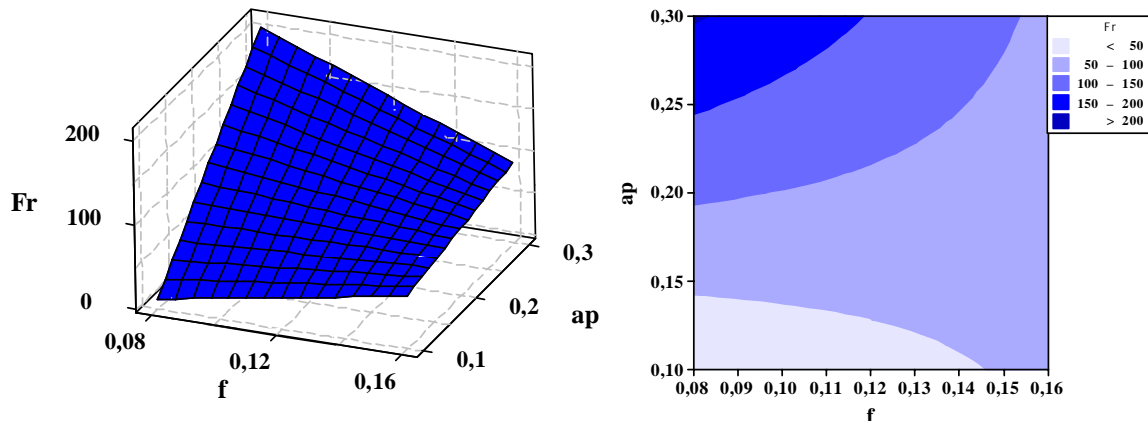
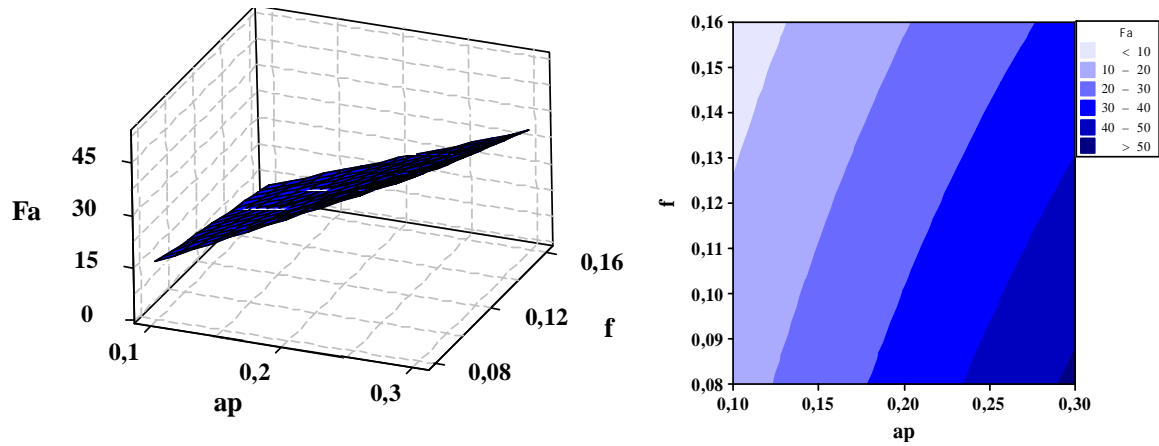
(a)

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil



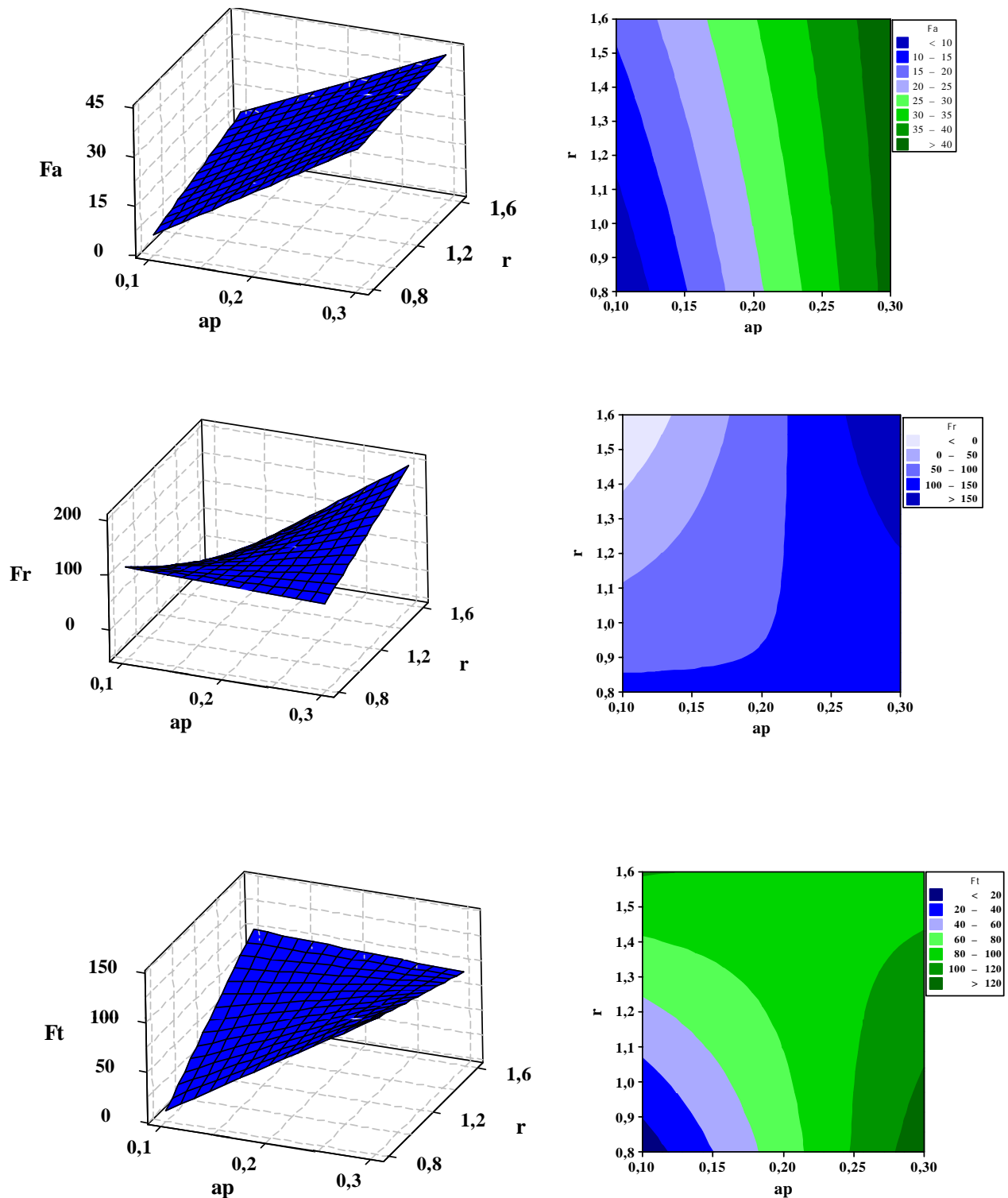
(b)

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil



(c)

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil



(d)

Figure V.7 : a), b), c) et d) Surface de réponse estimée pour les composantes de l'effort de coupe F_a , F_r et F_t en fonction de V_c , f , ap , χ_r , et r et graphes de contour

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

V.3.6. Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et prédites : (a) F_a , (b) F_r et (c) F_t

La comparaison entre les valeurs expérimentales des efforts de coupe F_a , F_r et F_t et celles prédites par les modèles pour le plan de Taguchi 18 essais (tableau V.4) obtenus par la méthodologie de surface de réponse, est présentée dans le tableau V.6 (a, b et c) et graphiquement sur la figure V.8 (a, b et c).

| N° essais | Valeurs expérimentales de F_a (N) | Valeurs prédites de F_a (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 4.32 | 1.9251 | 55.43 |
| 2 | 11.52 | 14.047 | -0.21 |
| 3 | 10.37 | 12.133 | -17 |
| 4 | 7.04 | 14.091 | 100.15 |
| 5 | 30.85 | 21.270 | 31.05 |
| 6 | 10.77 | 9.506 | 11.73 |
| 7 | 14.55 | 11.024 | 24.23 |
| 8 | 13.96 | 18.749 | -34.31 |
| 9 | 14.75 | 15.382 | -4.28 |
| 10 | 70.74 | 71.494 | -1.06 |
| 11 | 14.07 | 13.693 | 2.67 |
| 12 | 35.76 | 34.252 | 4.21 |
| 13 | 39.38 | 37.872 | 3.82 |
| 14 | 56.31 | 57.064 | -1.33 |
| 15 | 24.21 | 27.226 | -12.45 |
| 16 | 31.25 | 32.004 | -2.41 |
| 17 | 39.71 | 39.333 | 0.94 |
| 18 | 48.57 | 47.062 | 3.10 |

(a)

| N° essais | Valeurs expérimentales de F_r (N) | Valeurs prédites de F_r (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 28.00 | 23.619 | 0.15 |
| 2 | 52.38 | 73.20 | -39.74 |
| 3 | 74.71 | 73.866 | 1.10 |
| 4 | 36.00 | 32.703 | 9.15 |
| 5 | 96.76 | 79.237 | 18.10 |
| 6 | 74.71 | 64.300 | 10.82 |
| 7 | 63.68 | 65.329 | -2.58 |
| 8 | 88.81 | 97.571 | -9.86 |
| 9 | 47.41 | 52.615 | -10.97 |
| 10 | 257.40 | 253.380 | 1.56 |
| 11 | 62.74 | 64.750 | -3.20 |
| 12 | 62.87 | 70.909 | -12.78 |
| 13 | 104.49 | 112.529 | -7.69 |
| 14 | 104.49 | 100.470 | 3.84 |
| 15 | 97.26 | 81.182 | 16.53 |
| 16 | 150.39 | 146.370 | 2.67 |
| 17 | 106.35 | 108.360 | -1.88 |
| 18 | 124.18 | 132.219 | -6.47 |

(b)

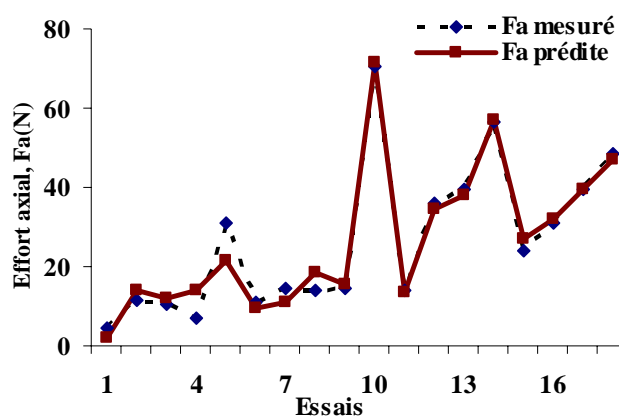
Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

| N° essais | Valeurs expérimentales de F_t (N) | Valeurs prédites de F_t (N) | Erreur % |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 14.66 | 8.162 | 14.32 |
| 2 | 46.75 | 65.775 | -40.6 |
| 3 | 65.03 | 66.772 | -2.67 |
| 4 | 15.68 | 22.647 | -44.43 |
| 5 | 93.85 | 67.858 | 27.69 |
| 6 | 65.03 | 55.517 | 14.62 |
| 7 | 44.70 | 41.216 | 7.79 |
| 8 | 61.51 | 74.506 | -21.12 |
| 9 | 29.41 | 34.166 | -16.17 |
| 10 | 250.39 | 248.380 | 0.80 |
| 11 | 48.74 | 49.745 | -2.06 |
| 12 | 32.96 | 36.979 | -12.19 |
| 13 | 158.28 | 162.299 | -2.53 |
| 14 | 158.28 | 156.270 | 1.26 |
| 15 | 77.32 | 69.282 | 10.39 |
| 16 | 120.82 | 118.81 | 1.66 |
| 17 | 98.64 | 99.645 | -1.01 |
| 18 | 117.91 | 121.929 | -3.40 |

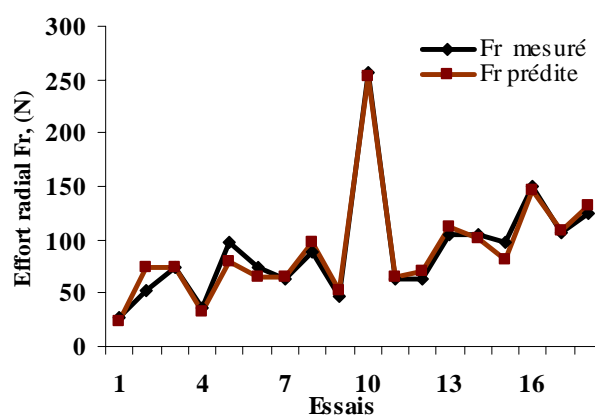
(c)

Tableau V.6 : Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et estimés :

(a) F_a , (b) F_r et (c) F_t



(a)



(b)

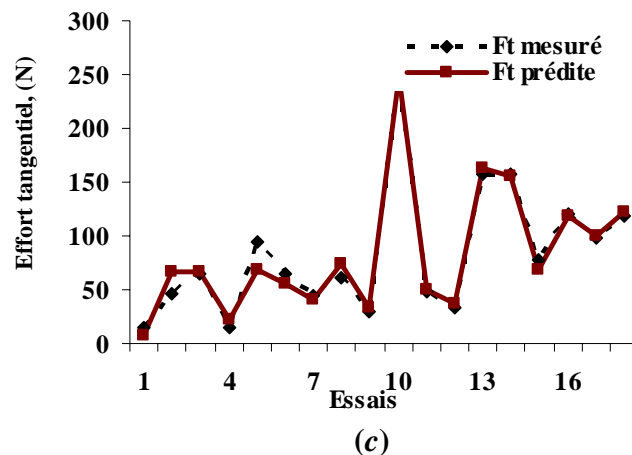


Figure V.8 : Comparaison entre les valeurs expérimentaux et prédites pour les efforts de coupe : (a) F_a , (b) F_r et (c) F_t

L'analyse de la comparaison du tableau V.6, montre que l'erreur minimale pour les trois composantes (F_a , F_r et F_t) est de (-1.06%, -1.88% et -1.01%) qui est enregistrée aux essais N° (10, 17 et 17) respectivement. L'erreur maximale est de (55.43, 18.10 et 27.69) est enregistrée aux essais N° (1, 5 et 5) respectivement. Les figures V.8 (a, b et c), montrent aussi que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches. Donc, on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donnent des résultats fiables.

V.4 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que [les efforts de coupe (F_a , F_r , F_t) et la rugosité arithmétique (R_a)] et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de coupe, angle de direction principal et rayon du bec de l'outil) lors de l'usinage de l'acier AISIA 4140 trempé à 57HRC. Les résultats obtenus dans ce chapitre nous ont conduits aux conclusions suivantes :

Les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) sont très affectés par l'angle de direction principal avec une contribution de (54.15%, 30.96% et 35.17%) respectivement, suivi par la profondeur de coupe avec une contribution de (11.15%, 25.60% et 25.03%) respectivement. Alors, la vitesse de coupe n'a pas d'influence significative.

- Le critère de la rugosité (R_a) est influencé considérablement par l'avance suivie par la vitesse de coupe. La profondeur de coupe n'a pas d'influence sur (R_a).
- Les résultats des essais montrent qu'avec une diminution de l'angle de direction principal, la rugosité diminué par contre les efforts de coupe (axial, radial et tangentiel) se trouvent alors augmentés et cela pour tous les régimes de coupe testés.

Chapitre V : Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et la géométrie de l'outil

- L'analyse des résultats de l'effort de coupe radial, montre que l'outil avec un rayon de bec de 1.6 mm donne un effort de coupe plus grand, suivi par le rayon de bec de 1.2 mm et en dernier lieu par le rayon du bec de 0.8 mm.
- Les coefficients de détermination (R^2) des différents modèles sont élevés, ce qui prouve que ces modèles sont en bonne concordance avec les valeurs trouvées expérimentalement.

CHAPITRE VI

Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des conditions de coupe et des vibrations

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des conditions de coupe et des vibrations

VI.1. INTRODUCTION

Dans le but de maîtriser le tournage dur, il est nécessaire d'identifier et de comprendre l'impact des différents facteurs et de leurs interactions sur la qualité de la surface. Du fait que le procédé de tournage dur est récent et la maîtrise des différents facteurs influençant l'état de surface est encore à explorer. Plusieurs recherches sont menées pour étudier l'impact de ces facteurs sur la qualité de surface et précisément la rugosité qui se présente comme le critère de qualité et de performance le plus exigé en industrie. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de recherche réalisé dans ce chapitre. Il a pour but d'investigé l'effet des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe) ainsi que les vibrations dans les deux directions (de la force de coupe principale et la force de coupe radiale) sur les critères de rugosité liés à la hauteur des profils (Ra et Rt). Le traitement des résultats permettra de modéliser la rugosité de surface et aussi d'optimiser les conditions de coupe.

VI.2. MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES CRITÈRES DE LA RUGOSITÉ (Ra et Rt)

VI.2.1. Analyse des critères de la rugosité (Ra et Rt) par la méthode de la surface de réponse (MSR)

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Y , dite variable de réponse (la rugosité (Ra et Rt)), en fonction d'un certain nombre des variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k d'autre part, d'analyser et optimisées l'influences des interaction de ces derniers sur les réponses. Cette procédure comprend 6 étapes [118] (voir chapitre IV, § IV.3)

La relation entre les cinq variables à savoir la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) la profondeur de coupe (ap) et les effets des vibrations de l'outil de coupe dans la direction de la force de coupe radial (Vy) et la force de coupe tangentielle (Vz) sont données par l'équation (VI.1).

$$Y = f(Vc, f, ap, Vy, Vz) + e_{ij} \quad (VI.1)$$

On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante

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

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des conditions de coupe et des vibrations

Où Y : est la réponse observée (la rugosité (Ra et Rt)), a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} : représentent respectivement les termes constants, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre les variables et des termes quadratiques. Les X_i représentent les variables indépendantes, ou bien les paramètres technologiques de coupe étudiés.

VI.2.2. Analyse et discussion des résultats expérimentaux des critères de la rugosité réalisés par la céramique non revêtue (CC650) selon le plan de Taguchi L_{27} ; $N=3^3$

En utilisant le tableau orthogonal standard de Taguchi L_{27} (tableau II.9) [107], les résultats expérimentaux de la rugosité sont illustrés dans le (tableau VI.1). Les essais concernent le tournage dur de l'acier AISI 4140 (57 HRC) par un outil en céramique non revêtue Al_2O_3+TiC (CC650). Le Tableau orthogonal standard de Taguchi L_{27} à 27 lignes (tableau II.9 et § II.3.2.2.3) correspond au nombre d'essais (26 degrés de liberté) à 13 colonnes à trois niveaux. Les facteurs et les interactions sont assignés aux différentes colonnes. La première colonne du tableau a été assignée à la vitesse de coupe (V_c), la seconde à l'avance (f), la cinquième à la profondeur de coupe (ap) et le reste a été assigné aux interactions.

Pour diminuer les erreurs systématiques un ordre aléatoire a été réalisé et la randomisation d'exécution des essais est montrée dans le Tableau VI.1.

L'analyse des résultats du tableau VI.1 montre que l'avance (f) a une incidence croissante et affecte fortement les critères de la rugosité ceci peut-être justifié par les essais N° 1, 9 et 17 ($V_c = 90$ m/min, $ap = 0.45$ mm et f , variables). Cette tendance est en accord avec la théorie basée sur la géométrie de l'usinage et qui prédit que la rugosité théorique est proportionnelle au carré de l'avance. En effet les pièces ayant subi des opérations de chariotage sont caractérisées par la présence des sillons hélicoïdaux sculptés sur leurs surfaces usinées, résultant de la trace du bec d'outil et du mouvement hélicoïdal outil – pièce (déplacement de l'outil et la rotation de la pièce). La géométrie de ces sillons est en fonction de l'avance et de la valeur de l'angle au sommet. Par conséquent ils seront d'autant plus larges et plus profonds que l'avance est élevée.

La vitesse de coupe a un effet relativement important et antagoniste. L'état de surface s'améliore avec une augmentation de la vitesse de coupe ceci est expliquée par les conditions de coupe de l'essai N°19 c'est-à-dire ($V_c = 180$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.15$ mm). Plus la vitesse de coupe est élevée plus le comportement plastique est moins important. Autrement dit, l'écoulement plastique latéral de la matière de la pièce sur les cotés du bec d'outil le long de la direction de coupe augmente les hauteurs maximales des irrégularités de la surface usinée. Si le matériau présente moins de plasticité (dureté élevée) et avec l'augmentation de la vitesse de coupe et donc l'augmentation de la vitesse de déformation, l'état de surface peut être amélioré à la suite de la réduction du flux plastique latéral et ainsi la réduction des hauteurs maximales des irrégularités de la rugosité de la surface usinée. Les échanges thermiques entre le copeau, l'outil et la pièce n'ont plus lieu. Le temps de contact entre ces

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

éléments est trop court, pour que la diffusion de la chaleur ait le temps de se faire. En outre, l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à la décroissance des critères de la rugosité (Ra et Rt). Par conséquent les vibrations du système MO.D.OP diminuent, ce qui rend le processus de coupe plus stable et mène à l'amélioration de l'état de surface cela est justifiée par les résultats trouvés aux tableaux VI.1.

| Facteurs | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------------|-------|-------|------------------|----------------|--------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| N° Essais | Valeurs codifiées | | | Valeurs réelles | | | Paramètres réponses | | | |
| | X_1 | X_2 | X_3 | V_c (m/min) | f (mm/tr) | ap (mm) | Ra (μm) | Rt (μm) | V_y (m/s^2) | V_z (m/s^2) |
| 1 | -1 | -1 | 1 | 90 | 0.08 | 0.45 | 0.43 | 2.61 | 0.8323 | 1.9097 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 180 | 0.12 | 0.45 | 0.49 | 3.59 | 0.1358 | 1.6966 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 90 | 0.12 | 0.30 | 0.66 | 3.90 | 0.8323 | 1.9097 |
| 4 | -1 | 0 | -1 | 90 | 0.12 | 0.15 | 0.64 | 3.10 | 0.0667 | 1.1977 |
| 5 | -1 | -1 | -1 | 90 | 0.08 | 0.15 | 0.39 | 2.25 | 0.1672 | 1.4793 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 180 | 0.16 | 0.30 | 0.53 | 3.95 | 0.0524 | 1.0111 |
| 7 | 1 | -1 | 0 | 180 | 0.08 | 0.30 | 0.32 | 2.75 | 0.0834 | 1.5655 |
| 8 | 0 | -1 | 0 | 120 | 0.08 | 0.30 | 0.35 | 2.22 | 0.9994 | 1.7648 |
| 9 | -1 | 1 | 1 | 90 | 0.16 | 0.45 | 0.78 | 4.03 | 0.5529 | 0.8622 |
| 10 | 0 | -1 | 1 | 120 | 0.08 | 0.45 | 0.37 | 2.1 | 0.2731 | 1.8447 |
| 11 | -1 | 1 | -1 | 90 | 0.16 | 0.15 | 0.72 | 3.56 | 0.7766 | 1.8908 |
| 12 | 0 | 1 | 0 | 120 | 0.16 | 0.30 | 0.63 | 4.1 | 0.7562 | 1.3789 |
| 13 | 1 | -1 | 1 | 180 | 0.08 | 0.45 | 0.34 | 2.85 | 1.3098 | 1.4773 |
| 14 | 1 | -1 | -1 | 180 | 0.08 | 0.15 | 0.30 | 2.83 | 0.5361 | 1.2732 |
| 15 | 1 | 1 | -1 | 180 | 0.16 | 0.15 | 0.51 | 3.60 | 0.0858 | 1.8133 |
| 16 | 1 | 0 | -1 | 180 | 0.12 | 0.15 | 0.46 | 3.40 | 0.5671 | 1.7014 |
| 17 | -1 | 0 | 1 | 90 | 0.12 | 0.45 | 0.68 | 3.43 | 0.8025 | 1.9016 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 120 | 0.12 | 0.30 | 0.54 | 3.67 | 0.0561 | 1.0652 |
| 19 | 0 | -1 | -1 | 120 | 0.08 | 0.15 | 0.33 | 2.1 | 0.9930 | 1.5702 |
| 20 | 1 | 0 | 0 | 180 | 0.12 | 0.30 | 0.47 | 3.41 | 0.0882 | 1.5679 |
| 21 | 1 | 1 | 1 | 180 | 0.16 | 0.45 | 0.55 | 3.30 | 0.0953 | 1.0135 |
| 22 | 0 | 0 | 1 | 120 | 0.12 | 0.45 | 0.56 | 3.4 | 0.4059 | 1.6720 |
| 23 | 0 | 1 | -1 | 120 | 0.16 | 0.15 | 0.62 | 4.02 | 0.5857 | 1.7625 |
| 24 | -1 | -1 | 0 | 90 | 0.08 | 0.30 | 0.41 | 2.80 | 0.1571 | 1.3369 |
| 25 | 0 | 0 | -1 | 120 | 0.12 | 0.15 | 0.51 | 3.60 | 0.2314 | 1.7959 |
| 26 | 0 | 1 | 1 | 120 | 0.16 | 0.45 | 0.64 | 3.95 | 0.1945 | 1.8255 |
| 27 | -1 | 1 | 0 | 90 | 0.16 | 0.30 | 0.74 | 3.56 | 0.9711 | 1.1602 |

Tableau VI.1 : Résultats des critères de la rugosité (Ra et Rt) en fonction des paramètres de coupe et des vibrations (tableau orthogonal standard de Taguchi $L_{27} = 3^3$).

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

VI.2.3. Analyse de la variance (ANOVA) pour les critères de la rugosité (Ra et Rt) en fonction de Vc, f, ap, Vy et Vz : Modèles quadratiques complets

L'analyse de la variance (ANOVA) pour les critères de la rugosité (Ra et Rt) en utilisant le Seq SS pour les tests ainsi que les coefficients de régression estimés sont exposés dans la tableau VI.2 (a et b) . Cette analyse est réalisée pour un niveau de signification $\alpha = 0.05$, c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95%. Dans ces tableaux sont mentionnés les valeurs des degrés de liberté (DL), la somme des carrés (Seq SS), les carrés moyens (CM), le F- valeur, la probabilité (P) et la contribution en pourcentage (PC %) de chaque facteur et des différentes interactions. F-Valeur est utilisée pour la compréhension qualitative des effets relatifs des facteurs. La valeur de la probabilité $P < \alpha$ indique que le facteur a un effet statistique sur les réponses (Ra et Rt) [130]. Plus le pourcentage de contribution (%) est grand, plus le facteur à une influence importante sur les réponses étudiées.

| 1 Coefficients de régression estimés pour Ra | | | 2 Analyse de variance pour Ra | | | | | | |
|--|------------|------|---------------------------------|----|---------|---------|-------|---------|-------|
| Terme | Coeff | P | Source | D | Seq SS | CM | F | P | PC% |
| Constante | 0.096715 | 0.00 | Vc | 1 | 0.11177 | 0.00337 | 30.30 | 0.002 | 22.02 |
| Vc | -0.006679 | 0.00 | f | 1 | 0.34168 | 0.00753 | 67.58 | <0.000 | 67.32 |
| f | 14.4105 | 0.00 | ap | 1 | 0.00720 | 0.00007 | 0.65 | 0.450 | 1.41 |
| ap | -0.283346 | 0.12 | Vy | 1 | 0.00034 | 0.00000 | 0.00 | 0.963 | 0.06 |
| Vy | 0.008492 | 0.45 | Vz | 1 | 0.00005 | 0.00000 | 0.07 | 0.807 | 0.01 |
| Vz | -0.083694 | 0.46 | $Vc \times f$ | 1 | 0.00869 | 0.00274 | 24.63 | 0.003 | 1.71 |
| $Vc \times f$ | -0.018602 | 0.00 | $Vc \times ap$ | 1 | 0.00000 | 0.00000 | 0.01 | 0.921 | 0.00 |
| $Vc \times ap$ | -0.0001074 | 0.92 | $Vc \times Vy$ | 1 | 0.00005 | 0.00008 | 0.75 | 0.420 | 0.00 |
| $Vc \times Vy$ | -0.0005818 | 0.42 | $Vc \times Vz$ | 1 | 0.00001 | 0.00018 | 1.66 | 0.245 | 0.00 |
| $Vc \times Vz$ | -0.003107 | 0.24 | $f \times ap$ | 1 | 0.00009 | 0.00000 | 0.00 | 0.968 | 0.01 |
| $f \times ap$ | 0.0345672 | 0.96 | $f \times Vy$ | 1 | 0.00000 | 0.00003 | 0.31 | 0.595 | 0.00 |
| $f \times Vy$ | -0.296660 | 0.42 | $f \times Vz$ | 1 | 0.00024 | 0.00014 | 1.27 | 0.302 | 0.04 |
| $f \times Vz$ | -0,585447 | 0.30 | $ap \times Vy$ | 1 | 0.00004 | 0.00002 | 0.23 | 0.651 | 0.01 |
| $ap \times Vy$ | 0.049819 | 0.65 | $ap \times Vz$ | 1 | 0.00009 | 0.00021 | 1.90 | 0.217 | 0.01 |
| $ap \times Vz$ | 0.158982 | 0.21 | $Vy \times Vz$ | 1 | 0.00039 | 0.00039 | 3.56 | 0.108 | 0.07 |
| $Vy \times Vz$ | 0.103218 | 0.10 | Vc^2 | 1 | 0.01383 | 0.00273 | 24.54 | 0.003 | 2.72 |
| Vc^2 | 0.0000239 | 0.00 | f^2 | 1 | 0.02167 | 0.00757 | 67.99 | < 0.000 | 4.21 |
| f^2 | -31.3964 | 0.00 | ap^2 | 1 | 0.00006 | 0.00004 | 0.39 | 0.556 | 0.01 |
| ap^2 | 0.218917 | 0.45 | Vy^2 | 1 | 0.00050 | 0.00007 | 0.71 | 0.432 | 0.09 |
| Vy^2 | -0.069484 | 0.43 | Vz^2 | 1 | 0.00035 | 0.00000 | 0.00 | 0.971 | 0.06 |
| Vz^2 | -0.003107 | 0.97 | Erreur résiduelle | 6 | 0.00066 | 0.00011 | | | 0.13 |
| | | | Total | 26 | 0.50751 | | | | 100 |

(a)

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

| 1 Coefficients de régression estimés pour R_t | | | 2 Analyse de variance pour R_t | | | | | | |
|---|------------|------|----------------------------------|----|---------|---------|-------|-------|-------|
| Terme | Coeff | P | Source | DL | Seq SS | CM | F | P | PC% |
| Constant | 9.13260 | 0.00 | V_c | 1 | 0.01212 | 0.00425 | 0.07 | 0.801 | 0.11 |
| V_c | 0.0074903 | 0.95 | f | 1 | 7.60500 | 0.00858 | 0.14 | 0.721 | 73.72 |
| f | 15.3797 | 0.02 | ap | 1 | 0.02420 | 0.00227 | 0.04 | 0.854 | 0.23 |
| ap | 1.58161 | 0.60 | V_y | 1 | 0.02064 | 0.20108 | 3.29 | 0.120 | 0.20 |
| V_y | 7.51855 | 0.67 | V_z | 1 | 0.03278 | 0.15309 | 2.50 | 0.165 | 0.31 |
| V_z | -12.1615 | 0.33 | $V_c \times f$ | 1 | 0.06745 | 0.00230 | 0.04 | 0.852 | 0.65 |
| $V_c \times f$ | 0.017046 | 0.85 | $V_c \times ap$ | 1 | 0.00001 | 0.16664 | 2.73 | 0.150 | 0.00 |
| $V_c \times ap$ | 0.040098 | 0.15 | $V_c \times V_y$ | 1 | 0.00350 | 0.07578 | 1.24 | 0.308 | 0.03 |
| $V_c \times V_y$ | -0.017543 | 0.30 | $V_c \times V_z$ | 1 | 0.00000 | 0.08126 | 1.33 | 0.293 | 0.00 |
| $V_c \times V_z$ | 0.012419 | 0.29 | $f \times ap$ | 1 | 0.01706 | 0.08637 | 1.41 | 0.279 | 0.16 |
| $f \times ap$ | 23.1265 | 0.27 | $f \times V_y$ | 1 | 0.21133 | 0.01717 | 0.28 | 0.615 | 2.04 |
| $f \times V_y$ | -6.56818 | 0.61 | $f \times V_z$ | 1 | 0.09524 | 0.17479 | 2.86 | 0.142 | 0.92 |
| $f \times V_z$ | 20.5423 | 0.14 | $ap \times V_y$ | 1 | 0.04951 | 0.04512 | 0.74 | 0.423 | 0.47 |
| $ap \times V_y$ | 2.10550 | 0.42 | $ap \times V_z$ | 1 | 0.08129 | 0.07879 | 1.29 | 0.300 | 0.78 |
| $ap \times V_z$ | 3.06804 | 0.30 | $V_y \times V_z$ | 1 | 0.00044 | 0.00044 | 0.01 | 0.935 | 0.00 |
| $V_y \times V_z$ | 0.108197 | 0.93 | V_c^2 | 1 | 0.00318 | 0.05847 | 0.96 | 0.366 | 0.03 |
| V_c^2 | -0.0001107 | 0.36 | f^2 | 1 | 0.67773 | 0.20743 | 3.39 | 0.115 | 6.57 |
| f^2 | -164.284 | 0.11 | ap^2 | 1 | 0.15114 | 0.62112 | 10.16 | 0.019 | 1.46 |
| ap^2 | -26.2287 | 0.01 | V_y^2 | 1 | 0.90270 | 0.43278 | 7.08 | 0.037 | 8.75 |
| V_y^2 | -5.14452 | 0.03 | V_z^2 | 1 | 0.00301 | 0.09007 | 1.47 | 0.270 | 0.02 |
| V_z^2 | 2.31953 | 0.27 | Erreur résiduelle | 6 | 0.36670 | 0.06112 | | | 3.55 |
| | | | Total | 26 | 10.3149 | | | | 100 |

(b)

Tableau VI.2 : 1) Coefficient de régression de la surface de réponse, 2) Analyse de la variance pour les critères de la rugosité (R_a et R_t) : a) R_a et b) R_t en fonction de V_c , f , ap , V_y et V_z en utilisant les valeurs non codées (Modèles quadratiques complets)

L'analyse détaillée des valeurs de la rugosité (R_a), présentée dans le tableau VI.2 (a) en fonction V_c , f , ap , V_y et V_z , montre que les termes V_c , f , ap , V_c^2 , f^2 et $V_c \times f$ ont des effets significatifs sur le critère de la rugosité R_a . Le facteur déterminant de la rugosité R_a est l'avance (f), ce qui explique une contribution de 67.32%. Dans le même contexte, la vitesse de coupe vient en deuxième position avec une de contribution de 23.03%. Cependant, la profondeur de coupe (ap) à une influence minime avec une contribution de 1.71%.

Le tableau VI.2 (b) présente l'analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité (R_t) en fonction de V_c , f , ap , V_y et V_z . On remarque que les termes f , f^2 et V_y^2 ont un impact significatifs sur critère de la rugosité R_t car la valeur de la probabilité $P < \alpha$. On enregistre des contributions successivement de (73.72%, 6.67% et 8.75%). Par contre les termes V_c , ap , V_y , V_z , V_c^2 , ap^2 , V_y^2 et $V_c \times f$ n'ont pas des effets significatifs sur critère de la rugosité R_t . Il ressort d'après cette analyse que l'avance par tour (f) est le facteur le plus

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

dominant sur les critères de la rugosité (Ra et Rt). Des résultats similaires ont été rapportés par les travaux des chercheurs [131 et 132]. Par contre la profondeur de coupe (ap) et les interactions ($Vc \times ap$), ($f \times ap$), ($ap \times Vy$) et ($ap \times Vz$) ne présente pas des pourcentages de contribution importants sur les critères de la rugosité (Ra et Rt). On peut notée d'après l'analyse des tableaux VI.2 (a et b) que l'effet de la profondeur de coupe (ap) est faible. Par conséquent si on veut augmenter le débit du copeau, ce constat nous permet de recommander l'augmentation de la profondeur de coupe au lieu de l'avance. Ceci reste valable tant que la coupe reste dans le rayon du bec de l'outil. L'analyse des résultats montre aussi un faible effet des vibrations sur l'évolution des critères de la rugosité (Ra et Rt). Ceci est normal, on pouvait s'y attendre puisque l'usinage est réalisé dans des bonnes conditions avec une rigidité extrême de l'outil et du porte outil. On est dans le cas où on dit que les surfaces sont bonnes et ne présentent pas de traces des vibrations nuisibles. Ici ce sont les paramètres de coupe qui contrôle majoritairement le résultat final et en particulier la rugosité de la surface usinée. C'est bien le résultat technique que l'on recherche d'habitude.

Notons bien que, les erreurs résiduelles associées aux critères de la rugosité (Ra et Rt) des tableaux VI.2 (a et b) sont d'environ (0.13%, 3.55%) respectivement. Les termes Vy , Vz , $Vc \times ap$, $Vc \times Vy$, $Vc \times Vz$, $f \times ap$, $f \times Vy$, $f \times Vz$, $ap \times Vy$, $ap \times Vz$, $Vy \times Vz$, ap^2 , Vy^2 , Vz^2 pour le paramètre de la rugosité Ra et les termes Vc , ap , Vy , Vz , $Vc \times Vz$, $f \times ap$, $f \times Vz$, $ap \times Vy$, $ap \times Vz$, $Vy \times Vz$, ap^2 , Vz^2 pour le paramètre de la rugosité Rt ne présentent pas des signification physique sur les critères de la rugosité (Ra et Rt) car le pourcentage de contribution (PC%) < aux erreur associées.

VI.2.4. Analyse de régression des critères de la rugosité (Ra et Rt) en fonction en fonction du régime de coupe (Vc , f et ap) et les effets des vibrations (Vy , Vz)

Les modèles des critères de la rugosité de surface liés à la hauteur du profil (Ra et Rt) obtenus à partir de la méthodologie de surface de réponse (MSR) en fonction de Vc , f , ap , Vy et Vz en incluant tous les paramètres et leurs interactions sont représentés par les équations VI (3. 4).

$$\begin{aligned} Ra = & 0,0967 - 6,67.10^{-3}Vc + 14,41f - 2,83.10^{-1}ap + 8,5.10^{-3}Vy - 8,3.10^{-2}Vz + 2,4.10^{-5}Vc^2 \\ & - 31,39f^2 - 2,1.10^{-1}ap^2 - 6,94.10^{-2}Vy^2 - 3,11.10^{-3}Vz^2 - 1,86.10^{-2}Vc.f - 1,07.10^{-4}Vc.ap - \\ & 5,82.10^{-4}Vc.Vy + 5,92.10^{-4}Vc.Vz + 3,46.10^{-2}f.ap - 2,96.10^{-1}f.Vy - 5,85.10^{-1}f.Vz + 4,98.10^{-2} \\ & ap.Vy + 1,59.10^{-1}ap.Vz + 1,03.10^{-1}Vy.Vz \end{aligned} \tag{VI.3}$$

$$\begin{aligned} Rt = & 9,133 + 0,74.10^{-2}Vc + 15,38f + 1,58ap + 7,51Vy - 12,16Vz - 1,1.10^{-4}Vc^2 - 164,28f^2 - \\ & 26,22ap^2 - 5,14Vy^2 + 2,30Vz^2 + 1,70.10^{-2}Vc.f + 4,01.10^{-2}Vc.ap - 1,75.10^{-2}Vc.Vy + 1,2.10^{-2}Vc.Vz \\ & + 23,13f.ap - 6,57f.Vy + 20,54f.Vz + 2,10ap.Vy + 3,06ap.Vz + 1,08.10^{-1}Vy.Vz \end{aligned} \tag{VI.4}$$

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

Les modèles sont réduits en éliminant les termes qui n'ont aucun effet significatif sur les critères de la rugosité (Ra et Rt). Cela permet de déduire les facteurs principaux et les interactions correspondants, et d'éliminer ceux ayant le moins d'influence sur la qualité du modèle initial. Ces facteurs peuvent être considérés comme peu influents vis-à-vis de la réponse puisque leur absence n'affecte que d'une manière limitée la qualité et l'aspect prédictif de la modélisation. Les coefficients de régression estimés pour les modèles réduits des critères de la rugosité (Ra et Rt) sont mentionnés dans le tableau VI.3 (a et b). La détermination des coefficients est faite avec des données non codées.

(a) coefficients de régression du modèle réduit pour Ra

| Variables | Coefficient | SE coefficient | T | P |
|-----------|-------------|----------------|-------|-------|
| Constant | 0.09671 | 0.011 | 43.45 | 0.000 |
| Vc | -0.0066792 | 0.0102 | -8.66 | 0.000 |
| f | 14.4105 | 0.0056 | 24.30 | 0.000 |
| $Vc*Vc$ | 0.000023938 | 0.0097 | 4.954 | 0.003 |
| $f*f$ | -31.3964 | 0.0060 | -8.24 | 0.000 |
| $Vc*f$ | -0.0186 | 0.0067 | -4.96 | 0.003 |

(b) coefficients de régression du modèle réduit pour Rt

| Variables | Coefficient | SE coefficient | T | P |
|-----------|-------------|----------------|--------|------|
| Constant | 9.13260 | 0.2719 | 16.00 | 0.00 |
| f | 15.3797 | 0.1313 | 3.109 | 0.02 |
| $ap*ap$ | -26.2287 | 0.1851 | -3.188 | 0.01 |
| $Vy*Vy$ | -5.1445 | 0.4334 | -2.661 | 0.03 |

Tableau V.3 : coefficients de régression estimés pour les modèles réduits des critères de la rugosité (Ra et Rt)

Donc, Les modèles réduits des critères de la rugosité (Ra et Rt) en fonction de Vc , f , ap , Vy et Vz donnent les équations VI (5. 6).

$$Ra = 0,0967 - 6,67 \cdot 10^{-3} Vc + 14,41f + 2,4 \cdot 10^{-5} Vc^2 - 31,39f^2 - 1,86 \cdot 10^{-2} Vc \cdot f \quad (VI.5)$$

$$Rt = 9,133 + 15,38f - 26,22ap^2 - 5,14Vy^2 \quad (VI.6)$$

L'analyse de la variance (ANOVA) des critères de la rugosité (Ra et Rt) est calculée afin d'examiner l'hypothèse nulle de la régression qui est présenté dans le tableau VI.4. L'analyse des résultats indique que les modèles estimés par la procédure de régression de la surface de réponse sont significatifs au niveau (P valeur < 0.05).

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité (Ra et Rt) sont $R^2 = 99.9\%$, R^2 ajusté = 99.4% et $R^2 = 96.4\%$, R^2 ajusté = 84.6%.respectivement.

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

Ces valeurs indiquent que 99.9%, et 96.4% d'une simple variation des critères de la rugosité (*Ra* et *Rt*) sont expliquées par les variables indépendants. Les valeurs des coefficients de détermination sont acceptables, ce qui prouve que les modèles sont relativement significatifs et en bonne adéquation avec les résultats expérimentaux.

| Source | DL | Seq SS | CM ajust | F | P | Remarque |
|--|----|---------|----------|--------|---------|------------|
| (a) Analyse de la variance pour le modèle ajusté pour <i>Ra</i> | | | | | | |
| Régression | 20 | 0.5068 | 0.0253 | 227.44 | < 0.000 | Signifiant |
| Erreur résiduelle | 6 | 0.0066 | 0.0001 | | | |
| Total | 26 | 0.5075 | | | | |
| R^2 | | | | | | 99.9 % |
| R^2 ajusté | | | | | | 99.4% |
| | | | | | | |
| (b) Analyse de la variance pour le modèle ajusté pour <i>Rt</i> | | | | | | |
| Régression | 20 | 9.9482 | 0.4974 | 8.14 | < 0.000 | Signifiant |
| Erreur résiduelle | 6 | 0.3667 | 0.0611 | | | |
| Total | 26 | 10.3149 | | | | |
| R^2 | | | | | | 96.4 % |
| R^2 ajusté | | | | | | 84.6 % |

Tableau V.4 : Tableau (ANOVA) pour les modèles ajustés des critères de la rugosité (*Ra* et *Rt*) pour la céramique non revêtue (CC650)

Pour valider ces modèles, il est nécessaire d'étudier la distribution des valeurs résiduelles (différence entre les valeurs expérimentales des critères de la rugosité (*Ra* et *Rt*) et celles obtenues à partir des modèles de prédiction). La distribution des résidus (valeurs résiduelles) est déterminée par l'évaluation de l'équation (VI.7) [119].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \tag{VI.7}$$

La valeur de la probabilité (P) du test de la normalité (d'Anderson - Darl), pour un intervalle de confiance de 95% (α inférieurs à P), prouve que les données montrent une forte tendance à être une loi normale (figure VI.1a) [125].

Les tracés des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées sont illustrés sur la (figure VI.1b). L'analyse montre que la structure comparative de distribution des points au dessus et au dessous de l'axe des abscisses (valeurs ajustées) montre que l'erreur est indépendamment distribuée et la variance est constante. Des résultats semblables ont été rapportés par Montgomery et Runger [126].

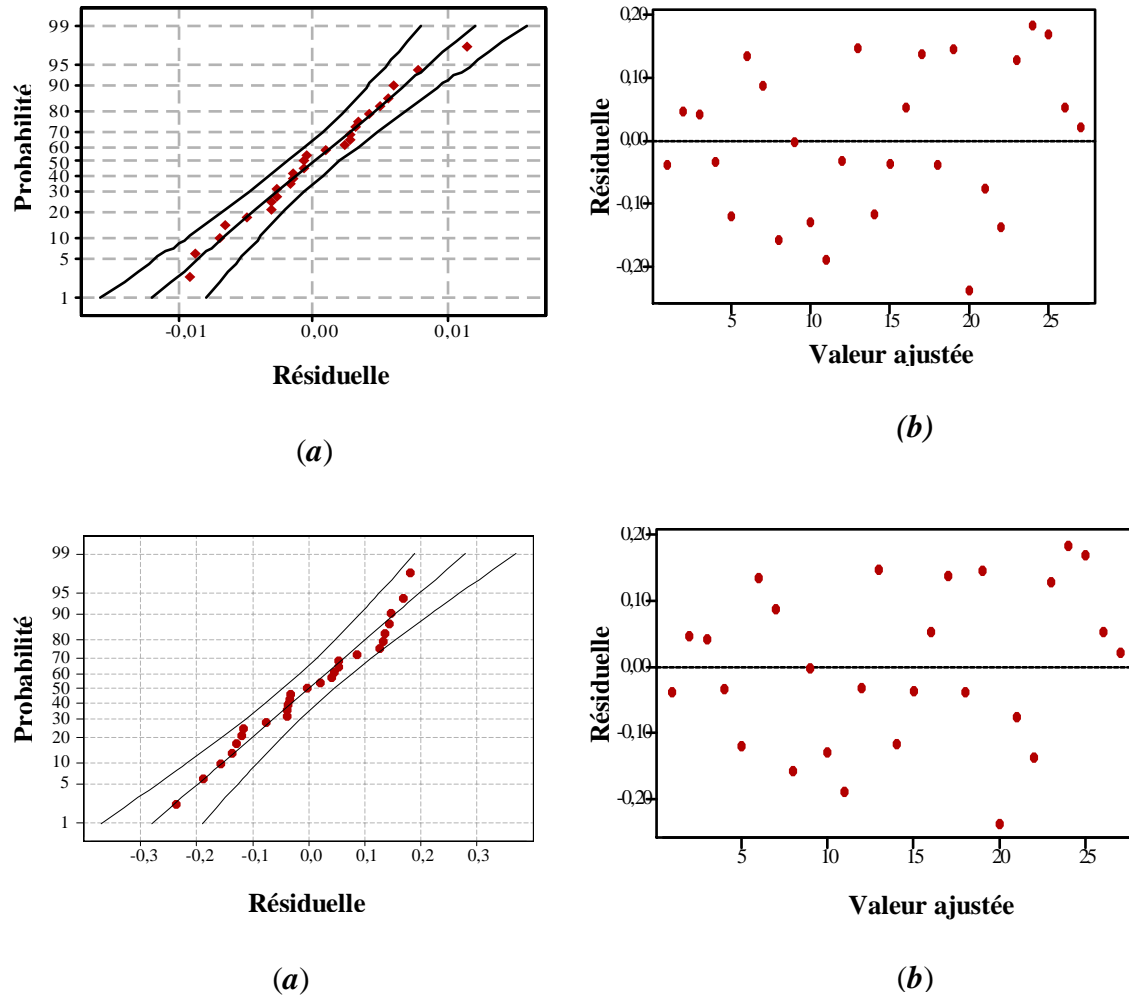


Figure V.1 : Graphique des valeurs résiduelles pour l’ajustement des modèles pour les critères de la rugosité (Ra et Rt) : **(a)** Test de normalité de la distribution des résidus **(b)** Valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustée pour la (CC650)

VI.2.5. Comparaison entre les critères de la rugosité (Ra et Rt) expérimentales et estimés

La comparaison entre les valeurs expérimentales de la rugosité (Ra) et (Rt) et celles estimées par le modèle obtenu par la méthodologie de surface de réponse (MSR) sont présentées dans le tableau VI.5 et sur la figure VI.2.

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

| N° essais | Valeurs expérimentales de Ra (μm) | Valeurs prédites de Ra (μm) | Erreur % |
|-----------|--|--|----------|
| 1 | 0.43 | 0.43311 | -0.72 |
| 2 | 0.49 | 0.49506 | -1.05 |
| 3 | 0.66 | 0.64849 | 1.74 |
| 4 | 0.64 | 0.63398 | 0.94 |
| 5 | 0.39 | 0.39657 | -1.68 |
| 6 | 0.53 | 0.53877 | -1.65 |
| 7 | 0.32 | 0.31757 | 0.75 |
| 8 | 0.35 | 0.35697 | -1.99 |
| 9 | 0.78 | 0.78073 | -0.09 |
| 10 | 0.37 | 0.36687 | 0.84 |
| 11 | 0.72 | 0.72922 | -1.28 |
| 12 | 0.63 | 0.62733 | 0.42 |
| 13 | 0.34 | 0.33730 | 0.79 |
| 14 | 0.30 | 0.29900 | 0.33 |
| 15 | 0.51 | 0.50508 | 0.96 |
| 16 | 0.46 | 0.46321 | -0.69 |
| 17 | 0.68 | 0.68042 | -0.06 |
| 18 | 0.54 | 0.54158 | -0.29 |
| 19 | 0.33 | 0.32588 | 1.24 |
| 20 | 0.47 | 0.47180 | -0.38 |
| 21 | 0.55 | 0.54218 | 1.42 |
| 22 | 0.56 | 0.56275 | -0.49 |
| 23 | 0.62 | 0.61434 | 0.91 |
| 24 | 0.41 | 0.40669 | 0.80 |
| 25 | 0.51 | 0.51269 | -0.52 |
| 26 | 0.64 | 0.64155 | -0.24 |
| 27 | 0.74 | 0.74075 | -0.10 |

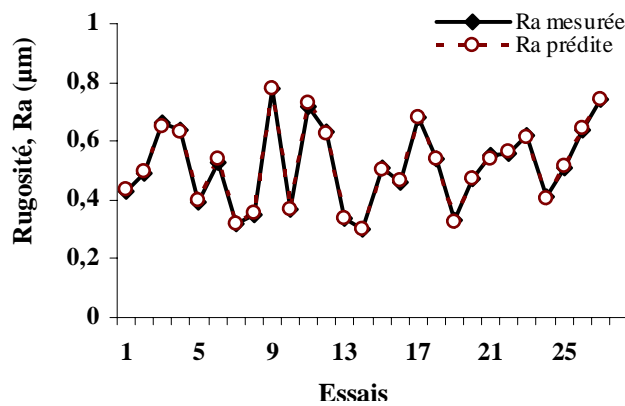
(a)

| N° essais | Valeurs expérimentales de Rt (μm) | Valeurs prédites de Rt (μm) | Erreur % |
|-----------|--|--|----------|
| 1 | 2.61 | 2.64814 | -1.46 |
| 2 | 3.59 | 3.54404 | 1.28 |
| 3 | 3.90 | 3.85889 | 1.05 |
| 4 | 3.10 | 3.13296 | -1.06 |
| 5 | 2.25 | 2.36937 | -5.30 |
| 6 | 3.95 | 3.81652 | 3.37 |
| 7 | 2.75 | 2.66278 | 3.17 |
| 8 | 2.22 | 2.37746 | -7.09 |
| 9 | 4.03 | 4.03244 | -0.06 |
| 10 | 2.10 | 2.22908 | -6.14 |
| 11 | 3.56 | 3.74811 | -5.28 |
| 12 | 4.10 | 4.13180 | -0.77 |
| 13 | 2.85 | 2.70276 | 5.16 |
| 14 | 2.83 | 2.94707 | -4.13 |
| 15 | 3.60 | 3.63724 | -1.03 |
| 16 | 3.40 | 3.34669 | 1.56 |
| 17 | 3.43 | 3.29343 | 3.98 |
| 18 | 3.67 | 3.70897 | -1.06 |
| 19 | 2.10 | 1.95563 | 6.87 |
| 20 | 3.41 | 3.64692 | -6.94 |
| 21 | 3.30 | 3.37599 | -2.30 |
| 22 | 3.40 | 3.53723 | -4.03 |
| 23 | 4.16 | 4.03206 | 3.07 |
| 24 | 2.80 | 2.61771 | 6.51 |
| 25 | 3.60 | 3.43088 | 4.69 |
| 26 | 3.95 | 3.89689 | 1.34 |
| 27 | 3.56 | 3.53895 | 0.59 |

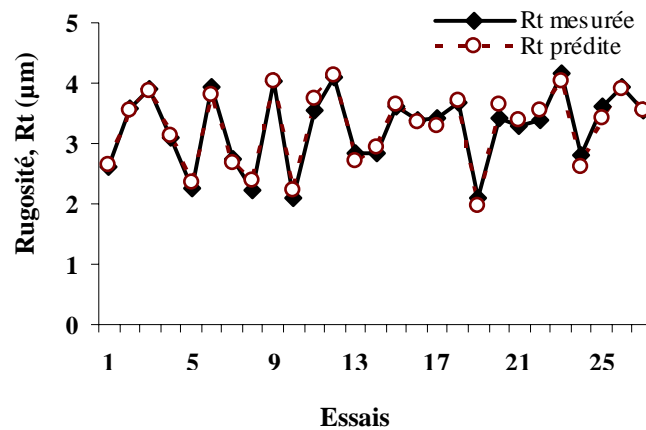
(b)

Tableau V.5 : Comparaison entre les critères de la rugosité expérimentales et estimés :
(a) Ra , (b) Rt pour la céramique non revêtue (CC650)

L'analyse de cette comparaison, des critères de la rugosité (Ra et Rt) montre que l'erreur minimale est de (-0.06% et 1.05%) pour les essais N° (17 et 3) respectivement, et que l'erreur maximale est de (1.74%, 3.98%) pour les essais N° (3 et 17) respectivement. Les figures VI.2 (a et b), montrent aussi que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches. Donc on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donnent des résultats précis.



(b)

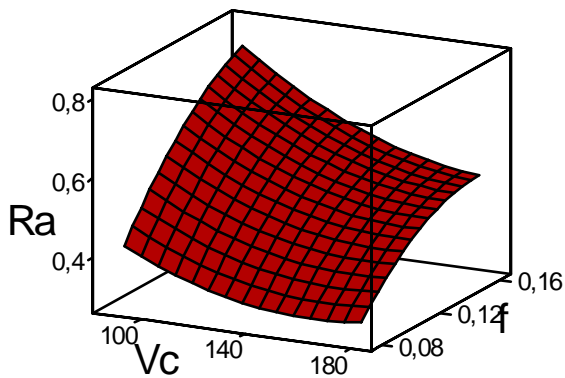


(a)

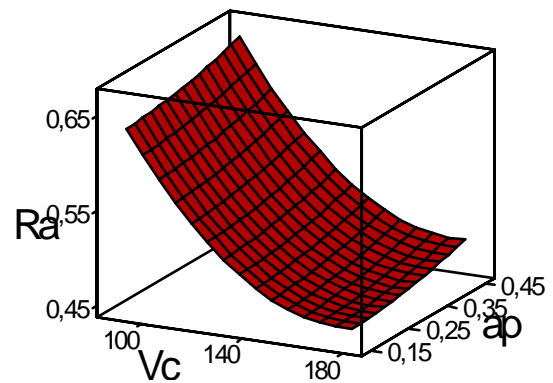
Figure VI.2: Courbe des critères de la rugosité expérimentales et estimés :
(a) Ra , (b) Rt pour la céramique non revêtue (CC650)

VI.2.6. Analyse de la surface de réponses 3D

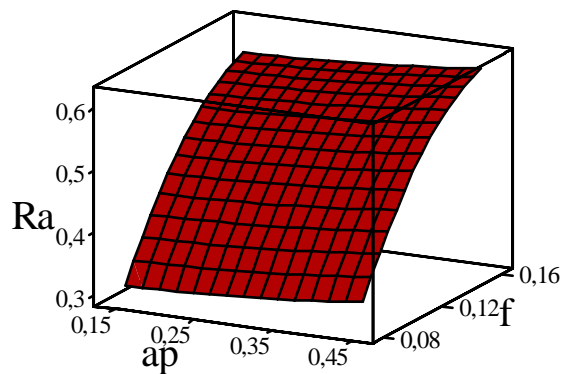
La figure VI.4 (a - h) affiche les surfaces de réponse estimées pour les différents critères de la rugosité liés à la hauteur de profile (Ra et Rt) en fonction de la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f), la profondeur de coupe (ap) et les effets des vibrations de l'outil de coupe dans la direction de la force de coupe radiale (Vy) et tangentielle (Vz). Les critères (Ra et Rt) de la rugosité de surface 3D sont générés à partir des modèles. .



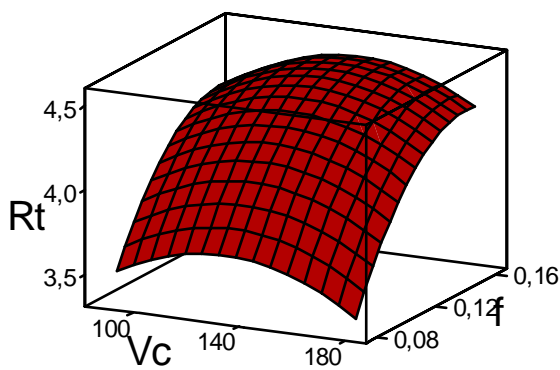
(a)



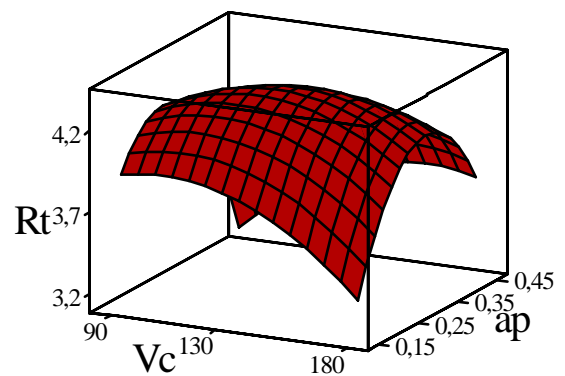
(b)



(c)



(e)



(f)

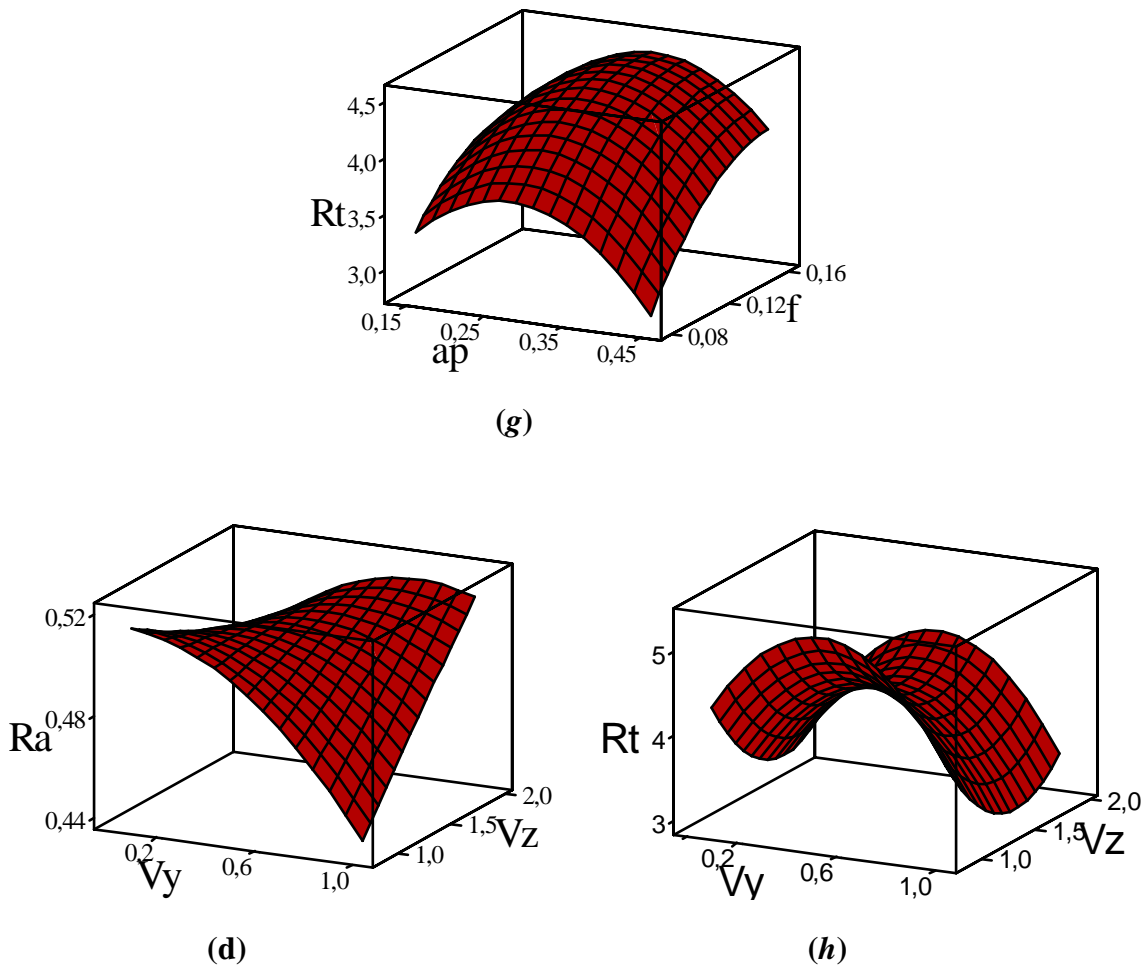


Figure VI.3: Surface des réponses estimées pour les différents critères de la rugosité (Ra et Rt) en fonction de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et les effets des vibrations de l'outil de coupe

La figure VI.3a, montre la rugosité de surface estimée en fonction de la vitesse de coupe et l'avance par tour. L'avance a plus d'effet sur le critère de la rugosité (Ra) et sont effet variation est très élevée par rapport aux autres paramètres. Cette figure montre également que la rugosité de surface Ra diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe, meilleure rugosité de surface est obtenue avec la combinaison d'une vitesse de coupe élevée et faible avance. La figure VI.3b montre la réponse estimée en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de coupe. La vitesse de coupe a un effet significatif sur la rugosité de surface, comme cela a été souligné précédemment, la vitesse de coupe à 180 m/min donne un état de surface le plus bas.

La rugosité de surface (Ra) est presque constante aux faibles profondeurs de coupe. L'influence de la vitesse d'avance et la profondeur de coupe sur le critère de la rugosité (Ra) est présentée sur la figure VI. 3c. Il est bien clair que la profondeur de coupe a un impact

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

minime sur la rugosité de surface. La figure VI. 3e, met en évidence l'impact de la vitesse de coupe et l'avance par tour sur le critère de la rugosité de surface (Rt). Il est clair que (Rt) diminue avec la diminution de la vitesse de coupe et augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance. La relation entre la vitesse de coupe et la profondeur de coupe avec respect du paramètre de la rugosité de surface (Rt) est présentée dans la figure VI.3f. La figure VI. 3g montre la réponse correspondant en fonction de la vitesse d'avance et la profondeur de coupe. La valeur de la rugosité de surface diminue lorsque la vitesse de coupe augmente de 120 à 180 m/min. La figure VI. 3 (d et h) montre les effets des signaux de vibration (dans les directions de la force de coupe tangentielle et la force de coupe radiale) avec respect de la rugosité de surface (Ra et Rt). Selon l'analyse précédente, les tableaux VI.2 (a et b) indiquent que l'effet est minime des vibrations (Vz et Vy) condition de coupe sont bien adaptés.

VI.2.7. Optimisation

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (MSR) a été étudié à trois niveaux différents. Le choix de trois niveaux pour chaque variable est exigé par cette conception afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à La fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir aux critères de la rugosité de surface (Ra et Rt) souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser les critères de la rugosité de surface (Ra et Rt) pour la céramique non revêtue (CC650)

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, $F(x)$, est définie comme suit [120]:

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{wi} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n wi}} \quad (\text{VI.8})$$

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

$$F(x) = -DF$$

Où d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et w_i est la fonction de pondération de d_i . Pour different 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 :

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

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad \text{(VI.9)}$$

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

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

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

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

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Inf}_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad \text{(VI.10)}$$

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

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

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

$$d_i = \left[\frac{\text{Sup}_i - Y_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad \text{(VI.11)}$$

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

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des condition de coupe et des vibrations

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

Le tableau VI.6 et la figure VI.4 (notée ci-dessous), exposent les résultats de l'optimisation réalisés par la méthodologie de surface de réponse (MSR) des différents critères de la rugosité (*Ra* et *Rt*). Les paramètres de coupe optimaux obtenus s'avèrent : la vitesse de coupe 180 m/min, l'avance 0.08 mm/tr, la profondeur de coupe 0.15 mm, les vibrations de l'outil de coupe (*Vz*) et (*Vy*) de 0.862 m/s² et 0.999 m/s², respectivement. Les critères de la rugosité optimisés sont *Ra* = 0.21µm, *Rt* = 2.40 µm

| Réponses | Objectifs | Solution globale | | | | | Valeur inf | Cible | Valeur sup | Réponses prédites |
|--------------------------------------|-----------|------------------|----------|-----------|---------------------|---------------------|------------|-------|------------|-------------------|
| | | <i>Vc</i> | <i>f</i> | <i>ap</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> | | | | |
| | | (m/mm) | (mm/tr) | (mm) | (m/s ²) | (m/s ²) | | | | |
| <i>Ra</i> (µm) | Minimum | 180 | 0.08 | 0.15 | 0.999 | 0.862 | 0.30 | 0.30 | 0.78 | 0.21 |
| <i>Rt</i> (µm) | Minimum | 180 | 0.08 | 0.15 | 0.999 | 0.862 | 2.83 | 2.83 | 4.03 | 2.40 |
| Désirabilité individuelle = 1 | | | | | | | | | | |
| Désirabilité Composite = 1 | | | | | | | | | | |

Tableau VI.6 : Réponse d'optimisation des différents critères de la rugosité *Ra* et *Rt* pour la céramique non revêtue (CC650)

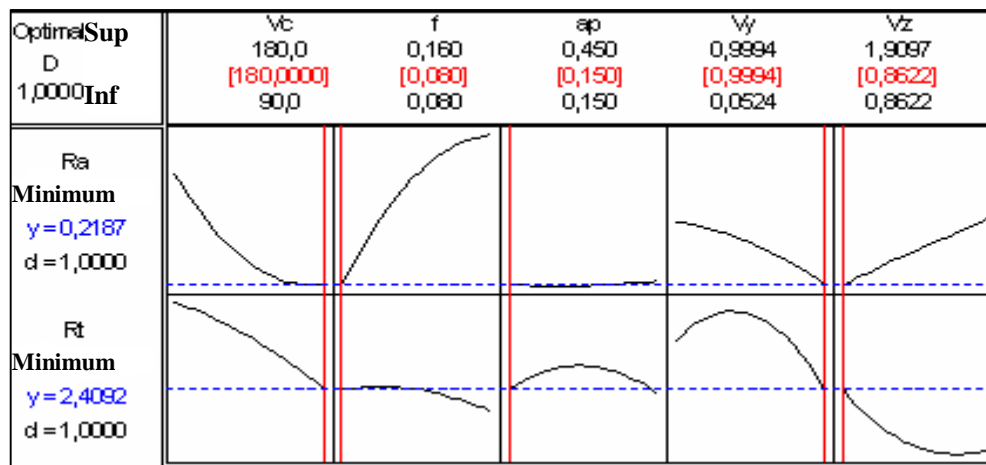


Figure VI.4: Diagramme d'optimisation de réponses multiples des critères de la rugosité (*Ra* et *Rt*) céramique non revêtue (CC650)

VI.3. CONCLUSION

Après cette étude de modélisation et d'optimisation des critères de la rugosité (*Ra* et *Rt*) en fonction des conditions de coupe et des vibrations de l'outil en appliquant la technique statistique de (MSR) lors du tournage dur de l'acier AISI 4140 (57 HRC) avec une céramique non revêtue (CC650), nous pouvons faire les conclusions suivantes :

Chapitre VI : Modélisation et optimisation de la rugosité de surface en fonction des conditions de coupe et des vibrations

- La méthodologie de surface de réponse (MSR) combiné avec les plans d'expériences factoriels est utile pour prédire les critères de la rugosité de la surface usinée.
- L'analyse de la variance (ANOVA) montre que l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c) ont un impact significatif sur la rugosité (R_a) avec des contributions de 67.32% et 22.02% respectivement. Pour le critère de la rugosité (R_t), l'effet de l'avance (f) est de 73.72%. Cependant la profondeur de coupe n'a pas d'influence sur les deux critères de la rugosité de surface.
- Les modèles complets et réduits ont été développés pour corrélérer les critères de la rugosité de surface (R_a et R_t) avec les paramètres d'usinages et les vibrations de l'outil de coupe.
- En se référant au modèle de la rugosité de surface R_a , on peut noter que la vitesse d'avance fournit la première contribution par rapport aux autres paramètres et a un effet significatif sur son évolution. L'interaction entre la vitesse de coupe et la vitesse d'avance et d'autre part l'effet quadratique de la vitesse de coupe et l'avance présentent pour le modèle une contribution secondaire. Les vibrations n'ont pas statistiquement d'effets significatifs sur la réponse étudiée.
- En ce qui concerne le modèle de la rugosité de surface R_t , il est souligné que la vitesse d'avance fournit la principale contribution est influé d'une manière significative la rugosité de surface. L'effet quadratique de la profondeur de coupe et la vibration de l'outil dans la direction de la force de coupe radiale fournir une seconde contribution pour ce modèle.
- Dans les limites des paramètres de coupe choisis pour notre application, les équations 4, 5, 6 et 7 montrent la faible influence des vibrations sur les critères de la rugosité (R_a et R_t), on n'a pas observé des vibrations auto entretenus lors de nos expériences ou de surface vibrées après opération. L'usinage c'est bien passé et ces modèles expérimentaux illustrent aussi ce fait là.
- Les modèles quadratiques de (MSR) avec un coefficient de corrélation de (99.9% et 96.4%) pour les critères de la rugosité de surface (R_a et R_t) respectivement, présentent une forte corrélation avec les résultats expérimentaux.
- Les valeurs optimaux des paramètres de coupe et des vibrations en usinage dur de l'acier AISI 4140 sont comme suit : la vitesse de coupe de 180 m/min, la vitesse d'avance de 0.08 mm/tr, la profondeur de coupe de 0.05 mm, les vibrations de l'outil (accélérations) dans la direction de la force de coupe principale de 0.862 m/s^2 et dans la direction de la force de coupe radial de 0.999 m/s^2 . Les critères de la rugosité de surface optimisée trouvés sont $R_a = 0.21 \text{ }\mu\text{m}$, $R_t = 2.40 \text{ }\mu\text{m}$.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le progrès technique a permis nettement d'élargir les conditions opératoires grâce au développement de nouvelles variétés de nuances de coupe qui sont destinées principalement à l'usinage des matériaux durs. Le choix rationnel de coupe ne peut se faire qu'avec des expérimentations spécifiques à chaque nuance et leur mise en œuvre nécessite une étude approfondie des effets gouvernant le processus de coupe et l'analyse des phénomènes qui trouvent naissance au cours de l'usinage orienté vers l'optimisation des conditions de coupe.

C'est dans ce contexte que nous avons exploré modéliser et optimiser un certain nombre de phénomènes qui interviennent lors de l'usinage de l'acier AISI 4140 trempé avec des outils en céramiques revêtue et non revêtue. Elle est fondé sur l'application de la méthode unifactorielle et inclut l'apport des plans d'expériences.

Les résultats trouvés dans le cadre de ce travail relèvent à la fois de perspectives d'applications industrielles ainsi synthétisées ci-dessous :

- Cette étude a permis d'une part, de mettre en évidence l'impact des conditions de coupe (l'avance par tour, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe) sur les efforts de coupe, pressions de coupe, rugosité des surfaces usinées et sur l'usure en dépouille à la fin de la passe pour les trois matériaux de coupe (la céramique revêtue CC6050, la céramique non revêtue CC650 et la céramique Wiper CC6050).
- Les revêtement permettent d'améliorer de manière significative les performances de l'usinage et facilitent l'évacuation des copeaux de la zone de coupe et cela de manière très importantes (Le revêtement jouant un rôle de barrière thermique, la chaleur du système localisée dans le copeau doit s'évacuer principalement par ce copeau). Cet apport incontestable est surtout dû à l'amélioration des conditions de frottement créées par les revêtements.
- La grande quantité de chaleur produite pendant l'usinage est évacuée principalement par le copeau. Par conséquent la pièce usinée ne sera pas affectée thermiquement et elle ne subira pas de dilatation qui peut endommager la précision macro et micro géométrique de la pièce.
- L'étude des efforts de coupe réalisée dans ce travail permet de mieux comprendre ce phénomène en tournage dur et cela dans le but d'avoir une meilleure stabilité du système usinant. Les résultats des efforts et de la pression de coupe en fonction des conditions de coupe permettent de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant face à l'acier étudié. Cette démarche appelée couple outil-matière, permet de définir un domaine de fonctionnement correct de l'outil.
- La profondeur de coupe (ap) et l'avance par tour (f) montrent l'influence dominantes sur les efforts de coupe et la rugosité de surface respectivement. Malgré l'augmentation de l'avance, les états des surfaces obtenus par les outils céramiques (revêtue et non revêtue) sont comparables à ceux obtenus par la rectification pour toute l'étude.
- L'effort de coupe le plus important pour toute l'étude est l'effort radial en raison de la géométrie négative de la plaquette et le travail à la limite du bec de l'outil.

- Les meilleurs états de surface en fonction de la vitesse de coupe sont enregistrés par la céramique Wiper (CC6050 HW) ($Ra = 0.25 \mu\text{m}$) suivi par la céramique revêtue (CC6050) ($Ra = 0.52 \mu\text{m}$) et en dernier lieu la céramique non revêtue (CC650) ($Ra = 0.66 \mu\text{m}$), ces valeurs compris dans les limites de la rugosité obtenue par la rectification ($Ra = 0.2$ à $1.1 \mu\text{m}$), ce qui offre la possibilité d'exécuter des opérations de dégrossissages et de finitions sur le même poste de travail, ce qui réduit considérablement la gamme de fabrication et bénéficie d'avantage sur le cycle de production, le coût, la qualité et la précision du produit.
- Les efforts de coupe les plus élevés sont ceux générés par la céramique non revêtue (CC650) suivi par la céramique revêtue (CC6050)
- La céramique Wiper (CC6050WH) présentent les meilleurs critères de l'évaluation de l'usinabilité : rugosité et effort de coupe (matériaux à outils de faibles coefficients de conductivité thermique). Donc, processus de coupe plus stable.

L'apport d'une expérimentation basée sur un plan d'expériences doit être considéré dans une double perspective :

- L'apport intrinsèque à l'étude envisagée et exécutée,
- L'apport déductif qu'il possède sur l'optimisation des conditions de l'expérience, ici les conditions de coupe.

- Dans le premier cas, il impose d'établir une distinction entre les paramètres d'entrée retenus pour cerner et étudier le problème posé (ici la connaissance du rôle des outils céramiques (revêtu et non revêtu) sur la rugosité des surface et les efforts de coupe dans l'usinage dur, problème de nature recherche et développement posé par l'industrie) et les variables de sortie mesurées ou seulement analysées qualitativement pour apporter des éléments de réponse au problème posé. La validation du plan apporte la fiabilité aux mesures effectuées et la qualité aux conclusions déduites des mesures dans une démarche scientifique logique et ordonnée entre questions et réponses.

- Dans le deuxième cas, la validation du plan offre des perspectives d'extrapolation assurées dans leurs fondements, et par là meilleures que la démarche du couple - outil - matière sur laquelle se fonde la plupart des industriels.

La notion de couple - outil matière permet de définir des zones stables d'usinages. Une fois la zone définie, les opérateurs doivent adapter cette zone aux autres paramètres de l'usinage pour optimiser le travail, mais cette adaptation essentiellement itérative est faite de manière non méthodique et dépendante du « savoir faire » du régleur. Le couple outil - matière possède donc un caractère prédictif empirique.

Dans le cas d'un plan d'expériences, on dispose de la connaissance d'un comportement de l'ensemble outil – revêtement - matière et non d'un seul domaine de stabilité. L'optimisation des conditions d'usinage ne s'opère plus par « tâtonnement » mais par l'intermédiaire des données de l'analyse comportementale des variables de sortie en fonction des paramètres de l'usinage. L'industriel peut sélectionner sa variable prioritaire (rugosité de surface, effort de coupe par exemple) et, pour cela, choisir ses conditions d'usinage. Il est guidé et dispose des résultats des plans sous différentes formes d'une grande commodité d'utilisation (tableaux de

coefficients, Tableaux des analyses de variances, représentations tridimensionnelles, équations de régression, graphiques des valeurs résiduelles).

En outre, l'utilisation du plan d'expériences permet, avec un nombre limité d'essais pour un même outil et une même matière, de prédire le comportement de l'outil dans le domaine considéré. L'optimisation de l'usinage est possible pour un revêtement donné et entre les différents outils, chaque outil présentant un comportement et une réaction aux contraintes différents.

- L'étude statistique en utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR) a abouti à la détermination des modèles mathématiques et à l'optimisation des conditions de coupe. Ces modèles mathématiques ont montré le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe. D'après les résultats et pour l'usinage par la céramique revêtue (CC6050) et la céramique non revêtue (CC650), on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'ensemble des résultats explorés par la céramique revêtue (CC6050) et la céramique non revêtue (CC650) conduisent à la même forme d'évolution des efforts de coupe et la rugosité de surface. Les rugosités obtenues par la céramique revêtue (CC6050) sont bien meilleures que ceux obtenues par la céramique non revêtue (CC650).

- L'optimisation par MSR des conditions de coupe les mieux adaptées pour $Ra = 0.23\mu\text{m}$; $Fa = 29.87\text{N}$, $Fr = 116.55\text{N}$ et $Ft = 34.83\text{N}$, cas de la céramique revêtue (CC6050) et $Ra = 0.30\mu\text{m}$; $Fa = 30.33\text{N}$, $Fr = 69.93\text{N}$ et $Ft = 60.99\text{N}$ cas de la céramique non revêtue (CC650), nous a donné un régime optimal : $Vc = 180 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $ap = 0.15 \text{ mm}$.

- D'autre part, ce travail a traité l'effet des conditions de coupe (Vc , f et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r) sur le comportement de la céramique non revêtue (CC650) à différentes rayon du bec de l'outil ($r = 0.8$, 1.2 et 1.6) sur la rugosité arithmétique (Ra) et les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft). Donc, on peut tirer que : l'usinage par un angle de direction ($\chi_r = 45^\circ$) a donné des états de surface bien meilleurs que ceux générés par l'angle de direction ($\chi_r = 75^\circ$) et les efforts de coupe générés par ($\chi_r = 45^\circ$) sont plus élevés que ceux générés par ($\chi_r = 75^\circ$) et la modélisation qui comprend on considération toutes les facteurs est très efficace car la valeur idéal converge vers 1.

- Les efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) sont très affectés par l'angle de direction principal et la profondeur de coupe.

- En dernier lieu, l'impact des conditions de coupe (Vc , f et ap) et les effets des vibrations dans les deux directions (Vy et Vz) sur les critères de la rugosité liées à la hauteur du profil (Ra et Rt) et pour l'usinage par la céramique non revêtue (CC650) montrent que : les équations 4, 5, 6 et 7 montrent la faible influence des vibrations sur les critères de la rugosité (Ra et Rt), on n'a pas observé des vibrations auto entretenus lors de nos expériences ou de surface vibrées après opération. L'usinage c'est bien passé et ces modèles expérimentaux illustrent aussi ce fait là.

- Les valeurs optimaux des paramètres de coupe et des vibrations en usinage dur de l'acier AISI 4140 sont comme suit : la vitesse de coupe de 180 m/min , la vitesse d'avance de 0.08 mm/tr , la profondeur de coupe de 0.15 mm , les vibrations de l'outil (accélérations) dans la

Conclusion générale

direction de la force de coupe principale de 0.862 m/s^2 et dans la direction de la force de coupe radial de 0.999 m/s^2 . Les critères de la rugosité de surface optimisée trouvés sont $Ra = 0.21 \text{ }\mu\text{m}$, $Rt = 2.40 \text{ }\mu\text{m}$.

- Les résultats fournis par l'analyse de la variance (ANOVA) ont montré que les modèles issus de (MSR) permettent de prévoir les valeurs des critères de la rugosité et les efforts de coupe avec un intervalle de confiance de 95% et un coefficient de détermination élevé (supérieur à 96.47%).
- Les valeurs des coefficients de détermination trouvés sont élevées suggérant une haute signification des modèles et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.
- Les modèles mathématique explorés peuvent être exploités industriellement, tout en respectant leur domaine de validation.
- Cette étude a mis en valeur les marges des conditions de coupe adéquates à l'optimisation du processus de coupe relatif à cet acier.
- Enfin, ce travail a montré que l'idée d'usinage à sec (sans fluide) peut désormais s'envisager de manière réaliste, grâce à l'action bénéfique des revêtements céramiques.

En fin, j'ai également appris à me montrer plus respectueuse de la sévérité scientifique en rédigeant des articles.

PERSPECTIVES

PERSPECTIVES

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

- L'orientation des efforts de coupe par rapport aux faces d'outils est à considérer dans l'avenir pour établir plus rapidement un couple outil matière (COM) pour de nouveaux matériaux ou de nouveaux outils.
- L'évolution des efforts de coupe corrélée avec l'usure doit être considérée comme une variable dynamique à prendre en compte à la fois pour la conception des machines et pour fixer les conditions de coupe pour une opération donnée. De manière à mieux maîtriser la composante dynamique qui apparaît de plus en plus fortement au fur et à mesure que se développent des nouvelles technologies de la coupe des métaux (l'usinage à grande vitesse et tournage dur).
- Utilisation d'autre type de plan (plan composite).
- Les revêtements, en modifiant les conditions de coupe, modifient aussi de manière sensible l'intégrité de la surface usinée, ce qui offre des perspectives intéressantes. Actuellement dans l'industrie le paramètre « respect de la côte d'usinage » n'est plus le seul objectif. De plus en plus, le monde industriel raisonne en comportement des surfaces par rapport aux contraintes. Des études importantes ont été faites pour caractériser les contraintes résiduelles en fonction du mode opératoire de génération des surfaces. Comme nous l'avons vu les revêtements permettent d'avoir des variations mesurables de cet effet. En conséquence le développement de nouveaux revêtements spécifiques des surfaces offre des perspectives d'amélioration dans le cadre de l'usinage.
- Utilisation d'autres techniques pour modéliser le processus de coupe tel que : l'algorithmes génétiques, réseaux de neurones.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- [1] **C. Bedrin.** Généralités sur la coupe des métaux. Conférences CAST, Lyon, INSA de Lyon, pp.5-7 (1971).
- [2] **Cetim'00.** Tournage dur et usinage à grande vitesse, Centre technique des industries mécaniques (CETIM), Rapport, pp.86 (2000).
- [3] **P. Mathon.** Usinabilité et lois générales de l'usinage des aciers et des fontes, Recueil de conférences, In. La coupe des métaux, INSA de Lyon, pp. 12-164 (1971).
- [4] **I. R. Gonthier.** Tournage des matières trempées. Marché des systèmes management, Vol.27, n°9 pp.17-23 Août (1998).
- [5] **G. Brandt.** "Développement des outils de coupe en céramique" Colloque International du Cercle d'Etudes des Métaux, pp. 8-1 à 8-21, 13 et 14 Novembre (1996).
- [6] **S. Söderberg.** "Recent advances in cutting tool materials" in "advances in hard materials production" (Proc. Eur. Conf. Held in Stockholm May, pp.27-29 (1996), EPMA Shrewsbury pp. 19-27(1996).
- [7] **H. Pastor.** "L'évolution des matériaux pour outils de coupe" Colloque International du Cercle d'Etudes des Métaux, pp 7-1 à 7-11, 13 et 14 Novembre (1996).
- [8] Documentation technique ISCAR Fabricant d'outil.
- [9] Documentation Widia Valenite Fabricant d'outil.
- [10] **H.K. Tonshoff, A. Mohlfeld, C. Spengler:** "Pre-treatment of coated tools for cutting applications" Actes de la conference Internationale THE COATINGS IN MANUFACTURING ENGINEERING, Hannover (2001).
- [11] **H.K. Tonshoff, A. Mohlfeld, C. Spngler.** "PVD coated tools for metal cutting applications" Actes de la conference Internationale THE COATINGS IN MANUFACTURING ENGINEERING, Thessalonique (1999)
- [12] Platit, Documentation commerciale
- [13] **F. Flocke, G. Eisenblatter.** "Dry cutting" Annals du CIRP, Vol. 46 (1997)
- [14] Documentation CETIM : "Les revêtements CVD et PDV appliqués aux outils de coupe" (1994)
- [15] **J. Rech** « Thèse de Doctorat » faisant référence à J. RECH, B, LAHALLE "Bilan économique d'un atelier UGV de production de culasses" Rapport d'étude industrielle, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Cluny (2001)
- [16] **CETIM.** "Revue d'information Cétim Information" Juin (1993), n° 134
- [17] **F. Sanchette, E. Damond, L. Henry, P. Jacquot, G. Veysiere.** "Revêtement sur outils coupants avec la méthode d'évaporation par arc cathodique sous vide" Colloque International du Cercle d'Etudes des Métaux, 13 et 14 Novembre (1996).
- [18] **R.F. Bunshah.** "Handbook of deposition technologies for films and coatings", Noyes publications, ISBN, pp 8155-1337-2 (1994).

- [19] **C. Nouveau.** “Etude de revêtement dur obtenu par méthode PVD : réalisation et caractérisations : applications à l’usinage du bois“ Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers Cluny (2001).
- [20] Documentation Balzers (2001)
- [21] Société française du vide, “Cours d’obtention des couches minces” (1994).
- [22] **F.M. Kustas.** “Nanocoatings on cutting tools for dry machining” (1997).
- [23] **E.M. Tret.** “Métal cutting” Butterworth Heinemann (1991).
- [24] **Z. Zuha, C. Ping.** “Study of cold welding caused by friction in metal cutting” *Wear*, n°201 (1996).
- [25] **Balzers.** Communication personnel et documentations commerciales.
- [26] **C.A. Van Luttermvelt.** “Present situation and future trends in modelling of machining operation” (1998)
- [27] **ISO 4287.** “Spécifications géométriques des produits – Etat de surface : méthode du profil“ Afnor (1997).
- [28] **ISO 4288.** “Spécifications géométriques des produits – Etat de surface : méthode du profils, règles et procédures pour l’évaluation de l’état de surface“ Afnor (1998)
- [29] **B. SCHEFFER.** “Etat de surface : comparaison des différentes normes nationales” Rapport de la régie nationale des usines Renault et de la direction générale de la recherche scientifique et technique (1969).
- [30] **H. Zahouani.** “Quantification de la topographie tridimensionnelle des surfaces” P.H.D. Université de Besançon (1989).
- [31] **H. Zahouani, R. Vargiolu, M. Dursapt, TG. Mathia.** “Motifs and spectral characterisation of anisotropic morphology of engineered surfaces. Incidence in tribology” World tribology congress of London (1997).
- [32] **T.R. Thomas.** “Characterization of surface roughness” *Precision engineering*, Vol 3, (1981).
- [33] **J. Girard.** Les états de surface en tournage, choix des conditions de coupe, influence des principaux paramètres de coupe. *CETIM-INFORMATION*, pp 54-70, N°61/Mai (1997)
- [34] **J. Riout.** Les états de surface. *CETIM-NOTE TECHNIQUE*, pp 93, N°18/ Décembre (1979).
- [35] Etude expérimentale de la rugosité des surfaces usinées, source INSA Lyon. pp. 1-6 Edition (1996/1997).
- [36] **André Grand Adam.** Tolérances. Etats de surface. *Technique de l’ingénieur*. Source (CETIM), Vol. B7 usinage, Fascule B 1620, pp. 8-9 (1990)
- [37] **P. Martin, J. Richard, M. Veron.** The influence of cutting speed variations on tool wear for optimal control of machining. *Annals of the CIRP*, Vol 28, n°1, pp.7-11 (1979).
- [38] **A. BER, M. Goldblat.** The influence of temperature gradient on cutting tool’s life. *Annals of the CIRP*, Vol. 381, n°1, pp. 69-7 (1989).
- [39] **N.P. Sush.** New theories of wear and their applications for tool materials, Vol. 62, pp. 1-20 (1980)

- [40] **Bera. Goldblatim.** The influence of temperature gradient on cutting tools life Annals of CIRP, Vol. 38 (1), pp. 69-73 (1989).
- [41] **O. Pantale.** Développement d'un modèle numérique de la coupe des métaux, pp.21-24.
- [42] **B. Roumesy.** Détermination des lois d'usure des outils de coupe 1, Machine-outil n° 319 Mai, pp.197-199, Mai (1975)
- [43] **F. Leroy.** Usinage et usinabilité, Technique de l'Ingénieur, MC2 M725, pp.3-7, (1984).
- [44] **R. Weil.** Données de base et mise en œuvre pratique. Technique d'usinage. DUNOD, pp. 87-134 (1971).
- [45] **F. Eugène.** La variation de l'énergie interne des métaux, déterminés par l'érouissage, comptes rendus des séances de l'Académie des sciences du 27 Mai (1953).
- [46] **K Maekawa, T. Shirakashi, T. Obikawa.** Recent progress of computer aided simulation of chip flow and tool damage in metal cutting, roceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering manufacture, Vol. 210, N° B3, pp. 233-242 (1996)
- [47] **H. AY, W.J YANG.** Heat transfer and life of metal cutting tools in turning. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, N°3, pp. 613-623, (1998).
- [48] **J. Rech, A. Kusiak, J.L. Battaglia.** Tribological and thermal functions of cutting tool coatings, Surface and Coatings Technology, Vol. 186, N° 3, pp. 364-371 (2004).
- [49] **J. L. Battaglia, H. Elmoussami, L. Puigsegur.** Modélisation du comportement thermique d'un outil de fraisage : approche par identification de système non entier, Comptes Rendus. .Mécanique, Vol. 330(12), pp. 857-864 (2002).
- [50] **J. RECH.** Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures à la fraise mère à grande vitesse, PhD Thesis en Procédés de fabrication, ENSAM, Paris, pp. 198-199. Décembre (2002)
- [51] **Le Calvez.** Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (**ENSAM**), (1995).
- [52] **M.C SHAW, A. VYAS.** The mechanisms of chip formation with hard turning steel. Annals of the CIRP, Vol. 47, N° 1, pp. 77-82 (1998).
- [53] **F. EUGENE.** La variation de l'énergie interne des métaux, déterminés par l'érouissage, comptes rendus des séances de l'Académie des sciences du 27 Mai (1953).
- [54] **R. KOMANDURI R, Z.B. HOH.** A review of the experimental techniques for measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology, Tribology International, Vol. 34, N° 10 pp. 653-682. October (2001).
- [55] **E.M. TRENT, P.K.** Metal Cutting, Butterworth-Heinemann, Boston, 4th Edition, ISBN 0-7506-7069-X, P. 446 (2000).
- [56] **DOCUMENTATION SANDVIK COROMANT.** Main Catalogue 2006, The Official Website of the Sandvik Coromant: <http://www.coromant.sandvik.com> (accessed April 10, 2007).

- [57] **A. GOUSKOV, D. BRUN-PICARD.** Instabilité du perçage vibratoire, Colloque Priméca, Nantes, France (1996).
- [58] **G. F. MORARU.** Etude du comportement dynamique du système pièce-outil-machine en régime de coupe vibratoire, Thèse Doctorat de mécanique de l'Ecole des Arts et Métiers, Aix-en-provence, octobre (2002).
- [59] **M. DOI, S. KATO S.** Chatter vibration of lathe tools, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 78, pp. 1127-1134 (1956).
- [60] **J. P. GURNEY, S. A. TOBIAS.** A graphical method for the determination of the dynamic stability of machine tools. International Journal of Machine Tools Design and Research, Vol.1, pp. 148-156 (1961).
- [61] **J. TLUSTY, M. POLACEK M.** The stability of the machine tool against self excited vibrations in machining, International Research in Production Engineering, ASME, pp. 465-474 (1963).
- [62] **H.E. MERRIT.** Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter: Research I, Journal of Engineering for Industry, Vol. 87, N° 4, pp. 447-454 (1965).
- [63] **D.W WU, C.R. LIU.** An analytical model of cutting dynamics, Part1: Model Building, Trans. ASME, Journal of engineering for industry, Vol. 107, pp. 107-111 (1985).
- [64] **A. ARFAOUI, A.I. FEDOTOV, M. CHOUCANE.** Modélisation des vibrations de l'outil de coupe en tournage. Premier congrès de mécanique ENIM, Rabat, pp.331-342 (1993).
- [65] **M. Thomas, Y. Beauchamp, A.Y. Youssef, J. Masounave.** Effect of tool vibration on surface roughness during lathe dry turning process, Comput. Ind. Eng, Vol, 31 (3-4) pp. 637-644 (1996)
- [66] **S.Y. Luo, Y.S. Liao, Y.Y. Tsai.** Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramics and CBN tools. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 88, pp. 114-121 (1999).
- [67] **CF. Cheung, WB. Lee.** Multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra-precision machining. Precis Eng, Vol 24 (1), pp. 77-87 (2000).
- [68] **E.M. Trent and P.K. Wright.** Metal cutting (*Fourth Edition*). Butterworth-Heinemann, (2000)
- [69] **H.O. Gekonde and S.V. Subramnian.** Tribology of tool-chip interface and tool wear mechanisms. Surface and Coatings Technology, Vol 149(2-3), pp. 151-160, January (2002).
- [70] **R.YOUNES.** Simulation du broutement sur les machines-outils. Séminaire International de Génie Mécanique, SIGMA'02, ENSET, pp. 394-403. Oran Avril (2002).
- [71] **G. C. Benga, A. M. Abrao.** Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 143-144, pp. 237-241 (2003).
- [72] **G. Poulachon. B.P Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, S. Pheulpin, E. Seguin.** The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp. 139 – 144 (2003).

- [73] **M.Y. Noordin, V.C. Venkatesh, S. Sharif, S. Elting, A. Abdullah.** Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. *Journal Materials Processes Technology*, Vol. 46, pp. 58-145 (2004).
- [74] **P.C. Wanigarathne, A.D. Kardekar, O.W. Dillon, G. Poulachon, and I.S. Jawahir.** Progressive tool-wear in machining with coated grooved tools and its correlation with cutting temperature. *Wear*, Vol 259(7-12), pp. 1215-1224 (2005).
- [75] **T. Özel, T-K. Hsu, E. Zeren.** Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 Steel. *Int J Adv Manuf Techno*, Vol, 25: 262–269, pp. 262–269 (2005).
- [76] **A. Kumar, A. Durai, T. Sornakumar.** The effect of tool wear on tool life of alumina based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel. *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 173, pp. 151–156 (2006).
- [77] **ED. Kirby, JC. Chen.** Development of a fuzzy-nets-based surface roughness prediction system in turning operations. *Comput Ind Eng*, Vol, 53, pp. 30-42 (2007).
- [78] **J.P. Davim, L. Figueira.** Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel, *J. Eng. Manuf*, pp. 625-633, 221 (2007).
- [79] **T. Ozel, T.K. Hsu, E. Zeren.** Effects of cutting edge geometry, work piece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol 25, pp. 262-269, (2007).
- [80] **S. Benchiheb, L. Boulanouar.** Influence des Paramètres de Coupe sur la Tenue du CBN 7020 Lors du Tournage Dur. 4th International Conférence on Computer Integrated Manufacturing CIP' (2007).
- [81] **A.M.A. Al-Ahmari.** Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 1-3, pp. 305-311 (2007).
- [82] **CH. R. Vikram Kumar, P. Kesavan Nair, B. Ramamoorthy.** Performance of TiCN and TiAlN tools in machining hardened steel under dry, wet and minimum fluid application, *Int. J. Mach. Mater*, Vol. (1/2), pp. 133-1423 (2008).
- [83] **B. Fnides, H. Aouici, M. A. Yallese.** Rugosité de surface et température en tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 usiné par une céramique mixte (Al_2O_3+TiC). 2^e Congrès National de Mécanique – CNM2, 07-08. Nr (F37), Avril (2008).
- [84] **B. Fnides, H. Aouici, M. A. Yallese.** Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic. ISSN 1392 - 1207. *MECHANIKA*. Nr.2 (70), (2008).
- [85] **K.V.B.S. Kalyan Kumar, S.K. Choudhury.** Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments, Vol. 203, N° 1-3, pp. 95-101(2008).
- [86] **J.S. Dureja, V.K. Gupta, M. Dogra.** Design optimization of cutting conditions and analysis of their effect on tool wear and surface roughness during hard turning of AISI-H11 steel with a coated-mixed ceramic tool. *Journal Engineering Manufacture*, Vol. 223(B), pp. 1441-1453 (2009).

- [87] **M. Arizmendi, F.j. Campa, J. Fernandez, L.N. Lopes de Lacalle, A. Gil, E. Bilbao, F. Veiga, A. Lamikiz.** Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 58/1, pp 93-96 (2009).
- [88] **V.N. Gaitonde, S. R Karnik, L. Figueira, J.P. Davim.** Analysis of machinability during hard turning of cold work tool steel (Type: AISI D2). *Mater Manuf Process*, Vol 24 (12), pp 1373-82 (2009).
- [89] **M. A. Yallese, K. Chaoui, N. Zeghib, L. Boulanouar, J. F. Rigal.** Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Journal Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 1092-1104 (2009).
- [90] **K. Bouacha, M. A. Yallese, T. Mabrouki, J-F. Rigal.** 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 & Hard Materials*, Vol. 28, pp. 349–361 (2010).
- [91] **H. Bouchelaghem, M. A. Yallese, A. Amirat, T. Mabrouki, J. F. Rigal.** Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3), *Machining Science and Technology*, Vol. 14: 4, pp. 471-501 (2010).
- [92] **A. Doniavi, M. Eskanderzade, M. Tahmesebian.** Empirical modeling of surface roughness in turning process of 1060 steel using factorial design methodology. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7(17), pp. 2509-2513.
- [93] **A.K. Sahoo, B.D. Sahoo.** Mathematical modeling and multi-response optimization using response surface methodology and grey based Taguchi method: an experimental investigation, *Int. Exp. Des. Process Optimis*, Vol. 2 (3), pp. 221-242 (2011).
- [94] **I. Asiltürk, H. Akkus.** Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, *Measurement*, Vol 44, pp. 1697-1704 (2011).
- [95] **S. Neseli, S. Yaldiz, E. Türkes.** Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology, *Measurement*, Vol 44, pp.580-587(2011).
- [96] **H. Aouici, M. A. Yallese, K. Chaoui, T. abrouki, J. F. Rigal.** Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement* Vol. 45, pp. 344-353 (2012).
- [97] **R. Suresh and al.** Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool, Vol 45, pp. 1872–1884 (2012).
- [98] **Vikas Upadhyay, P.K. Jain, N.K.** In-process prediction of surface roughness in turning of Ti–6Al–4 V alloy using cutting parameters and vibration signals Mehta *Measurement xxx* (2012) Vol. 46, Issue 10, pp. 4005-4022 (2013).
- [99] **Subramanian et al.** Optimization of end mill tool geometry parameters for Al7075-T6 machining operations based on vibration amplitude by response surface methodology, *Measurement*

- [100] **K. Venkata Rao**. Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring (2013), Measurement, Vol. 46, pp. 4075-4084 (2013).
- [101] **M. Elbah, M. A. Yallese, H. Aouici, T. Mabrouki, J. F. Rigal**. Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel (2013)
- [102] **R. Fisher**. Statistical Methods for Research Workers, Oliver and Boyd, (1925).
- [103] Properties and selection et metallography, structures and phase diagrams, metals handbooks Vol. 1 et 8
- [104] **P. Souvay**. “Plan d’expériences, la méthode Taguchi” Edition afnor ISBN 2-12-4750028-3 (1995).
- [105] **J. Goupy**. “Plan d’expérience“ Technique de l’ingénieur, cahier réf P-230
- [106] **P. Lanteri, R. Longerey, M. Ouadou et T. Mathia**. “Application de la planification expérimentale à l’optimisation des procédés d’élaboration des surfaces” Les Entretiens de la Technologie, Congrès 11 mai 1993, Nantes.
- [107] **P. Ross**. Taguchi techniques for quality engineering –loss function. Orthogonal experiments. Parameter and tolerance design, McGraw-Hill. New york, PP. 10-50 (1988)
- [108] **AFNOR** : NF E 66-520-1 : Norme française Couple outil matière “Domaine de fonctionnement des outils coupants : présentation générale”
- [109] **AFNOR** : NF E 66-520-2 : Norme française Couple outil matière “Domaine de fonctionnement des outils coupants : description générale”
- [110] **AFNOR** : NF E 66-520-2 : Norme française Couple outil matière “Domaine de fonctionnement des outils coupants : Application à la technologie de tournage”
- [111] **VN Gaitonde, SR Karnak, L. Figueira, JP. Davim**. Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. Int J Refract Met Hard Mater Vol. 27, pp. 754-63 (2009).
- [112] **VN Gaitonde, SR Karnik, L. Figueira, JP. Davim**. Performance comparison of conventional and wiper ceramic inserts in hard turning through artificial neural network modelling. Int J Adv Manuf Technol Vol. 52(1-4), pp. 754-63 (2011).
- [113] **W. Grzesik, T. Wanat**. Hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts. Int J Mach Tool Manuf Vol. 46, pp. 1988-95 (2006).
- [114] **Gaurav Bartarya, S.K. Choudhury**. State of the art in hard turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture.
- [115] **J.P. Davim (Ed.)**. Machining of hard Materials, Springer, (2011).
- [116] **A.I. Khuri, J.A. Cornel**. Response Surfaces: Design and Analysis, MARCEL DEKKER (Éditeur), New York, NY, USA, (1987).
- [117] **R.H Myers, D.C. Montgomery**. Response Surface Methodology, 2nd Ed., WILEY SONS (Éditeurs), New York, NY, USA, (2002).

- [118] **VN. Gained, SR. Karnik, M. Faustino, JP. Davim.** Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in EDM electrodes. *Int J Refract Metals hard Mater*, Vol. 27, pp. 754-63 (2009).
- [119] **H. Zarepour, A. Fadaei, D. Karimi, S. Amini.** Statistical analysis on surface roughness in EDM process of tool steel DIN 1.2714 used in forging dies. In: *Proceedings of AMPT (2006)*, Las Vegas, USA, July 30-August3.
- [120] **R.H. Myers and D.C. Montgomery.** *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc.: New York, (2002).
- [121] **VN. Gained, SR. Karnik, M. Faustino, JP. Davim.** Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in EDM electrodes. *Int J Refract Metals hard Mater*, Vol. 27, pp. 754-63 (2009).
- [122] **E. Aslan.** Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC). *Mater Design*. Vol. 26, pp. 21-7 (2005).
- [123] **Y. Sahin, A.R. Motorcu,** Surface roughness model for machining of mild steel by coated cutting tools. *Mater Des*, Vol. 26, pp. 321-6 (2005).
- [124] **T. Ozel, T.K. Hsu, E. Zeren.** Effects of cutting edge geometry, work piece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol. 25, pp 262-269 (2007).
- [125] **D.C Montgomery.** *Design and analysis of experiments*, 5 ed., John Wiley & Sons Inc, New York, (2001).
- [126] **D.C. Montgomery, G.C.Runger.** *Applied statistics and probability for engineers*, third ed. John wiley & sons inc., USA (2003).
- [127] **J.A. Arsecularatne, L.C. Zang, C. Montross, P. Mathew,** On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools, *J. Mater. Process. Technol.* 171 (2006) 244-252.
- [128] **J.G. Lima, R.F. Avila, A.M. Abrao, M. Faustino and J.P. Davim.** Hard turning: AISI 4340 high strength low steel and AISI D2 cold work tool steel, *J Mater Process Technol.* Vol.169, pp. 388-395 (2005).
- [129] **YK. Chou, H. Song.** Tool nose radius effects on finish turning. *J Mater Process Technol* Vol. 148, pp. 259-68 (2004).
- [130] **J.P Davim, L. Figueira.** Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Mater Des*.Vol. 28, pp.1186-91 (2007).
- [131] **J.P. Davim.** A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *J Mater Process Technol*, Vol.116, pp. 305-8 (2001).
- [132] **JG. Lima, RF Avila, AM. Abrao, M. Faustino, J.P. Davim.** Hard turning: AISI 4340 high strength low alloyed steel and AISI D2 cold work steel. *J Mater Process Technol.* Vol 169, pp. 388-95 (2005).

Les travaux de cette thèse ont été présentés via plusieurs communications dont un article paru dans la revue "Elsevier" *Measurement* ainsi que quatre communications internationale

Publication:

L'article intitulé: On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. *a été publié dans la revue "Elsevier" **Measurement**, No. 46(2013) 1671-1681*

Auteurs: Zahia Hessainia, A. Belbah, M. A. Yallese, T. Mabrouki, J. –F. Rigal

Communications :

- *1^{er} Congrès International sur la Mécanique Avancée* qui s'est tenu du 23 au 25 Mai 2010 à Annaba par **la communication intitulée :**

Détermination des modèles de la rugosité et de l'effort de coupe lors de l'usinage dur en utilisant la méthodologie de la surface de réponse

Auteurs: Z. Hessainia, M. A. Yallese, S.belhadi, N.Kribes

- *3^e Congrès Algérien de Mécanique (CAM2011)* qui s'est tenu du 14 au 17 Novembre 2011 à Guelma **par la communication intitulée :**

Etude de l'impact des conditions d'usinage sur la rugosité de surface basée sur la méthodologie de la surface de réponse en tournage dur

Auteurs : Z. Hessainia, M. A. Yallese ¹, N. Kribes, S. Belhadi

- *11^{ème} Congrès de Mécanique 2013 Université Ibn Zohr, Agadir-Maroc* qui s'est tenu du 23 au 26 Avril 2013

Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in the hard turning

Auteurs : Z. Hessainia, S. Belhadi, M. A. Yallese, A. Belbah, Jean-François Rigal

- *4^e Congrès Algérien de Mécanique (CAM2013) Université de Mascara* qui s'est tenu du 25 au 28 Novembre 2013 **par la communication intitulée :**

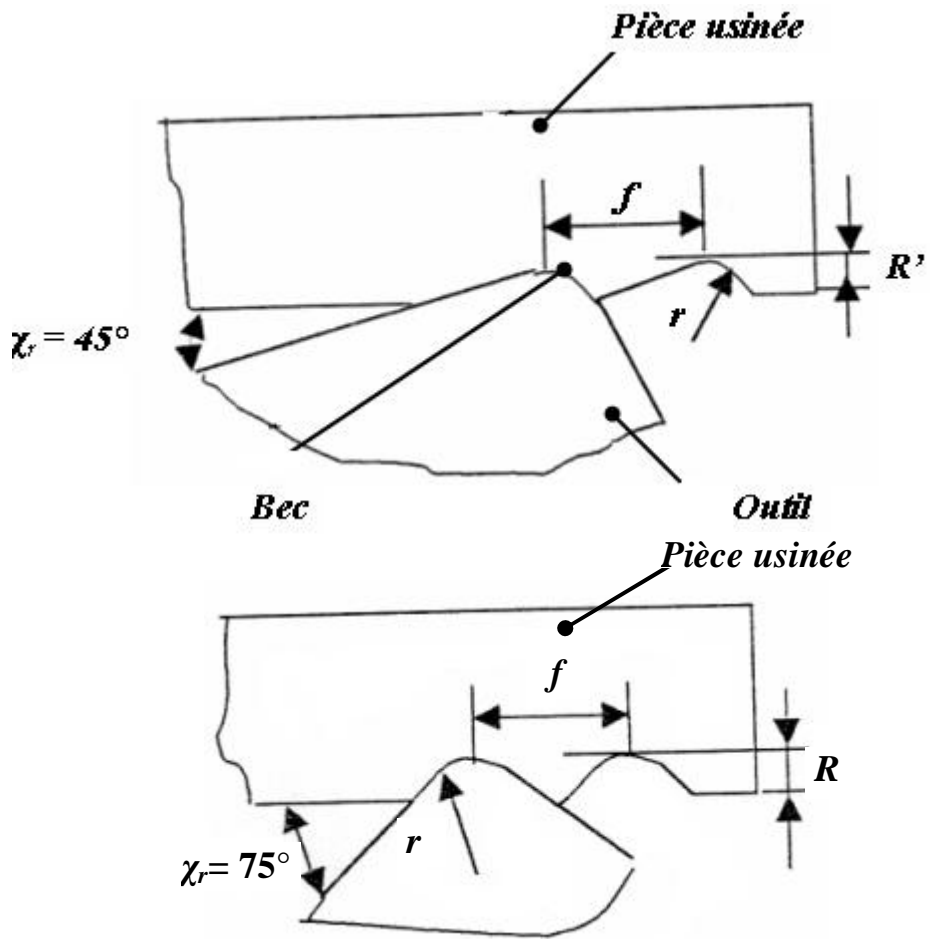
Surface roughness prediction and optimisation from machining parameters by response surface methodology in the hard turning.

Auteurs : Z. Hessainia, M. A. Yallese ¹, N. Kribes, S. Belhadi

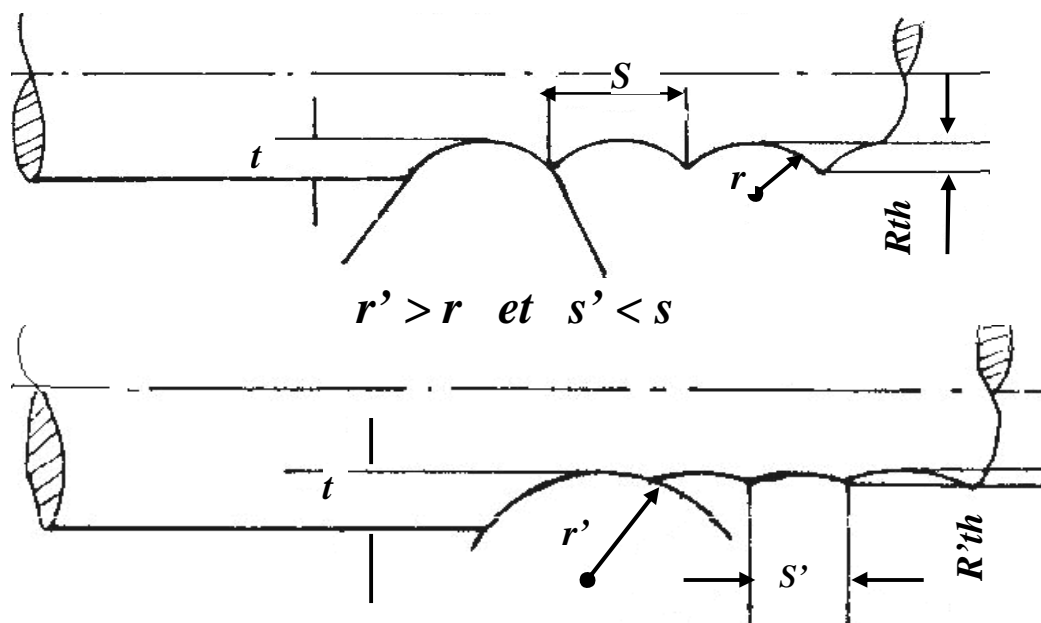
ANNEXE

ANNEXE N°1

INFLUENCE DE L'ANGLE DE DIRECTION SUR LA HAUTEUR ET LE PROFILE DE LA RUGOSITÉ DES SURFACES USINÉES



INFLUENCE DU RAYON DU BEC DE L'OUTIL SUR LA RUGOSITÉ



ANNEXE N°2

DÉSIGNATION NORMALISÉE DES OUTILS PLAQUETTES

| 1. Forme de plaquettes | 2. Angle de dépouille | 3. Tolérance | 4. Caractéristiques des faces et de la fixation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|---|------------------|--|----------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|------------|----------|--------|--------|---|--------|--------|---|--------|--------|---|--------|--------|-----------------------------|--------------------------|-------|-----------------------------|--------------------------|--------|-----------------------------|--------------------------|------------|--|--|--|
| | <p>O = autres angles de dépouille requérant des indications</p> | <p>Ecart admis en mm pour</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>d</th> <th>m</th> <th>s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A ±0,025</td> <td>±0,005</td> <td>±0,025</td> </tr> <tr> <td>C ±0,025</td> <td>±0,013</td> <td>±0,025</td> </tr> <tr> <td>E ±0,025</td> <td>±0,025</td> <td>±0,025</td> </tr> <tr> <td>G ±0,025</td> <td>±0,025</td> <td>±0,05-0,13</td> </tr> <tr> <td>H ±0,013</td> <td>±0,013</td> <td>±0,025</td> </tr> <tr> <td>J¹⁾ ±0,05-0,015²⁾</td> <td>±0,005</td> <td>±0,025</td> </tr> <tr> <td>K¹⁾ ±0,05-0,015²⁾</td> <td>±0,013</td> <td>±0,025</td> </tr> <tr> <td>L¹⁾ ±0,05-0,015²⁾</td> <td>±0,013</td> <td>±0,025</td> </tr> <tr> <td>M ±0,05-0,015²⁾</td> <td>±0,08-0,20²⁾</td> <td>±0,13</td> </tr> <tr> <td>N ±0,05-0,015²⁾</td> <td>±0,08-0,20²⁾</td> <td>±0,025</td> </tr> <tr> <td>U ±0,05-0,025²⁾</td> <td>±0,13-0,38²⁾</td> <td>±0,05-0,13</td> </tr> </tbody> </table> <p>1) Plaquettes avec tranchants rectifiés 2) Selon gabarit de plaquette (se référer à la norme ISO 1832)</p> | d | m | s | A ±0,025 | ±0,005 | ±0,025 | C ±0,025 | ±0,013 | ±0,025 | E ±0,025 | ±0,025 | ±0,025 | G ±0,025 | ±0,025 | ±0,05-0,13 | H ±0,013 | ±0,013 | ±0,025 | J ¹⁾ ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,005 | ±0,025 | K ¹⁾ ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,013 | ±0,025 | L ¹⁾ ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,013 | ±0,025 | M ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,08-0,20 ²⁾ | ±0,13 | N ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,08-0,20 ²⁾ | ±0,025 | U ±0,05-0,025 ²⁾ | ±0,13-0,38 ²⁾ | ±0,05-0,13 | <p>X Avec particularité demandant un dessin ou une descript exacte</p> | | |
| d | m | s | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A ±0,025 | ±0,005 | ±0,025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C ±0,025 | ±0,013 | ±0,025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E ±0,025 | ±0,025 | ±0,025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| G ±0,025 | ±0,025 | ±0,05-0,13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H ±0,013 | ±0,013 | ±0,025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J ¹⁾ ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,005 | ±0,025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K ¹⁾ ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,013 | ±0,025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| L ¹⁾ ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,013 | ±0,025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,08-0,20 ²⁾ | ±0,13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N ±0,05-0,015 ²⁾ | ±0,08-0,20 ²⁾ | ±0,025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| U ±0,05-0,025 ²⁾ | ±0,13-0,38 ²⁾ | ±0,05-0,13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5. Longueur de l'arête de coupe | 6. Épaisseur de la plaquette | 7. Rayon | 8. Forme des arêtes de coupe | 9. Sens de coupe | 10. Spécification du fabricant | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | <p>02 s = 2,38 03 s = 3,18 T3 s = 3,97 04 s = 4,76 05 s = 5,56 06 s = 6,35 07 s = 7,94 09 s = 9,52</p> | <p>02 r = 0,2 04 r = 0,4 08 r = 0,8 12 r = 1,2 16 r = 1,6 24 r = 2,4</p> <p>00 pour diamètre(s) avec cotes en pouces convertis en mm. M 0 pour diamètre(s) en cotes métriques.</p> <p>① Angle de dir du tranchant X: A = 45° D = 60° E = 75° F = 85° P = 90° Z = autres angles de direction</p> <p>② Angle de dépouille sur le tranchant A = 3° B = 5° C = 7° D = 15° E = 20° F = 25° G = 30° N = 0° P = 11° Z = autres angles de direction</p> | | | <p>Le code ISO comprend 9 symboles. On n'utilise les symboles 8 et/ou 9 qu'en cas de besoin. Le fabricant peut ajouter d'autres symboles. Ces derniers sont combinés avec un trait d'union. (p. ex. pour spécifier la forme d'un brise-copeaux).</p> <ul style="list-style-type: none"> - G 1 - G 2 - G 3 - M 1 - M 2 - M 3 - M 11 - M 20 - X 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ANNEXE N°3

PROCÉDÉ D'USINAGE RECTIFICATION : d'après : A. Chevalier, Guide de dessinateur industriel, Hachette, 1982.

| <i>Procédé d'usinage</i> | <i>Rectification</i> |
|---------------------------------|----------------------|
| Rugosité Ra (μm) | 0.2 - 1.6 |