



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI CONSTANTINE 1  
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



N° d'ordre :41/Ds/2019

N° de série :01/GM/2019

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Mécanique

OPTION : Construction Mécanique

Intitulé :

**Contribution à la détermination de critères de dégradation  
d'un outil de coupe lors des opérations d'usinage**

PAR

**AOUAD RAZIKA**

Soutenu le :21/02/2019

**Devant le jury**

Président	NECIB	Ibrahim	Prof.	Université Frères Mentouri – Constantine 1
Rapporteur	AMARA	Idriss	Prof.	Université Frères Mentouri – Constantine 1
Examineur	BOUKEBBAB	Salim	Prof.	Université Frères Mentouri – Constantine 1
Examineur	BOUCHENITFA	Hichem	M.C.A	Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf Mila
Examineur	KELAIAIA	Ridha	M.C.A	Université 20 Août 1955 Skikda

## Remerciement

*Je commencerai à remercier chaleureusement **mes parents**, pour m'avoir soutenu depuis que j'ai mis le pied dans ma première salle de cours et de m'avoir permis de pousser mes études aussi loin que possible.*

*Mon travail de thèse a été réalisé au sein du Laboratoire de Métrologie et Traitements Thermiques au Complexe Pelles et Grues (CPG) de Ain-Smara wilaya de Constantine, transformé en SPA dénommée SOMATEL (Société de Matériels de Terrassement et de Levage) en décembre 2010, et au sein de l'Entreprise Algérienne des Equipements et Machines-Outils (ALEMO) Oued El Hamimine à El Khroub - Constantine, Algérie. Mes vifs remerciements vont aux responsables et membres de ces entreprises qui m'ont bien reçu et fourni un cadre et environnement de travail plus qu'agréable.*

*Mes remerciements vont on premier lieu, à mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur **Idriss AMARA**, de l'Université Frères Mentouri Constantine 1. C'est grâce à ses remarques, ses conseils et à son soutien que j'ai pu débiter dans le domaine de la recherche. Je le remercie grandement pour sa confiance et la disponibilité qu'il m'a accordée. Aussi Je voudrais également remercier Monsieur **Zebiri Boubakeur**, Chef département de l'entreprise ALEMO pour son soutien et ses encouragements sans oublier aussi Monsieur Adel et Madame Yagouta pour leur aide.*

*Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur le Professeur **Brahim NECIB** de l'Université Frères Mentouri Constantine 1 qui me fait l'honneur de présider ce jury de cette thèse.*

*Mes remerciements sont adressés au Professeur **Salim BOUKEBBAB** de l'Université Frères Mentouri Constantine 1, à Monsieur le Docteur **Ridha KELALIAIA** Maître de Conférences à l'Université du 20 Août 1955 Skikda et Monsieur le Docteur **Hichem BOUGHENITFA** Maître de Conférences au Centre Universitaire Abdelhafid Bousof Mila d'avoir accepté d'être les membres du jury de ce travail.*

*Je remercie chaleureusement Monsieur **Lamine CHERIET** Professeur au Département de Droit Université Frères Mentouri Constantine1, pour sa disponibilité et son soutien permanent sur les plans scientifique et moral au cours de ma thèse particulièrement à la confiance déposée sur ma personne. Je tiens aussi à remercier Monsieur Kamel Boudeguige et Madame Amel Bouderrassa pour l'aide et les différentes idées apportées a ce travail.*

*Je terminerai par exprimer toute ma gratitude à l'ensemble de mes collègues et ami(e)s (la liste est trop longue pour figurer ici) de l'Université Frères Mentouri Constantine 1 ainsi qu'aux responsables des services de la Post-Graduation.*

## Dédicace

*A ma Mère, à qui je dois tout,*

*A mon Père qui m'a tout donné, et surtout beaucoup propulsé,*

*A mes frères et à mes sœurs,*

*A tous ceux qui s'investissent pour que la science soit lumière,*

*A mon Pays.*

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES EMPLOYES .....	I
TABLE DES FIGURES .....	II
TABLE DES TABLEAUX.....	VII
INTRODUCTION GENERALE .....	2
<b>CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'USINAGE DES METAUX (TOURNAGE) .....</b>	<b>5</b>
I.1. INTRODUCTION.....	5
I.2. PROCEDE DE TOURNAGE.....	5
<i>I.2.1. Principe de travail .....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.2. Principaux éléments d'une pièce en tournage .....</i>	<i>6</i>
<i>I.2.3. Mouvement relatif outil / pièce .....</i>	<i>6</i>
<i>I.2.4. Opération de base dans le tournage .....</i>	<i>7</i>
<i>I.2.5. Les machines de tournage.....</i>	<i>8</i>
<i>I.2.6. L'usinage à sec .....</i>	<i>9</i>
I.3. LES PARAMETRES DE COUPE.....	9
<i>I.3.1. Vitesse de coupe <math>V_c</math> .....</i>	<i>10</i>
<i>I.3.2. Vitesse d'avance <math>V_f</math>.....</i>	<i>10</i>
<i>I.3.3. Profondeur de passe <math>a_p</math>.....</i>	<i>11</i>
I.4. LE TOURNAGE DUR.....	11
<i>I.4.1. Avantage de tournage dur.....</i>	<i>11</i>
<i>I.4.2. Comparaison entre le tournage dur et la rectification .....</i>	<i>12</i>
I.5. LES OUTILS DE COUPE .....	13
<i>I.5.1. Géométrie d'un outil de coupe .....</i>	<i>13</i>
I.5.1.1. Face de coupe.....	13
I.5.1.2. Face de dépouille .....	13
I.5.1.3. Le rayon de bec .....	13
I.5.1.4. L'arête de coupe.....	13
I.5.1.5. Angles de l'outil.....	14
<i>I.5.2. Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil.....</i>	<i>14</i>
I.5.2.1. La géométrie de l'arête de coupe .....	15
I.5.2.2. Description géométrique du contact en tournage.....	15
I.5.2.3. La partie active des outils de coupe .....	15
I.5.2.3.1. Systèmes de fixation de la plaquette.....	16

<i>I.5.3. Différent types des outils de tournage</i> .....	16
<i>I.5.4. Matériaux des outils de coupe</i> .....	16
I.5.4.1. Les aciers rapides .....	17
I.5.4.2. Les carbures .....	17
I.5.4.3. Les céramiques.....	17
I.5.4.4. Les cermets .....	18
I.5.4.5. Les nitrures de bore cubique (CBN) .....	18
I.5.4.6. Diamants .....	19
<b>I.6. RUGOSITE DES SURFACES USINEES</b> .....	19
<i>I.6.1. Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface</i> .....	19
<i>I.6.2. Principaux défauts de surface</i> .....	20
<i>I.6.3. Principaux critères de rugosité</i> .....	20
<i>I.6.4. Evaluation de la rugosité</i> .....	22
<b>I.7. CHALEUR ET TEMPERATURE</b> .....	23
<i>I.7.1. Sources de chaleur</i> .....	23
<i>I.7.2. Mesure de la température</i> .....	24
I.7.2.1. Mesure par thermocouple (mesure avec contact) .....	24
I.7.2.2. Mesure par le pyromètre infrarouge (mesure sans contact).....	24
<b>I.8. ETAT DE L'ART SUR L'USINAGE DES METAUX</b> .....	25
<b>I.9. CONCLUSION</b> .....	39
<b>CHAPITRE II : L'USURE DES OUTILS DE COUPE EN TOURNAGE</b> .....	<b>41</b>
<b>II.1. INTRODUCTION</b> .....	41
<b>II.2. INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR L'USURE</b> .....	41
<b>II.3. MECANISMES D'USURE DES OUTILS DE COUPE</b> .....	42
<i>II.3.1. Phénomènes mécanique</i> .....	42
II.3.1.1. Usure par adhésion mécanique .....	42
II.3.1.2. Usure par abrasion mécanique.....	43
II.3.1.3. Usure par déformation plastique.....	43
II.3.1.4. Usure par fissuration.....	43
<i>II.3.2. Phénomène physico-chimiques</i> .....	43
II.3.2.1. Usure par diffusion .....	43
II.3.2.2. Usure par corrosion.....	44
<b>II.4. LES FORMES D'USURE DES OUTILS DE COUPE (MODES D'USURE)</b> .....	44

II.4.1. L'usure en dépouille Vb (Usure frontale).....	44
II.4.2. Usure en cratère Kt .....	45
II.4.3. Entaille.....	45
II.4.4. Autres forme d'usure .....	45
II.4.4.1. Usure par déformation plastique.....	45
II.4.4.2. Usure par écaillage et fissuration d'arête .....	46
II.4.4.3. Rupture brutale du bec d'outil.....	46
II.5. LES MODELES MATHEMATIQUES D'USURE (DUREE DE VIE).....	46
II.5.1. Modèle de Taylor généralisé .....	46
II.5.2. Modèle de Gilbert.....	46
II.5.3. Modèle de Colding.....	47
II.5.4. Modèle de Koning-De pierieux.....	47
II.5.5. Bilan des modèles d'usure.....	47
II.6. CONCLUSION.....	48
<b>CHAPITRE III : EQUIPEMENTS D'EXPERIENCE UTILISES .....</b>	<b>50</b>
III.1. INTRODUCTION.....	50
III.2. PRESENTATION DU MATERIEL .....	50
III.2.1. Machine-outil .....	50
III.2.2. Matière à usiner .....	51
III.2.2.1. Traitement thermique des éprouvettes .....	52
III.2.2.2. Mesure de dureté .....	52
III.2.3. Description des outils et porte-outils .....	53
III.2.3.1. Les outils .....	53
III.2.3.2. Les portes plaquettes .....	53
III.2.4. Instruments de contrôle et de mesure.....	54
III.2.4.1. Appareil de mesure de la rugosité .....	54
III.2.4.2. Appareil de mesure de la masse .....	54
III.2.4.3. Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille Vb.....	54
III.2.4.4. Pyromètre à infrarouge pour la mesure de la température de coupe.....	55
III.2.4.5. Autre équipements.....	55
III.2.4.6. Instruments de simulation .....	56
III.3. METHODOLOGIE D'ESSAIS .....	56
III.3.1. Préparation de la pièce.....	56

III.3.2. Conditions de coupe .....	57
III.3.3. Détermination d'un modèle de rugosité.....	58
III.4. CONCLUSION .....	61
<b>CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE DU PROFIL DE LA TEMPERATURE</b> .....	<b>63</b>
IV.1. INTRODUCTION.....	63
IV.2. RAPPEL SUR LES ELEMENTS FINIS .....	63
IV.2.1. Le maillage .....	64
IV.2.2. Modèle de comportement de la pièce à usiné.....	65
IV.2.3. Logiciel commercial.....	65
IV.3. ETUDE THERMIQUE.....	65
IV.3.1. Modèle géométrique et le maillage .....	65
IV.3.2. Création des défauts.....	66
IV.3.5. Conditions aux limites et les chargements .....	67
IV.3.4. Modélisation de la pièce à usiner.....	67
IV.3.4.1. Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux utilisés.....	67
IV.3.4.2. Loi de comportement de la pièce .....	68
IV.4. CONCLUSION .....	68
<b>CHAPITRE V: RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....</b>	<b>70</b>
V.1. INTRODUCTION .....	70
V.2. ANALYSE DE L'EXPERIENCE .....	70
V.3. EVOLUTION DES RUGOSITES .....	72
V.3.1. Effet des paramètres de coupe sur la rugosité.....	72
V.3.1.1. Effet de la vitesse de coupe .....	72
V.3.1.2. Effet de l'avance.....	73
V.3.1.3. Effet de la profondeur de passe .....	74
V.3.1.4. Evolution du poids des plaquettes par rapport à les vitesses de coupe .....	74
V.3.2. Détermination du modèle de rugosité.....	75
V.4. LES CRITERES DE DEGRADATION D'UN OUTIL DE COUPE.....	76
V.4.1. 1er critère / Usure en dépouille $V_b$ des outils .....	76
V.4. 1.1. Evolution de l'usure des outils pour différentes vitesses de coupe.....	76
V.4. 1.2. Evolution de l'usure des outils pour différentes avances .....	79

V.4. 1.3. Effet de l'usure en dépouille des outils sur la rugosité de surface .....	81
V.4.2. 2eme critère/ Température de coupe .....	83
V.4.2.1. Evolution de la température de coupe pour différents régimes de coupe sur la face d'attaque de l'outil.....	86
V.5. SIMULATION DU CRITERE DE LA TEMPERATURE.....	89
V.5.1. L'évolution de la température de coupe en fonction du temps à différents défauts créés .....	89
V.5.1.1 Validation des résultats expérimentalement.....	91
V.5.2. L'influence de la profondeur de coupe sur le champ de température .....	92
V.5.2.1. Validation des résultats expérimentalement.....	92
V.6. CONTEXTE D'USINAGE.....	93
LE BUT EST DE RECHERCHER LES CRITERES DE DEGRADATION DES OUTILS DE COUPE UTILISES AVEC UNE ANALYSE DES REVETEMENTS DES NUANCES ETUDIEES.....	93
V.6. 1. Présentation du matériel et la discussion des résultats.....	93
V.6.1. Influence de la condition de coupe sur la rugosité de la surface .....	94
V.6.2. Modèle de rugosité en fonction des conditions de coupe .....	94
V.6.3. Effet de l'usure sur la durée de vie de l'outil .....	95
V.6.4. Effet du temps de coupe sur l'usure .....	95
V.7. CONCLUSION .....	96
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	98
REFERENCES.....	101
ANNEXES .....	108
RESUME.....	116
المخلص .....	116
ABSTRACT .....	116



## Liste des abréviations et des symboles employés

MC : Mouvement de coupe	TiN : Titane de nitrure,
Ma : Mouvement d'avance	TiC : Titane de carbure
Mp : Mouvement de pénétration	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : Oxyde d'aluminium
CNC : Computer numerical control (Commande Numérique par Calculateur)	AISI 52100 : d'après la norme américaine USA
ARS : Acier rapide supérieur	MEB : Microscopie électronique à balayage :
V <sub>c</sub> : Vitesse de coupe (m/min)	KT : Profondeur du cratère
V <sub>f</sub> : Vitesse d'avance (mm/min)	KB mm : Largeur du cratère
A <sub>p</sub> : Profondeur de passe (mm)	BUE : Déformation plastique
f : Avance (tr/min)	BUL : Formation d'arête rapportée
D: Diamètre de la pièce exprimée en (mm)	VBC : Usure de rayon de bec (mm)
P : Puissance (Watt)	VBN : Usure en entaille
T : Température (C °)	R <sub>m</sub> : Résistance à la rupture (essai de traction)
N: Vitesse de rotation en tour par minutes (tr/min)	Re : Limite élastique
HRC : Dureté Rockwell	A : Allongement en % de l'éprouvette de traction après rupture.
r <sub>e</sub> : Rayon de bec	HB: Dureté Brinell
α : Angle de dépouille,	V <sub>b</sub> : Usure en dépouille
β : Angle de taillant	VB <sub>max</sub> : Hauteur maximum
γ : Angle de coupe (angle d'attaque) normal	VBB : Largeur de l'usure en dépouille
λ <sub>s</sub> : Angle d'inclinaison d'arête	R <sub>a</sub> : Rugosité moyenne arithmétique (μm)
K <sub>r</sub> : Angle de direction d'arête de l'outil degré	R <sub>t</sub> : Rugosité totale (μm)
PVD : Dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Déposition)	MEF : Méthode des éléments finis
CVD : Vapeur chimique CVD (Chemical Vapor Deposition)	ALE : Arbitraire Lagrangian-Eulerian
	μ : Coefficient de frottement
	t : Temps

## Table des figures

Figure I. 1. Représentation du tournage (chariotage) [3] .....	5
Figure I. 2. Les surfaces de la pièce [2] .....	6
Figure I. 3. Les mouvements de coupe [6] .....	7
Figure I. 4. Opérations de base en tournage [2] .....	7
Figure I. 5. Opération de chariotage en tournage.....	8
Figure I. 6. Composantes d'un tour conventionnel [4] .....	8
Figure I. 7. Les choix des paramètres de coupe [4] .....	9
Figure I. 8. Les paramètres de l'opération de tournage [10] .....	10
Figure I. 9. Complexité géométrique des pièces usinées en tournage dur [18] .....	11
Figure I. 10. Comparatif des coûts entre tournage dur et rectification [19] .....	12
Figure I. 11. Arêtes et parties actives d'un outil de tournage en travail [21] .....	13
Figure I. 12. Angles du taillant : a) outil en main, b) outil en travail [22] .....	14
Figure I. 13. Géométrie de l'arrêt de coupe [23] .....	15
Figure I. 14. Description géométrique de l'outil [23] .....	15
Figure I. 15. Composition de la partie active d'un outil de tournage [6] .....	15
Figure I. 16. Systèmes de fixation de la plaquette [2].....	16
Figure I. 17. Évolution des matériaux à outils suivant la ténacité et la résistance à l'usure [25] .....	16
Figure I. 18. Familles des céramiques de coupe (% à titre indicatif) [26].....	18
Figure I. 19. Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface [29].....	19
Figure I. 20. Principaux défauts de surface [30].....	20
Figure I. 21. Rt Hauteur de profil totale [32].....	21
Figure I. 22. Rz Hauteur de profil maximum (moyenne) [32] .....	21
Figure I. 23. L'écart moyen arithmétique du profil (Ra) [32].....	21
Figure I. 24. Principaux critères de rugosité [32] .....	21
Figure I. 25. Sillons théoriques [30] .....	22
Figure I. 26. Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur [38] .....	23
Figure I. 27. Mesure de la température : a) Par thermocouple, b) Par le pyromètre infrarouge [39].....	24
Figure I. 28. Evaluation de l'usure en dépouille en fonction du temps, de la vitesse de coupe et du matériau usiné [40].....	25
Figure I. 29. Plaquette instrumentée d'après CIRTES [41] .....	26
Figure I. 30. Champs de température (C°) dans le copeau et dans l'outil, au voisinage du rayon d'arête de l'outil obtenus par la simulation numérique de l'usinage de l'acier C45 : (a) avec un outil en carbure non revêtu et (b) avec un outil en carbure revêtu TiC/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN, [43] .....	26
Figure I. 31. Usure en dépouille d'une céramique noire à base d'alumine lors l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC [44] .....	26

Figure I. 32. Endommagement de type usure (a-b-c) et rupture (d-e-f) d'un outil de coupe selon Grzesik [48] et Childs et al [47] : (a) usure en cratère (b) usure en dépouille (c) collage et (d) ébréchure d'arête (e) rupture brutale (f) rupture de la pointe de l'outil .....	28
Figure I. 33. Usure en dépouille VB du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6.....	30
Figure I. 34. Usure en cratère KT du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 .....	30
Figure I. 35. Micrographies de l'usure VB et KT du CBN à $V_c = 90$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr .....	30
Figure I. 36. Aspect final de l'usure en cratère KT du CBN : a) début d'usinage, b) après 80 min d'usinage à $V_c = 120$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm.....	30
Figure I. 37. Photo par MEB de l'usure en de dépouille et en cratère d'un outil de coupe en CBN [50] .....	30
Figure I. 38. Déformation de l'outil de coupe dans 3 directions orthogonales et la déformation totale de l'outil de coupe [52].....	32
Figure I. 39. Planning du flux de chaleur après 20s et 180 secondes [52] .....	32
Figure I. 40. Usure en fonction du temps des différents matériaux [53] .....	33
Figure I. 41. Effet de la vitesse de rotation (N) avec la profondeur de passe à 0.25mm et l'avance $f = 0.96 =$ mm/tr et varié la vitesse de rotation N à 90tr/min à 355 tr/min .....	36
Figure I. 42. Effet de l'avance (f) avec la vitesse de rotation N à 90tr/min et la profondeur de passe à 0.25mm et varié l'avance $f = 0.88$ mm/tr à 0.96= mm/tr .....	36
Figure I. 43. Effet de la profondeur de passe $a_p$ avec la vitesse de rotation N à 90tr/min et l'avance $f = 0.88$ mm/tr et varié de profondeur de passe à 0.25mm à 1= mm.....	37
Figure I. 44. Comparaison entre les deux plans d'expérience (Box-behnken et Taguchi) .....	38
Figure II.1. Classification des mécanismes d'usure en fonction des paramètres de la température de l'usinage selon Konig [61] .....	42
Figure II.2. Processus d'usure par adhésion mécanique [59].....	42
Figure II.3. Processus d'usure par abrasion [58] .....	43
Figure II.4. Processus d'usure : a) Par diffusion, b) Par corrosion (oxydation) [61] .....	44
Figure II.5. Différents formes d'usure : Emplacement A « Usure en cratère », Emplacement B «Usure en dépouille», Emplacement C «Usure en entaille» [59].....	45
Figure II.6. Autres forme d'usure : a) Par déformation plastique, b) Par écaillage et fissuration d'arête c) Par rupture brutale du bec d'outil [38] .....	45
Figure II.7. Représentation graphique des différents modèles [27] .....	48
Figure III.1. Tour parallèle conventionnel .....	50
Figure III.2. Photos des éprouvettes : a) Essais de la rugosité, b) Essais d'usure et la température .....	51

Figure III.3. Four électrique .....	52
Figure III.4. Machine d'essais de dureté brinell « INNOVATEST », série VERZUS 710 .....	52
Figure III.5. Plaquette servant aux essais : a) Plaquette de carbure, b) Plaquette de la céramique noire .....	53
Figure III.6. Les porte-plaquette servant aux : a) Porte-plaquette de carbure, b) Porte-plaquette de la céramique noire .....	53
Figure III.7. Appareil de mesure de la rugosité .....	54
Figure III.8. Méthodologie de mesure de la rugosité .....	54
Figure III.9. Microscope optique 2D pour mesurer l'usure .....	55
Figure III.10. Amprobe IR608A, Infrared Thermometer .....	55
Figure III.11. Chariotage et la préparation de la pièce (1-mandrin, 2-contre pointe, 3- pièce) : a) Essais de la rugosité, b) Essais d'usure .....	56
Figure IV.1. Eléments les plus fréquemment utilisés [68] .....	64
Figure IV.2. Élément de maillage : a) l'élément tétraédrique, b) l'élément hexaédrique [68] .....	64
Figure IV. 3. Modèle géométrique avec le maillage .....	66
Figure IV. 4. Raffinement du maillage au niveau de la zone de contact outil-pièce .....	66
Figure IV. 5. Différents défauts créés sur la face de dépouille .....	67
Figure V.1. Effet de la rugosité en fonction des paramètres de coupe a) En fonction de la vitesse de coupe à $f = 0,084\text{mm/tr}$ et $a_p = 0,2\text{mm}$ , b) En fonction de l'avance à $V_c = 180\text{m/min}$ et $a_p = 0,2\text{mm}$ et c) En fonction de la profondeur de coupe à $V_c = 180\text{m/min}$ et $f = 0,084\text{mm/tr}$ avec l'évolution du poids par rapport à la vitesse de coupe avec $a_p=0.2\text{mm}$ , $f=0.084\text{mm/tr}$ .....	72
Figure V. 2. Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales en fonction des paramètres de coupe : a) En fonction de la vitesse de coupe à $f = 0,084\text{mm/tr}$ et $a_p = 0,2\text{mm}$ , b) En fonction de l'avance à $V_c = 180\text{m/min}$ et $a_p = 0,2\text{mm}$ et c) En fonction de la profondeur de coupe à $V_c = 180\text{m/min}$ et $f = 0,084\text{mm/tr}$ .....	76
Figure V. 3. Evolution de l'usure en dépouille ( $V_b$ ) en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour; a) Le carbure T9325, b) La céramique noire TC100 et c) Phase de comparaison à $a_p = 0.2\text{mm}$ , $f = 0.084\text{mm/tr}$ .....	77
Figure V. 4. Photos de l'usure $V_B$ à $V_c = 120\text{m/min}$ , $f = 0,084\text{mm/tr}$ et $a_p = 0.2\text{mm}$ avec temps d'usinage .....	78
Figure V. 5. l'aspect final de l'usure en cratère KT à $V_c = 120\text{m/min}$ , $f = 0,084\text{mm/tr}$ , $a_p = 0,2\text{mm}$ ..	79
Figure V. 6. Photos des copeaux obtenue pour différentes vitesse de coupe à $f = 0.084\text{mm/tr}$ et $a_p = 0,2\text{mm}$ .....	79
Figure V. 7. Evolution de l'usure en dépouille ( $V_B$ ) en fonction du temps pour différentes valeurs de l'avance à $a_p = 0.2\text{mm}$ et $V_c = 120,180$ et $220\text{m/min}$ .....	80

Figure V. 8. Photos des copeaux obtenus pour différents valeurs de l'avance à $V_c = 180\text{m/min}$ et $a_p = 0.2\text{mm}$ .....	80
Figure V. 9. Effet de l'usure en dépouille des outils sur la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe et l'avance pour à $a_p = 0.2\text{mm}$ .....	82
Figure V. 10. La trajectoire de l'outil en fonction de l'avance pour à $a_p = 0.2\text{mm}$ et $V_c = 200\text{ m/min}$	82
Figure V. 11. Mesure de la température .....	83
Figure V. 12. Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acier 90 Mn Cr V8 par le carbure T9325, temps de coupe = 480s (8min); $V_c = 180\text{ m/min}$ , $a_p = 0,5\text{ mm}$ ; $f = 0,084\text{ mm/tr}$ ; $t^\circ$ copeau = $840\text{C}^\circ$ , $t^\circ$ outil = $85\text{C}^\circ$ , $t^\circ$ pièce = $60\text{C}^\circ$ .....	83
Figure V. 13. Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acier 90 Mn Cr V8 par la céramique noire TC100, temps de coupe = 480s (8min); $V_c = 180\text{ m/min}$ , $a_p = 0,5\text{ mm}$ ; $f = 0,084\text{ mm/tr}$ ; $t^\circ$ copeau = $702\text{ C}^\circ$ , $t^\circ$ outil = $76\text{ C}^\circ$ , $t^\circ$ pièce = $48\text{ C}^\circ$ .....	84
Figure V. 14. Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acier 90 Mn Cr V8 par la céramique noire TC100, temps de coupe = 120s (2min); $V_c = 240\text{ m/min}$ , $a_p = 0,5\text{mm}$ ; $f = 0,084\text{ mm/tr}$ ; $t^\circ$ copeau = $778\text{ C}^\circ$ , $t^\circ$ outil = $120\text{ C}^\circ$ , $t^\circ$ pièce = $73\text{ C}^\circ$ .....	84
Figure V. 15. Evolution de la température de coupe en fonction du temps à différentes vitesses de coupe pour les deux plaquettes de coupe la céramique noire TC100 et carbure T9325 à $a_p = 0.5\text{mm}$ , $f = 0.084\text{ mm/tr}$ .....	85
Figure V. 16. Evolution de la température de coupe en fonction du temps à différentes vitesses de coupe ( $V_c = 120, 200$ et $240\text{m/min}$ ) avec la céramique noire TC100 et carbure T9325, à $a_p = 0.2\text{mm}$ , $f = 0.084\text{mm/tr}$ .....	86
Figure V. 17. Evolution de la température de coupe en fonction du temps pour différentes valeurs de l'avance ( $f = 0.084, 0.164$ et $0.196\text{mm/tr}$ ) avec la céramique noire TC100 et carbure T9325, à $a_p = 0.2\text{mm}$ , $V_c = 180\text{m/min}$ .....	87
Figure V. 18. Evolution de la température de coupe en fonction du temps pour différents profondeur de coupe ( $a_p = 0.25, 0.5$ et $0.1\text{mm}$ ) avec la céramique noire TC100 et carbure T9325, à $f = 0.084\text{mm/tr}$ , $V_c=180\text{m/min}$ .....	88
Figure V. 19. Evolution de la température de coupe en fonction du temps à différents défauts créés ( $V_b = 0.1, 0.2$ et $0.3\text{mm}$ ) avec un outil de carbure, à $a_p = 1\text{ mm}$ , $f = 0.084\text{ mm/tr}$ et $V_c = 180\text{m/min}$ .	90
Figure V. 20. Distribution des températures simulée par ANSYS 15 pour différents défauts créés à un temps = 60s .....	91
Figure V. 21. Comparaison de la température simulée par ANSYS avec le temps par les divers défauts créés à $a_p = 1\text{mm}$ , $V_f = f = 0.084\text{ mm/tr}$ .....	91
Figure V. 22. Propagation de la température dans la zone de coupe pour différents profondeur de coupe à $f = 0.084\text{ mm/tr}$ et $V_c= 180\text{m/min}$ .....	92

---

Figure V. 23. Comparaison entre l'étude expérimentale et simulation pour la propagation de la température dans la zone de coupe pour différents profondeur de coupe en fonction du temps = 60s, $f = 0.084$ mm/tr, $V_c = 180$ m/min.....	92
Figure V. 24. Effet des paramètres de coupe ( $V_c, f$ et $a_p$ ) sur la rugosité avec $V_c = 180$ m/min et $a_p = 0,2$ mm .....	94
Figure V. 25. Comparaison de la durée de vie des outils pour PCBN et CC 650 à différentes vitesses de coupe avec a) $f = 0,08$ mm / tour, $a_p = 0,5$ mm, b) $f = 0,3$ mm / tour, $a_p = 0,5$ mm .....	95
Figure V. 26. Effet du temps de coupe sur l'usure en dépouille pour a) $f = 0,08$ mm/tour, b) $f = 0,12$ mm/tour et c) $f = 0,16$ mm/tour .....	96
Figure V. 27. Plaquette servant aux essais : a) Polycrystalline cubic boron nitride (PCBN), b) Céramique mixte (CC650) .....	115

## Table des tableaux

Tableau I.1. Comparaison d'état de surface entre tournage dur et la rectification [19].....	12
Tableau III.1. Les dimensions des éprouvettes .....	51
Tableau III.2. Les compositions chimiques du matériau .....	51
Tableau III.3. Les caractéristiques mécaniques et physiques du matériau .....	51
Tableau III.4. Les caractéristiques de four électrique .....	52
Tableau III.5. Les informations relatives aux plaquettes utilisées .....	53
Tableau III.6. Caractéristiques géométriques des porte-plaquettes [65] .....	53
Tableau III.7. Les conditions de coupe utilisées pour les essais de la rugosité de surface .....	57
Tableau III.8. Les conditions de coupe utilisées pour les essais d'usure .....	57
Tableau III.9. Les conditions de coupe utilisées pour les essais de la température .....	57
Tableau IV. 1. Propriétés mécaniques et physiques de l'acier et du carbure .....	67
Tableau IV. 2. Paramètres de la loi de Johnson et Cook de l'acier AISI4340 [75] .....	68
Tableau V.1. Analyse de l'expérience pour la rugosité .....	71
Tableau V.2. Modèles mathématiques de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe....	75
Tableau V. 3. Modèle mathématique de la rugosité obtenue .....	94
Tableau V. 4. Analyse de l'expérience pour l'usure .....	112
Tableau V. 5. Analyse de l'expérience pour la température .....	113
Tableau V. 6. Compositions chimiques de la nuance AISI 4140 (42 CrMo4) .....	115
Tableau V. 7. Caractéristiques géométriques des porte-outils .....	115

# **INTRODUCTION**

## **GÉNÉRALE**



## Introduction générale

Le procédé d'usinage reste à l'un des procédés les plus largement utilisés car la recherche d'une productivité et la longévité des outils de coupe est une préoccupation majeure dans les industries de mécanique.

La plaquette d'un outil de coupe est l'élément principal de la coupe des métaux, par conséquent toute dégradation de cette dernière conduira inévitablement à des pertes de productivité et ceci quelque soit le mode d'usinage, le but final est d'obtenir un produit dont la qualité d'exécution sera caractérisée par une précision dimensionnelle et de formes géométriques répondant aux spécifications techniques exigées. Ainsi qu'au degré de propreté des surfaces usinées qui est lié directement à la notion de rugosité.

Une surface usinée est le résultat de la reproduction géométrique et cinématique de la forme et de la trajectoire de la pointe de l'outil. De ce fait, l'usure des outils de coupe est un processus composé, durant lequel sur les surfaces usinées en contact avec la partie active et le copeau, apparaissent des phénomènes physico-chimiques très complexes.

Notre travail de thèse est une contribution scientifique qui est scindée en deux études : une étude expérimentale et une étude simulation numérique. L'étude expérimentale permettra d'identifier les critères de dégradation des outils de coupe utilisés tout en mettant en évidence l'usure et la variation du gradient de la température, tandis que l'étude simulation numérique sera axée sur l'usure des outils de la coupe après échauffement du bec de l'outil.

Cette simulation fait ressortir le profil de température sur la partie active de l'outil et ce pour mieux comprendre comment se propage cette dernière sous l'effet du contact, après avoir généré des défauts sur la surface de dépouille (variation de l'usure en dépouille pour  $V_b=0.1\text{mm}$ ,  $V_b=0.2\text{mm}$  et  $V_b=0.3\text{mm}$ ), avec l'aide du logiciel SOLIDWORKS 14 ; pendant le tournage de l'acier 90MnCrV8. Trois cas d'études sont mis évidence avec l'utilisation d'un logiciel des éléments finis ANSYS 15. A l'issue de la simulation, les résultats obtenus sont alors comparés avec un outil sans défaut.

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres :

- **Le premier chapitre**, est consacré à la recherche bibliographique sur l'usinage des métaux (tournage), c'est-ce-que nous trouvons dans la première partie qui contient quelques définitions sur le procédé de tournage aussi un aperçu sur l'outil de coupe tels que la géométrie, les matériaux des outils de coupe, en plus, la description des phénomènes régissant le processus de coupe tels que, la rugosité et la variation de température. La

dernière partie du chapitre présente une synthèse sur les résultats des travaux de recherche relatifs à la thématique.

- **Le second chapitre**, est consacré aux différents types d'usure des outils coupe en mode tournage. En plus, un état des lieux des connaissances des modes d'usure et la durée de vie de l'outil.
- **Dans le chapitre III**, nous avons présenté les aspects théoriques et méthodologique de recherche qui sont reposit sur la planification des expériences, les équipements nécessaires à la réalisation des essais tels que, tour, matériau de la pièce et les plaquettes de coupe, etc. En plus, les dispositifs de mesure sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour mesurer la rugosité des surfaces, l'usure et la température de coupe. D'autre part nous avons déterminé un modèle mathématique exprimant. D'une part la relation entre la rugosité et les éléments du régime de coupe.
- **Le chapitre IV**, est consacré aux résultats de la simulation numérique réalisée. Ainsi le profil de température est mis en évidence.
- **Le chapitre V**, est consacré d'une part, à l'interprétation et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus en termes de rugosité, usure et température à l'interface et produite au niveau de la pointe de l'outil. D'autre part, nous avons exposé les résultats de simulation numérique du critère de la température à travers la variation de l'usure en dépouille pour  $VB=0.1\text{mm}$ ,  $VB= 0.2\text{mm}$  et  $VB= 0.3\text{mm}$ .

**Enfin**, la conclusion générale regroupe les principaux résultats obtenus des travaux de cette thèse et les perspectifs avenir.

# **CHAPITRE**

## **I**

**Recherche bibliographique sur l'usinage des métaux  
(tournage)**

# CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur l'usinage des métaux (tournage)

## I.1. Introduction

Le tournage est l'un des procédés d'usinage qui occupe une très importante place dans la fabrication mécanique à cause de sa simplicité et la possibilité de produire un grand nombre de formes géométriques [1]. Dans ce chapitre, nous présentons une généralité sur l'usinage des métaux (tournage) qui contient d'une part des définitions, des conditions de coupe, la géométrie d'outil et les paramètres techno-économiques de production. D'autre part, nous allons présenter une synthèse des travaux de recherche concernant l'usure des outils de coupe en tournage et le critère de température qui se dégage entre outil-pièce-coupeaux.

## I.2. Procédé de tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière mettant en jeu des outils à arête unique [2] (figure I.1). Il s'effectue sur des machines-outils dites tour [3]. Il existe principalement deux différents types d'opérations de tournage, selon la surface de la pièce à usiner et matériaux utilisés :

Le tournage extérieur qui comme son nom l'indique, définit l'enlèvement de copeaux sur l'extérieur de la pièce. Parmi les opérations de tournage extérieur, nous retrouvons entre-autres le dressage, le chariotage, le chan freinage, le rainurage et le filetage.

Le tournage intérieur qui consiste à usiner une pièce de l'intérieur. Ce type d'opération comprend le pointage, le centrage, l'alésage, le rainurage.

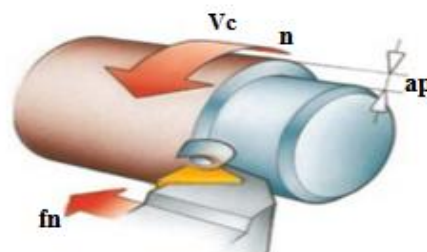


Figure I. 1. Représentation du tournage (chariotage) [3]

### I.2.1. Principe de travail

Pendant le tournage, la pièce, généralement tenue par le mandrin, qui a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles,

appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche [4].

### I.2.2. Principaux éléments d'une pièce en tournage

La figure I.2 illustre les principaux éléments d'une pièce à usiner, la surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée surface de la pièce. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc.) ou obtenue par usinage au cours d'opérations précédentes [2]. La surface engendrée (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée surface coupée.

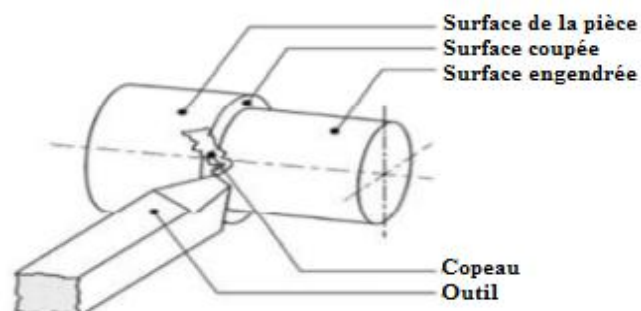


Figure I. 2. Les surfaces de la pièce [2]

### I.2.3. Mouvement relatif outil / pièce

Un examen approfondi du mécanisme de la coupe nous conduit à observer qu'il procède grâce à trois mouvements principaux perpendiculaires entre eux (figure I.3) [5].

- **Mouvement de coupe «  $M_c$  »** : c'est un mouvement de coupe circulaire donné à la pièce. qui est le mouvement principal du procédé, il prend le nom de Mouvement de coupe et est désigné par  $M_c$ .
- **Mouvement d'avance «  $M_a$  »** : c'est un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) donné à la l'outil, il prend le nom de mouvement d'avance et est désigné par  $M_a$  ou  $M_f$ .
- **Mouvement de pénétration «  $M_p$  »** : C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe et est désigné par  $M_p$ .

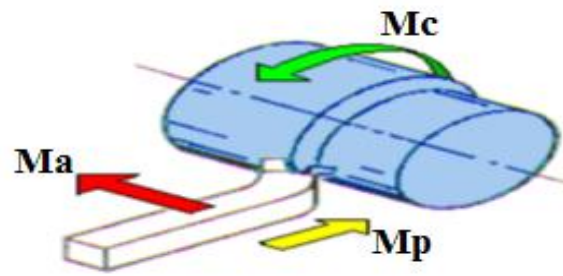


Figure I. 3. Les mouvements de coupe [6]

### I.2.4. Opération de base dans le tournage

Il existe quatre opérations de base (figure I.4) [2] :

- Tournage longitudinal, où chariotage (figure I.4.1),
- Dressage (figure I.4.2),
- Tournage de cônes (figure I.4.3),
- Contournage (figure I.4.4).

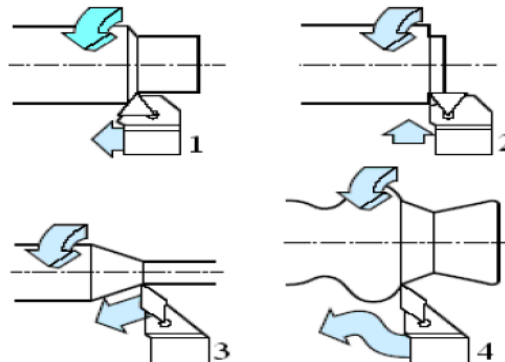


Figure I. 4. Opérations de base en tournage [2]

Pour faciliter le choix des outils et des paramètres de coupe, on peut souvent dissocier l'usinage des pièces complexes en profils de coupe élémentaires énumérer précédemment [2]

**Le chariotage :** C'est une opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure (figure I.4) [4]. En tournage, le chariotage (figure I.5) est une opération consistant à usiner sur un tour un cylindre d'un certain diamètre par déplacement de l'outil de coupe suivant un axe parallèle à l'axe de rotation de la pièce Z. Les paramètres de coupe sont l'avance (f), la profondeur de passe ( $a_p$ ) et la fréquence de rotation (N) [7].

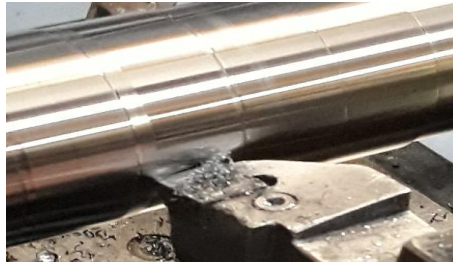


Figure I. 5. Opération de chariotage en tournage

### I.2.5. Les machines de tournage

Les mouvements cités ci-dessus sont communiqués simultanément à l'outil et à la pièce à l'aide d'une machine-outil appelée « tour » (figure I.6). Il existe plusieurs types de tours, ils se distinguent les uns des autres par leurs formes, dimensions, précision d'usinage, puissance et capacité de production. Néanmoins, ils présentent sensiblement la même disposition générale d'agencement des organes mécaniques [8].

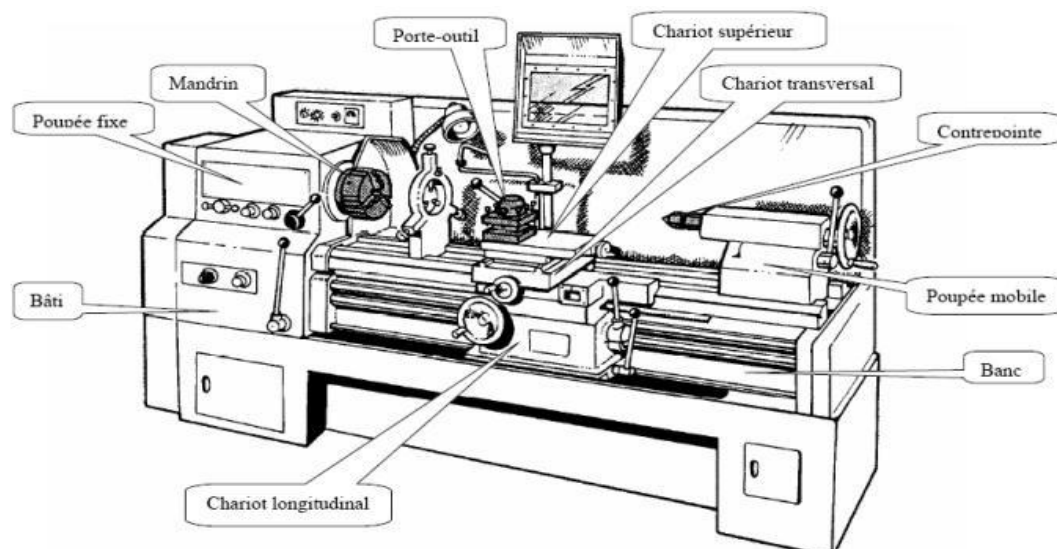


Figure I. 6. Composantes d'un tour conventionnel [4]

A l'heure actuelle, le tournage possède une multiplicité de modèles différents de machines-outils que l'on pouvait classer en :

- Tours universels manuels
- Tours universel à CNC
- Tours verticaux
- Centre de tournage bi broches
- Centre de tournage-fraisage
- Centre de tournage-rectification

### I.2.6. L'usinage à sec

L'usinage à sec est encore plus préjudiciable à la tenue à l'usure des outils puisque la température est extrêmement élevée. Les trois principaux modes d'usure identifiés aux interfaces de frottement sont l'abrasion, l'adhésion et la diffusion. La compréhension des mécanismes qui les gouvernent est encore incomplète, notamment du fait que les différents modes d'usure évoqués opèrent d'une manière interactive. De plus, l'étude de ces mécanismes reste difficile car les interfaces de frottement outil/pièce et outil/copeau sont inaccessibles pendant l'opération d'usinage [9].

### I.3. Les paramètres de coupe

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface, etc.), il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe, comme le montre la figure 1.7 suivante :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses, etc.)
- La puissance de la machine
- La matière de l'outil (ARS, carbure, etc.)
- La matière usinée (acier, aluminium, etc.)
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage, etc.)
- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement)

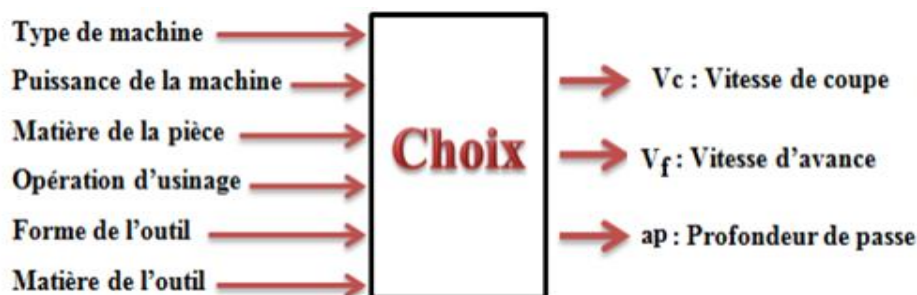


Figure I. 7. Les choix des paramètres de coupe [4]

Tous ces critères sont intimement liés et étant donné que l'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela, il faut déterminer certains paramètres spécifiques : La vitesse de coupe  $V_c$  ; La vitesse d'avance  $V_f$  et la profondeur de passe  $a_p$



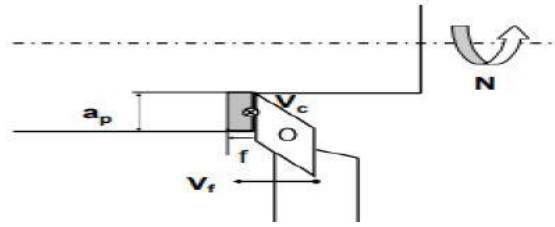


Figure I. 8. Les paramètres de l'opération de tournage [10]

### 1.3.1. Vitesse de coupe $V_c$

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse  $\omega$  (rad /s) soit  $N$  (tr/min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce. Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre  $D$  la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine), comme le montre dans la figure I.8 [2]. La relation reliant la vitesse de coupe et la vitesse de rotation est donnée par l'équation I. 1.

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \dots \dots \dots (I. 1)$$

Où :  $D$  : Diamètre de la pièce exprimée en mm ;  $N$  : La vitesse de rotation en tour par minutes (tr/min),  $V_c$  : La vitesse de coupe en mètre par minutes. (m/min)

Le choix de la vitesse de coupe se fait généralement en fonction des matériaux de la pièce et de l'outil, des paramètres d'avance et la profondeur de passe, de la lubrification et de la durée de vie souhaitée pour l'outil [10].

**Remarque :** d'une manière générale  $V_c$  ébauche est inférieure à  $V_c$  finition.

### 1.3.2. Vitesse d'avance $V_f$

L'avance correspond au déplacement de l'outil en fonction de la rotation de la pièce pendant la formation de copeau. L'avance est notée  $f$  et est exprimée en mm/tour. Comme pour la vitesse de coupe, en pratique, l'avance s'exprime en vitesse d'avance  $V_f$  [2]. La vitesse d'avance  $V_f$  (mm/ min) que la figure I.8 montre, est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti de la machine selon les axes longitudinal et transversal et en fonction du nombre de tours effectués par la pièce [2].

L'avance influence également l'épaisseur des copeaux et leur mode de segmentation [10, 11]. Elle est donnée par l'équation I.2.

$$V_f = f \times n \dots \dots \dots (I. 2)$$

Où :  $V_f$  = la vitesse d'avance de l'outil mm/tour,  $n$  = La vitesse de rotation en tr/min.

### 1.3.3. Profondeur de passe $ap$

Elle est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas selon l'arête de l'outil. En chariotage par exemple, elle correspond à la différence de rayon entre la surface usinée et la surface précédente. [10, 12]. C'est un critère important pour choisir le mode de travail en ébauche ou en finition, mais il reste secondaire par rapport aux précédents.

## I.4. Le tournage dur

Le tournage dur est un procédé récent dans son utilisation. Il se définit comme une opération de tournage sur des aciers traités thermiquement d'une dureté supérieure à 45 HRC. Ce procédé s'impose comme un concurrent sérieux de la rectification. Il vient compléter, et parfois remplacer, la rectification conventionnelle qui est considéré comme opération très coûteuse [13]. L'objectif du tournage dur est que les pièces en acier de dureté élevée soient finies en tournage et sans rectification. Le tournage dur permet d'obtenir de bons états de surfaces [14].

### I.4.1. Avantage de tournage dur

Parmi les avantages du tournage dur issus de l'expérience des utilisateurs du processus trouvés dans la littérature [15, 16, 17] nous citons :

- Usinage facile des pièces a contour complexe (figure I.9)
- Gamme d'usinage plus courte car la phase de rectification est éliminée
- L'aptitude à réaliser des opérations différentes avec une seule prise
- Le taux d'enlèvement de matière est plus élevé que celui de la rectification
- Le tournage dur peut être réalise sur un tour de tournage conventionnel
- Grace à la l'élimination de la lubrification, les déchets sont recyclables tels que les coupeaux

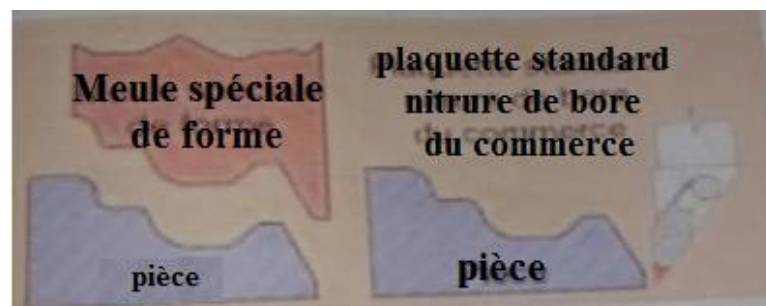


Figure I. 9. Complexité géométrique des pièces usinées en tournage dur [18]

### I.4.2. Comparaison entre le tournage dur et la rectification

Le tournage dur est une méthode d'usinage à un seul point de contact qui permet d'usiner des contours complexes sans avoir recours aux meules de forme coûteuses que nécessite la rectification à points de contact multiples [19]. Le tournage dur permet en outre de réaliser plusieurs opérations en un seul montage avec pour aboutissement une excellente précision de positionnement, moins de manipulations et une baisse des risques d'endommagement des pièces (Tableau I. 1) [19]. L'environnement est également bénéficiaire puisque cette méthode élimine les boues engendrées par la rectification et ne nécessite pas d'arrosage. Au final, le tournage dur réduit les coûts machine et permet une meilleure maîtrise de la production, des rendements plus élevés et une meilleure qualité de la pièce finie (Figure I.10). Tous ces avantages mis bout à bout, il est évident que les économies engendrées par l'adoption du tournage dur sont considérables [19].

Tableau I.1. Comparaison d'état de surface entre tournage dur et la rectification [19]

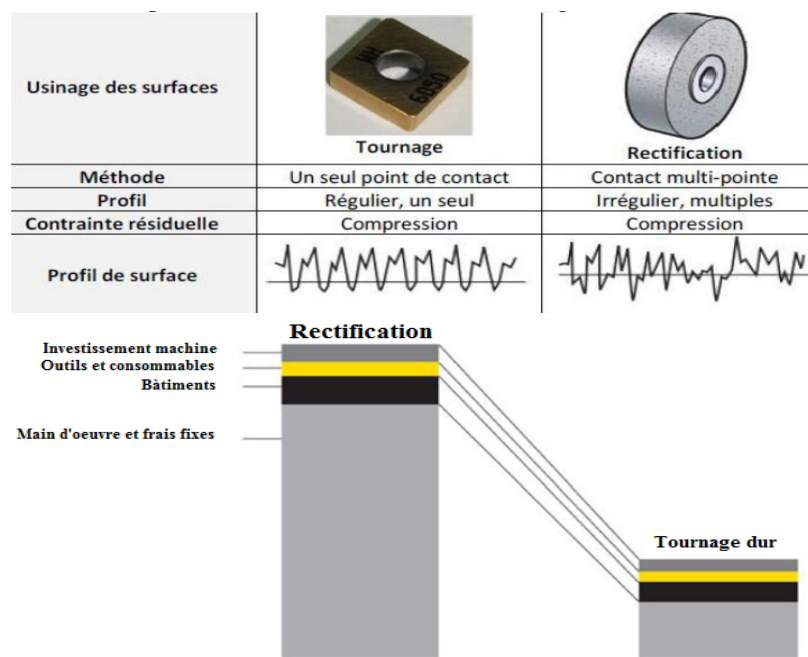


Figure I. 10. Comparatif des coûts entre tournage dur et rectification [19]

La stabilité thermique de la machine est également un élément à prendre en considération. Quel que soit l'endroit sur la machine où il y a production de chaleur, cela influe sur les tolérances de la pièce. Il faut donc en avoir une parfaite maîtrise. Évacuer la chaleur en refroidissant la broche ou éloigner les copeaux brûlants de la machine se traduira par de meilleures tolérances. Si tous les paramètres de stabilité machine, outils et température sont pris compte, alors l'obtention de la qualité de pièces finies sera équivalente à celle obtenue en rectification [19].

## I.5. Les outils de coupe

Les outils permettent d'enlever le copeau, La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables de la pièce. Il existe une grande diversité d'outils de coupe mais les principaux éléments des différents outils sont semblables. En ce titre nous définissons les constituants d'outil et son type de matériaux [20]. Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants [2] :

- Matière de la pièce, usinabilité.
- Configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage.
- Limitations : tolérances, état de surface.
- Machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques.
- Stabilité, rigidité de la prise de pièce et de la pièce.

### I.5.1. Géométrie d'un outil de coupe

Un outil de coupe consiste en un corps et une queue. Un corps est la partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. La queue de l'outil est la partie par laquelle celui-ci est maintenu. La partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe (les arêtes, les faces de coupe et les faces de dépouille) est appelée partie active [6]. Sont illustrées sur la figure I.11 :

#### I.5.1.1. Face de coupe

C'est la face de frottement entre l'outil et le copeau. On l'appelle  $A \gamma$ .

#### I.5.1.2. Face de dépouille

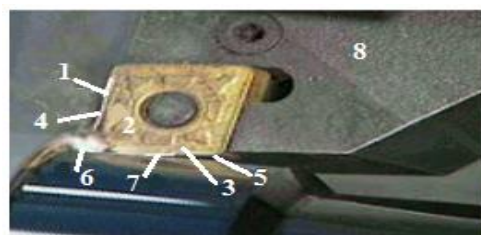
C'est la surface sur laquelle frotte la matière restant sur la pièce après arrachement du copeau. On l'appelle  $A \alpha$ .

#### I.5.1.3. Le rayon de bec

C'est le rayon de la surface reliant deux surfaces en dépouille. On l'appelle  $r \epsilon$ .

#### I.5.1.4. L'arête de coupe

C'est le segment ou la surface reliant la face de coupe et la face en dépouille (figure I.14).



- 1 Arête principale
- 2 Face de coupe principale
- 3 Face de coupe secondaire
- 4 Face de dépouille principale
- 5 Face de dépouille secondaire
- 6 Bec de l'outil
- 7 Arête secondaire
- 8 Queue de l'outil

Figure I. 11. Arêtes et parties actives d'un outil de tournage en travail [21]

### I.5.1.5. Angles de l'outil

Pour faciliter l'explication des phénomènes de la coupe, il est nécessaire de définir les angles ayant la plus grande influence sur les dits phénomènes. La figure I. 12 illustre les trois angles principaux du taillant dans les systèmes de référence outil en travail et en main. Elles sont comme suit : l'angle de dépouille  $\alpha$ , l'angle de taillant  $\beta$  et l'angle de coupe  $\gamma$  [22].



Figure I. 12. Angles du taillant : a) outil en main, b) outil en travail [22]

- **L'angle de dépouille  $\alpha$**  influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil.
- **L'angle de taillant  $\beta$**  : c'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille. L'angle de taillant  $\beta$  affecte la résistance à la rupture du taillant.
- **L'angle de coupe (angle d'attaque)  $\gamma$**  a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur, etc.

La somme de ces trois angles est toujours égale à  $90^\circ$  [22]. Elle est donnée par l'équation I.3 :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \dots\dots\dots (I. 3)$$

Dans le cas où la somme est supérieure à  $90^\circ$ , on parle de coupe négative ( $\gamma$  négatif).

### I.5.2. Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil

La pointe de l'outil est la zone de contact avec la matière. Elle est ainsi la zone de l'outil de coupe la plus sollicitée mécaniquement et thermiquement. À cet effet, il est important de bien choisir les caractéristiques géométriques de la pointe de l'outil. Ces dernières sont définies principalement par le rayon du bec de l'outil ( $r_\epsilon$ ), l'angle de coupe ( $\gamma$ ) et l'angle de dépouille ( $\alpha$ ) (figure I.12).

### I.5.2.1. La géométrie de l'arête de coupe

La plupart des modèles de coupe tridimensionnelle caractérisent l'outil suivant trois plans distincts matérialisés par la face de coupe et les faces de dépouilles principale et secondaire (figure I.13a) [23]. En réalité, la zone de coupe de l'outil est constituée de trois plans raccordés par deux rayons (Figure I.13b): le rayon de bec  $r_e$  et le rayon d'acuité  $R$  de l'arête de coupe, qui est souvent négligée dans un grand nombre de modèles [24].

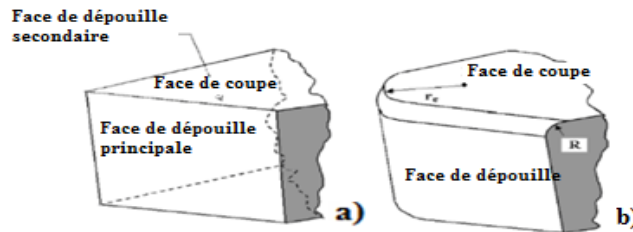


Figure I. 13. Géométrie de l'arrêt de coupe [23]

### I.5.2.2. Description géométrique du contact en tournage

La surface de contact entre l'outil et la pièce est relativement complexe. La définition suivante (figure I.14) découpe la surface de contact à partir d'une ligne directrice (ou ligne d'arête) et d'une ligne d'esquisse (ou ligne de coupe) [24].

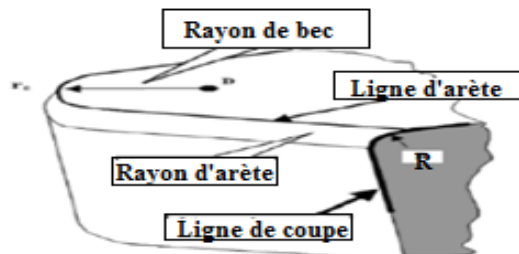


Figure I. 14. Description géométrique de l'outil [23]

### I.5.2.3. La partie active des outils de coupe

La plaquette de coupe (figure I.15) est l'élément principal des outils d'usinage et dans le domaine de l'industrie. Toute dégradation de la plaquette conduira inévitablement à des pertes dans l'économie productive industrielle.

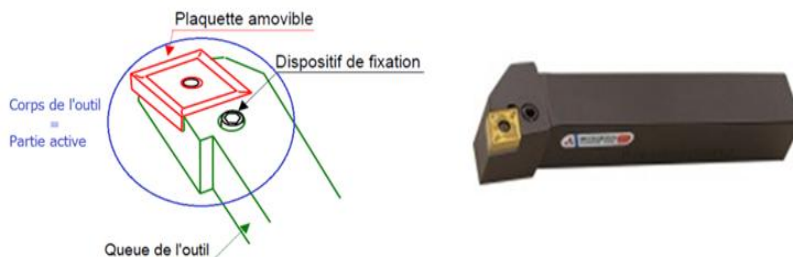


Figure I. 15. Composition de la partie active d'un outil de tournage [6]

### I.5.2.3.1. Systèmes de fixation de la plaquette

Il existe, dans la gamme Sandvik- Coromant, deux types principaux de systèmes de fixation de plaquettes.

- T max U (figure I.16a) : fixation par vis centrale, plus particulièrement destinée à la finition, avec des plaquettes à géométrie positive.
- T max P (figure I.16 b) : robuste fixation par levier ou bride-coin adaptée à l'ébauche pour utilisation de plaquettes à géométrie négative.

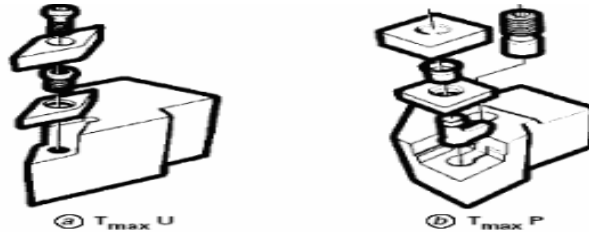


Figure I. 16. Systèmes de fixation de la plaquette [2]

### I.5.3. Différent types des outils de tournage

Les outils de coupe en tournage classés selon la forme de trois types, ce sont :

- Les forets pour l'alésage
- Les outils monoblocs : le corps et la partie active sont de même matériau
- Les outils à plaquette
- Les outils de tournage actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette [2]

### I.5.4. Matériaux des outils de coupe

La figure I.17 schématise l'évolution des matériaux à outils dans un diagramme « ténacité – résistance à l'usure »

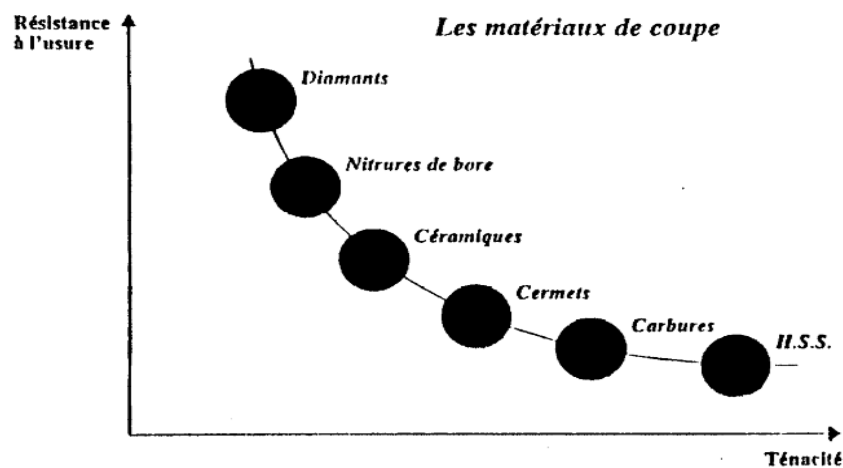


Figure I. 17. Évolution des matériaux à outils suivant la ténacité et la résistance à l'usure [25]

### **I.5.4.1. Les aciers rapides**

ARS sont apparus vers 1890 .Ce sont des aciers fortement alliés. Les métaux d'addition sont, le tungstène (W), le molybdène (D), le vanadium (V), le cobalt (K) et le chrome (C). Le pourcentage de carbone quant à lui varie de 0.8 à 1.75% [21]. Pour améliorer leurs performances, ces outils peuvent être revêtus par dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Déposition, PVD). Ce procédé permet d'obtenir des couches minces (épaisseurs 1 à 5µm) de matériaux durs, principalement du TiN, TiCN et TiAlN. Ils sont utilisés de manière occasionnelle (petites séries sans importance de qualité) [25].

### **I.5.4.2. Les carbures**

Ils sont apparus en 1926, et n'ont cessé d'être améliorés. Ils font partie maintenant de l'outillage couramment employé en mécanique pour la coupe des métaux. C'est un mélange de poudre de carbure de fer fritté, souvent revêtu d'alliage de grande dureté, pour faciliter le glissement du copeau sur l'outil et l'évacuation de la chaleur. L'épaisseur de ces couches varie de 4 à 10 microns.

Les outils de carbures (à base de carbure de tungstène WC) sont aujourd'hui très utilisés. Ils sont constitués essentiellement de carbure de tungstène (phase  $\alpha$ ), et de carbure de titane, de tantale ou de niobium (phase  $\gamma$ ). Le rôle de l'addition de carbure de titane, tantale ou niobium est d'augmenter les propriétés à haute température (vitesse de coupe élevée) en réduisant le frottement. C'est aussi de diminuer l'usure de la face de coupe en réduisant la diffusion du carbure de tungstène entre l'outil et le copeau [26]. Pour améliorer encore leurs performances, ils peuvent être revêtus de dépôts ioniques obtenus essentiellement par procédés :

- Par vapeur physique PVD (dépôt physique en phase vapeur : Physical Vapor Deposition)
- Par vapeur chimique CVD (Chemical Vapor Deposition) CVD : dépôts chimiques en phase gazeuse. Une grande diversité de revêtements est déposable (TiN, TiCN, TiAlN, Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>, etc.) avec un bon accrochage sur le substrat [25].

### **I.5.4.3. Les céramiques**

Les premières céramiques de coupe en oxyde d'aluminium sont apparues vers 1920 en Allemagne, mais sans connaître de grand succès. C'est surtout au cours de la deuxième guerre mondiale que les travaux sur les céramiques ont débouché sur des réalisations concrètes. Malheureusement ces outils étaient très fragiles et surtout on ne disposait pas à l'époque de machines assez puissantes et rapides pour les utiliser pleinement. La maîtrise de la microstructure des céramiques a permis des progrès considérables. Le nom de céramique



vient de la structure de ces matériaux qui ressemble à une structure hexagonale du type porcelaine. Il existe deux types de céramique (figure I.18) :

- La céramique blanche (aussi appelée céramique pure) sont divisés en deux catégories :
  - les céramiques à de l'oxyde d'aluminium plus quelques additifs. Les plaquettes sont obtenues par pressage à froid (on dit aussi pastillage) suivi d'un frittage.
  - les céramiques à base nitrure de silicium  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (Sialon). Possèdent de très bonnes propriétés thermiques. Leur haute ténacité et leur faible coefficient de dilatation font des Sialons des outils très résistants aux chocs thermiques. En contrepartie, ce sont les outils les plus fragiles.
- La céramique noire, c'est un mélange d'oxyde d'aluminium (75 %) et de carbure de titane  $\text{TiC}$  (30 %), mais contiennent un peu de zirconium ( $\text{ZrO}_2$ ). Elle est obtenue par frittage sous pression.

Ces deux types de céramiques se présentent en plaquettes de différentes formes (comme les carbures).

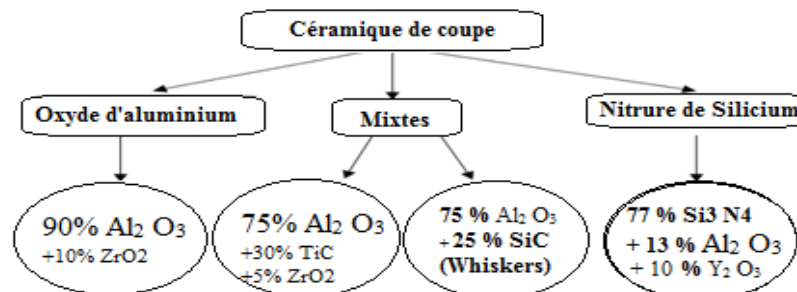


Figure I. 18. Familles des céramiques de coupe (% à titre indicatif) [26]

#### I.5.4.4. Les cermets

Le nom cermet est composé à partir du mot céramique et du mot métal. À l'origine, les cermets étaient des matériaux composés à base de  $\text{TiC}$  et de nickel. Les nuances des cermets modernes ne contiennent plus de nickel. Elles ont une structure basée sur des particules de carbonitride de titane  $\text{TiC}$ ,  $\text{TiN}$ . Le  $\text{Ti(C, N)}$  apporte une meilleure résistance à l'usure à la nuance, la seconde phase solide augmente la résistance à la déformation plastique et la teneur en cobalt contrôle la ténacité [27].

#### I.5.4.5. Les nitrures de bore cubique (CBN)

Le Nitrure de bore est un matériau d'outil coûteux. Aussi est le matériau le plus dur après le diamant. Le nitrure de bore permet d'usiner des matériaux très durs et difficiles à usiner (Fonte et acier de dureté supérieure à 45HRC) [25].

CBN est une matière très dure adaptée au tournage d'acier trompé, de fonte en coquille et d'alliages à base de nickel ou cobalt. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes céramiques ou en carbure, lorsqu'elles sont utilisées correctement. Les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition [20].

#### I.5.4.6. Diamants

Les diamants sont les matériaux les plus durs. Mais aussi le plus cher, mais il est quand même nettement moins cher que le diamant mono cristallin. Il possède une résistance à l'usure que les autres matériaux d'outils n'ont pas, en particulier pour les matières fortement abrasives [27]. Il se présente sous plusieurs formes :

- Le diamant synthétique (ou naturel) en cristaux déposés sur un support métallique ou carbure avec un liant électrolytique (Ni).
- Le diamant poly cristallin (PCD) obtenu par frittage de grains de diamant synthétiques. Le PCD est souvent lié, lors du frittage, à un support (une plaquette) à base de carbure de tungstène [25].

### I.6. Rugosité des surfaces usinées

#### I.6.1. Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface

En mécanique, l'état de surface est un élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées [28]. Parmi les divers facteurs qui affectent l'état de surface d'une pièce mécanique, les facteurs dominants sont la géométrie de l'outil de coupe, l'avance, et les vibrations relatives entre l'outil et la pièce [29]. À l'aide de la méthode Ichikawa, la figure I.19 montre les différents facteurs qui peuvent influencer sur l'obtention de l'état de surface désiré dans le cas d'usinage.

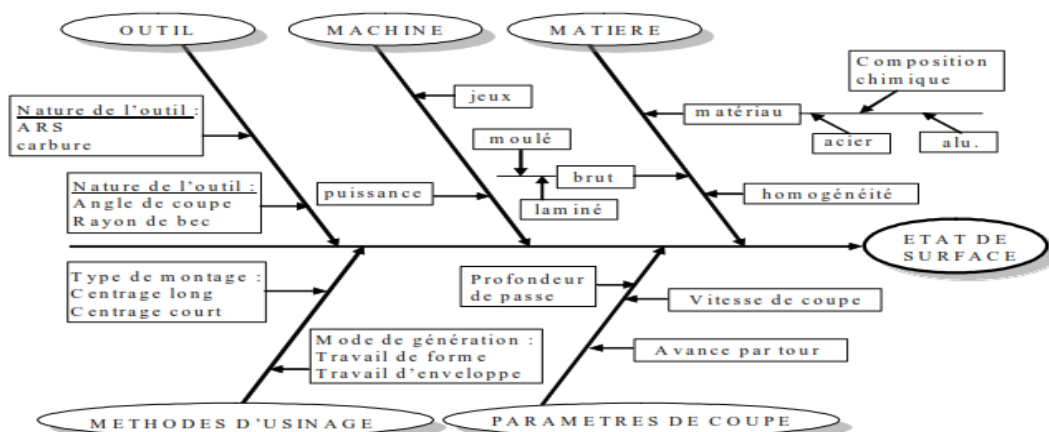


Figure I. 19. Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface [29]

### I.6.2. 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) [30].

- Défauts du premier ordre : Ce sont des défauts de forme (écart de rectitude, écarts de circularité), défaut a périodique.
- 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 3<sup>ème</sup> 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, piquûre, etc. Ce type de défaut a un caractère a périodique.

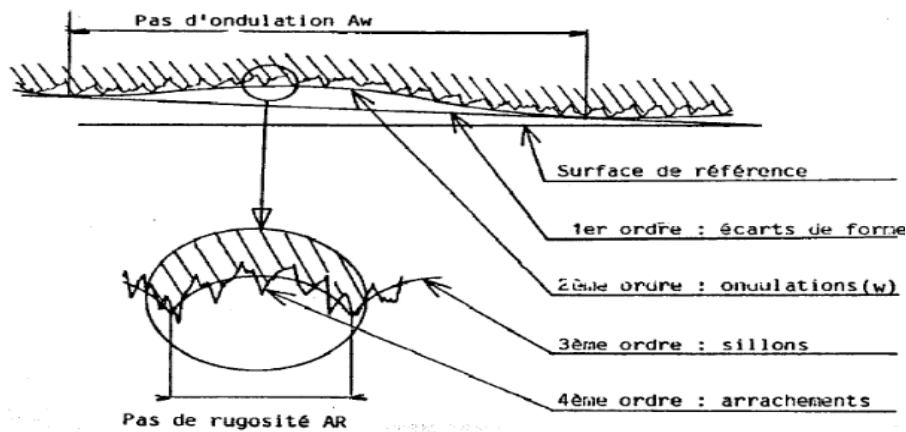


Figure I. 20. Principaux défauts de surface [30]

### I.6.3. 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 :

$$\int_0^l y dx = 0 \dots \dots \dots (I.4)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne [31].

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

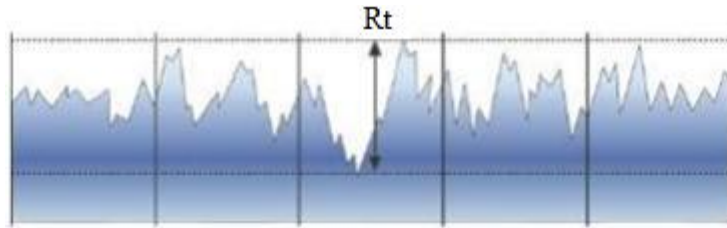


Figure I. 21.  $R_t$  Hauteur de profil totale [32]

- b) Rugosité  $R_z$ :  $R_z$  représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas (figure I.22).

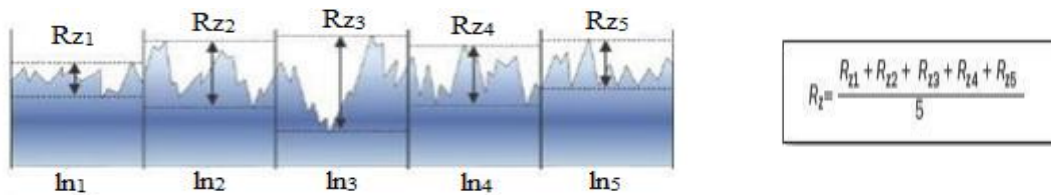


Figure I. 22.  $R_z$  Hauteur de profil maximum (moyenne) [32]

- c) Rugosité moyenne arithmétique  $R_a$  :  $R_a$  représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX (figure I.23).

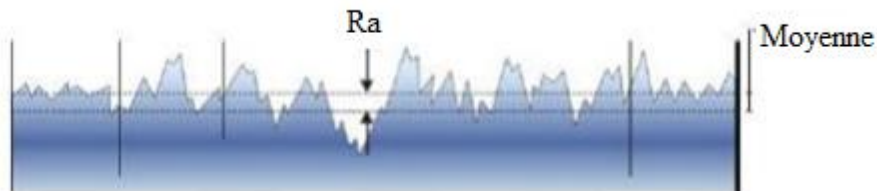


Figure I. 23. L'écart moyen arithmétique du profil ( $R_a$ ) [32]

$R_a$  est calculé sur une longueur d'évaluation (Figure I.24):

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \dots \dots \dots (I. 5)$$

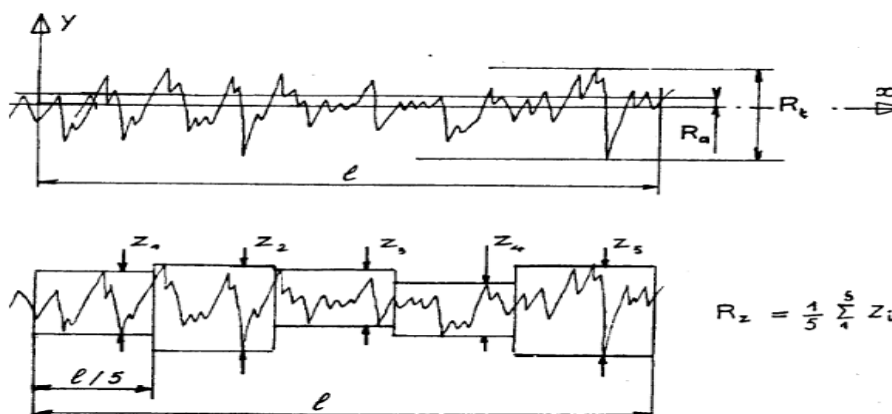


Figure I. 24. Principaux critères de rugosité [32]

### I.6.4. 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 de la surface  $R_t$  obtenue peut être déterminée à partir d'un profil géométrique idéal donné par la figure I.25 [30, 33].

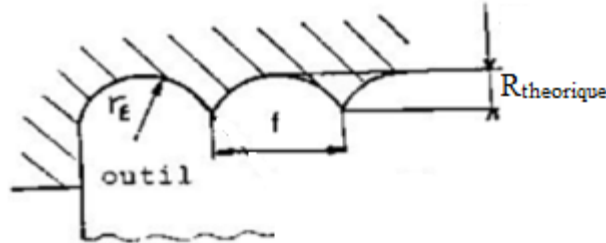


Figure I. 25. Sillons théoriques [30]

$$R_{t_{theorique}} = r_{\epsilon} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{f^2}{4r_{\epsilon}^2}} \right] \dots\dots\dots (I.6)$$

Avec :  $r_{\epsilon}$  c'est le rayon de pointe d'un outil.

Dans le cas où l'avance serait suffisamment petite devant la valeur de  $r_{\epsilon}$ . L'équation I.6 pourrait être remplacée par l'approximation :

$$R_{t_{theorique}} \approx \frac{f^2}{8r_{\epsilon}} \dots\dots\dots (I.7)$$

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  $R_t$  est bien supérieure à  $R_t$  (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  $R_t$  qui se rapproche de  $R_t$  (théorique).

A partir de l'équation I.7, une approximation largement utilisée pour évaluer la rugosité moyenne arithmétique ( $R_a$ ) se présente sous la forme [34]:

$$R_{t_{theorique}} \approx \frac{f^2}{32r_{\epsilon}} \dots\dots\dots (I.8)$$

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 [35]. Ces relations sont généralement de la forme :

$$R = C \times V^\alpha \times f^\beta \times a_p^\gamma \dots \dots \dots (I.9)$$

Avec: Les coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ , et  $\gamma$  indiquent respectivement l'influence de chacun des paramètres ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur la rugosité.

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

$$Ra = C \times f^\beta \times Vc^\alpha \dots \dots \dots (I.10)$$

Ou:  $C$  c'est une constante et  $\beta > 0$  et  $\alpha < 0$

## I.7. Chaleur et température

### I.7.1. Sources de chaleur

La température a des effets importants sur les efforts de coupe et l'usure des outils, l'aspect thermique de la coupe a donc été largement étudiée depuis de nombreuses années. Pourtant, à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu en usinage, il est très difficile de prédire l'intensité et la distribution des sources de chaleur. Les processus mécaniques et thermiques sont extrêmement couplés, en particulier parce que les propriétés des matériaux varient avec la température [36].

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

De la chaleur ainsi créée va se répartir dans les différentes parties de l'outil, de la pièce et du copeau (figure I.26). Le transfert de chaleur dans le copeau et dans la pièce s'effectue majoritairement par transport alors que dans l'outil le transfert s'effectue principalement par diffusion. De fait, la répartition des flux ne se fait pas de manière équivalente et dépend bien sûr des conditions de coupe et des propriétés thermiques des matériaux. Seul un faible pourcentage de la chaleur générée est transmis à l'outil et la pièce, la majorité étant évacuée par le copeau [37].

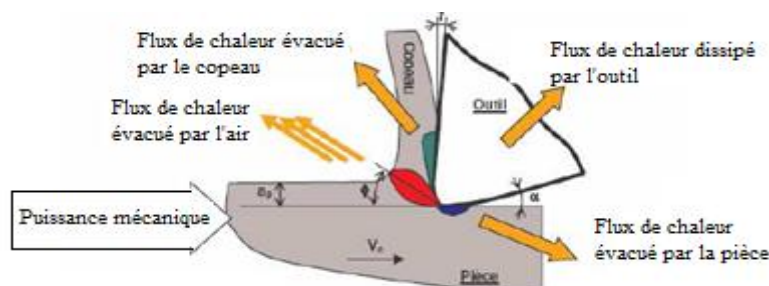


Figure I. 26. Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur [38]

## I.7.2. Mesure de la température

Les principales méthodes de mesure de la température de coupe sont les suivantes:

### I.7.2.1. Mesure par thermocouple (mesure avec contact)

La mesure de la température par un thermocouple se base sur le principe suivant : si deux métaux sont soudés à leurs extrémités et si une de ces soudures est portée à une température bien déterminée, l'autre étant maintenue à une température différente, on observera alors une force électromotrice entre les deux jonctions. L'évaluation de cette force, qui dépend des matériaux utilisés, symbolise la température mesurée. L'avantage des thermocouples est la simplicité et la flexibilité de réalisation et d'utilisation pour de simple acquisition et ce à moindre coût. Il existe plusieurs types de thermocouples, les plus répandus sont les thermocouples standards et dynamique (figure I.27a) [39].



Figure I. 27. Mesure de la température : a) Par thermocouple, b) Par le pyromètre infrarouge [39]

Cette méthode est la plus utilisée pour l'évaluation de la température. En usinage, l'utilisation de ces thermocouples nécessite des perçages de trous dans lesquels les thermocouples sont insérés. Pour estimer la température dans la zone de coupe et d'établir la cartographie thermique dans l'outil. Dans ce cas, on cherche à placer un ou plusieurs thermocouples au plus près de la zone sollicitée. L'avantage de cette méthode est la possibilité de les utiliser dans tous les procédés de coupe [39].

### I.7.2.2. Mesure par le pyromètre infrarouge (mesure sans contact)

Un thermomètre infrarouge est un instrument de mesure de la température de surface d'un objet à partir du rayonnement de type corps noir qu'il émet dans l'infrarouge. On utilise également le terme de pyromètre infrarouge lorsqu'il s'agit de mesurer des températures élevées se font soit sur la surface externe du copeau, soit sur la surface de l'outil soit sur la pièce dégagée pendant un court instant (Figure I.27b) [39].

## I.8. Etat de l'art sur l'usinage des métaux

L'usure d'outil de coupe est une question clé dans tous les processus de coupe des matériaux, principalement en raison de son effet néfaste sur l'intégrité extérieure de la surface usinée. Dans ce point, nous présentons les résumés de quelques travaux de recherche en usinage réalisés durant les 15 dernières années et qui concernent, les phénomènes d'usure des outils de coupe en tournage, les rugosités de surface, la modélisation du processus de coupe et l'optimisation des conditions de coupe.

**G. Poulachon et al [40]** ont étudié l'évolution de l'usure en dépouille lors du tournage de différents matériaux : acier pour travail à froid x155CrMoV12 [AISI D2], acier pour travail à chaud x38CrMoV5 [AISI H11], acier pour résilience 35NiCrMo15 et acier à roulement 100Cr6 [AISI 52100]. En plus de confirmer et vérifier certaines théories, cette étude a permis de donner de nouvelle information sur les caractéristiques de l'usure de l'outil en fonction de la microstructure du matériau usiné. Les matériaux ayant une microstructure grossière (les matériaux à grand pourcentage de carbone AISI D2 et AISI 52100) génèrent une usure très rapide. Par contre, les matériaux ayant une microstructure fine (AISI H11 et 35NiCrMo15), génèrent des taux de l'usure moins rapides (figure I.28)

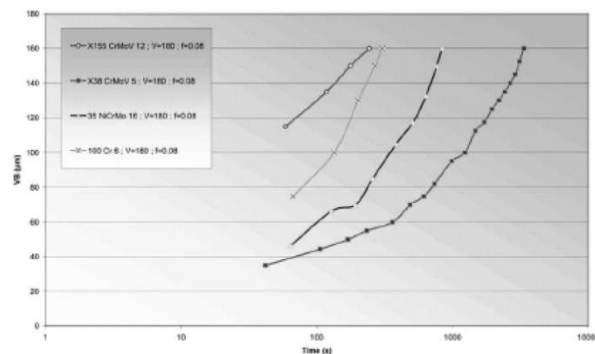


Figure I. 28. Evaluation de l'usure en dépouille en fonction du temps, de la vitesse de coupe et du matériau usiné [40]

**La société CIRTES [38]**, a mis en œuvre une technique où une sonde est intégrée dans la plaquette dès la fabrication de celle-ci (figure I.29). Le but de cette méthode est de détecter le seuil d'usure de l'outil en cours d'usinage et d'effectuer un contrôle en continu de l'arête de coupe par une mesure de la température de la zone de coupe. Les inconvénients majeurs de cette technique sont : Plaquettes très onéreuses (nécessite l'intégration de la sonde), La sonde peut être endommagée, dans le cas de l'usure de la plaquette, dans la zone de coupe, les gradients thermiques sont très importants et par conséquent les mesures ne sont pas très précises, l'introduction de la sonde fragilise la point de l'outil [41, 42].



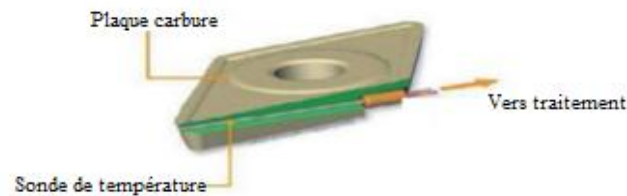


Figure I. 29. Plaquette instrumentée d'après CIRTES [41]

Les travaux numériques en 2D de Grzesik et autre [43] ont permis d'obtenir la température dans la zone de coupe lors de l'usinage de l'acier C45 avec des outils de coupe en carbure possédant différents types de revêtement (figure I.30).

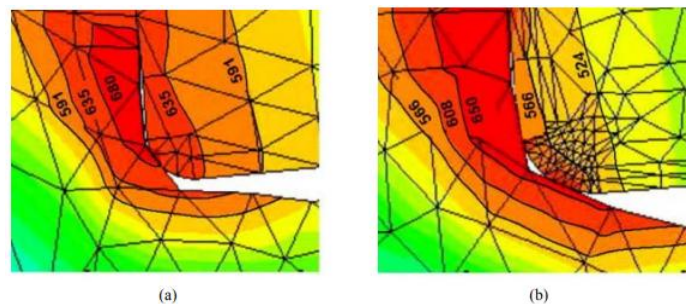


Figure I. 30. Champs de température ( $^{\circ}\text{C}$ ) dans le copeau et dans l'outil, au voisinage du rayon d'arête de l'outil obtenus par la simulation numérique de l'usinage de l'acier C45 : (a) avec un outil en carbure non revêtu et (b) avec un outil en carbure revêtu  $\text{TiC}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ , [43]

Les résultats de la figure I.30 indiquent une différence de température d'environ  $69^{\circ}\text{C}$  dans l'outil et au voisinage du contact outil-copeau tandis que dans le copeau, la différence de température est d'environ  $30^{\circ}\text{C}$ . Nous constatons une différence de maillage de l'outil de coupe dans la zone du rayon d'arête qui peut influencer sur les résultats de la simulation numérique de la coupe [43]. Indiquent que cette différence de maillage est due au rayon d'arête qui est légèrement modifié en passant du cas sans revêtement au cas avec revêtement.

**Kumar et al [44]** ont étudié l'évolution de l'usure et la durée de vie d'un outil en céramique noire à base d'alumine lors de l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC. Les auteurs ont élaboré des modèles de durée de vie de l'outil en fonction de l'usure. Ils ont conclu que l'usure en dépouille affecte la durée de vie de l'outil à des faibles vitesses de coupe, cependant, l'usure en cratère ou l'usure d'entaille affecte la durée de vie aux vitesses élevées au dessus de 200m/min (figure I.31).

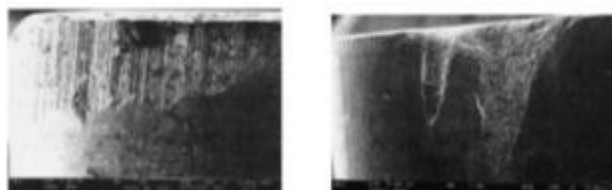


Figure I. 31. Usure en dépouille d'une céramique noire à base d'alumine lors l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC [44]

**Davim et Figueira [45]** ont étudié l'usinage de l'acier à outil AISI D2 en utilisant des techniques expérimentales et statistiques. L'opération de tournage dur a été réalisée sur un matériau ayant une dureté de 60HRC, les essais sont effectués en utilisant la vitesse de coupe, l'avance et le temps comme paramètres principaux. Les auteurs ont étudié l'influence des paramètres de coupe, l'usure en dépouille, la force de coupe spécifique et la rugosité de surface sur l'évaluation de l'usinabilité avec des outils en céramiques en utilisant l'analyse de variance (ANOVA). Les résultats trouvés ont permis de faire une modélisation du processus.

Les travaux de recherche réalisés par **Benchiheb et Boulanouar [46]** ont pour but d'évaluer les performances du matériau à outils de coupe CBN7020 lors de l'usinage de l'acier à roulement 100Cr6 trempé. La méthode retenue pour la réalisation de ces essais est celle des plans d'expériences dans le but de déterminer l'influence des éléments du régime de coupe sur sa tenue et sur l'état de surface produit. Les résultats expérimentaux obtenus à la

vitesse de coupe  $V_c = 120\text{m/min}$  montrent que l'outil CBN7020 a conduit à un meilleur rendement en termes de durée de vie et de productivité et que les modes d'usures observés sont ceux de l'abrasion et de la diffusion. Par ailleurs, le CBN7020 a donné lieu à des états de surfaces ( $R_a = 0.38$  à  $1.04\mu\text{m}$ ) comparables à ceux de la rectification ( $R_a = 0.2$  à  $1.1\mu\text{m}$ ). Le traitement statistique des résultats a permis aux auteurs d'établir des modèles mathématiques permettant de prédire la durée de vie de ce matériau ainsi que la rugosité attendue, nécessaires pour l'optimisation et l'exploitation industrielles. L'étude menée sur la tenue du matériau de coupe (CBN 7020) et sur l'état de surface produit lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 a permis de tirer les principales conclusions suivantes :

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

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

Selon Childs et al. [47] la dégradation des outils de coupe peut être classée en deux groupes en fonction de l'échelle de l'étude et la manière dont l'endommagement progresse: (i)- usure et (ii)- rupture (figure I. 32).

Grzesik [48] a défini l'usure comme étant un phénomène continu se manifestant par de la perte de masse à l'échelle microscopique comme c'est le cas pour la diffusion, et/ou à l'échelle des aspérités ou des micros contacts. D'un autre coté et toujours selon Grzesik [48] la rupture des outils de coupe est un endommagement brutal et observable à une échelle macroscopique.

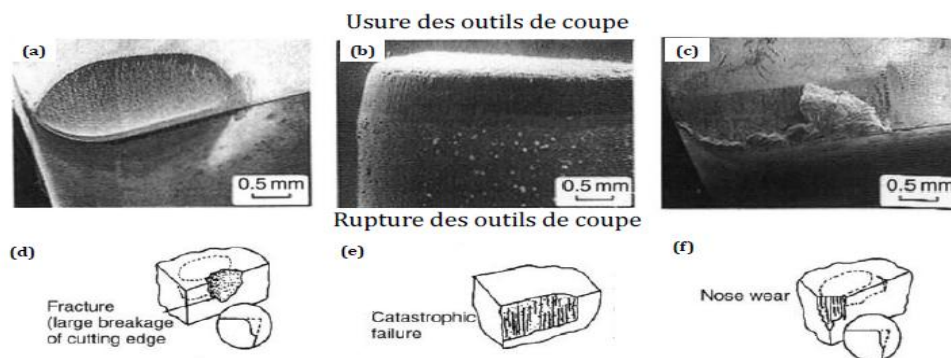


Figure I. 32. Endommagement de type usure (a-b-c) et rupture (d-e-f) d'un outil de coupe selon Grzesik [48] et Childs et al [47] : (a) usure en cratère (b) usure en dépouille (c) collage et (d) ébréchure d'arête (e) rupture brutale (f) rupture de la pointe de l'outil

Comme cela est illustré en figure I.32, l'usure des outils de coupe se produit essentiellement sur :

- La face de coupe de l'outil où l'on assiste à la formation d'un cratère (figure I.32a) et/ou d'une arête rapportée (figure I.32c) ;
- La face de dépouille (figure I.32b), y compris à proximité de l'arête de coupe et du rayon de bec.

Ces formes de dégradation sont la conséquence directe des interactions entre l'outil, la matière usinée, et le copeau sous l'effet des grandes pressions, hautes températures et grandes

vitesse de glissement. Elles dépendent de la nature du contact (collant, glissant ou transitoire), des matériaux de la pièce et de l'outil ainsi que des conditions de coupe.

**Yallese et al [49]** ont présenté les résultats d'une recherche expérimentale sur l'usure d'un outil en nitrure de bore cubique (CBN) lors du tournage de l'acier X210Cr12 traité à 60HRC. En premier lieu, des essais d'usure de longue durée ont été planifiés par les auteurs pour élucider l'effet de la vitesse de coupe sur les différentes formes d'usure de l'outil CBN (figures I.33, I.34, I.35 et I.36) ainsi que l'étude des conséquences de l'usure sur la productivité. Ensuite, une seconde série d'expériences a été dédiée à l'étude de l'impact de l'usure (VB) sur l'évolution de la rugosité des surfaces usinées. Les résultats trouvés par les auteurs montrent que :

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

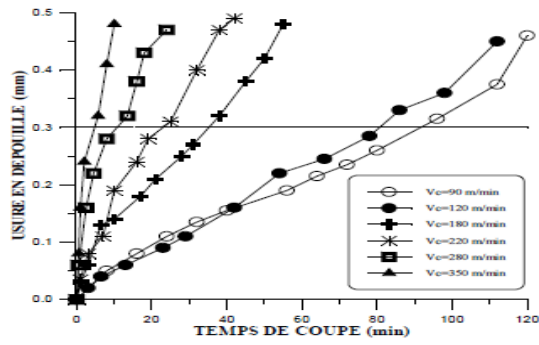


Figure I. 33. Usure en dépouille VB du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6

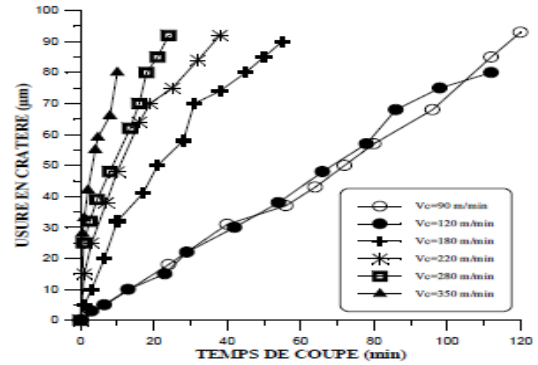


Figure I. 34. Usure en cratère KT du CBN7020 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6

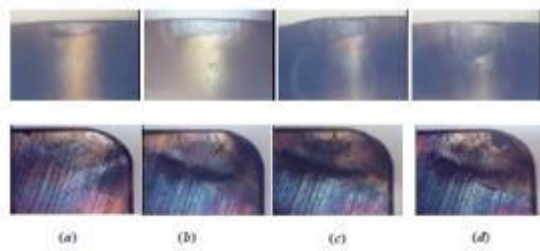


Figure I. 35. Micrographies de l'usure VB et KT du CBN à  $V_c = 90$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr et  $a_p = 0.5$  mm, Temps d'usinage : a) 8min, b) 40min, c) 56min et d) 80min



Figure I. 36. Aspect final de l'usure en cratère KT du CBN : a) début d'usinage, b) après 80 min d'usinage à  $V_c = 120$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr et  $a_p = 0.5$  mm

**Bouchlaghem et al [50]** ont conduit une recherche expérimentale pour déterminer l'influence des variables de coupe tels que, la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la rugosité, l'effort de coupe, la durée de vie et la température dans la zone de coupe, lors du tournage dur de l'acier AISI D3 (60HRC) avec des plaquettes en CBN. Les auteurs ont montrés dans cette étude, que la rugosité de surface est très sensible à la variation de l'avance et aussi ils ont trouvé que le principal mécanisme d'usure pour les outils CBN est l'abrasion du liant du matériau CBN par les particules dures en carbure de la pièce. En plus, les résultats montrent que l'effort axial est très sensible à la variation de la profondeur de passe (figure I.37).

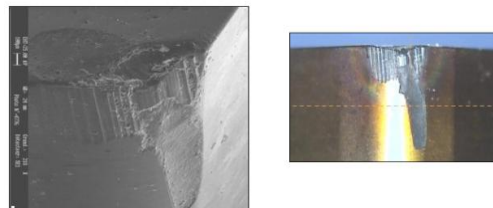


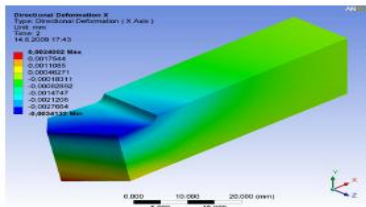
Figure I. 37. Photo par MEB de l'usure en de dépouille et en cratère d'un outil de coupe en CBN [50]

**Koné et al [51]** ont étudié l'usinage d'un acier à haute résistance avec une plaquette de coupe revêtue. Cette étude est faite expérimentalement et numériquement. Le matériau usiné est l'acier inoxydable AISI 304L et l'outil de coupe est une plaquette en carbure revêtue d'un dépôt multicouche TiN-TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN. Les résultats discutés dans leurs travaux portent sur les efforts de coupe et la rugosité de surface. L'étude expérimentale consistait sur plusieurs essais de tournage. Les auteurs ont varié les conditions suivantes : La vitesse de coupe  $V_c$  (m/min) puis l'avance  $f$  (mm/tr). Les conditions de coupe qui ont été considérées afin de déterminer dans un premier temps la vitesse de coupe minimale et l'avance minimale ont permis d'identifier une plage de coupe adaptée à l'usinage du 304L avec l'outil en carbure revêtu TiN-TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN. On note que la profondeur de passe  $a_p$  (mm) a été maintenue fixe pour tous les essais. Les conditions de coupe considérées dans ce travail sont :  $V_c = 100$  m/min et  $f = 0.2$  mm/tr. La loi de comportement du matériau usiné tient compte des sensibilités à la vitesse de déformation et à l'érouissage, ainsi que de l'adoucissement thermique. Les auteurs ont remarqué que le comportement de l'outil de coupe est thermo-rigide. Pour la caractérisation, ils ont fait une simulation numérique du tournage. Les simulations numériques du procédé de tournage en chariotage sont réalisées à l'aide du logiciel de calcul basé sur les éléments finis en adoptant une approche de coupe orthogonale (Déformations planes).

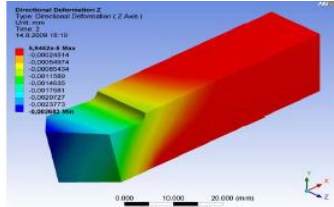
**Pavel and al [52]** présente la modélisation informatique de la déformation de l'outil et de la charge thermique lors du tournage en utilisant la méthode des éléments finis. La modélisation a été effectuée pendant le temps de coupe de 20 à 180 secondes (figures I. 38 et I.39). La quantité de flux de chaleur est approximée par un modèle informatique. La source de chaleur de la simulation d'intensité variable en quatre phases a été générée par le mouvement de l'outil :

- Lors de la première phase de réglage de la charge thermique, un outil a été modélisé dans la procédure d'admission, et le processus de découpe est modélisé après 20s usinages. Sur la base du mouvement d'avance indiqué, qui était de 0,428 mm/tr et de la vitesse  $V = 112$  m/min, après 20 s usinées, 72 mm de longueur de pièce. A ce stade, le flux de chaleur tiré de la littérature basé sur la température maximale de fonctionnement était d'environ  $0,0018 \times 10^6$  J/m<sup>2</sup> car les relations entre la détermination du flux thermique entrant dans les puces n'étaient pas disponibles dans la littérature. À la fin de la première phase, après 20 secondes, le flux de chaleur était de  $0,0029 \times 10^6$  J/m<sup>2</sup>s.

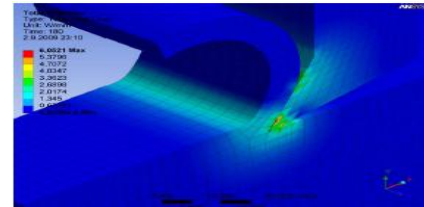
- La deuxième étape a pour suivi la définition du chargement lors de la première phase. Après 80 s à la même vitesse et à la même avance, les 290,4 mm de la pièce suivante ont été traitées.
- Dans les troisième et quatrième phases, le traitement est modélisé selon 140s ou 180s, à condition que la phase suivante contienne toujours la phase suivante en tant que sorties des phases précédentes.



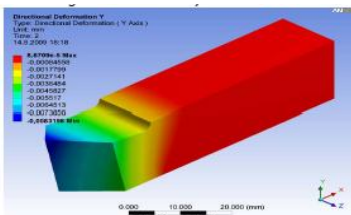
Déformation directionnelle axe X



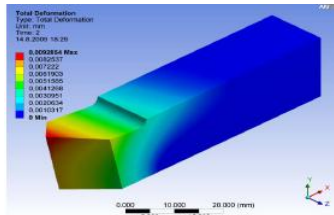
Déformation directionnelle axe Z



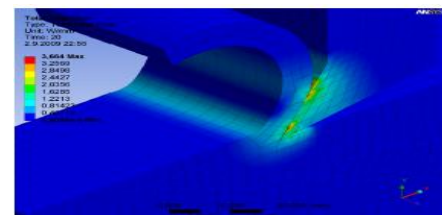
Planning du flux de chaleur après 20s



Déformation directionnelle axe Y



Déformation totale



Planning du flux de chaleur après 180s

Figure I. 38. Déformation de l'outil de coupe dans 3 directions orthogonales et la déformation totale de l'outil de coupe [52]

Figure I. 39. Planning du flux de chaleur après 20s et 180 secondes [52]

Les résultats montrent que le flux de chaleur (figure I.39) dans la zone de coupe change progressivement jusqu'à ce qu'un équilibre soit établi entre la chaleur créée et prise. À partir du point d'augmentation de la température, un modèle informatique a donné des résultats satisfaisants à certains points presque coïncidant avec les résultats expérimentaux (écart minimal de 0,61%). La principale possibilité d'amélioration du modèle thermique utilisé est une modification du processus de flux de chaleur; son calcul est basé sur les différences finies ou les volumes finis. Selon les informations disponibles dans la littérature, analyser le processus de tournage (détermination du flux de chaleur de découpage) est la méthode la plus appropriée pour les différences finies.

**Fnides B et al [53]** ont réalisé une étude expérimentale pour l'évaluation de la durée de vie des matériaux de coupe utilisés lors du tournage dur à sec de l'acier AISI H11, traité à 50 HRC (figure I. 40). Cet acier est destiné pour le travail à chaud et la fabrication des moules et matrices. Les essais de tournage sont réalisés par plusieurs matériaux de coupe: carbures (H13A et GC3015), céramique (CC650 et CC670 noire renforcé) et cermets (CT5015 et

GC1525). Les essais sont réalisés avec le régime de coupe suivant (profondeur de passe  $a_p = 0.15\text{mm}$ , vitesse d'avance  $f = 0.08\text{mm/tr}$  et la vitesse de coupe  $V_c = 120\text{m/min}$ ).

Les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs ont permis d'étudier l'influence des temps d'usinage sur l'usure en dépouille VB de ces matériaux de coupe et de déterminer leur durée de vie. Il ressort de ces résultats que la céramique noire (insert de CC650) est plus résistante à l'usure que les autres matériaux de coupe. Sa durée de vie est de 49min et par conséquent, ce matériau est plus performant. Pour les autres matériaux, la durée de vie des cermet revêtus et non revêtus (CT5015 et les cermet GC1525) est inférieur à 2min. La durée de vie du carbure non revêtu H13A est de 4,5min. Par contre la durée de vie de la céramique renforcée CC670 est que de 8 min. Toutefois, la durée de vie du carbure revêtu GC3015 est de 16min. Quant à la céramique noire, sa durée de vie de l'outil est de 49min.

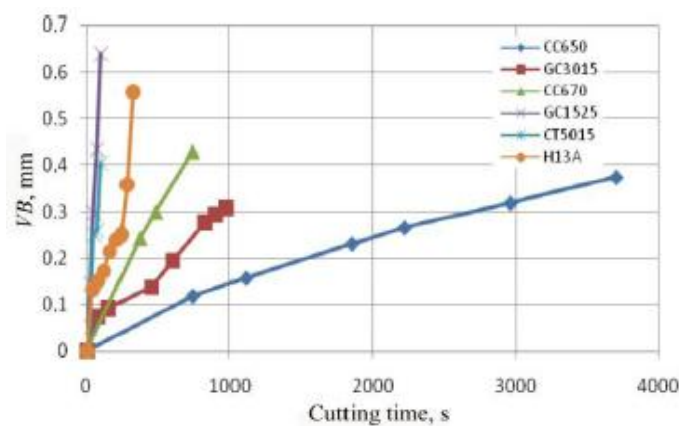


Figure I. 40. Usure en fonction du temps des différents matériaux [53]

**Rupinder Singh et al [54]** ont réalisé un travail de recherche sur l'usure de l'outil et la rugosité de surface ( $R_a$ ) pendant le tournage dur de finition de l'acier AISI D3 (58HRC) avec un outil de coupe en carbure revêtu (TiSiN-TiAlN PVD revêtement). Les chercheurs ont adopté pour la planification expérimentale un plan de Taguchi (L9), et ils ont réalisé une analyse de la variance (ANOVA) pour identifier les paramètres qui ont l'effet le plus importants sur l'usure des outils et la rugosité de surface. Les résultats trouvés par les chercheurs dans le cadre de ce travail sont comme suit :

- La vitesse de coupe et l'avance sont les facteurs les plus importants qui influencent l'usure de l'outil, l'avance est le facteur le plus important qui influence sur la rugosité de surface.
- L'analyse d'ANOVA montre que les contributions en pourcentage des paramètres d'entrée qui influencent l'usure en dépouille (VB) sont comme suit:  $V_c = 73.65\%$ ,  $f = 8.18\%$  et  $a_p = 9.28\%$ , ce qui signifie que la vitesse de coupe est le facteur qui le plus influençant l'usure.



- L'analyse d'ANOVA montre que les contributions en pourcentage des paramètres d'entrée qui influencent la rugosité Ra est:  $V_c = 19.47\%$ ,  $f = 52.98\%$  et  $a_p = 12.98\%$ , cela signifie que la vitesse d'avance est le facteur dominant sur la rugosité de surface (Ra).
- Les conditions d'usinage optimales pour minimiser l'usure de l'outil selon l'analyse Taguchi sont comme suit: La vitesse de coupe de 130m/min, l'avance de 0.10mm/tr, profondeur de coupe de 0.40mm.
- Les conditions d'usinages optimisés pour minimiser Ra selon l'analyse Taguchi sont : La vitesse de coupe de 155m/min, l'avance de 0.10mm/tr, profondeur de coupe de 0.25mm avec un Ra d'environ 0.57 $\mu$ m.
- L'optimisation de la fonction de désirabilité pour optimiser simultanément les réponses, VB et Ra :  $V_c = 130\text{m/min}$ ,  $f = 0.13\text{mm/tr}$  et  $a_p = 0.21\text{mm}$ . Cette solution fournie par l'optimisation de la fonction de désirabilité est assez proche des solutions optimales fournies par l'analyse Taguchi bien que pour un paramètre de réponse (VB ou Ra) à la fois.

Les modèles mathématiques de l'usure VB et la rugosité Ra de surface sont trouvés comme suit :

$$VB = 121.06 + 20.5V_c - 2.26f - 0.55a_p + 5.62V_c \times f - 0.080V_c \times a_p + 15.00 f \times a_p$$

$$Ra = 0.73 + 0.12V_c + 0.55f - 0.38a_p - 0.18V_c \times f + 0.27V_c \times a_p + 0.34 f \times a_p$$

**Babouri Mouhamed KHemissi [55]** l'objectif principal de cette étude est donc de proposer des indicateurs fiables de l'état de dégradation de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier AISI D3. Plusieurs indicateurs temporels, fréquentiels, ou encore temps-fréquence sont alors utilisés. En plus des indicateurs scalaires temporels classiques, deux indicateurs spectraux ; le niveau global (OL) et le centre de gravité spectrale (CGS), sont proposés pour séparer les phases qui caractérisent l'usure de l'outil.

L'évaluation de l'usure a été faite à partir du traitement et l'analyse des signaux par le biais de plusieurs méthodes, à savoir temporelles, fréquentielles ou temps-fréquence à l'image de l'Analyse Multi-Résolution en ondelettes (AMRO) et la Décomposition en Modes Empiriques (EMD).

Les résultats expérimentaux sont très prometteurs en vue d'instaurer un système de surveillance en ligne de l'état des outils de coupe en milieu industriel. Comme conclusions principales de cette étude, il est possible d'affirmer que:

- L'abrasion et l'écaillage, observés pendant l'usinage, sont les principaux mécanismes de l'usure en dépouille de l'outil de coupe.

- L'évolution des amplitudes vibratoires des fréquences propres de l'outil de coupe en fonction de sa dégradation a prouvé que la bande contenant ces fréquences [3500 - 5500] Hz est la mieux qualifiée pour suivre son état et par conséquent identifier l'usure.
- Les indicateurs temporels et fréquentiels ont été utilisés pour le suivi de l'évolution de l'usure de l'outil de coupe. Ces indicateurs, mis à part leur simplicité, pourraient avoir une importance capitale s'ils seront exploités pour développer un système de surveillance en temps réel permettant ainsi d'augmenter la rentabilité de l'usinage.
- Le niveau global (NG), étant un indicateur fréquentiel, a prouvé son pouvoir de prédiction du point de transition de la phase de l'usure normale vers celle accélérée correspondant à l'usure catastrophique de l'outil de coupe.
- L'indicateur spectral « Centre de Gravité Spectrale » (CGS), calculé à partir des autospectres d'accélération, a montré également son efficacité dans le cadre d'un système de surveillance capable de fournir le moment de la transition à l'usure accélérée.
- Les signaux vibratoires mesurés durant le processus d'usinage sont dans la majorité des cas non stationnaires. Cette propriété a motivé le choix d'utiliser des méthodes temps-fréquence adaptées à ce type de signaux.

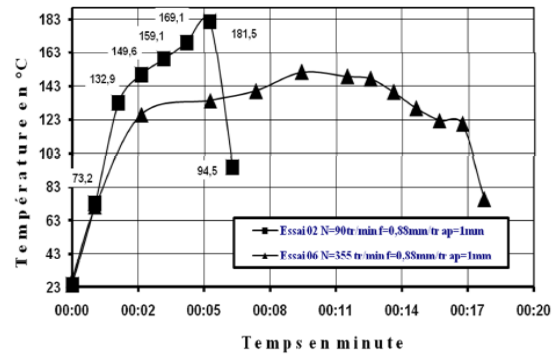
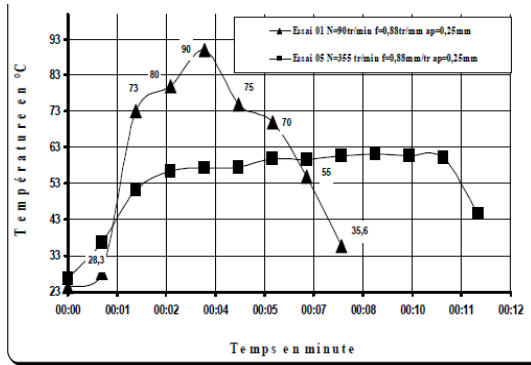
Il a choisi d'utiliser l'Analyse Multi-Résolution en ondelettes (AMRO) et la décomposition en Modes Empiriques (EMD). Ces deux méthodes ont donné de bons résultats notamment en ce qui concerne l'amélioration de la sensibilité des indicateurs scalaires temporels.

Une méthode hybride basée sur la combinaison de l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes (AMRO) et la Décomposition en Modes Empiriques (EMD) a été proposée en tant qu'outil robuste de filtrage, de débruitage et de traitement des signaux mesurés. Destinée à la détection des transitions entre les trois phases de vie de l'outil de coupe, elle a donné de meilleurs résultats comparés à l'application de l'une ou l'autre des méthodes mentionnées seule.

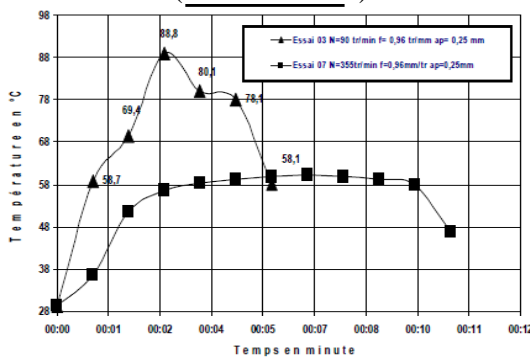
**Kacimi et autre [56]** ont réalisé une étude expérimentale pour suivre l'évolution de la température des plaquettes pendant l'usinage et l'état de surface usiné pour différents régimes et de voir l'influence de ces paramètres de coupe sur la température et sur la rugosité de la pièce usinée et définir à la limite un critère tribologique permettant de prédire la dégradation ultime des plaquettes des outils de coupe.

Les résultats obtenus dans les figures I.41, I.42 et I.43 ont montré que l'outil de coupe (les plaquettes) est un facteur principal dans le domaine de l'industrie et notamment si les plaquettes des outils de coupe sont revêtues avec des couches superficielles qui sont

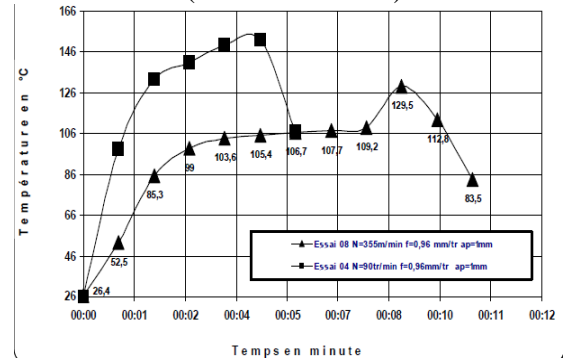
constituées des matériaux très durs. Pour cela, cette étude a été basée sur la recherche de l'effet des paramètres de coupe sur la température et sur le temps d'usinage.



L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 1/Essai 5)



L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 02/Essai 06)

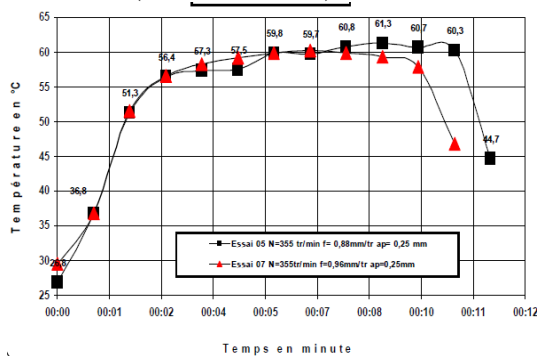


L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 3 /Essai 7)

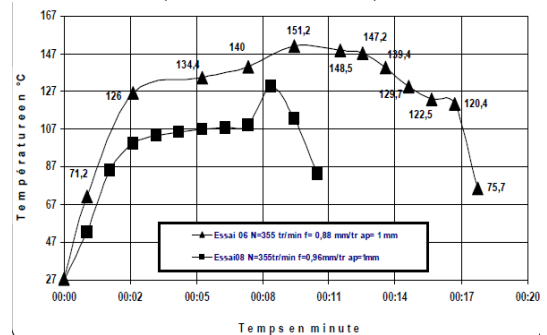
L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 4 /Essai 8)

Figure I. 41. Effet de la vitesse de rotation (N) avec la profondeur de passe à 0.25mm et l'avance f= 0.96= mm/tr et varié la vitesse de rotation N à 90tr/min à 355 tr/min

L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 01/Essai3)



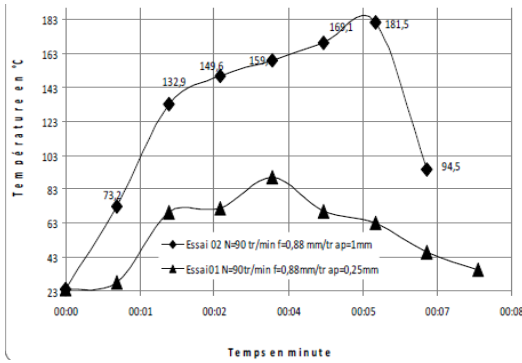
L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 02/Essai 04)



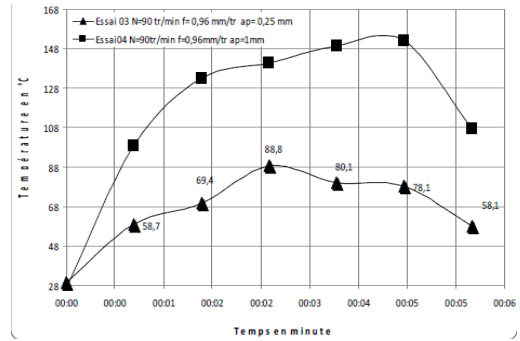
L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 05/Essai 07)

L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 06/Essai08)

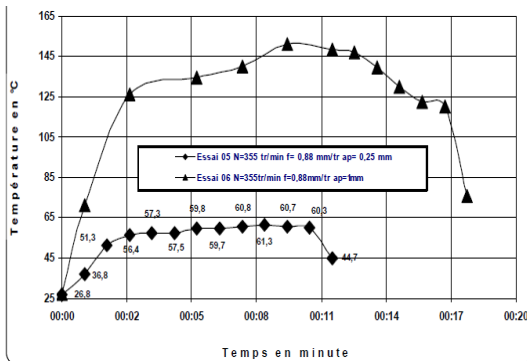
Figure I. 42. Effet de l'avance (f) avec la vitesse de rotation N à 90tr/min et la profondeur de passe à 0.25mm et varié l'avance f=0.88mm/tr à 0.96= mm/tr



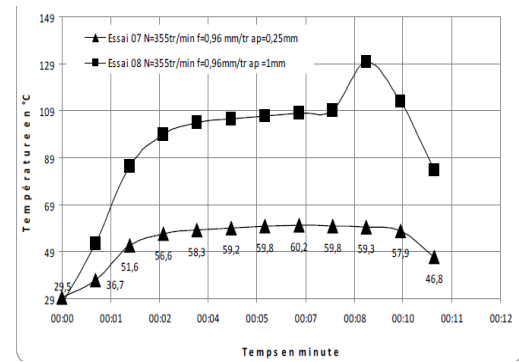
L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 01/Essai02)



L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 03/essai 04)



L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 5/Essai 6)



L'évaluation de température en fonction du temps (Essai 7 /Essai 8)

Figure I. 43. Effet de la profondeur de passe  $ap$  avec la vitesse de rotation  $N$  à 90tr/min et l'avance  $f=0.88\text{mm/tr}$  et varié de profondeur de passe à 0.25mm à 1 mm.

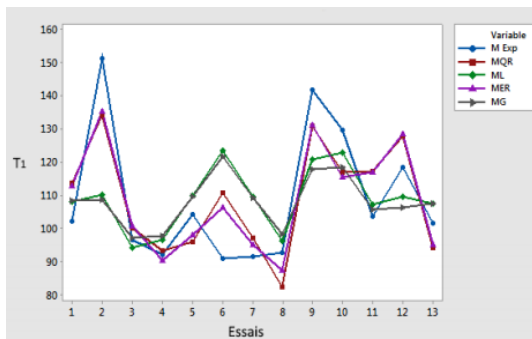
A travers les résultats obtenus, il a conclu les éléments suivants :

- L'augmentation de la vitesse de rotation ( $N$ ) et l'avance ( $f$ ) conduit à une diminution de la température générée -comparaison par les outils non revêtu- à cause du revêtement des plaquettes.
- L'augmentation de la profondeur de passe conduit à une augmentation sévère de la température
- L'augmentation de la vitesse de rotation ( $N$ ) et la vitesse d'avance ( $f$ ) conduit à une diminution de la rugosité et l'augmentation de la profondeur de passe ( $ap$ ) conduit à une augmentation de la rugosité.
- Dans la même vitesse de rotation ( $N$ ); l'augmentation de la température conduit à une augmentation de la rugosité c.-à-d. une dégradation de l'outil de coupe.

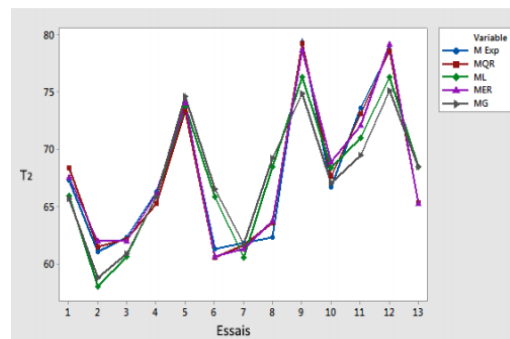
Bien que cette étude est un plus dans le domaine d'usinage pour comprendre l'effet de la température sur la dégradation de l'outil et l'état de surface et l'utilisation des revêtements pour protégé les plaquettes et diminuer l'effet de la température.

**Bessahraoui. M et Mahdjoub. L [57]** ont étudié la variation de la température lors de l'usinage de l'acier 42CD4 avec un outil de carbure revêtu de marque Sandvik (Référence KNMK 161504). En Appliquant la méthode de surface de réponse qui permet d'étudier les relations entre les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) et la température de l'outil de coupe. Les modèles ainsi obtenus sont de types : quadratique, linéaire, exponentiel et Gilbert, on utilisant deux plans : plan de Taguchi et plan de Box-Behnken. Les résultats trouvés montrent que la profondeur de passe  $a_p$  est le facteur le plus influent sur la température que les deux autres paramètres  $V_c$  et  $f$ . Les résultats trouvés montrent que les deux meilleurs modèles sont Le MQR et MER. Pour avoir une température minimum nous somme obligé de minimiser la profondeur de passe  $a_p$  et d'augmente la vitesse de coupe et la vitesse d'avance (figure I.44) :

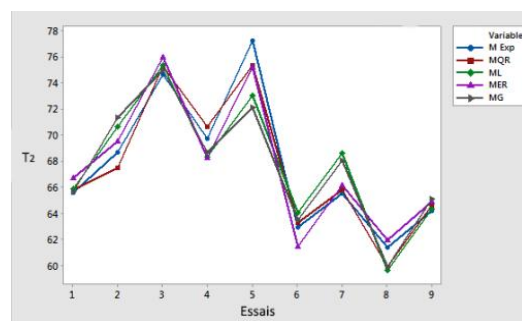
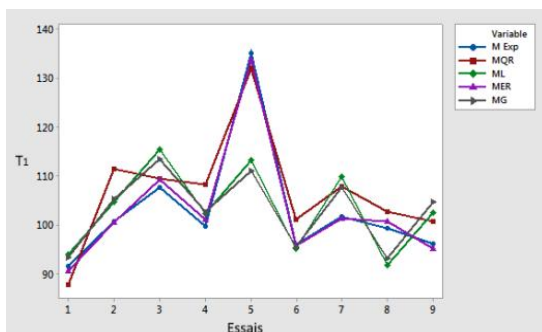
Les courbes de modèles pour la température T1



Les courbes de modèles pour la température T2



Plans d'expérience Box-behnken



Plans d'expérience Taguchi

Figure I. 44. Comparaison entre les deux plans d'expérience (Box-behnken et Taguchi)

On peut dire que le plan de Taguchi a des meilleurs résultats que le plan de Box Behnken. Pour cela on a choisi : MER (Modèle Exponentiel Réduit) pour température T1 et MQR (Modèle Quadratique Réduit) pour la température T2.

## **I.9. Conclusion**

Nous avons présenté dans cette recherche bibliographique les bases nécessaires à la compréhension de cette étude. Ce chapitre est devisé en deux parties :

La première partie expose un aperçu général sur l'usinage des métaux de coupe, aussi les principales procédures d'usinage et les paramètres de coupe. Le but de donner une vision assez large de différentes notions générales sur l'usinage.

La seconde partie de cette étude traite l'état de l'art sur la technique du tournage, tournage dur et la modélisation de la température de coupe. A cet effet, nous avons présenté un résumé sur les différents travaux scientifiques de recherche publiés ces quinze (15) dernières années (18 articles).

# **CHAPITRE**

## **II**

**L'usure des outils de coupe en tournage**

## CHAPITRE II : L'usure des outils de coupe en tournage

### II.1. Introduction

L'usure est souvent définie comme la quantité de matière perdue par l'outil. Aussi l'usure des outils décrit la défaillance progressive des outils de coupe en raison d'un fonctionnement régulier. L'arête de coupe constituant l'élément actif effectuant le travail de déformation, est soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques très sévères qui provoquent son usure et sa détérioration dans un temps relativement limité. Le frottement à l'interface copeau-outil s'effectue entre un métal naissant et l'outil à des pressions et des températures très élevées, ce qui peut donner naissance à des effets physico-chimiques aggravant l'usure de l'outil [58].

Dans ce contexte, nous présentons les différents mécanismes d'usure des outils qui ont lieu lors d'une opération de coupe. Aussi un état des lieux des connaissances des modes d'usure dans le cas de l'usinage.

### II.2. Influence des paramètres de coupe sur l'usure

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification) [59]:

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



Le second groupe est formé par les paramètres physiques et mécaniques de l'outil (géométrie et composition du matériau de l'outil, dureté, efforts et propriétés thermiques) [59].

### II.3. Mécanismes d'usure des outils de coupe

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 le professeur Konig [60, 61] l'usure se manifeste suivant le diagramme de la figure II.1

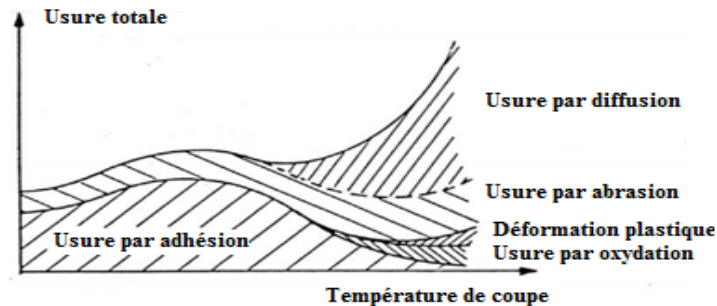


Figure II.1. Classification des mécanismes d'usure en fonction des paramètres de la température de l'usinage selon Konig [61]

#### II.3.1. Phénomènes mécanique

##### II.3.1.1. Usure par adhésion mécanique

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. Lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Les rugosités et microrugosités des surfaces, en contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des microsoudures. Ces microsoudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage [60]. Ce processus continu génère l'apparition d'arêtes rapportées (figure II.2).

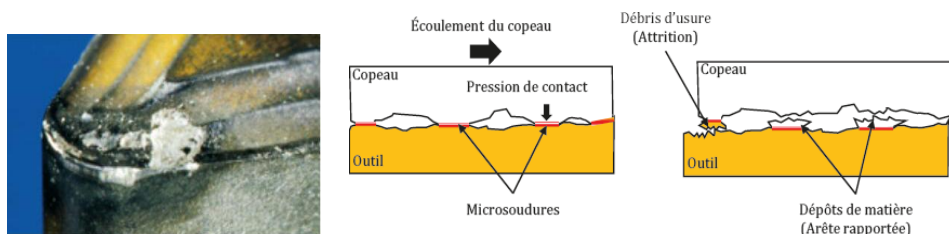


Figure II.2. Processus d'usure par adhésion mécanique [59]

Le frottement copeau-outil donne lieu à des phénomènes de grippage et d'arrachement, ce qui correspond à l'usure adhésive.

### II.3.1.2. Usure par abrasion mécanique

Lors de l'usinage, la matière (pièce usinée et copeau) frotte avec des pressions de contacts importantes sur l'outil. Suivant la constitution physico-chimique (nombre, nature, composition et proportion des phases) et la structure (répartition et agencement des composants de l'alliage : forme, dimension, arrangement) la matière est plus ou moins abrasive par rapport à l'outil (figure II.3). Si la matière comporte des constituants durs (écrouissage, aluminate, nitrure, carbure, oxyde par exemple) et que ces derniers sont plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil [38].

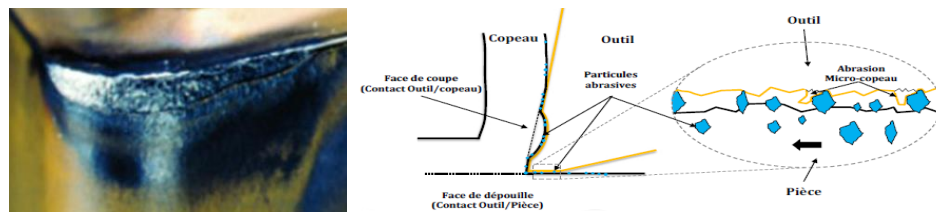


Figure II.3. Processus d'usure par abrasion [58]

### II.3.1.3. Usure par déformation plastique

Si l'on caractérise un usinage en prenant comme paramètres la température (interface outil/copeau) et la pression exercée sur l'outil, on obtient un domaine de fonctionnement. Lorsque ces paramètres prennent des valeurs très importantes, on se trouve dans le domaine de déformation plastique de l'arête de coupe. Il y a donc transformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe) [38].

### II.3.1.4. Usure par fissuration

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil au niveau de l'arête [61].

## II.3.2. Phénomène physico-chimiques

### II.3.2.1. Usure par diffusion

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

chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil (figure II. 4a) [61].

### II.3.2.2. Usure par corrosion

L'environnement de l'usinage est constitué d'oxygène dans l'air, de hautes températures, de l'eau provenant des huiles de coupe solubles. Cet environnement est propice au phénomène d'oxydation et peut provoquer localement une fragilisation de l'outil (Figure II.4b) [61].

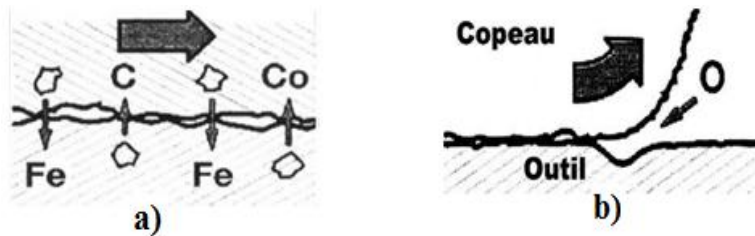


Figure II.4. Processus d'usure : a) Par diffusion, b) Par corrosion (oxydation) [61]

## II.4. Les formes d'usure des outils de coupe (Modes d'usure)

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent essentiellement de la nature de l'outil, du matériau usiné, des conditions de coupe et du type d'usinage [38]. D'une façon globale, l'outil est soumis à six modes de dégradation décrits ci-dessous :

- Usure en dépouille (Vb),
- Usure en cratère (Kt),
- Déformation plastique (BUE),
- Usure en entaille,
- Ecaillage,
- Formation d'arête rapportée (BUL)

### II.4.1. L'usure en dépouille Vb (Usure frontale)

Elle résulte du frottement de la pièce contre la face en dépouille de l'outil et se présente sous la forme d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête (Figure II. 5, emplacement B). Ce type d'usure influe sur l'état de surface de la pièce et sur sa précision dimensionnelle. C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible VB [59].

## II.4.2. Usure en cratère Kt

Caractérisée par une cuvette sur la face de coupe de l'outil. Elle est le résultat du frottement de l'outil sur la face de coupe (Figure II. 5, emplacement A) [59]. L'élévation de la température provoque une réaction chimique ou une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important quant à l'enroulement et la fragmentation du copeau;

- La profondeur du cratère est notée :  $K_T$
- largeur du cratère est notée :  $K_B$

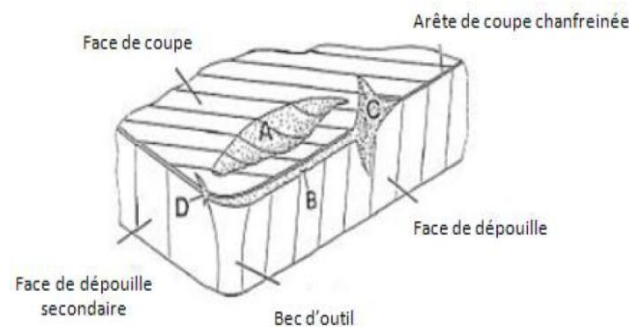


Figure II.5. Différents formes d'usure : Emplacement A « Usure en cratère », Emplacement B « Usure en dépouille », Emplacement C « Usure en entaille » [59]

## II.4.3. Entaille

C'est une forme spéciale d'usure de la face de dépouille à l'intersection de l'arête principale et de la surface de la pièce, qui rend parfois nécessaire le changement d'outil (figure II.5, emplacement C et D). La position et la longueur de l'usure en forme d'entaille VBN dépendent de la profondeur de passe et du réglage de cette profondeur à chaque passe [59].

## II.4.4. Autres forme d'usure

### II.4.4.1. Usure par déformation plastique

Concerne le bec de l'outil (figure II.6a). Cette déformation se manifeste par un refoulement sur les faces de dépouille et est le résultat des températures élevées et des hautes pressions régnant dans cette zone de coupe [38]:



Figure II.6. Autres forme d'usure : a) Par déformation plastique, b) Par écaillage et fissuration d'arête c) Par rupture brutale du bec d'outil [38]

#### II.4.4.2. Usure par écaillage et fissuration d'arête

Ce cas est relatif à la coupe discontinue caractérisée par des efforts cycliques. Des fissurations pourront être observées sur l'arête ou sur la face de coupe (figure II.6b) [38].

#### II.4.4.3. Rupture brutale du bec d'outil

Cette défaillance concerne l'usinage des matériaux durs et hétérogènes avec outil à comportement fragile (figure II.6c) [38].

### II.5. Les modèles mathématiques d'usure (Durée de vie)

La durée de vie de l'outil est caractérisée par le temps pour atteindre la valeur limite du critère d'usure. Plusieurs lois de durée de vie existent : Loi de Taylor, loi de Gilbert, et loi de Koenig – Depiereux, nous les détaillons ci-dessous [62, 63].

#### II.5.1. Modèle de Taylor généralisé

La loi de Taylor : Ce modèle établi par Taylor en 1907 est caractérisé par l'équation (Equation II.1) [63].

$$T = C \cdot V^{-n} \dots \dots \dots (II.1)$$

Avec: T: Durée de Vie, V : Vitesse de coupe, n: Exposant de TAYLOR, C : Constante dépendant du couple outil/pièce.

Le modèle simple de Taylor est suffisamment représentatif [64], il est couramment utilisé aujourd'hui pour tous les matériaux d'outils.

#### II.5.2. Modèle de Gilbert

La loi de Gilbert : Ce modèle établi par Gilbert en 1950. Gilbert a proposé la généralisation du modèle de Taylor pour prendre en considération l'influence de l'avance f et de la profondeur de passe ap. Elle est caractérisée par l'équation (Equation II.2) [63].

La constante C est remplacé par une expression qui tient compte de la géométrie de l'outil et du copeau.

$$T = K \cdot ap^x \cdot f^y \cdot V^{-n} \dots \dots \dots (II.2)$$

Avec: K : dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné, ap: Profondeur de passe, f: Avance, x, y: Exposants dépendant de la nuance de l'outil.

### II.5.3. Modèle de Colding

Ce modèle (1958-1960) tient compte de la courbure négative de la courbe. Ce sont des polynômes de la forme:

Ou:

$$K + a. X + C.Y-Z + K. X. Z \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

$$K + a. X + b. X^2 + C.Y + d. Y + 2C.Z^2-Z + f. X. Y + g. Y. Z + h. X. Z = 0 \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

Avec:

$$X = \text{Log } F, Y = \text{Log } V \text{ et } Z = \text{Log } T \dots\dots\dots (\text{II. 5})$$

La complexité de ce modèle et la difficulté d'obtenir toutes les constantes a, b, c, d, e, f, g et h, pour chaque cas le rendent très peu exploitable. Il rend pourtant compte des diverses particularités du phénomène de coupe, notamment de l'existence de valeur optimale de l'avance que les modèles plus simples ne laissent pas apparaître [63].

### II.5.4. Modèle de Koning-De piereux

La loi de Konig – Depiereux : Ce modèle établi par Konig – Depiereux en 1969. Cette loi prend en compte l'influence de l'avance f et la profondeur de passe dans une équation exponentielle (voir équation II.6) [63].

$$T = \text{Exp} (- \alpha. V^{\gamma} - \gamma . a \mu - \sigma. f \lambda) \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

### II.5.5. Bilan des modèles d'usure

Ces lois permettent d'évaluer la durée de vie d'une plaquette à partir des paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage. Le critère de durée de vie moyen courant est  $VB = 0.3 \text{ mm}$ . L'un des phénomènes qui endommagent les plaquettes de coupe lors d'usinage est le collage de matière usinée sur les plaquettes. Ce collage peut détériorer les arêtes de coupe des plaquettes, car dans certains cas quand la matière collée (Arête rapportée) casse, elle peut emporter avec elle des fragments de la plaquette, ce qui conduit à l'effondrement de l'arête de coupe et la fin de vie de la plaquette [27].

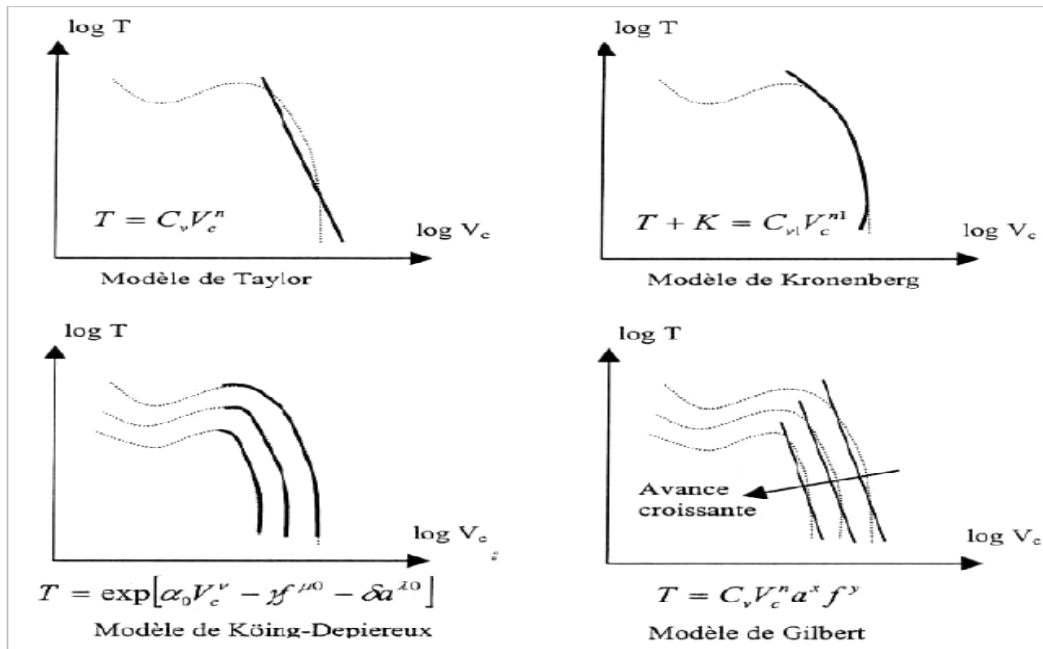


Figure II.7. Représentation graphique des différents modèles [27]

## II.6. Conclusion

Il est clair que les outils de coupe subissent des dégradations au cours des processus d'usinage, les causes sont multiples et complexes. Ces endommagements conduisent à des pertes économiques pour les industries d'usinage. Dans le but d'augmenter la production, des améliorations ont été apportées aux outils existants.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général sur l'usure des outils de coupe aussi un état des lieux des différents mécanismes d'usure qui peuvent avoir lieu lors d'une opération de coupe avec les lois de durée de vie de l'outil.

# **CHAPITRE**

## **III**

**Equipements d'expérience utilisés**



## CHAPITRE III : Equipements d'expérience utilisés

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique. Ce chapitre va consister aussi en une présentation du matériel qui aura servi à l'étude des évolutions de la rugosité des surfaces, de l'usure et de la température de coupe.

Les essais nécessaires à notre étude ont été effectués dans plusieurs services et sections (méthode, traitement, usinage, etc.) et dans deux entreprises nationales différentes, qui sont :

- L'entreprise Algérienne des Equipements et Machines-Outils (ALEMO) Oued Hamimine El khroub - Constantine, Algérie : Entreprise spécialisée dans la fabrication de la machine-outil, la fourniture d'équipements industriels et les prestations de services.
- Société de Matériels de Terrassement et de Levage (SOMATEL) du Groupe ENMTP à Ain-Smara-Constantine. Les essais ont été effectués au Laboratoire d'Analyse et Essais Mécaniques.

### III.2. Présentation du matériel

Pour la réalisation des expériences, il est nécessaire de préparer les équipements et les moyens suivants :

#### III.2.1. Machine-outil

Les usinages ont été réalisés sur un tour de modèle EMCO MAT-20D (Figure III.1). C'est une machine universelle pour usinage précis dans un atelier d'outillage à applications industrielles. C'est un tour parallèle de puissance de moteur 5,3 kW ayant une gamme de vitesses de broche comprise entre 40 et 3000 tour/min.



Figure III.1. Tour parallèle conventionnel

### III.2.2. Matière à usiner

Les essais d'usinage ont été réalisés sur une éprouvette cylindrique de l'acier traité 90 Mn Cr V8. Les applications et les propriétés de cet acier sont présentées à l'annexe A. En ce qui concerne les dimensions de l'éprouvette elles sont présentées dans le tableau III.1 ci-dessous :

Tableau III.1. Les dimensions des éprouvettes

Matière à usiner	Le diamètre (mm)	La longueur (mm)	
		Essais pour la rugosité	Essais pour la l'usure et la température
90 Mn Cr V8	50	200	350

Toutes les caractéristiques chimiques et mécaniques de ces matériaux sont mentionnées dans les tableaux III.2 et III.3:

Tableau III.2. Les compositions chimiques du matériau

Matière à usiner	Compositions chimiques (mass %)					
90 Mn Cr V8	C	Si	Mn	Cr	V	Si
	0,90	0,1	2,00	0,40	0,10	0,20

Tableau III.3. Les caractéristiques mécaniques et physiques du matériau

Matière à usiner	Allongement à la rupture A %	Résistance à la rupture Rm (MPa)	Dureté brinell à livraison HB	Dureté brinell d'utilisation HB
		Etat livré		
90 Mn Cr V8	22	770	260	61

- Pour les essais de la rugosité de la surface usinée (Figure III.2a), l'éprouvette a été préparée sur sept paliers et chaque palier correspondant au nombre de régimes du plan des expériences planifiées (Tableau V.1).
- Pour le suivi de l'évolution de la dégradation des outils de coupe (Figure III.2b), au départ l'éprouvette est un cylindre simple lisse, puis nous mesurons Vb (Usure en dépouille) en fin de chaque passe dès l'apparition de l'usure.



Figure III.2. Photos des éprouvettes : a) Essais de la rugosité, b) Essais d'usure et la température

### III.2.2.1. Traitement thermique des éprouvettes

Les essais de traitement, ont été réalisés dans un four électrique (marque : AICHELIN industrielle) à deux petites chambres (Figure III.3), type : WDSVGm. Les caractéristiques de ce four sont citées dans le tableau III.4.

Tableau III.4. Les caractéristiques de four électrique

Marque	Dimension intérieures (mm)			Puissance (kw)	T°max
	Largeur (b)	Longueur (L)	Hauteur (H)		
AICHELIN industrielle	150	455	95	14	1300



Figure III.3. Four électrique

Pour le traitement thermique des éprouvettes, nous avons réalisé une trempe et revenu pour les éprouvettes. la pièce a été chauffée entre 780 C° et 820 C° pendant 30 minutes et ensuite la plongée dans de l'huile chaude à 180 C° pour obtenir un acier d'une dureté de 61HRC.

### III.2.2.2. Mesure de dureté

Après le traitement thermique, la dureté des pièces a été mesurée sur une machine d'essais de dureté « INNOVATEST ». La machine de série VERZUS 710 est une machine d'essais de dureté Rockwell (ou Brinell) (Figure III.4).



Figure III.4. Machine d'essais de dureté brinell « INNOVATEST », série VERZUS 710

### III.2.3. Description des outils et porte-outils

#### III.2.3.1. Les outils

Les plaquettes utilisées sont amovibles, de forme carrée de marque PRAMET. Sont montées et fixées sur deux types de porte-plaquette qui sont généralement utilisées pour le tournage extérieur, l'ébauche et la finition. Toutes les informations relatives à ces outils sont représentées dans le tableau III.5:

Tableau III.5. Les informations relatives aux plaquettes utilisées

Matériau de coupe	Références	Géométrie	Marque
Carbure revêtu	T9325	CNMG 12.04.04 E-M	PRAMET
Céramique noire	TC100	CNGN 12.07.12 T01020	PRAMET

Le système d'identification des plaquettes de tournage amovibles est représenté dans l'annexe B.



Figure III.5. Plaquette servant aux essais : a) Plaquette de carbure, b) Plaquette de la céramique noire

#### III.2.3.2. Les portes plaquettes

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux porte-plaquettes sur lesquels sont fixées les plaquettes mécaniquement par bride et par trou central (Figure III.7). La géométrie des deux porte-plaquettes (annexe B) est donnée sur le tableau III.6 et figure III.6:

Tableau III.6. Caractéristiques géométriques des porte-plaquettes [65]

Désignation	Section	$\alpha$	$\gamma$	Kr	$\lambda_s$
PCLNR 2525 M 12	25x25	6°	-6°	95°	-6°
CCLNR 2525 M 12	25x25	6°	-6°	93°	-6°

Avec les angles caractéristiques d'un porte-plaquette:  $\alpha$ : l'angle de dépouille,  $\gamma$ : Angle de coupe (angle d'attaque) normal,  $\lambda_s$ : Angle d'inclinaison d'arête et Kr: Angle d'orientation d'arête



Figure III.6. Les porte-plaquette servant aux : a) Porte-plaquette de carbure, b) Porte-plaquette de la céramique noire

### III.2.4. Instruments de contrôle et de mesure

#### III.2.4.1. Appareil de mesure de la rugosité

Le critère de rugosité ( $R_a$ ) obtenu a été mesuré à l'aide d'un Rugosimètre 2D : «MITUTOYO SURFTEST SJ 301».



Figure III.7. Appareil de mesure de la rugosité

Il se compose d'une pointe en diamant, avec un rayon de la pointe de  $5\mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface usinée et à mesurer.

Le principe de la mesure de l'état de surface est le déplacement d'un palpeur sur la pièce comme montre la figure III.8. Le déplacement transversal de la pointe détermine le profil de la surface de l'outil.



Figure III.8. Méthodologie de mesure de la rugosité

#### III.2.4.2. Appareil de mesure de la masse

A chaque passe, la plaquette était démontée pour prendre son poids afin de voir la dégradation de l'outil de coupe. Les caractéristiques de cet appareil de mesure SCA-301 sont représentées dans l'annexe C.

#### III.2.4.3. Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille $V_b$

L'usure en dépouille  $V_b$  a été observée après chaque séquence de coupe à l'aide d'un microscope optique 2D, type Wmm 200/100, Fabricant : Zeiss, ayant une précision de  $0,001\text{mm}$ . (Figure III.9).

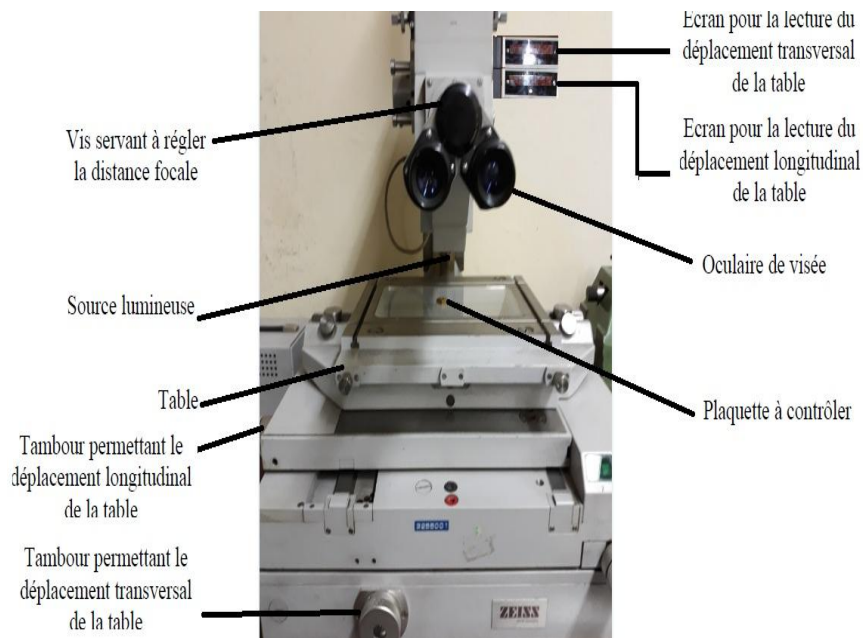


Figure III.9. Microscope optique 2D pour mesurer l'usure

#### III.2.4.4. 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 à distance modèle N°: Amprobe IR608A (Figure III.10). Le pyromètre infrarouge mesure les températures de surface à distance dont les caractéristiques sont représentées dans l'annexe C.



Figure III.10. Amprobe IR608A, Infrared Thermometer

#### III.2.4.5. Autre équipements

- Un chronomètre pour enregistrer le temps de coupe
- Un pied à coulisse pour le diamètre
- Un appareil photo numérique pour prendre des photos
- Une loupe pour zoomer l'usure.

### III.2.4.6. Instruments de simulation

La méthode des éléments finis propose une résolution numérique approchée des systèmes d'équations. La performance des outils de l'informatique a permis à cette méthode de connaître un formidable assaut et elle fait encore l'objet de nombreuses publications en mécanique et en mathématique appliquée. Pour cela le but de toute simulation est de reproduire le processus réel le plus fidèlement possible. Par ailleurs, elle est largement répandue dans l'industrie avec des codes commerciaux comme NASTRAN, ABAQUS, COSMOS, ANSYS....etc.

Dans notre travail nous avons créé un modèle de prédiction simple conçu à l'aide de logiciel SolidWorks 14, puis importé dans le code d'éléments finis ANSYS 15.

### III.3. Méthodologie d'essais

Les essais consistent à faire des opérations de chariotage à sec. Les essais ont été menés avec les plus grandes précautions. La démarche générale des essais est la suivante :

- Mise en position de l'éprouvette sur le tour,
- Réglage de l'avance, de la profondeur de passe et choix de la plage de vitesse,
- Observation visuelle périodique des plaquettes utilisées (face de coupe, et la face de dépouille).

#### III.3.1. Préparation de la pièce

Elle est réalisée sur une pièce divisée en 07 paliers de 24 mm de largeur chacun, séparés par un éboulement. La pièce est maintenue dans un montage mixte (Mandrin - Contre pointe) comme indiqué sur les figures III.11a et III.11b:

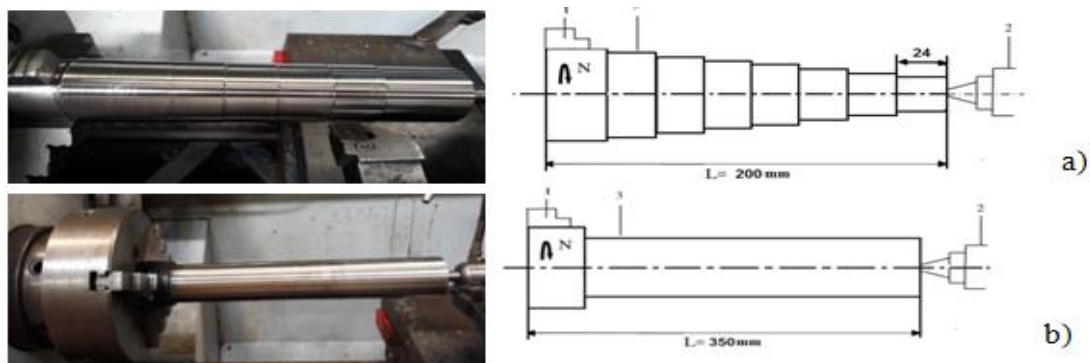


Figure III.11. Chariotage et la préparation de la pièce (1-mandrin, 2-contre pointe, 3- pièce) : a) Essais de la rugosité, b) Essais d'usure

### III.3.2. Conditions de coupe

Dans cette section, les essais sont réalisés afin d'examiner l'effet de chaque facteur des éléments de régime de coupe (vitesses de coupe  $V_c$  m/min, avance  $f$  mm/tr et profondeur de passe mm) individuellement sur les paramètres technologiques (la rugosité de surface, l'usure des plaquettes de coupe et la température).

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont représentées dans les tableaux III.7, III.8 et III.9 :

Tableau III.7. Les conditions de coupe utilisées pour les essais de la rugosité de surface

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
Avance de coupe $f$ (mm/tr)	0.084	Vitesse de coupe $V_c$	30, 60, 90, 120, 180, 200, 280
Profondeur de passe $a_p$ (mm)	0.2		
Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	180	Avance de coupe $f$	0.084, 0.112, 0.114, 0.168, 0.196, 0.225
Profondeur de passe $a_p$ (mm)	0.2		
Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	180	Profondeur de passe $a_p$	0.1, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55
Avance de coupe $f$ (mm/tr)	0.084		

Tableau III.8. Les conditions de coupe utilisées pour les essais d'usure

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
Profondeur de passe $a_p$ (mm)	0.2	Vitesse de coupe $V_c$	120, 180, 240
Avance de coupe $f$ (mm/tr)	0.084		
Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	180	Avance de coupe $f$	0.084, 0.112, 0.114,
Profondeur de passe $a_p$ (mm)	0.2		
Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	180	Profondeur de passe $a_p$	0.15, 0.35, 0.45
Avance de coupe $f$ (mm/tr)	0.084		
Usures de dépouille admissibles : $[VB] = 0.3$ mm			

Tableau III.9. Les conditions de coupe utilisées pour les essais de la température

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
Profondeur de passe $a_p$ (mm)	0.2	Vitesse de coupe $V_c$	120, 200, 240
Avance de coupe $f$ (mm/tr)	0.084		
Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	180	Avance de coupe $f$	0.084, 0.164, 0.196
Profondeur de passe $a_p$ (mm)	0.2		
Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	180	Profondeur de passe $a_p$	0.25, 0.5, 1
Avance de coupe $f$ (mm/tr)	0.084		



### III.3.3. Détermination d'un modèle de rugosité

Dans notre travail, nous avons considéré la rugosité de la surface usinée (Ra) comme étant les paramètres de sortie du système d'usinage et les éléments du régime de coupe (Vc, f, ap) comme étant les paramètres d'entrée. Le modèle mathématique que nous avons utilisé s'exprime sous la forme d'équation III.1 (cité dans la thèse de doctorat, du Prof. Yallese) [26] :

$$Ra = C \times V_c^\alpha \times f^\beta \times a_p^\gamma \dots\dots\dots (III. 1)$$

Pour faciliter le traitement de l'équation III.1 on doit les linéarités. Pour ce faire on prend les logarithmes de chaque membre de ces équations, ainsi l'équation III.2 devient :

$$\log Ra_i = \log C + \alpha \log V_{c_i} + \beta \log f_i + \gamma \log a_{p_i} \dots\dots\dots (III. 2)$$

Selon l'utilisation de la méthode des moindres carrés nous avons déterminé les coefficients: C, α, β et γ [26]

L'exploitation de ce système se fera à l'aide d'un système matriciel de type B = X .A

$$\text{Avec } A = \begin{bmatrix} 1 & \log V_{c_1} & \log f_1 \\ 1 & \log V_{c_2} & \log f_2 \\ 1 & \log V_{c_3} & \log f_3 \\ 1 & \log V_{c_4} & \log f_4 \\ 1 & \log V_{c_5} & \log f_5 \\ 1 & \log V_{c_6} & \log f_6 \\ 1 & \log V_{c_7} & \log f_7 \\ 1 & \log V_{c_8} & \log f_8 \\ 1 & \log V_{c_9} & \log f_9 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} \log C \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \text{ et } B = \begin{bmatrix} \log Ra_1 \\ \log Ra_2 \\ \log Ra_3 \\ \log Ra_4 \\ \log Ra_5 \\ \log Ra_6 \\ \log Ra_7 \\ \log Ra_8 \\ \log Ra_9 \end{bmatrix}$$

Par la suite les matrices sont rendues carrées de façon suivante : B = X .A

$$\begin{bmatrix} \log Ra_1 \\ \log Ra_2 \\ \log Ra_3 \\ \log Ra_4 \\ \log Ra_5 \\ \log Ra_6 \\ \log Ra_7 \\ \log Ra_8 \\ \log Ra_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log C \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & \log V_{c_1} & \log f_1 \\ 1 & \log V_{c_2} & \log f_2 \\ 1 & \log V_{c_3} & \log f_3 \\ 1 & \log V_{c_4} & \log f_4 \\ 1 & \log V_{c_5} & \log f_5 \\ 1 & \log V_{c_6} & \log f_6 \\ 1 & \log V_{c_7} & \log f_7 \\ 1 & \log V_{c_8} & \log f_8 \\ 1 & \log V_{c_9} & \log f_9 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III. 3)$$

D'ou:

$$(A^t B) = (A^t A) X \rightarrow X = (A^t B) (A^t A)^{-1}$$

Maintenant, déterminons chaque partie : la première partie obtenue par l'équation III.4

$$(A^t B) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \log Vc_1 & \log Vc_2 & \log Vc_3 & \log Vc_4 & \log Vc_5 & \log Vc_6 & \log Vc_7 & \log Vc_8 & \log Vc_9 \\ \log f_1 & \log f_2 & \log f_3 & \log f_4 & \log f_5 & \log f_6 & \log f_7 & \log f_8 & \log f_9 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \log Ra_1 \\ \log Ra_2 \\ \log Ra_3 \\ \log Ra_4 \\ \log Ra_5 \\ \log Ra_6 \\ \log Ra_7 \\ \log Ra_8 \\ \log Ra_9 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III. 4)$$

La deuxième partie obtenue par l'équation III.5 :

$$(A^t A) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \log Vc_1 & \log Vc_2 & \log Vc_3 & \log Vc_4 & \log Vc_5 & \log Vc_6 & \log Vc_7 & \log Vc_8 & \log Vc_9 \\ \log f_1 & \log f_2 & \log f_3 & \log f_4 & \log f_5 & \log f_6 & \log f_7 & \log f_8 & \log f_9 \end{bmatrix} X$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \log Vc_1 & \log f_1 \\ 1 & \log Vc_2 & \log f_2 \\ 1 & \log Vc_3 & \log f_3 \\ 1 & \log Vc_4 & \log f_4 \\ 1 & \log Vc_5 & \log f_5 \\ 1 & \log Vc_6 & \log f_6 \\ 1 & \log Vc_7 & \log f_7 \\ 1 & \log Vc_8 & \log f_8 \\ 1 & \log Vc_9 & \log f_9 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III. 5)$$

Et la matrice inverse  $(A^t A)^{-1}$  obtenue par la relation suivante [42] l'équation III.6:

$$(A^t A)^{-1} = \frac{1}{\det(A^t A)} (com A^t A)^t \dots\dots\dots (III. 6)$$

Avec :  $(com A^t A)^t$  Est la transposée de la Co matrice de  $(A^t A)$

$\det(A^t A)$  Est le déterminant

Calculons le déterminant : On choisit une ligne de la matrice et on multiplie chaque coefficient de cette ligne par le déterminant de la matrice obtenu en rayant la colonne et la ligne de ce coefficient (la matrice obtenu est une matrice) chaque résultat obtenu doit être multiplie de plus par -1 dans le cas ou sa colonne L et sa ligne C sont telles que L + C est impaire. A partir l'équation III.5, Nous calculons le déterminant obtenue par la relation suivante (Equation III.7):

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \log Vc_1 & \log Vc_2 & \log Vc_3 & \log Vc_4 & \log Vc_5 & \log Vc_6 & \log Vc_7 & \log Vc_8 & \log Vc_9 \\ \log f_1 & \log f_2 & \log f_3 & \log f_4 & \log f_5 & \log f_6 & \log f_7 & \log f_8 & \log f_9 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \log Vc_1 & \log f_1 \\ 1 & \log Vc_2 & \log f_2 \\ 1 & \log Vc_3 & \log f_3 \\ 1 & \log Vc_4 & \log f_4 \\ 1 & \log Vc_5 & \log f_5 \\ 1 & \log Vc_6 & \log f_6 \\ 1 & \log Vc_7 & \log f_7 \\ 1 & \log Vc_8 & \log f_8 \\ 1 & \log Vc_9 & \log f_9 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (III.7)$$

En générale la Co-matrice  $com(A)$  (ou matrice adjointe  $adj.(A)$ ) définie par :

$$com(A) = \begin{pmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \dots & \dots & \Delta_{1n} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \dots & \Delta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta_{n1} & \Delta_{n2} & \dots & \dots & \Delta_{nn} \end{pmatrix}$$

Avec  $\Delta_{ij}$  est le cofacteur de l'élément  $a_{ij}$  de A défini à partir du mineur  $\det(M_{ij})$  l'équation III.8 :

$$\Delta_{ij} = (-1)^{i+j} \det(M_{ij}) \dots \dots \dots (III. 8)$$

D'après les équations III.4, III.5, III.6, III.7 et III.8 on peut calculer les exposants du modèle de Taylor (C,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ ).

➤ **Coefficient de détermination R<sup>2</sup>**

Le coefficient du R<sup>2</sup> est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression, Ce coefficient varie entre 0 et 1. En bref, plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points se disperse autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R<sup>2</sup> tend vers 1, plus le nuage de points se resserre autour de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, alors R<sup>2</sup> = 1.

Le coefficient du R<sup>2</sup> est égal au rapport entre la somme des carrés des réponses calculées (corrigées de la moyenne) et la somme des carrés des réponses mesurées (corrigées de la moyenne) :

$$R^2 = \frac{\text{Somme des carrés des réponses calculées corrigée de la moyen}}{\text{Somme des carrés des réponses mesurées corrigée de la moyen}}$$

Si le modèle permet de retrouver exactement la valeur des réponses mesurées, la somme des carrés des réponses calculées est égale à la somme des carrés des réponses mesurées.

Le  $R^2$  est donc un bon indicateur de la qualité du modèle s'il y a plus de points expérimentaux différents que de coefficients dans le modèle postulé [67].

### **III.4. Conclusion**

Nous avons identifié dans ce chapitre tous les matériels et les méthodes nécessaires qui ont été utilisés pour déterminer les critères de dégradation des outils de coupe et l'évolution de la rugosité des surfaces.

La fin de ce chapitre abouti à la détermination des modèles mathématiques de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe.

# **CHAPITRE**

## **IV**

**Simulation numérique du profil de la température**

# CHAPITRE IV : Simulation numérique du profil de la température

## IV.1. Introduction

Des travaux expérimentaux sont nécessaires pour obtenir des résultats par contre ils coûtent chers et prennent beaucoup de temps. En plus de cela, des analyses simplifiées et méthodiques ont des applications limitées et ne peuvent pas être utilisées pour des processus de coupe complexe. À ce stade, les méthodes numériques deviennent importantes. Au cours des deux dernières décennies, la méthode des éléments finis (MEF) a été utilisée le plus souvent dans l'analyse de la coupe de métaux. Elle nous permet de prédire plusieurs paramètres de sortie de l'usinage tels que les efforts de coupe, les contraintes, les températures, la forme de coupeau, etc. sans pour autant faire des expériences.

Dans ce chapitre, on va présenter les aspects fondamentaux de la simulation numérique du profil de la température par la méthode des éléments finis, vu que la température a des effets importants sur l'usure des outils.

## IV.2. Rappel sur les éléments finis

La méthode des éléments finis est une technique pour rapprocher les équations différentielles régissant un système avec un ensemble d'équations algébriques concernant un nombre limité de variables. Ces méthodes sont populaires parce qu'elles peuvent facilement être programmées. Les techniques des éléments finis ont été initialement développées pour des problèmes structurels, mais elles ont été étendues à de nombreux problèmes du terrain. Le solide est décomposé en éléments de forme géométrique simple ayant des côtés communs et dont les sommets ou nœuds sont les points d'articulation de plusieurs éléments entre eux. Ces nœuds seront les points d'application des forces intérieures ou extérieures. L'opération de décomposition est le maillage. D'habitude on choisit un maillage carré ou triangulaire mais rien n'interdit de choisir des maillages plus complexes. Il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et à tendance à resserrer le maillage près des endroits d'intérêts (par exemple aux endroits où l'on pense que la solution va beaucoup varier), cependant il faut veiller à avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la «vraie» solution de l'équation aux dérivés partielles [68].

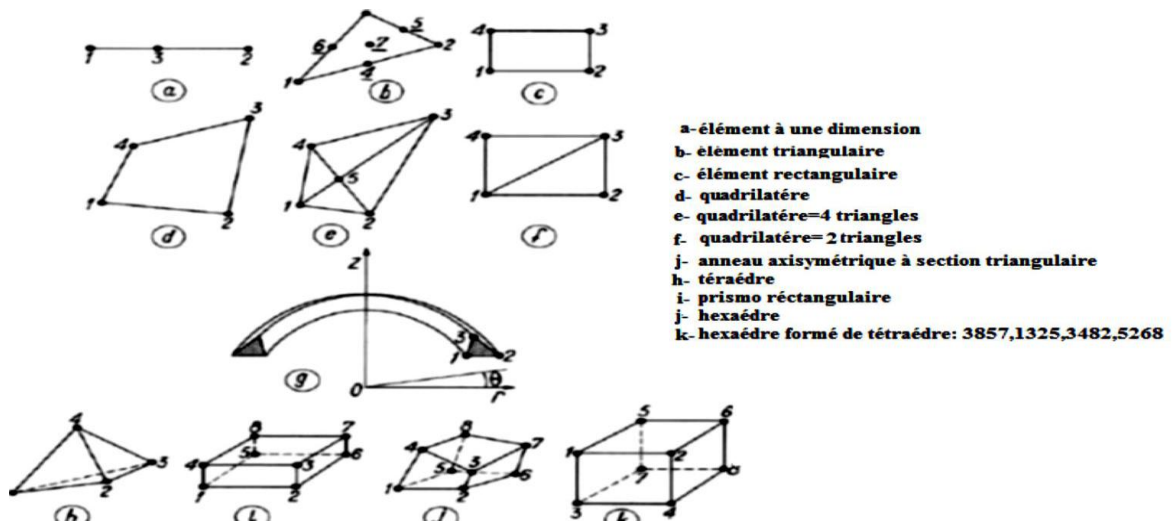


Figure IV.1. Eléments les plus fréquemment utilisés [68]

### IV.2.1. Le maillage

Le maillage est la procédure de diviser une région continue a des régions discontinues appelée élément. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l’obtention d’un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul [69].

Dans la simulation des structures solides plusieurs types d’éléments sont utilisés notamment l’élément tétraédrique et l’élément hexaédrique (Figure IV.2 (a et b)). Nous avons choisi le maillage tétraédrique selon le code de calcul ANSYS Workbench. Parce qu’il est considéré parmi les meilleurs types de maillage les plus fréquemment utilisés pour la modélisation des structures complexes à plusieurs singularités en trois dimensions. La géométrie, la position des nœuds, et le système de coordonnées pour cet élément sont indiqués dans la figure IV.2a.

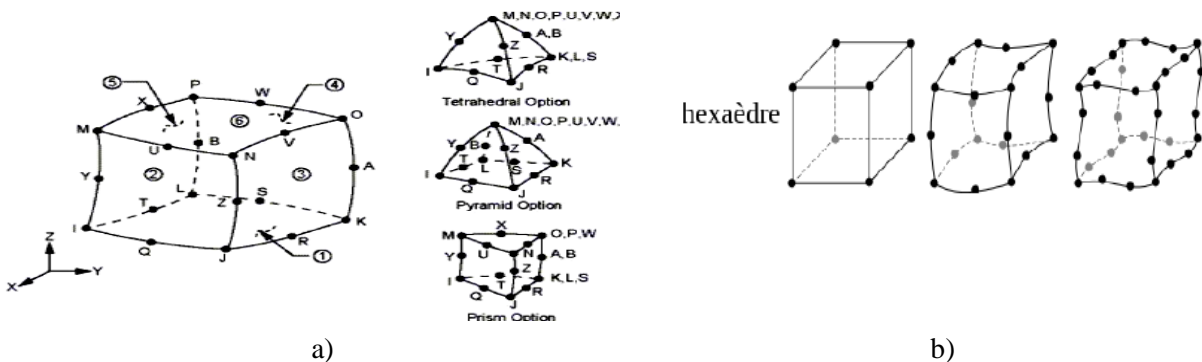


Figure IV.2. Elément de maillage : a) l’élément tétraédrique, b) l’élément hexaédrique [68]

En revanche, l'application de l'option raffinement entraîne l'augmentation de la densité du maillage par éléments finis dans la zone sélectionnée par l'utilisateur (dans notre étude la zone sélectionnée c'est la zone de contact outil-pièce). Il faut donc raffiner le maillage de la zone de contact exclusivement [70].

### **IV.2.2. Modèle de comportement de la pièce à usiné**

Le choix de la loi de comportement du matériau usiné est capital en simulation numérique de l'usinage. En effet, pour bien simuler le comportement du matériau usiné, il faut choisir un modèle qui colle au mieux à celui-ci sous les diverses sollicitations thermomécaniques auxquelles il fait face dans des conditions réelles d'usinage, Il existe divers modèles performants de comportement des matériaux utilisables en simulation numérique de l'usinage : Oxley, Johnson-Cook et Zerilli-Armstrong [68].

Cependant, leurs utilisations exigent l'identification de paramètres quand ils ne sont pas disponibles, une identification qui a des coûts non négligeables. Nous pouvons choisir parmi les lois de comportement disponibles en simulation numérique de l'usinage, celle de Johnson-Cook l'une des plus utilisées et très répandu [70].

### **IV.2.3. Logiciel commercial**

Les chercheurs ont généralement écrit leurs propres codes éléments finis pour des processus spécifiques tels que l'analyse de coupe de métal jusqu'au milieu des années 1990. Au cours des dernières années, des modules éléments finis commerciaux tels que Deform 2D / 3D, Abaqus, ANSYS, Advantedge, Ls-Dyna, etc. ont été utilisés de manière excessive dans le monde académique et industriel pour l'analyse de processus [69].

Dans notre étude, nous avons choisi l'ANSYS Workbench 15, est une plateforme qui nous permet de réaliser toutes les étapes de la simulation dans une interface unique et de connecter les différents modules et physiques associés (fluides, thermique, structure, etc.). La simplicité de son interface graphique nous permettra de gagner du temps et d'accroître notre productivité [71].

## **IV.3. Etude thermique**

### **IV.3.1. Modèle géométrique et le maillage**

Le modèle géométrique utilisé dans ces simulations est composé d'une pièce en acier déformable de 50 mm de longueur et 40 mm de diamètre et d'un outil en carbure déformable (figure IV.3). L'outil de coupe séparé en deux parties, la plaquette a une forme carrée de 12 mm de côté, une hauteur de 4 mm et un rayon de bec fixé à 0.1 mm. La plaquette est



mécaniquement fixée, par une vis à travers le trou central, sur la porte plaquette. La géométrie du porte-plaquette est PCLNR 2525 M 12. La modélisation de l'outil de coupe a été simplifiée en prenant (angle d'attaque  $\gamma = 4^\circ$ ; l'angle de taillant  $\beta = 80^\circ$  et l'angle de dépouille  $\alpha = 6^\circ$ ).

Le modèle de maillage utilisé durant ces simulations est présenté sur la figure IV.3. La pièce à usiner et l'outil sont maillés sous forme d'éléments finis : Le type de maillage utilisé est le maillage tétraédrique et la partie de contact est raffinée jusqu'à 0,1mm (Figure IV.4). Le nombre de nœuds pour la porte plaquette et la plaquette et la pièce sont respectivement 69197- 5532- 45454. Le nombre d'éléments sont respectivement 30896- 3212- 46299.

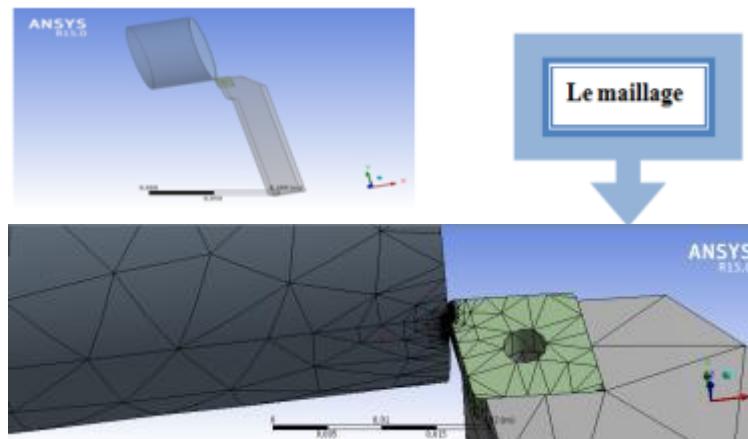


Figure IV. 3. Modèle géométrique avec le maillage

Par contre la figure IV.4 montre le raffinement du maillage au niveau la zone de contact outil-pièce.

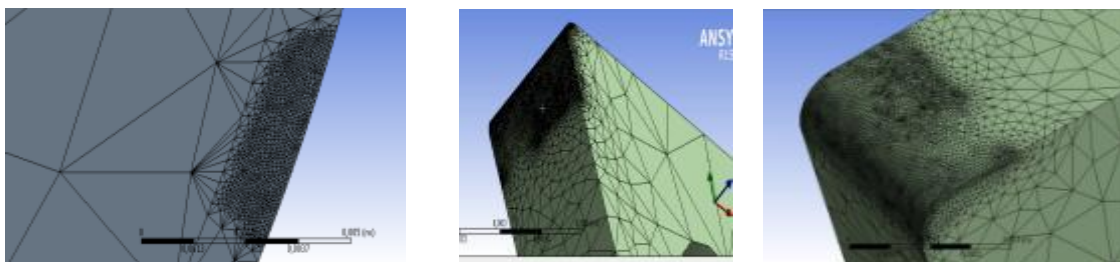


Figure IV. 4. Raffinement du maillage au niveau de la zone de contact outil-pièce

### IV.3.2. Création des défauts

Sur la figure IV.5 deux plaquettes de coupe sont représentées : la première est neuve, tandis que sur la deuxième des défauts (usure) sur la face de dépouille ont été créés. Les défauts à simuler ont une forme quelconque, la longueur de contact pièce/outil est considérée comme la longueur de défauts  $L_c = 1 \text{ mm}$ ,  $0.5 \text{ mm}$  et  $0.25 \text{ mm}$  et dans la hauteur maximum de l'usure a été étudiée pour trois cas :  $VB_{\max} = 0.1$ ,  $0.2$  et  $0.3 \text{ mm}$ .

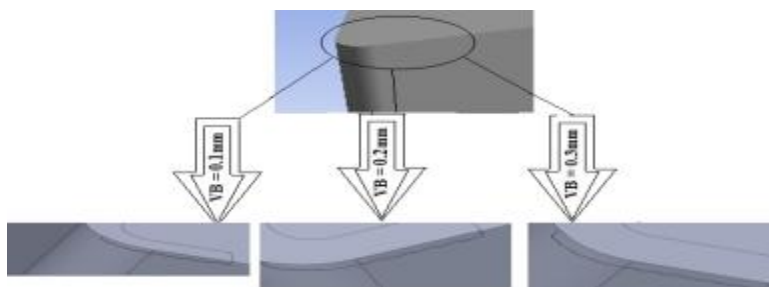


Figure IV. 5. Différents défauts créés sur la face de dépouille

### IV.3.5. Conditions aux limites et les chargements

Les essais ont été effectués dans les conditions suivantes :

- La pièce est tournée selon l'axe Y (360°), au contact entre l'outil et la pièce.
- Le mouvement relatif de la pièce et de l'outil est obtenu en déplaçant ce dernier à vitesse imposée pour une profondeur de passe. Ces deux paramètres de régime de coupe sont choisis lors des simulations comme suit :  $a_p = 1 \text{ mm}$ ,  $0.5 \text{ mm}$  et  $0.25 \text{ mm}$ , la vitesse de glissement pour l'outil a été constante pour tous les essais la vitesse d'avance  $V_f = 0.0016 \text{ m/s}$  ( $f = 0.084 \text{ mm/min}$ ) et la vitesse de rotation de la pièce  $N = 120 \text{ rad/s}$  ( $V_c = 180 \text{ m/min}$ ).
- Un contact sans séparation est supposé entre la plaquette de coupe et le corps de l'outil
- le coefficient de frottement est fixé à  $\mu = 0.2$  et le coefficient de d'écrouissage est fixé à  $0.1$ .
- La température nominale des essais  $22^\circ\text{C}$ .

### IV.3.4. Modélisation de la pièce à usiner

On a choisi l'acier comme matière de la pièce et le carbure comme matière de l'outil.

#### IV.3.4.1. Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux utilisés

Dans l'ensemble des simulations réalisées, les propriétés du matériau de l'outil et de la pièce sont présentés dans le tableau IV 1 :

Tableau IV. 1. Propriétés mécaniques et physiques de l'acier et du carbure

Propriétés mécaniques et physiques	Pièce (Acier)	Outil (Carbure)
Module d'élasticité E (GPa)	210	6000
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7850	15000
Coefficient de Poisson $\nu$	0.3	0.28
Chaleur spécifique $C_p$ (J kg <sup>-1</sup> C° -1)	460	475
Conductivité thermique $\Lambda$ (Wm <sup>-1</sup> C° -1)	30	50
Température de fusion $T_{fus}$ (K°)	1853	3140
Coefficient de dilatation thermique ( $\mu\text{m m}^{-1}$ C° -1) K-1	$1,1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$
Température ambiante $T_{amb}$ (C°)	22	22
Résistance élastique $R_e$ (MPa)	470	600
Résistance à la rupture $R_m$ (MPa)	770	1440

### IV.3.4.2. Loi de comportement de la pièce

Les lois des matériaux sont au cœur de toute simulation d'usinage. La loi des matériaux de Johnson-Cook, en raison de sa simplicité, a souvent été utilisée pour des simulations d'usinage [72]. La loi de Johnson et Cook a été choisie, dans cette étude pour représenter le comportement du matériau de la pièce. Les valeurs des constantes de cette loi sont celles utilisées par D. J. Benson [73] pour l'acier 90 Mn Cr V8 et sont représentées dans l'équation IV. 1:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_{amb}}{T_{fus} - T_{amb}} \right)^m \right) \dots \dots \dots (IV. 1)$$

Le premier terme est relatif à l'écroutissage, avec « A, B et n ». Le deuxième terme est relatif au durcissement dynamique du matériau, il dépend de la vitesse de déformation plastique équivalente, « C » est la constante définissant la dépendance à la vitesse de déformation. Le troisième terme correspond à l'adoucissement thermique pour des valeurs de température comprises entre la température initiale T0 et la température de fusion T, et « m » l'exposant d'adoucissement thermique. Les valeurs de ces constantes sont données dans le tableau IV. 2 [74].

Tableau IV. 2. Paramètres de la loi de Johnson et Cook de l'acier AISI4340 [75]

Constantes	A(MPa)	B(MPa)	n	c	m	$\varepsilon_0$
Valeurs	595	580	0.133	0.023	1.03	0.9

## IV.4. Conclusion

Nous avons présentés dans la première partie de ce chapitre les méthodes couramment utilisées pour la simulation du profil de la température de coupe tels que la formulation, Le maillage et le modèle de comportement de la pièce à usiné.

En suite dans la partie finale, nous avons complété l'étude de simulation numérique du profil de la température par la création de modèle géométrique à partir de dimension de données, précise les conditions aux limites et les chargements, définir les propriétés mécaniques et physiques des matériaux utilisés et la loi de comportement de la pièce (Johnson-Cook). Après tout ça et une fois les géométries mises en place, l'étude thermique peut être lancée.

# **CHAPITRE**

## **V**

### **Résultats et Interprétations**

## CHAPITRE V: Résultats et Interprétations

### V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter des résultats expérimentaux qui traitent l'évolution des rugosités des surfaces usinées en tournage en fonction des paramètres de coupe. Additivement à cela, déterminer les critères de dégradation d'un outil de coupe lors des opérations de chariotage.

La mesure de la température est un processus très difficile à cause de la complexité de la géométrie de l'outil, la connaissance de la température de coupe est très importante car elle a une grande influence dans le choix des matériaux et des conditions optimales d'usinage. De ce faite, la température qui se forme au niveau de la face de coupe de l'outil a une influence sur la durée de vie de l'outil.

Dans ce contexte, nous avons étudié l'évolution de la température en fonction du temps et de vitesse de coupe par un pyromètre à infrarouge à distance. Les essais de coupe effectués sur l'acier 90 Mn Cr V8 traité à 61HRC, usiné à sec par les matériaux de coupe suivants : carbure (T9325) et céramique noire (TC100) vont être traités dans la première partie. La seconde partie est consacrée à la simulation de profil de la température de coupe avec les trois cas des défauts qui ont été créé sur la surface de dépouille (usure en dépouille) dans la pointe de l'outil lors de expérimentale.

### V.2. Analyse de l'expérience

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans le tableau V.1. Ces résultats vont servir à la détermination des modèles mathématiques qui expriment la relation entre les paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) et le paramètre de sortie  $R_a$ .

L'intérêt de cette modélisation est surtout de tenter de faire des prédictions sur la durée de vie. Le reste des résultats expérimentaux obtenus se trouvent dans l'annexe D.

Tableau V.1. Analyse de l'expérience pour la rugosité

N°	Paramètres d'entrée			Ra ( $\mu\text{m}$ )		Poids des plaquettes (g)	
	ESSAI S	VC (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Carbure T9325	Céramique noire TC100	T9325
1	60	0,084	0,2	1,600	0,700	8,80	4,89
2	90			0,987	0,533	8,73	4,72
3	120			0,792	0,446	8,63	4,66
4	150			0,729	0,42	8,56	4,59
5	180			0,694	0,435	8,46	4,51
6	200			0,688	0,447	8,26	4,47
7	280			0,817	0,467	8,01	4,42
8	180	0,070	0,2	0,480	0,350	-	-
9		0,084		0,501	0,347	-	-
10		0,112		0,551	0,450	-	-
11		0,14		0,596	0,482	-	-
12		0,168		0,747	0,591	-	-
13		0,196		1,341	0,890	-	-
14	180	0,084	0,15	0,768	0,401	-	-
15			0,25	0,731	0,417	-	-
16			0,35	0,753	0,42	-	-
17			0,45	0,766	0,433	-	-
18			0,55	0,800	0,441	-	-

### V.3. Evolution des rugosités

A la fin de chaque essais, des mesures de rugosité ont été réalisées sur les surfaces usinées afin d'analyser l'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface.

#### V.3.1. Effet des paramètres de coupe sur la rugosité

La caractérisation de la qualité de la surface usinée a été limitée au critère de rugosité moyenne arithmétique (Ra). Les figures V.1 (a, b et c) illustrent l'influence des éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur la rugosité de surface de l'acier 90 Mn Cr V8, usiné par la céramique noire TC100 et carbure T9325.

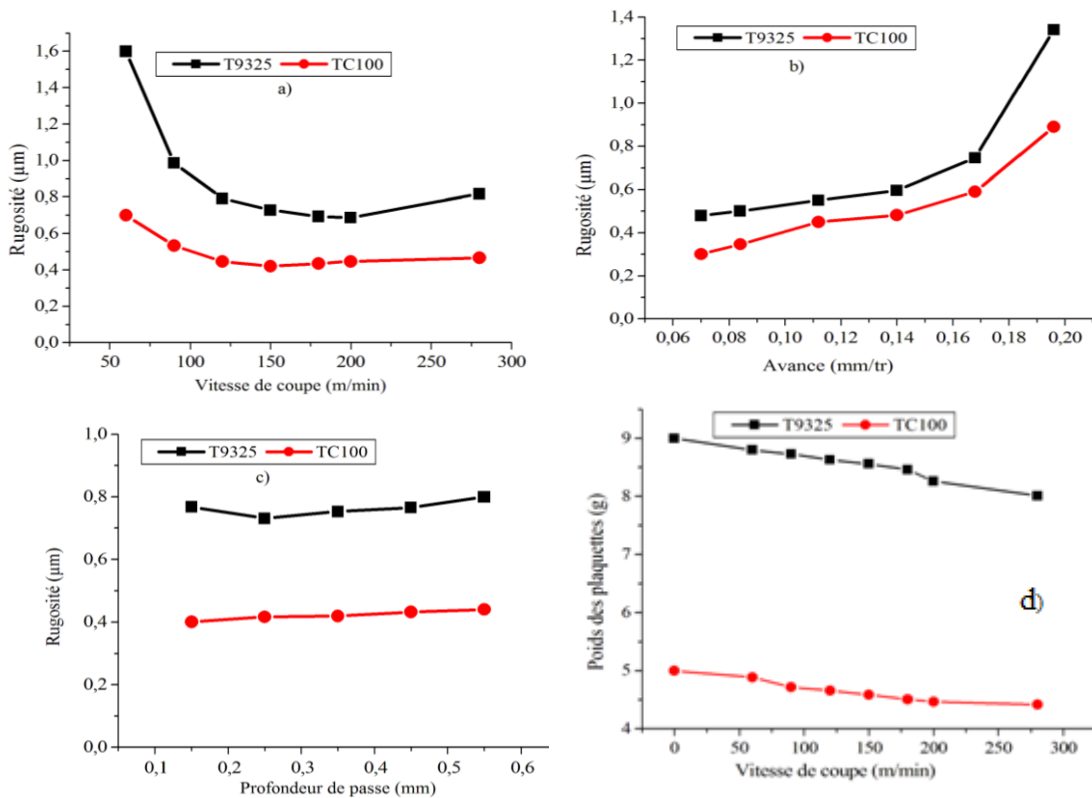


Figure V.1. Effet de la rugosité en fonction des paramètres de coupe a) En fonction de la vitesse de coupe à  $f = 0,084\text{mm/tr}$  et  $a_p = 0,2\text{mm}$ , b) En fonction de l'avance à  $V_c = 180\text{m/min}$  et  $a_p = 0,2\text{mm}$  et c) En fonction de la profondeur de coupe à  $V_c = 180\text{m/min}$  et  $f = 0,084\text{mm/tr}$  avec l'évolution du poids par rapport à la vitesse de coupe avec  $a_p = 0,2\text{mm}$ ,  $f = 0,084\text{mm/tr}$

##### V.3.1.1. Effet de la vitesse de coupe

La figure V.1.a, exprime l'évolution de critère de rugosité moyenne arithmétique (Ra) en fonction de la vitesse de coupe pour le carbure T9325 et la céramique noire TC100 à  $f = 0,084\text{mm/tr}$  et  $a_p = 0,2\text{mm}$  lors de tournage dur. L'analyse de cette courbe montre que pendant l'usinage, la rugosité de l'acier 90 Mn Cr V8 traité à 61HRC s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe pour les deux nuances de coupe. Alors, qu'après le

contact entre pièce-outil, nous avons remarqué qu'une certaine quantité de matière est enlevée de la pièce (sous forme de copeaux) et de la plaquette (se forme d'usure), ce qui a donné une variation dans le poids des plaquettes (figure V.1d). La diminution du poids des plaquettes est une preuve de la présence de l'usure dans l'outil de coupe. Aussi d'après ces courbes on remarque que, l'état de surface est dégradé lorsque la vitesse est inférieure à 80 m/min, au-delà de ces limites, elle s'améliore jusqu'à la limite de 180 m/min. et se stabilise légèrement jusqu'à 220 m/min, puis augmente et on enregistre une légère augmentation de la rugosité à cause de l'usure accélérée de l'outil aux vitesses de coupe élevées. Au-delà de cette valeur on enregistre une stabilisation de la rugosité pour la céramique noire (TC100), et une augmentation pour le carbure (T9325). En plus, à travers une petite comparaison entre les deux nuances utilisées (T9325 et TC100) on remarque clairement que l'outil TC100 est le plus performant que T9325.

### V.3.1.2. Effet de l'avance

La figure V.1b, représente le résultat de l'évolution de la rugosité en fonction de l'avance. On a remarqué que le critère de la rugosité ( $R_a$ ) augmente avec l'augmentation de l'avance. Dans le tournage, la surface engendrée n'est pas rigoureusement cylindrique, elle comporte des sillons hélicoïdaux résultants de la forme plus ou moins pointue de l'outil de coupe et du mouvement hélicoïdal outil/pièce. Ces sillons ont un profil d'autant plus profond que le rayon du bec de l'outil est faible (figure V.10). Par ailleurs ils sont d'autant plus larges que l'avance par tour est grande [77]. La forme de la surface engendrée par l'outil peut être affectée par les perturbations de la trajectoire de l'outil par rapport à la pièce, occasionnées par des vibrations importantes de l'un de ces éléments (ou des deux). Lorsque les conditions dynamiques (flexibilité et inertie des éléments, insuffisance d'amortissement mécanique) sont telles que les vibrations oscillatoires de cette trajectoire deviennent autoentretenues il en résulte des perturbations périodiques de la surface découpée. Elles prennent la forme de marques ou de stries plus ou moins accusées, qui peuvent modifier sensiblement la rugosité du profil idéal défini par la trajectoire théorique de l'outil [78].

L'analyse de cette courbe 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. En plus, on a remarqué que les valeurs du critère de la rugosité ( $R_a$ ) pour la céramique noire TC100 varient entre 0.350 et 0.890  $\mu\text{m}$  ces valeurs indiquent une augmentation de 0.54  $\mu\text{m}$ ; par contre, la valeur de l'augmentation pour le



carbure T9325 entre 0.480 et 1.341 indique 0.86 $\mu$ m. En dernier lieu, si on se base uniquement sur la rugosité, on remarque clairement que le TC100 est plus performant que T9325.

### V.3.1.3. Effet de la profondeur de passe

La figure V.1c, représente le résultat de l'évolution de critère de rugosité en fonction de la profondeur de passe. On a remarqué que les valeurs du critère de la rugosité (Ra) pour la céramique noire TC100 varient entre 0,401 et 0.441  $\mu$ m ; par contre, pour le carbure T9325 elles varient entre 0.768 et 0,800  $\mu$ m ces valeurs indiquent une légère augmentation avec l'augmentation de profondeur de coupe.

En plus, quand la profondeur de passe est de 0,25 à 0,45 mm, l'augmentation de la rugosité est égale à 0.047 mm (4.78 %) mm pour T9325 et de 0.038 (3.83 %) pour TC100. Mais, quand la profondeur de passe varie de 0,25 à 0.55 mm, l'augmentation de la rugosité est égale à 0.094 mm (9.43 %) mm pour T9325 et de 0.057 (5.75 %) pour TC100. L'analyse des résultats montre une stabilisation des critères de rugosité pour les deux plaquettes. À travers lequel on peut dire que ce paramètre est moins important que l'avance.

### V.3.1.4. Evolution du poids des plaquettes par rapport à les vitesses de coupe

La figure V. 1d, représente l'évolution du poids par rapport à les vitesses de coupe avec  $a_p=0.2$ mm,  $f=0.084$ mm/tr. Après le contact entre pièce-outil, nous avons remarqué une certaine quantité de matière est enlevée de la pièce (sous forme de copeaux) et de la plaquette (se forme d'usure), cela donne une diminution dans le poids des plaquettes. Pour voir mieux ce phénomène, Nous avons mesurée le poids des plaquettes après chaque vitesse de coupes et noté les points suivants :

- la diminution du poids des plaquettes c'est une preuve de la présence de l'usure dans l'outil de coupe.
- Le poids de la plaquette diminue avec l'augmentation de la vitesse c'est la conséquence de l'élimination des couches superficielles constituant le revêtement durant le premier contact avec la pièce.
- Le poids des plaquettes a augmenté, puisqu'il y a diffusion de la matière enlevée (copeaux) vers la plaquette, ainsi que des micros soudures qui se forment sur la face de coupe constituant l'arête rapportée.

### V.3.2. Détermination du modèle de rugosité

Selon l'analyse de l'évolution de la rugosité en fonction des paramètres de coupe nous concluons clairement que l'outil de céramique TC100 est le plus performant que l'outil en carbure T9325. En fonction de cela, nous nous sommes basés sur le modèle mathématique de Gilbert (cité dans la thèse de doctorat, du Prof. Yallese) [26]. Pour trouver ce modèle, la méthode des moindres carrée a été utilisée.

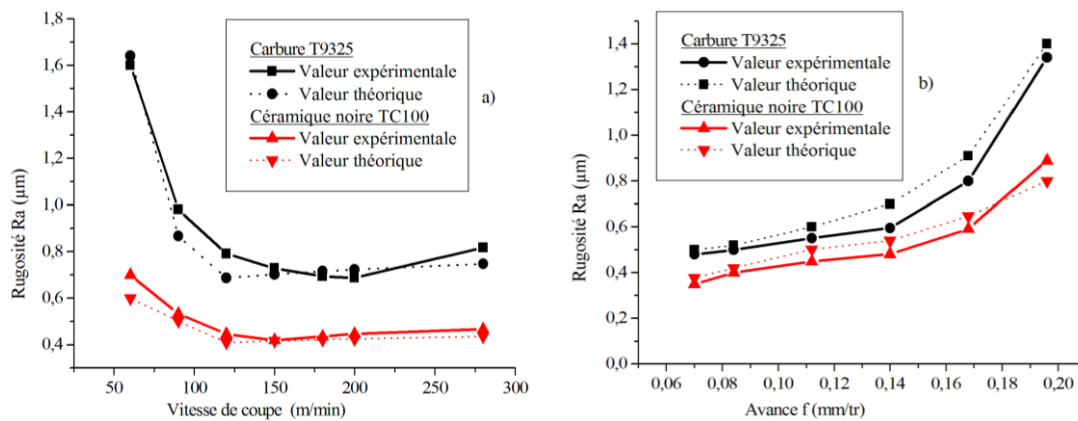
Les données expérimentales sont résumées dans le plan d'expérience qui est indiqué dans le tableau V.1. Les modèles mathématiques que nous avons obtenus sont présentés dans le tableau V.2 :

Tableau V.2. Modèles mathématiques de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe

Matériaux de coupe	Modèles	R <sup>2</sup>
Carbure T9325	$Ra = 1.316 \times V_c^{0.1} \times f^{0.358} \times a_p^{0.148}$	0.71
Céramique noire TC100	$Ra = 1.119 \times V_c^{0.072} \times f^{0.624} \times a_p^{-0.12}$	0.90

Les figures V. 3 (a, b et c) illustrent la comparaison des valeurs théoriques et expérimentales pour le carbure T9325 et la céramique noire TC100 en fonction des paramètres de coupe.

Nous avons observé que les valeurs théoriques convergent avec les valeurs expérimentales. Ce qui implique que le modèle proposé est convaincant et satisfaisant, ceci est confirmé par la valeur de coefficient de détermination R<sup>2</sup>. En plus, l'avance reste le facteur prépondérant sur les critères de rugosité, ensuite suivi par la vitesse de coupe et la profondeur de passe ap.



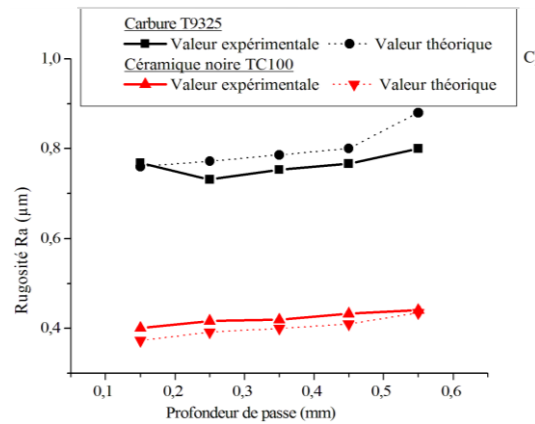


Figure V. 2. Comparaison des valeurs théoriques, expérimentales en fonction des paramètres de coupe : a) En fonction de la vitesse de coupe à  $f = 0,084\text{mm/tr}$  et  $a_p = 0,2\text{mm}$ , b) En fonction de l'avance à  $V_c = 180\text{m/min}$  et  $a_p = 0,2\text{mm}$  et c) En fonction de la profondeur de coupe à  $V_c = 180\text{m/min}$  et  $f = 0,084\text{mm/tr}$

## V.4. les critères de dégradation d'un outil de coupe

Après un certain temps  $t$  de travail, l'outil perd ses qualités de coupe et sa détérioration s'accroît très rapidement. On constate alors sur la surface façonnée de la pièce des rugosités plus accrues, des arrachements de matière, une usure de l'outil et une augmentation de la température. Donc, notre étude nous a permis de déterminer quelques critères de dégradation expérimentalement :

### V.4.1. 1er critère / Usure en dépouille $V_b$ des outils

La méthode de choix des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe) qui sont des facteurs très importants pour réduire le phénomène d'usure.

#### V.4. 1.1. Evolution de l'usure des outils pour différentes vitesses de coupe

Les figures V.3 (a, b et c) illustrent l'évolution de l'usure en dépouille  $V_b$  pour le carbure T9325 et la céramique noire TC100 en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe. L'analyse de ces résultats montre que la vitesse de coupe a un impact significatif sur l'usure. Aussi on peut dire que, 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. Cette usure augmente avec l'aide de l'augmentation de la vitesse de coupe et diminue avec l'avance. Cette analyse nous permet de conclure que la vitesse de coupe a un effet plus important que l'avance.

Dans les figures V.3a et V.3b, lors de la première minute d'usinage, nous avons remarqué une faible usure en dépeuille Vb et en cratère à la vitesse 120 m/min pour les deux nuances. Au-delà de 200 m/min, l'usure en dépeuille Vb s'accroît et se développe et se termine par une rupture de l'arête. En plus, dès 220 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. 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. Dans ces conditions l'usure de l'outil se développe suivant plusieurs mécanismes. Les deux principaux mécanismes généralement rencontrés sont l'abrasion et la diffusion. Selon l'allure de chaque nuance, on observe que la céramique noire TC100 a subi une rupture et sa durée de vie est plus longue que le carbure, par exemple à la vitesse de 120 m/min on constate que la durée de vie de la céramique noire TC100 correspondant à l'usure admissible de 0.3 mm est 66 min (Figure V.3b). Par contre pour le carbure T9325 est 24 min (Figures V.3a).

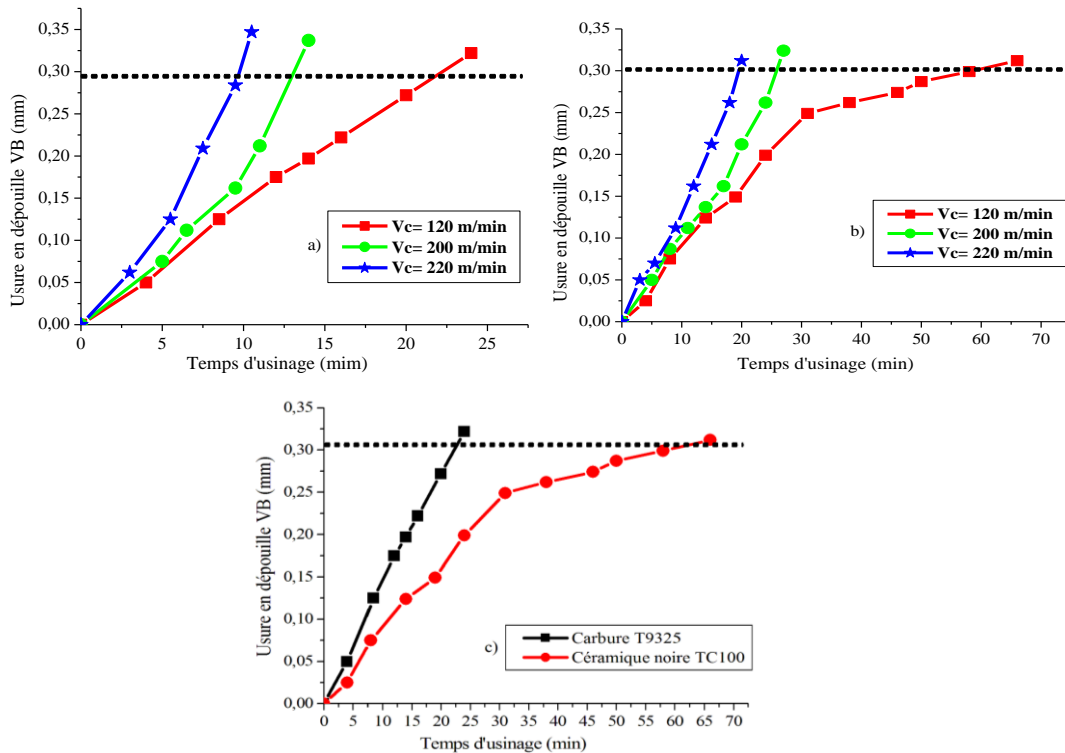


Figure V. 3. Evolution de l'usure en dépeuille (Vb) en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour; a) Le carbure T9325, b) La céramique noire TC100 et c) Phase de comparaison à  $a_p = 0.2\text{mm}$ ,  $f = 0.084\text{mm/tr}$

Les figures V.4 et V.5 exposent les photos de l'usure Vb et KT du T9325 et TC100 à  $V_c = 120$  m/min,  $f = 0,084$  mm/tr et  $a_p = 0.2$  mm avec temps d'usinage. Dans les figures V.4 (a et b) nous notons que l'usure en dépouille VB des plaquettes se développe régulièrement avec le temps pour acquérir à la fin de l'essai une forme irrégulière. Pour la céramique noire TC100 l'usure en dépouille Vb, à la vitesse minimale de coupe  $V_c = 120$ m/min nous notons que un effondrement est survenu après 66 min de travail (Figure V.4a). Par contre, pour le T9325 un effondrement est survenu après 24 min de travail (Figure V.4b). A la vitesse maximale de coupe  $V_c = 220$  m/min pour la TC100, un effondrement est survenu après seulement 20 min de travail et qui est caractérisé par une perte importante de matière et une rupture de l'arête (Figure V.3b). Par contre, pour le T9325 un effondrement est survenu après seulement 10 min de travail (Figure V. 3a).

Dans la plage de comparaison, la durée de vie « T » de la céramique noire TC100 est supérieure à T9325 (Figure V.3c). L'analyse des résultats montre que la durée de vie est très sensible à la variation de la vitesse de coupe.

À travers les figures V.5 (a et b), nous remarquons que l'évacuation de fragments de copeaux adhérents peut s'accompagner d'arrachement d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt et ce phénomène d'usure, appelé « usure en cratère KT ». KT se développe sous forme d'une cuvette très proche de l'arête tranchante (Figure V.5).

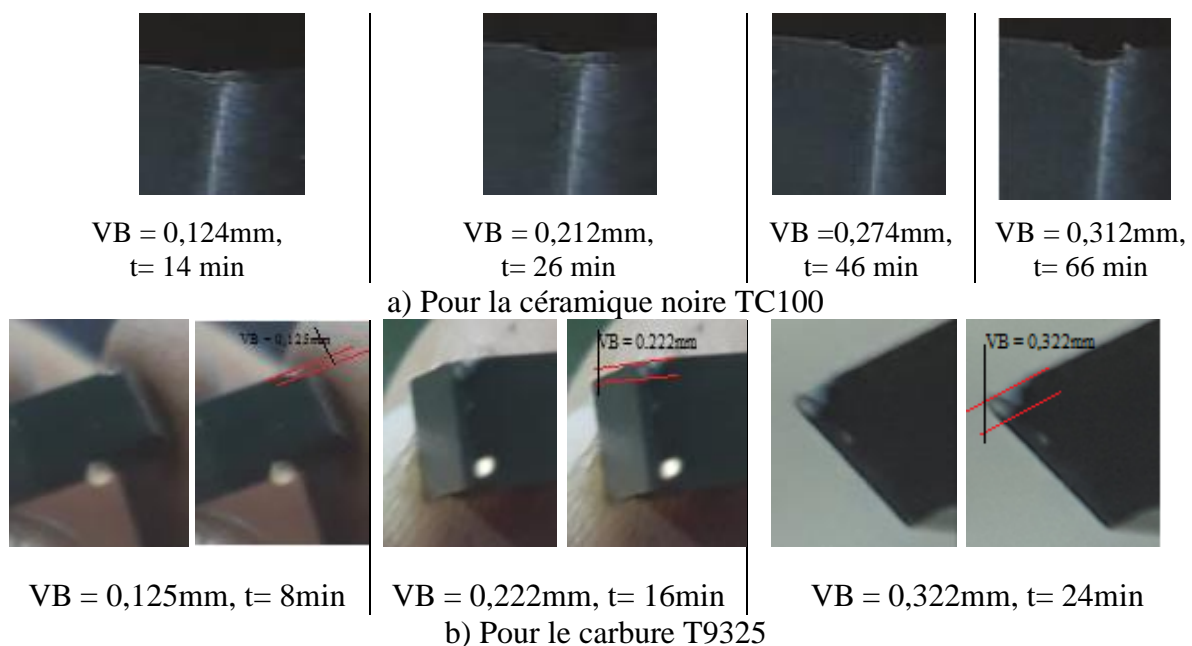


Figure V. 4. Photos de l'usure VB à  $V_c = 120$ m/min,  $f = 0,084$ mm/tr et  $a_p = 0.2$ mm avec temps d'usinage

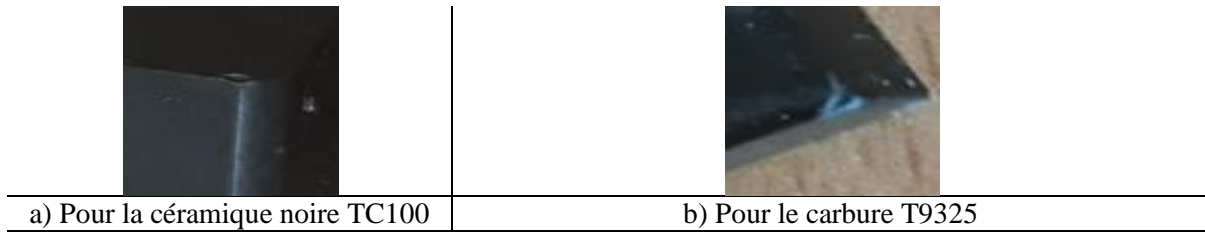


Figure V. 5. l'aspect final de l'usure en cratère KT à  $V_c = 120\text{m/min}$ ,  $f = 0,084\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0,2\text{mm}$

L'observation des copeaux (Figure V. 6a et Figure V. 6b) montre que le copeau passe d'un aspect continu à un aspect segmenté lorsque la vitesse s'approche de  $180\text{m/min}$ .

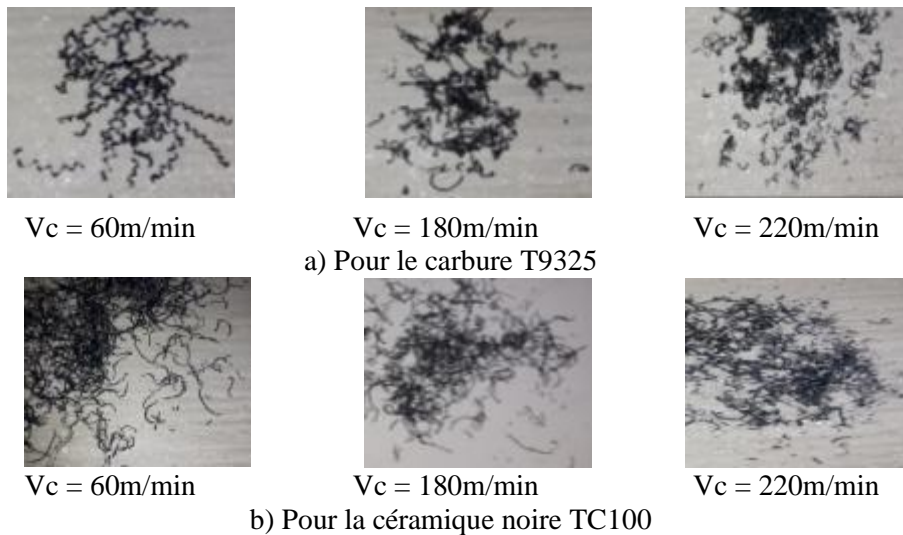


Figure V. 6. Photos des copeaux obtenue pour différentes vitesse de coupe à  $f = 0.084\text{mm/tr}$  et  $a_p = 0,2\text{mm}$

#### V.4. 1.2. Evolution de l'usure des outils pour différentes avances

Comme illustré dans la figure V.7, l'avance  $f$  semble avoir un effet assez prononcé sur l'évolution de l'usure en dépouille puisque une augmentation de l'avance  $f$  entraîne une augmentation de  $V_b$ .

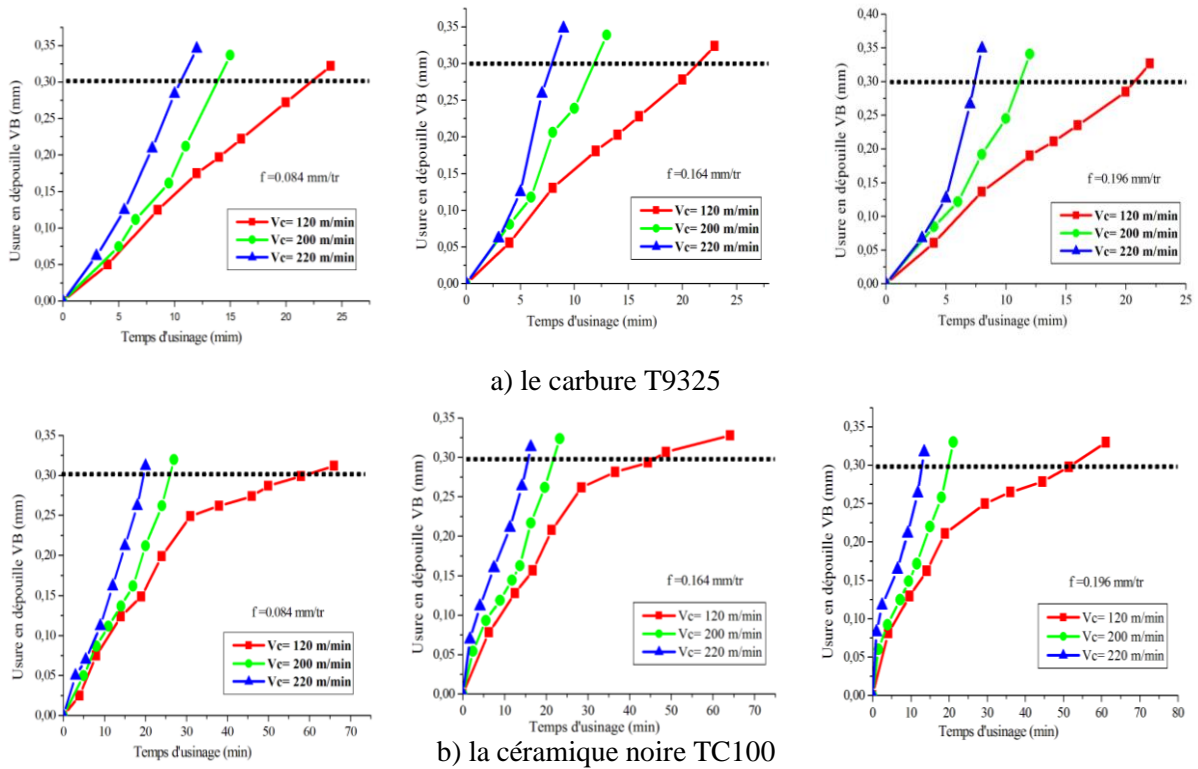


Figure V. 7. Evolution de l'usure en dépouille (VB) en fonction du temps pour différentes valeurs de l'avance à  $a_p = 0.2\text{ mm}$  et  $V_c = 120, 180$  et  $220\text{ m/min}$

En plus, l'aspect des copeaux est un critère important qui conditionne le choix de la plage des avances. Un copeau fragmenté est facile à évacuer et un copeau continu risque de s'enrouler sur l'outil ou sur lui-même accentuant ainsi l'usure des outils de coupe. De ce fait, un copeau fragmenté témoigne de conditions de coupe idéales. En outre, il ressort des observations aux photos des copeaux (Figure V. 8) que les copeaux sont fragmentés pour une avance  $f \geq 0.084\text{ mm/tr}$ .

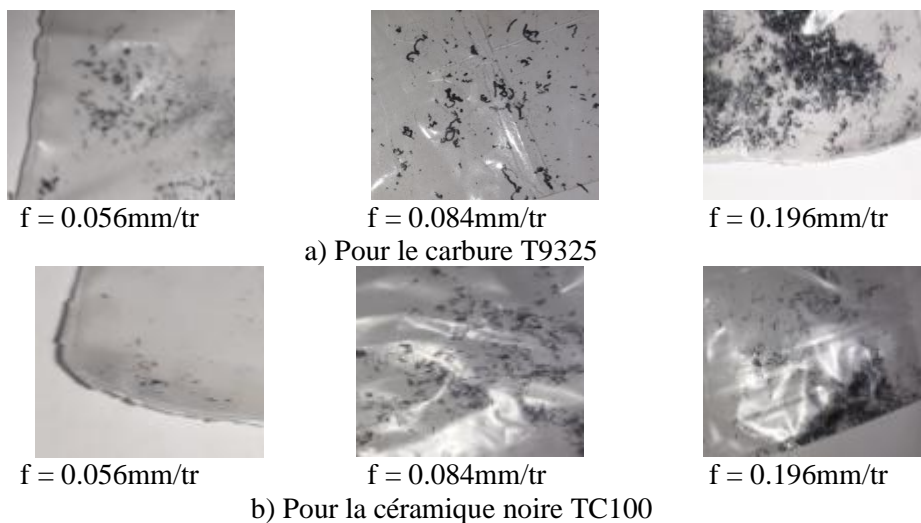
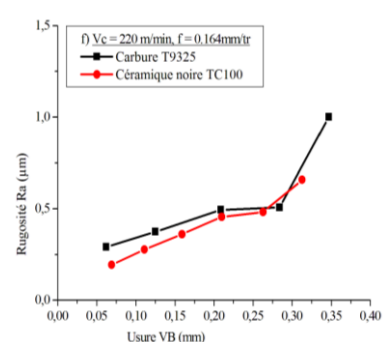
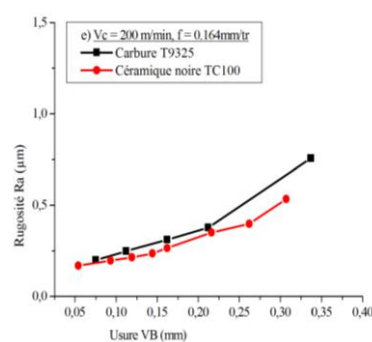
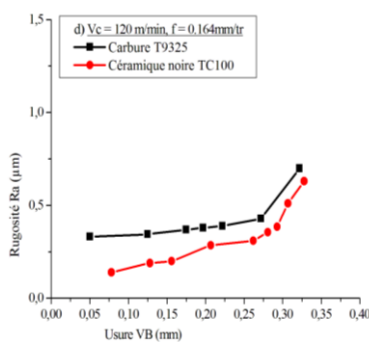
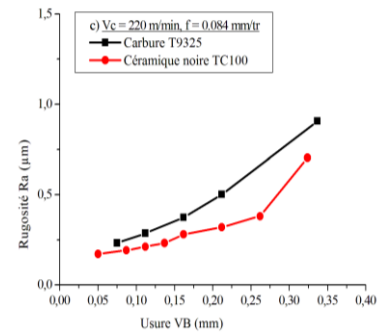
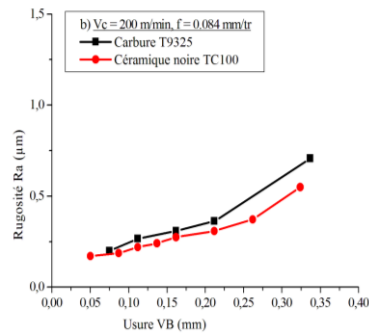
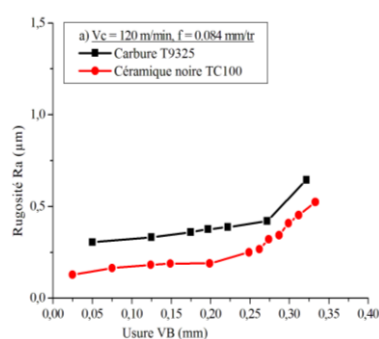


Figure V. 8. Photos des copeaux obtenus pour différentes valeurs de l'avance à  $V_c = 180\text{ m/min}$  et  $a_p = 0.2\text{ mm}$

### V.4. 1.3. Effet de l'usure en dépouille des outils sur la rugosité de surface

Généralement, la rugosité est un critère de qualité et l'usure des outils de coupe est un critère de contrôle de la production. Pour cette raison, nous avons choisi de mettre en évidence la relation entre la rugosité et l'usure. Les figures V.9 (a - i) et V.10 illustrent cette relation.

Dans ces figures, nous présentons les effets de l'usure en dépouille pour les deux outils testés sur la rugosité. Dans toutes les figures indiquées, nous notons selon le premier regard une augmentation de la rugosité à cause de l'usure accélérée de l'outil aux vitesses de coupe élevées. Aussi les valeurs enregistrées de Ra ne dépassent pas la valeur de  $1\mu\text{m}$  et cela pour tous les différents tests. Car la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente aussi à cause des frottements intenses et des températures élevées, en plus l'apparition de vibrations avec une grande étincelle qui sort à travers la brulre des copeaux. cette vibration conduit à limiter la plage des vitesses de coupe. On peut dire que nos recommandations sont de travailler dans des conditions inférieures à  $V_c = 220\text{ m/min}$  et  $f = 0.2\text{ mm/tr}$ .





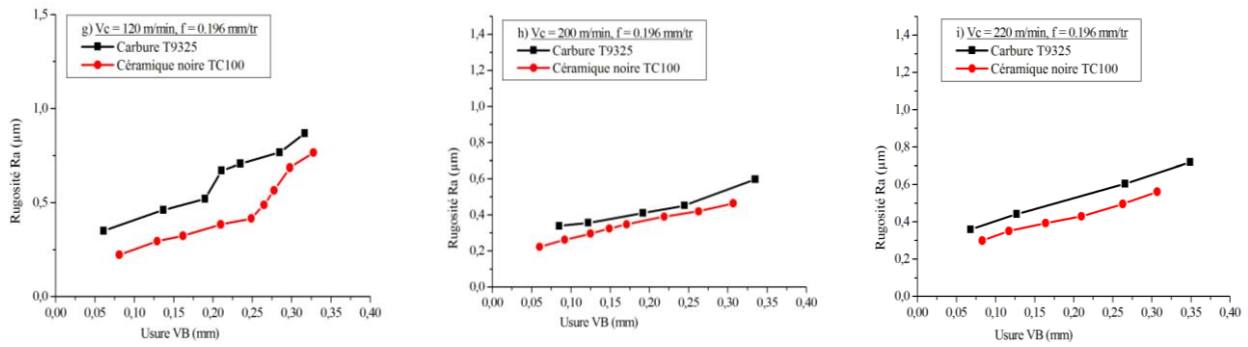


Figure V. 9. Effet de l'usure en dépouille des outils sur la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe et l'avance pour à  $a_p = 0.2 \text{ mm}$

La forme de la surface engendrée par l'outil change au fur et à mesure que l'outil change et cela à cause de l'usure qui augmente par rapport à l'augmentation de l'avance qui est affectée par les vibrations. Elles prennent la forme des lignes claires sur la surface de la pièce (figure V.10) qui peuvent modifier sensiblement la rugosité de surface



Figure V. 10. La trajectoire de l'outil en fonction de l'avance pour à  $a_p = 0.2 \text{ mm}$  et  $V_c = 200 \text{ m/min}$

### V.4.2. 2eme critère/ Température de coupe

L'objectif de cette campagne est de voir l'évolution de la température de coupe spécifique au cours du temps et d'observer sont allure pour différents régimes de coupe. Il est à noter que l'usinage du matériau dur provoque une température élevée sur la face de coupe ce qui accélère l'usure en cratère par le phénomène de diffusion chimique des éléments de l'outil vers le copeau (Figure. 12, 13 et 14).

Les températures présentées dans ces courbes ont été mesurées à l'aide d'un pyromètre à infrarouge à distance modèle N°: Amprobe IR608A (Figure V. 11).



Figure V. 11. Mesure de la température

Les figures V.12, V.13 et V.14 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 90 Mn Cr V8. 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, subit des déformations plastiques très intenses pour un volume relativement plus faible par rapport à celui de la pièce et de l'outil.



Figure V. 12. Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acier 90 Mn Cr V8 par le carbure T9325, temps de coupe = 480s (8min);  $V_c = 180$  m/min,  $a_p = 0,5$  mm;  $f = 0,084$  mm/tr;  $t^\circ$  copeau =  $840C^\circ$ ,  $t^\circ$  outil =  $85C^\circ$ ,  $t^\circ$  pièce =  $60C^\circ$



Figure V. 13. Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acier 90 Mn Cr V8 par la céramique noire TC100, temps de coupe = 480s (8min);  $V_c = 180$  m/min,  $a_p = 0,5$  mm;  $f = 0,084$  mm/tr;  $t^\circ$  copeau =  $702$  C°,  $t^\circ$  outil =  $76$  C°,  $t^\circ$  pièce =  $48$  C°

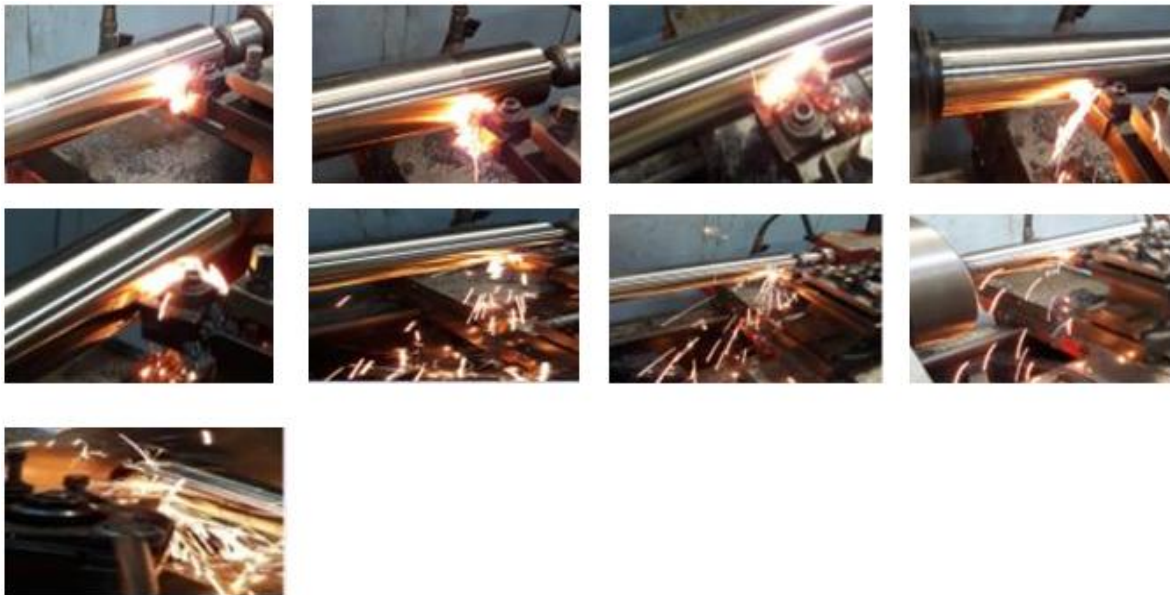


Figure V. 14. Evacuation de la chaleur par le copeau lors de l'usinage de l'acier 90 Mn Cr V8 par la céramique noire TC100, temps de coupe = 120s (2min);  $V_c = 240$  m/min,  $a_p = 0,5$  mm;  $f = 0,084$  mm/tr;  $t^\circ$  copeau =  $778$  C°,  $t^\circ$  outil =  $120$  C°,  $t^\circ$  pièce =  $73$  C°

Nous avons choisi d'observer la variation de la température en fonction de la vitesse de coupe, pour voir l'évacuation de la chaleur. La vitesse de coupe semble être l'un des paramètres les plus déterminants sur la température de coupe et sur l'usure des outils.

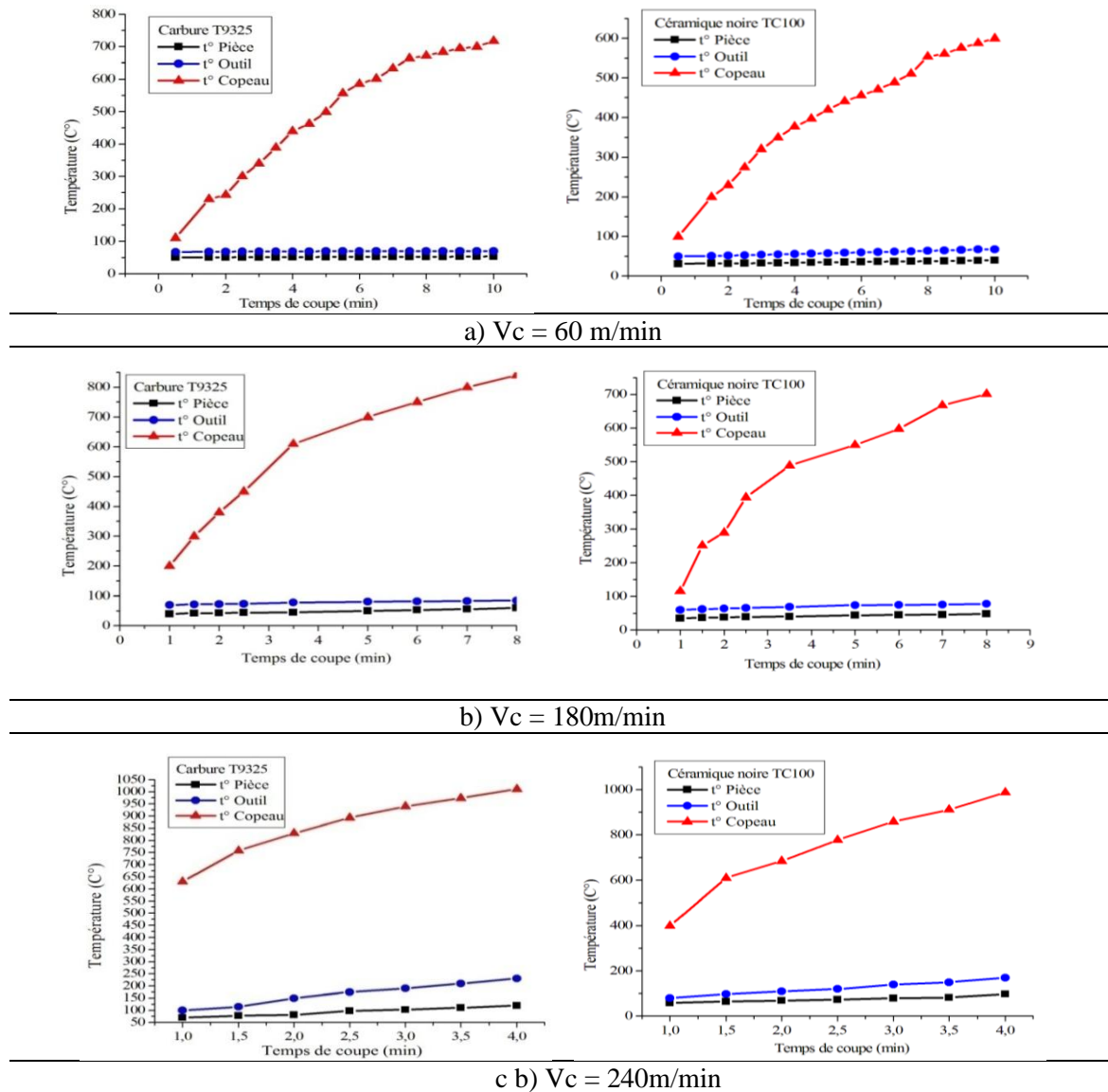


Figure V. 15. Evolution de la température de coupe en fonction du temps à différentes vitesses de coupe pour les deux plaquettes de coupe la céramique noire TC100 et carbure T9325 à  $a_p = 0.5\text{mm}$ ,  $f = 0.084$  mm/tr

La figure V.15 (a, b et c) présente les valeurs des températures (outil, copeau, pièce) enregistrées durant l’usinage de l’acier 90 Mn Cr V8 par le carbure T9325 et la céramique noire TC100. Cette figure montre 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. Aussi pendant l’usinage la majorité de la quantité de chaleur est effectivement évacuée par le copeau. Cette quantité de chaleur dégagée est le résultat des frottements, des déformations plastiques intenses et des cisaillements. 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 [79, 80, 81, 82, 83, 84].

### V.4.2.1. Evolution de la température de coupe pour différents régimes de coupe sur la face d'attaque de l'outil

Le but de ce point est de déterminer l'effet de la température sur l'usure de l'outil de coupe. Les essais d'usinage ont été conçus en tournage dur de l'acier 90 Mn Cr V8, usiné par la céramique noire TC100 et carbure T9325.

#### V.4.2.1.1. Evolution de la température de coupe pour différentes vitesses de coupe

La figure V.16 (a, b et c) illustre l'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe à différentes vitesses de coupe ( $V_c = 120, 200$  et  $240$  m/min) avec la céramique noire TC100 et carbure T9325, avec  $a_p = 0.2$  mm,  $f = 0.084$  mm/tr. D'après cette figure, on observe une évolution croissante de la température de coupe plus rapide suivant la vitesse de coupe, ainsi que par les propriétés mécaniques du métal œuvré. Nous avons enregistré dans différentes vitesses de coupe ( $V_c = 120, 200$  et  $240$  m/min) les températures moyennes pour le carbure T9325 est ( $80^\circ\text{C}$ ,  $129.71^\circ\text{C}$ , et  $286.42^\circ\text{C}$ ), mais du côté de la céramique noire TC100 nous avons enregistré les valeurs suivantes ( $68.5^\circ\text{C}$ ,  $102.14^\circ\text{C}$ , et  $208.71^\circ\text{C}$ ).

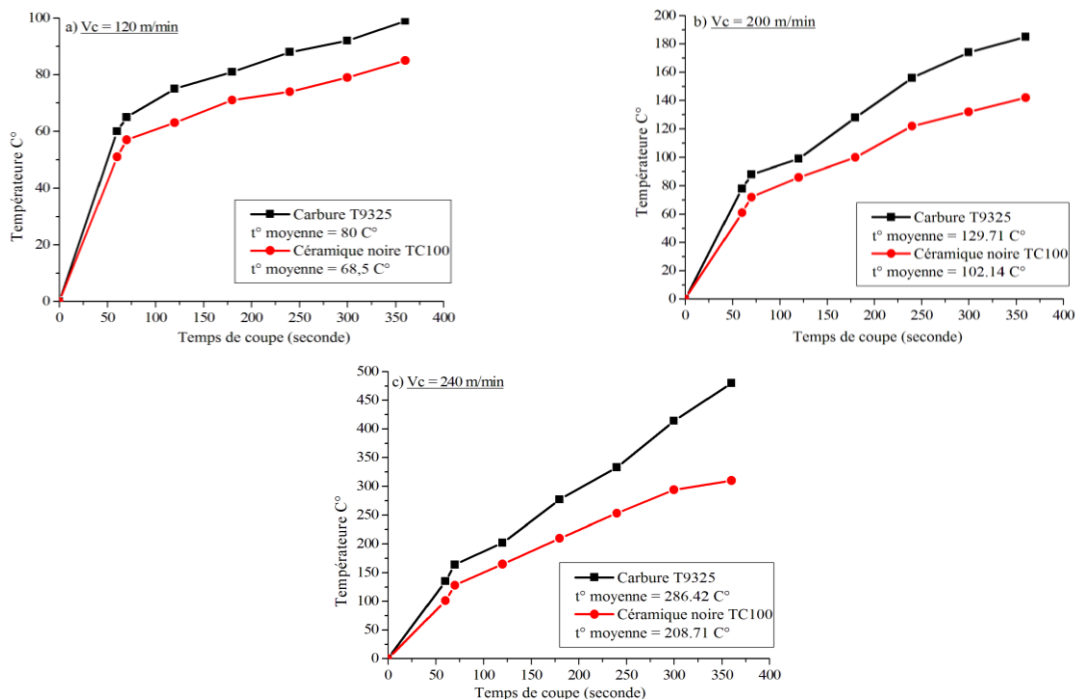


Figure V. 16. Evolution de la température de coupe en fonction du temps à différentes vitesses de coupe ( $V_c = 120, 200$  et  $240$  m/min) avec la céramique noire TC100 et carbure T9325, à  $a_p = 0.2$  mm,  $f = 0.084$  mm/tr.

La comparaison entre les courbes de la figure V.16 (a, b et c) montre que pendant l'usinage avec des plaquettes de céramique noire TC100 la température qui est atteinte par le pyromètre à infrarouge à distance est visiblement inférieure à celle obtenue par l'outil de

carbure T9325, Ceci s'explique par le fait que les matériaux à outils utilisés de céramique noire TC100 ont d'une part une grande résistance à l'usure.

#### V.4.2.1.2. Evolution de la température de coupe pour différentes valeurs de l'avance

Dans la figure V.17 (a, b et c), nous avons fixé les conditions de coupe avec une vitesse de coupe  $V_c = 180$  m/min, une profondeur de passe  $a_p = 0.2$  mm et fait varié l'avance ( $f = 0.084, 0.164$  et  $0.196$  mm/tr) pour étudier l'évolution de la température de coupe. D'après ces courbes, nous avons observé une augmentation de l'avance entraîne une augmentation de la température de coupe. Ce résultat est probablement dû au fait qu'une augmentation de l'avance génère un frottement important entre le matériau enlevé et l'outil de coupe, ce qui conduit également à une augmentation de l'énergie dans le système, ce qui génère une augmentation de la température de coupe.

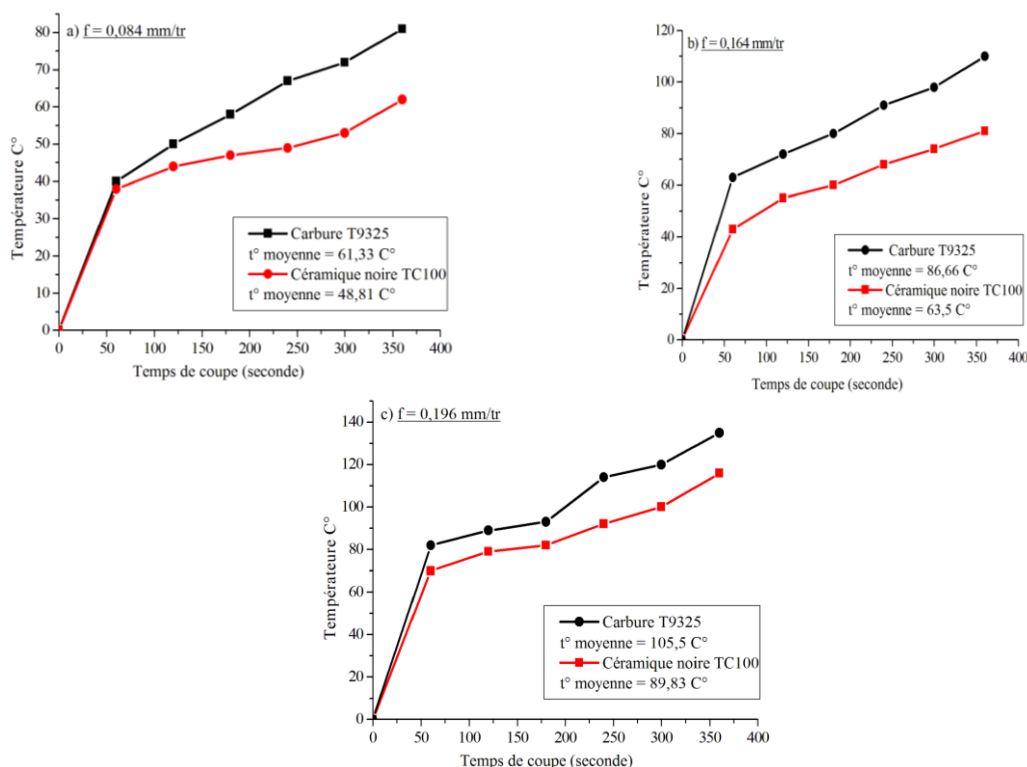


Figure V. 17. Evolution de la température de coupe en fonction du temps pour différentes valeurs de l'avance ( $f = 0.084, 0.164$  et  $0.196$  mm/tr) avec la céramique noire TC100 et carbure T9325, à  $a_p = 0.2$  mm,  $V_c = 180$  m/min

La comparaison entre ces courbes V. 17 (a, b et c) montrent que la céramique noire TC100 mieux que le carbure T9325, car les amplitudes des températures de la céramique noire TC100 sont moins que le carbure T9325.

### V.4.2.1.3. Evolution de la température de coupe en fonction du temps pour différentes profondeur de coupe

Les résultats de la variation de la température de coupe en fonction de la profondeur de coupe sont présentés sur la figure V. 18 (a, b et c). Nous avons fixé la vitesse de coupe  $V_c = 180$  m/min, l'avance  $f = 0.084$  mm/tr et varié la profondeur de passe  $a_p = (0.25, 0.5$  et  $1$  mm). Nous avons observé qu'avec l'augmentation de la profondeur de passe, l'épaisseur de copeau devient très importante ce qui conduit à une augmentation du volume de métal à déformer et cela donne des températures de coupe importantes pour les trois cas de profondeur de passe, et cela quelque soit le type de matière de l'outil. On constate toujours que la céramique est meilleure que le carbure.

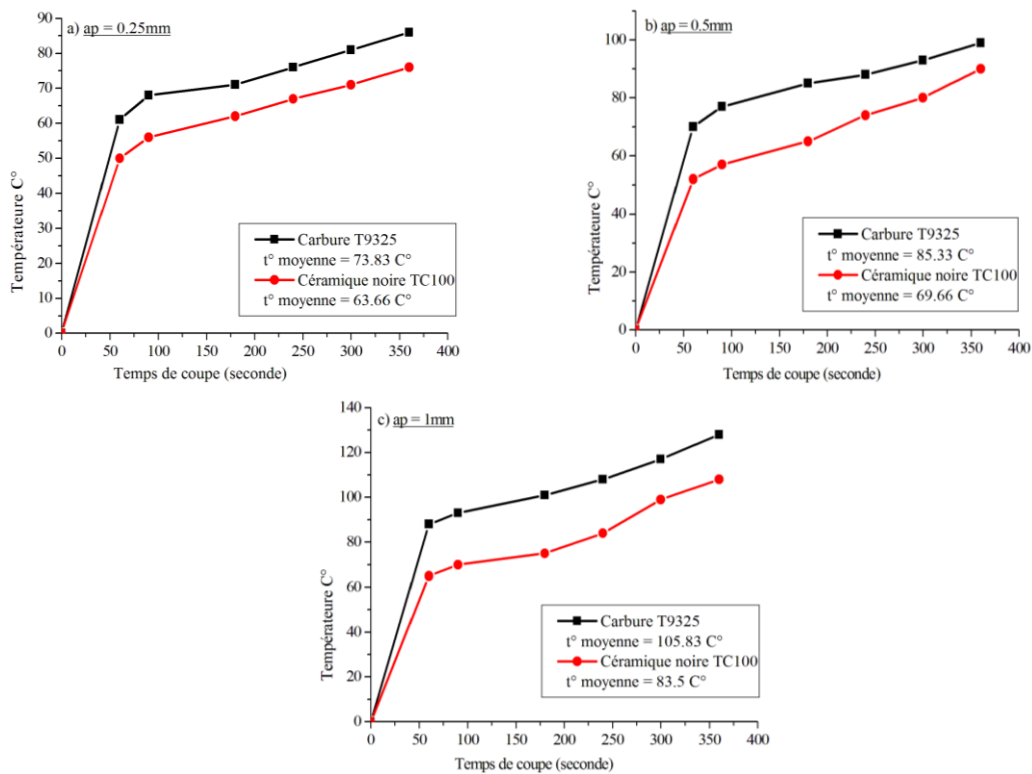


Figure V. 18. Evolution de la température de coupe en fonction du temps pour différents profondeur de coupe ( $a_p = 0.25, 0.5$  et  $0.1$  mm) avec la céramique noire TC100 et carbure T9325, à  $f = 0.084$  mm/tr,  $V_c = 180$  m/min

## V.5. Simulation du critère de la température

### V.5.1. L'évolution de la température de coupe en fonction du temps à différents défauts créés

Le but de ce point, est de déterminer l'effet de la température sur l'usure de l'outil de coupe. Pour voir cet effet, nous avons utilisé et travaillé uniquement sur l'outil de carbure, parce que c'est un outil qui est rapidement érodé et affecté par la température.

Nous avons pris trois cas des défauts ( $V_b = 0.1, 0.2$  et  $0.3\text{mm}$ ) comme illustré à la figure IV.5 avec un outil de carbure sans défaut, en suite nous avons laissé l'outil fonctionner pendant deux minutes (120s). Pendant cette période, nous avons divisé le temps de l'outil en sept sections (60, 70, 80, 90, 100, 110 et 120s), puis nous avons obtenu les résultats indiqués et représentés sur les figures V.19 et V.20.

La figure V.19, représente l'évolution de la température de coupe en fonction du temps ( $V_b = 0.1, 0.2$  et  $0.3\text{mm}$ ). Nous avons remarqué que le cheminement de la température est irrégulier et change en fonction du temps et avec les défauts créés. En plus, on trouve que le contact sans défaut génère une température moyenne  $69.477\text{C}^\circ$  dans un temps 120s, alors que le contact avec défaut produit une température variable avec la largeur du défaut : pour les défauts avec  $V_b = 0.1, 0.2$  et  $0.3\text{mm}$ , la température moyenne augmente de l'ordre de 2.544%, 4.859% et 6.0882% respectivement.

En fait, les courbes des sept sections sont identiques l'un sur l'autre mais pour voir mieux l'augmentation de la température en fonction du temps, j'ai séparés le temps en sept sections (60, 70, 80, 90, 100, 110 et 120s) puis nous avons obtenu les résultats de la température moyenne qui sont illustrent dans les légendes de figure V.19.



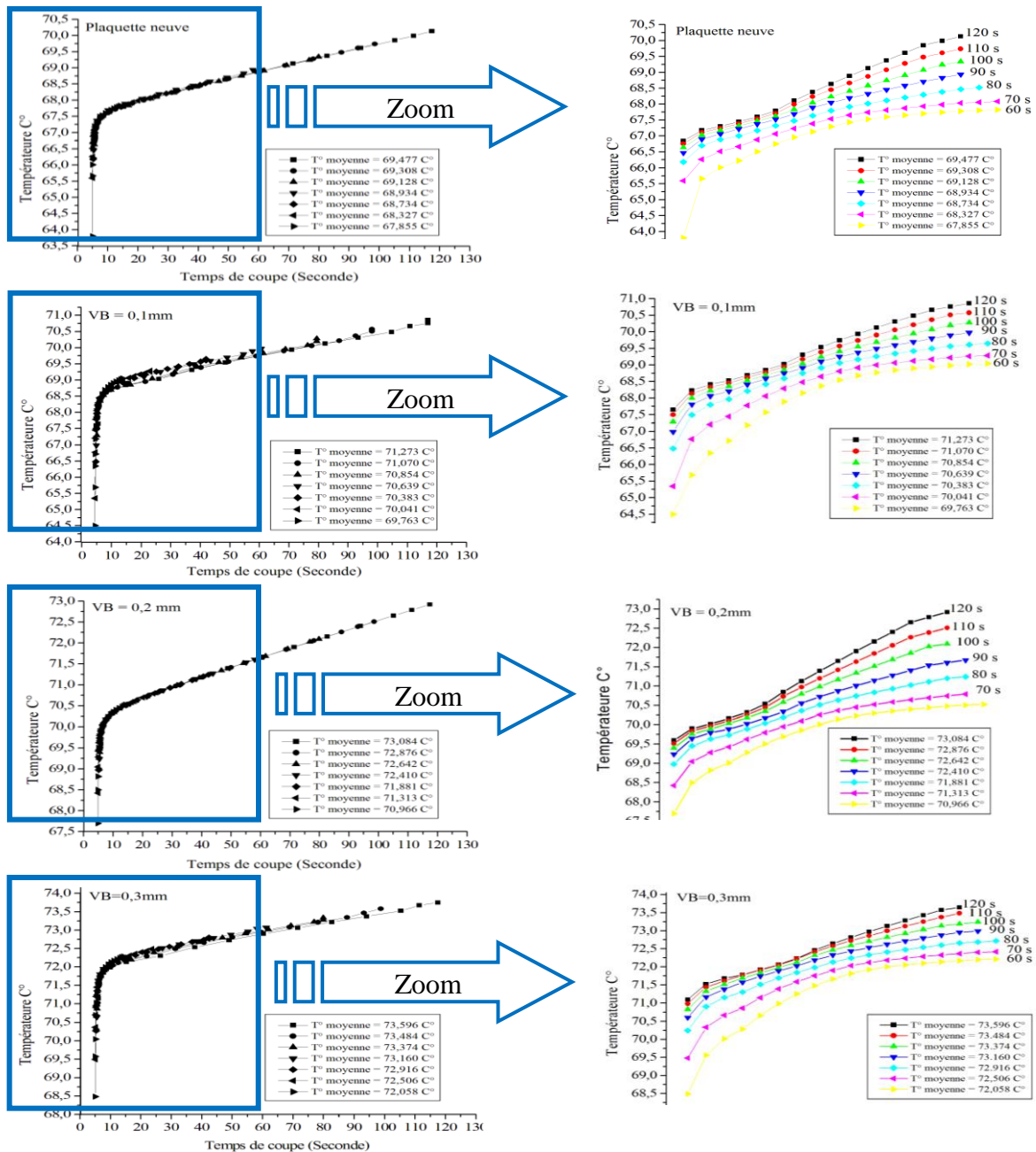
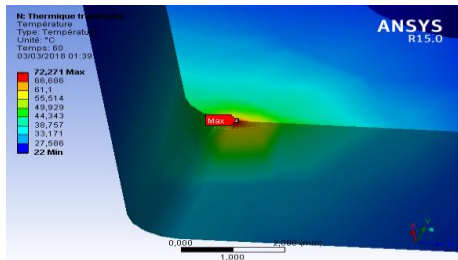


Figure V. 19. Evolution de la température de coupe en fonction du temps à différents défauts créés (Vb = 0.1, 0.2 et 0.3mm) avec un outil de carbure, à  $a_p = 1$  mm,  $f = 0.084$  mm/tr et  $V_c = 180$ m/min

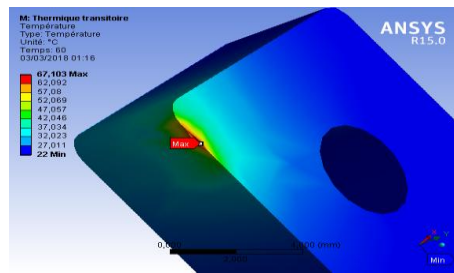
En fait, les courbes étaient identiques mais pour voir mieux l'augmentation de la température en fonction du temps, j'ai séparés le temps en sept sections (60, 70, 80, 90, 100, 110 et 120s) puis nous avons obtenu les résultats de la température moyenne qui sont illustrent dans les légendes suivantes:

La figure V.20, représente la distribution des températures simulées par ANSYS 15 pour différents défauts créés à un temps = 60s. Le résultat est un changement de la face de contact pièce-outil avec les changements dans les défauts qui ont été créés. De plus, une constatation peut être vue sur la zone rouge une augmentation de l'évolution de la hauteur

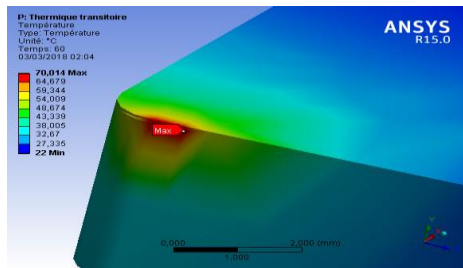
du défaut qui a été créé. De cela, on peut déduire que lorsque la surface n'est pas lisse, une augmentation de la température est constatée.



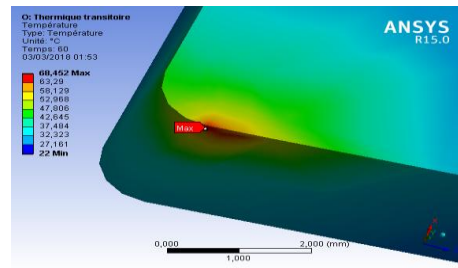
Plaque avec défaut VB max = 0,3mm



Plaque neuve



Plaque avec défaut VB max = 0,2mm



Plaque avec défaut VB max = 0,1mm

Figure V. 20. Distribution des températures simulée par ANSYS 15 pour différents défauts créés à un temps = 60s

### V.5.1.1 Validation des résultats expérimentalement

Pour la validation des résultats expérimentaux, nous avons travaillé sur trois étapes avec différentes usures ( $V_b = 0.1, 0.2$  et  $0.3\text{mm}$ ), puis mesuré la température à l'aide d'un pyromètre à infrarouge à distance au niveau du contact outil-pièce pendant 120s.

La comparaison de la température pour les deux études (modélisation et expérimentale) est représentée sur la figure V.21.

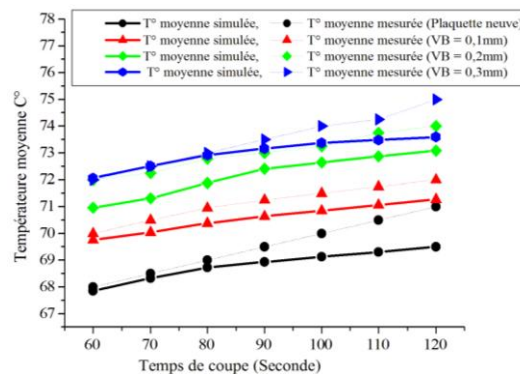


Figure V. 21. Comparaison de la température simulée par ANSYS avec le temps par les divers défauts créés à  $a_p = 1\text{mm}$ ,  $V_f = f = 0.084\text{ mm/tr}$

D'après cette présentation comparative, on a observé une convergence de résultats. En plus, ces résultats sont satisfaisants et proches de la réalité parce que chaque fois qu'il y avait de l'usure, il y avait une température élevée.

### V.5.2. L'influence de la profondeur de coupe sur le champ de température

Le champ de température dans la zone de coupe pour différents profondeur de coupe est représenté sur la figure V.22. On observe que la température maximale se développe à une certaine distance de l'arête de coupe, mais elle ne se développe pas sur la pièce à usiner. En plus, la largeur de la zone rouge augmente avec l'augmentation de la profondeur de coupe.

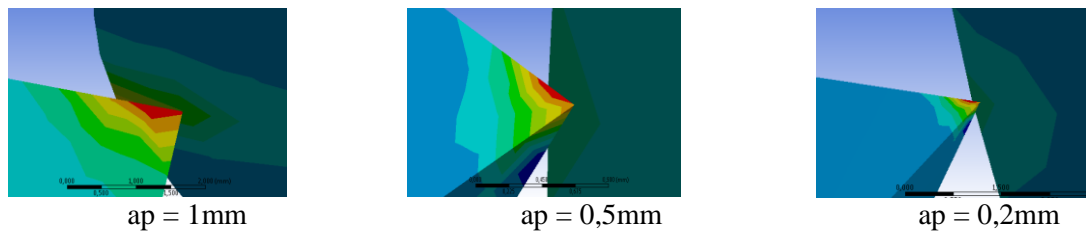


Figure V. 22. Propagation de la température dans la zone de coupe pour différents profondeur de coupe à  $f = 0.084$  mm/tr et  $V_c = 180$ m/min

Lorsque la partie active de l'outil augmente, l'évacuation de chaleur dans le corps de l'outil s'améliore et se déplace vers la pièce. En plus, la quantité de chaleur en fonction de la profondeur de passe s'accompagne de l'accroissement de la longueur engagée de l'arête tranchante.

#### V.5.2.1. Validation des résultats expérimentalement

La figure V.23, montre l'influence de la profondeur de coupe sur la température lors du tournage de l'acier 90 Mn Cr V8 modélisé par le logiciel des éléments finis ANSYS 15, il est observé que la température de coupe augmente à mesure que la profondeur de coupe est également augmentée.

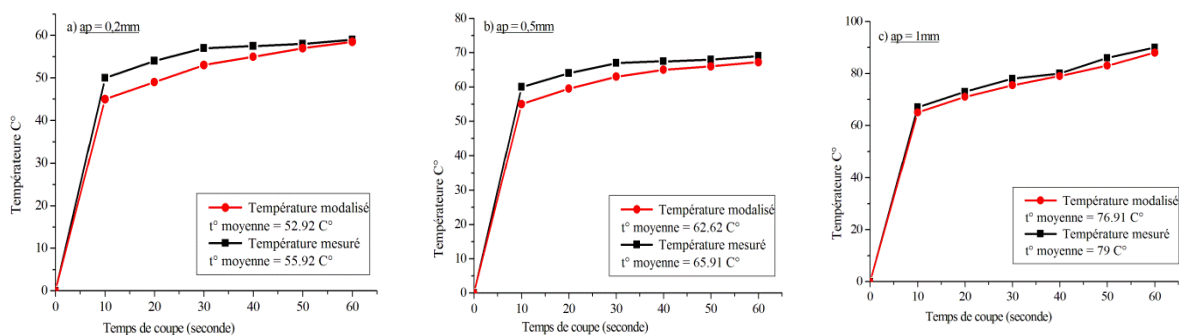


Figure V. 23. Comparaison entre l'étude expérimentale et simulation pour la propagation de la température dans la zone de coupe pour différents profondeur de coupe en fonction du temps = 60s,  $f = 0.084$  mm/tr,  $V_c = 180$ m/min

Les résultats de la comparaison entre l'étude expérimentale et l'étude simulation sont représentés sur la figure V.23 (a, b et c). La comparaison montre que les amplitudes des températures atteintes augmentent en fonction de profondeur de coupe. D'une manière générale on observe que l'augmentation de la profondeur de passe provoque l'accroissement de la quantité totale de la chaleur dégagée et ceci pour les deux études.

## V.6. Contexte d'usinage

Le but est de rechercher les critères de dégradation des outils de coupe utilisés avec une analyse des revêtements des nuances étudiées.

### V.6. 1. Présentation du matériel et la discussion des résultats

Afin de mieux comprendre les critères de dégradation, l'utilisation d'un autre acier nous a semblé plus utile avoir d'autres résultats que nous pourrions comparer et discuter avec ceux utilisés précédemment. L'acier utilisé dans cette partie est l'acier AISI 4140 (42CrMo4) qui est un acier faiblement allié, utilisé dans l'industrie automobile et pour la fabrication de bielles. Les dimensions des pièces sont 80 mm de diamètre et 150 mm de longueur. Les outils utilisés sont des outils spéciaux mentionnées ci-dessous, leurs caractéristiques géométriques sont visibles dans l'annexe E :

- a) PCBN (Polycrystalline cubic boron nitride) (CB7025) : CNGA 120408 S 01030 AWH (Figure V. 27a)
- b) Céramique mixte (CC650) : SNGN 12.04.08 (Figure V. 27b)

Lors de la réalisation des essais, deux porte-outils ont été utilisés : PCLNR2525M12 et PSBNR 2525 M12 (Tableau V.7). Les caractéristiques géométriques des porte-outils se trouvent dans l'annexe E.

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais d'évolution des rugosités (essais de l'usure) varient avec la vitesse de coupe ( $60 \leq V_c \text{ (m/min)} \leq 350$ ), l'avance ( $0.08 \leq f \text{ (mm/tr)} \leq 0.2$ ) et la profondeur de passe  $0.1 \leq a_p \text{ (mm)} \leq 1$ ).

Le contrôle et les mesures ont été effectués avec les mêmes instruments utilisés auparavant pour mesurer la rugosité et l'usure lors de l'étude expérimentale précédemment (Rugosimètre 2D : «MITUTOYO SURFTEST SJ 301» pour la rugosité et microscope optique 2D, type Wmm 200/100 pour l'usure.

**V.6.1. Influence de la condition de coupe sur la rugosité de la surface**

L'effet des conditions de coupe (vitesse de coupe (Vc), avance (f) et profondeur de coupe (ap)) sur la rugosité est représenté clairement sur la figure V. 24 (a-b et c). D'après ces courbes, on constate que lors de la diminution de la vitesse de coupe, de l'augmentation de l'avance et de la profondeur de coupe, l'état de surface se dégrade. Selon l'allure de chaque nuance, on ne déduit que le PCBN à un meilleur état de surface que le CC650.

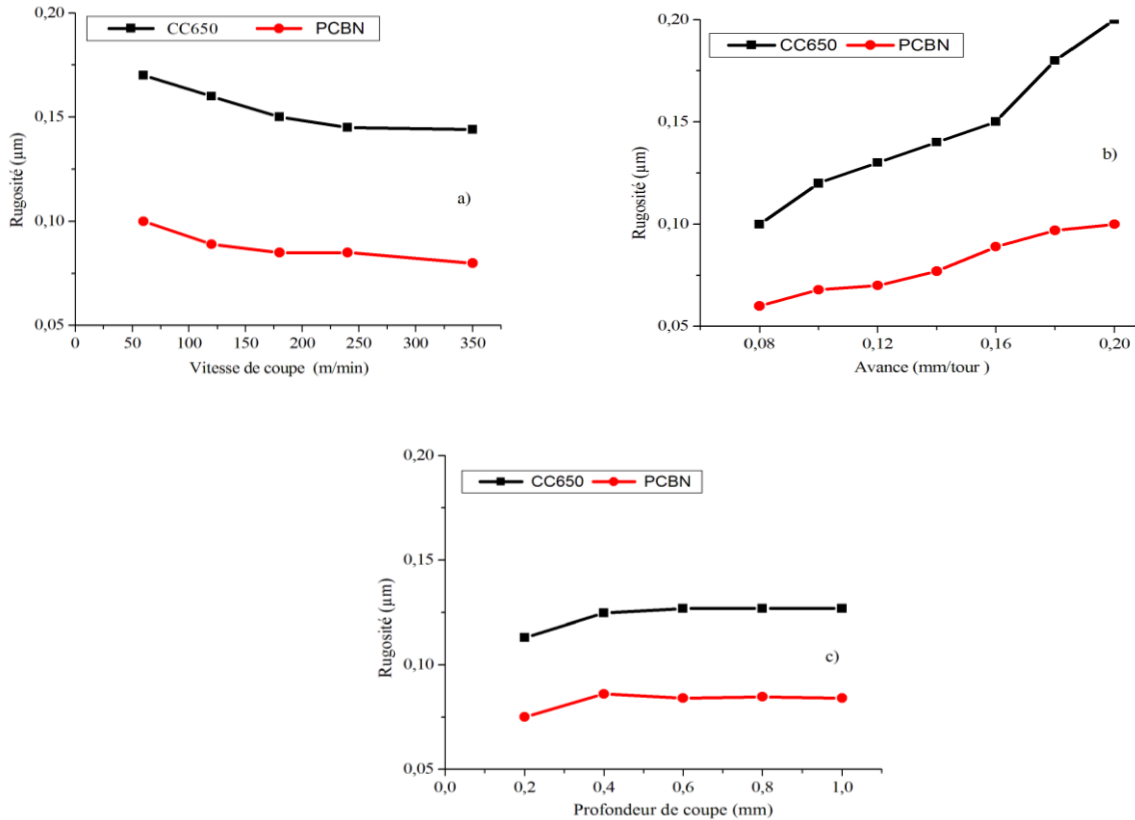


Figure V. 24. Effet des paramètres de coupe (Vc,f et ap) sur la rugosité avec Vc = 180 m/min et ap = 0,2 mm

**V.6.2. Modèle de rugosité en fonction des conditions de coupe**

Suivant le plan d'expériences réalisé pour différentes combinaisons de conditions de coupe (Vc, f, ap), le modèle type Gilbert a été utilisé pour calculer le modèle mathématique suivant :

Tableau V. 3. Modèle mathématique de la rugosité obtenue

Matériau de coupe	Modèles mathématiques	R <sup>2</sup>
PCBN	$R_a = e^{2,110} \times V_c^{-0,025} \times f^{-0,235} \times a_p^{0,001}$	0.85

### V.6.3. Effet de l'usure sur la durée de vie de l'outil

La figure V.25 (a, b) représente la comparaison de la durée de vie des outils PCBN et CC650. Après le contact entre pièce-outil, on a remarqué que la quantité de matière enlevée de la pièce (sous forme de copeaux) et de la plaquette (se forme d'usure), donne une diminution dans le poids des plaquettes.

Dans la figure V.25a, la durée de vie de l'outil du CC 650 diminue de 60% entre les vitesses de coupe de 60 à 240 m/min avec un rapport de vitesse de 1,62. Par contre, on constate que la durée de vie de l'outil dans PCBN diminue de 50% à des vitesses de coupe de 60 à 240 m/min.

Sur la figure V. 25b, la durée de vie de l'outil dans le CC 650 diminue de 53,86% à des vitesses de coupe de 60 à 240 m / min avec un rapport de vitesse de 1,60. Par contre, on constate que la durée de vie de l'outil PCBN diminue de 43% à des vitesses de coupe de 60 à 240 m/min.

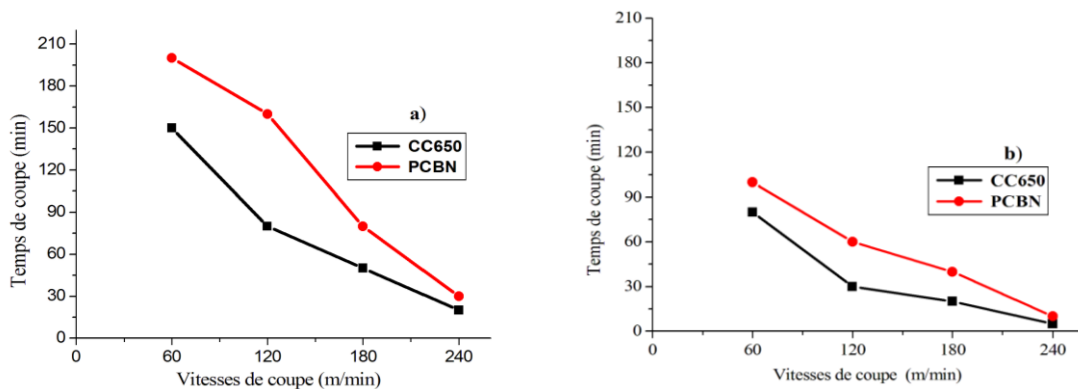


Figure V. 25. Comparaison de la durée de vie des outils pour PCBN et CC 650 à différentes vitesses de coupe avec a)  $f = 0,08$  mm / tour,  $a_p = 0,5$  mm, b)  $f = 0,3$  mm / tour,  $a_p = 0,5$  mm

Pour mieux comprendre le phénomène, on a pesé les plaquettes après chaque vitesse de coupes et on a constaté que la durée de vie de l'outil diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance. De plus, on a observé que la durée de vie de l'outil du CC 650 est plus courte que celle du PCBN.

### V.6.4. Effet du temps de coupe sur l'usure

Les figures V.26 (a, b et c) illustrent l'évolution de l'usure en dépouille VB pour le PCBN et CC 650 en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe.

Dans la plage de comparaison entre ces figures on a remarqué qu'il y avait une très basse usure en dépouille VB durant la première minute d'usinage avec une vitesse de 90

m/min, au-delà de 180 m/min, l'usure en dépouille VB s'accroît fortement et provoque une rupture l'arête de coupe. Au-delà de la vitesse de coupe de 240 m/mn, on constate une usure est très rapide, ce qui influe négativement sur l'état de surface, d'une part, d'autre part, on a noté que l'augmentation de l'avance  $f$  entraîne une augmentation de VB.

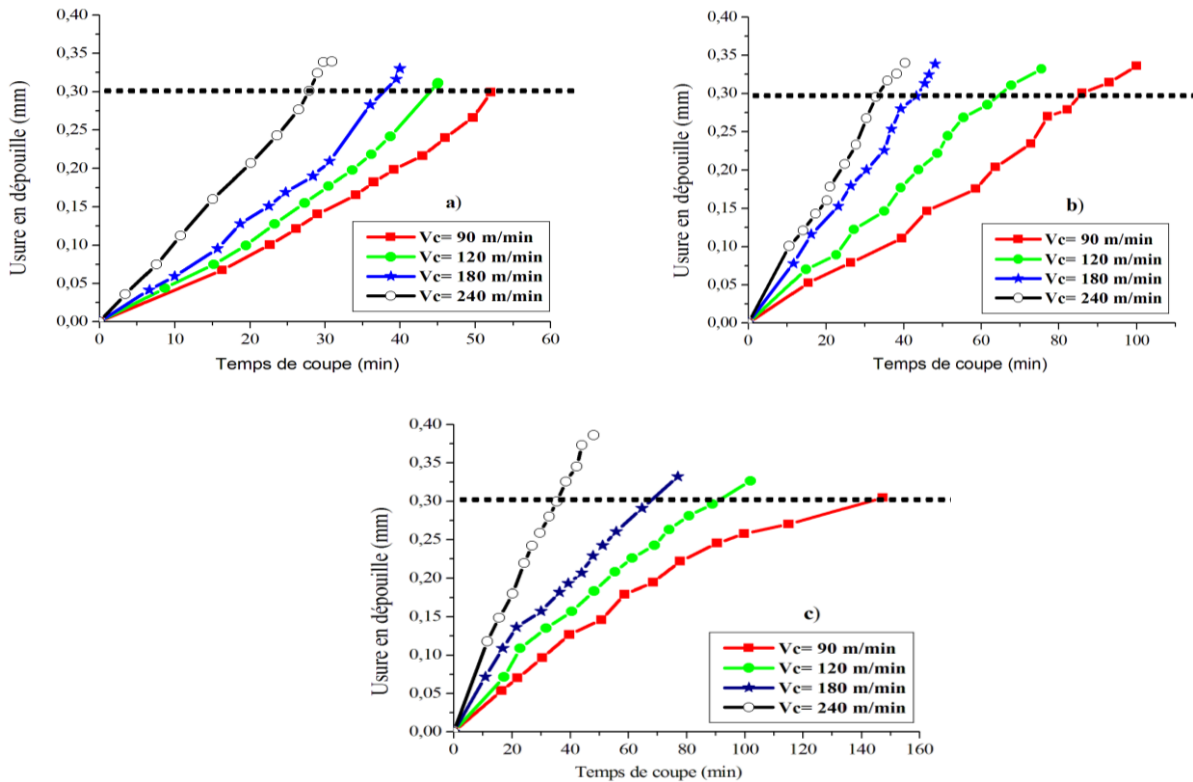


Figure V. 26. Effet du temps de coupe sur l'usure en dépouille pour a)  $f = 0,08$  mm/tour, b)  $f = 0,12$  mm/tour et c)  $f = 0,16$  mm/tour

## V.7. Conclusion

L'étude de l'état de surface est un facteur principal dans le domaine de l'industrie. Pour cela, on a fait une étude sur la minimisation des rugosités et l'usure afin d'améliorer l'état de surface et augmenter la durée de vie de l'outil et éviter l'endommagement rapide des outils de coupe. Nos études sont basées sur la méthode de planification des expériences, où les paramètres variables sont : la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur les différentes nuances de coupe utilisées lors de la première étude expérimentale qui sont : la céramique noire TC100 et le carbure T9325, mais dans la seconde étude expérimentale (contexte d'usinage), on a utilisé la céramique mixte et le PCBN). La comparaison des résultats montre que l'acier usiné avec de la céramique noire TC100 et le PCBN donne de très bons états de surface comparativement au carbure T9325 et la céramique mixte.

D'une part, le modèle mathématique de la rugosité obtenue exprime la relation qualitative entre le critère de rugosité ( $R_a$ ) et les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ). 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.

D'autre part, le contact entre outil-pièce génère une température ou une quantité de chaleur. Dans ce contexte, nous avons modélisé ce phénomène à travers ANSYS 15, ce qui nous a donné des résultats satisfaisants par rapport à l'étude expérimentale qui confirme que la chaleur augmente avec le défaut et la forme de la surface de contact.



## Conclusion générale et Perspectives

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière à l'aide d'une machine-outil destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans un intervalle de tolérance donné. L'enlèvement de matière est obtenu par une action mécanique de compression jusqu'à cisaillement mettant en œuvre un outil coupant en contact avec la pièce à usiner, où le phénomène de coupe ne peut être obtenu que si l'outil est plus dur que la pièce.

Dans cette optique, les procédés de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de répondre aux exigences industrielles imposées, qu'elles soient économiques ou écologiques, etc. Afin de réaliser rapidement des pièces mécaniques avec la qualité demandée et à moindre coût.

La formation du copeau s'accompagne d'un important dégagement de chaleur dû au frottement du copeau glissant sur la face de coupe et au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil. L'échauffement de la partie active est fonction de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et croît avec elle. Donc la température de la partie active de l'outil doit être réduite pour ne pas entraîner sa perte de dureté.

Le travail présenté dans ce manuscrit de thèse se base sur deux approches expérimentales et simulation.

De l'expérimentale les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ❖ Les conditions d'usinage ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) 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.
- ❖ Les mesures des rugosités obtenues avec la céramique noire TC100 sont comparables avec ceux de la rectification (ne dépasse pas  $1\mu\text{m}$ ). Ceci offre à la céramique noire TC100 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.
- ❖ Après quelques minutes de travail, nous avons remarqué l'apparition de vibrations, d'étincelles et d'écoulement de copeaux rouges, rendant l'usinage par la suite impossible. En plus, ces observations se produisent lorsque les vitesses de coupe sont supérieures à 220 m/min. Pour cette raison, elles sont déconseillées à cause de l'usure très rapide de l'outil lors de l'usinage de l'acier 90 Mn Cr V8 à 61HRC, ce qui n'est pas intéressant sur le plan industriel.

- ❖ La seconde étude expérimentale (contexte d'usinage) est appliquée à l'usinage à sec de l'acier 42CrMo4 avec la céramique mixte et le PCBN. Selon cette étude, on constate que le PCBN est plus performant que la céramique mixte en termes de résistance à l'usure mais le seul inconvénient est très coûteux à l'achat.
- ❖ Lors d'une opération d'usinage, les outils de coupe sont exposés à la détérioration avec le temps ce qui nuit à la qualité de l'usinage et la productivité. Donc à travers l'étude expérimentale nous avons bien confirmé que la dégradation des outils de coupe est basée sur deux critères :
  - Le premier critère est basé sur l'évolution de l'usure, telle que l'usure en dépouille VB qui se présente sous la forme d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête et caractérisée par une largeur limite VB. Les résultats qui concernent ce critère montrent que le choix des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) est des facteurs très importants une influence sur le phénomène d'usure.
  - Le deuxième critère est basé sur l'évolution de la température dans la zone de coupe. À travers les essais expérimentaux on constate que la majeure partie de la quantité de chaleur générée est évacuée par le copeau et l'augmentation de la température sur la face de coupe accélère l'usure ce qui donne un mauvais état de surface.
- ❖ A travers le modèle mathématique de rugosité nous pouvons prédire pour des conditions d'usinage choisies dans les limites du modèle, la rugosité avant même d'entreprendre des essais.

Dans la simulation est effectuée sur deux types d'outils de coupe avec la même propriété mécanique et physique : Le premier est un outil sans défaut et le deuxième est un outil avec des défauts. Ensuite, l'étude thermique commence à travers laquelle on a pu tirer les points suivants :

- ❖ Grâce aux trois défauts qui ont été créés ( $V_b = 0.1, 0.2$  et  $0.3\text{mm}$ ) sur la surface de dépouille nous avons pu prédire la température produite entre le point de l'outil et la pièce. Aussi nous avons confirmé que la température produite entre les deux corps est un critère qui augmente la dégradation de l'outil de coupe.
- ❖ L'augmentation des paramètres de coupe provoque une augmentation de la température de coupe dans l'outil, donc la minimisation de cette dernière nécessite la minimisation des paramètres de coupe, notamment la profondeur de coupe.
- ❖ Finalement, la petite comparaison entre les deux études expérimentales montrent clairement que l'état de surface est le résultat des conditions de coupe choisies avec la forme

du rayon du bec de l'outil et d'autre part, le critère de l'usure est contrôlée à travers les conditions de coupe choisies.

### **Perspectives**

Les problèmes vibratoires sont à l'origine de nombreux problèmes lors des opérations d'usinage. Dans le but de limiter leur influence sur la qualité de la pièce ou sur le moyen de production et donc sur le coût de revient ou sur la rentabilité, de nombreux moyens doivent être mis en œuvre pour traiter les différents types de vibrations et de leurs effets sur la pièce finie. Il est également question des moyens développés pour contrecarrer leurs effets.

A court terme, l'étude de la température dans la zone de contact pièce-outil en utilisant une caméra thermique est l'un des points nécessaires pour l'usinage. Cette température aide à mieux comprendre les phénomènes thermiques entre la pièce et l'outil et en conséquence la formation d'un cratère sur la face de coupe des outils.

A long terme, étudier les états de surfaces ainsi que les critères de dégradations qui résultent de la fabrication. Pour cela, il est nécessaire de développer des modèles analytiques pour pouvoir les déterminer. La présence de rugosité sur les surfaces en contact modifie la distribution normale de pression. Afin de prévoir la durée de vie des outils de coupe, il est d'abord nécessaire de déterminer ce champ de pression en utilisant soit un modèle numérique soit une approche analytique.

Enfin, il faut envisager des mesures de température dans la zone de contact et étudier le profil de distribution de cette température à l'interface outil-copeau. Il est nécessaire aussi d'effectuer une simulation numérique par éléments finis qui montreraient la répartition des pressions le long du contact entre l'outil et la pièce, et ainsi mieux prévoir les modes de frottements existants.

## Références

- [1] Benglia M. Sélection Optimale des Conditions Coupe d'Opération de Tournage à Passe Multiple, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla. 2014
- [2] Alain Passeron, « Tournage », Article BM 7086, Technique de l'ingénieur, 1997
- [3] Maamri Deyaeddine, NECIB Abderrahmane. Optimisation des Paramètres de Coupe pour Minimiser la Consommation d'Energie Pendant le Tournage. Mémoire master A cadimique, Université Kasdi Merbah Ouargla. Soutenu le 07/06/2015
- [4] Alexandre Toumine, «Cours D'Usinage », Groupe Conception Production, INSA de. Lyon, France. 2007
- [5] Bensaada S. Coupe des métaux, Edition Université Biskra, Alger 1988
- [6] Gara Souhir, Cours interactif : Le tournage, à Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul. 2015/2016
- [7] Rami. Mohammad, Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse. 2011
- [8] Benlahmidi S. Aouici H. TOURNAGE, Nationale Supérieure de Technologie. 2013
- [9] TchadjaKagnaya M. Contribution à l'identification des mécanismes d'usure d'un Wc-6%Co en usinage et par une approche tribologique et thermique, Thèse de Doctorat, L'école nationale Supérieure des mines de Paris. 2009
- [10] Aurelien Maurel-pantel. Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : application à l'identification paramétrique des lois de comportement. Thèse de doctorat pour l'ingénieur et microtechniques. Université de Franche-Comté. Soutenu 08/09/2009
- [11] Remli Fethi. L'effet d'usinage par tournage sur un acier XC18, Thèse de doctorat en Génie Mécanique, Université Mohamed Khider – Biskra, Soutenu le 16 octobre 2016
- [12] Vergnas J. Usinage : Technologie et Pratique, Génie Mécanique DUNOD, ISBN 2- 04-011186-7, BORDAS. Paris 1982
- [13] C.X. Feng, An experimental study of the impact of turning parameters on surface roughness, Proceedings of the 2001, Industrial Engineering Research Conference, Paper N 2036. 2001.
- [14] M. Habak, Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6. Thèse de doctorat, ENSAM d'Angers. Déc 2006

- [15] Astakhov V.P. Geometry of single point turning tools and drills fundamentals and practical application. London : Springer. 2010
- [16] Poulachon G. Usinabilité des matériaux difficiles : application aux aciers durcis. Techniques de l'ingénieur, BM7048. 2004
- [17] Pagés C. Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition, thèse de doctorat. 2003
- [18] TARMITAL. Tournage dur. pp.6-12. Mai 2005
- [19] Son, S.M. Lim and J.H . AHN. Effect of friction coefficient on minimum cutting thickness in micro cutting. International Journal of Machine Tools & Manufacture. p p. 529-535. 2005
- [20] Madani Mohammed Saïd et Ghouini Rabah. Amélioration des paramètres technologiques de coupe en tournage, Mémoire de fin d'étude du diplôme de master en mécanique. Université KasdiMerbah – Ouargla. Juin 2011
- [21] Usure des outils, Production Génie Mécanique, Université de Lille, France, 2017
- [22] Belloufi A. Cours Procédés de Fabrication, Master Maintenance Industrielle, Université KasdiMerbah Ouargla. 2010
- [23] Laheurte Raynald. Cahuc O. et Darnis A. Gérard. Evaluation de l'énergie mise en jeu et du comportement des outils de coupe dans l'usinage, mise en forme des métaux / CM – 09 – 015, Université Bordeaux 1. France. 2002
- [24] Laheurte Raynald. Application de la théorie de seconde gradient a la coupe des matériaux », thèse de doctorat, Université Bordeaux I. France, 2004
- [25] Lamarat Abdelmadjid et Touggourt Lakhdar. Prédiction de la température de coupe de l'acier AISI D3 : Application au tournage en utilisant la méthode de surface de réponse (RSM), Mémoire master académique en génie productique, Université Kasdi Merbah Ouargla Soutenu le : 31 /05/ 2017
- [26] Yaltese Mohamed Athmane. Étude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, université Badji Mokhtar-Annaba, génie mécanique, productique. 2005
- [27] Ramadna, Mohamed. Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN, thèse de doctorat, à L'INSA de Lyon, soutenue le 13/06/2001
- [28] Jacques Boulanger. Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface, sous la direction Eric Felder, BM 74 technique de l'ingénieur. Janvier 2000

- [29] Cheung C.F, W.B. Lee. A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra precision diamond turning. *International Journal of Machine Tools& Manufacture* (40) 979–1002. 2000
- [30] Bedrin. C, Roumesy. B. Usinage par outil coupant, Fascicule 1-2, INSA-Lyon, 1989
- [31] CETIM, Les états de surface -Description-Elaboration-Mesure, Note technique N°18, 1979
- [32][http://www.sandvik.coromant.com/frfr/knowledge/materials/measuring\\_surfaces/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/frfr/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/default.aspx)
- [33] Enache S. La qualité des surfaces usinées, Dunod, Paris 1972
- [34] Dawson. T. G. Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools, Georgia institute of technology. 2002
- [35] Poulachon. G, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis, Thèse de doctorat de l'ENSAM de Cluny, 1999
- [36] Gautier LIST. Étude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-CO par la caractérisation de l'interface outil copeau application à l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium Aéronautique AA2024 T351, Thèse de Mécanique et Matériaux, P156 paris, décembre 2004
- [37] Rech.J, Kusiak.A and Battaglia.J.L. Tribological and thermal functions of cutting tool coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 186, PP 364-371. 2004
- [38] Abdelkrim Mourad. Etude de l'influence de la température de coupe dans l'usure des outils et sur les caractéristiques métallurgiques des alliages usinés, Thèse de magistère, Université de Batna, Année 2008
- [39] M. Abdelghani. L'évolution de la température de coupe au niveau de l'interface outil pièce en tournage ». Université de Ouargla. 2014
- [40] Poulachon G, Bandyopadhyay B.P, Jawahir S, Pheulpin S et Seguin E. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. *International journal of machine tools and manufacture*. Vol 43, pp 139-144. 2003
- [41] M. Habak, Etude de l'Influence de la Microstructure et des Paramètres de Coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6, Thèse Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris, 2006
- [42] M. Abdelkrim, Etude de l'influence de la température de coupe dans l'usure des outils et sur les caractéristiques métallurgiques des alliages usinés”, Thèse de Magister, Université de Batna, 2008

- [43] Grzesik. W, Bartoszek. M et Nieslony P. Finite element modeling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165:1204 – 1211. 2005
- [44] Kumar A, Durai A et Sornakumar T. The effect of tool wear on tool life of alumina based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic steel. *Journal of material processing technology*. Vol. 173, pp 151-156. 2006
- [45] Davim .J.P. et Figueira. L. Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel, *J. Eng. Manuf*, pp. 625-633, 221. 2007
- [46] S. Benchiheb, L. Boulanouar. Influence des Paramètres de Coupe sur la Tenue du CBN 7020 Lors du Tournage Dur. 4th International Conférence on Computer Integrated Manufacturing CIP' . 2007
- [47] T.H. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane, *Metal Machining-Theory and Application*, Arnold, 177-198,265. 2000
- [48] W. Grzesik, *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*, Elsevier. 2008
- [49] Yallese M.A, chaoui K, zeghib N, Boulanouar L et Rigal J.F. hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Journal Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp 1092-1104. 2009
- [50] Bouchelaghem H, Yallese MA, Amirat A, Mabrouki T, Rigal JF, Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3), *Machining Science and Technology*, Vol. 14: 4, pp. 471-501, 2010
- [51] Koné. F, Czarnota. C, Haddag. B et Nouari.M. Etude expérimentale et numérique de l'usinage d'un acier à haute résistance avec une plaquette de coupe revêtue, *Laboratoire d'énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, LEMTA CNRS-UMR 7563, Ecole des Mines de Nancy (ENSMN), France*. 2011
- [52] Pavel KOVAČ, Borislav SAVKOVIĆ, Branislav SERDAR et Milenko SEKULIĆ. Modeling mechanical and thermal load of cutting tool. *ACTA Technical Corviniensis –bulletin of Engineering. University Politehnica Timisoara, ROMANIA. TOM.IV*. pp 77-80. 2011
- [53] Fnides B, Boutabba S, Fnides M, Aouici H, Yallese MA, Tool life evaluation of cutting materials in hard turning of AISI H11, *Estonian Journal of Engineering*, pp 143–151, 2013

- [54] Rupinder S, Dureja JS, Comparing Taguchi Method and RSM for Optimizing Flank Wear and Surface Roughness During Hard Turning of AISI D3 Steel, Proceedings of the International Conference on Research and Innovations in Mechanical Engineering, pp 139– 152, 2014
- [55] Babouri Mohamed Khemissi. Surveillance de l'évolution de l'usure d'un outil de coupe en tournage. Thèse de doctorat. Université 08 Mai 1945 Guelma. 2016
- [56] Kacimi Nouredine et Tafraoui Ahmed. Contribution à l'étude tribologique d'endommagement des outils de coupes lors du tournage. Journal of Advanced Research in Science and Technology. ISSN: 2352-9989. Pp 439-456. 2017
- [57] Bessahraoui Moussa Mahdjoub Lahcene. Modélisation de la température de coupe par la méthode de surface de réponse en tournage à sec. Mémoire Master Academique. Universite Kasdi Merbah Ouargla. 2017
- [58] Philippe Depeyre. Fabrication mécanique, Faculté des sciences et technologies, Université de la Réunion, pp 1-17. 2005
- [59] Elbah Mohamed. Investigation expérimentale sur l'effet de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe en tournage en utilisant les techniques statistiques. Thèse de doctorat en génie Mécanique. Université 08 Mai 1945 Guelma. 2015
- [60] Bakhti Abdelbassit et Merzoug Aissa. Recherche de l'usure de l'outil de coupe lors du tournage d'éprouvettes pour l'essai de traction. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2017
- [61] Christian PAGÈS. Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage a sec de finition. Thèse de Doctorat en Mécanique. École Centrale de Lyon. 2003
- [62] P. Bagard, M. Palleau, Cetim Senlis. « L'usinage à grande vitesse vu par le CETIM » Plastiques Modernes et élastomères, N°505, (p 43 – 45). Mai 1995
- [63] Roumesy. B. Détermination des lois d'usure des outils de coupe. Machines-outils, N° 301, P 34-36. Mai 1975
- [64] Amri, B. Contribution à l'étude du comportement des matériaux modernes pour outils coupants, thèse de doctorat, INSA de Lyon, P137. 1987
- [65] A. B. Sandvik Coramant. Outil de tournage, produits pour l'usinage des métaux. Suède. 2002
- [66] AMPROBE. IR608A Infrared Thermometer, data Sheet. Glottertal, Germany. 2007
- [67] Aouici Hamdi. Étude de l'usinabilité de l'acier AISI H11 a l'état traite par le CBN7020, thèse de doctorat de génie mécanique, université 08 Mai 1945 Guelma, page 93-95.2012
- [68] Zellagui, Redouane. Modélisation du comportement à la fatigue et à la fissuration d'un boggie de train. Thèse de doctorat.2018



- [69] Bouaita Mounir. Étude, modélisation et simulation de l'usinage orthogonal par la méthode des éléments finis. Mémoire de master. Université Badj Mokhtar – Annaba. 2017
- [70] [http://simon.renouf.free.fr/master/contact\\_hertzien.doc](http://simon.renouf.free.fr/master/contact_hertzien.doc).
- [71] ALI. F. Modélisation et simulation thermomécanique de la coupe des métaux, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris. 2001
- [72] Johnson.G. R and Cook. W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, strain rates and high temperatures, 7th Int. SYMP. Ballistics, PP. 541-547. Année 1983
- [73] Benson. D.J. A mixture theory for contact in multi-material Eulerian formulations, J. Comput. Meth. Appl. Mech. Eng. 140. PP. 59–86. 1997
- [74] Raynald Laheurte. Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux, Thèse de doctorat des sciences physiques et de l'ingénieur, Université de Bordeaux, 2004
- [75] Pantale. O, Bacaria. J. L, Dalverny. O, Rakotomalala. R and Caperaa.S. 2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects. Elsevier B.V. Doi:10.1016/j.cma.12.062. 2003
- [76] Johnson.G.R and Cook.W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engrg. Fracture Mech. 21, PP 31-48. 1985
- [77] K. Palanikumar, L. Karunamoorthy, R. Karthikeyan, Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites, Materials and Design. 27 862-871. 2006
- [78] Yallese Mohamed Athmane, J.-F.Rigal, K. Chaoui et L. Boulanouar. «The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60 HRC)». IMechE, Part B: J. Engineering Manufacture, Vol. 219, Nb. 1, 35-56. 2005
- [79] O'sullivan D et Cotterell M, Temperature measurement in single point turning, J. Mater. Process. Technol. N°118, pp 301-308, 2001
- [80] Bacci M., J. Wallbank J., Cutting temperature prediction and measurement methods-a review, J. Mater. Process. Technol. N°88, pp 195-202, 1999
- [81] Geiskopf. F, CoLandon. Y et Duc E., Usinage à grande vitesse, Rapport ENS Cachan, LURPA, 1999
- [82] Avevor. Y, Moufki. A « Influence de la vitesse de coupe sur les conditions thermomécaniques à l'interface outil-coupeau » 22ème Congrès Français de Mécanique, Lyon 2015

- [83] J. Wang; C.Z. Huang, W.G. Song « « The effect of tool flank wears on the orthogonal cutting process and its practical implications», Journal of Materials Processing Technology, N° 142 p.338-346. 2003
- [84] EM.A. Yallese, L. Boulanouar, N. Zeghib, S. Belhadi, J.F. Rigal, « Etude des efforts et de la température de coupe lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 par un outil CBN » Revue synthèse N° 16, Université de Annaba, Juin 2007
- [85] Safety: Catalogue général Safety cutting tools solutions, p. 405-408. 2011

## ANNEXES

### Annexe A

#### Acier 90 Mn Cr V8

➤ **Applications**

Cet acier utilisé dans les domaines d'application suivants : Recommandé pour outils de découpage, petites lames de cisailles, couteaux en disques. Outils pour l'usinage par enlèvement de copeaux tels que peignes et mollets de filetage, alésoirs, outils d'emboutissage, instrument de mesure, calibre.

➤ **Propriétés d'emploi**

L'acier 90 Mn Cr V8 : est un acier à outils au carbone, faiblement allié pour travail à froid, haute stabilité dimensionnelle élevée au traitement thermique. Très haute résistance à la fissuration. Haute usinabilité, résistant à l'usure et dureté.

Annexe B

➤ Système d'identification des plaquettes de tournage amovibles [85]

Symbole	Forme
H	Hexagonale 120°
O	Octogonale 135°
P	Pentagonale 108°
S	Carré 90°
T	Triangle 60°
D	Rhombique 80°
C	Rhombique 55°
E	Rhombique 75°
F	Rhombique 50°
M	Parallélogramme 86°
V	Rhombique 35°
W	Trigone 80°
L	Rectangle 90°
A	Parallélogramme 85°
B	Parallélogramme 82°
K	Parallélogramme 55°
R	Circulaire

L'angle représenté correspond à l'angle aigu de plaquettes rhombiques et parallélogrammes.

Symbole	Angle de dépouille
A	3°
B	5°
C	7°
D	15°
E	20°
F	25°
G	30°
N	0°
P	11°

Symbole (classe)	Tolérance (mm)		
	Hauteur du rayon	Épaisseur	Taille I.C.
A	±0.005	±0.025	±0.025
F	±0.013		±0.013
C			±0.025
H	±0.013	±0.013	
E	±0.025	±0.13	±0.025
G			
J	±0.005	±0.025	±0.05-±0.15
K*	±0.013		
L*	±0.025		
M*	±0.08-±0.18	±0.13	±0.08-±0.25
N*		±0.025	
U*	±0.13-±0.38	±0.13	±0.08-±0.25

\*Périphérie de la plaquette telle que montée. La différence de tolérance dépend de la taille de la plaquette.

Symbole	Trou	Forme du trou	Plaquettes Brite-copeaux	Forme
N	Non	-	Non	
R	Non	-	Un seul côté	
F	Non	-	Deux côtés	
A	Avec trou	Avec trou	Non	
M			Un seul côté	
G		Deux côtés		
W		Avec trou et une fraise 40°-60°	Non	
T	Avec trou	Avec trou et 2 fraises 40°-60°	Un seul côté	
Q			Non	
U		Avec trou et une fraise 70°-90°	Un seul côté	
B		Avec trou et 2 fraises 70°-90°	Deux côtés	
H	Avec trou et une fraise 70°-90°	Un seul côté	Non	
C			Un seul côté	
J			Deux côtés	
X	-	-	-	-



⑤ Symbole de la longueur de l'arête (ISO)							Taille I.C. (mm)	⑤ Taille I.C. (ANSI)	
								Taille IC (Pouces)	Symbole
03	04		03	06			3.97	5/32	1.2
04	05		04	08	08		4.76	3/16	1.5
		05					5		
05	06		05	09		03	5.56	7/32	1.8
		06					6		
06	07		06	11	11	04	6.35	1/4	2
08	09		07	13		05	7.94	5/16	2.5
		08					8		
09	11	09	09	16	16	06	9.525	3/8	3
		12					10		
		12					12		
12	15	12	12	22	22	08	12.7	1/2	4
16	19	15	15	27	27	10	15.875	5/8	5
		16					16		
19	23	19	19	33	33	13	19.05	3/4	6
		20					20		
22	27	22	22	38			22.225	7/8	7
		25					25		
25	31	25	25	44	44	17	25.4	1	8
32	38	31	31	54	54	21	31.75	1-1/4	10
		32					32		

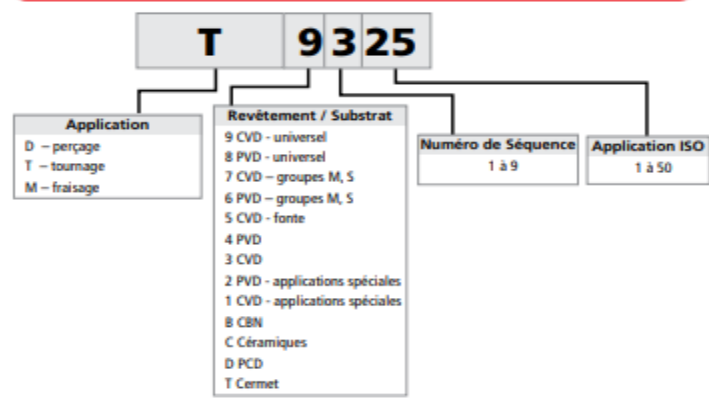
⑥ Symbole de l'épaisseur			
ISO		ANSI	
Épaisseur (mm)	Symbole	Épaisseur (Pouces)	Symbole
1.59	01	1/16	1(2)
2.38	02	3/32	1.5(3)
2.78	T2	-	-
3.18	03	1/8	2
3.97	T3	5/32	2.5
4.76	04	3/16	3
5.56	05	7/32	3.5
6.35	06	1/4	4
7.94	07	5/16	5
9.525	09	3/8	6

L'épaisseur indiquée correspond à la distance entre la surface du fond et le point le plus haut de l'arête de coupe.

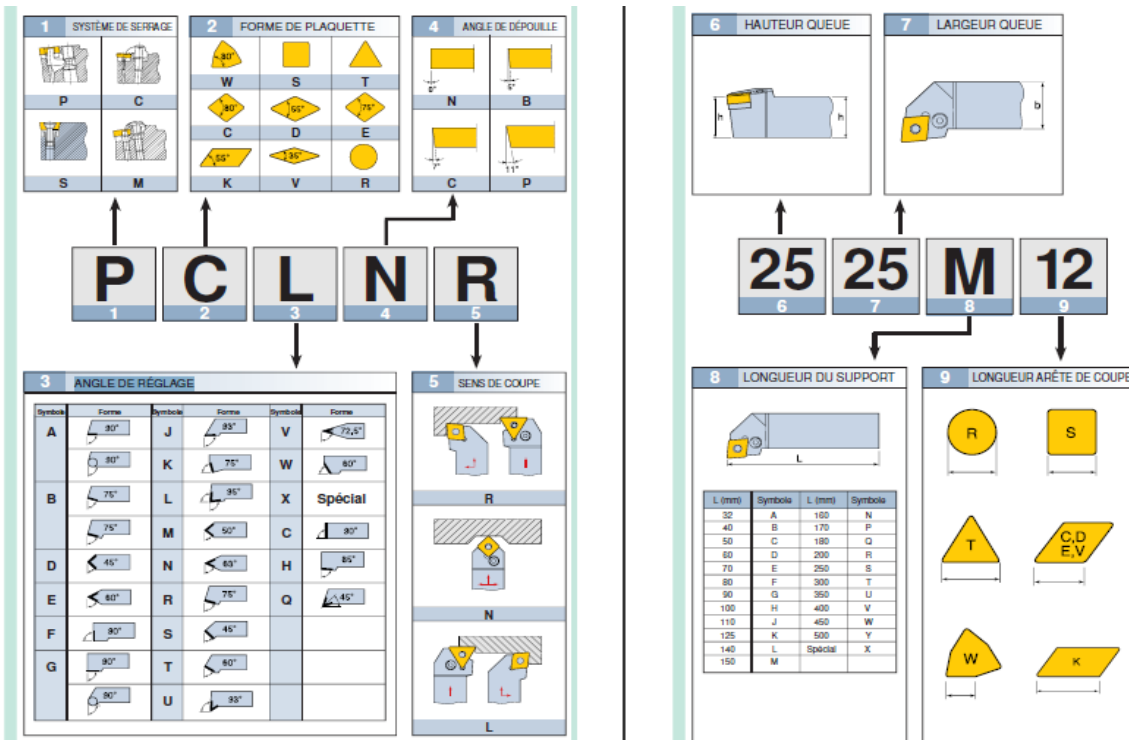
⑦ Symbole du rayon R (r)			
ISO		ANSI	
Rayon R (r : mm)	Symbole	Rayon R (r : pouces)	Symbole
Angle vif	00	.000	00
S0.03	003	.001	0.1
0.1	01	.004	0.2
0.2	02	.008	0.5
0.4	04	1/64	1
0.8	08	1/32	2
1.2	12	3/64	3
1.6	16	1/16	4
2.0	20	5/64	5
2.4	24	3/32	6
2.8	28	7/64	7
3.2	32	1/8	8
Plaquette circulaire	00 (Pouces) ou M0 (métrique)	Plaquette circulaire	0

⑧ Option du fabricant  
Symbole de la main, symbole du brise-copeaux, etc.

**NOUVELLE CODIFICATION**

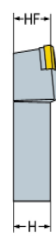
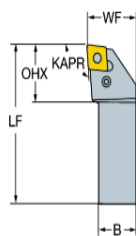
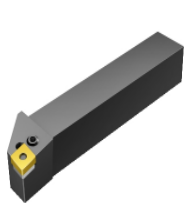


➤ Système d'identification des porte-plaquettes de tournage [85]



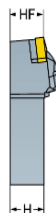
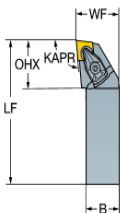
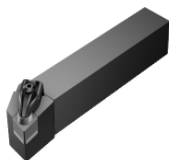
Les porte-plaquette sont :

a) Porte-plaquette de carbure PCLNR 2525 M12 [65]



(H): Hauteur de la queue 25 mm,  
 (HF): Hauteur fonctionnelle 25 mm,  
 (B): Largeur de la queue 25 mm,  
 (WF): Largeur fonctionnelle 32 mm,  
 (LF): Longueur fonctionnelle 150 mm,  
 (OHX): Porte-à-faux maximum 27.2 mm,  
 (KAPR): Angle de coupe de l'outil 95°

b) Porte-plaquette de céramique CCLNR 2525 M12 [65]



(H): Hauteur de la queue 25 mm,  
 (HF): Hauteur fonctionnelle 25 mm,  
 (B): Largeur de la queue 25 mm,  
 (WF): Largeur fonctionnelle 22 mm,  
 (LF): Longueur fonctionnelle 150 mm,  
 (OHX): Porte-à-faux maximum 27.5 mm, (KAPR): Angle de coupe de l'outil 95°

### Annexe C

➤ SCA-301 7kg / 1g Premium verre LCD numérique Digital Balance Portable rouge

#### Les caractéristiques sont :

- Couleur: Rouge
- Matériel: Plastique + verre
- Capacité maximum:7000g
- Low indicateur de batterie, écran LCD rétro éclairage
- Fonctions d'auto-zéro, de tare et d'arrêt automatique pratiques après 1 minute, étalonnage rapide en quelques secondes, et toutes les fonctions sont faciles à utiliser!
- Power Ed par 2 piles AA (incluses).
- Dimensions de produit (L \* W \* H): 24 \* 16.8 \* 4.5cm
- Dimensions de paquet: 24.5 \* 18.5 \* 10cm

➤ Le pyromètre infrarouge à distance modèle N°: Amprobe IR608A

#### Les caractéristiques sont [66] :

- Etendue de mesure -18° à 400C°
- Etendue spectrale 7 à 18  $\mu$
- Emissivité fixe à 0,95
- Temps de réponse rapide 500 msec, réponse à 95%
- Pointeur laser pour un ciblage facile

## Annexe D

Tableau V. 4. Analyse de l'expérience pour l'usure

N°	Paramètres d'entrée			Carbure T9325			Céramique noir TC100		
	VC (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	VB (mm)	Temps (min)	Ra ( $\mu$ m)	VB (mm)	Temps (min)	Ra ( $\mu$ m)
1	120	0.084	0.2	0	0	0	0	0	0
2				0.05	4	0,305	0.025	4	0,128
3				0.125	8.5	0,332	0.075	8	0,182
4				0.175	12	0,360	0.124	14	0,189
5				0.197	14	0,376	0.149	19	0,190
6				0.222	16	0,387	0.199	24	0,250
7				0.272	20	0,421	0.249	31	0,267
8				0.322	24	0,645	0.262	38	0,322
9				-	-	-	0.274	46	0,343
10				-	-	-	0.287	50	0,409
11				-	-	-	0.299	58	0,453
12				-	-	-	0.312	66	0,525
13	200	0.084	0.2	0	0	0	0	0	0
14				0.075	5	0,198	0.05	5	0,110
15				0.112	6.5	0,267	0.087	8	0,146
16				0.162	9.5	0,309	0.112	11	0,171
17				0.212	11	0,363	0.137	14	0,189
18				0.337	15	0,707	0.162	17	0,225
19				-	-	-	0.212	20	0,231
20				-	-	-	0.262	24	0,309
21				-	-	-	0.322	27	0,550
22	220	0.084	0.2	0	0	0	0	0	0
23				0.062	3	0,232	0.05	3	0,171
24				0.125	5.5	0,286	0.062	6	0,192
25				0.209	7.5	0,374	0.112	9	0,212
26				0.284	9.5	0,501	0.162	12	0,280
27				0.346	12	0,906	0.212	15	0,320
28				-	-	-	0.262	18	0,381
29	-	-	-	0.312	20	0,704			
42	120	0,164	0.2	0,05	4	0,332	0,078	6	0,14
43				0,125	8,5	0,345	0,128	12	0,19
44				0,175	12	0,37	0,156	16	0,2
45				0,197	14	0,38	0,207	21	0,286
46				0,222	16	0,39	0,262	28	0,31
47				0,272	20	0,43	0,281	36	0,356
48				0,324	23	0,7	0,293	44	0,386
49				-	-	-	0,307	48	0,511
50				-	-	-	0,328	64	0,631
51	200	0.164	0.2	0,081	4	0,2	0,054	3	0,169
52				0,118	6	0,249	0,093	6	0,198
53				0,206	8	0,312	0,119	9	0,215
54				0,239	10	0,378	0,144	12	0,236
55				0,339	13	0,757	0,162	14	0,266
56				-	-	-	0,216	16	0,350
57				-	-	-	0,262	19	0,399
58				-	-	-	0,324	23	0,534

59	220	0.164	0.2	0,062	3	0,291	0,069	2	0,193
60				0,125	5	0,375	0,111	4	0,277
61				0,259	7	0,495	0,159	7	0,361
62				0,248	9	0,508	0,210	11	0,456
63				-	-	1	0,263	14	0,482
64				-	-		0,313	16	0,658
65	120	0,196	0.2	0,061	4	0,35	0,081	4	0,224
66				0,137	8	0,462	0,129	9	0,296
67				0,19	12	0,521	0,162	14	0,324
68				0,211	14	0,671	0,210	18	0,385
69				0,235	16	0,708	0,249	29	0,417
70				0,285	20	0,766	0,265	36	0,488
71				0,327	22	0,868	0,278	44	0,566
72				-	-	-	0,298	51	0,686
73	-	-	-	0,328	61	0,766			
74	200	0.196	0.2	0,085	4	0,339	0,060	2	0,224
75				0,122	6	0,357	0,092	4	0,263
76				0,192	8	0,411	0,125	7	0,297
77				0,245	10	0,453	0,149	9	0,325
78				0,341	12	0,597	0,171	11	0,348
79				-	-	-	0,219	15	0,391
80				-	-	-	0,263	17	0,42
81				-	-	-	0,327	21	0,465
82	220	0.196	0.2	0,068	3	0,36	0,083	2	0,3
83				0,127	5	0,441	0,117	4	0,351
84				0,266	7	0,604	0,164	6	0,393
85				0,349	9	0,718	0,210	9	0,429
86				-	-	-	0,263	12	0,496
87				-	-	-	0,317	14	0,561

Tableau V. 5. Analyse de l'expérience pour la température

N°	Paramètres d'entrée				Paramètres de sortie	
					Carbure T9325	Céramique noire TC100
ES SAIS	VC (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Temps (s)	Température (C°)	
1	120	0.084	0.2	60	60	51
2				70	65	57
3				120	75	63
4				180	81	71
5				240	88	74
6				300	92	79
7				360	99	85
8	200	0.084	0.2	60	78	61
9				70	88	72
10				120	99	86
11				180	128	100
12				240	156	122
13				300	174	132
14				360	185	142



15	240	0.084	0.2	60	135	101
16				70	164	128
17				120	202	165
18				180	277	210
19				240	333	253
20				300	414	294
21				360	480	310
22	180	0.084	0.2	60	40	38
23		0.084		120	50	44
24		0.084		180	58	47
25		0.084		240	67	49
26		0.084		300	72	53
27		0.084		360	81	62
28	180	0.164	0.2	60	63	43
29		0.164		120	72	55
30		0.164		180	80	60
31		0.164		240	91	68
32		0.164		300	98	74
33		0.164		360	110	81
34	180	0.196	0.2	60	82	70
35		0.196		120	89	79
36		0.196		180	93	82
37		0.196		240	114	92
38		0.196		300	120	100
39		0.196		360	135	116
40	180	0.084	0.25	60	61	50
41			0.25	120	68	56
42			0.25	180	71	62
43			0.25	240	76	67
44			0.25	300	81	71
45			0.25	360	86	76
46	180	0.084	0.5	60	68	52
47			0.5	120	77	57
48			0.5	180	85	65
49			0.5	240	88	74
50			0.5	300	93	80
51			0.5	360	99	90
52	180	0.084	1	60	88	65
53			1	120	93	70
54			1	180	101	75
55			1	240	108	84
56			1	300	117	99
57			1	360	128	108

## Annexe E

## Contexte d'usinage

## ❖ Acier 42CrMo4/ Caractéristiques mécaniques et Compositions chimique

- Etat recuit : chauffage à 825 °C suivi d'un refroidissement lent.
- Dureté Brinell : 217
- Trempe à l'huile à 840 °C.
- Revenu à 200 °C.
- Résistance : 1900 N/mm<sup>2</sup>
- Limite d'élasticité à 0,2 % : 1500 N/mm<sup>2</sup>
- Allongement sur 5d : 7 %
- Résilience KCU : 30 J/cm<sup>2</sup>
- Trempe à l'huile à 840 °C.
- Revenu à 675 °C.
- Résistance : 1000 N/mm<sup>2</sup>
- Limite d'élasticité à 0,2 % : 800 N/mm<sup>2</sup>
- Allongement sur 5d : 18 %
- Résilience KCU : 95 J/cm<sup>2</sup>

Tableau V. 6. Compositions chimiques de la nuance AISI 4140 (42 CrMo4)

42 Cr Mo4	Compositions chimiques (mass %)							
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
	96.719	0.396	0.282	0.895	1.085	0.272	0.015	0.018
42 Cr Mo4	Caractéristiques mécaniques							
	A (%)	Re (N/mm <sup>2</sup> )	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Dureté brinell HB		Kcu (J/cm <sup>2</sup> )		
	10	832.96	921.57	285 174 après recuit		50		

## ❖ Les outils de coupe et Les portes outils

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux plaquettes :

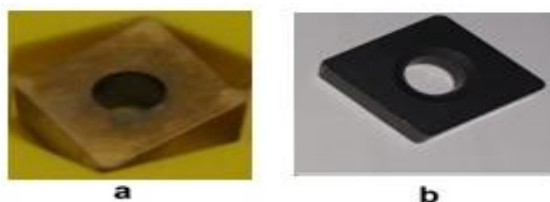


Figure V. 27. Plaquette servant aux essais : a) Polycrystalline cubic boron nitride (PCBN), b) Céramique mixte (CC650)

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux porte-outils (tableau V.7) :

Tableau V. 7. Caractéristiques géométriques des porte-outils

Désignation	Section	$\alpha$	$\gamma$	Kr	$\lambda_s$
PCLNR 2525 M 12	25x25	6	-6	95°	-6
PSBNR 2525 M 12	25x25	6°	-6°	75°	-6°

## Résumé

Dans le domaine de l'usinage, l'usure des outils de coupe conduit à une dégradation de la qualité de la pièce usinée, notamment en termes d'état de surface et de précision géométrique. Ainsi, il est important de disposer d'un critère permettant de suivre la dégradation d'un outil durant une opération d'usinage et donc de décider d'un changement éventuel d'outil. L'endommagement de la plaquette de coupe permet le suivi des évolutions de l'usure lors d'une opération d'usinage. Le travail présenté dans ce mémoire vise à suivre l'évolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction du temps d'usinage. Pendant l'usinage, quelques critères de dégradation de ce dernier ont été déterminés. L'influence des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur l'usure et sur la rugosité de la pièce usinée a été définie ainsi que l'évolution de l'usure sur la qualité de surface.

L'objectif principal est d'améliorer la productivité. L'étude expérimentale a permis l'obtention de résultats qui à travers eux l'usure en dépouille «  $V_b$  » a été identifiée comme critère direct, et comme principal critère indirect la température sur la face de coupe. Ces deux critères ont influencé l'usure de l'outil de coupe par les phénomènes d'abrasion, d'adhésion et de diffusion.

Dans autre part, une étude de simulation du profil de la température de coupe à l'aide de la Méthode des éléments finis (MEF) a été réalisée afin d'obtenir un modèle numérique très proche de la démarche pratique expérimentale. L'intérêt et l'importance de la prise en compte du moment de coupe sont alors confirmés pour prédire et définir les énergies mises en jeu par le processus de coupe.

**Mots clés :** Tournage dur, Usure en dépouille, Rugosité, Simulation, Température, Productivité, Méthode des moindres carrés, ANSYS 15.

## المخلص

في مجال التصنيع ، يؤدي ارتداء أدوات القطع إلى تدهور جودة الجزء الميكانيكي ، ولا سيما من حيث الحالة السطحية والدقة الهندسية. لذي من المهم أن يكون هناك معيار لرصد تدهور الأداة أثناء عملية القطع وبالتالي اتخاذ قرار بشأن التغيير المحتمل للأداة. تلف أدوات القطع يسمح بتعقب التغيرات في التآكل أثناء عملية التشغيل. العمل المقدم في هذه الورقة يهدف إلى متابعة تطور تآكل الأداة بدلالة الزمن مع تحديد بعض معايير تدهور أداة القطع أثناء التشغيل وتحديد تأثير شروط القطع (سرعة القطع  $V_c$ ، التغذية  $f$  و عمق التمريرة  $a_p$ ) على التآكل وعلى خشونة القطعة المصنعة، كذلك تأثير تطور تآكل الأداة على نوعية السطح.

الهدف الرئيسي من كل هذا هو تحسين الإنتاجية. بفضل الدراسة التجريبية، حصلنا على النتائج التي من خلالها حددنا "التآكل"  $V_b$  كأول معيار مباشر على تدهور أداة القطع وكمعيار غير مباشر "درجة الحرارة" على سطح القطع. وقد أثر هذان المعياران على تآكل أداة القطع من خلال ظاهرة التآكل، الالتصاق والانتشار.

من ناحية أخرى، قمنا بدراسة محاكاة لدرجة حرارة القطع باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) من أجل الحصول على نموذج رقمي قريب جد من التجارب. يتم التأكيد على الاهتمام والأهمية بأخذ لحظة القطع بعين الاعتبار للتنبؤ وتحديد الطاقات التي يتم إدخالها من خلال عملية القطع.

**الكلمات المفتاحية:** الخراطة الصلدة، تآكل أدوات القطع، الخشونة، محاكاة، درجة الحرارة، الإنتاجية، طريقة المربعات الصغرى ، انسيس 15.

## Abstract

In the field of machining, the cutting tools wear leads to a quality gradation of the machined workpiece, particularly in terms of surface state and geometric precision. So, it is important of disposing a criterion enabling of follow the degradation of a tool during a machining operation and therefore of decide on a possible change of tool. The cutting pad damage allows of followed of the developments of wear during a machining operation. The work presented in this memory aims to follow the evolution of tool wear as a function of machining time. During machining, some degradation criteria of the cutting tool were determined. The influence of the cut parameters ( $V_c$ ,  $f$  and  $a_p$ ) on wear and roughness of the machined workpiece had been defined as well as the evolution of wear on the surface quality.

The main objective is to improve productivity. The experimental study obtained results which through them the wear " $V_b$ " was identified as a direct criterion, and as the main indirect criterion: the temperature on the cutting face. Both criteria influenced the cutting tool wear by abrasion, adhesion and diffusion phenomena.

In another part, a simulation study of the cut temperature profile using the Finite Element Method (MEF) was conducted to obtain a numerical model very close to the experimental practical approach. The study confirms the cutting moment at the tool tip and shows the necessity to take into account moments in the energy balance.

**Key words:** Hard turning, Flank wear, Roughness, simulation, Temperature, Productivity, Method of least squares, ANSYS 15.