

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



**Mémoire de fin d'étude présenté en vue
de l'obtention d'un diplôme de Master**

Présenté par : **ELBOURY Youcef**

Master

Option : Conception et Production Industrielle

=====

Optimisation de l'usinage de l'acier fortement allié
Z200Cr12 avec une céramique mixte revêtue

=====

Sous la Direction de :

Dr. BELHADI S.

Année universitaire 2014/2015

Remerciement

*Je remercie dieu de ma avoir donné la force et le courage Ainsi
que la volonté d'effectuer mon projet de fin cycle.*

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à docteur

BELHADI SALIM *qui a su diriger ce mémoire avec intérêt et
compétences, et qui a su me conseiller tout au long de cette
période.*

*J'adresse aussi enseignantes à notre département de Génie
mécanique d'avoir m'apporté leur soutien pour réaliser se
travail.*

*J'exprime mes gratitudes et mes remerciements à mes parents
et toute ma famille pour leurs encouragements.*



Dedicace



J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

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

- *A mes parents.*
- *Mon encadreur Dr. Belhadi Salim*
- *A Mes frères et Mes sœurs surtout mon frère Ali.*
- *et mon ami drideh yakoub je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*
 - *A toute ma famille : Elboury*
 - *A tous mes Amis de Skikda*
 - *A tous mes Amis sans exception.*

Elboury Youcef



Nomenclature

Vc: Vitesse de coupe (m/min).

f: Avance par tour (mm/tr).

ap: Profondeur de passe (mm).

HRC: Dureté Rockwel Cône.

Ra: Rugosité moyenne arithmétique (μm).

Fx (Fa): Effort de coupe axial (N).

Fy (Fr): Effort de coupe radial (N).

Fz (Ft): Effort de coupe tangentiel (N).

P : puissance de coupe (W).

Q : débit de copeau (cm^3/min).

D : diamètre de l'éprouvette (mm).

L : longueur de l'éprouvette (mm).

r_e ou r: Rayon du bec de l'outil (mm).

α : Angle de dépouille principal (degré).

γ : Angle d'attaque (degré).

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

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 01

Chapitre I : étude et analyse bibliographique

I.1 Introduction 02

I.2 Généralité sur la coupe des métaux 02

 I.2.1 Introduction sur la coupe des métaux 02

 I.2.2 Définition de l'usinabilité 03

 I.2.3 Critère d'évaluation l'usinabilité 03

I.2.2 Matériaux de coupe 03

 I.2.2.1 Matériaux d'outillage et exigence principale de l'outil de coupe 04

 I.2.2.2 Classification des matériaux des outils de coupe 05

 I.2.2.3 Évolution des matériaux des outils de coupe 10

I.2.3 Revêtement pour outils coupants 11

 I.2.3.1 Fonction d'un revêtement en usinage 11

 I.2.3.2 Propriétés des revêtements 11

 I.2.3.3 Types de revêtements 11

I.2.4 Endommagement des outils de coupe 14

I.2.5 L'usure des outils 14

I.2.6 Rugosité des surfaces usinées 18

I.2.7 Les efforts de coupe 20

 I.2.7.1 Généralités 20

 I.2.7.2 Intérêt de mesure des efforts de coupe 21

 I.2.7.3 Influence des différents facteurs sur l'effort de coupe 21

I.2.8 Tournage dur 23

 I.2.8.1 Introduction 23

I.2.8.2 Définition de tournage dur	23
I.3 État de l'art	25
I.3-1 Développement d'un modèle de prédiction de l'usure en dépouille d'un outil céramique (ZTA) en utilisant la méthodologie de surface de réponse	25
I.3.1.1 Introduction	25
I.3.1.2 Méthodologie de recherche	25
I.3.1.3 Résultats et discussion	25
I.3.1.4 Conclusion	29
I.3.2 Comparaison de vie de l'outil de coupe entre le bore cubique céramique et nitrure (CBN) pour l'usinage des aciers trempés	30
I.3.2.1 Introduction	30
I.3.2.2 Résultats et discussion	30
I.3.2.3 Conception expérimentale	31
I.3.2.4 Conclusion	32
I.3.3 Mécanismes d'usure de plusieurs matériaux d'outils de coupe en tournage dur de l'acier à outils de haute teneur en carbone-chrome	33
I.3.3.1 Introduction	33
I.3.3.2 procédure expérimentale	33
I.3.3.3 Résultats et discussion	34
I.3.3.4 Conclusion	35
I.3.4. Étude comparative de la rugosité de surface obtenue par des outils céramiques classiques et wiper lors du tournage dur de l'acier AISI 4140	35
I.3.4.1 Introduction	35
I.3.4.2 Résultats et discussion	35
I.3.4.2.1 Evolution des critères de rugosité	35
I.3.4.2.2 Analyse statistique du critère de rugosité Ra	36
I.3.4.2.3 Evolution de la rugosité en fonction de l'usure	37
I.3.4.3 Conclusion	38
I.4 Conclusion	39

Chapitre II: *procédure et équipement d'expérience*

II.1 Introduction	40
II.2 Matériels utilisés	40
II.2.1 Machine-outil	40
II.2.2 Matériau utilisé	40
II.2.3 Outils de coupe utilisés	42
II.2.4 Appareillages de mesure utilisés	44
II.2.4.1 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	44
II.2.4.2 Mesure des efforts	44
II.2.4.3 Mesure de l'usure	47
II.2.4.4Autres équipements utilisé	47
II.3 Planification des expériences	47
II.4. Conditions de coupe	51
II.5 conclusion	51

Chapitre III: *étude de l'influence des paramètres de coupe*

III.1 Introduction	52
III.2 Résultats des expériences	53
III.3 Analyse des Résultats de l'usure en dépouillé VB	54
III.3.1 Analyse de la variance ANOVA	54
III.3.2 Modèles mathématique est les coefficients de déterminations	55
III.3.3Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	56
III.3.4 Diagrammes de surface 3D de VB et graphique de contour	56
III.4. Analyse des Résultats de rugosité Ra	57
III.4.1. Analyse de la variance ANOVA	57

III.4.2. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations	58
III.4.3. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	59
III.4.4. Diagrammes de surface 3D de Ra et graphiques de contours	59
III.5 Analyse des résultats expérimentaux de l'effort de coupe	60
III.5.1 Analyse des Résultats de l'effort (Fx)	60
III.5.1.1 Analyse de la variance ANOVA	60
III.5.1.2 Modèles mathématique est les coefficients de déterminations	62
III.5.1.3 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	62
III.5.1.4 Diagrammes de surface 3D et graphique de contour	63
III.5.2 Analyse des Résultats de l'effort de coupe (Fy)	64
III.5.2.1 Analyse de la variance ANOVA	64
III.5.2.2 Modèles mathématique est les coefficients de déterminations	65
III.5.2.3 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	65
III.5.2.4 Diagrammes de surface 3D et graphique de contour	66
III.5.3 Analyse des Résultats de l'effort de coupe (Fz)	67
III.5.3.1 L'analyse de la variance ANOVA	67
III.5.3.2 Modèles mathématique est les coefficients de déterminations	68
III.5.3.3 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	68
III.5.3.4 Diagrammes de surfaces 3D de (Fz) et graphique de contour	69
III.6 Conclusion	70

Chapitre IV: *Optimisation*

IV.1 Introduction	71
IV.2 Paramètres technologiques calculés	71
IV.2.1 Puissance de coupe	71
IV.2.2 débit de copeau	71
IV.3 Analyse des résultats de la puissance de coupe	73
IV.3.1 Analyse de la variance ANOVA	73

IV.3.2 Teste de la concordance prévue-expérimentale	74
IV.3.3 Diagrammes de surface 3D et graphique de contour	74
IV.4 Analyse des résultats du débit de copeaux	75
IV.4.1 Diagrammes de surface 3D et graphique de contour	75
IV.5 Optimisation des conditions de coupe	76
IV.5.1 Position du problème	76
IV.5.2 Résultats d'optimisation	77
IV.5.3 Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	79
IV.6 Conclusion	79
CONCLUSIONS GENERALE	81

Introduction Générale

Introduction générale

La qualité de la surface des pièces usinée, l'augmentation de la productivité et les conditions de coupe optimales sont des objectifs principaux du fabricant mécanique, l'usinage des matériaux trempé avec une dureté supérieur au 45HRC connu comme une nouvelle technique d'usinage par enlevé la matière appelé **tournage dur**. Cette technique est réalisée avec une gamme des outils de coupe caractérisés par une grande dureté, bonne résistance aux chocs et à l'usure (Céramiques, CBN, ... etc.).

Notre travail s'inscrit dans ce cadre, en effet il consiste à mener une étude expérimentale de l'usinage de l'acier trempé Z200Cr12 a 60HRC avec un outil de coupe CBN, le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur certains paramètres technologiques tels que les critères de rugosité, les composantes de l'effort de coupe et certains paramètres calculés en fonction des résultats expérimentaux. Après modélisation de ces différentes relations nous avons procédé à l'étude de détermination du régime de coupe optimal, permettant de satisfaire des objectifs précis.

La rédaction de ce mémoire est structurée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique qui concerne le tournage dur, les définitions des paramètres technologiques et l'état de l'art sur les différents travaux de recherche en relation avec notre sujet d'étude.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté d'une part, une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences (plan et intervalle de variation des paramètres de coupe) et d'autre part, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences.

Le troisième chapitre concerne une étude statistique, analyse de la variance ANOVA des résultats expérimentaux à l'aide d'un logiciel Design-Expert. Le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur le critère de rugosité (R_a), l'usure en dépouille et les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z), puis de déterminer des modèles mathématiques qui permet la prédiction des ces paramètres.

Dans la quatrième chapitre l'étude d'analyse a permis de voir le degré d'influence des paramètres de coupe sur les paramètres technologiques calculé en fonction des résultats expérimentaux tels que la puissance de coupe (P), le débit de copeau (Q). L'utilisation du logiciel Design-Expert a permis d'obtenir le régime de coupe optimal des paramètres technologiques, permettant d'une part de minimiser les critères de rugosité, la puissance de coupe et d'autre part de maximiser le débit de copeau.

En fin, nous avons fait une conclusion générale sur cette étude.

Chapitre : I

*Etude est analyse
Bibliographique*

I.1 Introduction

Depuis toujours, le fabricant essaye dans les stratégies d'optimisation des processus d'usinage actuellement préconisées visent à l'augmentation de la productivité, de la qualité de surface, ou à réduire les coûts par plusieurs voies, recherche du débit optimal d'enlèvement de matière, amélioration de la précision de l'usinage, réduction du nombre d'opérations (traitement thermique et rectification finale par exemple) et recherche d'une plus grande fiabilité au niveau des propriétés d'usage des pièces usinées.

Il est important d'utiliser un matériau de coupe et une géométrie de plaquette adaptées à la matière à usiner pour obtenir un processus d'usinage productif et exempt de problèmes. D'autres paramètres, tels que les conditions de coupe, la trajectoire d'outil, etc. doivent aussi être pris en compte pour obtenir de bons résultats.

La partie de mon travail qui concerne une recherche bibliographique, sur le thème de mon projet de fin d'études, est présentée en deux parties. La première est consacrée aux définitions et concepts de base de l'usinage par la présentation des différents paramètres technologiques d'usinage. Dans la deuxième partie est présenté un état de l'art des recherches dans le domaine de l'usinage dur. Quatre travaux scientifiques axés sur le domaine d'étude sont résumés, à savoir :

- Développement d'un modèle de prédiction de l'usure en dépouille d'un outil céramique (ZTA) en utilisant la méthodologie de surface de réponse
- Comparaison de vie de l'outil de coupe entre le bore cubique céramique et nitrure (CBN) pour l'usinage des aciers trempés
- Mécanismes d'usure de plusieurs matériaux d'outils de coupe en tournage dur de l'acier à outils de haute teneur en carbone-chrome
- Étude comparative de la rugosité de surface obtenue par des outils céramiques classiques et wiper lors du tournage dur de l'acier AISI 4140

I.2 Généralité sur la coupe des métaux

I.2.1 Introduction sur la coupe des métaux :

Il est important de délimiter clairement le domaine de la coupe des métaux et celui très voisin de l'étude de l'usinabilité. La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe sur le comportement d'un matériau (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, arrosage....) en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) et de géométries différentes.

Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-

mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage.

I.2.2 Définition de l'usinabilité :

L'usinabilité est la capacité d'un matériau M1 à être usiné par un matériau usinant M2. Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif de l'usineur. L'usinabilité peut être évaluée à partir d'une combinaison des paramètres suivants :

- L'évolution des efforts de coupe et de la puissance consommée
- Le débit copeaux
- La durée de vie des outils
- La productivité
- L'intégrité de surfaces

La notion d'usinabilité dépend donc d'un critère choisi par l'usineur mais reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût et/ou à la meilleure qualité pièce [1].

I.2.3 Critère d'évaluation l'usinabilité :

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont: [2].

- ❖ la durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps ;
- ❖ les conditions de coupe ;
- ❖ les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
- ❖ le fractionnement du copeau ;
- ❖ l'état de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité ;
- ❖ la productivité.

I.2.2 Matériaux de coupe

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie. Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du(19) XIXe siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu.

Dans le courant du (20) XXe siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces [3].



Domaines

Les matériaux de coupe sont des composants élaborés et utilisés pour des outils de coupe destinés à l'usinage mécanique.

- Outils de coupe fixes : monoblocs, à pastilles brasées, à pastilles montées, ils sont généralement utilisés en tournage mécanique et en fraisage.
- Outils de coupe tournants : ce sont les forets hélicoïdaux, alésoir-machine, fraise à deux tailles [4].

I.2.2.1 Matériaux d'outillage et exigence principale de l'outil de coupe

Les performances des machines-outils dépendent étroitement de celles des outils de coupe qu'elles actionnent et des conditions d'utilisation des outils. Pour que l'arête tranchante d'un outil de coupe reste toujours vive, elle ne doit pas s'user, ainsi la matière qui la constitue doit être plus dure que celle de la pièce à usiner. Comme la dureté d'un métal et sa résistance varient en sens inverse, on doit prendre des précautions particulières pour avoir une partie active, sur laquelle se forme les copeaux, très durs et un corps résilient et résistant à la flexion et la torsion. D'où l'idée de constituer un outil en deux parties.

- L'une (active) en matériau dur avec ou sans traitement thermique.
- L'autre (passive) sur laquelle est rapportée la partie active, soit par plaquette montée mécaniquement ou par soudo-brasage, soit par soudage électrique par rapprochement, soit par sertissage. La partie active de l'outil servant à couper la matière doit posséder les qualités suivantes:

- Résistance élevée aux sollicitations (résistance aux chocs, à la traction, compression etc....).
- Dureté élevée des faces de coupe et de dépouille (des surfaces dont l'intersection forme l'arête coupante) pour pouvoir pénétrer dans le métal usiné.
- Faible rugosité ($R_a = 1.6 \mu\text{m}$) des faces de coupe et de dépouille. Conservation de la dureté à des températures élevées (500 à 900°C) pour limiter les effets de l'usure sur les faces de coupe et de dépouille.

Depuis 1900 beaucoup de travaux ont été réalisés dans le domaine de coupe des métaux et plusieurs matériaux à outils ont été successivement introduits dont les performances sont de plus en plus élevées en ce qui concerne la dureté des matériaux susceptibles d'être usinés et les vitesses de coupe utilisables.

1.2.2.2 Classification des matériaux des outils de coupe

Une classification des matériaux par ordre de dureté croissant peut être établie comme suit:

A. Aciers au carbone

1. Aciers au carbone trempé

Ce sont les aciers de désignation XC et dont la teneur en carbone dépasse 0,6% (XC82, XC100) qui présentent une dureté à froid de 60 HRC. Leur vitesse de coupe est très faible, car un échauffement supérieur à 250°C leur fait perdre leur tenue (dureté).

Ces aciers acquièrent toute leur dureté par une trempe à l'eau après un chauffage à 750°C environ. Donc ces outils sont fabriqués d'une seule pièce (acier catégorie dur et extra dur). Ces aciers sont employés dans l'industrie uniquement pour les outils à faible vitesse de coupe (tarauds, filière, alésoirs, pour le travail à main).

2. Aciers au carbone alliés

On sait que le chrome et le molybdène permettent au carbone d'obtenir son maximum de dureté. Ce sont donc ces éléments que l'on retrouvera dans la composition des aciers alliés pour outils. Ils seront utilisés dans les mêmes conditions que les aciers XC mais permettront la coupe de matériaux plus durs.

B. Aciers rapides (au tungstène trempé)

Par aciers "rapides" il faut entendre "aciers à coupe rapide". On effet, ces aciers comportent généralement une quantité importante de Tungstène (W) de cobalt (K) et de chrome (C) additionnée à l'alliage de base afin d'améliorer la dureté et la résistance à l'usure (acier comportant 0.9 à 1.5% de carbone), ils sont austenisés entre 1250°C et 1300°C et subissent un revenu à une température de l'ordre de 600°C. Par suite ils peuvent travailler facilement à une température de 500°C sans que l'arête tranchante

soit détériorée. Si réchauffement n'est pas à craindre jusqu'à cette température, ils peuvent travailler plus vite, d'où leur terminologie. Bien que leur performances soient relativement faibles, ils sont encore utilisés dans différents domaines, tels que:

- Outils à tranchants multiples (fraise, taraud, forêt).
- Outils de forme complexe.
- Outils à tranchant unique utilisés pour la fabrication des outillages.

- Il est nécessaire de choisir une nuance d'acier rapide adaptée aux travaux à réaliser. Une révolution importante semble se dessiner avec l'introduction sur le marché des outils à aciers rapides revêtus d'une couche de nitrure de titane dont la dureté (HRC = 80) permet une meilleure résistance à l'usure et à corrosion.

Z: allié, W: tungstène, K: cobalt, C: chrome, V: vanadium, D: molybdène

Les aciers rapides sont chers et ils sont utilisés sous la forme de plaquettes. Les aciers rapides non revêtus ne sont pas recommandés pour usiner les matériaux dont la dureté est supérieure à HRC30.

On distingue:

C. Alliages spéciaux

Ces matériaux ne contiennent pas de fer: ce ne sont donc pas des aciers. Ils ne subissent pas de traitements thermiques et ne se forgent pas. Leur dureté provient de leur élaboration et parmi eux on peut citer :

- Les stellites
- Les carbures métalliques
- Les céramiques

1. Les stellites

Ce sont des alliages de cobalt (55%), (Chrome 33%), (tungstène 10%), carbone (2%), point de fusion 1280°C. Leur dureté est comparable à celle des aciers trempés, elle ne diminue qu'après réchauffage à 700°C. Ils autorisent donc des vitesses de coupe plus élevées que les aciers rapides.

Ils sont sensibles aux brusques changements de températures, Aussi faut-il travailler sous arrosage constant et non intermittent. Ils ne conviennent pas pour la coupe des matériaux tendres.

2. Les Carbures métalliques

Pour permettre une coupe encore plus rapide, les outils en aciers au carbone ou en acier allié sont remplacés par des alliages métalliques élaborés par frittage de carbures très durs. Les carbures métalliques sont des agglomérés de poudre de cobalt, de carbures de tungstène, de tantale, et de bore.

Le mélange des carbures et de la poudre de cobalt est comprimé à 4000kg/cm^2 dans un moule ensuite cuit en atmosphère d'hydrogène à 850°C , puis chauffé à 1500°C . A cette température, le cobalt seul fond et sert de liant. Ce mode d'obtention est appelé frittage.

La dureté des carbures métalliques est voisine de celle du diamant et ils la conservent jusqu'à 1000°C . Ils permettent de travailler quatre à huit fois plus vite qu'avec des aciers rapides mais sont sensibles aux brusques variations de températures.

3. Les Céramiques

Les céramiques (figure I.1) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Ils sont très durs et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques [3].

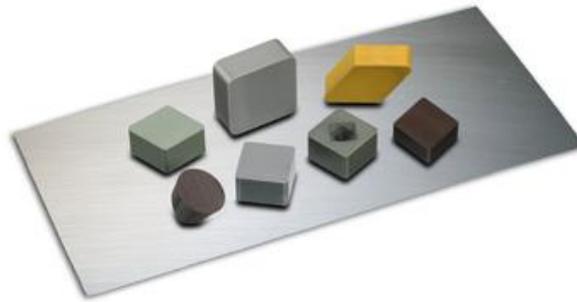


Figure I.1 matériaux frittés sans liant métallique

Ils sont comme les carbures, des matériaux obtenus par frittage. Mais les carbures métalliques sont remplacés ici par des éléments à base d'alumine pure (Al_2O_3) c'est la solution la plus ancienne sous forme de poudre Al_2O_3 ; avec utilisation comme liant l'oxyde de chrome.

La solution la plus récente utilise une poudre à base de nitrure de bore. Donc c'est un corps très dur 60 HRC (Al_2O_3) et 72 HRC (à base de nitrure de bore).

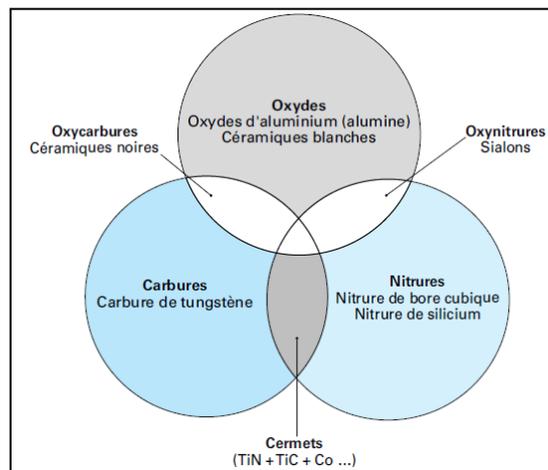


Figure I.2 : Céramiques [5]

✓ **Applications**

Les nuances céramiques conviennent à une grande variété d'applications et de matières. Les applications les plus courantes sont le tournage à grande vitesse, mais ces nuances conviennent aussi à l'usinage de gorges et au fraisage. Les propriétés spécifiques des nuances céramiques autorisent une productivité élevée si elles sont appliquées correctement. Les applications et la mise en œuvre des nuances céramiques a bon escient sont des critères importants pour la réussite. Les limites générales des céramiques incluent la résistance aux chocs thermiques et la ténacité.

✓ **Quelques propriétés:**

- Absence de copeaux adhérents pendant la coupe.
- Très bonne acuité de l'arête de coupe, ce qui autorise éventuellement un copeau minimum d'épaisseur voisine de 0.01mm.
- Obtention d'une bonne rugosité ($R_a = 0.8\mu\text{m}$).
- Utilisation des vitesses de coupe 3 à 5 fois supérieures à celles admises pour les carbures.
- Elles ont l'inconvénient d'être d'une utilisation plus délicate que celle des carbures par exemple :

- Elles sont plus sensibles aux chocs.
- Elles nécessitent des machines robustes et puissantes.

Les céramiques se présentent uniquement sous forme de plaquettes fixées sur un corps d'outil par un dispositif mécanique.

D. Nitrure de bore cubique polycristallin, CBN (BN)

✓ **Définition et propriétés**

Le nitrure de bore cubique polycristallin, ou CBN, est un matériau avec une excellente résistance à chaud. Il peut être utilisé à très grande vitesse de coupe. Il possède aussi une bonne résistance aux chocs thermiques et une ténacité élevée.

Les nuances CBN modernes sont des matériaux composites à base de céramique avec une teneur en CBN de 40 à 65 %. Le liant céramique augmente la résistance à l'usure du CBN qui serait sujet à l'usure chimique autrement. Un autre groupe de nuances est constitué par les nuances à forte teneur en CBN, de l'ordre de 85 à 100 %. Ces nuances peuvent contenir un liant métallique pour améliorer leur ténacité.

Les plaquettes CBN ont un insert CBN brase sur une plaquette en carbure cémenté figure(I.3). La technologie Safe-Lok™ assure la stabilité des inserts CBN sur les plaquettes négatives [6].

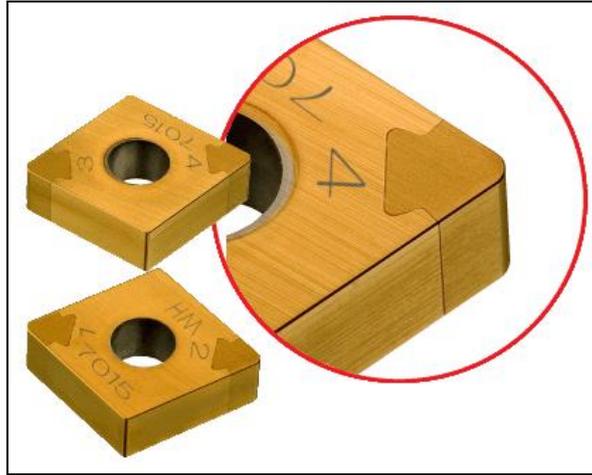


Figure I.3 : plaquette en carbure

✓ Applications

Les nuances CBN sont très utilisées pour le tournage de finition des aciers trempés d'une dureté supérieure à 45 HRC. Pour les matières d'une dureté supérieure à 55 HRC, le CBN est le seul matériau de coupe capable de remplacer les méthodes traditionnelles de rectification. Dans les aciers plus doux, d'une dureté inférieure à 45 HRC, la résistance à l'usure du CBN est moins bonne en raison de la présence d'une plus grande quantité de ferrite dans la matière.

Le CBN s'utilise aussi pour l'ébauche des fontes grises à grande vitesse, tant en tournage qu'en fraisage.

E. Diamant

D'origine naturelle ou synthétique c'est le matériau le plus dur. Son prix d'achat élevé en limite l'utilisation. On utilise dans l'industrie des diamants généralement impropres à la bijouterie (types noirs).

Le diamant se présente sous deux formes:

- Poudre collée sur un support en fonte pour les meules destinées à l'affûtage des outils des carbures.

- Grain serti ou brasé sur un corps pour les outils tranchant unique réservés à des travaux de finition. Exemple comparatif: finition d'un alésage de piston.

- Outil carbure: 2000 pièces entre deux affûtages, rugosité obtenue $Ra= 1.6\mu m$.

- Outil diamant: 5000 pièces entre deux affûtages, rugosité obtenue $Ra=0.4\mu m$

L'outil diamant trouve surtout son emploi à très grandes vitesses sur les matériaux ductiles que durs. Travail de finition du cuivre, bronze, aluminium pour obtenir un beau poli de la surface le diamant peut usiner tous les métaux quel que soit leur dureté.

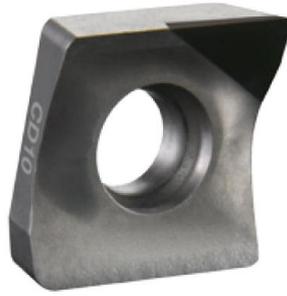


Figure I.4 : plaquette en diamant

I.2.2.3 Évolution 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 XXIème siècle, un doublement de la productivité tous les dix ans : figures I.5 et I.6 [7].

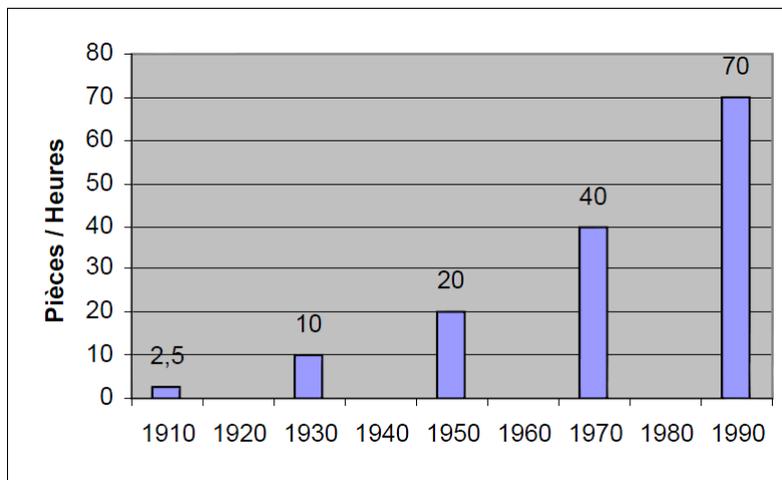


Figure I.5 : Augmentation de la productivité en usinage Acier.

Répartition des matériaux utilisés comme matériaux de coupe : Figure (I.6).

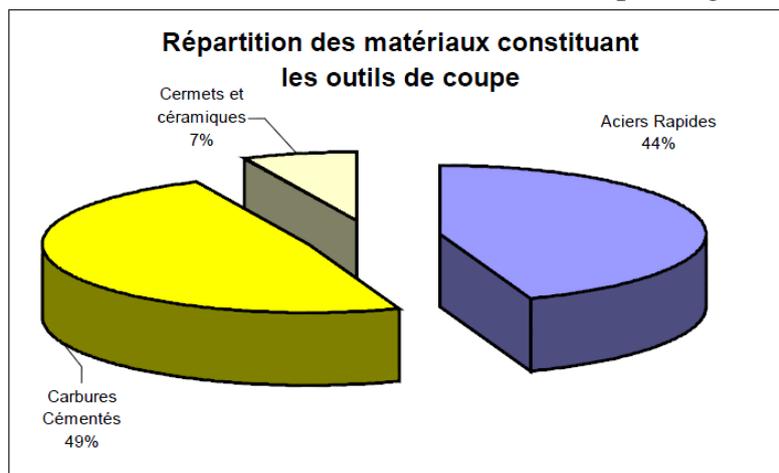


Figure I.6 : Répartition des matériaux constituant les outils de coupe.

I.2.3 Revêtement pour outils coupants

Depuis plus de dix ans, l'utilisation d'outils coupants non-revêtus en usinage tend à disparaître au profit d'outils revêtus. Cette tendance, d'abord instaurée en tournage, est peu à peu généralisée pour tous les outils coupants (fraisage, taillage et perçage) et ce, quelque que soit le matériau substrat (acier rapide ou carbure) [8].

Les revêtements d'outils sont donc principalement conçus pour les protéger contre les nombreuses agressions thermiques et mécaniques auxquelles il est soumis lors d'une opération d'usinage, surtout à grande vitesse, et par conséquent, pour limiter les quatre phénomènes d'usure que sont:

- L'adhésion entre usinant et usiné ;
- L'abrasion de l'usinant par des particules dures provenant de l'usiné ;
- L'oxydation de l'usinant ;
- La diffusion de matière de l'usinant vers l'usiné ;

I.2.3.1 Fonction d'un revêtement en usinage

Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage. Ces sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre [9].

I.2.3.2 Propriétés des revêtements

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent en définitif se traduire par des objectifs opérationnels, en lien avec des propriétés physiques quantifiables et/ou qualifiables. Ainsi, il est possible de demander au système substrat + revêtement de répondre au cahier des charges suivant :

- ❖ Une ténacité élevée ;
- ❖ Une parfaite adhésion sur le substrat ;
- ❖ Une grande résistance à la formation et à la progression des fissures ;
- ❖ Une dureté élevée ;
- ❖ Une inertie chimique élevée ;
- ❖ Une faible conductivité et diffusivité thermiques ;
- ❖ Une haute résistance à l'oxydation ;
- ❖ Une épaisseur adéquate ;
- ❖ Une fonction barrière de diffusion.

Sachant que ces propriétés doivent être conservées à la plus haute température possible, en lien avec les sollicitations thermiques de l'opération d'usinage visée.

I.2.3.3 Types de revêtements

Les revêtements déposés industriellement peuvent se décomposer en 2 familles distinctes : les revêtements déposés par voie physique (Physical Vapor Deposition:

PVD) et les revêtements déposés par voie chimique (Chemical Vapor Deposition: CVD) tableau (I.1). Chacune de ces familles possède une variété importante de sous-familles en constante évolution depuis quelques années. Ainsi, les procédés PVD sont basés sur trois types de technologie : l'évaporation, la pulvérisation et le dépôt ionique (ou 'ion-plating'). Chacune de ces sous-familles connaît également des variantes basées sur des moyens différents d'aboutir à l'évaporation ou à la pulvérisation des sources de matière : faisceau d'ions, effet joule, diode, etc.

L'ensemble de ces procédés permet de déposer des couches de compositions et d'aspects très voisins. Cependant, les modalités de dépôts peuvent entraîner des différences très importantes en termes de texture, adhésion, dureté, etc. Il est important de noter que les technologies de déposition ont subi de très grandes évolutions ces dernières années. A tel point qu'il est difficile de donner un aperçu exhaustif de l'ensemble des variantes.

Tableau I.1 : Différents types de revêtements et leurs significations.

Type	Signification	Température	Technique
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur	530°	La plus répandue
PVD	Dépôt physique en phase vapeur	200°	Courante
PCVD	Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma	315°	De plus en plus courante
MTCVD	Dépôt chimique en phase vapeur à moyenne température	425°	Récente

Les dépôts réalisés industriellement par PVD et CVD sont issus de familles très voisines, par contre leurs propriétés résultantes font que certains revêtements sont systématiquement réalisés par une des techniques. Ainsi, dans le domaine des outils-coupants, les procédés CVD produisent couramment les revêtements suivants :

- Revêtements à base de titane : TiC, Ti(C,N), TiN, TiB₂
- Revêtements céramiques : Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄
- Revêtements 'ultra-dur' : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC)
- Les procédés PVD réalisent plutôt des revêtements du type :
- Revêtements à base de titane : TiC, Ti(C,N), TiN, TiB₂, (Ti,Al)N
- Revêtements 'ultra-dur' : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC), cubic Boron Nitride (c-BN)
- Revêtements lubrifiants : MoS₂, WC/C, Cr/C

Les revêtements de la famille des (TiN), (TiCN) et (TiAlN) sont de loin les plus répandus en usinage comme le montre la figure (I.7). Ces revêtements doivent leur succès à leurs très bonnes propriétés moyennes dans l'ensemble des applications d'usinage et surtout leurs très bonnes adhésions aux substrats les plus couramment utilisés: acier rapide, carbures, cermet. Les revêtements céramiques se sont beaucoup moins développés du fait de leurs grandes fragilités et de leurs manques d'adhésion.

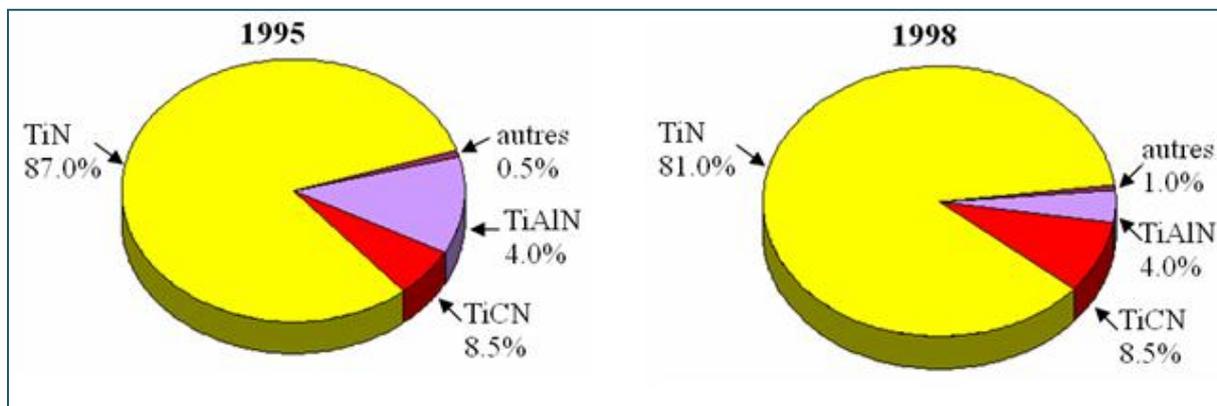


Figure I.7 : Statistique sur l'évolution de l'utilisation relative des revêtements pour outils-coupants

De plus, les revêtements à base de titane se déposent aussi bien par les procédés PVD que par les procédés CVD, alors que les revêtements céramiques sont très difficiles à réaliser en PVD. Cela limite ainsi toute une partie des applications sur les outils en acier rapide. Les avantages et les inconvénients des deux techniques sont regroupés dans le tableau I.2 :

Tableau I.2 : Comparaison des propriétés des modes de déposition PVD et CVD.

	Avantages	Inconvénients
PVD	Investissement limité Faible température de dépôt Bonne adhérence de dépôt Couches en contraintes compressives Nombreuses possibilités de dépôt Bonne acuité d'arête des outils	Nécessité de réaliser les dépôts sur des pièces de formes voisines Vitesse de dépôt faible Dépôts non uniformes Difficultés pour revêtir des outils à géométrie complexe
CVD	Grande pureté des dépôts Grande variété de composition Possibilité de dépôt sur des pièces complexes Bonne adhérence sur substrat carbure	Température de déposition élevée Investissement élevé Résidus toxiques de déposition Mauvaise acuité d'arête des outils Couches en contraintes de traction Risques d'attaque des substrats par les gazes corrosifs

Ainsi dans le cadre d'un usinage continu (perçage, tournage), un revêtement épais et adhérent sera préféré (afin d'accroître la quantité de matière à enlever).

Pour les procédés à coupe interrompue (fraisage, taillage, etc.), il sera privilégié un revêtement tenace, résistant à l'oxydation et ayant des contraintes de compression. Ces conditions privilégient plutôt les revêtements obtenus par PVD. Cette analyse est à moduler avec l'apparition de revêtements MTCVD. Par ailleurs, cela nécessite d'avoir des arêtes arrondies ce qui privilégie l'emploi des dépôts CVD, même si les dépôts PVD peuvent aussi s'appliquer sur des arêtes préalablement rodées. Les opérations de finition nécessitent des arêtes vives, ce qui privilégie plutôt l'emploi de revêtements PVD.

1.2.4 Endommagement des outils de coupe

Les outils de coupe ont une géométrie généralement complexe qui résulte assez souvent de mises au point d'atelier purement empiriques, quelquefois d'études plus analytiques à partir de divers critères (résistance à l'endommagement ou qualité de la surface générée), rarement d'une véritable optimisation qui nécessiterait une modélisation de l'écoulement du ou des copeaux [10].

1.2.5 L'usure des outils

La qualité des surfaces obtenues est directement liée au degré d'usure de l'outil. Il est donc important de bien caractériser ce phénomène afin de le rendre observable.

L'usure provient des sollicitations mécaniques et thermiques engendrées par les mouvements relatifs entre la pièce, l'outil et le copeau, qui provoquent un transfert de métal entre les surfaces en contact (érosion ou abrasion mécanique et diffusion physico-chimique). [11].

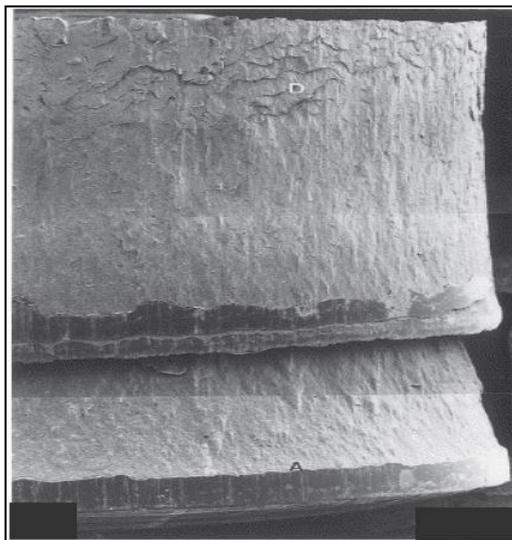


Figure I.8 : Usure des outils

Si l'on fait un inventaire des configurations de coupe que l'on rencontre dans un atelier d'usinage, on observe une très grande diversité des vitesses de coupe (entre 10

et plusieurs milliers de m/min), de la géométrie des copeaux et de leurs conditions d'évacuation, de la rigidité du contact pièce usinée/outil, de la nature et de la géométrie des outils. Dans une telle variété de configurations de coupe, il n'est pas surprenant d'observer une grande variété de faciès de dégradation. Ces mécanismes d'endommagement sont maintenant bien connus, notamment :

- **l'usure abrasive** : provoquée par la présence d'un troisième corps contenant des particules de haute dureté dans le contact copeau/outil ;
- **l'usure adhésive** : liée au frottement copeau/outil, et qui va prendre de plus en plus d'importance lorsque la vitesse de coupe croît, notamment dans le cas de certains matériaux comme les aciers inoxydables et les alliages à base de nickel ou de cobalt, ainsi que les alliages de titane ;
- **l'usure par diffusion** : que l'on retrouve aux vitesses de coupe élevées, conséquence d'une diffusion du matériau usiné vers l'outil et donc d'une fragilisation de ce dernier (par exemple : usinage de matériaux à base de fer avec des outils en carbures à liant au cobalt) ;
- **l'usure par fatigue mécanique** : qui est liée à l'apparition de phénomènes vibratoires de natures diverses : élimination partielle d'arête rapportée sur l'outil, apparition d'instabilités dans la formation du copeau en passant du copeau continu au copeau segmenté ;
- **l'usure par fatigue thermique** : dans le cas d'outils de très faible conductivité thermique (notamment les céramiques) avec de très grandes vitesses de coupe (UGV par exemple).

Pour comprendre les avantages et les limites de chaque matière, il est important de connaître les différents mécanismes d'usure qui agissent sur les outils [6].

a) Usure en dépouille

C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable étant donné qu'elle est plus prévisible et stable. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce.



Figure I.9 *Usure par abrasion*

b) Usure en cratère

L'usure en cratère apparaît sur la face de coupe de la plaquette. Elle est provoquée par la réaction chimique entre la matière de la pièce et le matériau de coupe. La vitesse de coupe l'amplifie. Une usure en cratère excessive affaiblit l'arête de coupe qui peut se rompre.



Figure I.10 Usure chimique

c) Arête rapportée

Ce type d'usure est provoqué par le soudage sous pression du copeau sur la plaquette. C'est le type d'usure le plus courant avec les matières collantes telles que les aciers bas carbone, les aciers inoxydables et l'aluminium. Une faible vitesse de coupe accélère la formation d'une arête rapportée.



Figure I.11 Usure par adhérence

d) Usure en entaille

Ce type d'usure se caractérise par une entaille localisée tant sur la face de coupe que sur la face de dépouille, au niveau de la profondeur de coupe. Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires.



Figure I.12 Usure par adhérence

e) Déformation plastique

La déformation plastique survient lorsque le matériau de coupe est ramolli par une température trop élevée. De manière générale, plus une nuance est dure et plus le revêtement est épais, meilleure est la résistance à la déformation plastique.

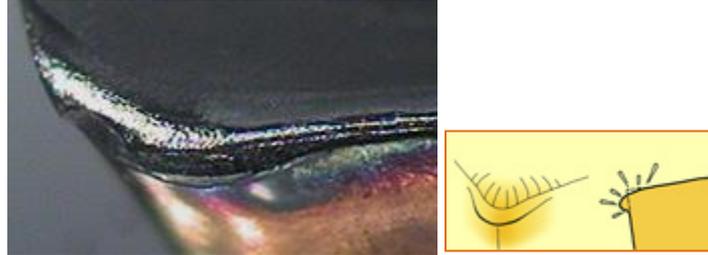


Figure I.13 Usure thermique

f) Usure en peigne

Lorsque l'arête de coupe subit des refroidissements brusques, des fissures perpendiculaires à l'arête apparaissent. Ce type de fissure est fréquent en cas de coupes interrompues, ce qui est courant en fraisage. L'utilisation de l'arrosage aggrave ce phénomène.



Figure I.14 Usure thermique

g) Ecaillage ou rupture de l'arête

L'écaillage ou la rupture de l'arête survient en cas de surcharge des contraintes de traction mécanique. Celles-ci sont dues à différentes causes telles que le martèlement des copeaux, une profondeur de coupe ou une avance excessives, des inclusions de sable dans la matière de la pièce, des arêtes rapportées, des vibrations ou une usure excessive de la plaquette.



Figure I.15 Usure mécanique

I.2.6 Rugosité des surfaces usinées

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.) Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [12].

- **Surface géométrique**

Surface parfaite ; Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

- **Surface spécifiée**

Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

- **Surface mesurée**

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.

- **Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication.

- **L**

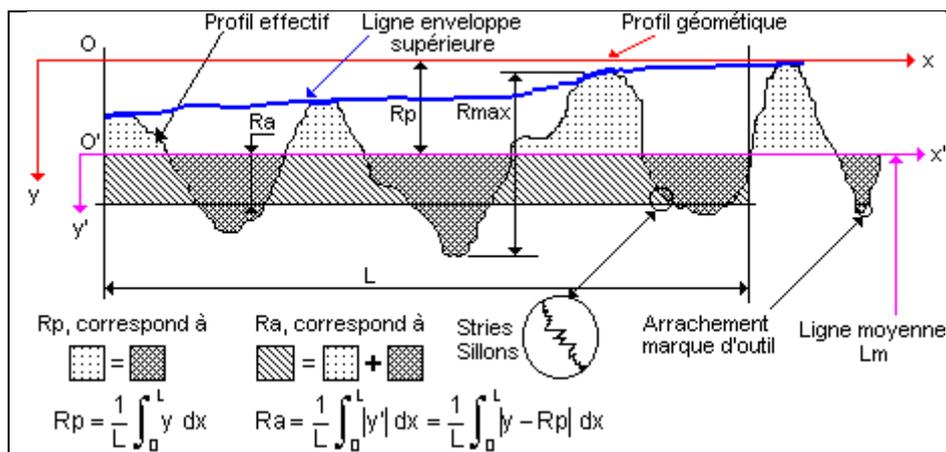
Longueur de base du profil moyen

- **R_p**

Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base L.

- **R_a**

Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y' (entre chaque point de la courbe et l'axe Ox').



a) Technologie de mesure :

La mesure des états de surface peut être réalisée avec un microscope d'état de surface. Cette technologie de mesure présente l'avantage de permettre l'obtention d'un modèle numérique de la surface réelle sans contact. La mesure est réalisée sur un échantillon de surface. Ainsi, la mesure prend en compte la forme et la direction des stries.

b) Cotation fonctionnelle des états de surface :

Le critère physique R est micro-géométrique, et c'est l'amplitude moyenne de la rugosité (rugosité).

Le critère statistique Ra est statistique, et c'est l'écart moyen arithmétique par rapport à la ligne moyenne. $R = 5 Ra$ environ

c) Caractéristiques du profil :

Pour l'analyse de la surface, il est nécessaire de la subdiviser en un certain nombre de profils de coupe parallèles selon une direction normale aux stries d'usinage. Tous les profils ont la même longueur L.

- *Strie d'usinage*

Chaque strie du profil numérotée i est composée d'une saillie et des deux demi-croix adjacents. Elle est caractérisée par sa longueur AR, sa profondeur de creux avant R_i et aval R_{i+1} .

- *Ligne moyenne*

La ligne moyenne est calculée à partir du relevé du profil de coupe. C'est la ligne des moindres carrés.

- *Ligne des saillies*

C'est la ligne parallèle à la ligne moyenne passant par la saillie la plus saillante.

- *Ligne des creux*

C'est la ligne parallèle à la ligne moyenne passant par le creux le plus profond.

- *Ligne de coupe c*

C'est la ligne parallèle à la ligne moyenne à une distance c de la ligne des saillies.

- *Hauteur du profil Pt*

C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux.

- *Ecart moyen arithmétique Ra*

C'est la moyenne intégrale des écarts en valeur absolue :

- *Profondeur moyenne R*

C'est la moyenne des profondeurs.

- *Profondeur maximale des stries Rmax*

C'est la profondeur maximale.

- *Pas moyen AR*

C'est la valeur moyenne de la longueur des stries.

- *Taux de longueur portante Tp*

C'est la longueur portante totale rapportée à la longueur du profil exprimée en %. La longueur portante d'une strie est la longueur de son intersection avec la ligne de coupe c.

1.2.7 Les efforts de coupe

1.2.7.1 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.16) [13]. La résultante de coupe F est la somme de 3 composantes suivantes:

-Ft ou FZ : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

-Fa ou Fx: composante dans le sens de l'avance, appelée effort axial

-Fr ou Fy: 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 Ft de l'énergie de coupe E nécessaire à l'enlèvement du copeau pendant l'unité de temps est donnée par la relation suivante:

$$E = F_t * V_c$$

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

Rapport des composantes:

La résultante de coupe F étant une diagonale de parallélépipède est égale à:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

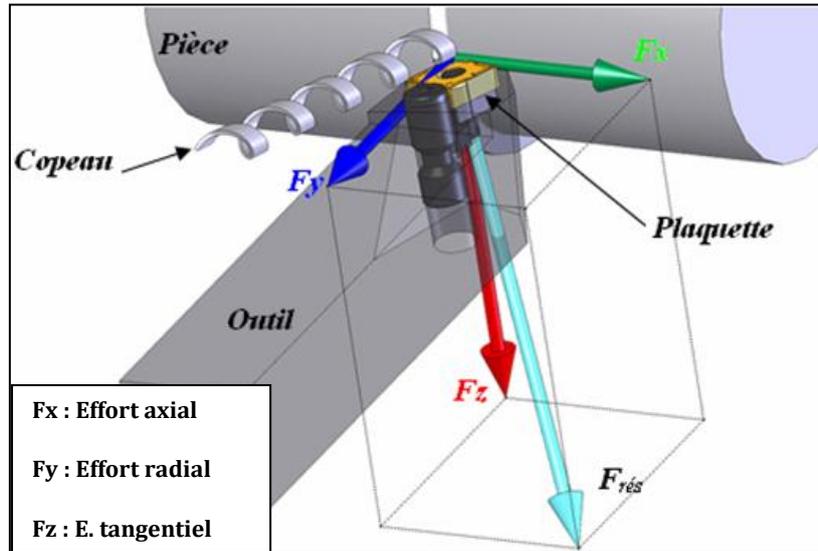


Figure I.16: composantes des efforts de coupe

I.2.7.2 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.2.7.3 Influence des différents facteurs sur l'effort de coupe

- Les propriétés mécaniques du métal à usiner :

La valeur de réaction F_v , F_a , F_p . est proportionnelle à la charge rupture à la traction R_t et à la dureté HB du métal à usiner.

-Influence de la profondeur de passe et l'avance :

Avec l'augmentation des ces deux facteurs, la section droite du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus fort à la formation du copeau et la valeur des composantes F_v , F_a , et F_p nécessaire pour assurer la coupe est plus importante. En chariotage, la profondeur de

passé intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance figure (I.17).

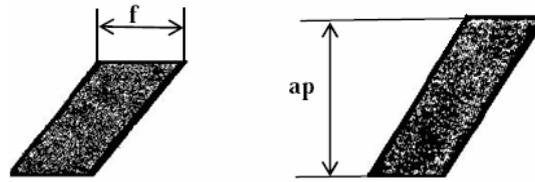


Figure I.17: Influence (a) de la profondeur de Passe (b) l'avance sur les efforts de coupe

- Influence de la vitesse de coupe :

Pour des vitesses de coupe situant dans la plage de formation de l'arête rapportée, l'effort de coupe accuse un maximum, puis diminution à nouveau avec l'augmentation de la vitesse de coupe (l'arête rapportée diminue).

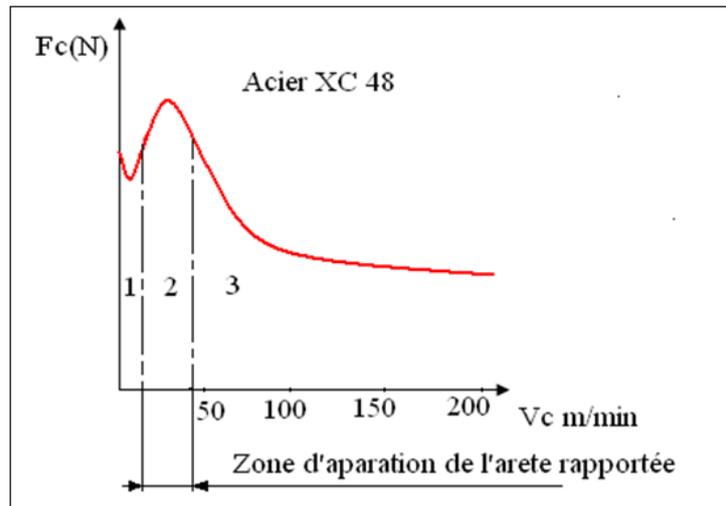


Figure I.18: Influence de la vitesse Coupe sur l'effort de coupe

-Influence dès l'usure en dépouille :

Les arêtes de coupe usées augmentent les efforts de coupe, en pratique on estime qu'une augmentation de l'effort de coupe 10 % par 0.1mm d'usure sur la surface en dépouille de l'outil.

-Influence du matériau de coupe :

Les matériaux de coupe revêtus, en particulier ceux avec des revêtements TiN ou Ti (C,N), accusent un frottement moindre et des efforts de coupe plus faibles que les matériaux de coupe non revêtus. Les faces d'attaque superfinies et dotées d'une arête de coupe dure et tranchante, réduisent les efforts de coupe.

I.2.8 Tournage dur

I.2.8.1 Introduction [14]

L'usinage d'aciers traités thermiquement dans leur état durci n'est pas nouveau, et existe depuis sans doute que les matériaux à outil durs ont vu le jour. Cela n'a pu se faire que par la mise au point de matériaux à outil nouveaux. C'est le cas des céramiques. Les produits céramiques (appelés poterie) sont connus depuis le néolithique. Il s'agissait d'articles d'usage quotidien, tels que les récipients façonnés à la main. La production de la céramique est donc l'une des plus anciennes technologies humaines. Les premiers brevets et publications sur les matériaux de coupe céramiques à base d'aluminium (Al_2O_3) datent du début du XX^e siècle en Allemagne. Des recherches systématiques commencèrent dans les années 1930. Mais ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale que furent intensifiés la recherche et le développement. Des résultats, permettant l'exploitation de la céramique, ont été mis au point en particulier aux États-Unis, en URSS et en Allemagne. L'application pratique de la céramique de coupe fut présentée pour la première fois lors des expositions de la machine-outil de Chicago, en 1956, et de Hanovre en 1957. Les premiers métaux de coupe étaient surtout des céramiques très pures, à base d'oxyde d'aluminium. Cette matière présente des valeurs mécaniques de très hautes résistances. C'est l'oxyde le plus stable, possédant une excellente stabilité chimique jusqu'aux températures avoisinant son point de fusion (2050 °C).

Cette céramique oxydée rendait possible l'usinage des fontes et des aciers à des vitesses qui, pour la première fois, excédaient la limite des 1 000 m/min. Le terme d'« usinage à grande vitesse » était né. La performance de la céramique de coupe était alors très supérieure aux possibilités des machines-outils existantes.

I.2.8.2 Définition de tournage dur [14]

Le tournage dur concerne le tournage de matériaux ferreux durcis entre 45 et 70 HRC par des opérations principalement de finition interne ou externe, et, dans certains cas, d'ébauche à l'aide d'outils modernes à géométrie définie.

Ces matériaux durs sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- une grande dureté à la pénétration comme le montre la figure I.19 ;
- un pouvoir abrasif élevé ;
- une faible ductilité ;
- un grand rapport dureté (HV)/module de Young (E), impliquant une quantité non négligeable de retour élastique local. L'erreur dimensionnelle devient non négligeable pour la finition des matériaux durs.

Les géométries d'outil utilisées présentent un angle de coupe fortement négatif (de l'ordre de -20°). Ce procédé existe depuis que les matériaux coupants ont été capables de résister à de telles contraintes de dureté (apparition des céramiques en 1960, c-BN).

Cependant, l'industrie ne s'est intéressée réellement à cette technique que trente ans plus tard, pour trois raisons principales :

- un manque de fiabilité des premiers outils coupants extra-durs ;
- les faibles gains de productivité qu'elle pouvait offrir ;
- un manque de moyens de production adaptés.

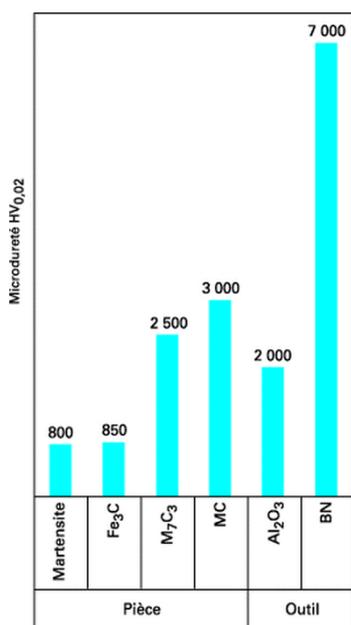


Figure I.19 Évolution de la micro dureté entre structure pièce et outil

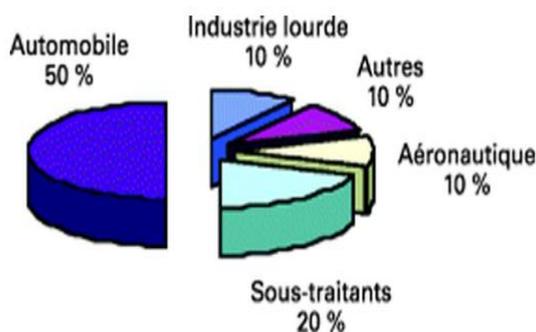


Figure I.20 Marché du bore cubique d'industrie utilisant le tournage dur

La figure I.20 montre les principales industries intéressées par ce type de technologie :

- l'industrie automobile (pignons, arbre de boîte) ;
- l'industrie du roulement ;
- la mécanique générale (outillage)... cts

L'un des objectifs actuels du tournage dur est d'être complémentaire, voire concurrentiel (dans certains cas) de la rectification. Les états de surface obtenus sont remarquables (jusqu'à des rugosités R_a de $0,1 \mu\text{m}$), les tolérances dimensionnelles sont de qualité 6 et des tolérances géométriques très précises (circularité inférieure à $1 \mu\text{m}$). L'un des facteurs essentiels pour l'obtention de ces critères de qualité étant la machine-outil.

I.3 État de l'art

I.3-1 Développement d'un modèle de prédiction de l'usure en dépouille d'un outil céramique (ZTA) en utilisant la méthodologie de surface de réponse

I.3.1.1 Introduction

L'usure en dépouille est un critère important pour l'évaluation de l'usinabilité d'un matériau [15]. La présente étude est une contribution pour évaluer l'influence de différents facteurs sur l'usure en dépouille lors du tournage dur d'acier EN 24 avec une céramique nano-composite ZTA nouvellement développée (Zirconia Toughened Alumina). Cette céramique fournit une solution pour les applications les plus exigeantes qui nécessitent une résistance à l'usure, résistance à la corrosion, la stabilité à haute température et une résistance mécanique supérieure. La méthodologie de surface de réponse est utilisée pour la planification des essais et le traitement des résultats de l'usure de l'outil. Une analyse de variance (Anova) a été appliquée pour vérifier l'adéquation du modèle mathématique et de leurs paramètres respectifs. Les paramètres clés et leur effet interactif sur l'usure ont également été présentés.

I.3.1.2 Méthodologie de recherche

Afin de réaliser le but désiré, les investigations ont été projetées dans l'ordre suivant :

- a. Identifiant les paramètres importants du processus qui ont une influence sur l'usure en dépouille et trouver les limites des paramètres choisis.
- b. Développer un plan d'expériences approprié.
- c. Entreprendre les expériences selon le plan choisi.
- d. Développer le modèle mathématique après calcul des coefficients de chacun des termes de l'équation.
- e. Vérification de l'adéquation du modèle par des méthodes d'ANOVA
- f. Essai de Confirmation

I.3.1.3 Résultats et discussion

Le Tableau I.3 présente les résultats de l'analyse ANOVA pour le modèle quadratique de surface de réponse pour l'usure en dépouille

Tableau I.3 : Analyse d'ANOVA pour le modèle quadratique de surface de réponse (réponse : usure en dépouille).

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	Prob > F	
Model	0.035348233	9	0.003927581	95.98302903	< 0.0001	Significant
A	0.02601	1	0.02601	635.6376404	< 0.0001	Significant
B	0.00225	1	0.00225	54.98595506	0.0003	Significant
C	0.00676	1	0.00676	165.2022472	< 0.0001	Significant
AB	0.00005	1	0.00005	1.221910112	0.3113	
AC	0.0002	1	0.0002	4.887640449	0.0691	
BC	0	1	0	0	1.0000	
A ²	2.53918E-05	1	2.53918E-05	0.620531154	0.4608	
B ²	2.53918E-05	1	2.53918E-05	0.620531154	0.4608	
C ²	9.48276E-06	1	9.48276E-06	0.231741573	0.6473	
Residual	0.000245517	6	4.09195E-05			
Lack of fit	0.000195517	5	3.91034E-05	0.782068966	0.6905	Not significant
Pure erro	0.00005	1	0.00005			
Cor. tot	0.03559375	15				
Std. dev.	0.006396838		R ²	0.993102237		
Mean	0.215625		Adj. R ²	0.982755593		
C.V.%	2.966649646		Pred. R ²	0.931649365		
PRESS	0.002432855		Adeq. precis	36.38416744		

. La valeur du coefficient de Fisher F du modèle est de 95.98, ce qui implique que le modèle est significatif et il y a seulement 0.01% risque d'inadéquation du modèle. Les effets principaux la vitesse de coupe (A), de l'avance (B), de la profondeur de coupe (C) et le produit (AxC) sont les termes significatifs du modèle.

Il peut dériver de figure I.21 que la vitesse de coupe joue un rôle important pour la détermination de l'usure en dépouille. La figure I.22 montre que pour une vitesse de coupe et une profondeur constantes, il n'y a pas d'effet significatif de l'avance sur le niveau moyen de l'usure. Il est également évident d'après la figure I.23 que pour la vitesse et l'avance constants, les pentes de la courbe de l'usure en dépouille augmentent significativement avec l'augmentation de la profondeur de la coupe jusqu'au niveau le plus élevé.

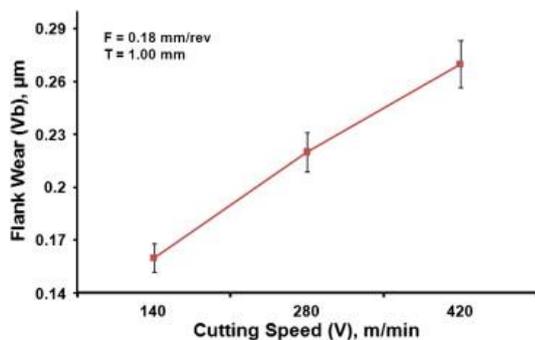


Fig. I.21 Effet de la vitesse de coupe sur l'usure en dépouille (Vb)

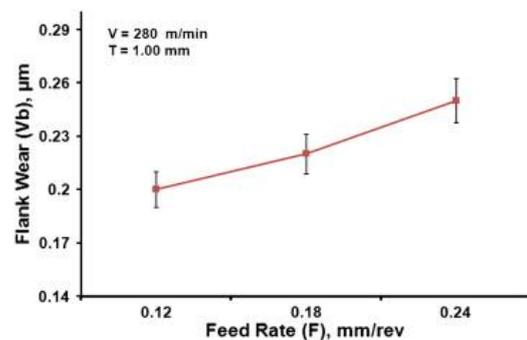


Fig. I.22 Effet de l'avance sur l'usure en dépouille (Vb).

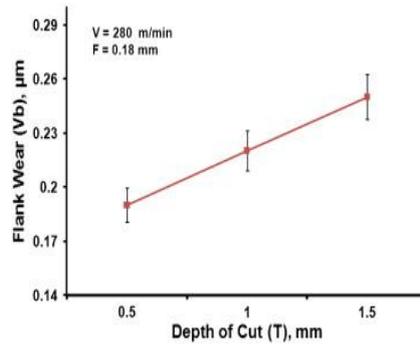


Fig. I.23 Effet de la profondeur de passe sur l'usure en dépouille (V_b)

La figure I.24 montre l'effet combiné de la vitesse de coupe et de l'avance sur l'usure en dépouille à la profondeur de coupe constante. Il est évident d'après cette figure que l'effet la vitesse de coupe est plus significatif que celui de l'avance.

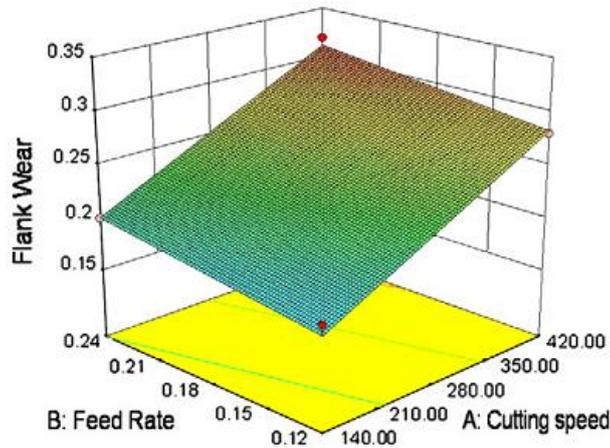


Fig. I.24 le graphique 3D des effets d'interaction de l'avance et de la vitesse de coupe à profondeur de coupe constante sur l'usure en dépouille.

Dans la présente étude, l'optimisation de la fonction de désirabilité du RSM a été utilisée pour l'optimisation d'une réponse. Le module d'optimisation recherche une combinaison des niveaux de facteur simultanément afin de satisfaire les conditions exigées sur chacune des réponses et des facteurs (Tableau I.4) dans une tentative d'établir le modèle approprié. Les solutions optimales sont rapportées dans le (tableau I.5) dans l'ordre du niveau décroissant de la fonction de désirabilité.

Tableau I.4 : Contraintes pour l'optimisation des états de découpage.

Condition	Goal	Lower limit	Upper limit
Cutting speed (V)	Maximize	140	420
Feed rate (F)	Is in the range	0.12	0.24
Depth of cut (C)	Is in the range	0.5	1.5
Flank wear (V_b)	Minimize	0.13	0.32

Tableau I.5 : Résultat d'optimisation.

Solution number	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	Vb (mm)	Desirability	Remarks
1	420	0.12	0.5	0.220625	0.723	Selected
2	415.79	0.12	0.5	0.219243	0.723	
3	420	0.12	0.5	0.220797	0.723	
4	412.77	0.12	0.5	0.218249	0.722	
5	409.66	0.12	0.5	0.217228	0.722	
6	408.34	0.12	0.5	0.216794	0.722	
7	419.99	0.12	0.52	0.221667	0.719	
8	396.07	0.12	0.5	0.212763	0.718	
9	419.99	0.13	0.5	0.222323	0.717	
10	391.16	0.12	0.57	0.215396	0.703	
11	419.85	0.14	0.5	0.226659	0.701	
12	420	0.12	0.61	0.227715	0.697	
13	420	0.17	0.5	0.232245	0.68	
14	420	0.12	0.71	0.233464	0.675	
15	373.12	0.19	0.5	0.221732	0.656	

Les figures I.25 (a et b) montrent un fractographie SEM de la zone d'écaillage. Après usinage à grande de vitesse de l'acier, les zones d'usure des étés examinés par SEM couplé à un système d'analyse chimique EDX. Une réaction chimique entre le fer oxydé et l'alumine n'était pas évident, mais les surfaces de rupture ont été observées par des couches fissurées de la phase riche en fer [16]. Cela peut être le résultat d'une contrainte de cisaillement plus élevée et une contrainte thermique à température de coupe plus élevée permettant l'induction d'une contrainte de traction supérieure à la résistance de l'outil. La plupart des mécanismes d'usure dans les zones de cratère sont liés à la haute température atteinte dans la partie de la plaquette pendant le tournage. En fait, il est bien connu que les matériaux céramiques en général conservent leurs propriétés mécaniques, même à température élevée. L'usure de cette partie est

due à la déformation plastique de l'alumine et au mécanisme d'adhésion. Selon le mécanisme, des particules chaudes de fer collent sur la face de coupe et en retirent d'alumine et des grains de zircone. La surface de la céramique est sujette à la déformation plastique provoquée par l'écoulement du copeau.

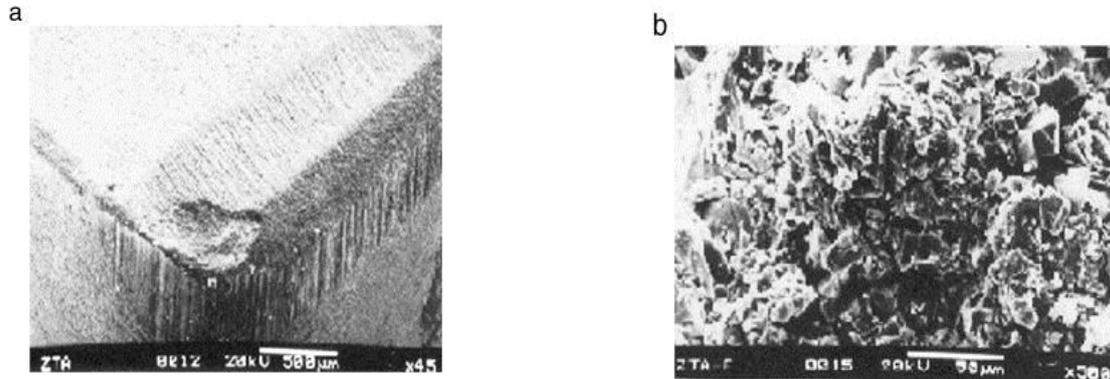


Fig. I.25 (a) Micrographie SEM de la Plaquette ZTA après 15 min d'usinage

(b) Image SEM de la surface du crater Sur le bec de l'outil

I.3.1.4 Conclusion

Les conclusions suivantes ont été tirées :

1. L'utilisation de la méthodologie RSM s'est avéré être un outil efficace pour la prédiction de l'usure de cette nuance d'outil nouvellement développée.
2. la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe sont les trois paramètres les plus importants qui influencent significativement l'usure en dépouille, alors que l'effet d'interaction de la vitesse de coupe et l'avance a également un effet prédominant sur l'usure en dépouille.
3. Cette étude montre que la pente d'usure diminue légèrement dans la plage des vitesses élevées (250 à 400 m/min).
4. Le modèle quadratique réduit développé en utilisant RSM est raisonnablement précis et peut être utilisé pour la prédiction d'un régime de coupe optimal, dans les limites des facteurs étudiés.
5. Les résultats de l'analyse de la variance et des expériences de validation confirmer que le modèle mathématique développé montre excellente prédit valeurs sont très proches des valeurs expérimentales

I.3.2 Comparaison de vie de l'outil de coupe entre le bore cubique céramique et nitrure (CBN) pour l'usinage des aciers trempés

I.3.2.1 Introduction

Dans cet article, Y. Sahin [17] décrit une comparaison de la durée de vie des outils de coupe en céramique et nitrure de bore cubique (CBN) lors de l'usinage des aciers à roulement durci en utilisant la méthode de Taguchi. Un plan orthogonal, le rapport signal-bruit (S/N) et l'analyse de variance (ANOVA) ont été utilisés pour déterminer les paramètres de coupe influents sur la durée de vie de l'outil. Des modèles linéaires du première ordre et exponentiels ont été utilisés pour la corrélation entre le temps de coupe et les variables indépendantes. Un modèle de régression du second ordre a également été étendu à partir du modèle du 1^{er} ordre lors de l'examen de l'effet de la vitesse de coupe (V), l'avance (f), la dureté de l'outil (TH) et des interactions entre les variables V, f, TH. Les résultats indiquent que la vitesse est révélée être un facteur dominant sur la durée de vie, suivie de la dureté de l'outil et enfin l'avance. Outil de coupe CBN a montré la meilleure performance que celle des outils de coupe à base de céramique. L'amélioration du rapport signal/bruit à partir des paramètres initiale vers des paramètres de coupe, optimaux ou capacité de prédiction dépendant du rapport S/B et les résultats d'analyse de variance. En outre, l'analyse de la variance a indiqué que la vitesse de coupe était une fortement significative mais d'autres paramètres sont aussi des effets significatifs sur la durée de vie de l'outil à 90% du niveau de confiance.

I.3.2.2 Résultats et discussion

La figure I.26 montre les effets principaux des valeurs moyennes des rapports S/N de la durée de vie des outils de coupe. Plus grand est le rapport S/N, plus petite est la variance de la durée de vie de l'outil autour de la valeur souhaitée. Les conditions optimales de ces facteurs de contrôle pourraient être très facilement déterminées à partir du diagramme de réponse. La meilleure valeur de la durée de vie de l'outil correspond au niveau supérieur à la valeur S/N dans le graphique de réponse. Pour principaux facteurs de contrôle, d'après figure 6. Il est évident que la vitesse de coupe a eu le plus grand effet.

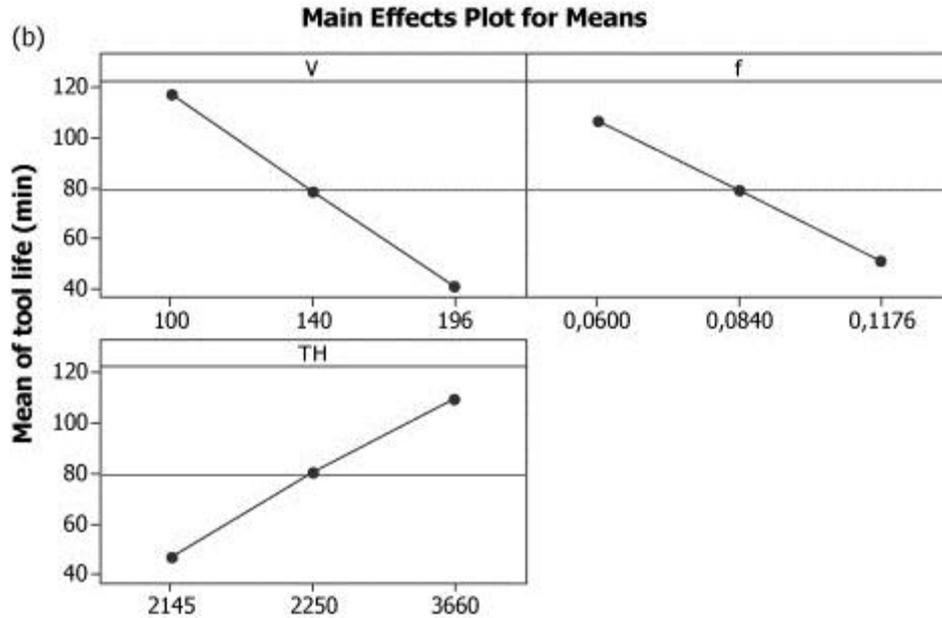


Fig. I.26 droites des effets principaux des moyennes des facteurs sur la durée de vie

I.3.2.3 Conception expérimentale

La profondeur de passe était fixée à $a_p = 0.2$ mm pour tous les essais. Trois niveaux de l'avance (f) 0.06, 0.084, et 0.117mm/tr ont été choisis. Aussi trois niveaux de la vitesse de coupe (V) ont été choisis: 100, 140, et 196 m/min. le plan d'expériences (plan de taguchi $L_9(3^4)$) ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans le tableau I.6. Les expériences ont été entreprises deux fois pour chaque ligne de la table orthogonale pour éviter les erreurs possibles dans l'étude l'expérimental. Dans la méthode du Taguchi, les résultats expérimentaux sont transformés en signal/bruit (S/N). Cette méthode recommande l'utilisation du rapport de S/N aux caractéristiques de qualité de mesurer déviant des valeurs désirées. Pour obtenir des paramètres d'essai optimaux, la qualité le-plus haut-le-meilleur pour usiner les aciers a été prise en raison de la mesure de la vie d'outil. Le rapport de S/N pour chaque niveau des paramètres d'essai a été calculé. Cette conception était déciment pour étudier les trois effets principaux. Avec l'analyse du rapport S/N, la combinaison optimale des paramètres d'essai peut être déterminée.

Tableau I.6 : Conception et résultats expérimentaux pendant les vies d'outil et leurs rapports de S/N

Trial number	Control factors and their uncoded values			Experimental and theoretical values	
	<i>V</i> (m/min)	<i>f</i> (mm/rev)	TH (HV)	Measured tool life, <i>T</i> (min)	S/N ratio (dB)
1	100	0.06	2145	114	41.138
2	100	0.084	2250	117.5	41.401
3	100	0.1176	3660	121	41.656
4	140	0.06	2250	108.5	40.709
5	140	0.084	3660	110	40.828
6	140	0.1176	2145	17.5	24.861
7	196	0.06	3660	97.5	39.780
8	196	0.084	2145	10.1	20.086
9	196	0.1176	2250	15.1	23.580
Mean S/N ratio (dB)					34.893

I.3.2.4 Conclusion

Les conclusions suivantes ont été tirées des résultats de la durée de vie des outils différents aciers trempés portant outils de coupe en usinant.

Le plan orthogonal L_9 (3^4) a été adopté pour étudier les effets de la vitesse de coupe, l'avance et la dureté des outils de coupe sur la vie de l'outil. Les résultats ont montré que la vitesse de coupe possède le plus grand effet sur l'usure de l'outil, suivie de la dureté de l'outil et enfin l'avance par tour. Le rapport estimé signal/bruit en utilisant le paramètre de test optimisation pour la durée de vie a été calculée. Le modèle de régression a également été présenté par le modèle exponentiel et second ordre.

D'autre part, l'analyse de la variance a indiqué que la vitesse de coupe avait une signification élevée mais d'autres paramètres avaient des effets significatifs sur la durée de vie de l'outil à un niveau de confiance de 90%. En effet les contributions en pourcentage de la vitesse de coupe, la dureté de l'outil, et l'avance étaient d'environ 41,63, 32,68 et 25,22% sur la vie de l'outil, respectivement.

I.3.3 Mécanismes d'usure de plusieurs matériaux d'outils de coupe en tournage dur de l'acier à outils de haute teneur en carbone-chrome

I.3.3.1 Introduction

Dans cette étude M.A. Shalaby and all [18], illustrent la performance de trois différents matériaux d'outils de coupe, à savoir: PCBN, TiN PCBN, et la céramique mixte d'aluminium (Al_2O_3+TiC) lors du tournage de l'acier à outil D2 durcie (52 HRC). La formation de films tribologiques Cr-O sur la surface de l'outil en céramique comme un résultat de l'interaction avec le matériau de la pièce et de l'environnement (identifiés par spectroscopie rayons X) conduit à une amélioration des propriétés lubrifiantes à l'interface outil / pièce. Les résultats obtenus ont révélés que l'outil céramique mixte peut dépasser les deux types de PCBN selon des critères différents d'usinabilité.

I.3.3.2 procédure expérimentale

Acier à outils AISI D2 durci à 52 HRC a été employé, la composition chimique est donnée par le tableau I.7 suivant :

Tableau I.7 : Composition chimique du matériel d'objet.

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%Fe
1.55	0.3	0.4	11.8	0.8	0.8	Balance

Les essais d'usinage ont été effectués sur un tour à commande numérique de puissance 3 kW. Le rayon du bec d'outil (r_c) a été maintenu constant (1.2 mm) pour tous les matériaux à outil employés, un microscope d'un fabricant d'outil a été utilisé pour mesurer la largeur de la bande d'usure de l'outil (VB). La composition chimique et la dureté des matériaux à outil utilisés sont données dans le tableau I.8.

Tableau I.8 : Composition chimique des spécifications de matériaux d'outil de coupe et de support d'outil

Matériau à outil	Composition Chimique	dureté	spécifications du porte outil	micro-géométrie de la plaquette
PCBN (BNX20)	60% CBN+TiN binder	3100–3300 HV	–5° rake angle, 5° clearance angle, 75° setting angle	Chamfer angle – 25°, Effective chamfer angle – 30°, Cutting edge angle 90°
TiN coated PCBN (CB7020)	57% CBN+TiN binder TiN physical vapor deposition (PVD) coated, 2 μm thickness	2700–2900 HV		
Mixed Alumina	70% $Al_2O_3+30%$ TiC	2000 HV		

I.3.3.3 Résultats et discussion

La figure I.27 illustre le comportement de la largeur de la bande d'usure en dépouille (VBB) – ainsi que les traces d'usure qui ont eu lieu dans la zone du bec de l'outil – en fonction du temps d'usinage (t) pour les trois matériaux d'outils. Tout d'abord, un test d'usinage a été réalisé à 100 m/min. Il a été remarqué que, au début du processus d'usinage, l'usure la plus faible a été obtenue avec l'outil PCBN. Cependant, après un temps d'usinage de 5,5 min, (après avoir dépassé une usure de 0,12 mm) l'usure la plus faible était obtenue par l'outil en céramique. Le PCBN revêtu de TiN a donné la valeur la plus élevée à l'usure parmi les matériaux d'outils utilisés. Lorsque la vitesse de coupe est augmentée à 175 m/min, des résultats similaires ont été observés. La figure I.III.7 montre que le rodage et les phases d'usure stables peuvent être facilement observés lors de l'utilisation de l'outil en céramique, alors que pour les deux types d'outil PCBN; des valeurs d'usure plus élevées en fonction du temps ont été obtenues.

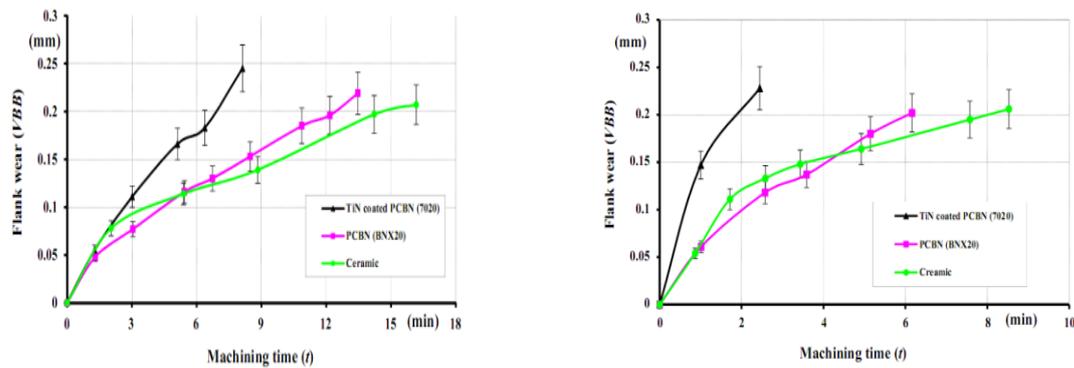


Fig. I.27 courbes d'usure à différentes vitesses de coupe en utilisant différents matériaux d'outils; (a) $v_c = 100$ m/min, (b) $v_c = 175$ m/min; $a_p = 0,06$ mm, $f = 0,05$ mm/tr, $r_\epsilon = 1,2$ mm.

Figure I.III.8 présentes les micrographes de SEM des trois portés hors des insertions. Les marques d'abrasion sont claires sur les trois d'outil de coupe. L'usage de cratère n'est pas trouvé sur le visage en céramique d'outil, tandis qu'il peut observer sur les visages des deux types d'insertions de PCBN.

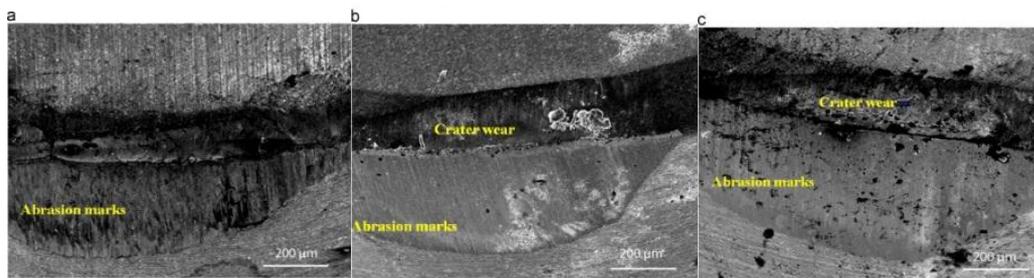


Fig. I.28 Micrographes de SEM des plaquettes usées ;(a) Céramique mixte, (b) PCBN, (c) PCBN à revêtement TiN $V_c=100$ m/min, $a_p=0.06$ mm, $f=0.05$ mm/ tour, $r_\epsilon = 1.2$ mm.

I.3.3.4 Conclusion

La présente étude illustre les mécanismes d'usure des différents matériaux d'outils utilisés dans l'usinage des aciers à outils AISI D2 durci. La cinématique du frottement entre chaque matériau d'outil et le matériau de la pièce contrôle l'évolution de l'usure de l'outil. L'outil en céramique mixte a donné la durée de vie de l'outil la plus importante et les plus faibles composantes de l'effort de coupe. Comme le montre cette recherche cette combinaison de caractéristiques n'existe pas avec PCBN.

I.3.4. Étude comparative de la rugosité de surface obtenue par des outils céramiques classiques et wiper lors du tournage dur de l'acier AISI 4140

I.3.4.1 Introduction

Le travail présenté par Mohamed Elbah and all [19], Cette étude traite la comparaison entre les critères de rugosité de surface (R_a , R_z et R_t) obtenus avec une plaquette wiper et ceux obtenus par des plaquettes conventionnelles, lors du tournage dur de l'acier AISI 4140 traité (60HRC). La méthodologie de planification des expériences a été utilisée en se basant sur la table orthogonale L_{27} de Taguchi. La méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'analyse de variance (ANOVA) ont été utilisées pour vérifier la validité du modèle de régression quadratique et pour déterminer les paramètres significatifs affectant la rugosité de surface. La recherche des conditions d'usinage optimales pour produire la meilleure rugosité de surface a été réalisée en utilisant l'approche de la fonction de désirabilité pour une optimisation à réponses multiples.

I.3.4.2 Résultats et discussion

I.3.4.2.1 Evolution des critères de rugosité

Les figures I.29 et I.30 expriment l'évolution des critères de rugosité de surface par rapport à l'avance, pour plusieurs profondeurs de coupe. Selon le graphe on peut voir que la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de l'avance, parce que son augmentation génère des sillons hélicoïdaux. Ces sillons sont plus profonds et plus large lorsque l'avance augmente [20]. Des Résultats similaires ont été rapportés par Bouchelaghem [21] lors du tournage de l'acier AISI D3 (60 HRC) avec l'outil CBN. Les valeurs maximales de critères de rugosité de surface (R_a , R_t et RZ) ont été trouvées à $V_c = 80\text{m/min}$ et $f = 0,14\text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,10\text{mm}$. Afin de parvenir à une meilleure finition de surface, le plus haut niveau de la vitesse de coupe, à 150 m/min , le plus bas niveau de l'avance, $0,08\text{mm/tr}$, sont recommandés.

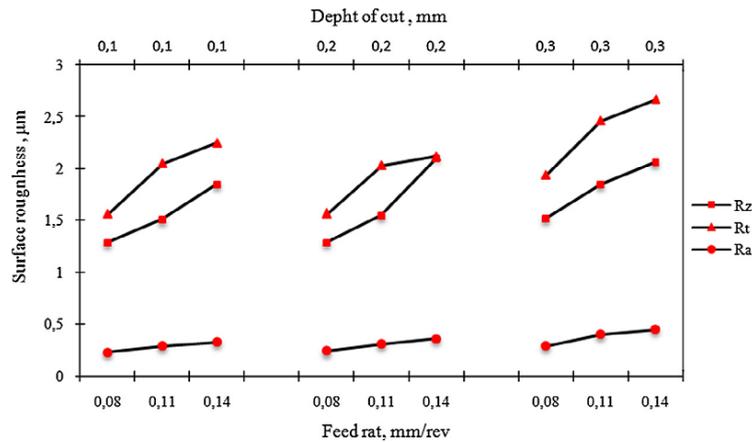


Fig. I.29 Évolution de la rugosité de surface l'ors de la coupe avec la CC6050WH ($V_c = 115$ m/min)

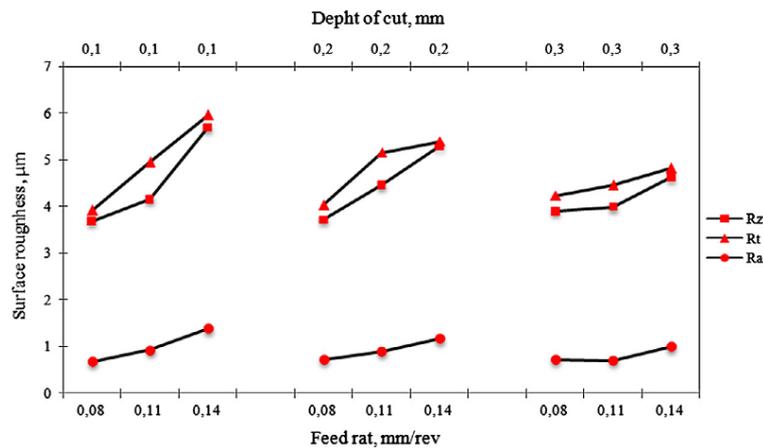


Fig. I.30 Évolution de la rugosité de surface lors de la coupe avec la CC6050 ($V_c = 115$ m/min).

I.3.4.2.2 Analyse statistique du critère de rugosité Ra

Le tableau I.9 présente les résultats de l'ANOVA du critère de rugosité Ra. Il est constaté l'avance est le facteur le plus important affectant la rugosité de surface, sa contribution est (63.455 et 74.517)% respectivement pour la CC6050WH et la CC6050. Le deuxième facteur influencé la rugosité Ra est la profondeur de la coupe. Sa contribution est (33.594 et 12.283)% respectivement (CC6050WH et CC6050). L'effet de la vitesse de coupe n'est pas significatif parce que sa contribution est 0.560% pour CC6050WH, aussi les différentes interactions n'ont pas d'effet significatif sur la rugosité.

Tableau I.9 : Analyse de la variance pour Ra

Source	SS	DF	MS	F-value	Prob.	Cont. %	Remarks
<i>(a) Wiper: CC6050WH</i>							
Model	0.081	9	8.977E-3	13.75	0.0001		Significant
Vc	4.500E-4	1	4.500E-4	0.69	0.4180	0.560	Not significant
F	0.051	1	0.051	78.40	0.0001	63.455	Significant
Ap	0.027	1	0.027	41.68	0.0001	33.594	Significant
Vc × f	1.333E-4	1	1.333E-4	0.20	0.6571	0.166	Not significant
Vc × ap	4.083E-4	1	4.083E-4	0.63	0.4400	0.508	Not significant
f × ap	8.333E-6	1	8.333E-6	0.013	0.9114	0.010	Not significant
Vc × Vc	9.074E-5	1	9.074E-5	0.14	0.7139	0.113	Not significant
f × f	2.963E-5	1	2.963E-5	0.045	0.8339	0.037	Not significant
ap × ap	1.252E-3	1	1.252E-3	1.92	0.1841	1.558	Not significant
Error	0.011	17	6.531E-4				
Total	0.092	26				100	
<i>(b) Conventional: CC6050</i>							
Model	1.21	9	0.13	98.67	0.0001		Significant
Vc	0.014	1	0.014	10.17	0.0054	1.146	Significant
F	0.91	1	0.91	664.22	0.0001	74.517	Significant
Ap	0.15	1	0.15	106.80	0.0001	12.283	Significant
Vc × f	5.333E-4	1	5.333E-4	0.39	0.5402	0.044	Not significant
Vc × ap	8.333E-4	1	8.333E-4	0.61	0.4454	0.068	Not significant
f × ap	0.11	1	0.11	79.33	0.0001	9.008	Significant
Vc × Vc	1.252E-3	1	1.252E-3	0.92	0.3517	0.103	Not significant
f × f	0.031	1	0.031	22.93	0.0002	2.538	Significant
ap × ap	3.585E-3	1	3.585E-3	2.63	0.1235	0.294	Not significant
Error	0.023	17	1.365E-3				
Total	1.24	26				100	

I.3.4.2.3 Evolution de la rugosité en fonction de l'usure

Les mesures de rugosité révèlent une dépendance de l'état d'usure de l'outil. La figure I.31 montre que la plaquette wiper CC6050WH a la meilleure performance comparée à la plaquette conventionnelle CC6050, en termes de rugosité de surface usinée. D'autre part la rugosité moyenne Ra n'a pas excédé 0.88 µm pour CC6050WH et 0.99 µm pour CC6050, cela pour un temps de coupe de 90 min. Des résultats semblables ont été rapportés par Grzesik et Wanat [22] et Özel et al. [23] lors du tournage dur en utilisant des plaquettes céramique wiper.

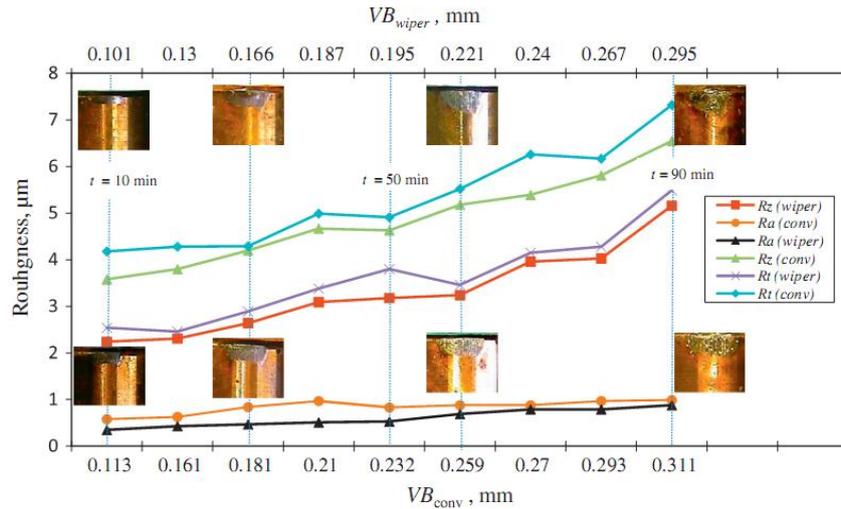


Fig. I.31 Effet de l'usure sur la rugosité à

$V_c=160\text{m/min}$; $f=0,08\text{mm / tr}$; $a_p=0,2\text{mm}$.

I.3.4.3 Conclusion

Sur la base des résultats expérimentaux et de leur traitement, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

(1) Le résultat d'ANOVA a montré que les modèles mathématiques du second degré permettent la prédiction des critères de rugosité de surface avec un intervalle de confiance de 95%.

(2) En général, la plaquette de coupe céramique wiper CC6050WH donne la meilleure performance par rapport à celle conventionnelle CC6050, en termes de rugosité de surface. Le rapport moyen de la rugosité de la surface est d'environ 2,5.

(3) L'analyse statistique de la rugosité de surface indique que l'avance est l'élément qui possède l'effet le plus significatif sur les critères de rugosité de surface (Ra, Rz et Rt) avec une contribution respective de (63,455; 70,474et65, 678)% pour la céramique CC6050WH par contre pour la céramique CC6050 la contribution est de (74,517; 70,964et70, 615)% en réduisant les valeurs de rugosité moyenne.

I.4 Conclusion

Cette étude bibliographique a montré la difficulté de l'étude de l'usinage des matériaux durcis. En effet les différentes références consultées montrent que chaque cas d'usinage possède ses propres spécificités à cause de la complexité du processus d'usinage. Pour cela nous proposons d'étudier le tournage de l'acier fortement allié Z200Cr12, dans le but de rechercher les meilleures conditions (*conditions optimales*) pour l'usinage de cet acier. Pour satisfaire cet objectif, une démarche expérimentale est proposée. Il s'agit de réaliser un plan d'expériences de Taguchi, où les paramètres d'entrée seront la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps de coupe. Les paramètres de sortie, représentant les fonctions objectives de notre étude seront l'état d'usure de l'outil de coupe, un critère de rugosité de la surface usinée et un paramètre de productivité tel que le volume de copeau enlevé. De cette manière il est possible d'utiliser une des différentes techniques d'optimisation multi-objectives afin de trouver un compromis, tant recherché, entre productivité et qualité de la pièce usinée.

Chapitre II

*Procédure et équipements
d'expérience*

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les principaux équipements qui ont servis pour la réalisation des expériences, il s'agit d'un rugosimètre pour la mesure des critères de rugosité de la surface usinée, d'une plate forme de mesure des composantes de l'effort de coupe et d'un microscope VISUAL 250 qui permet de contrôler l'état d'usure des plaquettes de coupe utilisées. En fin nous présentons le plan choisi ainsi que les conditions de réalisation des expériences.

Les essais d'usinage de l'acier Z200Cr12 sont réalisés sur un tour universel SN40C au sein du Laboratoire de coupe des métaux à l'université 08 Mai 1945 de Guelma.

II.2 Matériels utilisés

II.2.1 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN40C, La puissance sur la broche égale à 6.6KW (figure II-1). Les fréquences de rotation disponibles sur le tour entre (22.5 à 2000) tr/min.



Figure II.1 tour parallèle model SN40

II.2.2 Matériau utilisé

Les opérations de chariotage relatives aux essais d'usure ont été effectuées sur des éprouvettes rondes en acier traité de nuance Z200Cr12, Grâce à sa résistance élevée à l'usure, l'acier Z200Cr12 connu aussi sous la dénomination d'AISI D3 est un acier à outil à haute teneur en chrome présentant le minimum de risques de déformation et d'altération des dimensions aux traitements thermiques. Il a une excellente tenue à l'usure (haute résistance à

l'usure), utilisé pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filière d'étirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois peigne à rouler les filets [24].

Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suit :

1. Densité : 7.7g/cm³
2. Module d'élasticité: 21.10 MPA.
3. Conductibilité thermique: 20 W/m.C°.
4. Coefficient moyen de dilatation en m/m°C :
 - entre 20°C et 100°C : 10,5x10⁻⁶
 - entre 20°C et 300°C : 11,0x10⁻⁶
 - entre 20°C et 500°C : 12,0x10⁻⁶

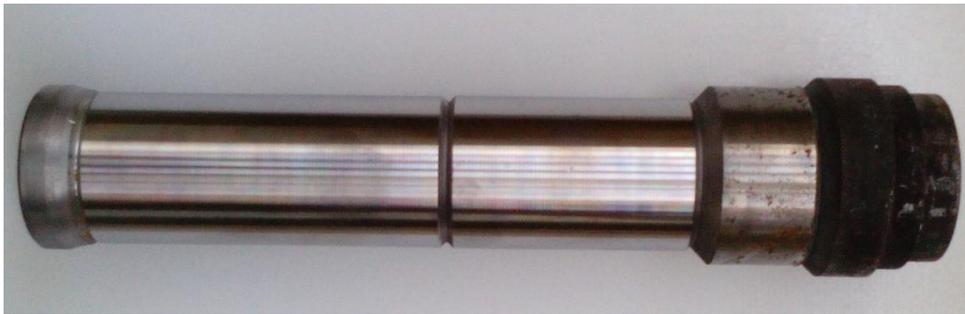


Figure II.2 : photo d'éprouvette utilisée

Traitement thermique appliqué

Pour le traitement thermique des éprouvettes, nous avons réalisé une trempe suivie d'un revenu, ce qui a augmenté la dureté des éprouvettes à 54 HRC (tableau II.1)

Tableau II.1: Conditions de traitement thermique

Acier	Dureté avant traitement	Dureté après traitement	Traitement thermique		Temps de maintien
			Trempe	Revenu	
Z200Cr12	27 HRC	54 HRC	960°C	510°C	60 minutes

La figure II.3 présente le diagramme de revenu de l'acier Z200Cr12 établi par le fabricant [BÖHLER].

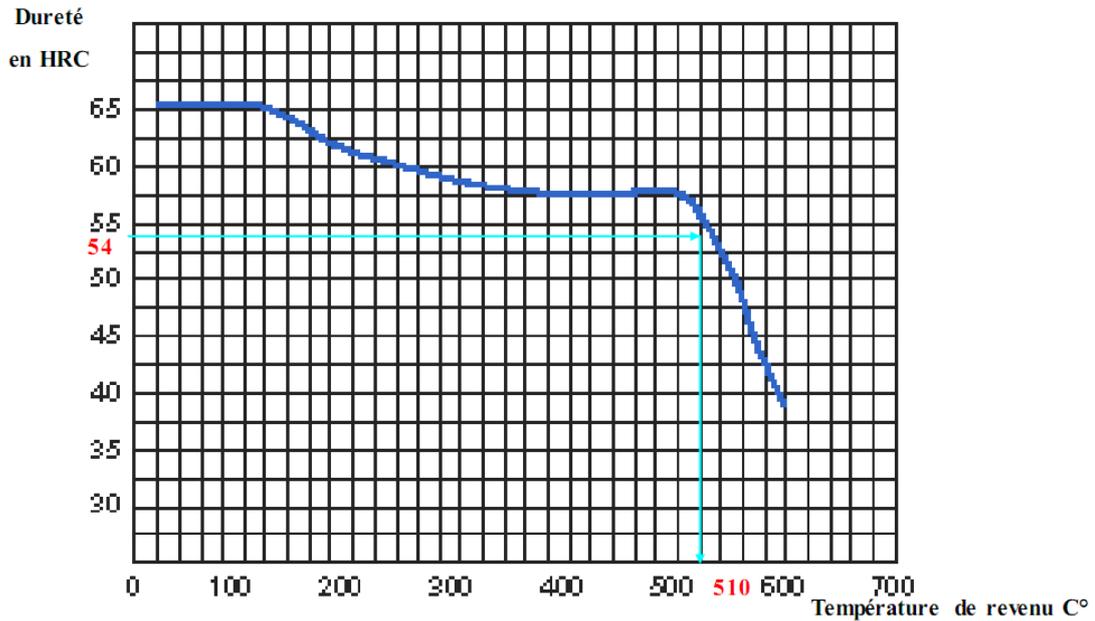


Figure II.3: Diagramme de revenu

Tableau II.2 : les compositions chimiques de l'acier Z200Cr12

Elément	Pourcentage (%)
Carbone(C)	2,00-2,20
Silicium (Si)	0,25-0,45
Manganèse (Mn)	0,25-0,35
Chrome(Cr)	12,00-14,00

II.2.3 Outils de coupe utilisés

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée à fixation par trou centrale. Elles sont de marque Sandvik et de désignation SNGA120408T01525S avec une composition chimique de : (70% Al_2O_3 + 30% TiC) et avec revêtement en TiN (figure II.4). Ces plaquettes possèdent une meilleure ténacité et une bonne conductivité thermique. Toutes les informations relatives à ces plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau II-3.

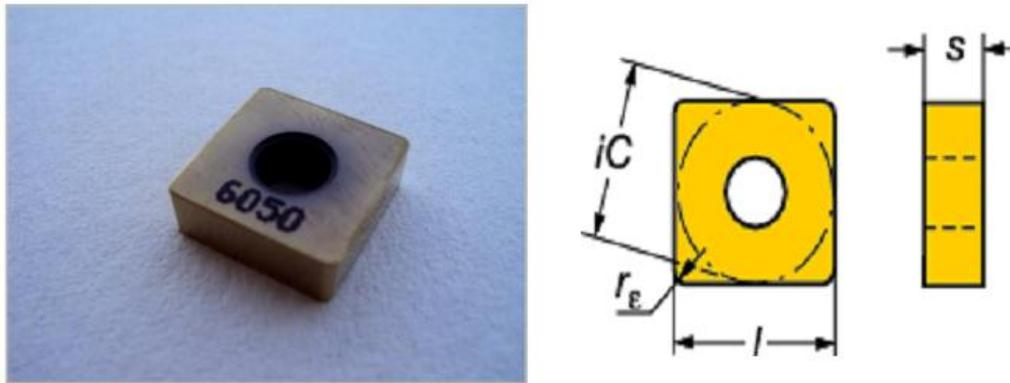


Figure II.4: Plaquette Céramique CC6050

Tableau II.3: Informations relatives à la plaquette de coupe

Matériau de coupe	Désignation firme	Désignation ISO	Firme	Composition	Epaisseur de revêtement	Rayon r_{ϵ}
Céramique mixte revêtue	CC6050	SNGA120408T01525S	Sandvik	70 % Al_2O_3 + 30 % TiC + revêtement enTiN	Fin	0,8mm

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé un porte outil sur lesquels on fixe les plaquettes mécaniquement par trou central.



Figure II.5 le porte plaquette

La géométrie du porte outil est donnée dans le tableau II.4 Ce porte-plaquette permet de travailler avec la géométrie suivante :

Tableau II.4: Caractéristique géométrique du porte outil

Porte outil	Section (mm ²)	χ°	α°	γ°	λ°
PSBNR2525K12	25*25	75°	6°	-6°	-6°

II.2.4 Appareillages de mesure utilisés

II.2.4.1 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo), la plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à 40 μm) pour R_a , la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (fig II.6).

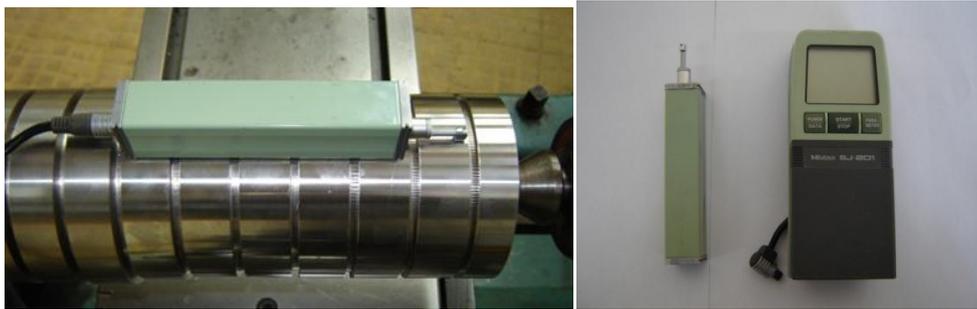


Figure II.6 mesure de la rugosité sans démontage de la pièce

II.2.4.2 Mesure des efforts

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (KISTLER 9257 B), 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 cite: la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel (DYNOWARE).

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est animé du mouvement d'avance. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (fig. II.7).

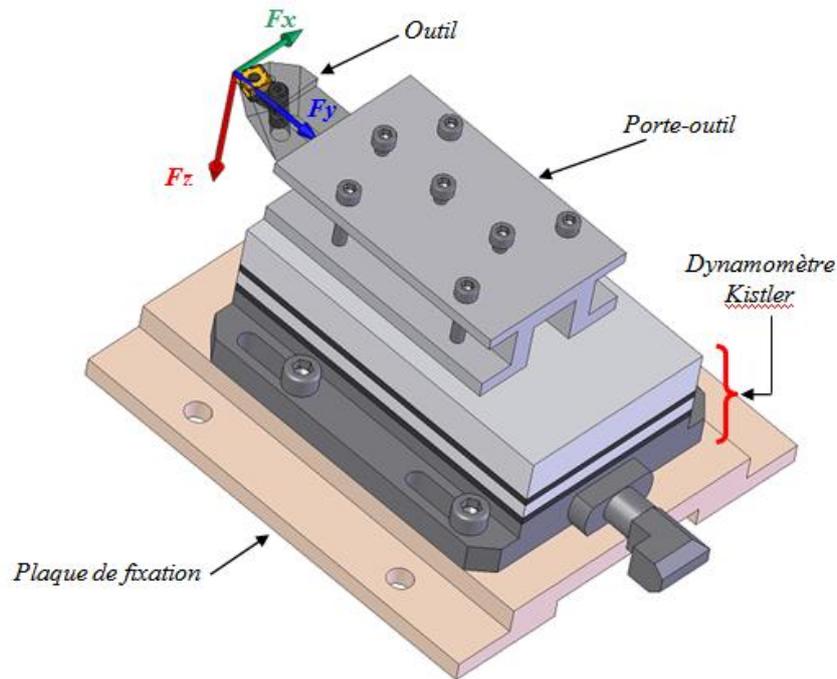


Figure II.7 Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties par les capteurs piézo-électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (*DYNOWARE*) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimé en trois composantes (fig II.8, fig II.9).

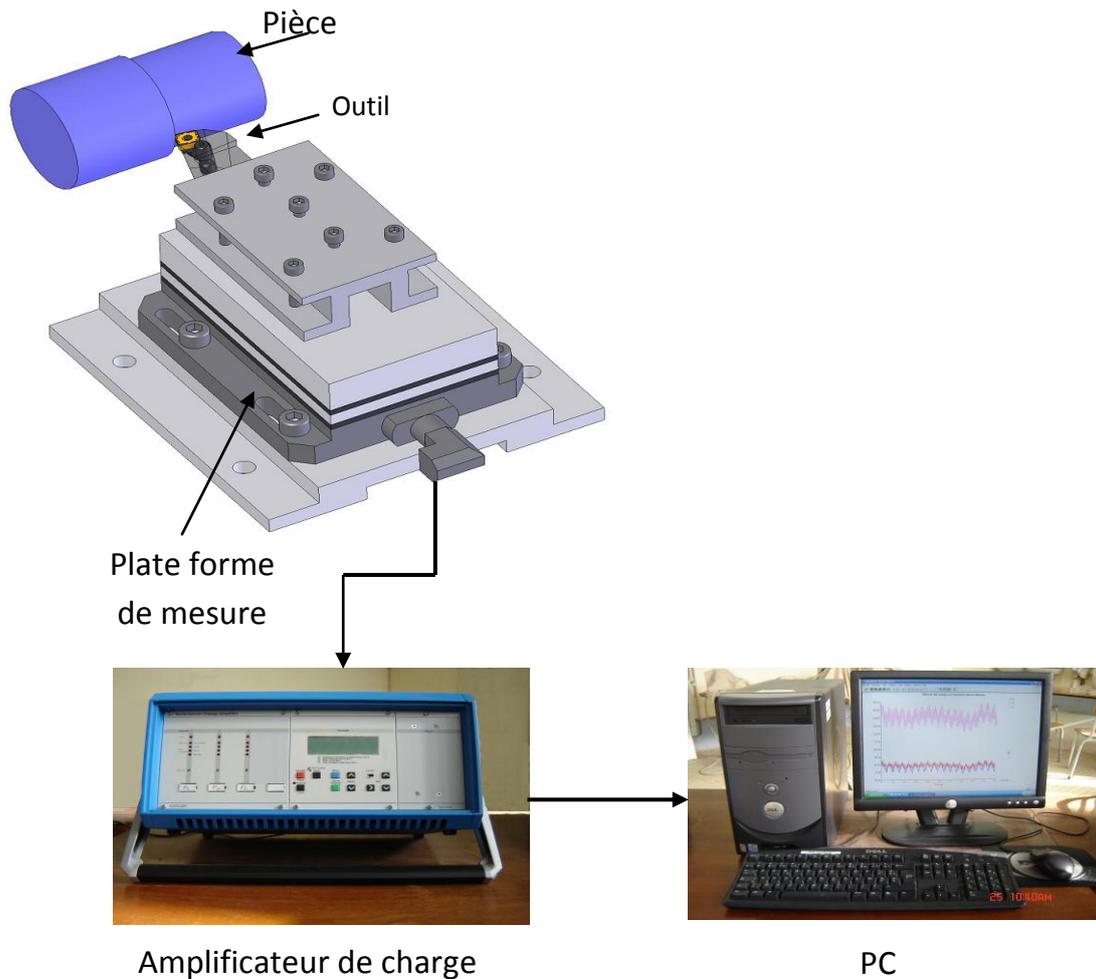


Figure II.8 Chaîne de mesure des efforts de coupe

La (figure II.9) présente un exemple d'acquisition qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (*Effort axial*: F_x , *Effort radial*: F_y et *Effort tangentiel*: F_z).

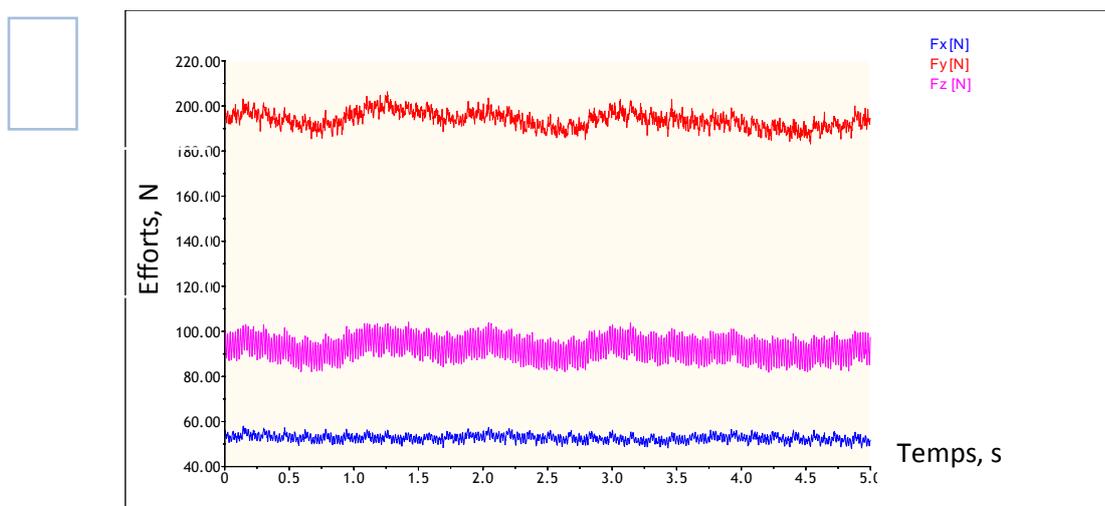


Figure II.9 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE »
Essai 5 : $V_c = 80\text{m/min}$, $f = 0.14\text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.2\text{ mm}$

II.2.4.3 Mesure de l'usure

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure est du type *VISUAL 250* est la réponse à une demande croissante de l'industrie pour des systèmes capables de mesurer des formes ou des matières hors d'atteinte des moyens tactiles. La nouvelle *VISUAL 250* manuelle, compacte mais sans compromis quant à ses performances métrologiques, est à même de satisfaire la demande du marché dans le domaine de la mesure 2D. Sa conception mécanique est d'une grande robustesse, ce qui permet une utilisation de la machine aussi bien en atelier que dans le laboratoire de mesure. Equipée de Visual Gage – le logiciel qui requiert moins d'un demi-jour de formation la *VISUAL 250* se révèle un moyen multitâche et multiutilisateur parfait pour la mesure sans contact. (Figure II.10).



Figure II.10 : *VISUAL250* pour la mesure de l'usure

II.2.4.4Autres équipements utilisé

- un appareil photo numérique pour prendre les photos.
- un pied à coulisse pour mesurer les dimensions de la pièce.

II.3 Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c , f , T_u), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la rugosité,... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

✓ **Méthode de planification des expériences**

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs. Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (Vc, f, Tu) sur les inverses fonctions d'optimisation (Usure, rugosité et efforts de coupe), Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule Suivante:

$$N = q^k \dots\dots\dots (II.1)$$

Où:

- N: nombre d'essais ;
- q: nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;
- k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base (k=3) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)).

Nous avons alors: $N=3^3=27$.

Les essais sont numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II.5.

L'expérimentateur, quel que soit son domaine d'étude, est toujours confronté au problème difficile de l'organisation optimale de ses essais. Comment obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ?

L'utilisation des plans d'expériences, et en particulier les tables orthogonales de Taguchi, a permis la détermination de l'influence des effets simultanés et de l'interaction des paramètres opératoires sur l'usure, les efforts de coupe et la rugosité.

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

Tableau II.5 Matrice de planification pour un plan 3^3 [25]

N° d'essai	Facteurs		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Tu(min)
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X1	X2	X3
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

Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats [26].

Dans cette recherche, la table orthogonale standard L_{27} (3^3) de Taguchi est adoptée comme plan expérimentale (tableau II.5). Les niveaux de paramètre ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau II.6.

La table orthogonale standard $L_{27} (3^3)$ de Taguchi a 27 lignes correspondant au nombre d'essais et 13 colonnes à trois niveaux. Les facteurs et leurs interactions sont assignés aux colonnes. En effet, la première colonne de la table a été assignée à la vitesse de coupe (V_c), la seconde à l'avance (f) et la cinquième au temps d'usinage (T_u).

Tableau II.5 : Plan d'expériences (table orthogonale de Taguchi ($L_{27} (3^3)$)) [26].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
03	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
04	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
05	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
06	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
07	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
08	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
09	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

II.4. Conditions de coupe

Les essais de chariotage sont effectués sur un acier traité de nuance Z210Cr12, La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification sous les conditions de coupe indiquées dans le tableau II.6 :

Tableau II.6 : les paramètres de coupe et paramètre de sortie

Paramètre constant	valeur	Les paramètres	Valeurs
ap (mm)	0,2	Vc (m/min)	80; 110 ; 140
		f (mm/tr)	0,08; 0,11; 0,14
		Tu (min)	4 ; 8 ; 12

II.5 conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les équipements nécessaires pour la réalisation des essais et la composition chimique des éprouvettes. Les caractéristiques du matériau de coupe, les appareils de mesure et la planification des expériences ont été désignées.

Chapitre III

*Etude de l'influence des
paramètres de coupe*

III.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une étude expérimentale de l'influence de certains facteurs tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) ainsi que le temps d'usinage (T_u), susceptibles d'influencer les paramètres technologique, à savoir l'usure de l'outil, les composantes de l'effort de coupe, les critères de la rugosité de surface, la puissance de coupe et le débit de matière. Des modèles mathématiques sont déduits, décrivant la relation qualitative et quantitative entre les paramètres de coupe considérés et les paramètres technologiques étudiés.

Pour cela nous avons réalisé l'usinage de l'acier Z200Cr12 traité à 54 HRC, avec un outil en céramique revêtue, suivant un plan d'expérience de taguchi du type $L_{27} (3^3)$.

D'une part les résultats expérimentaux sont traités à l'aide du logiciel d'analyse Design-Expert 8.0.7 qui permet de donner le modèle mathématique ainsi que d'établir l'analyse de la variance ANOVA, Cette analyse détermine le pourcentage de contribution des facteurs, des interactions et les termes carrés sur les paramètres étudiés. D'autre part ces données expérimentales ont permis de calculer certains paramètres technologiques non mesurables directement lors des essais, qui ont subi un traitement similaire à celui des composantes de l'effort et des critères de rugosité. Enfin les différents modèles déduits ont servis à une étude d'optimisation du processus de coupe.

III.2 Résultats des expériences

Les valeurs des paramètres de réponse considérés sont présentées dans le tableau III.1. Ces résultats sont obtenus suivant le plan d'expérience de taguchi à 27 essais avec 3 facteurs et 3 niveaux.

Tableau III.1 Résultats expérimentaux des critères de rugosité, L'usure en dépouille et les composantes de l'effort de coupe

N	Les valeurs d'entrée			Les valeurs de sortie				
	Vc, m/min	f, mm/tr	Tu, min	VB, mm	Ra, μm	Fx, N	Fy, N	Fz, N
01	80	0.08	4	0.021	0.32	14.01	65.22	41
02	80	0.08	8	0.032	0.36	46.34	100.91	81.19
03	80	0.08	12	0.047	0.4	76.09	140	110
04	80	0.11	4	0.071	0.44	22.85	66.72	62.26
05	80	0.11	8	0.092	0.47	47.17	119.65	97.04
06	80	0.11	12	0.126	0.52	92.27	189.1	139.64
07	80	0.14	4	0.087	0.66	29.78	100.59	77.78
08	80	0.14	8	0.114	0.69	62.02	154.73	127.5
09	80	0.14	12	0.135	0.76	98.04	234.11	160.93
10	110	0.08	4	0.08	0.37	14.25	45.16	47.88
11	110	0.08	8	0.11	0.68	44.1	99.43	82.88
12	110	0.08	12	0.14	0.82	73.48	132.01	114.55
13	110	0.11	4	0.152	0.78	25.72	68.71	60.66
14	110	0.11	8	0.186	0.91	52.44	138.13	108.4
15	110	0.11	12	0.22	1.02	86.93	188.08	131.31
16	110	0.14	4	0.155	0.75	27.21	83.06	77.47
17	110	0.14	8	0.196	1.1	64.09	149.4	117.2
18	110	0.14	12	0.24	1.27	94.14	227.44	151.27
19	140	0.08	4	0.088	0.33	18.04	50.2	40.96
20	140	0.08	8	0.14	0.58	41	88.3	77.53
21	140	0.08	12	0.152	0.88	70.64	129.46	109.73
22	140	0.11	4	0.142	0.51	22.23	58.46	66.68
23	140	0.11	8	0.175	0.62	50.65	123.47	95.72
24	140	0.11	12	0.2	0.85	82.08	174.92	130.7
25	140	0.14	4	0.215	0.71	35.34	92.36	79.06
26	140	0.14	8	0.25	0.86	54.75	146.02	116.39
27	140	0.14	12	0.29	1.01	92.91	236.01	151.23

III.3 Analyse des Résultats de l'usure en dépouillé VB

III.3.1 Analyse de la variance ANOVA

Le tableau III.2 présente l'analyse de la variance ANOVA du critère de l'usure en dépouille VB. L'usure en dépouille influencée par l'avance, la vitesse de coupe (V_c) et le temps d'usinage (T_u), En plus d'après les résultats de l'ANOVA on constate que la vitesse (V_c) est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 39.96% suivi par l'avance (f) avec une valeur de 35.36%, en fin le temps d'usinage (T_u) avec 13,51 %. suivi par le terme carré (V_c^2) avec une valeur de contribution de 5.23% et le terme carré (f^2) avec une valeur 0.86%

Tableau III.2 Analyse de la variance (ANOVA) pour VB

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont.%	remarque
Model	0,1156979	9	0,0128553	58,1828243	<0.0001	96.85	significant
A- V_c	0,0477405	1	0,0477405	216,072016	<0.0001	39.96	significant
B-f	0,0422435	1	0,0422435	191,193017	<0.0001	35.36	significant
C- T_u	0,0161400	1	0,0161400	73,0493888	<0.0001	13.51	significant
AB	0,0016100	1	0,0016100	7,28718702	0.0152	1.34	significant
AC	0,0003853	1	0,0003853	1,74400667	0.2041	0.32	Non significant
BC	0,0002803	1	0,0002803	1,26877994	0.2756	0.23	Non significant
A ²	0,0062511	1	0,0062511	28,292418	<0.0001	5.23	significant
B ²	0,0010314	1	0,0010314	4,6681178	0.0453	0.86	significant
C ²	1,5574E-05	1	1,5574E-0	0,07048777	0.7938	0.01	Non significant
Residual	0,0037561	17	0,0002209			3.14	
Cor Total	0,1194540	26				100	

La figure III-1, illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'usure en dépouille VB. L'usure en dépouille influencée par l'avance, la vitesse de coupe et le temps d'usinage ont une influence significative sur l'usure en dépouille VB.

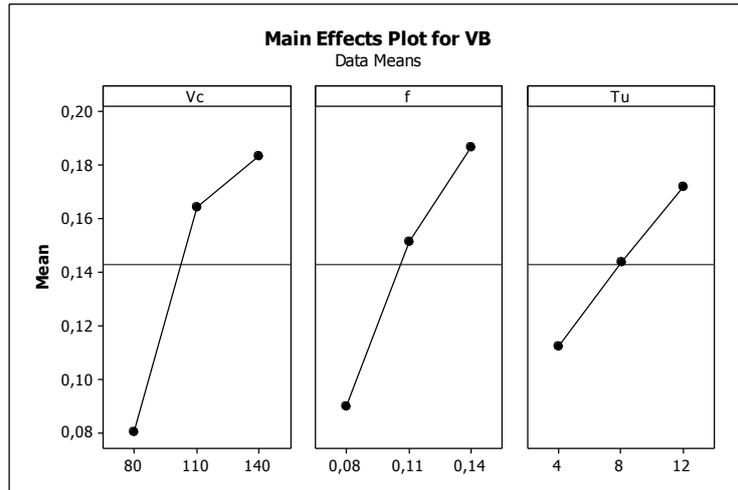


Figure III-1 Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur l'usure en dépouille VB

III.3.2 Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ces modèles permettent de décrire la relation entre le critère d'usure et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité

$$VB = -0.63615 + 7.81327E-003 * Vc + 3.08179 * f - 5.27778E-004 * Tu + 0.012870 * Vc * f + 4.72222E-005 * Vc * Tu + 0.040278 * f * Tu - 3.58642E-005 * Vc^2 - 14.56790 * f^2 - 1.00694E-004 * Tu^2$$

R-Squared 0.9686 , Adj R-Squared 0.9519 , Pred R-Squared 0.9225

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle n'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$VB = -0.70777 + 8.19105E-003 * Vc + 3.40401 * f + 7.48611E-003 * Tu + 0.012870 * Vc * f - 3.58642E-005 * Vc^2 - 14.56790 * f^2$$

R-Squared 0.9629, Adj R-Squared 0.9517, Pred R-Squared 0.9316

III.3.3 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

La figure III-2 montrent qu'en général il y a une faible dispersion des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite à 45° qui représente le cas idéal.

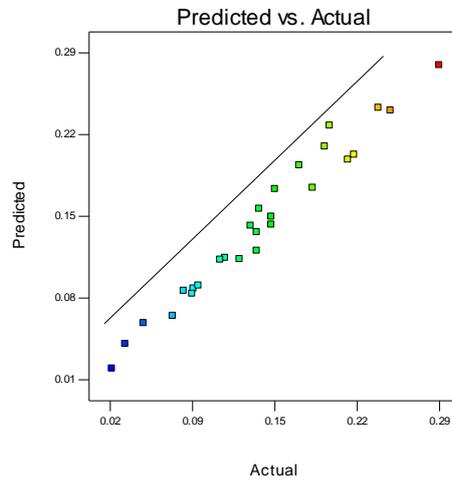


Figure III-2 les valeurs prévues en fonction des expérimentales pour l'usure en dépeuille

III.3.4 Diagrammes de surface 3D de VB et graphique de contour :

La figure III-3 permet d'évaluer l'influence simultanée de (V_c ; f), (V_c ; T_u) sur le critère l'usure en dépeillé(VB).

La figure III-4 représente les graphes de contour permettant de visualiser la projection de la surface de réponse, ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

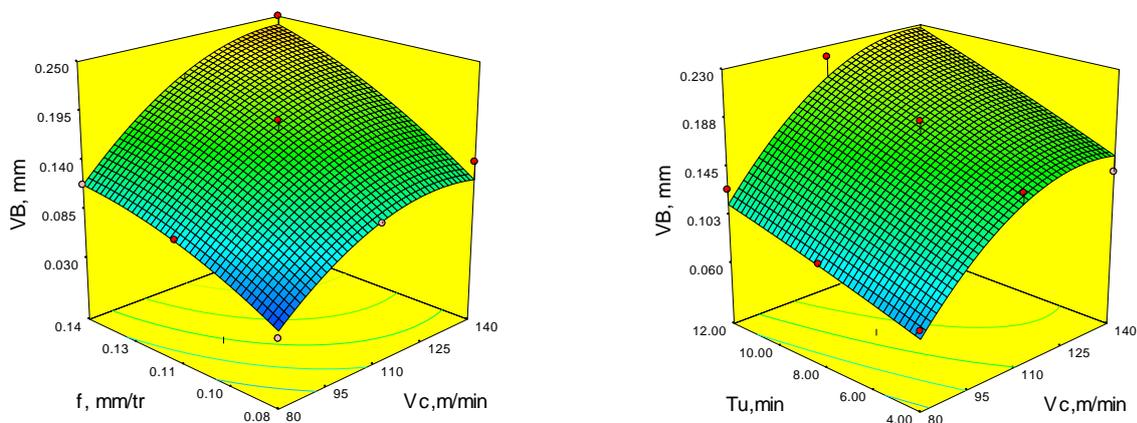


Figure III-3 Diagrammes de surface 3D de VB en fonction de (V_c , f et T_u)

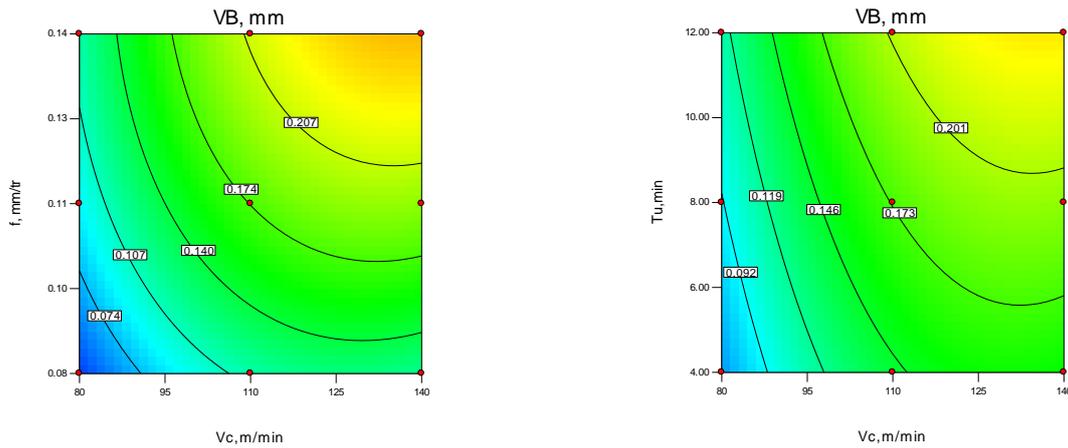


Figure III.4 le contour de VB en fonction de (Vc, f, Tu)

III.4. Analyse des Résultats de rugosité Ra

III.4.1. Analyse de la variance ANOVA

Le tableau III.3 qui concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de rugosité Ra montre que l'avance par tour (f) est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 31.91% suivi par le temps (Tu) a une valeur de 23.95%, l'interaction(Vc^2) de 22.14%, la vitesse de coupe (Vc) de 10.13%, l'analyse indique que l'effet la vitesse de coupe (Vc) sur la rugosité Ra est faible .

Tableau III.3 Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont %	Remarque
Model	1,52754167	9	0,16972685	25,4892233	< 0.0001	93.10	significant
A-Vc	0,16627222	1	0,16627222	24,9704143	0.0001	10.13	significant
B-f	0,52360556	1	0,52360556	78,6339863	< 0.0001	31.91	significant
C-Tu	0,39308889	1	0,39308889	59,0332665	< 0.0001	23.95	significant
AB	0,0048	1	0,0048	0,72085395	0.4077	0.29	Non significant
AC	0,072075	1	0,072075	10,8240726	0.0043	4.39	significant
BC	0,00213333	1	0,00213333	0,32037953	0.5788	0.13	Non significant
A^2	0,36342407	1	0,36342407	54,5782667	< 0.0001	22.14	significant
B^2	0,00177963	1	0,00177963	0,26726105	0.6118	0.10	Non significant
C^2	0,00036296	1	0,00036296	0,05450902	0.8182	0.02	Non significant
Residual	0,11319907	17	0,00665877			6.89	
Cor Total	1,64074074	26				100	

La figure III.5 présente les effets principaux des facteurs considérés à savoir la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage sur la rugosité de

surface Ra . La rugosité est principalement influencée par l'avance et le temps d'usinage par contre l'influence de la vitesse de coupe n'est pas claire.

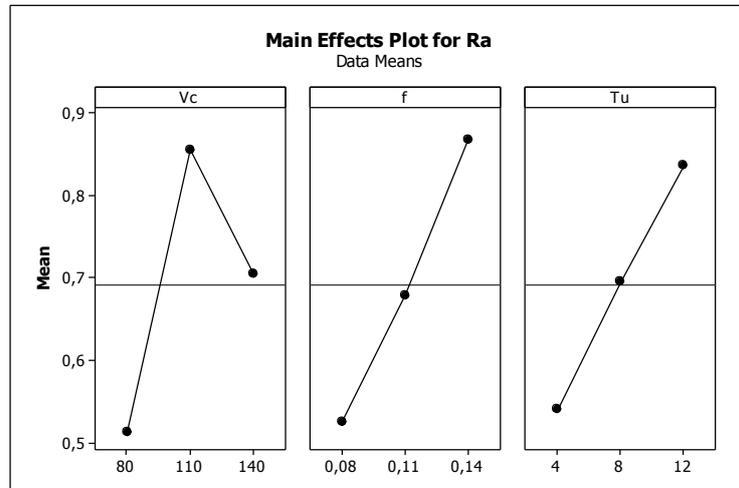


Figure III.5 Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur la rugosité Ra

III.4.2. Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun des critères de rugosité et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

$$Ra = -3.33080 + 0.060642 * Vc + 4.80864 * f - 0.014097 * Tu - 0.022222 * Vc * f + 6.45833E-004 * Vc * Tu - 0.11111 * f * Tu - 2.73457E-004 * Vc^2 + 19.13580 * f^2 - 4.86111E-004 * Tu^2$$

$$R\text{-Squared } 0.9310, \quad Adj \text{ R-Squared } 0.8945, \quad Pred \text{ R-Squared } 0.8241$$

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle n'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$Ra = -3.15827 + 0.058198 * Vc + 5.68519 * f - 0.034097 * Tu + 6.45833E-004 * Vc * Tu - 2.73457E-004 * Vc^2$$

$$R\text{-Squared } 0.9255, \quad Adj \text{ R-Squared } 0.9077, \quad Pred \text{ R-Squared } 0.8726$$

III.4.3. Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

La figure III.6 montre qu'en général il y a une faible dispersion des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite à 45° qui représente le cas idéal.

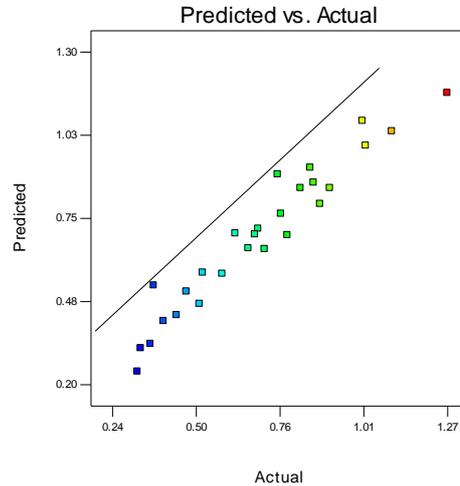


Figure III.6 les valeurs prévues en fonction des expérimentales pour le critère de rugosité

III.4.4. Diagrammes de surface 3D de Ra et graphiques de contours

La figure III.7 permet d'évaluer l'influence simultanée de $(V_c ; f)$, $(V_c ; T_u)$ sur le critère de rugosité de surface (R_a). La figure indique que la pente de l'avance (f) est la plus importante suivie par le temps d'usinage (T_u). La meilleure rugosité de la surface usinée est obtenue avec la combinaison de la plus petite avance par tour (f) et le petit temps d'usinage (T_u),

La figure III.8 représente les graphes de contour permettant de visualiser la projection de la surface de réponse, ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

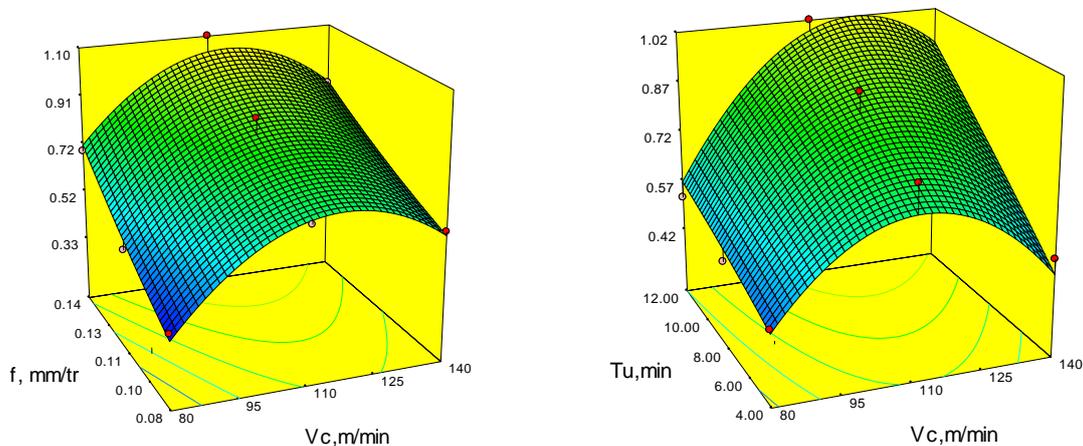


Figure III.7 Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (Vc, f et Tu)

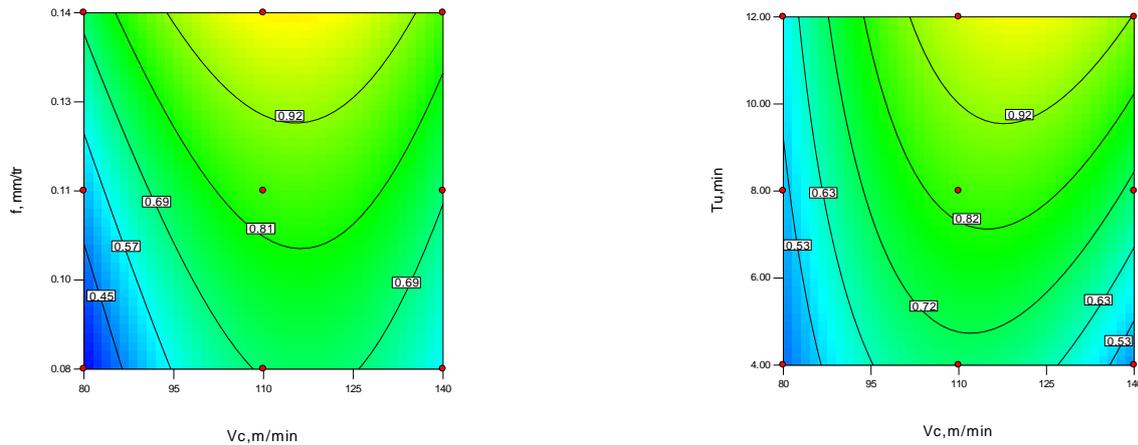


Figure III.8 le contour de rugosité Ra en fonction de (Vc, f, Tu)

III.5 Analyse des résultats expérimentaux de l'effort de coupe

Les valeurs des résultats expérimentaux des composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z) sont présentées dans le tableau III.1. Ces résultats sont analysés à l'aide d'un logiciel d'analyse Design-Expert 8.0.7 Trial. En appliquant l'analyse de la variance ANOVA pour les composantes de l'effort étudiées. Cette analyse est réalisée pour une signification ajustée de 5%, c.-à-d., pour un niveau de confiance de 95%.

III.5.1 Analyse des Résultats de l'effort (F_x)

III.5.1.1 Analyse de la variance ANOVA

Les résultats de l'ANOVA de la composante F_x sont présentés dans le tableau III.3. Cette analyse montre que le temps d'usinage (T_u) est le facteur de plus grande influence avec une valeur de contribution à 90.81% suivi par le temps l'avance (f) avec une contribution de 7.52%,

Tableau III.3 résultat de la variance du composante de l'effort de coupe (Fx)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Con %	Remarque
Model	18851,7109	9	2094,63454	258,379177	< 0.0001	99.27	significant
A-Vc	24,3369389	1	24,3369389	3,00203119	0.1013	0.21	Non significant
B-f	1428,09494	1	1428,09494	176,159605	< 0.0001	7.52	significant
C-Tu	17245,3401	1	17245,3401	2127,26215	< 0.0001	90.81	significant
AB	0,00053333	1	0,00053333	6,5788E-05	0.9936	2.8	Non significant
AC	73,7056333	1	73,7056333	9,0918012	0.0078	0.38	significant
BC	29,6102083	1	29,6102083	3,6525041	0.0730	0.15	Non significant
A^2	1,34111296	1	1,34111296	0,16543013	0.6893	0.007	Non significant
B^2	1,32226852	1	1,32226852	0,16310561	0.6913	0.006	Non significant
C^2	47,959113	1	47,959113	5,91589409	0.0263	0.25	Non significant
Residual	137,81601	17	8,10682413			0.72	
Cor Total	18989,5269	26				100	

La figure III.9 présente les effets principaux des facteurs considérés à savoir l'avance par tour et le temps d'usinage sur l'effort de coupe (Fx). l'effort de coupe influencée par l'avance et le temps d'usinage ont une influence significative sur l'effort de coupe, Mais par contre la vitesse de coupe n'est pas influencée.

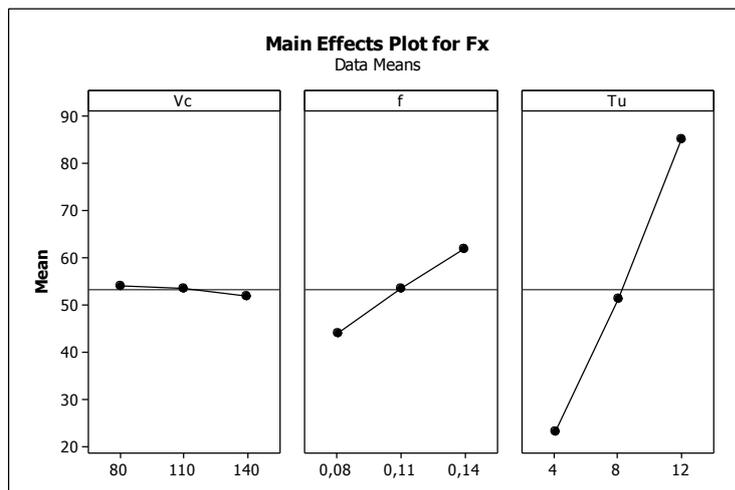


Figure III.9 Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur l'effort de coupe (Fx)

III.5.1.2 Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ce modèle permet de décrire la relation entre l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

$$F_x = -46.38154 + 0.24285 * V_c + 307.75309 * f + 5.74285 * T_u - 7.40741E-003 * V_c * f - 0.020653 * V_c * T_u + 13.09028 * f * T_u - 5.25309E-004 * V_c^2 - 521.60494 * f^2 + 0.17670 * T_u^2$$

R-Squared 0.9927 , Adj R-Squared 0.9889 , Pred R-Squared 0.9824

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle n'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$F_x = -55.19593 + 0.12646 * V_c + 296.90741 * f + 10.01 * T_u - 0.020653 * V_c * T_u$$

R-Squared 0.9885 , Adj R-Squared 0.9864 , Pred R-Squared 0.9830

III.5.1.3 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

Ce figure III.10 montrent qu'en général il y a une faible dispersion des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite à 45° qui représente le cas idéal.

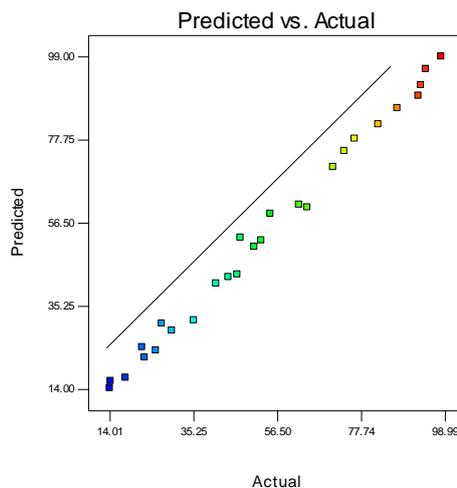


Figure III.10 les valeurs prévues en fonction des expérimentales pour l'effort de coupe (F_x)

III.5.1.4 Diagrammes de surface 3D et graphique de contour

La figure III-11 permet d'évaluer les diagrammes d'influence des (V_c ; f), (V_c ; T_u) sur le composante de l'effort de coupe (F_x). La figure montre que la pente du temps d'usinage (T_u) est importante, donc ce facteur (T_u) possède l'effet le plus significatif sur la composante (F_x).

La figure III.12 présentée les graphes de contour qui permettent de visualiser la projection de la surface de réponse, ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

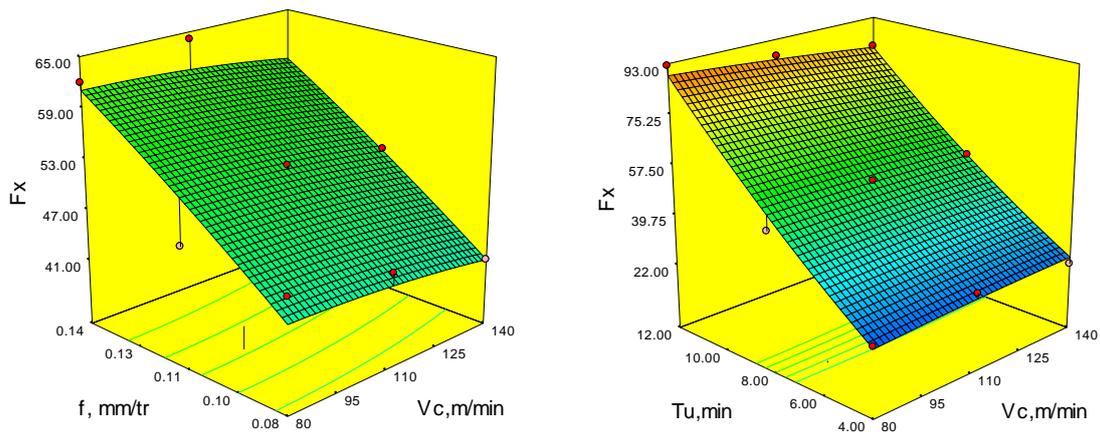


Figure III.11 Diagrammes de surface 3D de (F_x) en fonction de (V_c , f et T_u)

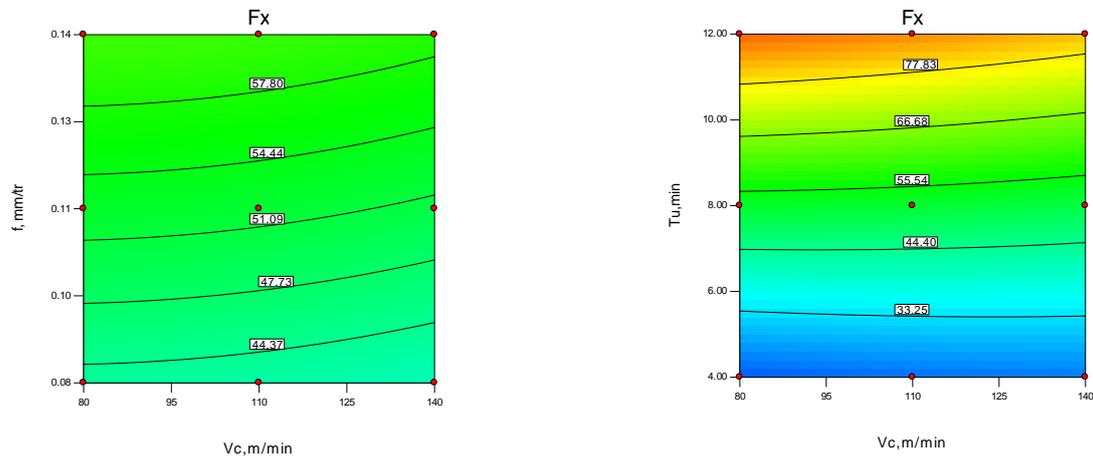


Figure III.12 le contour de composante (F_x) en fonction de (V_c , f , T_u)

III.5.2 Analyse des Résultats de l'effort de coupe (Fy)

III.5.2.1 Analyse de la variance ANOVA

L'analyse de la variance ANOVA de la variation de la composante radiale de l'effort de coupe est représentée dans le tableau III.4. Le tableau montre que l'avance (Tu) est le facteur qui a l'influence la plus significative sur la composante (Fy) de l'effort de coupe avec une contribution d'environ 72.13% suivi par l'avance de coupe (f) à 22.73%,

Tableau III.4 : Les résultats d'ANOVA pour la composante de l'effort de coupe (Fy)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont %	Remarque
Model	79213,7608	9	8801,52898	147,052434	< 0.0001	98,73	significant
A-Vc	286,641606	1	286,641606	4,78909357	0.0429	0,35	Non significant
B-f	18242,4101	1	18242,4101	304,786908	< 0.0001	22,73	significant
C-Tu	57873,6901	1	57873,6901	966,930522	< 0.0001	72,13	significant
AB	44,583075	1	44,583075	0,74487623	0.4001	0,05	Non significant
AC	6,29300833	1	6,29300833	0,10514107	0.7497	0,007	Non significant
BC	2719,8363	1	2719,8363	45,4419396	< 0.0001	3,38	significant
A^2	1,01133519	1	1,01133519	0,01689698	0.8981	0,001	Non significant
B^2	7,3556463	1	7,3556463	0,1228952	0.7302	0,009	Non significant
C^2	31,9396463	1	31,9396463	0,53363487	0.4750	0,03	Non significant
Residual	1017,50096	17	59,8529975			1,26	
Cor Total	80231,2618	26				100	

La figure III.13 présente les effets principaux des facteurs considérés : l'avance par tour et le temps d'usinage sur l'effort de coupe (Fy).

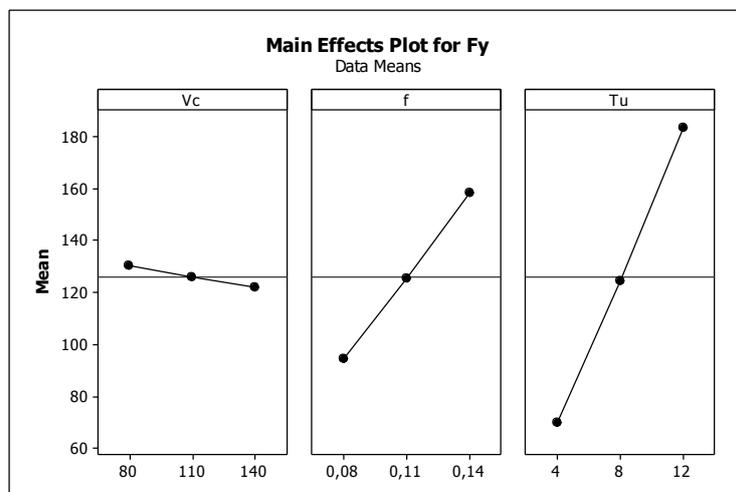


Figure III.13 Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur l'effort de coupe (Fy)

III.5.2.2 Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

$$F_y = +79.19781 - 0.51724 * V_c - 448.73765 * f - 2.59576 * T_u + 2.14167 * V_c * f + 6.03472E-003 * V_c * T_u + 125.45833 * f * T_u + 4.56173E-004 * V_c^2 + 1230.24691 * f^2 + 0.14420 * T_u^2$$

R-Squared 0.9873 ,Adj R-Squared 0.9806 ,Pred R-Squared 0.9673

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle N'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$F_y = +20.88852 - 0.13302 * V_c + 57.50000 * f + 0.37528 * T_u$$

R-Squared 0.9862 ,Adj R-Squared 0.9837 , Pred R-Squared 0.9787

III.5.2.3 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

Ce figure III.14 montrent qu'en général il y a une faible dispersion des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite à 45° qui représente le cas idéal.

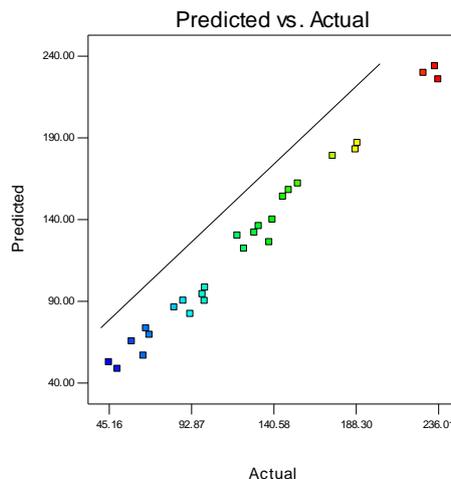


Figure III.14 les valeurs prévues en fonction des expérimentales pour l'effort de coupe (F_y)

III.5.2.4 Diagrammes de surface 3D et graphique de contour

La figure III.15 présente la réponse de la composante radiale de l'effort de coupe (F_y) en (3D) en fonction des facteurs d'expérimentation. La figure montre que la pente du temps d'usinage (T_u) est supérieure aux autres facteurs ce que implique que ce facteur a l'influence la plus significative suivi par l'avance (V_c).

La figure III.16. Permet de visualiser la projection de la surface de réponse, ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

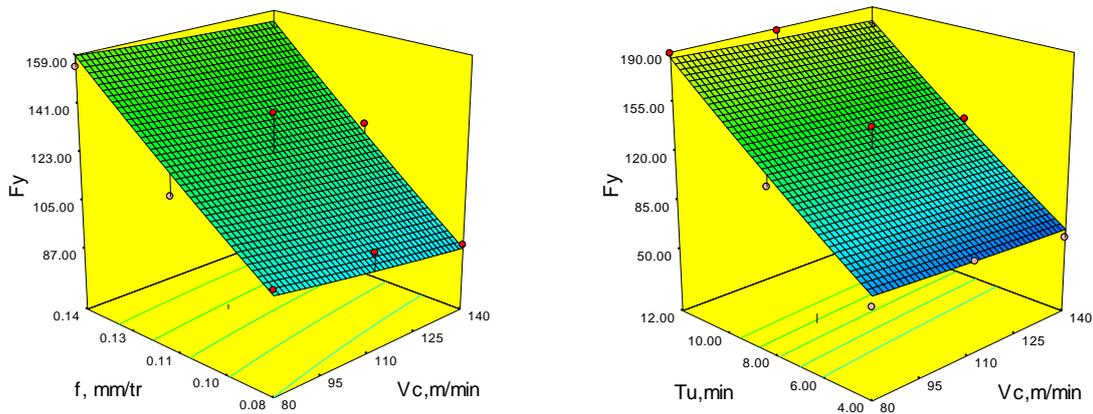


Figure III.15 Diagrammes de surface 3D de (F_y) en fonction de (V_c , f et T_u)

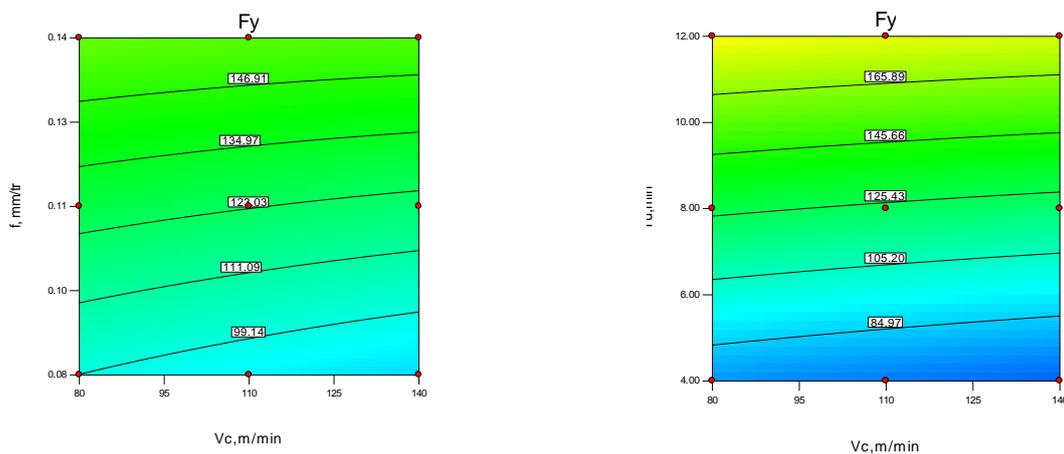


Figure III.16 le contour de composante (F_y) en fonction de (V_c , f , T_u)

III.5.3 Analyse des Résultats de l'effort de coupe (Fz)

III.5.3.1 L'analyse de la variance ANOVA

Le tableau III.5 qui concerne l'analyse de la variance ANOVA de la composante tangentielle de l'effort (Fz) montre que le temps d'usinage (Tu) le facteur de plus grande influence avec une contribution de 75.74% suivi par l'avance par tour (f) à 22.65%.

Tableau III.5: les résultats d'ANOVA de composante de l'effort de coupe (Fz)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	Cont%	Remarque
Model	30321,069	9	3369,0077	227,46251	< 0.0001	99.17	significant
A-Vc	47,8242	1	47,8242	3,22890712	0.0901	0.15	Non significant
B-f	6927,0373	1	6927,0373	467,68707	< 0.0001	22.65	significant
C-Tu	23156,237	1	23156,237	1563,4206	< 0.0001	75.74	significant
AB	20,176133	1	20,176133	1,3622153	0.2593	0.06	Non significant
AC	50,307075	1	50,307075	3,39654135	0.0828	0.16	Non significant
BC	50,758533	1	50,758533	3,4270220	0.0816	0.16	Non significant
A^2	5,9335185	1	5,9335185	0,4006084	0.5352	0.01	Non significant
B^2	7,6087574	1	7,6087574	0,5137142	0.4833	0.024	Non significant
C^2	55,186446	1	55,186446	3,7259778	0.0704	0.18	Non significant
Residual	251,79151	17	14,811265			0.82	
Cor Total	30572,860	26				100	

La figure III.17 présente les effets principaux des facteurs considérés : le temps d'usinage sur l'effort de coupe (Fz).

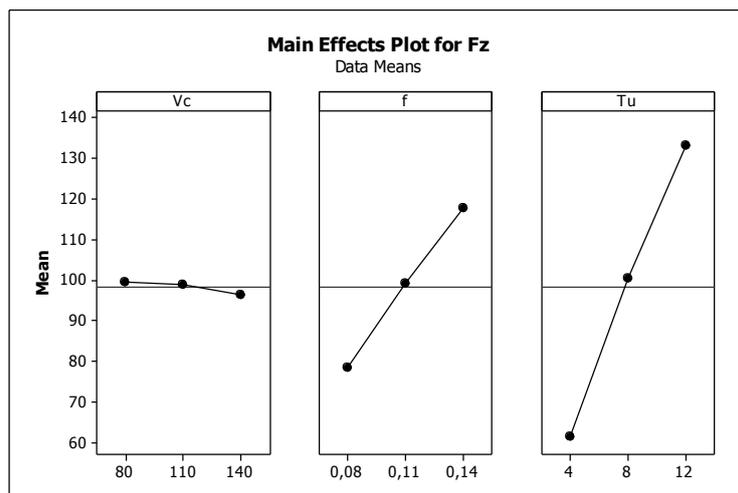


Figure III.17 Graphe des effets principaux de Vc, f et Tu sur l'effort de coupe (Fz)

III.5.3.2 Modèles mathématique est les coefficients de déterminations

Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

$$F_z = -93.85265 + 0.48373 * V_c + 950.54938 * f + 11.99118 * T_u - 1.44074 * V_c * f - 0.017063 * V_c * T_u + 17.13889 * f * T_u - 1.10494E-003 * V_c^2 - 1251.23457 * f^2 - 0.18955 * T_u^2$$

R-Squared 0.9918, Adj R-Squared 0.9874, Pred R-Squared 0.9804

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle N'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$F_z = -39.28167 - 0.054333 * V_c + 653.90741 * f + 8.96681 * T_u$$

R-Squared 0.9856, Adj R-Squared 0.9837, Pred R-Squared 0.9804

III.5.3.3 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

Ce figure III.18 montrent qu'en général il y a une faible dispersion des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite à 45° qui représente le cas idéal.

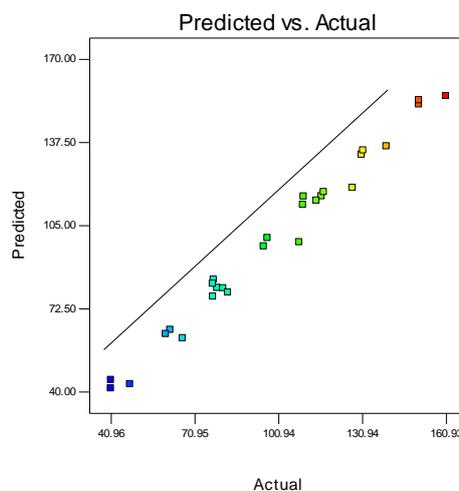


Figure III.18 les valeurs prévues en fonction des expérimentales pour l'effort de coupe (Fz)

III.5.3.4 Diagrammes de surfaces 3D de (Fz) et graphique de contour

La figure III-19 permet d'évaluer l'influence simultanée de (V_c ; f), (V_c ; T_u) et en sur le composante de l'effort de coupe (F_z). La figure indique que la pente du temps d'usinage (T_u) est la plus importante qui implique la plus significatif suivi par l'avance par tour (f) en fin la vitesse de coupe (V_c).

La figure III.20 représente les graphes de contour permettant de visualiser la projection de la surface de réponse, ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

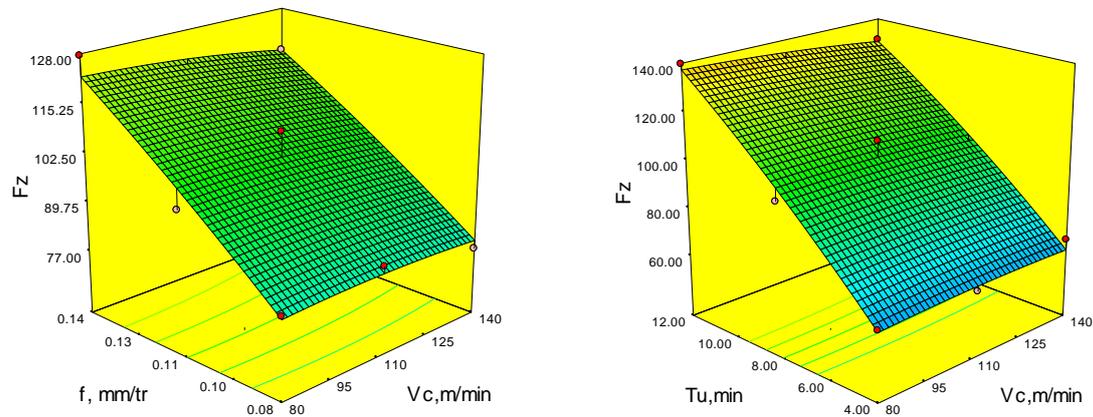


Figure III.19 Diagrammes de surface 3D de (F_z) en fonction de (V_c , f et T_u)

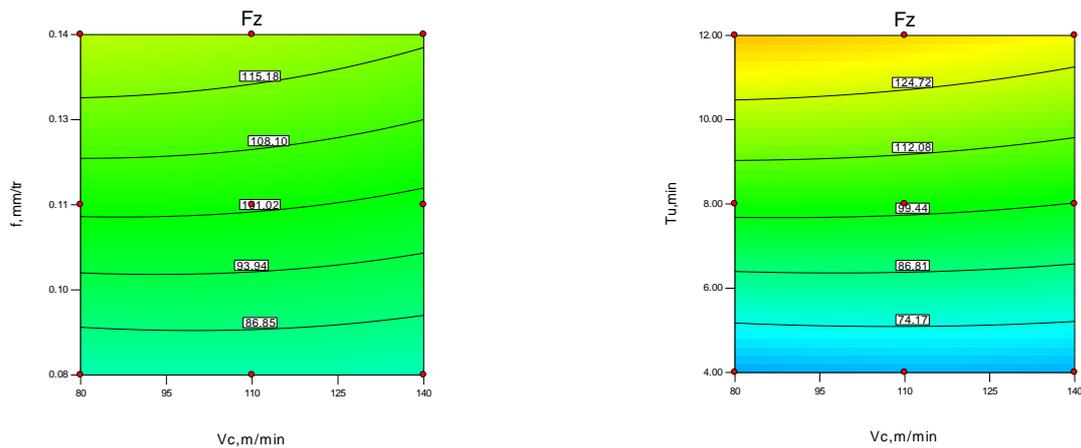


Figure III.20 le contour de composante (F_z) en fonction de (V_c , f , T_u)

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale qui est consacré à la détermination du degré d'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f) et le temps d'usinage (T_u)) sur les critères de rugosité considérée, l'usure en dépouille et les composantes de l'effort de coupe, elle a permis de déterminer les modèles mathématiques et les coefficients de détermination de chacun des paramètres. L'analyse de la variance ANOVA du critère de rugosité (R_a) montre que l'avance par tour et le temps d'usinage sont les facteurs qui ont l'influence la plus significative sur ces critères, alors que la vitesse de coupe n'a pas d'influence significative sur le critère de rugosité (R_a). Pour le critère de l'usure en dépouillé (VB), l'ANOVA montre que l'avance est le facteur qui a la plus grande influence suivi par le temps d'usinage (T_u) et enfin la vitesse de coupe (V_c). Les modèles mathématiques obtenus permettent de donner des prédictions qui sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales. Les coefficients de détermination permettent de valider ces modèles ($R^2 > 93.10$ pour les critères de rugosité, $R^2 > 96.86$ pour l'usure en dépouille et $R^2 > 95$ pour les composantes de l'effort). D'autre part il est à noter que l'élimination des termes non significatifs des modèles permet d'obtenir des modèles réduits, faciles à exploiter tout en gardant une assez bonne précision puisque les différents coefficients de détermination ne sont diminués que légèrement. Ces modèles seront exploités dans le chapitre suivant afin de mener une étude d'optimisation.

Chapitre IV

Optimisation

IV.1 Introduction

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif des chercheurs en général est de rechercher les conditions optimales d'usinage, qui permettent d'atteindre deux types d'objectifs, soit économiques soit technologiques soit les deux à la fois. Dans notre cas d'étude nous proposons de déterminer un régime optimal permettant d'atteindre **des objectifs technologiques contradictoires**. En effet par exemple pour atteindre un débit de copeau maximal il est demandé de travailler avec une vitesse de coupe (V_c) et une avance par tour (f) au niveau maximal, alors que si l'objectif est de minimiser la puissance de coupe il sera recommandé de travailler avec une vitesse de coupe (V_c), une avance par tour (f) et un temps d'usinage (T_u) au niveau minimal.

IV.2 Paramètres technologiques calculés :

Les paramètres technologiques considérés dans cette étude d'optimisation sont la puissance de coupe (P) et le débit de copeau (Q). Ce dernier est considéré comme un indice de productivité.

IV.2.1 Puissance de coupe

Lors d'une opération d'usinage la connaissance de la puissance de coupe est nécessaire afin de s'assurer que les organes de la machine permettent la transmission de cette puissance et qu'elle soit inférieure à la puissance disponible sur la broche de la machine.

Elle est donnée par la relation suivante : [27]

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}, \text{ kW} \quad \dots \dots \dots \text{(IV.1)}$$

P_c : puissance de coupe (kW).

F_c : effort principal de coupe (N).

V_c : vitesse de coupe (m/min).

Les résultats de la puissance de coupe (tab IV-1), calculés en fonction des résultats expérimentaux de l'effort principale de coupe, qui sont présentés dans le tableau III.1.

IV.2.2 débit de copeau

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

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

$$Q = V_c \cdot A \dots\dots\dots (IV.2)$$

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

A : Section de coupe [mm^2] avec ($A = a_p \cdot f$)

V_c : Vitesse de coupe [m/min]

$$\text{D'où } Q = V_c \cdot a_p \cdot f$$

Les résultats obtenus, pour le plan d'expérience adopté, sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : résultats des paramètres technologiques calculés (P, Q)

N° essai	V_c , m/min	f, tr/min	Tu, mm	P, W	Q, Cm^3/min
1	80	0,08	4	54.66	1.28
2	80	0,08	8	108.25	1.28
3	80	0,08	12	146.66	1.28
4	80	0,11	4	83.01	1.76
5	80	0,11	8	129.38	1.76
6	80	0,11	12	186.18	1.76
7	80	0,14	4	103.70	2.24
8	80	0,14	8	170	2.24
9	80	0,14	12	214.57	2.24
10	110	0,08	4	87.78	1.76
11	110	0,08	8	151.94	1.76
12	110	0,08	12	210.00	1.76
13	110	0,11	4	111.21	2.42
14	110	0,11	8	198.73	2.42
15	110	0,11	12	240.73	2.42
16	110	0,14	4	142.02	3.08
17	110	0,14	8	214.86	3.08
18	110	0,14	12	277.32	3.08
19	140	0,08	4	95.57	2.24
20	140	0,08	8	180.90	2.24
21	140	0,08	12	256.03	2.24
22	140	0,11	4	155.58	3.08
23	140	0,11	8	223.34	3.08
24	140	0,11	12	304.96	3.08
25	140	0,14	4	184.47	3.92
26	140	0,14	8	271.57	3.92
27	140	0,14	12	352.87	3.92

IV.3 Analyse des résultats de la puissance de coupe

IV.3.1 Analyse de la variance ANOVA

Le tableau IV.2 présente l'analyse de la variance ANOVA des résultats de la puissance de coupe. Cette analyse montre que le temps d'usinage (T_u) est le facteur qui a l'influence la plus significative sur la puissance de coupe a valeur de contribution 53.87% suivi par la vitesse de coupe (V_c) puis de l'avance par tour (f) avec une contribution de 26.97% et 16.06% respectivement.

Tableau IV.2 Résultats d'ANOVA pour la puissance de coupe (P)

	Sum of		Mean	F	p-value	Con%	Remarque
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F		
Model	140746,11	9	15638,4566	364,56425	< 0.0001	99.48	significant
A- V_c	38169,003	1	38169,003	889,797138	< 0.0001	26.97	significant
B- f	22726,2909	1	22726,2909	529,796091	< 0.0001	16.06	significant
C- T_u	76223,4321	1	76223,4321	1776,92332	< 0.0001	53.87	significant
AB	795,657959	1	795,657959	18,5484063	0.0005	0.56	significant
AC	2471,07	1	2471,07	57,6056705	< 0.0001	1.74	significant
BC	132,47915	1	132,47915	3,0883586	0.0968	0.09	Non significant
A ²	41,7589539	1	41,7589539	0,9734862	0.3376	0.02	Non significant
B ²	34,3549717	1	34,3549717	0,8008843	0.3833	0.024	Non significant
C ²	152,062598	1	152,062598	3,54488861	0.0770	0.107	Non significant
Residual	729,237063	17	42,8962978			0.515	
Cor Total	141475,347	26				100	

Le modèle quadratique représentant la variation de la puissance de coupe en fonction des éléments du régime de coupe est donné par :

$$P = -91.40468 + 0.22795 * V_c + 552.60905 * f + 5.10286 * T_u + 9.04753 * V_c * f + 0.11958 * V_c * T_u + 27.68866 * f * T_u - 2.93128E-003 * V_c^2 - 2658.74486 * f^2 - 0.31464 * T_u^2$$

R-Squared 0.9948, Adj R-Squared 0.9921, Pred R-Squared 0.9881

L'examen de l'analyse ANOVA permet de déduire que certains termes du modèle n'ont pas une influence significative, d'où nous présentons un modèle dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif.

$$P = -34.70460 - 0.41693 * V_c + 189.19444 * f + 3.11435 * T_u + 9.04753 * V_c * f + 0.11958 * V_c * T_u$$

R-Squared 0.9923, Adj R-Squared 0.9905, Pred R-Squared 0.9875

IV.3.2 Teste de la concordance prévue-expérimentale

La figure (IV.1) montrent qu'en générale il y a une bonne concordance entre les valeurs des résultats prévus par les modèles quadratiques et ceux obtenus par calcul en fonction des mesures expérimentales. En effet les points expérimentaux sont assez proches de la droite à 45°.

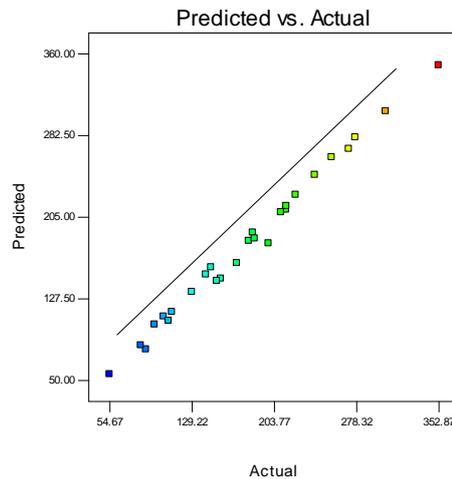


Figure IV.1 valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales de la puissance de coupe

IV.3.3 Diagrammes de surface 3D et graphique de contour

La figure IV.2 montre que la pente du temps d'usinage (T_u) est la plus grande donc c'est le facteur le plus important qui influence la puissance de coupe (P) suivie par la vitesse de coupe (V_c) et l'avance par tour (f).

La figure IV.3 représente les graphes de contour qui permettent de visualiser la projection de la surface de réponse, ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

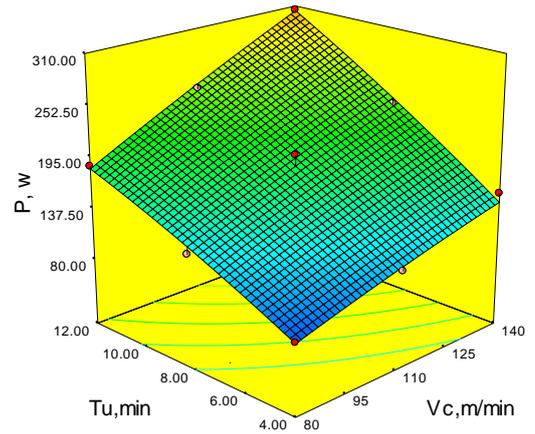
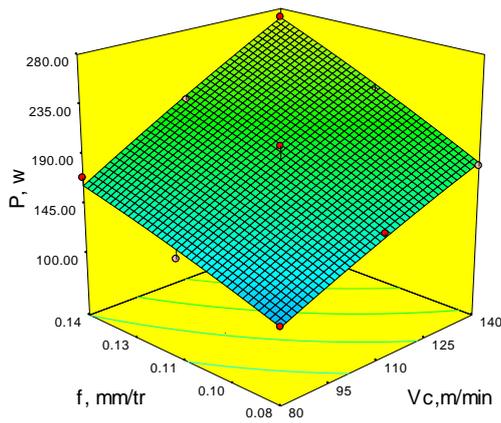


Figure IV.2 Diagrammes de surface 3D de (P) en fonction de (Vc, f et Tu)

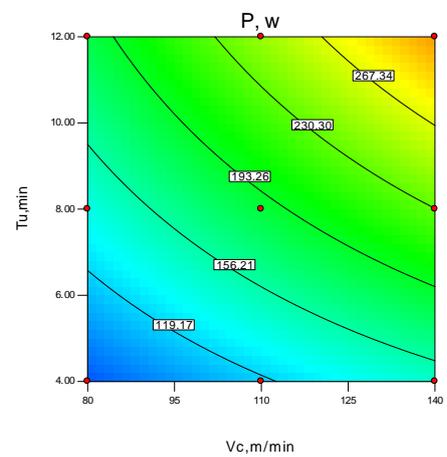
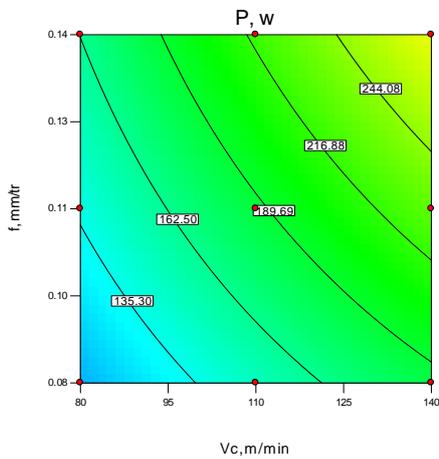


Figure IV.3 le contour de la puissance de coupe (P) en fonction de (Vc, f, Tu)

IV.4 Analyse des résultats du débit de copeaux

IV.4.1 Diagrammes de surface 3D et graphique de contour

La figure IV.4 permet d'évaluer l'influence simultanée de (Vc ; f), (Vc ; Tu) sur le débit de copeau (Q). La figure indique que l'avance par tour (f) est la plus importante suivie par la vitesse de coupe (Vc).

La figure IV.5 représente les graphes de contour, qui permettent de visualiser la projection de la surface de réponse, ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

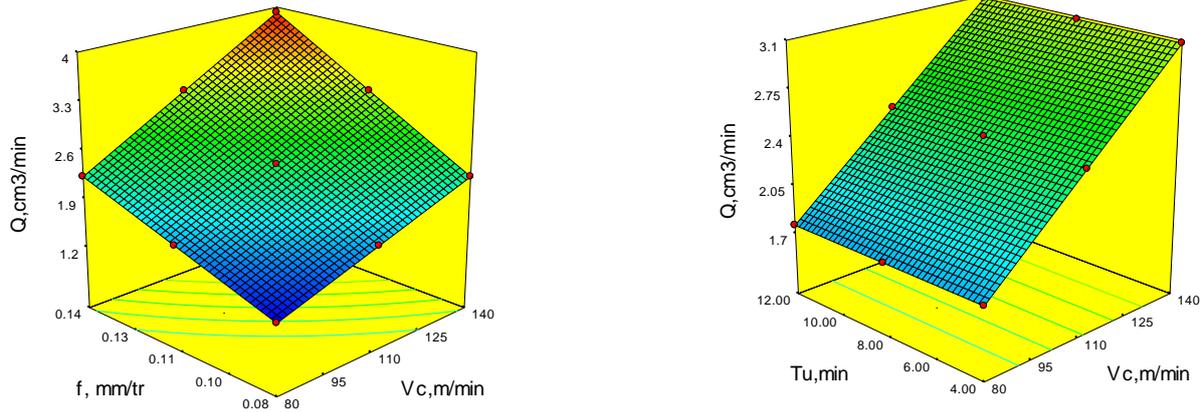


Figure IV.4 Diagrammes de surface 3D de (Q) en fonction de (Vc, f et Tu)

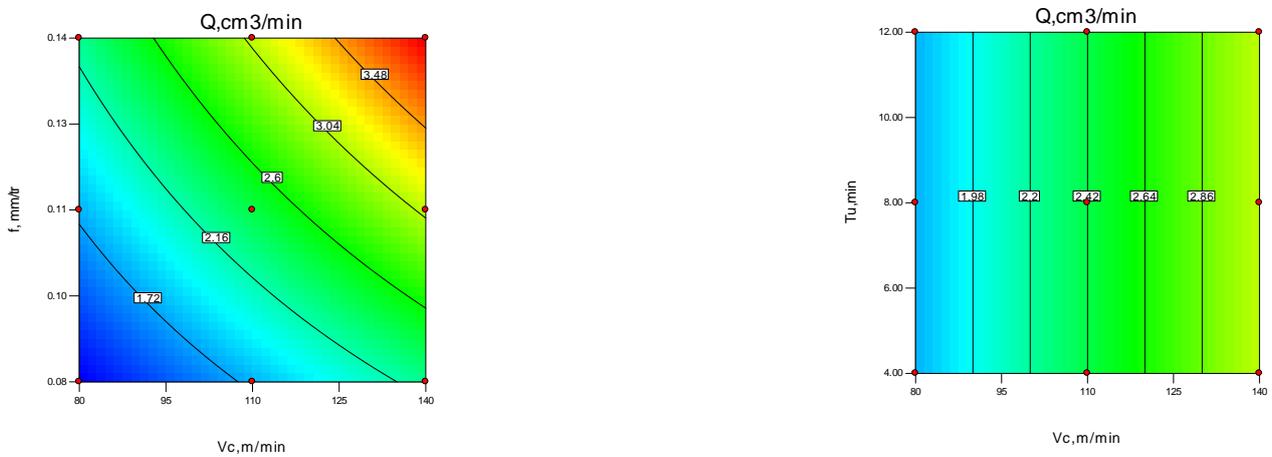


Figure IV.5 le contour de débit de copeau (Q) en fonction de (Vc, f, Tu)

IV.5 Optimisation des conditions de coupe

IV.5.1 Position du problème

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait les objectifs suivants :

- Faible usure en dépouille (VB mini)
- Bon état de surface (Ra mini)
- Faible puissance de coupe (P mini)
- Débit de copeau maximal (Q max)

Il est à noter que les paramètres variables doivent être compris dans l'intervalle de réalisation des essais expérimentaux qui ont aboutis à la déduction des modèles empiriques exploités dans cette étude d'optimisation, d'où :

$$Vc \in [80, 140] \text{m/min} ; f \in [0,08, 0,14] \text{mm/tr} ; Tu \in [8, 12] \text{min}$$

IV.5.2 Résultats d'optimisation

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, obtenues en utilisant le logiciel Design-Expert, sont présentées dans le tableau IV.3 et la figure IV.6.

Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs minimales des critères de rugosité considérés, d'une faible puissance de coupe, d'un débit de copeau maximal et d'un faible l'usure sur l'outil, le régime de coupe à adopter correspond à une vitesse de coupe (V_c) de 140 m/min, une avance par tour de 0.11mm/tr et une valeur de 4 min pour le temps d'usinage.

Tableau IV.3 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.

N	V_c	f	Tu	VB	Ra	Fy	P	Q	Desirability	
1	140	0,11	4	0,164	0,49	67,54	151,47	3,20481	0,682	Selected
2	140	0,12	4	0,165	0,49	68,08	152,59	3,22871	0,682	
3	140	0,11	4	0,158	0,47	65,64	147,47	3,12066	0,682	
4	140	0,12	4	0,169	0,50	69,65	155,81	3,29734	0,681	
5	140	0,12	4	0,173	0,52	71,22	158,96	3,36549	0,681	
6	140	0,11	4	0,151	0,45	63,23	142,25	3,01219	0,680	
7	140	0,12	4,13	0,176	0,53	73,89	163,46	3,40119	0,676	
8	140	0,1	4	0,139	0,42	59,55	133,96	2,84319	0,676	
9	140	0,11	4,16	0,153	0,46	65,44	146,15	3,02127	0,675	
10	139	0,11	4	0,155	0,47	64,58	144,07	3,04621	0,674	
11	140	0,13	4	0,189	0,59	79,03	173,80	3,69519	0,673	
12	140	0,14	4	0,194	0,62	81,73	178,61	3,80596	0,670	
13	140	0,1	4	0,128	0,39	56,46	126,69	2,69818	0,669	
14	140	0,09	4	0,115	0,36	53,13	118,52	2,53853	0,658	
15	137	0,11	4	0,152	0,49	63,26	138,37	2,92009	0,658	
16	140	0,09	4	0,110	0,35	52,00	115,66	2,48336	0,653	
17	81	0,14	4	0,086	0,66	90,04	104,80	2,25859	0,558	
18	80	0,14	4	0,084	0,65	90,10	104,09	2,24529	0,558	
19	82	0,14	4	0,092	0,68	89,86	107,10	2,30166	0,558	
20	82	0,14	4,06	0,093	0,68	90,81	108,19	2,30446	0,557	
21	86	0,14	4	0,106	0,73	89,41	112,84	2,41026	0,556	
22	108	0,13	4	0,163	0,82	81,35	135,31	2,82849	0,551	
23	100	0,13	4	0,147	0,81	83,72	127,20	2,66819	0,546	

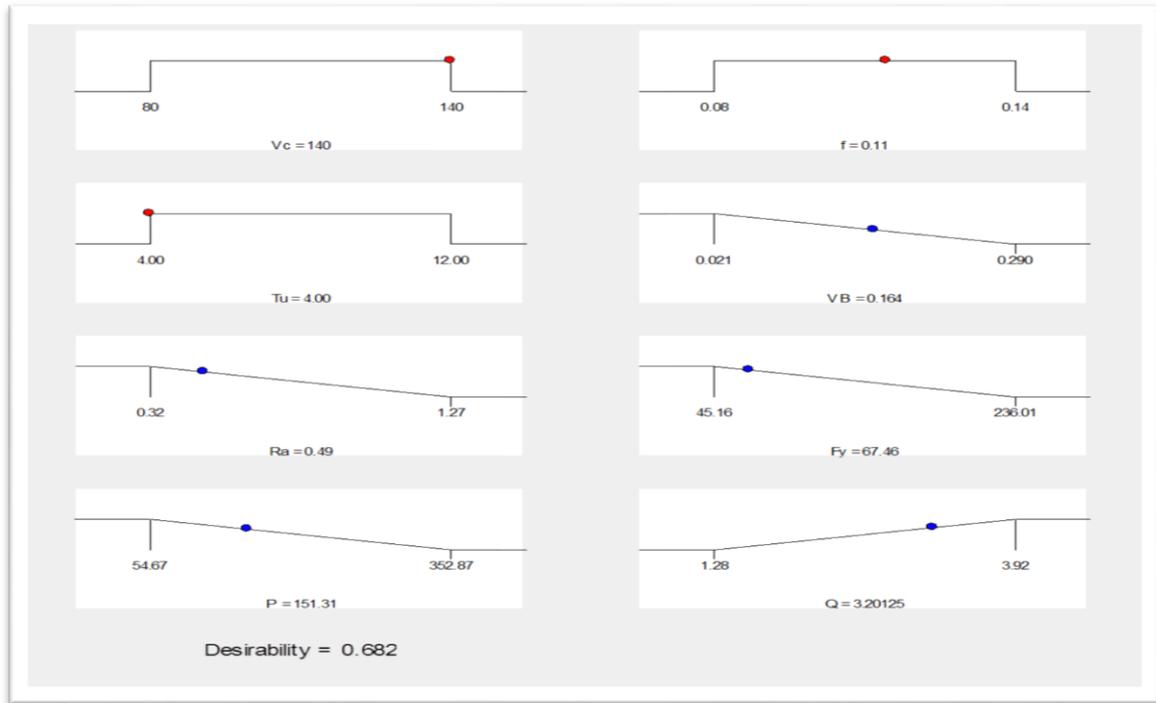


Figure IV.6 : Résultat optimales des paramètres étudiés

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.682). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation (Ra-Min, VB Min, P-Min, et Q-Max).

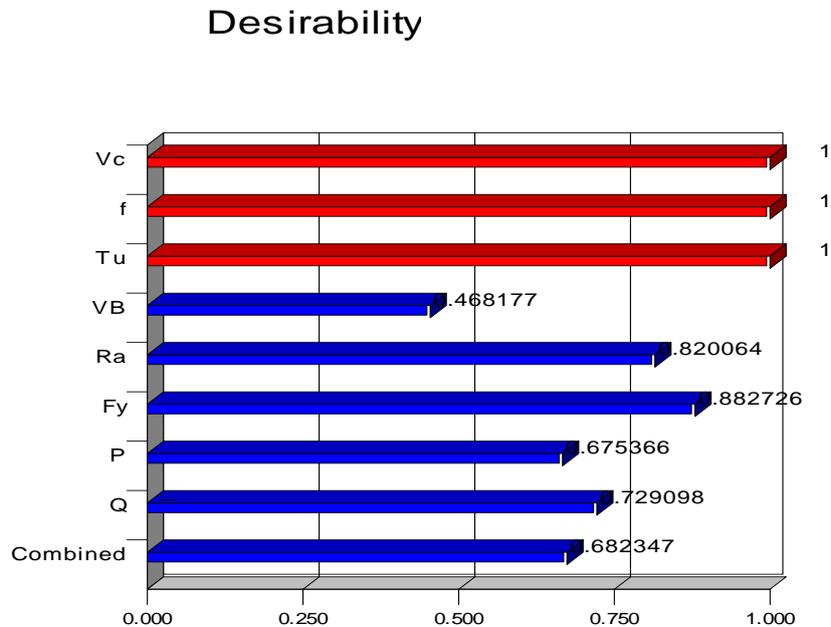


Figure IV. 7 Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques

IV.5.3 Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure IV.8 présente la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe (V_c , f et T_u). La figure montre que la désirabilité est maximale pour une vitesse de coupe et le temps d'usinage maximal, alors que la variation de la désirabilité en fonction de l'avance présente un maximum vers la valeur de f à 0.11 mm/tr.

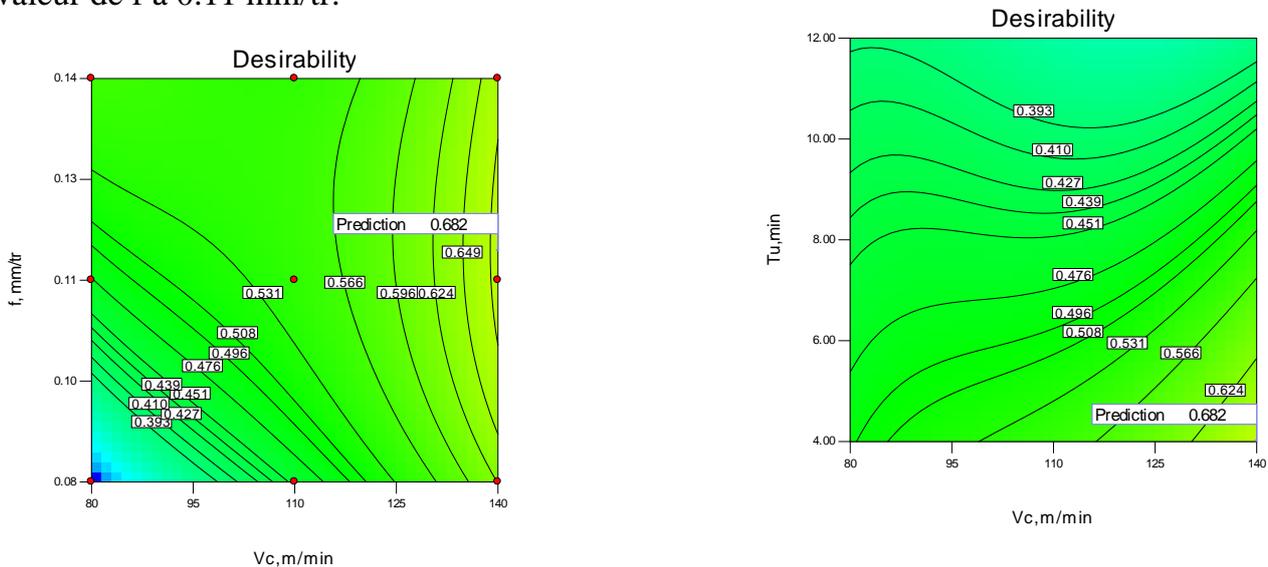


Figure IV.8 La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale qui a permis l'étude de l'influence des différents éléments du régime de coupe sur les paramètres obtenus par calcul en fonction des mesures expérimentales. Cette étude a permis d'établir des modèles mathématiques, les différents coefficients de détermination permettent de valider ces modèles ($R^2 > 0.96$). La puissance de coupe est fortement influencée par la vitesse de coupe, suivie de la section du copeau (f_{xap}) qui influence l'effort de coupe, la puissance de coupe est minimisée en réduisant la vitesse de coupe et la section du copeau. Alors que pour obtenir un débit de copeau maximal on doit augmenter les différents éléments du régime de coupe. Puisque l'étude expérimentale (Chap. III) a montré que l'augmentation de (V_c) conduit à une diminution de l'effort principal de coupe, la figure IV.6 montre qu'une augmentation de l'avance conduit à une forte augmentation de V_B et R_a , alors que l'avance par tour influe peu sur l'usure en dépouille et la rugosité.

Si en plus nous recherchons à obtenir une rugosité minimale et faible valeur de l'usure en dépouille, il paraît qu'il n'est pas évident de choisir ou de déterminer un régime de coupe satisfaisant tous ces objectifs à la fois.

L'utilisation du logiciel Design-Expert à permis d'obtenir un régime de coupe optimal permettant d'une part de minimiser le critère de rugosité et l'usure en dépouille, de la puissance de coupe et d'autre part de maximiser le débit de copeau.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'étude expérimentale de l'usinage de l'acier Z200Cr12 traité thermiquement à une dureté de 54HRC nous a permis d'étudier l'évolution des principaux paramètres technologiques dans le domaine de la fabrication par usinage, critères de rugosité de surface usinée (R_a), les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) et les paramètres calculés en fonction des résultats expérimentaux tels que la puissance de coupe (P), le débit de copeau (Q).

Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- ❖ L'analyse des paramètres d'usinage permet d'étudier l'influence de chacun des paramètres de coupe sur l'amélioration des paramètres de sortie du processus de coupe, tels que le critère de rugosité, l'usure en dépouille et les composantes de l'effort de coupe.
- ❖ Cette étude montre que la vitesse de coupe possède une influence statistiquement significative sur l'usure en dépouille avec une contribution de 39.96% suivi par l'avance avec 35.36% et le temps d'usinage avec 13.51%), puis viennent les termes quadratiques (V_c^2) avec 5.23% et (f^2) avec 0.86%. les termes d'interaction et le terme quadratique (T_u^2) ne présentent pas une influence significative.
- ❖ Cette étude montre que l'avance par tour a une influence statistique significative sur la rugosité de surface (f avec 31.91%, le temps d'usinage avec 23.95% suivi par le terme quadratique (V_c^2) avec 22.14%). les termes d'interaction et les termes quadratiques (f^2), (T_u^2) ne présentent pas une influence significative.
- ❖ L'effort axial (F_x), l'effort radial (F_y) et l'effort de coupe tangentiel (F_z) sont influencés par le temps d'usinage, (90.81%), (72.13%) et (75.74%) respectivement. Par contre, la vitesse de coupe a une faible influence sur l'effort (F_x), (F_y) et (F_z), 0.21%, 0.35%, 0.15% respectivement.
- ❖ La puissance de coupe est augmentée par l'augmentation des différents paramètres de coupe (T_u , V_c , et f) possèdent une influence significative sur la puissance de coupe de (53.87%), (26.97%) et (16.06%) respectivement.
- ❖ le débit de copeau est influencé par la vitesse de coupe (48,79%) et avance par tour (48.79%). L'augmentation de ces paramètres permet d'augmenter le débit de copeau.
- ❖ Les modèles proposés permettent d'obtenir des approximations des différents paramètres de sortie étudiés qui sont en bonne concordance avec les valeurs obtenues expérimentalement, ce qui permet leur exploitation dans l'étude d'optimisation menée dans ce mémoire.
- ❖ L'optimisation des paramètres de coupe par la minimization de la fonction de désirabilité en utilisant le logiciel Design-expert a permis l'obtention d'une combinaison optimale des paramètres de coupe ($V_c=140\text{m/min}$, $f=0.11\text{mm/tr}$ et $T_u=4\text{min}$). Ce régime de coupe permet, dans notre cas d'étude, d'obtenir un meilleur état de surface, un débit de copeaux maximal et une puissance de coupe minimales, Ce qui permet de réaliser un compromis entre des critères de qualité (VB et R_a) et un critère de productivité (Q).

Références

Références bibliographiques

- [1] **Tarek BRAHAM BOUCHNAK** : *étude de comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique*, thèse de doctorat, École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, (2010) pp : 11
- [2] **TROMBERT C**; *Usinabilité des aciers inoxydables*, Techniques de l'ingénieur M726.
- [3] **François BAGUR** "*Matériaux pour outils de coupe*" Techniques de l'ingénieur, BM7 080 - 1
- [4] **Wikipédia**, *l'encyclopédie libre*
http://fr.wikipedia.org/wiki/Matériaux_de_coupe
- [5] **Sandvik Coromant**
http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H.PDF
- [6] **Christian PAGÈS** ; "*COMPORTEMENT DE REVÊTEMENTS CÉRAMIQUES SUR OUTIL EN TOURNAGE A SEC DE FINITION*. thèse de doctorat, ÉCOLE CENTRALE DE LYON" Novembre 2003, pp : 14-15
- [7] **Farhat ZEMZEMI** "*Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièce-outil-copeau en usinage : Application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718* " thèse de doctorat, l'École Centrale de Lyon Année 2007 pp : 19
- [8] **Joël RECH** ; "*CONTRIBUTION A LA COMPREHENSION DES MODES D' ACTIONS TRIBOLOGIQUES ET THERMIQUES DES REVETEMENTS EN USINAGE*", thèse de doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers, (2002) pp : 65
- [9] **Daniel LEPADATU** ; *Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse*. (2006) pp : 35-36.
- [10] **François LEROY** ; "*endommagement des outils de coupe*" Techniques de l'ingénieur, B7042 – 1
- [11] <http://www.accreteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [12] **Archive multilingue**, Actionnées par WorldLingo http://www.multilingualarchive.com/ma/frwiki/fr/État_de_surface#Rugosit.C3.A9
- [13] **M.A.Yalese**, « *(cours de module)* ».Cours des efforts de coupe
- [14] **Gérard Poulachon**, *Usinabilité des matériaux difficiles*, Techniques de l'Ingénieur bm7048, 2004.
- [15] **Nilrudra Mandal, B. Doloi and al**, *Development of flank wear prediction model of Zirconia Toughened Alumina (ZTA) cutting tool using respons surface methodology*,

International. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol 29, pp 273–280 Feb 2011

[16] **Mondal B.** *Zirconia toughened alumina for wear resistant engineering and machinability of steel application.* Adv Appl Ceram 2005; 104(5):256–60

[17] **Y. Sahin,** *Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels,* journal of materials processing technology 209, Vol 209, pp3478–3489, Feb 2009

[18] **M.A. Shalaby, M.A. El Hakim and all,** *Wear mechanisms of several cutting tool materials in hard turning of high carbon–chromium tool steel,* Tribology International, Vol 70, pp 148–154, Feb 2014

[19] **Mohamed Elbah , Mohamed Athmane Yallese and all,** *Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel,* Measurement, Vol 46, pp 3041–3056 Feb 2013

[20] **H. Aouici, M.A. Yallese, B. Fnides, T. Mabrouki,** *Machinability investigation in hard turning of AISI H11 hot work steel with CBN tool,* Mechanika 6 (86) (2010) 71–77.

[21] **H. Bouchelaghem, M.A. Yallese, T. Mabrouki, A. Amirat, J.F. Rigal,** *Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3),* Mach. Sci. Technol. 14 (2010) 471–501

[22] **W. Grzesik, T. Wanat,** *Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts,* Int. J. Mach. Tools Manuf. 46 (15) (2006) 1988–1995.

[23] **T. Özel, Y. Karpata, L. Figueira, J.P. Davim,** *Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts,* J. Mater. Process. Technol. 189 (2007) 192–198.

[24] **J.S. Dureja, V.K. Gupta, V.S. Sharma, M. Dogra,** *Wear mechanisms of coated mixed-ceramic tool during finish hard turning of hot tool die steel.* Journal Mechanical Engineering Science, Proc. IMechE Part C, Vol. 223, pp. 1-11, (2009).

[25] **M.A. Yallese,** *Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur.* Thèse de doctorat, (2005).

[26] **G. Taguchi, S. Konishi, Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graph, tools for quality engineering.** American supplier institute, pp. 35-38, (1987).

[27] **Heinz Tschatsch,** *Applied Machining Technology,* 2009.