وزارة التعليم العالى و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Mécanique

Année 2005

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Docteur d'Etat

ETUDE DU COMPORTEMENT A L'USURE DES MATERIAUX DE COUPE MODERNES EN TOURNAGE DUR

Spécialité : **Génie Mécanique**

Option

Productique

Par

YALLESE MOHAMED ATHMANE

Devant le Jury :

K. CHAOUI	Pr.	Président	Université Badji Mokhtar-Annaba
L. BOULANOUAR	MC.	Dir. de thèse	Université Badji Mokhtar-Annaba
J.F. RIGAL	Pr.	Examinateur	Laboratoire LaMcoS -INSA LYON
N. OUELAA	Pr.	Examinateur	Université 8 mai 1945 Guelma
M. LABAIZ	Pr.	Examinateur	Université Badji Mokhtar-Annaba

ANNABA 2005

A la mémoire de ma mère

A mon père pour ses sacrifices

A mon épouse et mes enfants, Mouna, Amira, Aymen

A mes frères et sœurs

A toute ma famille

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement Monsieur Boulanouar Lakhdar pour avoir assuré la direction de cette thèse de doctorat et pour avoir témoigné un intérêt constant tout au long du déroulement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au Professeur Chaoui Kamel pour avoir bien voulu nous faire l'honneur de présider notre jury de thèse et pour ses conseils précieux. Son expérience m'a été d'une grande utilité dans la réalisation de ce travail de recherche.

Je remercie également le Professeur Jean François Rigal pour les stages que j'ai effectué au sein de son équipe au laboratoire LaMcos de L'INSA de Lyon et pour avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail et de faire partie de notre jury de soutenance.

Je remercie également Mr le Professeur Ouelaa Noureddine et le Professeur Labaiz Mohamed pour avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail et de faire partie de notre jury de thèse.

Enfin, je remercie tout le personnel technique et administratif du département de Génie Mécanique de l'université de Guelma. Je remercie tous ceux qui de loin ou de près ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Que toutes ces personnes qui sont impliquées trouvent ici ma gratitude pour leur disponibilité et pour m'avoir fait bénéficier de leurs compétences scientifiques et techniques.

NOMENCLATURE

a_p	Profondeur de passe [mm]
f	Avance [mm/tr]
Fa	Effort axial [N]
Fp	Effort radial [N]
Fv	Effort tangentiel [N]
F_R	Effort résultant [N]
HB	Dureté Brinell
HRC	Dureté Rockwell
Kc	Effort spécifique de coupe [N/mm^2]
Kca	Effort spécifique de coupe axial [N/mm^2]
Kcr	Effort spécifique de coupe radial [N/mm^2]
Kcv	Effort spécifique de coupe tangentiel [N/mm^2]
[KT]	Usure en cratère admissible [mm]
KT	Usure en cratère [mm]
r	Rayon de bec de l'outil [mm]
R^2	Coefficient de détermination
Ra	Rugosité moyenne arithmétique [µm]
Ra_{th}	Rugosité moyenne théorique [µm]
Rt	Rugosité totale [µm]
Rt_{th}	Rugosité totale théorique [µm]
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité [µm]
S	Section du copeau [mm^2]
TD	Tournage dur
TTh	Traitement thermique
[VB]	Usure en dépouille admissible [mm]
VB	Usure en dépouille [mm]
VN	Usure en entaille [mm]
Vc	Vitesse de coupe [m/min]
α	Angle de dépouille principale [degré]
χ_r	Angle de direction principale [degré]
χ_{r1}	Angle de direction auxiliaire [degré]
γ	Angle d'attaque [degré]
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [degré]

SOMMAIRE

Introduction

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES PHENOMENES REGISSANT LE PROCESSUS DE COUPE

I.1 Evolution des matériaux à outils **23**

I.1.1 Introduction **23**

I.1.2 Carbures métalliques **24**

I.1.3 Céramiques de coupe **25**

I.1.3.1 Introduction **25**

I.1.3.2 Classification des céramiques de coupe **26**

I.1.3.3 Facteurs influençant le rendement des céramiques **29**

I.1.3.4 Perspectives **29**

I.1.4 Nitrure de bore cubique (CBN) **29**

I.1.4.1 Plaquettes en nitrure de bore cubique **31**

I.1.4.2 Domaines d'emploi technique et économique du Nitrure de bore cubique **32**

I.1.4.3 Marché potentiel du CBN d'après « General Electric » **32**

I.1.4.4 Conclusion **33**

I.2 Le Tournage dur **34**

I.2.1 Introduction **34**

I.2.2 Définition **34**

I.2.3 Comparaison entre le tournage dur et la rectification **35**

I.2.4 Désavantages du tournage dur par rapport à la rectification **36**

I.2.5 Matériaux usinés en tournage dur **37**

I.2.6 Marché potentiel du tournage dur d'après General Electric **39**

I. 2.7 Conclusion **40**

I.3 Usure des outils de coupe **41**
I.3.1 Introduction **41**
I.3.2 Phénomènes provoquant l'usure **41**
I.3.3 Différentes formes d'usure des outils **43**
I.3.4 Relation entre l'usure et le temps **45**
I.3.5 Critères d'usure **45**
I.3.6 Lois d'usure des outils de coupe **46**
I.3.6.1 Introduction **46**
I.3.6.2 Modèle de Taylor **47**
I.3.6.3 Modèle de Gilbert **48**
I.3.6.4 Modèle de Colding **48**
I.3.6.5 Modèle de Kronenberg **48**
I.3.6.6 Modèle de König – Dépiereux **48**
I.4 Rugosité des surfaces usinées **50**
I.4.1 Principaux défauts de surface **50**
I.4.2 Principaux critères de rugosité **51**
I.4.3 Influence des principaux paramètres de coupe **52**
I.4.4 Evaluation de la rugosité **52**
I. 5 Efforts de coupe **53**
I.5.1 Définition et intérêt de leur mesure **53**
I.5.2 Génération des efforts de coupe **54**
I.5.3 Effort spécifique de coupe **55**
I.5.4 Mesure des efforts de coupe **56**
I. 6 Formation du copeau **57**
I.6.1 Intérêt du contrôle de la formation du copeau **57**
I.6.2 Mécanisme de la formation du copeau **57**
I.6.3 Types de copeaux rencontrés **58**
I.6.4 Influence de la vitesse de coupe **59**
I.6.5 Influence de la dureté du matériau usiné **60**

I.7 Evolution de la température dans le processus de coupe **61**
I.7.1 Importance de la température de coupe **61**
I.7.2 Origine de la chaleur **61**
I.7.3 Répartition de la chaleur entre outil, copeau et pièce **62**
I.7.4 Mesure de la température de coupe **63**
I.8 Conclusion **64**
I.9 Position du problème **64**

CHAPITRE II : EQUIPEMENTS UTILISES ET PROGRAMME D'EXPERIENCE

II.I Introduction **66**
II.2 Equipements utilisés **66**
II.2.1 Machine outil **66**
II.2.2 Matière à usiner **67**
II.2.3. Outils de coupe utilisés **68**
a) Porte-plaquettes **68**
b) Plaquettes **69**
II.2.4. Microscope pour la mesure de l'usure **70**
II.2.5 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité **71**
II.2.6 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe **72**
II.2.7 Pyromètre à infrarouge pour la mesure de la température **73**
II.3 Planification des expériences **73**
II.3.1 Introduction **73**
II.3.2 Méthode unifactorielle **74**
II.3.3 Méthode multifactorielle **75**
II.3.4 Méthode de calcul des constantes des modèles mathématiques **76**
II.4 Conditions de coupe et du traitement thermique **80**
II.4.1 Conditions de coupe **80**
II.4.2 Conditions du traitement thermique **81**

CHAPITRE III: RESULTATS DE L'USURE DES MATERIAUX DE COUPE TESTES

III. 1 Introduction **84**

III. 2 Usinage de l'acier à roulement 100Cr6 **84**

III. 2.1 Evolution de l'usure des outils **84**

a) Nitrure de bore cubique CBN7020 **84**

b) Céramique Mixte CC650 **88**

c) Carbure métallique GC3015 **91**

III.2.2 Tenues des outils **94**

III.2.3 Modèles de la tenue **98**

III. 3 Usinage de l'acier fortement allié X200Cr12 **100**

III. 3.1 Evolution de l'usure des outils **100**

a) Nitrure de bore cubique CBN7020 **100**

b) Céramique Mixte CC650 **103**

c) Carbure métallique GC3015 **106**

III.3.2 Tenues des outils **109**

III.3.3 Modèles de la tenue **113**

III. 4 Température de coupe **114**

III. 5 Conclusion **121**

CHAPITRE IV : IMPACT DES CONDITIONS DE COUPE ET DE L'USURE SUR LA RUGOSITE DES SURFACES USINEES

IV.1 Introduction **123**

IV. 2 Impact des conditions de coupe sur la rugosité (Méthode unifactorielle) **123**

IV.2.1 Rugosité de surface de l'acier à roulement 100Cr6 **123**

IV.2.2 Rugosité de surface de l'acier X200Cr12 **128**

IV. 3 Impact des conditions de coupe sur la rugosité (Méthode Multifactorielle) **132**

IV.4 Impact de l'usure des outils sur la rugosité des surfaces usinées 133

IV.4.1 Impact de l'usure sur la rugosité de surface de l'acier 100Cr6 **133**
IV.4.2 Impact de l'usure sur la rugosité de surface de l'acier X200Cr12 **139**

IV.5 Détermination des modèles de la rugosité 144

IV.5.1 Modèles de la rugosité en fonction des conditions de coupe **144**

IV.5.2 Modèles de la rugosité en fonction de l'usure **148**

CHAPITRE V : IMPACT DES CONDITIONS DE COUPE ET DE L'USURE SUR LES EFFORTS DE COUPE

V.1 Introduction 151

V. 2 Impact des conditions de coupe sur la rugosité (Méthode unifactorielle) 151

V.2.1 Evolution des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 **151**

a) Influence de la vitesse de coupe **151**

b) Influence de l'avance **152**

c) Influence de la profondeur de passe **152**

V.2.2 Evolution des efforts spécifiques lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 **155**

a) Influence de la vitesse de coupe **155**

b) Influence de l'avance **155**

c) Influence de la profondeur de passe **155**

V.2.3 Evolution des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 **157**

a) Influence de la vitesse de coupe **157**

b) Influence de l'avance **157**

c) Influence de la profondeur de passe **158**

V.2.4 Evolution des efforts spécifiques lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 **161**

a) Influence de la vitesse de coupe **161**

b) Influence de l'avance **161**

c) Influence de la profondeur de passe **161**

V.3 Impact des conditions de coupe sur les efforts de coupe (Methode multifactorielle) **163**

V.4 Impact de l'usure sur l'évolution des efforts de coupe **165**

V.4.1 Cas de l'acier 100Cr6 **165**

V.4.2 Cas de l'acier X200Cr12 **168**

V.5 Corrélation entre les efforts de coupe et les conditions d'usinage **171**

V.6 Conclusion **172**

Conclusion générale **173**

Liste des publications et communications **178**

Bibliographie **181**

Annexe 1 **188**

Annexe 2 **190**

Annexe 3 **193**

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Classement des matériaux à outils suivant la ténacité et la résistance à l'usure. **24**

Figure I.2 : Familles des céramiques de coupe (% à titre indicatif). **27**

Figure I.3 : Micrographie d'une coupe de plaquette en céramique à dispersion de nuance AC5 hertel ($AL_2O_3 +$ Zr O_2) (Grossissement 5000 fois). **28**

Figure I.4 : Micrographie d'une coupe de plaquette en céramique mixte de nuance MC2 hertel (AL_2O_3 + TiC) (Grossissement 5000 fois). **28**

Figure I.5 : Micrographie d'une coupe de plaquette céramique en Nitrure de Silicium NC1 hertel (Si_3 N_4) (Grossissement 5000 fois). **28**

Figure I.6 : Micrographie d'une coupe de plaquette en céramique renforcée de fibres de carbures de Silicium (AL_2O_3+ SiC) (Grossissement 5000 fois). **28**

Figure I.7 : Procédé d'obtention du CBN. **30**

Figure I.8 : Influence du % du CBN. **31**

Figure I.9 : Différentes formes d'outils en Nitrure de Bore cubique. **32**

Figure I.10 : Marché potentiel européen des matériaux de coupe. **33**

Figure I.11 : Marché potentiel japonais des matériaux de coupe. **33**

Figure I.12 : Matériaux à outil utilisés en tournage dur en Europe. **39**

Figure I.13 : Utilisation du CBN par famille de pièces. **39**

Figure I.14 : Marché du CBN par type d'industries. **40**

Figure I.15 : Causes d'usure. **41**

Figure I.16 : Formes d'usures sur les outils de coupe. **44**

Figure I.17 : Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe. **45**

Figure I.18 : La loi d'usure T = F(v). **47**

Figure I.19 : Représentation graphique des différents modèles. **49**

Figure I.20 : Principaux défauts de surface. **50**

Figure I.21: Principaux critères de rugosité. **51**

Figure I.22: Sillons théoriques. **52**

Figure I.23 : Composantes de l'effort de coupe. **54**

Figure I.24 : Structure de la force de coupe. **55**

Figure I. 25 : Effort de coupe spécifique. **56**

Figure I.26 : Principales zones de cisaillement du copeau. **57**

Figure I.27 : Formes de copeau A : copeau continu ; B : copeau segmenté ; C : copeau dentelé. **59**

Figure I. 28 : Morphologie du copeau en fonction de la vitesse de coupe. **60**

Figure I. 29 : Evolution de la morphologie d'un copeau (100Cr6) en fonction de la dureté de la pièce et de la vitesse de coupe. **60**

Figure I.30 : Schéma des zones de dégagement de chaleur. **62**

Figure I.31 : Répartition de la chaleur entre outil, copeau et pièce. **63**

CHAPITRE II

Figure II.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40. **66**

Figure II.2 : Géométrie des éprouvettes pour les essais d'usure. **67**

Figure II.3 : Photos des éprouvettes a) Essais d'usure b) Essais de rugosité et d'effort de coupe. **67**

Figure II.4 : Portes-outils utilisés. **68**

Figure II.5 : Plaquettes de coupe utilisées. **69**

Figure II.6 : Plaquette CBN7020 revêtue d'une couche de TiN. **70**

Figure II.7 : Carbure GC3015 à triple revêtement. **70**

Figure II.8 : Microscope pour la mesure de l'usure. **71**

Figure II.9 : Rugosimètre Surftest 301. **72**

Figure II.10 : Mesure de la rugosité sans démontage de la pièce. **72**

Figure II.11 : Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe. **72**

Figure II.12 : Pyromètre à infrarouge. **73**

Figure II.13 : Diagramme de revenu et bande de Jominy de l'acier 100Cr6. **81**

Figure II.14 : Diagramme de revenu de l'acier X200Cr12. **82**

CHAPITRE III

Figure III.1 : Usure en dépouille (VB) du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6. **85**

Figure III.2 : Usure en cratère (KT) du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6. **85**

Figure III.3 : Micrographies de l'usure VB et KT à V_c=90m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm. Temps d'usinage; a) 8min, b) 40min, c) 56min et d) 80min. **86**

Figure III. 4 : Aspect final de l'usure en cratère KT : a) début d'usinage, b) après 80min d'usinage à Vc=120m/min, f=0,08mm/tr, a_p=0,5mm. **86**

Figure III.5 : Micrographies de l'usure VB et KT à V_c=280m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm. Temps d'usinage; a) 1,5min, b) 7min, c) 9min et d) 15,5min. **87**

Figure III.6 : Micrographies de l'usure VB et KT à V_c=350m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm. Temps d'usinage; a) 1,5min, b) 2,5min, c) 4,5min et d) 7,5min **88**

Figure III.7 : Usure en dépouille (VB) de la céramique mixte CC650 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6. **89**

Figure III.8 : Usure en cratère (KT) de la céramique mixte CC650 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6. **89**

Figure III.9 : Micrographies de l'usures KT et VB du CC650 ; V_c=90m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm; Temps d'usinage a)1,5min, b) 8min, c)12min et d)22min. **90**

Figure III.10 : Aspect final de l'usures de la céramique CC650 a) en cratère b) en dépouille ; Vc=180m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm ;Temps d'usinage=1,5 min. **90**

Figure III.11 : Usure en dépouille (VB) du GC3015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6. **92**

Figure III.12 : Usure en cratère (KT) du GC3015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6. **92**

Figure III.13 : Micrographies de l'usures KT et VB du carbure GC3015; V_c=90m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm ; Temps d'usinage; a) 1,5min, b) 6min. **93**

Figure III.14 : Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe du CBN7020. **94**

Figure III.15 : Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe de la céramique CC650. **95**

Figure III.16 : Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe de la GC3015. **95**

Figure III.17 : Plage de comparaison des tenues des trois matériaux de coupe. **96**

Figure III.18 : Longueur du copeau enlevé à différentes vitesses de coupe pour le CBN. **97**

Figure III.19 : Comparaison entre la longueur de copeau enlevé par les trois matériaux de coupe. **97**

Figure III.20 : Tenues en fonction de la vitesse de coupe (Droites de Taylor). **99**

Figure III.21 : Usure en dépouille (VB) du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12. **101**

Figure III.22 : Usure en cratère KT du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12. **101**

Figure III.23: Evolution de l'usure en dépouille et en cratère du CBN 7020 au début et à la fin de l'usinage pour différentes vitesses de coupe:a_p=0,5mm; f=0,08mm/tr a) 90 m/min, b)120 m/min, c) 180 m/min, d) 280 m/min, e) 350 m/min. **102**

Figure III.24 : Usure en dépouille (VB) de la céramique CC650 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12. **104**

Figure III.25 : Usure en cratère (KT) de la céramique CC650 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12. **104**

Figure III.26 : Evolution de l'usure en dépouille et en cratère de la céramique mixteCC650 au début et à la fin de l'usinage pour différentes vitesses de coupe: a_p=0,5mm; f=0,08mm/tr a) 60m/min, b) 90m/min, c) 120m/min, d) 180m/min. **105**

Figure III.27: Usure en dépouille (VB) du GC3015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12. **107**

Figure III.28: Usure en cratère (KT) du GC3015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12. **107**

Figure III.29 : Aspect de l'usure VB et KT : a) début d'usinage, b) après 38min d'usinage à Vc=30m/min, f=0,08mm/tr, a_p=0,5mm. **106**

Figure III.30 : Micrographies de l'usure VB et KT à V_c=60m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm. Temps d'usinage; a) 6min, b) 8min. **108**

Figure III.31 : Aspect de l'usure VB et KT après 2,5min d'usinage à Vc=90 m/min, f=0,08mm/tr, a_p=0,5mm. **108**

Figure III.32 : Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe du CBN7020. **111**

Figure III.33 : Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe de la CC650. **111**

Figure III.34 : Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe du GC3015. **111**

Figure III.35 : Plage de comparaison des tenues des trois matériaux de coupe. **112**

Figure III.36 : Comparaison entre la longueur du copeau enlevé par les trois matériaux de coupe. **112**

Figure III.37 : Longueur du copeau enlevé par le CBN pour [VB]=0,3 et 0,4 mm. **112**

Figure III.38 : Evacuation de la chaleur par le copeau durant l'usinage du 100Cr6 avec la Céramique CC650 à 180m/min (a-c) et le CBN7020 à 220m/min (d-f). **115**

Figure III.39 : Evacuation de la chaleur par le copeau durant l'usinage du 100Cr6 avec le CBN7020 a) 120m/min, b) 280m/min. **115**

Figure III.40 : Evolution de la température de coupe en fonction du temps à différentes vitesses de coupe ; a_p=0,5mm ; f=0,08mm/tr. **117**

Figure III.41: Température de coupe en fonction de la vitesse de coupe pendant 2min d'usinage. **118**

Figure III.42 : Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acierX200Cr12 par le CBN7020, temps de coupe=1,8min ;Vc=280m/min, a_p=0,5mm; f=0,08mm/tr; t°copeau=895°C; t°outil=158°C ; t°pièce=64°C. **119**

Figure III.43 : Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 par la céramique CC650, temps de coupe=4,5min ; Vc=180m/min, a_p=0,5mm, f=0,08mm/tr; t°copeau=744°C ; t°outil=86°C ; t°pièce=44°C. **120**

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par le CBN à f=0,08 mm/tr et a_p=0,2 mm. **125**

Figure IV.2 : Influence de la profondeur de passe sur la rugosité obtenu par le CBN à Vc=90m/min et f=0,08mm/tr. **125**

Figure IV.3 : Influence de l'avance sur la rugosité obtenue par le CBN Vc=90m/min et a_p=0,2mm. **126**

Figure IV.4 : Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à f=0,08 mm/tr et a_p=0,2 mm. **126**

Figure IV.5 : Influence de la profondeur de passe sur la rugosité obtenu par la céramique CC650 à Vc=90m/min et f=0,08mm/tr. **127**

Figure IV.6 : Influence de l'avance sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à Vc=90 m/min et a_p=0,2mm. **127**

Figure IV.7 : Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par le CBN à f=0,08 mm/tr et a_p=0,2 mm. **129**

Figure IV.8 : Influence de la profondeur de passe sur la rugosité obtenu par le CBN à Vc=120m/min et f=0,08mm/tr. **129**

Figure IV.9 : Influence de l'avance sur la rugosité obtenue par le CBN à Vc=120 m/min et a_p=0,2mm. **130**

Figure IV.10 : Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à f=0,08 mm/tr et a_p=0,2 mm. **130**

Figure IV.11 : Influence de la profondeur de passe sur la rugosité obtenu par la céramique CC650 à Vc=120 m/min et f=0,08mm/tr. **131**

Figure IV. 12 : Influence de l'avance sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à Vc=120 m/min et a_p=0,2mm. **131**

Figure IV.13 : Évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille du CBN7020 pour différentes vitesses de coupe. **136**

Figure IV.14 : Évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille de la CC6650 pour différentes vitesses de coupe. **138**

Figure IV.15 : Évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille du CBN7020 pour différentes vitesses de coupe. **142**

Figure IV.16 : Évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille de la CC650 pour différentes vitesses de coupe. **144**

Figure IV.17 : Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales et prédites de Ra et Rt pour CBN7020/100Cr6 en fonction de (f) à Vc=90m/min et a_p=0,2mm. **146**

Figure IV.18 : Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales et prédites de Ra et Rt pour CC650/100Cr6 en fonction de (f) à Vc=90m/min et a_p=0,2mm. **146**

Figure IV.19 : Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales et prédites de Ra et Rt pour CBN7020/X200Cr12 en fonction de (f) à Vc=120m/min et a_p=0,2mm. **147**

Figure IV.20 : Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales et prédites de Ra et Rt pour CBN7020/X200Cr12 en fonction de (f) à Vc= 120m/min et a_p=0,2mm. **147**

CHAPITRE V

Figure V.1 : Evolution des efforts de coupe en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier 100Cr6 usiné par le CBN. **153**

Figure V.2 : Evolution des efforts de coupe en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier 100Cr6 usiné par le céramique CC650. **154**

Figure V.3 : Evolution des efforts spécifiques en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier 100Cr6 usiné par le CBN. **156**

Figure V.4: Evolution des efforts de coupe en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier X200Cr12 usiné par le CBN. **159**

Figure V.5 : Evolution des efforts de coupe en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier X200Cr12 usiné par le céramique CC650. **160**

Figure V.6 : Evolution des efforts spécifiques en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier X200Cr12 usiné par le CBN. **162**

Figure V.7: Evolution des l'efforts de coupe en fonction du temps d'usinage Vc = 180 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08 mm/tr. **166**

Figure V.8 : Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure Vc = 180 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr. **166**

Figure V.9 : Evolution de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage Vc = 350 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr. **167**

Figure V.10 : Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure Vc = 350 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr. **167**

Figure V.11 : Evolution de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage Vc = 120 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr. **169**

Figure V.12 : Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure Vc = 120 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr. **169**

Figure V.13 : Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure Vc = 180 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr. **170**

Figure V.14: Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure Vc = 180 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr. **170**

LISTES DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Comparaison des propriétés de certains revêtements. **25**

Tableau I.2 : Influence des paramètres de coupe sur la rugosité. **52**

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Composition chimique des aciers utilisés. **68**

Tableau II.2 : Caractéristiques géométriques des portes-outils. **68**

Tableau II.3 : Informations relatives aux plaquettes utilisées. **69**

Tableau II.4 : Réalisation d'essais d'après la méthode unifactorielle. **74**

Tableau II.5 : Matrice de planification pour un plan 2^3. **75**

Tableau II.6 : Conditions de coupe. **80**

Tableau II.7 : Conditions du traitement thermique des aciers utilisés. **81**

CHAPITRE III

Tableau III. 1: Modèles Mathématiques obtenus pour les trois matériaux de coupe. **98**

Tableau III.2 : Effets des différentes plages de vitesses de coupe sur la durée de vie du CBN pour [VB] = 0,3 mm. **109**

Tableau III.3: Modèles Mathématiques obtenus. **113**

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 : Rugosité de surface de l'acier 100Cr6 en fonction du plan d'expérience. **132**

Tableau IV.2 : Rugosité de surface de l'acier Z00Cr12 en fonction du plan d'expérience. **132**

Tableau IV.3 : Modèle de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe. **145**

Tableau IV.4 : Modèles de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille. **148**

CHAPITRE V

Tableau V.I : Résultats de l'effort et de la pression de coupe en fonction des différentes combinaison des éléments du régime de coupe (100Cr6/CBN). **163**

Tableau V.2 : Résultats de l'effort et de la pression de coupe en fonction des différentes combinaison des éléments du régime de coupe (100Cr6/ CC650). **163**

Tableau V.3 : Résultats de l'effort et de la pression de coupe en fonction des différentes combinaison des éléments du régime de coupe (X200Cr12/CBN). **164**

Tableau V.4 : Résultats de l'effort et de la pression de coupe en fonction des différentes combinaison des éléments du régime de coupe (X200Cr12/ CC650). **164**

Tableau V.5 : Modèle mathématique de l'effort de coupe (Méthode multi factorielle). **171**

Résumé

Les outils de coupe en céramique mixte à base d'alumine et de carbure de titane (Al_2O_3 + TiC) ainsi que les CBN à base de nitrure de bore cubique et carbonitrure de titane sont largement convoités pour les opérations d'usinage des matériaux très durs et dans des conditions sévères. Ainsi, les objectifs de cette recherche se résument à étudier d'une part, l'effet des conditions de travail sur l'usure des matériaux de coupe modernes comme la céramique mixte (CC650), le nitrure de bore cubique (CBN7020) ainsi que le carbure métallique revêtu (GC3015). D'autre part, l'impact des conditions de coupe et de l'usure des outils sur la qualité des surfaces usinées est abordé en terme de rugosité. Des essais d'usure de longue durée ont été réalisés sur deux nuances d'acier (100Cr6 et X200Cr12) qui sont difficilement usinables de part leur dureté avoisinant un niveau de 60HRC.

Lors de l'usinage de l'acier 100Cr6, les résultats des tenues montrent qu'à la même vitesse de 90 m/min, le ratio T_{CBN}/T_{CC650} n'est que de 6,57 en comparaison avec le ratio T_{CBN}/T_{GC3015} qui est de 38,33. Cependant, le ratio T_{CC650}/T_{GC3015} donne une faible valeur de 5,8. Aux vitesses de coupe supérieures à 120 m/min, le CBN dépasse largement la céramique mixte en durée de vie et en qualité de surface. Les états de surfaces obtenues sont comparables à celles de la rectification dont la plage de R_a en µm est de 0,2 à 1,6. Une relation entre la rugosité de la surface usinée et l'usure VB de l'outil a été mise en évidence sous la forme d'une équation puissance. Cette dernière permet de décrire l'évolution de la rugosité à différentes vitesses de coupe.

Ce travail présente également l'influence des conditions de coupe ainsi que celle de l'usure sur les efforts de coupe. L'usinage des aciers 100Cr6 et X200Cr12 s'est caractérisé par une génération de chaleur intense, principalement véhiculée par le copeau, et qui n'a pas affecté thermiquement la surface usinée de la pièce. Des modèles mathématiques exprimant la relation entre les éléments du régime de coupe et les paramètres technologiques (durée de vie, rugosité et effort de coupe) ont été proposés.

Mots-clés: Céramique mixte, CBN, carbure métallique revêtu, Usure, Rugosité, Tournage dur.

Abstract

Both mixed ceramic (alumina and titanium carbide) and CBN (cubic boron nitride and titanium carbonitride) tools are widely sought for machining under severe conditions. The object of this research work is primarily to study the effect of the cutting conditions on the wear of modern materials for cutting tools such as mixed ceramics, cubic boron nitride as well as coated metallic carbides. Secondly, the study presents, the impact of both cutting conditions and tools wear on the machined surface roughness. Long duration wear tests were carried out on two nuances of steel (100Cr6 and X200Cr12) having a hardness about 60HRC and which are difficult to machine.

Tool life results during the machining of 100Cr6 steel at the same speed 90 m/min show that the ratio T_{CBN} / T_{CC650} is 6,57 and the ratio T_{CBN} / T_{GC3015} is 38,33, whereas the ratio T_{CC650} / T_{GC3015} is only about 5,8. At higher cutting speeds over 120 m/min, the CBN tool exceeds by far mixed ceramics in tool-life and surface quality. Surface qualities obtained are comparable with those of grinding in terms of average roughness ($0,2\mu m < Ra < 1,6\mu m$). A relation between machined surface roughness and tool wear VB was highlighted in the form of a power equation. The latter makes it possible to describe the evolution of roughness at various cutting speeds.

This work also presents a study of the influence of the cutting conditions and wear on the cutting forces. The machining of 100Cr6 and X200Cr12 steels was characterized by a significant heat generation, which was conveyed mainly by the chip, and did not thermally affect the machined surface of the part. Mathematical models expressing the relation between the elements of the cutting regime and technological parameters (tool-life, roughness and cutting forces) are proposed.

Key words: Mixed Ceramic, Cubic Boron Nitride, Coated carbide, Wear, Roughness, Hard Turning.

INTRODUCTION

Malgré le développement de nouvelles techniques permettant d'élargir le champ d'application des procédés de fabrication par enlèvement de matière, telles que l'électroérosion ou la découpe par laser, l'usinage par outil coupant garde une place dominante parmi ces procédés, en raison du rendement énergétique très favorable de ce processus traditionnel. Cette position se trouve d'ailleurs renforcée, grâce aux gains de productivité et à la flexibilité accrue, que permet l'utilisation de plus en plus étendue de la commande numérique et de la programmation automatique des machines-outils.

Aussi, est-il souhaitable d'abaisser au maximum les coûts de production de ce processus par l'augmentation des vitesses de coupe, réalisables notamment grâce à l'introduction de nouveaux matériaux coupants. De ce fait, l'optimisation des conditions opératoires des outils coupants doit contribuer largement à la productivité et au développement des techniques avancées d'automatisation de l'usinage.

De plus les progrès techniques, notamment dans les domaines de l'automobile, l'aviation, de l'espace et du nucléaire, ont développé l'emploi de matériaux très durs ou réfractaires d'usinabilité difficile, qui demandent des matériaux à outils très résistants. Parallèlement, ces progrès font apparaître de nouveaux matériaux susceptibles d'être utilisés pour réaliser des outils coupants répondant à ces exigences.

Les outils de coupe en acier rapide, carbure et cermet sont utilisés en tournage pour la plupart des matériaux usinés mais leur tenue est limitée et leur usage parfois impossible lorsque certaines pièces à usiner se caractérisent par une grande dureté et une résistance à l'abrasion élevée. C'est le cas principalement des aciers et des fontes trempés, des alliages réfractaires à base de nickel et des matériaux composites à matrice métallique.

C'est pourquoi, bien que les études entreprises jusqu'à présent dans le domaine de la coupe (mécanisme de la formation du copeau, comportement des outils, aspect thermique, endommagement des arêtes de coupe) aient permis des progrès importants pour la connaissance du processus, il est nécessaire de les réactualiser et de les poursuivre, afin de répondre aux nouvelles conditions du contexte industriel. Il apparaît, en particulier, que la complexité et les interactions des nombreux facteurs impliqués dans les phénomènes de la coupe, nécessitent des expérimentations spécifiques à chaque matériau, afin de définir le meilleur choix des outils et des conditions de coupe optimales correspondantes, en se basant sur l'analyse de leurs comportements à l'usure.

Les travaux qui font l'objet de cette thèse de doctorat s'inscrivent dans cet objectif. En particulier l'étude de l'usinabilité des aciers de hautes duretés (100Cr6, X200Cr12) et aussi l'évaluation des capacités de coupe des outils représentatifs des grandes familles de matériaux coupants modernes (à savoir : le nitrure de bore cubique et les céramiques).

La thèse est structurée comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique, dans lequel sont définis, le tournage dur, l'évolution des matériaux à outil et la description des phénomènes régissant le processus de coupe (l'usure des outils, la rugosité, les efforts et la température de coupe et enfin la formation du copeau).

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés, la planification des expériences et les conditions de coupe et de traitements thermiques.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus lors des essais d'usure. Ceci dans le but de déterminer les capacités de coupe des matériaux de coupe testés. Le suivi de l'usure a permis l'établissement de modèles mathématiques prenant en compte l'influence des conditions de coupe.

Le quatrième chapitre est réservé à l'étude de l'impact des conditions de coupe et de l'usure sur la rugosité des surfaces usinées pour les deux matériaux de coupe testés. Cette étude a conduit à la détermination de modèles mathématiques exprimant d'une part la relation entre la rugosité et les éléments du régime de coupe et d'autre part la relation entre la rugosité de la surface usinée et l'usure de l'outil.

Le cinquième chapitre est réservé à l'étude de l'impact des conditions de coupe et de l'usure sur les efforts de coupe générés lors de l'usinage des deux aciers trempés par le CBN et la céramique mixte. Cette étude a conduit à la détermination des modèles mathématiques exprimant la relation entre les efforts de coupe et les éléments du régime de coupe.

En dernier lieu, nous avons présenté une conclusion générale, suivie par une liste des références bibliographiques et des annexes.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES PHENOMENES REGISSANT LE PROCESSUS DE COUPE

I.1 Evolution des matériaux à outils

I.1.1 Introduction

Le 20ème siècle se caractérise par une amélioration constante de la productivité des industries manufacturières conséquence de l'accroissement spectaculaire de la vitesse d'enlèvement des copeaux, lui-même du au développement remarquable des matériaux pour outil de coupe. La figure I.1 schématise l'évolution des matériaux à outils dans un diagramme "ténacité – résistance à l'usure".
Dans toute opération d'usinage par enlèvement de copeaux, l'outil est confronté à quatre problèmes **[PAS 96]** :

- L'usure qui survient essentiellement au niveau de l'arête de coupe ;
- La chaleur engendrée ;
- Les chocs ;
- Les interactions chimiques possibles avec le matériau usiné.

L'outil pour enlever le copeau doit s'enfoncer dans le métal à usiner, pour cela le matériau de l'outil doit avoir les qualités suivantes **[GLA 84], [BED 89], [ROM 74]** :

a) Une dureté élevée: Elle lui donne le pouvoir de pénétrer dans le métal à usiner. La différence entre la dureté de l'outil et celle de la pièce doit être la plus grande possible (supérieure à 3 fois).

b) Une résistance à l'abrasion élevée: Pour s'opposer à l'usure sur la surface d'attaque de l'outil et sur les surfaces en dépouille et cela, afin de garantir une durée de vie élevée.

c) Une résistance mécanique élevée

- Résistance à la flexion élevée ;
- Résilience élevée pour résister au choc pendant la coupe (rabotage, fraisage) ;
- Résistance à la compression élevée pour résister à la pression du copeau sur la surface d'attaque.

d) Une résistance à la température élevée: Afin de résister aux températures atteignant les 1000° et plus qui règnent à la pointe de l'outil et qui diminuent sensiblement la résistance mécanique.

- Une conductibilité thermique élevée ;
- Une densité élevée.

Ces exigences sont nécessaires pour assurer une évacuation rapide du flux de chaleur hors de la zone de coupe.

L'usinage des pièces dures (dureté > 45HRC) nécessite l'utilisation de matériaux à outils ayant une grande dureté à haute température, une résistance à l'usure et une stabilité chimique. Par conséquent, les matériaux de coupe présentés dans cette étude sont les carbures métalliques, les céramiques et les polycristallins de Nitrure de bore cubique.

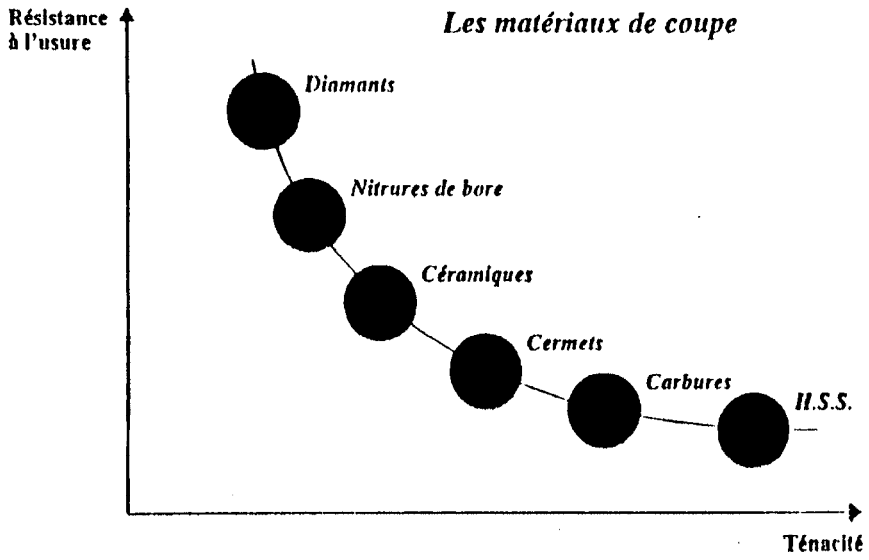


Figure I.1 : *Classement des matériaux à outils suivant la ténacité et la résistance à l'usure.*

I.1.2 Carbures Métalliques

Les carbures métalliques sont des alliages frittés à base de carbure de tungstène, de carbure de titane et de carbure de tantale liés par le cobalt. Le tungstène est mélangé au carbone et chauffé à 1500°C pour obtenir le carbure de tungstène. Ce dernier est mélangé au cobalt pur et comprimé à la presse. A une température de 700°C on effectue un premier frittage. Ce pré frittage donne des produits assez solides pour en permettre le découpage. Ils sont ensuite frittés définitivement à 1400°C avec des additions complexes de (W) et de (Ti). En usinant les aciers les carbures métalliques permettent une vitesse de coupe allant jusqu'à 300 m/min. La vitesse d'usure est minimale quand l'outil arrive à une température de 800° mais l'outil peut supporter une température jusqu'à 1000°. La dureté de ce matériau est aux alentours de 90 HRC. La symbolisation des carbures a fait l'objet de la recommandation NF E 66 – 304 (ISO 513) **[GLA 84]**. Les nuances de carbure sont divisées en trois grandes catégories :

- P : pour les matières à copeaux longs (aciers) ;
- M: pour les matières difficiles (aciers inoxydables, réfractaires, fontes alliées) ;
- K : pour les matières à copeaux courts (fontes, laiton, aluminium, bois, plastiques).

❖ ***Carbures revêtus***

La plupart des outils carbures sont revêtus. On revêt un carbure tenace d'une couche de TiN ou de céramique. Ce revêtement assure une très forte résistance à la cratérisation ce qui amélioré l'usure par diffusion. Il réduit la friction au contact outil-copeau, ce qui diminue les efforts de coupe. Les qualités de carbures revêtus autorisent des vitesses de coupe élevées avec des sections de copeau importantes, permettant un

gain de production de l'ordre de 20 à 30 %. La durée de vie est de 2 à 5 fois supérieure à celle d'un carbure non revêtu. L'usinage est possible jusqu'à 1300°C **[REV 86]**. On trouve différents types de revêtements : monocouche (TiN jaune) multicouches (TiCN de 2µm d'épaisseur et TiN de 6µm, TiN+TiC+TiN, TiC+AL_2O_3, TiCN+AL_2O_3+TiN,…+HFN). HFN : Nitrure de Hafnium métal rare. Le tableau I.1 compare les propriétés de certains revêtements **[GLA 84]**.

Tableau I.1 : *Comparaison des propriétés de certains revêtements.*

Matériau de revêtement	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	*****	*	*	***
TiN	***	***	***	*****
Ti(C,N)	**	**	**	****
Al_2O_3	****	*****	*****	**
HfN	***	****	****	****
* Indique la valeur la plus faible et ***** Indique la valeur la plus forte.				

Les principaux procédés de revêtement utilisés sont :

PVD : Dépôt Physique en phase Vapeur (Physical Vapor Deposition)
On vaporise, sous vide le matériau de revêtement entre 150 et 500°C en utilisant un courant à haute tension. La vapeur produite se condense en un film de 2 à 5µm sur les surfaces à revêtir (substrat).

CVD : Dépôt Chimique en phase Vapeur (Chemical Vapor Deposition)
C'est un procédé de revêtement par réaction chimique à température élevée de 900 à 1100°C sous une atmosphère inerte, réductrice où recarburante. Un gaz transporteur amène une vapeur réactive appropriée dans un réacteur ou se trouvent les pièces. L'épaisseur de 2 à 12µm dépend du matériau de revêtement, de la pression, du temps et de la température.
En conclusion, on peut dire que les carbures revêtus couvrent un très large domaine d'application d'usinage. On estime que 70% des opérations d'usinage sont effectuées par des plaquettes en carbure. Une large gamme de compositions est offerte et chaque nuance est conçue en fonction des besoins requis pour toute application particulière.

I.1.3 Céramiques de coupe

I.1.3.1 Introduction

Les premiers brevets et publications sur les matériaux de coupe céramiques à base d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) datent en Allemagne du début du siècle précédent. Des recherches systématiques commencèrent dans les années trente. 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 USA, en ex 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 Hanovre en 1957 **[HER 86]**.
Les premiers matériaux de coupe étaient surtout des céramiques très pures, à base d'oxyde d'aluminium. Cette matière première présente des valeurs mécaniques de très

hautes résistances. Et même si à cette époque, la résistance et la stabilité de ces céramiques de coupe n'étaient pas équivalentes à celles d'aujourd'hui, il se trouve qu'elles étaient déjà supérieures aux aciers rapides et aux carbures. Cette céramique oxydée rendait possible l'usinage des fontes et des aciers à des vitesses qui, pour la première fois excédaient la limite des 1000 m/min. On créa le terme de « Tournage à grande vitesse ». La performance de la céramique était alors très supérieure aux possibilités des machines-outils existantes. Pour pouvoir introduire le plus largement possible les céramiques de coupe, il est devenu nécessaire de perfectionner les machines outils (stabilité, puissance, vitesse). Dés le début des années soixante une importante réorientation commença et eut pour effet une évolution réciproque sur les outils et les machines. Au début du siècle (1900), nul n'aurait pensé qu'un matériau de coupe céramique jouerait un rôle aussi important dans l'usinage par enlèvement de matière. Cette technologie de pointe qui nous mena à la fabrication de céramique de coupe d'une qualité jamais atteinte aura marqué son époque dans les milieux techniques **[HER 86]**, **[BRA 86]**.

I.1.3.2 Classification des céramiques de coupe

Sur la figure I.2, sont mentionnés les différents groupes de matériaux de coupe en céramiques (Oxydes, Carboxydes, Nitrures et Composites).

- **Céramique oxydée**

Parmi les céramiques oxydées des plaquettes en oxydes d'aluminium pur (99% AL_2O_3). Aujourd'hui la céramique oxydée mixte, appelée aussi céramique à dispersion, il s'agit de la combinaison de AL_2O_3+ZrO_2 (Oxyde de Zirconium) (figure I.3). L'oxyde d'aluminium confère au matériau de coupe son excellente dureté à chaud permettant des vitesses de coupe élevées. Les additions d'oxyde de Zirconium contribuent à ce que ce type de céramique ait une structure à grains extrêmement fins influençant de manière positive la résistance à l'usure et à la flexion. Aujourd'hui, l'alumine pure n'est plus utilisée pour l'usinage des métaux. Tous les outils en alumine commercialisés contiennent de zircone en concentration allant de 2 à 10%. Une teneur plus élevée en zircone est utilisée pour les outils employés en usinage intermittent. Les domaines d'applications d'une telle céramique à dispersion sont le tournage ébauche et de finition des fontes, ainsi que le tournage ébauche des aciers de cémentation et de traitement **[VIG 87]**.

- **Carboxydes**

Ces céramiques sont connues habituellement sous le nom "mixte". Dans ce cas AL_2O_3 est allié à d'autres carbures métalliques comme TiC (figure I.4). Elles sont utilisées pour la coupe depuis 1970. Mais on trouve également des combinaisons de AL_2O_3 avec du nitrure de titane (TiN) ou TiC/N (carbonitrure). Les matériaux de coupe pressés à chaud se distinguent par une haute densité, une excellente stabilité des arêtes de coupe et une résistance à la rupture **[BRA 86]** avec une bonne conductivité thermique **[FUR 85]**. Leur principale application est le tournage des fontes blanches. Ils sont cependant utilisés avec succès pour certaines opérations de finitions en tournage, ainsi qu'en fraisage fin qui se substitue à l'opération de rectification **[VIG 87]**.

- **Nitrures**

Ces types de matériaux sont plus récents que les céramiques à base d'aluminium et sont actuellement en développement. Les plus connus sont les sialons (Si_3N_4+ AL_2O_3), il s'agit des céramiques de couleur noire, (figure I.5). Les outils en sialon ont une grande dureté à chaud, une meilleure ténacité à chaud et une plus grande résistance au choc thermique que les outils à base d'alumine. Ils ne peuvent être utilisés pour les aciers du fais d'interaction chimique avec eux, mais ils conviennent à l'usinage des fontes et des superalliages jusqu'à des vitesses de coupe de 1500 m/min **[GRE 83]**. Les développements dans ce domaine ne sont pas encore terminés, il est possible de revêtir le Si_3 N_4 d'une couche en oxyde d'aluminium (AL_2O_3), en carbure de titane (TiC) **[PAS 87]**. Cette technique améliore la résistance à l'usure, permettant ainsi des vitesses élevées.

- **Composites**

Actuellement le renforcement des matériaux de coupe de céramique à base de l'oxyde d'aluminium au moyen d'une dispersion des fibres en carbures de silicium (AL_2O_3 + SiC) semble représenter l'une des solutions les plus prometteuse permettant d'augmenter considérablement la ténacité du matériau final. Un Whiskers est une fibre monocristalline. Les whiskers de SiC utilisés pour renforcer les outils de coupe en alumine ont un diamètre inférieur à 1 µm et une longueur comprise entre 5 et 20 µm (figure I.6). Les composites en carbure de silicium comportent généralement 25 à 35% en poids de whiskers. Cette adjonction se traduit par un doublement de la résistance à la rupture et par une augmentation de la résistance aux chocs thermiques qui rend donc possible l'utilisation d'un liquide de coupe en cours d'usinage **[BRA 97]**.

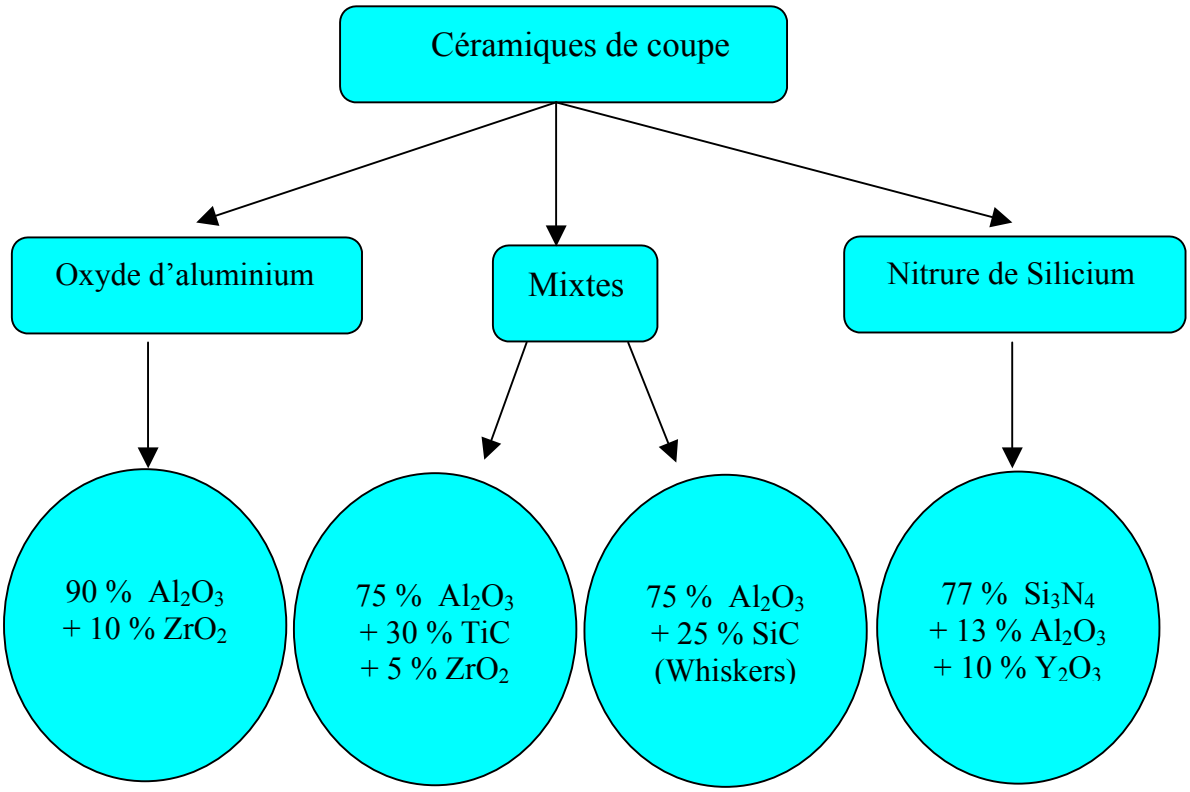


Figure I.2 : *Familles des céramiques de coupe (% à titre indicatif).*

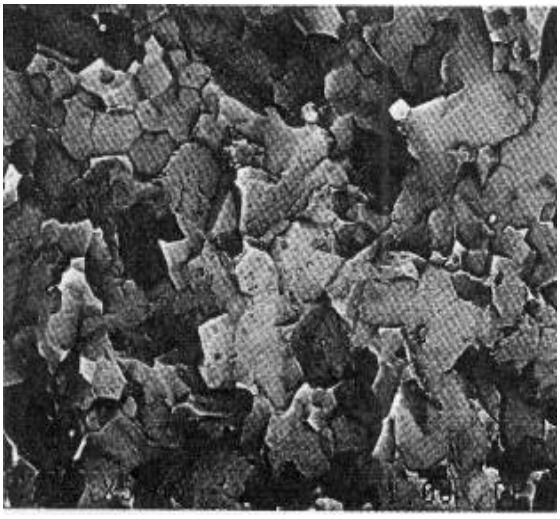


Figure I.3 : *Micrographie d'une coupe de plaquette en céramique à dispersion de nuance AC5 hertel (AL_2O_3 + $Zr\ O_2$) (Grossissement 5000 fois).*

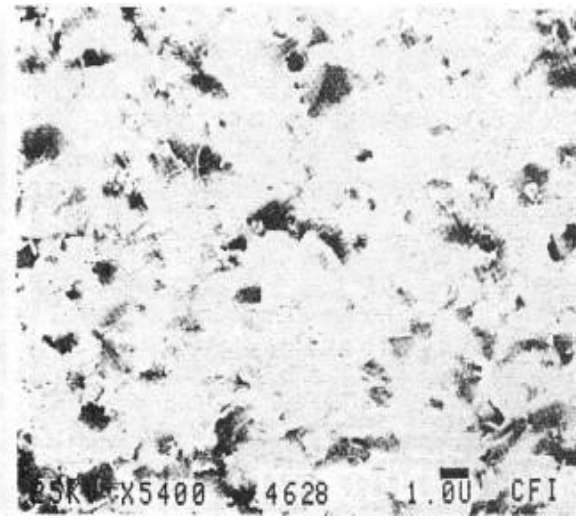


Figure I.4 : *Micrographie d'une coupe de plaquette en céramique, mixte de nuance MC2 Hertel (AL_2O_3 + TiC) (Grossissement 5000 fois).*



Figure I.5 : *Micrographie d'une coupe de plaquette céramique en Nitrure de Silicium NC1 Hertel ($Si_3\ N_4$) (Grossissement 5000 fois).*



Figure I.6 : *Micrographie d'une coupe de plaquette en céramique renforcées de fibres de carbures de Silicium (AL_2O_3+ SiC). (Grossissement 5000 fois).*

I.I.3.3 Facteurs influençant le rendement des céramiques

Des travaux de recherche et des essais très poussés ont trouvé qu'il y'a plusieurs facteurs qui peuvent influencer le rendement des outils de coupe en céramique **[FAN 86], [VIG 87], [PAS 87]**. Il faut absolument tenir compte de ces facteurs pour obtenir le rendement optimal.

- Les machines doivent être amplement puissantes et pouvoir travailler sans désemparer aux vitesses élevées nécessaires pour l'usinage aux outils en céramique.
- La rigidité du montage de l'outil ou de porte outil est tout aussi importante que la rigidité de la machine. Pour éviter la pression de serrage, il convient de placer une plaque intercalaire entre le porte- outil et la plaquette.
- Le porte-à-faux de l'outil doit être aussi court que possible.
- Les vitesses, les avances et les profondeurs de passe doivent être adaptées aux types de céramique utilisée.
- Lorsque la lubrification est obligatoire pour garantir les tolérances requises, le débit devra être important et continu pour limiter les chocs thermiques sur l'outil.
- Il est souvent favorable de pratiquer un chanfrein d'entrée afin d'éviter la détérioration de l'arête de coupe.
- Les plaquettes devront avoir la plus grande épaisseur possible, avec un angle de coupe négatif pour que leur résistance soit maximale.

I.1.3.4 Perspectives

Les perspectives de développement des outils coupants en céramique sont liées d'une part à leur capacité de remplacement des carbures dans les techniques d'usinage actuelles (Tournage - Fraisage). D'autre part à leur capacité d'emploi dans des nouvelles techniques d'usinage. Le développement des machines-outils (CNC, Centre d'usinage), offrent aujourd'hui plus de puissance et une meilleure stabilité, capable d'usiner selon les paramètres de coupe bien adaptés aux outils céramiques. Ils permettent aussi d'adapter avec plus de précision le cycle d'usinage au matériau de coupe afin de réduire au minimum les risques de rupture de la plaquette. Une évolution rapide de la part de marché des céramiques paraît par conséquent assez probable, on trouve souvent dans la presse spécialisée des prévisions très optimistes prévoyant une croissance importante dans les 10 ans avenir **[BRA 97]**.

I.1.4 Nitrures de Bore Cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique est le matériau le plus dur après le diamant. Le Pc-BN (le nitrure de bore polycristalin) est 50 fois plus résistant à l'abrasion que le carbure de tungstène et 5 fois plus que l'oxyde d'alumine et le nitrure de silicium. Il conserve sa résistance et n'a pas tendance à réagir avec le fer ou l'air aux hautes températures de coupe qui sont caractéristiques de l'usinage des aciers durs. Sa température d'utilisation en atmosphère oxydante atteinte 1400°C. En atmosphère inerte ou réductrice, il résiste à des températures allant jusqu'à 2000°C. Dans l'hydrogène sec, on peut atteindre les 3000°C. D'après Peter RIGBY **[RIG 94]** leurs propriétés physiques de dureté, de résistance à la compression et de conductivité thermique leur confèrent une résistance

à l'abrasion qui leur permet surtout d'usiner avec des vitesses de coupe plus importantes qu'avec des outils carbures, tout en assurant des états de surface excellents pour des durées de vie élevées. Ses propriétés ont conduit à l'utilisation du CBN comme matériau d'outil depuis le début des années 1970 **[PAS 87]**.

Contrairement au diamant, le CBN ne se trouve pas dans la nature. On l'élabore donc par synthèse (première synthèse en 1957 aux Etas-Unis) (figure I.7).
Suivant les conditions, on obtient les deux formes suivantes:

- Nitrure de bore à structure cubique (CBN) qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant).
- Nitrure de bore à structure hexagonale de faible dureté (même structure que le graphite).

La forme dure est très difficile à obtenir et les techniques sont voisines de celles utilisées pour la synthèse du diamant. Les cristaux obtenus sont très petits (< 0,5mm, plutôt vers 50µm) utilisables pour la réalisation de meubles au nitrure de bore.
Pour fabriquer des outils de coupe, on réalise par frittage (premier essai vers 1972) un compact polycristallin (analogie avec le PCD à matrice céramique ou métallique, éventuellement lié à un substrat en carbure de tungstène).

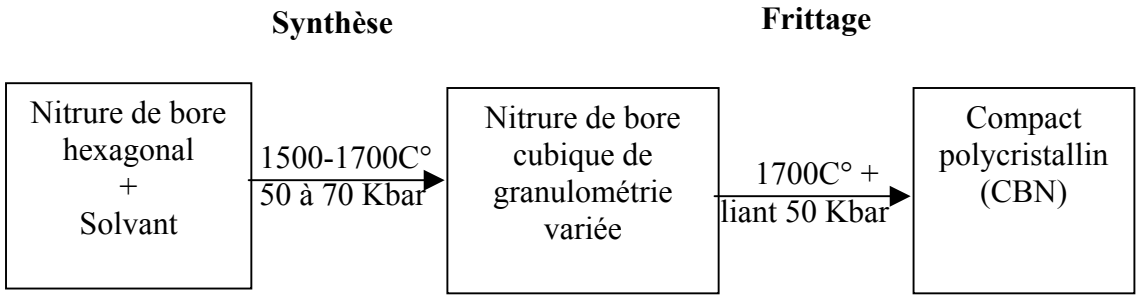


Figure I.7 : *Procédé d'obtention du CBN.*

Pour couvrir tous les cas d'usinage, il existe plusieurs nuances de CBN, chacune ayant son application spécifique. Les performances dépendent de la teneur en CBN, de la grosseur des particules, du type de liant utilisé et de la microstructure. On les classe généralement en deux groupes selon leur microstructure **[GLA 84]**.

- Les outils Pc-BN dites «purs» dont la teneur en nitrure de bore cubique dépasse 90%, ils sont caractérisés par une deuxième phase liante de nature métallique ($2\%ALB_2/ALN$). Cette nuance possède une grande résistance mécanique et aux chocs. Elle est recommandée pour l'usinage des alliages de rechargement, des fontes perlitiques, des superalliages et des pièces en métaux frittés. Du fait de sa grande résistance, on utilise cette nuance pour les travaux d'ébauche et de coupe interrompue d'alliages durs.

- Les outils Pc-BN dites «**mixtes**» métal/céramique: la teneur de nitrure de bore cubique reste inférieure à 70% et la seconde phase est complexe pour associer les propriétés de composés métalliques et celles de composés céramiques. Cette seconde phase peut comprendre des composés à base d'aluminium {(nitrure AIN, borure AlB_2), de titane (nitrure TiN, carbure TiC, carbonitrure Ti(CN))} et éventuellement d'autres éléments composés. Une nuance à liant céramique possède une plus grande résistance à l'usure thermochimique, ce qui est préférable pour les coupes continues et à vitesses élevées des aciers traités. Le pourcentage de CBN joue énormément sur la valeur de la conductivité thermique de la plaquette CBN.

Des essais **[FLO 90]** ont montré que l'usinage à grande vitesse d'une fonte coulée perlitique avec un outil CBN donnait de meilleurs résultats qu'avec un outil céramique (Sialon). D'une manière générale, si le matériau de coupe contient plus de 75% de CBN, il est plutôt utilisé pour des opérations d'ébauche. Dans le cas contraire, il est réservé au travail de finition (figure I.8) **[GEI 99]**.

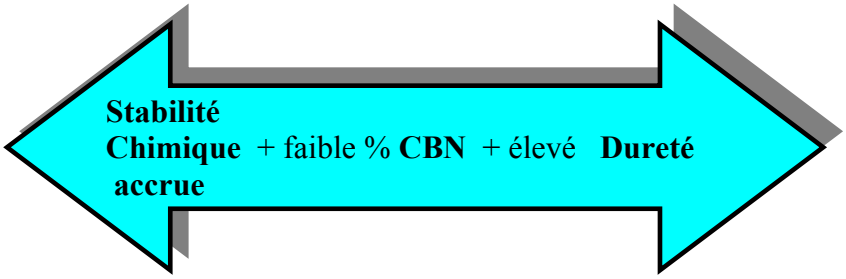


Figure I.8 : *Influence du % du CBN.*

I.1.4.1 Plaquettes en nitrure de bore cubique

Les plaquettes en Nitrure de Bore cubique se présentent sous différentes formes (figure I.9) **[CET 75]** :

- Plaquettes massives : ces plaquettes sont plus robustes et résistent mieux aux chocs que les plaquettes revêtues. Ce type de plaquettes est utilisé pour les opérations d'ébauche.
- Plaquettes revêtues sur une face : Ces plaquettes sont moins chères, mais elles résistent moins bien aux chocs. On les utilise pour des opérations de semi–finition et finition. Ces plaquettes revêtues donnent parfois des résultats meilleurs lors de l'usinage d'alliages réfractaires.
- Plaquettes revêtues en coin : Ces plaquettes sont encore moins chères que les deux précédentes, mais elles n'offrent qu'une arête de coupe. La profondeur de passe est limitée par la longueur d'arête de la partie revêtue.
- Plaquettes avec insert CBN en coin : Ces plaquettes présentent un insert en CBN sur toute l'épaisseur de la plaquette (brevet Sandvik), elles sont utilisables sur les deux cotés.

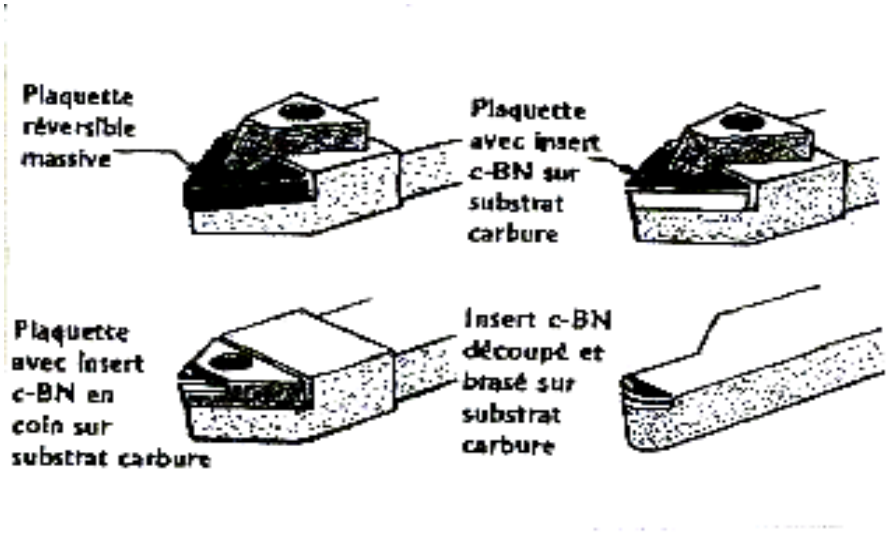


Figure I.9 : *Différentes formes d'outils en Nitrure de Bore cubique.*

I.1.4.2 Domaines d'emploi technique et économique du Nitrure de bore cubique

Le Nitrure de bore est un matériau d'outil coûteux. Son emploi est donc limité aux opérations où les progrès techniques qu'il permet de réaliser équilibrent le surcoût d'outillage ou aux opérations impliquant des matériaux pratiquement inusinables par d'autres outils. Le tournage et l'alésage sont les opérations les plus couramment réalisées. Le nitrure de bore permet d'usiner des matériaux très durs et difficiles à usiner (Fonte et acier de dureté supérieure à 45HRC et certains alliages réfractaires). Pour les opérations d'alésage des fontes grises, la grande résistance à l'usure de nitrure de bore permet d'usiner plusieurs centaines de pièces tout en garantissant la cote réalisée. Pour l'usinage des aciers traités, l'utilisation de Nitrure de Bore conduit parfois à éliminer l'opération de rectification **[CET 75]** et ainsi justifier sa rentabilité.

I.1.4.3 Marché potentiel du CBN d'après General electric

Le marché potentiel des céramiques et du CBN représente les parts de marché que pourraient prendre ces matériaux de coupe par rapport aux autres. Les figures I.10 et I.11 nous montrent respectivement le marché des céramiques et du CBN en Europe et au Japon **[DAP 94]**.
On remarque d'après ces deux figures que la demande des outils de coupe en céramique et en nitrure de bore cubique est beaucoup plus importante au Japon (198M$), même si cette dernière a tendance à réagir actuellement pour combler son retard. L'Europe, comparée au japon, utilise moins le CBN et beaucoup le procédé de rectification.

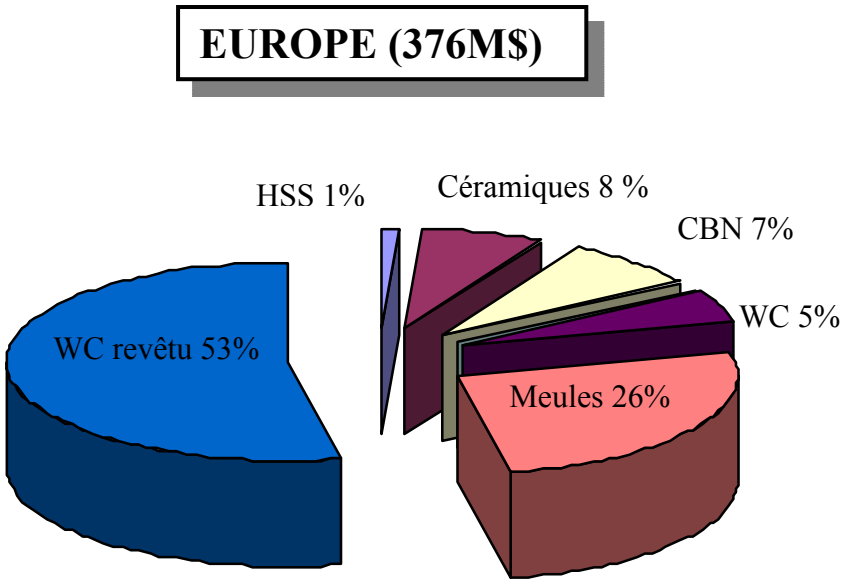


Figure I.10 : *Marché potentiel européen des matériaux de coupe* **[DAP 94].**

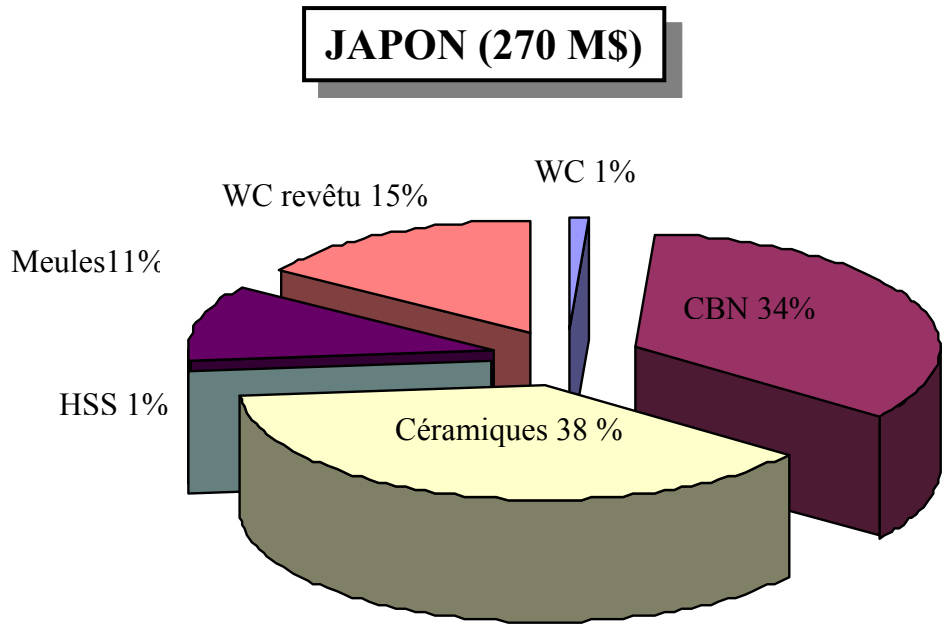


Figure I.11 : *Marché potentiel japonais des matériaux de coupe.*

I.1.4.4 Conclusion

Les outils en nitrure de bore cubique ouvrent une nouvelle voie d'amélioration de la productivité pour les usineurs. Ceux-ci doivent donc être attentifs à leurs possibilités, performances et progrès. Toutefois, en raison du coût de ce matériau d'outil, un bilan économique précis des avantages induits par son utilisation est nécessaire avant de décider de son application industrielle.

I.2 Le Tournage Dur (TD)

I.2.1 Introduction

Le tournage des métaux durs est un procédé assez récent dans son utilisation. Le but de celui-ci est, à terme de supprimer lors de l'usinage de pièces de précision, la phase de rectification, souvent longue et coûteuse.
Aussi, le tournage des métaux durs est prometteur et intéresse de nombreux industriels de part les gains de productivité qu'il doit permettre de réaliser sur l'usinage des pièces. En effet, avec les méthodes d'usinage conventionnel, là où une grande dureté fonctionnelle des pièces est demandée (50 à 65 HRC), consiste à faire les différentes phases successives suivantes :
- Usinage de la pièce à l'état non traité ;
- Traitement thermique jusqu'à l'obtention de la dureté désirée ;
- Finition par rectification pour que la pièce respecte les cotes notifiées sur le dessin de définition.

Cette longue séquence d'opérations est causée en partie par :

- La non disponibilité (jusqu'à récemment) d'un matériau à outil coupant les matériaux de hautes duretés, résistant à l'usure et tenace.
- La mauvaise appréciation du besoin en machines-outils plus puissantes, plus rigides et plus précises.
- La pratique traditionnelle qui consiste à faire l'ébauchage sur une machine et après faire la finition sur une autre machine plus précise.

Ce type d'usinage conventionnel implique donc des montages et des démontages des pièces qui sont inutiles avec le tournage dur. Avec le nouveau mode d'usinage, le brut peut être usiné directement après traitement thermique et beaucoup d'opérations peuvent être supprimées par substitution d'une opération à deux, donnant ainsi un gain considérable aussi bien en temps qu'en coût **[BEC 92],[GON 98]**.

I.2.2 Définition

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 certain cas d'ébauche.
Les matériaux durs sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- Une grande dureté à la pénétration ;
- Un pouvoir abrasif élevé ;
- Une faible ductilité ;
- Un grand rapport entre la dureté et le module d'élasticité (module de Young).

Le mot **Dur** signifie :

- Dur au sens de la dureté du matériau usiné, du point de vue résistance à la pénétration d'un indenteur ;
- Dur au sens de difficulté à usiner le matériau, conséquence de sa très mauvaise usinabilité (un matériau peut être difficile à usiner sans pour autant être dur);
- Dur au sens de la difficulté de l'opération d'usinage (alésage profond, travail aux chocs,…) **[POU 99]**.

A l'origine, ce terme ***"dur"*** ne concernait que la grande dureté du matériau usiné. Avec l'arrivée de nouveaux matériaux, des géométries de pièces plus complexes, ce vocable s'est généralisé à d'autres dimensions **[HUG 95]**.

I.2.3 Comparaison entre le tournage dur et la rectification

Poulachon **[POU 99]** a fait une comparaison entre le tournage dur et la rectification, suivant quatre critères: "productivité, qualité, investissement et environnement".

- ***Productivité***

- Le tournage dur autorise des taux d'enlèvement de matière trois à quatre fois supérieurs à ceux de la rectification conventionnelle.
- Il peut s'appliquer de la petite à la grande série (ex: roulementier, automobile);
- Les formes complexes sont réalisables par contournage et les réglages sont rapides;
- Il permet de s'adapter rapidement aux productions de plus en plus variables;
- L'automatisation est bien plus aisée;
- Le tournage dur est un procédé très souple, bien adapté aux petites séries répétitives et aux changements de fabrication fréquents, ce qu'exige le travail en flux tendu ou de type juste à temps;
- L'opération de polissage est facilitée sur une pièce tournée (écrêtage), et est ramenée à 25% du temps nécessaire après rectification;
- La possibilité de tourner des pièces de très grandes dimensions;
- Le travail aux chocs est possible en utilisant la nuance d'outil adaptée;
- Pour un volume de matière déterminée, le tournage dur consomme 5 fois moins de puissance que la rectification;
- Les plaquettes CBN normalement usées peuvent être réaffûtées sur la face de coupe.

- ***Qualité et précision***

- Le TD permet de réaliser de multiples opérations sans reprises sur la machine;
- Le TD permet d'obtenir des états de surface (jusqu'à des Ra de 0,15 µm) de même valeur que ceux obtenus en rectification (inférieur à 0,5 µm);
- Le TD permet d'obtenir des qualités IT5-IT6, mais la rectification s'impose pour de meilleures qualités;
- Les nouvelles machines disponibles sur le marché permettent d'atteindre des circularités de 1 µm des cylindricités de 2 µm sur 50 mm, des tolérances de forme de ± 2 µm, des tolérances en production de 4 µm;
- En rectification la pièce et la meule sont en rotation ce qui affecte la qualité de la cylindricité;
- Les stries en hélice, caractéristiques de la topographie des surfaces tournées ne sont pas toujours favorables dans le cas des pièces avec fonction d'étanchéité;
- L'alésage avec meule tige est très délicat (encrassement et flexion), l'alésage à la barre d'alésage -voir antivibratoire- est meilleur;
- Les efforts de coupe sont plus faibles qu'en rectification.

- ***Investissement***

- Le tournage dur diminue considérablement le montant d'investissements machine et outil (coût d'une rectifieuse: 2000KF, coût d'un tour CN: 850KF) cependant le coût outil/pièce, peut être deux à trois fois plus important (mais suite à son industrialisation croissant rapidement, le prix des plaquettes CBN est en forte baisse);
- La rectification nécessite des opérateurs plus spécialisés.

- ***Environnement***

Avec les nouvelles normes environnementales, les industries sont contraintes de traiter ou recycler leurs déchets sous peine de fortes amendes. Les entreprises qui génèrent des boues de rectification sont actuellement entre les mains des cimentiers. Effectivement les boues ne sont plus un déchet puisque c'est une matière première rentrant dans la fabrication du ciment, en conséquence, la qualité des boues doit être maîtrisée. L'analyse des taux d'hydrocarbures (huiles machine, liquide de coupe, lavage des boues) doit rester inférieur à 0,05% sinon celle-ci doivent être traitées différemment soit par pyrolyse, en décharge ou en incinération (surcoût à la tonne 1000F). Ces boues sont constituées de 50% de minuscules copeaux d'acier générés en cours d'opération de rectification qui se mélangent avec 46% de liquide de coupe, 3% de meule et 1% d'huile de graissage.
Malgré des résultats encourageants concernant le traitement des déchets d'autres pistes sont à envisager:
- En interne pour réduire les quantités de boues par pressage, en réduisant les surépaisseurs d'usinage en utilisant des procédés ne générant pas de boues (tournage dur);
- En externe par le développement d'autres filières telles que la mise en décharge contrôlée après neutralisation, l'incinération mais surtout le recyclage en aciérie ou en fonderie ;
- L'usinage pouvant s'effectuer à sec, le procède contribue à des économies de lubrifiant. Aujourd'hui l'utilisation des liquides d'arrosage et des huiles représente 16 % des coûts totaux de fabrication, tant en produits utilisés qu'en recyclables de destruction entretien des installations;
- Il n'existe pas de coût de gestion des boues des rectifications: 3000F/m³ ou 1000F/tonne;
- Il génère des copeaux recyclables, donc revendus;
- Les pièces rectifiées nécessitent un lavage.

I.2.4 Désavantages du tournage dur par rapport à la rectification

Dans certains cas, il ne sera pas possible, d'un point de vue technique ou économique, de remplacer la rectification cylindrique par le tournage dur. Il se peut, par exemple, que la courbure de la pièce soit si importante que les tolérances dimensionnelles ne puissent être atteintes. Ceci peut se produire dans le cas d'une pièce mince. En effet, dans le cas du tournage dur, la force de coupe (Fr > Fv), contrairement au tournage de pièces à l'état non durci. Le diamètre des pièces à tourner ne doit pas être trop réduit de sorte que les vitesses de coupe requises puissent continuer à être atteintes. Prenons par exemple une pièce d'un diamètre de 8 mm et

une vitesse requise de 200 m/min. Pour cela le nombre de tours doit être de 7961,7 tours par minute. Il va de soi que ce nombre de tours ne peut être fourni dans n'importe quelle condition. Pour certaines applications, la surface ne peut présenter un relief fileté. C'est notamment le cas des composants hydrauliques qui nécessitent des garnitures d'étanchéité. La surface des pièces tournées présentera toujours une structure filetée, contrairement à celle des pièces rectifiées. (Il n'est cependant pas exclu d'obtenir une pièce tournée qui puisse servir à réaliser une parfaite étanchéité aux gaz) **[WIN 03]**.

I.2.5 Les matériaux usinés en tournage dur

Les matériaux ferreux considérés ici comprennent les aciers rapides, les aciers d'outillages à chaud et à froid, les aciers alliés, les aciers de cémentation, les aciers de nitruration, les fontes blanches, les fontes alliées… **[POU 99]**.

- **Les aciers de construction pour TTh**

Pendant l'usinage d'aciers durs, même à de faibles vitesses de coupe, les outils en aciers rapides et en carbure cémenté sont peut efficaces à cause de leur faiblesse à supporter des contraintes élevées à des températures élevées. Par conséquent, l'usinage des alliages ferreux traités (45HRC à 70HRC) constitue le principal domaine d'application des outils céramiques et CBN. La prudence invite à dire qu'un des matériaux devient difficile à usiner lorsque sa dureté dépasse 30HRC ou 1020MPa.

- **Les aciers d'outillages à froid (X200Cr12, X160CrMoV12,…)**

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure et à la compression exceptionnelle. La dureté de ces aciers peut varier de 50 à 65HRC. Ils sont principalement utilisés pour tous travaux à froid tels que: poinçons d'estampage, outils de découpe, outils d'extrusion,…

- **les aciers d'outillages à chaud (X40CrMoV5-1, X38CrMoV 40NiCrMo16, 35CrNiMo4…)**

Ces aciers possèdent une excellente résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Leur résistance à haute température, leur ténacité et leur aptitude au polissage leur permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants: matriçage à chaud, moules à couler sous pression, filage à chaud, vis d'extrudeuse, lame de cisaille à chaud. La dureté après revenu peut varier de 30HRC à 55HRC.

- **les aciers à moules (XC48, 40CrMnMo8, 40NiCrMo16…)**

L'acier XC48, livré à l'état normalisé, permet après trempe d'obtenir une dureté de surface appréciable (50HRC). Le 40CrMnMo8 spécialement conçu pour l'élaboration des moules, pour matrice plastique est livré à l'état trempé et revenu a une résistance de 1000 à 1100 MPa. Il est caractérisé par la grande facilité d'usinage que lui donne la resulfuration. Ces aciers à moules sont utilisés pour la réalisation des carcasses de moules pour matières plastiques, semelles d'outillages, outils pour moulage sous pression, plaques porte empreintes,…

- **les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI52100)**

Ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils CBN sont employés avec succès **[WER 85], [KON 87]**. Lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à faible concentration de CBN est préférable par rapport à un outil à forte concentration de CBN ou à une céramique mixte (Al_2O_3+TiC).

- **Les aciers rapides (HS 6-5-2, HS 2-9-1-8)**

Cette famille d'acier comprend, en majorité, les matériaux utilisés pour la fabrication des lames de découpe et des poinçons. La représentation de cette catégorie de matériaux regroupe les aciers rapides, les aciers de travail à chaud et les aciers de travail à froid.

- **Les aciers de cémentation (16MnCr5, 10 CrNi6, C10, 18CrMo4…)**

L'usinage de finition et la coupe continue d'aciers de cémentation de dureté de 65HRC peuvent être effectués avec des CBN à haute vitesse de coupe. En général le liant céramique TiC est plus performant qu'un métal liant CBN, en raison de sa capacité à garder une plus grande dureté aux températures élevées. L'usinage en coupe interrompue peut également être pratiqué avec satisfaction à l'aide de Pc-BN. Les outils à base de céramique peuvent être utilisés à de plus faibles conditions de coupe, mais les risques de rupture augmentent beaucoup.

- **Les aciers de nitruration (30CrMo4, 30CrAlMo6-12, 40CrAlV6-10)**

Le but de la nitruration est de former une couche très dure sans trempe ultérieure. La nutriration peut être solide, gazeuse, liquide ionique, la dureté des couches peut varier 850HV à 1400HV. Suivant le procédé de nitruration et selon les matériaux traités. L'épaisseur des couches durcies n'excède pas 0,4mm. Pendant ce procédé, l'accroissement de dureté et produit par insertion des atomes de carbone et d'azote dans le réseau cristallin du matériau. L'usinage de ses couches fines est très dur.

- **Les fontes**

Les fontes grises, blanches en et nickel/chrome représentent un marché important de l'utilisation des CBN et des outils céramiques.

Les fontes grises (fontes moulées) sont utilisées en grandes quantités pour des applications générales, leur faible coût en étant la raison principale. Les fontes grises ont une plage de dureté typiquement comprise entre 180 et 320HB. Dons ce cas, les Pc-BN dépassent de loin les performances des outils en carbures et en céramique. Cependant d'autres auteurs ont affirmé que les céramiques à base de nitrure de silicium (Si_3N_4-TiC) présentaient une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage de la fonte grise. Les fontes blanches ou trempées sont beaucoup plus dures, plus fragiles et plus résistantes à l'usure que les fontes grises à cause de la présence de carbure de fer (cémentite), au lieu de graphite. Leur dureté varie typiquement de 45 à 65HRC. Des additions de nickel et de Chrome produisent un type de fonte blanche martensitique qui est habituellement connue sous le nom de Ni-Hard. Elle est caractérisée par une dureté de 50 à 65HRC et qui est largement employée comme pièces d'usure. Les fontes Ni-Hard chrome sont dures, fragiles et difficiles à usiner. La haute dureté de ces fontes limite l'utilisation des outils carbure à des conditions de coupe non économiques.

- **Les alliages réfractaires à base de nickel (Inconel 718) ou cobalt (stellite)**

Les alliages à base de nickel ou de cobalt sont très utilisés dans l'industrie aéronautique et sont plus difficiles à usiner que la plus part des aciers par ce qu'ils sont réfractaires. Ils maintiennent donc une grande partie de leur résistance pendant l'usinage mais s'écrouissent également. L'usure en entaille sur la face de dépouille et le principal problème. Les alliages à base de nickel et de cobalt sont habituellement usinés avec des outils en carbure avec des vitesses de coupe inférieures à 30 m/min.

I.2.6 Marché potentiel du tournage dur d'après General Electric

Parmi les 376 M$ cités à la figure I.9, le tournage dur représente 95 M$. On peut remarquer clairement que les outils en CBN ont les possibilités de se développer par rapport aux autres matériaux usinant utilisés dans la technique du tournage dur (Figure I.12, I.13, I.14) **[DAP 94]**.

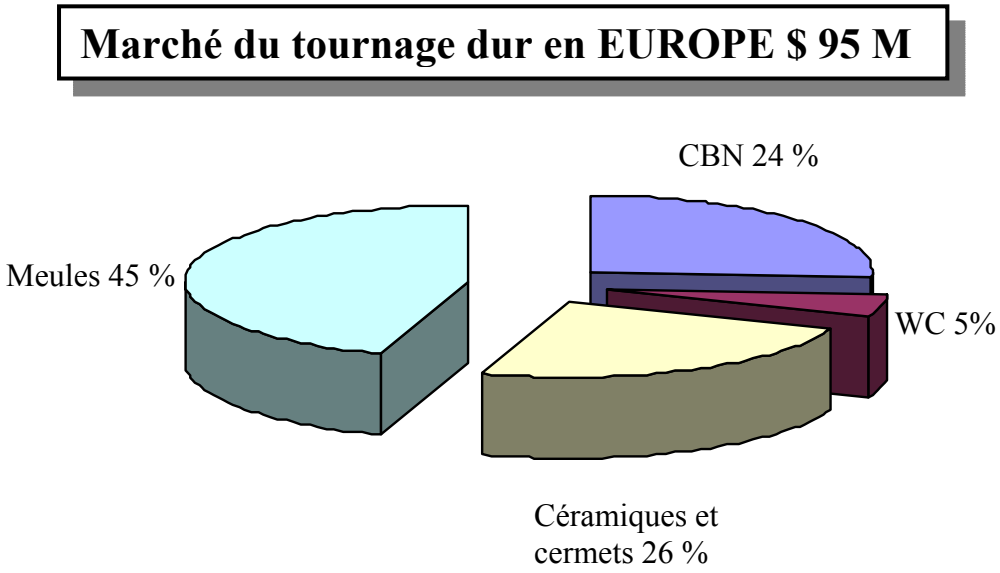


Figure I.12 : *Matériaux à outil utilisés en tournage dur en Europe.*

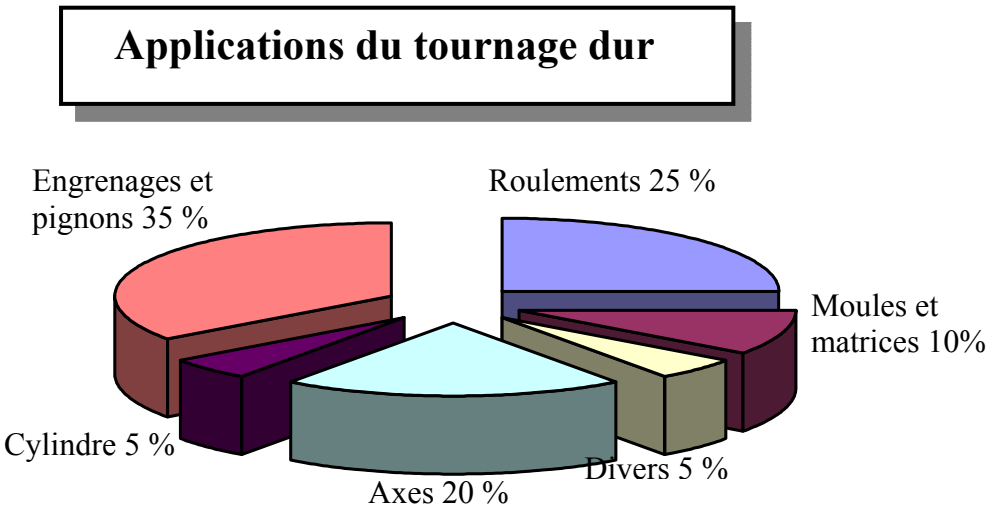


Figure I.13 : *Utilisation du CBN par famille de pièces.*

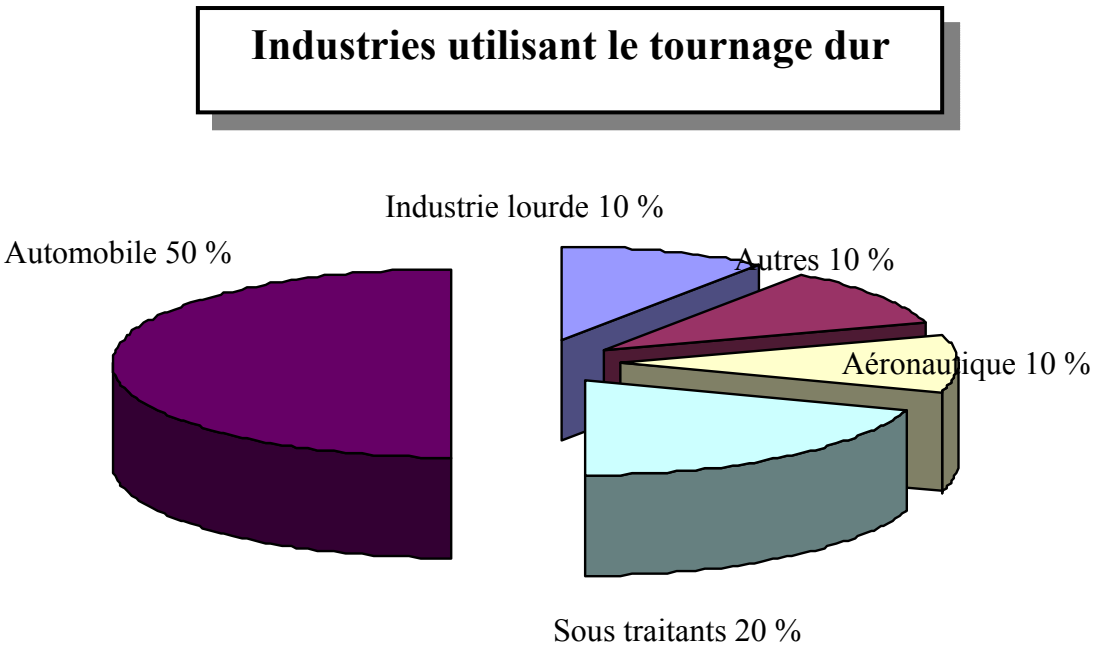


Figure I.14 : *Marché du CBN par type d'industries* **[MEY 94]**.

I. 2.7 Conclusion

Les grandes entreprises ayant compris les gains financiers qu'elles pouvaient en tirer de la technique du tournage dur sont de plus en plus nombreuses. On citera à titre d'exemple : Ford (Bordeaux), Mercedes (Gaggenau), Volkswagen (Kassel), Fiat (Turin), BMW (Munich), General motors, etc….
Les pièces usinées sont des baladeurs, des couronnes, des manchons d'accouplement, des pignons, des arbres, des cages de roulement. On notera aussi que, s'il est quelquefois possible d'usiner complètement par tournage dur les pièces traitées, il est vain de vouloir en faire un substitut à la rectification. En combinant les deux techniques d'usinage, il est possible de réduire considérablement les temps d'usinage et de réalisations des produits.

I.3 Usure des outils de coupe

I.3.1 Introduction

Dans la concurrence du marché, la production industrielle doit perfectionner ses méthodes d'usinage en travaillant soit avec une production maximale ou avec un coût minimal. Il arrive parfois que ce dernier passe au second plan et que seule la production maximale importe. On choisira alors une vitesse de coupe (Vc) supérieure. Plus celle-ci croît plus les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent. Par conséquent les frottements et les pressions élevées qui s'exercent à l'interface copeau / outil provoquent une usure intense de l'outil **[GEL 95]**.

La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure, qui a une influence directe sur :

- La qualité de la surface obtenue ;
- La durée de vie de l'outil ;
- La puissance nécessaire à la coupe.

C'est en fonction de ce degré d'usure que l'on conditionnera la tenue d'un outil. Il faudra donc maîtriser cette durée de vie ainsi que son évolution par rapport aux paramètres d'usinage **[BAR 92]**.

I.3.2 Phénomènes provoquant l'usure

D'une façon générale, l'usure de deux matériaux en contact est due à des phénomènes d'ordre mécanique et physico-chimique. Ces phénomènes dépendent essentiellement de la température de coupe et selon Konig et Aachen **[HER 86]** ces derniers se divisent comme le montre la figure I.15.

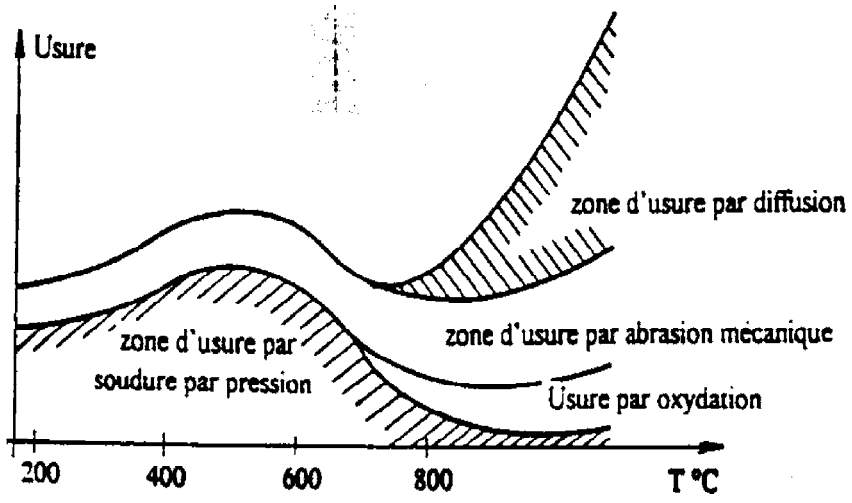


Figure I.15 : *Causes d'usure.*

- **Usure par abrasion mécanique**

L'usure par abrasion est essentiellement due aux frottements outil/pièce et copeau/outil. L'usure abrasive des outils résulte d'arrachement en surface de l'outil causé par des particules souvent anguleuses et de grande dureté contenues dans le matériau usiné (précipités en inclusions). Ces particules sont toujours renouvelées au cours de l'usinage. Les produits d'abrasion sont évacués en continu avec les copeaux. La vitesse d'usure abrasive croît avec la quantité de particules abrasives qui entrent en contact avec l'outil par unité de temps. Elle dépend donc de la composition chimique et du procédé d'élaboration du matériau usiné et croît avec la vitesse **[LER 84]**.

- **Usure par déformation plastique**

L'usure par déformation est due en fait à l'affaissement de l'arête de coupe sous l'action des efforts de coupe. Ceci est d'autant plus marqué lorsque la température à proximité du bec de l'outil augmente **[GEL 95]**.

- **Usure par adhésion**

Cette usure s'exprime à son tour par un arrachement mécanique de particules de l'outil, suite à la formation d'une micro-soudure entre le copeau et l'outil. Les micro-soudures sont favorisées par les pressions locales importantes entre les aspérités du copeau et celle de l'outil. Ces dernières entraînent des déformations importantes et une élévation de chaleur provoquant la soudure. L'usure par adhésion a tendance à diminuer lorsque la vitesse de coupe augmente. Ceci jusqu'à une certaine valeur critique de la vitesse au-delà de laquelle un autre mécanisme d'usure dit de diffusion prend naissance.

- **Usure par diffusion**

Ce type d'usure est dû essentiellement à la température. Il apparaît lors de l'usinage avec des vitesses de coupe trop élevées. Des éléments de l'outil sont transférés vers le copeau et la pièce et vis-versa. Cette usure dépend de la solubilité du matériau de l'outil dans le métal usiné et de la température d'interface atteinte en cours d'usinage.
Les réactions provoquées par la diffusion affaiblissent la résistance mécanique de l'outil en surface. L'usure par diffusion croît avec la vitesse de coupe **[LOL 81]**.

- **Usure par corrosion**

Ce type d'usure est dû à la corrosion provoquée par le contact des deux matériaux constituants la pièce et l'outil et particulièrement sous l'effet des lubrifiants. Koren et Lenz **[KOR 72]** ont expliqué l'évolution de l'usure des outils carbures par la superposition de l'usure par abrasion, due à l'enlèvement de matière sur l'outil par des constituants durs de la matière usinée. Alors que l'usure par diffusion est provoquée par un transfert de constituants de l'outil dans le copeau. La perte de certains constituants et les réactions provoquées par diffusion affaiblissent la résistance mécanique de l'outil en surface. L'usure frontale est exprimée par le modèle mathématique suivant:

$$VB = \underbrace{A\,[1 - e^{(\alpha t)}]}_{\text{Abrasion}} + \underbrace{B[e^{(\beta t)} - 1]}_{\text{Diffusion}} \qquad (I.1)$$

I.3.3 Les différentes formes d'usure des outils

Les formes d'usure des outils de coupe (figure I.16) dépendent essentiellement de la nature de l'outil, du matériau usiné, des conditions de coupe et du type d'usinage. Nous pouvons rencontrer les formes suivantes **[LE M 71]**, **[GEL 95]**, **[LER 84]**:

- **Usure en dépouille ou usure frontale**

Elle est due au frottement de la pièce sur la face en dépouille de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête, de largeur moyenne VB. Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce et la précision dimensionnelle **[AMR 87]**.

- **Usure en cratère**

Elle est caractérisée par une cuvette formée sur la face d'attaque de l'outil par frottement du copeau. Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante, La forme du cratère est définie par sa profondeur KT, le rapport de cratérisation KT/KM ou l'angle de cratérisation γ_c. KT ne provoque pas de détérioration de la surface usinée, mais affaiblit la résistance mécanique de l'outil. Cette usure peut jouer un rôle important quand à l'enroulement et la fragmentation du copeau **[TAY 93]**.

- **Déformation plastique**

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe. Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée.

- **Ebréchures (Ecaillages)**

Des arrachements peuvent se produire sur l'arête de l'outil, surtout dans le cas de chocs. Ces derniers sont dus à des discontinuités de la pièce ou par des vibrations.

- **Fissuration d'arête**

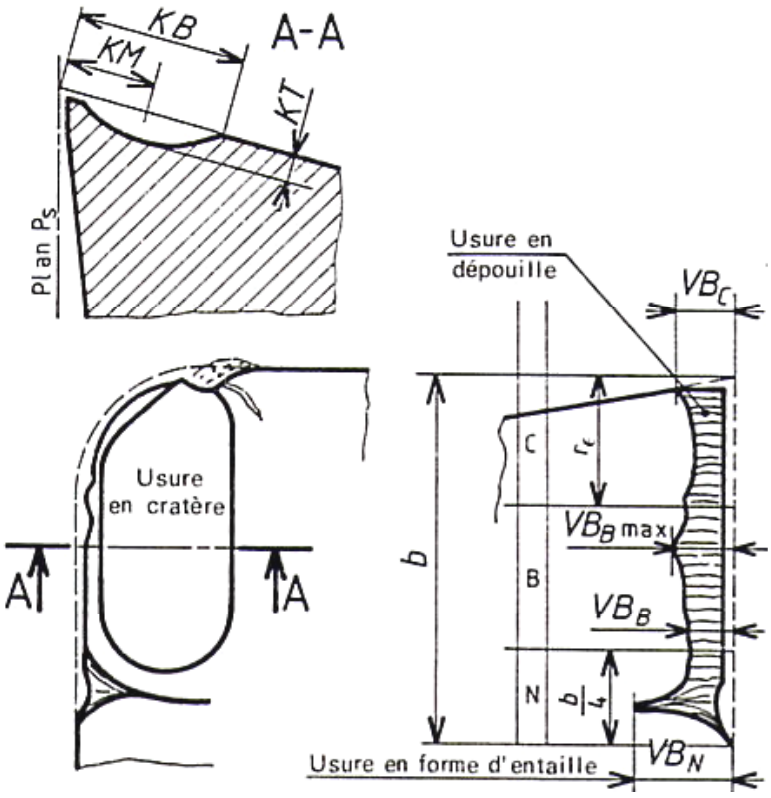
A des températures de coupe élevées et sous des conditions de coupe sévères, on observe l'apparition de fissures sur l'arête de coupe. Les chocs mécaniques et thermiques sont à l'origine de la création de ces fissurations.

- **Entaille**

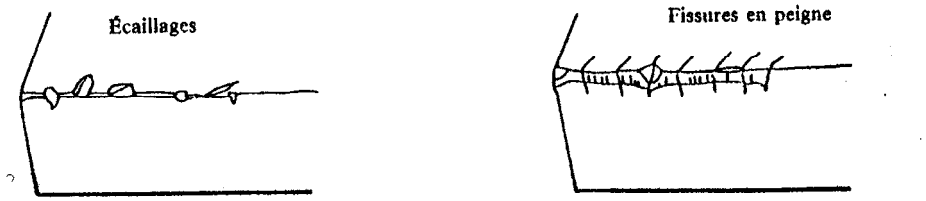
Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use et il y a un effondrement à cet endroit. L'entaille est caractérisée par la valeur (VN) sur la surface en dépouille. Elle est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dure **[WEI 71]**.

- **Usure par arête rapportée ou copeau adhérent**

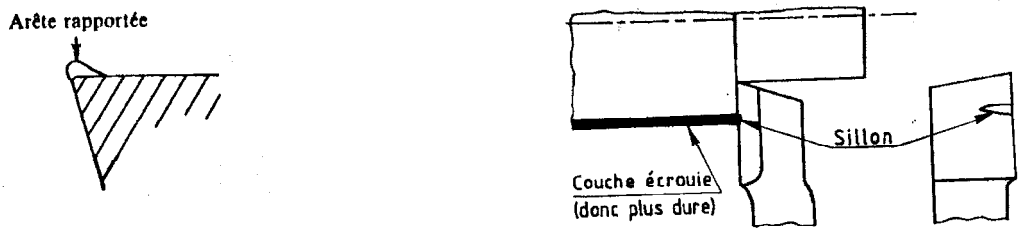
Ce type d'usure est dû à une température trop basse dans la zone de coupe, ce qui provoque un mauvais écoulement du copeau et celui-ci se soude à l'arête. Ce copeau adhérent entraîne un accroissement de la puissance nécessaire à la coupe et une détérioration rapide de l'état de surface de la pièce.



a) Usure en dépouille et en cratère.



b) Ecaillage et fissuration d'arête.



c) Usure par arête rapportée et en entaille.

Figure I.16 : *Formes d'usures sur les outils de coupe* **[DIE 85]**.

I.3.4 Relation entre l'usure et le temps

La durée de vie de l'outil de coupe est directement liée à son usure ou, à sa détérioration pour un temps donné. L'allure tracée sur la figure I.17, se divise en trois zones A, B et C. Elle représente la relation entre l'usure et le temps de coupe **[ROU 75]**.

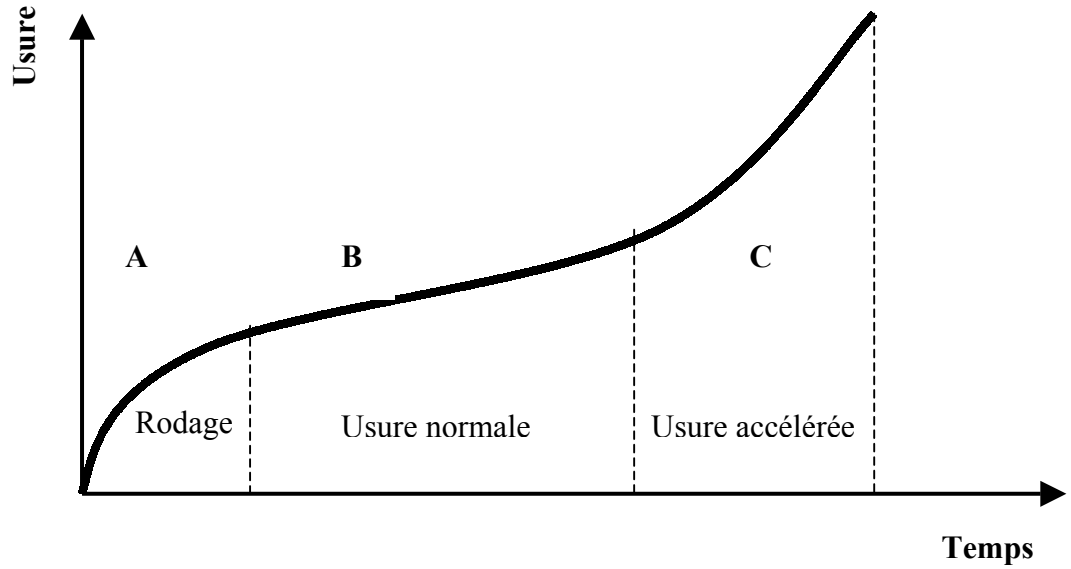


Figure I.17 : *Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe.*

- **Zone A** : Est celle du rodage ou usure initiale. Elle donne lieu à une usure intense qui se caractérise par l'arrachement d'une quantité importante de petites particules de la surface de l'outil, plus les surfaces de la partie active de l'outil sont nettes (lisses), plus l'évolution de l'usure est faible.
- **Zone B** : Correspond à l'usure normale. Elle est plus stable, c'est-à-dire linéaire. Elle est caractérisée par une pente très faible comparativement aux autres zones.
- **Zone C** : C'est la zone d'usure accélérée (catastrophique), là où les deux types d'usure (celle en dépouille et en cratère) se réunissent.

I.3.5 Critères d'usure

Les différents critères actuellement utilisés se rangent en deux catégories, NF E 66 505, **[AMR 87]**, **[CAL 98]**.

A) Critères directs : Basés sur l'évolution de l'usure, tels que :

- Critère d'usure frontale caractérisé par la largeur moyenne VB, de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil.
- Critère de cratérisation défini par la valeur limite de la profondeur du cratère KT, ou par la valeur limite du rapport de cratérisation KT/KM ou par la valeur limite de l'angle de cratérisation γc.

- Critère de « mort d'outil » utilisé principalement pour les outils en acier rapide.
- Critère d'usure volumétrique ou massique caractérisé par la perte en poids de l'outil, mesuré par pesée ou à l'aide de traceurs radioactifs.
- Critère basé sur les variations de cotes des surfaces usinées. Il est actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers.

B) Critères indirects

Ils sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil, ce sont par exemple :

- Les efforts de travail spécifique de coupe ;
- La rugosité de surface usinée ;
- La température de coupe à la pointe de l'outil.

Les critères de durée d'outil recommandés par les normes ISO sont :

Les critères préférables pour les carbures et céramiques pour toutes conditions de coupe, en usinage d'acier ou fonte sont soit :

- La largeur de la bande d'usure frontale [VB] = 0,3 mm si elle est uniforme.
- La largeur maximale de cette bande [VBmax]= 0,5 mm si elle est irrégulière.

Dans certains cas, on peut faire recours à des critères complémentaires telle que la profondeur KT du cratère pour les carbures métalliques qui se calcule d'après la formule (KT = 0,1 + 0,3f) mm où f est l'avance en mm/tr.

I.3.6 Lois d'usure des outils de coupe

I.3.6.1 Introduction

Les conditions de coupe ont une influence non négligeable sur les coûts de fabrication. Par conséquent il est nécessaire de connaître les lois régissant le processus de coupe. En effet, connaissant les lois d'usure il est possible de déterminer les conditions de coupe économiques, donc d'agir directement sur les coûts de fabrication inhérent à la coupe **[GEL 95]**.

La loi d'usure d'un outil de coupe représente la variation du temps effectif de coupe (t) en fonction des conditions géométriques (pour le copeau et l'outil) et cinématiques de l'usinage la durée effective de vie T est définie comme étant le temps d'usinage qui conduit à l'usure limite définie par les critères précédents **[ROU 75]**.
La figure (I.18) indique l'allure de la variation de la tenue en fonction de la vitesse de coupe.

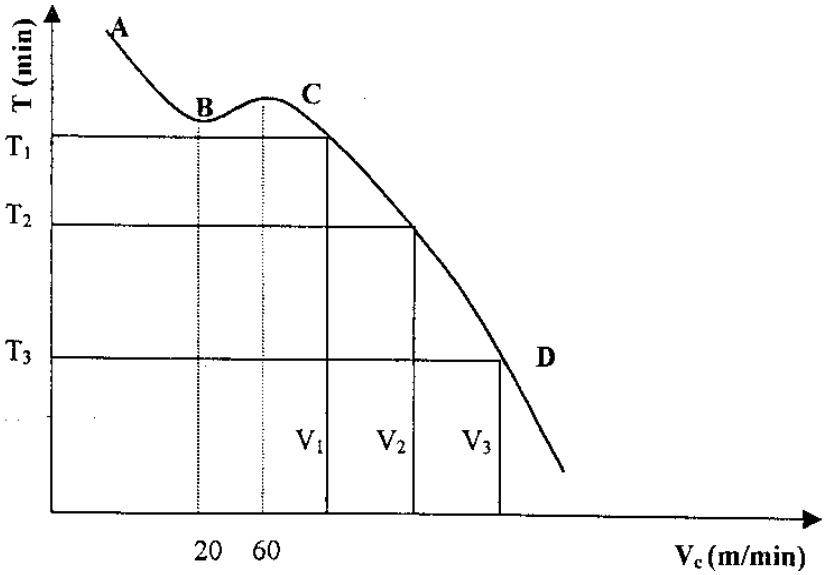


Figure I.18 *: La loi d'usure T = F(v).*

- La partie AB (Vc faible) correspond à une usure par abrasion ou par adhésion.
- Dans la partie BC apparaît la couche de glissement facile, l'abrasion et l'adhésion diminuent et on assiste à une amélioration de la résistance à l'usure.
- Au-delà du point C, cette amélioration relative est compensée par l'effet néfaste de l'accroissement de la température qui augmente l'usure par diffusion jusqu'à atteindre le régime de destruction de l'outil.

De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour représenter la loi d'usure des outils de coupe, **[ROU 75]**, **[AMR 87]**, parmi lesquels on donne :

I.3.6.2 Le modèle de Taylor : En (1906 – 1907)

A partir de 1905 l'américain Taylor développe les travaux de recherche sur la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie des outils **[ROU 73]**.

Les résultats de ces travaux sont encore à l'heure actuelle d'ailleurs approfondis et améliorés. Taylor a proposé le modèle suivant :

$$T = C_v.V^n \quad \text{ou } VT^{1/n} = C_T \qquad (I.2)$$

Où V : Vitesse dépendant des conditions de coupe ;
T : Durée de vie en minutes ;
C_v, C_T : Constantes dépendantes des conditions de coupe ;
n : Exposant de Taylor prenant pour valeur ;
0,12 à 0,18 pour les outils en acier rapide ;
0,2 à 0,3 pour les outils en carbure ;
> à 0,45 pour les outils céramiques.

Sur un diagramme à échelle logarithmique et dans la gamme des vitesses usuelles, la courbe représentative peut être assimilée à une droite comme sous l'appellation droite de Taylor.

I.3.6.3 Le modèle de Gilbert : en 1950

Ce modèle est la généralisation du modèle de Taylor, dans lequel la constante Cv est remplacée par une expression qui tient compte de la géométrie de copeau telle que : $Cv = C\ f^x\ a_p^{\ y}$

alors $T = C\ f^x\ a_p^{\ y}\ V^n$ (I.3)

En prenant le logarithme des deux parties de modèle (I.3) s'écrit:

$\log T = \log C + x\log f + y\log a_p + n\log V$ (I.4)

En faisant le changement de variable le modèle (I.4) prend la forme :

$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$ (I.5)

La résolution du modèle (I.5) est la suivante :

$y = b_1x_1 + b_0$ si V et a_p sont constantes
$y = b_2x_2 + b_0$ si V et f sont constantes
$y = b_3x_3 + b_0$ si f et a_p sont constantes

I.3.6.4 Modèle de Colding : En 1958 - 1960

Ce modèle peut être représenté sous la forme d'un polynôme simplifié du 1er degré en x, y, z.

$k + ax + cy - z = 0$ (I.6)

Où : $x = \log f$; $y = \log V$; $z = \log T$

Ce polynôme se résout comme le modèle de Gilbert par contre le polynôme du 2ème degré en x, y, z de la forme suivante :

$k + ax + bx^2 + cy + dy^2 - z + ez^2 + Fxy + gyz + hxz = 0$ (I.7)

Comporte un nombre important de coefficients dont la détermination ne peut se faire que par des méthodes numériques sur ordinateur, compte tenu du nombre important de coefficients.

I.3.6.5 Modèle de Kronenberg **:** En 1968

$T = C\ (V + k)^m$ ou encore $T + k = CV^n$ (I.8)

En prenant le logarithme des deux parties de (I.8), on aura :

$\log (T + k) = n \log(V) + \log (C)$

Posons : $x = \log (V)$; $y = \log (T + k)$ on obtient :

$y = nx + \log (C)$ (I.9)

Le calcul de n et C se fait comme dans le cas du modèle de Taylor.

I.3.6.6 Modèle de König – Dépiereux : En 1969

Le modèle proposé par König ne fait intervenir que la vitesse de coupe. L'avance et la profondeur de passe étant supposées constantes.

$T = \exp [-\alpha V^{\upsilon} + \beta]$ (I.10)

Avec : $\beta = -[\gamma S^{\mu} + \delta t^{\lambda}]$ = constante

Alors $\ln T = -\alpha V^{\upsilon} + \beta$

Posons : $X = V^{\upsilon}$; $Y = \log (T)$

On obtient : $Y = -\alpha X + \beta$ (équation d'une droite)

L'étude graphique ou analytique de cette droite permet de déterminer les coefficients α et β du modèle de König.
La représentation graphique des différents modèles mathématiques est donnée par la figure I.19.

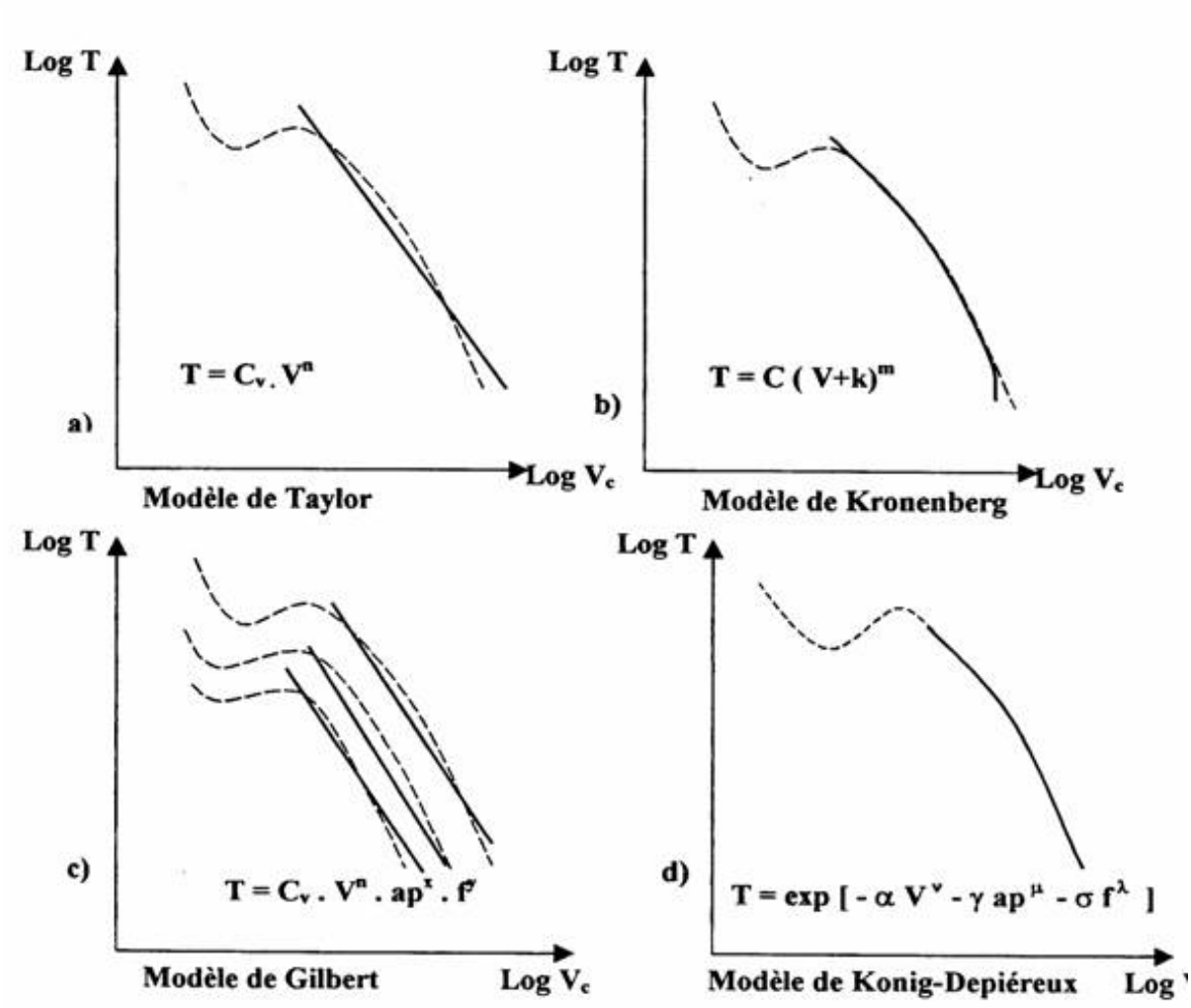


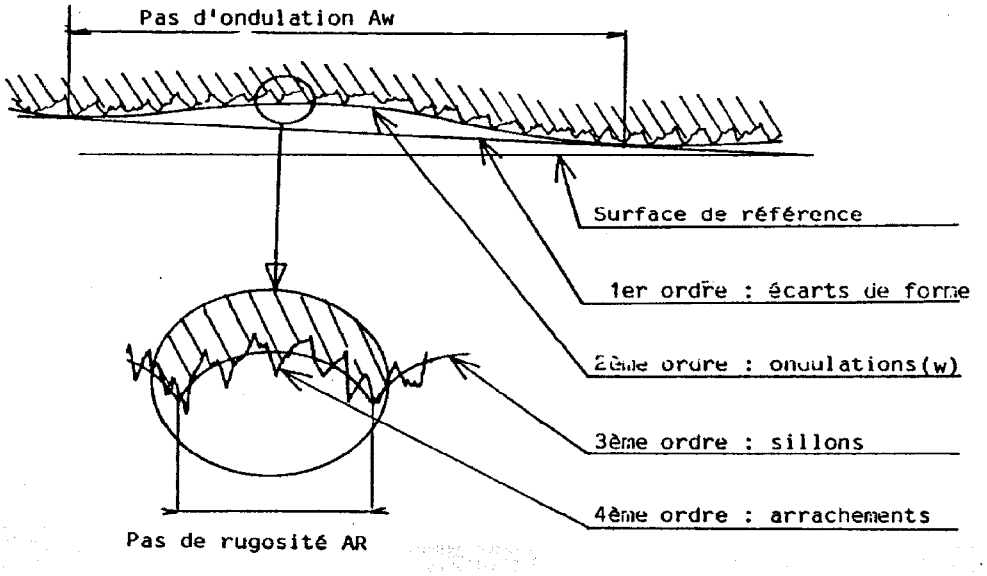
Figure I.19 *: Représentation graphique des différents modèles.*

I.4 Rugosité des surfaces usinées

I.4.1 Principaux défauts de surface

L'aptitude d'une pièce à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions notamment des caractéristiques de ses états de surface. En général les défauts de surface jouent un rôle important pour une pièce à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico-chimique. On ne s'intéresse ici qu'aux défauts géométriques, qui sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (figure I.20) **[BED 89]**.

- **Défauts du premier ordre** : Ce sont des défauts de forme (écart de rectitude, écarts de circularité), défaut apériodique.
- **Défauts du deuxième ordre** : Ils sont caractérisés par une ligne ondulée à un caractère périodique du essentiellement à des vibrations de basses fréquence de la pièce et de l'outil générateur.
- **Défauts du troisième et quatrième ordre** : Ils caractérisent la rugosité de la surface, les défauts du 3ème ordre sont constitués par des stries ou sillons, ce type de défaut à un caractère périodique ou pseudo périodique. Par contre les défauts du quatrième ordre sont constitués par des arrachements, fente, piqûre … etc. Ce type de défaut a un caractère apériodique.



Figures I.20 : *Principaux défauts de surface.*

I.4.2 Principaux critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (figure I.21) soit OX la ligne moyenne tel que :

$$\int_0^l y dx = 0 \qquad \text{(I.11)}$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne **[CET 79]**.

a) Rugosité totale Rt *:* Rt représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.

b) Rugosité Rz : Rz représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

c) Rugosité moyenne arithmétique Ra : Ra représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX.
Ra est calculée sur une longueur d'évaluation :

$$R_a = \frac{1}{L}\int_0^1 |y| dx \qquad \text{(I.12)}$$

d) Rugosité maximum R_{max} : C'est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité R_{max} étant pris sur une saillie et un creux consécutif.

e) Rugosité Rp : C'est la hauteur maximale de saillie de rugosité. Rp est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

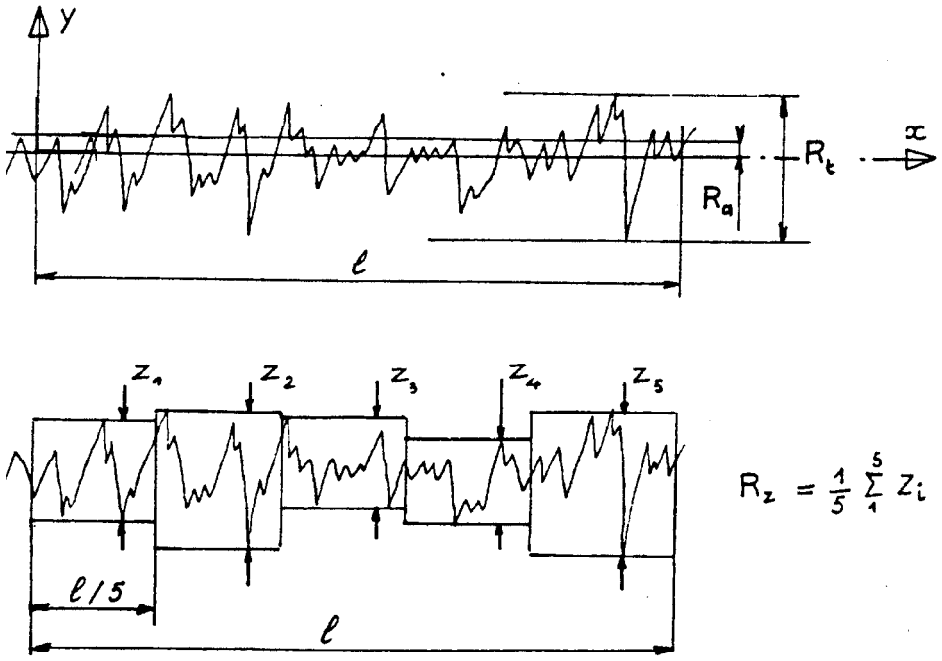


Figure I.21*: Principaux critères de rugosité.*

I.4.3 Influence des principaux paramètres de coupe

Le tableau I.2 représente l'influence des principaux paramètres de coupe sur la rugosité en tournage **[BAR 92]**.

Tableau I.2 : *Influence des paramètres de coupe sur la rugosité.*

Paramètres d'usinage	Variation de la rugosité
Dureté du matériau usiné ↑	↓
Avance f ↑	↑
Rayon du bec d'outil r_ε ↑	↓
Angle d'attaque de l'outil γ ↑	↓
Acuité d'arête ↑	↓
Profondeur de passe ↑	↑
Usure de l'outil ↑	↑
Lubrification ↑	↓
Vibrations ↑	↑
Angle de direction auxiliaire χ_{r1} ↑	↑

I.4.4 Evaluation de la rugosité

Théoriquement la connaissance de l'avance (*f*) ainsi que la géométrie de l'outil permet de calculer la profondeur maximale des sillons marqués sur la surface usinée. En tournage par exemple, la rugosité totale Rt de la surface obtenue peut être déterminée à partir d'un profil géométrique idéal donné par la figure I.22 **[BED 89], [ENA 72]**.

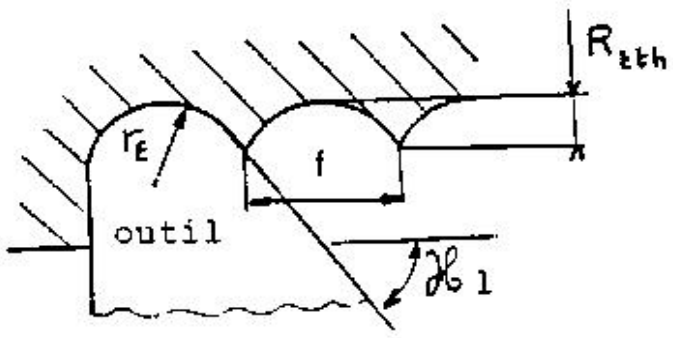


Figure I.22: *Sillons théoriques*

$$Rt_{(théorique)} = r_\varepsilon \left[1 - \sqrt{1 - \frac{f^2}{4r^2_\varepsilon}} \right] \quad (I.13)$$

Avec r_ε le rayon de pointe d'un outil rond. Dans le cas où l'avance serait suffisamment petite devant la valeur de r_ε. L'équation (I.13) pourrait être remplacée par l'approximation :

$$Rt_{(théorique)} \approx \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \quad (I.14)$$

Pour les faibles avances, le phénomène de copeau minimum prend place et il se traduit par un refus de coupe de l'outil ce qui donne lieu à un copeau de faible épaisseur. Dans ce cas, la rugosité totale réelle Rt est bien supérieure à $Rt_{(théorique)}$. Par contre, pour les avances élevées, les irrégularités découlant de la coupe deviennent faibles par rapport aux sillons théoriques ce qui donne une rugosité totale réelle Rt qui se rapproche de $Rt_{(théorique)}$. A partir de l'équation (I.14), une approximation largement utilisée pour évaluer la rugosité moyenne arithmétique (Ra) se présente sous la forme **[DAW 02]**:

$$Ra_{(théorique)} \approx \frac{f^2}{32r_\varepsilon} \quad (I.15)$$

En utilisant un certain nombre d'expériences, il est possible de mettre au point expérimentalement des relations mathématiques entre la rugosité obtenue par usinage et les paramètres usuels de coupe **[BED 89]**.
Ces relations sont généralement de la forme :

$$R_a = K_1 . r_\varepsilon^{k2} . HB^{k3} . ap^{k4} . f^{k5} . V_C^{k6} \quad (I.16)$$

Avec les k_i des coefficients déterminés pour les conditions expérimentales choisies. En général, $k_4 \approx 0$ et pour un matériau et un outil bien spécifié, il vient que :

$$Ra = C f^{k5} V_c^{k6} \quad (I.17)$$

où : C est une constante et $k_5 > 0$ et $k_6 < 0$

I. 5 Efforts de coupe

I.5.1 Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe F, peu utilisée en pratique, est la somme de trois composantes (figure I.23).

F_v : Composante dans le sens de la vitesse de coupe appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. Elle a la plus grande valeur absolue.

F_a : Composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage.

F_r : Composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial.

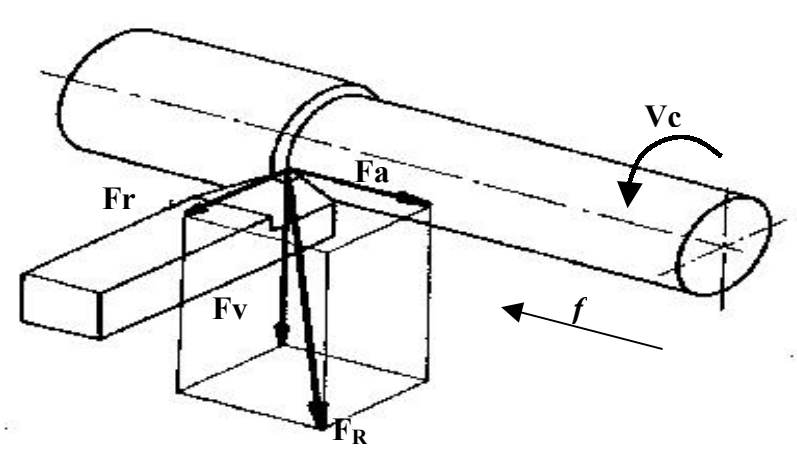


Figure I.23 : *Composantes de l'effort de coupe.*

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil. On a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage dans les conditions d'opposition des vibrations auto-excitées ou broutage et indirectement, dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur l'usinabilité du matériau coupé **[WEI 71]**.

I.5.2 La génération des efforts de coupe

La génération des efforts a lieu pendant l'opération d'usinage. Les efforts produits par la coupe sont le résultat de forces de cisaillement et de frottement exercés par l'outil sur la pièce. On peut différencier trois zones (figure I.24).

La zone 1 : est associée aux forces produites par l'interaction entre l'outil et le copeau. La force résultante F' dépend principalement de :
N : La force de déformation plastique ou de rupture instantanée, normale à la surface d'attaque.
F_f : La force de frottement entre le copeau et la surface d'attaque de l'outil, de sens contraire au mouvement du copeau et située dans le plan tangent à la surface d'attaque.

La zone 2 : est associée aux forces exercées entre l'outil et la pièce usinée. La force résultante F_d est pratiquement indépendante de la section de coupe. La magnitude de cette force est faible par rapport aux forces agissantes sur les autres zones. Cette force dépend de :
F_{fd} : La force de frottement sur la surface résultante de la pièce « face en dépouille normale » située dans le plan tangent à cette surface.
N_d : La force normale à la surface de dépouille normale.

La zone 3 : est associée aux forces exercées entre le copeau et la pièce. La force résultante F'' dépend de :
F_S : La force de cisaillement à appliquer pour réaliser la déformation du métal. Cette force est directement proportionnelle à la section de coupe Sc.
F_n : La force normale à la direction de la force de cisaillement.
F_i : La force d'inertie représente la force qui s'oppose, pour un copeau de masse m, au changement de la vitesse de coupe V_c et de la vitesse résultante du copeau V_e. Ces forces sont négligeables pour l'usinage avec des vitesses de coupes conventionnelles mais elles deviennent importantes lors de l'usinage à grande vitesse **[CAL 98]**.

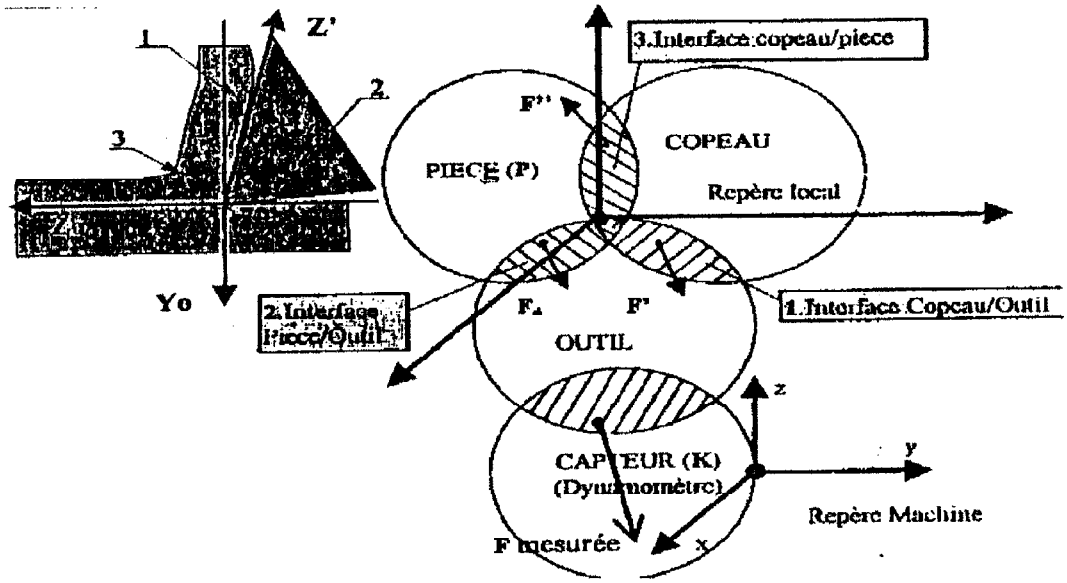


Figure I.24 : *Structure de la force de coupe.*

1.5.3 Effort spécifique de coupe

L'effort spécifique de coupe (pression de coupe) est la force de coupe par unité de surface de coupe (figure I.25). Ce coefficient varie en fonction de **[CAL 98]**:

- Matériau usiné ;
- L'épaisseur de coupe ;
- L'angle de coupe (diminution d'environ 1,5 % pour une augmentation de 1°) ;
- L'usure de l'outil (30 à 50 %, outil fortement usé).

$$Fv = Kc.\ S \qquad (I.17)$$

Fv : Effort tangentiel de coupe en Newton (N)
Kc : Effort spécifique de coupe en (N/mm²)
S : Section du copeau en (mm²)

$$S = a_p.f \qquad (I.18)$$

f : Avance en millimètre par tour (mm/tr)
a_p : profondeur de passe en (mm)

$$Fv = Kc.\ a_p.\ f \qquad (I.19)$$

L'effort de coupe spécifique est l'un des facteurs importants qui caractérise l'usinabilité du matériau usiné. La connaissance de celui-ci permet d'évaluer la valeur de la force de coupe nécessaire en fonction de la section du copeau choisi.

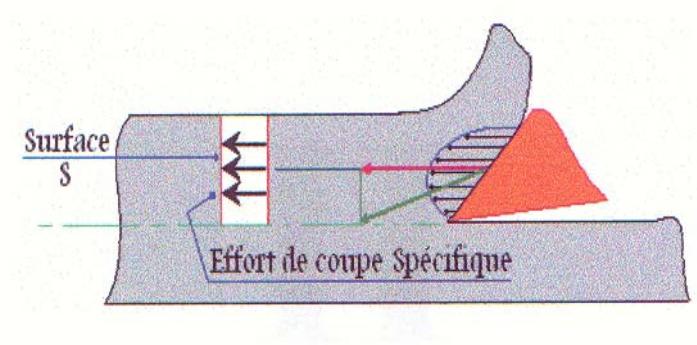


Figure I.25 : *Effort de coupe spécifique.*

I. 5.4 Mesure des efforts de coupe

De nombreuses techniques expérimentales ont été exploitées pour examiner la force de coupe **[USU 60], [KAT 72], [BAR 82], [CHI 89]**. La mesure des efforts de coupe est basée sur diverses méthodes exploitant des dynamomètres. Pour la plupart de ces dispositifs, la déformation élastique d'un élément de rigidité contrôlée du système dynamométrique est mesurée. Actuellement les dynamomètres piézo-électriques sont des outils indispensables dans la recherche expérimentale en usinage. On les utilise également comme appareils de surveillance des outils de coupe lors de l'usinage industriel **[MOU 67]**. La plupart des systèmes ont été réalisés pour la mesure simultanée de plusieurs composantes **[CAL 98]**.

Pour conclure sur ce point concernant les efforts de coupe, on peut dire d'une manière générale, que la tendance est de minimiser les efforts de coupe lors de l'usinage des pièces. Ceci conduit à :

- Un faible fléchissement de la pièce, ce qui augmente la précision géométrique.
- A une consommation moindre de la puissance développée par la machine outil.
- Des faibles déformations statiques et dynamiques du système usinant MODOP.
- Améliore l'état de surface des pièces usinées.

I.6 Formation du copeau

I.6.1 Intérêt du contrôle de la formation du copeau

Le respect des trois critères : coût, qualité et délai impose l'utilisation des moyens de production plus performants et plus flexibles. La formation du copeau en usinage dur (tournage dur) est un phénomène micro-géométrique influant sur plusieurs grandeurs macro-géométriques à surveiller, sa maîtrise contribue à :

- Fiabiliser le processus d'usinage ;
- Garantir la qualité géométrique des surfaces usinées (état de surface et précision dimensionnelle) ;
- Assurer la productivité ;
- Renfoncer la sécurité des opérateurs et la cellule d'usinage **[GEI 99]**.

I.6.2 Mécanisme de la formation du copeau

La phénoménologie de la formation du copeau fait intervenir un grand nombre de paramètres tels que la rhéologie du matériau usiné, la nature du contact outil – matière et les différents paramètres d'usinage. La compréhension des divers phénomènes qui entrent en jeu lors d'une opération de coupe nécessite une observation locale très fine. Des expérimentations ont permis de mettre en exergue quelques phénomènes. Parmi ces méthodes expérimentales on peut citer :

- La Méthode de visualisation et d'investigation métallographique des essais de coupe brusquement interrompue (quick stop) **[CAR 79]**;
- Le Procédé de microcinématographie **[PAN 98]** qui permet de visualiser la formation du copeau.

Les observations micrographiques mettent généralement en évidence la présence de 5 zones lors de la formation du copeau (figure I.26) **[PAN 98]**, **[DES 03]**.

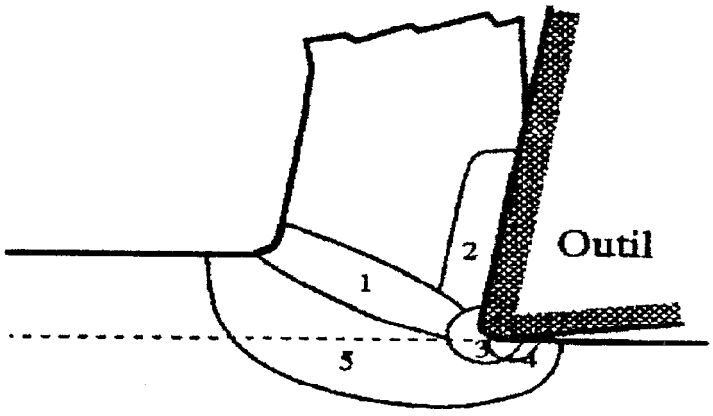


***Figure I.26** : Principales zones de cisaillement du copeau.*

- ***Zone 1*** : Zone de cisaillement primaire. Elle provient du changement de direction d'écoulement de la matière. Cette zone est le siège de cisaillement, ayant un taux de cisaillement intense engendrant une forte élévation de température due aux frottements internes.
- ***Zone 2*** : Zone de cisaillement secondaire induite par le frottement du copeau sur l'outil. Cette zone est à la fois soumise à de forts taux de cisaillement et à une forte élévation de température engendrée par le frottement.
- ***Zone 3*** : Zone de séparation du métal en pointe d'outil. Dans cette région, l'outil exerce un effort de compression sur le matériau qui est refoulé et se sépare en deux parties ; le copeau et la pièce usinée. La présence d'un chanfrein entre la face de coupe et la face de dépouille au niveau de cette zone de retenue favorise la création d'arêtes rapportées.
- ***Zone 4*** : Zone de frottement au niveau de la surface de dépouille. Dans cette zone, les interactions avec l'outil sont moins importantes qu'au niveau de la zone de cisaillement secondaire. Dans ce cas c'est la matière constituant la pièce usinée qui est directement sollicitées.
- ***Zone 5*** : Zone d'amorce de déformations, la formation du copeau provoque des déformations plastiques et élastiques de la structure du matériau en amont de l'outil conduisant à des contraintes résiduelles en surface de la pièce usinée.

Toutes ces zones sont soumises à de grandes déformations, des vitesses de déformation importantes et des phénomènes de dislocation. Des influences thermiques sont aussi à noter (sollicitations thermomécaniques). On assiste ainsi à des phénomènes particuliers : adhésion, soudage, diffusion, transformations chimiques, etc. L'interaction de l'ensemble de ces phénomènes conduit à la création d'une multitude de formes de copeaux et de sections **[DES 03], [VAN 98]**.

I.6.3 Types de copeaux rencontrés

Les mécanismes de coupe des aciers durs entraînent la formation de copeaux dentelés dits « dents de scie ». Quelques auteurs ont essayé de dresser une liste des différentes formes de copeaux obtenus. Komanduri et Brown **[KOM 81]** ont classifié les formes de copeaux de la façon suivante (figure 1.27):

- ***Copeau continu*** : La continuité du matériau y est préservée et les déformations plastiques dans la zone de cisaillement sont quasi stationnaires.
- ***Copeau segmenté*** : Il est composé d'éléments plus ou moins connectés entre eux résultant de variations périodiques de la couche superficielle, ce qui conduit à des zones alternées de déformations locales très peu cisaillées.
- ***Copeau dentelé*** : Dit « dents de scie » il est en majorité formé d'éléments séparés dus plutôt à une rupture du matériau qu'à un cisaillement de celui-ci.

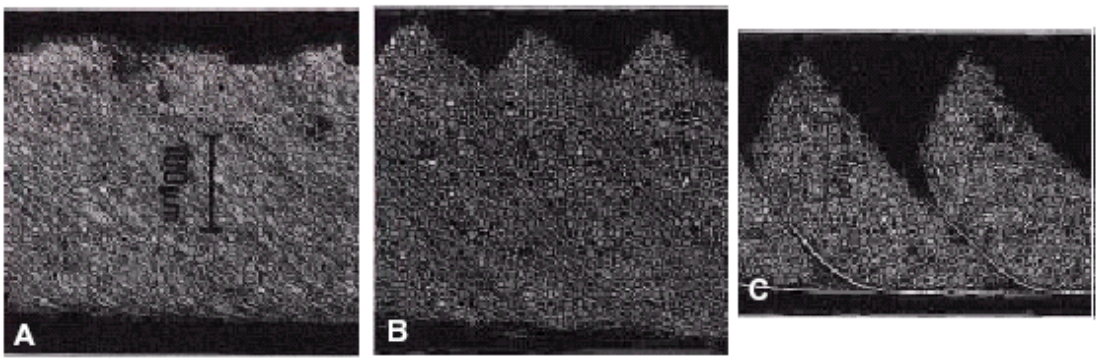


Figure I.27 : *Formes de copeau A : copeau continu ; B : copeau segmenté ; C : copeau dentelé* **[DEI 99]**.

Komanduri et al **[KOM 82]** proposent de justifier cette morphologie de copeau par une instabilité qui peut dépendre :

- Des conditions de coupe (Vc, f, a_p,….) ;
- Des caractéristiques métallurgiques et thermoplastiques du matériau ;
- D'un cisaillement variable dans la zone de cisaillement ;
- Des conditions de frottement variables sur la face de coupe ;
- Des interactions entre les zones primaires et secondaires ;
- De la réponse de la machine – outil et de ses interactions avec le procédé de coupe.

I. 6.4 Influence de la vitesse de coupe

Une augmentation de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier provoque une modification du copeau celui-ci tend à se fragmenter de plus en plus, voir devient poussière pour les vitesses très élevées. Le copeau ressemble à celui que l'on pourrait observer en usinant de la fonte. La figure I. 28 présentée ci dessous extraite du rapport de Leroy **[LER 92]** montre la modification morphologique du copeau en fonction de la vitesse de coupe.

En usinage dur, le copeau se fragmente de façon régulière. Ceci s'explique par un phénomène de cisaillement adiabatique périodique provocant la rupture du copeau. Ce cisaillement apparaît pour des vitesses d'autant plus faibles que le matériau usiné est dur, principalement à cause des propriétés thermiques de ces matériaux qui permettent une accumulation de la chaleur dans la zone de cisaillement et donc une diminution des propriétés mécaniques dans cette zone **[GEI 99]**.

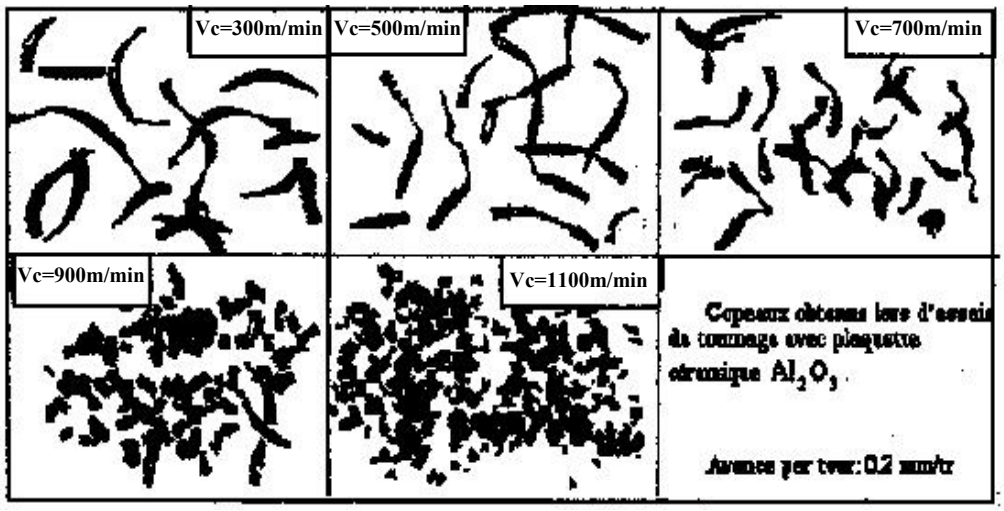


Figure I.28 : *Morphologie du copeau en fonction de la vitesse de coupe* **[LER 92]**.

I. 6.5 Influence de la Dureté du matériau usiné

Poulachon **[POU 99]** indique que les deux paramètres principaux influençant la morphologie du copeau sont la dureté apparentes du matériau usiné et la vitesse de coupe. Pour une vitesse fixée, dépendant de la dureté du matériau, le copeau est successivement (figure I 29):

- Continu avec des épaisseurs périodiques et non symétriques à l'état recuit ;
- Ondulant à la dureté 300 HV_{10} ;
- Parfaitement continu et sans aucune instabilité à la dureté de 410 HV_{10} ;
- Formé par localisation de déformation à 535 HV_{10} ;
- En dents de scie à partir de 760 HV_{10}.

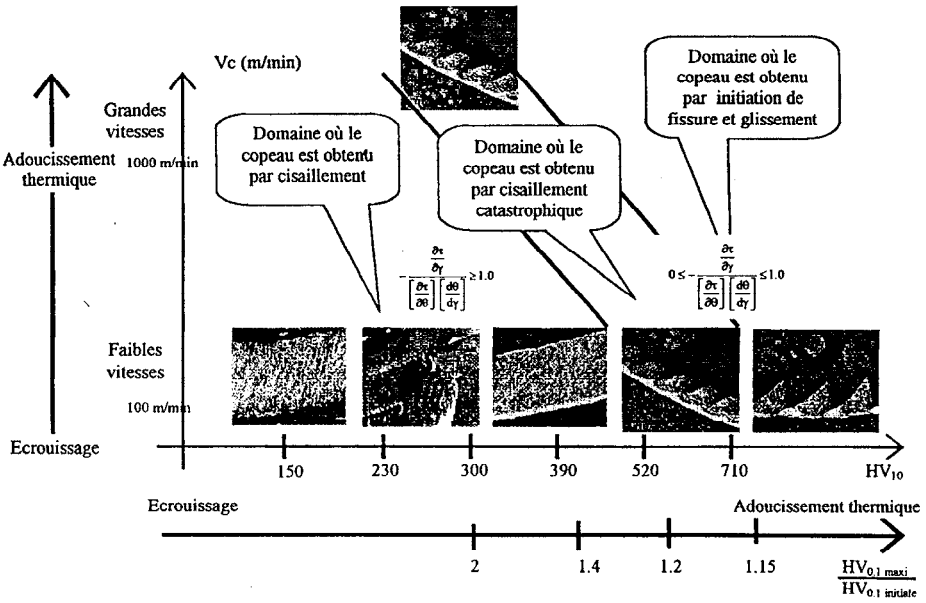


Figure I.29 : *Evolution de la morphologie d'un copeau (100Cr6) en fonction de la dureté de la pièce et de la vitesse de coupe* **[POU 99]**.

I.7 Evolution de la température dans le processus de coupe

I.7.1 Importance de la température de coupe

Au cours des dix dernières années, les études sur l'usinage ont montré l'importance de la température ou de la distribution de la température dans l'arête des outils de coupe pour expliquer les causes physiques de l'usure des outils et par suite apprécier l'usinabilité des matériaux **[AMR 87]**. L'importance de la température dans l'usure des outils avait déjà été reconnue par Edward Herbert **[WEI 71]** qui à énoncé le premier la loi qui porte son nom « L'usure de l'arête de l'outil n'est fonction que de la température de coupe ». Effectivement, tous les phénomènes physiques qui sont à la base de l'usure des outils de coupe (frottement, abrasion, corrosion chimique, usure par diffusion) sont étroitement sous la dépendance de la température. Il n'est donc pas surprenant que les relations entre l'usure de l'outil et la température de coupe qui ont été trouvées soient de forme exponentielle **[WEI 71]**.

$$VB = K\,\theta^{n} \quad \text{(loi de SCHALLBROCH et SCHAUMANN)} \tag{I.20}$$

Entre la température de coupe et la vitesse de coupe, on a trouvé d'autres relations, comme :

$$\theta = C\,V^{n} \quad \text{(GOTTWEIN)} \tag{I.21}$$

$$\theta = C\,V + \text{constante} \quad \text{(O.W. BOSTON)} \tag{I.22}$$

I.7.2 Origine de la chaleur

Dans le processus de coupe, la pièce, l'outil de coupe et le copeau s'échauffent c'est-à-dire dans la zone de coupe, la température augmente, cela est dû à la transformation de l'énergie mécanique, déformation élastique et plastique ainsi que le frottement du copeau sur les surfaces d'attaques et de dépouille de l'outil en énergie thermique.

$$Q = Q_{fr}\gamma + Q_{fr}\alpha + Q_{déf} \tag{I.23}$$

Si on considère un outil entrain de couper, on distingue 4 zones (figure I.30)

[CET 75] :

- **Zone 1** : zone de frottement copeau-outil (face d'attaque) : génération de chaleur.
- **Zone 2** : bec de l'outil (arête rapportée ou zone morte : stable ou instable)
- **Zone 3** : zone de frottement outil-pièce (face en dépouille) : génération de chaleur.
- **Zone 4** : zone de déformation et de cisaillement. Une élévation de température se produit dans la masse du copeau et peut être transféré a l'outil et à la pièce.

Les zones 1 et 2 sont les sièges de frottements intenses. Ces frottements provoquent une élévation considérable de température dans les zones de contact ; formation de plasma à l'interface des deux corps.

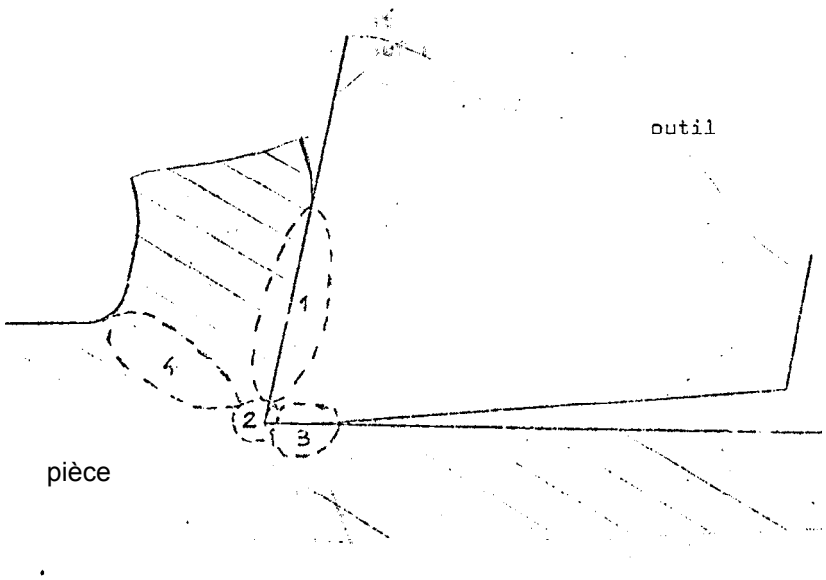


Figure I.30 : *Schéma des zones de dégagement de chaleur.*

I.7.3 Répartition de la chaleur entre outil, copeau et pièce

Le travail de frottement du copeau sur l'outil et de déformation plastique dans le copeau et dans la pièce provoque un dégagement de chaleur qui se partage entre l'outil, le copeau, la pièce usinée et l'air. La chaleur due au travail de déformation plastique dans le plan de cisaillement, s'écoule essentiellement dans le copeau. Une partie est abandonnée par rayonnement et une partie va dans la pièce usinée par conductibilité.
Le frottement copeau outil produit une quantité de chaleur qui se partage entre copeau et outil approximativement suivant une loi énoncée par CHARRON **[WEI 71]** pour deux corps frottant l'un sur l'autre :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt{K_1.\rho_1.C_1}}{\sqrt{K_2.\rho_2.C_2}} \qquad \text{(I.24)}$$

K : Conductibilité thermique ;
C : Chaleur spécifique ;
ρ : Densité ;
1, 2 : Indices relatifs aux corps 1 ou 2.
Dans la pièce, il y a apparition de chaleur due à l'écrouissage du métal usiné. L'importance de cet écrouissage est fonction de la vitesse de coupe et de l'avance. Aux grandes vitesses de coupe. La couche écrouie diminue d'épaisseur, alors qu'aux faibles vitesses de coupe, celle-ci peut avoir une épaisseur égale à l'avance dans un acier extra-doux par exemple. La chaleur ainsi produite se répand dans la pièce par conductibilité. L'analyse calorimétrique de la coupe, qui a été pratiquée par divers auteurs a permis de donner la répartition de la chaleur entre outil, copeau, pièce usinée et air (figure I.31).

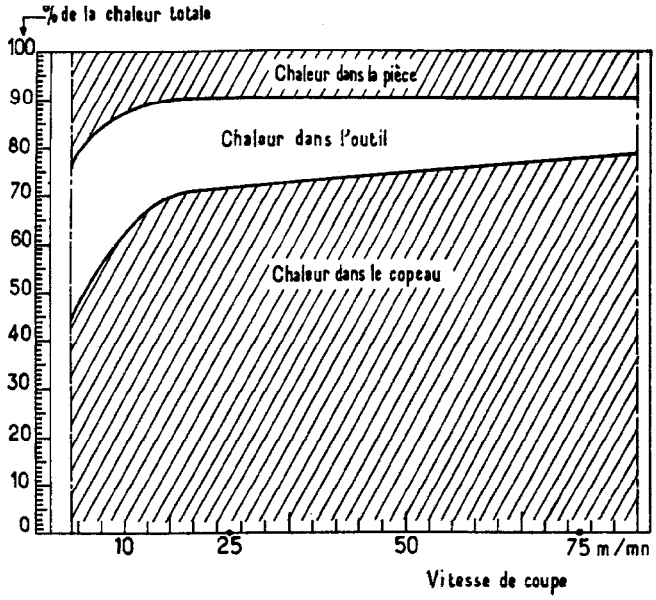


Figure I.31 : *Répartition de la chaleur entre outil, copeau et pièce.*

Plusieurs auteurs ont développé des méthodes numériques pour déterminer la distribution de la température dans la pièce, le copeau et l'outil **[RAP 54], [TAY 74], [LIN 93], [CHO 88], [OBI 96], [CHA 91].** En effet, toutes ces méthodes montrent que le gradient de température est beaucoup plus élevé dans le copeau que dans la pièce et l'outil **[AMR 87]**.

I.7.4 Mesure de la température de coupe

Plusieurs méthodes sont envisageables pour la mesure des températures dans un processus de coupe selon la nature des informations souhaitées. Parmi celle–ci, on peut citer les principales méthodes suivantes **[PAN 98]**:

a) Mesure par thermocouples implantés dans la plaquette de coupe. Pour ce type de mesure thermique la cartographie des températures est effectuée à partir de relevés ponctuels obtenus par des thermocouples implantés dans la plaquette de l'outil de coupe **[BOU 93]**. Cette réalisation présente des inconvénients majeurs liés à la mise en place de ces thermocouples (fragilisation de la plaquette, coût et fragilité élevés des thermocouples …).

b) Mesure directe de la température par thermocouples directs du couple outil- pièce. Dans le cas particulier où on ne désire qu'une valeur moyenne de la température, Sephenson **[SEP 92], [SEP 93]** propose d'utiliser la jonction chaude au contact outil-pièce comme thermocouples.

c) Mesure des températures par un pyromètre infrarouge solidaire de l'outil de coupe, focalisé sur l'arête de coupe **[BIT 93]**. Ce procédé de mesure a été retenu pour notre étude.

d) Mesure par caméra thermique CCD **[CAL 95]**. L'avantage principal de ce type de mesure est lié à l'obtention directe de la cartographie des températures.

e) Mesure par analyse métallurgique de la plaquette de coupe après usinage Wright et al. **[WRI 73]** montrent qu'il est possible de déterminer la cartographie des températures dans l'outil de coupe en fonction des transformations de phase relevées au cours d'une analyse métallographique d'un outil en acier rapide.

Les quatre premiers points correspondent à des méthodes de mesure de la température en temps réel. La dernière est une méthode de mesure à posteriori.

I. 8 Conclusion

Dans cette étude bibliographique (chapitre I), nous avons résumé les différents phénomènes régissant le processus de coupe. L'évolution des matériaux de coupe, présentée dans le point 1.1, montre que la recherche continue vers le matériau idéal à la fois le plus dur et le plus tenace. C'est l'un des défis de notre siècle, les chercheurs en matériau sont condamnés à trouver un compromis entre dureté et ténacité, ce qui toute fois, apparaît comme un vaste domaine de recherche. Nous avons présenté dans le point I.2 le tournage dur en tant que technique nouvelle d'usinage, son intérêt économique, ses limites actuelles pour un développement à l'échelle industrielle. La bibliographie rencontrée dans ce domaine remonte à cette dernière décennie, les informations trouvées étaient d'une aide capital dans la connaissance de cette technique. L'usure des matériaux de coupe et l'un des points principaux investigué dans cette étude, en effet, dans le cas de l'usinage des matériaux durs, l'usure des outils arrive au premier plan car elle influe fortement sur l'obtention des états de surfaces correctes et de la précision recherchée. Nous avons souligné ensuite le rôle des effets thermiques dans la zone de coupe, sur le processus de dégradation des outils de coupe et par suite la nécessité d'évaluer le champ thermique régnant dans celle-ci.
Le prochain chapitre présente l'ensemble des équipements utilisés pour la réalisation des expériences ainsi que la démarche poursuivie pour la planification des essais.

I. 9 Position du problème

En se basant sur l'étude bibliographique, il ressort que les céramiques de coupe et les CBN sont des matériaux à outil en pleine évolution, ils permettent des performances irréalisables avec les autres matériaux à outils du point de vue :

- Productivité, parce qu'ils sont utilisés dans l'usinage à grande vitesse, par conséquent, une réduction considérable des temps d'usinages.
- Ils offrent la possibilité d'usiner des matériaux difficilement usinables.
- Ils permettent d'obtenir des qualités de surface, avec toute satisfaction, lors des opérations de finition.

Par conséquent l'objectif de notre étude est d'essayer de contribuer à caractériser le comportement à l'usure des outils de coupe modernes en usinage dur. De définir l'impact des conditions de coupe et de l'usure sur la rugosité des surfaces et aussi sur les efforts de coupe générés lors de l'usinage. A cet effet nous avons choisi dans nos essais deux matériaux à usiner, l'acier faiblement allié 100Cr6 et l'acier fortement allié X200Cr12, qui sont très agressifs vis-à-vis des matériaux d'outils. Des modèles mathématiques, exprimant les relations entre les paramètres de coupe et l'usure, la rugosité, les efforts de coupe seront proposés dans un nouveau contexte d'usinage (tournage dur) et avec des matériaux d'outils nouveaux.

I-3-9 L'usure des outils de coupe en tournage dur

Dans le cas de l'usinage des matériaux durs, l'usure des outils de coupe arrive au premier plan car il influe fortement sur l'obtention d'un état de surface correct et de la forme désirée dans la précision recherchée, comme en usinage traditionnel la durée de vie des outils de coupe diminue avec une augmentation de la vitesse de coupe, néanmoins et c'est ce qui importe surtout en ébauche, le débit de copeau augmente.

Une explication relative à l'évolution de l'usure est la suivante : pour des vitesses de coupe relativement faibles, le copeau se soude sur la face de coupe car le temps de contact est relativement long, l'usure en cratère est faible. L'augmentation de la vitesse de coupe provoque une force inertielle plus importante et un temps de contact plus court, le soudage n'a plus lieu et l'usure en cratère augmente. Une augmentation supplémentaire de la vitesse de coupe engendre une diminution des propriétés mécaniques de l'outil par effet thermique. Le matériau outil s'allie avec le copeau pour provoquer une usure rapide et des durées de vie très faibles. Les très grandes vitesses de coupe produisent un effondrement de l'arête dû à une usure en cratère très importante.

Il résulte de l'étude que la zone privilégiée pour l'usinage est la zone de transition entre les deux domaines (soudure ou non), l'équilibre optimal entre la durée de vie et l'usure est en effet obtenu dans cette zone. [18]

CHAPITRE II

EQUIPEMENTS UTILISES ET PROGRAMME D'EXPERIENCE

II.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des outils mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le souci de caractériser le comportement des matériaux de coupe modernes étudiés, face aux deux matériaux à usiner. Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés qui servent au suivi de l'évolution de l'usure, des efforts de coupe générés, de la rugosité des surfaces obtenue et de la température dégagée lors de l'usinage. Nous présentons également la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences nécessaires à notre étude ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS), département de Mécanique (Université de Guelma).

II.2 Equipements utilisés

II.2.1. Machine outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour à charioter et à fileter de la société tchèque « TOS TRENCIN » modèle SN40 de puissance sur la broche égale à 6,6 kW (figure II.1). Les nombres de tours disponibles sur la machine sont : 22,5 ; 31,5 ; 45 ; 63 ; 90 ; 125 ; 180 ; 250 ; 355 ; 500 ; 710 ; 1000 ; 1400 ; 2000 (tr/min). Les avances sont : 0,08 ; 0,11 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,2 ; 0,24 ; 0,28…….6,4 (mm/tr).



Figure II.1 : *Tour à charioter et à fileter modèle SN40.*

II.2.2. Matière à usiner

Les matériaux sur lesquels ont été testées nos plaquettes présentent des caractéristiques voisines des matériaux que l'on usine le plus souvent dans l'industrie. Les deux nuances d'acier choisies sont :
- L'acier à roulement 100Cr6, connu aussi par la dénomination AISI 52100.
- L'acier pour travail à froid X200Cr12, connu aussi par la dénomination AISI D3.

Le 100Cr6 est un acier très résistant à l'usure. Il est l'un des aciers les plus produits dans l'utilisation et la fabrication de billes, rouleaux, bagues, cages de roulement. On l'emploi également pour l'usinage à froid comme matrice de formage, cylindres de laminoirs, calibres et comme revêtement d'usure **[BEC 92]**.
Le X200Cr12 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). Il est utilisé surtout pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filières d'étirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois, peigne à rouler les filets, etc.. **[NOT 81]**. Pour les essais d'usure nous avons usiné des éprouvettes de diamètre D = 80 mm et de longueur L = 400 mm (figure II.2, II.3). Par contre pour les essais de rugosité et des efforts de coupe, la longueur des éprouvettes a été réduite de moitié.

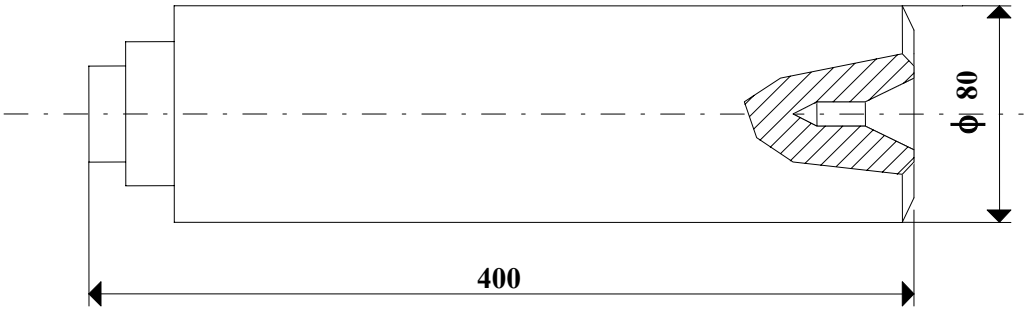


Figure II.2 : *Géométrie des éprouvettes pour les essais d'usure.*



a) **b)**

Figure II.3 : *Photos des éprouvettes a) Essais d'usure*
b) Essais de rugosité et d'effort de coupe.

Les compositions chimiques des deux nuances d'acier utilisées sont données dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : *Composition chimique des aciers utilisés.*

Eléments chimiques	**C (%)**	**Mn (%)**	**Si (%)**	**P (%)**	**S (%)**	**Cr (%)**	**Ni (%)**
100Cr6	1,05	0,38	0,21	0,03	0,028	1,41	0,21
X200Cr12	2	0,29	0,31	0,011	0,009	12	0,259

II.2.3. Outils de coupe utilisés

a) Porte plaquette

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux portes-outils sur lesquels sont fixées les plaquettes mécaniquement par bride et par trou central (figure II.4). La géométrie des deux portes-outils est donnée sur le tableau II.2 La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protége le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

Tableau II.2 : *Caractéristiques géométriques des portes-outils.*

Port outil	**Section mm^2**	**χ_r°**	**α°**	**γ°**	**λ°**
PSBNR2525K12	25x25	75	6	-6	-6
CSBNR2525 M12	25x25	75	6	-6	-6



Figure II.4 : *Portes-outils utilisés.*

b) Plaquettes

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée (figure II.5) à fixation par bride et trou central. Toutes les informations relatives à ces plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau II.3 **[POU 99], [SAN 02].**

Tableau II.3 : *Informations relatives aux plaquettes utilisées.*

Matériau de coupe	Désignation Firme	Désignation ISO	Firme	Composition
C B N	7020	SNGA 12.04.08	Sandvik coramant	57%CBN+35%TiCN 8% autre
Céramique mixte	CC650	SNGN 12.04.08		70%AL_2O_3 +30%TiC
Carbure revêtu	GC 3015 (K10)	SNNG 12.04.08		WC avec un triple revêtement TIN+AL_2O_3+Ti(CN)

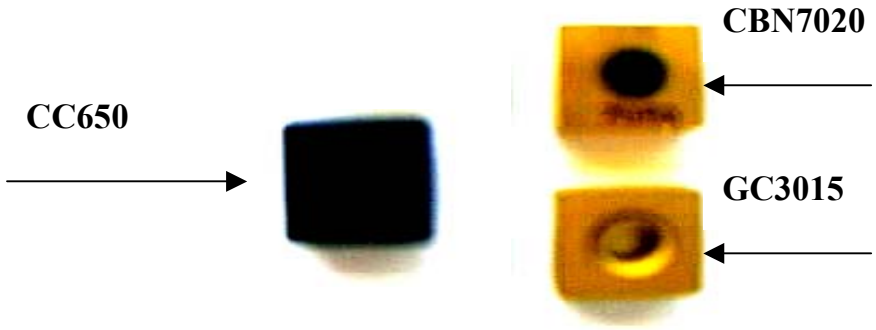


Figure II.5 : *Plaquettes de coupe utilisées.*

Le CBN7020 : est une nuance de Nitrure de bore cubique (CBN) additionnée de carbonitrure de titane. Pour une plus haute sécurité, le CBN est fritté (non brasé) (insert CBN en coin) (figure II.6) sur chaque pointe du support carbure, d'où le nom de plaquettes multipointes. Cette technique réduit le risque de débrasage de l'insert causé par l'affaiblissement de cette liaison à hautes températures. Dans le cas des inserts brasés, lorsque la température de la plaquette atteint 640° C, la brasure fond et l'insert se déchausse du substrat WC. La plaquette a également un revêtement PVD TiN de 2 µm d'épaisseur pour faciliter la détection de l'usure. La résistance à l'usure et la stabilité chimique sont considérables, pour l'usinage de finition des aciers et les fontes trempées. Les plaquettes CBN sont fabriquées avec chanfrein de protection de 20° sur une largeur de 0,1mm ainsi qu'un rayon de raccordement r_β d'environ 0,03mm.

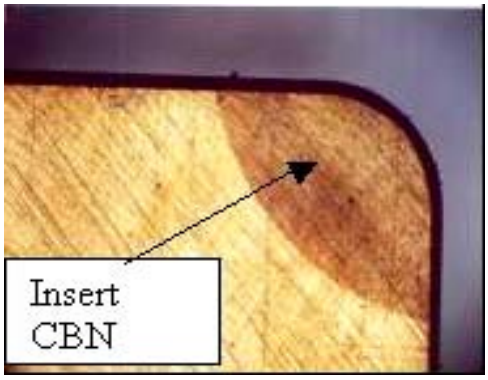


Figure II.6 : *Plaquette CBN7020 revêtue d'une couche de TiN.*

Céramique CC650 : C'est une nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnée de carbure de titane. Elle est recommandée principalement pour l'usinage de finition des aciers trempés, des fontes trempés et les superalliages réfractaires, requérant une bonne résistance à l'usure associée à de bonnes propriétés thermiques.

Carbure GC3015 (K10) : C'est une nuance à revêtement épais CVD (TiCN - AL_2O_3 - TiN) de 14µm (figure II.7). La combinaison de ce revêtement est extrêmement résistante à l'usure. Elle est recommandée pour l'usinage des aciers trempés et des fontes. Le substrat est dur capable de supporter des températures de coupe élevées sans se déformer. La GC3015 est la nuance idéale en général pour l'ébauche et la finition avec des vitesses de coupe modérées à élevées.

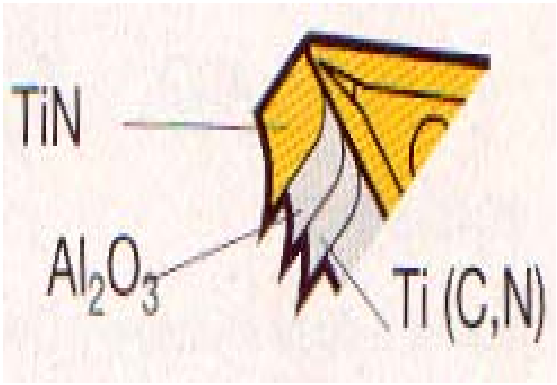


Figure II.7 : *Carbure GC3015 à triple revêtement.*

II.2.4. Microscope pour la mesure de l'usure

La mesure de l'usure a été faite par un microscope optique HUND type W-AD équipé d'une caméra CCD (figure II.8). Ce dernier sert à mesurer les grandeurs de l'usure sur la surface en dépouille principale et la surface en dépouille auxiliaire, ainsi que la majorité des paramètres du cratère et cela suivant la norme NF E 66-505. La

plaquette de coupe est placée sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0,001 µm. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Sur le cadran digital on fait une lecture directe qui donnera la valeur de l'usure VB. Après chaque séquence de travail la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure. Les essais d'usure réalisés sont de longue durée [Norme ISO 36 85] et cela pour évaluer la durée de vie des plaquettes utilisées à différentes vitesses de coupe. Ils sont effectués jusqu'à une valeur d'usure VB dépassant légèrement l'usure admissible [VB] =0,3 mm.



Figure II.8 : *Microscope pour la mesure de l'usure.*

II.2.5 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (Ra, Rt, Rz) nous avons utilisé un rugosimétre (2D) Surftest 301 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante de profil de rugosité (Figure II.9). Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de 5µm se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpage est de 4mm avec une longueur de base de 0,8mm (0,8X5). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0,05 à 40µm) pour Ra et de (0,3 à 160µm) pour Rt et Rz. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la même machine et sans démontage de la pièce (figure II.9 et II.10).



Figure II.9 : *Rugosimètre Surftest 301.*

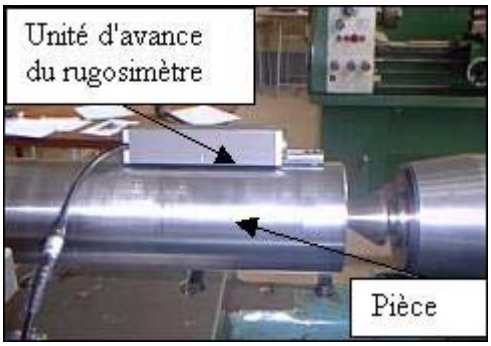


Figure II.10 : *Mesure de la rugosité Sans démontage de la pièce.*

II.1.6 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe (Fv, Fa et Fr) nous avons utilisé un dynamomètre qui se compose d'un outil équipé de capteurs piézoélectriques, d'un transmetteur qui permet l'enregistrement sélectif des trois composantes de l'effort de coupe et d'un amplificateur de mesure à 4 canaux. L'acquisition des données sur PC se fait par une interface analogique numérique Black Star I/O 2308 via un câble RS232 (figure II.11).



Figure II.11 : *Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.*

Composant du système :

Le système de mesure des efforts de coupe se compose de :

- Amplificateur de mesure à 4 canaux, l'unité contient 3 amplificateurs autonomes et précis à tension continue avec facteur d'amplificateur réglable et un quatrième amplificateur sert à amplifier la tension de sortie délivrée par le thermocouple de l'outil pour mesurer la température de coupe.
- Transmetteur d'effort de coupe : enregistrement sélectif des trois composantes d'une force (Force de coupe, axiale et force radiale).
- Transmetteur de mesure de la température de la plaquette.
- Transmetteur de force, moment de perçage.

II.2.7 Pyromètre à infrarouge pour la mesure de la température de coupe

Durant l'usinage, pour mesurer les températures de l'outil, de la pièce et du copeau, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge modèle Raynger 3I (figure II.12). Le pyromètre mesure les températures de surface à distance. Il concentre l'énergie infrarouge rayonnant de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (moyenne, maximale et minimale) qui seront affichées sur l'écran digital en degré Celsius ou Fahrenheit. Une sortie analogique/digitale permet le transfert des données enregistrées. Le pyromètre infrarouge Raynger 3I présente les caractéristiques suivantes :

- Etendue de mesure -30° à 1200°C
- Etendue spectrale 8 à 14 µ
- Résolution optique 75 : 1
- Emissivité 0,10 à 1,00 par pas de 0,01 (0,95 par défaut)
- Visée laser double
- Temps de réponse 700 msec



Figure II.12 : *Pyromètre à infrarouge.*

II.3 Planification des expériences

II.3.1ntroduction

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage on peut citer, les éléments du régime de coupe (V, f, $a_{p)}$, la géométrie de la partie active de l'outil (r, α, β, γ, ε, …etc.), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine, lubrification). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, les efforts, la rugosité, la température de coupe présentent les paramètres de sortie. Dans notre étude, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution des paramètres suivants (avec un accent particulier sur le comportement de l'outil CBN).

- Evolution de l'usure des matériaux de coupe.
- Evolution de la température de coupe.
- Evolution de la rugosité en fonction des paramètres (Vc, f, a_p).
- Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille VB.
- Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres (Vc, f, a_p).
- Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille VB.

Notons X_1, X_2, X_3, …., X_n comme paramètres d'entrée et Y_1, Y_2, Y_3, ….Y_n comme paramètres de sortie.
Pour étudier l'action d'un ou de plusieurs facteurs (X_1, X_2, X_3, …., X_n) sur un paramètre Y, on est amené à utiliser une des deux méthodes suivantes **[AND 84], [CLE 02]** :

- Méthode unifactorielle
- Méthode multifactorielle

II.3.2 Méthode unifactorielle

Cette méthode est indispensable lorsqu'il s'agit de caractériser l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y. Pour cela, on donne une série de valeurs discrètes au facteur examiné X [$Xi \in \{X_{min}, X_{max}\}$] tout en maintenant tous les autres facteurs constants (tableau II.4).
Pour chaque X = Xi, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Yi, (i = 1÷ N). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation Y = f(X). Dans ce cas, on varie seulement le facteur X, tout en maintenant les autres facteurs constants.

Tableau II.4 : *Réalisation d'essais d'après la méthode unifactorielle.*

N°	**Facteur variable**	**Paramètre de sortie**						
	X	Y_1	Y_2	-	Y_g	-	Y_n	Y_{moy}
1	X_1	Y_{11}	Y_{21}	-	Y_{g1}	-	Y_{n1}	Y_{moy1}
2	X_2	Y_{12}	Y_{22}	-	Y_{g2}	-	Y_{n2}	Y_{moy2}
3	X_3	Y_{13}	Y_{23}	-	Y_{g3}	-	Y_{n3}	Y_{moy3}
i	X_i	Y_{1i}	Y_{2i}	-	Y_{gi}	-	Y_{ni}	Y_{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X_N	Y_{1N}	Y_{2N}	-	Y_{gN}	-	Y_{nN}	Y_{moyN}

II.3.3 Méthode multifactorielle

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes.
La stratégie de recherche expérimentale consiste 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 (f, a_p, Vc) sur les diverses fonctions d'optimisation (Usure, Rugosité, effort de coupe, température de coupe). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante :

$$N = q^k \qquad \text{(II.1)}$$

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 deux niveaux de variation (un niveau supérieur (+ 1) et un niveau inférieur (-1)).
Nous avons alors : $N = 2^3 = 8$

Les essais ont été numérotés de 1 à 8. 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.

Tableau II.5 : *Matrice de planification pour un plan 2^3.*

Niveau de facteurs	**Valeurs naturelles des facteurs**		
	f (mm/tr)	**a_p (mm)**	**Vc (m/min**
Niveau supérieur (+1) Niveau inférieur (-1) Niveau moyen (0)	Valeur maximale Valeur minimale Valeur moyenne	Valeur maximale Valeur minimale Valeur moyenne	Valeur maximale Valeur minimale Valeur moyenne
Nombre des essais	**Valeurs codifiées des facteurs**		
	X1	X2	X3
1	- 1	- 1	- 1
2	+ 1	- 1	- 1
3	- 1	+ 1	- 1
4	+ 1	+ 1	- 1
5	- 1	- 1	+ 1
6	+ 1	- 1	+ 1
7	- 1	+ 1	+ 1
8	+ 1	+ 1	+ 1
9	0	0	0

Dans la coupe des métaux, les lois liant la sortie Y d'un système d'usinage aux paramètres d'entrée (X_1, X_2, ….., X_n) sont en général de la forme :

$$Y=CX_1^{k1}.X_2^{k2}.....X_n^{kn} \quad \text{(II.2)}$$

Où C : est une constante tenant compte de l'influence des facteurs ne figurant pas dans la relation (II.2).

k_1, k_2, k_3 ,….., k_n sont des exposants qui reflètent respectivement les degrés d'influence de (X_1, X_2, ….., X_n) sur Y **[ROU 75]**.

II.3.4 Méthode de calcul des constantes des modèles mathématiques

a) Méthode uni factorielle

Les modèles mathématiques dans la coupe des métaux liant la sortie Y d'un système d'usinage au paramètre d'entrée X s'expriment conformément aux idées de Taylor sous la forme : $y = C X^n$ (II.3)
pour la tenue : $T = C V^n$ (II.4)
pour la rugosité : $R = C V^n$ (II.5)
pour l'effort de coupe : $F = C V^n$ (II.6)

Graphiquement la détermination des coefficients (C et n) se fait rapidement et sans difficulté. Cependant cette méthode graphique est peu précise. Une meilleure précision est assurée par la méthode des moindres carrés de GAUSS **[CLE 02]**.

$$\text{Log } T = \text{Log } C + n \text{ Log } V \quad \text{(II.7)}$$

$$\text{Log } R = \text{Log } C + n \text{ Log } V \quad \text{(II.8)}$$

$$\text{Log } F = \text{Log } C + n \text{ Log } V \quad \text{(II.9)}$$

Ces équations sont linéaires et elles sont du type :

$$Y = nX + C, \text{ (y = ax + b l'équation d'une droite)} \quad \text{(II.10)}$$

$$S=\sum_{i=1}^{N}(Y_i-Y_{it})^2 \rightarrow \varepsilon \quad \text{(II.11)}$$

où ; S : la somme des carrés des écarts quadratiques ;
N : le nombre des essais ;
Y_i : les coordonnées d'un point expérimental ;
Y_{it} : les coordonnées d'un point situé sur la droite moyenne de régression ;
ε : Valeur infiniment petite.

Cette méthode exige que la somme S soit minimale. En dérivant l'équation (II.11) par rapport aux coefficients (C et n) et en égalisant les résultats à zéro, on obtient :

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0, \qquad \frac{\partial S}{\partial C} = 0$$

$$S = \sum_{i=1}^{N} (Yi - nXi - C)^2 \qquad (II.12)$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial n} &= -2 \sum_{i=1}^{N} (Yi - nXi - C)\, Xi = 0. \\ \frac{\partial S}{\partial C} &= -2 \sum_{i=1}^{N} (Yi - nXi - C) = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (II.13)$$

Le développement des expressions (II.13) nous donne:

$$\left.\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N} Yi &= NC + n \sum_{i=1}^{N} Xi \\ \sum_{i=1}^{N} Yi\, Xi &= C \sum_{i=1}^{N} Xi + n \sum_{i=1}^{N} Xi^2 \end{aligned}\right\} \qquad (II.14)$$

de (II.14) on peut déterminer les constantes C et n

$$C = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^{N} Yi - n \sum_{i=1}^{N} Xi \right] \qquad (II.15)$$

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^{N} Yi\, Xi - \sum_{i=1}^{N} Yi \sum_{i=1}^{N} Xi}{N \sum_{i=1}^{N} Xi^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} Xi\right)^2} \qquad (II.16)$$

Une fois, C et n sont déterminés, le modèle mathématique cité dans l'équation (II.3) est complètement défini. Cette méthode est très précise, seulement, elle nécessite des calculs sur micro-ordinateur.
Pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques, nous avons utilisé un programme en turbo pascal (Annexe I.1) qui détermine directement les valeurs des constantes des modèles (tenue, rugosité et effort) ainsi que le coefficient de détermination R².

b) Détermination de la loi de la coupe (méthode multifactorielle)

Les modèles mathématiques les plus couramment utilisés s'expriment (conformément aux idées de TAYLOR) sous la forme de l'équation suivante :

$$Y = C X_1^{k1} . X_2^{k2} ..... X_n^{kn} \qquad (II.17)$$

pour la rugosité : $R = C. f^{\beta} a_p^{\gamma}. V^{\alpha}$ (II.18)

pour l'effort : $F = C. f^{\beta} a_p^{\gamma}. V^{\alpha}$ (II.19)

Où ; R : Rugosité (Ra, Rz, Rt);

F : Effort de coupe (Fa, Fv, Fr) ;
C : constante qui tient compte des facteurs non cités dans (II.18 et 19) ;
α, β, γ : exposant qui expriment le degré d'influence des différents facteurs de base (V, f, a_p) sur les paramètres de sortie (R, F).

La méthode des moindres carrés de « GAUSS-LEGENDRE » permet de déterminer les différents coefficients de la loi de coupe.
Prenons le logarithme de l'équation (II.18), on obtient alors pour l'équation suivante :

$$1n\ R = \ln c + \alpha\ 1n\ V + \beta\ 1n\ f + \gamma\ 1na_p \quad \text{(II.20)}$$

Un changement de variables permet d'écrire l'équation (II.20) sous la forme suivante :

$$Y = C + \alpha.X_1 + \beta.X_2 + \gamma\ X_3 \quad \text{(II.21)}$$

Où : $Y = 1n\ R$; $C = 1nC$; $X_1 = 1n\ V$; $X_2 = 1n\ f$; $X_3 = \ln a_p$.
La méthode des moindres carrés exige que la somme des écarts quadratiques soit minimale, nous aurons alors :

$$S = \sum_{i=1}^{N} (Yi - Yit)^2 \rightarrow \varepsilon \text{ (valeur infiniment petite).}$$

$$S = \sum_{i=1}^{N} (Yi - C - \alpha.X_{1i} - \beta.X_{2i} - \gamma.X_{3i})^2 \rightarrow \varepsilon \quad \text{(II.21)}$$

En prenant les dérivées partielles de la somme (S) par rapport aux inconnues C, α, β, et γ et en égalisant à zéro on obtient.

$$\frac{\partial S}{\partial C} = -2 \sum_{i=1}^{N} (Yi - C - \alpha\ X1i - \beta.X_{2i} - \gamma.X_{3i}) = 0.$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^{N} Yi - \sum_{i=1}^{N} C - \sum_{i=1}^{N} \alpha\ X1i - \sum_{i=1}^{N} \beta.X_{2i} - \sum_{i=1}^{N} \gamma.X_{3i} = 0.$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^{N} Yi = NC + \alpha \sum_{i=1}^{N} X_{1i} + \beta \sum_{i=1}^{N} .X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^{N} .X_{3i.} \quad \text{(II.22)}$$

Pour les autres dérivés on aura :

$$* \frac{\partial S}{\partial \alpha} = -2X_{1i} \sum_{i=1}^{N} (Yi - C - \alpha\ X1i - \beta.X_{2i} - \gamma.X_{3i}) = 0.$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^{N} X_{1i}\ Yi = C \sum_{i=1}^{N} X1i + \alpha \sum_{i=1}^{N} X1i^2 + \beta \sum_{i=1}^{N} X_{1i}.X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^{N} X_{1i}.X_{3i} \quad \text{(II.23)}$$

$$* \frac{\partial S}{\partial \beta} = -2X_{2i} \sum_{i=1}^{N} (Yi - C - \alpha\ X1i - \beta.X_{2i} - \gamma.X_{3i}) = 0.$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^{N} X_{2i}\ Yi = C \sum_{i=1}^{N} X_{2i} + \alpha \sum_{i=1}^{N} X1i.\ X_{2i} + \beta \sum_{i=1}^{N} .X_{2i}^2 + \gamma \sum_{i=1}^{N} X_{1i}.X_{3i} \quad \text{(II.24)}$$

$$* \frac{\partial S}{\partial \gamma} = -2X_{3i} \sum_{i=1}^{N} (Yi - C - \alpha X1i - \beta.X_{2i} - \gamma.X_{3i}) = 0.$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^{N} X_{3i}\, Yi = C\sum_{i=1}^{N} X_{3i} + \alpha\sum_{i=1}^{N} X_{1i}.\, X_{3i} + \beta \sum_{i=1}^{N} X_{3i}.X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^{N} .X_{3i}^2 \qquad \text{(II.25)}$$

Les équations (II.22 à II.25) forment le système suivant :

$$\left(\begin{array}{l} \sum_{i=1}^{N} Yi = NC + \alpha\sum_{i=1}^{N} X_{1i} + \beta \sum_{i=1}^{N} X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^{N} X_{3i.} \\ \sum_{i=1}^{N} X_{1i}\, Yi = C\sum_{i=1}^{N} X_1 i + \alpha\sum_{i=1}^{N} X_1 i^2 + \beta \sum_{i=1}^{N} X_{1i}.X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^{N} X_{1i}.X_{3i} \\ \sum_{i=1}^{N} X_{2i}\, Yi = C\sum_{i=1}^{N} X_{2i} + \alpha\sum_{i=1}^{N} X1i.\, X_{2i} + \beta \sum_{i=1}^{N} .X_{2i}^2 + \gamma \sum_{i=1}^{N} X_{1i}.X_{3i} \\ \sum_{i=1}^{N} X_{3i}\, Yi = C\sum_{i=1}^{N} X_{3i} + \alpha\sum_{i=1}^{N} X_{1i}.\, X_{3i} + \beta \sum_{i=1}^{N} X_{3i}.X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^{N} X_{3i}^2 \end{array}\right) \qquad \text{(II.26)}$$

Pour résoudre le système (II.26), on remplace les Xji par leurs valeurs codifiées du tableau II.5 on obtient :

$$\left(\begin{array}{l} \sum_{i=1}^{N} Yi = NC \\ \sum_{i=1}^{N} X_{1i}\, Yi = N\,\alpha \\ \\ \sum_{i=1}^{N} X_{2i}\, Yi = N\,\beta \\ \sum_{i=1}^{N} X_{3i}\, Yi = N\,\gamma \end{array}\right) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} C = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} Yi \\ \alpha = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_{1i}\, Yi \\ \\ \beta = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_{2i} \\ \gamma = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_{3i}\, Yi \end{array}\right) \qquad \text{(II.27)}$$

Les valeurs (Yi = Ln R_i, Fi, T) sont obtenues à partir des essais. Un coefficient dit « coefficient de corrélation global » (R) entre le modèle mathématique et les résultats expérimentaux est donné par la formule suivante :

$$R = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (Yi - Yit)^2}{\sum_{i=1}^{N} (Yi - Y_{moy})^2}\right)^{1/2} \qquad \text{(II.28)}$$

avec : $Y_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Yi$

yi : C'est la valeur obtenue expérimentalement;

yit : Valeur calculée d'après le modèle.

Une meilleure adéquation est assurée lorsque la valeur de « R » tend vers l'unité. Pour déterminer les constantes du modèle de la rugosité et de l'effort de coupe (Multifactorielle), nous avons utilisé un programme en turbo pascal (Annexe I.2) qui donne directement les valeurs des constantes des différents modèles ainsi que le coefficient de détermination R^2.

II.4 Conditions de coupe et du traitement thermique

II.4.1 Conditions de coupe

Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage). La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification et dans les conditions de coupe suivantes (tableau II.6).

Tableau II.6 : *Conditions de coupe.*

Conditions de coupe	**Essais d'usure**	**Essais de rugosité et d'effort de coupe**
Vitesse de coupe (m/min) CBN7020	90 -120 -180 -220 - 280 -350	60 – 90 – 120 – 150 – 180 - 220 -280
Vitesse de coupe (m/min) Céramique CC650	60 -90 -120 -180	60 - 80 - 90 -1 00 - 120 -180
Vitesse de coupe (m/min) Carbure GC3015 (K10)	30 – 60 - 90	20 – 30 – 40 – 60- 80 – 90
Avance (mm/tr)	0,08	0,08 - 0,11- 0,14 - 0,16 - 0,2
Profondeur de passe (mm)	0,5	0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 1,0

En se référant à la norme ISO 3685-1977 (F), nous avons retenu les critères suivants de l'usure admissible : [VB] = 0,3 mm, et [KT] = 0,15 mm. Cependant, pour faire une analyse plus approfondie sur le comportement à l'usure de ces matériaux et sur l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe en fonction de l'usure, nous avons jugé utile de pousser la valeur admissible de l'usure en dépouille jusqu'à [VB] = 0,4 mm. Pour tous les essais d'usure, de rugosité et d'effort de coupe en fonction du temps de coupe, les valeurs de l'avance et de la profondeur de passe sont maintenues constantes et elles sont respectivement égales à 0,08 mm/tr et 0,5 mm.

II.4.2 Conditions du traitement thermique

Pour le traitement thermique des pièces, nous avons réalisé une trempe suivie d'un revenu, ce qui a augmenté la dureté de 60HRC (tableau II.7). Pour chaque nuance d'acier les éprouvettes ont été traitées ensemble dans le même lot et cela pour garder les mêmes conditions de traitement thermique. Les courbes tracées sur la figure II.13 et II.14 ont permis de déterminer la section des éprouvettes de manière à garder une dureté constante et la température de revenu.

Tableau II.7 : *Conditions du traitement thermique des aciers utilisés.*

Acier	Dureté avant traitement	Dureté après traitement	Traitement Thermique
100Cr6	285 HB	60HRC	Trempe à T = 850° + revenu à T = 240°
X200Cr12	250 HB	60HRC	Trempe à T = 940° + revenu à T = 280°

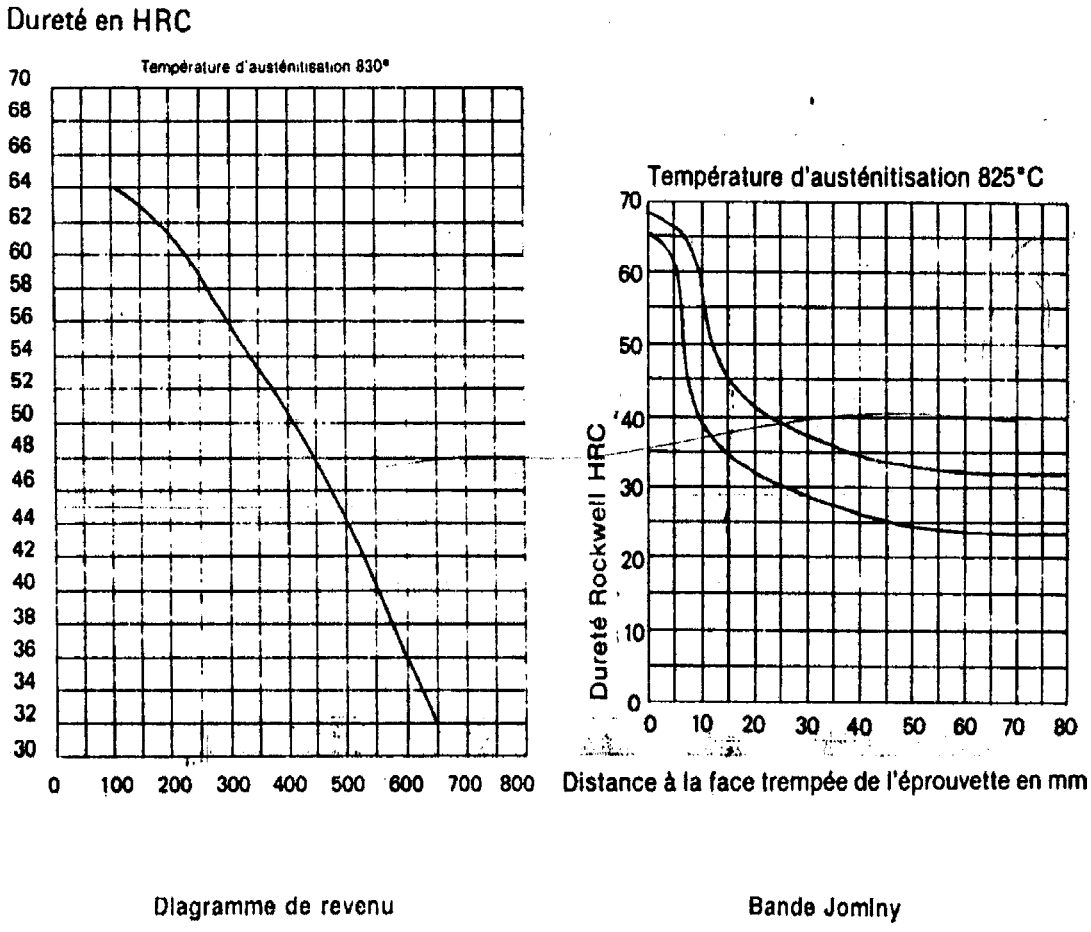


Figure II.13 : *Diagramme de revenu et bande de Jominy de l'acier 100Cr6.*

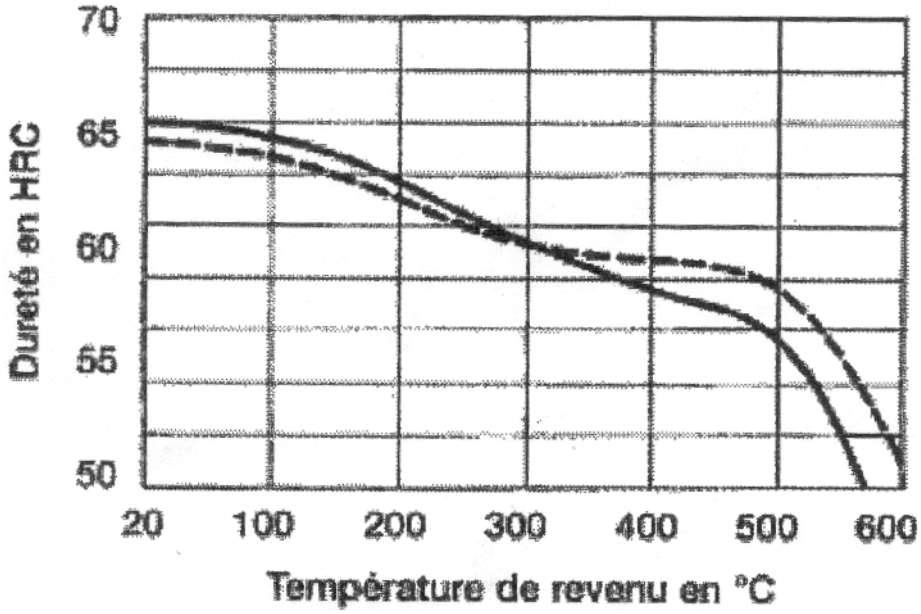


Figure II.14 : *Diagramme de revenu de l'acier X200Cr12.*

CHAPITRE III

RESULTATS DE L'USURE DES MATERIAUX DE COUPE TESTES

III.1 Introduction

En se basant sur l'étude bibliographique (chapitre I), on constate que les principaux paramètres technologiques, tels que la précision d'usinage, la qualité de l'état de surface, le prix de revient, la productivité de travail,…etc., sont en relation directe avec l'usure. Par conséquent l'étude approfondie et continue de l'usure, notamment lors de l'usinage des aciers durcis, tels que les aciers 100Cr6 et X200Cr12, avec des matériaux à outils de hautes performances (Nitrure de bore cubique et céramique) est une tache d'une grande importance économique et technologique en productique mécanique.

III.2 Usinage de l'acier à roulement 100Cr6

III. 2.1 Evolution de l'usure des outils

a) Nitrure de bore cubique CBN7020

Les figures III.1 et III.2 illustrent l'évolution de l'usure en dépouille et en cratère du CBN7020 en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe. Il ressort qu'avec l'augmentation de la vitesse, l'usure s'accroît de manière notable à partir de 180 m/min. La vitesse d'accroissement de l'usure en cratère est relativement faible (KT < 95µm, ceci pour toutes les vitesses testées) par rapport à celle de l'usure en dépouille. Par conséquent cette dernière est considérée comme le critère principal, permettant la détermination de la durée de vie de l'outil. L'usure en dépouille admissible [VB] est illustrée par une ligne horizontale (figure III.1).

La figure III.3 montre la morphologie de l'usure VB et KT en fonction du temps pour une vitesse de coupe de 90 m/min. Initialement, l'usure en dépouille se développe suivant une bande régulière qui s'élargit avec le temps pour acquérir en fin d'essai une forme irrégulière. L'usure suivant la surface d'attaque s'annonce sous forme d'un petit cratère qui prend de l'ampleur jusqu'à ce qu'il atteigne l'usure précédente de dépouille. A ce moment, au voisinage de l'arête tranchante apparaît une usure importante sous forme de cuvette (figure III.3d). Cette dernière fragilise le bec de l'outil et conduit ultérieurement à son effondrement. La figure III.4 illustre la dégradation de la surface d'attaque de l'outil après 80 min de travail à 120 m/min. Au début de l'usinage, il est observé que le chanfrein de la plaquette subit une usure annonçant une condition plutôt sévère au vu de la chaleur dégagée. Cette situation a évolué pour obtenir la dégradation indiquée dans la figure III. 4b. En effet, la fin de l'usinage a été marquée par un écaillage sur la surface d'attaque, qui s'est élargi dans la direction de la diagonale de la plaquette. Du coté du bec de l'outil celui ci a mis fin au chanfrein de renforcement de l'arête tranchante, alors que sur le coté opposé il a atteint la limite de l'insert CBN.

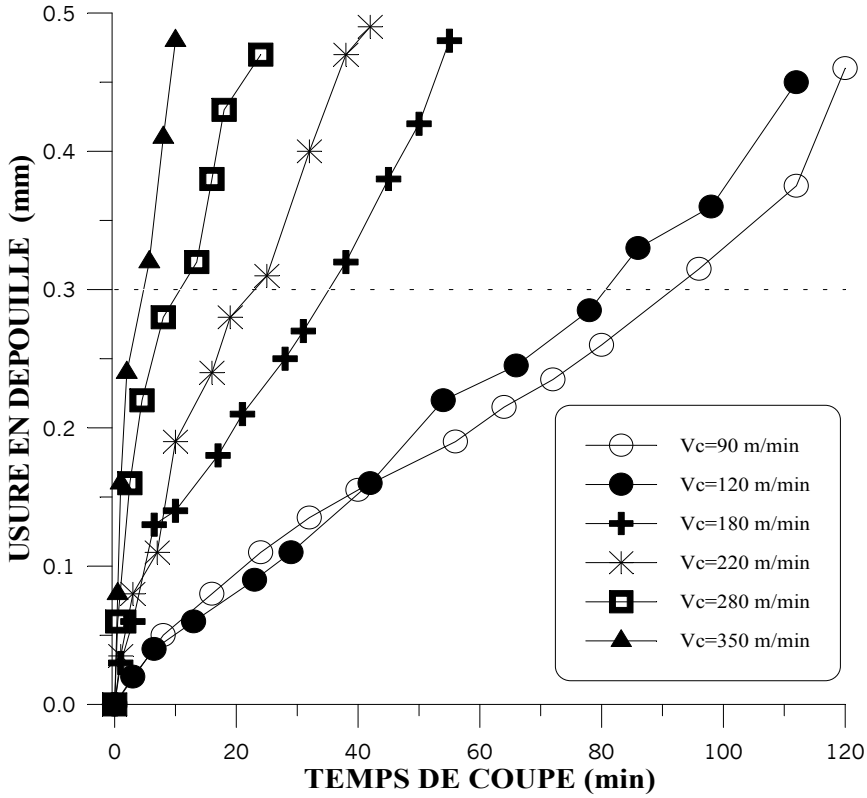


Figure III.1 : *Usure en dépouille (VB) du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6.*

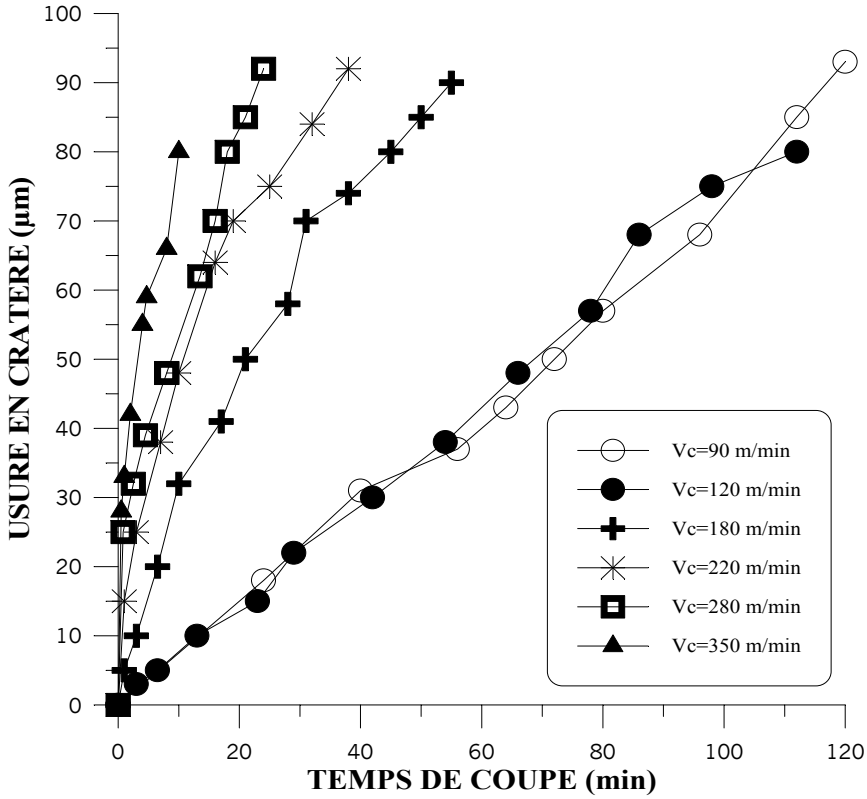


Figure III.2 : *Usure en cratère (KT) du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6.*

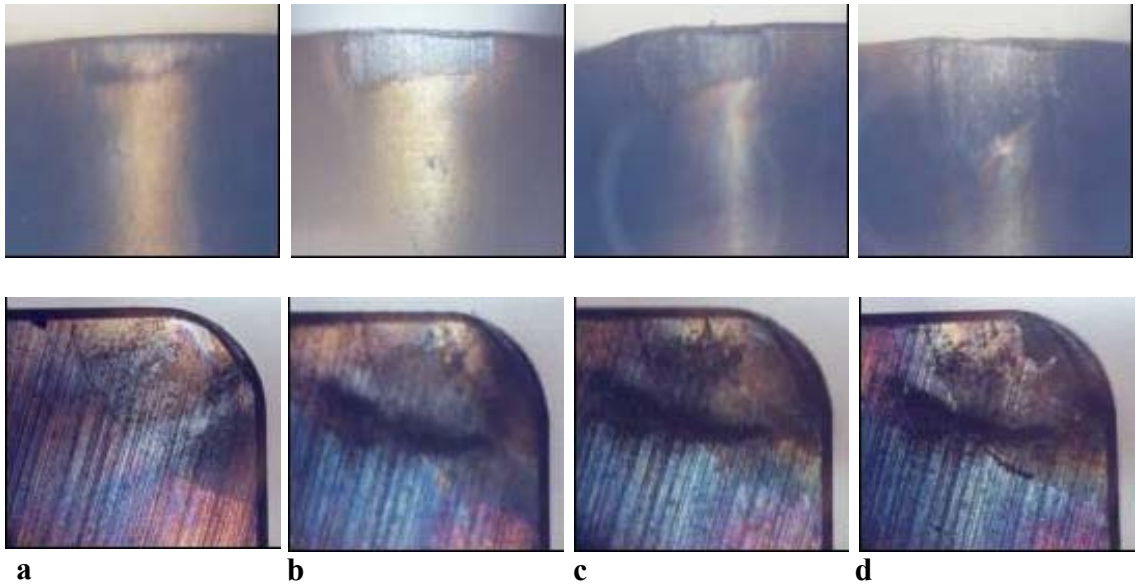


***Figure III.3**: Micrographies de l'usure VB et KT du CBN à V_c=90m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm. Temps d'usinage; a) 8min, b) 40min, c) 56min et d) 80min.*

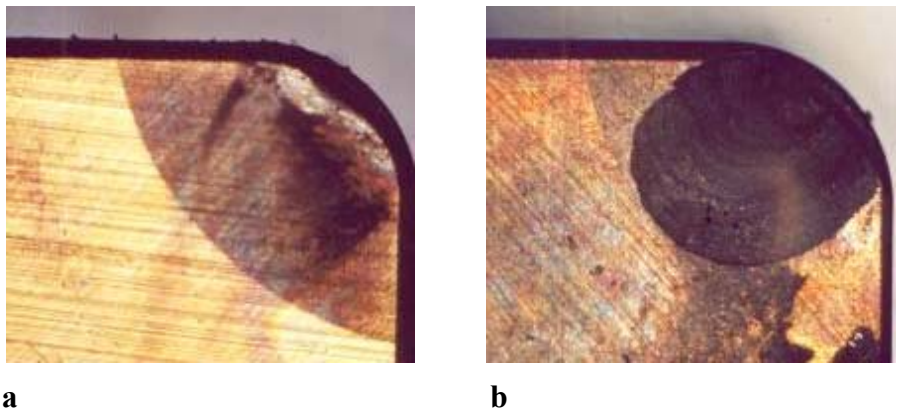
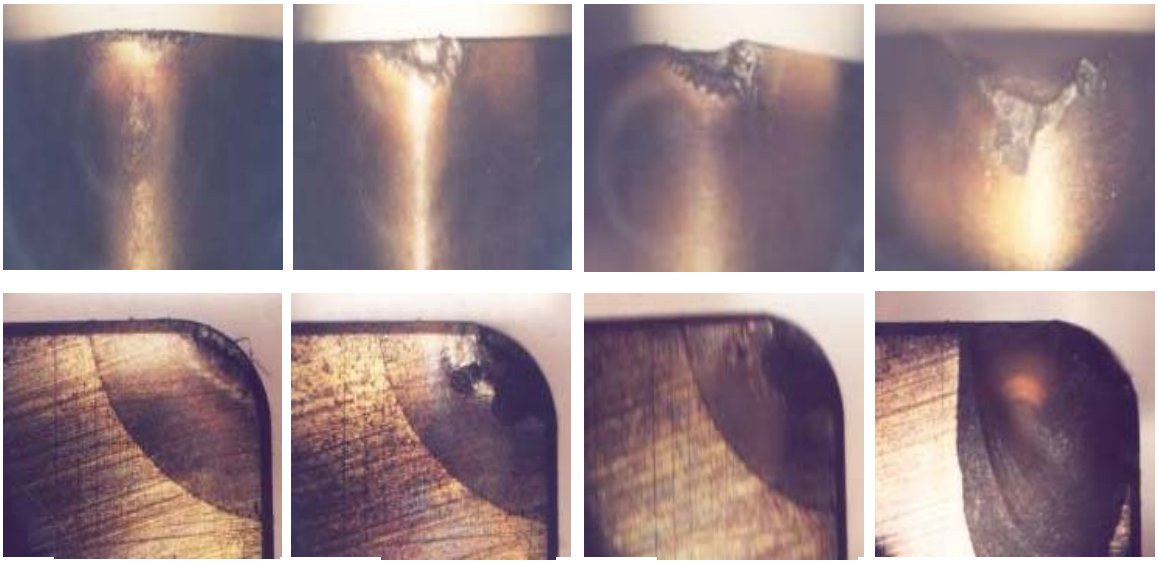


***Figure III. 4 :** Aspect final de l'usure en cratère KT du CBN: a) début d'usinage, b) après 80min d'usinage à Vc=120m/min, f=0,08mm/tr, a_p=0,5mm.*

Il est intéressant à ce stade d'effectuer des observations microscopiques pour des vitesses plus importantes. A la vitesse 280 m/min (figure III.5), la dégradation de la plaquette CBN suivant ses deux surfaces de dépouille et d'attaque devient intense. La détérioration du bec de l'outil est nettement visible après seulement 7 minutes de travail (figure III.5b). Le travail ultérieur a conduit à un écaillage suivant la surface d'attaque et en dépouille qui a donné lieu à la formation d'une poche assez profonde au niveau du bec de l'outil (figure III.5d). L'effet de la vitesse sur la morphologie de

l'usure du CBN est encore plus prononcé à 350 m/min. La destruction de l'arête tranchante suite à la jonction des deux types d'usure VB et KT est apparue dès la première minute (figure III.6). Avec le temps, l'usure sommaire s'est développée très rapidement pour aboutir en fin d'usinage à un effondrement total du bec de l'outil, accompagné d'une série d'écaillages sur les différentes faces de l'outil. Il en découle qu'en travaillant à grandes vitesses de coupe, notamment au-delà de 280 m/min, l'usure est très rapide et se traduit par des tenues très réduites ce qui influence d'une manière négative l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce usinée. Dans ces conditions l'usure de l'outil se développe suivant plusieurs mécanismes. A titre indicatif, les deux principaux mécanismes généralement rencontrés sont l'abrasion et la diffusion. Le premier est dû aux frottements aux interfaces accompagnés de fortes pressions spécifiques qui sont le résultat des rapports entre les duretés des phases du matériau usiné et celles des composants de l'outil. Aux grandes vitesses de coupe, les températures aux interfaces s'élèvent rapidement donnant lieu à un adoucissement du matériau de l'outil. Ceci enclenche le second mécanisme représenté par la diffusion qui favorise le processus des réactions chimiques. La combinaison de ces deux mécanismes, conduit à l'accélération du processus d'écaillage des surfaces de la partie active de l'outil et de la dégradation de l'arête de coupe **[YAL 04]**.



a **b** **c** **d**

Figure III.5 *: Micrographies de l'usure VB et KT du CBN à,*
V_c=280m/min, f=0,08mm/tret a_p=0,5mm.
Temps d'usinage; a) 1,5min, b) 7min, c) 9min et d) 15,5min.



a **b** **c** **d**

Figure III.6 : *Micrographies de l'usure VB et KT du CBN à* V_c=350m/min, *f*=0,08mm/tr et a_p=0,5mm.
Temps d'usinage; a) 1,5min, b) 2,5min, c) 4,5min et d) 7,5min

b) Céramique Mixte CC650

Les figures III. 7 et III. 8 présentent les résultats de l'évolution de l'usure en dépouille et en cratère de la céramique mixte CC650 en fonction du temps de coupe à différentes vitesses de coupe. A 60 m/min, la céramique mixte CC650 a montré une faible usure en dépouille et en cratère (figures III.7 et III.8) et les trois stades de l'usure sont nettement signalés. L'outil est exempt de l'effet des contraintes thermomécaniques comme relevé lors des observations microscopiques. Comme illustré dans la figure III.8, la céramique donne lieu à une usure en cratère régulière et lente (KT<65µm) à 60 m/min. Au-delà de 90m/min, l'usure s'accentue et se termine par une rupture de l'arête comme dans le cas de la vitesse limite de 180m/min. L'allure générale de KT ressemble à celle de VB.
Afin d'expliquer le mode de dégradation de l'arête de coupe, une série de micrographies de l'évolution de l'usure VB et KT a été préparée à la vitesse moyenne de 90m/min (figures III.9). Il ressort que l'usure VB se manifeste par une bande striée régulière bien dégagée alors que KT se développe sous forme d'une cuvette très proche de l'arête tranchante. En observant la figure III.9d, on remarque que la céramique mixte CC650 a subi une rupture au bout de 22 min de travail qui a conduit à un effondrement du bec.

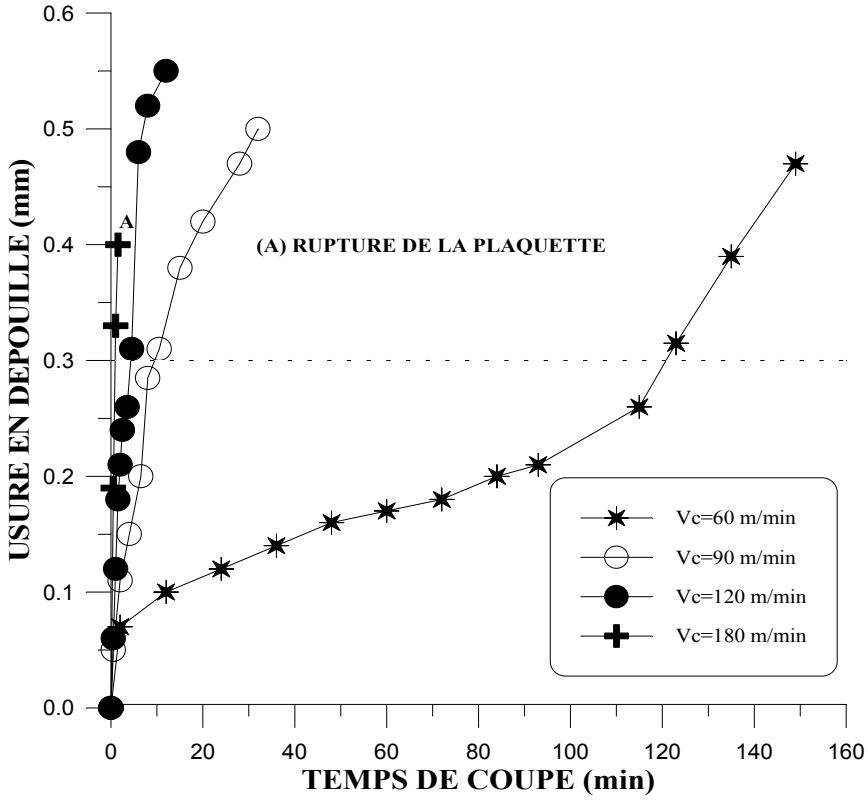


Figure III.7 : *Usure en dépouille (VB) de la céramique mixte CC650 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6.*

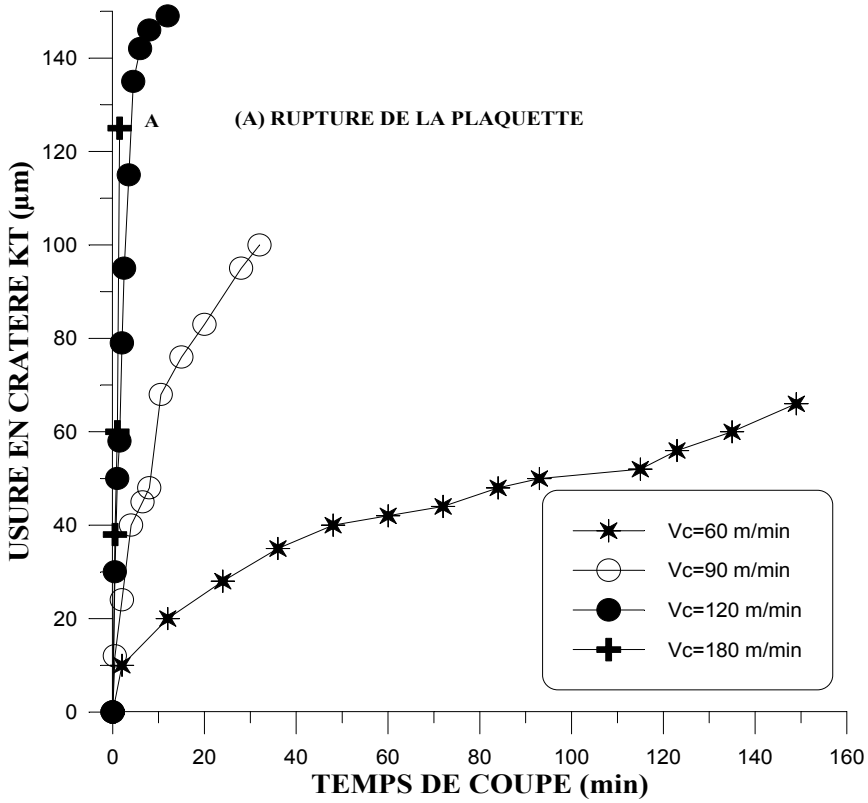
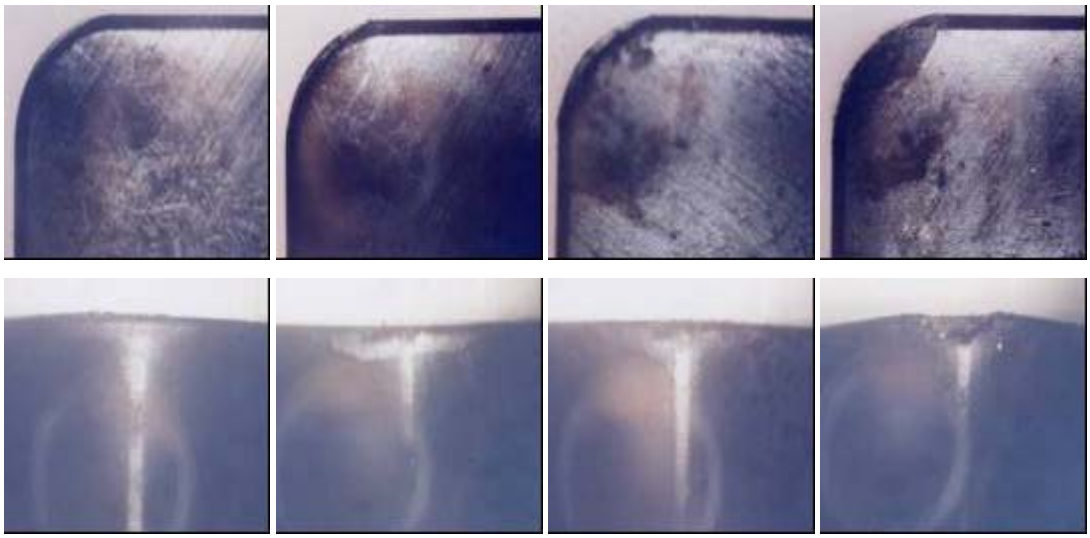


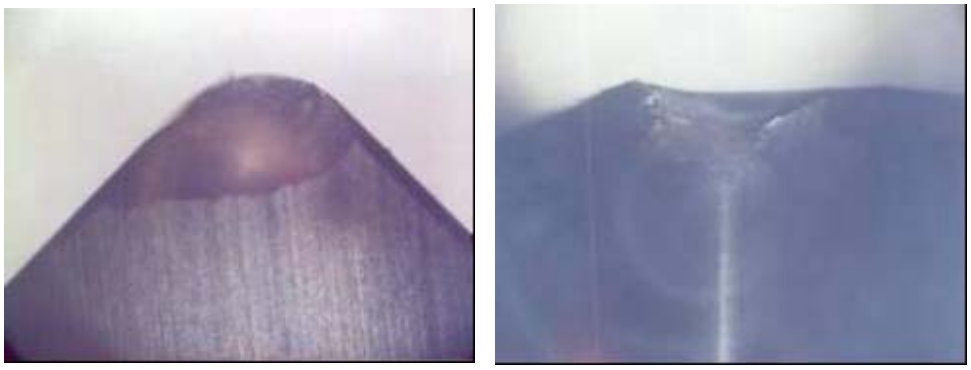
Figure III.8 : *Usure en cratère (KT) de la céramique mixte CC650 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6.*



a **b** **c** **d**

Figure III.9 : *Micrographies de l'usures KT et VB du CC650 ;*
V_c=90m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm ;
Temps d'usinage; a) 1,5min, b) 8min, c) 12min et d) 22min.

A la vitesse maximale de coupe Vc = 180m/min pour la CC650, un effondrement est survenu après seulement 1,5 min de travail et qui est caractérisé par une perte importante de matière et une rupture de l'arête. La figure III.10 montre l'aspect final de la céramique CC650 à la fin de l'usinage. Il ressort que la vitesse de coupe limite Vc = 180 m/min n'est pas recommandée pour l'usinage du 100Cr6 durci à 60 HRC.



a **b**

Figure III.10 : *Aspect final de l'usure de la céramique CC650*
a) en cratère b) en dépouille; Vc=180m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm ;
Temps d'usinage = 1,5 min.

c) Carbure métallique GC3015

Les carbures métalliques revêtus sont très utilisés dans l'usinage des pièces mécaniques. Ils couvrent un très large domaine d'application d'usinage. On estime que 70 % des opérations d'usinage sont effectuées par des plaquettes en carbure. A cet effet nous avons jugé utile d'introduire dans notre travail un des meilleurs carbures métalliques revêtus. Il s'agit du carbure GC3015 ayant un triple revêtement et très utilisé dans l'usinage des matériaux difficilement usinables. Son introduction est dans un souci de comparaison avec les résultats obtenus avec les deux autres familles de matériaux de coupe (CBN et céramique).

Les figures III.11 et III.12 présentent les résultats de l'évolution de l'usure en dépouille et en cratère du carbure métallique GC3015 en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe. L'analyse des courbes montre que l'allure de l'usure obéit à la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique comme cité dans la bibliographie (figure I.34) (rodage, usure normale, usure accéléré). L'analyse des résultats montre aussi que la vitesse de coupe a une influence capitale sur l'usure. En effet, avec l'augmentation de cette dernière l'usure s'accroît d'une façon remarquable. Cet accroissement de l'usure réduit considérablement l'étendue de la zone normale, ceci est justifié par les essais réalisés avec les vitesses de coupe de 60 et 90 m/min. En effet, à la vitesse de 30 m/min la zone de l'usure normale s'étend sur une durée de 28 m/min, alors que pour la vitesse 60 m/min elle est d'une durée de 3 min et enfin à la vitesse de 90 m/min la zone d'usure normale est presque inexistante. Concernant les courbes de l'usure KT, elles suivent les mêmes allures que celles de l'usure en dépouille VB. Lors de l'usinage de 100Cr6 avec le carbure GC3015 à la vitesse de 30 m/min, l'usinage est très stable, l'usure est régulière et évolue lentement. Au début l'usure VB se manifeste sous forme d'un léger plat avec une rugosité de la surface Ra = 0,43µm. Avec le temps VB s'élargit jusqu à la valeur admissible [0,3] mm, ce qui correspond à une tenue de 36 min, la rugosité enregistrée est Ra = 0,95 µm. Au-delà de VB=0,4 mm, l'outil perd complètement ses qualités de coupe et on remarque une destruction totale du bec de l'outil. La rugosité moyenne enregistrée à la fin de l'usinage est d'une valeur Ra = 1,45 µm.

A la vitesse de 60 m/min, la température de coupe augmente et l'usure sur les surfaces en dépouille et en cratère s'accentue. A la première minute d'usinage l'usure VB se manifeste sous forme d'une bande régulière et s'agrandie en largeur pour atteindre l'usure admissible [VB]=0,3mm après 6,8 min de travail. En parallèle l'usure en cratère prend progressivement de l'ampleur dans le plan horizontale et verticale jusqu'à ce quelle rejoigne la limite de l'usure VB, il en résulte une rupture du bec de l'outil. Après 18min d'usinage, l'usure VB atteint la valeur de 0,48 mm et KT atteint la valeur de 128 µm. A ce stade d'usinage, on remarque un recule de l'arête de coupe ce qui affecte la précision d'usinage.

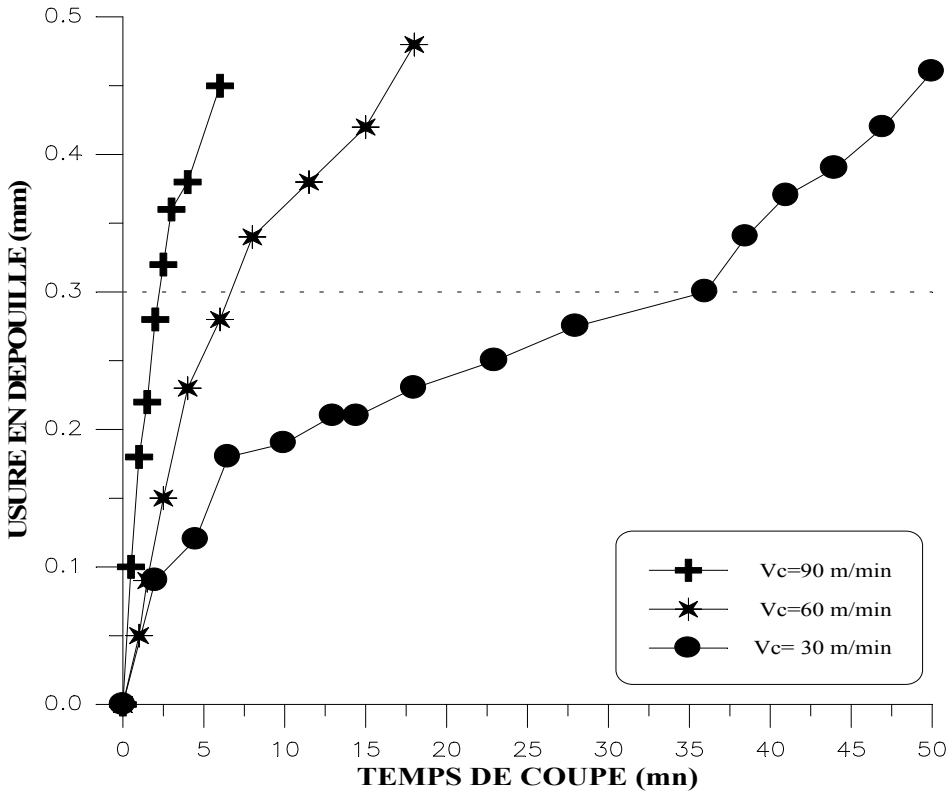


Figure III.11 : *Usure en dépouille (VB) du GC3015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6.*

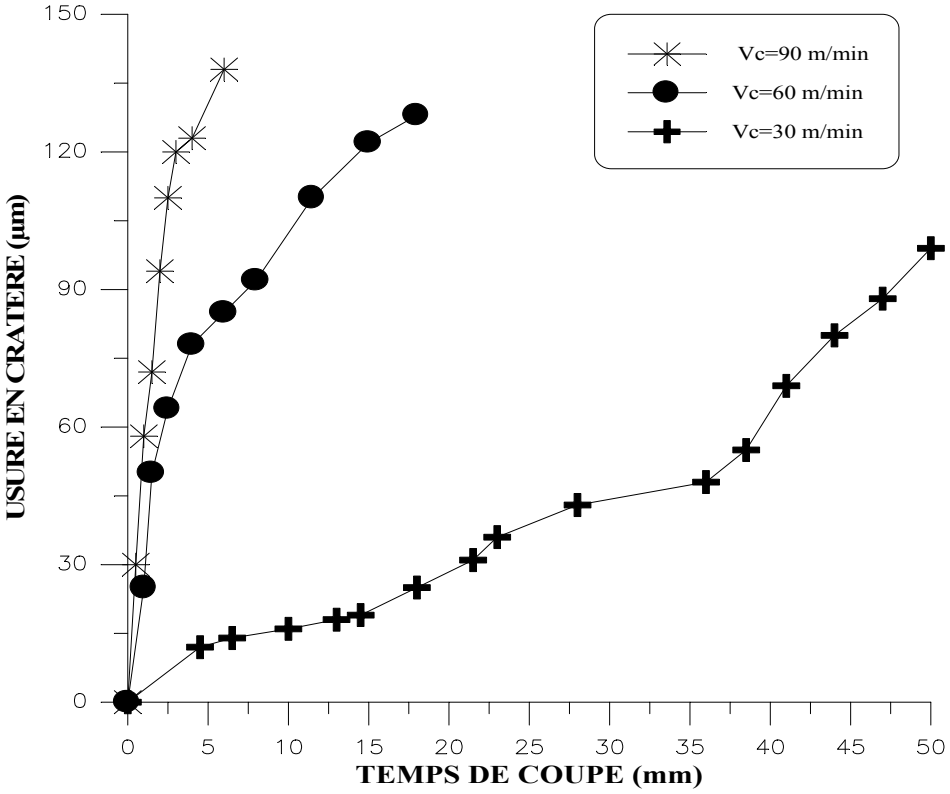
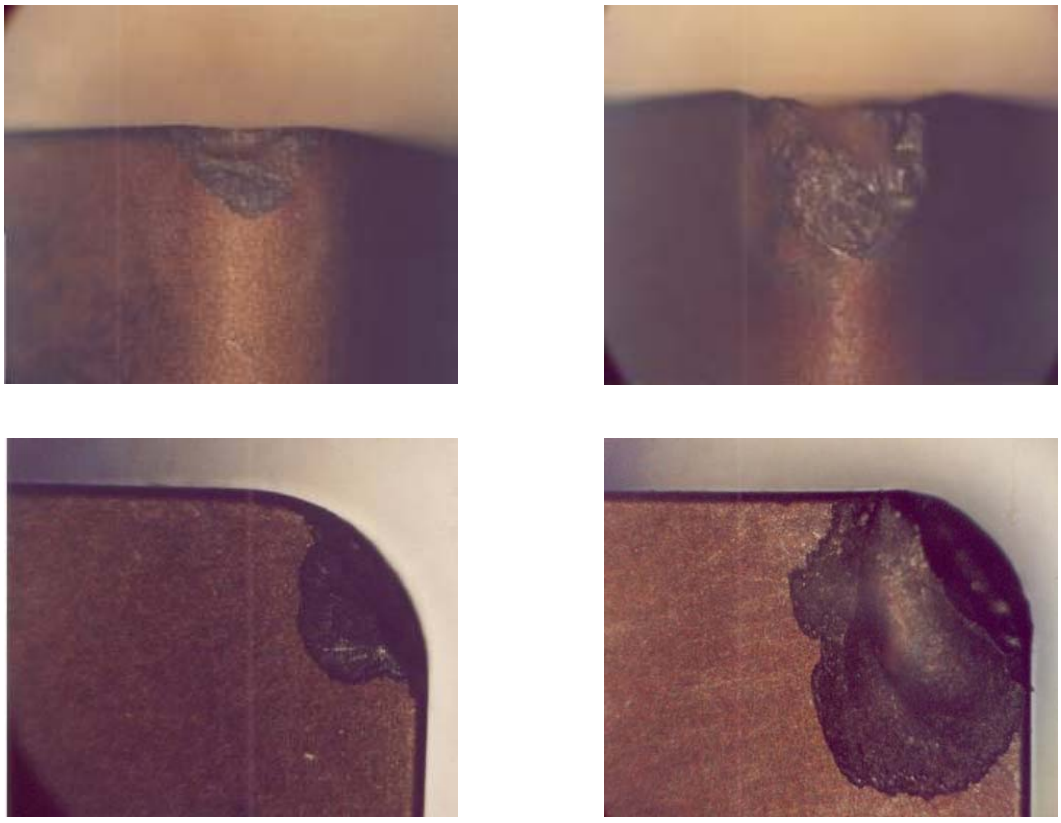


Figure III.12 : *Usure en cratère (KT) du GC3015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du 100Cr6.*

A la vitesse maximale de coupe Vc = 90 m/min pour le carbure GC3015, l'usinage est caractérisé par une instabilité, le copeau s'écoule à une vitesse très élevée ayant une couleur rouge. Au début l'usure se manifeste par une perte de matière au bec de l'outil et un écaillage survient sur les surfaces en dépouille et en cratère après seulement 1,5 min de travail (figure III.13a). Après 6 min d'usinage la dégradation de la plaquette est totale sur ses deux surfaces. L'écaillage et le détachement du revêtement sont bien visibles sur la surface d'attaque (figure III.13b). A cette vitesse l'outil atteint l'usure admissible [VB] après seulement 2,4 min d'usinage avec une usure en cratère d'environ 100 µm. Ces observations nous permettent de conclure, que la vitesse 90 m/min n'est pas recommandée pour l'usinage de l'acier 100Cr6 à cause de la durée de vie très courte du carbure GC3015.



a **b**

Figure III.13 : *Micrographies de l'usures KT et VB du carbure GC3015; V_c=90m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm ; Temps d'usinage; a) 1,5min, b) 6min.*

III.2.2 Tenues des outils

En général, la tenue d'un outil de coupe est influencée par une série de facteurs notamment la vitesse de coupe **[YAL 03]**. A vitesses importantes, les frottements outil-pièce sont fonction de la surface de contact. Cette dernière augmente avec l'usure, ce qui génère une quantité de chaleur altèrant les arêtes de coupe par des phénomènes physico-chimiques complexes **[KOP 01]**.

Le critère d'usure recommandé par ISO et adopté dans cette étude est celui en dépouille de 0,3 mm. La figure III.14 montre l'impact de la vitesse sur la durée de vie pour les deux critères de l'usure admissible [VB] = 0,3 mm et 0,4 mm. L'idée du choix de [VB] = 0,4 mm est venue suite à la constatation sur la pièce d'un bon état de surface. Ceci est intéressent dans le cas où les exigences envers la précision dimensionnelle et le fini de la surface le permettent. Cette approche permet de mettre en valeur des gains substantiels en tenue surtout pour les vitesses de coupe élevées. Pour ces deux critères limites d'usure et lors de l'usinage avec le CBN7020 entre 90 et 220 m/min, le gain passe de 25 à 61%. Pour la plage des vitesses Vc > 220 m/min, le gain est supérieur au 2/3 de la durée de vie de l'outil. Les conséquences sur les coûts de production se voient optimisés de manières significatives. Pour le critère [VB] = 0,3 mm, l'effet de la vitesse peut être interprété par la comparaison des ratios des tenues du CBN7020. Le ratio T_{90}/T_{120} n'est que 1,15 alors que T_{120}/T_{180} est le double. Aux grandes vitesses, ce ratio s'envole à une valeur de 19,16 indiquant une usure importante.

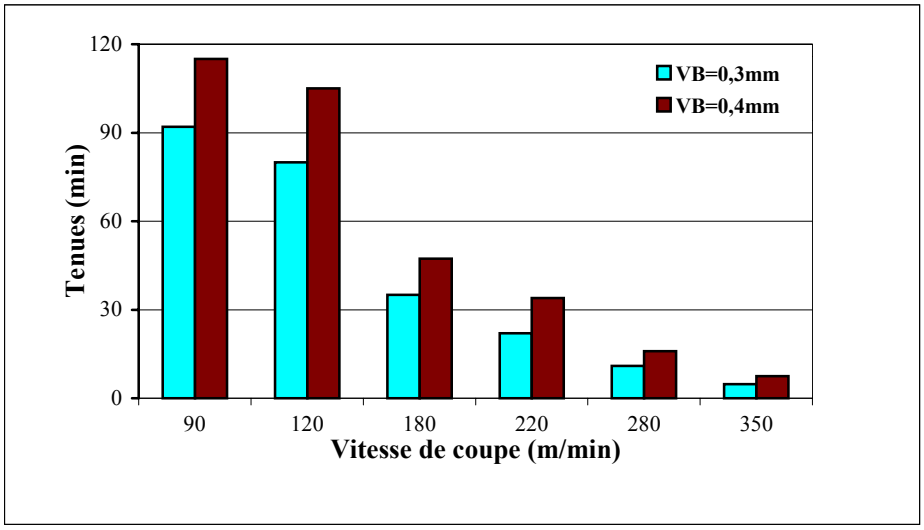


Figure III.14 : *Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe du CBN7020.*

La figure III.15 illustre les tenues obtenues lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 par la céramique 650 et cela à différentes vitesses de coupe pour une usure admissible de [VB] = 0,3mm et [VB] = 0,4mm. Il est aussi intéressant de procéder à la comparaison des ratios des tenues pour différentes vitesses de coupe. A 90 m/min et à [VB] = 0,3 mm, le ratio T_{60}/T_{90} est de 8,50 alors que T_{90}/T_{120} n'est que 3,33. Dans le cas de la vitesse 180 m/min, la plaquette n'a pas pu contenir l'effet de l'énergie

dégagée à cause du cisaillement et de la chaleur pour se rompre au bout de 1,5 minutes de travail.

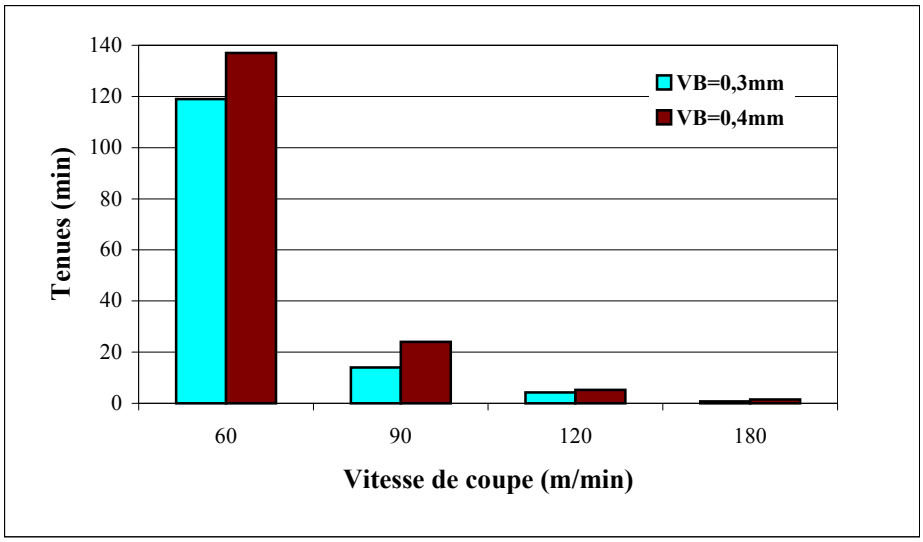


Figure III.15 : *Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe de la céramique CC650.*

La figure III.16 illustre les tenues obtenues lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 par le carbure GC3015 et cela à différentes vitesses de coupe pour une usure admissible de [VB] = 0,3mm et [VB] = 0,4mm. L'analyse des résultats montre que la durée de vie est très sensible à la variation de la vitesse de coupe. En effet, l'augmentation de la vitesse de coupe de 30 à 60 m/min, c'est à dire dans un rapport de vitesse de 2 fois, conduit à une chute de tenue de 5,25 fois. Alors que l'augmentation de Vc de 30 à 90 m/min, dans un rapport de 3 fois, conduit à une diminution de la tenue de 15 fois. Cette chute de tenue aux grandes vitesses de coupe s'explique par la présence de températures élevées générées du processus de coupe et qui règnent à la pointe de l'outil, ce qui favorise les différents mécanismes de l'usure et par conséquent les capacités de coupe de l'outil diminuent.

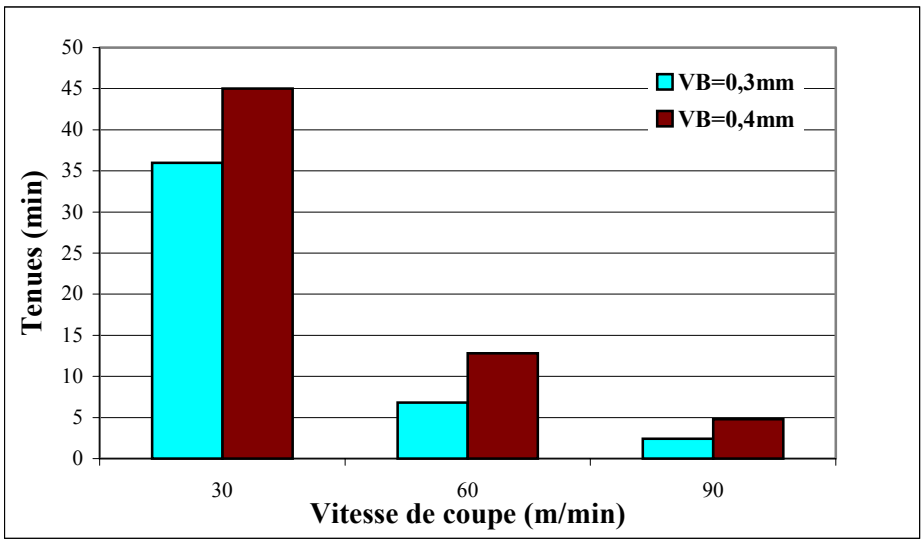


Figure III.16 : *Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe de la GC3015.*

La figure III.17 résume la plage de comparaison entre le CBN7020, la céramique CC650 et le carbure GC3015. La comparaison dans ce contexte est représentée par les vitesses 60, 90, 120 et 180 m/min. Les plaquettes en CBN n'ont pas été testées en dessous de 90m/min car elles sont généralement conçues pour travailler à des vitesses plus élevées ce qui leur permet aussi de conserver la dureté à haute température **[POU 03]**, **[CHO 03]**. De plus le comportement de la céramique CC650 indique une réelle alternative économique pour des vitesses de coupe faibles. Ceci est largement explicité par l'étude de Brandt consacrée aux outils en céramique **[BRA 97]**.

A la vitesse de coupe de 180 m/min et pour [VB] = 0,3 mm, le ratio (T_{CBN}/T_{CC650}) est à un maximum de 43,75 et pour la vitesse 120 m/min, le ratio (T_{CBN}/T_{CC650}) décroît rapidement pour donner la valeur de 19,05 et en dernier lieu, à la vitesse de 90 m/min le ratio (T_{CBN}/T_{CC650}) chute et prend la valeur 6,57. Concernant la comparaison des tenues entre le carbure et les deux autres matériaux de coupe, à la vitesse de 90 m/min le ratio (T_{CBN}/T_{GC3015}) est de 38,33 alors que le ratio (T_{CC650}/T_{GC3015}) est de 5,8 seulement. A la vitesse 60m/min le ratio (T_{CC650}/T_{GC3015}) est de 17,5. Cette comparaison des ratios des tenues confirme l'efficacité des outils CBN vis-à-vis des céramiques mixtes et des carbures métalliques revêtus pour l'usinage des pièces trempées à des vitesses de coupe supérieures à 90m/min, ceci a été confirmé également par **[LUO 99]**.

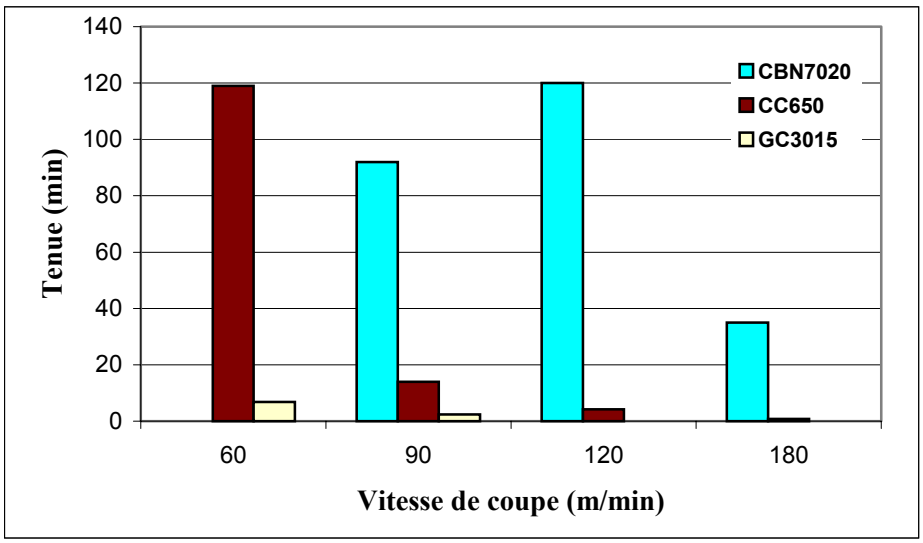


Figure III.17 : *Plage de comparaison des tenues des trois matériaux de coupe.*

L'influence de la vitesse de coupe sur la productivité, exprimée en longueur de copeau enlevé est illustrée dans la figure III.18 Le temps durant lequel est produite cette longueur de copeau (L) est égal à la durée de vie (T) correspondante à chaque vitesse de coupe (Vc) testée. Elle est calculée d'après l'expression suivante :

$$L = V_c \; T \qquad \text{(III.1)}$$

Il ressort de ces résultats que la vitesse 120 m/min est optimale et ceci pour les deux critères de l'usure admissible retenus. Pour [VB] = 0,4 mm, l'arête de coupe a produit

12 600 m de copeau pendant 105 min de travail et 9 600 m pour [VB] = 0,3 mm correspondant à une tenue de 80 min.
En comparant la longueur du copeau usiné par les différents matériaux de coupe à différentes vitesses de coupe, il ressort que dans ces conditions la production de copeaux est maximale à 60m/min pour la CC650 alors que le CBN exhibe un optimum à 120m/min. Dans la plage de comparaison, le CBN l'emporte de manière claire mais la compétitivité économique avec la céramique diminue pour des vitesses en dessous de 90m/min (figure III.19).

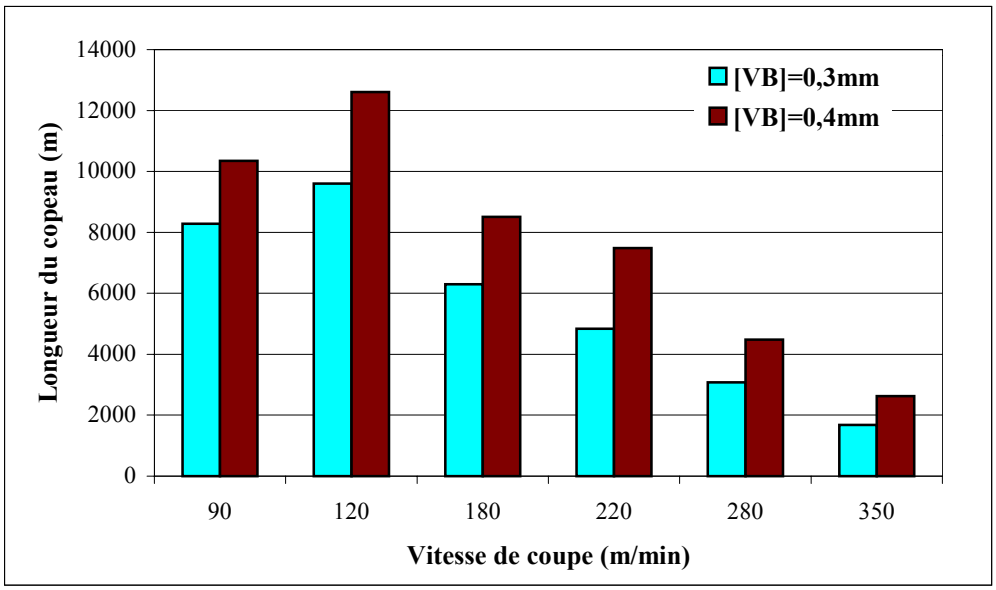


Figure III.18 : *Longueur du copeau enlevé à différentes vitesses de coupe pour le CBN.*

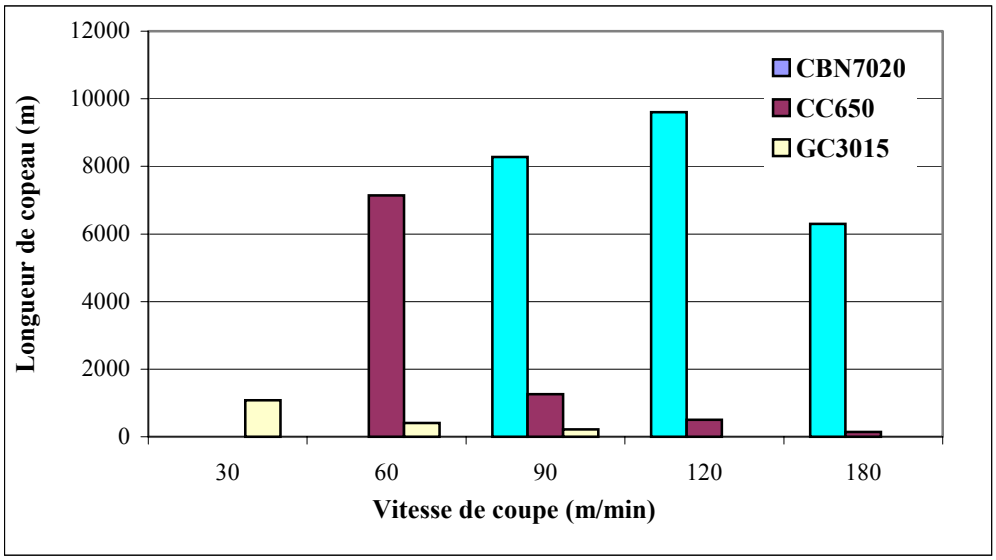


Figure III.19 : *Comparaison entre la longueur de copeau enlevé par les trois matériaux de coupe.*

III.2.3 Modèles de la tenue

Le traitement des résultats par la méthode des moindres carrées des valeurs des tenues (figures III.14, III.15 et III.16) a permis l'établissement des modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe pour [VB] = 0,3 mm et 0,4 mm (tableau III.1).

Tableau III. 1: *Modèles Mathématiques obtenus pour les trois matériaux de coupe.*

Matériaux de coupe	Modèle de Taylor sous ses deux formes [VB]=0,3mm	Modèle de Taylor sous ses deux formes [VB]=0,4mm	R^2
Nitrure de bore cubique CBN7020	$V T^{0,459} = 828,578$ (III.2)	$V T^{0,5} = 1131,03$ (III.3)	0,997
	$T = \exp^{14,65} V^{-2,18}$	$T = \exp^{14,14} V^{-2,02}$	0,996
Céramique Mixte CC650	$V T^{0,206} = 158,937$ (III.4)	$V T^{0.214} = 173,402$ (III.5)	0,976
	$T = \exp^{24,603} V^{-4,854}$	$T = \exp^{24,122} V^{-4,679}$	0,988
Carbure métallique GC3015	$V T^{0,407} = 129,404$ (III.6)	$V T^{0.496} = 201,205$ (III.7)	0,998
	$T = \exp^{11,955} V^{-2,4584}$	$T = \exp^{10,697} V^{-2,017}$	0,996

Les modèles mathématiques trouvés expriment la relation qualitative et quantitative entre la durée de vie des trois outils de coupe et la vitesse de coupe. Ils permettent d'une part de calculer la vitesse de coupe nécessaire pour une durée de vie imposée à l'outil et d'autre part, leur intérêt industriel est grand car ils permettent d'optimiser les conditions de coupe. Les coefficients de détermination sont élevés est convergent vers l'unité ce qui indique qu'ils sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux.
La figure III.20 a été obtenue en se servant des équations du tableau III.1. Elle représente la relation entre la tenue et la vitesse de coupe sur une échelle bi-logarithmiques usuellement connue sous "droite de Taylor". Son intérêt industriel est de taille car elle permet d'établir des abaques et d'optimiser le processus de coupe.

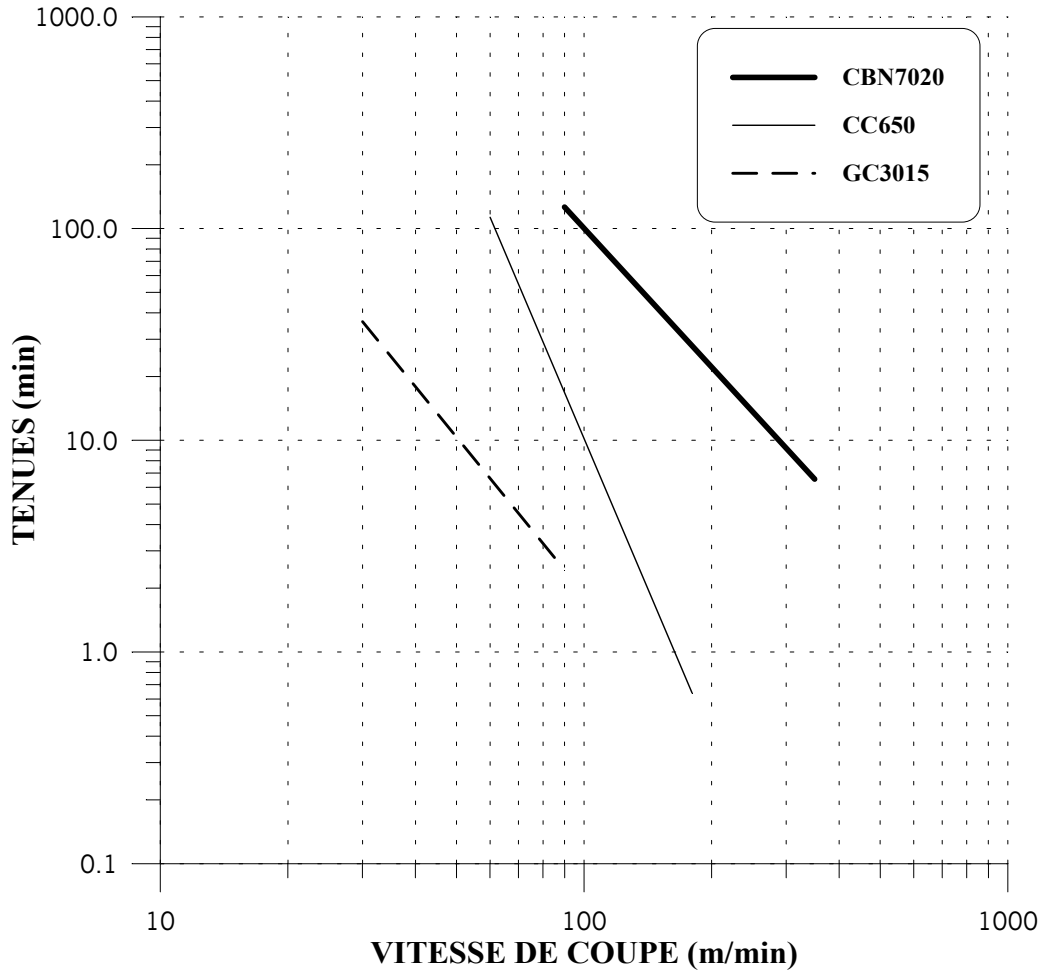


Figure III.20 : *Tenues en fonction de la vitesse de coupe (Droites de Taylor).*

Cette figure montre les tendances de variation des tenues en fonction de la vitesse de coupe pour les trois matériaux à outils testés et pour une usure admissible [VB]=0,3mm. Il en découle que le degré d'influence de la vitesse de coupe sur la tenue est plus significatif lors de l'usinage avec la céramique CC650. Ceci est justifié également par la valeur des exposants de la vitesse de coupe dans les équations du tableau III.I. Le rapport de degré est de 2, 2. L'intérêt économique de ces droites est très important, car elles permettent de déterminer la tenue des matériaux de coupe testés lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 à n'importe quelle vitesse de coupe Choisie et cela sans faire des essais qui sont long est coûteux. La figure III.20 met en évidence également les performances du CBN et de la céramique par rapport au carbure métallique GC3015.

III. 3 Usinage de l'acier Fortement allié X200Cr12

III.3.1 Evolution de l'usure des outils

a) Nitrure de bore cubique CBN7020

Les essais effectués ont permis de déterminer l'évolution des usures VB et KT à différentes vitesses de coupe. Les figures III.21 et III.22 illustrent l'usure en dépouille et en cratère en fonction du temps de coupe pour le CBN7020. L'analyse de ces courbes montre que l'allure de l'usure obéit à la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique (avec une particularité aux grandes vitesses de coupe). Autrement dit cette fonction se caractérise par trois zones principales :

Zone1 : Cette zone correspond aux premières secondes de travail et elle se distingue par une usure intensive, appelée souvent usure initiale ou rodage. Cette grande vitesse d'accroissement de l'usure s'explique par l'élimination des aspérités au niveau de l'arrête de coupe ou à son voisinage.

Zone 2 : Dépassant la zone de rodage, l'usure évolue avec une vitesse relativement plus lente et elle devient plus au moins linéaire. Cette zone est connue dans la littérature par «l'usure normale». Elle se distingue par une grande résistance à l'usure. Au fur et à mesure que l'outil travaille, la température à l'interface outil / pièce et outil / copeau s'élève ce qui favorise l'apparition de la troisième zone.

Zone 3 : L'élévation de la température dans les zones de contact de la partie active de l'outil conduit à l'accélération des mécanismes d'usure par abrasion et par diffusion. Par conséquent, l'usure augmente brusquement et l'outil perd ses qualités de coupe avec une affectation de la rugosité et de la précision dimensionnelle.

L'analyse des courbes d'usure montre également que la vitesse de coupe a une influence capitale sur l'évolution de l'usure. En effet, avec l'augmentation de cette dernière l'usure s'accroît d'une façon remarquable. Cet accroissement brusque de l'usure peut réduire considérablement l'étendue de la zone d'usure normale ($2^{ème}$ zone d'usure) ceci est bien claire sur les figures surtout lors de l'utilisation des vitesses de coupe supérieures ou égale à 180 m/min. En effet, pour l'essai à Vc = 90 et à 120 m/min, la zone de l'usure normale s'étend successivement sur une durée d'environ 43 et 30 min, alors que pour l'essai à Vc = 350 m/min, la zone de l'usure normale est de moins d'une minute (figure III.21).
Afin d'expliquer l'aspect de l'usure de l'outil CBN, deux séries de micrographies de l'évolution de l'usure VB et KT à différentes vitesses de coupe ont été préparées (figure III.23). A la vitesse de 90m/min, on remarque que l'usure VB se manifeste par une bande striée et régulière et KT évoluent lentement et les trois stades de l'usure sont nettement signalés. KT se manifeste par une cuvette proche de l'arête de coupe (figure III.23a). L'usinage est caractérisé par une stabilité, pas d'écaillage sur l'arête de coupe, le copeau obtenu est fragmenté avec des dents de scie. A la fin de l'usinage VB reste toujours régulière et des rayures sur la bande d'usure apparaissent. A 120 m/min, VB se manifeste toujours par une petite bande brillante et régulière. L'outil atteint la valeur admissible de l'usure après 31 min d'usinage avec une rugosité de 0,66µm. A la fin de l'usinage et après 40 min d'usinage VB devient irrégulière et un petit effondrement apparaît à la pointe de l'outil (figure III.23b). A 180 m/min, l'usure

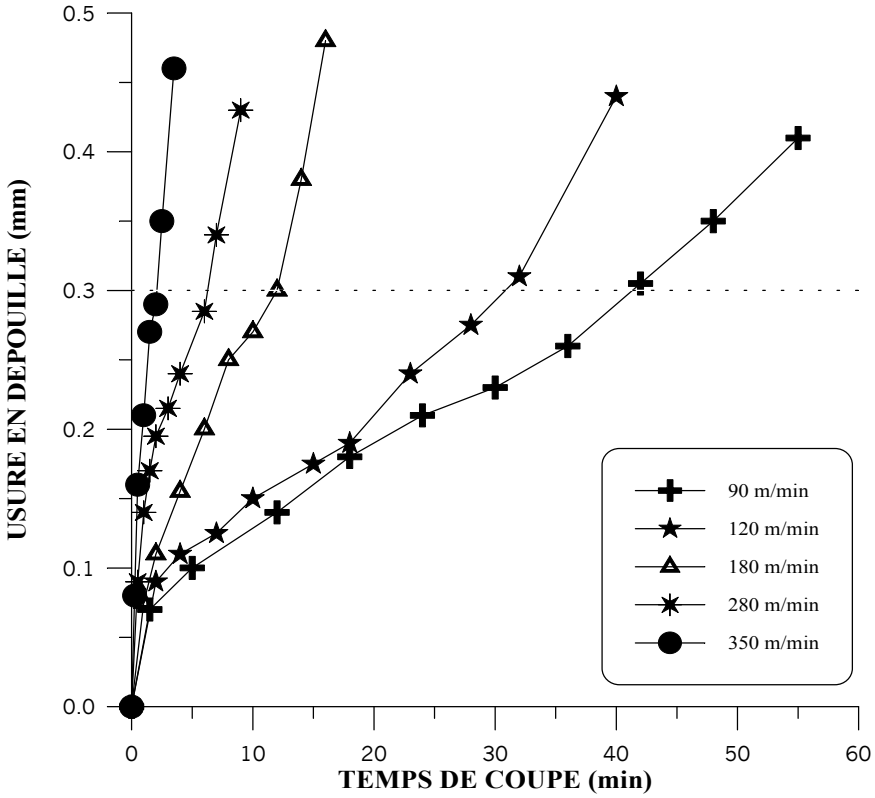


Figure III.21 : *Usure en dépouille (VB) du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12.*

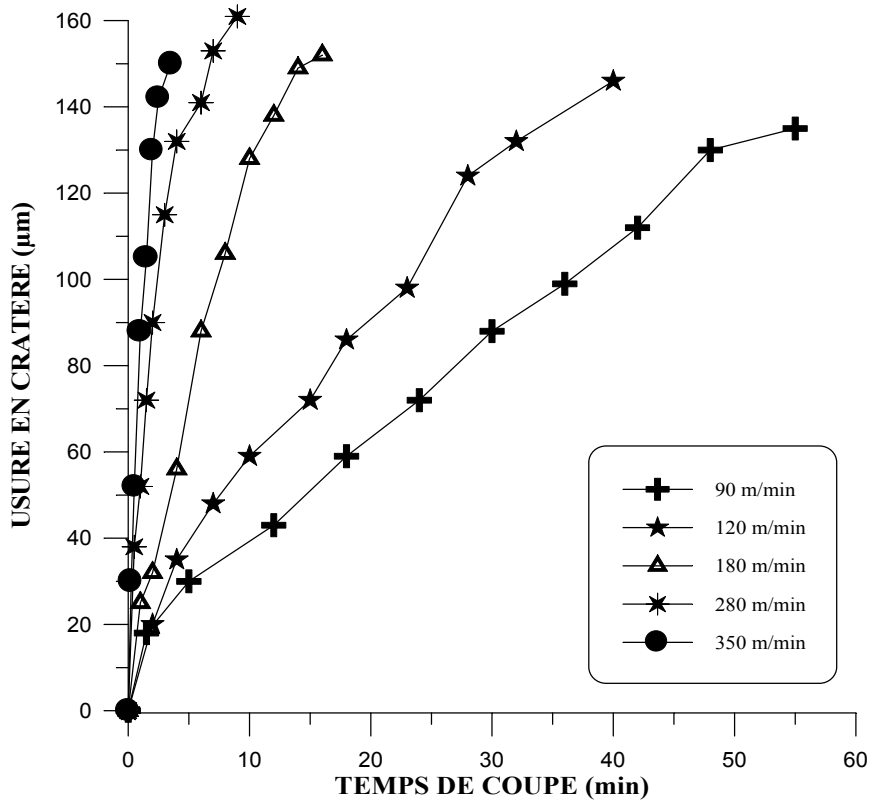
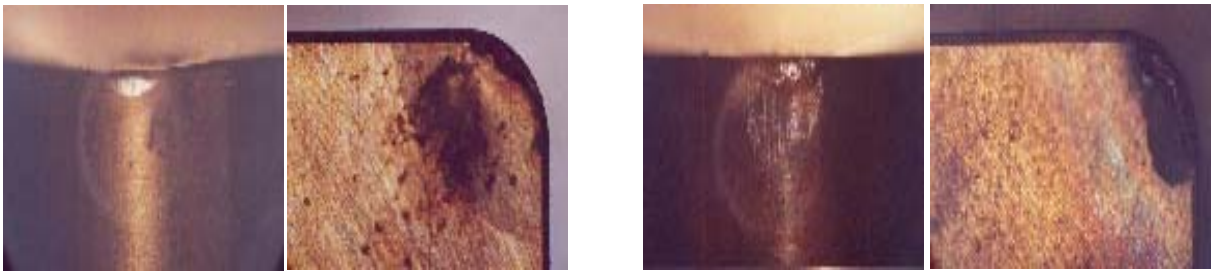


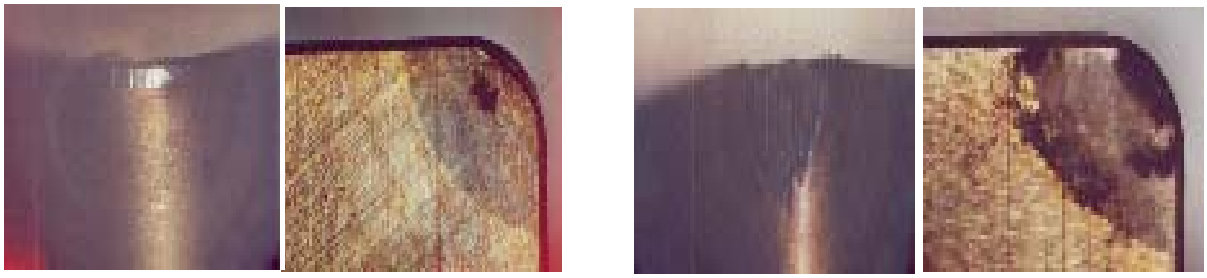
Figure III.22 : *Usure en cratère KT du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12.*



a) t_1= 5 min t_2= 48 min



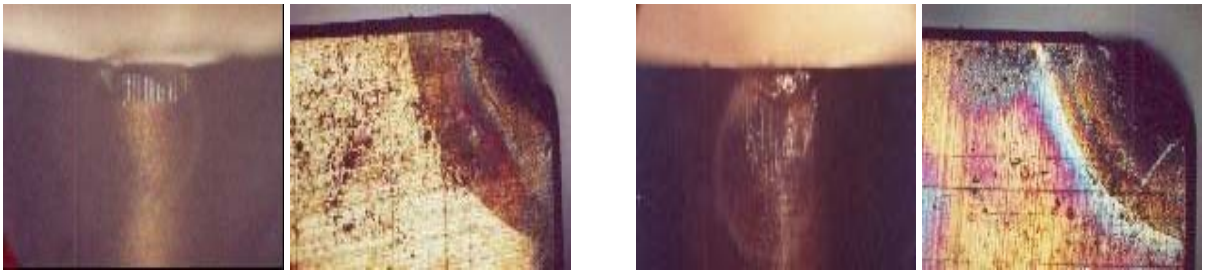
b) t_1= 2 min t_2= 40 min



c) t_1= 2 min t_2= 16 min



d) t_1= 1,5 min t_2= 9 min



e) t_1= 0,5 min t_2= 3,5 min

Figure III.23: *Evolution de l'usure en dépouille et en cratère du CBN 7020 au début et à la fin de l'usinage pour différentes vitesses de coupe: a_p=0,5mm; f=0,08mm/tr a) 90 m/min, b)120 m/min, c) 180 m/min, d) 280 m/min, e) 350 m/min.*

du CBN s'accentue et la tenue enregistrée n'est que de 12 min. Pour [VB]=0,3mm, l'usure en cratère KT ne dépasse pas la valeur de 60µm. Au-delà de la vitesse de 180 m/min et aux vitesses de coupe élevées (280, 350 m/min), le taux de l'usure sur les surfaces en dépouille et en cratère est très important. Par exemple, la tenue du CBN à Vc = 350 m/min est de 2,25 min et avec des valeurs de KT de 150 µm à la fin d'usinage. L'effondrement du bec de l'outil est le résultat de la combinaison de l'usure en dépouille sur le flanc de l'outil et en cratère sur la surface d'attaque. Aux grandes vitesses de coupe (280 et 350m/min), l'usinage est caractérisé par des vibrations, des étincelles, des écaillages sur la plaquette et un écoulement du copeau avec une couleur rouge vive. Ce mode d'endommagement des arêtes de coupe mérite une attention particulière puisqu'il affecte l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce. Ces observations permettent de conclure que les grandes vitesses ne sont pas recommandées pour l'usinage de l'acier X200Cr12 durci à 60 HRC, à cause de l'usure rapide des outils, ce qui entraîne des tenues très courtes qui ne sont pas intéressantes sur le plan industriel **[YAL 05]**.

b) Céramique Mixte CC650

Les figures III.24 et III.25 illustrent l'évolution de l'usure en dépouille et en cratère de la céramique mixte CC650 en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe. Il ressort qu'avec l'augmentation de la vitesse de 60m/min à 90m/min, l'usure s'accroît rapidement ce qui donne lieu à une chute de tenue. La vitesse d'accroissement de l'usure en cratère est relativement faible (KT < 80µm pour les quatre vitesses testées) par rapport à celle de l'usure en dépouille, ce qui permet de considérer cette dernière comme le critère principal de la durée de vie de l'outil. L'usure en dépouille admissible [VB] est illustrée par une ligne horizontale.

La figure III.26 montre la morphologie de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage pour toutes les vitesses de coupe testées. A 60 m/min, la céramique mixte CC650 a montré une faible usure tant en dépouille qu'en cratère, l'outil est exempt de l'effet des contraintes thermomécaniques comme relevé lors des observations microscopiques. Comme illustré dans la figure III.26a, la céramique donne lieu à une usure en dépouille régulière, l'usinage est très stable et l'état de surface et d'une qualité comparable à celui obtenu en rectification. Quand l'usure VB atteint la valeur de 0,3 mm après 82 min d'usinage, la rugosité Ra enregistrée est de 0,65 µm. A son tours l'usure en cratère KT évolue lentement et ne dépasse pas la valeur de 80 µm après 112min d'usinage. A 90 m/min, l'usure VB reste régulière mais évolue à un rythme plus accéléré, l'outil atteint l'usure admissible après 10min d'usinage avec une rugosité Ra de la pièce de 0,76 µm (figure III.26b). A la vitesse de 120m/min les sollicitations thermomécaniques sur l'arête de coupe augmentent et conduisent à une usure rapide, qui donne une tenue de 3,8min (figure III.26c). Au-delà de 120 m/min l'usure de la céramique CC650 s'accentue est se termine par une rupture de l'arête sur la surface d'attaque et un effondrement total du bec de l'outil comme dans le cas de la vitesse limite 180 m/min (figure III.26d). Cette observation nous permet de conclure que la vitesse 180 m/min n'est pas recommander pour l'usinage des aciers traités.

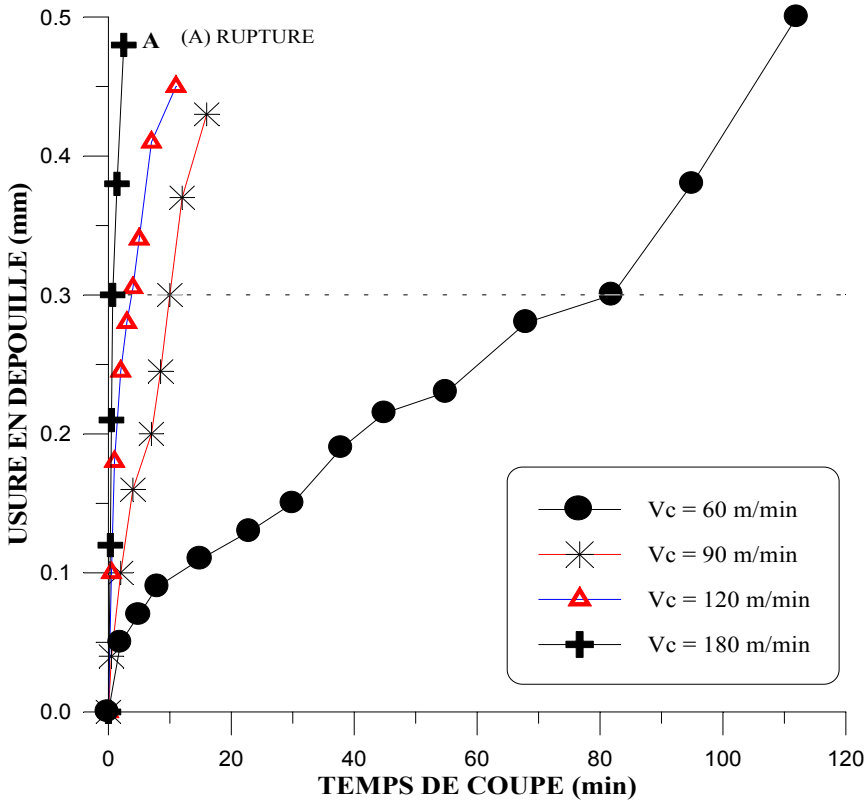


Figure III.24 : *Usure en dépouille (VB) de la céramique CC650 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12.*

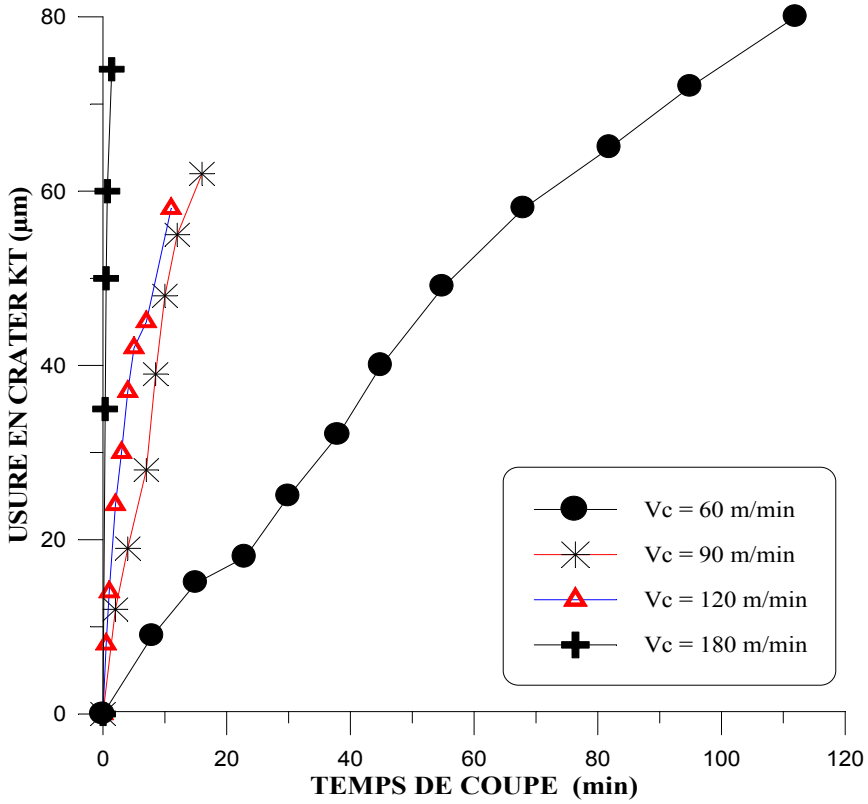


Figure III.25 : *Usure en cratère (KT) de la céramique CC650 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12.*



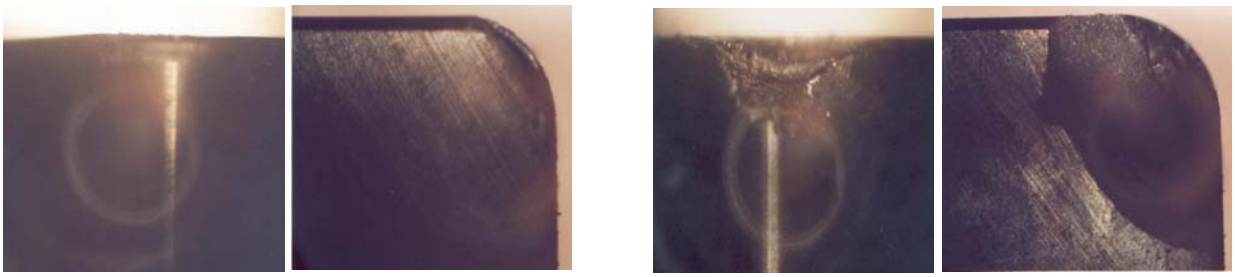
a) t_1= 5 min t_2= 82 min



b) t_1= 2 min t_2= 12 min



c) t_1= 0,5 min t_2= 7 min

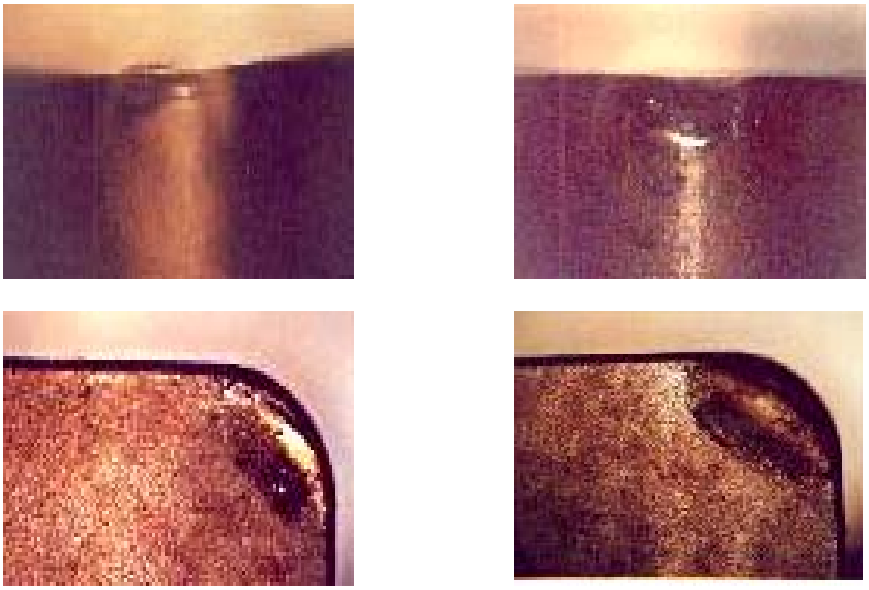


d) t_1= 0,3 min t_2= 2,5 min

Figure III.26 : *Evolution de l'usure en dépouille et en cratère de la céramique mixte CC650 au début et à la fin de l'usinage pour différentes vitesses de coupe: a_p=0,5mm; f=0,08mm/tr a) 60m/min, b) 90m/min, c) 120m/min, d) 180m/min.*

c) Carbure métallique GC3015 (K10)

Les figures III.27 et III.28 présentent l'évolution de l'usure en dépouille VB et en cratère KT du carbure métallique GC3015 en fonction du temps de coupe pour différentes vitesses de coupe. A la vitesse 30 m/min l'usure VB évolue lentement et les trois stades de l'usure sont bien clairs. La vitesse d'accroissement de KT est relativement faible, après 38 min d'usinage KT atteint à pêne les 60 µm. La figure III.29 montre l'aspect final de l'usure VB et KT au début et à la fin d'usinage. Au début d'usinage (figure III.29a), l'usure VB est régulière et se manifeste sous forme d'une bande brillante. Par contre l'usure KT s'annonce sous forme d'un petit cratère. L'usinage à cette vitesse est très stable et l'écoulement du copeau est régulier, fragmenté en dent de scie. Au fur est à mesure que le temps de coupe augmente, VB et KT se développe et prennent de l'ampleur ce qui provoque un petit effondrement au niveau du bec de l'outil après 38 min d'usinage (figure III.29b).



a **b**

Figure III.29 : *Aspect de l'usure VB et KT : a) début d'usinage, b) après 38min d'usinage à Vc=30m/min, f=0,08mm/tr, a_p=0,5mm.*

A la vitesse de 60 m/min, les sollicitations thermomécaniques sur l'outil augmentent et l'usure VB et KT évoluent à un rythme beaucoup plus accentué. L'usure VB se manifeste au début par un léger plat et l'usure KT se manifeste sous forme d'une petite cuvette dés les premières minutes d'usinage. L'usure admissible [VB] est atteinte après seulement 4,5 min de travail avec une usure KT de 85 µm. Après 6 min (figure III.30a) de travail on remarque l'apparition d'une arête rapportée sur le bec de l'outil (figure III.30b). Cette dernière se manifeste sous forme de micro-copeaux qui se tassent et se logent à l'emplacement de l'effondrement du bec de l'outil et constitue une arête rapportée, ce qui explique la dégradation de l'état de surface à cette période de travail.

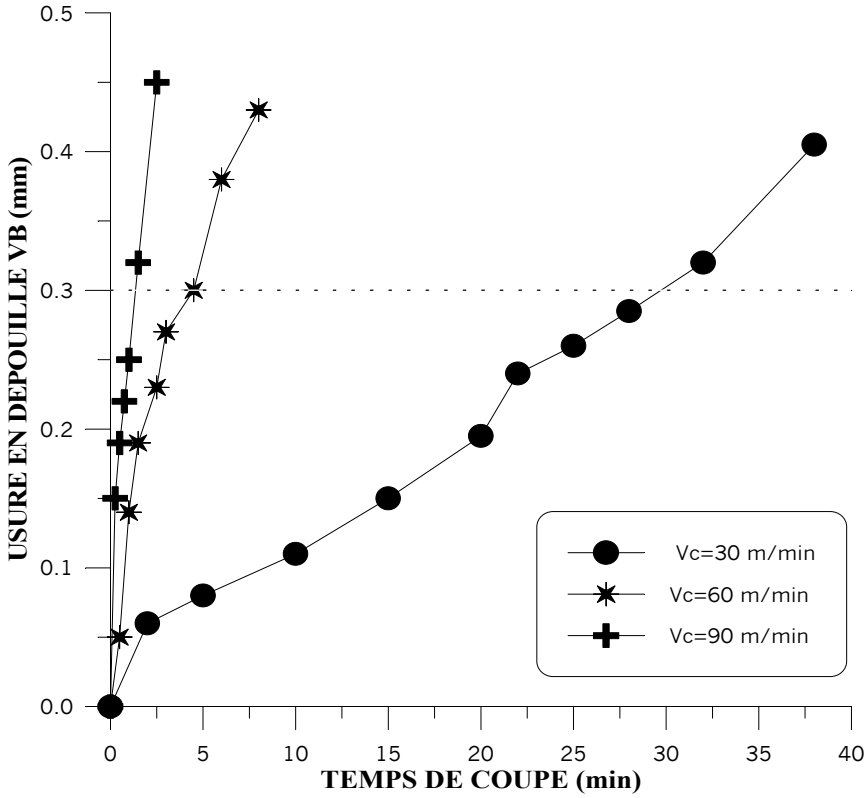


Figure III.27: *Usure en dépouille (VB) du GC3015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12.*

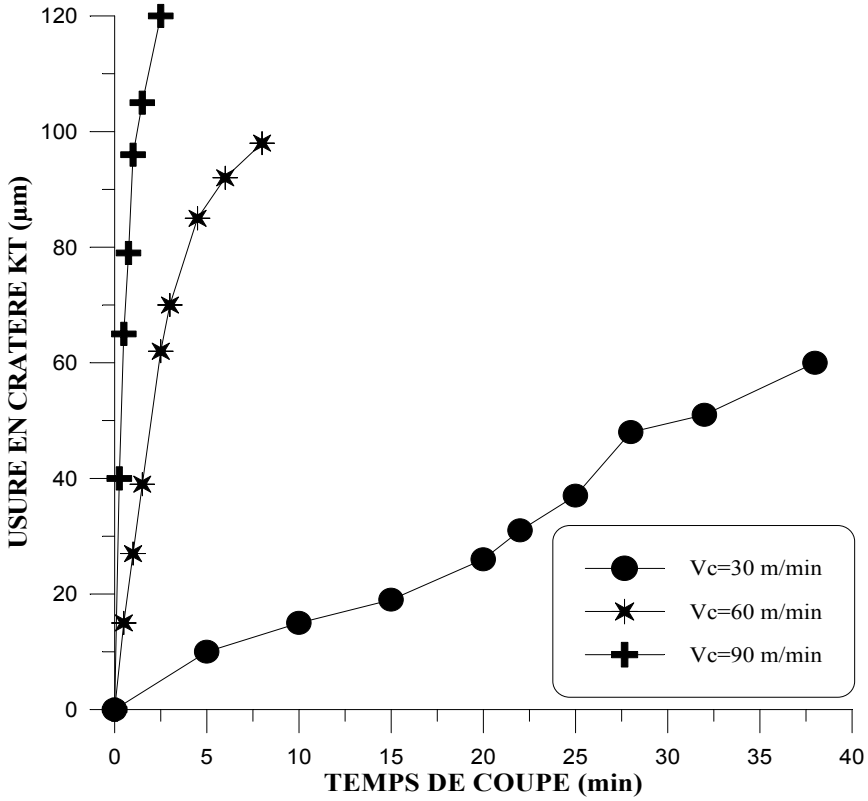
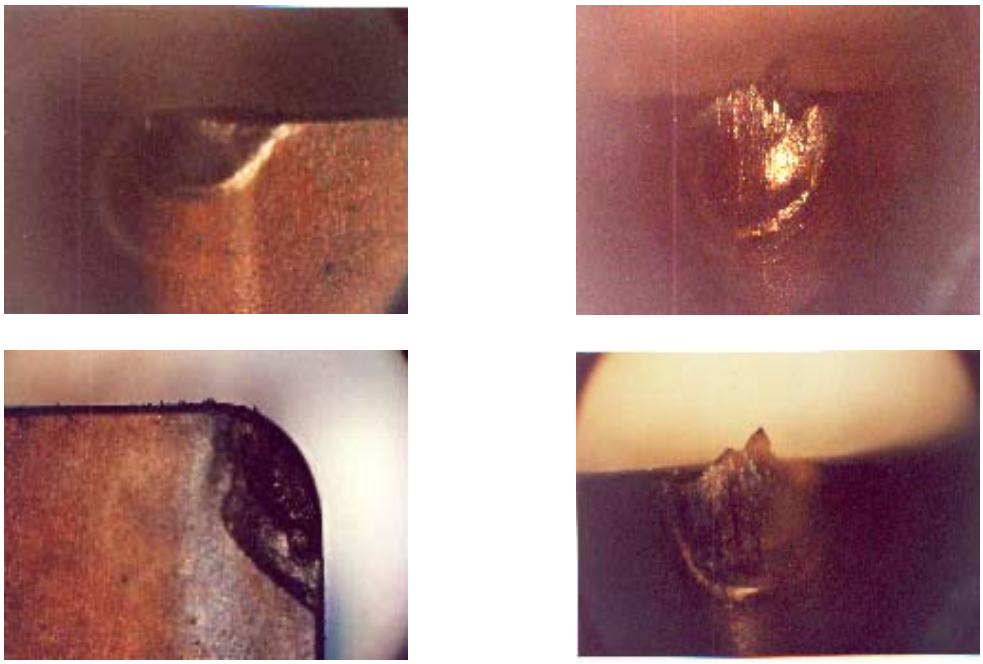


Figure III.28: *Usure en cratère (KT) du GC3015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage du X200Cr12.*



a **b**

Figure III.30 *: Micrographies de l'usure VB et KT à V_c=60m/min, f=0,08mm/tr et a_p=0,5mm. Temps d'usinage; a) 6min, b) 8min.*

A 90 m/min l'usinage devient instable, un écoulement du copeau de couleur rouge vive s'écoule dans tous les sens. Un effondrement du bec de l'outil survient après 1,5 min de travail et une rupture est observée sur la surface d'attaque de la plaquette (figure III.31). On remarque aussi le détachement du revêtement sur la surface en dépouille et cela peut être expliqué par les pressions et les températures intenses qui règnent à la pointe de l'outil. A cette vitesse la tenue de l'outil est de 1,3 min avec une valeur de l'usure en cratère qui avoisine 120 µm.
D'après ces essais d'usure il ressort que la vitesse limite d'utilisation du carbure métallique GC3015 lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 est de 60 m/min. Au-delà de cette valeur les tenues sont très faibles et par conséquent elles sont pratiquement inexploitables.

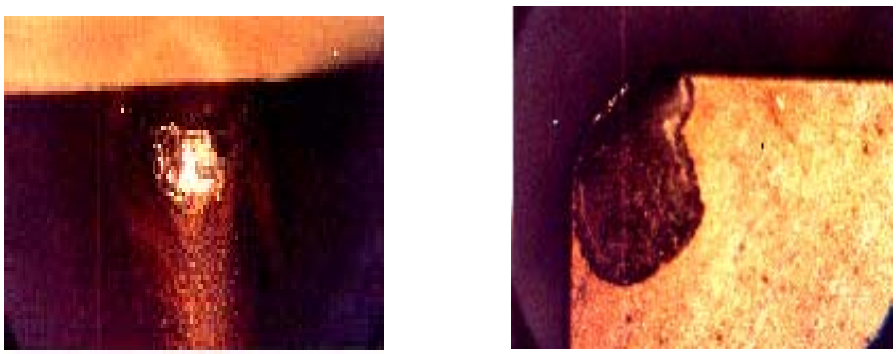


Figure III.31 : *Aspect de l'usure VB et KT après 2,5min d'usinage à Vc=90m/min, f=0,08mm/tr, a_p=0,5mm.*

III.3.2 Tenues des outils

Le traitement graphique des résultats de l'usure en dépouille (VB) (figures III.21, III.24 et III.27) en fonction du temps pour les différentes vitesses de coupe retenues à permis la détermination des tenues des trois matériaux à outils testés. Il est à noter que la tenue (T) a été déterminée en se basant uniquement sur l'usure en dépouille car la vitesse d'accroissement de celle-ci par rapport à celle de l'usure en cratère est nettement plus grande. Les valeurs des tenues trouvées sont résumées dans la figure III.32 pour le CBN, la figure III.33 pour la céramique CC650 et la figure III.34 pour le carbure GC3015. Ces tenues sont déterminées à partir de deux critères d'usure admissible [VB]=0,3mm et [VB]=0,4mm. Ceci est ainsi car à 0,4mm, aucune anomalie d'usinage n'est observée. Il est entendu par anomalie l'apparition de vibrations au niveau du système usinant, la dégradation de l'état de surface de la pièce usinée ou l'imprécision dimensionnelle remarquable. Par conséquent, cette approche nous permet de dire que pendant les opérations de semi-finition et d'ébauche ou les exigences envers la précision et le fini ne sont pas aussi sévères comme dans le cas de celles de finition, on peut recommander dans ces conditions d'augmenter la valeur admissible de l'usure. A cet effet, la tenue de l'outil devient plus grande et par conséquent la productivité du travail augmente.

L'analyse des résultats montre que la durée de vie est très sensible à la variation de la vitesse de coupe. Cette analyse peut être également menée en considérant l'effet des rapports d'augmentation successive des vitesses de coupe sur les durées de vie correspondantes (tableau III.2).

Tableau III.2 *: Effets des différentes plages de vitesses de coupe sur la durée de vie du CBN pour [VB] = 0,3 mm.*

Rapport d'augmentation successive des vitesses de coupe		Rapport des tenues		Plage de variation de la vitesse (m/min)
V_2/V_1	1,33	T_2/T_1	0,71	Vc = [90 – 120]
V_3/V_2	1,50	T_3/T_2	0,38	Vc = [120 – 180]
V_4/V_3	1,55	T_4/T_3	0,52	Vc = [180 – 280]
V_5/V_4	1,25	T_5/T_4	0,36	Vc = [280 – 350]

L'analyse des résultats du CBN (figure III.32), montre que pour les vitesses de coupe [90 à 120] m/min et quand le rapport des vitesses est égal à 1,33 la durée de vie de l'outil chute de 29 %. On constate également qu'en travaillant avec les vitesses de coupe appartenant à une plage de vitesse élevée [120 à 180] m/min et que ces dernières varient dans un rapport de 1,5 fois, la durée de vie chute de 62 %. Pour les deux autres plages de vitesses plus élevées [180 à 280], [280 – 350] où les rapports des vitesses de coupe sont respectifs 1,55 et 1,25 les durées de vie correspondantes subissent des réductions de 48 % et 64 %. Il ressort de cette analyse que l'effet de la

vitesse de coupe sur la durée de vie est plus marqué pour les plages de vitesses élevées.
L'analyse des résultats des tenues de la céramique CC650 (figure III.33), montre que l'effet de la vitesse de coupe peut être interprété par la comparaison des ratios des tenues. Pour la céramique CC650, le rapport T_{60}/T_{90} est de 8,2 alors que T_{90}/T_{120} n'est que de 2,63. Dans le cas de la vitesse 180 m/min, la plaquette n'a pas pu contenir l'effet de l'énergie dégagée à cause du cisaillement et de la chaleur pour se rompre au bout de 1,2 minutes d'usinage. L'analyse des résultats des tenues du carbure GCC3015 (figure III.34), montre l'impact de la vitesse de coupe sur la tenue de l'outil. Le rapport des tenues T_{30}/T_{60} est de 6,66 alors que pour T_{30}/T_{90} est à son maximum avec une valeur de 23 indiquant une chute de tenue importante.
La figure III.35 illustre la plage de comparaison des tenues pour les mêmes vitesses de coupe pour les trois matériaux de coupe testés. Il ressort que les ratios (T_{CBN}/T_{CC650}), (T_{CBN}/T_{GC3015}), (T_{CC650}/T_{GC3015}) à la vitesse de 90 m/min est successivement de 4,37, 33,65 et 7,7. Pour la vitesse de coupe de 120 m/min le ratio (T_{CBN}/T_{CC650}) augmente et prend la valeur 8,15. Par contre à la vitesse 180 m/min, le ratio (T_{CBN}/T_{CC650}) s'envole à une valeur maximale de 17,14. A la vitesse de 60 m/min, le ratio (T_{CC650}/T_{GC3015}) est de 18,22. Cette comparaison des tenues entre les trois matériaux de coupe aux même vitesses de coupe, confirme la supériorité du CBN par rapport à la céramique CC650 et au carbure GC3015 surtout aux grandes vitesses de coupe. Plus la vitesse de coupe augmente plus l'écart entre les tenues des matériaux de coupe devient grand. L'explication de cette supériorité réside dans le fait que le CBN se caractérise par la haute rigidité et la tenue exceptionnelle de ses arêtes de coupe, ainsi que sa dureté accrue et sa stabilité chimique aux températures élevées. C'est pourquoi ce matériau de coupe devient incontournable lors de l'usinage de finition des pièces dures.

Bien que les facettes de comparaison soient multiples, l'intérêt est de taille pour les aspects de production en condition de tournage dur par des matériaux à outil tels que la céramique mixte, le nitrure de bore cubique et le carbure métallique. En effet, l'influence de la vitesse de coupe sur la productivité, exprimée en longueur de copeau enlevé est illustrée dans la figure III.36. Le temps durant lequel est produite cette longueur de copeau (L) est égal à la durée de vie (T) correspondante à chaque vitesse de coupe (Vc) testée. Elle est calculée d'après l'expression (III.1) déjà citée. Il ressort de ces résultats qu'à la vitesse 90 m/min le CBN7020 produit 3915 mètres de copeau, la céramique CC650 produit 900 mètres, alors que le carbure GC3015 n'arrive à enlever que 117 mètres. A la vitesse de 120m/min le CBN7020 produit 3720 mètres de copeau alors que la céramique CC650 ne produit que 456 mètres à la vitesse de 180 m/min le CBN produit 2160 mètres de copeau alors que la céramique CC650 n'arrive à enlever que 126 mètres de copeau. Enfin si on compare la céramique avec le carbure à la vitesse de 60 m/min, ils produisent successivement 4920 et 900 m de copeau. De ce fait, il découle que le CBN est nettement plus productif que la céramique et le carbure. Si on compare la longueur de copeau enlevé par le CBN, pour les deux critères d'usure admissible [VB]=0,3 mm et 0,4 mm (figure III.37), on remarque à [VB]=0,4 mm et pour les vitesses (90; 120; 180; 280; 350) m/min, le débit de copeau produit est successivement (4837,3; 4500; 2610; 2240, 1050) mètres. Cela représente un gain de productivité pour chaque vitesse de (19,1%; 17,34%; 17,34%; 21,9%; 25%).

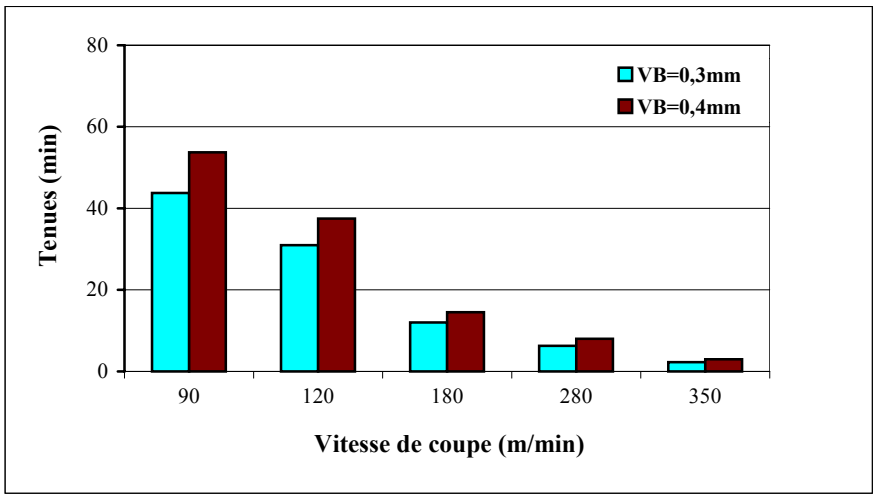


Figure III. 32 : *Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe du CBN7020.*

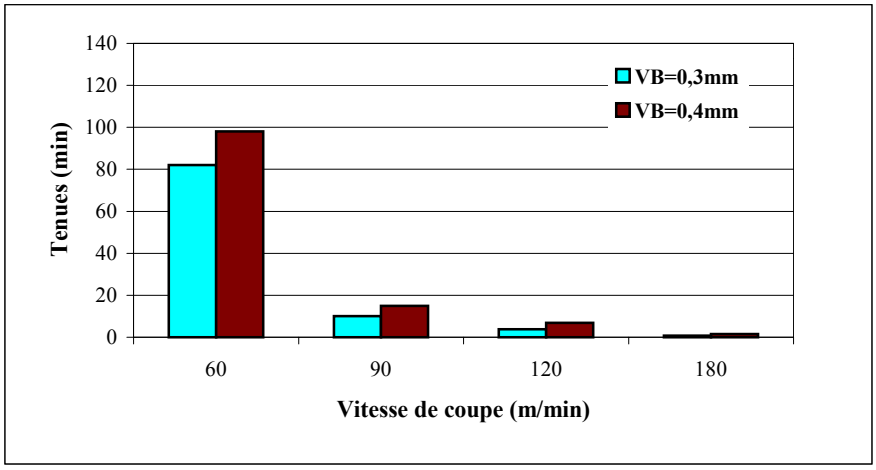


Figure III.33 : *Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe de la CC650.*

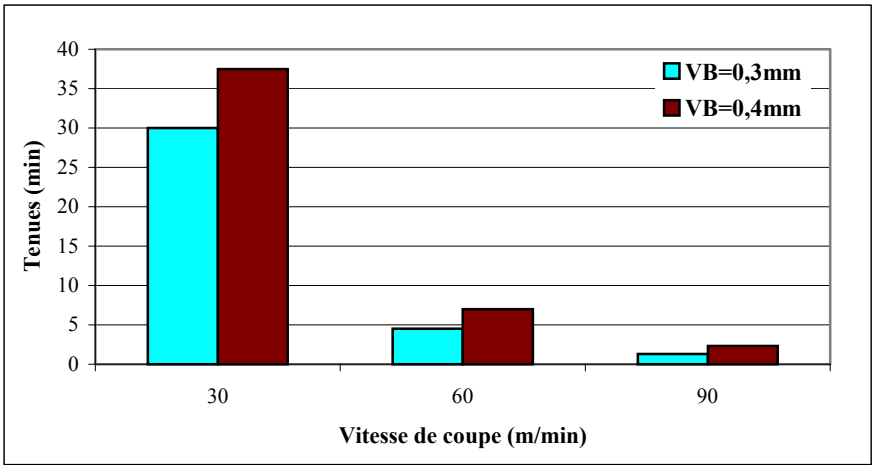


Figure III.34 : *Tenues expérimentales à différentes vitesses de coupe du GC3015.*

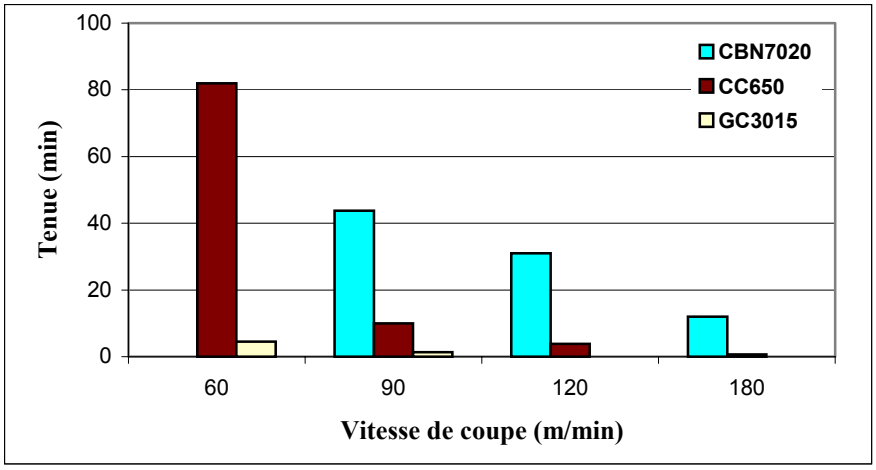


Figure III.35 : *Plage de comparaison des tenues des trois matériaux de coupe.*

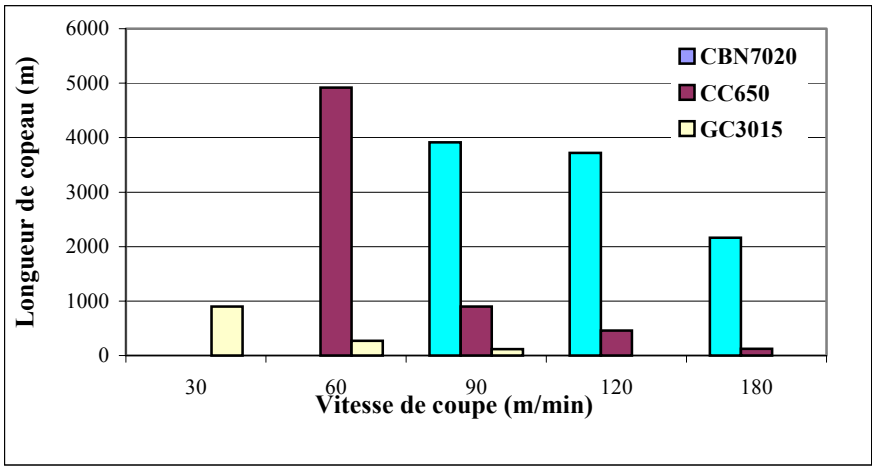


Figure III.36 : *Comparaison entre la longueur du copeau enlevé par les trois matériaux de coupe.*

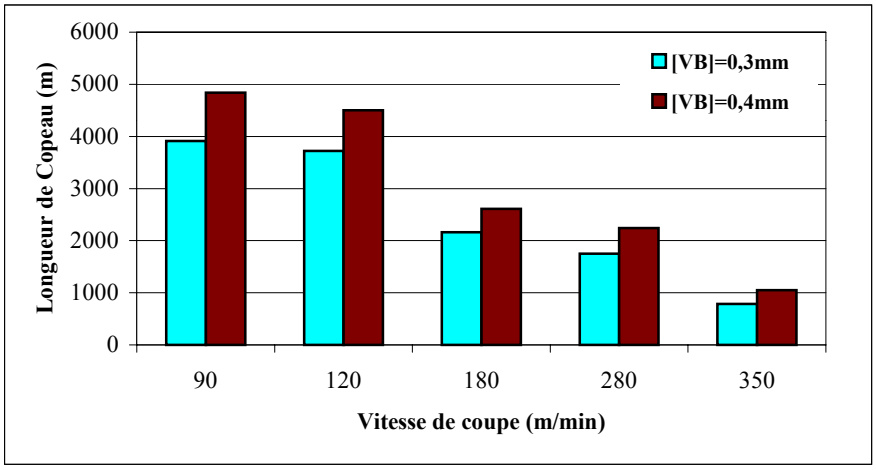


Figure III.37 : *Longueur du copeau enlevé par le CBN pour [VB]=0,3 et 0,4 mm.*

III.3.3 Modèle de la tenue

Le traitement des résultats par la méthode des moindres carrées des valeurs des tenues (figures III.32, III.33 et III.34) a permis l'établissement des modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe pour [VB] = 0,3 mm et 0,4 mm (tableau III.3).

Tableau III.3: *Modèles Mathématiques obtenus.*

Matériaux de Coupe	Modèle de Taylor sous ses deux formes [VB]=0,3mm	Modèle de Taylor sous ses deux formes [VB]=0,4mm	R^2
Nitrure de bore cubique CBN7020	$V\,T^{0,478} = 586,582$ (III.6)	$V\,T^{0,492} = 678,749$ (III.7)	0,986
	$T = \exp^{13,336}\,V^{-2,589}$	$T = \exp^{13,241}\,V^{-2,031}$	0,984
Céramique Mixte CC650	$V\,T^{0,223} = 157,419$ (III.8)	$V\,T^{0,258} = 191,119$ (III.9)	0,952
	$T = \exp^{22,670}\,V^{-4,481}$	$T = \exp^{20,385}\,V^{-3,881}$	0,964
Carbure métallique GC3015	$V\,T^{0,352} = 99,893$ (III.10)	$V\,T^{0,396} = 126,817$ (III.11)	0,998
	$T = \exp^{13,095}\,V^{-2,844}$	$T = \exp^{12,242}\,V^{-2,528}$	0,987

Les modèles mathématiques déterminés (tableau III.3), montrent la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie des trois matériaux de coupe. Ils permettent donc de déterminer, pour des conditions de coupe stabilisées la vitesse de coupe à utiliser en fonction de la durée de vie souhaitée. Selon ces modèles, la vitesse de coupe a une influence capitale sur la durée de vie des outils. Avec son augmentation la tenue des matériaux de coupe testés diminue. Ces modèles sont très utiles pour l'élaboration des abaques et aussi pour l'optimisation éventuelle du processus de coupe. Les coefficients de détermination des modèles trouvés sont élevés et convergent vers l'unité, ce qui traduit la bonne corrélation avec les résultats expérimentaux. En se servant des équations III.6 à III.11, on peut tracer les droites, connues sous «droite de Taylor » pour les deux critères d'usure [VB]=0,3mm, et [VB]=0,4mm et cela sur une échelle bi-logarithmique.

III.4 Température de coupe

Le but de ce paragraphe n'étant pas d'étudier systématiquement les variations de la température de coupe en fonction de tous les paramètres de base de la coupe. Nous avons choisi d'observer essentiellement la variation de la température en fonction de la vitesse de coupe. Cette dernière semble être l'un des paramètres les plus déterminants sur la température de coupe et sur l'usure des outils.

Lors de l'usinage des aciers 100Cr6 et X200Cr12 traités à 60HRC par le CBN et la céramique CC650, la coupe est caractérisée par un écoulement de copeau très chaud de couleur rouge. Cette quantité de chaleur dégagée est le résultat des frottements, des déformations plastiques intenses et des cisaillements. Les figures III.38 et III.39 mettent en évidence l'effet de la vitesse de coupe sur le dégagement de chaleur dans la zone de coupe lors de l'usinage du 100Cr6. La majeure partie de la quantité de chaleur est évacuée à travers le copeau. Ceci s'explique par le fait que le copeau en plus du frottement, il subit des déformations plastiques très intenses pour un volume relativement plus faible par rapport à celui de la pièce et de l'outil. A cet égard, les mesures des températures par pyromètre infrarouge indiquent qu'en usinant avec la céramique CC650 et à la vitesse de coupe 180 m/min, la température du copeau est 707°C, celle mesurée sur la pièce est de 42°C et enfin celle de l'outil est de 84°C. Pour le CBN7020 et à 220 m/min, la température du copeau est de 890°C, celle sur la surface d'attaque de l'outil est de 150°, alors que sur la pièce elle ne dépasse pas les 60°C. A titre Comparatif, il est clair que la majeure partie de la quantité de chaleur générée est évacuée par le copeau. Cette observation est confirmée dans la littérature par plusieurs auteurs pour le cas des aciers comme le 100Cr6 et l'Inconel 718 **[O'SU 01]**, **[BAC 99]**, **[GEI 99]**.

La figure III.40 illustre l'évolution de la température de coupe en fonction du temps d'usinage et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 par le CBN7020. A la vitesse de 90 m/min les températures maximales enregistrées sont de 574°C sur le copeau, 95°C sur l'outil et 46°C sur la pièce et cela pour une durée de coupe de 8 min. On remarque qu'à partir de 4 min d'usinage la température du copeau commence à se stabiliser et évolue lentement (figure III.40a). A 180 m/min les températures maximales enregistrées sont de 620°C sur le copeau, 80°C sur l'outil et 45°C sur la pièce et cela pour une durée de coupe de 4 min (figure III.40b). A 220 m/min les sollicitations thermomécaniques augmentent ce qui engendre une élévation de la température sur le copeau de 870°C, 110°C sur l'outil et 55°C sur la pièce au voisinage de la zone de coupe et cela pour un temps d'usinage de 2 min. Le rapport t°copeau/t°pièce est de 15,8 ce qui montre clairement que la quantité de chaleur produite est dégagée par le copeau, les échanges thermiques avec la pièce sont minimes. Il ressort aussi de la figure III.40, que les trois paramètres (vitesse, température et usure) sont étroitement liés entre eux, car l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une élévation de la température de coupe et la diffusion de la chaleur dans l'outil diminue ses caractéristiques mécaniques et accélère son usure par conséquent la tenue de l'outil sera affectée. De nombreux chercheurs **[AMR 87]**, **[WEI 77]**, **[GEI 99]** pensent que le suivi de la température de coupe, peut fournir de précieux renseignements sur l'importance des effets thermiques associés à la coupe, notamment en ce qui concerne la tenue de l'outil.

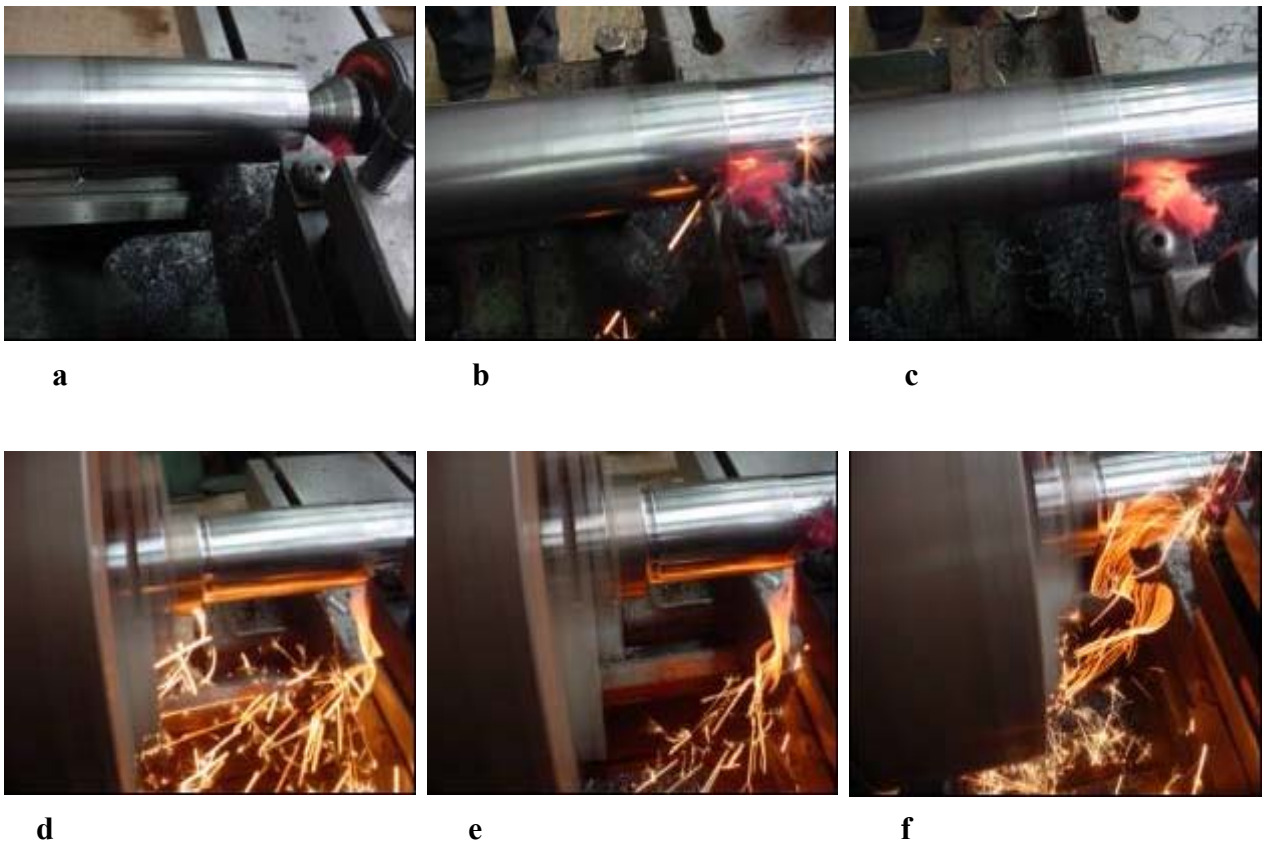


Figure III.38 : *Évacuation de la chaleur par le copeau durant l'usinage du 100Cr6 avec la Céramique CC650 à 180m/min (a-c) et le CBN7020 à 220m/min (d-f).*

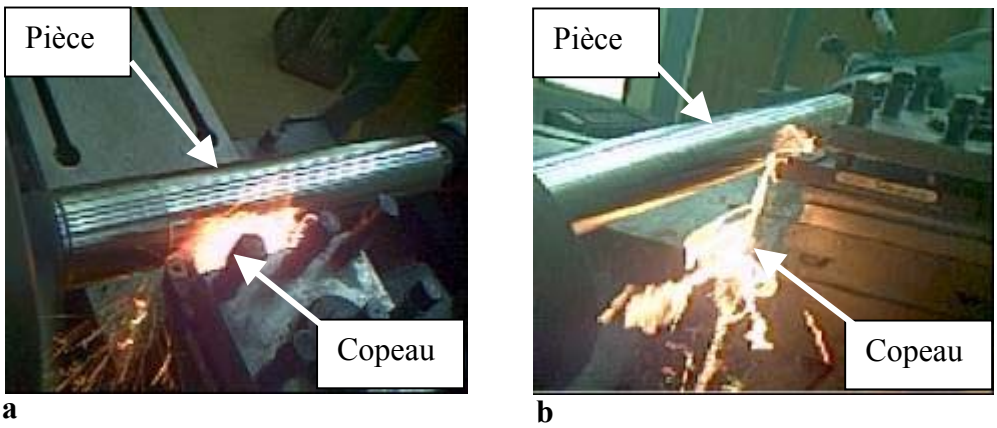
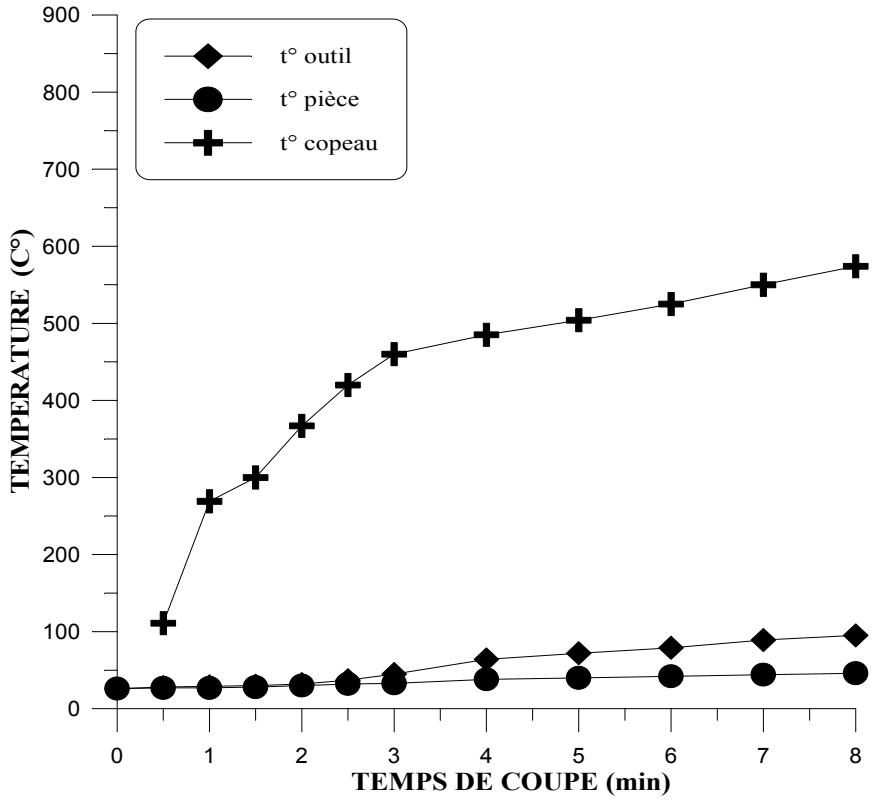
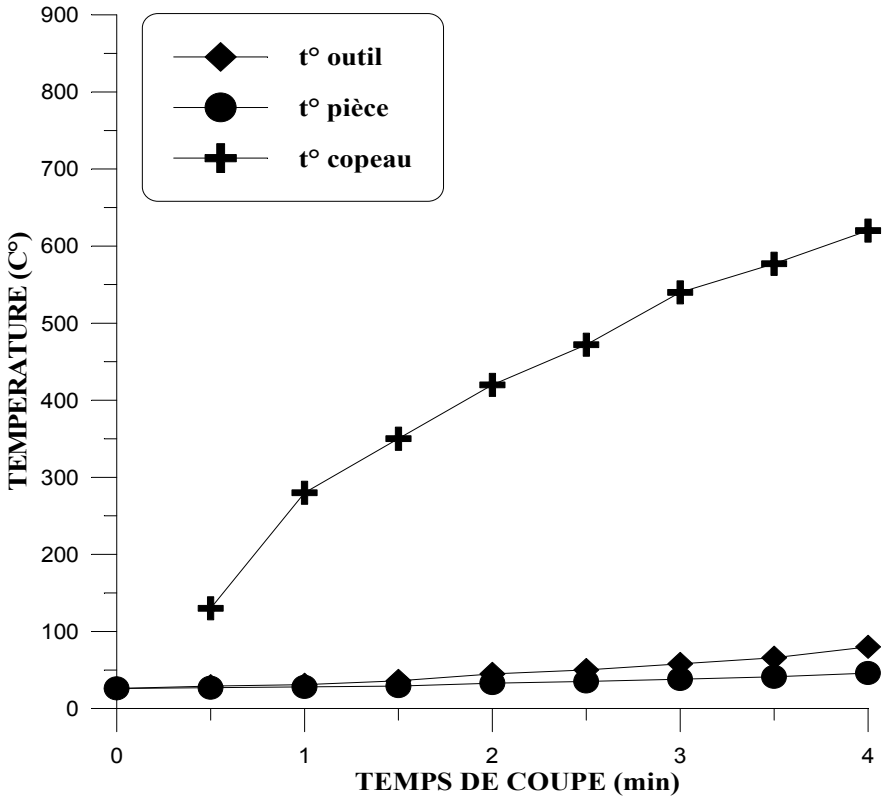


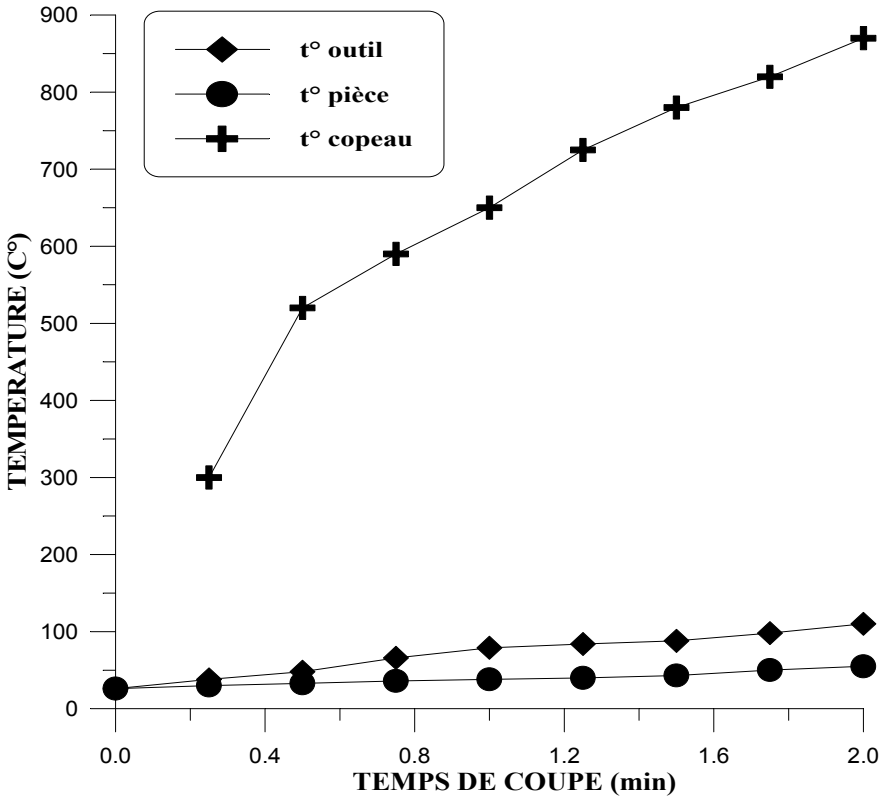
Figure III.39 : *Évacuation de la chaleur par le copeau durant l'usinage du 100Cr6 avec le CBN7020 a) 120m/min, b) 280m/min.*



a) Vc = 90m/min



b) Vc = 180m/min



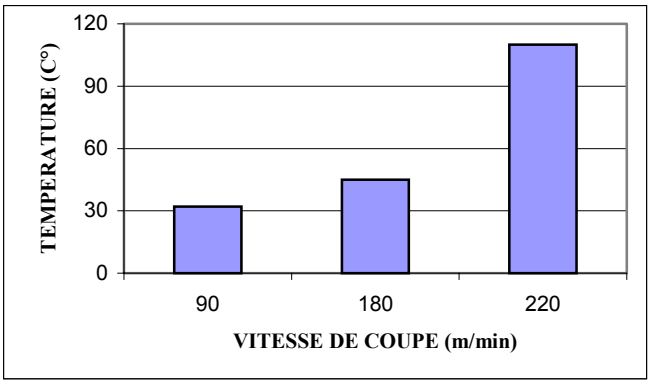
c) Vc = 220m/min

Figure III.40 : *Evolution de la température de coupe en fonction du temps à différentes vitesses de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 avec le CBN; a_p=0,5mm ; f=0,08mm/tr.*

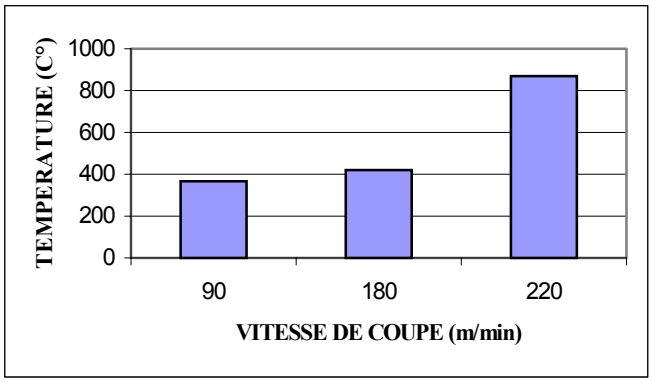
La figure III.41 présente les valeurs des températures (outil, copeau, pièce) enregistrées durant l'usinage de l'acier 100Cr6 par le CBN7020 pour un temps de coupe de 2 min. Il ressort que l'augmentation de la vitesse de coupe engendre une augmentation des frottements et des déformations ce qui élève la température dans la zone de coupe. La majorité de la chaleur dégagée du processus de coupe est évacuée par le copeau, les échanges thermiques avec la pièce sont minimes. Cela a pour effet d'éviter la dilatation thermique de la pièce, c'est à dire, elle ne sera pas affectée thermiquement. En pratique, les conséquences de l'influence de la vitesse de coupe sur la température sont comme suit :

- Une élévation de la vitesse de coupe de 90 à 180 m/min, conduit à une élévation de la température (outil, copeau, pièce) respectivement de (40,6% ; 14,4% ;10%).
- Une élévation de la vitesse de coupe de 180 à 220 m/min, conduit à une élévation de la température (outil, copeau, pièce) respectivement de (144% ; 107,1% ;66,6%).

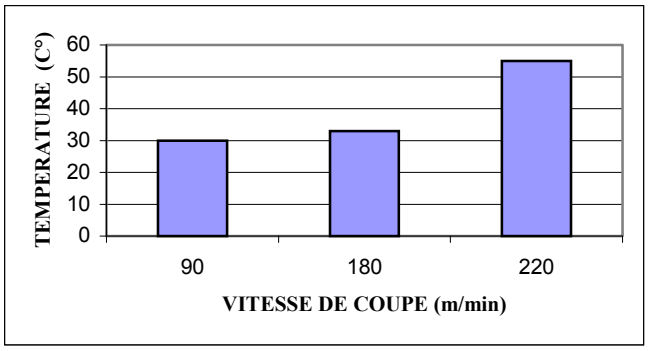
Les figures III.42 et III.43 montrent le suivi d'une séquence d'usinage de l'acier X200Cr12 par le CBN7020 et la céramique CC650. Il ressort de ces figures que la majorité de la quantité de chaleur est effectivement évacuée par le copeau et que la morphologie du copeau change au cours de l'usinage, ce qui nous permet de dire que la température de coupe et l'usure influent sur la morphologie du copeau.



a) Température de coupe sur la face d'attaque de l'outil



b) Température de coupe sur le copeau



c) Température de coupe sur la pièce usinée

Figure III.41*: Température de coupe en fonction de la vitesse de coupe pendant 2min d'usinage de l'acier 100Cr6 avec le CBN.*

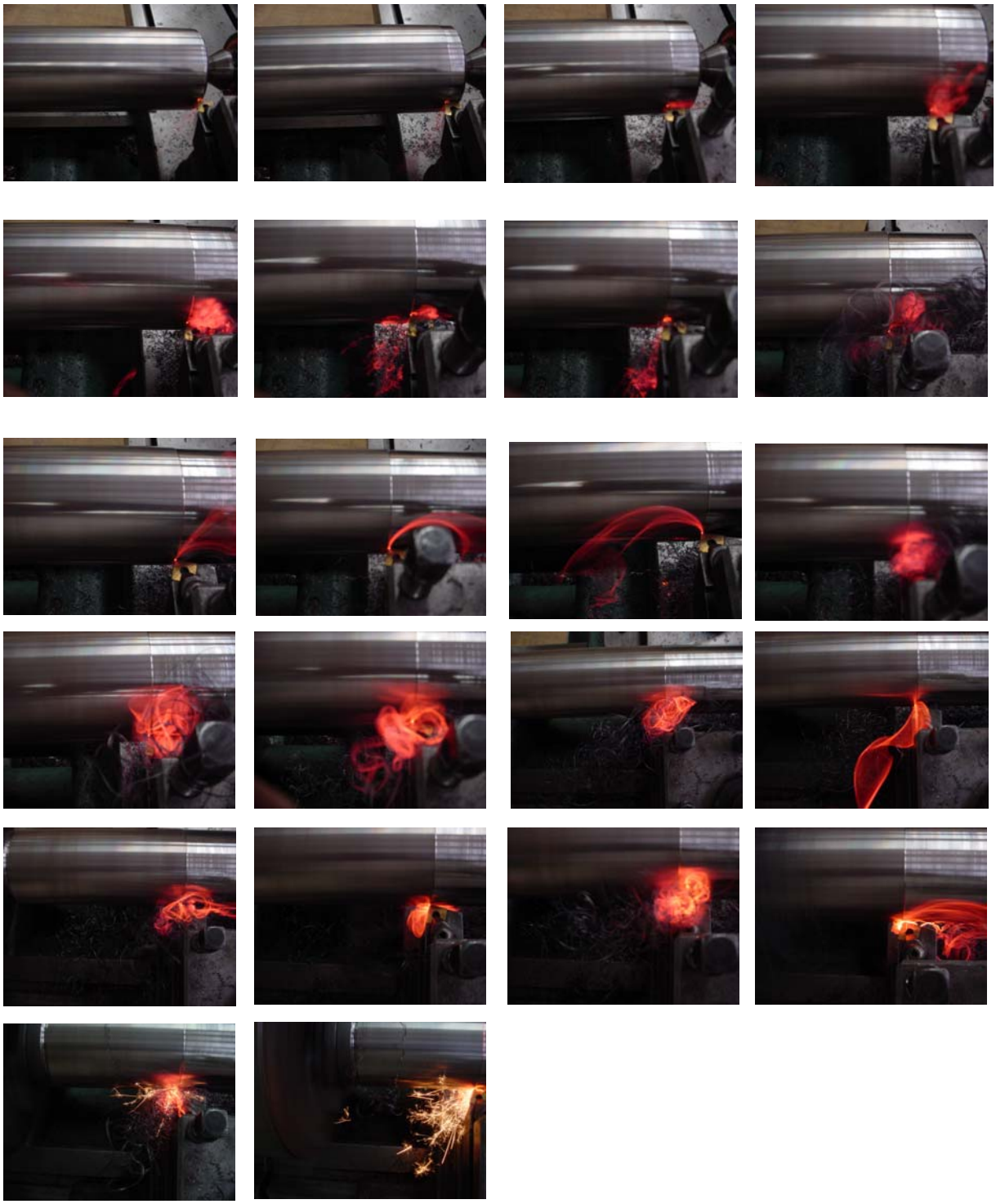


Figure III.42 : *Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 par le CBN7020, temps de coupe=1,8min ;Vc=280m/min, a_p=0,5mm,; f=0,08mm/tr ; t°copeau=895°C , t°outil=158°C , t°pièce=64°C.*

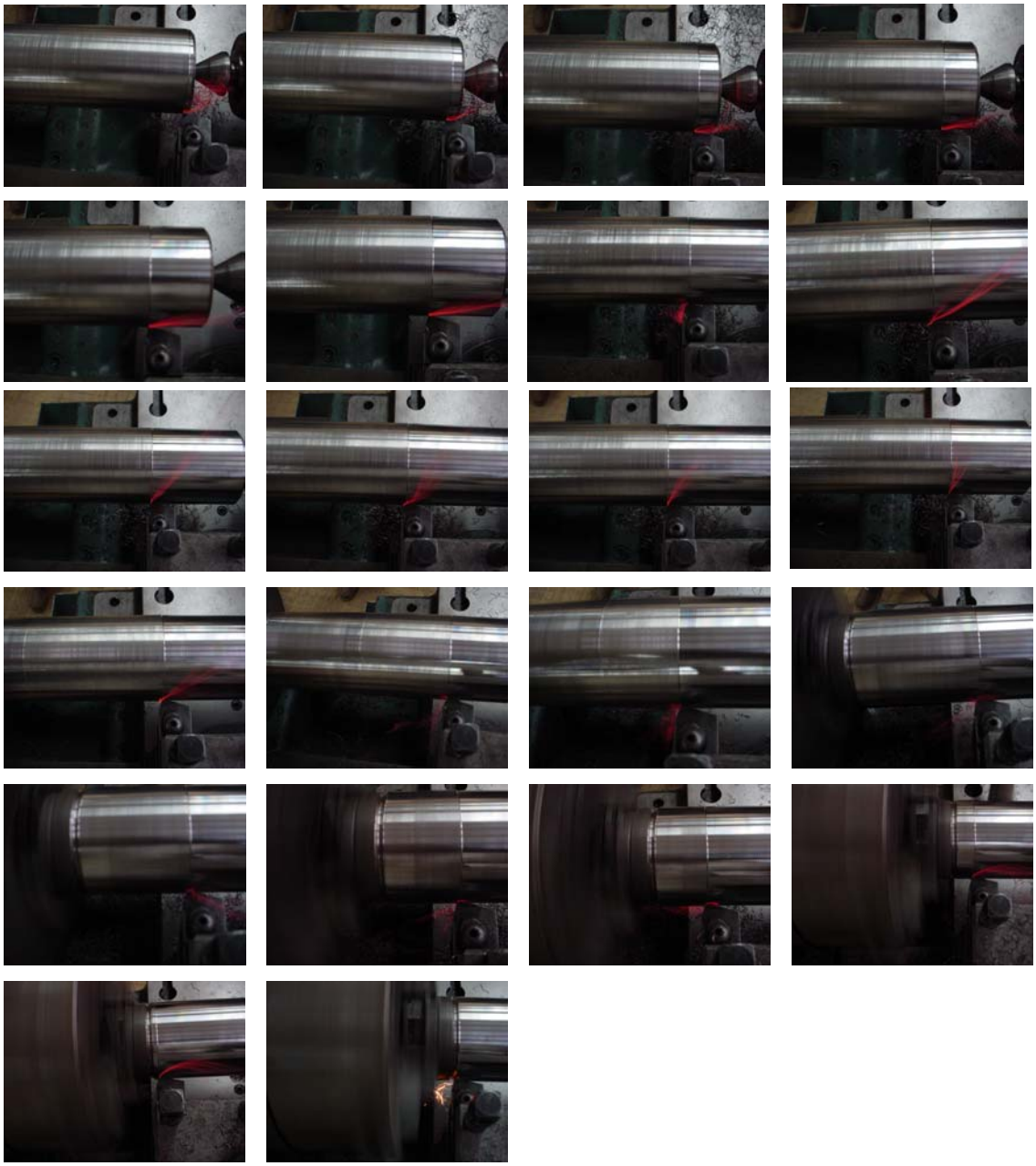
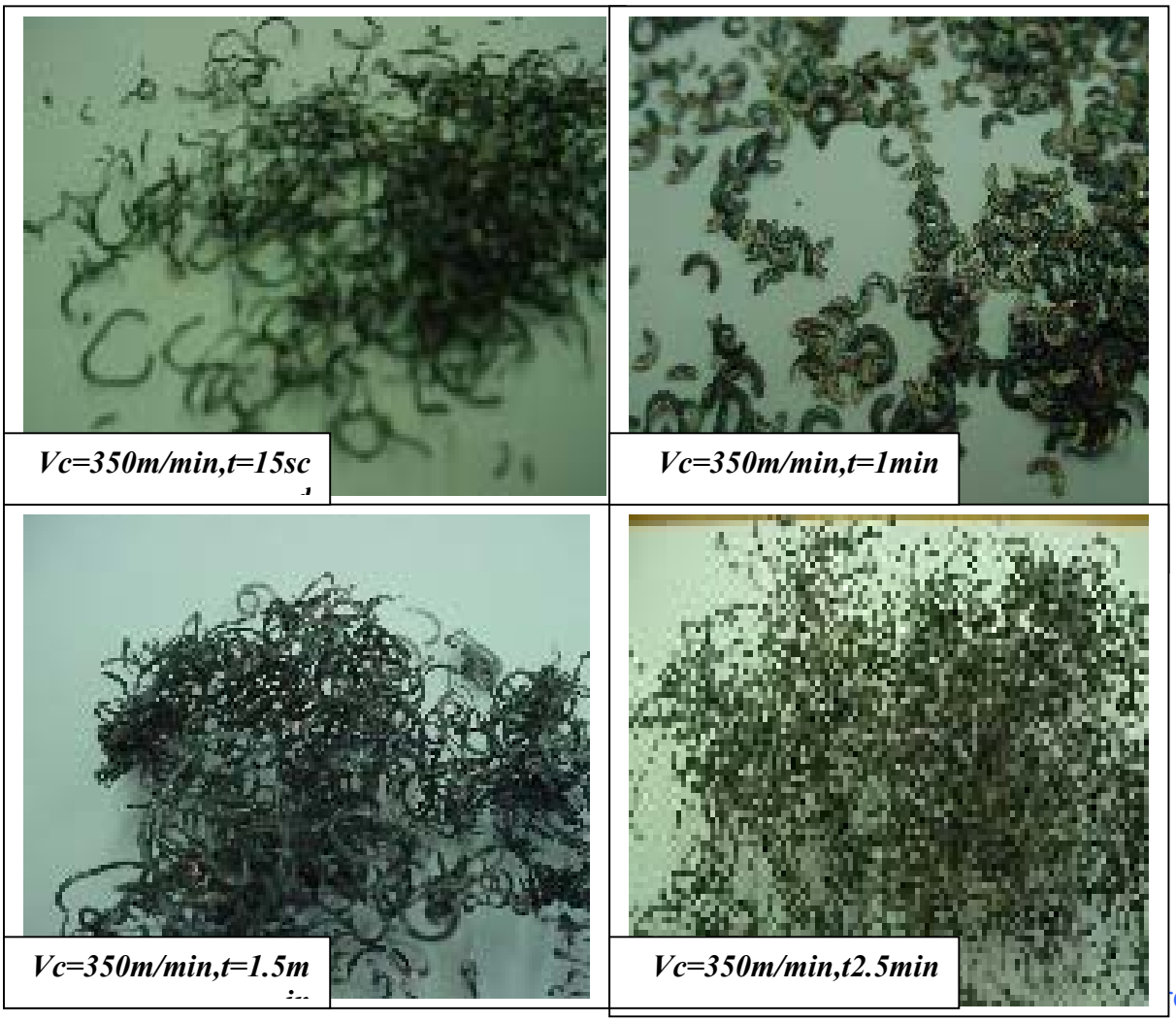


Figure III.43 : *Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 par la céramique CC650, temps de coupe=4,5min ;Vc=180m/min, a_p=0,5mm, f=0,08mm/tr; t°copeau=744°C ; t°outil=86°C ; t°pièce=44°C.*

III.5 Conclusion

Cette étude comparative réalisée dans ce chapitre a permis d'établir les écarts de performances entre les outils en nitrure de bore cubique, céramique, carbure métallique revêtu en terme d'usure, de durée de vie et de productivité. Il ressort de cette étude que chaque nuance de matériau de coupe utilisé présente des particularités de comportement à l'usure qui sont fonction principalement de la composition chimique et des caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux de coupe testés, de la nuance du matériau usiné et des conditions de coupe utilisées. Par conséquent les tenues trouvées montrent que le meilleur comportement à l'usure est observé avec le CBN7020 suivi par la céramique CC650 et en dernier lieu par le carbure GC3015. En terme de productivité le CBN reste le matériau idéal pour l'usinage des aciers à usinabilité difficile.

A/-Morphologie du copeau (Z200Cr12, CBN7020):



ès quelques minutes de travail. Il s'accompagne par l'apparition de vibrations, d'étincelles et d'écoulement de copeau rouge, rendant l'usinage par la suite impossible. Cette observation conduit à limiter la plage des vitesses de coupe utilisées lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 à 60HRC. Les vitesses de coupe supérieures à 280 m/min sont peu recommandées à cause de l'usure très rapide de l'outil ce qui n'est pas intéressant sur le plan industriel (Figures 5, 9 et 11).

CHAPITRE IV

IMPACT DES CONDITIONS DE COUPE ET DE L'USURE SUR LA RUGOSITE DES SURFACES USINEES

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'impact des conditions de coupe sur la rugosité des surfaces des aciers 100Cr6 et X200Cr12 usinées par le CBN7020 et la céramique CC650. Nous examinons Aussi les effets de l'usure en dépouille des outils testés sur la rugosité. La fin de ce travail abouti à la détermination des modèles mathématiques de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe. Nous déterminant aussi la corrélation entre la rugosité des surfaces et l'usure en dépouille des outils. L'analyse des résultats trouvés est une contribution de notre part afin de comprendre le comportement du système usinant et de la surface usinée.

IV. 2 Impact des conditions de coupe sur la rugosité (Méthode unifactorielle)

IV.2.1 Rugosité de surface de l'acier à roulement 100Cr6

La caractérisation de la qualité de la surface usinée a été limitée aux critères de rugosité totale (Rt), moyenne arithmétique (Ra) et moyenne des hauteurs des irrégularités (Rz) **[ENA 72]**.
Les figures IV.1, IV.2 et IV.3 expriment l'influence des éléments du régime de coupe (Vc, a_p et *f)* sur la rugosité obtenue par le CBN7020. L'augmentation de la vitesse de coupe (figure III.1) améliore la qualité de la surface usinée surtout pour les vitesses allant jusqu'à 120 m/min. Au delà de cette limite, la rugosité se stabilise à cause de la diminution des efforts de coupe aux grandes vitesses traduisant ainsi une stabilité relative du système usinant **[CAL 98]**. Par contre, les augmentations de la profondeur de passe et de l'avance (Figure IV.2 et IV.3) contribuent à l'élévation de la rugosité. Il est constaté que l'avance est le facteur déterminant de la qualité des surfaces usinées. La surface engendrée comporte des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce **[BED 98]**. Ces sillons sont autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée, d'où la nécessité d'employer de faibles avances lors du tournage de finition. D'autre part, malgré une augmentation de l'avance de 2,5 fois, les états de surface obtenus avec l'outil CBN7020 restent toujours bons et peuvent être comparés à ceux de la rectification.
En pratique, les conséquences de l'influence des paramètres du régime de coupe sur la rugosité (Ra) obtenue lors de l'usinage avec le CBN7020 peuvent être résumées comme suit : L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,2 mm/tr et celle de la pénétration de 0,2 à 1,0 mm font accroître respectivement la rugosité de 5,25 et 1,45 fois, alors que l'accroissement de la vitesse de coupe de 60 à 180 m/min la fait baisser de 1,6 fois.

Les figures IV.4, IV.5 et IV.6 illustrent l'influence des éléments du régime de coupe (Vc, a_p et f) sur la rugosité de surface de l'acier 100Cr6, usiné par la céramique CC650. On remarque sur la figure IV.4, que l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à abaisser les critères de rugosité et on enregistre des rugosités minimales aux alentours de la vitesse 120 m/min. On observe une stabilité de la rugosité à partir de 100 m/min. Une augmentation de la vitesse de coupe de 60 à 180 m/min conduit a une diminution de la rugosité de 1,25 fois.

Aux grandes vitesses de coupe et dans l'intervalle de vitesse de 120 à 180 m/min, on enregistre une légère augmentation de la rugosité à cause de l'usure accélérée de l'outil aux vitesses de coupe élevées. Pour l'effet du second paramètre de coupe illustré par la profondeur de passe, la rugosité varie très peu surtout pour les faibles valeurs de a_p. En effet avec l'augmentation de la profondeur de passe de 0,2 à 0,4 mm, la rugosité Ra passe de 0,37 à 0,38µm. Le triplement de a_p (de 0,2 à 0,6) mm, conduit à une augmentation de la rugosité Ra de 0,37 à 0,39µm. Enfin, il est admis que l'avance influence drastiquement l'état de surface en terme de rugosité tel que démontré par les équations (I.14) et (I.15) **[SHA 01]**, **[JOS 99]**.

La figure IV.6 montre une nette influence de l'avance sur la rugosité, avec l'augmentation de cette dernière, la qualité de surface obtenue se dégrade d'une manière significative. Par conséquent l'avance est l'un des paramètres dont l'effet est le plus sensible sur la rugosité des surfaces usinées. Un doublement de la valeur de l'avance (de 0,08 à 0,16) mm/tr, conduit à une augmentation de la rugosité Ra de 3,08 fois.

En dernier lieu, si on compare les résultats des rugosités obtenues par le CBN7020 et la céramique CC650 lors de l'usinage de l'acier 100Cr6, on remarque clairement que le CBN7020 est plus performant que la céramique CC650. En effet aux même conditions de coupe (Vc=120m/min, a_p=0,2mm et f=0,08mm/tr) le ratio Ra_{CC650} /Ra_{CBN} est de 1,5. A la vitesse de 90 m/min, le ratio Ra_{CC650} /Ra_{CBN} est égal à 1,42.

La supériorité du CBN réside dans le fait qu'il possède une grande résistance à l'usure, ce qui lui confère des efforts de coupe moindres et par conséquent un système usinant stable. En outre, ces performances peuvent aussi être partiellement expliquées par la haute rigidité du CBN et la tenue exceptionnelle de ses arêtes de coupe ainsi que sa stabilité chimique à des températures élevées **[PAS 96]**.
Globalement, les deux outils de coupe considérés donnent lieu à des rugosités comparables à celles de la rectification ce qui permet de réduire les temps opératoires et les erreurs de reprise **[BOU 97]**.

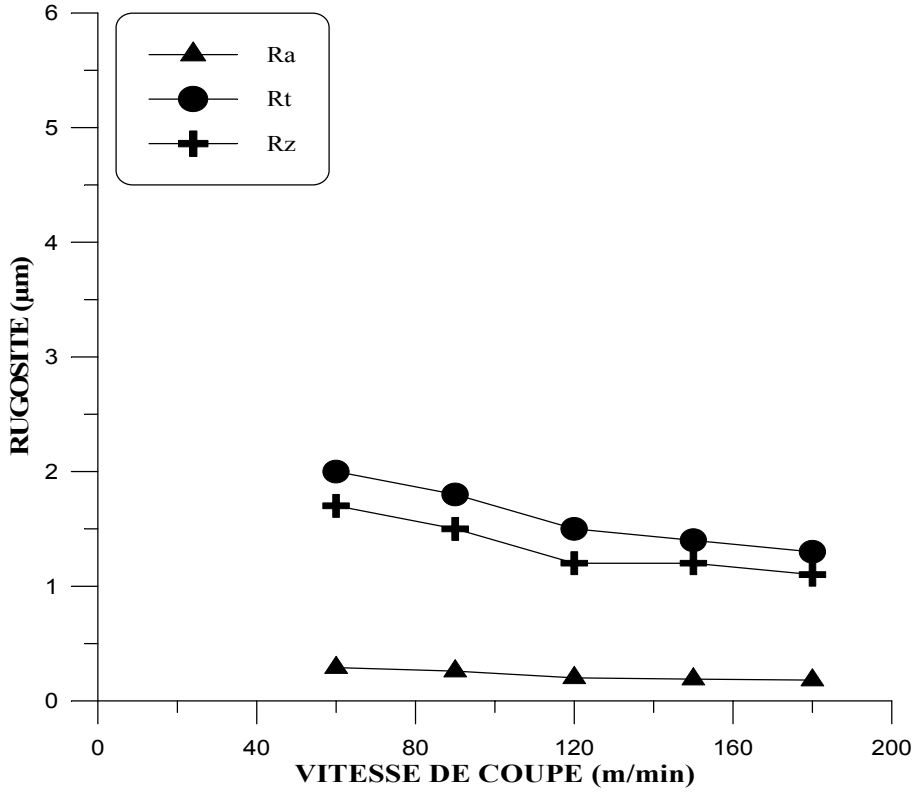


Figure IV.1 : *Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité Obtenue par le CBN à f=0,08mm/tr et a_p=0,2mm.*

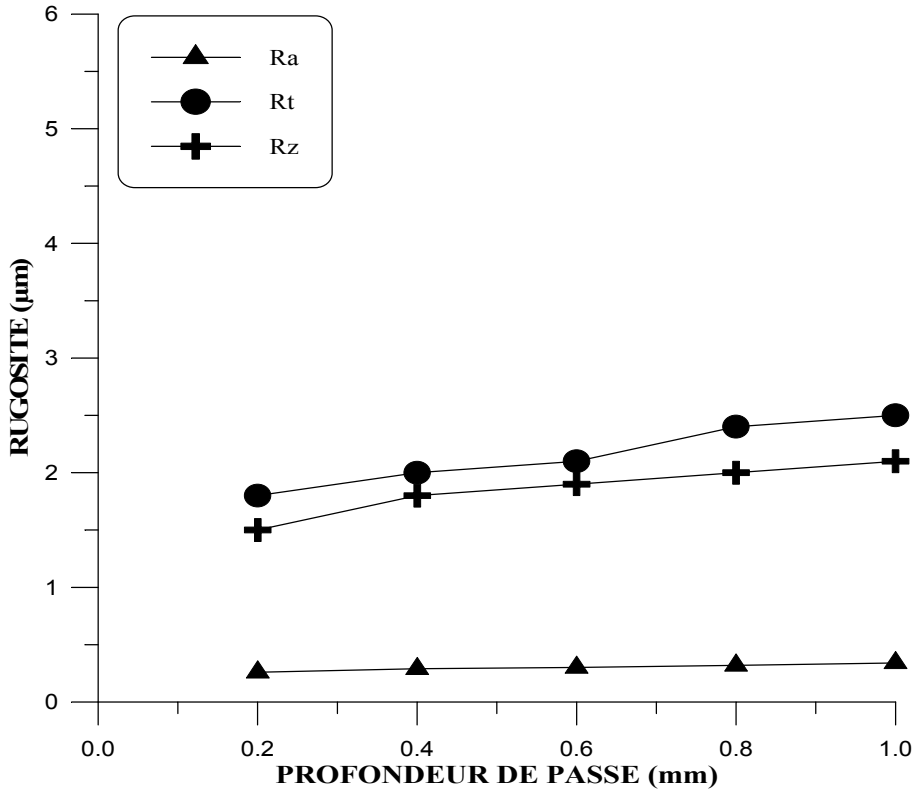


Figure IV.2 : *Influence de la profondeur de passe sur la rugosité obtenue Par le CBN7020 à Vc=90m/min et f=0,08mm/tr.*

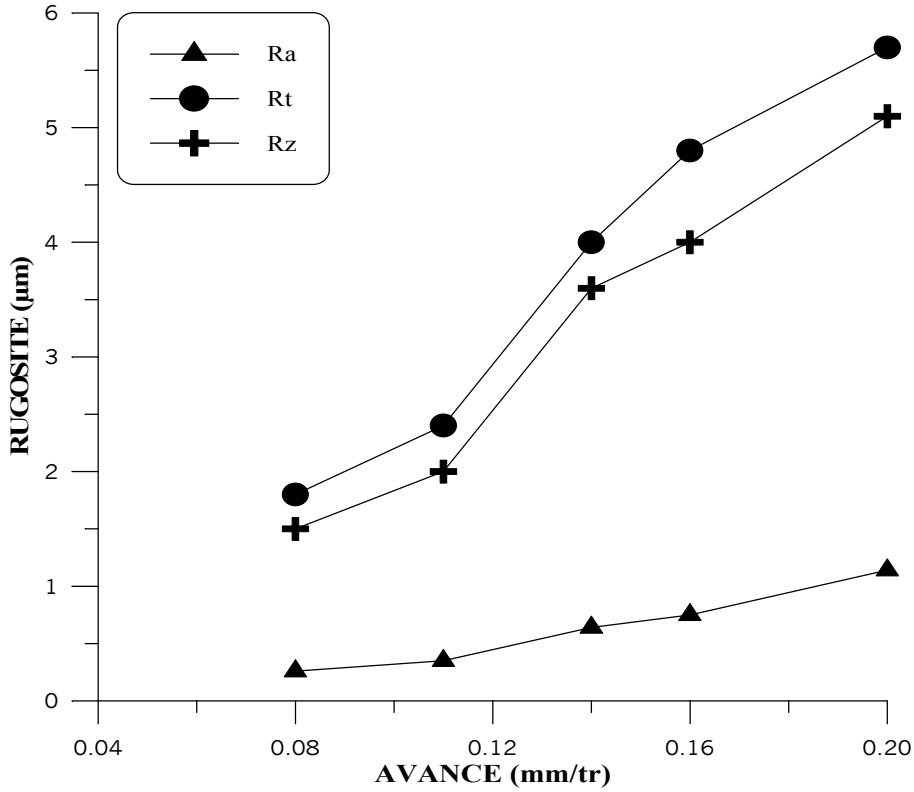


Figure IV.3 : *Influence de l'avance sur la rugosité obtenue par le CBN7020 à Vc=90m/min et a_p=0,2mm.*

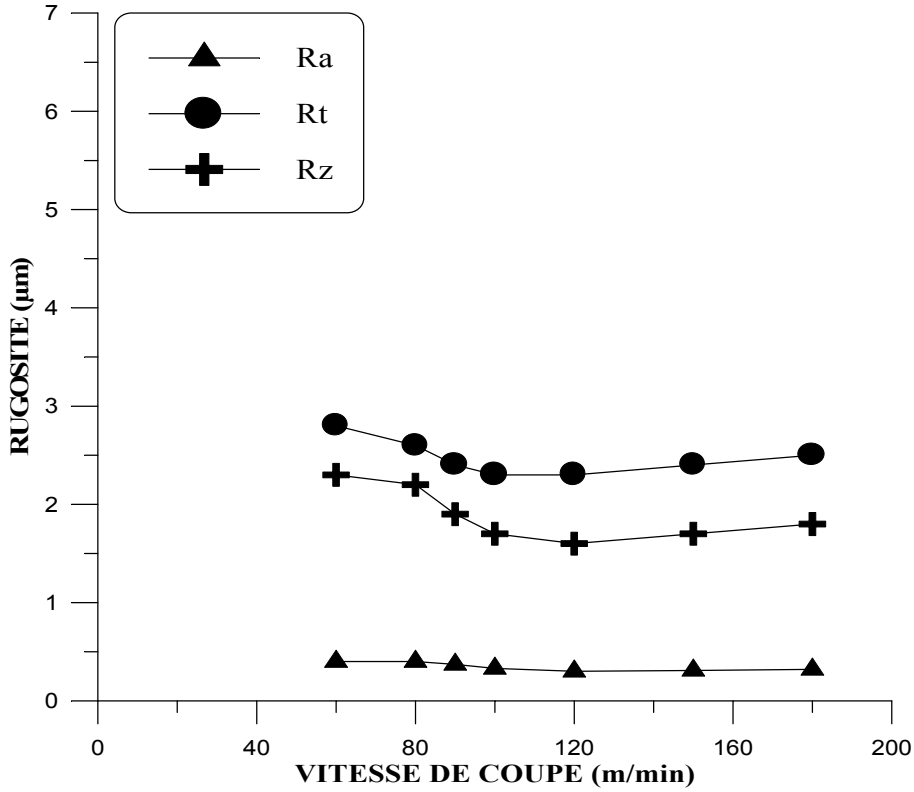


Figure IV.4 : *Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à f=0,08mm/tr et a_p=0,2mm.*

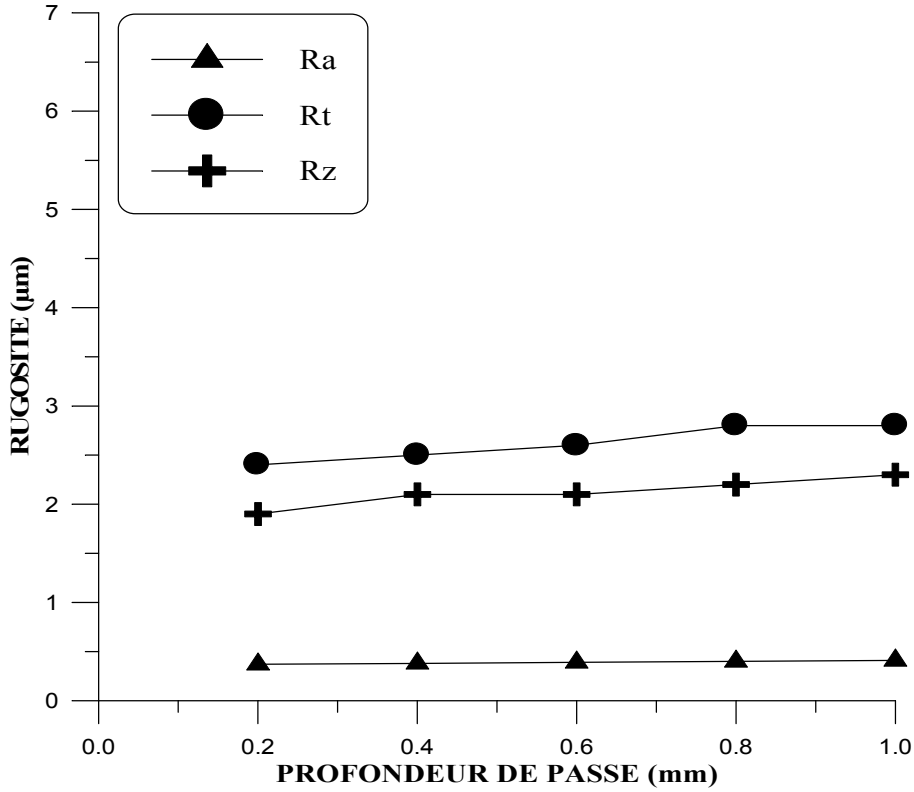


Figure IV.5 : *Influence de la profondeur de passe sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à Vc=90m/min et f=0,08mm/tr.*

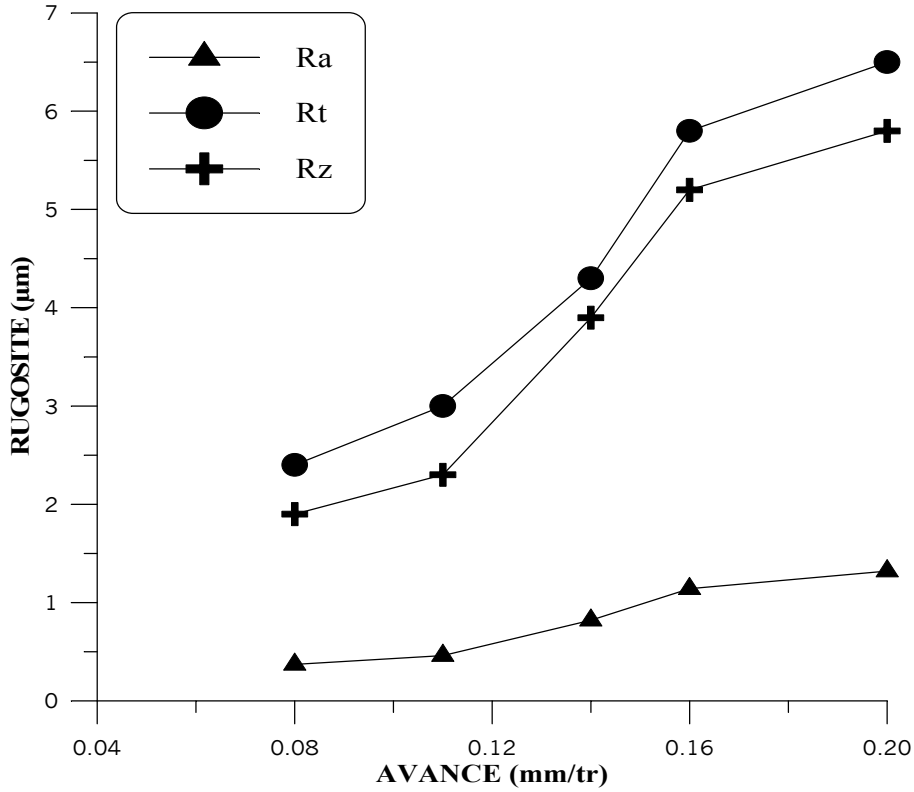


Figure IV.6 : *Influence de l'avance sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à Vc=90m/min et a_p=0,2mm.*

IV.2.2 Rugosité de surface de l'acier X200Cr12

Les figures IV.7, IV.8 et IV.9 expriment l'influence des éléments du régime de coupe (Vc, a_p et f) sur la rugosité de surface de l'acier X200Cr12 obtenue par le CBN7020. La figure IV.7, montre que la qualité de l'état de surface s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe. En travaillant avec des vitesses de coupe élevées les conditions de formation et d'évacuation du copeau s'améliorent, les efforts de coupe diminuent ce qui permet de travailler dans un système stable. D'après les observations les différents critères de rugosité évoluent de manière similaire en enregistrant des rugosités minimales aux alentours de la vitesse de coupe de 180 m/min. La stabilité de la rugosité est entamée à partir de 120 m/min. La profondeur de passe et l'avance (figures IV.8 et IV.9) contribuent à l'élévation de la rugosité. Les résultats montrent que l'avance intervient d'une manière plus accentuée en la comparant avec la profondeur de passe. Si on double la valeur de la profondeur de passe (de 0,2 à 0,4mm), la rugosité Ra augmente de 1,17 fois. Par contre, un doublement de la valeur de l'avance (de 0,08 à 0,16 mm/tr) conduit à une augmentation de la rugosité de 2,11 fois. En effet, avec les faibles valeurs de a_p, on enregistre de faibles variations de la rugosité, ce qui montre clairement que la profondeur de passe ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité de surface usinée. Mais, avec des profondeurs de passe élevées (de 0,2 à 1) mm, la rugosité augmente de 1,86 fois (presque deux fois). Cette influence ne peut pas être ignorée, car en travaillant avec des grandes passes, la longueur de contact entre l'arête de coupe principale et la pièce augmente, ce qui génère des efforts de coupe importants et influent sur la stabilité du système d'usinage, qui entraîne une élévation de la rugosité.

Les figures IV.10, IV.11 et IV.12 illustrent l'influence des éléments du régime de coupe (Vc, a_p et f) sur la rugosité de surface de l'acier X200Cr12, usiné par la céramique CC650. On remarque sur la figure IV.10, que l'augmentation se la vitesse de coupe contribue à abaisser la rugosité, tout en notant qu'elle se stabilise à partir de 120 m/min. Une augmentation de la vitesse de coupe de 60 à 180 m/min conduit a une diminution de la rugosité de 1,4 fois. Pour l'effet du second paramètre de coupe illustré par la profondeur de passe, la rugosité varie très peu surtout pour les faibles valeurs de a_p. En effet avec l'augmentation de la profondeur de passe de 0,2 à 0,4 mm, la rugosité Ra augmente de 1,2 fois. Mais, quand a_p passe de (de 0,2 à 1) mm, la rugosité Ra augmente de 1,97 fois. L'accroissement de l'avance (figure IV.12) entraîne l'élévation de la hauteur des aspérités sur la surface usinée. Une augmentation de l'ordre de 2 fois de l'avance (de 0,08 à 0,16) mm/tr, conduit à une élévation de la rugosité de 2,31 fois.

Ce constat permet de recommander qu'il est toujours préférable d'augmenter la profondeur de passe au lieu de l'avance si ont veut augmenter le débit de copeau tout en gardant presque la même valeur de la rugosité **[POU 99]**. En comparant les valeurs de rugosités obtenues par les deux matériaux de coupe utilisés, on remarque clairement une nette supériorité du CBN7020 par rapport à la céramique CC650. Enfin, les deux outils considérés donnent des rugosités qui peuvent être comparées à ceux obtenues en rectification.

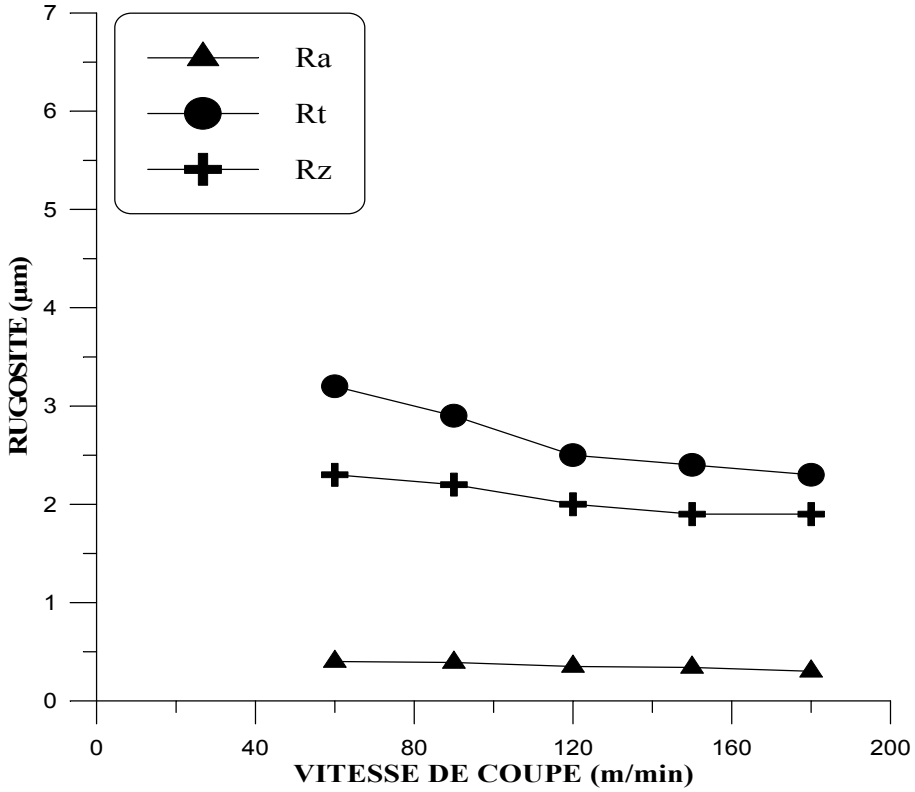


Figure IV.7 : *Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité Obtenue par le CBN7020 à f=0,08mm/tr et a_p=0,2mm.*

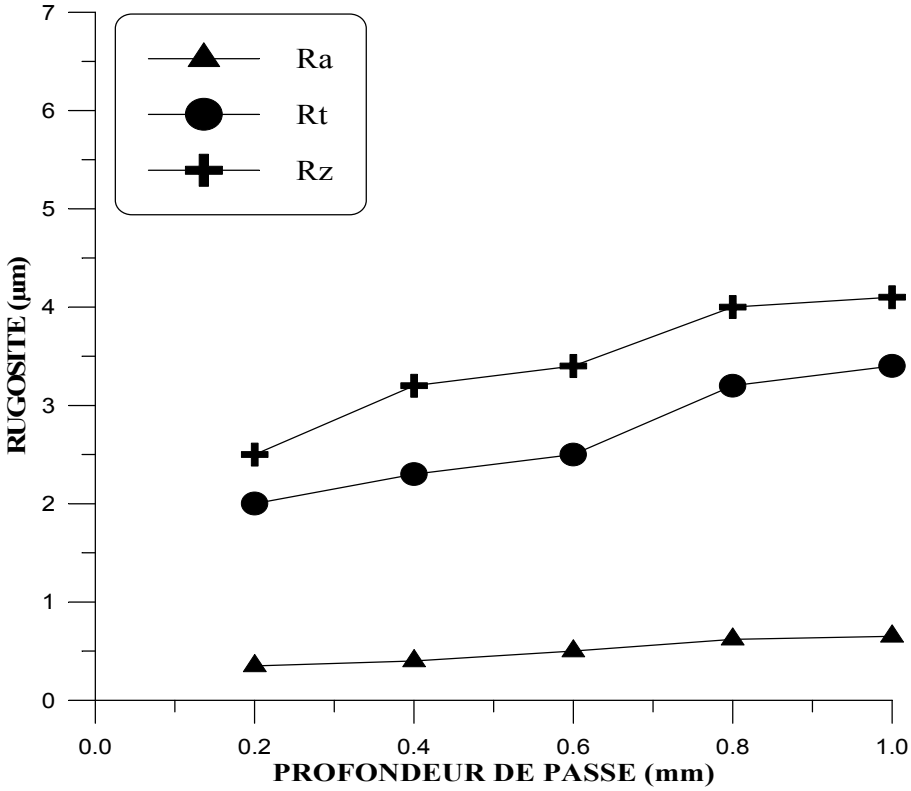


Figure IV.8 : *Influence de la profondeur de passe sur la rugosité obtenue Par le CBN7020 à Vc=120m/min et f=0,08mm/tr.*

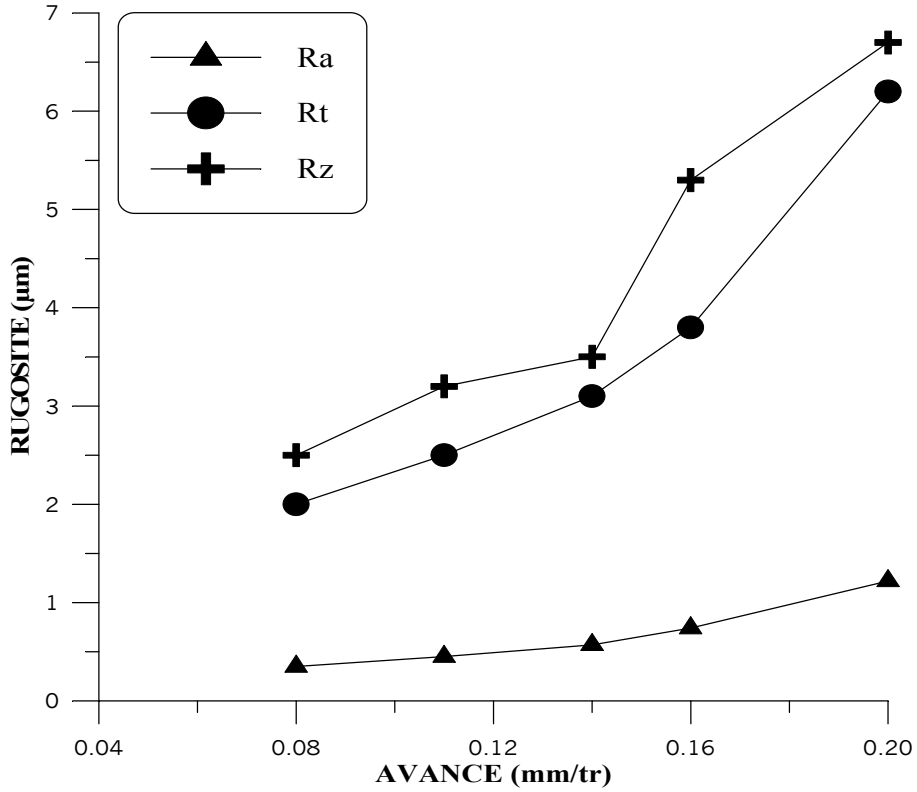


Figure IV.9 : *Influence de l'avance sur la rugosité obtenue par le CBN à Vc=120m/min et a_p=0,2mm.*

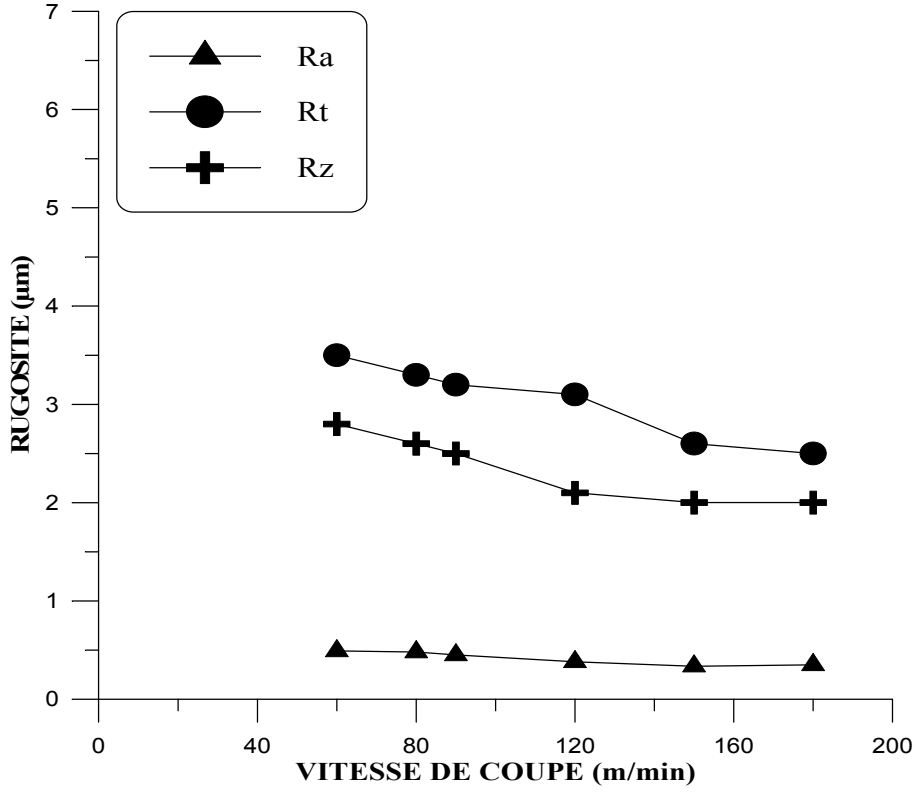


Figure IV.10 : *Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à f=0,08 mm/tr et a_p=0,2mm.*

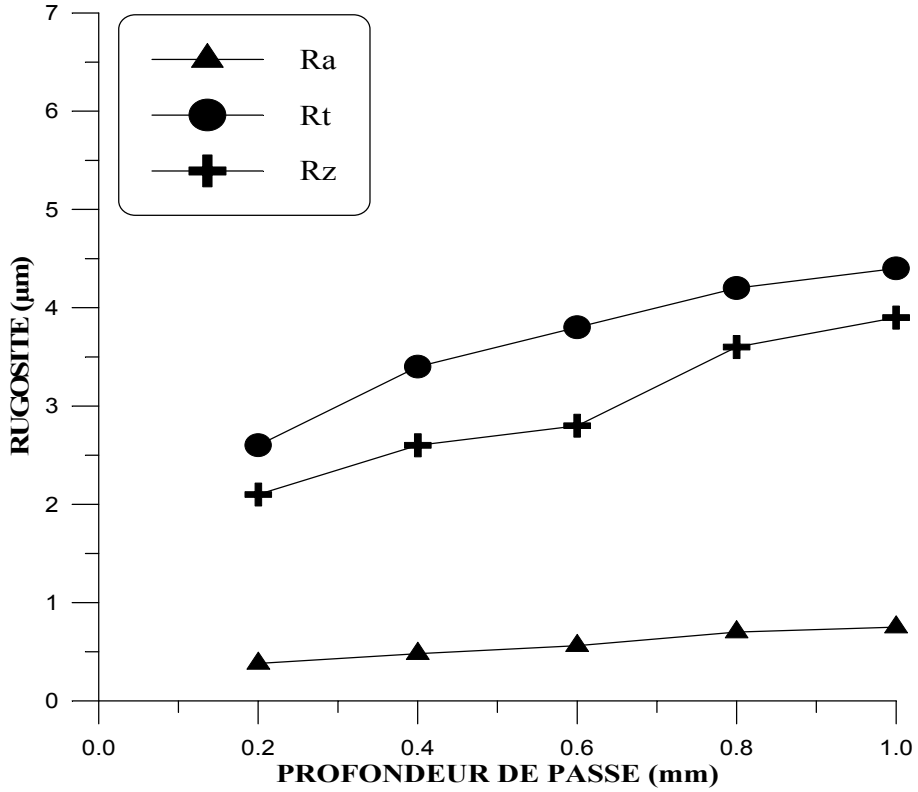


Figure IV.11 : *Influence de la profondeur de passe sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à Vc=120m/min et f=0,08mm/tr.*

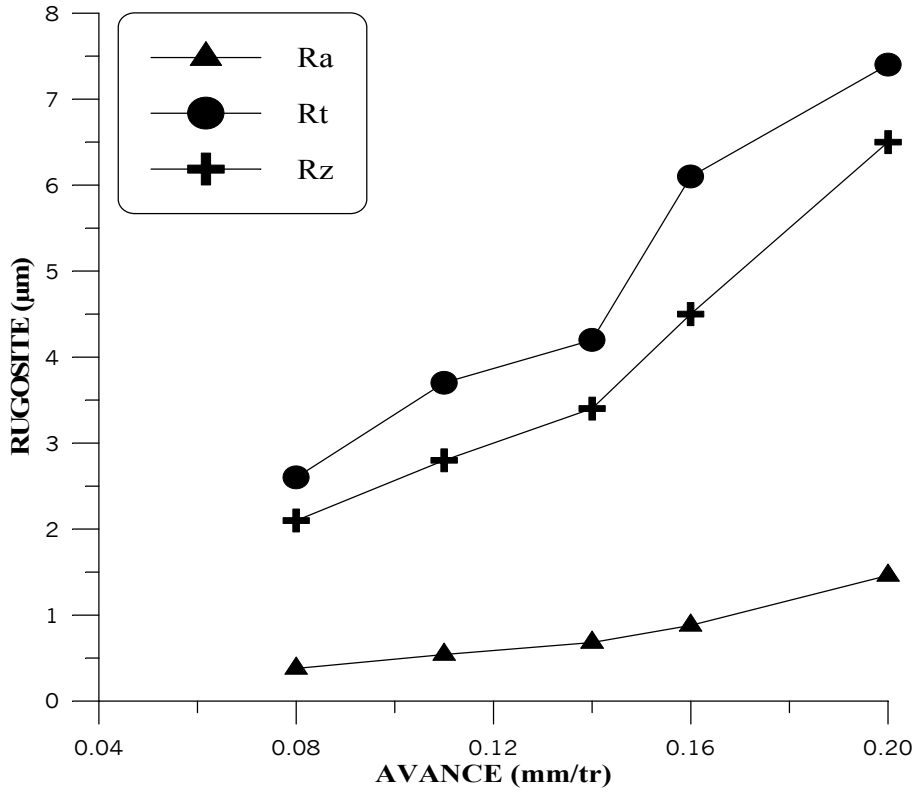


Figure IV.12 : *Influence de l'avance sur la rugosité obtenue par la céramique CC650 à Vc=120m/min et a_p=0,2mm.*

IV. 3 Impact des conditions de coupe sur la rugosité (Méthode Multifactorielle)

Les essais relatifs à l'étude de l'influence des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (Vc, f, a_p) ensemble sur la rugosité de surface des aciers 100Cr6 et X200Cr12, ont permis l'obtention des résultats reportés sur les tableaux 1 et 2 et ceci pour le cas du CBN7020 et celui de la céramique CC650.
Ces résultats sont nécessaires pour la détermination des modèles mathématiques des différents critères de rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe.

Tableau IV.1 *: Rugosité de surface de l'acier 100Cr6 en fonction du plan d'expérience.*

Facteurs								**Critères de rugosité**					
Valeurs codifiées				**Valeurs réelles**				**CBN7020**			**CC650**		
N° Essai	**X_1**	**X_2**	**X_3**	***f*** **(mm/tr)**	**a_p (mm)**	**Vc (m/min)**		**Ra (µm)**	**Rz (µm)**	**Rt (µm)**	**Ra (µm)**	**Rz (µm)**	**Rt (µm]**
						CBN	**CC650**						
1	-1	-1	-1	0,08	0,2	90	60	0,23	1,4	1,9	0,4	2,3	2,7
2	+1	-1	-1	0,2	0,2	90	60	1,08	4,9	5,2	1,44	6,2	6,7
3	-1	+1	-1	0,08	0,6	90	60	0,27	1,6	2,1	0,43	2,6	3,0
4	+1	+1	-1	0,2	0,6	90	60	1,05	5,2	5,8	1,46	6,2	6,9
5	-1	-1	+1	0,08	0,2	180	120	0,18	1,1	1,4	0,29	1,6	2,3
6	+1	-1	+1	0,2	0,2	180	120	0,88	4,1	4,8	1,36	5,8	6,3
7	-1	+1	+1	0,08	0,6	180	120	0,21	1,3	1,5	0,3	1,8	2,3
8	+1	+1	+1	0,2	0,6	180	120	0,90	4,5	5,2	1,38	6,0	6,6
9	0	0	0	0,14	0,4	135	90	0,58	3,3	3,7	0,82	3,9	4,3

Tableau IV.2 *: Rugosité de surface de l'acier X200Cr12 en fonction du plan d'expérience.*

Facteurs								**Critères de rugosité**					
Valeurs codifiées				**Valeurs réelles**				**CBN7020**			**CC650**		
N° Essai	**X_1**	**X_2**	**X_3**	***f*** **(mm/tr)**	**a_p (mm)**	**Vc (m/min)**		**Ra (µm)**	**Rz (µm)**	**Rt (µm)**	**Ra (µm)**	**Rz (µm)**	**Rt (µm]**
						CBN	**CC650**						
1	-1	-1	-1	0,08	0,2	90	60	0.39	2.2	2.9	0.49	2.8	3.5
2	+1	-1	-1	0,2	0,2	90	60	1.26	6.4	7.2	1.47	6.6	7.5
3	-1	+1	-1	0,08	0,6	90	60	0.44	2.5	3.5	0.55	2.9	3.7
4	+1	+1	-1	0,2	0,6	90	60	1.32	6.6	7.5	1.51	7.0	7.9
5	-1	-1	+1	0,08	0,2	180	120	0.3	1.9	2.3	0.38	2.1	3.1
6	+1	-1	+1	0,2	0,2	180	120	1.15	6.0	6.8	1.41	6.2	7.2
7	-1	+1	+1	0,08	0,6	180	120	0.36	2.1	2.7	0.41	2.3	3.3
8	+1	+1	+1	0,2	0,6	180	120	1.2	6.5	7.0	1.22	6.8	7.6
9	0	0	0	0,14	0,4	135	90	0.54	3.3	4.3	0.88	4.1	5.1

IV.4 Impact de l'usure des outils sur la rugosité de surfaces usinées

IV.4.1 Impact de l'usure sur la rugosité de surface de l'acier 100Cr6

Le premier volet de cette étude est dédié au suivi de l'évolution de la rugosité de surface de l'acier 100Cr6 en fonction de l'usure en dépouille des outils CBN7020 et céramique. L'objectif de cette quantification est de mettre en évidence la relation entre la rugosité de la surface considérée, comme critère de qualité de production et l'usure de l'outil de coupe en tant que moyen de contrôle de la production. A priori, le résultat reste valable pour les conditions de travail choisies mais permet entre autres d'estimer les changements à entreprendre moyennant des facteurs de correction à établir.

Une série de 10 expériences a été réalisée en vue de cerner l'effet de l'usure des outils sur la rugosité de la surface usinée. Les figures IV.13a-f et IV.14a-d illustrent cette évolution respectivement pour le CBN7020 et la céramique CC650 à f=0,08 mm/tr et a_p=0,5 mm. Pour le CBN7020, l'allure des courbes rugosité-usure est toujours croissante et ceci pour toutes les vitesses de coupe de 90 à 350 m/min comme montré dans les figures IV.13a-f. Jusqu'à 180 m/min, la rugosité diminue pour le même critère d'usure admissible (0,3mm). A partir de cette vitesse de coupe, les courbes rugosité-usure sont subdivisées en 2 zones et la transition correspond en général à la valeur de l'usure admissible. Il est constaté que pour les vitesses élevées ($V_c \geq 180$ m/min), la dégradation de la surface usinée est trop rapide au-delà du critère d'usure admissible avec des valeurs de Rt>6 µm. Ces résultats démontrent aussi que le choix du critère d'usure admissible 0,3 mm est bien adapté pour décrire de manière appropriée la durée de vie de l'outil. Il est à noter que la qualité de surface correspondante à cet état est décrite par des rugosités acceptables avec Rt<3,5 µm. Afin d'expliciter le changement du comportement de la rugosité en fonction de l'usure du CBN, des examens au microscope optique du bec de l'outil ont été réalisés. Les micrographies ont été prises à usure croissante décrivant la zone à faible rugosité pour VB=0,11 mm, la transition (VB=0,31 mm) et la zone à rugosité élevée (VB=0,47 mm) pour une vitesse de coupe de 220 m/min représentée dans la figure IV.13d. A t_1=7 min, la largeur de la bande d'usure est faible ce qui donne lieu à une rugosité totale sensiblement constante ($Rt \approx 2,5$ µm). Cet état est associé à un début d'usure régulière qui est basée sur un mécanisme d'abrasion. Cependant, à t_2=25 minutes, la limite d'usure admissible est atteinte ce qui se traduit sur la pièce par un accroissement brusque de la rugosité, alors que sur l'outil, on observe un début d'effondrement du bec signalant des effets de température relativement importants. A à un stade avancé de l'usure, l'effondrement devient catastrophique et la surface de contact (outil-pièce) augmente. Par conséquent, la chaleur générée ainsi que les efforts de coupe s'intensifient, donnant lieu à un mécanisme associant l'abrasion au phénomène de la diffusion **[NAB 01]**,**[THI 99]**. Il en résulte une dégradation importante de la surface usinée (R_t>6 µm). Concernant la céramique CC650, la même allure des courbes rugosité-usure du CBN7020 est observée (figure IV.14a-d). Ra et les autres critères de rugosité diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe pour une usure admissible donnée. Cependant, à V_c=180 m/min, les conditions d'usinage deviennent suffisamment sévères ce qui n'a pas permis de prendre plusieurs mesures vu la mort subite de l'outil. D'ailleurs, à usure admissible égale, les critères de rugosité obtenus croissent jusqu'à rupture brutale des arêtes de coupe.

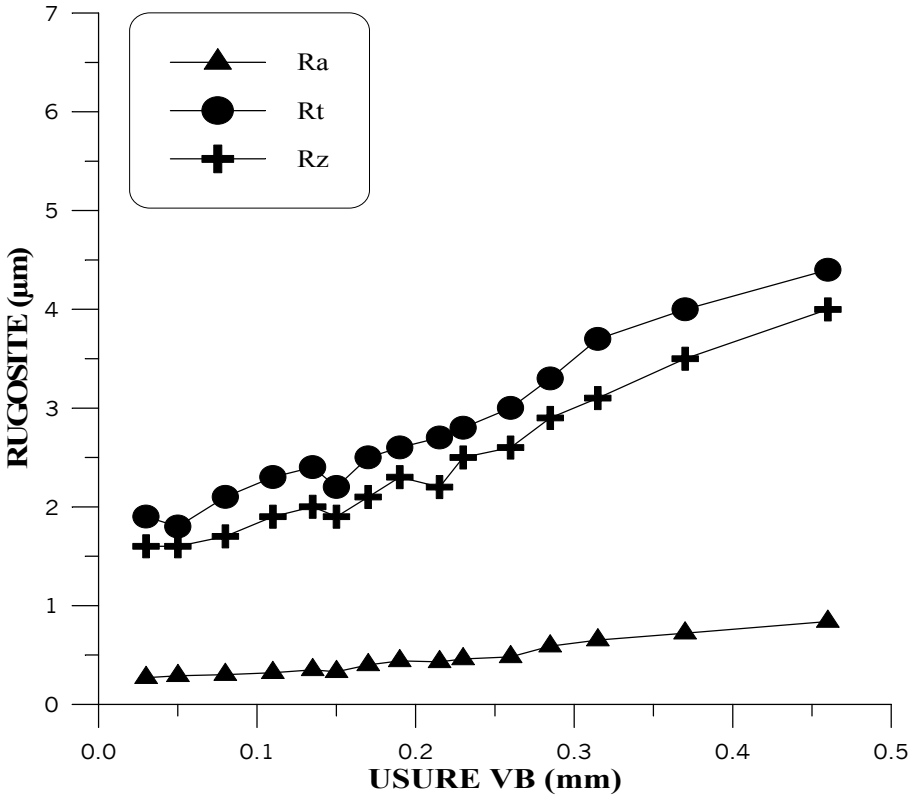


Figure IV.13a : *Vc=90 m/min*

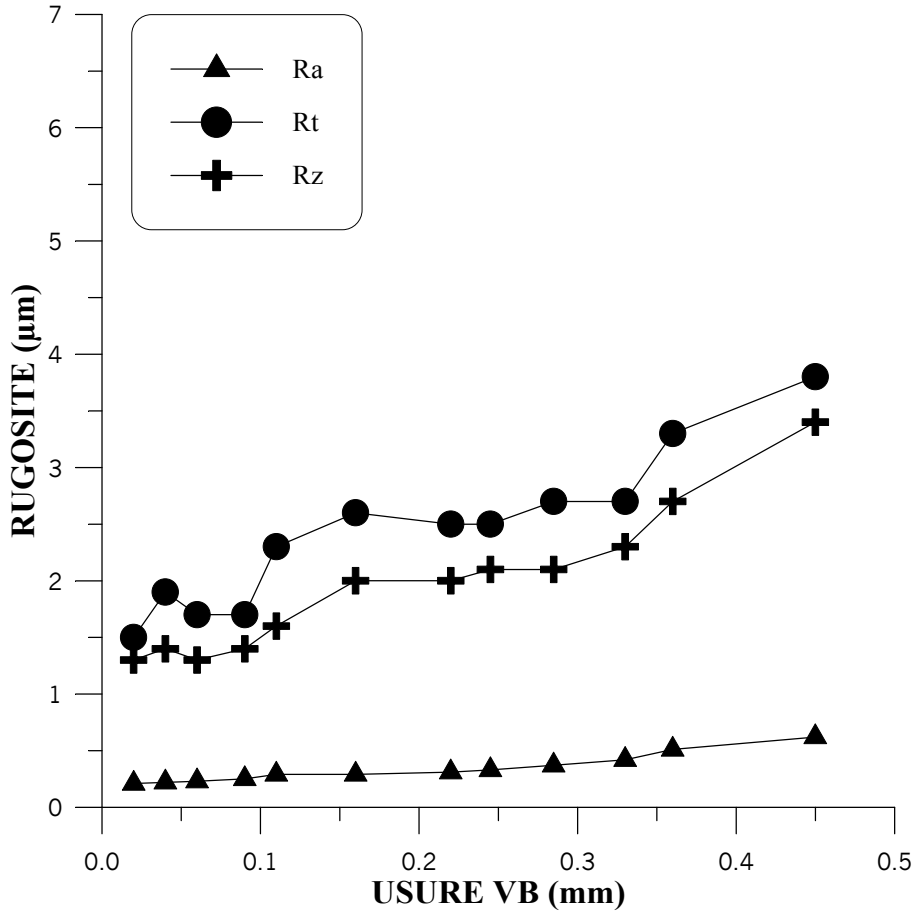


Figure IV.13b : *Vc=120 m/min*

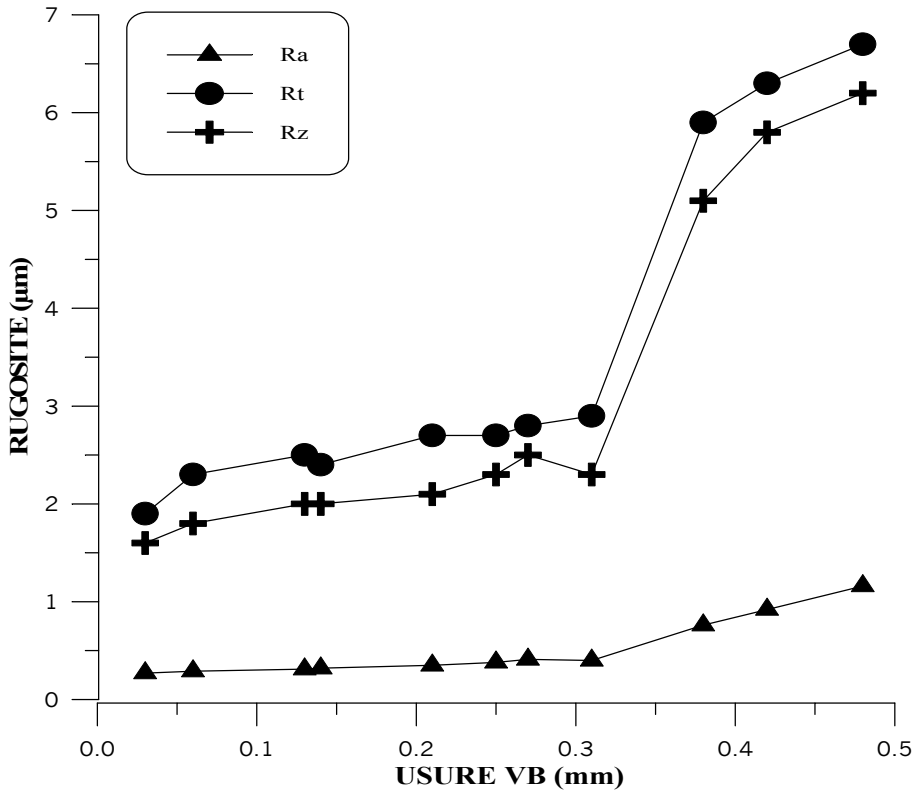


Figure IV.13c : *Vc=180 m/min*

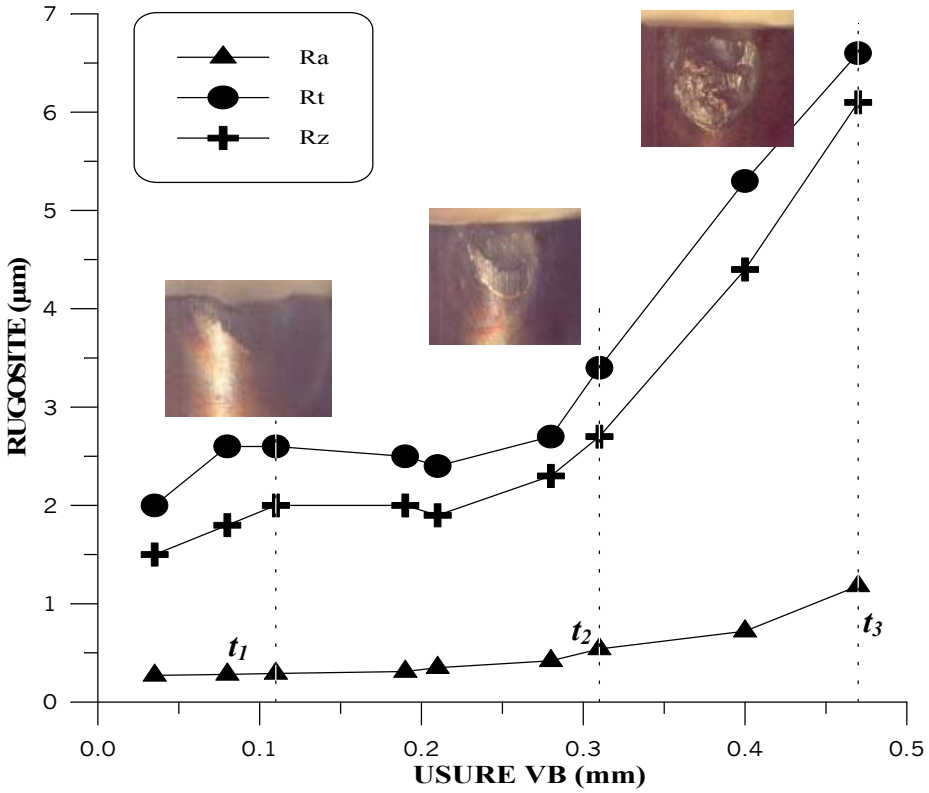


Figure IV.13.d : *Vc=220 m/min*

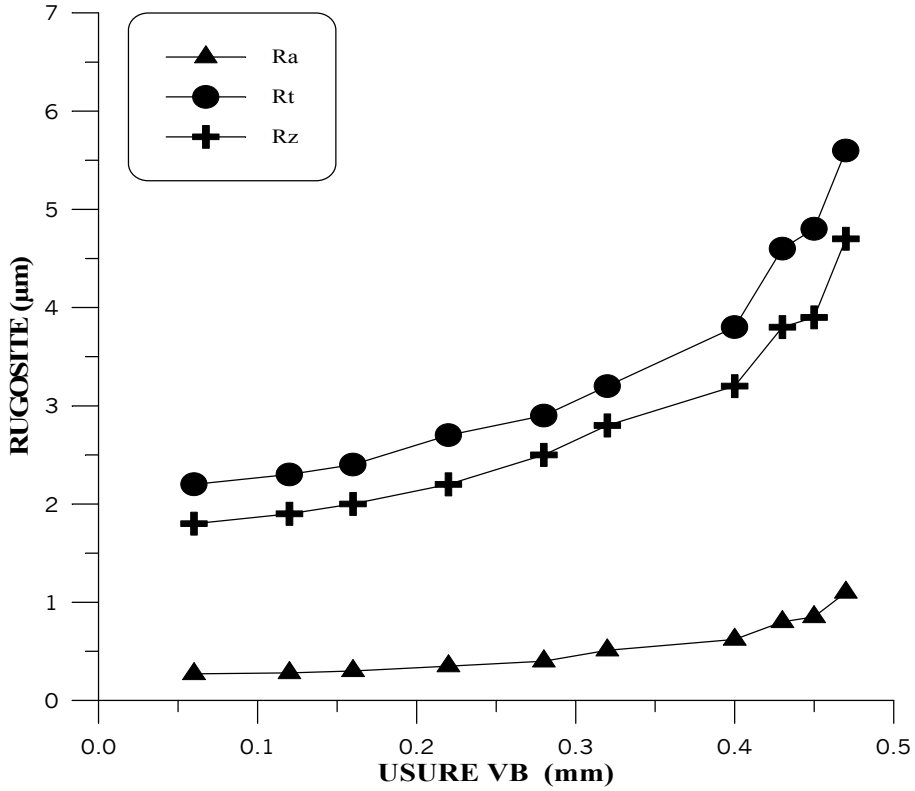


Figure IV.13e : *Vc=280 m/min*

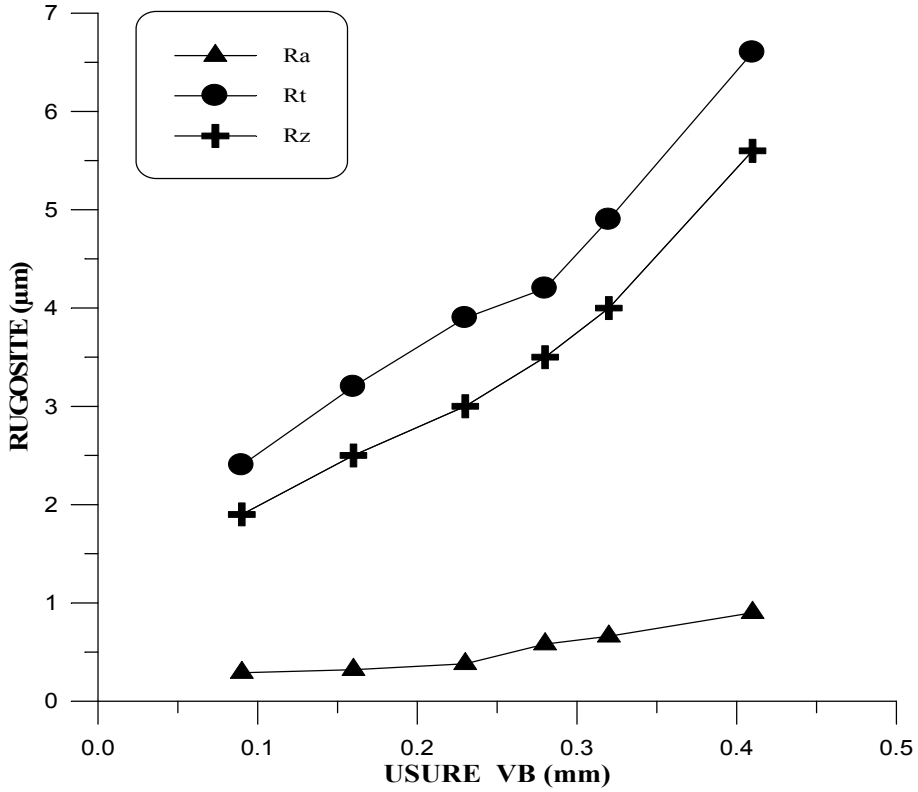


Figure IV.13f : *Vc=350 m/min*

Figure IV.13 : *Évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille du CBN7020 pour différentes vitesses de coupe.*

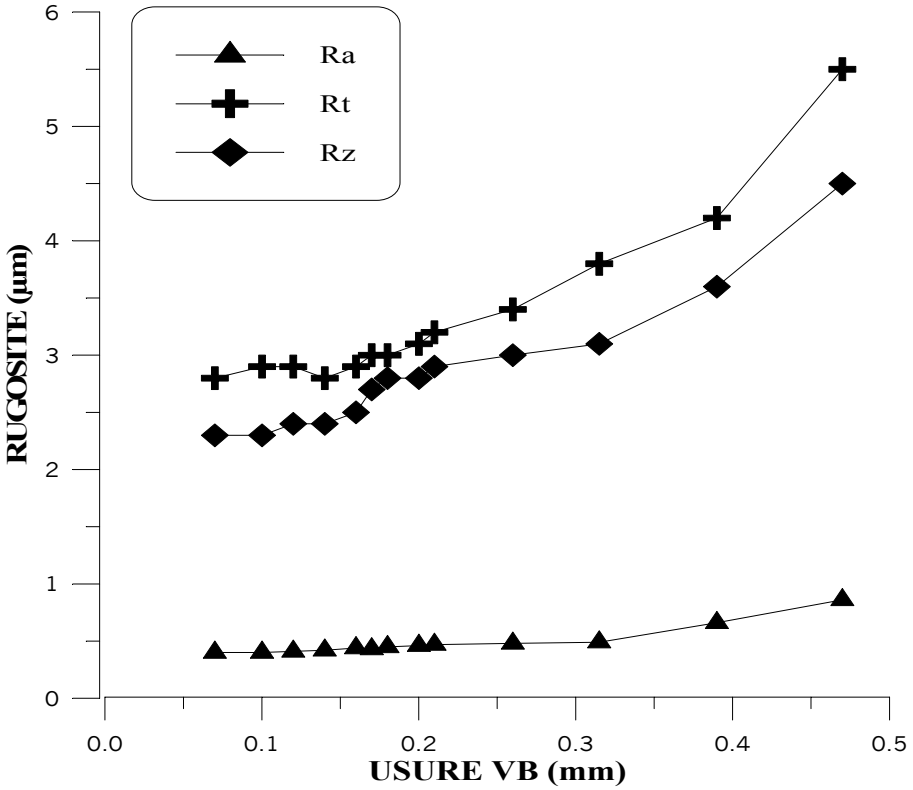


Figure IV.14a : *Vc=60 m/min*

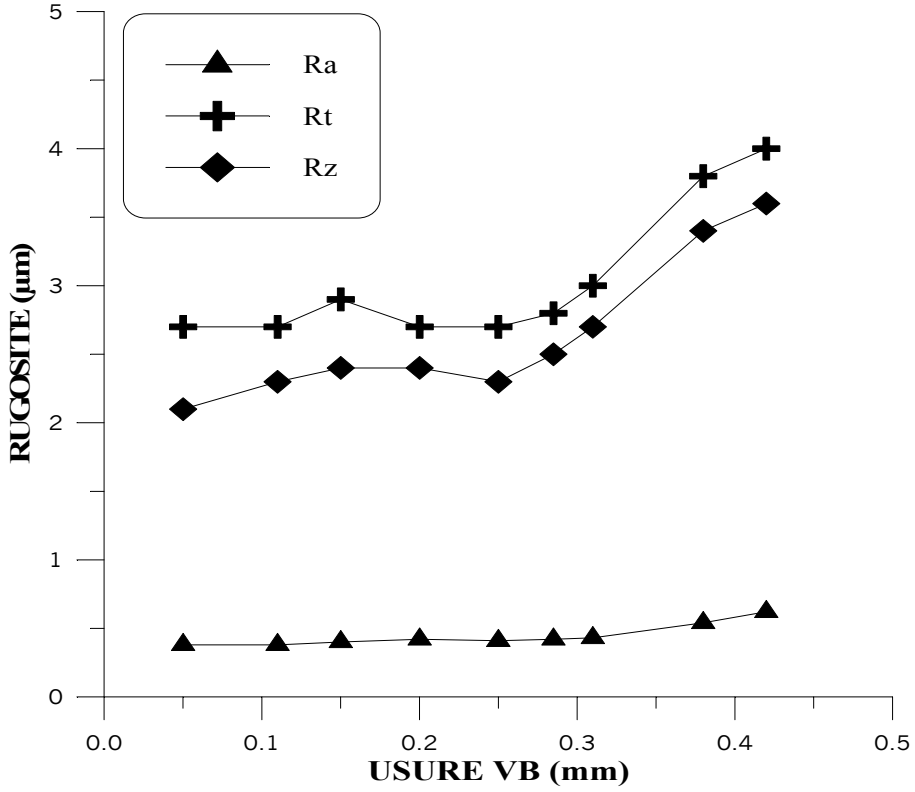


Figure IV.14b : *Vc=90 m/min*

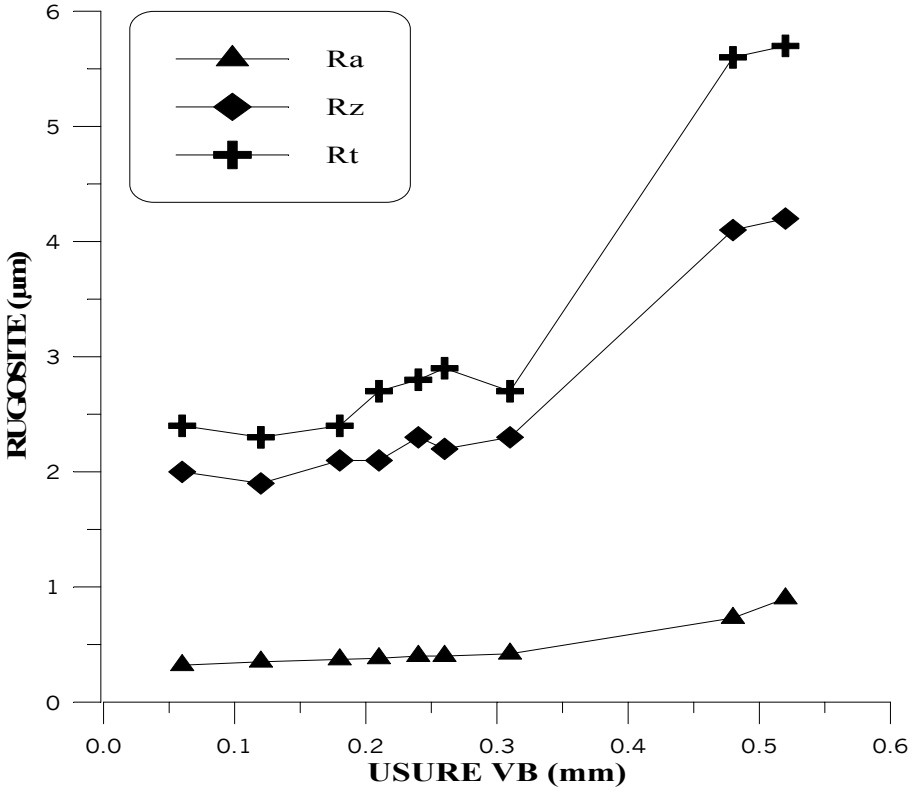


Figure IV.14c : *Vc=120 m/min*

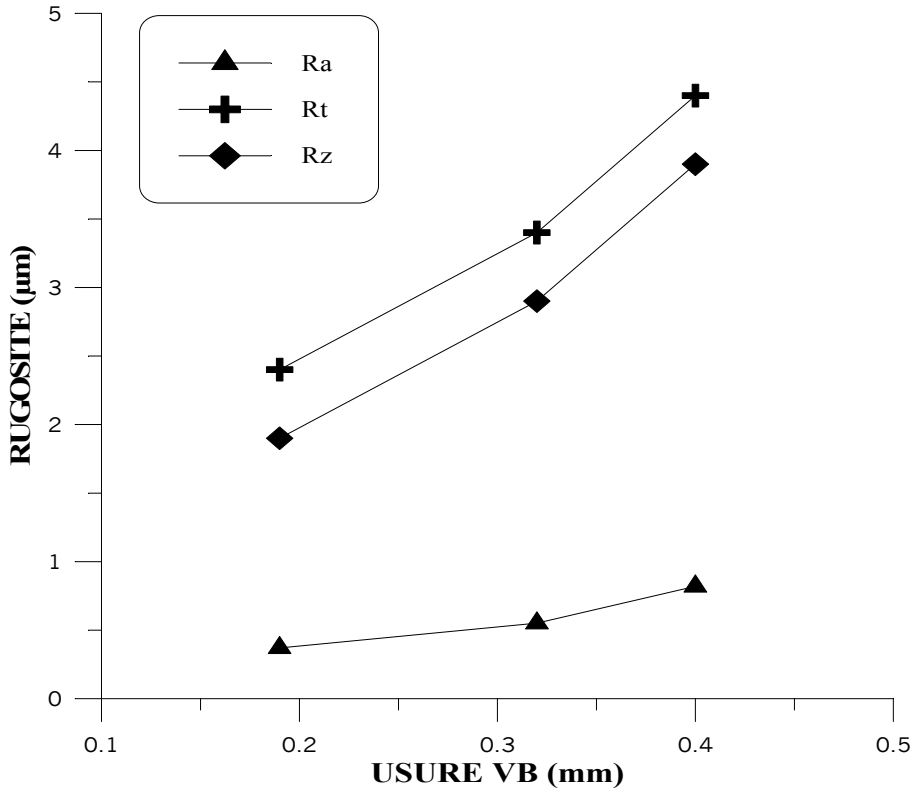


Figure IV.14d : *Vc=180 m/min*

Figure IV.14 : *Évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille de la CC6650 pour différentes vitesses de coupe.*

IV.4.2 Impact de l'usure sur la rugosité de surface de l'acier X200Cr12

Le deuxième volet de cette étude est dédié au suivi de l'évolution de la rugosité de surface de l'acier X200Cr12 en fonction de l'usure en dépouille des outils. A cet effet une série de 9 expériences représentant les vitesses adoptées pour l'établissement des tenues a été réalisée en vue de cerner l'effet de l'usure de l'outil sur la rugosité de la surface usinée. Les figures IV.15a-e et IV.16a-d illustrent cette évolution respectivement pour le CBN7020 et la céramique CC650 à f=0,08 mm/tr et a_p=0,5 mm. L'analyse des résultats montre que l'augmentation de l'usure en dépouille VB, entraîne une détérioration de la qualité de la surface usinée. Il faut préciser à ce niveau que, tant que l'usure est régulière et ne dépasse pas la valeur admissible [VB]=0,3mm, la rugosité (notamment le critère Ra) évolue très lentement et l'état de surface demeure appréciable. En effet, les valeurs enregistrées de Ra ne dépassent pas la valeur de 1µm et cela pour les différentes vitesses de coupe testées. Au-delà de cette valeur, la rugosité subit une augmentation relative, mais elle reste fort acceptable Ra<1,2 µm. A cet effet le critère d'usure recommandé par ISO et adopté dans nos essais, c'est l'usure en dépouille [VB]=0,3 mm. Cependant lors de la réalisation des essais, dans l'intervalle des vitesses de coupe [90 à 180] m/min, nous avons remarqué que lorsque l'usure VB passe de 0,3 à 0,4 mm, aucune anomalie d'usinage ne s'est manifestée, telles que l'apparition des vibrations, la détérioration de l'état de surface et de la précision. Par conséquent, on peut dire que, lors des opérations d'ébauche et demi-finition, la valeur de l'usure admissible [VB] peut être augmentée jusqu'à 0,4 mm, car les exigences envers la précision et le fini ne sont pas aussi sévères, comme dans le cas de l'usinage de finition. Ceci conduit à l'augmentation de la durée de vie des outils qui se traduit par une productivité plus élevée. Cette approche permet d'optimiser les coûts de production d'une manière significative.

L'analyse des courbes de la rugosité en fonction de l'usure de l'outil montre aussi que l'augmentation de la vitesse de coupe ne conduit pas systématiquement à la diminution de la rugosité. En effet, aux vitesses de coupe élevées Vc= [280 à 350] m/min comme dans le cas du CBN7020, l'arête de l'outil produit des rugosités élevées par rapport à celles obtenues avec les vitesses Vc= [90 à 180] m/min, pour un même temps de coupe. Cela peut être expliqué par les modifications géométriques de l'arête tranchante de l'outil provoquées par les conditions de coupe sévères et les températures élevées qui règnent à la pointe de l'outil ce qui conduit à l'endommagement de cette dernière.

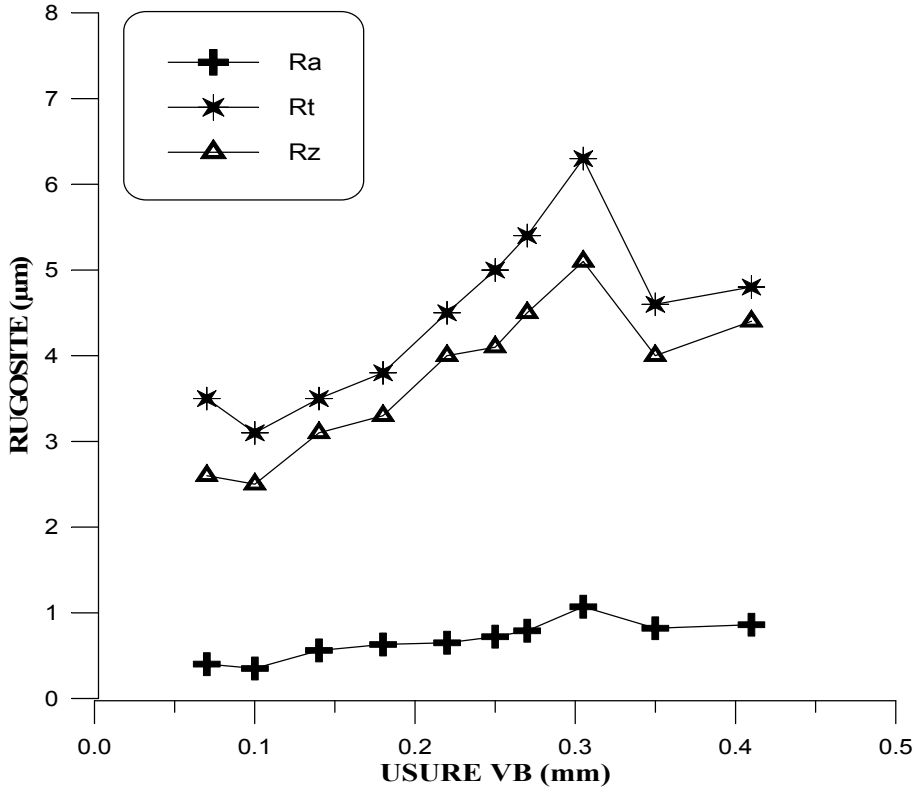


Figure IV.15a : *Vc = 90 m/min*

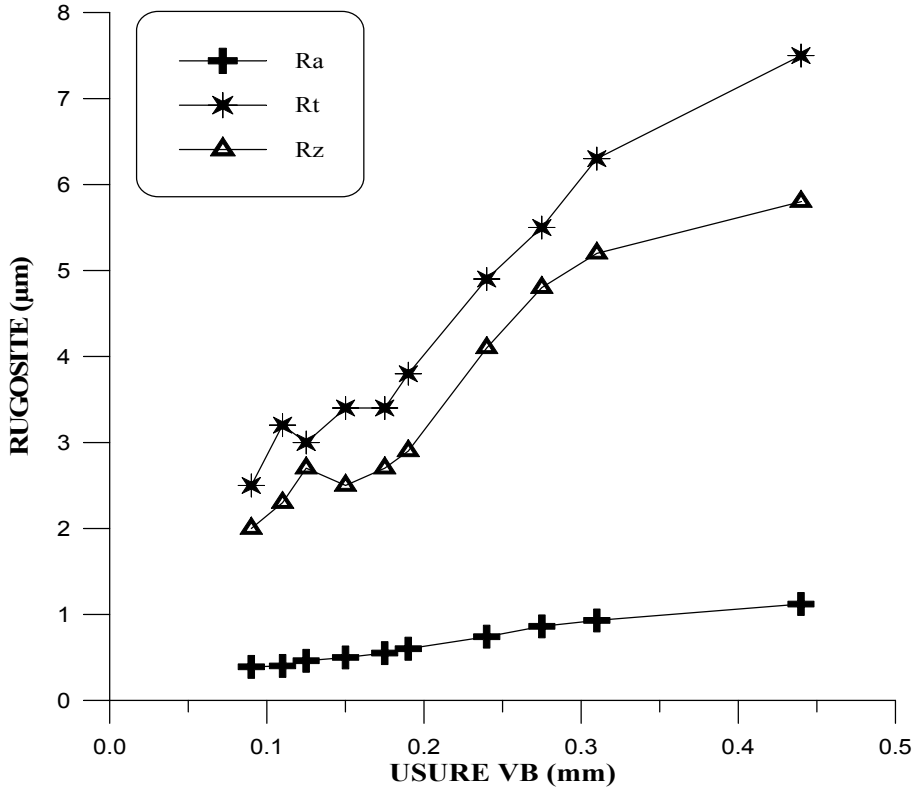


Figure IV.15b : *Vc = 120 m/min*

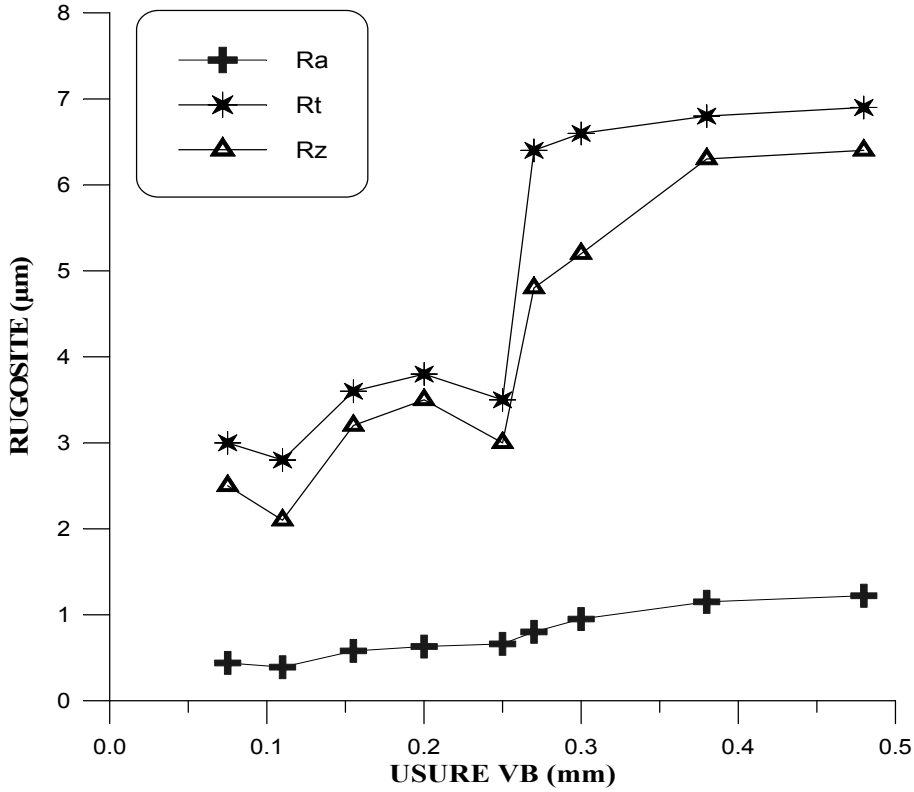


Figure IV.15c : *Vc = 180 m/min*

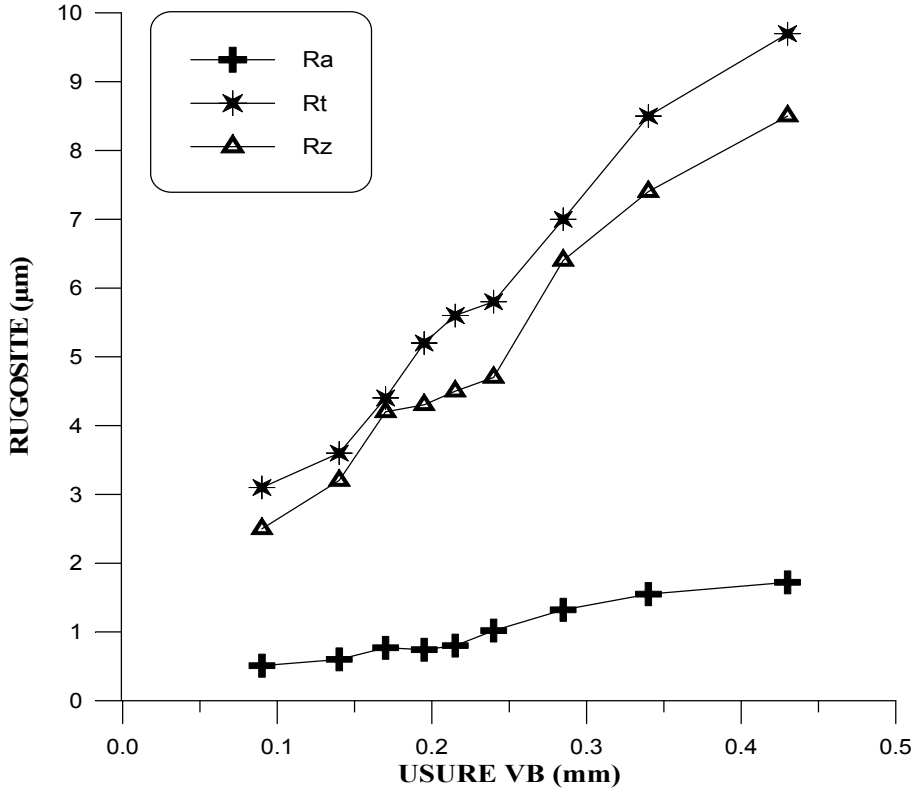


Figure IV.15d : *Vc = 280 m/min*

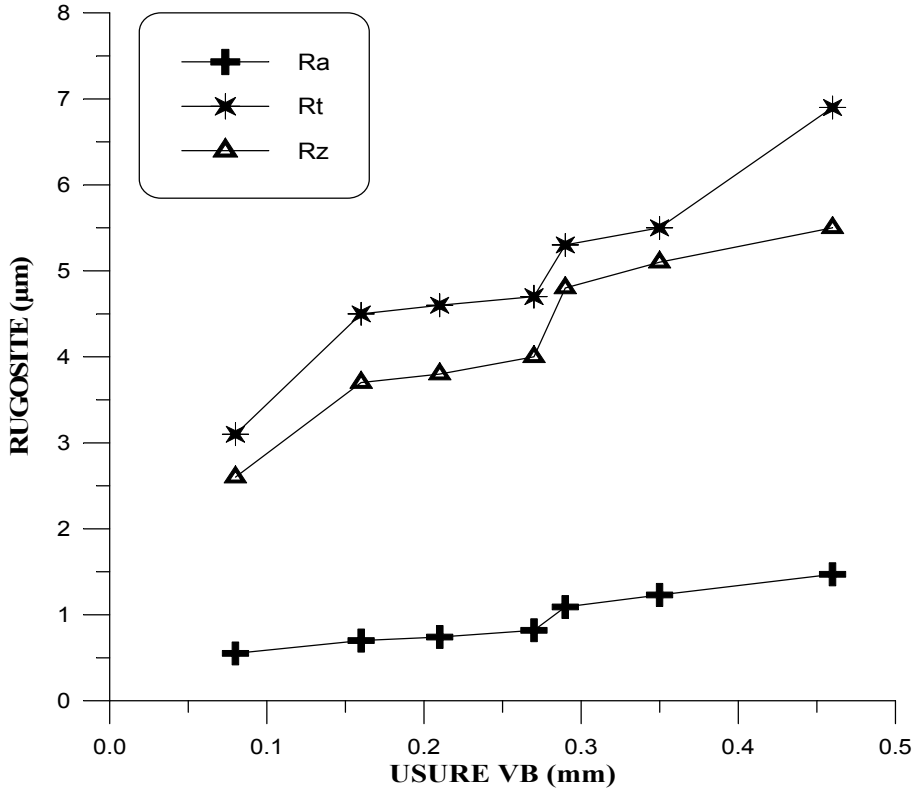


Figure IV.15e : *Vc = 350 m/min*

Figure IV.15 : *Évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille du CBN7020 pour différentes vitesses de coupe.*

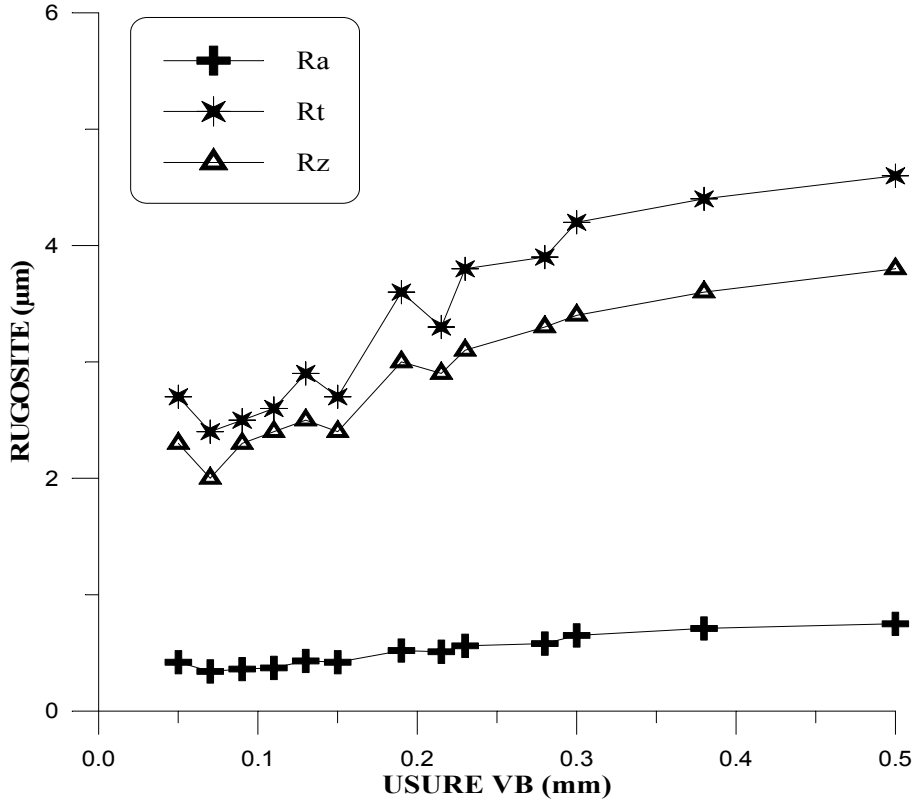


Figure IV.16a : *Vc=60 m/min*

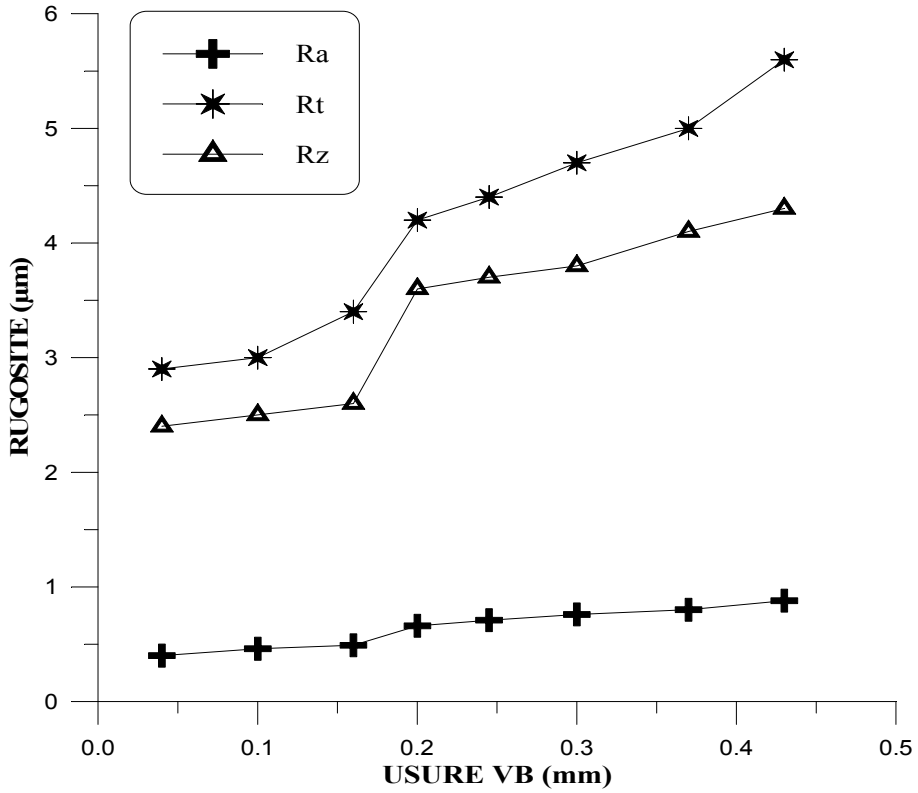


Figure IV.16b: *Vc=90 m/min*

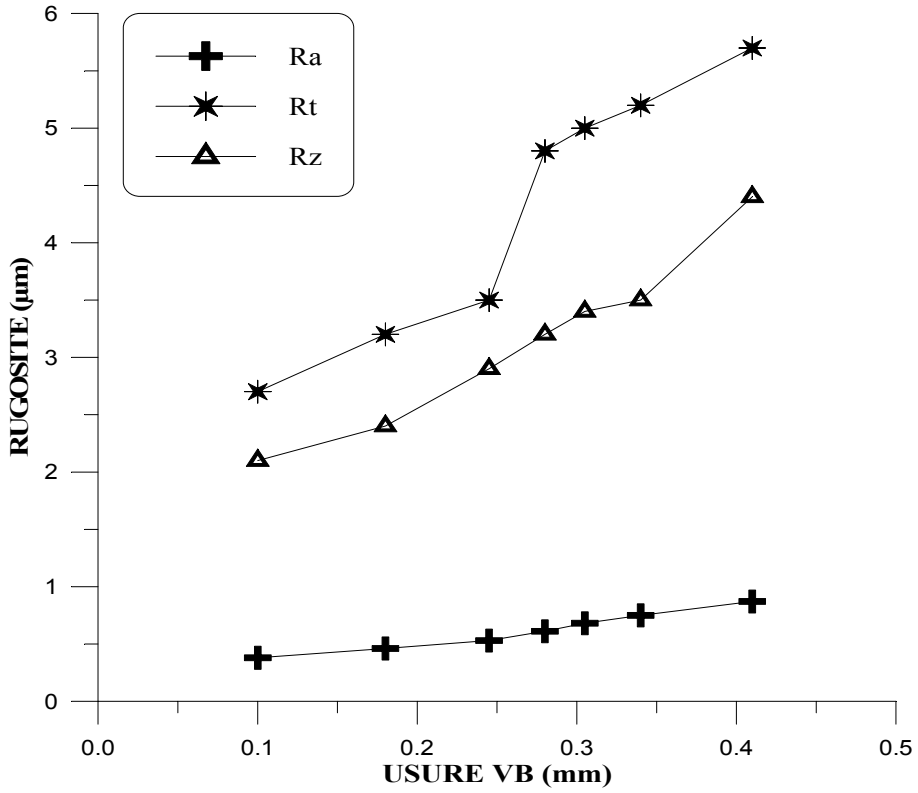


Figure IV.16c: *Vc=120 m/min*

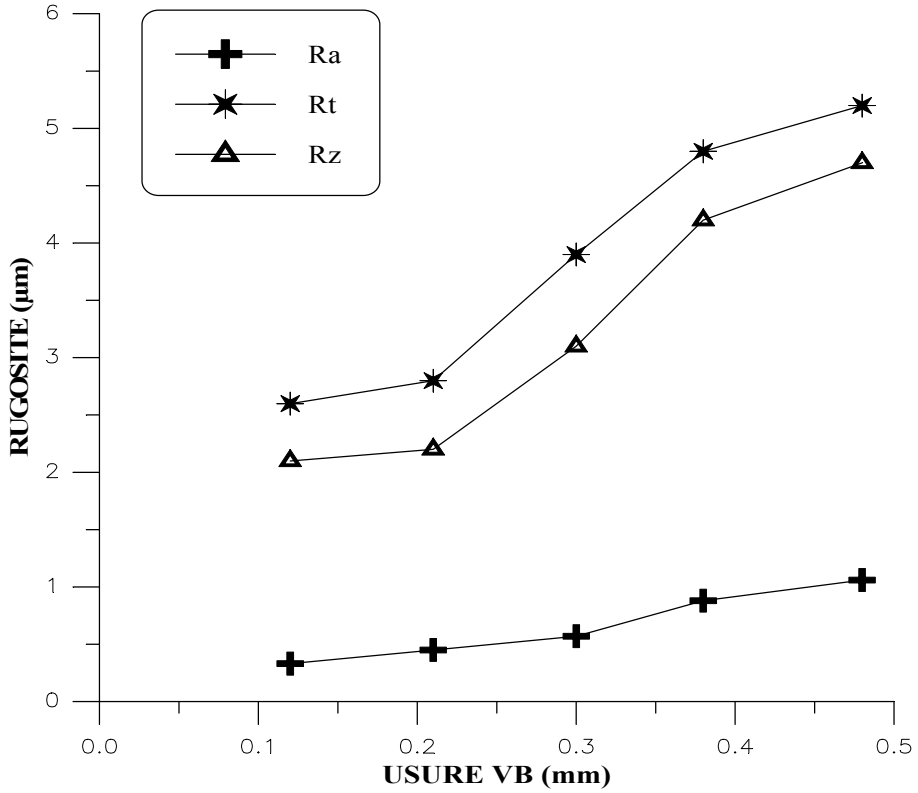


Figure IV.16d: Vc = 180 m/min

Figure IV.16 : *Évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille de la CC650 pour différentes vitesses de coupe.*

IV.5 Détermination des modèles de la rugosité

IV.5.1 Modèle rugosité en fonction des conditions de coupe

Suivant le plan d'expériences indiqué dans le tableau IV.1 et IV.2, une série d'essais a été réalisée pour différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (V_c, f, a_p) et ceci pour les deux aciers testés. Les critères de rugosité considérés, comme il est défini plus haut, sont Ra, Rz et Rt. Le but est de mettre au point des corrélations entre ces critères et les paramètres d'usinage sous la forme de l'équation suivante :

$$R = C_1 f^{k_1} a_p^{k_2} V_c^{k_3} \qquad \text{(IV.1)}$$

où C_1, est une constante ;

k_1, k_2 et k_3 sont des exposants..

En utilisant la méthode des moindres carrée, les modèles obtenus sont présentés dans le tableau IV.3. Les coefficients de détermination indiquent une bonne corrélation entre ces variables et la rugosité. Les résultats permettent de prédire, pour des conditions d'usinage choisies dans les limites du modèle, la rugosité avant même d'entreprendre des essais.

Tableau IV.3 : *Modèle de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe.*

Matériaux de coupe	Modèles	R²
CBN 7020 / 100Cr6	$R_a = e^{4,154}. f^{1,622}. a_p^{0,070}. Vc^{-0,308}$	0,99
	$R_t = e^{5,170}. f^{1,227}. a_p^{0,081}. Vc^{-0,299}$	0,98
	$R_z = e^{5,187}. f^{1,361}. a_p^{0,103}. Vc^{-0,278}$	0,99
CC650 / 100Cr6	$R_a = e^{4,097}. f^{1,521}. a_p^{0,03}. Vc^{-0,287}$	0,98
	$R_t = e^{4,456}. f^{1,038}. a_p^{0,041}. Vc^{-0,192}$	0,99
	$R_z = e^{5,107}. f^{1,187}. a_p^{0,062}.Vc^{-0,299}$	0,96
CBN 7020 / X200Cr12	$R_a = e^{3,554}. f^{1,.315}. a_p^{0,089}. Vc^{-0,234}$	0,99
	$R_t = e^{4,770}. f^{1,012}. a_p^{0,095}. Vc^{-0,223}$	0,97
	$R_z = e^{4,530}. f^{1,178}. a_p^{0,077}.Vc^{-0,145}$	0,99
CC650 / X200Cr12	$R_a = e^{3,619}. f^{1,231}. a_p^{0,016}. Vc^{-0,289}$	0,98
	$R_t = e^{3,984}. f^{0,872}. a_p^{0,051}. Vc^{-0,114}$	0,99
	$R_z = e^{4,654}. f^{1,065}. a_p^{0,063}.Vc^{-0,220}$	0,98

Comme attendu, l'avance reste le facteur prépondérant sur les critères de rugosité avec des exposants supérieurs à l'unité suivie par la vitesse de coupe ce qui confirme la tendance de l'équation (I.17). Pour étayer cette idée, la rugosité est reprise en fonction de l'avance pour trois types de données à savoir les rugosités Rt et Ra mesurées, celles prédites par les corrélations (Tableau IV.3) et enfin, celles obtenues par les équations (I.14) et (I.15). Ces comparaisons sont réunies pour V_c=90m/min dans les figures IV.17 et IV.18 et Vc=120m/min dans les figures IV.19 et IV.20 pour le CBN7020 et la céramique CC650 respectivement et ceci lors de l'usinage des aciers 100Cr6 et X200Cr12. Les corrélations de Ra et de Rt décrivent de manière satisfaisante l'évolution de la rugosité en fonction de l'avance, bien qu'une dispersion est observée dans les valeurs mesurées autour des valeurs prédites par les corrélations. Il est aussi observé (figure IV.17 et IV.18) qu'aux valeurs faibles de f, l'équation I.14 sous évalue la valeur de Rt mais à mesure que *f* augmente, l'écart diminue sensiblement. Ceci est confirmé par la littérature **[BED 89], [DIE 85]**. Comparativement à la céramique, le CBN permet d'obtenir des rugosités inférieures pour la même avance ce qui se traduit par des écarts entre $Rt_{(théorique)}$ et $Rt_{(mesurée)}$ de plus en plus faibles. La même approche est invoquée pour $R_{t(théorique)}$ qui dans ce cas surestime la rugosité aux avances élevées pour le CBN ($f \geq 0,2$ mm/tr). Cependant, la différence entre $Ra_{(mesurée)}$ et $Ra_{(théorique)}$ est en nette divergence à partir de *f*=0,11mm/tr. Ce qui implique que la surface générée par le CBN comme attendu est de meilleure qualité par rapport à celle de la CC650.

Les mêmes constatations sont observées lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 (figure IV.19 et IV.20), $Rt_{(théorique)}$ sous évalue la valeur de Rt et ceci pour le CBN7020 et la CC650. Mais à mesure que l'avance augmente, l'écart se réduit sensiblement. Pour le CBN7020 les valeurs de $Rt_{(mesurée)}$ sont plus proches de $Rt_{(théorique)}$ comparativement à la CC650, ce qui prouve que le CBN génère des rugosités faibles par rapport à la CC650. La rugosité moyenne $Ra_{(théorique)}$ suit des valeurs plutôt surestimées. Au-delà de f=0,14mm/tr et f=0,15mm/tr pour la CC650, les courbes commencent à diverger.

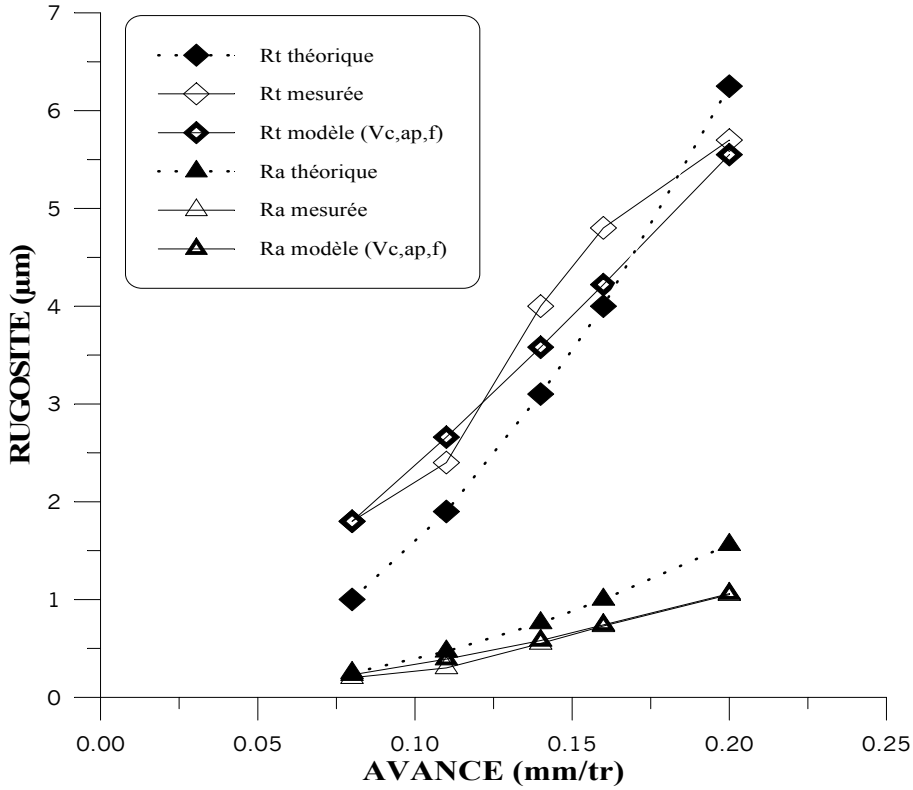


Figure IV.17 : *Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales et prédites de Ra et Rt pour CBN7020/100Cr6 en fonction de (f) à Vc=90m/min et a_p=0,2mm.*

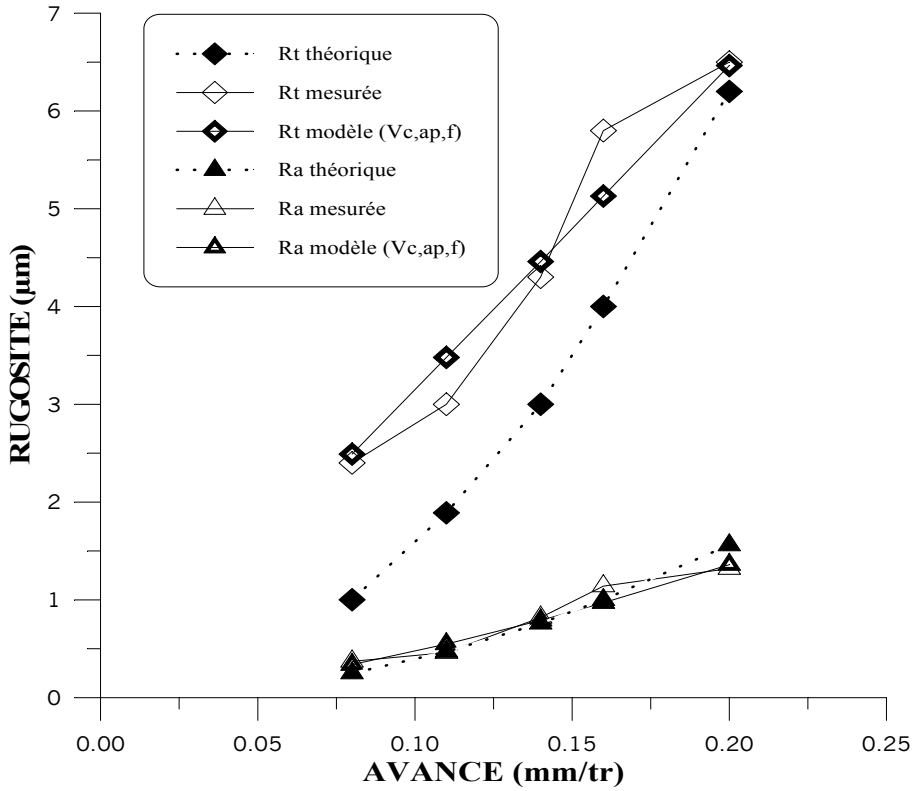


Figure IV.18 : *Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales et prédites de Ra et Rt pour CC650/100Cr6 en fonction de (f) à Vc=90m/min et a_p=0,2mm.*

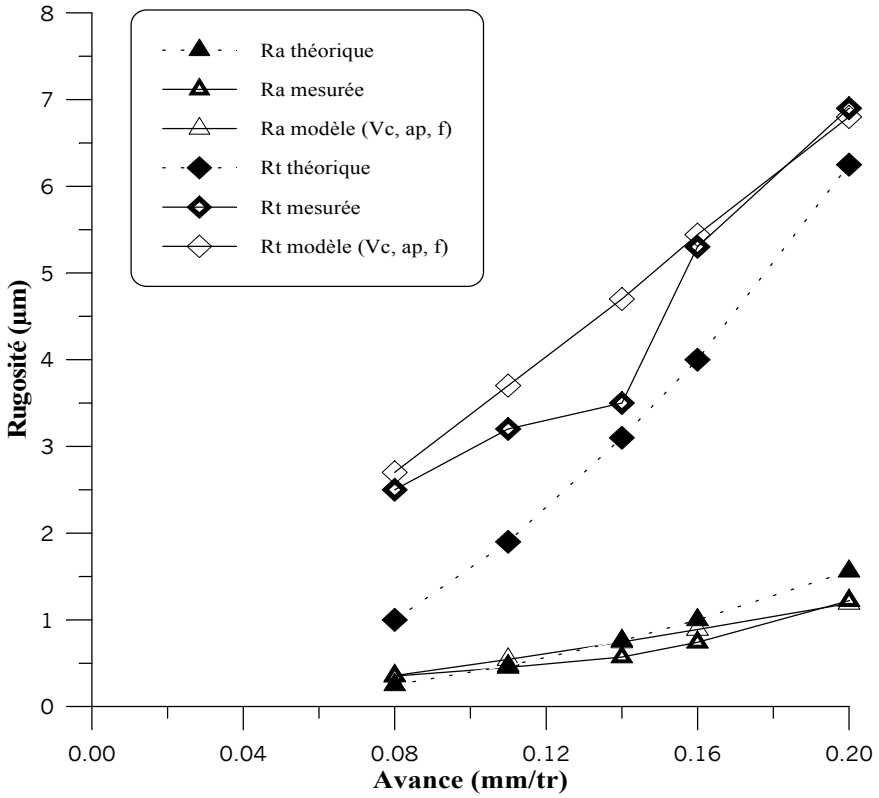


Figure IV.19 : *Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales et prédites de Ra et Rt pour CBN7020/X200Cr12 en fonction de (f) à Vc=120m/min et a_p=0,2mm.*

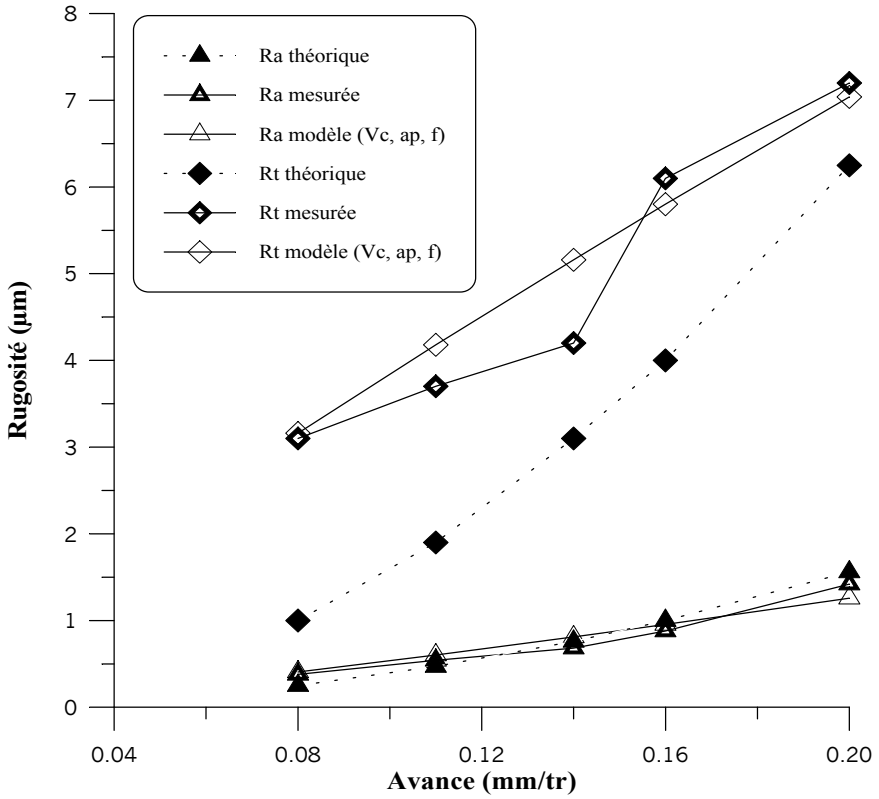


Figure IV.20 : *Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales et prédites de Ra et Rt pour CBN7020/X200Cr12 en fonction de (f) à Vc= 120m/min et a_p=0,2mm.*

VI.5.2 Modèle rugosité-usure

Afin de concrétiser le second objectif de l'étude, cette phase indique que les conditions sont réunies pour examiner éventuellement la corrélation reliant R_a et VB. En effet, ces deux critères (VB et R_a) bien qu'associés au couple (outil-pièce) respectivement influencent l'un l'autre et donc, doivent obéir à une corrélation qu'il faut définir. Le traitement des résultats des figures IV.13a-f, IV.14a-d, IV.15a-e et IV.16a-d a permis de mettre au point pour chaque vitesse de coupe une corrélation de la forme :

$$R_a = K\,(VB)^{\eta} \qquad \text{(IV.2)}$$

Les modèles trouvés pour les deux aciers étudiés sont illustrés dans le tableau IV.4. Cette approche contribue au suivi de l'usure en dépouille VB à partir des valeurs mesurées de la rugosité et en même temps renseigne sur la durée de vie des outils. Ce qui revient à dire que pour un temps d'usinage donné cette corrélation traduit d'une manière simple les données des figures III.1, III.7, III.21, III.24 par l'intermédiaire des constantes K et η.

Tableau IV.4 : *Modèles de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille.*

Matériaux de coupe	Vitesse de coupe (m/min)	Modèles (R_a µm ; VB mm)	R^2
CBN7020 / 100Cr6	90	$Ra = 0{,}936 \cdot VB^{0{,}424}$	0,84
	120	$Ra = 0{,}477 \cdot VB^{0{,}240}$	0,89
	180	$Ra = 0{,}507 \cdot VB^{0{,}197}$	0,88
	220	$Ra = 0{,}465 \cdot VB^{0{,}184}$	0,82
	280	$Ra = 0{,}925 \cdot VB^{0{,}522}$	0,88
	350	$Ra = 1{,}848 \cdot VB^{0{,}873}$	0,87
CC650 / 100Cr6	60	$Ra = 0{,}589 \cdot VB^{0{,}160}$	0,91
	90	$Ra = 0{,}459 \cdot VB^{0{,}069}$	0,81
	120	$Ra = 0{,}498 \cdot VB^{0{,}162}$	0,97
	180	$Ra = 1{,}934 \cdot VB^{1{,}014}$	0,95
CBN7020 / X200Cr12	90	$Ra = 1{,}601 \cdot VB^{0{,}563}$	0,85
	120	$Ra = 2{,}086 \cdot VB^{0{,}730}$	0,98
	180	$Ra = 1{,}890 \cdot VB^{0{,}638}$	0,90
	280	$Ra = 3{,}529 \cdot VB^{0{,}865}$	0,93
	350	$Ra = 2{,}061 \cdot VB^{0{,}567}$	0,88
CC650 / X200Cr12	60	$Ra = 1{,}125 \cdot VB^{0{,}679}$	0,90
	90	$Ra = 0{,}921 \cdot VB^{0{,}353}$	0,84
	120	$Ra = 1{,}351 \cdot VB^{0{,}587}$	0,93
	180	$Ra = 1{,}859 \cdot VB^{0{,}856}$	0,95

IV. 6 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre ont permis de définir l'influence des paramètres de coupe ainsi que l'usure des outils, sur la rugosité des surfaces usinées. Il ressort de ces résultats que :

- Les conditions d'usinage (Vc, f, a_p) ont une influence considérable sur la qualité de la surface usinée. En effet l'influence la plus pertinente sur la rugosité est attribuée à l'avance, suivie par la vitesse de coupe et enfin la profondeur de passe.
- Le matériau de coupe est également un maillon essentiel de la chaîne d'amélioration de la qualité macro et micro-géométrique des pièces mécaniques. En effet les résultats obtenus par le CBN7020 en terme de rugosité, dépassent de loin ceux de la céramique CC650.
- Les rugosités trouvées par le CBN7020 sont comparables à celles obtenues par la rectification. Cela a pour effet de réduire et de simplifier les phases de fabrication des pièces.
- L'usure est l'un des facteurs à considérer, puisque son évolution endommage et dégrade l'état de surface des pièces. Malgré l'évolution de l'usure jusqu'à la valeur [VB]=0,3 mm, la majorité des valeurs enregistrées de Ra n'ont pas dépassé la valeur de 1µm.
- Le suivi de l'évolution de la rugosité en fonction de l'usure des plaquettes de coupe permet de donner des informations sur l'état de l'arête de coupe pendant l'usinage. Ceci est qui très important la surveillance automatisée de la coupe dans les conditions industrielles.

CHAPITRE V

IMPACT DES CONDITIONS DE COUPE ET DE L'USURE SUR LES EFFORTS DE COUPE

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'étude de l'impact des conditions de coupe (Vc, f, a_p) sur les efforts et les pressions de coupe générés lors du tournage des aciers 100Cr6 et X200Cr12 traités à 60 HRC. Les matériaux de coupe testés sont le CBN 7020 et la céramique mixte CC650. Nous présentons également les résultats de l'effet de l'usure de l'outil CBN7020 sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe. En dernier lieu nous proposons des relations mathématiques qui lient les composantes de l'effort de coupe avec les trois paramètres (Vc, f, a_p).

V.2 Impact des conditions de coupe sur les efforts de coupe (Méthode unifactirielle)

V.2.1 Evolution des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6

a) Influence de la vitesse de coupe

Les résultats présentés sur la figure V.1 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage (Vc, f, a_p) lors de l'usinage du 100Cr6 par le CBN7020. La figure V.1a, montre qu'une augmentation de la vitesse de coupe conduit à une diminution des composantes de l'effort de coupe, ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui rend le métal travaillé plus plastique et par conséquent l'effort nécessaire pour la coupe diminue. Il est à noter aussi que les vitesses de coupes employées ne favorisent pas l'apparition de l'arête rapportée. En examinant l'allure des courbes, on remarque que les efforts diminuent jusqu'à 180 m/min, au-delà de cette limite, ils se stabilisent légèrement. Cette diminution des efforts est d'autant plus marquée par les faibles vitesses de coupe. En effet, une élévation de la vitesse de coupe de 60 à 180 m/min, conduit à une diminution des trois composantes de l'effort (Fr, fa et Fv) respectivement de (18,4%, 22,3%, 23,7%). Alors qu'une augmentation de la vitesse de 180 à 280 m/min, conduit à une diminution de (11,6% ; 9,47% ; 7,18%). Les résultats du tournage du 100Cr6 à l'état trempé, montrent que l'effort radial (Fr) est prépondérant par rapport aux deux autres efforts (Fv et Fa). Avec une profondeur de passe de 0,2 mm l'effort principal en tournage dur est bien l'effort radial. Ceci peut être expliqué par le travail de l'outil exclusivement avec son rayon du bec qui est égal à 0,8 mm ($r_\varepsilon > a_p$).

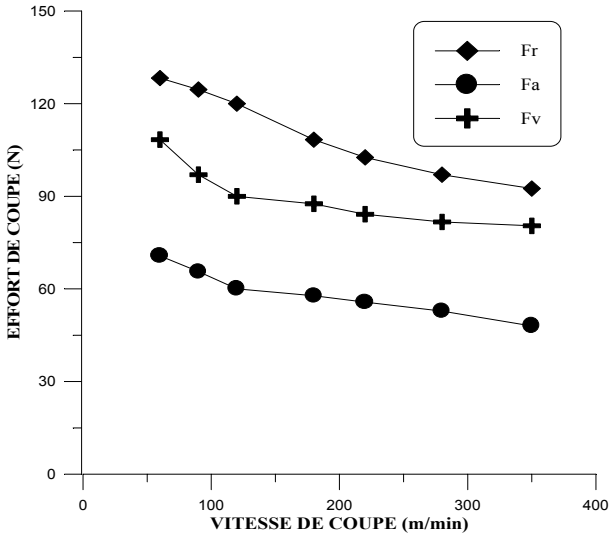
La figure V.2, illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe (Vc, f, a_p), lors de l'usinage du 100Cr6 avec la céramique mixte CC650. La figure V.2a, montre que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une diminution des efforts de coupe. A la vitesse de 30 m/min les trois composantes (Fr, Fa, Fv) sont à leur maximum ce qui entraîne des pressions spécifiques élevées sur l'arête de coupe. A 90 m/min on remarque une légère stabilisation des efforts. L'augmentation de la vitesse de 30 à 90 m/min entraîne une diminution des composantes (Fr, Fa et Fv) successivement de (17,5% ; 18,18% ; 17%). A la vitesse de 180 m/min les efforts de coupe sont à leur minimum, ce qui est très bénéfique à la stabilité d'usinage. Mais à cette vitesse la tenue de la céramique CC650 est très faible et l'endommagement des arêtes est important, ce qui nous oblige à chercher un compromis entre les efforts mini aux grandes vitesses de coupe et l'usure maxi.

b) Influence de l'avance

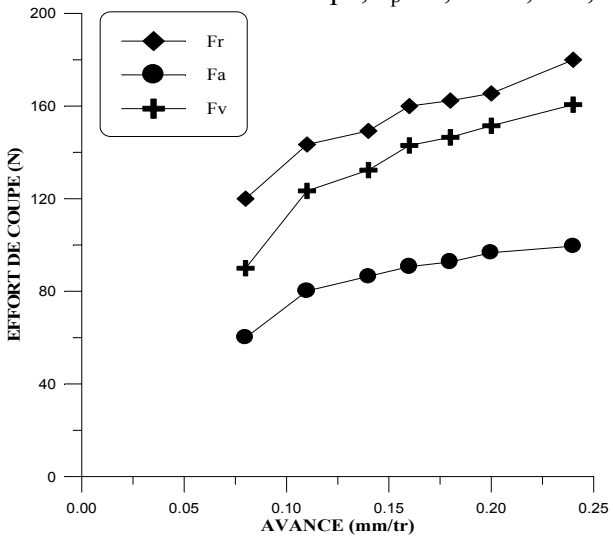
Les résultats de l'influence de l'avance sur les efforts de coupe dans le cas du CBN7020 (figures V.1b), montrent que les efforts augmentent avec l'accroissement de l'avance, car cette dernière accroît la section du copeau cisaillée. Ce qui se traduit par une résistance à la rupture plus importante nécessitant des efforts plus grands pour l'enlèvement du copeau. On remarque que l'effort radial est prépondérant suivi par l'effort tangentiel et en dernier lieu l'effort axial. Ceci est valable pour toutes les avances testées. Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de l'avance sur les efforts de coupe sont comme suit : L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,16 mm/tr, accroît les composantes de l'effort de coupe (Fr, Fa et Fv) successivement de 33%, 51% et 58%. L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 mm/tr, conduit à une élévation de (Fr, Fa et Fv) successivement de 50%, 65% et 77%.
La figure V.2b, illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance dans le cas de la céramique CC650. Il ressort que l'effort radial (Fr) comme dans le cas du CBN7020 reste prépondérant suivi par l'effort tangentiel et ensuite l'effort axial. Ce dernier est moins sensible à l'augmentation de l'avance car avec une profondeur de 0,2 mm l'outil usine exclusivement dans le rayon du bec. L'augmentation de l'avance de 0,8 à 0,24 mm/tr, conduit à une augmentation de (Fr, Fa et Fv) successivement de 56%, 44,3% et 56,2%.

c) Influence de la profondeur de passe

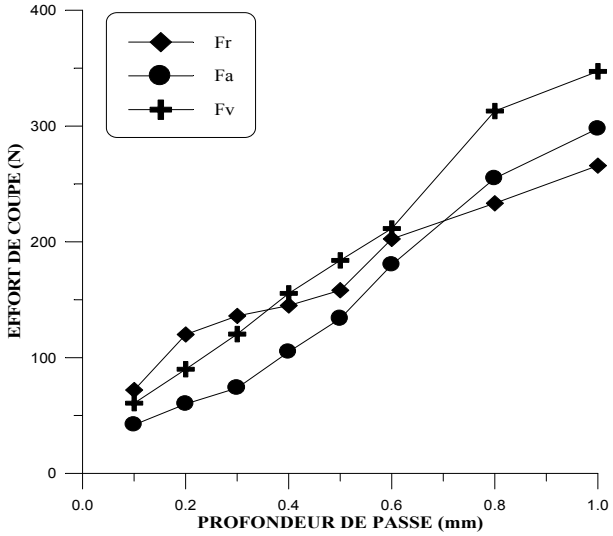
La figure V.1c présente les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe dans le cas du CBN7020. Les résultats montrent une nette augmentation des efforts de coupe avec l'augmentation de la profondeur de passe et cela à cause de l'augmentation de l'épaisseur (section) du copeau et par conséquent l'augmentation du volume du métal déformé. Cette augmentation est presque linéaire. Aux petites valeurs de la profondeur de passe, l'effort radial est prépondérant. Au-delà de la valeur de a_p= 0,6mm, les efforts tangentiel et axial dépassent l'effort radial. Cela peut être expliqué par le travail de l'outil en tournage par son rayon du bec aux petites profondeurs de passe. Avec l'augmentation de a_p, la coupe se fait en dehors de la limite du rayon du bec de l'outil et la pièce présente une résistance à la pénétration de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et en particulier axial. Car la longueur de l'arête tranchante en contact avec la pièce augmente, autrement dit l'outil ne travaille plus avec son rayon seulement.
Si on compare les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe et l'avance, on remarque que la profondeur de passe influence d'une manière plus accentuée les efforts de coupe par rapport à l'avance. Avec l'augmentation de la profondeur de passe de 0,5 à 1 mm, l'effort de coupe se multiplie presque à une par deux de l'effort de coupe, avec une augmentation de (Fr, Fa et Fv) d'une valeur de 68%, 123% et 88,8%. La valeur de l'effort axial est sensible à l'augmentation de la profondeur de passe. Les mêmes observations sont enregistrées lors de l'usinage avec la céramique CC650 (Figures V.2c). Quand l'outil travaille avec son rayon du bec, l'effort radial est prépondérant suivi par l'effort tangentiel et en fin l'effort axial. Au fur est à mesure que la coupe s'effectue avec le rayon du bec et l'arête de coupe, l'effort axial augmente rapidement et l'effort radial diminue d'intensité.



a) Influence de la vitesse de coupe, a_p =0,2mm ; f=0,08mm/tr

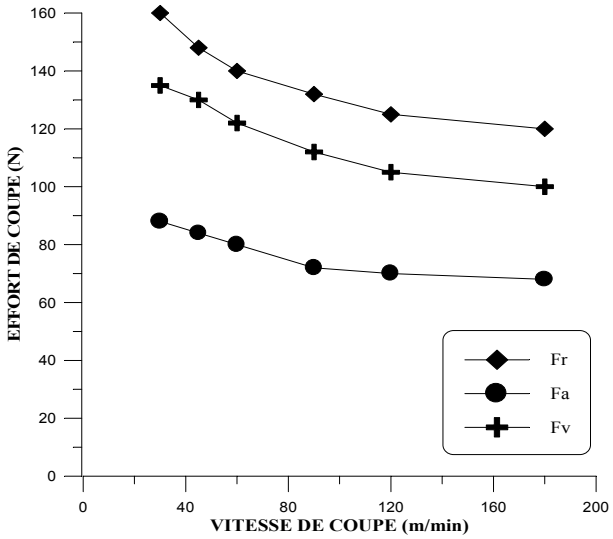


b) Influence de l'avance, Vc=120m/min ; f=0,08mm/tr

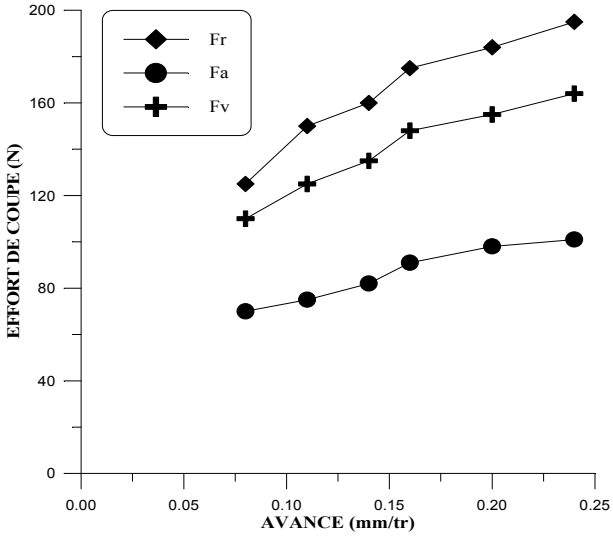


c) Influence de la profondeur de passe, Vc=120m/min ; a_p=0,2mm.

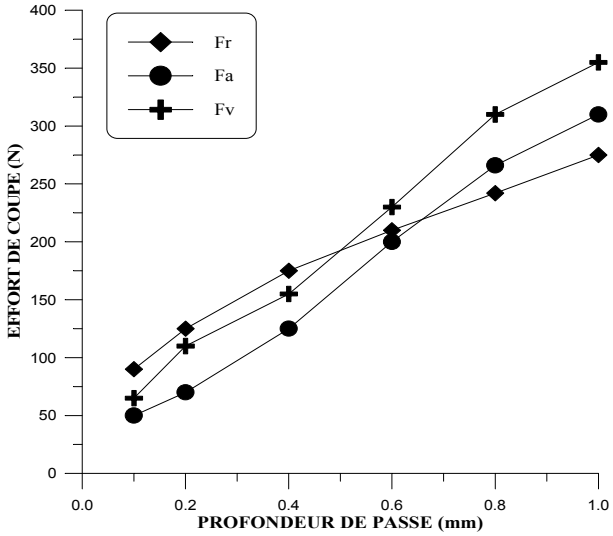
Figure V.1 : *Evolution des efforts de coupe en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier 100Cr6 usiné par le CBN7020.*



a) Influence de la vitesse de coupe, a_p =0,2mm ; f=0,08mm/tr



b) Influence de l'avance, Vc=120m/min ; f=0,08mm/tr



c) Influence de la profondeur de passe, Vc=120m/min ; a_p=0,2mm.

Figure V.2 : *Evolution des efforts de coupe en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier 100Cr6 usiné par le céramique CC650.*

V.2.2 Evolution des efforts spécifiques lors de l'usinage de l'acier 100Cr6

a) Influence de la vitesse de coupe

La pression de coupe, aussi appelée effort spécifique, est une grandeur définie comme étant l'effort de coupe par unité de surface, $Kc = Fv/(f \cdot a_p)$. La figure V.3a illustre les courbes de l'évolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse (Vc) dans le cas du CBN7020. Il ressort que l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution des pressions de coupe. A cet effet, on distingue deux périodes d'évolution différentes:

- La première période est caractérisée par une diminution importante de l'effort spécifique qui correspond à un chargement important de l'arête de coupe. Les pressions enregistrées sont élevées dans cette zone, à titre d'exemple, à Vc=60 m/min on enregistre des pressions (Kcr, Kca et Kcv) de l'ordre de 8015,7 ; 4418,7 et 6771,2 N/mm^2. La fin de cette période conduit à la détermination de la vitesse minimale du domaine d'utilisation du couple outil-matière.

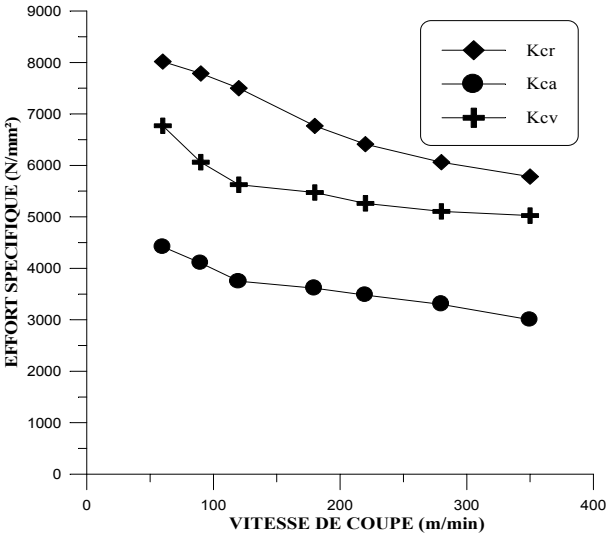
- La deuxième période est caractérisée par une plage où, les pressions de coupe se stabilisent, le décrochage se fait à partir de Vc=120 m/min. En pratique cette zone constitue la plage optimale d'utilisation de l'arête de coupe, elle se termine par la détermination de la vitesse de coupe maximale. A Vc=350 m/min les pressions spécifiques sont à leurs bas niveaux, ce qui est préférable à l'outil, on enregistre des pressions (Kcr, Kca et Kcv) de l'ordre de 5781,25 ; 3000 et 5025 N/mm^2. Cela a pour effet de minimiser les contraintes qui provoquent les sollicitations et la rupture brusque de l'arête de coupe.

b) Influence de l'avance

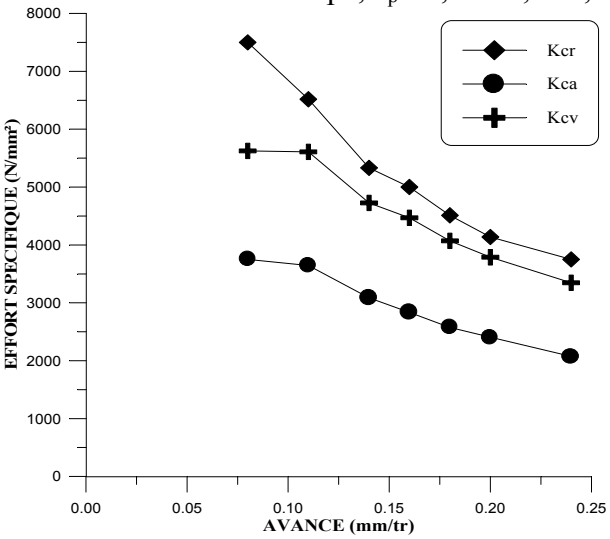
La figure V.3b présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance (*f*). On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance les pressions de coupe ont un comportement décroissant similaire à celui de la vitesse de coupe. Pour les faibles avances, on enregistre des pressions extrêmement élevées. Avec une avance de 0,08 mm/tr, les pressions de coupe (Kcr, Kca et Kcv) sont de l'ordre de 7500 ; 3750 et 5625 N/mm^2. Avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0,24 mm/tr les pressions chutent successivement de 50% ; 44,8% et 40,5%. Ici, un compromis reste à faire entre la diminution des pressions de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance.

c) Influence de la profondeur de passe

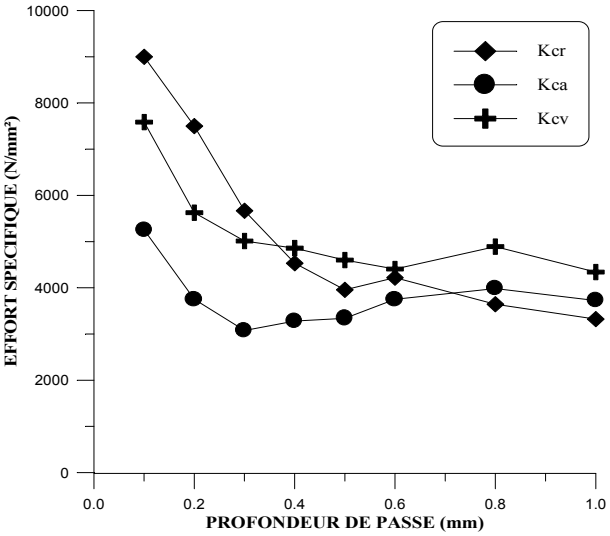
La figure V.3c illustre l'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe (a_p). Avec l'augmentation de cette dernière, on remarque une diminution des pressions jusqu'à a_p=0,3 mm. Au delà de cette valeur, on remarque une stabilité accompagnée avec une légère évolution des pressions (Kcv et Kca). L'analyse des résultats montre qu'aux faibles valeurs de la profondeur de passe on enregistre des pressions élevées (a_p=0,1mm ; Kcr=9000N/mm^2). A cet effet, il est déconseillé de travailler aux faibles valeurs de a_p, parce que l'arête de coupe subit des pressions énormes qui peuvent l'endommager.



a) Influence de la vitesse de coupe, a_p =0,2mm ; f=0,08mm/tr



b) Influence de l'avance, Vc=120m/min ; f=0,08mm/tr



c) Influence de la profondeur de passe, Vc=120m/min ; a_p=0,2mm.

Figure V.3 : *Evolution des efforts spécifiques en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier 100Cr6 usiné par le CBN.*

V.2.3 Evolution des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier X200Cr12

a) Influence de la vitesse de coupe

Les résultats présentés sur la figure V.4 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage (Vc, f, a_p) lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 par le CBN7020. L'analyse des courbes de la figure V.4a, montre que l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une décroissance des trois composantes (Fr, Fa et Fv). Cette observation n'est pas propre seulement au tournage des matériaux durs, c'est ce qui est appelé l'effet grande vitesse **[POU 99]**. Car avec l'augmentation de la vitesse de coupe, les températures dans la zone de formation du copeau sont relativement grandes. Elles rendent généralement le matériau usiné plus plastique, ce qui entraîne une diminution des efforts de coupe nécessaires à la déformation du copeau d'une part et elle améliore les conditions de frottement aux interfaces outil-pièce et copeau-outil. La température fait passer le frottement de sec à visqueux. Il faut signaler aussi qu'aux conditions de coupe utilisées, l'effort principal est bien l'effort radial suivi par l'effort tangentiel et axial. L'augmentation de la vitesse de coupe de 60 à 350m/min, fait baisser les trois composantes (Fr, Fa et Fv) successivement de 34,7% ; 66,6% et 38,8%. Toutefois les grandes vitesses de coupe génèrent des grandes températures qui accélèrent l'usure et par conséquent diminuent la durée de vie de l'outil. Cela nous pousse à choisir des vitesses de coupe qui donnent des tenues exploitables sur le plan industriel.

La figure V.5a illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 avec la céramique CC650. De la même manière que dans le cas du CBN7020, les courbes des composantes de l'effort de coupe sont décroissantes avec l'augmentation de la vitesse de coupe. En examinant l'allure des courbes on remarque deux périodes d'évolution. Les efforts diminuent jusqu'à la vitesse de 60 m/min, au-delà de cette limite, on observe une légère stabilisation. En effet, l'augmentation de la vitesse de coupe de 30 à 60 m/min a pour effet de diminuer les composantes (Fr, Fa et Fv) successivement de 11,8% ; 12,8% et 9,3%. Entre la vitesse de 60 et 120 m/min, les composantes (Fr, Fa et Fv) diminuent successivement de 8,5% ; 8,33% et 5,3%. A la vitesse de 180 m/min les efforts de coupe sont à leurs bas niveaux ce qui a pour conséquence la diminution des pressions spécifiques sur l'arête de l'outil, mais l'endommagement de l'arête à cause de l'usure rapide est très important.

b) Influence de l'avance

La figure V.4b, illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance. Il ressort de ces résultats que les trois composantes (Fr, Fa et Fv) ont une allure croissante avec l'augmentation de l'avance, mais avec une pente qui diffère. L'effort radial est l'effort de coupe principal à cause de l'usinage dans le rayon du bec de l'outil. Pratiquement l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 a pour effet d'accroître les composantes de l'effort (Fr, Fa et Fv) successivement de 43% ; 40% et 72%.

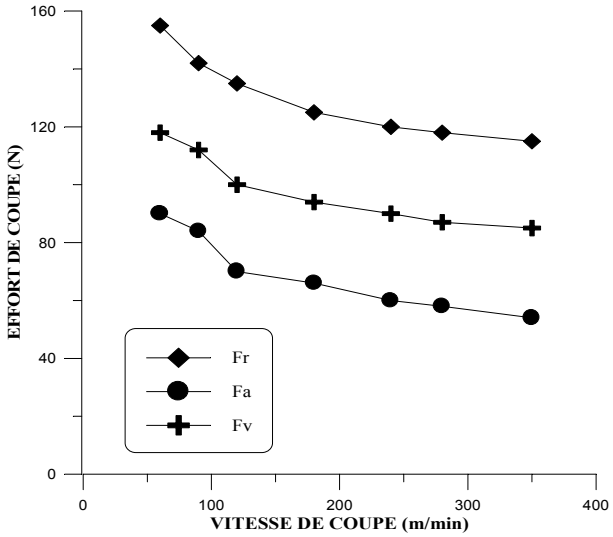
L'évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance enregistrés avec la céramique CC650 (figure V.5b) diffère peu de celle enregistrée avec le CBN7020. De la même manière, l'augmentation de l'avance conduit à une élévation des efforts de coupe et que l'effort radial reste prépondérant suivi par l'effort tangentiel et enfin l'effort axial. L'analyse des valeurs des efforts enregistrés montre que l'augmentation

de l'avance de 0,08 à 0,24 conduit à une élévation des composantes (Fr, Fa et Fv) de 55% ; 50% et 53%). Il est intéressant de souligner aussi que les petites avances engendrent des pressions de coupe élevées et aux grandes avances les pressions sont à leurs bas niveaux, ce qui est profitable à la coupe. Là aussi un compromis doit ce faire entre les pressions basses et les rugosités élevées causées par l'augmentation de l'avance.

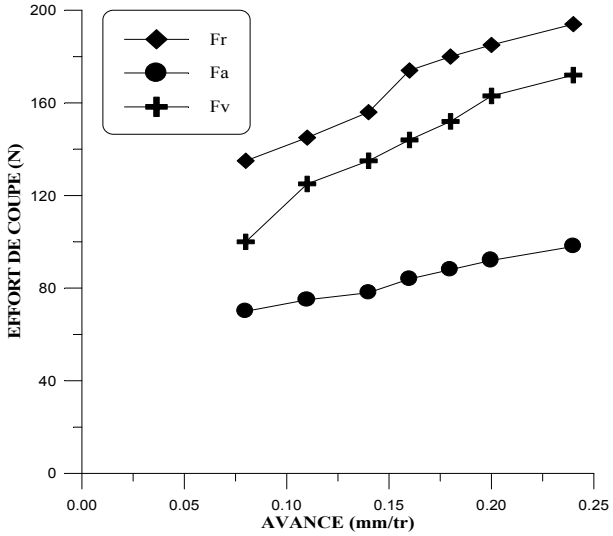
c) Influence de la profondeur de passe

La figure V.4c présente les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe dans le cas du CBN7020. L'analyse des courbes montre que les composantes des efforts de coupe augmentent fortement et presque linéairement avec l'augmentation de la profondeur de passe et l'effort radial est prépondérant jusqu'à la valeur de $a_{p(limite)} = r_\varepsilon(1-\cos(\chi)) = 0.593$mm. Cette valeur correspond à la limite du travail dans le rayon du bec de l'outil. Au-delà de cette valeur limite la coupe se fait avec le rayon d'arrondi du bec de l'outil et de l'arête tranchante. Dans ce cas l'effort radial diminue et les efforts tangentiel et axial prennent de l'ampleur. Plus la profondeur de passe augmente plus l'effort axial est grand, car la pièce présente une résistance à l'avancer de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et en particulier l'effort axial. Sur le plan pratique, l'augmentation de la profondeur de passe de 0,1 à 1mm (dix fois) conduit à une élévation des composantes de l'effort (Fr, Fa et Fv) successivement de 189,5% ; 540% et 380%.

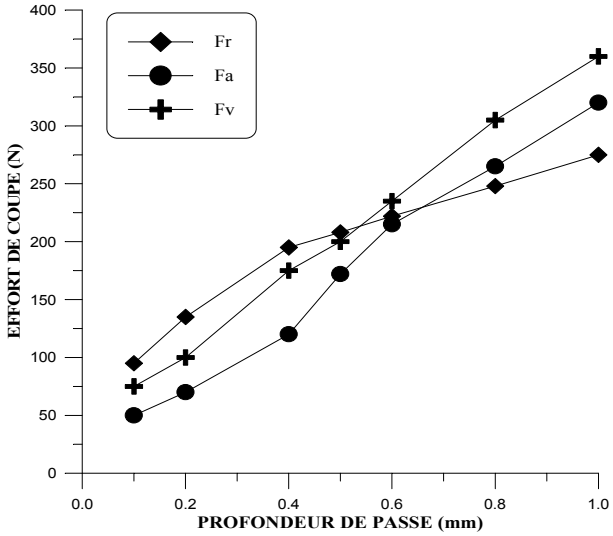
De la même manière, les efforts de coupe générés lors de l'usinage avec la céramique CC650 augmentent presque linéairement en fonction de l'augmentation de la profondeur de passe (figure V.5c). L'augmentation de la profondeur de passe de 0,1 à 1mm (dix fois) conduit à une augmentation des composantes de l'effort (Fr, Fa et Fv) successivement de 195% ; 498,2% et 374%. L'analyse des efforts de coupe enregistrés par les deux nuances d'outils testés, montre que les efforts enregistrés par la céramique sont légèrement supérieurs à ceux du CBN7020 et les variations se situent entre 5 à 10%. Cette variation peut être expliquée partiellement par l'existence du revêtement en TiN (2µm) sur la plaquette en CBN. Ce dernier facilite l'écoulement du copeau et retarde l'usure ce qui conduit à minimiser les frottements et par conséquent les efforts de coupe.



a) Influence de la vitesse de coupe, a_p =0,2mm ; f=0,08mm/tr

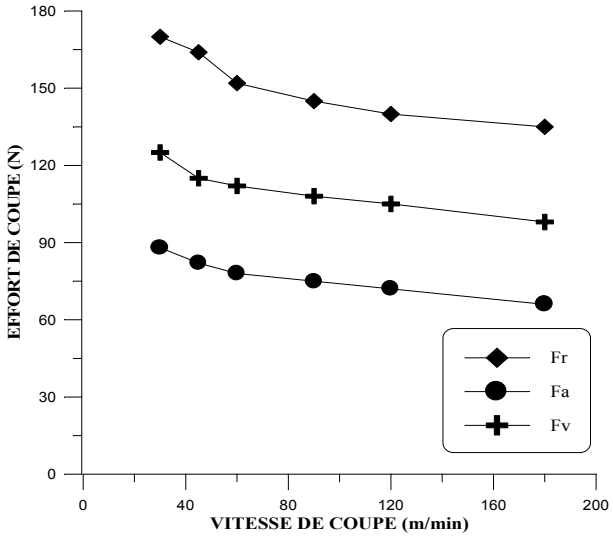


b) Influence de l'avance, Vc=120m/min ; f=0,08mm/tr

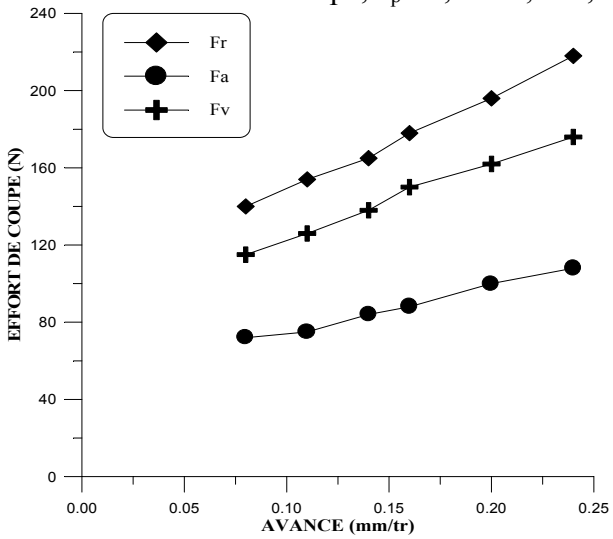


c) Influence de la profondeur de passe, Vc=120m/min ; a_p=0,2mm.

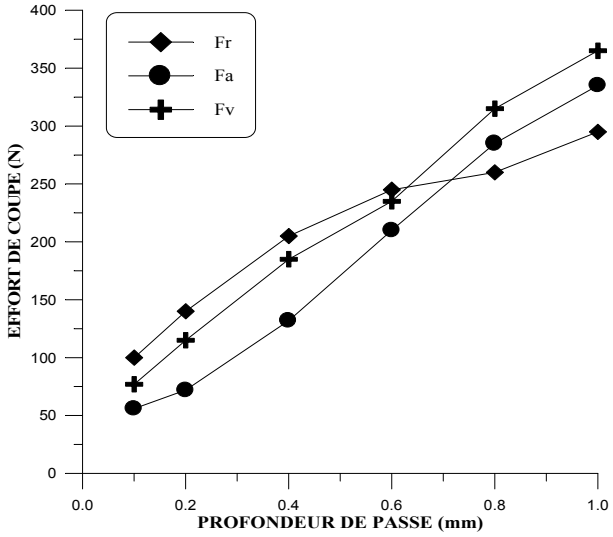
Figure V.4: *Evolution des efforts de coupe en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier X200Cr12 usiné par le CBN.*



a) Influence de la vitesse de coupe, a_p =0,2mm ; f=0,08mm/tr



b) Influence de l'avance, Vc=120m/min ; f=0,08mm/tr



c) Influence de la profondeur de passe, Vc=120m/min ; a_p=0,2mm.

Figure V.5 : *Evolution des efforts de coupe en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier X200Cr12 usiné par le céramique CC650.*

V.2.4 Evolution des efforts spécifiques lors de l'usinage de l'acier X200Cr12

a) Influence de la vitesse de coupe

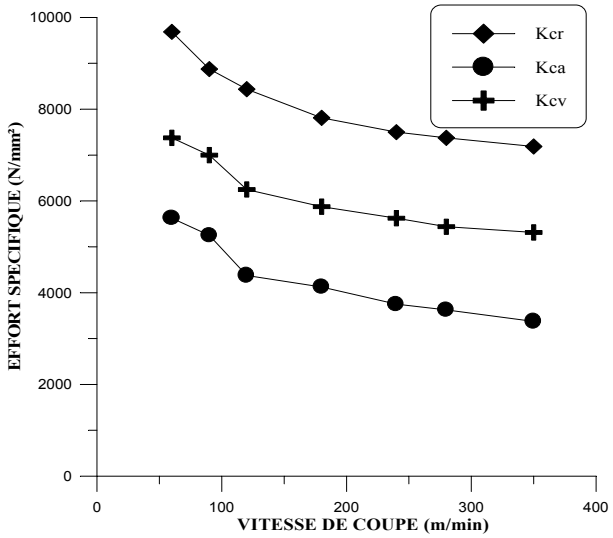
La vitesse de coupe est le paramètre qui contrôle majoritairement l'énergie fournie au système et qui endommage l'outil. Le choix non adéquat de la vitesse de coupe lors de l'usinage à des conséquences graves sur les résultats escomptés. Le bon contrôle de cette plage de vitesse de coupe permet donc une meilleure maîtrise du processus de coupe. A cet effet, la figure V.6a montre la variation des efforts (pressions) spécifiques en fonction de la vitesse de coupe. L'analyse des courbes montre que l'augmentation de la vitesse conduit a une nette diminution des efforts spécifiques de coupe. Dans la zone de vitesse (60 à 120) m/min, l'usinage est perturbé, on enregistre des pressions (Kcr, Kca et Kcv) élevées. Donc, il n'est pas possible de tenir compte de la vitesse 60 m/min car les pressions sur la surface d'attaque de l'outil sont extrêmes 9687,5 ; 5625 et 7375 N/mm^2. A la vitesse de 120 m/min, les pressions de coupe commencent a se stabiliser. L'usinage à cette vitesse est idéal, car le système usinant est caractérisé par une très bonne stabilité. A la vitesse de 350 m/min les pressions de coupe sont à leurs bas niveaux ce qui est avantageux à l'outil. Mais d'autre part, à 350 m/min la tenue de l'outil est tellement petite qu'elle ne peut pas être exploitée sur le plan pratique. Là aussi un compromis doit se faire entre les pressions minimales et l'usure maximale enregistrées aux grandes vitesses.

b) Influence de l'avance

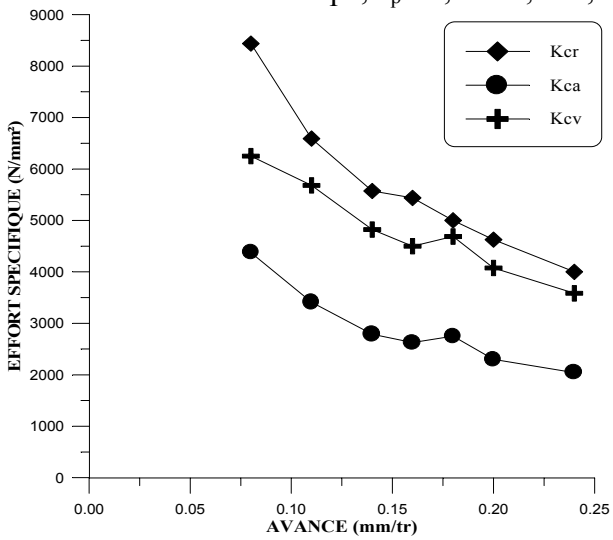
La figure V.6b, présente l'évolution de la pression de coupe en fonction de l'avance (f). On remarque clairement que l'augmentation de (f) a pour effet de diminuer la pression de coupe et que Kcr est prépondérante par rapport à Kcv et Kca, car on travaille dans la zone du rayon du bec de l'outil (a_p=0,2mm). Aux faibles valeurs de (f), on enregistre des pressions maximales. En effet à 0,08 mm/tr les pressions (Kcr, Kca et Kcv) sont de l'ordre de 8437,5; 4375 et 6250 N/mm^2. Un doublement de (f), conduit a une chute respective de pression de 35,5%; 40% et 28%. Pour une avance (f) de 0,24 mm/tr, les pressions sont à leurs bas niveaux. On enregistre dans ce cas une chute de pression de l'ordre de 52,6%; 54% et 44,66%. Là aussi un choix doit se faire entre les rugosités élevées qui dégradent la surface usinée ainsi que l'outil de coupe et les faibles pressions engendrées par l'augmentation de l'avance.

c) Influence de la profondeur de passe

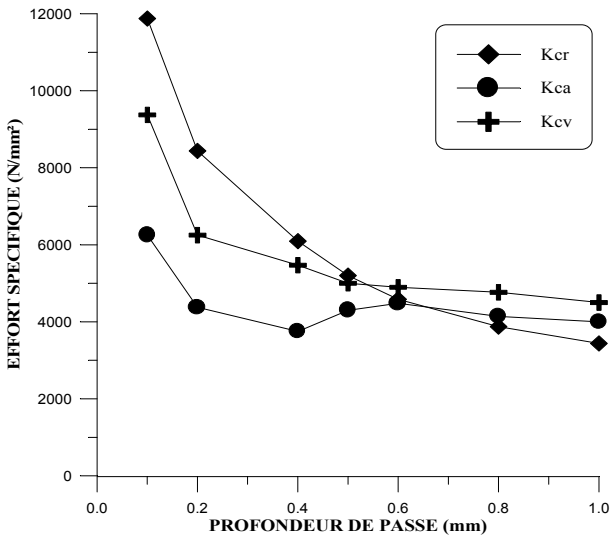
La figure V.6c, présente l'évolution de la pression de coupe en fonction de la profondeur de passe. Il ressort de ces courbes que l'augmentation de la profondeur de passe a pour effet de diminuer la pression de coupe. Pour une a_p= 0,1 mm, les pressions sont à leur maximum. On enregistre des pressions (Kcr, Kca et Kcv) de l'ordre de 11875 ; 6250 et 9375 N/mm^2. Par conséquent, il est déconseillé de travailler avec cette faible profondeur de passe, car les pressions engendrées sont extrêmement élevées ce qui peut endommager les arêtes de coupe. Dans l'intervalle (0,1 à 0,2) mm, les pressions (Kcr, Kca et Kcv) chutent respectivement de 28,9% ; 30% et 33,33%. De 0,1 à 1,0 mm, les pressions sont à leurs bas niveaux, on enregistre des chutes de 71% ; 36% et 52%. Là aussi un compromis doit ce faire entre les pressions basses et l'usure de l'outil lors du travail avec des profondeurs de passe élevées.



a) Influence de la vitesse de coupe, a_p =0,2mm ; f=0,08mm/tr



b) Influence de l'avance, Vc=120m/min ; f=0,08mm/tr



c) Influence de la profondeur de passe, Vc=120m/min ; a_p=0,2mm.

Figure V.6 : *Evolution des efforts spécifiques en fonction de (Vc, f, a_p) de l'acier X200Cr12 usiné par le CBN.*

V.3 Impact des conditions de coupe sur les efforts de coupe (Methode multifactorielle)

Les résultats de la variation des composantes des efforts de coupe et de la pression spécifique pour les différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (V_c, f, a_p) sont représentés sur les tableaux V.1 à V.4. Le but et de mettre au point des corrélations entre les composantes de l'effort de coupe et les paramètres d'usinage sous la forme de l'équation suivante :

$$F_i = C_1.f^{K1}.a_p^{K2}.Vc^{K3} \quad (V.1)$$

Où : K_1,K_2 et K_3 sont des coefficients qui indiquent le degré d'influence de chaque facteur examiné sur les efforts de coupe.

Tableau V.I: Résultats de l'effort et de la pression de coupe en fonction des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (100Cr6/CBN 7020).

Essais N°=	Facteurs			Paramètres					
				Efforts de coupe			Pressions de coupe		
	f (mm/tr)	a_p (mm)	Vc (m/min)	Fr (N)	Fa (N)	Fv (N)	Kcr (N/mm²)	Kca (N/mm²)	Kcv (N/mm²)
1	0,08	0,2	90	132,24	71,08	106,25	8265	4442,5	6640,62
2	0,2	0,2	90	166,5	87	157	4162,5	2175	3925
3	0,08	0,6	90	216,24	222,5	230,44	4505	4635,41	4800,83
4	0,2	0,6	90	302,1	274	385	2517,5	2283,33	3208,33
5	0,08	0,2	180	111,5	66,1	90,5	6968,75	4131,25	5656,25
6	0,2	0,2	180	144,5	83,1	126,4	3612,5	2077,5	3160
7	0,08	0,6	180	206,4	202,2	215,4	4300	4212,5	4487,5
8	0,2	0,6	180	280,6	247,7	356,4	2338,33	2064,16	2970

Tableau V.2 : Résultats de l'effort et de la pression de coupe en fonction des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (100Cr6/ CC650).

Essais N°=	Facteurs			Paramètres					
				Efforts de coupe			Pressions de coupe		
	f (mm/tr)	a_p (mm)	Vc (m/min)	Fr (N)	Fa (N)	Fv (N)	Kcr (N/mm²)	Kca (N/mm²)	Kcv (N/mm²)
1	0,08	0,2	60	136	82	126	8500	5125	7875
2	0,2	0,2	60	180	125	165	4500	3125	4125
3	0,08	0,6	60	225	202	220	4687,5	4208,33	4583,33
4	0,2	0,6	60	305	261	298	2541,66	2175	2483,33
5	0,08	0,2	180	118	73	109	7375	4562,5	4812,5
6	0,2	0,2	180	160	108	158	4000	2700	3950
7	0,08	0,6	180	235	184	240	4895,83	3833,33	5000
8	0,2	0,6	180	290	235	280	2416,66	1958,33	2333,33

Tableau V.3: Résultats de l'effort et de la pression de coupe en fonction des différentes combinaison des éléments du régime de coupe (X200Cr12/CBN 7020)

Essais N°=	Facteurs			Paramètres					
				Efforts de coupe			Pressions de coupe		
	f (mm/tr)	a_p (mm)	Vc (m/min)	Fr (N)	Fa (N)	Fv (N)	Kcr (N/mm²)	Kca (N/mm²)	Kcv (N/mm²)
1	0,08	0,2	90	160	90	115	10000	5625	7187,5
2	0,2	0,2	90	191	115	172	4775	2875	4300
3	0,08	0,6	90	265	240	260	5520,83	5000	5416,66
4	0,2	0,6	90	330	288	320	2750	2400	2666,66
5	0,08	0,2	180	142	83	107	8875	5187,5	6687,5
6	0,2	0,2	180	168	100	135	4200	2500	3375
7	0,08	0,6	180	235	210	225	4895,83	4375	4687,5
8	0,2	0,6	180	290	253	285	2416,66	2108,33	2375

Tableau V.4 : Résultats de l'effort et de la pression de coupe en fonction des différentes combinaison des éléments du régime de coupe (X200Cr12/ CC650).

Essais N°=	Facteurs			Paramètres					
				Efforts de coupe			Pressions de coupe		
	f (mm/tr)	a_p (mm)	Vc (m/min)	Fr (N)	Fa (N)	Fv (N)	Kcr (N/mm²)	Kca (N/mm²)	Kcv (N/mm²)
1	0,08	0,2	60	180	95	130	11250	5937,5	8125
2	0,2	0,2	60	202	136	180	5050	3400	4500
3	0,08	0,6	60	290	225	280	6041,6	4687,5	5833,3
4	0,2	0,6	60	340	308	328	2833,33	2566,6	2733,3
5	0,08	0,2	120	150	88	118	9375	5500	7375
6	0,2	0,2	120	195	120	165	4875	3000	4125
7	0,08	0,6	120	258	218	236	5375	4541,6	4916,6
8	0,2	0,6	120	318	263	310	2650	3025	2583,3

L'analyse des résultats des tableaux V.1 à V.4, montre que les efforts de coupe maximales sont enregistrés avec le régime 04. Les valeurs minimales des efforts de coupe correspondent au régime 05. Par contre, les pressions de coupe minimales sont enregistrées en travaillant avec la huitième combinaison des éléments du régime de coupe.

V.4 Impact de l'usure sur l'évolution des efforts de coupe

V.4.1 Cas de l'acier 100Cr6

Les figures V.7 à V.10 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de l'usure lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 avec le CBN7020 et cela pour deux vitesses de coupe testées. Il ressort que les composantes de l'effort de coupe augmentent en fonction du temps d'usinage. Ceci est une conséquence de l'évolution de l'usure sur les surfaces en dépouille et d'attaque de l'outil, puisque dans ce cas la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente ce qui augmente les forces de frottement. L'analyse des courbes à la vitesse de 180 m/min, montre que l'évolution des efforts en fonction du temps, passe par trois périodes (figure V.7). La première période est d'une durée de coupe de 10 minutes ce qui correspond à une usure VB de 0,175mm. Les efforts de coupe (Fr, Fa et Fv) augmentent successivement d'une valeur de 33,33% ; 25% et 9,5%. La deuxième période varie de 10 à 22 minutes d'usinage, ce qui correspond à une augmentation de l'usure VB de 0,175 à 0,3 mm. Ceci a fait augmenter les efforts de coupe (Fr, Fa et Fv) successivement de 11,11% ; 16,2% et 16%. On remarque clairement que durant cette période l'évolution des efforts de coupe est moins accentuée que la première période, sauf pour la composante tangentielle. La troisième période est caractérisée par une évolution rapide de l'usure VB, qui passe d'une valeur de 0,3 à 0,41 mm et cela dans une période qui varie de 22 à 32 minutes. Alors les efforts de coupe se trouvent dans leurs haut niveaux avec une augmentation de 50% ; 26,3% et 10,3%. Si on compare les valeurs des composantes de l'effort de coupe au début et à la fin de l'usinage et cela durant une période d'usinage de 32 minutes. On remarque que les efforts (Fr, Fa et Fv) ont augmenté successivement de 150% ; 135% et 52%. Sur la figure V.8, qui représente l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'usure sont représentées les micrographies de l'usure VB de l'outil CBN7020.

A la vitesse de coupe maximale de 350 m/min, l'outil CBN7020 s'use rapidement à cause des frottements intenses et des températures élevées, ce qui a augmenter les efforts de coupe. Après 1 min de travail, l'usure VB atteint la valeur de 0,19 mm, on enregistre des efforts (Fr, Fa et Fv) de 373; 358 et 234 N. Au-delà de l'usure admissible [VB] = 0,3 mm et après 2 min de travail les efforts augmentent de 44,8% ; 26,5% et 12,4%. En comparant les valeurs des composantes de l'effort de coupe au début et à la fin de l'usinage, on enregistre une augmentation de (Fr, Fa, Fv) de 107,1% ; 210,7% et 45,16%.

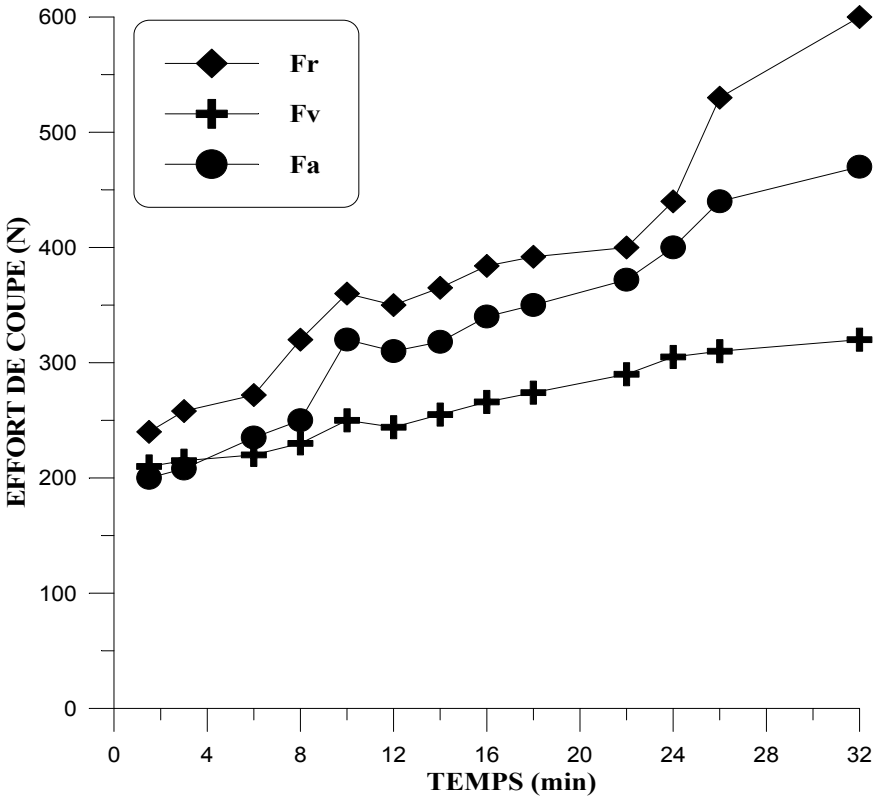


***Figure V.7**: Evolution des l'efforts de coupe en fonction du temps d'usinage*
Vc = 180 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08 mm/tr.

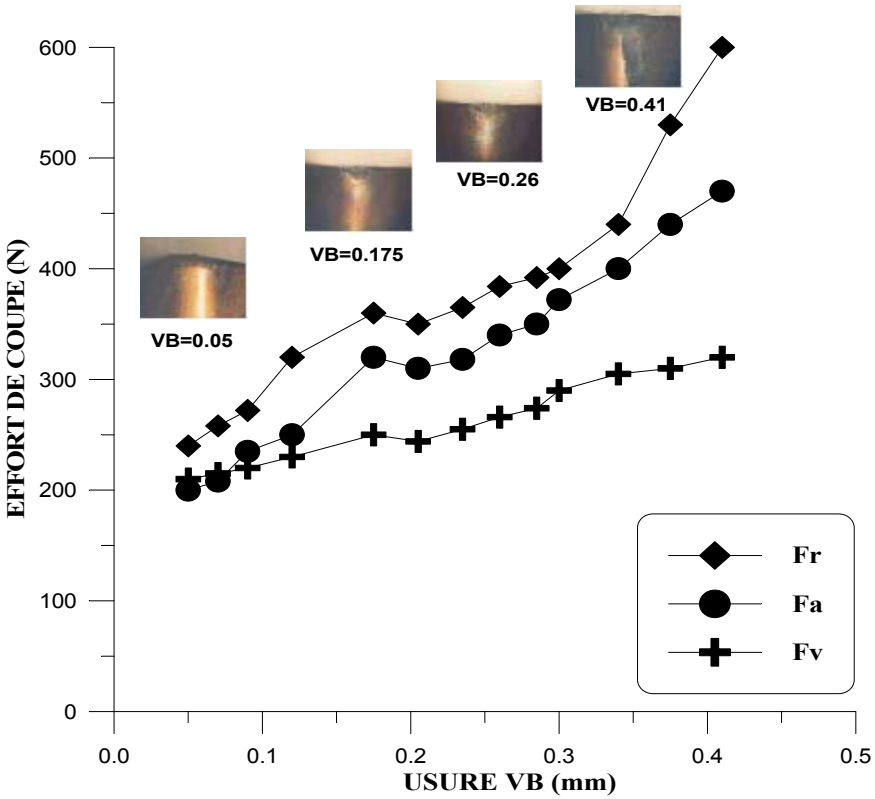


***Figure V.8 :** Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure*
Vc = 180 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr .

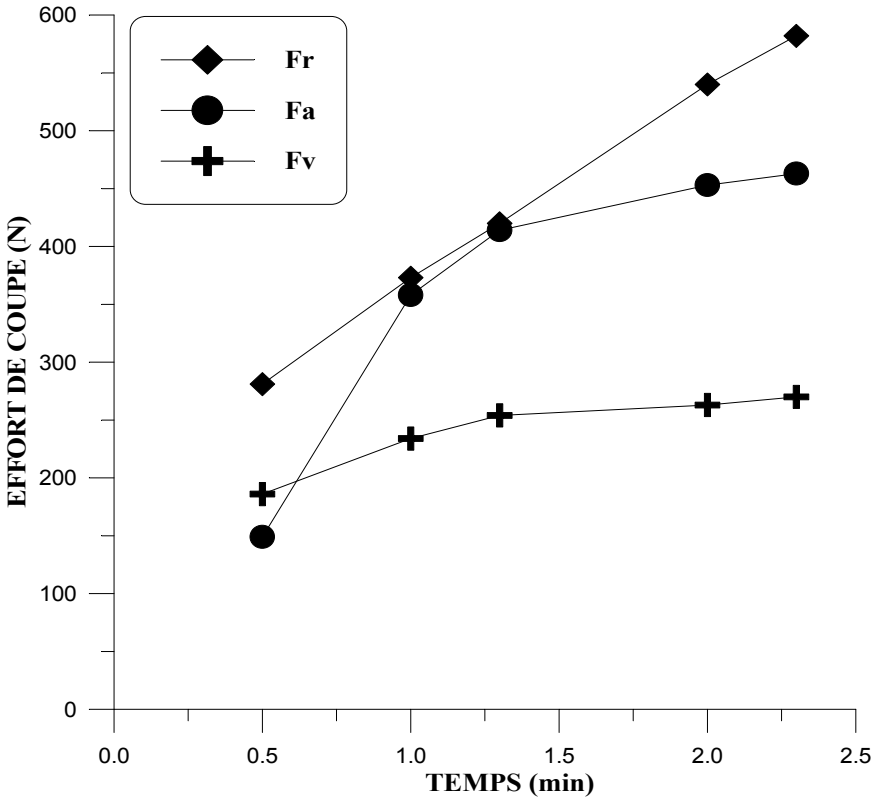


Figure V.9 : *Evolution de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage*
Vc = 350 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr .

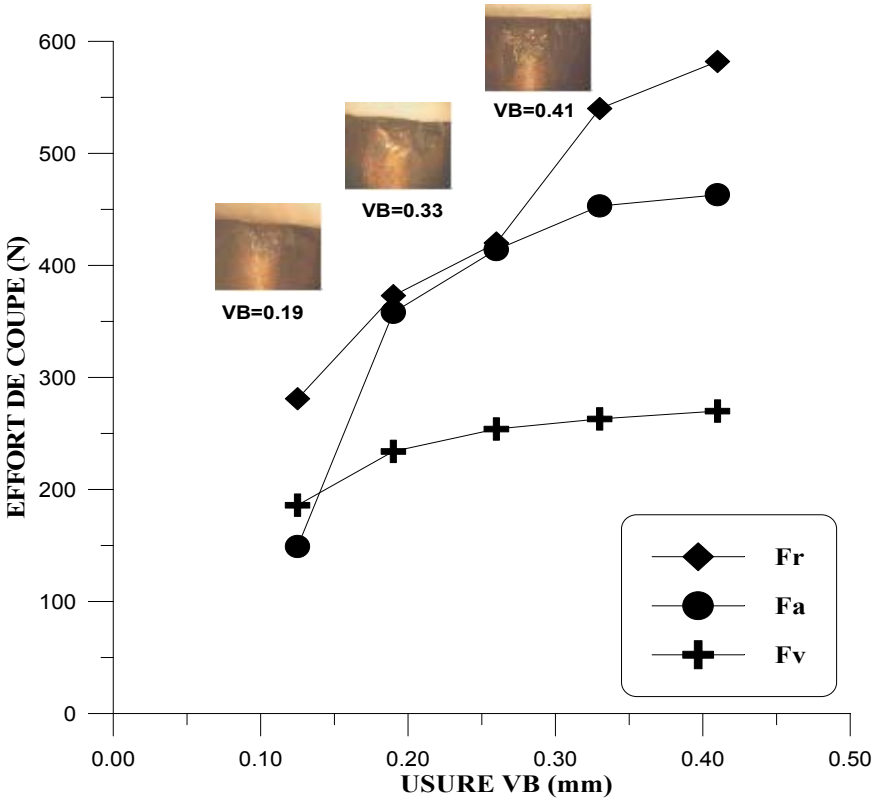


Figure V.10 : *Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure*
Vc = 350 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr .

V.4.2 Cas de l'acier X200Cr12

Les figures V.11 à V.14 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de l'usure lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 avec le CBN7020. Les essais ont été réalisés pour deux vitesses de coupe (Vc=120 et 180 m/min). L'avance et la profondeur de passe sont maintenues constantes. L'analyse de l'allure des courbes montre que les efforts de coupe ne sont pas stables au cours de l'usinage mais ils évoluent en fonction du temps et de l'usure de l'outil. A la vitesse de 120 m/min, l'évolution des efforts se fait en trois périodes différentes. La première période correspond à 8 min d'usinage, l'usure atteint la valeur de 0,14 mm, l'augmentation des efforts de coupe (Fr ; Fa et Fv) correspond successivement à 40% ; 45,9% et 13,9%. La deuxième période se caractérise par une légère stabilité, elle varie de 8 à 24 min d'usinage, la valeur de l'usure atteint 0,285 mm, ce qui génère une augmentation des efforts de coupe de 15,7% ; 24,1% et 12,24%. La dernière période varie de 24 à 45 min, l'usure VB augmente de 0.285 à 0,43 mm, ce qui provoque une élévation des efforts de coupe, on enregistre une augmentation de 50,6% ; 46,2% et 16,3. Durant toute la période d'usinage qui dure 45min, les efforts de coupe ont évolués de 144% ; 164% et 48,8%.
A la vitesse de coupe de 180 m/min, les sollicitations thermomécaniques sur la pointe de l'outil sont élevées, ce qui a pour effet d'accéléré l'usure. Après une minute d'usinage, l'usure VB atteint la valeur de 0,08mm, on enregistre des efforts de coupe (Fr ; Fa et Fv) de l'ordre de 245 ; 190 et 210 N. Après 11min de travail, l'outil atteint l'usure admissible [VB]=0,3mm, ce qui augmente les efforts de coupe de 79,6% ; 92,1% et 52,3%. A la fin de l'usinage et après 20 min d'usinage, l'usure VB atteint 0,42 mm, les efforts sont à leurs haut niveaux, on enregistre une augmentation par rapport à la première minute d'usinage de 136,7% ; 163,1% et 66,6%.

Synthèse :

A partir des résultats du suivi de l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure, on peut tirer les remarques suivantes:

- L'augmentation de l'usure du matériau de coupe induit une augmentation des efforts de coupe et cela pour les différentes vitesses testées et pour les deux aciers usinés.
- Avec les conditions de coupe utilisées, l'effort principal est l'effort de coupe radial suivi par l'effort axial, par contre l'effort tangentiel est moins sensible à l'augmentation de l'usure.
- Le changement des allures des courbes des évolutions des efforts se produit a peu près simultanément avec celui de régime de l'usure. Ce qui indique que ces deux phénomènes sont corrélés entre eux.

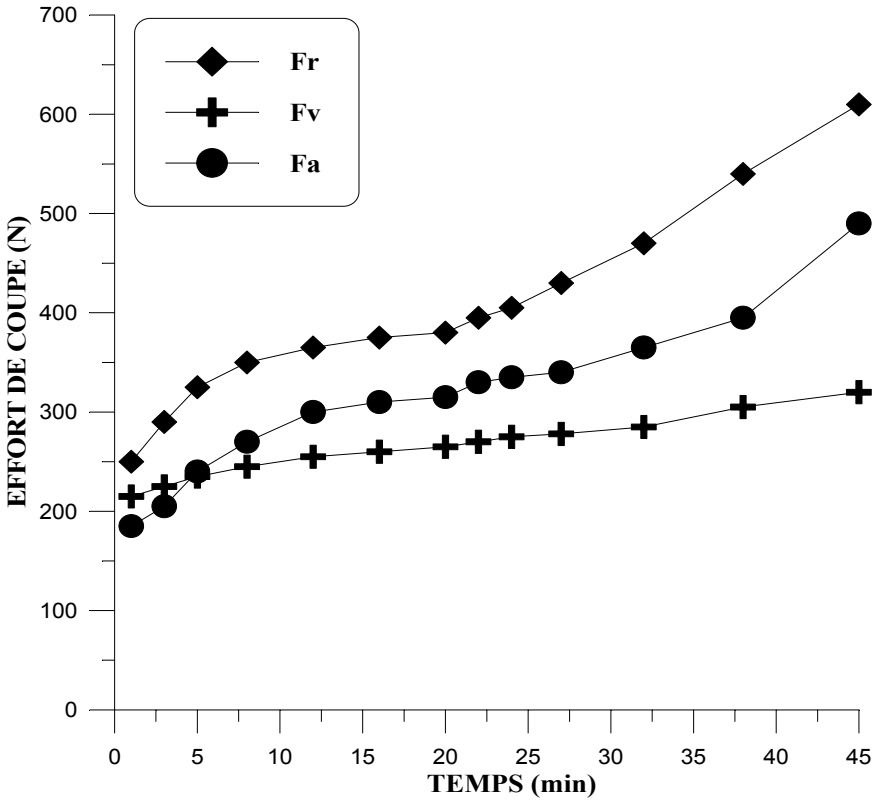


Figure V.11 : *Evolution de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage*
Vc = 120 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr .

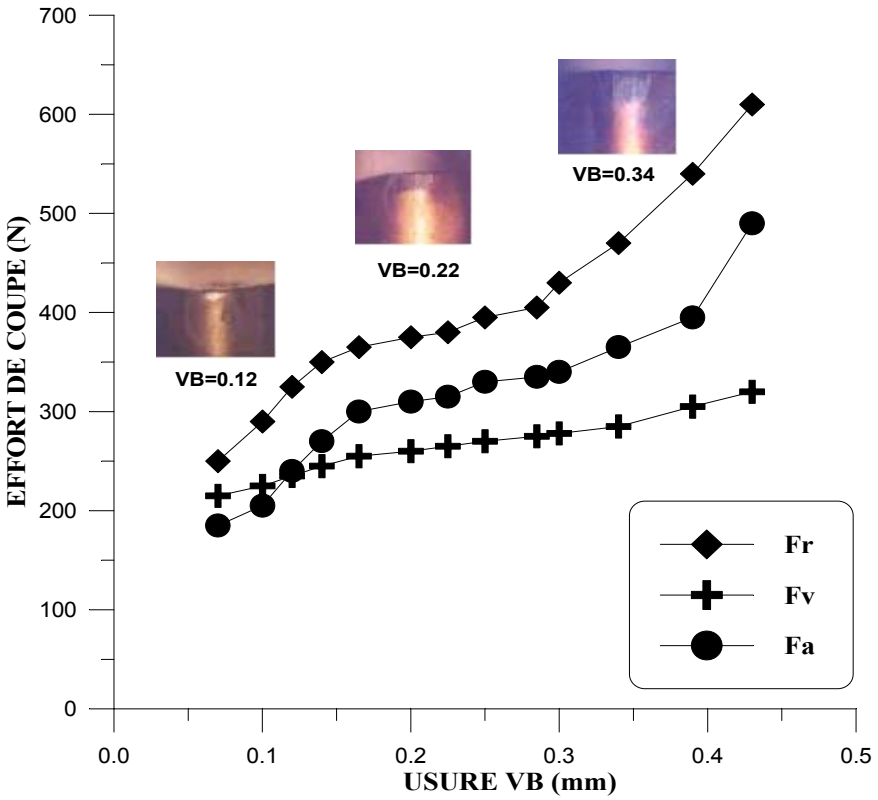


Figure V.12 : *Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure*
Vc = 120 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr .

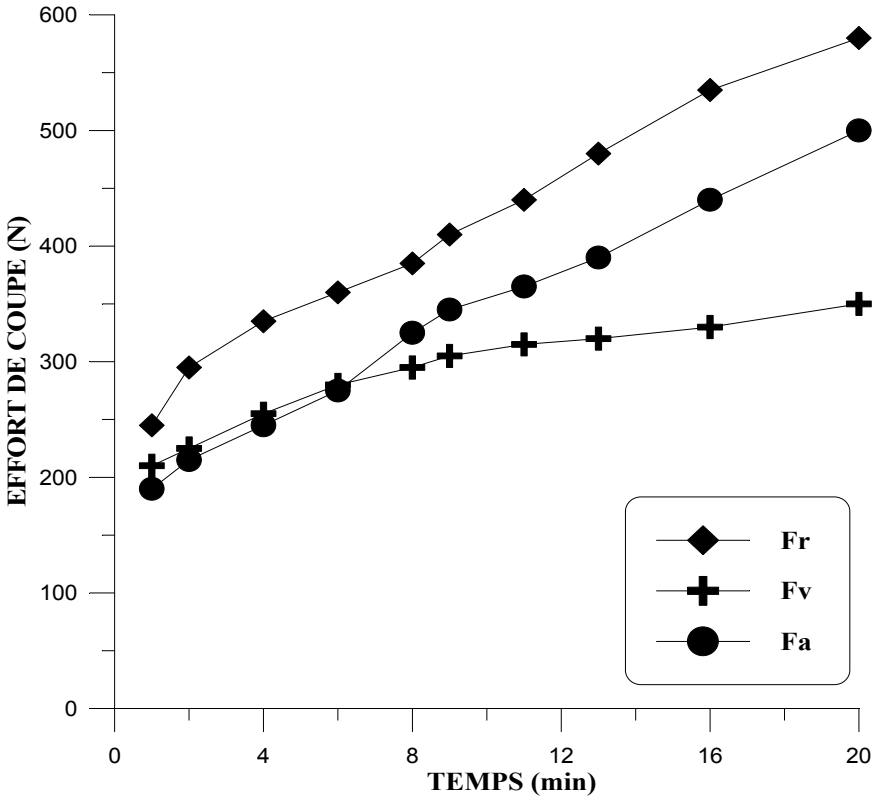


Figure V.13 : *Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure*
Vc = 180 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr .

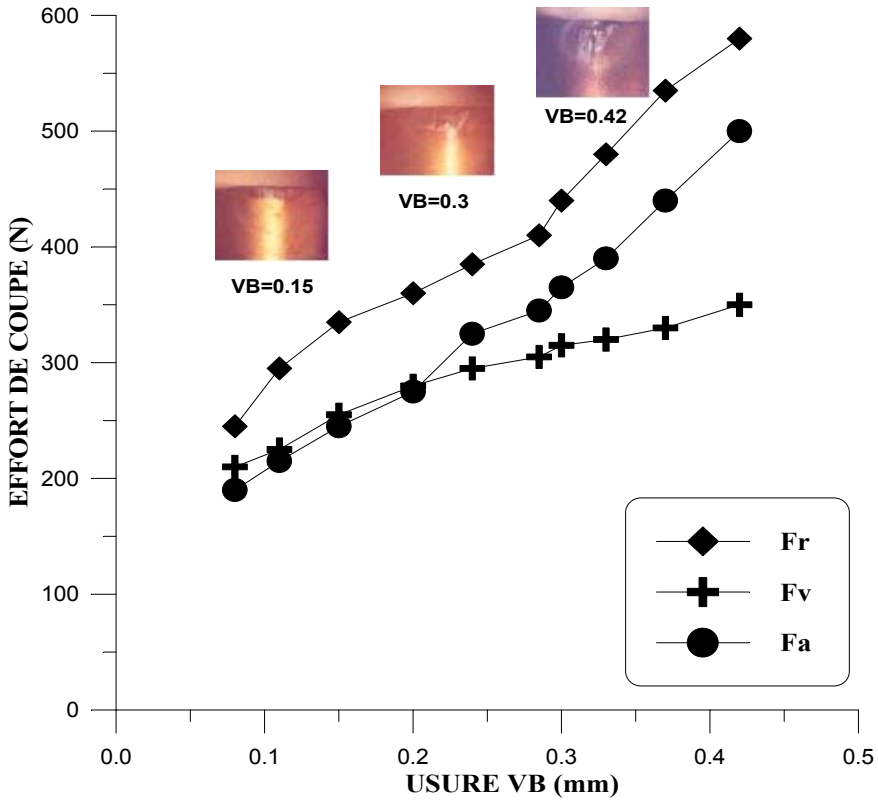


Figure V.14: *Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure*
Vc = 180 m/min ; a_p = 0,5 mm ; f = 0,08mm/tr .

V.5 Corrélation entre les efforts de coupe et les conditions d'usinage

Le traitement des résultats expérimentaux obtenus aux tableaux V.1 à V.4, a permis la détermination des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre les différentes composantes de l'effort de coupe et les paramètres du régime de coupe (Vc, f, a_p).

Tableau V.5 *: Modèles mathématiques de l'effort de coupe (Méthode multi factorielle).*

Couple outil matière	Facteurs variables	Modèles mathématiques	Coefficient de détermination
CBN7020/ 100Cr6	f	$Fr = e^{7.183} f^{0.308} a_p^{0.538} Vc^{-0.156}$	R^2=0,992
	a_p	$Fa = e^{7.008} f^{0.229} a_p^{1.023} Vc^{-0.113}$	R^2=0,980
	Vc	$Fv = e^{7.970} f^{0.475} a_p^{0.813} Vc^{-0.188}$	R^2=0,990
CC650/ 100Cr6	f	$Fr = e^{4.757} f^{0.396} a_p^{0.631} Vc^{-0.061}$	R^2=0,986
	a_p	$Fa = e^{4.637} f^{0.474} a_p^{0.911} Vc^{-0.105}$	R^2=0,990
	Vc	$Fv = e^{4.855} f^{0.396} a_p^{0.685} Vc^{-0.04}$	R^2=0,980
CBN7020/ X200Cr12	f	$Fr = e^{5.075} f^{0.279} a_p^{0.573} Vc^{-0.113}$	R^2=0,980
	a_p	$Fa = e^{5.639} f^{0.288} a_p^{1.024} Vc^{-0.110}$	R^2=0,980
	Vc	$Fv = e^{4.743} f^{0.421} a_p^{0.820} Vc^{-0.151}$	R^2=0,996
CC650/ X200Cr12	f	$Fr = e^{5.303} f^{0.269} a_p^{0.553} Vc^{-0.091}$	R^2=0,992
	a_p	$Fa = e^{5.037} f^{0.422} a_p^{0.919} Vc^{-0.090}$	R^2=0,992
	Vc	$Fv = e^{4.991} f^{0.394} a_p^{0.734} Vc^{-0.094}$	R^2=0,986

L'analyse des modèles mathématiques (tableauV.5), permet de définir avec plus de précision les tendances ainsi que les degrés d'influence des différents facteurs du régime de coupe (Vc, f, a_p), sur les trois composantes de l'effort de coupe. A cet effet, l'analyse des exposants des différents modèles trouvés avec le CBN 7020 et la céramique CC650 lors de l'usinage des deux aciers, fait sortir que l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à la diminution des efforts de coupe, alors que l'augmentation de la section du copeau (f x a_p) contribue à l'accroissement des efforts

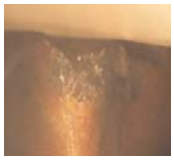
de coupe. D'autre part, le classement des exposants des différents modèles trouvés en valeur absolue exprime le degré d'influence de chaque facteur des éléments du régime de coupe sur les efforts de coupe. Par conséquent la plus grande influence est réservée à la profondeur de passe suivie par l'avance, par contre la vitesse de coupe a une influence relativement faible. Les coefficients de détermination des différents modèles sont élevés et convergent vers l'unité ce qui indique qu'ils sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux. L'intérêt industriel des modèles mathématiques trouvés est de taille car ils permettent la détermination des conditions de coupe optimales et donnent des renseignements précieux sur le processus de coupe.

V.6 Conclusion

L'étude des efforts de coupe réalisée dans ce chapitre permet de mieux comprendre ce phénomène en tournage dur et cela dans le but d'avoir une meilleure stabilité du système usinant. Les résultats des efforts et de la pression de coupe en fonction des conditions de coupe permettent de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant face à l'acier étudié. Cette démarche appelée couple - outil - matière, permet de définir un domaine de fonctionnement correct de l'outil. Aussi l'étude de la variation des efforts de coupe permet de donner des informations sur l'état de l'arête de coupe en terme d'usure, ce qui est très important sur le plan pratique pour les applications de surveillance automatisée de la coupe.









ANNEXE I : Programme de calcul des constantes des modèles unifactoriel

```
program usure;
uses wincrt;
const
    max=10;
type
   vect=array[1..max] of real;
   tab=array[1..2] of real;
var
  g:array[1..2,1..2] of real;
  ten,v,tmod : vect;
  c : tab;
  n,i,j,k : integer;
  a,b,e,m,p,q,r,s : real;
begin
 clrscr;
    s:=0 ; p:=0 ; q:=0;
writeln; write('donner le nombre d`experiences : N =
') ; readln(n);
   for i:=1 to 2 do
   for j:=1 to 2 do
   begin
    c[i]:=0 ; g[i,j]:=0;
   end;
   g[1,1]:=n;
   for i:=1 to n do
   begin
      write('   v(',i,') = ') ; readln(v[i]);
      write('   ten(',i,') = ') ; readln(ten[i]);
      g[2,1]:=g[2,1]+ln(v[i]);
      g[2,2]:=g[2,2]+sqr(ln(v[i]));
      c[1]:=c[1]+ln(ten[i]);
      c[2]:=c[2]+ln(ten[i])*ln(v[i]);
   end;
   g[1,2]:=g[2,1] ;
   for i:=1 to 2 do
   begin
     e:=g[i,i];
     g[i,i]:=1;
     for j:=1 to 2 do
     g[i,j]:=g[i,j]/e;
     for k:=1 to 2 do
     if k<>i then
     begin
         e:=g[k,i];
         g[k,i]:=0;
```

```
            for j:=1 to 2 do
            g[k,j]:=g[k,j] - e*g[i,j] ;
          end;
        end;
        a:=0 ; b:=0 ;
        for i:=1 to 2 do
        begin
          a:=a+g[1,i]*c[i];
          b:=b+g[2,i]*c[i];
        end;
      writeln('  les coefficients d,finissant le modèle de
TAYLOR sont : '); writeln;
      writeln('          A = ',a:3:5,'      B = ',b:3:5);
writeln;
        for i:=1 to n do
        begin
          tmod[i]:=exp(a)*exp(b*ln(v[i]));
          s:=s+tmod[i];
        end;
        s:=s/n;
        for i:=1 to n do
        begin
          p:=p+sqr(ten[i]-tmod[i]);
          q:=q+sqr(ten[i]-s);
        end;
        r:=sqrt(1-p/q);
     writeln('    le coefficient de correlation est : R =
',r:2:3);
     readln;
    end.
```

ANNEXE II : Programme de calcul des constantes des modèles Multifactorielles

```
program rugosité;
uses wincrt;
const
     max=20;
type
    vect=array[1..max] of real;
    tab=array[1..4] of real;
var
   g:array[1..4,1..4] of real;
  di,s,v, u,t,tm:vect;
   h:tab;
  i,j,k:integer;
  a,b,d,e,c,m,p,q,r,moy,v1,v2,s1,s2,d1,d2,y,x:real;
begin
clrscr;
    moy:=0 ; p:=0 ; q:=0;
writeln;writeln;writeln('Donner les intervalles de
variation');
    writeln('des éléments du régime de coupe');
writeln; write('   Smini = ');readln(v1);write('   Smaxi =
') ; readln(v2);
writeln; write('   tmini = ');readln(s1);write('   tmaxi =
') ; readln(s2);
writeln; write('   vmini = ');readln(d1);write('   Vmaxi =
') ; readln(d2);
         writeln;writeln('donner les valeurs des
rugosités')
         ;for i:=1 to 8 do
         begin
         write('        T[',i,'] = '); readln(t[i]);
         end;
         for i:=1 to 7 do
         v[i]:=v1;
         v[2]:=v2 ; v[4]:=v2 ; v[6]:=v2 ; v[8]:=v2;
         for i:=1 to 6 do
         s[i]:=s1;
         s[3]:=s2 ; s[4]:=s2 ; s[7]:=s2 ; s[8]:=s2;
         for i:=1 to 4 do
         begin
         h[i]:=0 ;
         di[i]:=d1; end;
         for i:=5 to 8 do
         di[i]:=d2;
```

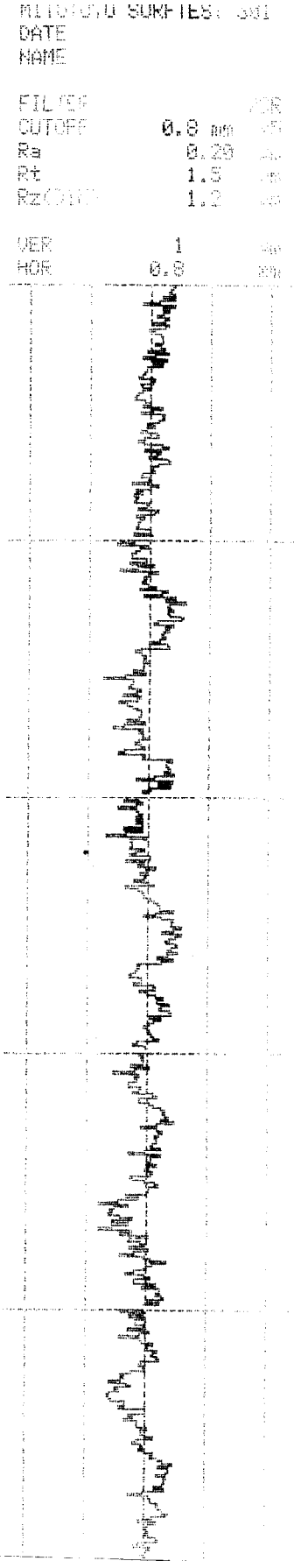
```
        g[1,1]:=8;
        g[2,1]:=4*(ln(v1)+ln(v2)) ;
        g[3,1]:=4*(ln(s1)+ln(s2)) ;
        g[4,1]:=4*(ln(d1)+ln(d2)) ;
        g[2,2]:=4*(sqr(ln(v1))+sqr(ln(v2))) ;
        g[3,2]:=2*(ln(v1*v2))*(ln(s1*s2)) ;
        g[4,2]:=2*(ln(v1*v2))*(ln(d1*d2)) ;
        g[3,3]:=4*(sqr(ln(s1))+sqr(ln(s2))) ;
        g[4,3]:=2*(ln(s1*s2))*(ln(d1*d2)) ;
        g[4,4]:=4*(sqr(ln(d1))+sqr(ln(d2))) ;
        for i:=1 to 8 do
        h[1]:=h[1]+ln(t[i]);
        h[2]:=h[2]+ln(v1)*ln(t[1]*t[3]*t[5]*t[7]);
        h[2]:=h[2]+ln(v2)*ln(t[2]*t[4]*t[6]*t[8]);
        h[3]:=(ln(s1))*(ln(t[1]*t[2]*t[5]*t[6]));
        h[3]:=h[3]+(ln(s2))*(ln(t[3]*t[4]*t[7]*t[8]));
        for i:=1 to 4 do
        h[4]:=h[4]+ln(t[i])*ln(d1);
        for i:=5 to 8 do
        h[4]:=h[4]+ln(t[i])*ln(d2);
      g[1,2]:=g[2,1];  g[1,3]:=g[3,1];  g[1,4]:=g[4,1];
      g[2,3]:=g[3,2];  g[2,4]:=g[4,2];
      g[3,4]:=g[4,3];

      for i:=1 to 4 do
      begin
        e:=g[i,i];
        g[i,i]:=1;
        for j:=1 to 4 do
        g[i,j]:=g[i,j]/e;
        for k:=1 to 4 do
        if k<>i then
        begin
            e:=g[k,i];
            g[k,i]:=0;
            for j:=1 to 4 do
             g[k,j]:=g[k,j] - e*g[i,j] ;
        end;
      end;
      c:=g[1,1]*h[1]+g[1,2]*h[2]+g[1,3]*h[3]+g[1,4]*h[4];
      m:=g[2,1]*h[1]+g[2,2]*h[2]+g[2,3]*h[3]+g[2,4]*h[4];
      y:=g[3,1]*h[1]+g[3,2]*h[2]+g[3,3]*h[3]+g[3,4]*h[4];
      x:=g[4,1]*h[1]+g[4,2]*h[2]+g[4,3]*h[3]+g[4,4]*h[4];

writeln('  les coefficients définissant le modèle de la
GILBERT sont : ');
```

```
writeln('   C0= ',c:3:5,'    m = ',m:3:5,'      y =
',y:3:5,'    x = ',x:3:5);
for i:=1 to 8 do
begin
tm[i]:=exp(c)*exp(m*ln(v[i]))*exp(y*ln(s[i]))*exp(x*ln(di[
i]));
write ('   ',tm[i]:3:3);  writeln;
moy:=moy+tm[i];
end;
moy:=moy/8;
for i:=1 to 8 do
begin
p:=p+sqr(t[i]-tm[i]);
q:=q+sqr(t[i]-moy);
end;
r:=sqrt(1-p/q);
writeln('    le coefficient de corrélation est : R =
',r:2:3);
readln;
end.
```

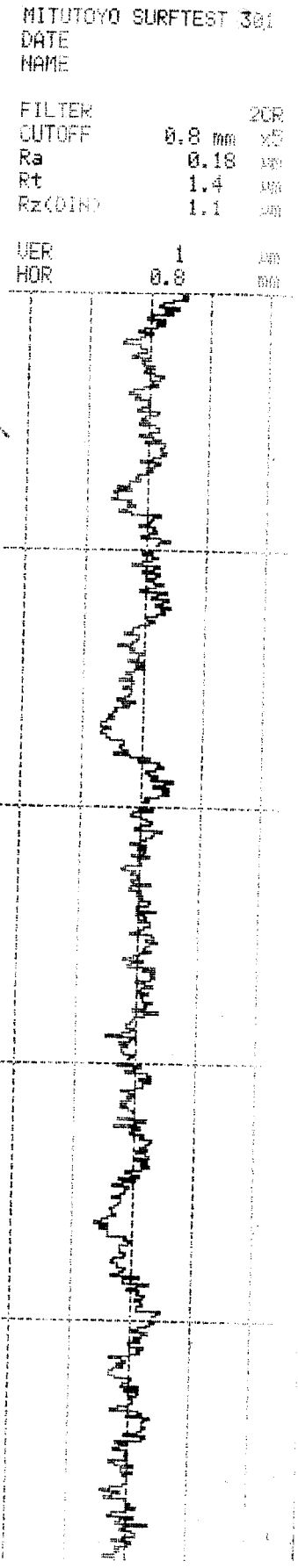
ANNEXE III : Exemples de profils de rugosité obtenus



CBN7020/100Cr6

a) Vc=120m/min ;
f=0,08mm/tr ;
a_p=0,2mm

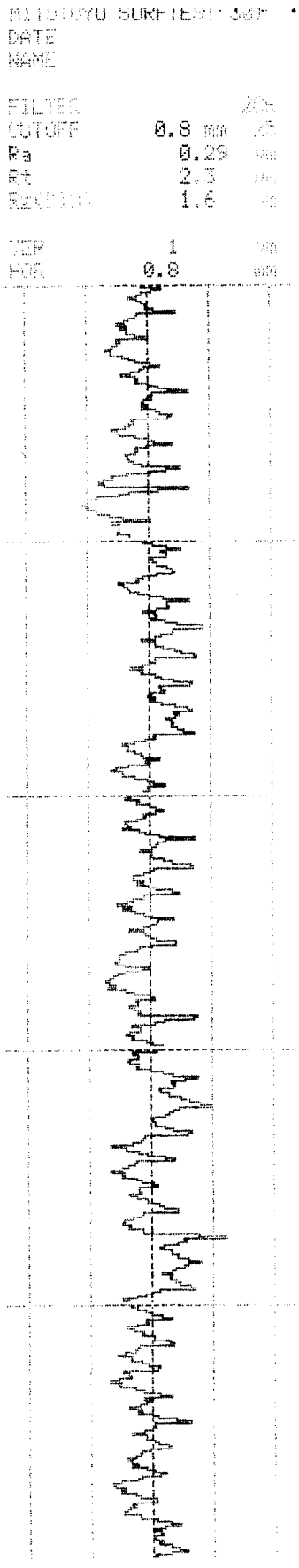
b) Vc=180m/min ;
f=0,08mm/tr ;
a_p=0,2mm

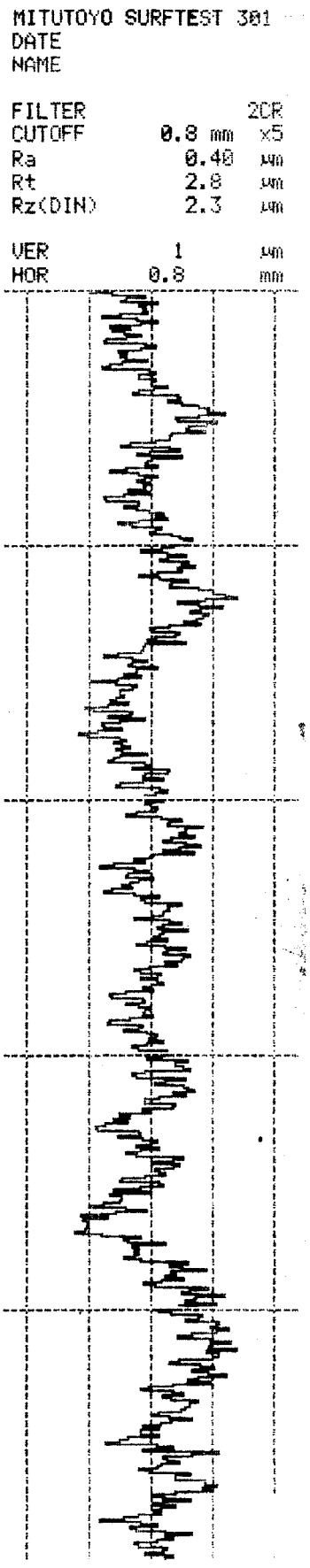


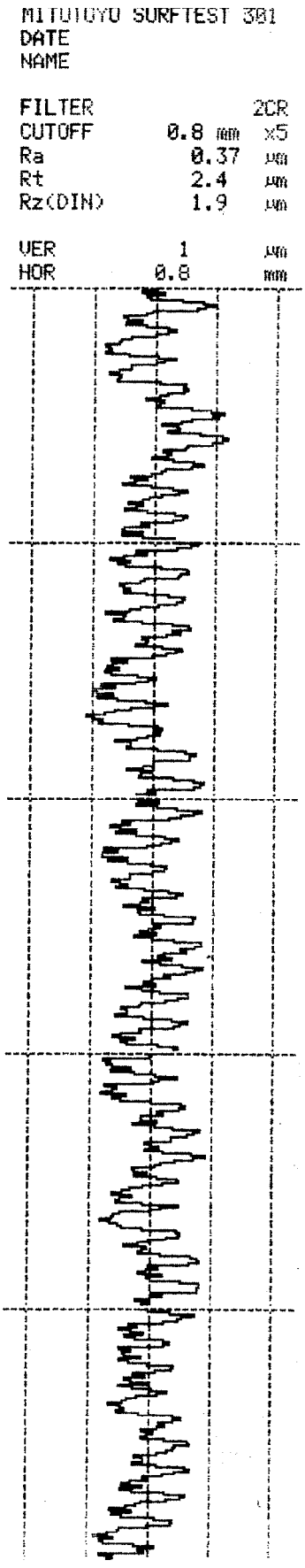
Céramique CC650/100Cr6

a) Vc=120m/min b)Vc=60m/min c) Vc=90m/min

(f=0.08mm/tr ; a_p=0,2mm constantes)



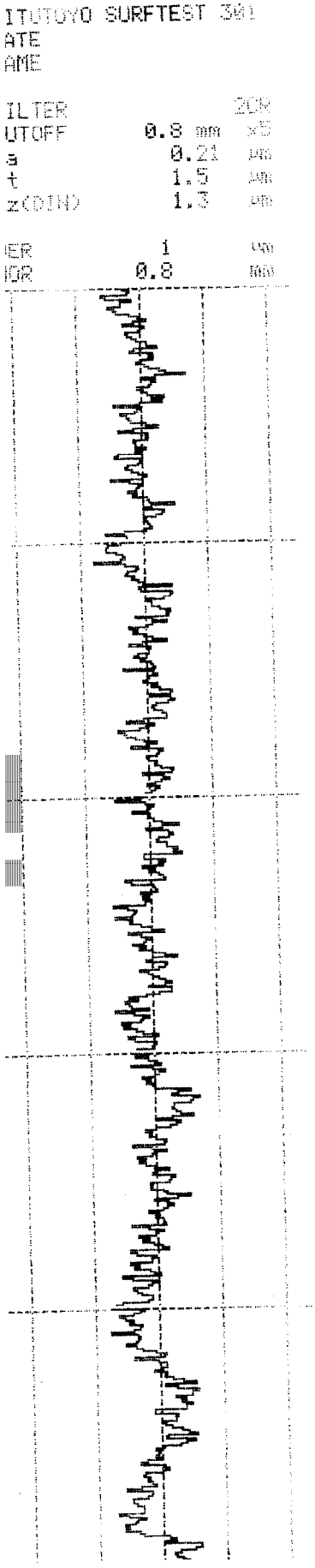




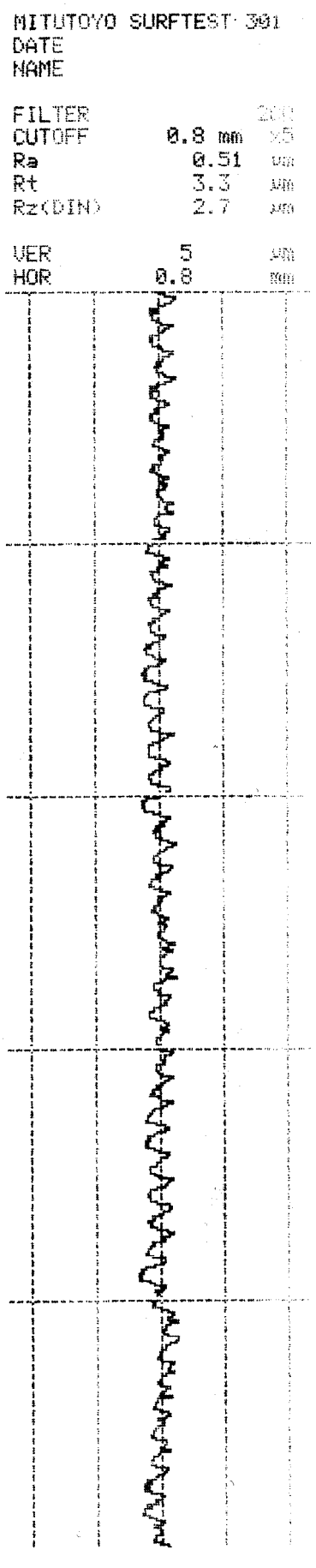
CBN7020/100Cr6

Vc=120m/min ; f=0.08mm/tr ; a_p=0.5mm

a)Temps de coupe T=3min ; VB=0.02mm



b)Temps de coupe T=98min ; VB=0.36mm



CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis d'éclaircir quelques points d'un problème assez complexe de la coupe, en faisant intervenir un nombre important de paramètres liés au comportement interfacial du couple outil-matière, en vue de déterminer le meilleur domaine d'emploi des matériaux de coupe testés pour des conditions de travail données.

Le chapitre I, rapporte les points clés de l'étude bibliographique retenus pour la suite du travail. Nous avons présenté d'une manière détaillée les matériaux de coupe utilisés lors de l'usinage des pièces traitées, l'accent a été mis sur leur classification, leur domaine d'application, leurs avantages et performances, mais aussi leurs limites et leurs perspectives d'avenir. Nous avons présenté aussi une étude sur le procédé du tournage dur en tant que technique nouvelle d'usinage, sur l'intérêt économique qu'il peut apporter et les limites actuelles pour son développement à l'échelle industrielle. En dernier lieu, nous avons examiné les phénomènes régissant le processus de coupe en particulier, l'usure des outils, les lois d'usure, la rugosité des surfaces, les efforts et les pressions de coupe, la température de coupe et la formation du copeau.

Dans le chapitre II, nous avons présenté une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences. Pour cela nous avons fait appel à la méthode unifactorielle et la méthode multifactorielle. Le traitement des résultats à été fait par la méthode des moindres carrés, pour cela des programmes en turbo-pascal ont été élaborés pour déterminer les constantes des modèles mathématiques trouvés. Les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe et du traitement thermique ont été également l'objet de ce chapitre.

Dans le chapitre III, nous avons présenté, les divers résultats expérimentaux des essais d'usure. Un suivi micrographique de l'endommagement des outils en fonction du temps de coupe et une caractérisation de l'usure en dépouille et en cratère avec une analyse étendue de l'évolution de l'usure à été faite, pour chaque matériau de coupe. Les tenues des deux outils de coupe, ont été déterminées en se basant sur les courbes VB=f(t). L'aspect de production à été examiné à partir de l'analyse de la longueur du copeau produit par les différents outils. Le traitement des résultats de l'usure a permis la détermination des modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe.

Dans le chapitre IV, nous avons présenté les résultats de l'étude de l'impact des conditions de coupe et de l'usure sur la rugosité des surfaces usinées pour le CBN et la céramique mixte testés face aux deux matériaux usinés. Une analyse des différents résultats obtenus à été faite. Cette étude a abouti à la détermination des modèles mathématiques exprimant d'une part la relation entre les critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) et les éléments du régime de coupe (Vc, f, a_p) et d'autre part la relation entre la rugosité arithmétique (Ra) et l'usure en dépouille de l'outil sous forme d'une équation puissance.

Dans le chapitre V, nous avons présenté les résultats de l'évolution des composantes de l'effort de coupe en fonction des conditions de coupe et de l'usure pour le CBN et la céramique mixte. Ensuite nous avons proposé des modèles mathématiques qui expriment la relation entre les efforts de coupe et les paramètres (Vc, f, a_p).

Cette étude a permis d'établir les écarts de performance entre les outils CC650 et CBN7020 en terme d'usure, de tenue d'outils, de rugosité et de productivité dans des conditions similaires. En se basant sur les résultats trouvés, on peut dégager les principales conclusions suivantes :

- Les résultats des essais d'usure ont montré que, chaque matériau de coupe testé présente des particularités de comportement à l'usure qui sont principalement fonction de la composition chimique et de la structure, ainsi que des caractéristiques du matériau usiné. Par conséquent le meilleur comportement à l'usure est observé avec le nitrure de bore cubique CBN7020 suivi par la céramique CC650 et en dernier lieu le carbure métallique GC3015.
- L'usure en dépouille est principalement due à l'abrasion, elle est attribuée aux rapports entre la dureté des composants des aciers 100Cr6 et X200Cr12 et celle des composants des trois matériaux de coupe testés.
- La haute dureté des aciers usinés (60HRC) limite l'utilisation de la céramique CC650 et le carbure GC3015 successivement à des vitesses de coupe inférieures à 120 et 60 m/min et cela à cause des risques de rupture et aussi à la durée de vie très courte. Par contre le CBN7020 supporte des vitesses de coupe plus élevées et fournit donc un très bon état de surface des pièces usinées. Dans la plage des vitesses (90 à 350) m/min le CBN7020 dépasse de loin la céramique CC650 aussi bien en durée de vie qu'en qualité de surface générée. Les vitesses de coupe élevées utilisées pour le CBN7020 conduisent à un temps d'usinage plus court et aussi un faible coût de machine et de main d'œuvre. Malgré cela la céramique mixte CC650 reste une alternative intéressante par rapport au CBN7020 quand il s'agit d'une production très réduite et à des vitesses de coupe basses.
- En travaillant avec les vitesses de coupe élevées (Vc>120 m/min pour la CC650 et Vc>280 m/min pour le CBN), le système usinant s'est montré instable en produisant des étincelles et des vibrations, après quelques minutes de travail et cela à cause de l'accroissement intensif du mécanisme d'usure qui se traduit par un effondrement total du bec de l'outil, accompagné d'une série d'écaillages sur les différentes faces de l'outil. Il en découle qu'en travaillant à grandes vitesses de coupe l'usure est très rapide et se traduit par des tenues très réduites ce qui influence d'une manière négative l'état de surface et la précision dimensionnelle des pièces usinées.
- Le bilan thermique lors de l'usinage des deux aciers trempés avec la céramique CC650 et le CBN7020 montre que la coupe est caractérisée par un écoulement de copeau ayant une couleur rouge. Bien que la température du copeau augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la température de la pièce ne varie presque pas. La grande quantité de chaleur produite lors de l'usinage

des aciers trempés est en effet évacuée par le copeau, les échanges thermiques avec la pièce sont minimes, car le temps de contact entre le copeau et la pièce est faible. Ceci évite la dilatation thermique de la pièce, autrement dit celle ci ne sera pas affectée thermiquement.

- Les modèles mathématiques de l'usure trouvés, montrent la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie du CBN7020 et de la céramique CC650. Ils permettent donc de déterminer, pour des conditions de coupe stabilisées la vitesse de coupe à utiliser en fonction de la durée de vie souhaitée. Avec ces modèles, la vitesse de coupe a une influence capitale sur la durée de vie des outils. Car avec son augmentation la tenue des deux matériaux de coupe diminue. Ces modèles sont très utiles pour l'élaboration des abaques et éventuellement l'optimisation du processus de coupe. Les coefficients de détermination des modèles trouvés, sont élevés et convergent vers l'unité, ce qui traduit leur bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.
- Les résultats des rugosités obtenues par les deux matériaux de coupe, soit par la méthode unifactorielle où multifactorielle montrent que les performances du CBN7020 dépassent de loin celles de la céramique. Ceci est valable pour toutes les conditions de coupe testées. Les performances du CBN7020 pour les opérations de finition des aciers 100Cr6 et X200Cr12 traités, peuvent être partiellement expliquées par la haute rigidité et la tenue exceptionnelle de ses arêtes de coupe, ainsi qu'à sa grande dureté et sa stabilité chimique à des températures élevées. Toutes ces caractéristiques rendent ce genre de matériaux particulièrement approprié aux travaux de finition des pièces dures. Mais la céramique mixte CC650 reste une alternative économique intéressante pour les travaux de finition, quoique les rugosités obtenues sont plus grandes que celles produites par le CBN7020. Ceci nécessite une étude économique afin de décider sur le choix du matériau à outil à utiliser dans des conditions de travail concrètes.
- D'après les résultats, on constate que l'avance est le facteur déterminant de la qualité de l'état des surfaces usinées. L'explication réside dans la génération de la surface usinée en tournage. La surface engendrée en tournage comporte des sillons hélicoïdaux, résultant de la forme du bec de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons seront d'autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée. D'autre part, malgré l'augmentation de l'avance de 2,5 fois, les états de surface obtenus, en particulier ceux de l'outil CBN7020 restent toujours acceptables.
- Grâce à son excellent effet sur la qualité des surfaces usinées, les résultats des rugosités obtenues avec le CBN7020 sont comparables avec ceux de la rectification. Ceci offre au CBN7020 la possibilité d'exécuter des opérations multiples (ébauche, demi-finition et finition) sur le même poste de travail avec une seule prise de pièce. Ce qui influe avantageusement sur le cycle de production, le coût de fabrication et sur la précision des pièces usinées.
- L'évolution de l'usure des deux matériaux étudiés influe sur les valeurs des rugosités. En effet avec l'augmentation de la vitesse de coupe, l'usure augmente

et conduit directement à la dégradation de l'état de surface. Malgré l'évolution de l'usure jusqu'à la valeur admissible 0,3 mm, la rugosité Ra n'a pas dépassé la valeur de 1µm pour la plupart des vitesses utilisées.

- Les modèles mathématiques de la rugosité obtenus, expriment la relation qualitative et quantitative entre les différents critères de rugosité (Ra, Rt, Rz) et les éléments du régime de coupe (Vc, f, a_p). Par conséquent, l'augmentation de chacun des paramètres (f) et (a_p) contribue à l'élévation de la rugosité, alors que la vitesse de coupe a une influence inversement proportionnelle sur cette dernière. Le classement des exposants des différents modèles, traduit le degré d'influence de chaque paramètre (Vc, f, a_p) sur la rugosité.
- Les résultats obtenus lors des essais des efforts de coupe montrent clairement que l'effort radial est prépondérant surtout lorsqu'on travaille dans la limite du rayon du bec de l'outil. Ceci diffère complètement des connaissances du tournage classique où l'effort principal est l'effort tangentiel Fr = (0,3 à 0,5)Fv. Par conséquent, l'effort radial ne peut être négligé dans les calculs du comportement statique et dynamique du système usinant.
- Il est intéressant de souligner que les très faibles valeurs de l'avance et de la profondeur de passe engendrent des pressions de coupe élevées sur l'arête tranchante de l'outil ce qui conduit à sa rupture. Les grandes vitesses de coupe engendrent d'une part une diminution des efforts de coupe et d'autre part une accélération de l'usure. Ce qui nous pousse à chercher un compromis entre l'effort minimal et la tenue qu'on peut exploiter sur le plan industriel.
- Les résultats de l'effort de coupe en fonction de l'usure montrent que l'augmentation de cette dernière engendre une élévation des efforts de coupe. L'effort principal reste l'effort radial suivi par l'effort axial, alors que l'effort tangentiel s'est montré moins sensible à l'usure.
- Les modèles mathématiques de l'effort de coupe obtenus, expriment la relation qualitative et quantitative entre les différentes composantes (Fr, Fa et Fv) et les éléments du régime de coupe (Vc, f, a_p). Par conséquent, l'augmentation de chacun des paramètres (f) et (a_p) contribue à l'élévation des efforts, alors que la vitesse de coupe a une influence inversement proportionnelle sur ces derniers. Le classement des exposants des différents modèles, traduit le degré d'influence de chaque paramètre (Vc, f, a_p) sur les efforts de coupe.

En dernier lieu on peut dire que les résultats trouvés dans le cadre de cette thèse ont permis permettront d'apporter une contribution à la connaissance des phénomènes physiques mis en jeu lors du tournage des aciers ayant une dureté de 60 HRC. Ce ci permet d'apporter des nouvelles réflexions sur le développement de cette technique. Ce travail de recherche intéresse toutes les unités de fabrication mécanique, du fait qu'il permet d'avoir des informations nécessaires, pour définir les conditions de travail optimales des matériaux de coupe modernes (Céramique et CBN) tout en appréciant l'usinabilité des matériaux. Par conséquent les résultats obtenus peuvent être exploités par les entreprises de fabrication mécanique.

Cette étude n'est nullement exhaustive et les résultats trouvés doivent être considérés comme une introduction à l'utilisation des nouveaux matériaux de coupe, plutôt que comme une indication de leurs limites, qui restent encore à être complètement définies.

PERSPECTIVES

Les résultats obtenus dans ce travail ouvrent d'importantes perspectives.

- Continuer à étudier le comportement à l'usure de nouvelles nuances de matériaux de coupe modernes et cela dans le but d'avoir une meilleure caractérisation scientifique du procédé de tournage dur. Le travail permettra aussi de déterminer les lois d'usure dans un nouveau contexte de matériau de coupe et avec des matériaux difficilement usinables.
- Approfondir les connaissances sur la corrélation qui existe entre l'usure des outils de coupe et la rugosité de surfaces usinées ainsi que les efforts de coupe. Dans le but de permettre des prédictions de l'usure à partir du suivi des efforts de coupe et de la rugosité.
- L'état métallurgique de la surface usinée est un point aussi à considérer en tournage dur. L'étude de la structure de la surface obtenue, des contraintes résiduelles sur la surface et la formation de la couche blanche, restent des points essentiels à éclaircir.
- En dernier lieu, il faut s'intéresser aussi au cotée dynamique de la coupe, en particulier l'étude des vibrations générées en tournage dur, l'influence des vibrations sur la tenue des outils de coupe, sur l'état de surface et la précision géométrique des pièces.
- La modélisation du processus de coupe est un aspect à développé et les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse présentent des informations très précieuses pour sa validation.

LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Les travaux de thèse réalisés ont donné lieu à des publications avec comité de lecture et à des communications avec actes et comité de lecture.

PUBLICATIONS INTERNATIONALES

1- M.A. YALLESE, L.BOULANOUAR et S. BELHADI, Etude de l'endommagement des outils de coupe en céramique noire et en CBN lors du tournage d'un acier durci. Revue de Mécanique appliquée et théorique, Vol 1 N°5 Décembre 2003.

2- M.A. YALLESE, L.BOULANOUAR et K.CHAOUI, Usinage de l'acier 100C6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique Mécanique & Industries 5, 2004, pp 355-368.

3- M.A. YALLESE, J.F RIGAL, K.CHAOUI, L.BOULANOUAR, Cutting conditions effect on Mixed ceramic and CBN tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60HRC), Journal of Engineering Manufacture (I MECH E), volume 219,N=°1 Janvier 2005.

PUBLICATIONS NATIONALES

1- M.A. YALLESE et L.BOULANOUAR, Etude du comportement à l'usure du CBN7020 lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé. Synthèse N°11 Juin 2002.

2- M.A. YALLESE et L.BOULANOUAR, Utilisation d'un matériau de coupe de haute technologie dans l'usinage de finition de l'acier 100Cr6 trempé. Communication science et technologie, COST- N°1 Octobre 2002.

3- M.A. YALLESE, L.BOULANOUAR et S. BELHADI, Endommagement des outils de coupe en céramique (Al_2O_3 +TiC) et en CBN lors de l'usinage de l'acier trempé X200Cr12. Communication science et technologie, COST- N°2 Décembre 2003.

4- M.A. YALLESE, L.BOULANOUAR et S.BELHADI, Investigation de l'usure de matériaux à outils à base d'alumine-SiC_w et de CBN-TiCN lors de l'usinage d'un acier à roulement (60HRC) Science et technologie N°20, décembre 2003, pp 92-99.

COMMUNICATIONS

1- YALLESE M. A., BOULANOUAR L., DJAMAA M. C. et OUELAA N.,: « Etude comparative de deux modèles mathématiques de l'usure des outils de coupe en céramique ». Communication à la troisième conférence internationale sur les mathématiques appliquées et les sciences de l'ingénieur CIMASI'2000, le 23-24-25 Novembre 2000 Casablanca, Maroc.

2- YALLESE M. A., BOULANOUAR L. et BELHADI S., « Etude des performances des outils céramiques lors du tournage ». Communication à la conférence internationale sur la productique, CIP2001 du 09 au 11 juin 2001, Club des pins Alger.

3- YALLESE M. A., BOULANOUAR L. et BELHADI S., « Qualité de surface de l'acier 100C6 trempé usiné par un outil en Nitrure de bore cubique ». Communication aux 2èmes Journées de la mécanique, J.M EMP'2001 du 23 au 24 Décembre 2001 Alger.

4- YALLESE M. A. BOULANOUAR L. et BELHADI S., « Etude de l'usure de la céramique composite et du CBN7020 lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé ». Communication aux VIIIèmes Journées maghrébines des sciences des Matériaux, 25 - 27 Mars 2002 Bizerte, Tunisie.

5- YALLESE M. A., BOULANOUAR L. et BELHADI S., « Etude de l'endommagement de la céramique mixte CC650 et du CBN7020 en tournage dur ». Communication au Séminaire international de Génie Mécanique SIGMA'02, du 28 au 29 Avril 2002 Oran Algérie.

6- BOULANOUAR L. et YALLESE M. A., « Qualité de surface de l'acier 100Cr6 trempé (60HRC) usiné par de nouveaux matériaux de coupe ». Communication au 1er congrès international de Mécanique CIM '02, du 14 au 16 Décembre 2002 Constantine-Algérie.

7- YALLESE M. A., BOULANOUAR L. et BELHADI S, « Etude de l'endommagement du Nitrure de bore cubique lors de l'usinage de l'acier trempé X200Cr12 ». Communication au 1er congrès international de Mécanique CIM '02, du 14 au 16 Décembre 2002 Constantine-Algérie.

8- YALLESE M. A., BOULANOUAR L. et BELHADI S. : «Détermination des modèles mathématiques de l'usure et de la rugosité lors de l'usinage de l'acier traité 100Cr6 par un outil en CBN». Communication à la quatrième conférence internationale sur les mathématiques appliquées et les sciences de l'ingénieur CIMASI 2002, du 23 au 25 octobre 2002 Casablanca, Maroc.

9- YALLESE M.A., BOULANOUAR L., Ouelaa N., REZAIGIA A., CHAOUI K, « Etude de l'usinage de l'acier 100Cr6 par le CBN en tournage dur » Communication à la conférence international de mécanique avancée CIMA'04, du 30 au 02 décembre 2004, Boumerdes.

10- BOULANOUAR L, YALLESE M.A., CHAOUI K., « Effet du matériau à outil et des conditions d'usinage sur la qualité de surface de l'acier 100Cr6 trempé » Communication au symposium international Qualité et Maintenance au service de l'entreprise, QUALIMA'01, le 21 – 22 novembre 2004, Tlemcen.

11- YALLESE M.A., BOULANOUAR L., Ouelaa N., REZAIGIA A., KRIBES N, « Influence des conditions d'usinage sue les efforts de coupe lors du tournage du 100Cr6 (60 HRC) aven le CBN » Premier Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques » du 23 au 25 mars 2005 Hammamet, Tunisie.

BIBLIOGRAPHIE

[AMR 87] **Amri. B**, Contribution à l'étude du comportement des matériaux modernes pour outils coupants, Thèse , INSA-Lyon, pp 43-44, 1987.

[AND 84] **Andonov. I, Bekech. Y**, Analyse et synthèse des processus technologiques en construction mécanique, Technica, Sofia 1984.

[BAC 99] **Bacci M., J. Wallbank J.**, Cutting temperature prediction and measurement methods-a review, J. Mater. Process. Technol. N°88, pp 195-202, 1999.

[BAR 92] **Barlier C. et Girardin L.** Mémothech-matériaux et usinage, Editions Casteilla, pp 137-140, 1992.

[BEC 92] **Becir K.,** Etude de l'usinage des aciers trempés avec des outils en nitrure de bore cubique, Thèse de magister, Université de Annaba 1992.

[BED 89] **Bedrin C., Roumesy B.,** Usinage par outil coupant, Fascicule 1-2, INSA-Lyon, 1989.

[BIT 93] **Bittes G.,** Contribution à la connaissance des mécanismes fondamentaux liés à l'usinabilité des aciers de construction mécanique, Masters's thesis, Université de Toulon, 1993.

[BOU 93] **Bouzid W.,** Etude expérimentale et numérique de la coupe orthogonale, Master's thesis, ENSAM Paris, 1993.

[BOU 97] **Boulanouar L., Belhadi S. et Lahrache T.**, Influence de la géométrie sur la durée de vie d'un outil de tour en acier rapide, Matériaux et technique N° 9-10, pp 43-46, 1997.

[BRA 86] **Brandt G.,** Thermal shock resistance of ceramic cutting tools, Surface Engenieering, vol 2 N° 2, pp 121-131, 1986.

[BRA 97] **BRANDT G.,** DEVELOPPEMENT DES OUTILS DE COUPE EN CERAMIQUE,
MATERIAUX ET TECHNIQUES, N° 9-10, PP 3-12, 1997.

[CAL 95] **LE Clavez C.,** Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone, Master's thesis, ENSAM, 1995.

[CAL 98] **Calderon J.,** Caractérisation dynamique du système pièce-outil-machine: Usinage des pièces minces, Thèse, INSA-Lyon, pp 44-45, 1998.

[CAR 79] **Carro Cao. G et Santichi M.,** La formation du copeau et de la surface usinée, INSA Lyon, 1979, pp 367-423.

[CET 75] **CETIM**, Etude de l'usinage à grande vitesse, Décision d'aide N° 72-7-0669, 1975.

[CET 79] **CETIM,** Les états de surface -Describtion-Elaboration-Mesure, Note technique N°18, 1979.

[CHA 91] **Chan C.L. et Chandra A.,** A boundary element method analysis of the thermal aspect of metal cutting processes, Trans. ASME, J. Eng. Ind. 113, pp 311-319, 1991.

[CHI 89] **CHILDS T. H. C. ET MAHDI M.I.,** ON THE STRESS DISTRIBUTION BETWEEN THE CHIP AND TOOL DURING METAL TURNING. ANNALS OF THE CIRP, VOL 38, PP 55-58, 1989.

[CHO 88] **CHOW J.G., WRIGHT P.K.,** ON-LINE ESTIMATION OF TOOL/CHIP INTERFACE TEMPERATURE FOR A TURNING OPERATION, TRANS.ASME, J. ENG. IND. 110, 1988, PP 56-64.

[CHO 03] Y. K. Chou, « Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting », Wear, 225, pp. 1388-1394, 2003.

[CLE 02] **Clément. B,** Design and analysis of experiments, Génistat Conseils Inc., 2000.

[DAP 94] **Dapsalmon P.,** Machining of hardened ferrous materials, GE Superabrasif France 1994.

[DAW 02] **Dawson. T. G,** Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools, Gorgia institute of technology 2002.

[DES 03] **Deshayes L.,** Méthodologie d'étude de la coupe-Liaison entre couple outil matière et système pièce outil machine-, Thèse de doctorat, INSA 2003.

[DIE 85] **Dietrich. R et col**, Précis de méthodes d'usinage, 5^{e} édition, pp 109,

Nathan 1985.

[ENA 72] **Enache S.,** La qualité des surfaces usinées, Dunod, Paris 1972.

[FAN 86] **Fantin J. P.,** Les céramiques de coupe des outils à hautes performances, CETIM – Information, N° 94, pp 49-56, 1986.

[FLO 90] **Flom D.G, Reed W.R,** High speed machining of cast iron with BZN compact, General Electric Superabrasives, 1990

[FUR 85] **Furukawa M.,** Fracture toughness of the system Al_2O_3-TiC Ceramic, Nippon Tungsten review, N° 18, pp 16-22, 1985.

[GEI 99] **Geiskopf F., CoLandon Y. et Duc E.,** Usinage à grande vitesse, Rapport ENS Cachan, LURPA, 1999.

[GEL 95] **GELIN. D ET VINCENT. M,** ELEMENT DE FABRICATION, EDITIONS ELLIPSES 1995.

[GLA 84] **Gladel G., Gourdet D., Tous J.L,** Matériaux pour outils de coupe, Technique de l'ingénieur, B 7080, pp 2-16, 1984.

[GRE 83] **Grearson A.N., Hillert L., Pastor H**., Application des sailons à la coupe des métaux, L'industrie céramique, N° 775, pp 615-621, 1983.

[GON 98] **Gonthier J.R.,** Tournage des matières trempées, Marchés systèmes management, N° 9, 27 août 1998.

[HER 86] **Hertel,** Manuel technique de céramique, 1986.

[HUG 95] **Hug J. L.**, Tournage des métaux durs, Machine de production, N° 110 pp 17-19,1995.

[JOS 99] **Joshi S., Ramakrishnan N., Ramakrishnan P.,** Analysis of chip breaking during orthogonal machining of Al/SiCp composites, J. Mater. Process. Technol. 88, pp 90-96 1999.

[KAT 72] **Kato S. et Yamagichi K.,** Stress distribution at the interface between tool and chip in machining. Journal of Engineering for Industry, vol Mai, PP 683-689, 1972.

[KOM 81] **Komanduri R. et Brown T.H.,** The mechanics of chip segmentation in machining. Journal of Engineering for industry, vol 103, N°1, pp 33-51, 1981.

[KOM 82] **Komanduri R. Schroeder T., Turkovich V., Hazra J., Flom D. G.,** On the catastrophic shear instability in speed machining of an AISI4340 steel, Trans. ASME, J. of Eng. For Ind., Vol 104, pp 121-131, 1982.

[KON 87] **Konig W., Wand Th.,** Turning bearing steel steel with amborite and ceramic, Industrial diamond review, N°3, pp 117-120, 1987.

[KOP 01] **Kopac J.**, Hardening phenomena of Mn-austenite steels in the cutting process, J. Mater. Process. Technol. 109, pp 96-104, 2001.

[KOR 72] **Koren.Y et lenz. E,** Mathematical model for the flank wear while turning steel with carbide tools, CIRP Vol 1 N°2, pp 127-137, 1972.

[LEM 71] **Le Maitre. F,** Les phénomènes d'usure au contact du copeau et de l'outil, notice C.A.S.T, pp 121-125, 1971.

[LER 84] **Leroy. F,** Usinage et usinabilité, Technique de l'ingénieur, MC2 M725, pp 3-7, 1984.

[LER 92] **LEROY F., BLANCHARD T., ALEXANDRE S.,** LES MODIFICATIONS STRUCTURALES APPORTEES PAR LES NOUVEAUX PROCEDES D'USINAGE ET LA MISE EN FORME. BULETTIN DU CERCLE D'ETUDE DES METAUX, PARIS, PP 64-79, 1992.

[LIN 93] **LIN J., LEE S.L. ET WENG C.I.,** ESTIMATION OF CUTTING TEMPERATURE IN HIGH SPEED MACHINING, TRANS. ASME-JEMT 114, PP 289-296, 1993.

[LOL 81] **Loladze T.N.,** Of the theory of diffusion wear, Annals of the CIRP, 30(1), pp71-75, 1981.

[LUO 99] **Luo S.Y., Lias Y.S. et Tsai Y.Y.**, Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools, J. Mater. Process. Technol., 88, pp 114-121, 1999.

[MEY 94] **Meyer D.,** Plaquette Pc-BN haute performance pour les aciers durs, les fontes perlitiques et les fonte trempées, Secomax 1994.

[MOU 67] **Moulin J., Didgard de cuissart J.,** La mesure des efforts de coupe, Applications Industrielles. MICROTECNIC, vol V, N°4, pp 179-187, 1967.

[NOT 81] **Notter A.T, Heath J.P.,** Usinage des métaux ferreux de grande dureté à l'aide de l'amborite, Matériaux et Techniques, N°386, pp 301-308, 1981.

[OBI 96] **Obikawa T., Usui E.**, Computational machining of titanium alloy-finite element modeling and a few results, Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng 118, pp 208-215, 1996.

[O'SU 01] **O'sullivan D., Cotterell M.**, Temperature measurement in single point turning, J. Mater. Process. Technol. N°118, pp 301-308, 2001.

[PAS 87] **Pastor H**., Etat actuel et développement des matériaux durs et superdurs, Matériaux et techniques, 2ème partie, pp.319-327,1987.

[PAS 96] **Pastor H.**, The evolution of cutting tool materials, Bulletin du Cercle d'Etudes des Métaux, N°13, PP 7.1-7.11, Novembre 1996.

[PAN 98] **Pantale O.,** Développement d'un modèle numérique de la coupe des métaux, thèse de doctorat, 1998.

[POU 99] **Poulachon G.,** Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Thèse de doctorat de l'ENSAM de Cluny, 1999.

[POU 03] **Poulachon G**., A. Moisan, « Performance evaluation on hardened steel-PCBN tool pair in high speed turning », Matériaux et Techniques, N° 1-2, pp. 23-34, 2003.

[RAP 54] **Rapier A.C.,** A théorical investigation of the temperature distribution in the metal cutting process, Britich journal of applied physics, vol 5, pp 400-404, 1954.

[REV 86] **Reyre J.P. et Roby J.,** « Application des revêtement céramiques dans l'industrie mécanique » CETIM Information n°94, pp.56, 1986.

[RIG 94] **Rigby P.,** Les superabrasives et la grande vitesse, Journée d'information, CETIM Senlis, 6 et 7 décembre 1994.

[ROM 74] **Romagnolo G.**, « Evolution de l'outils de coupe en carbure » Machine Modernes, n° 784, 1974.

[ROU 73] **Roumesy B., Bedrin C.,** Remarques sur la représentativité comparée des modèles de la loi d'usure, Machines-Outils, N°= 301, 1975.

[ROU 75] **Roumesy B.,** Détermination des lois d'usure des outils, Machines-Outils, N°= 322, pp 319-323, 1975.

[SAN 02] **Sandvik C.,** Outils de tournage -Produit pour l'usinage des métaux-, Elanders, 2002.

[SHA 01] **Sharman A. R. C., Aspinwall D. K., Dewew R. C., Bowen P,** Workpiece surface integrity considerations when finish turning gamma titanium aluminide, Wear 249, pp 473-481, 2001.

[STE 92] **Stephenson D. A., Ali A.,** Tool temperature in interrupted metal cutting, Journal of Engineering for industry, N°136, pp 114-127, 1992.

[STE 93] **Stephenson D. A.,** Tool-work thermocouple temperature measurements-theory and implementation issues, Journal of Engineering for industry, N°115, pp 432-437, 1993.

[TAY 74] **Tay A.O. et Stevenson M.G.,** Using the finite element method to determine distribution in orthogonal machining, Proc. Instn. Mech. Eng, vol 188, pp 627-638, 1974.

[TAY 93] **Tay A.O.,** A review of methods of calculating machining temperature, J.Mat.Prod.Tech, Vol 36, pp 225-257, 1993.

[USU 60] **Usui E. et Takeyama H.,** A photoelastic analysis of machining stresses. Journal of Engineering for Industry, Transaction of the ASME, vol 6, pp 303-308, 1960.

[VAN 98] **Van Luttervelt CA., Jawahir I.S. Klocke F. Venuvinod P.K. t al.,** Present situation an futur trend in modelling of machining operation. Progress report of the CIRP working group, pp 1-47, 1998.

[VIG 87] **Vigneau J.**, Les outils de coupe en céramique utilisation actuelle et perspectives, Mat-Méc-Elec, N°421, 1987.

[WEI 71] **Weil R.**, Techniques d'usinage, Dunod, Paris 1971.

[WER 85] **Werner G., Knappert W.,** Machining hardened bearing races with Pc-BN, Industriel diamond review, N°3, pp 117-120, 1985.

[WIN 03] **Windels F.,** Le tournage dur, un concurrent pour la rectification cylindrique, Techniwatch, pp 1-3, 2003.

[WRI 73] **Wright P.K., Trent E.M.,** Metallographic methods of determining temperatures gradients in cutting tools, Journal of the iron and steel institute, pp 364-368, 1973.

[YAL 01] **Yallese M.A., Boulanouar L., Belhadi S.,** Etude des performances des outils céramiques lors du tournage, Conférence Internationale sur la Productique, CIP2001, pp.345-350, 2001.

[YAL 03] **Yallese M.A., Boulanouar L. et Belhadi S.**, Etude de l'endommagement des outils de coupe en céramique noire et en CBN lors du tournage d'un acier durci. Revue de Mécanique appliquée et théorique, Vol 1 N°5 décembre 2003.

[YAL 04] **Yallese M.A., Boulanouar L. et Chaoui K.,** Usinage de l'acier 100C6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique Mécanique & Industries 5, pp 355-368, 2004.

[YAL 05] **Yallese M.A., Rigal J.F, Chaoui K., Boulanouar L.,** The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60 HRC) Vol 219 N°, pp 35-55, Janvier 2005.

ANNEXE I : Programme de calcul des constantes des modèles unifactoriel

```
program usure;
uses wincrt;
const
    max=10;
type
   vect=array[1..max] of real;
   tab=array[1..2] of real;
var
  g:array[1..2,1..2] of real;
  ten,v,tmod : vect;
  c : tab;
  n,i,j,k : integer;
  a,b,e,m,p,q,r,s : real;
begin
 clrscr;
    s:=0 ; p:=0 ; q:=0;
writeln; write('donner le nombre d`experiences : N =
') ; readln(n);
   for i:=1 to 2 do
   for j:=1 to 2 do
   begin
    c[i]:=0 ; g[i,j]:=0;
   end;
   g[1,1]:=n;
   for i:=1 to n do
   begin
      write('   v(',i,') = ') ; readln(v[i]);
      write('   ten(',i,') = ') ; readln(ten[i]);
      g[2,1]:=g[2,1]+ln(v[i]);
      g[2,2]:=g[2,2]+sqr(ln(v[i]));
      c[1]:=c[1]+ln(ten[i]);
      c[2]:=c[2]+ln(ten[i])*ln(v[i]);
   end;
   g[1,2]:=g[2,1] ;
   for i:=1 to 2 do
   begin
     e:=g[i,i];
     g[i,i]:=1;
     for j:=1 to 2 do
     g[i,j]:=g[i,j]/e;
     for k:=1 to 2 do
     if k<>i then
     begin
         e:=g[k,i];
         g[k,i]:=0;
         for j:=1 to 2 do
```

```
            g[k,j]:=g[k,j] - e*g[i,j] ;
        end;
      end;
      a:=0 ; b:=0 ;
      for i:=1 to 2 do
      begin
        a:=a+g[1,i]*c[i];
        b:=b+g[2,i]*c[i];
      end;
     writeln('  les coefficients d,finissant le modèle de
TAYLOR sont : '); writeln;
     writeln('          A = ',a:3:5,'      B = ',b:3:5);
writeln;
      for i:=1 to n do
      begin
        tmod[i]:=exp(a)*exp(b*ln(v[i]));
        s:=s+tmod[i];
      end;
      s:=s/n;
      for i:=1 to n do
      begin
        p:=p+sqr(ten[i]-tmod[i]);
        q:=q+sqr(ten[i]-s);
      end;
      r:=sqrt(1-p/q);
    writeln('    le coefficient de correlation est : R =
',r:2:3);
    readln;
   end.
```

ANNEXE II : Programme de calcul des constantes des modèles Multifactorielles

```
program rugosité;
uses wincrt;
const
     max=20;
type
    vect=array[1..max] of real;
    tab=array[1..4] of real;
var
   g:array[1..4,1..4] of real;
  di,s,v, u,t,tm:vect;
   h:tab;
  i,j,k:integer;
  a,b,d,e,c,m,p,q,r,moy,v1,v2,s1,s2,d1,d2,y,x:real;
begin
clrscr;
    moy:=0 ; p:=0 ; q:=0;
writeln;writeln;writeln('Donner les intervalles de
variation');
    writeln('des éléments du régime de coupe');
writeln; write('   Smini = ');readln(v1);write('   Smaxi =
') ; readln(v2);
writeln; write('   tmini = ');readln(s1);write('   tmaxi =
') ; readln(s2);
writeln; write('   vmini = ');readln(d1);write('   Vmaxi =
') ; readln(d2);
         writeln;writeln('donner les valeurs des
rugosités')
         ;for i:=1 to 8 do
         begin
         write('        T[',i,'] = '); readln(t[i]);
         end;
         for i:=1 to 7 do
         v[i]:=v1;
         v[2]:=v2 ; v[4]:=v2 ; v[6]:=v2 ; v[8]:=v2;
         for i:=1 to 6 do
         s[i]:=s1;
         s[3]:=s2 ; s[4]:=s2 ; s[7]:=s2 ; s[8]:=s2;
         for i:=1 to 4 do
         begin
         h[i]:=0 ;
         di[i]:=d1; end;
         for i:=5 to 8 do
         di[i]:=d2;
```

```
        g[1,1]:=8;
        g[2,1]:=4*(ln(v1)+ln(v2)) ;
        g[3,1]:=4*(ln(s1)+ln(s2)) ;
        g[4,1]:=4*(ln(d1)+ln(d2)) ;
        g[2,2]:=4*(sqr(ln(v1))+sqr(ln(v2))) ;
        g[3,2]:=2*(ln(v1*v2))*(ln(s1*s2)) ;
        g[4,2]:=2*(ln(v1*v2))*(ln(d1*d2)) ;
        g[3,3]:=4*(sqr(ln(s1))+sqr(ln(s2))) ;
        g[4,3]:=2*(ln(s1*s2))*(ln(d1*d2)) ;
        g[4,4]:=4*(sqr(ln(d1))+sqr(ln(d2))) ;
        for i:=1 to 8 do
        h[1]:=h[1]+ln(t[i]);
        h[2]:=h[2]+ln(v1)*ln(t[1]*t[3]*t[5]*t[7]);
        h[2]:=h[2]+ln(v2)*ln(t[2]*t[4]*t[6]*t[8]);
        h[3]:=(ln(s1))*(ln(t[1]*t[2]*t[5]*t[6]));
        h[3]:=h[3]+(ln(s2))*(ln(t[3]*t[4]*t[7]*t[8]));
        for i:=1 to 4 do
        h[4]:=h[4]+ln(t[i])*ln(d1);
        for i:=5 to 8 do
        h[4]:=h[4]+ln(t[i])*ln(d2);
      g[1,2]:=g[2,1];  g[1,3]:=g[3,1];  g[1,4]:=g[4,1];
      g[2,3]:=g[3,2];  g[2,4]:=g[4,2];
      g[3,4]:=g[4,3];

      for i:=1 to 4 do
      begin
        e:=g[i,i];
        g[i,i]:=1;
        for j:=1 to 4 do
        g[i,j]:=g[i,j]/e;
        for k:=1 to 4 do
        if k<>i then
        begin
            e:=g[k,i];
            g[k,i]:=0;
            for j:=1 to 4 do
             g[k,j]:=g[k,j] - e*g[i,j] ;
        end;
      end;
      c:=g[1,1]*h[1]+g[1,2]*h[2]+g[1,3]*h[3]+g[1,4]*h[4];
      m:=g[2,1]*h[1]+g[2,2]*h[2]+g[2,3]*h[3]+g[2,4]*h[4];
      y:=g[3,1]*h[1]+g[3,2]*h[2]+g[3,3]*h[3]+g[3,4]*h[4];
      x:=g[4,1]*h[1]+g[4,2]*h[2]+g[4,3]*h[3]+g[4,4]*h[4];

writeln('  les coefficients définissant le modèle de la
GILBERT sont : ');
```

```
writeln('   C0= ',c:3:5,'    m = ',m:3:5,'      y =
',y:3:5,'    x = ',x:3:5);
for i:=1 to 8 do
begin
tm[i]:=exp(c)*exp(m*ln(v[i]))*exp(y*ln(s[i]))*exp(x*ln(di[
i]));
write ('   ',tm[i]:3:3);  writeln;
moy:=moy+tm[i];
end;
moy:=moy/8;
for i:=1 to 8 do
begin
p:=p+sqr(t[i]-tm[i]);
q:=q+sqr(t[i]-moy);
end;
r:=sqrt(1-p/q);
writeln('    le coefficient de corrélation est : R =
',r:2:3);
readln;
end.
```