

République Algérienne Démocratique & populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
Et de la Recherche scientifique

## Mémoire de Magister



74

Département de: Génie Mécanique  
Spécialité: Construction mécanique et productive

Présenté par: HESSAINIA ZAHIA

### CONTRIBUTION A L'ETUDE DES FACTEURS AFFECTANT LA RUGOSITE DES SURFACES EN USINAGE DUR

Sous la Direction de: Dr. Yallese Med Athmane

Devant le jury

|                             |                |                                 |
|-----------------------------|----------------|---------------------------------|
| Dr. N. OUELAA               | Pr. Président  | Université 8 Mai 1945 Guelma    |
| Dr. M.A. YALLESE            | M.C Rapporteur | Université 8 Mai 1945 Guelma    |
| Dr. L. BOULANOUAR           | Pr. Examineur  | Université Badji Mokhtar Annaba |
| Dr. A.REZAK BEZAZI          | M.C Examineur  | Université 8 Mai 1945 Guelma    |
| M <sup>r</sup> . S. BELHADI | M.C C Invité   | Université 8 Mai 1945 Guelma    |

2008

## Remerciements

Ce travail a été réalisé au laboratoire de mécanique et structure, département de mécanique de l'université de **8 Mai 1945 de Guelma**.

Mes remerciements iront bien à mon directeur de thèse le Dr. MOHAMED ATHMEN YALLESE qui a dirigé ce travail avec beaucoup de rigueur et d'implication. Je tiens à lui témoigner ma profonde reconnaissance pour m'avoir communiqué son enthousiasme pour la recherche et pour m'avoir initié à un sujet passionnant par ses conseils judicieux et précieux.

Je remercie vivement le Pr. NOUREDINE OUELAA pour son aide précieuse durant les phases des essais de vibration et l'analyse spectrale des signaux.

Je tiens à exprimer ma gratitude et ma sympathie aux membres du jury Monsieur: Pr NOUREDINE OUELAA, Pr. LHADAR BOULANOUAR, Dr. A.RAZAK BEZAZI, M<sup>r</sup>. SALIM BELHADI, qui ont bien voulu examiner le contenu de ce travail.

Je tiens à remercier M<sup>me</sup> NADIA FRIOUI de m'avoir toujours aidé par ses encouragements à surmonter beaucoup de difficultés.

J'adresse également mes sincères remerciements, à tous les personnels du département de mécanique et plus particulièrement, les techniciens du hall technologique et du centre de calcul du département.

## ملخص

تعتبر الخراطة الصلبة من احدث الطرق المستعملة . فهي متناوبة(متعاقبة) مع التجليخ الاتفاقي, الذي يعد بطيئا و ثمينا أثناء تشغيل القطع الدقيقة.

فهي عملية رائدة جلبت انتباه عديد من الصناعيين بسبب الايجابيات التي تمتاز بها من وجهة نظر الإنتاجية والمرونة. من اجل التحكم في عمل الخراطة الصلبة و الرفع من مرد وديتها أثناء الاستعمال الصناعي ,بات من الضروري دراسة نوعية السطوح المحصل عليها و أيضا القوانين المسيرة للتغيرات بدلالة شروط (عناصر) القطع.

لتعين و تخصيص نوعية السطح 54 (HRC)المصلد CrMo442عناصر كثيرة تؤثر على نتائج الدراسة التجريبية للفضلا للخراطة الصلبة حيث (مثل) عناصر القطع (سرعة القطع, التغذية, و عمق التمريرة ) ,خصائص الأداة (نصف قطر قمة الأداة ,زاوية التوجيه الأساسية ) . التآكل, و جهود القطع المولدة اثر تلامس الأداة بالقطعة المشغلة دون أن ننسى اهتزازات الأداة الناتجة عن ظاهرة القطع.

يبين تحليل النموذج الرياضي المحصل عليه للتآكل أن سرعة القطع و التغذية لهما تأثير متناسب عكسي مع مدة صلاحية (حياة) الأداة.

معالجة النتائج بواسطة تطبيق بالمقاربة الإحصائية (مساحة الأجوبة) مما سمح لنا من نمذجة الخشونة , جهود القطع و الاهتزاز بدلالة شروط 'عناصر' القطع.

## **Résumé**

Le tournage dur est un procédé récent dans son utilisation. IL se présente comme une alternative à la rectification conventionnelle, souvent longue et coûteuse lors de l'usinage des pièces de précision. C'est un procédé promoteur qui s'intéresse de nombreux industriels pour les avantages qu'il présente du point de vue productivité et flexibilité. A fin de maîtriser le procédé du tournage dur et de rentabiliser son utilisation industrielle il est nécessaire d'étudier la qualité de la surface obtenue ainsi que les lois qui régissent sa variation en fonction des paramètres d'usinage. Plusieurs paramètres portant sur les résultats d'une études expérimentale de l'acier 42CrMo4 durci (54HRC) pour caractériser la qualité de surface en tournage dur tels que les paramètre de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance et la profondeur de passe), les paramètres de l'outil (rayon du bec, angle de direction principale), l'usure et les efforts de coupe générés aux contact outil pièce sans oublier les vibrations de l'outil dues aux phénomènes de coupe. L'analyse du modèle mathématique de l'usure obtenu a montré que la vitesse de coupe et l'avance ont une influence inversement proportionnelle sur la durée de vie de l'outil. Le traitement des résultats par l'intermédiaire de l'application d'une approche statistique (surface de réponses) nous a permis de modéliser la rugosité, efforts de coupe, vibration en fonctions des paramètres de coupe.

**Mots-clés:** tournage dur, qualité de surface, rugosité, vibration, surface de réponse, model de prédiction.

## **Abstract**

The hard turning is a new machining process. This presents an alternative of the costly grinding one. It is beneficial and efficient to increase quality and reduce manufacturing costs. In order to maximize the hard turning process rentability, it is necessary to study several phenomena that affect the roughness of hard turning surface and the associated prediction models. In hard turning, surface quality is affected by many factors such as, (cutting speed, feed, depth of cut), tools characteristics (nose radius, angle of principal direction), wear of tool, and cutting force geneses with contact tool-pièce, with out forgetting the vibration of the tool due to the phenomena of cut. The analysis of the mathematical model of wear obtained showed that the cutting speed and the feed rate have an influence inversely proportional over the life span of the tool. The treatment of the results via the application of a statistical approach (surface of Reponses) enabled us to model roughness, cutting force, vibration to the function of parameters of cut.

**Keywords:** hard turning, surface quality, roughness, vibration, regression, prediction models.

## **Problématique**

Devant la concurrence intense et la demande des produits rigoureuse du point de vue complexité des matériaux précision dimensionnelles et finition, la grande dureté, la faible ductilité, le rapport entre la dureté et le module d'élasticité élevé, le pouvoir abrasif élevée. Et devant une dispersion ou une instabilité des caractéristique de la qualité du produit fini, par les opérations de super finition qui sont en général effectuées par abrasion (meule, poudre, toile). Ces technologies induisent un certain nombre de contraintes, montage et démontage de pièces entraînant des problèmes de coûts et de précision, pollutions des surfaces générés par les grains d'abrasif qui restent incrustés dans la pièce, les fluide de coupe obligatoires dans les opérations de rectification créant des actions chimiques et physico-chimiques (fissures, corrosion), la création de contraintes résiduelles qui peuvent être dû à un effet thermique où mécanique. Ce constat nous a conduit à essayer d'obtenir des surfaces superfinis par l'amélioration de la qualité de la géométrie de l'outil coupant qui s'additionnent aux facteurs connues telle que: la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de passe, la rigidité de la pièce ainsi que les divers interactions entre ces facteurs afin de définir les ordres de grandeurs des rugosités pour obtenir une qualité optimales et à rechercher aussi bien en usinage dur. Cette technologie a obligé l'industrie à adopter de nouvelles stratégies d'optimisation dans l'usinage qui nous permet d'avoir un gain substantiel de productivité par l'intermédiaire de la suppression de la phase de rectification et la création de nouveaux matériaux de coupe ayant des caractéristiques physico-chimique et mécanique très élevés permet d'envisager l'usinage de pièce de dureté de plus en plus importantes. Cependant la maîtrise du procédé est encore loin d'être complète aux regards de l'état de contrainte et l'état métallurgique de la surface usinée qui sont difficiles à maîtriser et la présence des couches blanches fragiles susceptibles de se fissurées et qui présente actuellement un frein au développement en usinage dur.

## Introduction

Dans le domaine des usinages à grandes vitesses, le tournage dur est aujourd'hui en plein développement, les besoins industriels sont importants, les enjeux économiques sont grands mais la maîtrise du procédé est loin d'être acquise. Si la dureté à haute température des nouveaux matériaux de coupe tel que céramique noire ( $Al_2O_3 + TiC$ ) permet d'envisager l'usinage de pièce de dureté de plus en plus importantes. Le tournage dur est répandu, également dans l'industrie aéronautique, les industries de forage et de laminages des machines outils, d'outillages et dans la fabrication des moules et des matrices, mais la maîtrise du procédé est loin d'être acquise. Dans l'industrie le choix des conditions de coupe est encore basé sur les connaissances acquises grâce aux essais. Cependant ces derniers sont coûteux. Un mauvais choix des conditions de coupe peut générer des effets indésirables, tels que les vibrations importes, des effets excessifs, une usure prématurée de l'outil, conduisant à des qualités de surfaces et des tolérances de fabrication médiocres.

Le mémoire est structuré comme suit:

**Le premier chapitre**, concerne les aspects bibliographiques. Une évolution des matériaux de coupe débouche sur une présentation détaillée des matériaux de coupe modernes actuellement utilisés. Dans un deuxième temps, les divers aspects technico-économiques du tournage dur sont exposés. Enfin après un résumé de l'ensemble des théories et des méthodes de la physique de la coupe des métaux. Ce chapitre s'appuie à la fois sur des références fondamentales anciennes et sur des publications récentes qui concerne le domaine de la coupe des métaux.

**Le deuxième chapitre**, expose les équipements utilisés et les conditions expérimentales. Les dispositifs de mesures et le couple outil matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour l'étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

**Le troisième chapitre**, est consacré à la présentation des résultats de l'impact des conditions de coupe sur le comportement de la rugosité avec différentes rayons du bec et angle de direction principale, et avec l'acquisition des efforts de coupe, un suivi de l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure en dépouille et en cratère pour certaine régime de coupe, des essais de performances des différentes matériaux ainsi le phénomène de vibrations en fonction des régimes de coupe et de l'usure VB sont également présentés avec une analyse étendue.

**Le quatrième chapitre,** est consacré à l'exploitation mathématique des résultats présentés au chapitre 3. Cette exploitation conduit à proposer des modèles mathématiques de la rugosité, tenue, efforts de coupe, et vibration en fonction des conditions de coupe. Les valeurs numériques des constantes des modèles proposés sont bien dans l'ordre de grandeur de celles que proposent d'autres chercheurs pour des situations de coupe voisines.



## SOMMAIRE

### Chapitre I : Etude et analyse bibliographique

|   |    |
|---|----|
| I-1 Généralité sur la coupe des métaux.....   | 1  |
| I-1-1 Introduction.....   | 1  |
| I-1-2 Définition de la coupe des métaux.....  | 1  |
| I-1-3 Définition de l'aptitude à l'usinage.....   | 2  |
| I-1-4 Les nouvelles stratégies de fabrication.....  | 2  |
| I-2 Le tournage dur (TD).....   | 3  |
| I-2-1 Les outils de coupe.....  | 7  |
| I-2-1-1 Introduction.....   | 7  |
| I-2-1-2 Evolution des matériaux des outils de coupe.....  | 7  |
| I-2-2 Matériaux difficilement usinables.....  | 12 |
| I-2-3 Morphologie du copeau.....  | 16 |
| I-3 L'intégrité de surface.....   | 18 |
| I-3-1 Introduction.....   | 18 |
| I-3-2 état de surface des pièces usinées.....   | 18 |
| I-3-3 Défauts géométrique de surface.....   | 19 |
| I-3-4 Défauts physico- chimiques.....   | 21 |
| I-3-5 mécanisme de formation du profil micro géométrique.....                                       | 21 |
| I-3-6 Définition des critères de rugosité.....  | 22 |
| I-3-7 détermination théorique de la hauteur d'aspérités.....  | 23 |
| I-3-8 Modèles théoriques de la rugosité.....  | 24 |
| I-3-9 Influences des différents facteurs d'usinage sur l'état de la surface des pièces usinées..... | 25 |
| I-3-10 Couche blanche.....  | 27 |
| I-3-11 Contraintes résiduelles.....   | 28 |
| I-4 Endommagement des outils de coupe.....  | 28 |
| I-4-1 Mécanisme d'usure.....  | 29 |
| I-4-2 Usure visible sur l'outil.....  | 33 |
| I-4-3 Critères d'usures.....  | 36 |
| I-5 Les facteurs influençant la qualité de surface en tournage dur.....                             | 37 |
| I-6 Les efforts de coupe.....   | 39 |
| I-7 Les vibrations dans le processus de coupe.....  | 40 |
| Conclusion .....  | 41 |

## **Chapitre II : Procédures expérimentales**

|  |       |
|--|-------|
| II-1 Introduction .....                              | 43    |
| II-2 Récapitulation du problème .....                | 43    |
| II-3 Planification des expériences.....              | 44    |
| II-4 Equipements et moyens utilisés .....            | 47    |
| II-5 Procédure expérimentale.....                    | 55    |
| II-6 Banc d'essais pour un plan 3 <sup>3</sup> ..... | 57-58 |

## **Chapitre III : Résultats et interprétations**

|   |    |
|---|----|
| III- I Introduction .....   | 59 |
| III-2 Résultats de l'influence du régime de coupe sur la rugosité des surfaces usinées.....   | 59 |
| III-3 Résultats de l'influence de la géométrie de l'outil sur la rugosité des surfaces usinées..  | 61 |
| III-3-1 Influence de l'angle de direction principale .....  | 61 |
| III-3-2 influence du rayon du bec de l'outil .....  | 66 |
| III-4 Résultats de l'influence de la géométrie de l'outil sur les efforts de coupe .....  | 70 |
| III-4-1 influence de l'angle de direction principale .....  | 70 |
| III-4-2 influence du rayon du bec de l'outil.....   | 73 |
| III-5 Résultat de l'influence de la nuance de l'outil sur la rugosité de la surface usinée corrélé avec l'acquisition des efforts de coupe, et l'usure en dépouille ..... | 76 |
| III-6 Influence de l'usure de l'outil sur la rugosité des surfaces usinées corrélé avec l'acquisition des efforts de coupe.....   | 81 |
| III-6-1 comportement à l'usure de la céramique mixte (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Tic) en fonction du temps ...   | 81 |
| III-6-2 Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure .....   | 84 |
| III-6-3 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure .....   | 88 |
| III-7 Influence des vibrations sur la qualité des surfaces usinées.....   | 93 |
| III-7-1 Résultat de l'influence des vibrations sur la rugosité.....   | 94 |
| III-7-2 Résultat de l'influence des vibrations sur les efforts de coupe .....   | 94 |
| III-7-3 Relation entre vitesse de coupe et vibration .....  | 96 |

## **Chapitre IV : Traitement et analyse des résultats**

|   |     |
|---|-----|
| IV-1 Traitement et analyse des résultats .....  | 98  |
| IV-1-1 Introduction .....   | 98  |
| IV-1-2 Modèle mathématique de la tenue .....  | 98  |
| IV-I-3 Modèles mathématiques pour un plan 3 <sup>3</sup> , (résultats et discussions) ..... | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| A) Randomisation et stockage du plan .....   | 101 |
| B) Analyse des effets des facteurs sur ( $R_a$ , $R_z$ , $R_t$ , $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ , $V_y$ , $V_z$ ) en fonction de la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ), et la profondeur de passe ( $a_p$ ) ..... | 101 |
| IV-I-3-1 Analyse des effets des facteurs sur $R_a$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....   | 103 |
| A) Evolution de la rugosité $R_a$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....  | 103 |
| B) Droite de Henry des effets normalisés.....  | 103 |
| C) Diagramme de Pareto des effets normalisés .....   | 104 |
| D) Graphique des effets principaux pour $R_a$ .....  | 105 |
| E) Diagramme d'interaction pour $R_a$ .....  | 106 |
| F) Modèle de prédiction de $R_a$ .....   | 106 |
| IV-I-3-2 Analyse des effets des facteurs sur $R_z$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....   | 107 |
| A) Evolution de la rugosité $R_z$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....  | 107 |
| B) Graphique des effets principaux pour $R_z$ .....  | 108 |
| VI-I-3-3 Analyse des effets des facteurs sur $R_t$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....   | 108 |
| A) Evolution de la rugosité $R_t$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....  | 109 |
| B) Graphique des effets principaux pour $R_t$ .....  | 109 |
| VI-I-3-4 Analyse des effets des facteurs sur $F_x$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....   | 110 |
| A) Evolution de $F_x$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....  | 110 |
| B) Graphique des effets principaux pour .....  | 111 |
| IV-I-3-5 Analyse des effets des facteurs sur $F_y$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....   | 111 |
| A) Evolution de $F_y$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....  | 112 |
| B) Droite de Henry des effets normalisés .....   | 112 |
| C) Diagramme de Pareto des effets normalisés .....   | 113 |
| D) Graphique des effets principaux pour $F_y$ .....  | 114 |
| IV-I-3-6 Analyse des effets des facteurs sur $F_z$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....   | 115 |
| A) Evolution de $F_z$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....  | 115 |
| B) Graphique des effets principaux pour $F_z$ .....  | 116 |
| IV-I-3-7 Analyse des effets des facteurs, vibration tangentielle ( $V_z$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....   | 117 |
| A) Evolution de $V_z$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....  | 117 |
| B) Graphique des effets principaux pour $V_z$ .....  | 118 |
| IV-I-3-8 Analyse des effets des facteurs, vibration radiale ( $V_y$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....  | 119 |
| A) Evolution de $V_y$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$ .....  | 119 |
| B) Graphique des effets principaux pour $V_y$ .....  | 120 |

|  |     |
|--|-----|
| IV-I-3-9 Analyse des effets des facteurs, Ra en fonction de (Vc, f, ap, Vy, Vz) .....  | 121 |
| A) Evolution de Ra en fonction de (Vc, f, ap, Vy, Vz).....                             | 121 |
| B) Graphique des effets principaux pour Ra .....                                       | 122 |
| C) Droite de Henry des effets normalisés.....  | 123 |
| D) Diagramme de Pareto des effets normalisés.....                                      | 123 |
| IV-I-3-10 Analyse des effets des facteurs, Rz en fonction de (Vc, f, ap, Vy, Vz) ..... | 124 |
| IV-I-3-11 Analyse des effets des facteurs, Rt en fonction de (Vc, f, ap, Vy, Vz).....  | 125 |
| Conclusion.....  | 127 |
| Nomenclature.....  | 129 |
| Bibliographique.....   | 130 |

*Chapitre I*  
*Etude et analyse bibliographique*

## **I-1 Généralité sur la coupe des métaux**

### **I-1-1 Introduction**

La coupe des métaux, procédé d'usinage dans l'origine est très ancienne, 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 à titre d'exemple le volume des dépenses faites aux U.S.A pour l'usinage des métaux, il représente 5% du produit national brut ce qui énorme pour une seul technique [1].

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 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 oeuvre rationnelle de cette technique passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le contrôlent.

### **I-1-2 Définition de la coupe des métaux**

Afin de mieux situer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux intervient dans l'ensemble de procédé d'élaboration des pièces par enlèvement de matière en quantités pouvant représenter une proportion des matériaux bruts. 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 constitué un système qui doit être considéré de plusieurs points de vue cinématique, commande ....etc. Dans ce premier chapitre nous considérons d'abord le phénomène central de la coupe. Ce processus de coupe peut être utilisé à l'état pur comme c'est ordinairement le cas ou bien avec l'assistance de techniques auxiliaires (par exemple excitation vibratoire, effet technique, etc.....) pour améliorer certaines performances. Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leur forme, adaptée à une opération d'usinage, et leur matière la partie active le plus souvent amovible (appelée plaquette) est maintenue sur le corps de l'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 technique de fabrication importante est réponde. 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 [2].

### **I-1-3 Définition 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 et micro géométrique imposée pour un prix de revient minimal. 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 que serait donc: (la précision de cotes macro et micro géométriques, le prix de revient). D'autres facteurs qui définissent l'aptitude à l'usinage sont: (l'état de surface, les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la morphologie du copeau).

### **I-1-4 Les nouvelles stratégies de fabrication**

La connaissance et la demande en produits exigeants en terme de complexité, de forme de matière, de taille ont demandé aux industries d'adapter de nouvelles stratégies pour optimiser l'usinage. Lors du processus de fabrication d'un produit, les phases intervenants ont de nature variées : usinage, formage, coupe, traitements thermique et procédé de finition. Certain de ces procédés peuvent être évités, tout dépend des formes initiales et des exigences requises par le produit fini. En générale on peut diminuer le temps de chaque phase en utilisant les nouvelles avancées technologiques, diminuant le temps total de fabrication par l'élimination d'une ou plusieurs étapes ou par substitution ou par combinaison de plusieurs phases entraînant un gain de coup et de temp. Les différentes stratégies actuelles pour optimiser le processus de fabrication en vue d'augmenter la productivité, la qualité et de réduire les coûts sont :

- L'augmentation des taux d'enlèvement de matière.
- L'amélioration de la qualité des pièces (précision de la finition).
- la fabrication au plus près des cotes (moins d'opérations et moins d'enlèvement de matière).
- l'introduction de séquences machine plus efficaces et de plus grandes flexibilités.

Cette flexibilité est actuellement amenée par les possibilités qu'offrent l'usinage d'aciers durs ou très résistants sans avoir recours à des traitements thermiques, des opérations de rectification ultérieures où en éliminant les opérations d'ébauche. Une telle flexibilité élargit le champ d'application de ces procédés de finition. Les progrès dans l'optimisation de tournage dur amènent des changements dans les étapes de production soient en les substituant, en les combinant ou en les éliminant.

## **I-2 Le tournage dur (TD)**

Le tournage dur, c'est-à-dire le tournage des métaux durs, se définit comme une opération de tournage sur des aciers traités thermiquement, d'une dureté de 45 HRC à 68 HRC. Le tournage dur est un procédé récent dans son utilisation [3]. Il se présente comme une alternative à la rectification conventionnelle, souvent longue et coûteuse lors de l'usinage de pièces 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 ou attendu du tournage 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 0.01mm. 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 importants. D'autre part, du point de vue énergétique, le tournage dur présente un meilleur rendement, il engendre 5 fois 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, le tournage des métaux durs 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 de 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 tournage dur sont des plaquettes en céramiques et des diamants synthétiques. Les plus utilisées sont celles à base de nitrure de bore cubique (C-B-N) pour leur bonne compatibilité avec les aciers, c'est un 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.



Comme l'épaisseur du copeau est très faible, l'usinage est essentiellement effectué avec le chanfrein de l'outil. Nous avons vu que l'objectif du tournage 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 surfaces. Les premières appréciations montrent que la rugosité peut descendre jusqu'à des Ra de  $0.15\mu\text{m}$ , approchant les valeurs obtenues en rectification (inférieur à  $0.15\mu\text{m}$ ). Les tolérances dimensionnelles peuvent atteindre des qualités 6 avec des tolérances géométriques très précises. Des défauts de circularité inférieure à  $1\mu\text{m}$  peuvent être observés. Les facteurs principaux pour l'obtention de ces caractéristiques sont la machine et l'outil [4].



Photo prise lors de la réalisation des essais au laboratoire LMS (Usinage dur)

### - Comparaison des procédés de tournage dur et de rectification

Le tournage dur peut soit remplacer ou être complémentaire de la rectification, soit venir s'ajouter en amont de celle-ci afin d'optimiser la productivité. Une situation défavorable, en termes de coût et de délai, est de sous-traiter la rectification et/ou les traitements thermiques. Pour choisir entre la rectification et le tournage dur, chaque application doit être considérée en tenant compte de différents facteurs : (taille et répétitivité de la série, Souplesse du procédé qualité à obtenir, Complexité de la forme à réaliser, Coût des outils, Ratio longueur/profondeur de section à enlever, Parc machines existant ou investissement prévu, Fluide de coupe et traitement des rejets, Niveau de complexité de la gamme d'usinage de fabrication). Cette comparaison peut se faire suivant les cinq critères de **productivité, qualité, investissement, environnement et rentabilité**.

### **a) Productivité**

Les avantages du tournage dur dans ce domaine sont les suivants:

Le tournage dur autorise des taux d'enlèvement de matière trois à quatre fois supérieurs à celui de rectification conventionnelle. Cela est vrai jusqu'à une certaine longueur de passe (40 mm), au-delà de laquelle la rectification en plongée est plus intéressante en grande série. Mais le taux d'enlèvement de matière n'est qu'un aspect du temps de cycle.

- Il peut s'appliquer de la petite à la grande série (exemple: roulottier, automobile).
- Les formes complexes sont réalisables par contour nage et les règles sont rapides.
- Il permet de s'adapter rapidement aux productions de plus en plus variables.
- L'automatisation est bien plus aisée.

### **b) Qualité et précision**

Les avantages du tournage dur dans ce domaine sont les suivants:

- Possibilité de réaliser de multiples opérations sans reprise sur la machine (gain de précision, respect des concentricités et des perpendicularités, gain de temps).
- Possibilité d'obtenir des états de surface (jusqu'à des Ra de 0.1  $\mu\text{m}$ ).
- Possibilité d'obtenir des qualités IT5 – IT6, mais la rectification s'impose pour de meilleures qualités avec les nouvelles machines disponibles sur le marché, possibilité d'atteindre des circularités de 1  $\mu\text{m}$ , des cylindricités de 2  $\mu\text{m}$  sur 50 mm, des tolérances de formes  $\pm 2 \mu\text{m}$ , en rectification la pièce et la meule sont en rotation ce qui affecte la qualité de la cylindricité.

❖ Quelques inconvénients sont à noter:

- Les stries en hélice, caractéristiques de la topographie des surfaces tournées, ne sont pas toujours favorables dans le cas de pièces ayant une fonction d'étanchéité.
- L'alésage avec meule- tige est très délicat (encrassement et flexion), l'alésage à la barre d'alésage est meilleur, Les efforts de coupe sont plus faibles qu'en rectification.

### **c) Investissement**

L'examen de ce critère ferait adapter le tournage dur: Le tournage dur diminue considérablement le montant des investissements machine et outil (coût d'une rectifieuse: 300 K€, coût d'un tour à commande tendu. Numérique: -120 K€), cependant le coût outil/pièce peut être deux à trois fois.

- plus important (mais suite à son industrialisation croissant rapidement, le prix des plaquettes C- BN et céramique est en forte baisse).
- La rectification nécessite des opérateurs plus spécialisés.

## **a) Environnement**

En même temps que la volonté européenne (directive européenne du type nouvelle approche en matière d'environnement [5]), les industriels ont compris que fabriquer écologiquement devenait une nécessité, voire une action civique vis-à-vis des générations futures. Cette volonté écologique est venue de l'Allemagne où la poussée écologique est puissante et bien représentée. Avec les nouvelles normes environnementales, les industries contraintes de traiter ou recycler leurs déchets, sous peine de fortes amendes. La France produit 50 000 t de boues de rectification par an. Les entreprises qui génèrent ces boues de rectification collaborent actuellement avec les cimentiers. Effectivement, les boues ne sont plus un déchet puisque c'est une matière première rentrent dans la fabrication du ciment. En conséquence, la qualité des boues doit être maîtrisée; l'analyse des taux d'hydrocarbures (huile machine, liquide de coupe, lavage de boues) doit rester inférieure à 0.5 % sinon celle-ci doivent être traitées différemment par pyrolyse, en décharge ou en incinération (surcoût à la tonne 150 €). Ces boues sont constituées de 50 de minuscules copeaux d'acier générés en cours d'opération de rectification qui se mélangent avec 46 % de liquide de coupe, 3% de débris de meule et 1% d'huile de graissage. Un bref historique sur l'évolution de coût des boues montre que les législations concernant l'écologie évoluent très rapidement.

Evolution des boues de rectification:

- Avant 1985, les boues étaient stockées en décharge (5 €/t).
- En 1985 une circulaire oblige des décharges à plus de rigueur (40 €/t).
- En 1987, les décharges ferment, les boues sont recyclées par les cimenteries (75€/t).
- En 1996, un arrêté ministériel impose aux cimenteries de ne plus accepter n'importe quel type de boues (taux d'hydrocarbures inférieur à 0.5%) [6].

## **e) rentabilité**

Les études permettant de comparer les techniques du tournage dur et de la rectification sont rares. A présent, il faut plutôt voir ces deux procédés comme complémentaires. Aux expositions mondiales de la machine-outil, les constructeurs présentent des tours conçus sur la base de rectifieuse ou les outils de tournage et les meules de rectification cohabitent dans le même magasin à outils.

Le tournage dur à l'outil céramique affiche un retour sur investissement de l'ordre de trois ans (les conditions de coupe étant plus modestes que celles du C-BN). quand au retour sur investissement de la rectification C-BN, celui-ci n'est pas validé. en conclusion, on souligne fortement que la technique du tournage dur est un investissement très rentable pour une entreprise type PME [6].

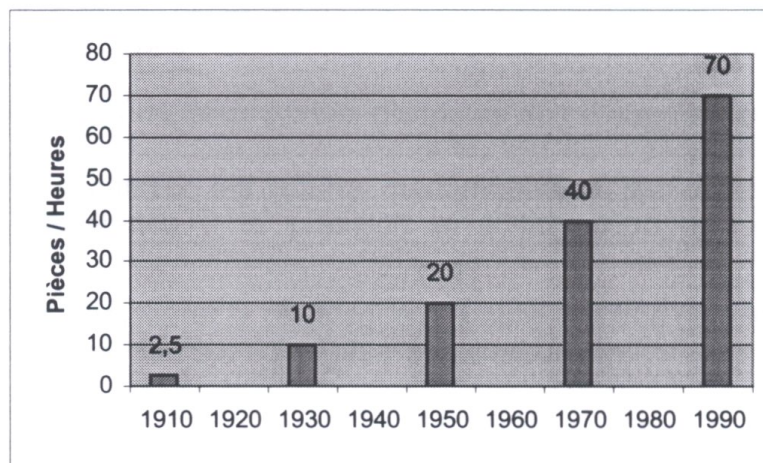
## I-2-1 Les outils de coupe

### I-2-1-1 Introduction

Le tournage des aciers durcis par trempe (tournage dur) nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistances à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie. La condition optimale d'usinage pour un couple outil matière donné n'est pas facile 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 dur.

### I-2-1-2 Evolution des matériaux des outils de coupe

L'évolution des matériaux constituant les outils de coupe a été une source de gain de productivité très importante pour l'industrie. Elle a entraîné, au cours du  $xx^{\text{ième}}$  siècle, un doublement de la productivité tous les dix ans [7] : figureI-1

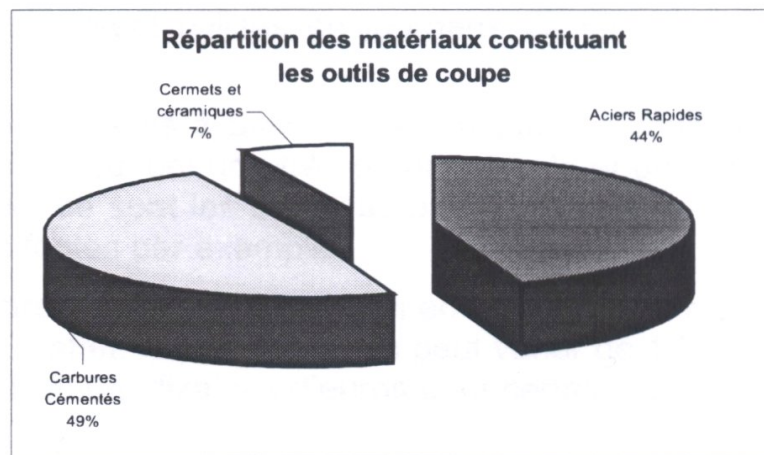
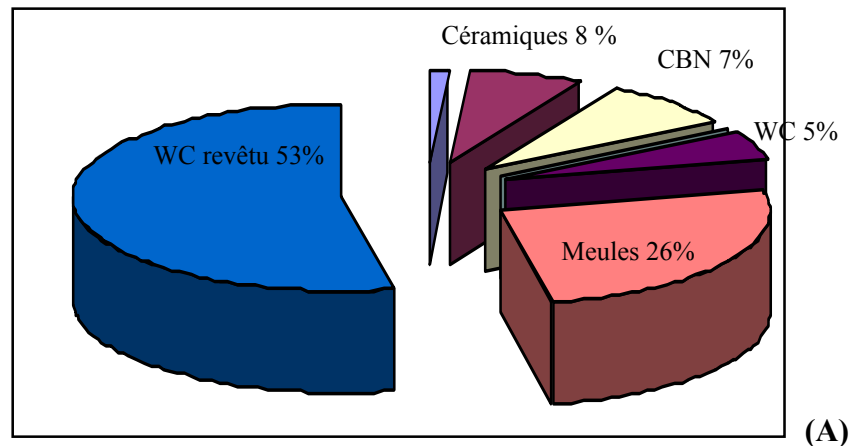


FigureI-1: augmentation de la productivité en usinage

Cette amélioration de la productivité résulte d'un accroissement important des vitesses de coupe permise, grâce à l'amélioration des performances des matériaux des outils [8]. Elle résulte aussi des études et travaux à la fois techniques et fondamentaux portant sur les propriétés suivantes des matériaux [9].

- 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'usinages ou aux vibrations.
- l'inertie chimique pour éviter les dégradations de l'outil par diffusion d'impuretés en provenance de la pièce usinée).

Répartition des matériaux utilisés comme matériaux de coupe : figureI-2 [A-B]



(B)

FigureI-2: Répartition des matériaux utilisés comme matériaux de coupe

### a)- Les carbures métalliques

Les outils frittés en carbure de tungstène (WC) et en carbure de titane (Tic) contiennent entre 70% et 90% de substances dures, 10% à 30% de substances liantes. Les substances dures qui représentent la phase  $\gamma$  sont constituées de carbures de tungstène, titane, tantale ou niobium, les substances liantes qui représentent la phase  $\beta$  sont généralement constituées de cobalt. La norme ISO donne trois nuances de carbures obtenues en faisant varier les contenus et les pourcentages de phase  $\gamma$  et de la phase  $\beta$ .

Ces trois nuances sont désignées par les lettres P, M, K. La nuance P destinée à l'usinage aciers coulés et des fontes malléables à coupeaux longs. La nuance M, pour l'usinage des aciers au manganèse, les aciers austénitiques, les aciers de décolletage ainsi que les fontes alliées. et malléables à copeaux courts, et la nuance K, retenue pour l'usinage des aciers

trepés, des métaux non ferreux, des matières plastiques, du bois et des matériaux composites. L'outil d'ébauche requiert une ténacité importante car il doit résister aux chocs alors que la finition nécessite un outil ayant une résistance à l'usure élevée pour le calibrage de la cote fabriquée et la qualité de l'état de surface. L'usinage des pièces dures impose la nuance K car l'outil doit être à la fois tenace et résistant à l'usure.

Actuellement, des carbures "micro- grains" plus performants que les carbures classiques sont disponibles [6]. Ces carbures micro- grains" sont caractérisés par une structure granulométrique très fine du carbure de tungstène (0.2 à 1µm), liée à du cobalt (8 à 20%).

Ils ont une ténacité plus élevée pour une dureté constante. Leur granulométrie procure un rayon d'acuité d'arête très petit ainsi que des angles de coupe très positifs. De plus, le coût des plaquettes en carbure de tungstène "micro- grain" est comparable à celui des plaquettes en carbure "classique". Il existe également des carbures revêtus d'un revêtement dur de (3 à 10) µ m réalisé par dépôt chimique en phase vapeur. Dans ce cas le substrat est en carbure de tungstène, le revêtement dur en TiC, TiN

Ti(C, N),  $Al_2O_3$  [10].

### **b) les céramiques (matériaux utilisés)**

La céramique est une combinaison d'éléments inorganiques non métalliques et d'éléments métalliques et à de bonnes propriétés atomiques de métallisation. Ces éléments ont des températures de fusion très hautes et de grandes duretés ce qui leur permet d'être utilisées en coupe continue. Par contre dans le cas de coupe intermittente, ces caractéristiques favorisent les ébréchures du bord des plaquettes et du craquage thermique. La contribution des outils en céramiques au développement de la productivité c'est pendant principalement fait sentir pour l'usinage des matériaux comme les fontes, les aciers trempés et les alliages réfractaires. Les céramiques peuvent alors offrir une excellente productivité comparée aux autres matériaux de coupe. Les outils de coupe en céramiques sont divisés en deux familles

- les céramiques à base d'oxyde d'aluminium.
- les céramiques à base de nitrure de silicium.



FigureI-4: Plaquette en céramique

Les outils en céramique souffraient toujours d'être fragiles. Pour donner un degré de dureté à la céramique, une petite taille de grain d'alumine est employée. Le coût de l'alumine est bas. Mais les coûts de traitement de fabrication sont coûteux. Il s'agit de découper d'abord de grands blocs en tranches d'alumine dans de petits morceaux avec des scies de diamant. La fragilité relative de la céramique exige des machines très stables. Il est normal d'utiliser ces matériaux avec des vitesses de coupe à 900 m/min en tournant des aciers. La céramique composée du carbure d'alumine et de titane (cermets), est moins sujette à la fragilité, avec des efforts de rupture supérieurs à 690 MPA.

#### **b-1) céramique oxydée et céramique renforcée par whiskies:**

Alors que le manque de résistance thermique entraîne la défaillance de matériaux de l'outil dans le cas des carbures, c'est le manque de dureté et de résistance au choc thermique qui entraîne une défaillance dans le cas des matériaux de l'outil en céramique oxydée. Par suite des cassures se produisant dès le début sur l'arête de coupe. Il n'a pas été possible pour une céramique oxydée pure d'obtenir une amélioration de la durée de vie de l'outil par rapport au carbure. Le renforcement de l'alumine par des fibres "Whiskies", plus efficace que les additions particulières telles réalisées pour les mélanges alumines- zircone et alumine- Tic permet une meilleure résistance, une plus grande résistance à la rupture ainsi qu'une meilleure résistance aux chocs thermiques. De plus le module de Wei Bull augmente, ce qui se traduit par une réduction des variations de résistance. Un Whiskies est une fibre monocristalline. Les Whiskies de Sic utilisés pour renforcer les outils de coupe en alumine ont un diamètre inférieur à  $1\mu\text{m}$  et une longueur comprise entre 5 et  $20\mu\text{m}$ .

### **b-2) céramique non oxydé (nitrure de silicium):**

Le nitrure de silicium (SiC) est un composé atomique présentant un certain nombre de propriétés mécaniques intéressantes. La plus intéressante pour l'usinage des métaux est son très faible coefficient de dilatation thermique qui rend ce matériau très résistant aux chocs thermiques. Le matériau de l'outil en céramique nitrurée avec son élément caractéristique, le nitrure de silicium, a été utilisé jusqu'à présent avec succès principalement pour l'usinage de la fonte. Dans le procédé d'enlèvement de copeaux continu, comme par exemple le tournage de l'acier, son utilisation n'est conseillée en raison de la diffusion du silicium dans le copeau évacué et de la résistance à l'usure plus faible que celle de l'oxyde d'aluminium.

### **c) les cermets**

Les cermets (céramique- métal), constitués principalement de TiC ou de TiC/N, possèdent par rapport aux métaux durs conventionnels, une densité beaucoup plus faible mais une dureté et une résistance à l'usure plus élevées. Les forts coefficients de dilatation thermique des cermets ( $7 \text{ à } 9 \cdot 10^{-6} /\text{K}$ ) dus au TiC et TiN par rapport aux outils carbures (WC) sont co-responsables de la faible résistance des cermets aux chocs thermiques. C'est également ce qui explique leur faiblesse lors de l'usinage à coupe interrompue. Les remplacements du TiC par le TiN qui possède la plus grande conductivité thermique, ont permis d'améliorer la résistance des cermets aux chocs thermiques. Les cermets sont utilisés pour la finition et l'usinage de précision demandant de grandes vitesses de coupe et des avances faibles. Ils se rapprochent ainsi du domaine d'utilisation des céramiques étant toutefois résistants. Leurs emplois diminuent ou suppriment le collage des copeaux évitant ainsi les arrachements sur les matériaux (inox, aciers doux) et conduisent à une durée de vie accrue. La plage des vitesses de coupe est étendue dans le tournage des aciers inoxydables (100 à 200 m/min), les avances sont celles de passes de finition (0.02 à 0.15 mm/tr). Les profondeurs de passe ne doivent pas excéder 1mm. Un rodage de l'arête ( $r_{\beta} = 0.03 \text{ à } 0.1$ ) est souvent un remède contre les écaillages et les ruptures de l'arête. En conclusion, on peut retenir les avantages d'utiliser les cermets. (Résistance à la cratérisation et à la formation de l'arête rapportée supérieure à celle de carbures de tungstène et des caractéristiques, résistance à l'usure trois à quatre fois plus grandes que celle des carbures non revêtus, admettent de faibles avances, vitesse de coupe proche de celle des céramiques mais également utilisables aux vitesses supérieures des carbures et de tungstène non revêtus, ils recouvrent la plage des carbures revêtus).

**Perspectives des céramiques:** Les outils de coupe en céramiques occupent aujourd'hui 4 à 5% de marché des plaquettes indexables. Leur principal avantage est qu'ils autorisent des vitesses de coupe plus élevées que les outils en carbures, d'où des gains de productivité



élevés. Leurs principaux inconvénients sont leur fragilité et leur manque de fiabilité. Ils ont pu être surmontés dans une large mesure grâce aux céramiques renforcées qui ont été développées au cours des années 80. Parallèlement au développement des matériaux céramiques, on a vu également le développement de machines outils qui offre aujourd'hui plus de puissance et une meilleure stabilité. Elles sont aujourd'hui capables d'usiner selon des paramètres de coupe bien adaptés aux outils céramiques.

#### **d- les nitrures de bore cubique (C-BN)**

Le nitrure de bore cubique est un matériau de synthèse dont les propriétés sont voisines de celles du graphite. Sous l'effet de températures très élevées (supérieur à 1500°C) et de pressions importantes (comprises entre 50 et 100 bars). Le nitrure de bore cubique subit une transformation structurale (passage d'une structure hexagonale à une structure cubique). Qui lui confère une grande dureté. Le nitrure de bore cubique est le second des matériaux les plus durs connus, juste après le diamant, il est donc plus résistant à l'usure que les céramiques ou les carbures métalliques.

Le C-BN ne réagit pas avec les alliages ferreux et il est thermiquement stable jusqu'à 1400°C.

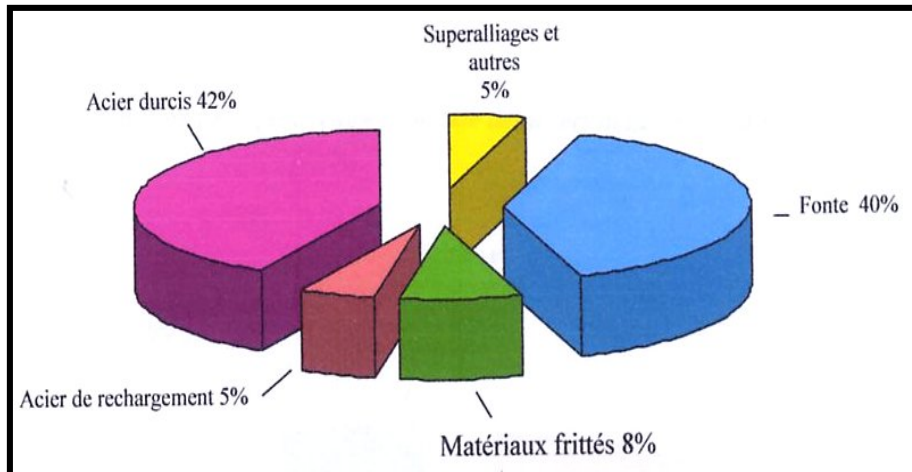
Le C-BN peut donc usiner des alliages par contre le diamant ne peut pas, tels que les aciers à outils, les fontes trempées, les superalliages à base Nickel ou cobalt.

#### **e- le diamant**

D'origine naturelle ou synthétique, c'est le matériau le plus dur que l'on connaisse et de ce fait il constitue un excellent outil de coupe. Son prix d'achat très élevé en limite d'utilisation dans les ateliers de fabrications mécaniques. Il se présente sous forme de poudre collée sur un support en fonte pour les meules destinées à l'affûtage des outils en carbures. D'un grain serti ou brasé sur un corps pour les outils à tranchant unique (outils à charioter, grain d'alésage, etc.....). Ces outils sont réservés pour des travaux de finition. Ils permettent d'obtenir une très bonne rugosité et une grande précision.

#### **I-2-2 Matériaux difficilement usinables**

De plus en plus, les métallurgistes élaborent de nouveaux matériaux répondant à des exigences de l'industrie (meilleure usinabilité, plus grande résistance mécanique, plus grande dureté). L'aptitude à être usiné et le niveau des propriétés mécaniques sont antagonistes [11]. Les réfractaires, les aciers fortement alliés dans leur état durci, les fontes alliées sont souvent difficilement usinables par des procédés conventionnels. Une étude récente sur les applications de l'usinage dur, fait ressortir que 66% d'entre elles concernent des aciers traités, 26% couvrent les fontes et 8% les superalliages et autres matériaux (figure I-5).



FigureI-5: Répartition des matériaux usinés en tournage dur

[D'après Goran Avance Métal Institutue (2002)]

#### **a) Les aciers de construction pour traitement thermique:**

Pendant l'usinage d'aciers durs, même à de faible vitesse de coupe, les outils en acier rapide et en carbure cémenté sont peu efficaces à cause de leur faiblesse à supporter des contraintes élevées à températures élevées. Par conséquent, des alliages ferreux traités (45HRC- 450HV à 70 HRC - 930HV) constituent le principal domaine d'application des outils céramique et C-BN. La prudence invite à dire qu'un matériau devient difficile à usiner lorsque sa dureté dépasse 300 HV (30 HRC ou 1020 MPa).

#### **b) Les aciers d'outillage à froid (X200Cr12, X160CrMoV1, X100CrMoV5, ...)**

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure et à la compression exceptionnelles. Ils sont remarquables pour leurs faibles variations dimensionnelles au traitement thermique. La dureté de ces aciers peut varier de 50 à 65 HRC. Ils sont principalement utilisés pour tous travaux à froid tels que : poinçons d'estampage, outils de coupe, molettes à rouler les pas de vis, lames de cisaille, outils de travail du bois, cames.

#### **C) Les aciers d'outillage à chaud (X40CrMoV5, 40NiCrMo16, 35CrNiMO4)**

Ces aciers possèdent une excellente résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Leur résistance à hautes température, leur ténacité et leur aptitude au polissage permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants : matriçage à chaud, moules à coulée sous pression, filage à chaud, lames de cisaille à chaud. La dureté après revenu varie de 30 à 55 HRC.

#### **d) les aciers à moules (C48, 40CrMnMo8, 40NiCrMo16,...)**

L'acier XC 48, livré à l'état normalisé, permet après trempe d'obtenir une dureté de surface appréciable (50HRC). Le 40CrMo8 spécialement conçu pour l'élaboration des moules pour matières plastiques est livré à l'état trempé et revêtu d'une résistance de 1000 à 1100 Mpa. Il est caractérisé par la grande facilité d'usinage que lui donne la ré sulfuration. Cet acier peut être trempé superficiellement à la flamme ou par induction, permettant d'atteindre des duretés de 55 HRC. Des duretés superficielles beaucoup plus importantes pourront être obtenues par nitruration gazeuse ou ionique, environ 650HV. La couche nitrurée (0,3 à 0,5mm) donne une excellente résistance à l'usure et améliore la résistance à la corrosion. Ces aciers à moules conviennent pour la réalisation de carcasses de moules pour matières plastiques. Semelles d'outillages, outils pour moulage sous pression, plaque porte- empreintes.

#### **e) les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI52100)**

Fortement utilisé ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils C-BN sont employés avec succès lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à faible concentration de c- BN est préférable à un outil à forte concentration de C-BN ou à une céramique mixte ( $Al_2O_3 + Tic$ ) donnant une durée de vie trois fois supérieure dans le cas de la céramique, et six fois plus dans le cas du C-BN à forte concentration [12].

#### **f) les aciers rapides (HS6-5-2, HS6-5-2- 5, HS2- 9- 1- 8)**

Cette famille d'aciers comprend, en majorité, les matériaux utilisés pour la fabrication des lames de découpe et des poinçons. La représentation de cette catégorie de matériaux regroupe les aciers rapides, les aciers de travail à chaud et les aciers de travail à froid. Bien que les outils en céramique mixte puissent être utilisés en tournage continu d'aciers à des duretés de 45- 55 HRC à haute vitesse, ils ne conviennent pas pour la coupe interrompue en raison de leur faible ténacité. Lors de l'usinage d'un acier rapide M2 (HS6- 5- 2) à 32HRC, le C-BN s'affaiblit rapidement par rapport à un carbure [13]; aux faibles vitesses de coupe (60m/min) une arête rapportée massive se développe, et aux hautes vitesses de coupe (137m/min), un cratère apparaît rapidement. De plus, pendant l'usinage du même acier rapide à haute dureté (62HRC), l'outil carbure s'affaiblissait rapidement quelle que soit la vitesse utilisée.

#### **g) les aciers de cémentation (16MnCr5, 10CrNi6, 18CrMo4)**

L'usinage de finition et la coupe continue d'acier de cémentation de dureté de 65HRC peuvent être effectués avec des C- BN à hautes vitesses de coupe comme le rapportent [14,15].

En général, le liant céramique Tic est plus performant qu'un liant métal C-BN, en raison de sa capacité à garder une plus grande dureté aux températures élevées. L'usinage en coupe interrompue peut également être pratiqué avec satisfaction à l'aide de C-BN [16]. Les outils à base céramique peuvent être utilisés à de plus faibles conditions de coupe, mais les risques de ruptures augmentent beaucoup.

#### **h) les aciers de nitruration (30 CrMo4, 30CrAlMo6- 12, 40CrAlV6- 10)**

Le but de la nitruration est de former une couche très dure sans trempe ultérieure. La nitruration peut être solide, gazeuse, liquide, ionique. La dureté des couches peut varier de 850HV à 1400HV suivant le procédé de nitruration et selon le matériau traité. L'épaisseur des couches durcies n'excède pas 0.4mm. Pendant ce procédé, l'accroissement de dureté est produit par insertion des atomes de carbone et d'azote dans le réseau cristallin du matériau. L'usinage de ces couches fines est très dur et problématique.

#### **e) les fontes grises**

Ces fontes moulées sont utilisées en grandes quantités pour les applications générales, leur faible coût en étant la raison principale. Les fontes grises ont une plage de dureté typiquement comprise entre 180 et 320 HB. Dans ce cas, les C- BN dépassent de loin les performances des outils carbure et céramique (sial on) [17], et une fonte perlitique contenant peu de ferrite peut être usinée à des vitesses de coupe de 600m/min à l'aide de C-BN [18]. Cependant d'autres auteurs [19, 20] ont trouvé que des outils à base d'alumine donnaient de bien meilleurs résultats que le C- BN. [21] a montré dans ses travaux que la ferrite libre produisait une usure rapide sur les outils C- BN. Il a affirmé que les céramiques à base de nitrure de silicium ( $Si_3N_4$ -TiC) présentaient une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage de la fonte grise.

#### **j) les fontes blanches**

Les fontes blanches ou trempées sont beaucoup plus dures, plus fragiles et plus résistantes à l'usure que les fontes grises à cause de la présence de carbures de fer (cémentite) au lieu de graphite. Leur dureté varie typiquement de 45 à 65 HRC et elles sont largement utilisées pour la fabrication des cylindres de laminoir [22]. a rapporté que lors du tournage ébauche de fonte trempée, les outils en carbure cémentés étaient limités par la vitesse de coupe 10m/min ou moins. Alors que les outils C-BN étaient capables de travailler de 60 à 90m/min avec des avances de 0.3 à 0.7 mm/tr et des profondeurs de passe de 2 à 4 mm. Quand on compare les performances du C-BN avec la céramique conventionnelle pendant des opérations d'ébauche de fonte trempée (55 HRC), les résultats montrent que la céramique ne peut pas être utilisée à des avances supérieures à 0.16 mm/tr, en particulier quand les vitesses de coupe sont plus hautes que 40m/min. le C-BN se comporte très bien à des avances de 0.1mm/tr et des vitesses

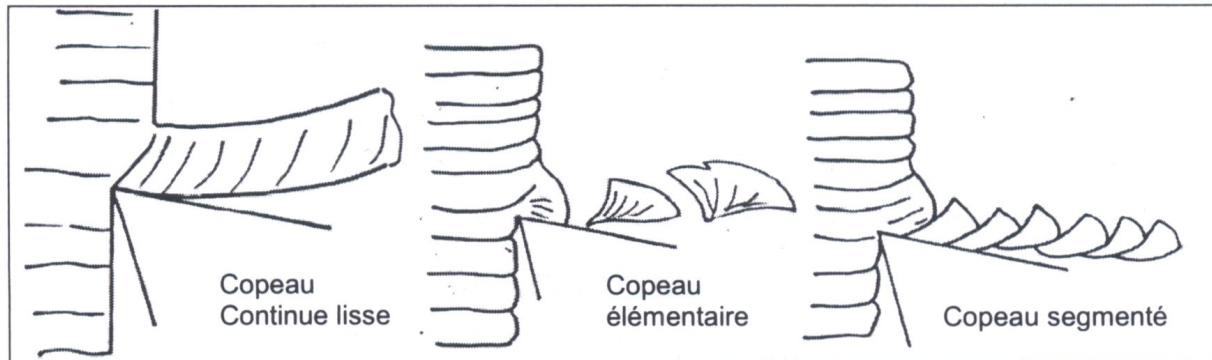
de coupe de 80m/min. pour comparaison, à 0.16mm/tr et 60m/min, la durée de vie de l'outil céramique n'est que 0.6 minute alors que celle de C-BN est de 200 minutes.

### **I-2-3 Morphologie du copeau**

En usinage conventionnel avec des plaquettes en carbures métallique, un phénomène de cisaillement localisé [4] provoquant la rupture du copeau. Ce cisaillement apparaît pour des vitesses autant plus faibles que le matériau usiné est dur. Principalement à cause des propriétés thermiques de ces matériaux qui permettent une accumulation de chaleur dans la zone de cisaillement et donc une diminution des propriétés mécaniques dans cette zone. En usinage des aciers durs se phénomènes se retrouve mais on observe également l'existence des phénomènes de fissuration du fait de leur grande fragilité. Dans le modèle de MERCHNT, le mouvement relatif outil matière provoque une compression entre la face de coupe de l'outil et la pièce usinée, au voisinage de l'arête de coupe. Pour encaisser cette compression, quelque part, en avant de l'outil, la matière s'étire jusqu'à sa rupture, d'où la naissance du copeau. D'autres études et modèles ont permis de discuter et de faire évoluer le modèle de MERCHANT. Entre autres celles de COOK, FINNIE et SHAW [23], quelques années plus tard et, plus récemment de SHAW [24], LEMAIRE [25], KOMANDURI [26], pour ne citer que les plus connues. Ont été ainsi introduits, dans la réflexion et l'analyse: [des caractéristiques métallurgiques des matériaux, les conditions de coupe, la composition chimique des matériaux, les structures particulières des phases en présence, le comportement thermique des phases du matériau, les phénomènes thermodynamiques (apparitions des couches blanches), les phénomènes de cisaillement, les conditions de frottement].

Certaines de ces études ont été faites avec des aciers doux (KOMANDURI) [26], des alliages mi durs (MATSUMOTO [27]) et des alliages durs (KOKIG [28]). Il ressort de ces études que les modes de formation du copeau sont très différents suivant les conditions d'usinage mais aussi les caractéristiques des matériaux usinés: [dureté du matériau, condition de coupe (vitesse, Avance et profondeur de passe), efforts résultants des conditions de coupe, comportement dynamique du matériau à l'effort, géométrie de l'outil].

Le copeau crée à plusieurs formes possibles (figure I-6) qui sont classées en familles non normalisées à ce jour.



FigureI-6: Exemple de 3 formes différentes de copeau

De nombreuses études analytiques ont été faites pour décrire la formation des copeaux comme celles menées par KOMANDURI [26], KONIG [29], NAKAYAMA [30], SCHULTZ [31], et WINKLER [32], pour ne citer que les plus connues. Elles se limitent toutes au cas de la coupe orthogonale. On peut donc affirmer que la formation du copeau implique la compréhension de phénomènes se rattachant à plusieurs disciplines (thermodynamique, tribologie, physique de la matière condensée) ce qui implique leur analyse. Peu d'études ont été faites sur la détermination des champs de températures dans le copeau et l'outil. Nous pouvons citer BOOTHROYD [33] et WRIGHT [34] qui dans leurs travaux, proposent l'idée que l'élévation de température est la conséquence de la dissipation de la puissance mécanique au cours du cisaillement.

## Conclusion

Le tournage dur concerne l'usinage de matériaux ferreux durcis entre 45 et 70 HRC par des opérations principalement de finition interne ou externe [10]. Il est intégré dans l'industrie en raison des avantages qu'ils présente tels que la réduction du temps d'usinage, la capacité d'obtenir des géométries complexes. Du fait que le procédé de tournage dur est récent, la maîtrise des différents facteurs s'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.

## I-3 L'intégrité de surface

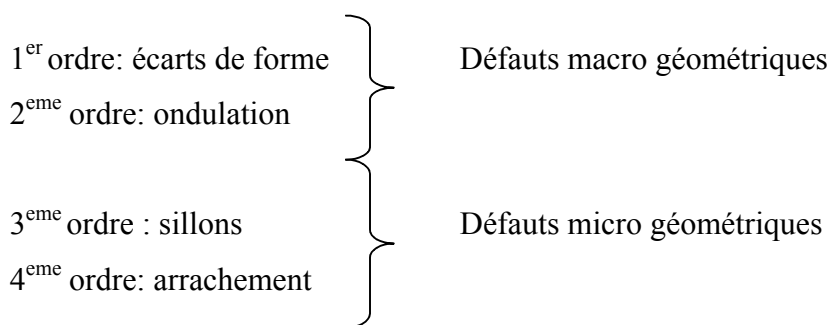
### I-3-1 Introduction

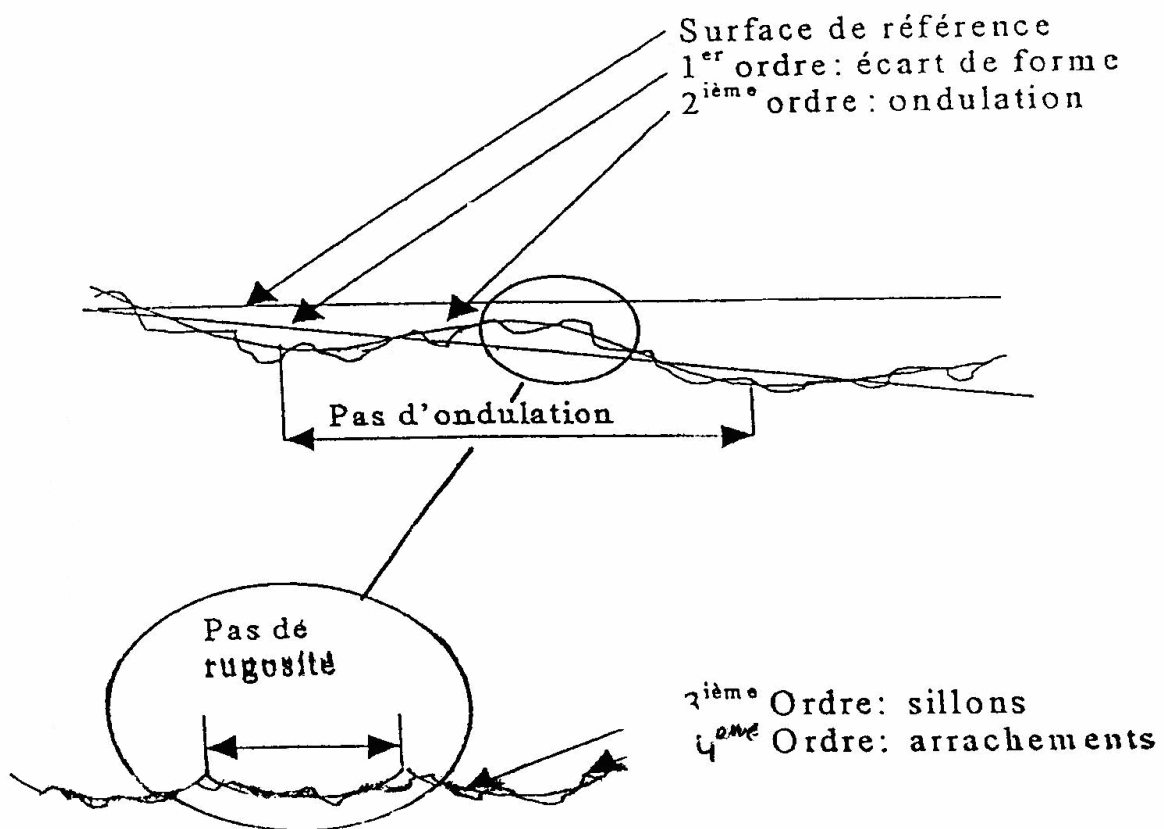
Pour juger la qualité d'une surface il faut considérer l'aspect physio- chimique. Ce dernier a donné naissance au concept d'intégrité de surface prenant en compte l'étude de la couche superficielle apparue lors de la coupe et l'influence de celle-ci sur le comportement des pièces en service. A cet effet il faut considérer les différents types d'altérations qui apparaissent avec leurs conséquences sur le comportement des pièces. L'intégrité de surface c'est la prise en compte de l'ensemble des données caractérisant une surface et sa sous couche incluant la rugosité, la microstructure, l'état d'écrouissage et de dureté, les contraintes résiduelles. Ces éléments ont une influence directe sur la tenue en fatigue, la résistance à la corrosion, au de la sur la durée de vie de la pièce.

### I-3-2 état de surface des pièces usinées

La coupe ou usinage par enlèvement de copeaux ne permet pas d'obtenir des surfaces idéalement précises et lisses, si bien que, on enlève des écarts plus ou moins grands par rapport à la géométrie théorique. La notion de qualité des surfaces usinées comprend deux aspects fondamentaux:

- L'aspect physique: suivant lequel la qualité de la couche de métal superficielle sera rapportée à celle du métal de base en définissant les écarts constatés sur leurs propriétés physico- mécaniques. Se seront essentiellement des propriétés caractéristiques de résistance superficielle, telles que la résistance à l'usure, à la corrosion, à l'érosion.
- L'aspect géométrique: qui consiste à relever les écarts dimensionnels entre la surface réelle, et celle idéale définie par le dessin, selon leurs dimensions. Dans notre étude, on se limitera aux facteurs géométriques de l'état de surface, ils sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (figureI-7).





FigureI-7: défauts géométriques de la surface usinée

**I-3-3 Défauts géométrique de surface:** Ils se définissent à partir de deux notions distinctes:

**a) Défauts «macro géométriques»**

Qui caractérise l'écart maximal entre les cotes théoriques et les cotes réalisées, à l'intérieur de certaines tolérances. Ils sont représentés par les défauts de 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> ordre (écarts de forme, ondulation) (FigureI-7) [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 (l'échauffement) [36].

**b) Défauts «micro géométriques »**

Essentiellement la rugosité, qui se définit à partir de l'état d'une ou plusieurs portions de surface très limitées indépendamment de la qualité macro géométrique globale de la surface. Ces défauts sont représentés par les défauts de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordre. (sillon, arrachement) (figureI-7)[35].

**- Forme théorique, défauts du 3<sup>ème</sup> ordre**



Le premier de ces facteurs, c'est la forme théorique de la surface effectivement engendrée par le déplacement du tranchant de l'outil. Dans le tournage, à titre d'exemple la surface engendrée n'est pas rigoureusement cylindrique mais elle comporte des sillons hélicoïdaux résultant de la forme (plus ou moins pointue) de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil/pièce. Si l'on considère le profil de ces sillons dans un plan passant par l'axe de la pièce, on observe que ces sillons (figure I-8) ont un profil d'autant plus profond que le rayon du bec de l'outil est plus faible. Par ailleurs, ils sont d'autant plus larges que l'avance par tour est grande ces remarques justifient l'emploi de faibles avances et d'outils à bec arrondi  $r = (0,8 \text{ à } 1,6) \text{ mm}$  pour les travaux de finitions ou une faible rugosité est recherchée.

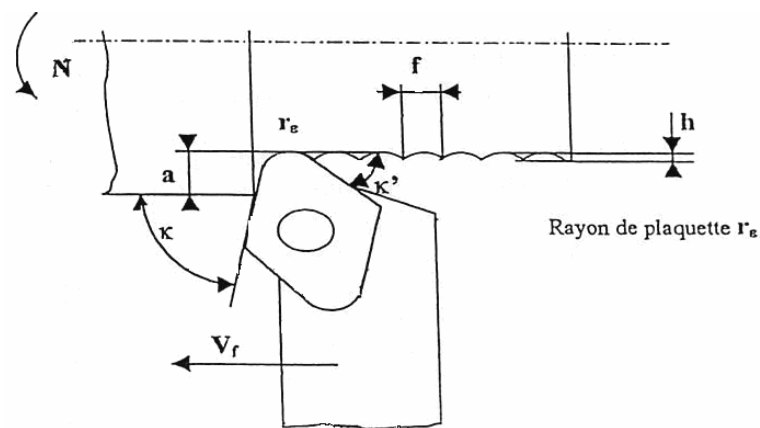


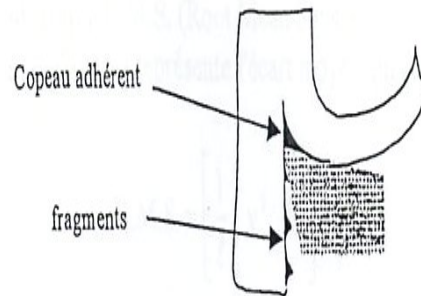
Figure I-8 : profil usiné en chariotage

D'autre part, la forme de la surface engendrée par l'outil peut être affectée par les perturbations de la trajectoire de l'outil par rapport à la pièce, occasionnées par des vibrations importantes de l'un de ces éléments (ou des deux). Lorsque les conditions dynamiques (flexibilité et inertie des éléments, insuffisance d'amortissement mécanique) sont telles que les variations oscillatoires de cette trajectoire deviennent auto- entretenues, il en résulte des perturbations périodiques de la surface découpée. Elles prennent la forme de marques ou de stries plus ou moins accusées, qui peuvent modifier sensiblement la rugosité du profil idéal défini par la trajectoire théorique de l'outil. (Phénomène de broutement)[38].

#### **-Les imperfections de la coupe, défauts de 4<sup>ème</sup> ordre**

Le second facteur déterminant la rugosité est l'état de la surface découpée, qui décale des imperfections inhérente à l'action de l'outil tranchant. L'état du bec de l'outil et les défauts d'état de surface résultant des imperfections de la coupe donnent une rugosité de la surface usinée différente de la rugosité théorique, cette différence est plus ou moins sensible suivant les conditions opératoires (nature des matériaux, vitesse de coupe et avance, type d'outil et son usure, etc....) [38]. Les cas les plus défavorables, à cet égard, sont ceux où l'on usine des

métaux ductiles à faible vitesse et très faible avance [37], en effet, ces conditions entraînent généralement la formation, au voisinage de l'arête tranchante, d'une "arête rapportée" ou "copeau adhérent", (figure I-9) dont les fragments sont appliqués sur la surface usinée par la pression de l'outil. Il en résulte un mauvais état de surface.



FigureI-9: Copeau adhérent

Il faut noter que l'effet défavorable des faibles avances sur la rugosité s'avère en contradiction avec leur influence directe sur la rugosité théorique. Ici encore, ceci conduit à un compromis pour le choix d'une vitesse de coupe élevée (dans la limite de l'endurance à l'usure de l'outil), est un élément généralement favorable à cet égard. Les défauts de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordres 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, géométrie et qualité d'affûtage, hétérogénéité du matériau, Conditions de lubrification].

#### I-3-4 Défauts physico- chimiques

Ces défauts se définissent à partir des défauts de 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> ordres, ces derniers dépendent de la structure et de réseau cristallin du matériau, 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 cristallographie, microscope électronique ou à balayage électronique. En fait on peut dire que la somme des écarts du 1<sup>er</sup> ou 4<sup>ème</sup> ordres caractérise la qualité de surface des pièces mécaniques [36]. Nous intéressons ici pour notre étude qu'aux défauts micro géométriques (défauts du 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordres).

#### I-3-5 mécanisme de formation du profil micro géométrique

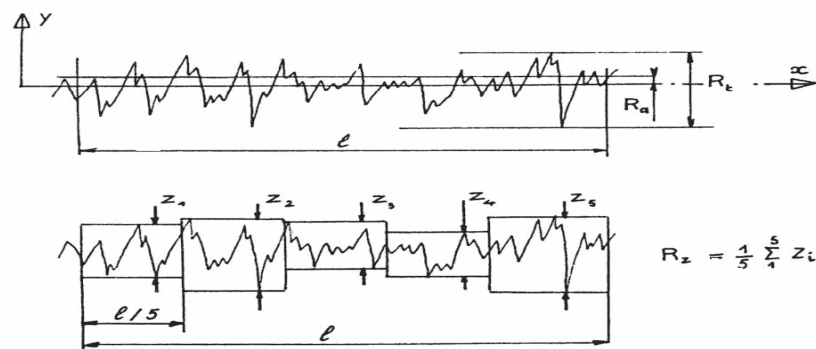
Lors de la coupe des métaux, l'outil laisse à la surface usinée des traces sous forme de sillons orientés non seulement dans le sens de la coupe, mais seulement dans celui de l'avance la coupe donne lieu à un bon nombre de phénomène tel que:

-déformation élastique et plastique du matériau travaillé.

- apparition dans certaines conditions d'une arête rapportée.
- effets dynamiques qui se manifestent par des vibrations du système mécanique, machine-outil, outil, pièce.
- frottements entre le copeau et la face de dégagement, ainsi qu'au contact entre facette d'usure sur plan en dépouille et pièces usinées. En conclusion, le mécanisme de formation de profil micro géométrique met en jeu l'action concomitante de tous les facteurs évoqués précédemment.

### I-3-6 Définition des critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage. (figureI-10)



FigureI-10: critères de rugosité

Soit la ligne moyenne telle que

$$\int_0^x y dx = 0 \dots\dots\dots(I-3)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne, soit:

La grandeur " R max" désigne la rugosité en hauteur totale. Elle définie comme la distance entre les deux droites parallèle à la ligne moyenne et délimitant le profil pour la longueur de référence établie.

**a) Rugosité moyenne arithmétique Ra:** dite C.L.A (canter ligne average)

Ra, représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX :

dés les débuts de l'usinage industriel, il a fallu définir la qualité de la surface usiné outre les aspects dimensionnels, il est aussi nécessaire de définir l'état de la rugosité de la surface, le critère le plus couramment utilisé dans le milieu industriel [38,39] est le paramètre statistique Ra défini par l'expression:

$$Ra = 1/L \int_0^x |y| dx \dots\dots\dots(I-4)$$

Ce critère est caractérisé par les chercheurs [40,41].

Le critère Ra reste encore le plus répondu dans l'industrie seule les entreprises de pointe utilisent d'autres paramètres pour caractériser les états de surface des pièces utilisées car sa sensibilité permet de faire la distinction entre les surfaces de qualités différentes.

**b) Rugosité moyenne quadratique R.M.S:** (Rot mean Square) "R.M.S" très voisine de "Ra" en valeur numérique et de moins en moins utilisée.

Représente l'écart moyen quadratique par rapport à OX:

$$RMS = \sqrt{1/L \int_0^x y^2 dx} \dots\dots\dots(I-5)$$

**c) Rugosité totale R t:** Représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur de pal page l:

**d) Rugosité R z:**

Représente la rugosité totale moyenne:  $Rz = 1/5 \sum_1^5 Z_i \dots\dots\dots(I-6)$

L'avance utilisée sera toujours inférieure à Rε.

On considérera les modèles théoriques suivants :

$$Rt_{théorique} = f^2 / 8 R\epsilon \quad \text{et} \quad Ra = f^2 / 18 \sqrt{3} R\epsilon \dots\dots\dots(I-7)$$

Quand  $f \ll R\epsilon$

**I-3-7 détermination théorique de la hauteur d'aspérités**

Dans le cas du tournage, elle relève de considérations géométriques (figureI-11)

- Pour un outil sans rayon "r=0", c'est-à-dire l'angle de dépouille et l'ongle d'attaque conservent respectivement une valeur constante en tout point de l'arête de coupe. La hauteur théorique d'aspérités répond à la relation

$$Rt = f / \cotg Sr + \cotg Sr_1 \dots\dots\dots(I-8)$$

- Avec un outil de rayon de pointe "r ≠ 0" l'outil produit sur la pièce usinée une forme d'hélice ayant un pas égale à l'avance et dont la hauteur théorique de la rugosité est déterminée d'après la formule

$$Rt = f^2 / 8 r_\epsilon \dots\dots\dots(I-9)$$

La présence de rayon de raccordement sur le bec est intéressant pour notre étude expérimentale et la pratique industrielle, sa présence minimise les risques de ruptures sous les fortes pressions, ainsi il conduit la plaquette à supporter des contraintes d'usinage dues aux duretés des matériaux des pièces usinées. La coupe des matériaux durcis ne nécessite des valeurs d'angle de coupe négatif qui a pour avantage de donner au taillant de l'outil une résistance plus élevée ainsi d'augmenter les protections d'arête compatibles avec une tenue correcte de celle-ci.

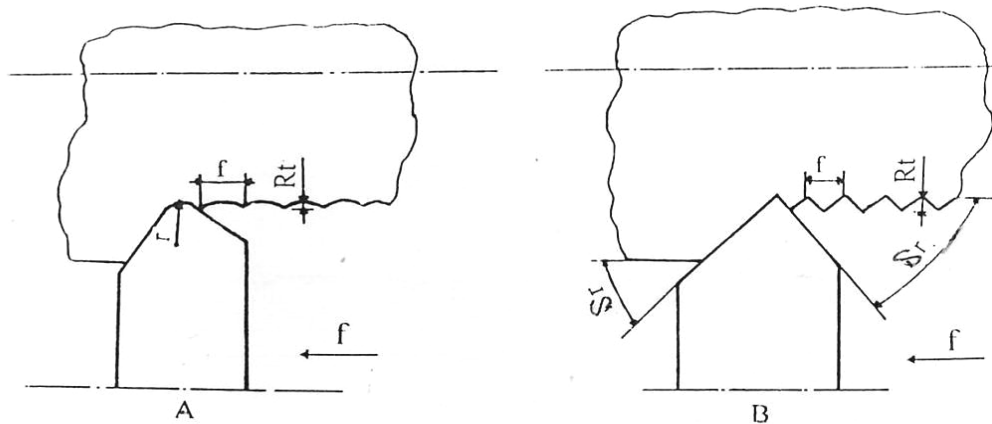


Figure I-11: détermination schématique de la hauteur théorique des aspérités

### I-3-8 Modèles théoriques de la rugosité

Dans le but de maîtriser la modélisation exacte de la rugosité Ra en 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. Le modèle théorique de la rugosité arithmétique moyenne est exprimé par l'équation (I-10)

$$Ra = f^2 / 32r \dots\dots\dots (I-10)$$

Où:  $f$  est la vitesse d'avance (mm/tr).

$r_e$  est le rayon de l'outil en (mm).

En se basant sur ce modèle, la rugosité est améliorée en diminuant la vitesse d'avance et en augmentant le rayon de l'outil. Ce modèle présente plusieurs limites, en effet il ne tient pas compte des imperfections du système usinant et des géométries spécifiques à l'outil.

Le modèle développé par Fang et Sati - Jahanshahi [42], exprime la rugosité de la surface en fonction de la vitesse de coupe  $V_C$ , de l'avance  $f$  et de la profondeur de passe  $a_p$ , ce modèle est donné par l'équation suivante:

$$Ra = C_0 V^{c_1} f_n^{c_2} a_p^{c_3} t^{c_4} \dots\dots\dots (I-11)$$

Fang et Wang [43], ont exprimé la rugosité Ra en fonction de la dureté du matériau à usiner H, de l'angle de l'outil A, de la vitesse de coupe  $V_C$ , de la vitesse d'avance f, de la profondeur de passe et de la durée de vie de l'outil T. ce modèle est donné par l'équation (I-12)

$$Ra = C_0 H^{c_1} A^{c_2} V^{c_3} F^{c_4} a^{c_5} T^{c_6} \dots\dots\dots (I-12)$$

Ces modèles n'expriment ni l'influence de la pointe de l'outil ni la teneur en C-BN. Donc pour remédier à cette défaillance, l'équation (I-12) est modifiée par Tügrül özel [44] pour prendre la forme suivante (I-13)

$$Ra = C_0 H^{c_1} C^{c_2} E^{c_3} V^{c_4} F^{c_5} L^{c_6} \dots\dots\dots (I-13)$$

Où E est la variable de la géométrie de la pointe, L: la longueur usinée, C: la teneur en Nitrure de bore. La profondeur de passe ne figure pas dans l'équation puisque il est prouvé qu'elle n'a pas d'effet sur l'état de la surface en tournage de finition des aciers durcis [1].

### **I-3-9 Influences des différents facteurs d'usinage sur l'état de la surface des pièces usinées**

#### **a) Influence de la vitesse de coupe:**

Parmi les facteurs les plus influençant l'état de surface, la vitesse de coupe a une influence assez importante sur la qualité micro géométrique de la surface usinée, du fait que son influence est souvent liée au phénomène d'arête rapportée. Pour l'usinage d'un grand nombre de matériaux, la courbe de rugosité présente l'allure illustrée par la figure (I-12). On observe sur cette courbe trois zones distinctes:

- **La zone A:** aux faibles vitesses de coupe, il n'y a pas de manifestation du phénomène d'arête rapportée, mais un important écrouissage superficiel. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe l'arête rapportée se forme ce qui engendre l'accroissement de la rugosité et une dégradation de l'état de surface est observée.
- **La zone B:** la rugosité décroît avec la diminution de l'arête rapportée (disparition progressive), occasionnée par l'augmentation de la vitesse de coupe ainsi que la température de coupe.
- **La zone C:** cette zone est caractérisée par la disparition totale de l'arête rapportée favorisée par les grandes vitesses et les températures élevées de coupe, ce qui contribue une amélioration assez sensible de l'états de la surface usinée. La diminution de la rugosité est encore favorisée par la réduction des déformations et des arrachements.

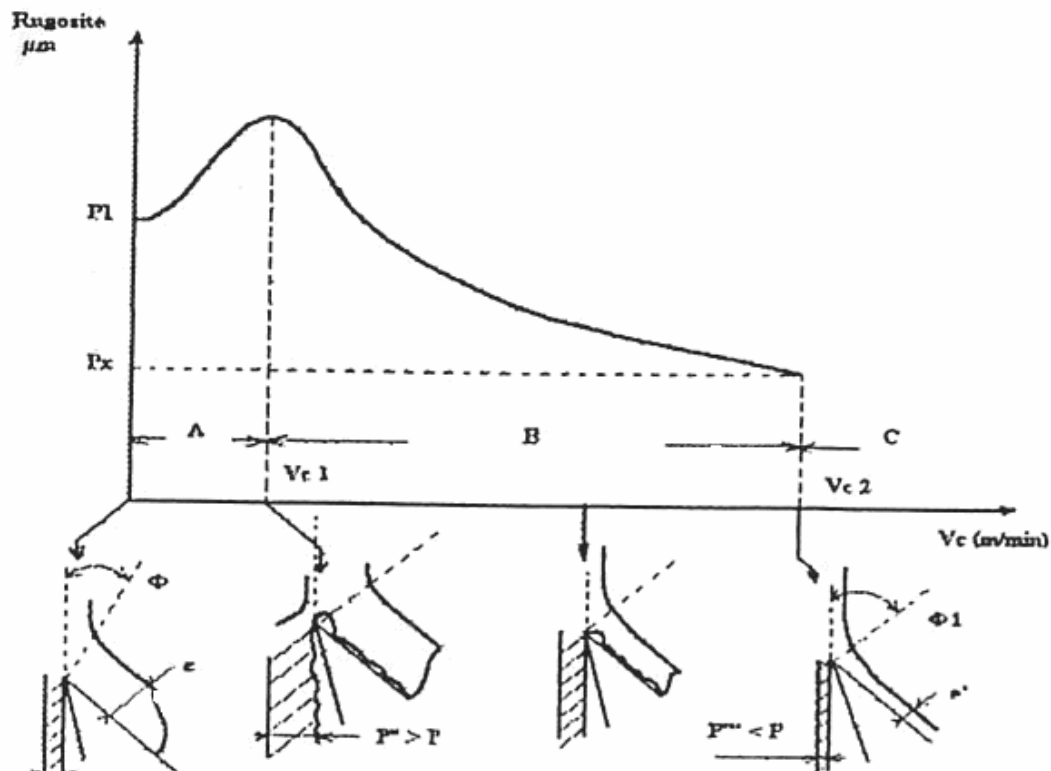


Figure I-12: influence de la vitesse de la coupe sur l'état de surface.

### b) Influence de l'arête rapportée

L'arête rapportée se trouve constituée par des couches successives de matière (provenant de la pièce), qui s'ajoutent les unes aux autres (dus à la pression excessive et au frottement du copeau sur l'outil), jusqu'au moment où l'arête rapportée se démole suite à l'élévation de la température dans la zone de la coupe. En présence de ce phénomène on observe une couche rugueuse sur la surface de la pièce usinée. Les particules détachées sont entraînées par le copeau où elles sont collées sur la surface usinée, ce qui détériore l'état de surface.

### c) Influence de l'avance de coupe

L'avance est le facteur déterminant de la qualité de l'état des surfaces usinées.

L'explication réside dans la génération de la surface usinée en tournage. La surface engendrée en tournage comporte des sillons hélicoïdaux, résultant de la forme du bec de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons seront d'autant plus profonds et d'autant plus larges que l'avance est élevée.

#### d) Influence de la profondeur de passe

La profondeur de passe ne joue qu'un rôle secondaire dans la formation de la rugosité. Elle agit naturellement sur la précision par les déformations de la pièce et du montage. La profondeur de passe ( $a_p$ ) n'a pas une influence significative sur la rugosité. Ce constat permet d'affirmer qu'il est toujours préférable d'augmenter la profondeur de passe plutôt que l'avance, quand on veut augmenter le débit de copeau tout en gardant la même valeur de rugosité.

#### e) Influence de la géométrie de l'outil

Le passage de l'outil sur une pièce usinée par tournage, trace à sa surface un sillon en hélice, dont le pas est équivalent à l'avance usinée. Suivant les caractéristiques du bec de l'outil, la profondeur des sillons sera plus ou moins profonde. Elle est exprimée par la (figure I-13)

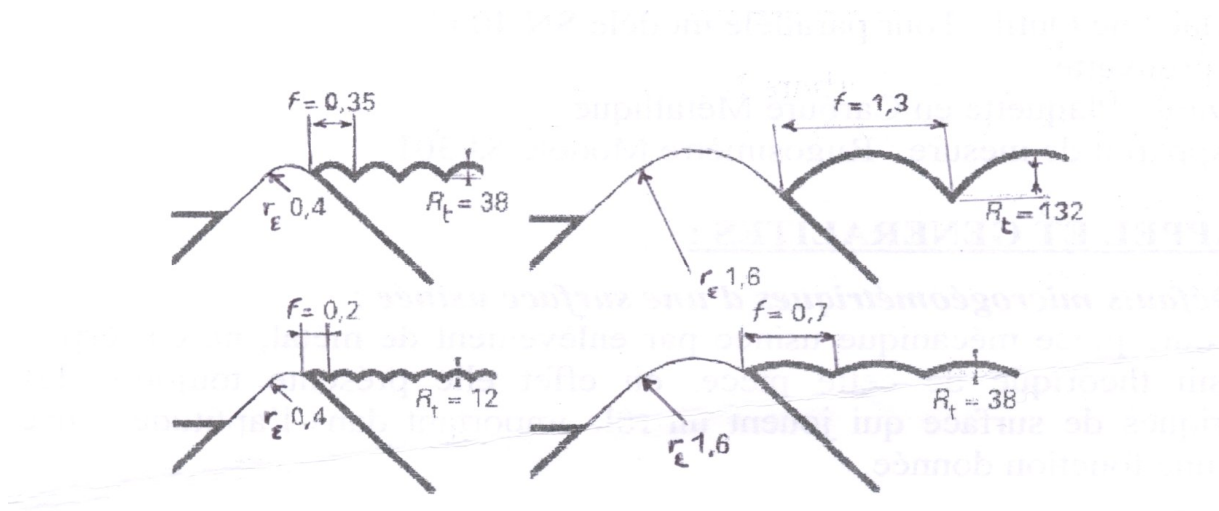


Figure I-13: influence de l'avance de coupe et le rayon du bec d'outil

Sur la rugosité théorique totale  $R_t$ .

La rugosité théorique  $R_t$  est influencée par l'avance  $f$  et par le rayon du bec d'outil. Celle de l'avance est plus remarquable (facteur prépondérant de la qualité micro géométrique de la surface usinée) relativement à celle du rayon du bec d'outil. La netteté du tranchant de l'outil joue un rôle non négligeable.

#### I-3-10 Couche blanche

La coupe des aciers durcis par l'intermédiaire des matériaux de coupe (céramique, C-BN) qui peuvent conduire à des grains significatifs en coût d'usinage, a été développés un changement structural de la surface extérieure générée pendant l'obtention des pièces par n'importe quel procédé de finition. Cette modification se produit par l'élévation de la température entre l'outil et la pièce. Le changement de l'état métallurgique de la surface dans la zone de contact outil / pièce produit un matériau austénitique ramolli qui flue à la fois vers le haut et sous l'outil. La



couche blanche est le résultat d'une modification de la structure superficielle se produit en raison de l'intensité mécanique et technique localisé et rapide. Selon [45, 46,47], ont adopté que la modification structurale ne s'applique qu'au copeau qui absorbe la plus grande partie de la qualité de chaleur produite lors de la coupe. La couche blanche a une dureté élevée souvent plus haute que le cœur, elle se produit lorsque l'outil atteint une certaine valeur d'usure, elles semblent être nuisibles dans la coupe des aciers durs. Pour la réduire, il est très important de contrôler l'usure en dépouille sur l'outil.

### **I-3-11 Contraintes résiduelles**

Le changement possibles de microstructure à la surface extrême causées par une transformation structurale et de phase (chauffage et refroidissement non uniforme) où par déformations plastiques des couches superficielles du matériau, il sont dues à un écrouissage localisé de la couche superficielle prévenant de la faible température de la pièce tout au long de l'usinage et de l'action mécanique du rayon de bec et de la surface de dépouille sous forme de talonnement de l'outil, ils naissent aussi a partir du moment où il y a des arrachements de matière [41]. Les contraintes résiduelles qui se forment et s'équilibre directement dans tout le volume du métal influent sur la précision d'usinage et sur les caractéristiques de l'exploitation des pièce, d'autres se forment et s'équilibres dans des grains et des cristaux du métal où dans les limites des quelques mailles du réseau cristallin [48].

Avec ce nouveau procédé de fabrication qu'est l'usinage dur, l'augmentation des avances produisant des contraintes mécaniques élevées sur la surface usinée, les températures associées au frottement de l'outil augmentent provoquant ainsi une contrainte de traction résiduelle au voisinage de la surface de la pièce et des contraintes de compression dans la zone la plus profonde. D'autre caractéristique de la surface ont évolué rapidement dans le temps, ci que l'état des contraintes à la surface de la pièce varie fortement cette variation résulte de deux effets de natures totalement différents [49,50]. Un effet thermique dépendent de l'évacuation des calories durant l'usinage et un effet mécanique en relation avec la vitesse de coupe (génération de contraintes résiduelles par enlèvement de matière). La connaissance du développement des contraintes à différentes étapes de fabrication (usinage) et traitement thermique peuvent aider à déterminer les causes de défaillances de façon à pouvoir prendre des mesures correctives appropriées, et peuvent servir à optimiser et améliorer la fiabilité et la performance, des produits.

### **I-4 Endommagement des outils de coupe**

L'usure de l'outil de coupe est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique qui doit obtenir la

rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes. Il s'ensuit une usure de l'outil qui peut être d'origine thermomécanique ou chimique. Cette usure est provoquée par la concentration de contraintes en divers endroits de l'outil qui dépend des paramètres de l'usinage, mais aussi:

- de la géométrie de la plaquette: angle de coupe, présence de brise copeau, etc....
- du revêtement et de son comportement mécanique et thermique il en résulte une usure apparente schématisée par la (figure I-14).

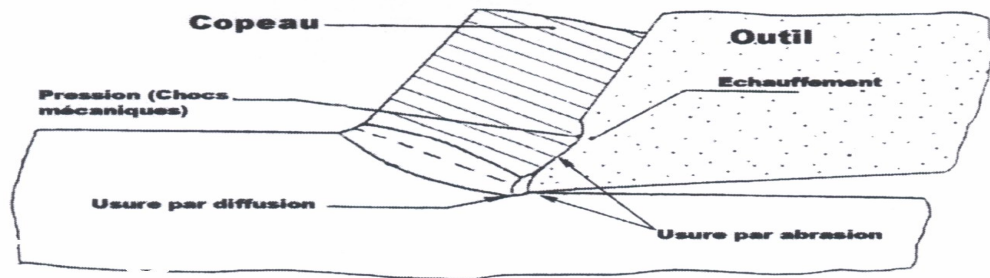


Figure I-14: Représentation des différentes zones d'usures de l'outil durant la phase de formation du copeau.

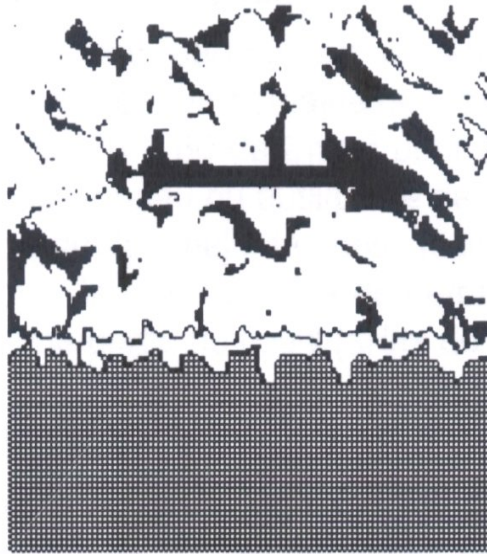
#### I-4-1 Mécanisme d'usure

L'usure des outils de coupe est la conséquence de divers mécanismes décrits ci-dessous.

##### a) Processus d'abrasion (mécanique)

Lors de l'usinage, la matière (pièce usinée et copeau) frottent avec des pressions de contacts importantes sur l'outil. Suivant la constitution physico-chimique (nombre, nature, composition et proportion des phases) et la structure (répartition et agencement des composants de l'alliage: forme, dimension, arrangement) la matière est plus ou moins abrasive par rapport à l'outil (figure I-15). Si la matière comporte des constituants durs (écrouissage, aluminate, nitrure, carbure, oxyde par exemple) et que ces derniers sont plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil. Cette usure pourra être:

- homogène: dans le cas d'une matière où les constituants sont homogènement répartis
- localisée: dans le cas de condition de coupe particulière: écrouissage, apparition d'oxyde lors de l'usinage.



FigureI-15: Processus d'usure par abrasion

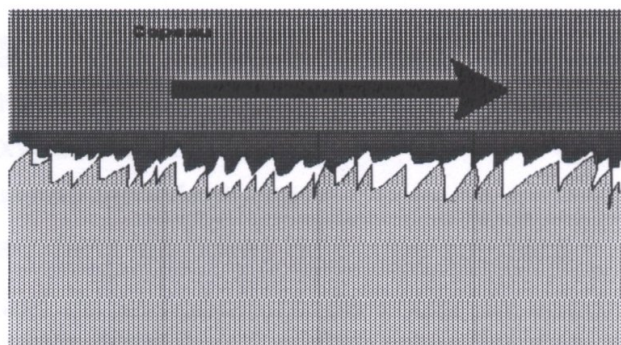
#### **b) Processus d'adhésion (Mécanique)**

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. En effet de l'usinage, ces entités frottent les uns contre les autres. Or les rugosités et microrugosités de ces surfaces, par contact et sous contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des micro- soudures (figure I.16). Ces microsoudures se crée et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus continu génère:

- l'apparition d'arêtes rapportées si les micro- soudure sur l'outil sont plus résistantes que celles du copeau.

- L'usure de l'outil si la micro- soudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil.

Cette usure est très faible et généralement négligeable.



FigureI-16: Processus d'usure par adhésion mécanique

### c) Processus de fissuration (Mécanique)

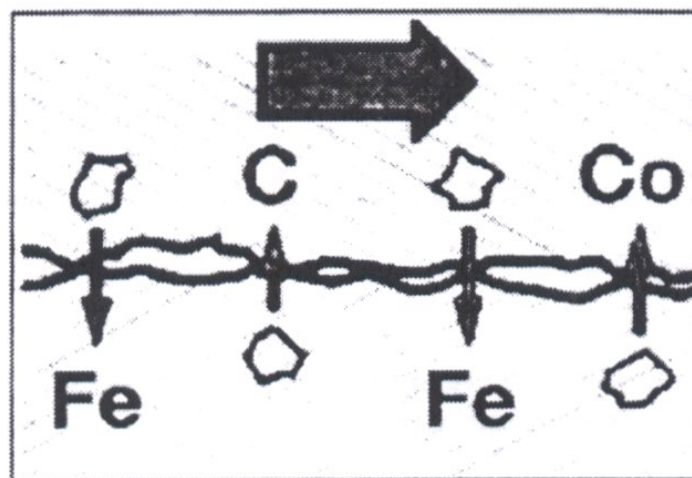
Lors de l'usinage, L'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier degré. De plus, la déformation plastique du matériau, engendre, par réaction des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil.

### d) processus de déformation plastique (Mécanique)

Si l'on caractérise un usinage en prenant comme paramètres la température (interface outil / copeau) et la pression exercée sur l'outil, on obtient un domaine de fonctionnement. Les pressions sont très importantes (de l'ordre de 70 à 80 dan/mm<sup>2</sup> pour un matériaux mi-dur par exemple) et les températures à l'interface outil / copeau où outil / pièce de l'ordre de 1000°C. Prenons le cas d'une paquette en WC (grande majorité des plaquettes): pour ces températures et pour ces pressions, on se trouve dans le domaine de déformation pastique du WC [51]. Il y a donc transformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe).

### e) Processus de diffusion (physico-chimique)

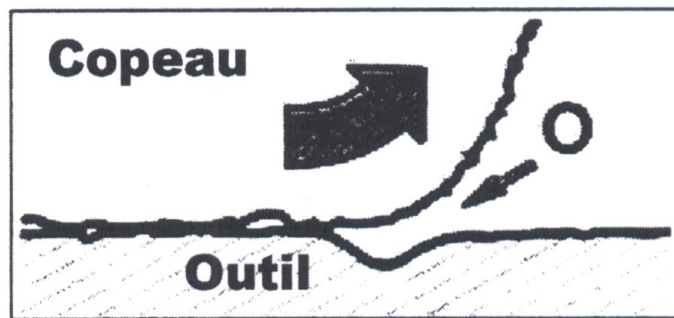
La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène d'usure qui ne peut se produire qu'à des températures élevées. Ces zones de températures élevées se situent à l'endroit du frottement du copeau sur l'outil. De plus, ce sont aussi des zones de forte pression car le copeau applique des contraintes sur l'outil. Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil au copeau. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil (figureI-17).



FigureI-17: Processus d'usure par diffusion.

### e) Processus d'oxydation (physico-chimique).

Le milieu de l'usinage est constitué: de l'oxygène dans l'air, des hautes températures, de l'eau dans les huiles de coupe solubles. Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoque localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (figure I-18). De plus, le potentiel d'oxydo - réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.



FigureI-18 : Processus d'usure par oxydation

### f) processus combiné

Au cours d'un usinage, l'ensemble de ces processus se produit. Suivant les conditions d'usinage certains processus sont favorisés par rapport à d'autres. En général on peut dire que:

- les processus d'abrasion et d'adhésion sont favorisés lors des usinages où les températures sont faibles et où les vitesses de défilement du copeau sont faibles. En effet dans ces cas là, il n'y a pas de formation de couche de glissement due à la température ou aux vitesses élevées. Il y a donc grippage ou arrachement.

- les processus de diffusion, de déformation plastique, d'oxydation sont favorisés par l'élévation de la température et des vitesses de coupe. Peut se résumer d'après KONIG [2] par le diagramme suivant (figureI-19).

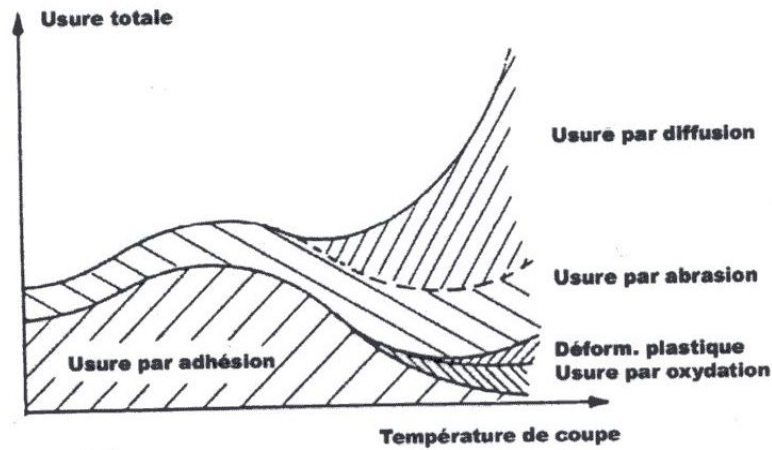


Figure I-19: diagramme de combinaison des différents processus d'usure en fonction de la température d'usinage

### I-4-2 Usure visible sur l'outil

L'ensemble des processus décrits dans les deux paragraphes précédents. En se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils (figure I-20).

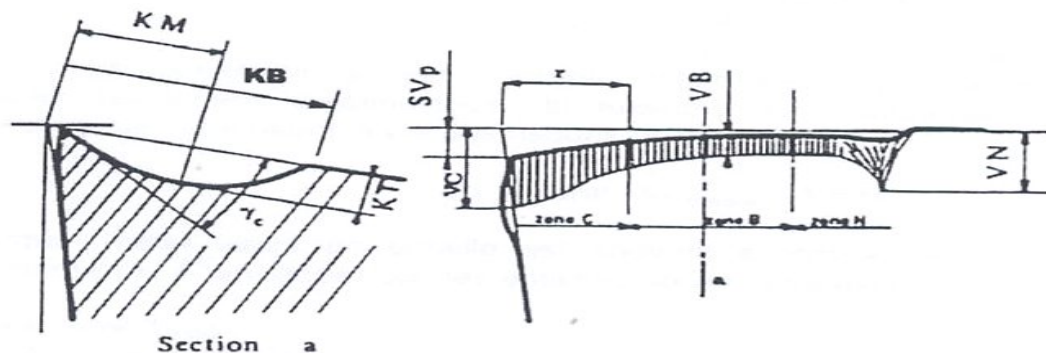


Figure I-20: Forme d'usure des outils de coupe

#### Indices:

- KM: distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil.
- KT: profondeur d'un cratère.
- KB: largeur du cratère.
- $\gamma_c$ : angle de cratérisation.
- VB: hauteur de l'usure en dépouille.
- VN: profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale.
- SV: profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée.

### a) L'usure en dépouille ou usure frontale

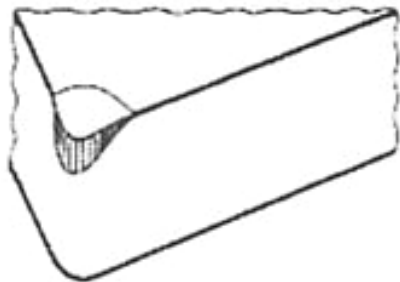
Elle est due au frottement de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête de coupe. Elle influe sur l'état de surface de la pièce usiné et sur la précision dimensionnelle de l'usinage car elle modifie la position de l'arête de coupe, c'est un critère général pour la tenue d'outil. Caractérisée par une valeur d'usure admissible **VB**. Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer puisqu'elle détermine la précision dimensionnelle et l'état de surface de la pièce usiné (figure I-20).

### b) Usure en cratère

C'est une usure en creux sur la face de coupe caractérisée par la profondeur de caractérisation (**KT**) et le rapport **KT/KM** où son angle de caractérisation  $\gamma_c$ . Elle peut avoir à une incidence sur la tenue d'outil (durée de vie, effondrement ou recul de l'arête de coupe. Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil, lors de l'usinage la température élevée à l'interface copeau outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil provoquent une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion. Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par une flèche  $S_{vp}$  et un renflement de la face de dépouille. Cette usure est souvent constatée sur les outils en carbures, elle provoque généralement la rupture de la pointe de l'outil. La valeur critique est celle à partir de laquelle l'outil est considéré comme hors d'usinage avec risque important de rupture de l'outil. Cette usure est généralement due à vitesse de coupe excessive où à une avance trop faible (figure I-20).

**Valeur limite:**  $KT_{critique} = 0.06 + 0.3f$  où f: l'avance par tour

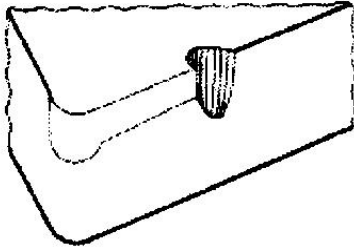
### c) Déformation plastique



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, on peut trouver cette

déformation plastique en parallèle d'une cratérisation, en effet le cratère affaiblit la section de l'outil (figureI-20a).

### c) Usure en entaille ou par oxydation

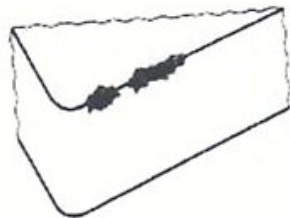


Pour certains outils, et dans certaines conditions de coupe. Il se Produit une entaille ponctuellement au niveau du point de contact entre l'arête principale de coupe et la surface de la pièce mais elle peut aussi apparaître sur la face de dépouille secondaire.

Elle est due à l'érouissage ou l'oxydation de la pièce ce genre d'usure due à des phénomènes métallurgiques (calamine des pièces forgées, différence de taille de grain des pièces moulées, oxydation des aciers) est caractérisé par l'indice VN. Suivant l'importance de cette usure, il y a des risques de rupture. Cette usure en entaille est souvent accompagnée d'une usure en dépouille (figurI-20b).

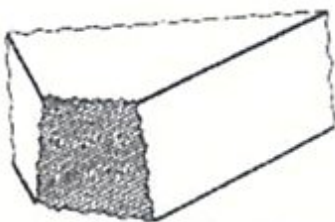
**En général:**  $VN_{critique} = 1mm$

### d) Ecaillage de l'arête de coupe



C'est une destruction de l'arête de coupe par arrachement de petits fragments d'outil. Elle est généralement accompagnée d'une usure de la face de dépouille. Elle est générée par les chocs thermiques et les vibrations. Cette usure est souvent le fait de chocs thermiques où d'arête trop fragile (figureI-20c).

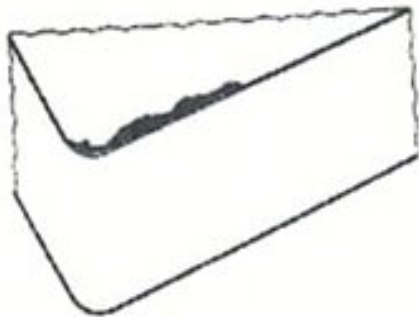
### e) Rupture de la plaquette



Une rupture de la plaquette signifie en général Détérioration de l'outil et de la pièce. Ces causes sont multiples et dépendent de la machine et de la pièce. Elle est souvent le résultat d'entailles sur l'arête de coupe, d'une cratérisation où d'une usure trop importante (figureI-20d).

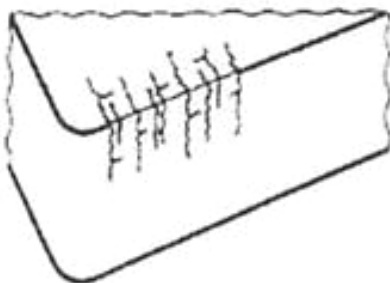


#### f) Arêtes rapportées



Les arêtes rapportées résultent d'une accumulation de métal de la pièce usinée sur la face de coupe, en particulier dans le cas de matériaux difficilement usinables. IL arrive parfois que cet apport de métal se détache et détériore l'arête de coupe, et une avance trop faible ou des angles de coupe non appropriés (figureI-20e).

#### g) Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne



Légères fissures sensiblement perpendiculaires à l'arête de coupe occasionnées par les chocs thermiques résultant des interruptions de coupe, en particulier dans le cas du fraisage. Risque de rupture (figureI-20f)

### I-4-3 Critères d'usures

Les différents critères actuellement utilisés se rangent en deux catégories:

#### A) Critères directs

Ils sont basés sur l'évolution de l'usure. Avec ces différentes formes, tels que la (figure I-20).

- critère d'usure frontale: caractérisé par la largeur moyenne  $VB$  de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil.
- critère de cratérisation: défini par la valeur limite de la profondeur du cratère  $KT$ , Ou par la valeur limite du rapport de cratérisation  $KT/KM$ , ou par une valeur limite de l'angle de cratérisation  $\gamma_c$ .
- critère de «mort d'outil» utilisé principalement pour les outils en acier rapide.
- critère d'usure volumétrique ou massique: caractérisé par la perte en poids de l'outil.
- critère basé sur les variations des cotes des surfaces usinées, actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers.

Les critères de durée d'outil recommandés par la norme "ISO" sont:

- . La largeur de la bande d'usure frontale  $[VB] = 0,3\text{mm}$ , si elle est uniforme.
- . La largeur maximale de cette bande  $[VB]_{\text{max}} = 0.5\text{mm}$ , si elle est irrégulière.

## **B) critère indirect**

Ils sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil, prenons à titre d'exemple.

- les efforts et le travail spécifique de coupe.
- la rugosité de la surface usinée.
- la température de coupe.

Pour les outils en carbure métallique, les critères utilisés actuellement sont ceux recommandés par la norme " ISO". Ils sont basés sur l'évolution de l'usure frontale ou sur celle de l'usure en cratère (caractérisation).

## **C) critère complémentaire**

Si on désire dans certains cas avoir recours à des critères complémentaires, il est recommandé d'employer: pour les carbures et les céramiques, une profondeur **KT** du cratère calculée par la formule.

$$KT = 0.1 + 0.3f \quad \text{où : } f \text{ est l'avance en mm/tr}$$

## **I-5 Les facteurs influençant la qualité de surface en tournage dur**

Dans l'usinage des pièces la qualité de surface est une condition la plus indiquée du produit fini, pour éviter toute instabilité des caractéristiques d'un produit lors de sa fabrication ou de son utilisation il faut rechercher les relations entre les caractéristiques des matériaux usinés (rigidité, nuance), celles de l'outil (rigidité, géométrie, nuance), et les paramètres fondamentaux caractérisant les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe). Afin de faciliter la compréhension du processus du tournage dur il est nécessaire de comprendre l'impact de chacune de ces variables, mais également l'interaction entre elles. Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés dans ce domaine. Tugrul özel [44] montre que pour améliorer la rugosité il faut seulement diminuer l'avance et augmenter le rayon du bec de l'outil, il y a beaucoup de problème avec ce modèle, d'abord il ne tient compte d'aucune imperfection d'usinage (vibration, frottement du copeaux), il prouve qu'il y a une dispersion entre les valeurs réelles de la rugosité mesurées et celle calculée par le modèle pour des vitesses d'avances faibles. Selon [52], l'auteur montre que les vitesses basses induisent une grande adhérence entre l'outil et la surface de coupe secondaire provoquant un grand frottement. J.kopac, M.bahor [53] suggèrent que la géométrie de l'outil a un impact important mais prouvent aussi que ce n'est pas la géométrie seul qui influe sur la rugosité. J.D.thiele, S.N.Melkote [54] ont prouvé que la géométrie du tranchant est particulièrement significative, une augmentation du rayon augmente la rugosité à cause des vibrations du système usinant

qui provoquent l'usure des outils et affectent ainsi la qualité de la surface. Hodgson et Al [55] ont prouvé que pour la coupe des aciers durcis il est nécessaire d'avoir une bonne qualité. Abouelatta [56] suggère que la divergence dans la rugosité est due aux effets de vibration et l'effet du copeau. Les propriétés des matériaux de la pièce qui se résument dans la dureté ont un impact important sur la rugosité, pour un matériau de dureté entre 45 et 70 HRC, Lieu et al [57] ont trouvé que la rugosité augmente jusqu'à une dureté de 50 HRC et puis diminue ce qui implique que 50 HRC est une valeur critique. Feng et Hu [58] et Feng [55], ils ont constatés que parmi les facteurs qui influent d'une façon significatif sur la rugosité, l'angle de coupe, le rayon du bec de l'outil, qui s'additionnent aux facteurs connus tel que: la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de passe, la rigidité de la pièce ainsi que les divers interactions entre ces facteurs, mais d'autre paramètres qui ont l'effet sur la rugosité, mais ces effets n'ont pas été en juste mesurés pour que les fabricants maximisent leurs gains d'utiliser l'usinage dur, la couche blanche observé par les chercheurs [45,46,47] et qui présente actuellement un frein au développement de l'usinage dur. La qualité de surface est influencée par la dureté et les propriétés du matériau usiné les travaux de recherche de Y.Ratsumoto, F.Hashimoto, G.Lahotli [59], Y.K.Chou, C.Evans, M.M Barash [60], LL.W.A.Koenig, R.Komanduri, H.K.Toenshoff, G.Ackeshoh [61], ils ont prouvé que la rugosité de la surface diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce, mais cette dernière affecte la durée de vie de l'outil. Koenig [62] a étudié l'effet de la géométrie de l'outil de l'arête de coupe, il a trouvé qu'une arête chanfreinée altère la rugosité en la comparant à une arête vive. Theile et al [63], ont prouvé que la géométrie de l'outil de coupe présente un impact important sur la contrainte résiduelle, une arête arrondie favorise l'apparition des contraintes compressives, d'autre part le rayon de la pointe de l'outil a un effet considérable sur l'intégrité de la surface, en effet la rugosité et inversement proportionnelle au rayon. Y.K.Chou, C.J.Evans, M.M.Barash [64], ont prouvé que la coupe négative est un facteur intéressant dans l'étude de la qualité de surface en usinage dur vue son influence sur l'usure de l'outil qui affect la surface usinés. Fang et Wang [65], ont prouvé que les paramètres de coupe ont des effets considérables sur la qualité de la surface obtenue. L'augmentation de la vitesse de coupe et la diminution de l'avance permettent la diminution de la rugosité et améliorent la qualité de surface. Les paramètre de coupe à savoir la vitesse d'avance, la profondeur de passe et la vitesse de rotation ont un impact très important sur la rugosité car ils interviennent d'une façon direct par leur interactions parmi les travaux effectuées dans ce cadre sont ceux des chercheurs Bhattacharya. A Faria, Gonzalez [66], Sundaram.R.M, et B.K. Lambert [67], J.D Thiele et S.N.Melkote [68].Concernant les variables de l'outil, le modèle théorique considère que le

rayon du bec de l'outil est le seul paramètre qui intervient alors l'auteur, O.B.Abouelatta et J.Madl[69], montre que l'influence de la géométrie de la pointe de l'outil est particulièrement considérable. Les vibrations de l'outil sont souvent ignorées par les chercheurs. Dans la référence [70], l'auteur suggère que la divergence dans la rugosité de surface est due aux vibrations de l'outil, pour réduire cette dernière il faut travailler avec un outil plus rigide. Les résultats obtenus lors de l'usinage dur par les chercheurs [71,72] des aciers durcis ( $45 < \text{HRC} < 65$ ) ont donné un très bon état de surface comparable à celui obtenu par la rectification ( $R_a=0.1\mu\text{m}$ ). ils prouvent que le remplacement de la rectification permet un gain considérable sur le temps, et le coût. Les essais de rugosités effectués par K.chou et J.Evan [71] avaient pour but de donner une alternative aux opérations de finition, les résultats obtenus étaient surprenants, la rugosité  $R_a$  varie de 0.05 jusqu'à  $0.1\mu\text{m}$ . M. Zimmermann, M. lahres, D.V.viens et B.L.laube [72] ont prouvé que l'usinage dur permet de remplacer la rectification mais avec une géométrie définie.

## I-6 Les efforts de coupe

### I-6-1 Généralités

Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec une certaine force  $F$  dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts coupe (figure I-21) [73] La résultante de coupe  $F$  est la somme de 3 composantes suivantes:

- $F_t$  ou  $F_z$ : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

- $F_a$  ou  $F_x$ : composante dans le sens de l'avance, appelée effort axial

- $F_r$  ou  $F_y$ : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial. Il n'a aucune importance et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.

La composante déterminante  $F_t$  de l'énergie de coupe  $E$  nécessaire à l'enlèvement du copeau pendant l'unité de temps est donnée par la relation suivante:

$$E = F_t * V_c \dots\dots\dots(I.14)$$

L'énergie due à la composante  $F_a$  et presque négligeable à côté de  $E$ .

Rapport des composantes:

La résultante de coupe  $F$  étant une diagonale de parallélépipède est égale

$$\text{à: } F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \dots\dots\dots(I.15)$$

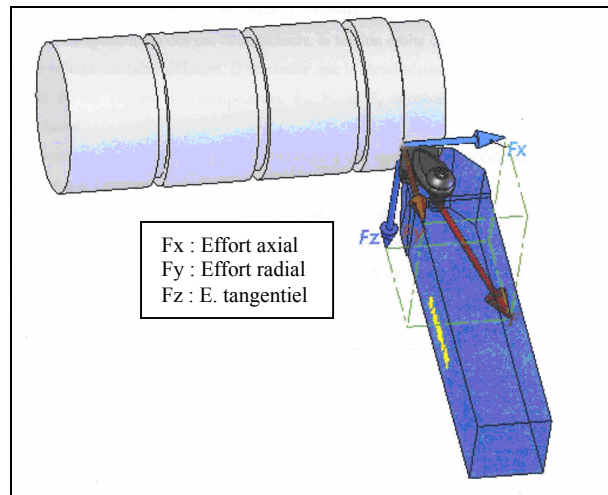


Figure I-21: composantes des effort de coupe

## I-6-2 Intérêt de mesure des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est 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 qu'elle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de la machine, et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient également dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations ou broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. En fin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de formation du copeau.

## I-7 Les vibrations dans le processus de coupe

### I-7-1 Introduction

Le problème majeur qui apparaît pendant la coupe des métaux se caractérise par l'apparition de vibrations dites auto- excitées ou «broutement». Ces vibrations sont très redoutés, car elles rendent le processus de coupe instable, elles peuvent mettre en danger les organes de la machine outils et limiter sévèrement ses performances tant sur le plan qualitatif que quantitatif. Des études approfondies ont été consacrées à ce phénomène de broutement pour en expliquer l'origine d'une part et d'en trouver des remèdes d'autre part [69]. Les théories actuelles ne sont pas en mesure de prédire les conditions d'apparition de ce phénomène à cause de la complexité de la structure de la machine outil, qui possède un grand nombre de degré de liberté qui se modifie en cours d'usinage. De plus, les structures de la machine outil comporte des non linéarités (contact pièce- outil, frottements, variation des efforts de coupe en fonction des amplitudes des déplacements, etc.....). Sur les machines-outils travaillant par

coupe, deux types de vibrations peuvent être observés les vibrations forcées et auto excitées [74].

#### **a) Les vibrations forcées**

Causées par la variation cyclique de la force de coupe. Il s'agit de perturbation due à l'application d'une force oscillatoire (perturbation périodique) provoquée par la variation des forces qui s'exercent sur le système variation due à la coupe intermittente, aux forces centrifuges dues au manque d'équilibre des masses en rotation. Les vibrations forcées sont à l'origine de mauvais usinage 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.

#### **b) Les vibrations auto excités**

Causées essentiellement par la variation de la force de frottement du copeau sur l'outil, de l'outil sur l'ébauche, de l'érouissage irrégulier de la couche enlevée suivant son épaisseur de la variations dimensionnelles de l'arête rapportée qui se modifient en cours de l'usinage de l'angle de coupe, et de la surface de la section droite de la tranche cisailée. Les vibrations auto excités sont bien fréquentes que les vibrations forcées.

### **Conclusion**

Les caractéristiques de l'état de surface jouent un rôle prépondérant sur son aptitude à remplir une tâche donnée. Les surfaces réelles ne sont jamais entièrement conformes à celles idéalement géométriques représentées sur le dessin. Elles présentent des défauts de natures géométriques et physico- chimique résultant du procédé de fabrication utilisé et du matériau.

Le terme état de surface englobe à la fois l'état géométrique de la surface définie 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. La bibliographie rencontré dans le domaine de l'usinage dur passe par les axes suivant: avoir une microstructure du matériau moins abrasif cela est possible par la minimisation de la taille des grains structure fine ou par l'amélioration des traitements thermiques (avoir un durcissement par transformation martensitique plus q'un durcissement par précipitation des carbures), de trouver une solution concernant la formation des couches blanches, et ainsi le phénomène de broutement qui rendent le processus de coupe instable est de mettre en danger les organes de la machine outil et limite sévèrement ses performances tant sur la plan qualificatif que quantitatif. Les recherches entamées étaient en concordance entre elles sur la qualité de surface. La stratégie actuelle d'optimisation reposent sur l'augmentation de la productivité la qualité ou la diminution des coûts par l'intermédiaire de l'utilisation des

outils de meilleures performances techniques et économiques telles que (céramique, C-BN) par rapport aux autres matériaux outils actuels, ils sont idéals pour plusieurs opérations d'usinage des aciers trempés dont la dureté se situe entre 50 et 65 HRC. Ce qui permet d'introduire de séquences machines plus efficaces et avec une plus grande flexibilité, d'augmenter les taux d'enlèvement de matière, d'améliorer la qualité des pièces (précision de la finition) et de fabriquer au plus près des formes et des cotes (moins d'opérations et moins d'enlèvement de matière), et la détermination du domaine d'emploi (nature de matières à usiner ) sur les mécanismes d'usure(nature et évolution de l'usure) sur la détermination de la durée de vie des outils ainsi que les performances économiques (productivités taux d'enlèvement de matière). Les principaux types d'usure trouvés dans la littérature étaient l'usure par abrasion, l'usure par adhésion et l'usure par diffusion, l'usure par abrasion est le résultat de la présence de particules très dures dans le matériau usiné, l'usure par adhésion est le résultat des jonctions métalliques qui forment des micro soudures qui seront rompues par le mouvement relatif du copeau, l'usure par diffusion est le résultat de l'interaction entre l'outil et le copeau à des températures de coupe élevées. L'usure de l'outil prend plusieurs formes, les principaux sont l'usure en dépouille et l'usure en cratère. La détermination de la durée de vie de l'outil à plusieurs critères, les plus utilisés sont les critères d'usure en dépouille admissible et le critère de l'usure en cratère admissible. Le faible degré d'usure (longue durée de vie) des outils en céramique garantit obligatoirement dans l'usinage des aciers trempés une bonne stabilité dimensionnelle des pièces réalisées et une bonne réduction considérable des temps auxiliaires (pas de reprise). La focalisation des études sur l'usure des outils de coupe pendant le tournage dur facilite la compréhension du mécanisme d'usure et permet l'amélioration et le développement des outils. L'évolution des possibilités des outils a engendré une augmentation de la puissance des machines outils ainsi que de leur résistance aux différentes sollicitations (tant au point de vue statique que dynamique ou thermique). La tendance actuelle est d'obtenir des surfaces de qualité appropriée ceci est un facteur essentiel d'évolution de la productivité et de diminution des coûts de production.

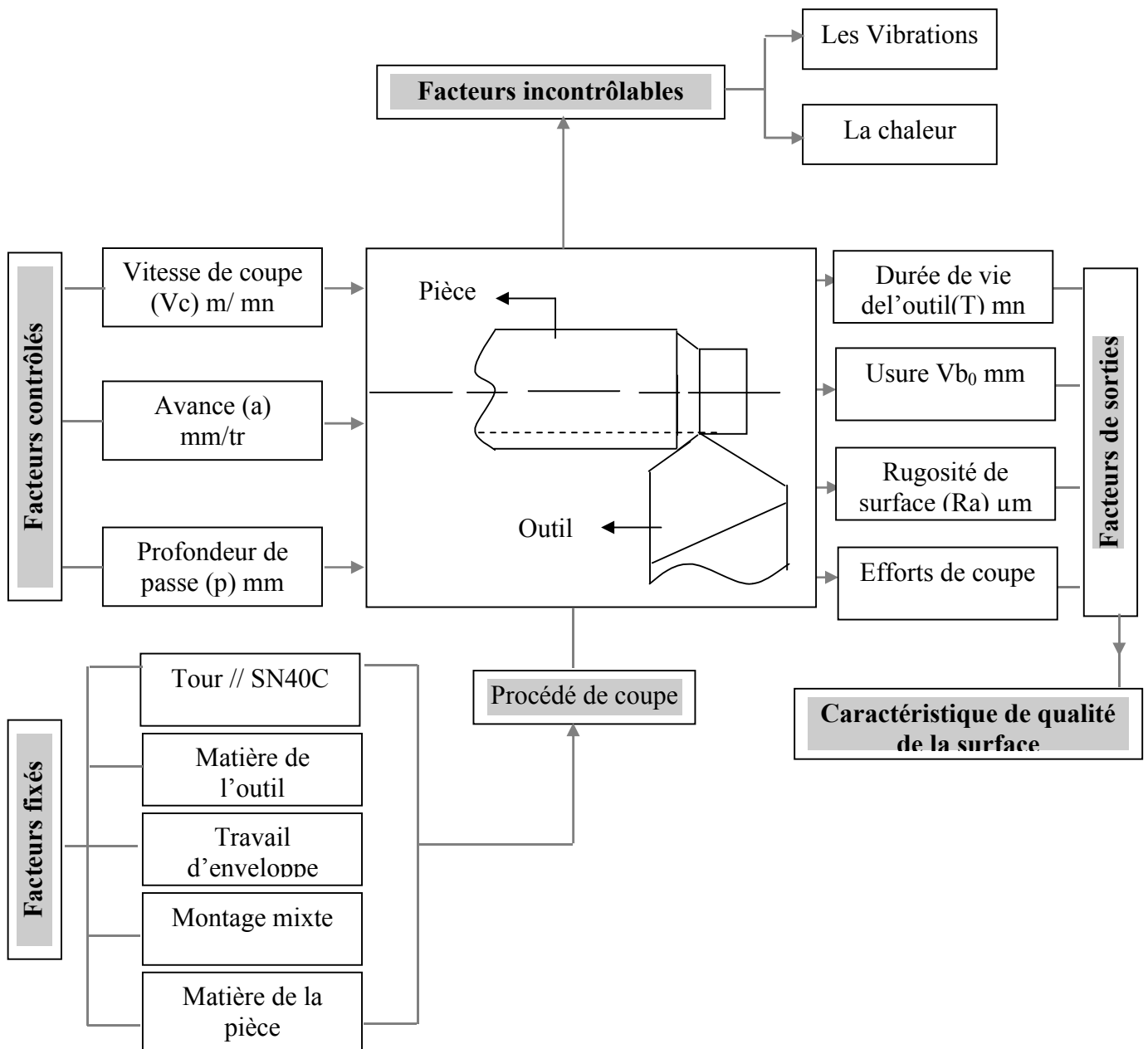
***Chapitre II***  
***Procédures expérimentales***



## II-1 Introduction

Les essais d'usinage de l'acier **42CrMo4**, nécessaires à la réalisation de notre étude, ont été effectués au laboratoire de coupe des métaux du département de génie mécanique à l'université **8 Mai 1945 de Guelma**. Cela va consister en une présentation du matériel noté ci-dessus.

## II-2 Récapitulation du problème



### II-3 Planification des expériences

Les éléments du régime de coupe ( $V_c, f, a_p$ ) ainsi que les paramètres géométriques de l'outil ( $\alpha, \gamma, K_r, K_{r1}, \beta, r$ ) sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité de la surface usinée, précision d'usinage représentent les paramètres de sortie. Une propriété peut toujours être décrite par une expression mathématique: **J.Goupy [75]** telle que :  $Y = f(X_1 X_2 X_3 \dots X_n)$  .....(2.1)

Avec :

- Y grandeur appelée (variable de sortie)
- X variable appelé (paramètre d'entrée).

Pour parvenir à cette forme mathématique selon le type de plan, deux méthodes de planification des expériences qui sont:

- méthode unifactorielle.
- méthode multifactorielle.

#### II-3-1 méthode unifactorielle

Cette méthode permet de déterminer un modèle mathématique exprimant la relation entre le paramètre d'optimisation étudié (y) et un seul facteur prédéterminé (x).

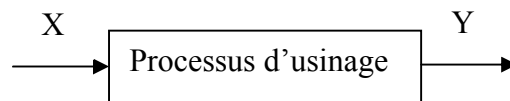


Figure II-1:Schéma structural du processus de coupe

Dans le domaine de l'usinage cette relation à généralement la forme suivante

$$Y = C_0 X_1^{C_1} \dots \dots \dots (2.2)$$

Ou :  $C_0$  : c'est une constante qui tient compte de l'influence de tous les autres facteurs qui ne figurent pas dans la formule (2.2)

$C_1$  : c'est un exposant indiquant le degré d'influence du facteur  $X_1$  sur le paramètre  $Y$ .

#### II-3-2 Méthode multifactorielle

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes. La stratégie de recherche expérimentale consiste a déterminé tout d'abord le nombre d'essais nécessaires, le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction d'entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs. Dans notre étude nous avons Considéré

l'influence de trois facteurs de base ( $V_c, f, a_p$ ) sur les divers fonctions d'optimisation (rugosité, effort de coupe, usure, vibration), c'est la relation de la forme:

$$Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_M) \dots \dots \dots (2.3)$$

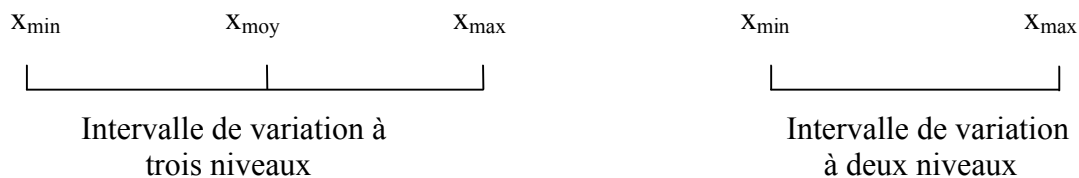
Dans ce cas, la variation de ces facteurs se fait selon un plan d'expérience préalablement établi et qui prend en considération toutes les combinaisons de variations possibles (tableau II-1).

| Essais           | Facteurs xi        |                   |                   |      |                   |                  |      |      |      |                | Paramètres yi   |                  |                  |
|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------|-------------------|------------------|------|------|------|----------------|-----------------|------------------|------------------|
|                  | Valeurs naturelles |                   |                   |      |                   | Valeurs codifiés |      |      |      |                | Y <sub>1</sub>  | Y <sub>2</sub>   | Y <sub>3</sub>   |
|                  | X1                 | X2                | X3                | .... | X <sub>M</sub>    | X1               | X2   | X3   | .... | X <sub>M</sub> | Y <sub>1</sub>  | Y <sub>2</sub>   | Y <sub>3</sub>   |
| 1                | X <sub>1min</sub>  | X <sub>2min</sub> | X <sub>3min</sub> | .... | X <sub>M</sub>    | -1               | -1   | -1   | .... | -1             | Y <sub>11</sub> | Y <sub>21</sub>  | Y <sub>31</sub>  |
|                  |                    |                   |                   |      | min               |                  |      |      |      |                |                 |                  |                  |
| 2                | X <sub>1max</sub>  | X <sub>2min</sub> | X <sub>3min</sub> | .... | X <sub>Mmin</sub> | -1               | -1   | +1   | .... | -1             | Y <sub>12</sub> | Y <sub>22</sub>  | Y <sub>32</sub>  |
| 3                | X <sub>1min</sub>  | X <sub>2max</sub> | X <sub>3min</sub> | .... | X <sub>Mmin</sub> | -1               | 1    | -1   | .... | -1             | Y <sub>13</sub> | Y <sub>23</sub>  | Y <sub>33</sub>  |
| 4                | X <sub>1max</sub>  | X <sub>2max</sub> | X <sub>3min</sub> | .... | X <sub>Mmin</sub> | -1               | 1    | +1   | .... | -1             | Y <sub>14</sub> | Y <sub>24</sub>  | Y <sub>34</sub>  |
| 5                | X <sub>1min</sub>  | X <sub>2min</sub> | X <sub>3max</sub> | .... | X <sub>Mmin</sub> | +1               | -1   | -1   | .... | -1             | Y <sub>15</sub> | Y <sub>25</sub>  | Y <sub>35</sub>  |
| 6                | X <sub>1max</sub>  | X <sub>2min</sub> | X <sub>3max</sub> | .... | X <sub>Mmin</sub> | +1               | -1   | +1   | .... | -1             | Y <sub>16</sub> | Y <sub>26</sub>  | Y <sub>36</sub>  |
| 7                | X <sub>1min</sub>  | X <sub>2max</sub> | X <sub>3max</sub> | .... | X <sub>Mmin</sub> | +1               | 1    | -1   | .... | -1             | Y <sub>17</sub> | Y <sub>27</sub>  | Y <sub>37</sub>  |
| 8                | X <sub>1max</sub>  | X <sub>2max</sub> | X <sub>3max</sub> | .... | X <sub>Mmin</sub> | +1               | 1    | +1   | .... | -1             | Y <sub>18</sub> | Y <sub>28</sub>  | Y <sub>38</sub>  |
| 9                | X <sub>1min</sub>  | X <sub>2min</sub> | X <sub>3min</sub> | .... | X <sub>Mmin</sub> | -1               | -1   | -1   | .... | -1             | Y <sub>19</sub> | Y <sub>29</sub>  | Y <sub>39</sub>  |
| 10               | X <sub>1max</sub>  | X <sub>2min</sub> | ....              | .... | ....              | 1                | -1   | +1   | .... | ....           | Y <sub>10</sub> | Y <sub>210</sub> | Y <sub>310</sub> |
| ....             | ....               | ....              | ....              | .... | ....              | ....             | .... | .... | .... | ....           | ....            | ....             | ....             |
| N=p <sup>M</sup> | X <sub>1max</sub>  | X <sub>2max</sub> | X <sub>3max</sub> |      | X <sub>Mmin</sub> | 1                | 1    | 1    | .... | 1              | Y <sub>1N</sub> | Y <sub>2N</sub>  | Y <sub>3N</sub>  |

Tableau II-1 : Réalisation d'essai d'après la méthode multifactorielle

Chaque facteur X<sub>i</sub> ne peut se varier que dans un intervalle bien déterminé.

Soit xi ∈ [x<sub>min</sub>, x<sub>max</sub>]. On se sert des valeurs x<sub>min</sub>, x<sub>moy</sub> et x<sub>max</sub> dans une expérience à trois niveaux (p=3), pour une expérience à deux niveaux (p=2) nous utilisant seulement le x<sub>min</sub> et x<sub>max</sub>.



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

$$N = P^k \dots \dots \dots (2.4)$$

Où N: nombre d'essais

P: nombre de niveau de variations des facteurs de base .

K: nombre de facteurs de base.

Pour déterminer le critère d'usure nous avons variés la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et l'avance ( $f$ ) à deux niveaux c'est à dire nous avons 2 facteurs de base  $k = 2$  et chaque facteurs à deux. Niveaux de variation niveau supérieur (+1) et un niveau inférieur (-1) : donc ( $N = 2^2 = 4$  essais). La série d'essais d'usure se fait selon le plan d'expériences suivant :

| Essais | Facteurs                  |            |                           |            | Paramètres |
|--------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|------------|
|        | Valeurs naturelles        |            | Valeurs codifiées         |            |            |
|        | Vitesse de coupe<br>$V_c$ | Avance $f$ | Vitesse de coupe<br>$V_c$ | Avance $f$ |            |
| 1      | $V_{c \min}$              | $f_{\min}$ | -1                        | 1          | $T_1$      |
| 2      | $V_{c \max}$              | $f_{\min}$ | 1                         | 1          | $T_2$      |
| 3      | $V_{c \min}$              | $f_{\max}$ | -1                        | -1         | $T_3$      |
| 4      | $V_{c \max}$              | $f_{\max}$ | 1                         | -1         | $T_4$      |

Tableau II-2: Plan d'expériences des essais de l'usure sur des éprouvettes en aciers trempés avec les matériaux de coupe CC650 pour un plan  $2^2$ .

Une autre série de 27 expériences a été réalisé dans le but de déterminer des modèles de prédiction de la rugosité, de l'effort de coupe et des vibrations en fonction des paramètres du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ). Chaque paramètre d'entrée a été varié en trois niveaux. Le résultat est un plan de 27 expériences indiqué au (tableau II-3).

| N°des essais | Vc(m/mn)       | Valeurs naturelles des facteurs |  | a <sub>p</sub> (mm) |
|--------------|----------------|---------------------------------|--|---------------------|
|              |                | f(min/tr)                       |  |                     |
|              | X <sub>1</sub> | Valeurs codifiées des facteurs  |  | X <sub>3</sub>      |
|              |                | X <sub>2</sub>                  |  |                     |
| 1            | -1             | -1                              |  | -1                  |
| 2            | -1             | -1                              |  | 0                   |
| 3            | -1             | -1                              |  | +1                  |
| 4            | -1             | 0                               |  | -1                  |
| 5            | -1             | 0                               |  | 0                   |
| 6            | -1             | 0                               |  | +1                  |
| 7            | -1             | +1                              |  | -1                  |
| 8            | -1             | +1                              |  | 0                   |
| 9            | -1             | +1                              |  | +1                  |
| 10           | 0              | -1                              |  | -1                  |
| 11           | 0              | -1                              |  | 0                   |
| 12           | 0              | -1                              |  | +1                  |
| 13           | 0              | 0                               |  | -1                  |
| 14           | 0              | 0                               |  | 0                   |
| 15           | 0              | 0                               |  | +1                  |
| 16           | 0              | +1                              |  | -1                  |
| 17           | 0              | +1                              |  | 0                   |
| 18           | 0              | +1                              |  | +1                  |
| 19           | +1             | -1                              |  | -1                  |
| 20           | +1             | -1                              |  | 0                   |
| 21           | +1             | -1                              |  | +1                  |
| 22           | +1             | 0                               |  | -1                  |
| 23           | +1             | 0                               |  | 0                   |
| 24           | +1             | 0                               |  | +1                  |
| 25           | +1             | +1                              |  | -1                  |
| 26           | +1             | +1                              |  | 0                   |
| 27           | +1             | +1                              |  | +1                  |

Tableau II-3: Plan d'expériences des essais de la rugosité, efforts de coupe, vibration sur des éprouvettes en acier trempés avec un matériaux de coupe CC650 pour un plan 3<sup>3</sup>.

## II-4 Equipements et moyens utilisés

**II-4-1 Machine outil utilisé:** Tour conventionnel de la société chèque modèle SN40 figureII.1 dont les caractéristiques suivantes

-Puissance du moteur électrique: 6.6 kW

-Nombres de tours par minute: 45 à 2000tr/min.

-Vitesse d'avance en millimètres par tour: 0.08 à 6.4mm



Figure II-1: tour parallèle modèle SN40

#### II-4-2 Matière usinée

Le matériau à usiner est un acier faiblement allié de nuance:

AFNOR : 42CD4

DIN : 42CrMo4

Il présente une bonne résistance, une bonne trempabilité, une résistance notable à l'usure et aux efforts mécaniques (pièce de transmission), telles que bielles, engrenages, arbres, etc....

Il est également recommandé pour des emplois à chaud jusqu'à des températures de 525°C en particulier pour la boulonnerie (centrales thermiques, raffineries de pétroles). La composition chimique de l'acier 42CrMo4 est représentée ci-dessous

|                        |   |                        |
|------------------------|---|------------------------|
| Carbone (C): 0.42%     | - | Manganèse (Mn): 0.68%  |
| Silicium (Si): 0.25%   | - | phosphore (p): 0.013 % |
| Soufre (S): 0.018 %    | - | Cuivre (Cu): 0.022 %   |
| Nickel (Ni): 0.021%    | - | Chrome (Cr): 1.08 %    |
| Molybdène (Mo): 0.209% | - | Vanadium (V): 0.004 %  |
| Fer (Fe): 96.95%       |   |                        |

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

Propriétés mécaniques du matériau:

Limite élastique: 57- 90 Kp/mm<sup>2</sup>

Résistance à la traction: 95- 130 Kp/mm<sup>2</sup>

Allongement: 13-10

Résilience: 6 Kp/cm<sup>2</sup>).

Pour nos essais nous avons usinés des éprouvettes dont le diamètre ( $\varnothing = 70\text{mm}$ ; longueur L= 370mm) (figure II-2).



Figure II-2: Eprouvettes destinées pour la réalisation des essais d'usure pour un plan  $2^2$ .



Figure II-3: Eprouvettes destinées pour la réalisation des essais pour un plan  $3^3$

Les conditions de traitement thermique des éprouvettes de l'acier 42CrMo4

-Température d'échauffement 850°.

-Temps de maintien 40min.

-Dureté obtenue 54HRC.

#### II-4-3 Portes plaquettes utilisées



Figure II-4: Portes outils de coupe utilisées

Le rôle du porte outil est important à plusieurs titres (figure II-4) :

- Il permet de maintenir l'outil (ici 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.

### II-4-3 Description des plaquettes

Les plaquettes (figure II.5) choisies pour cette étude de marque **sandvik**

(Référence: SNGN 12-04-08) comportant 8 arêtes de coupe par plaquette. Leurs caractéristiques sont répertoriées dans le tableau noté ci-après.

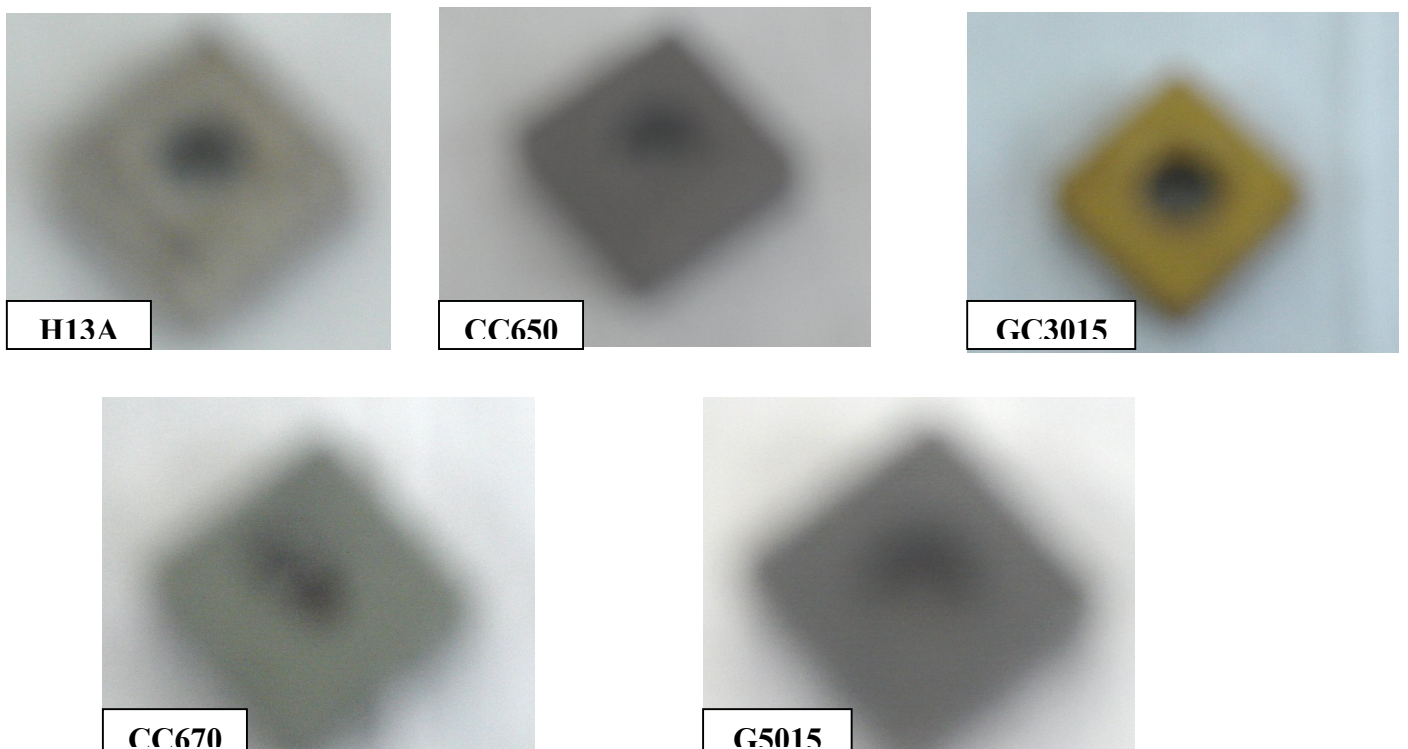


Figure II-5 : plaquettes sandvik SNGN 12-04-08 utilisées

### II-4-4 Désignation des plaquettes de coupes testées

| Matériau de coupe | Désignation | Géométrie | Marque | Composition |
|-------------------|-------------|-----------|--------|-------------|
|-------------------|-------------|-----------|--------|-------------|



|                     |                 |                  |         |   |
|---------------------|-----------------|------------------|---------|---|
| Céramique noire     | CC650           | SNGN<br>12.04.08 | Sandvik | AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Tic        |
| Céramique composite | CC670           | -                | -       | AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Sic        |
| Carbure revêtu      | GC3015<br>(K10) | SNGN<br>12.04.08 | Sandvik | TiN +AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Ti(CN) |
| Carbure non revêtu  | H13A (M20)      | -                | -       | Sans revêtement                             |
| Cermet              | G5015           | SNGN<br>12.04.08 | Sandvik | Sans revêtement                             |

Tableau II-2 : Désignation des plaquettes de coupes testées

### Descriptif des plaquettes SNGN 12-04-08

S : indique la forme de la plaquette (ici carré)

N: valeur de l'angle de dépouille

G: tolérances dimensionnelles

N: type de fixation de la plaquette sur le corps d'outil

12: indication de la longueur d'arête de coupe

04: indication de l'épaisseur de la plaquette

08: Rayon du bec de l'outil ici égal à 0.8mm.

Les critères de performance de la plaquettes et les considérations d'ordre économique sont prise en compte par rapport aux caractéristiques mécanique du matériau à usiner (Nuance, état de surface désiré, dureté etc. ....).

### II-4-5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne dynamomètre (**KISTLER**), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on site: la plateforme; l'amplification des signaux; le PC avec le logiciel. Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo - électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle- même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteur en quartz (figureII.6) les forces agissantes sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplification des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du

Le tourage est directement exprimée en trois composantes: [force axiale ( $F_x$ ), force radiale ( $F_y$ ), force tangentielle ( $F_z$ )].

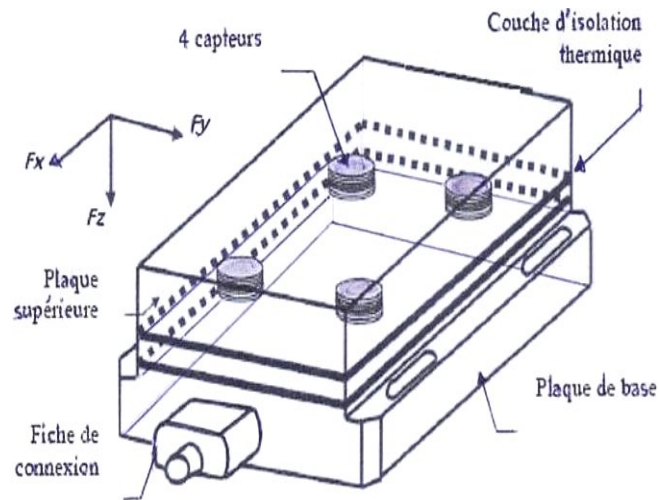


Figure II-6: capteur d'effort de coupe KISTLER

#### Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à 3 composantes (9257B): le porte outil type 9403 visible est employé pour des outils de tournage avec une section maximum de 26\*26. (Grande rigide, fréquence propre très élevées, large gamme de mesure, bonne linéarité sans hystérésis, faible interaction (<1%), utilisation simple, résistant au lubrifiant selon mode de protection IP67, câble spécial à haute résolution de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8 mm de diamètre), Amplificateur multicanaux, destiné à la mesure des efforts de coupe, Ordinateur personnel (PC).



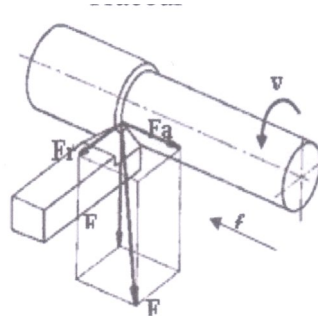


Figure II-7: dynamomètre utilisé pour la mesure des efforts de coupe

#### II-4-6 microscope pour la mesure de l'usure en dépouille VB

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) est du type **HUND (W.AD)**. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif de microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0.001mm. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure VB. Après chaque séquence de travail la plaquette de coupe est démontée du porte- outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (figureII.8), (figureII.9)



Figure II-8: microscope pour la mesure de l'usure frontale

Figure II-9: microscope d'acquisition d'image de l'usure

#### **II-4-7 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité**

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ) nous avons utilisé un **rugosimètre** surf test 301 (**Mitutoyo**) (figure II-10), ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), se déplaçant linéairement sur la surface mesurée afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce. Les caractéristiques du rugosimètre sont les suivantes:

Résolution :  $0,1\mu\text{m}$

Filtre utilisé : 0.8

Avance utilisée : 0.5

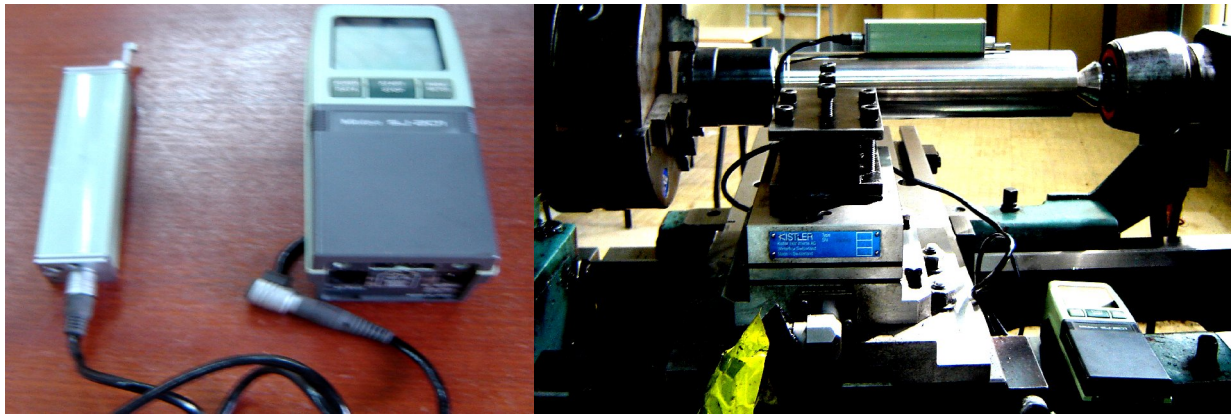


Figure II-10: Mesure de la rugosité avec le rugosimètre portable mitutoyo

Le rugosimètre était étalonné avant chaque campagne d'essais sur un étalon de caractéristiques:  $R_a$  égale à  $3,2\mu\text{m}$ .

#### II-4-8 Analyseur de vibration de l'outil

L'analyseur de vibration **BK (2035)** (figure II-11), c'est un appareillage bi canal contient deux accéléromètre (ch. A, ch. B) jouant le rôle d'intermédiaire de liaisons entre l'analyseur et l'outil de coupe et qui servent de mesurer les vibrations dans n'importe quel direction (axiales, tangentielles, radiales).



Figure II-11: Analyseur de vibration

#### II-5 Procédure expérimentale

Des essais sont effectués en chariotage sur un tour parallèle (figure II-1) extrêmement rigide dont la puissance sur la broche égale à  $6,6\text{kW}$ , et sur des éprouvettes cylindriques en acier trempé **42CrMo4** (diamètre  $70\text{mm}$ , longueur  $370\text{mm}$ ). Les éprouvettes initialement avec une dureté de **29HRC**, ont été traitées thermiquement jusqu'à **54HRC**. L'objectif recherché est de déterminer l'influence des trois paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe  $V_c$ ,

l'avance  $f$ , profondeur de passe  $a_p$ ) sur le comportement de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ), l'usure et avec l'acquisition des efforts de coupe. Le seul matériau testé la céramique mixte « CC650» avec différentes rayon du bec  $r = (0.8; 1.2; 1.6)$  mm et angle de direction  $K_r [45^\circ, 75^\circ]$ .

La quasi-totalité des essais ont été réalisés selon la méthode uni factorielle c'est-à-dire en variant un facteur et en gardant les autres constants).

Le suivi du comportement de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ) face aux variation des éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) ont été réalisé au moyen d'un (rugosimètre) qui est constitué d'une pointe en diamant (palpeur) à fin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce. Le suivi du comportement des trois composantes des efforts de coupe par l'intermédiaire d'un dynamomètre (KISTLER) qui compte parmi les équipements les plus fiables. Et le suivi de l'usure en dépouille (VB) au moyen d'un microscope de type HUND (W-AD) avec une précision de 0.001mm, les essais ont été menés conformément à la méthode multifactoriel. L'objectif recherché est de déterminer l'influence des différentes paramètres des régimes de coupe sur la durée de vie du matériau à outil testé **CC650** Comme l'usure en dépouille modifié la rhéologie de contact outil pièce et comme elle est relativement facile à contrôler par des moyens usuels, elle sera suivi en priorité nous devons rajouter à ce critères la rupture d'arête générée par une usure en cratère où par un phénomène de déformation plastique, ces effets sont souvent difficiles à suivre par des moyens de mesure conventionnels, mais la rupture d'arête quand elle se produit elle constitue un vrai critère d'usure excessive et donc l'arrêt de l'essai.

Pour des usinages courant en mécanique générale où en outillage les limites acceptables pour les deux critères d'usure selon la norme **ISO** sont les suivants:

- Une largeur moyenne de la bande d'usure frontale de 0.3mm si elle est régulière où une largeur maximale  $VB_{max} = 0.5mm$  si elle est irrégulière (voir figure I-20).
- Une profondeur maximale du cratère  $KT = 0.15mm$ .

Des essais de performances ont été réalisés dans les mêmes conditions d'usinage par l'intermédiaire de cinq nuances de plaquettes différentes (céramique noire "**CC650**" céramique composite "**CC670**" carbure revêtus "**GC3015**", carbure non revêtu "**H13A**", Cermet "**G5015**"). Cependant l'objectif général que nous poursuivons à travers ces essais est la détermination du critère d'état de surface primordial dans les conditions d'usinage de finition. Les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ) et les trois composante de l'effort de coupe sont enregistrées en fonction du temps de coupe à la fin de la passe, la plaquette est démontée est observée au microscope, la valeur de l'usure en dépouille VB est mesurée.

La surveillance de la vibration pendant la coupe aux moyens de deux accéléromètres qui sont montés sur le support de l'outil, le premier accéléromètre mesure la vibration dans la direction de la force de coupe principale et le second dans la direction de la force de coupe radiale. Les accéléromètres sont reliés à un analyseur de vibration (**BK2035**).

- pour la méthode uni factorielle: les éléments du régime de coupe lors de l'usinage avec la céramique noire avec différentes rayon du bec et angle de direction principale :

( $V_c = 45-60-90-125-250-350\text{m/min}$  ;  $f = 0.08-0.11-0.14-0.16-0.18-0.20-0.24\text{ mm/tr}$  et  $a_p = 0.05-0.1-0.15-0.2-0.3-0.4-0.5-0.6\text{ mm}$ ).

- Pour la méthode multifactorielle: les éléments du régime de coupe lors de l'usinage avec la céramique mixte:

. Pour un plan  $2^2$ : ( $V_c = 125-200\text{m/min}$  -  $f = 0.08-0.12\text{ mm/tr}$  -  $a_p = 0.15\text{mm}$ ).

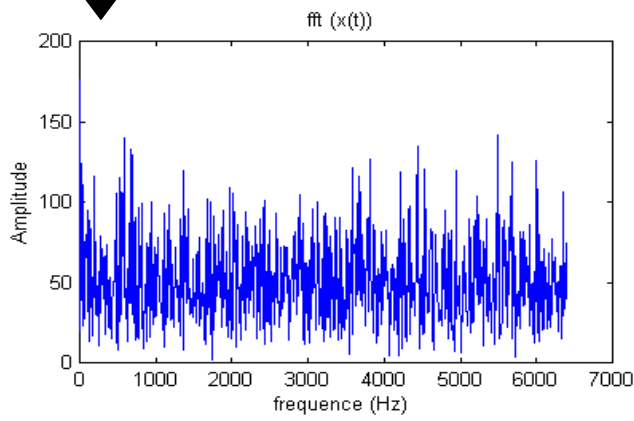
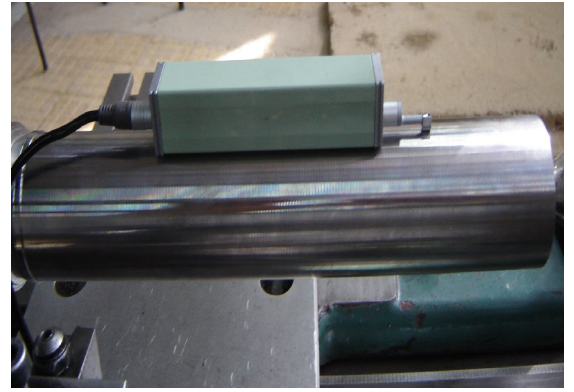
. Pour un plan  $2^3$ : ( $V_c = 90-125-200\text{ m/min}$  -  $f = 0.08-0.12-0.16\text{mm/tr}$  -  $a_p = 0.15-0.3-0.45\text{mm}$ )

## **II-6 Banc d'essais pour un plan $3^3$**

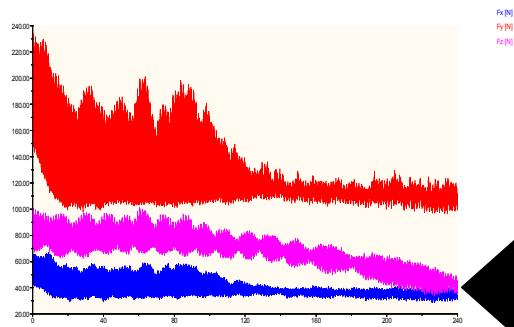
Les expériences ont été effectuées en utilisant les conditions de coupe montrées dans le (tableau II-3). Chaque essai a été terminé par l'acquisition des trois composantes de l'effort de coupe, les signaux de vibration ont été mesurés juste avant que l'usinage soit arrêté pour mesurer la rugosité de la surface.



Analyseur de vibration



Opération de tournage dur avec dynamomètre type 9257B



des efforts de coupe.



Profils des trois composantes

Ordinateur avec logiciel dynoware

Figure II-12: Banc d'essai pour un plan  $3^3$



***Chapitre III***  
***Résultats et interprétations***

### III- I Introduction

La rugosité de la surface et l'exactitude dimensionnelle joue un rôle important dans le rendement d'un composant usiné. Cependant dans le processus d'usinage réel, la qualité de la pièce (rugosité ou dimension) sont considérablement influencé par les conditions de coupe, la géométrie de l'outil, le matériau de l'outil, le processus d'usinage, la formation du copeau, le matériau de la pièce, l'usure de l'outil et la vibration pendant la coupe. Un produit de haute qualité avec la plus longue durée de vie peut être obtenu par un choix approprié des paramètres de coupe et par le contrôle et le suivi direct du processus de coupe. Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de l'étude de (08) huit paramètres de coupe affectant la rugosité de surface usinée ainsi que les efforts de coupe.

### III-2 Résultats de l'influence du régime de coupe sur la rugosité des surfaces usinées

Pour voir l'influence du régime de coupe sur la rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ), Nous avons réalisés des essais avec un outil en céramique mixte (CC650). La figure (III-1 à III-3), montre l'évolution de la rugosité en fonction du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), avec un angle de direction principale  $K_r=75^\circ$  et sans lubrification.

#### III-2-1 Influence de la vitesse de coupe $V_c$

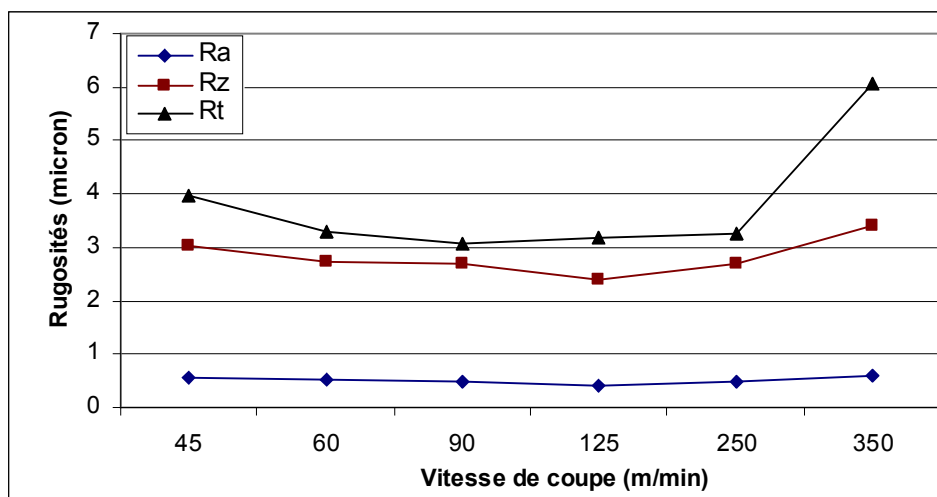


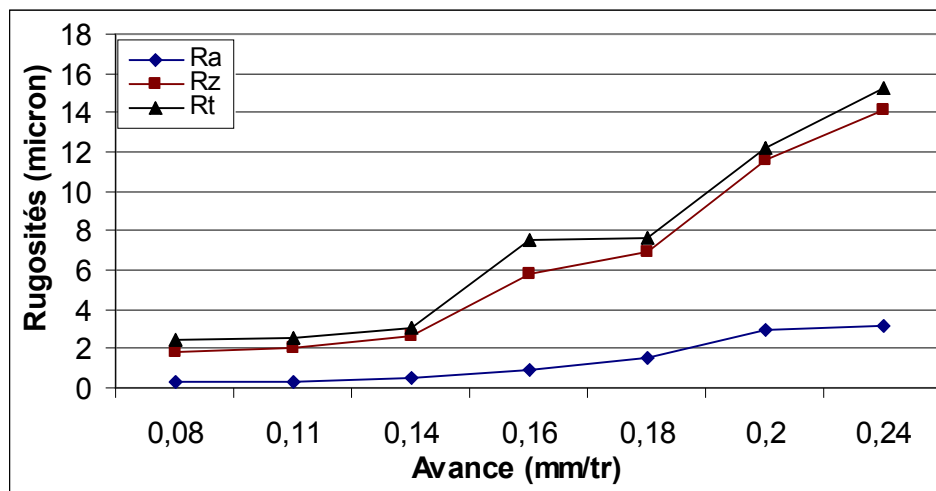
Figure III-1: Evolution des critères  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$  de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe  $V_c$ ,  $r=0.8\text{mm}$ ,  $K_r=75^\circ$ .

[Régime de coupe:  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

L'état de surface s'améliore légèrement (figure III-1), avec la diminution de la vitesse de coupe, pour des vitesses allant de (45 à 60 m/min), les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ , et  $R_t$ ) chutent successivement de (5.45%, 9.53%, 17,17%). la 2<sup>ème</sup> zone de (60 à 250m/min), les

critères de la rugosité se stabilise légèrement à cause de la diminution des efforts de coupe traduisant une stabilité relative du système usinant. La 3<sup>ème</sup> zone de (250 à 350m/min) les courbes relatives à la rugosité prennent des allures ascendantes, les critères (Ra, Rz, Rt) de la rugosité accroît successivement de (20.40%, 25.83%, 85.62%).

## II-2-2 Influence de l'avance par tour

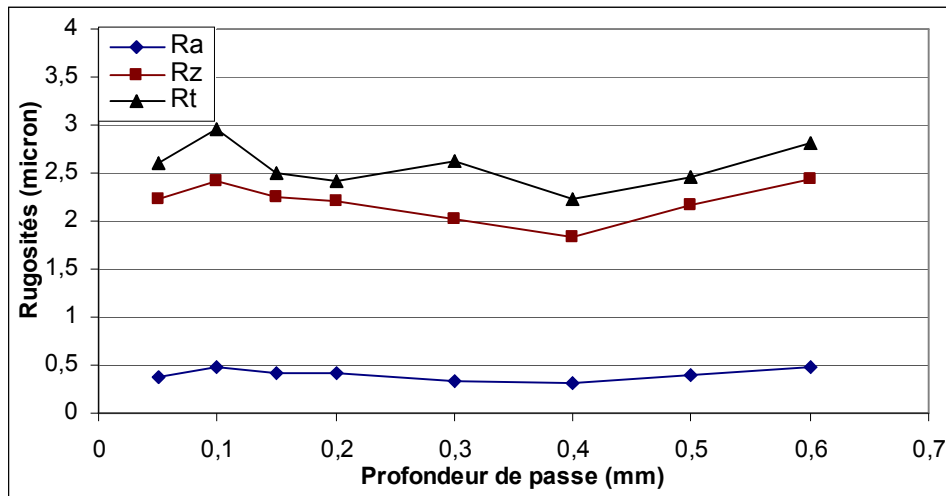


FigureIII-2: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de l'avance  $f$ ,  $r=0.8\text{mm}$ ,  $Kr=75^\circ$ .

[Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

Nous constatons à travers les résultats obtenus et représentés sur la (figure III-2) que l'effet de l'avance sur la rugosité montre qu'avec l'augmentation de ce paramètre l'état de surface se dégrade d'une manière très significative, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil - pièce. Ces sillons sont d'autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée, d'où la nécessité d'employer de faibles avances lors du tournage de finition. On peut remarquer que l'avance est l'un des paramètres de coupe dont l'effet est plus sensible sur l'état de la surface usinée, elle contribue largement à l'évolution de la rugosité. L'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.24mm/tr fait accroître les critères de rugosité respectivement de (551.02%, 322.98%, 305.31%).

### III-2-3 Influence de la profondeur de passe



FigureIII-3: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de la profondeur de passe  $a_p$ ,  $r=0.8\text{mm}$ ,  $K_r=75^\circ$ .  
[Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ].

On peut constater sur l'illustration de la (figure III-3) que la profondeur de passe  $a_p$  ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité des surfaces usinées par rapport à celui de l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce. Celle-ci améliore les conditions d'évacuations de la chaleur de la zone de coupe et par conséquent elle freine le processus du mécanisme d'usure. Pour une profondeur de passe minimale de 0.05 mm les critères de rugosité Ra, Rz, et Rt sont respectivement de (0.37, 2.22, 2.60)  $\mu\text{m}$ . Pour une valeur maximale de la profondeur de passe égale à 0.6mm les critères de rugosité Ra, Rz, et Rt sont respectivement de (0.48, 2.44, 2.81)  $\mu\text{m}$ . Ce constat nous permet, de dire si on veut augmenter le débit du copeau, il est recommandé d'augmenter la profondeur de passe au lieu de l'avance.

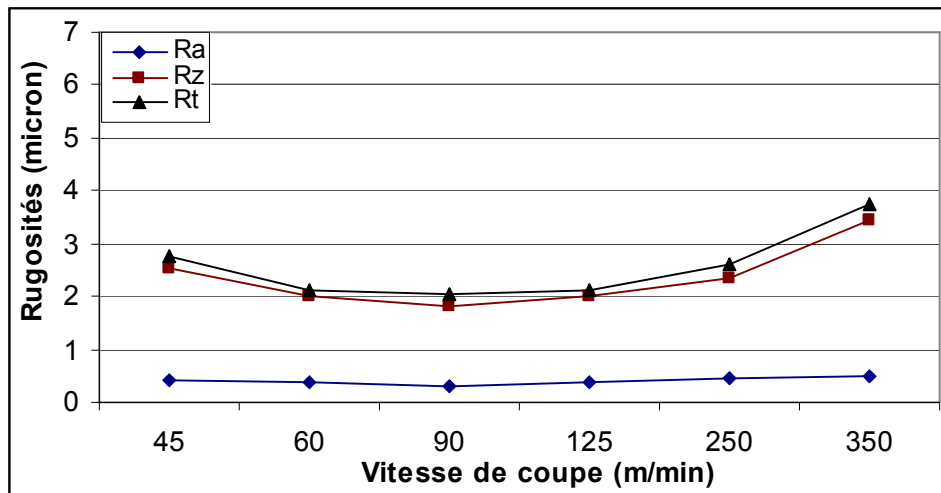
### III-3 Résultats de l'influence de la géométrie de l'outil sur la rugosité des surfaces usinées.

#### III-3-1 Influence de l'angle de direction principale

Pour voir l'influence de l'angle de direction principale sur la rugosité lors du tournage de l'acier 42CrMo4 trempé, nous avons réalisés une série d'expérience avec un outil en céramique mixte (CC650) dont l'angle de direction principale  $K_r=45^\circ$ ,  $r = 0.8\text{mm}$ . [Les

résultats réalisés avec un angle  $K_r = 75^\circ$  sont déjà mentionnés au point III-2]. La figure (III-4 à III-6), montre l'évolution de la rugosité en fonction du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ).

### A) Influence de la vitesse de coupe $V_c$

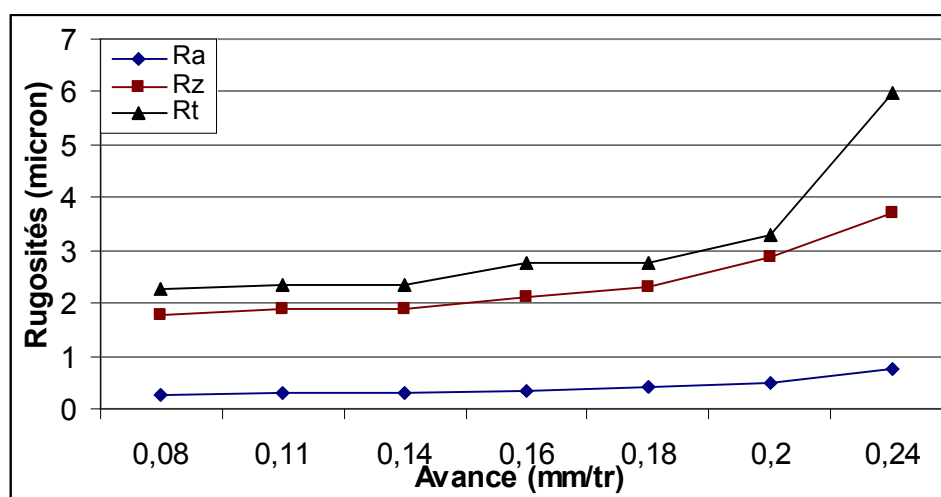


FigureIII-4: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe,  $r=0.8\text{mm}$ ,  $K_r=45^\circ$ .

[Régime de coupe:  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

Pour des vitesses allant de 45 à 60m/min les critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) chute successivement de (9.75%, 20.23%, et 23.18%). de 60 à 250m/min, les critères d'état de surface se stabilise. de 250 à 350m/min, les critères Ra, Rz, Rt de la rugosité augmentent successivement de (4.25%, 42.74%, 48.06%).

### B) Influence de l'avance par tour

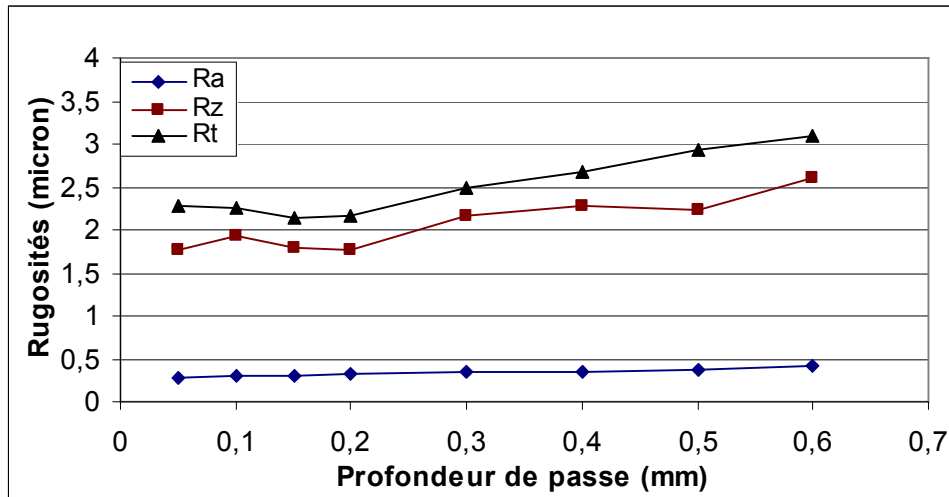


FigureIII-5: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de l'avance ( $f$ ),  $r=0.8\text{mm}$ ,  $K_r=45^\circ$ .

[Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

Pour des vitesses allant de (0.08 à 0.24mm/tr), on enregistre une augmentation des critères (Ra, Rz, Rt) successivement de (164.28%, 118.84 %, 109.03%).

### C) Influence de la profondeur de passe

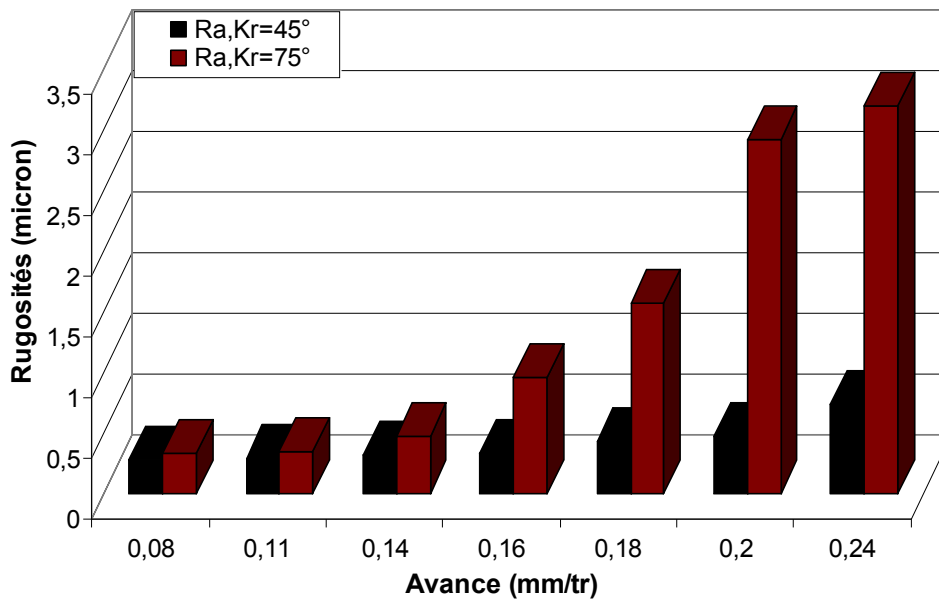


FigureIII-6: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de la profondeur de passe,  $r=0.8\text{mm}$ ,  $K_r=45^\circ$ .

[Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ].

Pour une profondeur de passe minimale de 0.05, les critères de rugosité Ra, Rz, et Rt sont respectivement de (0.43, 1.58, 2.10)  $\mu\text{m}$ . Pour une profondeur de passe maximale de 0.6mm, les critères de rugosité Ra, Rz, et Rt sont respectivement de (0.90, 2.52, 3.10)  $\mu\text{m}$ . On remarque que les courbes évoluées de la même manière que celles avec l'angle  $K_r=75^\circ$ , mais avec une certaine différence avec les rugosités obtenues.

La figure III-7 montre la différence remarquable de la rugosité Ra en fonction de l'avance pour différents angles de direction.



FigureIII-7: Evolution de la rugosité arithmétique (Ra) de l'acier 42CrMo4 en fonction de l'avance,  $r=0.8\text{mm}$ ,  $Kr [45^\circ, 75^\circ]$  [Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $a_p= 0.15\text{mm}$ ].

Les résultats montrent que la rugosité arithmétique (Ra) obtenue par les angles  $[45^\circ, 75^\circ]$  est influencée par les grandes avances:

Pour les avances de (0.08 à 0.14mm/tr) la rugosité obtenue augmente de 38.23% pour  $Kr = 75^\circ$ , alors que pour  $Kr = 45^\circ$ , elle est de 14.28 %.

Pour les avances de (0.16 à 0.24mm/tr) la rugosité obtenue augmente de 232.29% pour  $Kr = 75^\circ$ , alors que pour  $Kr = 45^\circ$ , elle est de 117.64 %.

L'explication physique de cette différence est représentée par la (figureIII-8)

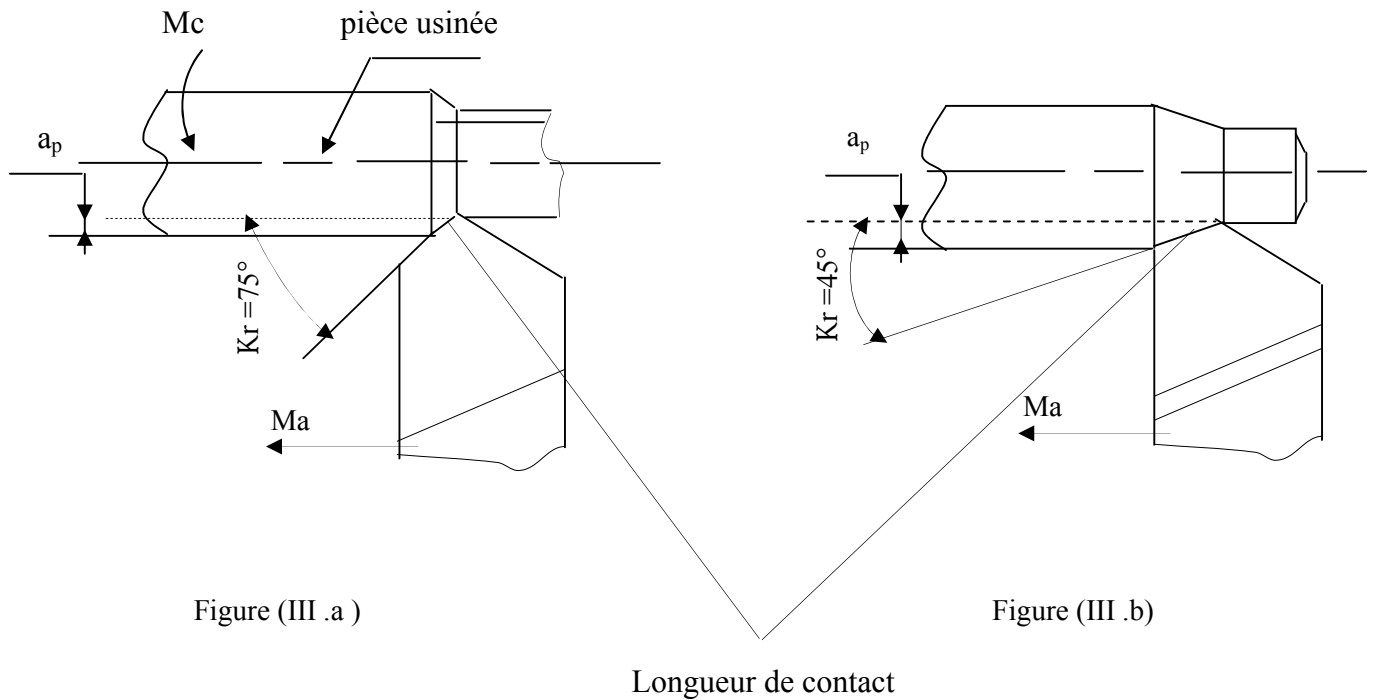


Figure III-8: Influence de l'angle de direction principale sur l'état de surface

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 figure III. (a), l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce figure III. (b), réduisent la pression d'usinage dans la matière, on peut dès lors envisager que cela modifie 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. La remarque principale qu'on peut déduire, est que les états de surfaces générés par l'angle de direction principale (45°) sont bien meilleurs que ceux générés par l'angle de direction (75°).



### III-3-2 influence du rayon du bec de l'outil

Les outils produisent sur la pièce des sillons en forme d'hélice ayant un pas égal à l'avance par tour et d'une profondeur moyenne de rugosité  $R = h$  (hauteur des stries). Le schéma de la (figure III-9) montre le profil qu'on peut avoir avec le changement du rayon du bec.

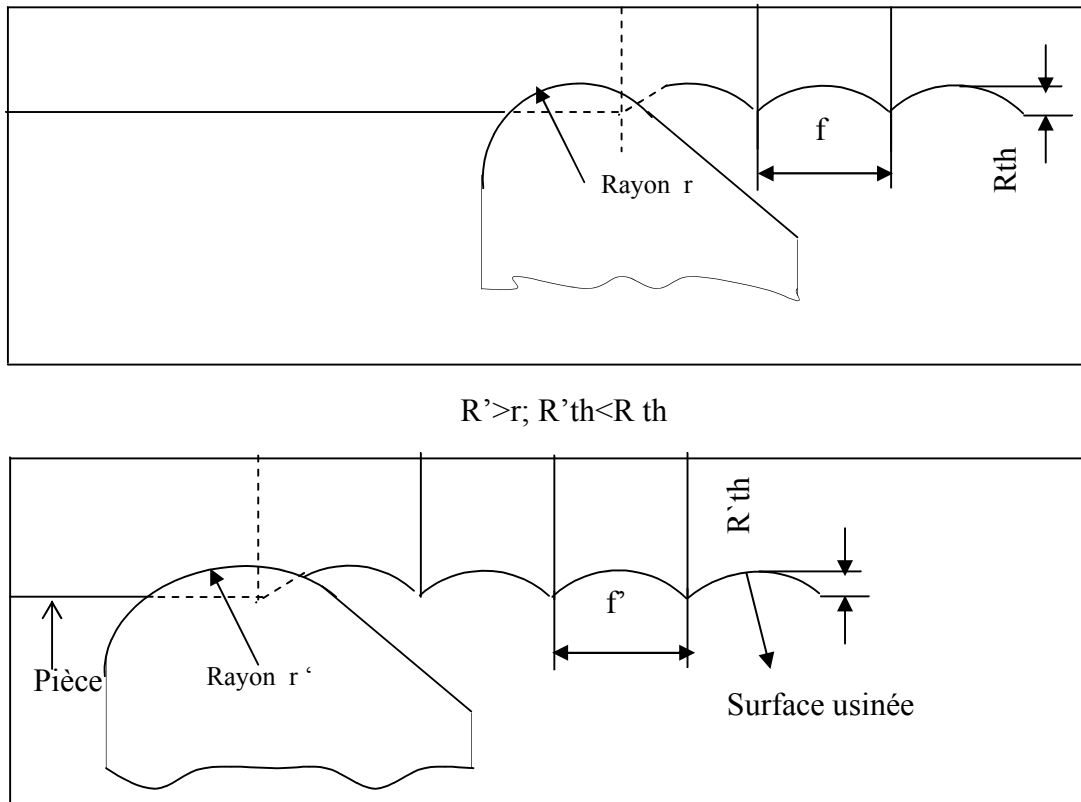
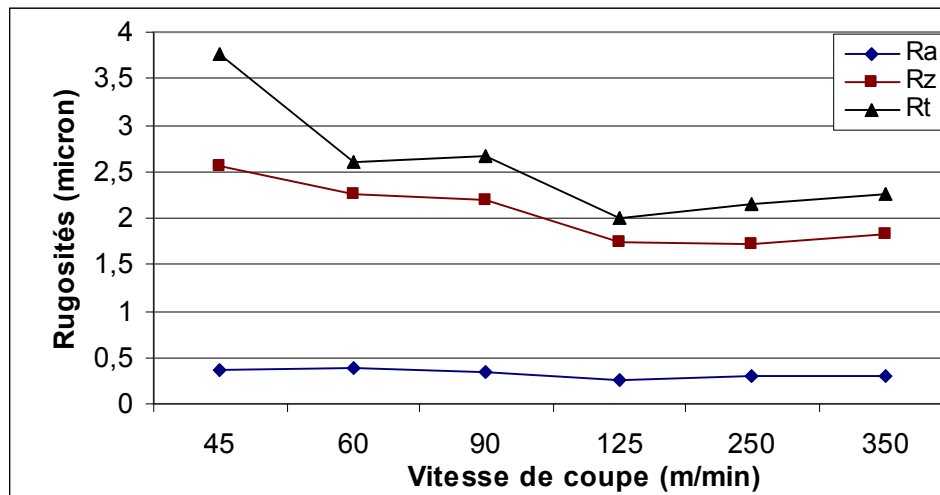


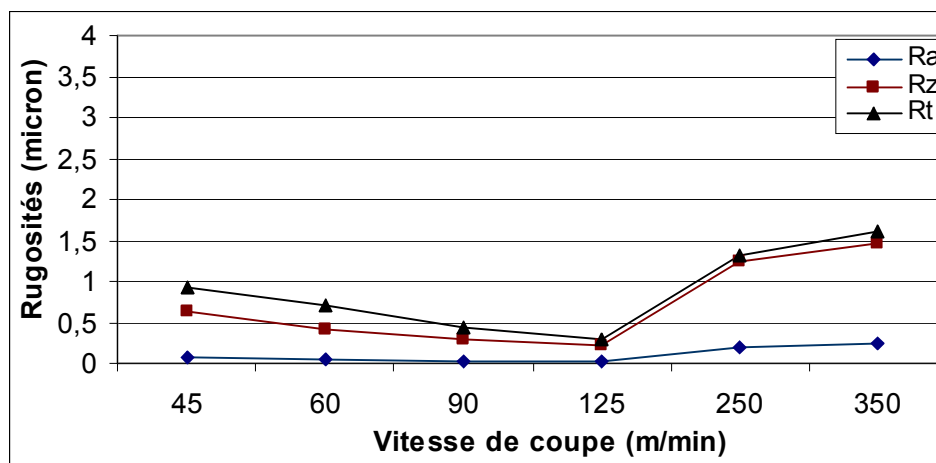
Figure III-9: influence du rayon du bec de l'outil sur l'état de surface

Pour voir l'influence du rayon du bec sur les divers critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ , et  $R_t$ ), en fonction de trois facteurs de base ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ). Nous avons réalisés une séries d'expérience sur l'acier 42CrMo4 à l'état trempé avec un outil en céramique mixte CC650 pour deux rayons du bec de l'outil  $r = (1.2, 1.6)$  mm, et dont l'angle de direction principale égale à  $75^\circ$ . Les figures (III-10 à III-15), montrent l'évolution des critères  $R_a$ ,  $R_z$ , et  $R_t$  de la rugosité en fonction de la variation des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ )

### A) Influence de la vitesse de coupe



FigureIII-10: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe,  $r=1.2\text{mm}$ ,  $K_r=75^\circ$ ,  
[Régime de coupe:  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

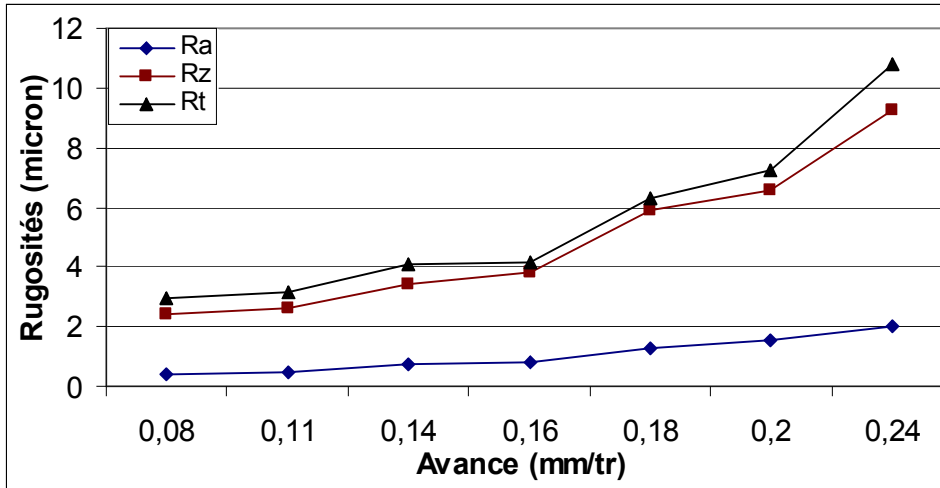


FigureIII-11: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe,  $r=1.6\text{mm}$ ,  $K_r=75^\circ$ ,  
[Régime de coupe:  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

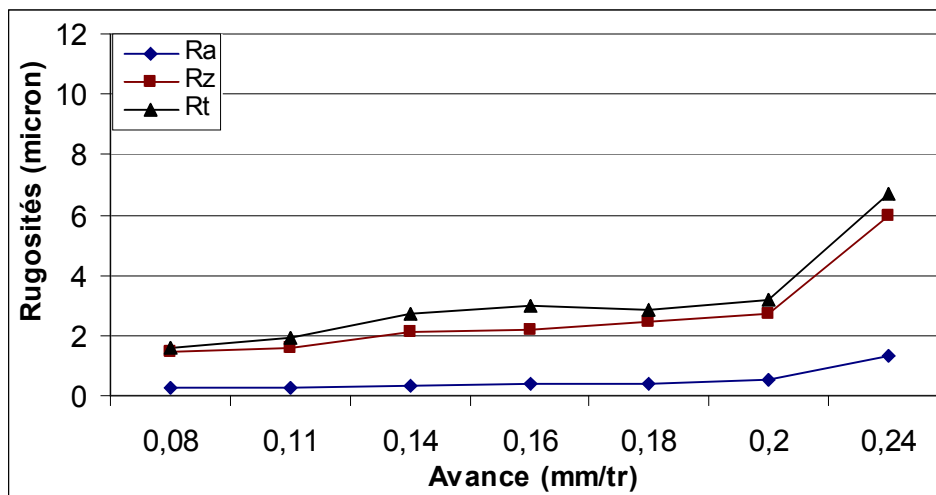
Les figures III (10 -11), montrent l'évolution des critères de rugosité Ra, Rz, et Rt en fonction de la vitesse de coupe. On constate que l'état de surface s'améliore légèrement, puis tend à se stabiliser quand la vitesse de coupe croît. Cette amélioration est due aux bonnes conditions de frottement aux interfaces pièce- outil- copeau. On constate que la rugosité arithmétique (Ra) obtenue est de  $0.08\mu\text{m}$  pour une vitesse minimale de  $45\text{m/min}$ , alors que pour la vitesse maximale de  $350\text{m/min}$ , elle est de  $0.24\mu\text{m}$ , pour  $r = 1.6\text{mm}$ . Ces résultats sont presque

comparable à celle obtenu par les chercheurs K.chou et J.Evans [60]. Par contre pour  $r = 1.2\text{mm}$ , la rugosité arithmétique (Ra) varié de 0.37 à 0.31mm.

### B) Influence de l'avance par tour



FigureIII-12: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de l'avance,  $r=1.2\text{mm}$ ,  $Kr=75^\circ$ .  
[Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

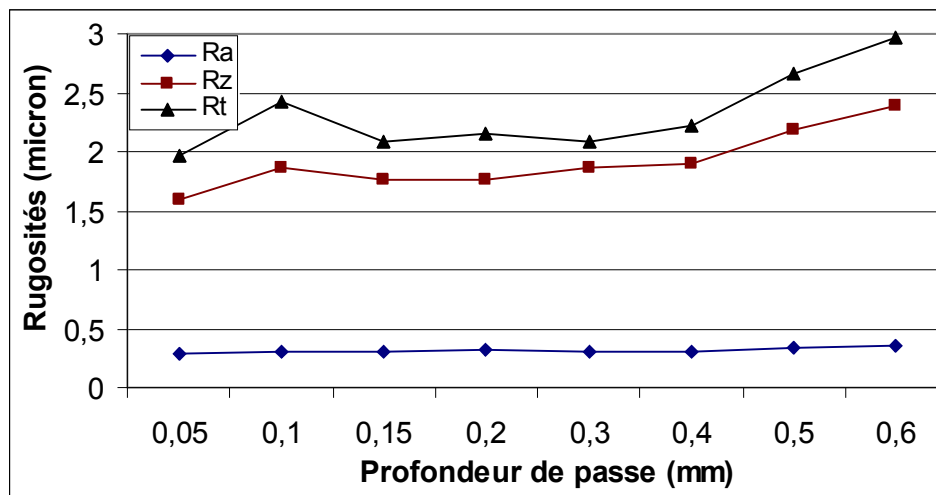


FigureIII-13: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de l'avance,  $r=1.6\text{mm}$ ,  $Kr=75^\circ$ .  
[Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

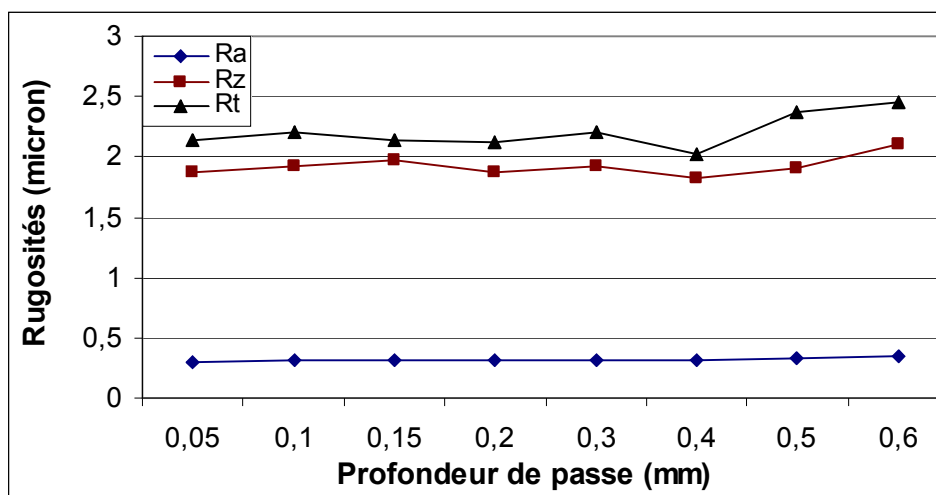
Les figures III (12 -13), montrent l'évolution des critères d'état de surface Ra, Rz, Rt, en fonction de l'avance (f). Nous voyons qu'avec l'augmentation de l'avance, la qualité de l'état de surface obtenu se dégrade d'une manière significative. L'avance est le paramètres de coupe

dont l'effet est le plus sensible sur l'état de surface usinée, on constate que l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.24mm/tr fait accroître Ra, Rz, Rt de (402,5%, 280.65%, 264.18%) pour  $r = 1.2\text{mm}$ . pour  $r = 1.6\text{mm}$  l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.24mm/tr, les critères Ra, Rz, Rt de la rugosité sont respectivement de (445.83%, 314.76%, 304.19%).

### C) Influence de la profondeur de passe



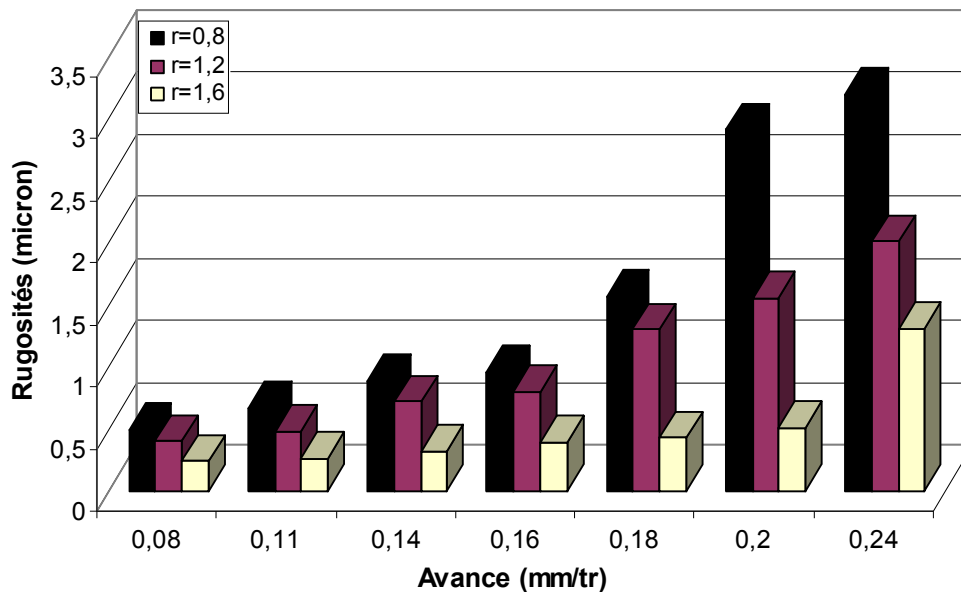
FigureIII-14: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de la profondeur de passe,  $r=1.2\text{ mm}$ ,  $Kr=75^\circ$ .  
[Régime de coupe:  $Vc=125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ]



FigureIII-15: Evolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de la profondeur de passe,  $r=1.6\text{ mm}$ ,  $Kr=75^\circ$ .  
[Régime de coupe:  $Vc=125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ]

Les figures III (14 -15), montrent l'évolution des critères Ra, Rz, Rt de la rugosité en fonction de la profondeur de passe, on peut facilement constater que la profondeur de passe  $a_p$  ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité des surfaces usinées, avec son augmentation on observe un léger accroissement des valeur des critères Ra, Rz, Rt pour les deux rayon du bec.

La figure III-16 montre l'influence entre les différents rayons du bec en fonction de l'avance sur la rugosité Ra de la surface usinée en tournage dur.



FigureIII-16: Evolution de la rugosité Ra en fonction de l'avance pour différentes rayons du bec  $r = [0.8, 1.2, 1.6]$  mm  
[Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

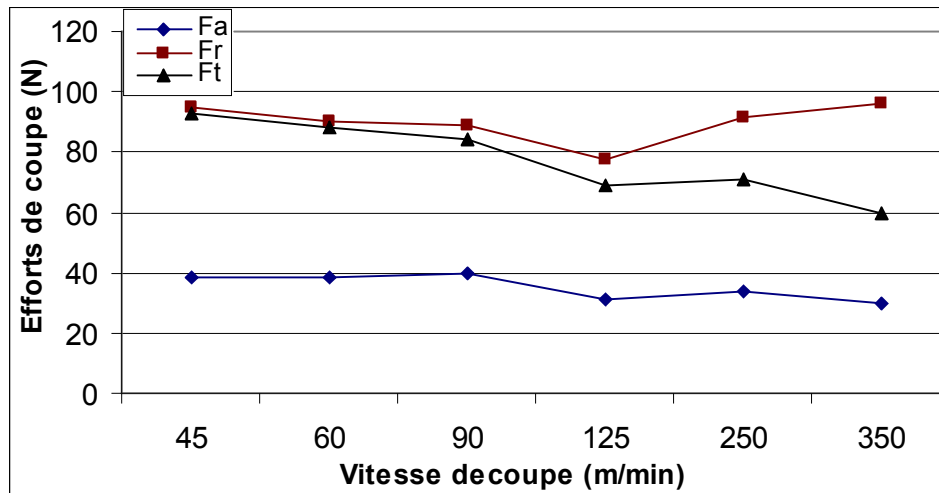
On constate également d'après la (figure III-16) que l'amélioration de la rugosité arithmétique Ra obtenu par un rayon à bec arrondi ( $r=1.6\text{mm}$ ) est plus importante par rapport à ( $r =1.2$  et  $0.8$ ) mm, ceci peut être justifié que le bec arrondi intervient dans le grand échauffement et dans 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 écrase les aspérités laissées par l'usinage, et de cette façon il contribue à diminuer la rugosité et améliorer l'état de surface.

### III-4 Résultats de l'influence de la géométrie de l'outil sur les efforts de coupe

#### III-4-1 influence de l'angle de direction principale

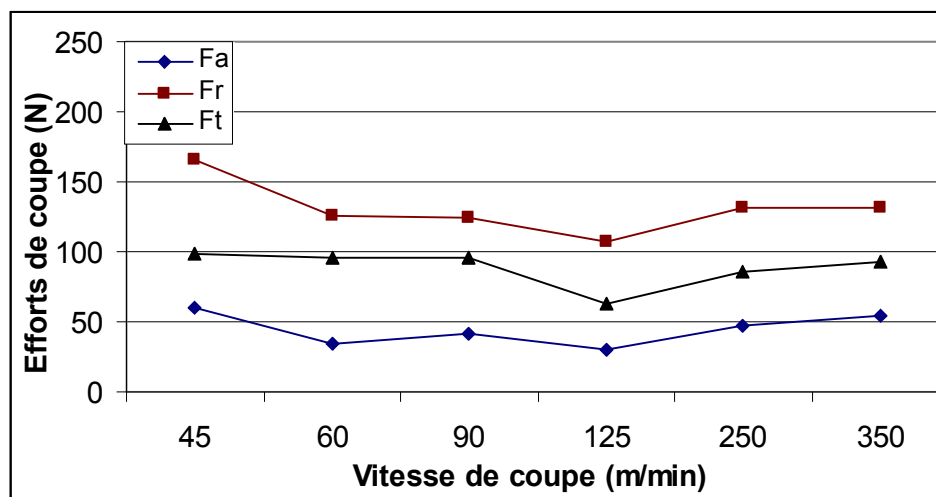
Pour voir l'influence de l'angle de direction principale sur les divers fonction d'optimisation (Fa, Fr, Ft) en fonction des trois facteurs de base ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ). Nous avons réalisés une séries d'expérience sur l'acier 42CrMo4 à l'état trempé avec un outil en céramique mixte CC650 dont le rayon du bec égale 0.8mm, et dont l'angle de direction principale  $K_r = [45^\circ, 75^\circ]$ .

#### A) En fonction de la vitesse de coupe $V_c$



FigureIII-17: Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe,  $r=0.8\text{mm}$ ,  $K_r = 75^\circ$ .

[Régime de coupe:  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].



FigureIII-18: Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe,  $r=0.8\text{mm}$ ,  $K_r = 45^\circ$ .

[Régime de coupe:  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm/tr}$ ].

Les figures III-17, III-18 mettent en évidence la faible influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe. Les efforts de coupe diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe, ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui rend le métal usiné plus plastique et par conséquent les efforts nécessaires à la coupe diminuent. En examinant l'allure des trois courbes on enregistre une décroissance très nette des trois efforts jusqu'à la vitesse [60]. Au-delà de cette limite, ils se stabilisent légèrement. Les valeurs maximales des efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ ) sont enregistrées respectivement à la  $V_c=350\text{m/min}$  sont de (53.59, 131.64, 92.25) N pour  $K_r=45^\circ$ , alors que pour  $K_r=75^\circ$ , ( $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ ) sont de (29.63, 96.05, 60).

### B) En fonction de l'avance $f$

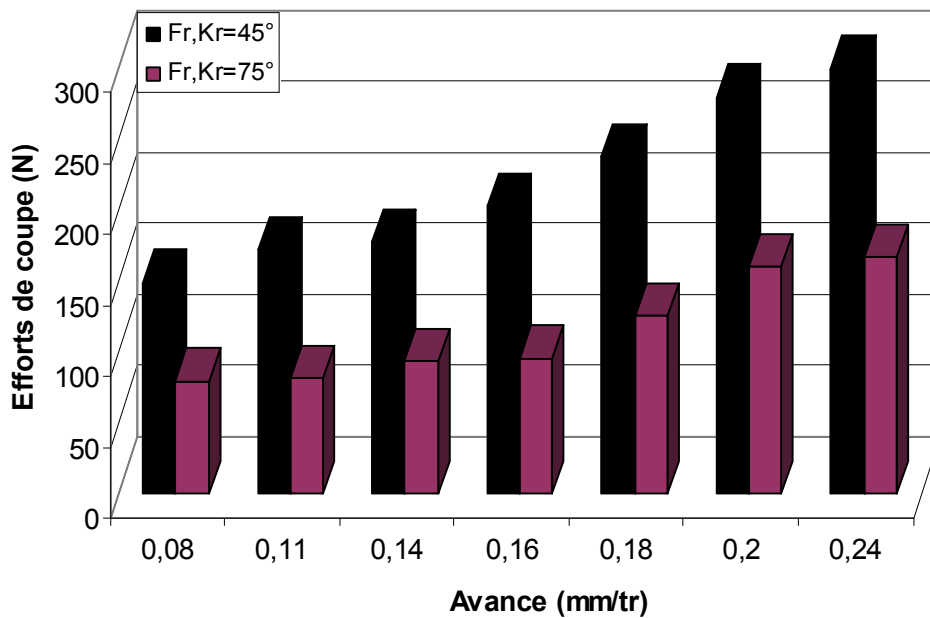


Figure III-19: Evolution de l'effort de coupe radial  $F_r$  en fonction de l'avance,  $r = 0.8\text{mm}$   $K_r = [45^\circ, 75^\circ]$ .

[Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm/tr}$ ].

Les résultats présentés sur la figure III-19, montrent l'évolution de l'effort de coupe radial en fonction de l'avance. Si l'avance augmente la section du copeau cisailé accroît, d'où le métal résiste plus à la rupture et nécessite des efforts pour l'enlèvement du copeau. L'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.24 mm/tr accroît l'effort de coupe radial de:  $K_r = 75^\circ$ ,  $F_r = 110,27\%$ ; pour  $K_r = 45^\circ$ ,  $F_r = 101,74\%$ .

### C) En fonction de la profondeur de passe $a_p$

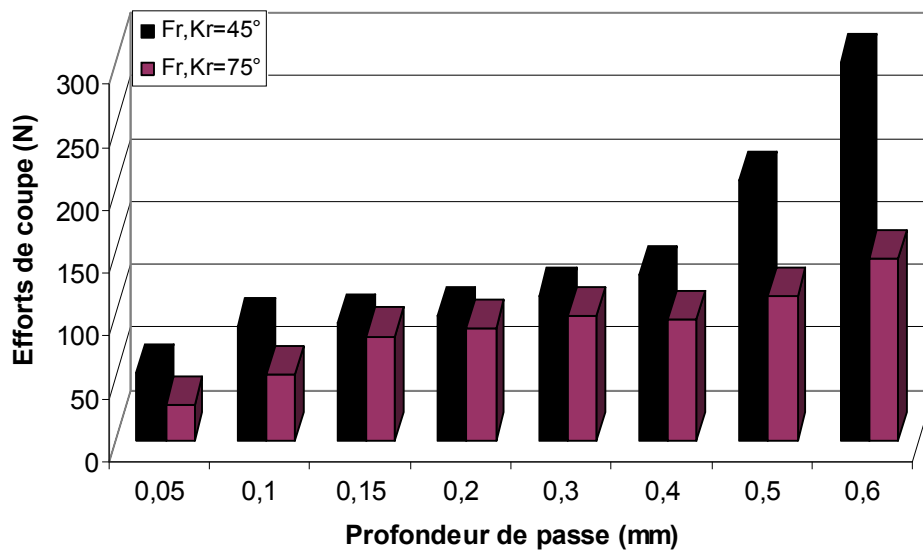


Figure III-20: Evolution de l'effort de coupe radial  $F_r$  en fonction de la profondeur de passe  $r=0.8\text{mm}$   $K_r = [45^\circ, 75^\circ]$ .  
[Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ].

Les résultats obtenus sur la (figure III-20), montre l'évolution de l'effort de coupe radial ( $F_r$ ) en fonction de la profondeur de passe pour différents angles de direction, avec l'augmentation de cette dernière on assiste à un accroissement important de  $F_r$ . La nette augmentation de  $F_r$  est logique (l'épaisseur du copeau devient importante). Pour des valeurs prises de profondeur de passe de (0.05 à 0.6)mm, l'augmentation est plus marquée pour  $K_r = 45^\circ$ ,  $F_r = 585.97\%$ , pour  $K_r = 75^\circ$ ,  $F_r = 416.20\%$ .

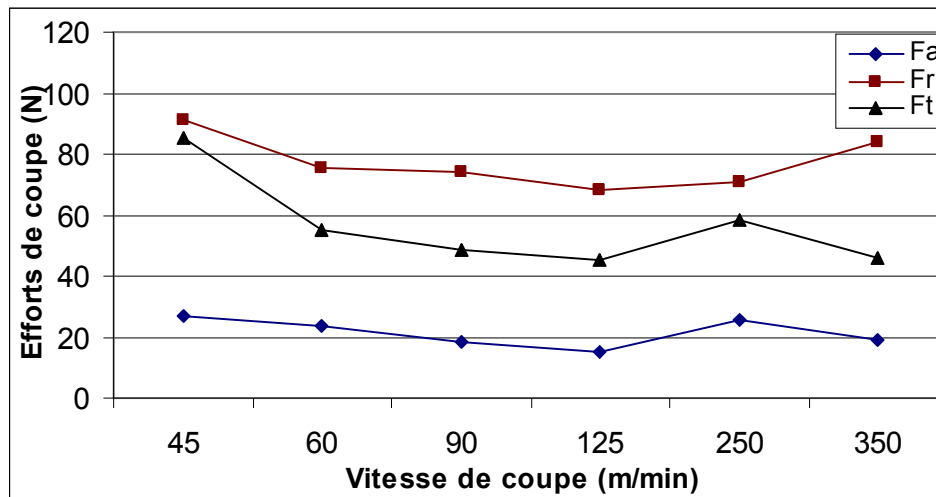
L'examen des résultats permet de conclure que: avec la diminution de l'angle de direction principal, les composantes des efforts de coupe se trouvent alors augmentés et cela pour toutes les régimes de coupe testés.

#### III-4-2 influence du rayon du bec de l'outil

Pour voir l'influence du rayon du bec sur les divers composantes de l'efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ ) en fonction de trois facteurs de base ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), nous avons réalisé une série d'essais sur l'acier 42CrMo4 à l'état trempé pour différents rayons du bec [ $r = 1.2, 1.6$ ] mm et avec un angle de direction  $K_r = 75^\circ$ .

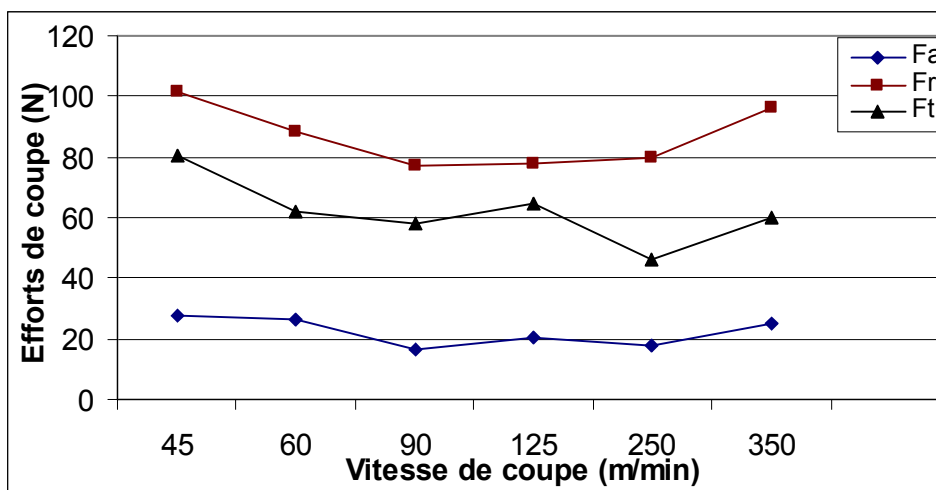


### A) En fonction de la vitesse de coupe



FigureIII-21: Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe,  $r = 1.2\text{mm}$ ,  $K_r = 75^\circ$ .

[Régime de coupe:  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm/tr}$ ].



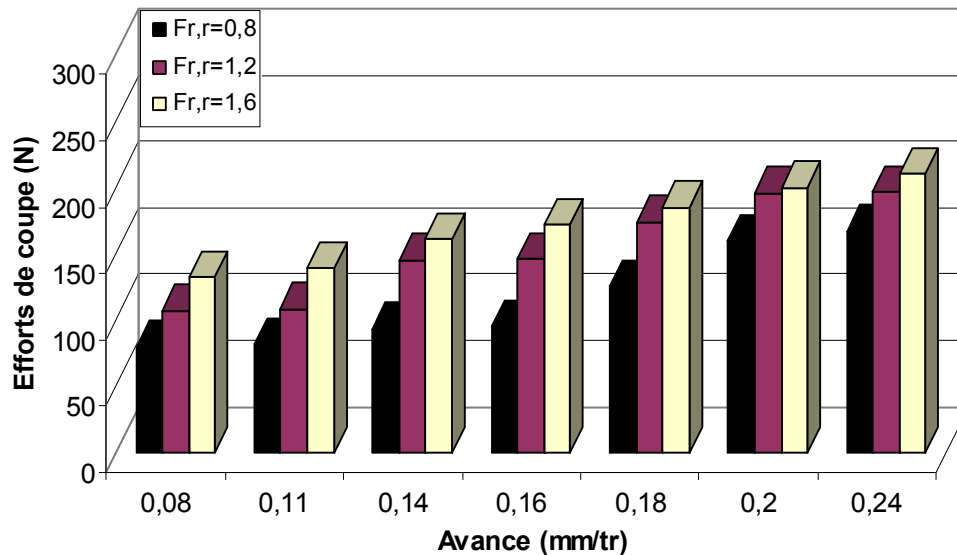
FigureIII-22: Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe,  $r = 1.6\text{mm}$ ,  $K_r = 75^\circ$ .

[Régime de coupe:  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm/tr}$ ].

Les figures (III-21, III-22) mettent en évidence la faible influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe. Les efforts de coupe diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe, ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui rend le métal usiné plus plastique et par conséquent les efforts nécessaires à la coupe diminuent. En examinant l'allure des trois courbes on enregistre une décroissance très nette des trois efforts jusqu'à la vitesse [90]. Au-delà de cette limite, ils se stabilisent légèrement. Il faut

noter que les valeurs maximales ( $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ ) sont respectivement de (27.93, 101.34, 80.14) N pour  $r = 1.6\text{mm}$ , pour  $r = 1.2\text{mm}$  ( $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ ) sont respectivement de (26.94, 91.34, 85.02) N. Ces efforts sont enregistrés à la vitesse 45m/min.

## B) en fonction de l'avance



FigureIII-23: Evolution de l'effort de coupe radial  $F_r$  en fonction de l'avance,  $r = (0.8, 1.2, 1.6)$  mm,  $K_r = 75^\circ$ .

[Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm/tr}$ ].

Les résultats présentés sur la (figure III-23), montre l'évolution de l'effort de coupe radial en fonction de l'avance. Si l'avance augmente la section du copeau cisailé accroît, d'où le métal résiste plus à la rupture et nécessite des efforts pour l'enlèvement du copeau. Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de l'avance sur l'effort de coupe radial pour les trois rayons sont comme suite: l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.24mm/tr accroît  $F_r$  de 110.27% pour  $r = 0.8\text{mm}$ , 82.92% pour  $r = 1.2\text{mm}$ , 59.35% pour  $r = 1.6\text{mm}$ . Donc on peut conclure, que les efforts de coupe augmentent avec l'augmentation du rayon du bec.

### C) En fonction de la profondeur de passe

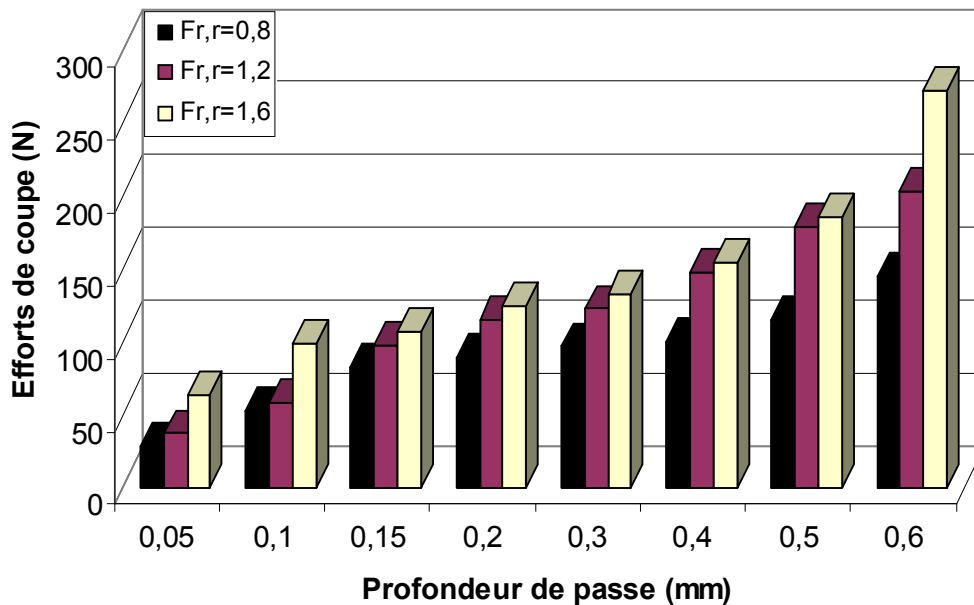


Figure III-24: Evolution de l'effort de coupe radial  $F_r$  en fonction de la profondeur de passe  $r = (0.8, 1.2, 1.6)$  mm,  $K_r = 75^\circ$ .  
[Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ].

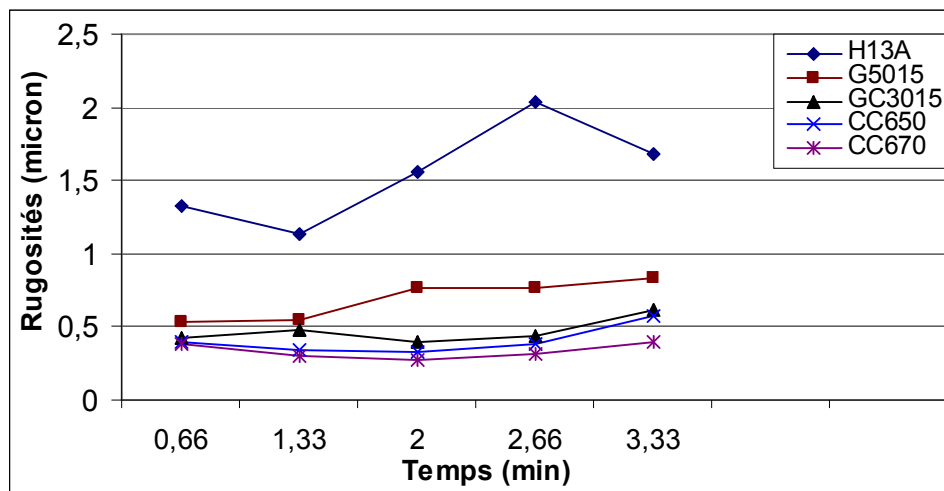
La (figure III-24), illustre l'évolution de l'effort de coupe radial ( $F_r$ ) en fonction de la profondeur de passe pour les trois rayons du bec. Avec une augmentation de cette dernière, l'épaisseur du copeau devient importante, ce qui entraîne une croissance de volume du métal déformer et cela nécessite d'énormes efforts de coupe pour tailler le copeau. Pour des valeurs prises de profondeur de passe de 0.05 à 0.6mm, on enregistre une augmentation de l'effort radial ( $F_r$ ) de 416% pour  $r = 0.8\text{mm}$ , 500% pour  $r = 1.2$ , 327% pour  $r = 1.6\text{mm}$

#### III-5 Résultat de l'influence de la nuance de l'outil sur la rugosité de la surface usinée corrélé avec l'acquisition des efforts de coupe, et l'usure en dépouille.

Pour voir l'influence de la nuance de la nuance de l'outil sur la rugosité de la surface usinée corrélé avec l'acquisition des efforts de coupe, et l'usure en dépouille lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé (54HRC), nous avons réalisés des essais avec cinq matériaux de coupe: céramique noire (CC650), céramique composite (CC670), le cermet (G5015), le carbure métallique (revêtu (G3015) et non revêtu (H13A), sous même condition d'usage:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ .

Les courbes de la (figureIII-25), montrent la différence enregistrée entre la rugosité Ra, obtenue lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec les cinq matériaux de coupe utilisés. La vitesse de coupe, l'avance, et la profondeur de passe sont maintenues constantes.

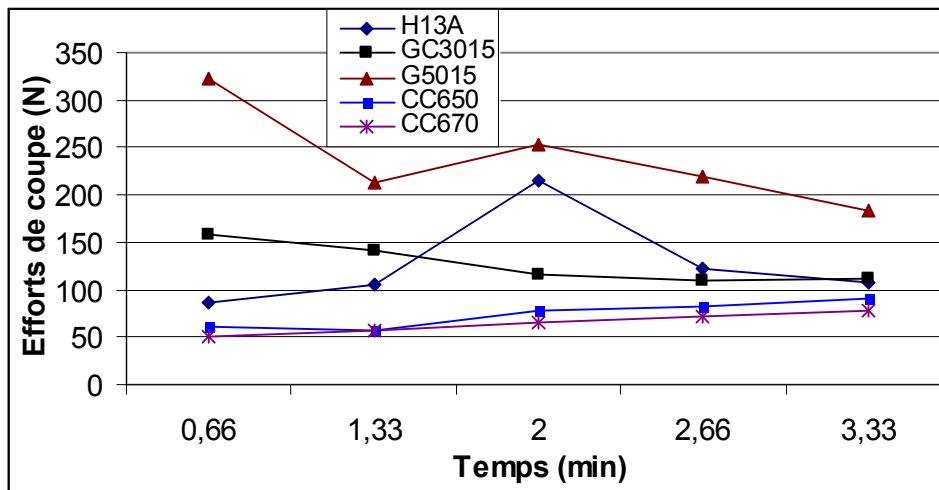
L'analyse de ces courbes montre que l'état de surface générée par la céramique CC670 et la céramique CC650 sont meilleurs par rapport au trois autres matériaux de coupe testés.



FigureIII-25: Evolution de la rugosité Ra en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec différents matériaux de coupe,  $r = 0.8\text{mm}$ ,  $K_r = 75^\circ$ .

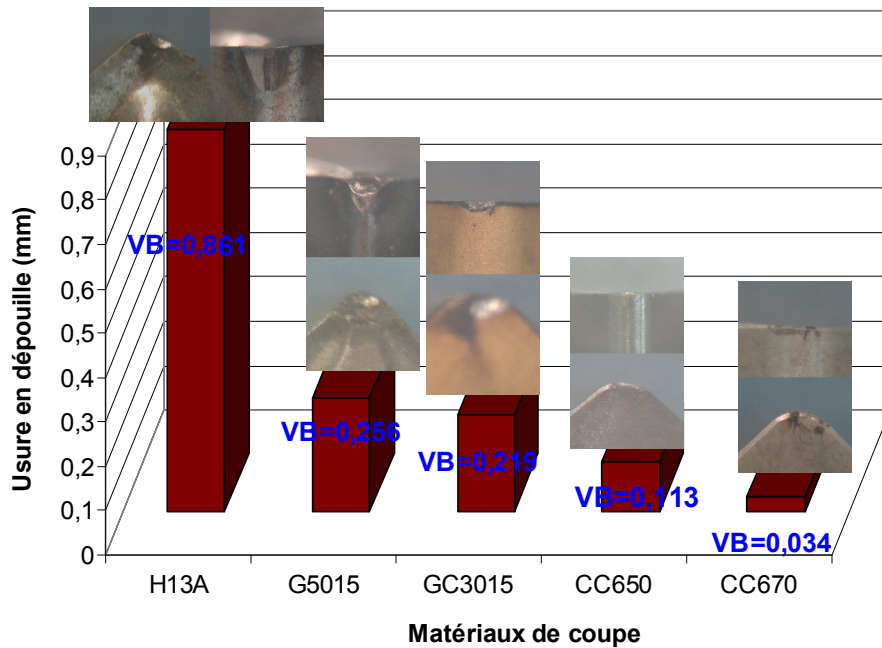
[Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

Les courbes de la (figureIII-26), montrent la différence enregistrée entre l'évolution de l'effort de coupe radial  $F_r$  en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec les outils en, céramique mixte (CC650), céramique composite (CC670), le cermet (G5015), le carbure métallique [revêtu (G3015) et non revêtu (H13A)]. La vitesse de coupe, l'avance, et la profondeur de passe sont maintenues constantes. L'analyse de ces courbes montre que, les efforts enregistrés avec les deux céramiques CC670 et CC650 sont inférieures par rapport aux efforts enregistrés par les trois autres matériaux.



FigureIII-26: Evolution de l'effort de coupe radial  $F_r$  en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec différents matériaux de coupe,  $r = 0.8\text{mm}$ ,  $K_r = 75^\circ$ . [Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

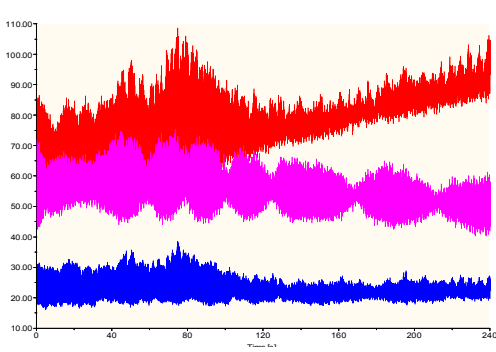
La (figure III-27), montre l'évolution de l'usure en dépouille  $VB$  lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec les outils en, céramique mixte (CC650), céramique composite (CC670), le cermet (G5015), le carbure métallique [revêtu (GC3015) et non revêtu (H13A)]. Pour une durée de 3.33min, l'usure maximale est enregistrée avec le carbure non revêtu ( $VB = 0.861\text{mm}$ ), suivi par le cermet avec une usure ( $VB = 0.256\text{mm}$ ), en troisième lieu le carbure revêtu avec une usure ( $VB = 0.219\text{mm}$ ), en quatrième lieu la céramique mixte ( $VB = 0.113\text{mm}$ ), et en dernier lieu la céramique composite avec une usure ( $VB = 0.034\text{mm}$ ).



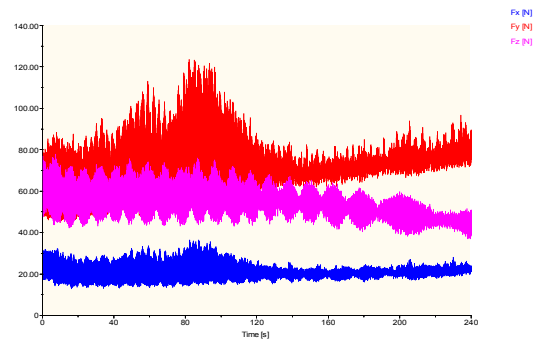
FigureIII-27: Evolution de l'usure à la fin de la passe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec différents matériaux de coupe, [Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm}$ ,  $t=4\text{min}$ ].

Les résultats des essais, (rugosité, usure, effort) sur les outils de coupe nous a permis de dégager la conclusion suivante. L'acier 42CrMo4 trempé (54HRC) est très difficile à usiner d'où la nécessité d'un matériau outil de coupe ayant des caractéristiques très élevées. D'après les résultats obtenus, on remarque que les deux céramiques sont plus performantes par rapport aux trois matériaux de coupe testés.

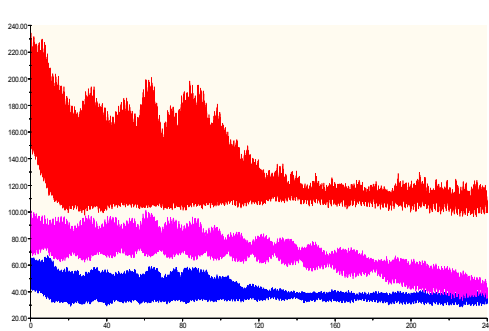
La figureIII-28, montre les différents profils des trois composantes de l'effort de coupe enregistrés lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec différents matériaux de coupe. On remarque d'après ces profils que l'effort radial est prépondérant suivi par l'effort tangentiel et en dernier lieu par l'effort axial.



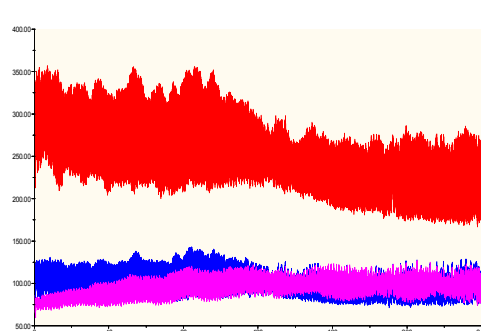
Profils des trois composantes des efforts de coupe de la **CC650**



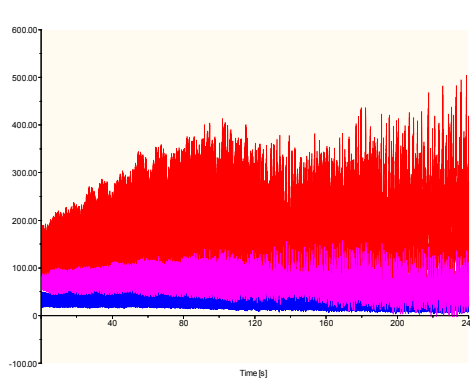
Profils des trois composantes des efforts de coupe de la **CC670**



Profils des trois composantes des efforts de coupe du **G3015**.



Profils des trois composantes des efforts de coupe du **G5015**.



Profils des trois composantes des efforts de coupe **H13A**

FigureIII-28: Composantes des efforts de coupe de différents matériaux  
[Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

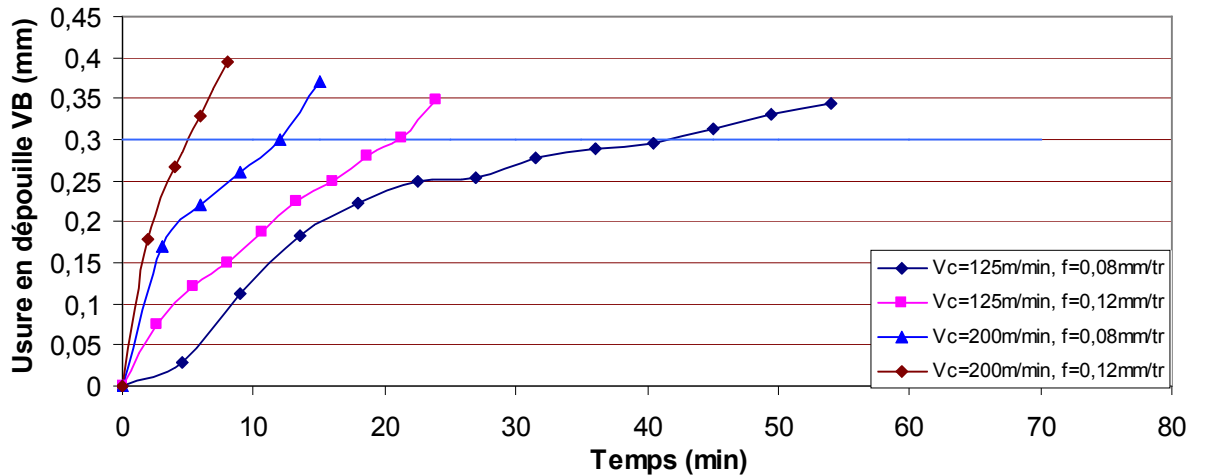
### **III-6 Influence de l'usure de l'outil sur la rugosité des surfaces usinées corrélé avec l'acquisition des efforts de coupe**

A fin d'analyser l'influence de l'usure sur la rugosité et les efforts de coupe, nous avons réalisées une séries d'essais avec la céramique mixte ( $Al_2O_3 + Tic$ ), pour  $r = 0.8mm$  et dont l'angle de direction principale  $Kr = 75^\circ$  sur l'acier 42CrMo4 trempé. Le comportement à l'usure de la céramique noire a été examiné par la méthode multifactorielle [en utilisant deux vitesses de coupe (125-200) m/min et deux avances (0.08-0.12)]mm/tr. Les résultats expérimentaux relevées en fonction des conditions de coupe, sont présentés sous formes graphiques. L'objectif est de définir la tendance et le degré d'évolution de ce paramètre en fonction des facteurs envisagés. Pour ce faire nous avons présenté sur les figures les différentes relations du type: usure = f (temps), rugosité = f (temps et de l'usure), effort = f (temps et de l'usure).

#### **III-6-1 comportement à l'usure de la céramique mixte ( $AL_2O_3+TiC$ ) en fonction du temps**

La (figureIII-29), présente les courbes de tendances de la relation fonctionnelle entre l'usure en dépouille et le temps d'usinage de la céramique mixte. Ces dernières montrent que l'usure obéit aux mêmes lois connues dans la littérature. Autrement dit cette fonction se caractérise par trois phase principales: La 1<sup>ère</sup> phase correspond aux premières secondes de travail et elle se distingue par une usure intensive appelée souvent usure initiale ou rodage, qui s'explique par l'élimination des aspérités. Dépassant la zone de rodage, l'usure devient stable et évolue linéairement avec le temps. Cette phase est nommée usure normale, elle se distingue par une grande résistance à l'usure au fur et a mesure que l'outil travaille la température à l'interface outil/pièce et outil/copeau s'élève ce qui favorise l'apparition de la troisième phase où l'usure en dépouille et en cratère se réunissent et on aboutit en fin de compte à l'effondrement de l'arête tranchante. A ce stade là la précision macro et micro géométrique des pièces usinées se trouve altérée.





FigureIII-29: Evolution de l'usure de la céramique noire en fonction du temps d'usinage lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4

L'analyse de ces résultats montre également que la vitesse de coupe a une influence capitale sur l'usure. En effet avec l'augmentation de cette dernière l'usure s'accroît d'une façon remarquable. Cet accroissement brusque de l'usure réduit considérablement l'étendue de la zone d'usure normale, ceci peut être justifié par les essais réalisés par la vitesse de coupe 200m/min. En prenant le critère de l'usure admissible  $[VB] = 0.3\text{mm}$ , on peut déterminer les durées de vie de l'outil correspondant à chaque régime de coupe. Les durées de vie de la céramique noire en fonction des régimes de coupes adoptées sont illustrées dans les tableaux III (1-2).

| N°d'essai | vitesse de coupe (m/min) | durée de vie (min) |
|-----------|--------------------------|--------------------|
| 1         | 125                      | 40                 |
| 2         | 200                      | 12                 |

TableauIII-1: Durée de vie de la céramique noire en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4  $a_p = 0.15\text{mm}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$

| N°d'essai | vitesse de coupe (m/min) | durée de vie (min) |
|-----------|--------------------------|--------------------|
| 1         | 125                      | 23.94              |
| 2         | 200                      | 5.5                |

TableauIII-2: Durée de vie de la céramique noire en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4  $a_p = 0.15\text{mm}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ .

L'analyse de ces résultats montre que la vitesse de coupe exprime un degré d'influence considérable sur la durée de vie de l'outil. En effet quand la vitesse de coupe augmente de 60% (de 125m/min à 200m/min), la durée de vie diminue de 70% pour une avance de 0.08mm/tr. En effet si l'avance augmente de 0.12mm/tr, la durée de vie diminue de 72.57%. L'explication de cette influence est due aux effets de reculs de la géométrie des angles de coupe, à l'augmentation de la section du copeau cette dernière en relation avec l'avance, et à l'élévation de la température qui est due au mauvaise condition d'évacuation de la chaleur de la zone de coupe. Ce degré d'influence de la vitesse de coupe est mis en évidence par le modèle trouvé  $[T = e^{13,4869} \cdot V_c^{-2,848} \cdot f^{-1,592}]$  chapitre IV et qui exprime la relation qualitative et quantitative entre la durée de vie, la vitesse de coupe et l'avance.

Les figures (III-30, III-31), illustre la progression de l'usure en dépouille de la céramique mixte lors de l'usinage selon les régimes de coupe adoptés. Sur ces images on peut aussi observer le phénomène de recul de l'arête, avec l'augmentation de la vitesse de coupe l'usure s'accroît d'une façon remarquable, ceci peut être justifié par la fragilité de la céramique mixte à grande vitesse de coupe.

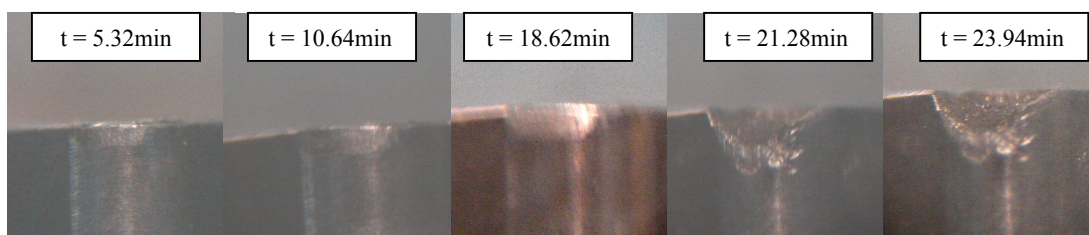


Figure III.30 : Succession d'images montrant la progression de l'usure en dépouille de la céramique CC650 conformément à la procédure d'essai adoptée  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $f=0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm}$

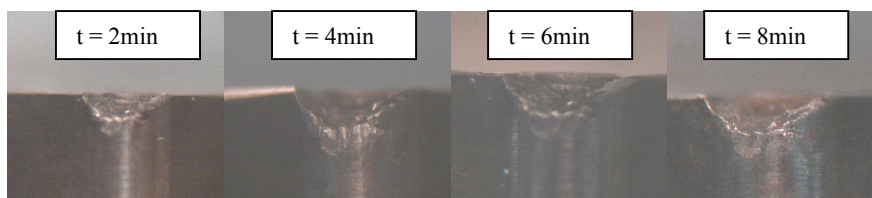
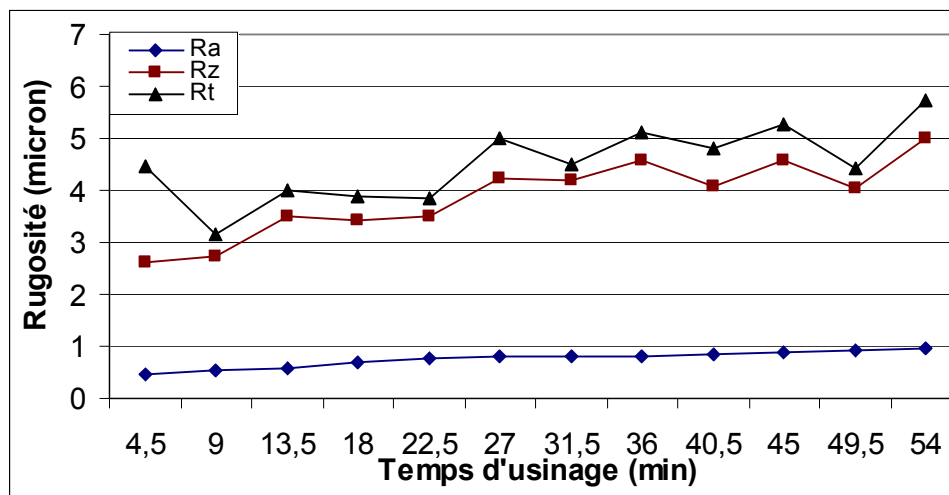


Figure III.31 : Succession d'images montrant la progression de l'usure en dépouille de la céramique CC650 conformément à la procédure d'essai adoptée  $V_c=200\text{m/min}$ ,  $f=0.12\text{mm}$ ,  $a_p=0.15\text{mm}$

### III-6-2 Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure

Les figures[(III-32, III-33); (III-34,III-35);(III-36, III-37); (III-38,III-39)], montrent l'évolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage et de l'usure en dépouille (VB), on constate que les allures des courbes de la rugosité en fonction du temps d'usinages sont presque identiques à celles de l'usure en dépouille (VB) ce qui explique que cette dernière est très liée au temps d'usinage. Avec l'augmentation du temps d'usinage l'usure en dépouille s'accroît et donne naissance aux frottement qui provoquent la dégradation de la surface usinée. Ceci s'explique par la modification géométrique de l'arête tranchante de l'outil provoquée par les conditions de coupe sévères et les températures élevées qui règnent sur la pointe de l'outil. L'augmentation de l'usure de l'outil entraîne l'accroissement de la perte de cote. Sur le plan expérimental, l'analyse des figures III(32-33) montre que pour un d'usinage de 4.5min l'usure en dépouille VB à une valeur de  $29\mu\text{m}$ , les valeurs des critères de rugosité (Ra, Rz, Rt ) sont respectivement de (0.46, 2.62,4.46)  $\mu\text{m}$ . Après un temps de 18min l'usure en dépouille à une valeur de  $222\mu\text{m}$ , l'augmentation des critères de rugosités est de (47.82%, 31.29%, 13.22%), à la fin de l'essai pour un temps de 54min l'usure en dépouille à une valeur de  $345\mu\text{m}$ , l'augmentation des critères de rugosités est de (106.52%, 91.22%, 28.47%).



FigureIII-32: Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage  
[Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

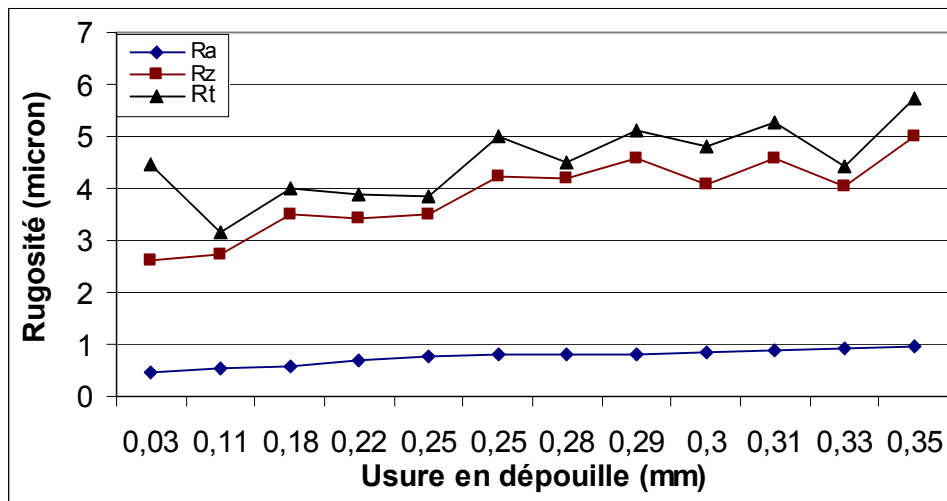


Figure III-33: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille.  
 [Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

L'analyse des figures III(34-35), montre que pour un temps d'usinage de 2.66min l'usure en dépouille est de  $74\mu\text{m}$ . Les valeurs des critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) sont respectivement de (0.42, 2.84, 3.28) $\mu\text{m}$ , pour un temps d'usinage de 10.44min ce qui correspond à une usure en dépouille de  $188\mu\text{m}$ , les valeurs d'augmentation des critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) augmentent respectivement de (88.09%, 48%, 47.53%), à la fin de l'essai pour un temps de 23.94min et une usure en dépouille de  $348\mu\text{m}$ , l'augmentation des critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) sont respectivement de (145.23%, 87.19%, 84.50%).

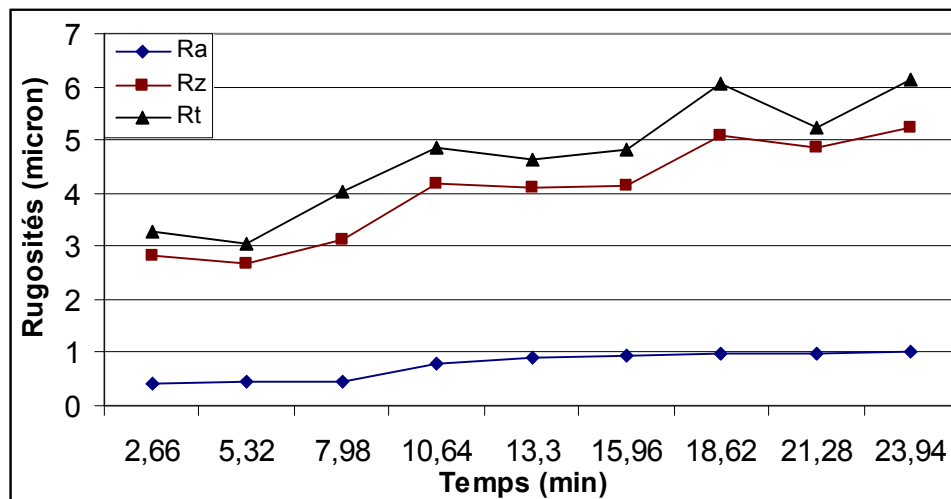


Figure III-34: Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage  
 [Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

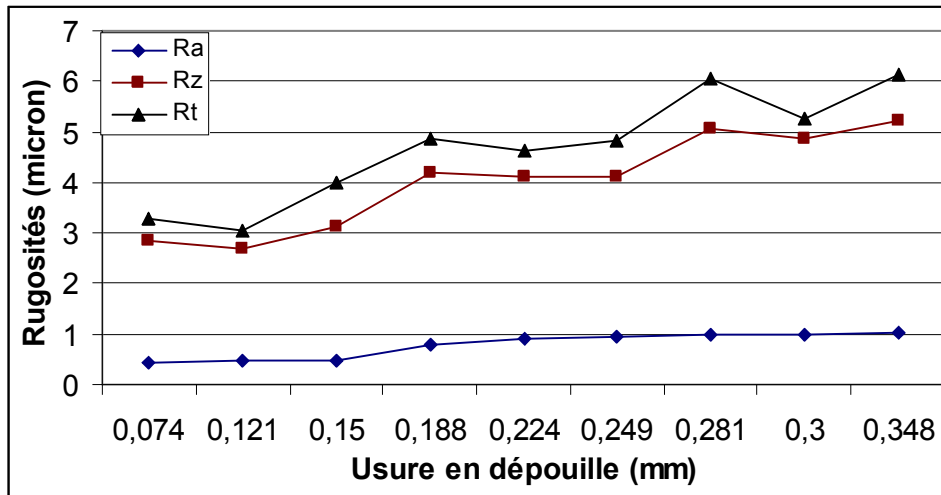
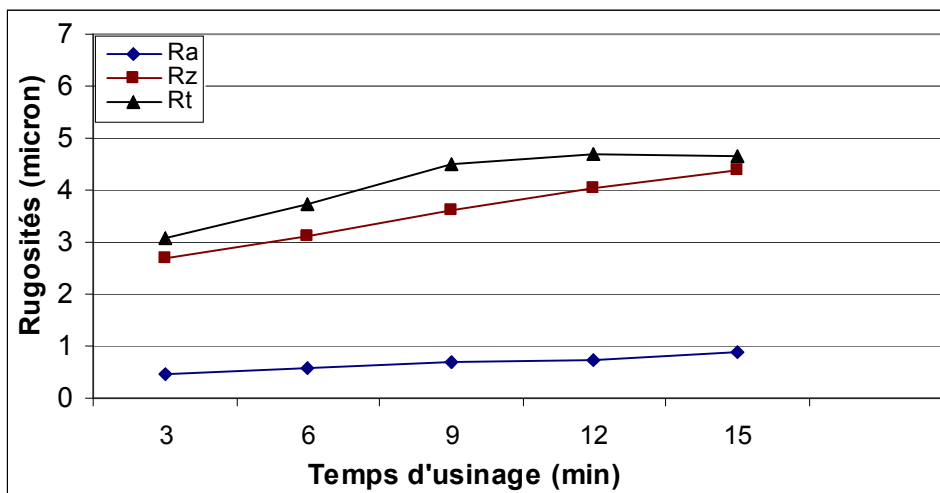
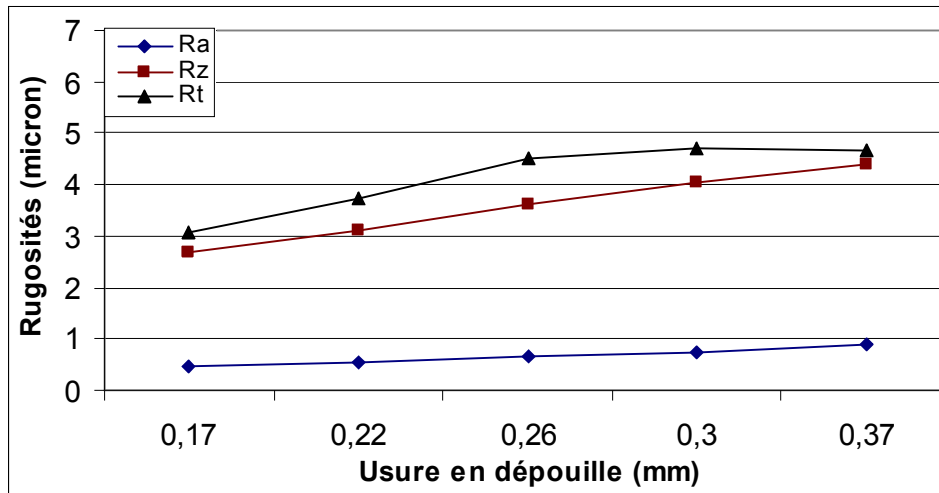


Figure III-35 : Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille [Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

L'analyse des figures III(36-37), montre que pour un temps d'usinage de 3 min ce qui correspond à une usure en dépouille de  $170\mu\text{m}$  figure III (36-37) les valeurs des critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) sont respectivement de (0.48, 2.68, 3.01), Pour un temps d'usinage de 15 min ce qui correspond à une usure en dépouille de  $370\mu\text{m}$ , les critères (Ra, Rz, Rt ) augmentent de (87.5%, 63.80%; 54.48%).

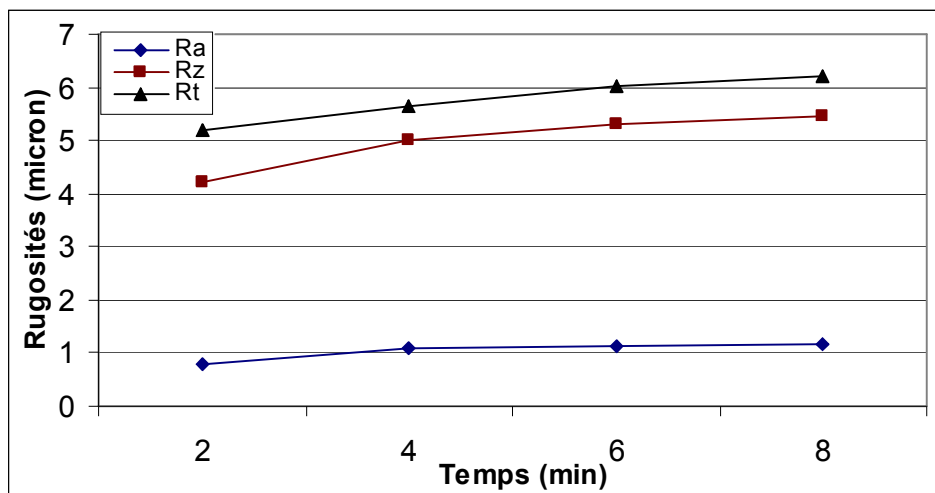


FigureIII-36: Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage [Régime de coupe:  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].



FigureIII-37: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille  
[Régime de coupe:  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

L'analyse des figures III(38-39), montre que pour Pour un temps d'usinage de 2min ce qui correspond à une usure en dépouille de  $178\mu\text{m}$ , les valeurs des critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) sont respectivement de (0.8, 4.23, 5.2)  $\mu\text{m}$ , à la fin de l'usinage pour un temps de 8min et une usure en dépouille de  $395\mu\text{m}$ , l'augmentation des critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) est de (46.25%, 28.84%, 19%).



FigureIII-38: Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage  
[Régime de coupe:  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

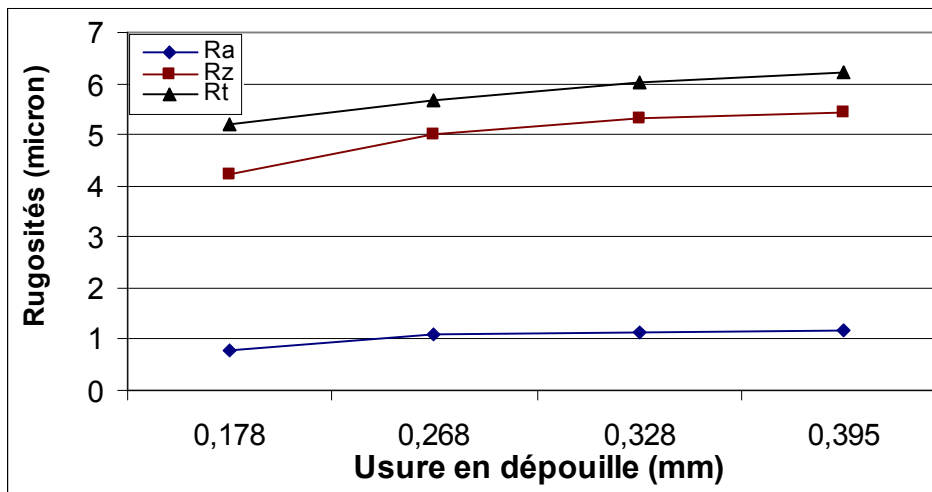


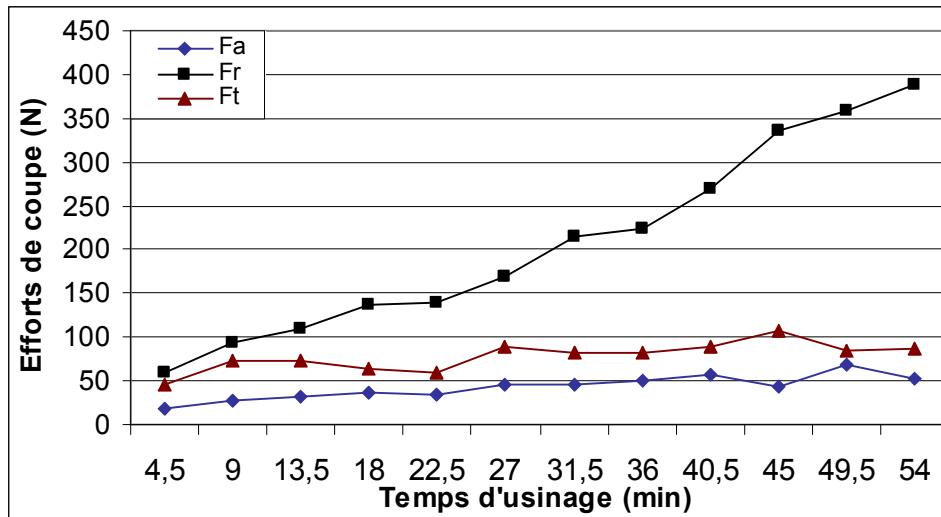
Figure III-39: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille

[Régime de coupe:  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

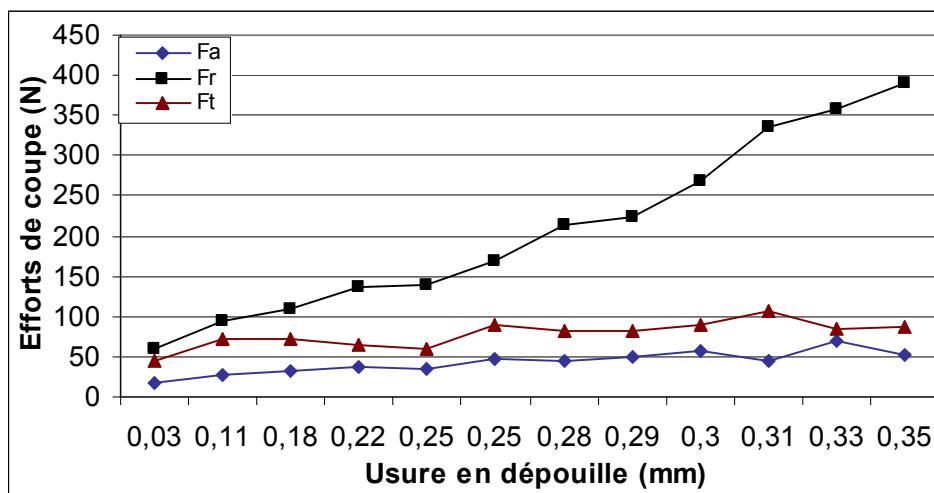
D'après ces résultats on peut dire que, L'augmentation du temps d'usinage entraîne des frottements et des températures élevées ce qui dégrade les arêtes de l'outil et augmente son usure. L'augmentation de cette dernière dégrade la surface usinée de la pièce et augmente sa rugosité.

### III-6-3 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure

Les figures III (40-41), montrent l'évolutions des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de l'usure en dépouille VB lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé. Le régime de coupe adopté est ( $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ). L'évolution des efforts de coupe prennent presque la même allure: pour un temps d'usinage de 4.5 min, l'usure atteint la valeur  $29\mu\text{m}$ , les efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ ) augmentent successivement de (17.68, 59.19, 45.45) N. A la fin de l'usinage,  $t = 54\text{min}$  les efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ ) atteignent les valeurs de (52.47, 389.25, 86.36) et cela pour une usure finale de  $345\mu\text{m}$ .



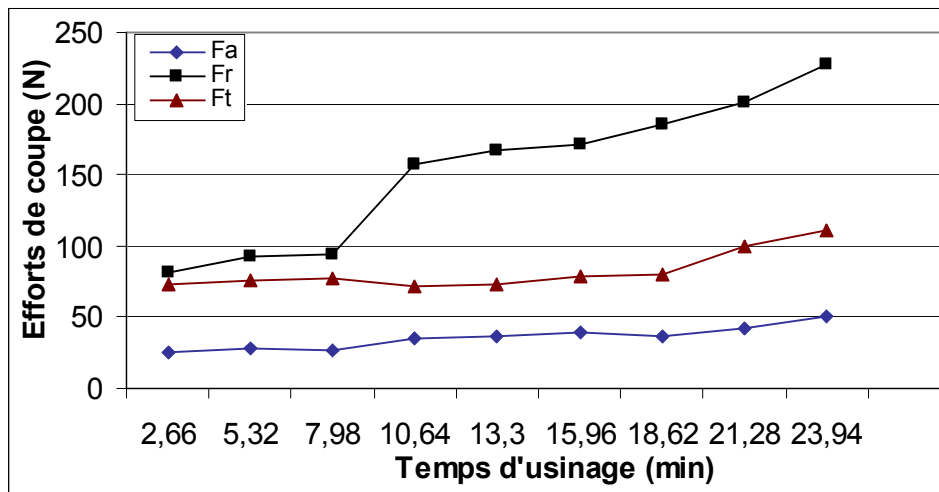
FigureIII-40: Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage  
 [Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].



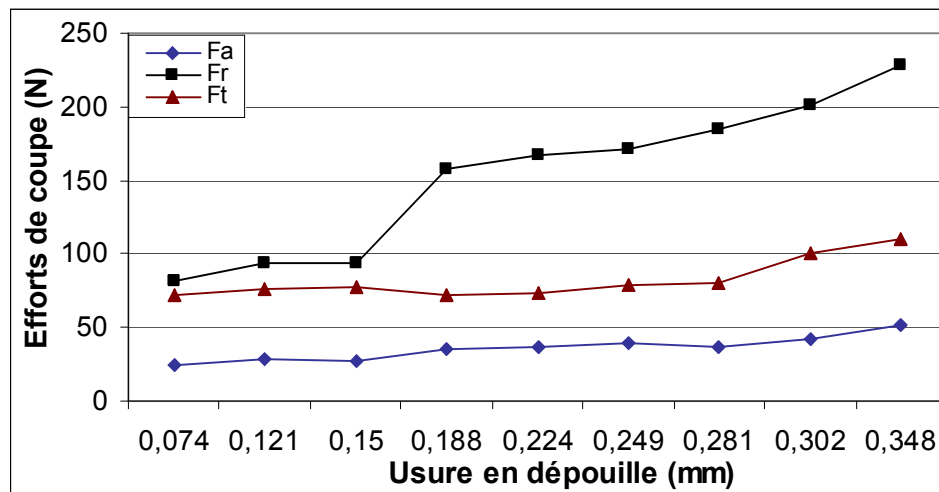
FigureIII-41: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille  
 [Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

Les figures III (42-43), montrent l'évolutions des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de l'usure en dépouille VB lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé, pour un régime de coupe ( $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ), l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure prennent presque la même allure. Pour un temps d'usinage de 2.66 min, l'usure atteint la valeur  $74\mu\text{m}$ , les efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ ) augmentent successivement de (22.94, 81.28, 72.67) N. A la fin de l'usinage on enregistre une usure de  $384\mu\text{m}$ , pour un temps d'usinage de 23.94min.



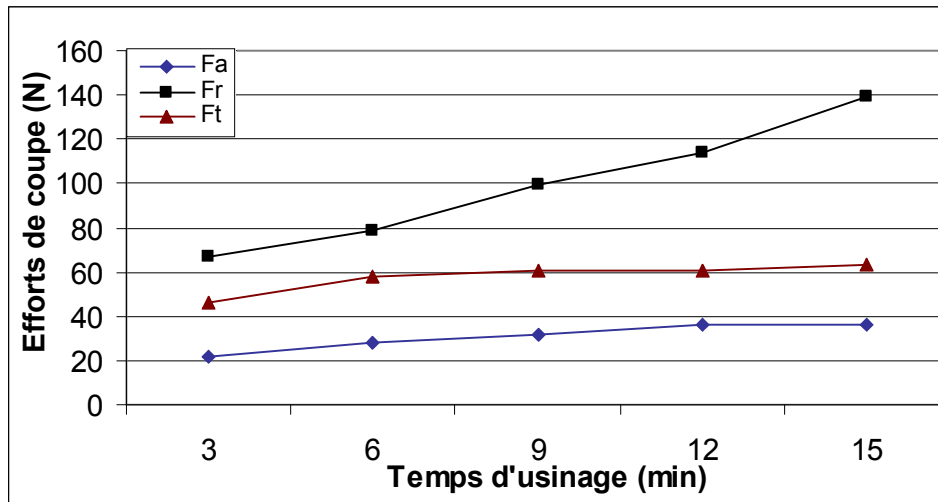


FigureIII-42: Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage  
 [Régime de coupe:  $V_c=125\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

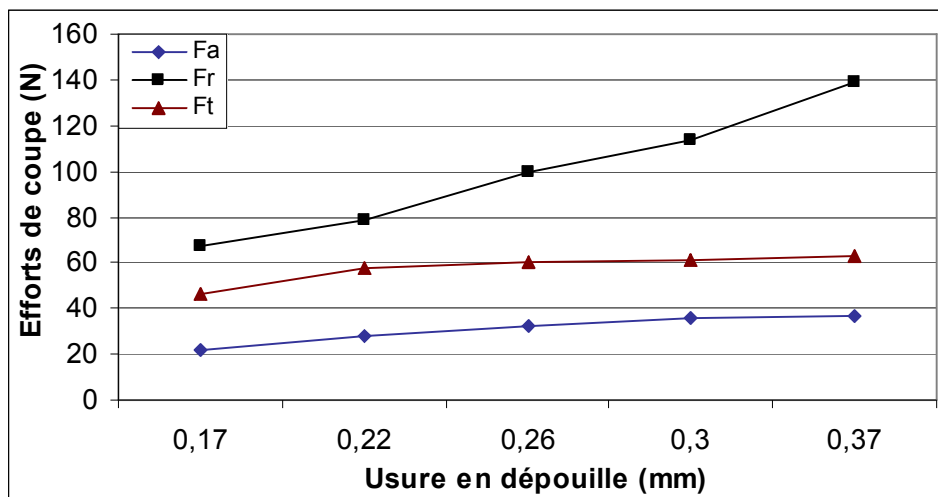


FigureIII-43: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille  
 [Régime de coupe:  $V_c = 125\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

Les figures III (44-45), montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 pour le régime de coupe envisagés ( $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ). Les courbes prennent presque les mêmes allures. Pour un temps de 3 min, l'usure atteint la valeur de  $170\mu\text{m}$ , les efforts de coupe (Fa, Fr, Ft) augmentent successivement de (21.7, 67.03, 46.1) N, pour un temps de 15min qui correspond à une usure en dépouille de  $370\mu\text{m}$ , les efforts de coupe augmentent respectivement de (36.56, 139.14, 62.93) N.

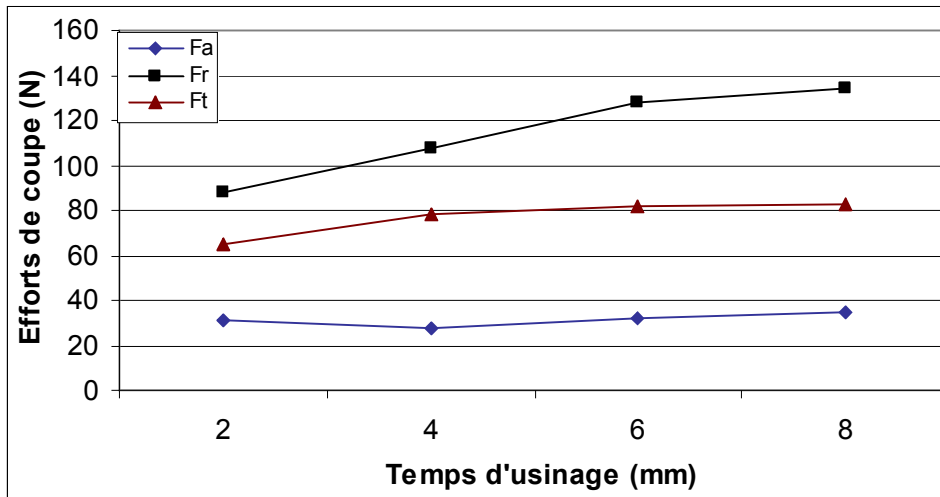


FigureIII-44: Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage  
[Régime de coupe:  $V_c=200\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

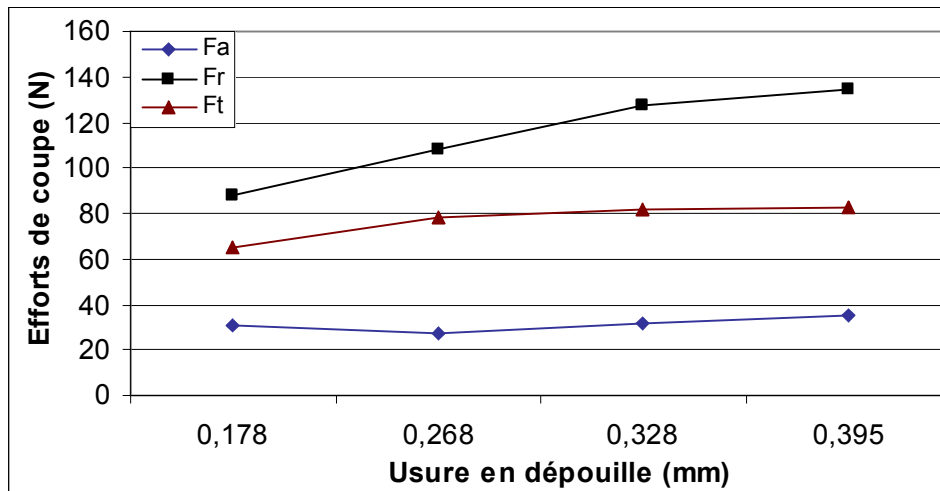


FigureIII-45: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille  
[Régime de coupe:  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

Les figures III (46-47), montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 pour le régime de coupe envisagés ( $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ). Les courbes prennent presque les mêmes allures. Pour un temps de 2 min l'usure atteint la valeur de  $178\mu\text{m}$ , les efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$ ,  $F_t$ ) augmentent successivement de (30.78, 87.85, 64.87) N, pour un temps de 8min qui correspond à une usure en dépouille de  $395\mu\text{m}$ , les efforts de coupe augmentent respectivement de (34.73, 134.43, 82.29) N.



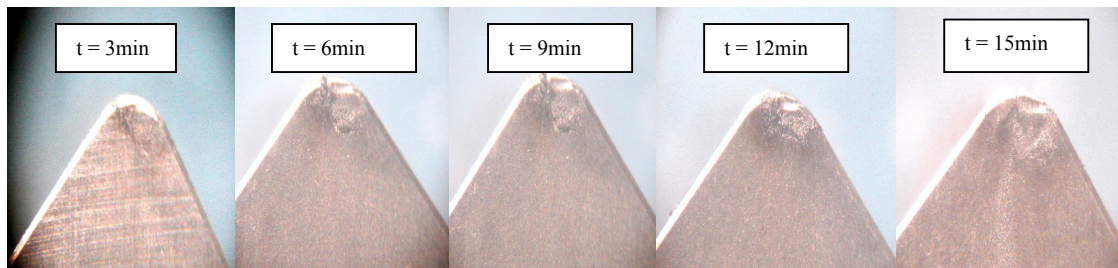
FigureIII-46: Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage  
[Régime de coupe:  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].



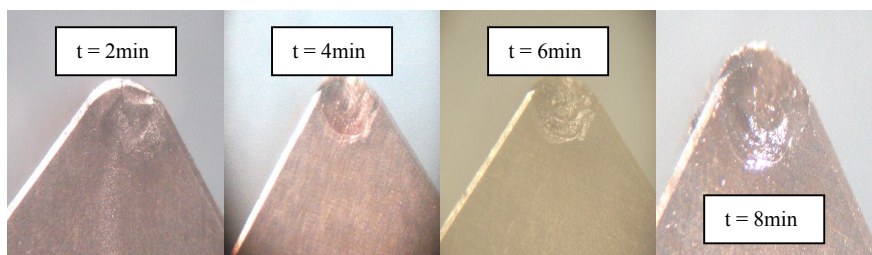
FigureIII-47: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille  
[Régime de coupe:  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ].

D'après ces résultats, on peut observer qu'après atteinte d'une certaine valeur d'usure les efforts de coupe prennent des valeurs considérables en fonction du temps d'usinage. Les courbes représentatives des efforts en fonction du temps et de l'usure ont la même allure, l'usure de l'outil a une influence importante sur l'augmentation et l'orientation de l'effort radial. L'effort radial est prépondérant car l'angle de coupe est négatif  $\gamma = -6^\circ$ , et à la dureté du matériau usiné (un matériau à l'état trempé s'oppose à toute pénétration extérieure ce qui augmente l'effort radial). D'autre part on travaille avec une profondeur de passe inférieure au rayon du bec ( $a_p = 0.15\text{mm} < r = 0.8\text{mm}$ ).

Lorsque on travaille avec des vitesses de coupe élevées la température dans la zone de coupe, augmente notamment sur les surfaces de contacts entre le copeau et la surface d'attaque ainsi qu'entre la pièce et la surface de dépouille principale, ce qui favorise la manifestation de l'usure en cratère KT qui se développe beaucoup plus vite est qui traduit une dégradation de l'état de surface et une augmentation des efforts de coupe figure III (48-49).



FigureIII-48: Succession d'image montrant la progression de l'usure en cratère conformément à la procédure d'essai adoptée ( $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = .15\text{mm}$ )



FigureIII-49: Succession d'image montrant la progression de l'usure en cratère conformément à la procédure d'essai adoptée ( $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm}$ ).

Ce pendant il faut noter que malgré la vitesse d'accroissement accrue de KT, cette dernière reste relativement inférieure à celle de l'usure en dépouille, c'est pour cette raison que toutes les tenues sont déterminées en se référant à la valeur admissible de celle-ci.

### III-7 Influence des vibrations sur la qualité des surfaces usinées

Une série d'expériences a été réalisé lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 dans le but de mettre en évidence l'influence de la vibration dans les deux direction (tangentielle, radial) sur la rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ), et les effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) en fonction des paramètres du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ).

### III-7-1 Résultat de l'influence des vibrations sur la rugosité

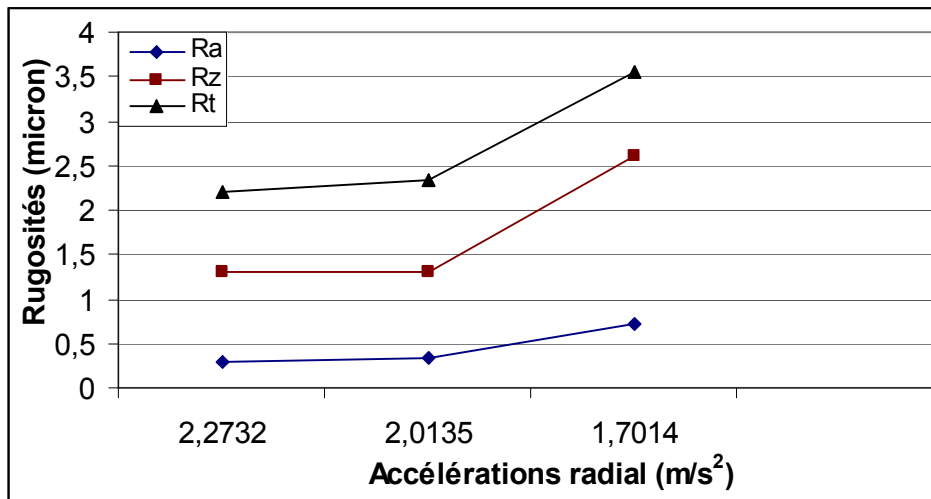


Figure III-50: Evolution des rugosités (Ra, Rz, Rt) en fonction de l'accélération radiale [Régime de coupe:  $V_c = 200m/min$ ,  $f = 0.08, 0.12, 0.16mm/tr$ ,  $a_p = 0.15mm$ ]

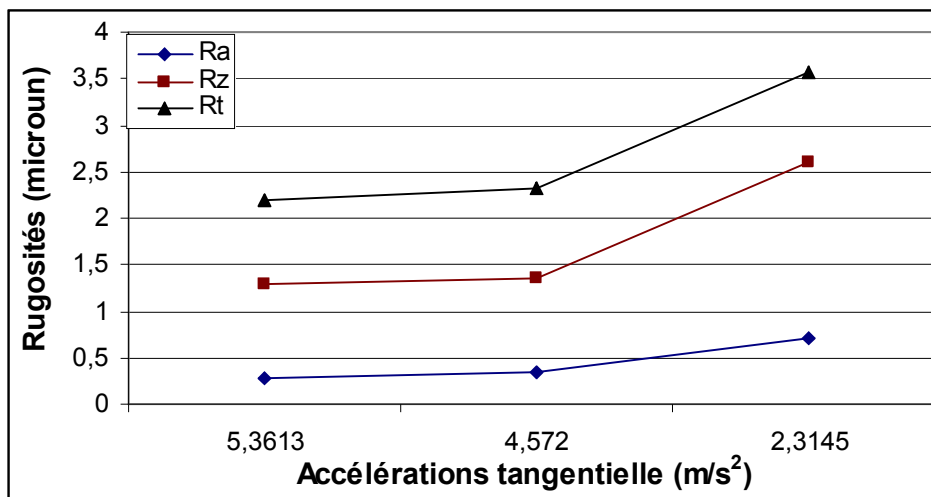


Figure III-51 Evolution des rugosités (Ra, Rz, Rt) en fonction de l'accélération tangentielle [Régime de coupe:  $V_c = 90m/min$ ,  $f = 0.08, 0.12, 0.16mm/tr$ ,  $a_p = 0.15mm$ ].

Les figures III (50-51), illustrent une certaine variation de la rugosité en fonction de l'accélération tangentielle et radiale, mais cette variation est plus marquée lorsque on faisant variée la vitesse d'avance qui un facteur très dominant sur la rugosité.

### III-7-2 Résultat de l'influence des vibrations sur les efforts de coupe

Les Figure III (52-53), montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'accélération radiale et tangentielle, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sont maintenues constante et

elles sont égales à:  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.16\text{mm/tr}$ , la profondeur de passe est variable ( $a_p = 0.15, 0.30, 0.45\text{mm}$ ). L'analyse de ces résultats montre également que les efforts de coupe augmentent avec l'augmentation de la profondeur de passe et une diminution des accélérations.

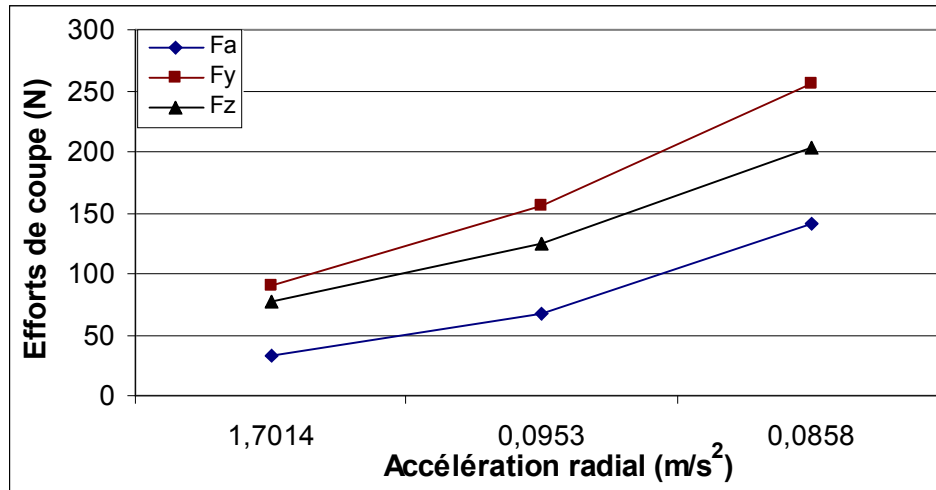


Figure III-52: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'accélération radiale  
[Régime de coupe:  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0.16\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.15, 0.30, 0.45\text{mm}$ ]

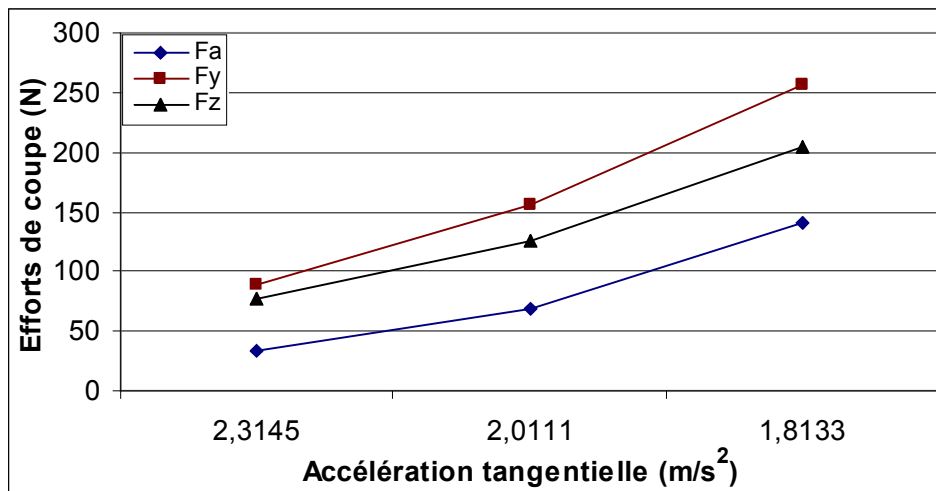


Figure III-53: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'accélération tangentielle  
[Régime de coupe:  $V_c=200\text{m/min}$ ,  $f=0.16\text{mm/tr}$ ,  $a_p= (0.15, 0.30, 0.45) \text{ mm}$ ].

### III-7-3 Relation entre vitesse de coupe et vibration

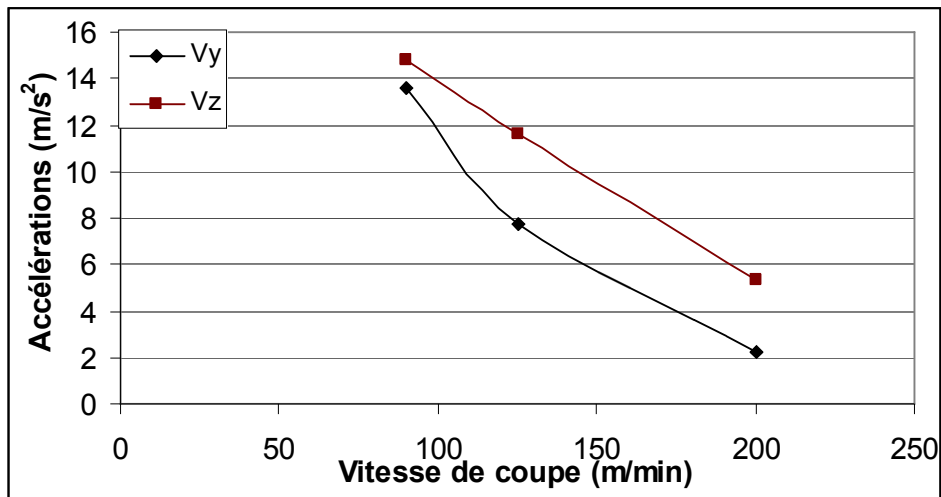


Figure III -54: L'accélération de l'outil en fonction de la vitesse de coupe  
[Régime de coupe:  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm}$ ,  $V_c=(90, 125, 200)$  m/min]

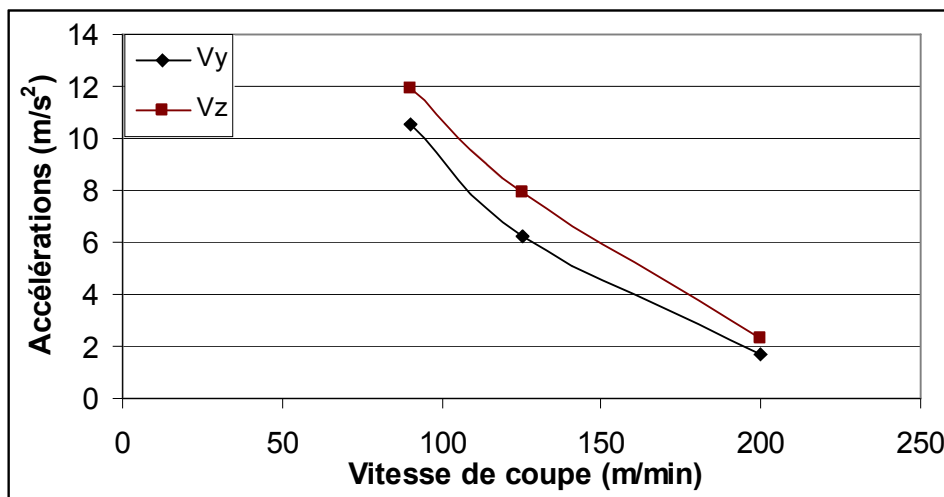


Figure III-55: L'accélération de l'outil en fonction de la vitesse de coupe  
[Régime de coupe:  $f=0.16\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.15\text{mm}$ ,  $V_c=(90, 125, 200)$  m/min].

Les figures III (54 et 55) montre l'influence de la vitesse de coupe sur l'accélération tangentielle et radiale. L'analyse des courbes montrent que:

- L'accélération tangentielle ( $V_z$ ) est supérieure à l'accélération radiale ( $V_y$ ) et cela pour toutes les vitesses de coupe testées.
- L'accélération radiale et tangentielle diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe.
- Aux vitesses de coupe élevées l'usinage se stabilise (la coupe devient plus stable).

Conclusion partielle: Cette étude réalisée au chapitre III, montre que la rugosité de surface et les efforts de coupe sont influencés par les paramètres du régime de coupe, par la géométrie de l'outil, par la nuance du matériau de coupe, par l'usure de l'outil CC650 et en dernier lieu par les vibrations.



***Chapitre IV***  
***Traitement et analyse des résultats***

## IV-1 Traitement et analyse des résultats

### IV-1-1 Introduction

Le traitement des résultats de l'usure relevés au chapitre 3 afin d'aboutir aux modèle théorique (modèle de Gilbert) est de la forme:

$$T = e^{k_0} \cdot v_c^{k_1} \cdot f^{k_2} \dots\dots\dots(4-1)$$

Avec:  $e^{k_0}$  est une constante qui dépend des propriétés physico mécaniques de la pièce, de l'outil, et de l'état du système MO.D.OP; les exposants  $K_1$  et  $K_2$  reflètent respectivement les degrés d'influence des paramètres: vitesse de coupe ( $V_c$ ), avance de coupe ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ) sur la tenue de la plaquettes  $T$ , en utilisant la méthode de taguchy.

Les résultats représentés dans le (tableau VI-3) sont analysés par le logiciel (MINITAB 12) en appliquant l'analyse de la surface de réponse.

### IV-1-2 Modèle mathématique de la tenue

Le traitement des résultats de la tenue suivant les conditions de coupe utilisées, nous a permis d'établir le graphique des effets moyens de la vitesse de coupe et de l'avance figure (IV-1).

|                             |             |             |                |
|-----------------------------|-------------|-------------|----------------|
|                             | Niv 1       | Niv 2       |                |
| <b>Vc</b><br><b>[m/min]</b> | <b>125</b>  | <b>200</b>  | <b>Entrées</b> |
| <b>f [mm/tr]</b>            | <b>0,08</b> | <b>0,12</b> |                |

| N°d'essai | Vc<br>[m/min.] | f [mm/tr] | Texp [min.] | ln(T)     | Tthéor. Eff.<br>Moy |
|-----------|----------------|-----------|-------------|-----------|---------------------|
| 1         | 125            | 0,08      | <b>40</b>   | 3,6888795 | <b>42,7935</b>      |
| 2         | 125            | 0,12      | <b>24</b>   | 3,1780538 | <b>22,4409</b>      |
| 3         | 200            | 0,08      | <b>12</b>   | 2,4849066 | <b>11,2208</b>      |
| 4         | 200            | 0,12      | <b>5,5</b>  | 1,7047481 | <b>5,88419</b>      |
|           |                |           |             | 2,764147  | 20,584858           |

|                        |                         |
|------------------------|-------------------------|
| $(T_{exp} - T_{th})^2$ | $(T_{exp} - T_{thmoy})$ |
| 7,803745358            | 376,9477467             |
| 2,430721839            | 11,66319626             |
| 0,607150578            | 73,69978342             |
| 0,147600923            | 227,5529348             |
| 10,9892187             | 689,8636612             |

| Niveau | $\ln(V_c)$ | $\ln(f)$  |
|--------|------------|-----------|
| 1      | 4,828314   | -2,525729 |
| 2      | 5,298317   | -2,120264 |

| Eff $V_c$ | Eff $f$   |
|-----------|-----------|
| 0,6693196 | 0,322746  |
| -0,66932  | -0,322746 |

|                      | $m_T$ | $x_T$          | $\ln(C_T)$    |                              |
|----------------------|-------|----------------|---------------|------------------------------|
| Effx = a x ln(x) + b | a=    | <u>-2,8481</u> | <u>-1,592</u> | <u>13,48695</u>              |
|                      | b=    | 14,421         | -3,6982       | <b>R<sup>2</sup>= 0,9841</b> |
|                      |       |                |               | <b>R= 0,992</b>              |

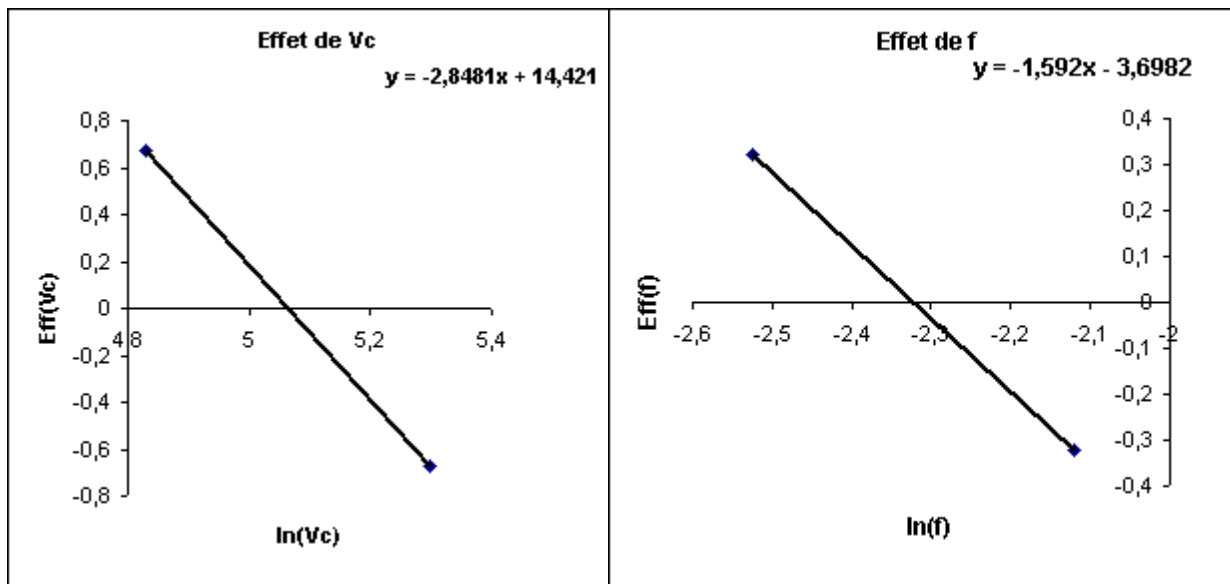


Figure IV-I: graphique des effets de la vitesse de coupe et l'avance.

Le traitement de résultat de la tenue, permet de déterminer le modèle mathématique qui exprime la relation fonctionnelle entre la vitesse de coupe, l'avance et la durée de vie de l'outil est présentée dans le (tableau IV-2).

| Matériau de coupe | L'usure en dépouille [VB] en (mm) | Modèle mathématique de Gilbert                       | R <sup>2</sup> |
|-------------------|-----------------------------------|--|----------------|
| cc650             | 0.3                               | $T = e^{13,4869} \cdot Vc^{-2,848} \cdot f^{-1,592}$ | 0.9936         |

Tableau IV-2 : Modèle mathématique de Gilbert pour [VB = 0.3] mm.

- Ce modèle montre que la durée de vie est inversement proportionnelle aux deux éléments de régime de coupe (vitesse de coupe, avance).
- Une première lecture des exposants de ce modèle met en évidence la faible influence de l'avance par rapport à la vitesse de coupe sur la durée de vie de l'outil. Ce modèle exprime également une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux (tableau IV-2) (R<sup>2</sup> = 0.99).

A partir du modèle mathématique trouvé, on peut tracer la courbe de tendance qui lie la tenue aux paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe et avance).

|   |       | Vc  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|   |       | 125 | 130 | 135 | 140 | 145 | 150 | 155 | 160 | 165 | 170 | 175 | 180 | 185 | 190 | 195 | 200 |
| f | 0,08  | 43  | 38  | 34  | 31  | 28  | 25  | 23  | 21  | 19  | 18  | 16  | 15  | 14  | 13  | 12  | 11  |
|   | 0,085 | 39  | 35  | 31  | 28  | 25  | 23  | 21  | 19  | 18  | 16  | 15  | 14  | 13  | 12  | 11  | 10  |
|   | 0,09  | 35  | 32  | 28  | 26  | 23  | 21  | 19  | 18  | 16  | 15  | 14  | 13  | 12  | 11  | 10  | 9,3 |
|   | 0,095 | 33  | 29  | 26  | 24  | 21  | 19  | 18  | 16  | 15  | 14  | 12  | 12  | 11  | 9,9 | 9,2 | 8,5 |
|   | 0,1   | 30  | 27  | 24  | 22  | 20  | 18  | 16  | 15  | 14  | 12  | 12  | 11  | 9,8 | 9,1 | 8,5 | 7,9 |
|   | 0,105 | 28  | 25  | 22  | 20  | 18  | 17  | 15  | 14  | 13  | 12  | 11  | 9,8 | 9,1 | 8,4 | 7,8 | 7,3 |
|   | 0,11  | 26  | 23  | 21  | 19  | 17  | 15  | 14  | 13  | 12  | 11  | 9,9 | 9,1 | 8,4 | 7,8 | 7,3 | 6,8 |
|   | 0,115 | 24  | 21  | 19  | 17  | 16  | 14  | 13  | 12  | 11  | 10  | 9,2 | 8,5 | 7,9 | 7,3 | 6,8 | 6,3 |
|   | 0,12  | 22  | 20  | 18  | 16  | 15  | 13  | 12  | 11  | 10  | 9,3 | 8,6 | 7,9 | 7,3 | 6,8 | 6,3 | 5,9 |

Tableau IV-1: La tenue T en fonction de la vitesse de coupe et l'avance.

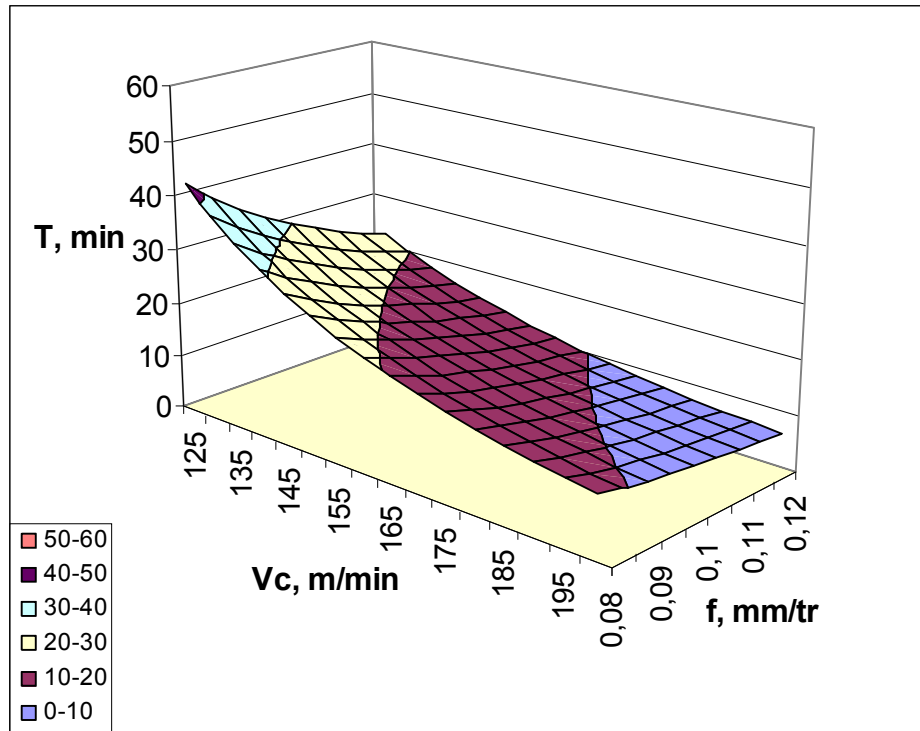


Figure IV-2 : Tenue T en fonction de la vitesse de coupe et l'avance

### IV-I-3 Modèles mathématiques pour un plan 3<sup>3</sup>, (résultats et discussions)

#### A) Randomisation et stockage du plan

A fin d'élaborer des modèles mathématiques de la rugosité, des efforts de coupe et des vibrations, nous avons réalisés un plan d'essai de 27 expériences. Les essais ont été numérotés de 1 à 27, la matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de bases (Vc, f, a<sub>p</sub>) qui constituent les différents régimes de coupe. A fin d'éliminer l'influence des conditions d'usinages et les erreurs systématiques, un ordre aléatoire (Randomisation) d'exécution des essais a été choisi par exemple (3 – 24 – 5 – 27 – 26 – 20 -.....8) (voir tableau IV-3 ).

#### B) Analyse des effets des facteurs sur (Ra, Rz, Rt, Fx, Fy, Fz, Vy, Vz) en fonction de la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f), et la profondeur de passe (a<sub>p</sub>)

A fin d'ajuster un modèle mathématique pour chaque variable de sortie, on applique l'analyse de la surface de réponse. L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la réponse, de générer quelques graphiques pour l'évaluation des effets. Lors de l'ajustement d'un modèle qui inclut les effets et les interactions, la valeur dans la colonne P (valeur de la probabilité) du tableau d'estimation des effets et coefficients doit être inférieure à 0.05.

| Ordre Essai | Ordre Std | Vc  | f    | a <sub>p</sub> | Ra   | Rz   | Rt   | Fx     | Fy     | Fz     | Vy      | Vz      |
|-------------|-----------|-----|------|----------------|------|------|------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1           | 3         | 90  | 0.08 | 0.15           | 0.31 | 1.23 | 2.16 | 7.97   | 62.86  | 42.42  | 13.5778 | 14.7934 |
| 2           | 24        | 90  | 0.08 | 0.30           | 0.30 | 1.2  | 1.9  | 35.71  | 101.71 | 87.52  | 12.1517 | 13.7934 |
| 3           | 5         | 90  | 0.08 | 0.45           | 0.32 | 1.2  | 2.16 | 87.36  | 145.21 | 120.02 | 9.5668  | 12.3700 |
| 4           | 4         | 90  | 0.12 | 0.15           | 0.33 | 1.45 | 2.25 | 35.71  | 101.71 | 87.52  | 10.6676 | 12.9022 |
| 5           | 1         | 90  | 0.12 | 0.30           | 0.67 | 2.6  | 3.45 | 84.77  | 155.13 | 142.47 | 9.7871  | 12.1928 |
| 6           | 26        | 90  | 0.12 | 0.45           | 0.74 | 2.76 | 3.56 | 109    | 225.64 | 164.38 | 9.7648  | 11.2552 |
| 7           | 20        | 90  | 0.16 | 0.15           | 1.05 | 3.16 | 4.53 | 62.77  | 163.84 | 140.21 | 10.5702 | 11.9577 |
| 8           | 11        | 90  | 0.16 | 0.30           | 1.06 | 3.66 | 5.03 | 67.17  | 186.6  | 161.68 | 8.3232  | 10.7172 |
| 9           | 9         | 90  | 0.16 | 0.45           | 1.09 | 3.76 | 4.83 | 119.32 | 266.15 | 204.46 | 8.0252  | 9.0165  |
| 10          | 12        | 125 | 0.08 | 0.15           | 0.39 | 1.5  | 2.25 | 24.37  | 77.39  | 69.7   | 7.7664  | 11.6021 |
| 11          | 7         | 125 | 0.08 | 0.30           | 0.38 | 1.6  | 2.6  | 62.83  | 124.07 | 103.97 | 6.5291  | 9.0979  |
| 12          | 17        | 125 | 0.08 | 0.45           | 0.29 | 1.20 | 1.7  | 143.36 | 204.95 | 167.53 | 5.5720  | 8.9085  |
| 13          | 21        | 125 | 0.12 | 0.15           | 0.42 | 1.6  | 2.30 | 42.63  | 128.02 | 93.49  | 7.0042  | 8.6225  |
| 14          | 19        | 125 | 0.12 | 0.30           | 0.40 | 1.6  | 2.8  | 110.24 | 215.71 | 145.75 | 5.5291  | 7.6250  |
| 15          | 25        | 125 | 0.12 | 0.45           | 0.35 | 1.4  | 2.76 | 161.86 | 242.87 | 204.21 | 4.5820  | 7.6050  |
| 16          | 22        | 125 | 0.16 | 0.15           | 0.44 | 1.95 | 2.8  | 90.08  | 180.74 | 167.43 | 6.2314  | 7.9591  |
| 17          | 6         | 125 | 0.16 | 0.30           | 0.58 | 2.25 | 3.35 | 144.58 | 224.55 | 245.27 | 4.4050  | 7.6201  |
| 18          | 14        | 125 | 0.16 | 0.45           | 0.52 | 2.0  | 3.15 | 240.41 | 297.29 | 273.59 | 3.315   | 5.6291  |
| 19          | 10        | 200 | 0.08 | 0.15           | 0.29 | 1.3  | 2.2  | 30.89  | 87.63  | 55.05  | 2.2732  | 5.3613  |
| 20          | 23        | 200 | 0.08 | 0.30           | 0.22 | 1.35 | 2.0  | 54.49  | 107    | 102.75 | 1.5655  | 3.0981  |
| 21          | 27        | 200 | 0.08 | 0.45           | 0.24 | 1.10 | 1.75 | 101.73 | 158.38 | 140.64 | 1.4733  | 1.4059  |
| 22          | 15        | 200 | 0.12 | 0.15           | 0.34 | 1.3  | 2.33 | 37.53  | 104.63 | 81.49  | 2.0135  | 4.5720  |
| 23          | 16        | 200 | 0.12 | 0.30           | 0.27 | 1.1  | 2.0  | 70.45  | 149.03 | 131.31 | 1.6979  | 2.3580  |
| 24          | 2         | 200 | 0.12 | 0.45           | 0.33 | 1.65 | 1.75 | 128.32 | 199.65 | 185.29 | 1.0029  | 1.5679  |
| 25          | 13        | 200 | 0.16 | 0.15           | 0.72 | 2.6  | 3.56 | 33.1   | 89.39  | 77.17  | 1.7014  | 2.3145  |
| 26          | 18        | 200 | 0.16 | 0.30           | 0.87 | 3.1  | 4.30 | 67.95  | 156.51 | 125.07 | 0.0953  | 2.0111  |
| 27          | 8         | 200 | 0.16 | 0.45           | 0.89 | 3.2  | 4.2  | 140.3  | 256.4  | 203.64 | 0.0858  | 1.8133  |

Tableau IV-3: Randomisation et stockage du plan

### IV-I-3-1 Analyse des effets des facteurs sur Ra en fonction de Vc, f, et ap

Coefficients de régression estimés pour Ra

| Terme     | Coeff    | Er-T Coef | T      | P     |
|-----------|----------|-----------|--------|-------|
| Constante | 0,29074  | 0,08642   | 3,364  | 0,004 |
| vc        | -0,09444 | 0,03678   | -2,568 | 0,020 |
| f         | 0,24723  | 0,03717   | 6,652  | 0,000 |
| ap        | 0,02416  | 0,03717   | 0,650  | 0,524 |
| vc*vc     | 0,19963  | 0,07501   | 2,661  | 0,016 |
| f*f       | 0,12556  | 0,06370   | 1,971  | 0,045 |
| ap*ap     | -0,02444 | 0,06370   | -0,384 | 0,706 |
| vc*f      | -0,01369 | 0,04408   | -0,311 | 0,760 |
| vc*ap     | -0,02068 | 0,04408   | -0,469 | 0,645 |
| f*ap      | 0,03583  | 0,04505   | 0,795  | 0,437 |

S = 0,1560 R-carré = 78,7% R-carré (ajus) = 67,4%

**Tableau IV-4:** Analyse de régression de Ra

#### A) Evolution de la rugosité Ra en fonction de Vc, f, et ap

La surface de la réponse de la rugosité Ra en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur le graphique (figure IV-3). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité Ra.

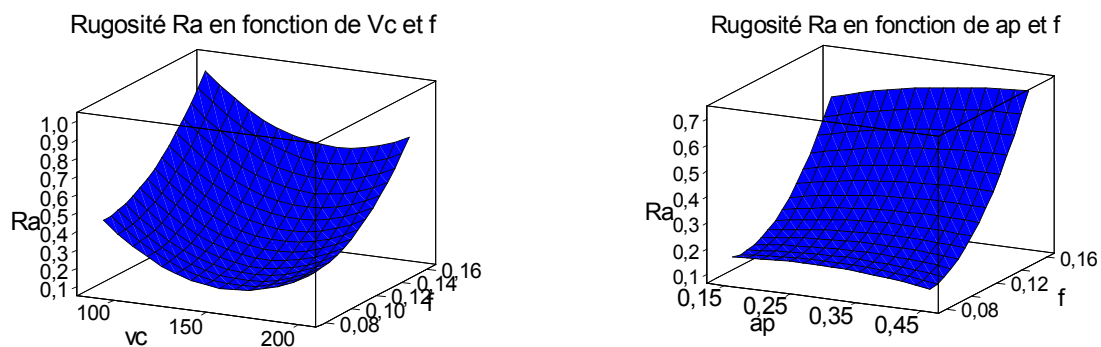


Figure IV-3: Evolution de Ra en fonction de Vc, f et ap

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que seules la vitesse de coupe et la vitesse d'avance qui ont un impact significatif sur la rugosité puisque la valeur de la probabilité P est inférieure à 0.05 (tableau IV-4). La profondeur de passe n'a pas d'influence sur Ra ( $p = 0,524 > 0.05$ ). La valeur de la probabilité P de l'interaction Vc \* Vc et de f \* f qui sont inférieure à 0.05 (tableau IV-4) signifie qu'ils ont un impact significatif à 95%.

#### B) Droite de Henry des effets normalisés

Nous utiliserons maintenant la droite de **Henry** et le diagramme de **Pareto** des effets pour voir quels effets influencent la réponse Ra

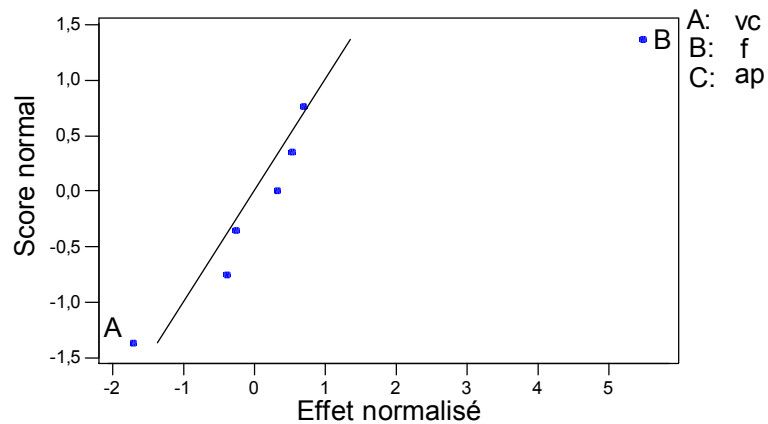


Figure IV-4: Droite de Henry des effets normalisés  
(La réponse est Ra, Alpha = 0.10)

Les effets actifs sont les effets significatifs ou importants dans la droite de Henry, les effets significatifs ont tendance à s'éloigner de la droite. Ils sont plus éloignés de la droite d'ajustement et de valeur plus importante que les effets non significatifs qui, pour leur part sont généralement de valeur plus faible et centrés autour de la droite, la moyenne de l'ensemble des effets (figure IV-4).

### C) Diagramme de Pareto des effets normalisés

Le diagramme de Pareto des effets constitue également un outil utile pour déterminer les effets significatifs.



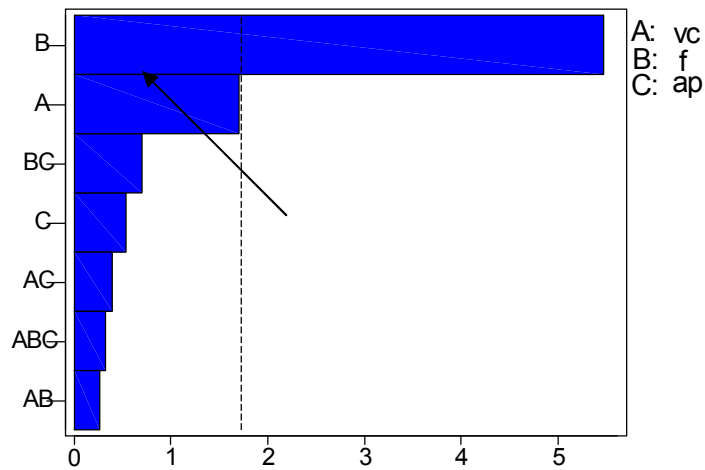


Figure IV-5: Diagramme de Pareto des effets normalisés

(La réponse est Ra, Alpha = 0.10)

On constate que les effets situés au-delà de cette ligne sont significatifs, les interactions  $f \cdot a_p$ ,  $V_c \cdot a_p$ , et  $V_c \cdot f$  semblent ne pas être significatifs. L'interaction d'ordre trois ne perturbe pas la la réponse Ra.

#### D) Graphique des effets principaux pour Ra

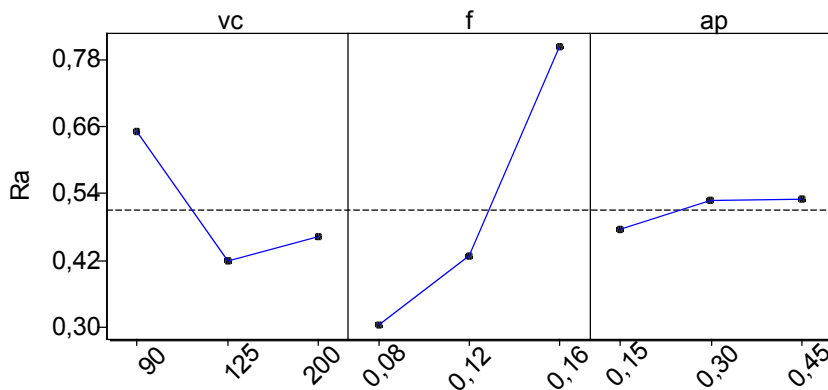


Figure IV-6: Graphique des effets principaux pour Ra

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 augmente légèrement lorsque  $V_c$  passe de 125 à 200, ceci est expliqué par la vibration du système usinant pour les vitesses de coupe élevées. Une diminution de la vitesse d'avance permet d'améliorer la rugosité de la surface par

contre sans augmentation entraîne un état de surface médiocre, alors que la profondeur de passe n'a pas d'effets significatifs (pente faible).

### E) Diagramme d'interaction pour Ra

L'étape suivante consiste donc à considérer l'interaction significative. Bien que nous avons déjà vérifié l'interaction significative via les résultats du (tableau VI-4). Le diagramme des interactions nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux.

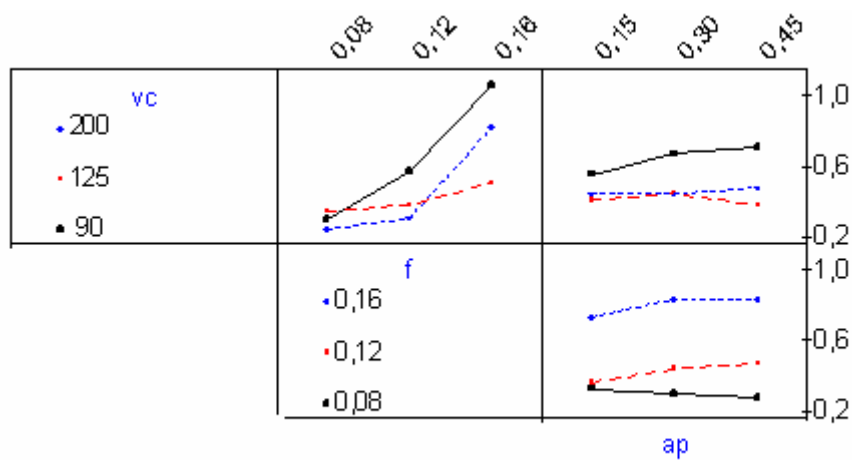


Figure IV-7: Diagramme d'interaction pour Ra

Le diagramme (figure IV-7) montre l'impact exercé par la variation des valeurs d'un facteur sur un autre facteur. L'interaction significative ( $Vc \cdot Vc$  et  $f \cdot f$ ) est mise en évidence par deux droites aux pentes nettement différentes, la valeur de la probabilité P des interactions inférieure à 0.05 (tableau IV-4) signifie qu'ils ont un impact significatif à 95%.

### F) Modèle de prédiction de Ra

Un modèle qui décrit la variation de Ra en fonction de la vitesse de coupe, l'avance, et la profondeur de passe) peut être défini de la façon suivante (seuls les facteurs et les interactions significatifs sont pris en considération):

$$Ra = k_0 + k_1 \cdot vc + k_2 \cdot f + k_4 \cdot vc^2 + k_5 \cdot f^2 \dots \dots \dots (4-2)$$

Une deuxième analyse des résultats (analyse de variance), permet de déterminer les coefficients estimés de la régression de Ra et qui sont:

| Terme     | Coeff        |
|-----------|--------------|
| Constante | 2,16714      |
| vc        | -0,0193565   |
| f         | -13,5420     |
| vc*vc     | 0,0000659933 |
| f*f       | 78,4722      |

Le modèle de prédiction de Ra s'écrit, en négligeant les termes non significatifs de la façon suivante

$$Ra = 2,1671 - 0,0193Vc - 13,5420f + 6,5993 \cdot 10^{-5} Vc^2 + 78,4722f^2 \dots\dots\dots(4-3)$$

#### IV-I-3-2 Analyse des effets des facteurs sur Rz en fonction de Vc, f, et ap

Coefficients de régression estimés pour Rz

| Terme     | Coeff   | Er-T Coef | T      | P     |
|-----------|---------|-----------|--------|-------|
| Constante | 1,3698  | 0,2594    | 5,280  | 0,000 |
| vc        | -0,2400 | 0,1104    | -2,174 | 0,044 |
| f         | 0,7701  | 0,1116    | 6,902  | 0,000 |
| ap        | 0,1143  | 0,1116    | 1,025  | 0,320 |
| vc*vc     | 0,5820  | 0,2252    | 2,585  | 0,019 |
| f*f       | 0,3578  | 0,1912    | 1,871  | 0,039 |
| ap*ap     | -0,1422 | 0,1912    | -0,744 | 0,467 |
| vc*f      | -0,0634 | 0,1323    | -0,479 | 0,638 |
| vc*ap     | -0,0560 | 0,1323    | -0,423 | 0,677 |
| f*ap      | 0,1483  | 0,1352    | 1,097  | 0,288 |

S = 0,4684      R-carré = 79,5%    R-carré (ajus) = 68,7%

Tableau IV-5: Analyse de régression de Rz

#### A) Evolution de la rugosité Rz en fonction de Vc, f, et ap

La surface de la réponse de la rugosité Rz en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur le graphique (figureIV-8). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur Rz.

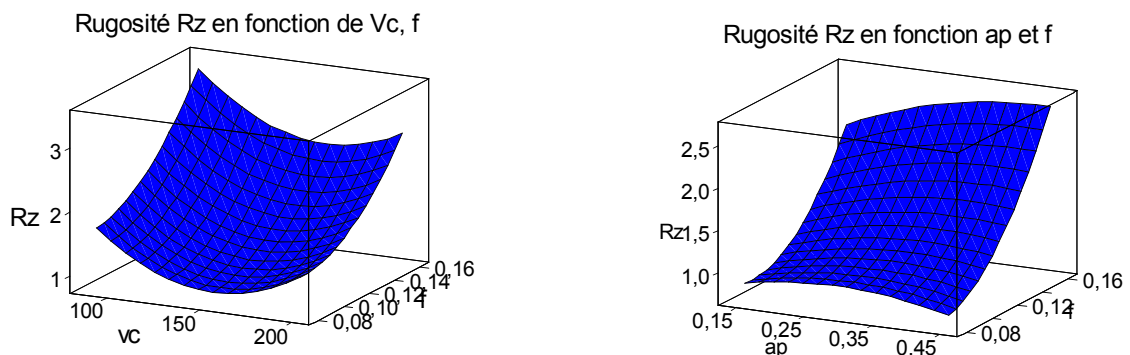


Figure IV-8: Evolution de Rz en fonction de f, Vc, et ap

## B) Graphique des effets principaux pour Rz

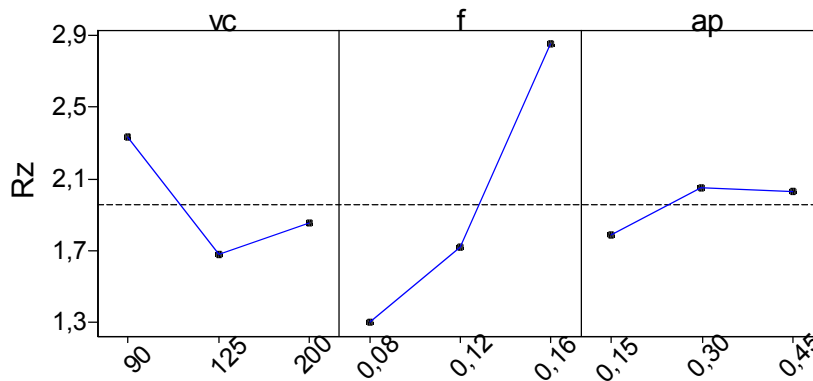


Figure IV-9: Graphique des effets principaux pour Rz

Une deuxième analyse des résultats, permet de déterminer les coefficients estimés de la régression de Rz et qui sont:

| Terme     | Coeff       |
|-----------|-------------|
| Constante | 6,25330     |
| vc        | -0,0546654  |
| f         | -37,6544    |
| vc*vc     | 0,000192400 |
| f*f       | 223,611     |

**Le modèle de prédiction** de Rz s'écrit, en négligeant les termes non significatifs de la façon suivante:  $Rz = 6,2533 - 0,0546Vc - 37,6544f + 1,9240 \cdot 10^{-4}Vc^2 + 223,611f^2 \dots \dots \dots (4-4)$

### VI-I-3-3 Analyse des effets des facteurs sur Rt en fonction de Vc, f, et ap

Coefficients de régression estimés pour Rt

| Terme     | Coeff   | Er-T   | Coef | T      | P     |
|-----------|---------|--------|------|--------|-------|
| Constante | 2,3167  | 0,2897 |      | 7,998  | 0,000 |
| vc        | -0,3211 | 0,1233 |      | -2,605 | 0,018 |
| f         | 0,9365  | 0,1246 |      | 7,518  | 0,000 |
| ap        | 0,0637  | 0,1246 |      | 0,511  | 0,616 |
| vc*vc     | 0,5533  | 0,2514 |      | 2,201  | 0,042 |
| f*f       | 0,4483  | 0,2135 |      | 2,100  | 0,041 |
| ap*ap     | -0,2567 | 0,2135 |      | -1,202 | 0,246 |
| vc*f      | -0,0795 | 0,1478 |      | -0,538 | 0,598 |
| vc*ap     | -0,1529 | 0,1478 |      | -1,035 | 0,315 |
| f*ap      | 0,1908  | 0,1510 |      | 1,264  | 0,223 |

S = 0,5230      R-carré = 82,1%      R-carré (ajus) = 72,6%

Tableau VI-6: Analyse de régression de Rt

### A) Evolution de la rugosité $R_t$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$

La surface de la réponse de la rugosité  $R_t$  en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur le graphique (figure IV-10). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur  $R_t$ .

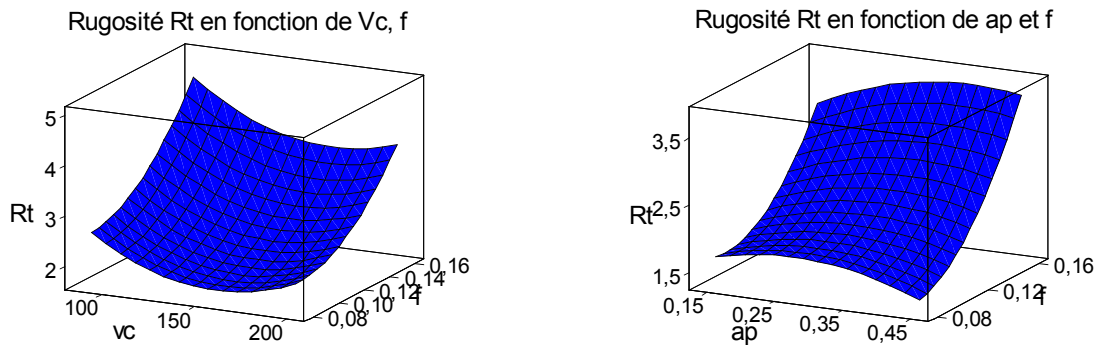


Figure IV-10: Evolution de  $R_t$  en fonction de  $f$ ,  $V_c$ , et  $a_p$

### B) Graphique des effets principaux pour $R_t$

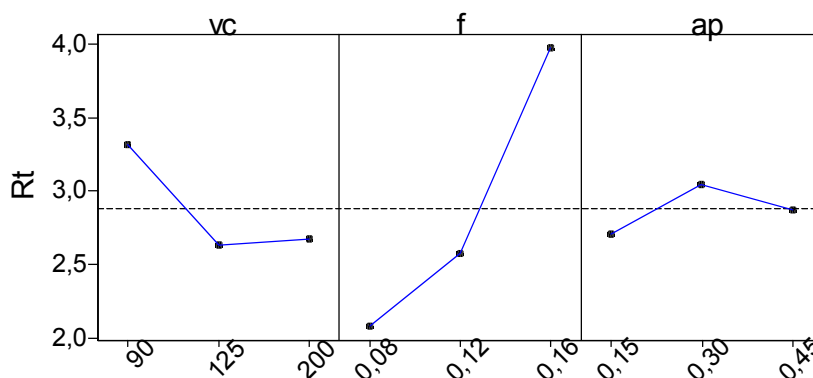


Figure IV-11: Graphique des effets principaux pour  $R_t$

Une deuxième analyse des résultats, permet de déterminer les coefficients estimés de la régression de  $R_t$  et qui sont:

| Terme     | Coeff       |
|-----------|-------------|
| Constante | 6,79063     |
| $vc$      | -0,0489845  |
| $f$       | -48,1415    |
| $vc*vc$   | 0,000182896 |
| $f*f$     | 280,208     |

**Le modèle de prédiction** de  $R_t$  s'écrit, en négligeant les termes non significatifs de la façon suivante.  $R_t = 6,7906 - 0,0489V_c - 48,1415f + 1,82 \cdot 10^{-4}V_c^2 + 280,20f^2$ .....(4-5)

En considérant un intervalle de confiance de 95% figure IV (8 -10), on constate que seules la vitesse de coupe et la vitesse d'avance qui ont un impact significatif sur la rugosité ( $R_z$ ,  $R_t$ ) puisque la valeur de la probabilité  $P$  est inférieure à 0.05 tableau IV (5 - 6). La profondeur de passe  $a_p$  n'a pas d'influence sur  $R_z$  ( $p = 0.320 > 0.05$ ), et pour  $R_t$  ( $p = 0.616 > 0.05$ ). La valeur de la probabilité  $P$  de l'interaction  $V_c * V_c$  et de  $f * f$  qui sont inférieure à 0.05 tableau IV (5 - 6). Signifie qu'ils ont un impact significatif à 95%.

Les figure IV (9 – 11), montre que  $L$ 'avance à une influence statistiquement significative sur la rugosité, la profondeur de passe n'a pas d'influence physique pente faible, l'augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de surface.

### VI-I-3-4 Analyse des effets des facteurs sur $F_x$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$

Coefficients de régression estimés pour  $F_x$

| Terme       | Coeff  | Er-T Coef | T      | P     |
|-------------|--------|-----------|--------|-------|
| Constante   | 115,45 | 11,458    | 10,075 | 0,000 |
| $v_c$       | 3,05   | 4,876     | 0,626  | 0,539 |
| $f$         | 22,17  | 4,928     | 4,500  | 0,000 |
| $a_p$       | 48,37  | 4,928     | 9,817  | 0,000 |
| $v_c * v_c$ | -50,33 | 9,945     | -5,061 | 0,000 |
| $f * f$     | -2,59  | 8,446     | -0,307 | 0,763 |
| $a_p * a_p$ | 11,13  | 8,446     | 1,318  | 0,205 |
| $v_c * f$   | -8,17  | 5,845     | -1,398 | 0,180 |
| $v_c * a_p$ | 1,86   | 5,845     | 0,319  | 0,754 |
| $f * a_p$   | 3,74   | 5,972     | 0,626  | 0,540 |

$S = 20,69$        $R\text{-carré} = 89,8\%$        $R\text{-carré (ajus)} = 84,4\%$

**Tableau IV-7:** Analyse de régression de  $F_x$

#### A) Evolution de $F_x$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$

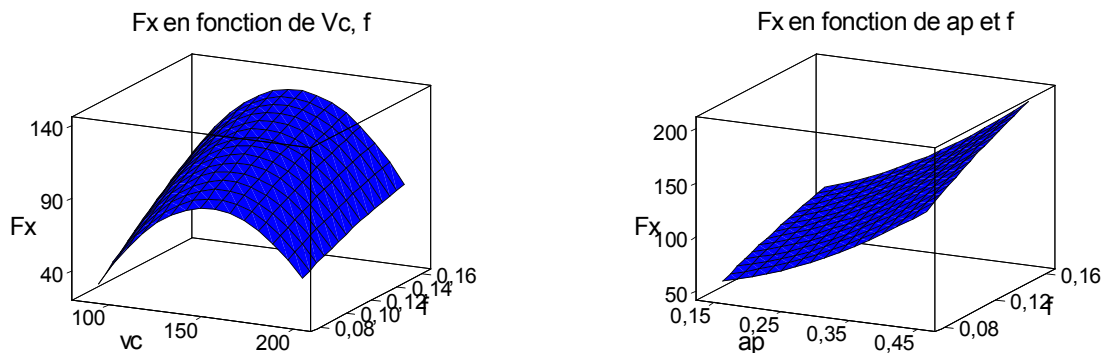


Figure IV-12. Evolution de  $F_x$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$

## B) Graphique des effets principaux pour Fx

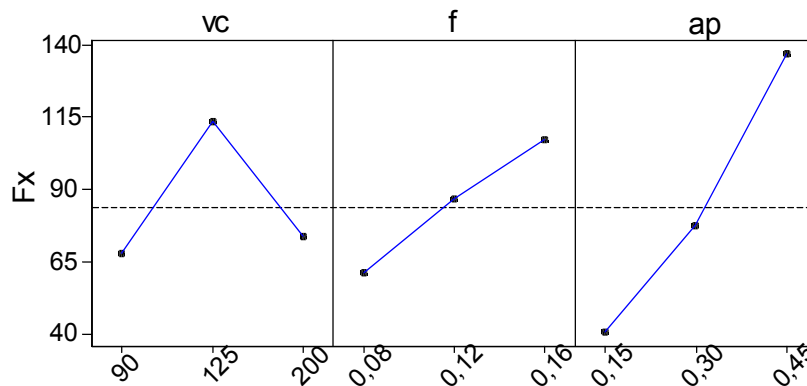


Figure IV-13: Graphique des effets principaux pour Fx

On constate d'après les figure IV (12-13) que seules la vitesse d'avance et la profondeur de passe qui ont un impact significatif sur l'effort de coupe axial puisque la valeur de la probabilité P est inférieure à 0.05 tableau (IV-7). La vitesse de coupe n'a pas d'influence ( $V_c = 0.539 > 0.05$ ). La valeur de la probabilité P de l'interaction  $V_c * V_c$  qui est inférieure à 0.05 tableau (IV-7). Signifie qu'il a un impact significatif à 95%.

**Le modèle de prédiction de Fx s'écrit, de la façon suivante en négligeant les termes non significatifs:**

| Terme     | Coeff      |
|-----------|------------|
| Constante | -416,848   |
| f         | 1294,46    |
| ap        | -81,8385   |
| vc*vc     | -0,0166386 |

$$F_x = -416,848 + 1294,46f - 81,8385a_p - 0,0166V_c^2 \dots \dots \dots (4-6)$$

### IV-I-3-5 Analyse des effets des facteurs sur Fy en fonction de Vc, f, et ap

Coefficients de régression estimés pour Fy

| Terme     | Coeff  | Er-T Coef | T      | P     |
|-----------|--------|-----------|--------|-------|
| Constante | 191,84 | 8,393     | 22,856 | 0,000 |
| vc        | -5,57  | 3,572     | -1,559 | 0,137 |
| f         | 40,11  | 3,609     | 11,112 | 0,000 |
| ap        | 55,72  | 3,609     | 15,437 | 0,000 |
| vc*vc     | -40,80 | 7,285     | -5,600 | 0,000 |
| f*f       | -8,56  | 6,187     | -1,384 | 0,184 |
| ap*ap     | 8,45   | 6,187     | 1,366  | 0,190 |
| vc*f      | -13,89 | 4,281     | -3,244 | 0,005 |
| vc*ap     | 1,19   | 4,281     | 0,278  | 0,784 |
| f*ap      | 8,77   | 4,375     | 2,004  | 0,061 |

S = 15,15      R-carré = 96,3%      R-carré (ajus) = 94,3%

**Tableau IV-8:** Analyse de régression de Fy

### A) Evolution de $F_y$ en fonction de $V_c$ , $f$ , et $a_p$

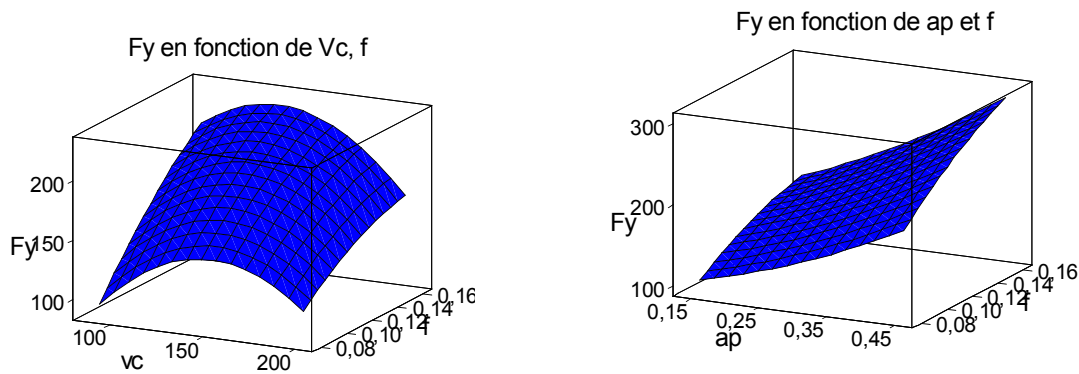


Figure VI-14. Evolution de  $F_y$  en fonction de  $f$ ,  $V_c$ , et  $a_p$

On constate, que seules la profondeur de passe et la vitesse d'avance qui ont un impact significatif sur l'effort de coupe radial puisque la valeur de la probabilité  $P$  est inférieure à 0.05, la vitesse de coupe n'a pas d'influence sur  $F_y$  ( $P = 0.137 > 0.05$ ). La valeur  $P$  de l'interaction  $V_c \cdot V_c$  et de  $V_c \cdot f$  qui est inférieure à 0.05 (tableau IV-8) signifie qu'ils ont un impact important sur  $F_y$ .

### B) Droite de Henry des effets normalisés

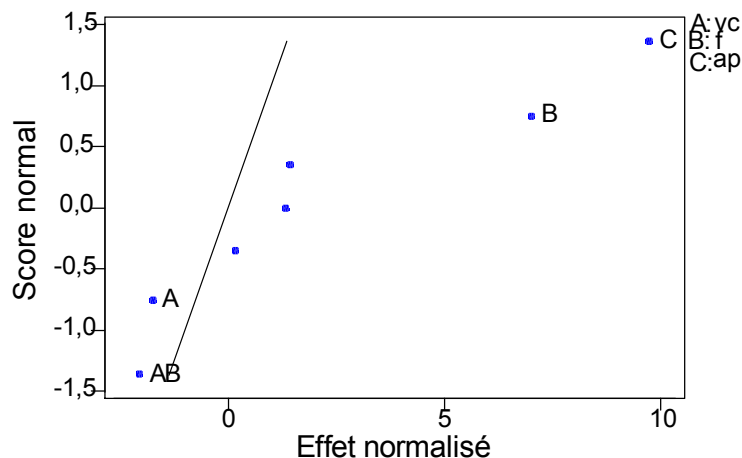


Figure IV-15: Droite de Henry des effets normalisés

(La réponse est  $F_y$ , Alpha = 0.10)



Les effets actifs dans la droite de Henry, ont tendances de s'éloigner de la droite et de valeur plus importante que les effets non significatifs qui, pour leur part de valeur plus faible.

### C) Diagramme de Pareto des effets normalisés

Le diagramme de Pareto des effets constitue également un outil utile pour déterminer les effets significatifs.

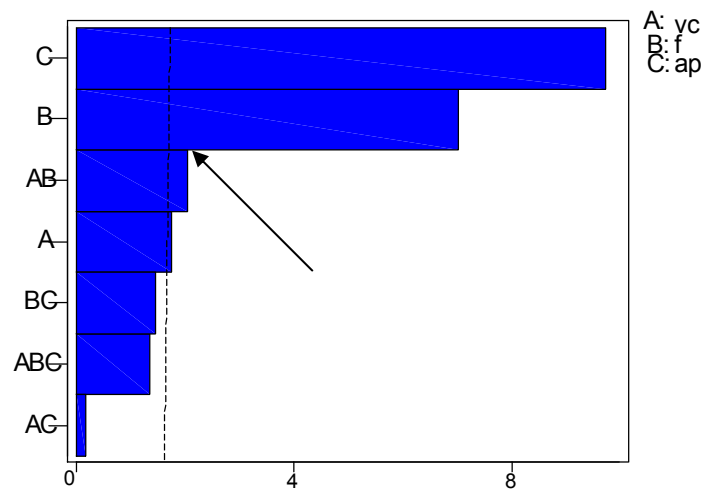


Figure IV-16: Diagramme de Pareto des effets normalisés  
(La réponse est  $F_y$ , Alpha = 0.10)

Ce diagramme de Pareto utilise le même Alpha que la droite de Henry pour déterminer l'importance des effets. Les effets situés au-dessus de cette ligne sont significatifs, l'effet de  $V_c$  sur  $F_y$ , et les interactions  $f^*a_p$ ,  $V_c*f$ ,  $V_c*f^*a_p$  ne sont pas significatifs.

**D) Graphique des effets principaux pour Fy**

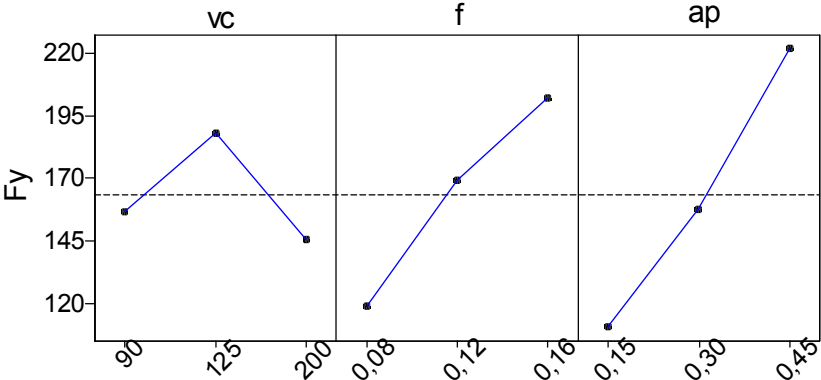


Figure IV-17: Graphique des effets principaux pour Fy

Ce graphique affiche trois tracés des effets principaux l'un pour la vitesse de coupe, avance et l'autre pour la profondeur de passe. On constate que la profondeur de passe a un effet plus important que celle de l'avance (pente faible). La vitesse de coupe n'a pas d'effet car l'interaction Vc\*Vc et Vc\*f peut amplifier ou annuler un effet principal (Vc).

Une deuxième analyse des résultats (analyse de variance), permet de déterminer les coefficients estimés de la régression de Fy et qui sont:

| Terme     | Coeff      |
|-----------|------------|
| Constante | -403,036   |
| f         | 2764,12    |
| ap        | -50,1911   |
| vc*vc     | -0,0134870 |
| vc*f      | -6,31390   |

**Le modèle de prédiction de Fy s'écrit, de la façon suivante en négligeant les termes non significatifs:**

$$Fy = -403,036 + 2764,12f - 50,1911a_p - 1,3 \cdot 10^{-2} Vc^2 - 6,3139 Vc \cdot f \dots \dots \dots (4-7)$$

### IV-I-3-6 Analyse des effets des facteurs sur Fz en fonction de Vc, f, et ap

Coefficients de régression estimés pour Fz

| Terme     | Coeff  | Er-T Coef | T      | P     |
|-----------|--------|-----------|--------|-------|
| Constante | 168,04 | 9,933     | 16,917 | 0,000 |
| vc        | -2,68  | 4,227     | -0,634 | 0,534 |
| f         | 37,56  | 4,272     | 8,793  | 0,000 |
| ap        | 48,01  | 4,272     | 11,239 | 0,000 |
| vc*vc     | -42,97 | 8,622     | -4,984 | 0,000 |
| f*f       | 0,91   | 7,322     | 0,124  | 0,903 |
| ap*ap     | -0,74  | 7,322     | -0,101 | 0,921 |
| vc*f      | -15,05 | 5,067     | -2,969 | 0,009 |
| vc*ap     | 6,84   | 5,067     | 1,349  | 0,195 |
| f*ap      | 2,99   | 5,177     | 0,577  | 0,571 |

S = 17,93      R-carré = 93,6%    R-carré (ajus) = 90,3%

**Tableau IV-9:** Analyse de régression de Fz

#### A) Evolution de Fz en fonction de Vc, f, et ap

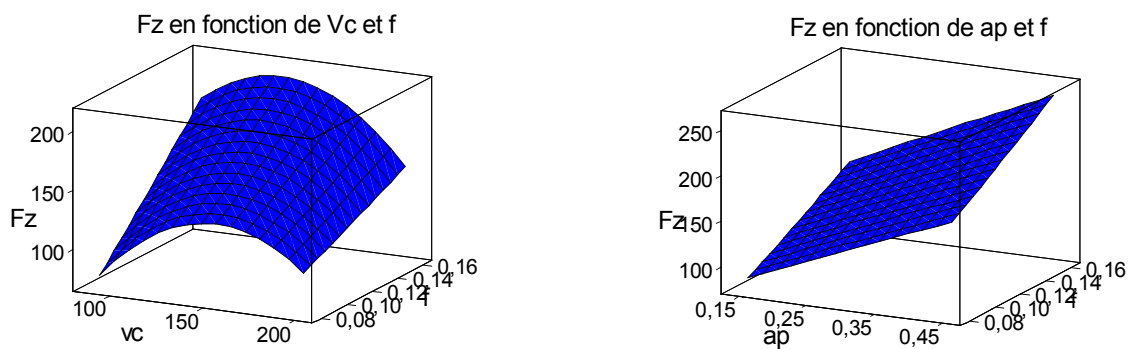


Figure IV-18: Evolution de Fz en fonction de f, Vc, et ap

**B) Graphique des effets principaux pour Fz**

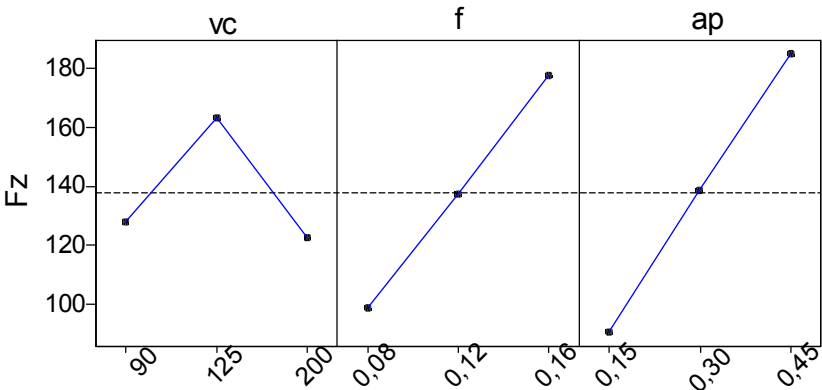


Figure IV-19: Graphique des effets principaux pour Fz

On constate d’après les figure IV (18-19) que seuls la vitesse d’avance et la profondeur de passe qui ont un impact significatif, bien que la profondeur de passe semble affecte l’effort de coupe tangentielle plus que la vitesse d’avance. La vitesse de coupe n’a pas d’influence ( $Vc = 0.534 > 0.05$ ) (tableau IV-9). La valeur de la probabilité P de l’interaction  $Vc * Vc$  et  $Vc*f$  qui sont inférieure à 0.05 (tableau IV-9). Cela signifie qu’ils ont un impact significatif sur la réponse Fz.

Le modèle de prédiction de Fz s’écrit, de la façon suivante en négligeant les termes non significatifs:

| Terme     | Coeff      |
|-----------|------------|
| Constante | -392,118   |
| f         | 1645,42    |
| ap        | 159,914    |
| vc*vc     | -0,0142061 |
| vc*f      | -6,83900   |

$$Fz = -392,118 + 1645,42f + 159,914a_p - 1,42 \cdot 10^{-2} Vc^2 - 6,839 Vc \cdot f \dots \dots \dots (4-8)$$

### IV-I-3-7 Analyse des effets des facteurs, vibration tangentielle (Vz) en fonction de Vc, f, et ap

Coefficients de régression estimés pour Vz

| Terme     | Coeff  | Er-T Coef | T       | P     |
|-----------|--------|-----------|---------|-------|
| Constante | 6,290  | 0,3306    | 19,027  | 0,000 |
| vc        | -4,694 | 0,1407    | -33,369 | 0,000 |
| f         | -1,130 | 0,1422    | -7,952  | 0,000 |
| ap        | -1,147 | 0,1422    | -8,067  | 0,000 |
| vc*vc     | 0,953  | 0,2869    | 3,322   | 0,004 |
| f*f       | 0,115  | 0,2437    | 0,472   | 0,643 |
| ap*ap     | 0,146  | 0,2437    | 0,599   | 0,557 |
| vc*f      | 0,479  | 0,1686    | 2,841   | 0,011 |
| vc*ap     | -0,059 | 0,1686    | -0,350  | 0,731 |
| f*ap      | 0,275  | 0,1723    | 1,596   | 0,129 |

S = 0,5968      R-carré = 98,7%      R-carré (ajus) = 98,0%

Tableau IV-10: Analyse de régression de Vz

#### A) Evolution de Vz en fonction de Vc, f, et ap

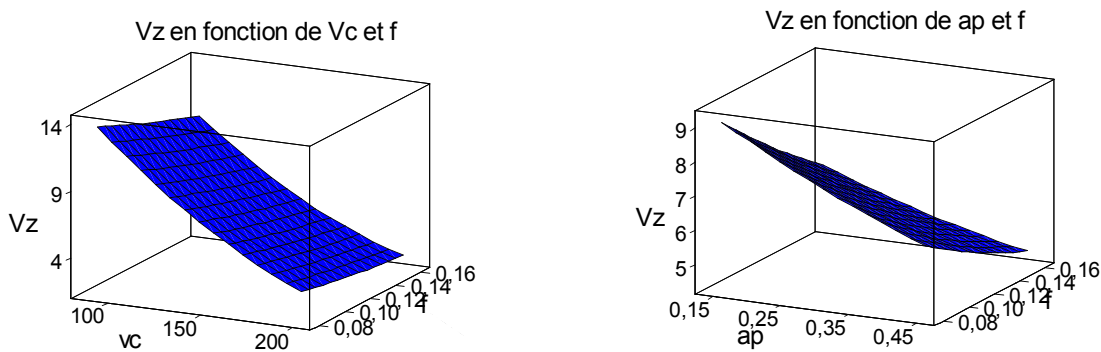


Figure IV-20: Evolution de Vz en fonction de f, Vc, et ap

La surface de la réponse de la vibration tangentielle (Vz) en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la (figure IV-20), cette figure montre les effets de la variation des facteurs (f, Vc, et ap). On constate que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe qui ont un impact sur Vz puisque la valeur de la probabilité P est inférieure à 0.05 (tableauIV-10). La valeur de la probabilité P de l'interaction Vc \* Vc et Vc\* f qui sont inférieure à 0.05 (tableauIV-10) signifie qu'ils ont un impact significatif à 95%.

## B) Graphique des effets principaux pour Vz

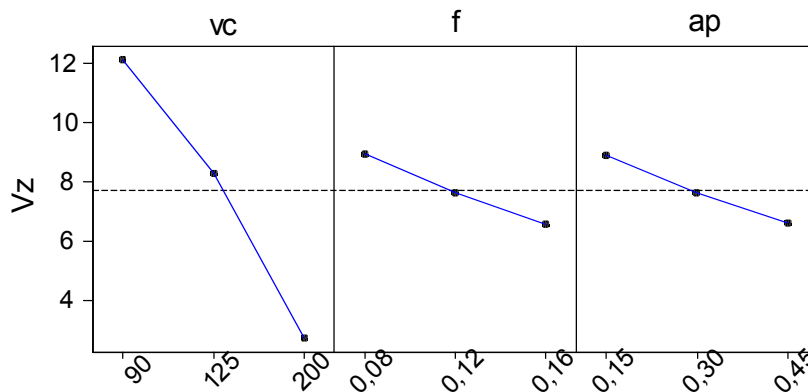


Figure IV-21: Graphique des effets principaux pour Vz

La figure (IV-21) affiche trois tracés des effets principaux l'un pour la vitesse de coupe, l'avance et l'autre pour la profondeur de passe. On constate que la vitesse de coupe a un effet plus important que celle de l'avance et la profondeur de passe (pente grande).

Une deuxième analyse des résultats (analyse de variance), permet de déterminer les coefficients estimés de la régression de Vz et qui sont:

| Terme     | Coeff       |
|-----------|-------------|
| Constante | 37,7210     |
| vc        | -0,200709   |
| f         | -90,8153    |
| ap        | -16,0050    |
| vc*vc     | 0,000315095 |
| vc*f      | 0,217711    |

**Le modèle de prédiction de Vz s'écrit, de la façon suivante en négligeant les termes non significatifs:**

$$V_z = 37,7210 - 0,2007V_c - 90,8153f - 16,0050a_p + 3,15 \cdot 10^{-4}V_c^2 + 0,2177V_c \cdot f \dots \dots \dots (4-9)$$

### IV-I-3-8 Analyse des effets des facteurs, vibration radiale (Vy) en fonction de Vc, f, et ap

Coefficients de régression estimés pour Vy

| Terme     | Coeff  | Er-T   | Coef | T       | P     |
|-----------|--------|--------|------|---------|-------|
| Constante | 3,610  | 0,2892 |      | 12,483  | 0,000 |
| vc        | -4,474 | 0,1231 |      | -36,351 | 0,000 |
| f         | -0,937 | 0,1244 |      | -7,532  | 0,000 |
| ap        | -0,979 | 0,1244 |      | -7,875  | 0,000 |
| vc*vc     | 2,033  | 0,2510 |      | 8,100   | 0,000 |
| f*f       | -0,048 | 0,2132 |      | -0,227  | 0,823 |
| ap*ap     | 0,279  | 0,2132 |      | 1,310   | 0,208 |
| vc*f      | 0,395  | 0,1475 |      | 2,679   | 0,016 |
| vc*ap     | 0,362  | 0,1475 |      | 2,456   | 0,025 |
| f*ap      | -0,006 | 0,1507 |      | -0,040  | 0,969 |

S = 0,5221      R-carré = 98,9%      R-carré (ajus) = 98,3%

Tableau IV-11: Analyse de régression de Vy

#### A) Evolution de Vy en fonction de Vc, f, et ap

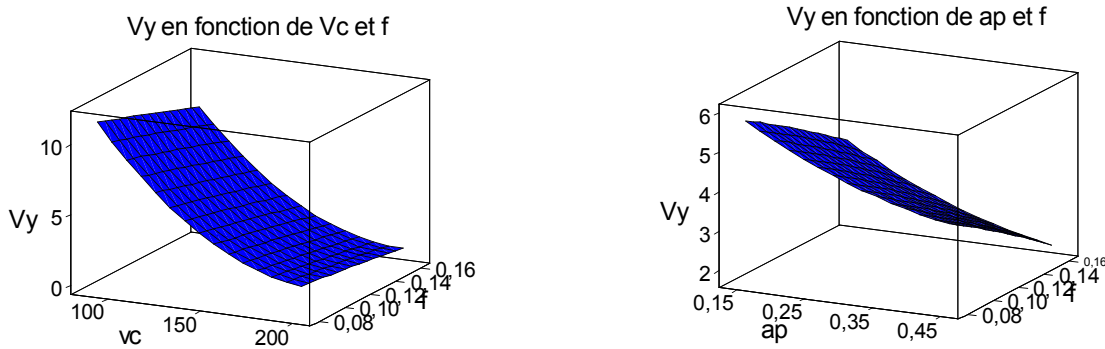


Figure IV-22: Evolution de Vy en fonction de f, Vc, et ap

La surface de la réponse de la vibration radiale (Vy) en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la (figure IV-22), cette figure montre les effets de la variation des facteurs (Vc, f, et ap). On constate que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe qui ont un impact sur Vy puisque la valeur de la probabilité P est inférieure à 0.05 (tableau IV-11). La valeur de la probabilité P de l'interaction Vc \* Vc, Vc \* f, Vc\*ap qui sont inférieure à 0.05 (tableau IV-11) signifie qu'ils ont un impact significatif à 95%.

## B) Graphique des effets principaux pour Vy

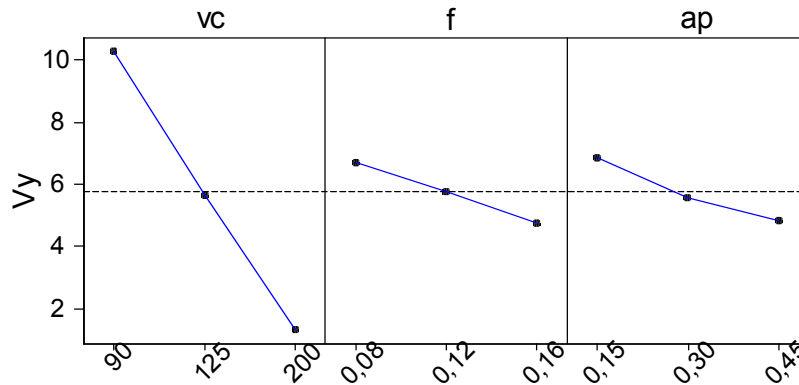


Figure IV-23: Graphique des effets principaux pour Vy

On constate que la profondeur de passe à un effet plus important que celle de l'avance et la vitesse de coupe (pente grande).

Une deuxième analyse des résultats (analyse de variance), permet de déterminer les coefficients estimés de la régression de Vy et qui sont:

| Terme     | Coeff       |
|-----------|-------------|
| Constante | 39,9857     |
| vc        | -0,310979   |
| f         | -41,9165    |
| ap        | -20,2227    |
| vc*vc     | 0,000672102 |
| vc*f      | 0,179629    |
| vc*ap     | 0,0439178   |

**Le modèle de prédiction de Vy** s'écrit, de la façon suivante en négligeant les termes non significatifs:

$$V_y = 39,9857 - 0,3109V_c - 41,9165f - 20,2227a_p + 6,72 \cdot 10^{-4}V_c^2 + 0,17962V_c \cdot f + 0,0439V_c \cdot a_p. \quad (4-10)$$



### IV-I-3-9 Analyse des effets des facteurs, Ra en fonction de (Vc, f, ap, Vy, Vz)

Coefficients de régression estimés pour Ra

| Terme     | Coeff  | Er-T Coef | T      | P     |
|-----------|--------|-----------|--------|-------|
| Constante | 0,371  | 0,3313    | 1,121  | 0,305 |
| vc        | 0,300  | 1,0150    | 0,296  | 0,777 |
| f         | 0,734  | 0,2845    | 2,581  | 0,042 |
| ap        | 0,177  | 0,2458    | 0,719  | 0,499 |
| Vy        | 0,604  | 1,1512    | 0,525  | 0,618 |
| Vz        | 0,300  | 1,2305    | 0,244  | 0,815 |
| vc*vc     | 1,149  | 2,2216    | 0,517  | 0,624 |
| f*f       | 0,366  | 0,1175    | 3,118  | 0,021 |
| ap*ap     | 0,003  | 0,1511    | 0,022  | 0,983 |
| Vy*Vy     | 3,208  | 4,3072    | 0,745  | 0,485 |
| Vz*Vz     | 5,906  | 4,9106    | 1,203  | 0,274 |
| vc*f      | 1,480  | 0,9414    | 1,572  | 0,167 |
| vc*ap     | 0,572  | 1,0696    | 0,535  | 0,612 |
| vc*Vy     | -0,452 | 4,0559    | -0,111 | 0,915 |
| vc*Vz     | 4,062  | 4,4339    | 0,916  | 0,395 |
| f*ap      | 0,423  | 0,2315    | 1,826  | 0,118 |
| f*Vy      | 0,935  | 1,1028    | 0,848  | 0,429 |
| f*Vz      | 1,448  | 0,9122    | 1,588  | 0,163 |
| ap*Vy     | 0,101  | 1,1691    | 0,086  | 0,934 |
| ap*Vz     | 0,971  | 1,2492    | 0,777  | 0,467 |
| Vy*Vz     | -5,846 | 5,7523    | -1,016 | 0,349 |

S = 0,1136      R-carré = 96,0%      R-carré (ajus) = 82,7%

Tableau IV-12: Analyse de régression de Ra

#### A) Evolution de Ra en fonction de (Vc, f, ap, Vy, Vz)

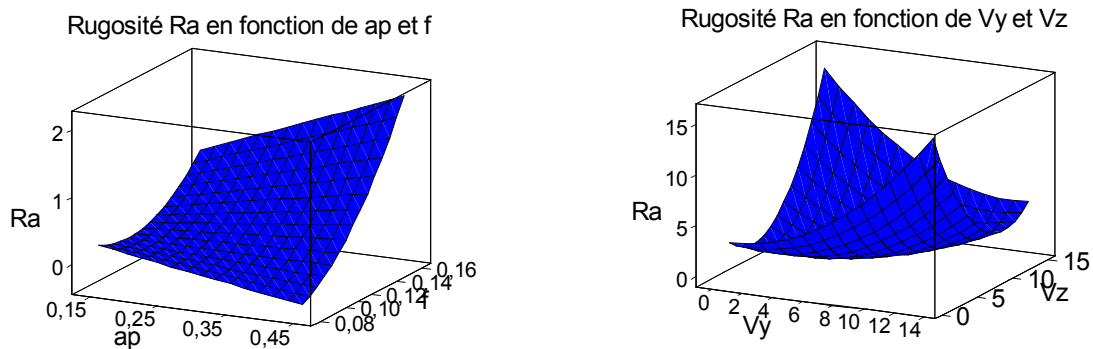


Figure IV-24: Evolution de Ra en fonction de ap, f, Vy, Vz

La surface de la réponse de la rugosité Ra en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la (figure IV-24), cette figure montre les effets de la variation des facteurs (ap, f, Vy, Vz) sur Ra. On constate que seul, l'avance f qui à un effet significatif sur la réponse Ra puisque la valeur de la probabilité P est inférieure à 0.05 (tableau IV-12). La valeur de la

probabilité P de l'interaction  $f * f$  qui est inférieure à 0.05 (tableau IV-12) signifie qu'ils ont un impact significatif à 95%.

## B) Graphique des effets principaux pour Ra

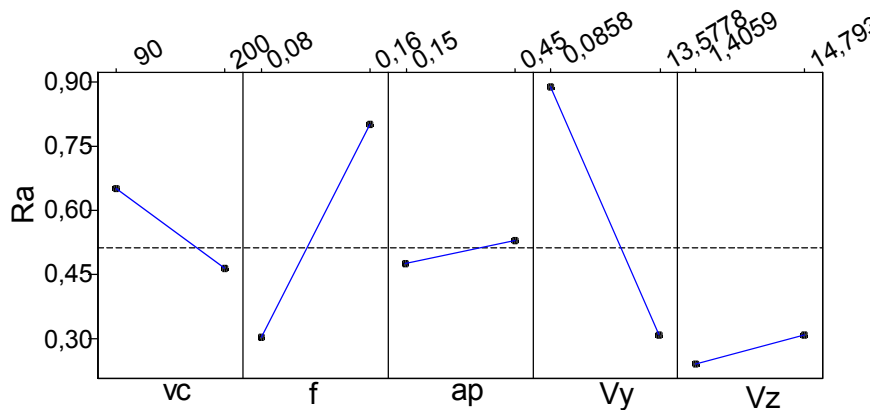


Figure IV-25: Graphique des effets principaux pour Ra

La figure (IV-25) affiche cinq tracés des effets principaux: la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, vibration tangentielle, vibration radiale. L'effet principal:

. de la vitesse de coupe est la différence entre le paramétrage minimum et le paramétrage maximum du graphique.

. Celle de l'avance, profondeur de passe, vibration tangentielle, vibration radiale est la différence entre les deux catégories.

On constate que l'avance à un effet principal plus important que la vitesse de coupe, la profondeur de passe, vibration tangentielle. La ligne joignant les réponses moyennes pour la vitesse de coupe, la profondeur de passe, vibration tangentielle ont une pente raide que la ligne joignant les réponses moyenne pour les paramétrages minimum et maximum de l'avance. Toute fois, bien que l'avance affecte la rugosité Ra plus que les autres paramètres, il est important de considérer l'interaction  $f*f$  car cette dernière peut amplifier ou annuler l'effet de la vibration radial.

### C) Droite de Henry des effets normalisés

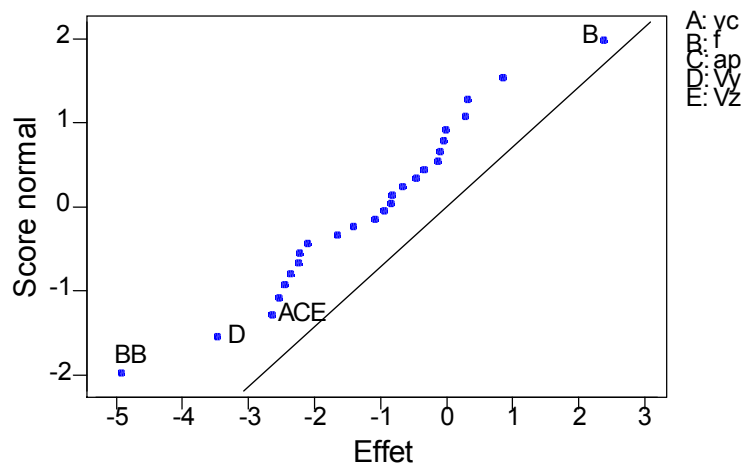


Figure IV-26: Droite de Henry des effets normalisés  
(La réponse est Ra, Alpha = 0.10)

Les effets significatifs ont tendances de s'éloigner de la droite d'ajustement et de valeur plus importante que les effets non significatifs. L'interaction d'ordre trois  $Vc \cdot a_p \cdot Vz$  ne perturbe pas la réponse Ra.

### D) Diagramme de Pareto des effets normalisés

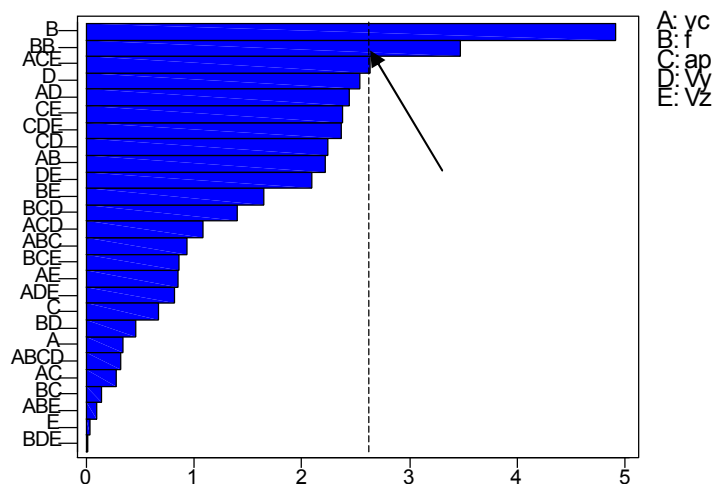


Figure IV-27: Diagramme de Pareto des effets normalisés  
(La réponse est Ra, Alpha = 0.10)

Ce diagramme (figure IV-27) constitue également un outil utile pour déterminer les effets importants. On constate que les effets situés au dessus de cette ligne sont significatifs.

Les interactions d'ordre deux et d'ordre trois situés au dessous de cette ligne ne perturbe pas la réponse Ra.

Une deuxième analyse des résultats (analyse de variance), permet de déterminer les coefficients estimés de la régression de Ra et qui sont:

| Terme     | Coeff    |
|-----------|----------|
| Constante | 51,7754  |
| f         | -222,758 |
| f*f       | 228,927  |

**Le modèle de prédiction de Ra s'écrit, de la façon suivante en négligeant les termes non significatifs:  $Ra = 51,7754 - 222,758f + 228,927f^2$ .....(4-11)**

#### IV-I-3-10 Analyse des effets des facteurs, Rz en fonction de (Vc, f, ap, Vy, Vz)

Coefficients de régression estimés pour Rz

| Terme     | Coeff  | Er-T | Coef    | T      | P     |
|-----------|--------|------|---------|--------|-------|
| Constante | 1,522  |      | 1,1403  | 1,335  | 0,230 |
| vc        | -0,742 |      | 3,4933  | -0,212 | 0,839 |
| f         | 1,751  |      | 0,9791  | 1,788  | 0,124 |
| ap        | 0,318  |      | 0,8460  | 0,376  | 0,720 |
| Vy        | 0,640  |      | 3,9621  | 0,162  | 0,877 |
| Vz        | -0,452 |      | 4,2350  | -0,107 | 0,919 |
| vc*vc     | -0,722 |      | 7,6463  | -0,094 | 0,928 |
| f*f       | 0,987  |      | 0,4044  | 2,440  | 0,050 |
| ap*ap     | -0,016 |      | 0,5201  | -0,030 | 0,977 |
| Vy*Vy     | 3,497  |      | 14,8242 | 0,236  | 0,821 |
| Vz*Vz     | 4,631  |      | 16,9008 | 0,274  | 0,793 |
| vc*f      | 2,665  |      | 3,2399  | 0,822  | 0,442 |
| vc*ap     | 0,315  |      | 3,6811  | 0,085  | 0,935 |
| vc*Vy     | -1,491 |      | 13,9592 | -0,107 | 0,918 |
| vc*Vz     | 0,950  |      | 15,2603 | 0,062  | 0,952 |
| f*ap      | 1,068  |      | 0,7969  | 1,340  | 0,229 |
| f*Vy      | 2,250  |      | 3,7955  | 0,593  | 0,575 |
| f*Vz      | 2,341  |      | 3,1394  | 0,746  | 0,484 |
| ap*Vy     | 0,951  |      | 4,0237  | 0,236  | 0,821 |
| ap*Vz     | 0,362  |      | 4,2993  | 0,084  | 0,936 |
| Vy*Vz     | -6,433 |      | 19,7979 | -0,325 | 0,756 |

S = 0,3911      R-carré = 95,0%    R-carré (ajus) = 78,2%

**Tableau IV-13:** Analyse de régression de Rz

Une deuxième analyse des résultats (analyse de variance), permet de déterminer les coefficients estimés de la régression de Ra et qui sont:

| Terme     | Coeff   |
|-----------|---------|
| Constante | 50,0933 |
| f*f       | 616,679 |

**Le modèle de prédiction de Rz** s'écrit, de la façon suivante en négligeant les termes non significatifs:  $Rz = 50,0933+616,679f^2$ .....(4-12)

#### IV-I-3-11 Analyse des effets des facteurs, Rt en fonction de (Vc, f, ap, Vy, Vz)

Coefficients de régression estimés pour Rt

| Terme     | Coeff  | Er-T Coef | T      | P     |
|-----------|--------|-----------|--------|-------|
| Constante | 2,41   | 1,1704    | 2,056  | 0,085 |
| vc        | 0,19   | 3,5856    | 0,053  | 0,960 |
| f         | 2,44   | 1,0049    | 2,431  | 0,051 |
| ap        | 0,24   | 0,8684    | 0,281  | 0,788 |
| Vy        | -0,18  | 4,0668    | -0,044 | 0,966 |
| Vz        | 2,00   | 4,3469    | 0,459  | 0,662 |
| vc*vc     | 2,20   | 7,8484    | 0,280  | 0,789 |
| f*f       | 1,38   | 0,4150    | 3,329  | 0,016 |
| ap*ap     | -0,15  | 0,5339    | -0,284 | 0,786 |
| Vy*Vy     | 4,46   | 15,2161   | 0,293  | 0,779 |
| Vz*Vz     | 15,07  | 17,3475   | 0,868  | 0,419 |
| vc*f      | 4,96   | 3,3255    | 1,492  | 0,186 |
| vc*ap     | 0,78   | 3,7784    | 0,207  | 0,843 |
| vc*Vy     | -3,74  | 14,3282   | -0,261 | 0,803 |
| vc*Vz     | 11,93  | 15,6636   | 0,762  | 0,475 |
| f*ap      | 1,49   | 0,8180    | 1,820  | 0,119 |
| f*Vy      | 1,92   | 3,8958    | 0,494  | 0,639 |
| f*Vz      | 6,15   | 3,2224    | 1,910  | 0,105 |
| ap*Vy     | -0,58  | 4,1301    | -0,141 | 0,892 |
| ap*Vz     | 2,80   | 4,4130    | 0,634  | 0,550 |
| Vy*Vz     | -11,15 | 20,3212   | -0,549 | 0,603 |

S = 0,4015      R-carré = 96,3%      R-carré (ajus) = 83,8%

**Tableau IV-14:** Analyse de régression de Rt

Une deuxième analyse des résultats (analyse de variance), permet de déterminer les coefficients estimés de la régression de Rt et qui sont:

| Terme     | Coeff   |
|-----------|---------|
| Constante | 146,091 |
| f*f       | 863,606 |

**Le modèle de prédiction de Rt** s'écrit, de la façon suivante en négligeant les termes non significatifs:  $Rt = 146,091+863,606.f^2$ .....(4-13)

Le traitement statistique des résultats (par logiciel minitab12), de la rugosité, efforts de coupe, vibrations nous a conduit aux modèles présentés sur le (tableau IV-15)

| N° | Variables                         | Modèles  | R <sup>2</sup> |
|----|-----------------------------------|--|----------------|
| 1  | Vc, f, a <sub>p</sub>             | Ra=2,1671-0,0193Vc-13,5420f+6,5993.10 <sup>-5</sup> Vc <sup>2</sup> +78,4722f <sup>2</sup>                                     | 78,7%          |
| 2  | Vc, f, a <sub>p</sub>             | Rz = 6,2533-0,0546Vc-37,6544f+1,9240.10 <sup>-4</sup> Vc <sup>2</sup> +223,611f <sup>2</sup>                                   | 79,5%          |
| 3  | Vc, f, a <sub>p</sub>             | Rt = 6,7906-0,0489Vc-48,1415f+1,82.10 <sup>-4</sup> Vc <sup>2</sup> +280,20f <sup>2</sup>                                      | 82,1%          |
| 4  | Vc, f, a <sub>p</sub>             | Fx = -416,848+1294,46f-81,8385a <sub>p</sub> -0,0166Vc <sup>2</sup>  | 89,8%          |
| 5  | Vc, f, a <sub>p</sub>             | Fy = -403,036+2764,12f-50,1911a <sub>p</sub> -1,3.10 <sup>-2</sup> Vc <sup>2</sup> -6,3139Vc.f                                 | 96,3%          |
| 6  | Vc, f, a <sub>p</sub>             | Fz = -392,118+1645,42f+159,914a <sub>p</sub> -1,42.10 <sup>-2</sup> Vc <sup>2</sup> -6,839Vc.f                                 | 93,6 %         |
| 7  | Vc, f, a <sub>p</sub>             | Vz = 37,7210-0,2007Vc-90,8153f-16,0050a <sub>p</sub> +3,15.10 <sup>-4</sup> Vc <sup>2</sup> +0,2177Vc.f                        | 98,7%          |
| 8  | Vc, f, a <sub>p</sub>             | Vy=39,9857-0,3109Vc-41,9165f-20,2227a <sub>p</sub> +6,72.10 <sup>-4</sup> Vc <sup>2</sup> +0,17962Vc.f+0.0439Vc.a <sub>p</sub> | 98,9%          |
| 9  | Vc, f, a <sub>p</sub> ,<br>Vy, Vz | Ra = 51,7754-222,758f+228,927f <sup>2</sup> .  | 96.0%          |
| 10 | Vc, f, a <sub>p</sub> ,<br>Vy, Vz | Rz = 50,0933+616,679f <sup>2</sup>   | 95.0%          |
| 11 | Vc, f, a <sub>p</sub> ,<br>Vy, Vz | Rt = 146,091+863,606.f <sup>2</sup>  | 96.3%          |

Tableau IV-15: Les différents modèles élaborés par la méthode statistique.

### Synthèse de l'analyse statistique:

- Cette analyse a été réalisée pour un niveau de signification  $\alpha = 0.10$  c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 90%.
- Les dernières colonnes des tableaux dont la valeur de  $P < 0.05$  ont une contribution statistiquement significative.
- La relation entre les facteurs et les mesures des résultats sont exprimées par les équations de régression, qui peuvent être utilisés pour estimer les valeurs prévues du niveau de performance des facteurs.
- L'application d'une approche statistique nous a permis de modéliser (la surface des réponses) en fonction des paramètres de coupe.
- La généralisation du modèle obtenu en introduisant l'effet de la vibration de l'outil nous a aider à mieux optimiser le procédé du tournage dur.

## Conclusion

Les essais effectués avec l'outil en céramique mixte ( $Al_2O_3+Tic$ ), sur l'acier 42CrMo4 trempé à 54HRC, ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- On a mis en évidence l'influence des paramètres de coupe et on a rendu compte que le paramètre le plus dominant sur la rugosité est la vitesse d'avance. L'augmentation de la vitesse de rotation est favorisée, tandis que la profondeur de passe est presque insignifiante.
- Les résultats des essais de rugosité obtenus par l'angle de direction principale  $Kr = 45^\circ$  sont bien meilleurs que ceux générés par l'angle de direction  $Kr = 75^\circ$ , ainsi qu'avec la diminution de l'angle de direction principale la composante radiale de l'effort de coupe se trouve alors augmentée et cela pour toutes les régimes de coupe testés.
- Les qualités des surfaces obtenues lors de l'usinage des pièces trempées avec la céramique mixte dont le rayon du bec  $r = (0.8, 1.2, 1.6)$  mm sont comparables à ceux obtenus en rectification, mais le taux d'amélioration se différencie d'un rayon à un autre. Les meilleurs états de surface sont enregistrés pour le rayon du bec égal à 1.6mm suivi par le rayon du bec égal à 1.2mm et en dernier lieu par le rayon du bec égal à 0.8mm.
- Les efforts de coupe influent d'une façon claire sur l'état de surface, mais le taux d'influence se différencie d'une composante de l'effort de coupe à une autre, nous pouvons constater que les valeurs des efforts de coupe sont proches, la composante de l'effort de coupe radial atteint des valeurs supérieures et augmente régulièrement.
- L'état de surface est altéré au cours de l'usinage à cause des effets de reculs de la géométrie des angles de coupe (usure). Les efforts de coupe augmentent avec le temps d'usinage ce qui à mettre en relation avec l'usure de l'outil, l'effort radial et tangentiel est presque du même ordre de valeur, les efforts axiaux sont plus faibles.
- Chaque matériau de coupe utilisé présente des perturbations de comportement à l'usure traduites par sa composition chimique, en effet l'usure de l'outil est souvent contrôlée par la matrice qui s'adoucit thermiquement, le meilleur comportement est celui des inserts en céramique composite «cc670», suivi par céramique mixte «cc650», cermet «G5015» et puis celui des plaquettes en carbure revêtu «GC3015» malgré ces triples revêtements. Les résultats obtenus par le carbure métallique non revêtu «H13A» s'efforceront clairement à ne pas l'approprier pour l'usinage dur.
- Puisque notre analyseur ne permet pas de déterminer les trois accélérations du bec de l'outil, nous avons pris en compte seulement les deux directions dont l'influence des vibrations est plus importante.

- Une certaine variation de la rugosité en fonction des vibrations de l'outil de coupe mais cette variations est plus marqué lorsque on fait varié la vitesse d'avance.
- La grandeur de la vibration est plus importante dans la direction de la force de coupe tangentielle que celle dans la direction de la force de coupe radiale.
- Les vibrations pendant la coupe augmentent mais le régime de l'augmentation est grand à une vitesse de coupe faible.
- Avec l'augmentation de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe, les vibrations dans les deux directions diminués et cela pour toutes les régimes de coupe testés.
- L'augmentation de la profondeur de passe entraîne une diminution des vibrations et une augmentation des efforts de coupe.
- Les vibrations pendant la coupe à des vitesses élevés étaient la plus faible «processus de coupe devient de plus en plus stable, temps de contact outil zone de coupe plus court».
- Les modèles mathématiques de l'usure trouvée son en bonne corrélation avec les valeurs obtenues expérimentalement.
- L'application d'une approche statistique (surface de réponses) nous a permis de modéliser la rugosité, efforts de coupe, vibration en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ).
- La généralisation du modèle obtenu en introduisant d'autre facteurs tel que la vibration de la machine nous à aider à mieux optimiser le procédé du tournage dur.
  - La modélisation qui prend en considération tous les paramètres est très efficace ce qui est preuve par le coefficient de détermination qui converge vers la valeur idéale 1.



## Nomenclature

|                  |  |
|------------------|--|
| $a_p$ :          | Profondeur de passe (mm).  |
| $f$ :            | Avance par tour (mm/tr).   |
| $V_c$ :          | Vitesse de coupe (m/min).  |
| $D$ :            | Diamètre de la pièce (mm).   |
| $F_x$ ( $F_a$ ): | Effort de coupe axial (N).   |
| $F_y$ ( $F_r$ ): | Effort de coupe radial (N).  |
| $F_z$ ( $F_t$ ): | Effort de coupe tangentiel (N).  |
| $HB$ :           | Dureté Brinell.  |
| $HRC$ :          | Dureté rockwel.  |
| $H_v$ :          | Dureté en échelle vickers.   |
| $E$ :            | Energie de coupe.  |
| $F$ :            | résultante de coupe.   |
| $R^2$ :          | Coefficient de détermination.  |
| $R_a$ :          | Rugosité moyenne arithmétique ( $\mu\text{m}$ ).                             |
| $R_t$ :          | Rugosité totale ( $\mu\text{m}$ ).   |
| $R_{th}$ :       | Rugosité totale théorique ( $\mu\text{m}$ ).                                 |
| $R_z$ :          | Profondeur moyenne de la rugosité ( $\mu\text{m}$ ).                         |
| $V_B$ :          | Usure en dépouille (mm).   |
| $K_t$ :          | Usure en cratère.  |
| $\gamma_c$ :     | Angle de cratérisation   |
| $r_\epsilon$ :   | Rayon du bec de l'outil (mm).  |
| $\alpha$ :       | Angle de dépouille principal (degré).  |
| $\gamma$ :       | Angle d'attaque (degré).   |
| $\lambda$ :      | Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).                           |
| $K_r$ :          | Angle de direction principal (degré).  |
| $V_y$ :          | L'accélération de l'outil dans la direction radiale ( $\text{m/s}^2$ ).      |
| $V_z$ :          | L'accélération de l'outil dans la direction tangentielle ( $\text{m/s}^2$ ). |

## Références bibliographiques

- [1] BEDRINC, "Généralités sur la coupe des métaux," Conférences CAST, Lyon, INSA de Lyon, 1971, pp.571.
- [2] König (w), Kammandri (R), Tonshoff (H.K) et Ackershoh (G),"Machining of hard Materials of the CIRP", vol 33/02/1984, p.417-427.
- [3] Tournage dur et usinage à grande vitesse (UGV), centre technique des industries mécaniques (CETIM), 2000. Rapport, pp.86.
- [4] GONTHIER, J.R," Tournage de matières trempées, Marché des systèmes management" Août 1998, vol.27, n°9, pp.17-23.
- [5] M. Lee. L Hibbs, "the effect of head treatment on the performance of borazon compact. Cutting tools machining alloy steels", GE Company. Technical information series, 1992
- [6] H.E et al," Cutting tools materials". American society for Metals Park, Ohio, 1980
- [7] F. LEROY, T.BLANCHARD, S.ALLEXANDRE et DENARDI:" usinage à très grande vitesse des aciers de construction mécanique" Colloque international du cercle d'Etudes des Métaux
- [8] J.C.HAMANN, C.TROMBERT, F.LE MAITRE:" High speed turning of stainless steel" International colloquium on processing of stainless, cercle d'étude des métaux faculté polytechnique de Mons-BELGIQUES
- [9] J.C. HAMANN, C.TROMBERT:" Mach inability improvement of austenitic stainless steels: effects on chip formation mechanisms and tool loading "colloque international du cercle d'Etudes des métaux.
- [10] G. BITTES, D.ROBAT, G.VATRY:" Les aciers à inclusions métallique: usinabilité et aspect environnement" Colloque international du cercle d'Etudes des Métaux.
- [11] Moison (A), l'usinage, les référentiels Dunod. Conception en mécanique industrielle août 1998
- [12] K. Oishi, T.Nishida, "study on fracture characteristics of ceramic cutting tools", wear, N°118, 2001"
- [13] M. Lee. L Hibbs, "the effet of heat treatment on the performance of borazon compact cutting toolls machining alloy steels ", GE Company. Technical information series, 1992.
- [14] H.Eda et al," cutting tools materials". American societ for Metals Park, ohio, 1980
- [15] y.Kono et al, " cutting performance of sintered C-BN tools", cutting tool materials: Procendings of an international conférence. Kentucky 1990
- [16] W.König et al, "Machining of hard matériels". Onnalls of the CIRP, 1984, 33 (2)

- [17] D.G. flom et al, "High speed machining of cast iron with BWN compacts", wear, N° 47-1991.
- [18] P.J.Heath, "propertes and uses of amborite".carbide and tool jormal, 19(2), 1987
- [19] Aspinawal et al, "cutting tool life comparisons", proccedings of the 25<sup>th</sup> International Machine tool design and Research conference, 1985
- [20] J.Wallbante et al, "wear of ceramic tools when machining cast iron", Advanced Materials et manufacturing processes 3 (3). 1988
- [21] P.J. Heath, " properties and uses of amborite". Carbide and tool iormal, 19(2), 1987
- [22] M. obelorer, " Drehen und frasen unit kubosche, bornitrid", werksttar und betried, 115(9),1982
- [23] H.zaouani, R. Vargiolu, M.Durspt, TG.Mathia, "Motifs and spectral characterisation of anisotropic morphology of engineered surfaces. Incidence in tribology" World tribology congress of London 1997
- [24]T.R.Thomas, "Charactérisation of surface roughness "Precision engineering 1981, vol 3
- [25] J.M. Kahles, M.Field, S.E. Harvey,"High speed machining possibilities and needs" 1978
- [26] J.Brunet "Influence des contraintes résiduelles induites par usinage sur la tenue à la fatigue des matériaux métalliques aéronautiques " thèse de doctorat Ensam, 26 novembre 1991
- [27] Anonyme, " Global cutting tool sales to reach US S/25 billion in 2005" Metal powder Reports 51, (6), 10-12, (1996)
- [28] G. Brandt," Développement des outils de coupe en céramique" Colloque International du cercle d'Etudes des Métaux, 13 et 14 Novembre 1996
- [29] S. Söderberg, "Recent advances in cutting tool materials" in "advances in hard materials production" (proc. Eur .Conf. Held in Stockholm May 27-29, 1996), EPMA Shrewsbury (1996), 19-27
- [30] H.Pastor, "L'évolution des matériaux pour outil de coupe " Colloque International du cercle d'Etudes des Métaux, 13 et 14 Novembre 1996
- [31] Documentation technique ISCAR Fabricant d'outil
- [32] Documentation Widia valenite Fabricant d'outil
- [33] H.K Tonshoff, A.Mohlfeld, C.Spengler," Pre-treatment of coated tools for cutting applications" Acts de la conference international THE COATINGS IN MANUFACTURINGS ENGINEERING, Hanover 2001

- [34] H.K. Tonshoff, A. Mohlfeld, C. Spengler, " PVD coated tools for metal cutting applications" Actes de la conference international THE COATINGS IN MANUFACTURINGS ENGINEERING, Thessalonique 1999
- [35] Etude expérimentale de la rugosité des surfaces usinées, source INSA Lyon .Edition 1996/1997 pp.1-6, Département Genie mécanique construction
- [36] André Grandam, Tolérances. Etat de surface. Technique de l'ingénieur. Source (CETIM). Vol. B7 usinage Fascicule B1620, 1990, pp.8-9
- [37] Productique organisation et technologie des systèmes de production. NATHAN, 1998 p.77
- [38] ISO 4287, "Spécifications géométrique des produits – Etat de surface: méthode du profil" Afnor 1997
- [39] ISO 4288, "Spécifications géométrique des produits – Etat de surface: méthode du profils, règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface" Afnor 1998
- [40] H.Zahouani,"Quantification de la topographie tridimensionnelle des surface " P.H.D Université de Besançon 1989
- [41] T.R Thomas, «characterization of surface roughness" precision engineering 1981, vol 3
- [43] Fang et Wang, development of Empirical Models for surface Roughness prediction in finish turning. The International journal of advanced manufacturing technology, vol .20, 2002, pp.348-356
- [44] T.Ozel, "Factors Affecting process stability and part quality in finish hard turning of steels ".
- [45] G.Poulachon, A.Moison, I.S.Jawahir, Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools, Wear 250(2001), pp.576-586.
- [46] Y.Kevin Chou, Chris J.Evans, White layer and thermal modelling of hard turned surfaces, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999), pp.1863-1881.
- [47] J.Barry, G.Byrne, Cutting tool wear in the machining of hardened steels partI: alumina/TiC cutting tool wear, Wear 247 (2001), pp.1863-1881.
- [48] Leroy F, Blanchardt., Alexendres., Les modification structurales apportées par les nouveaux procédés d'usinage et de mise en forme bulletin du cercle d'études des métaux, paris, 1992, pp 64 79
- [49] J.M Kahles, M.Fieldl, S.M.Harvey," High speed machining possibility and need" 1978
- [50] J.Brwnet "Influence des contraintes résiduelles induites par usinage sur la tenue à la fatigues des matériaux métalliques aéronautiques" Thèse de doctorat Ensam, 26 novembre 1991

- [51] Properties and SELECTION et METALLOGRAPHY, structure and phase diagrams, Metals handbooks vol 1 et 8
- [52] D.F.Moore, principles and Application of tribology, pergamon, Oxford, 1975
- [53] J.kopac, M.Bahor, " Interaction of the work piece material's technological past and machining parameters on the desired quality of the product surface roughness," journal of materials processing Technology, vol 109,2001,pp/105-111
- [54] J.D. Thiele, S.N.Melkote, " Effect of cutting edge geometry and work piece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 94, 1999,pp.216-226.
- [55] T. Hodgson, P.H. Trendler,"Turning Hardened Tool Seels with Cubic Boron Nitride Inserts», Annals of the CIRP, Vol. 30/1, 1981, pp. 63-66.
- [56] O.B. Abouelatta, J.Madl, " Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations ", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, 2001, pp .269-277.
- [57] X.L.Liu, D.H. Wen, Z.J.Li, Xiao, F.G.Yan, "Experimental study on hard turning hardened GCr15 steel with PCBN tool", Journal of Materials processing Technology, Vol. 129, 2002, pp. 217-221.
- [58] J.kopac, M.Bahor, M.Sokovic, " Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold pre- formed steel work pieces", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, 2002,pp. 707-716.
- [59] Y.Ratsumoto, F.Hashimoto, G.Lahotli," Surface integrity generated by precision hard warning", Annals of the CIRP, Vol.48/1-1999,pp.59-62.
- [60] Y.K.Chou, C.Evans, M.M Barash, " Journal of materials processing technology , Vol. 124,2002,pp.274 roughness measuring technique in hard turning." International Journal of machine tool and manufacture, Vol. 36/4, pp.453-464.
- [61] LL.W.A.Koenig, R.Komanduri, H.K.Toenshoff, G.Ackeshoh, " Machining of hard metals , Annals of the CIRP, Vol.33/2,1984,pp.417-427 surface roughness infine turning of cold preformed steel work pieces", International Journal of machine tools and Manufacture.Vol.42.
- [62] Grover, M.P (1996) Fundamentals of modern manufacturing". Prentice Hall, UPPER Saddle River, published Johon willey and sons, New york.
- [63] Y.K. Chou, C.J.Evans, M.M.Barash," Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 124, 2002, pp.274-283.
- [64] C.X.Feng, X.Wang," Development of Empirical Models for Surface Roughness Prediction in Finish Turning", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 20,2002, pp.348-356.

- [65] Karmaker,A (1970) "Factors influencing surface finish during fine turning". Proceeding of All India Machine Tool Design and Research conference, India, 123-128.
- [66] Bhattacharya. A Faria, Gonzalez, (1970) Regression analysis for predicting surface finish and its application in the determination of optimum machining conditions. SME Journal of engineering for industry.
- [67] Sundaram.R.M, and B.K. Lambert (1979) "Surface roughness variability of ANSI 4140 steel infine turning using carbide tools" International journal of production research, 17(3):249-258.
- [68] J.D Thiele, S.N.Melkote, " effect of cutting edge geometry and work piece hardness on surface generation in the finish hard turning Journal of materials processing technology, Vol.94, 1999, pp216-226.
- [69] O.B.Abouelatta, J.Madl, "Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning technology, Vol.118, 2001, pp 269-277.
- [70] M.Sokovic,"On the inter-relationships of some mach inability parameters in finish machining with cermet TiN (PVD) coated tools" ,Journal of Materials processing Technology, Vol. 78, 1998,pp. 163-170.
- [71] Y. Kevin Chou,Chris J.Evans,Tool wear mechanism in continuous cutting of hardened tool steels, Wear (1997), pp.59-65.
- [72] M.Zimmermann, M.Lahres, D.V.Viens, B.L.Laube, Investigations of the wear of cubic boron nitride cutting tools using Auger electron spectroscopy and X-ray analysis by EPMA, wear 209(1997), pp.241-246.
- [73]M.A.Yalese, « (cours de module) ».Cours des efforts de coupe.
- [74] IPASC.1998, conference d'intérêt production department GMC Insa de lyon 1998.
- [75] J.Goupy, « plan d'expérience» Technique de l'ingénieur cahier réf P-2