TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE, BAVURES D'USINAGE 3
1.1 Introduction.....3
1.2 Mécanisme de formation des bavures.....3
1.2.1 Fraisage.....5
1.2.2 Perçage.....6
1.2.3 Meulage.....7
1.3 Classification des bavures.....9
1.4 Localisation des bavures d'usinage 13
1.5 Mesure des bavures.....15
1.5.1 Introduction.....15
1.5.2 Mesure géométrique.....15
1.5.3 Méthodologie de la mesure géométrique.....21
1.5.4 Mesure mécanique des bavures 23
1.6 Influence des facteurs technologiques sur la formation des bavures.....26
1.6.1 Paramètres liés à la pièce 28
1.6.2 Conditions de coupe.....32
1.6.3 Paramètres d'outil 37
1.6.4 Paramètres liés à la machine et son environnement.....43
1.6.5 Stratégie de coupe.....43
1.7 Bavures uniformes et bavures régulières 51
1.8 Prédiction des bavures 52
1.9 Autres facteurs influençant la formation des bavures.....53
1.9.1 Force de coupe 53
1.9.2 La rugosité 55
1.10 Conclusion 56

CHAPITRE 2 ÉBAVURAGE ET FINITION DES PIÈCES.....58
2.1 Introduction.....58
2.2 Caractéristiques de l'ébavurage 59
2.2.1 Exigences de finition.....59
2.2.2 Nombre d'arêtes et quantité linéaire d'ébavurage 60
2.2.3 Effort d'ébavurage 61
2.2.4 Système de contrôle de la qualité d'ébavurage.....61
2.3 Classification des procédés d'ébavurage 63
2.4 Principaux procédés d'ébavurage 65
2.4.1 Ébavurage manuel.....65
2.4.2 Ébavurage par brosse 68
2.4.3 Ébavurage par sablage 70
2.4.4 Ébavurage par jet abrasif 72

2.4.5 Finition de masse 73
2.4.6 Coupe mécanisée 75
2.4.7 Broche de finition 78
2.4.8 Ébavurage électrochimique....79
2.5 Coût d'ébavurage 80
2.6 Analyse et critères de sélection des méthodes d'ébavurage 82
2.7 Conclusion 85

CHAPITRE 3 FORMATION DES BAVURES : PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE....87
3.1 Problématique et objectif 87
3.2 Procédure expérimentale....87
3.2.1 Pièces et montage....88
3.2.2 Plan d'expérience....89
3.2.3 Mesures 92

CHAPITRE 4 FORMATION DES BAVURES : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 98
4.1 Introduction....98
4.2 Forme et mécanisme de formation des bavures....98
4.3 Analyse statistique des bavures 105
4.3.1 Bavures d'entrée latérales ED....105
4.3.2 Autres types de bavures 107
4.3.3 Sommaire des résultats des autres types de bavures....109
4.3.4 Autres facteurs 112
4.3.5 Paramètres d'outil et usure....114
4.4 Prédiction des bavures 116
4.5 Régularité et uniformité des bavures 122
4.6 Conclusion 123

CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS EN MILIEU INDUSTRIEL 126
5.1 Introduction....126
5.2 Problèmes rencontrés et pistes de solutions....127
5.3 Expérimentation en milieu industriel....135
5.3.1 Introduction....135
5.3.2 Approche expérimentale 135
5.3.3 Résultats et discussions....140
5.4 Conclusion 155

CONCLUSION....157

RECOMMANDATIONS 158

ANNEXE I FICHE TECHNIQUE DE LA TABLE DYNAMOMÉTRIQUE....161

ANNEXE II AUTRES PHOTOS DES BAVURES GÉNÉRÉES....162

ANNEXE III ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES D'ENTRÉE EC 163

ANNEXE IV ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES DE SORTIE SC 164

ANNEXE V ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES DE SORTIE LATÉRALES SG 165

ANNEXE VI ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES SUPÉRIEURES G - SUP 166

ANNEXE VII ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES SUPÉRIEURES D - SUP 167

ANNEXE VIII ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LA RUGOSITÉ ARITHMÉTIQUE 168

ANNEXE IX ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LA FORCE DE COUPE 169

ANNEXE X ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR L'INDICE D'OCCUPATION 170

ANNEXE XI FORMATION D'ARÊTE RAPORTÉE 171

ANNEXE XII ANALYSE SURFACIQUE DES BAVURES SUPÉRIEURES D - SUP 172

ANNEXE XIII ANALYSE SURFACIQUE DES BAVURES SUPÉRIEURES G – SUP 173

ANNEXE XIV CARACTÉRISTIQUES DES COPEAUX 174

LISTE DE RÉFÉRENCES 175

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Symbolisation des arêtes et directions de coupe 12

Tableau 1.2 Localisation des bavures d'usinage 14

Tableau 1.3 Techniques de mesure des bavures 17

Tableau 1.4 Quelques matériaux retrouvés dans le domaine aéronautique 29

Tableau 1.5 Classification industrielle des matériaux à usiner 37

Tableau 1.6 Description des revêtements de titane 38

Tableau 2.1 Les dix procédés d'ébavurage les plus utilisés dans le monde 65

Tableau 2.2 Liste des différents types d'outils d'ébavurage manuel 67

Tableau 3.1 Propriétés mécaniques des trois alliages d'aluminium 88

Tableau 3.2 Conditions de coupe utilisées 91

Tableau 4.1 Résumé des facteurs les plus influents sur les six types de bavures 109

Tableau 5.1 Paramètres de coupe 137

Tableau 5.2 Propriétés mécaniques du matériau (inconel) 137

Tableau 5.3 Séquences des essais 140

Tableau 5.4 Sommaire des résultants obtenu 155

Tableau 5.5 Suggestions et recommandations pour les travaux futures 159

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Formation de la bavure. 4

Figure 1.2 Différents bords de la pièce obtenus après usinage. 4

Figure 1.3 Mécanisme de formation de bavure en fraisage. 5

Figure 1.4 Formation des bavures dans le cas du perçage. 7

Figure 1.5 Processus de formation de bavures de meulage.....8

Figure 1.6 Classification des bavures d'usinage.....9

Figure 1.7 Classification géométrique et visuelle des bavures. 11

Figure 1.8 Classification des bavures.....11

Figure 1.9 Caractéristiques dimensionnelles de la bavure d'usinage. 16

Figure 1.10 Caractérisation dimensionnelle de la bavure d'usinage. 16

Figure 1.11 Méthode de mesure optique.....18

Figure 1.12 Représentation schématique du microscope électronique à balayage. 19

Figure 1.13 Mesure des bavures par la méthode de contact.....20

Figure 1.14 Méthode de mesure des bavures à fractures. 22

Figure 1.15 Distribution de microdureté sur une bavure.....24

Figure 1.16 Mesure de micro dureté sur la bavure de meulage. 25

Figure 1.17 Influence des facteurs technologiques sur la formation des bavures.....28

Figure 1.18 Influence de la géométrie de la pièce sur la taille des bavures. 30

Figure 1.19 Effet du durcissement du matériau sur la taille des bavures.....31

Figure 1.20 Influence de la vitesse d'avance sur les bavures de perçage. 33

Figure 1.21 Hauteur des bavures en fonction de la variation des conditions de coupe.34

Figure 1.22 Influence de la géométrie de l'outil sur les bavures de perçage. 39

Figure 1.23 Usure de la pointe de l'outil. 41
Figure 1.24 Relation entre la formation des bavures et l'usure de l'outil. 42
Figure 1.25 Optimisation de la trajectoire de l'outil - entrée arquée. 44
Figure 1.26 Cheminement échelonné de l'outil lors d'une opération de rainurage. 46
Figure 1.27 Emmanchement d'inserts pendant une opération de surfaçage. 47
Figure 1.28 Influence de la direction de coupe sur la formation des bavures. 48
Figure 1.29 Influence de l'angle de désengagement. 49
Figure 2.1 Exigences géométriques sur l'arête de la pièce. 59
Figure 2.2 Nombre d'arêtes à ébavurer sur une roue d'entée. 60
Figure 2.3 Section transversale d'une bavure. 61
Figure 2.4 Système de qualité d'ébavurage à 9 classes 62
Figure 2.5 Principaux procédés d'ébavurage. 64
Figure 2.6 Ébavurage manuel. 67
Figure 2.7 Ébavurage par brosse. 69
Figure 2.8 Outil de sablage 71
Figure 2.9 Finition par vibration. 74
Figure 2.10 Principe de fonctionnement de l'outil Orbitool. 76
Figure 2.11 Ébavurage robotisé 78
Figure 2.12 Broche de finition. 79
Figure 3.1 Définition des principales bavures de rainurage. 88
Figure 3.2 Montage spécial utilisé pour maintenir les pièces. 89
Figure 3.3 Comparaison des performances d'outils par leurs revêtements. 90
Figure 3.4 Machine-outil utilisée. 92
Figure 3.5 Interface de *plaque Kistler-9255B* pour la mesure des forces. 93

Figure 3.6 Mesure de la rugosité. 94
Figure 3.7 Rugosimètre utilisé lors des essais. 94
Figure 3.8 Mesure des bavures le long de l'arête de la pièce. 95
Figure 3.9 Microscope optique utilisé pour la mesure des bavures. 96
Figure 3.10 Définition de l'indice d'occupation des bavures η_s (Éta%). 97
Figure 4.1 Géométries typiques des bavures obtenues. 99
Figure 4.2 Bavures de sortie latérale SG et SD. 100
Figure 4.3 Formation des bavures roulées en ED. 101
Figure 4.4 Forme longitudinale observée sur les bavures supérieures. 102
Figure 4.5 Accumulation du copeau sur la pièce. 102
Figure 4.6 Formation des bavures d'entrée EC et de sortie SC. 104
Figure 4.7 Analyse de Pareto pour les bavures d'entrée latérales ED. 105
Figure 4.8 Influence des paramètres sur les bavures ED. 106
Figure 4.9 Interactions des paramètres pour les bavures ED. 107
Figure 4.10 Usure des outils observée après usinage de 18 pièces. 116
Figure 4.11 Surfaces de réponse pour prédiction des bavures d'entrée latérales ED. 117
Figure 4.12 Surfaces de réponse pour prédiction des bavures d'entrée EC. 119
Figure 4.13 Surface de réponse pour prédiction des bavures de sortie SC. 121
Figure 4.14 Surface de réponse pour prédiction des bavures de sortie latérale SG. ...122
Figure 5.1 Grattures observées sur la pièce. 127
Figure 5.2 Processus de segmentation du copeau. 128
Figure 5.3 Dégagement du copeau pendant le perçage. 131
Figure 5.4 Répartition de la dureté sur une section transversale du matériau brut. ..132
Figure 5.5 Outil brisé à cause de l'irrégularité dans la dureté du matériau. 133

Rapport-Gratuit.com

Figure 5.6 Trou de perçage concerné par l'expérience. 136
Figure 5.7 Outil standard de perçage 1 habituellement utilisé. 138
Figure 5.8 Outil 3 géométriquement modifié. 139
Figure 5.9 Microscope optique utilisé pendant les mesures. 139
Figure 5.10 Matériau brut utilisé pour l'usinage des pièces. 141
Figure 5.11 Résultat de test de dureté sur l'inconel brut. 142
Figure 5.12 Grattures de copeaux générées par l'outil standard 1 (essai 1). 143
Figure 5.13 Grattures de copeaux générées par l'outil standard 1 (essai 2). 144
Figure 5.14 Grattures de copeaux générées par l'outil 2 (essai 3). 145
Figure 5.15 Grattures de copeaux générées par l'outil 2 à la vitesse n2 (essai 4). 146
Figure 5.16 Absence de grattures de copeaux sur la première pièce. 147
Figure 5.17 Absence de grattures de copeaux sur la deuxième pièce. 147
Figure 5.18 Gratture engendrée sur la troisième pièce. 147
Figure 5.19 Copeau hélicoïdal long généré pendant les essais 1, 2 et 3. 148
Figure 5.20 Copeau hélicoïdal à tendance courte généré pendant l'essai 4. 148
Figure 5.21 Copeau hélicoïdal à tendance courte généré pendant l'essai 5. 149
Figure 5.22 Usure constatée sur l'outil standard 1 (test 1). 150
Figure 5.23 Usure constatée sur l'outil standard 1 (test 2). 150
Figure 5.24 Usure constatée sur l'outil 2 (test 3). 151
Figure 5.25 Usure constatée sur l'outil 2 (test 4). 151
Figure 5.26 Usure constatée sur l'outil 3 (test 5). 152
Figure 5.27 Bavures générées à la sortie du trou oblique par un alésoir neuf. 153
Figure 5.28 Bavures générées à la sortie du trou oblique par un alésoir usé. 153
Figure 5.29 Relation entre l'usure de l'outil et formation des bavures. 154

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CVD	Dépôt vapeur chimique
CNC	Machine-outil à commande numérique
CRIAQ	Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec
MTCVD	dépôt vapeur chimique à moyenne température
MQL	Minimum quantity lubricant
MM	*Mismatch*
PVD	Dépôt vapeur physique
P&WC	Pratt and Whitney Canada
TiN	Titanium nitride
TiCN	Titanium carbon nitride
TiAIN	Titanium aluminum nitride
RCM	*Rubber Casting Method*

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

r [mm]	Rayon de l'arrête de l'outil
H_l [^{o}]	Angle d'hélice
α [^{o}]	Angle d'inclinaison axiale
β [^{o}]	Angle d'inclinaison radiale
V_c [m/min]	Vitesse de coupe
η [tr/min]	Vitesse de rotation
P [mm]	Profondeur de coupe
T [min]	Durée de vie de l'outil
n	Constante qui dépend du matériau de l'outil
C_t	Constante qui dépend de la géométrie de l'outil, et matériau de la pièce
ξ [^{o}]	Angle oblique de coupe
Ψ [^{o}]	Angle de désengagement
e [mm]	Offset d'engagement
R [mm]	Rayon de l'outil
α [^{o}]	Angle du bord de la pièce
b_f [mm]	Longueur de la fissure
r_f [mm]	Rayon de la bavure
b_o [mm]	Épaisseur de la bavure
r_o [mm]	Rayon de la bavure
h_o [mm]	Hauteur de la bavure
f_z [mm/ dent]	Avance par dent
f_t [mm/tr]	Avance par tour
g [mm]	Effort d'ébavurage
F_T [N]	Force tangentielle
F_R [N]	Force radiale
F_a [N]	Force axiale
F_c [N]	Force de coupe
h_m [mm]	Épaisseur de coupe
C_S [N/ mm^2]	Force de coupe par unité de section transversale

k [^{o}]	Angle d'approche de l'outil
C_S [N/ mm^2]	force de coupe par unité de section transversale
C_{SI}	Force de coupe spécifique du matériau
q	Facteur dépendant du matériau à usiner et de la méthode de coupe
φ [^{o}]	Angle de rotation de l'arête de coupe
α_a [^{o}]	Angle de coupe axial
α_r [^{o}]	Angle de coupe radial
Ra [µm]	Rugosité arithmétique de la surface
Z	Nombre de dent de l'outil
τ_c [N/ mm^2]	Contraintes de cisaillement du copeau
τ_w [N/ mm^2]	Contraintes de cisaillement de la pièce
C [$]	Coût d'ébavurage par pièce
C_D [$]	Coût de dépréciation de la machine par heure/ heure d'opération
C_M [$]	Coût de maintenance par heure d'opération
C_L [$]	Coût de la main d'ouvre par heure
C_p[$/ Kwh]	Coût de l'énergie utilisée
C_A [$]	Coût de nettoyage par heure après ébavurage (travail et matériel)
C_B [$]	Coût de la brosse
D_o[%]	Charge indirecte du taux de travail en pourcentage
N	Nombre de pièces passées par heure
N_p	Durée de vie de la brosse (nombre de pièces faites)
N_c	Nombre de pièces nettoyées par heure
n	Nombre de pièces par réglage
T_S [s]	Temps de réglage
W [KW]	Énergie utilisée (1 hp =0.75 kw)
F [$]	Coût annuel de la plateforme (sq ft / yr)
H [$]	Coût annuel de chauffage pour la zone d'ébavurage (sq ft / yr)
L_i [$]	Coût annuel d'éclairage pour la zone d'ébavurage (sq ft / yr)
G [$]	Tout autre coût de charge indirecte (sq ft / yr)
H_y [h]	Heure par année d'utilisation d'ébavurage
A [sq ft]	Surface de plateforme d'opération

INTRODUCTION

La fabrication de produits métalliques joue un rôle important dans l'économie canadienne. Le secteur aéronautique en particulier occupe une place prépondérante dans la génération de revenus annuels. La continuation de cette industrie dépend de sa capacité de livrer des produits de qualité à des coûts concurrentiels.

Les fabricants dans le domaine aéronautique comme dans beaucoup d'autres domaines, rencontrent d'importants obstacles à réaliser des pièces d'excellente finition : ***la formation des bavures, la non-consistance de l'ébavurage, les grattures de copeaux, l'usure des outils, etc***. Selon Ko et Dornfeld (1991), les bavures sont indésirables dans la fabrication des pièces, leurs existences réduit la qualité de l'ajustage des composants dans un assemblage, réduit la qualité dimensionnelle et surfacique de la pièce, peut causer des blessures aux ouvriers pendant la manipulation, peut réduire la durée de vie des composants en opération par la présence de débris (petites particules de bavures), diminue la résistance de la pièce et réduit la durée de vie des outils, ce qui réduit sensiblement la productivité. Éliminer les bavures ou limiter leur génération est par conséquent d'une importance capitale.

Traditionnellement, pour avoir une pièce sans bavures, nous devons impérativement passer par les opérations d'ébavurage pour enlever les bavures générées pendant l'usinage. Cependant, selon Gillespie et Blotter (1976), Gillespie (1978 et 1981), les opérations d'ébavurages coûtent cher et prennent beaucoup de temps, elles sont considérées comme des opérations non productives, sans aucune valeur ajoutée. Gillespie (1999) affirme que les opérations d'ébavurage peuvent représenter 30% du coût total de la finition d'une pièce, en particulier lorsque les bavures sont épaisses, l'accès aux bavures est difficile, ou lorsque les pièces sont petites.

L'ébavurage peut être une source d'erreurs dimensionnelles et géométriques significatives, puisque la précision de la pièce est souvent affectée. La maîtrise des techniques d'ébavurage est très importante, mais elle n'est toujours pas suffisante pour pouvoir produire des pièces

de bonne qualité, d'où l'intérêt de limiter ou d'éliminer la formation des bavures pendant l'usinage.

L'objectif principal de ce travail est de déterminer les facteurs influençant la formation des bavures dans le but de les réduire ou de les éliminer, analyser, sélectionner et améliorer les méthodes d'ébavurage et finition de pièces permettant de générer des pièces de meilleure qualité. Pour résoudre ce problème, une revue critique et détaillée de ce qui a été fait dans le domaine serait nécessaire. L'utilisation de certaines connaissances liées aux techniques d'usinage, science des matériaux, simulation, expérimentation et analyse, ensuite application dans un milieu industriel est également d'une grande importance.

Ce mémoire est subdivisé en 5 chapitres, suivi d'une conclusion finale. Dans le premier chapitre, nous faisons une revue de littérature sur la formation des bavures d'usinage. Le chapitre 2 est dédié à l'ébavurage et finition des pièces, suivi du chapitre 3 où nous présentons la méthodologie et procédure expérimentale de la formation des bavures. Le chapitre 4 est consacré aux résultats et analyse des expériences sur la formation des bavures. Le chapitre 5 est réservé à l'étude de cas dans un milieu industriel (Pratt & Whitney Canada), suivi d'une conclusion finale.

Pour des raisons de confidentialité, nous avons caché certaines données techniques dans la partie «étude de cas en milieu industriel (Pratt & Whitney Canada)». Mais ceci n'altère en aucun cas le sens et la qualité de l'étude menée dans ce mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE, BAVURES D'USINAGE

1.1 Introduction

Les bavures sont définies par un excès ou un manque de matériau au bord de la pièce. Tous les procédés de fabrication génèrent des bavures, et ces bavures se forment partout où il y a des arêtes. Selon Aurich *et al*. (2005), il est presque impossible d'éviter la formation des bavures. L'auteur explique qu'il existe deux types de bavures : les bavures microscopiques créées par les procédés de finition telle que le brossage, le rodage, et même le meulage. Les bavures macroscopiques créées par les procédés de fabrication conventionnels: l'usinage, le forgeage, l'estampage, le laminage, le moulage, le poinçonnage, etc. Plusieurs études ont été menées pour comprendre la formation des bavures afin d'essayer de les éliminer ou au moins les réduire. De nombreux chercheurs se sont intéressés aux mécanismes de formation, aux facteurs influençant leur création. Durant ces études, de nombreuses classifications ont été présentées se basant sur divers critères. Plusieurs modèles de réduction et de prédiction des bavures ont été également présentés. Les opérations de tournage, fraisage, perçage et meulage étaient les principales opérations approchées pour étudier le comportement des bavures.

1.2 Mécanisme de formation des bavures

Le mécanisme de formation des bavures dépend essentiellement du type d'opération d'usinage; les forces de coupe et leurs directions jouent un rôle important dans le processus de génération des bavures (figure 1.1).

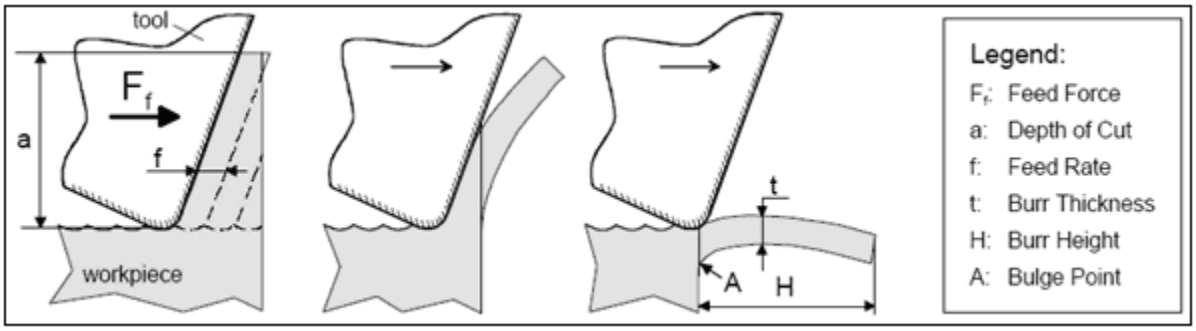


Figure 1.1 Formation de la bavure.
Tirée de Nakayama et Arai (1997)

Selon Sofronas (1975), les bavures sont formées suite à un flux de déformation plastique du matériau pendant les opérations de coupe. Selon Ko et Dornfeld (1991), l'origine de la formation des bavures est due à l'insuffisance de résistance à la déformation plastique du matériau pendent qu'il est soumis aux forces temporaires de l'outil; le matériau est par conséquent déformé et plié au-delà du bord initial de la pièce. Dépendamment des paramètres d'usinage et du matériau de la pièce utilisé, quatre situations de bord de la pièce peuvent se présenter : (a) déformation complète, (b) déformation avec fracture, (c) fracture avec légère déformation et d- fracture complète (figure 1.2).

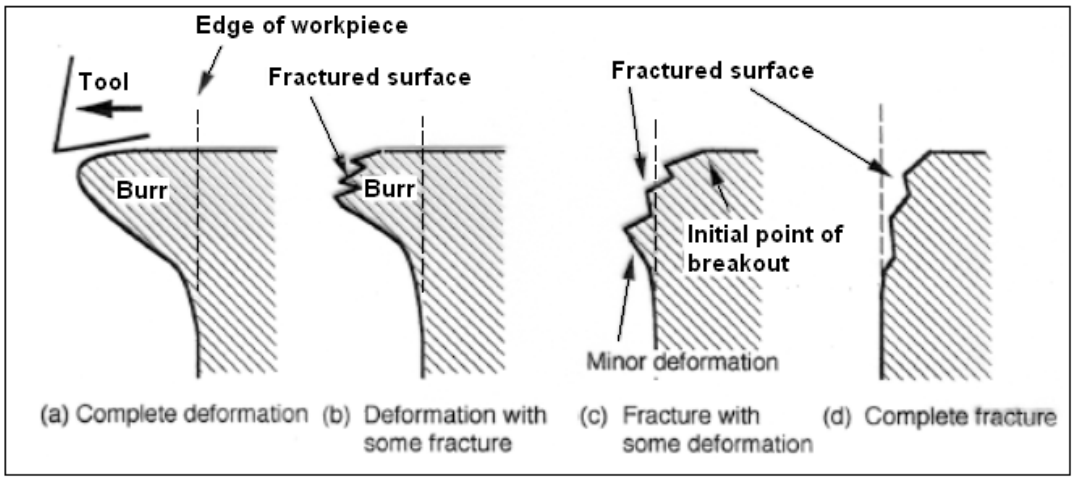


Figure 1.2 Différents bords de la pièce obtenus après usinage.
Tirée de Hashimura et Dornfeld (1999)

Néanmoins, chaque procédé d'usinage a un mécanisme de formation spécifique. Les opérations de fraisage, perçage, et meulage sont les principaux procédés d'usinage étudiés par les chercheurs dans le domaine des bavures.

1.2.1 Fraisage

De nombreux chercheurs ont étudié la formation des bavures lors des opérations de fraisage. Il se trouve que les mécanismes de formation relatifs aux opérations de rabotage et tournage seront très similaires. Plusieurs modèles ont été présentés pour expliquer les différentes phases par les lesquels les bavures se construisent ainsi que les causes de leurs générations. En général ces différents modèles convergent dans leurs principes de base. Hashimura *et al*. (1995; 1999), Park (1996) expliquent que la formation des bavures dans une coupe orthogonale est composée de 4 étapes essentielles: initiation des bavures, pivotement, développement et formation finale (figure 1.3).

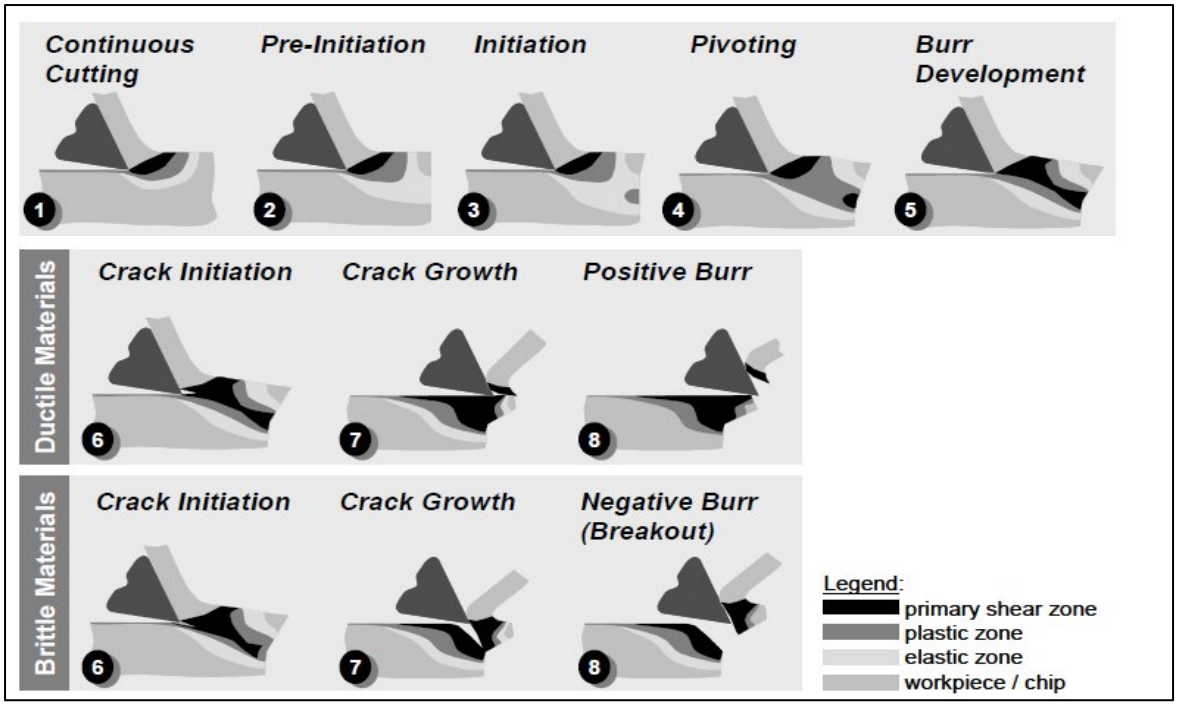


Figure 1.3 Mécanisme de formation de bavure en fraisage.
Tirée de Hashimura, *et al*. (1999)

Au stade 1 de la figure 1.3 où l'usinage est continu, aucune déformation du matériau n'est apparente au bord de la pièce; au fur et à mesure que l'outil s'approche de l'arête de la pièce, la bavure commence à apparaître selon une série d'étapes de déformation élastique et plastique jusqu'à la formation finale, et un point de pivotement est créé autour duquel la bavure se décline. Le plan de cisaillement formé juste avant la formation finale de la bavure joue un rôle important dans la détermination de la géométrie finale de la bavure puisque pour un matériau fragile. C'est souvent une bavure négative qu'on voit apparaître au bord de la pièce « Stade : 6-7-8 fragile». Par contre, dans le cas d'un matériau ductile, la bavure a tendance à s'allonger au lieu de se couper, formant ainsi une bavure positive de géométrie parfois assez importante « Stade : 6-7-8 ductile».

1.2.2 Perçage

De nombreuses recherches ont été réalisées pour comprendre le mécanisme de formation des bavures pendant les opérations de perçage qui sont presque similaires à ceux du taraudage. Partant du principe que les bavures de sortie sont nettement plus importantes que les bavures d'entrée, la majorité des études faites sur les bavures de perçage se sont limitées à traiter le mécanisme de formation des bavures à la sortie du trou. Selon Kim et Dornfeld (2002), Furness (1998), le mécanisme de formation des bavures pendant la phase finale du perçage peut être décrite par un intense processus de déformation du matériau due à la poussée de l'outil. Une petite couche de matériau non coupé (t_o) reste collée à la sortie du trou usiné, constituant plus tard les bavures de perçage (figure 1.4). Le processus de déformation s'explique par le fait que lorsque l'outil avance vers la fin du perçage, ce dernier ne coupant plus le métal génère un flux plastique du matériau poussé en dehors du trou formant ainsi les bavures. Le matériau poussé est soit déchiré dans le cas d'un matériau ductile, soit projeté sous forme de chapeau dans le cas d'un matériau fragile. Il se peut aussi qu'une forme intermédiaire des bavures soit formée dans le cas de l'usinage de certains matériaux ni ductiles, ni fragiles, ou sous certaines conditions de coupe.

Rapport-Gratuit.com

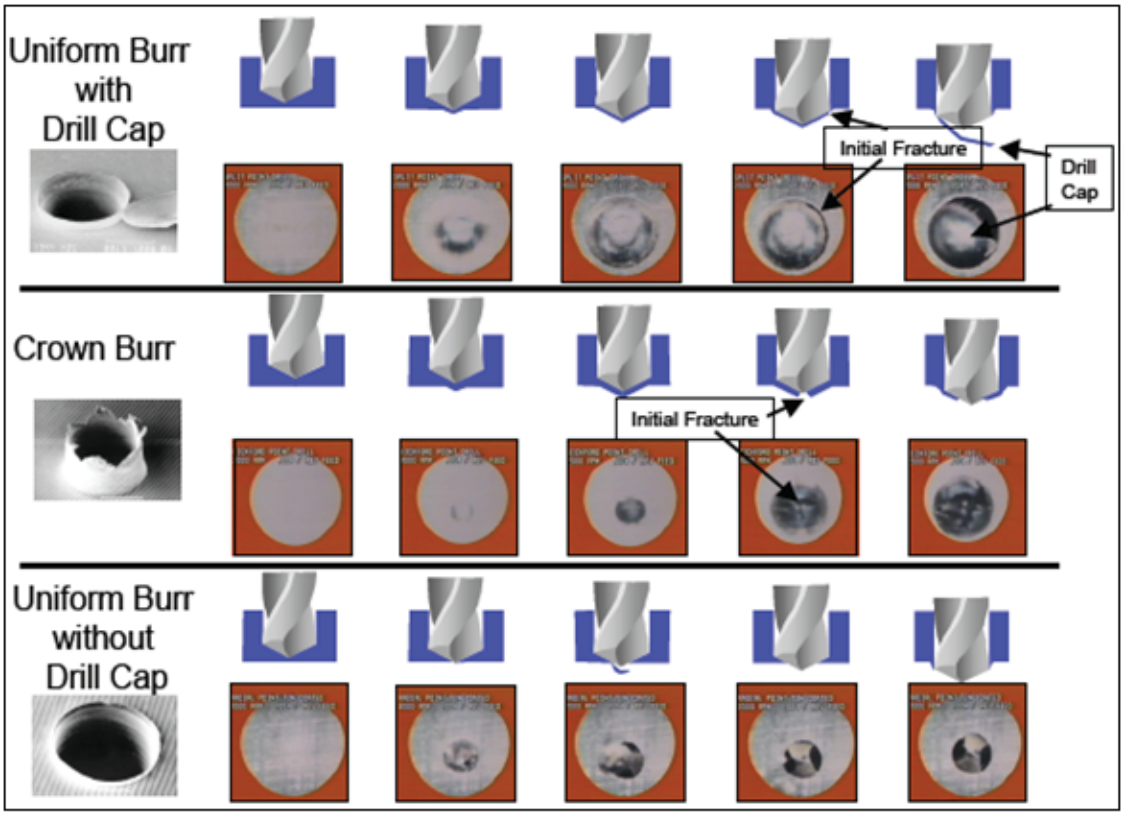


Figure 1.4 Formation des bavures dans le cas du perçage.
Tirée de Furness (1998)

Selon Avila *et al*. (2006), dans de nombreux domaines industriels notamment dans le domaine aéronautique, on éprouve le besoin de percer des trous en une seule passe, sur plusieurs couches de matériaux différents sans retravailler le trou et avec un minimum de bavures. Cela représente un véritable défi qui peut être simplement réalisé par la maîtrise du mécanisme de déformation du matériau.

1.2.3 Meulage

Le mécanisme de formation des bavures dans le cas du meulage et différent de celui du fraisage et perçage, mais presque similaire à l'ensemble des procédés de rectification, de sciage et de tronçonnage. Selon Aurich *et al*. (2005), les bavures de meulage sont formées par un déplacement du matériau le long de la surface de contact meule / pièce; ceci est

provoqué initialement par la simple granulation microscopique, suivie de génération macroscopique des bavures (figure 1.5).

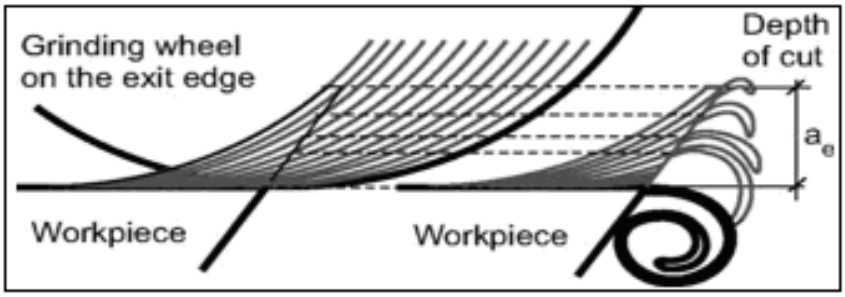


Figure 1.5 Processus de formation de bavures de meulage.
Tirée de Aurich *et al*. (2005)

La bavure de meulage est générée sous une forme spirale, initialement par accumulation d'une zone d'épaisseur accrue au-dessus de la bavure initiale; le matériau est brusquement conduit hors de la pièce à cause de la grande vitesse de coupe ainsi que l'imposante force de frottement engendrée par la rotation de l'outil. La dimension linéaire de la bavure est souvent proportionnelle à la profondeur de passe. L'intense température de coupe atteinte pendant l'opération de meulage qui peut facilement doubler celle des opérations de fraisage et de perçage, a un impact direct sur les caractéristiques mécaniques des bavures. Selon Yamakawa *et al*. (1989), la géométrie de la pièce a une importante incidence sur le processus de formation des bavures de meulage, puisque la concentration de la chaleur au bord de la pièce usinée devient élevée lorsque l'arrête de sortie de la pièce est plus aiguë; ceci mène à une déformation plus prononcée de l'extrémité de la pièce à cause de la diminution de sa rigidité. Selon Avila (2003), cette déformation plastique du matériau peut sensiblement être réduite par l'augmentation de la vitesse de coupe.

La géométrie des bavures varie d'une situation à une autre, leur classification peut aider à mieux comprendre les liens communs qui les unissent, et identifier les facteurs pouvant les générer ou alors les réduire; d'où l'importance de les répertorier.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.3 Classification des bavures

Plusieurs travaux ont été consacrés à la classification des bavures, et ont engendré plusieurs approches permettant de répertorier les bavures. Dépendamment du procédé d'usinage utilisé, la majorité des auteurs ont classifié les bavures selon leur localisation, leur géométrie et leur mécanisme de formation. La classification commune retrouvée dans la plupart des travaux distingue deux types de bavures : bavures d'entrée et bavures de sortie de la pièce.

Gillespie (1981) a classifié les bavures d'usinage selon le mécanisme de leur formation où quatre types spécifiques de bavures ont été ressorti (figure 1.6) : *cut-off bur, rollover burr, poisson burr* et *tear burr,* cette classification a été reprise dans les travaux de plusieurs auteurs comme : Olvera et Barrow (1996), Tseng et Chiou (2003) et le groupe de Dornfeld de l'université de Berkeley en Californie.

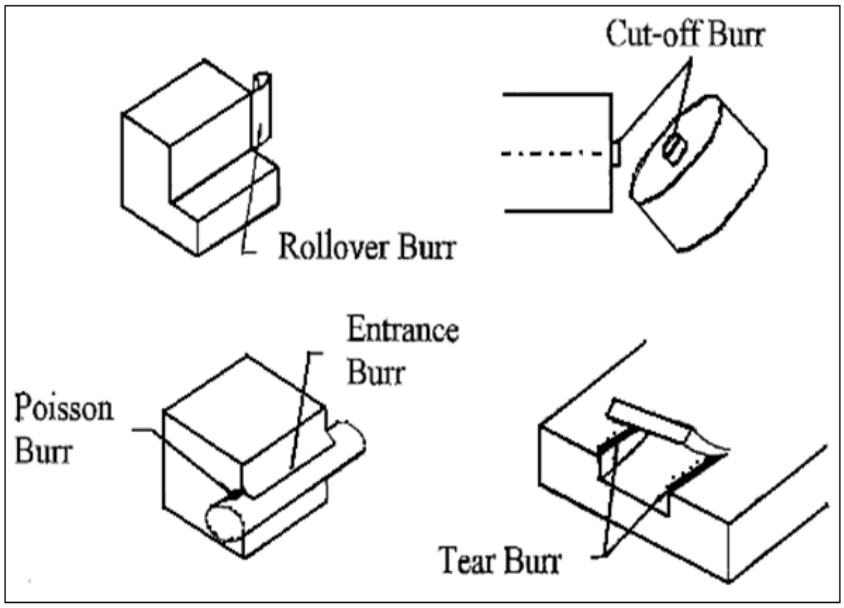


Figure 1.6 Classification des bavures d'usinage.
Tirée de Gillespie (1981)

Poisson burr : Elle est définie comme le résultat d'une déformation latérale du matériau lorsqu'il est soumis à une compression de l'outil; l'extension de la matière est fonction de la

nature du matériau (coefficient de poisson), dimension et forme de la pièce, ainsi que la charge appliquée.

Rollover burr : Elle est formée lorsqu' il est plus facile pour le copeau de se fléchir que de se couper ou de se fragmenter au bord de la pièce; la longueur de la bavure est fonction des conditions de coupe et de la plasticité du matériau.

Tear burr : Se forme lorsque le copeau est déchiré plutôt que d'être cisaillé de la pièce. Les cotés latéraux du copeau se déchirent à partir de la pièce, et le *tear burr* est la partie du matériau restante collée sur la pièce.

Cut-off burr: (aussi appelé *cut-off projection);* elle est formée au moment où la pièce est séparée du matériau brut par l'action de l'outil; la pièce est détachée avant même que l'outil commence à se retirer du matériau, se processus est couramment rencontré dans le cas du dressage.

Schäfer (1975) a classifié les bavures d'usinage selon leur forme géométrique. En se basant sur l'apparence visuelle des bavures et le type d'opération d'usinage utilisé, plusieurs contours ont été dessinés comme montré sur la figure 1.7.

La classification des bavures d'usinage présentée par Nakayama et Arai (1987) considère l'arête de coupe de l'outil lié à la formation des bavures correspondantes ainsi que le fléchissement et déchirement du copeau (figure 1.8).

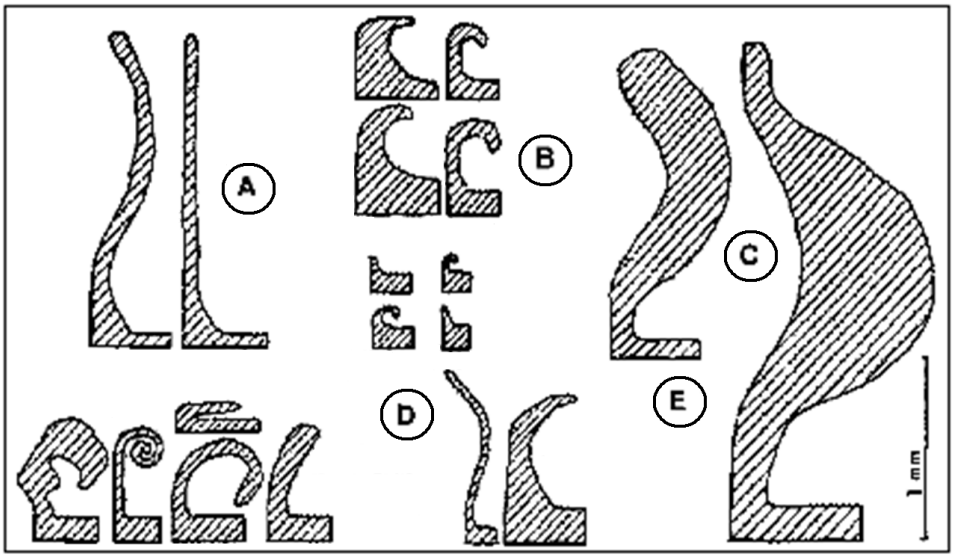


Figure 1.7 Classification géométrique et visuelle des bavures.
(A) perçage, (B) tronçonnage, (C) tournage, (D) rectification, (E) rabotage), tirée de Schäfer (1975)

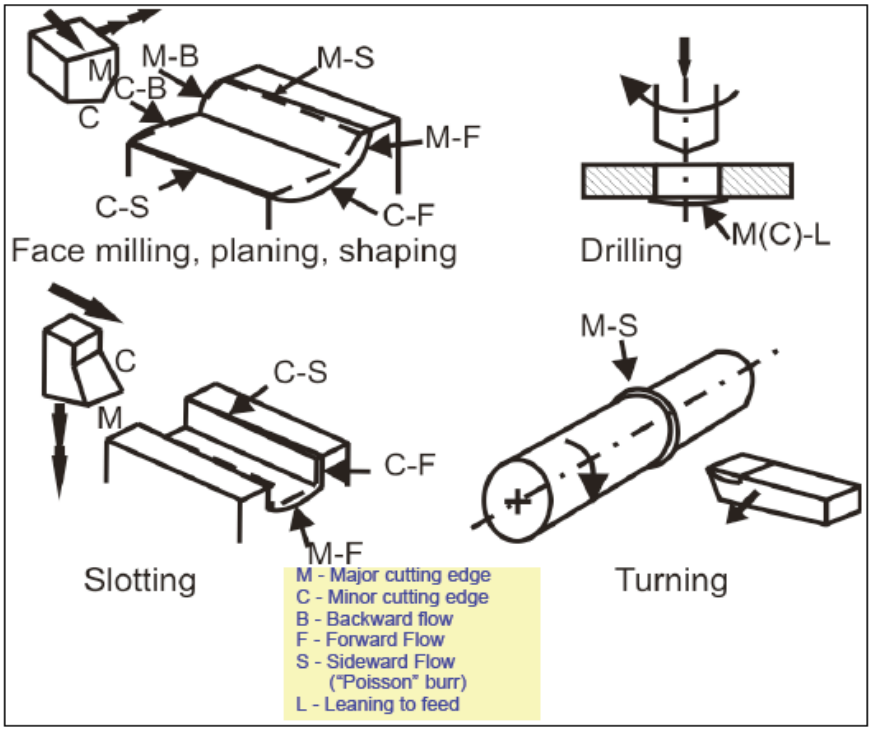


Figure 1.8 Classification des bavures.
Tirée de Nakayama et Arai (1987)

La symbolisation donnée pour chaque type de bavure est identifiée sur le Tableau 1.1. Cette classification permet de reconnaître plusieurs types de bavures correspondantes à diverses opérations d'usinage, cependant l'aspect géométrique des bavures n'est pas identifié.

Tableau 1.1 Symbolisation des arêtes et directions de coupe

M	Arête principale de coupe	Arêtes coupantes formant la bavure
C	Arête de coupe secondaire	
B	Écoulement en arrière (Bavure d'entrée)	Directions de coupe formant la bavure
S	Écoulement latéral (Bavure latérale)	
F	Écoulement en avant (bavure de sortie)	
L	Incliné à une direction d'avance (Bavure générée par l'avance)	

La classification présentée par Kishimoto *et al*. (1981) repose essentiellement sur deux types de bavures : bavures primaires et bavures secondaires.

Bavures primaires : Les bavures primaires sont formées par l'arête de coupe de l'outil, elles se développent au moment où l'arête de l'outil sort de la pièce et pendant que le matériau ne peut plus être coupé; elles sont considérées comme plus importantes en dimension que les bavures secondaires.

Bavures secondaires : Les bavures secondaires sont produites par le flanc d'outil. Elles se développent quand la plasticité du matériau est si basse qu'elles se forment avant le copeau; elles sont aussi considérées comme des bavures résiduelles issues de la rupture des bavures primaires, elles sont petites de taille, mais difficiles à enlever.

Transition des bavures primaires aux bavures secondaires : Selon Avila *et al*. (2004), le passage ou la transition des bavures primaires aux bavures secondaires survient lorsqu'il y a détachement des bavures principales; l'origine de ce détachement peut être due à

l'amincissement des bavures sous l'effet de la coupe ou à l'étirement causé par l'outil; dans la plus part des cas, des bavures latérales seront formés.

Hashimura *et al*. (1999) ont présenté une nomenclature des bavures établie selon les trois critères suivants : localisation des bavures, forme et mécanisme de formation des bavures.

Nous avons montré dans cette section les principales classifications des bavures réalisées jusqu'à maintenant en présentant leurs évolutions dans le temps; chaque auteur avait répertorié les bavures selon ses besoins et selon l'orientation de sa recherche; mais en réalité, toutes les classifications présentées ont beaucoup de points en commun. Il est par conséquent avantageux de sélectionner une classification qui permettra la meilleure compréhension du domaine de recherche dans lequel on voudra se lancer.

1.4 Localisation des bavures d'usinage

Les bavures se forment là où il y a une arête; leurs localisations dépendent principalement du procédé d'usinage utilisé et du mécanisme de formation. Selon Kim (2000), le seul aspect positif rencontré dans l'étude des bavures est leur localisation puisque leur lieu de génération est souvent prévisible. Nous avons récapitulé dans le tableau 1.2 les divers lieux où les bavures peuvent être susceptibles de se former suivant les multiples procédés d'usinage couramment utilisés.

Tableau 1.2 Localisation des bavures d'usinage

Opération d'usinage	**Localisation des bavures**
Perçage Taraudage	BBS et BBE BBS et BBE
Fraisage Rainurage	BBS, BBE et BL BBS, BBE, BL et BS
Tournage (chariotage, alésage) Dressage	BBS et BBE BBE et BC
Meulage Sciage	BBS, BBE, BL et BS BBS, BBE, BL et BS
Rabotage Mortaisage Brochage	BBS, BBE, BL et BS BBS, BBE, BL et BS BBS, BBE, BL et BS

Où :

BBE : bavures au bord de l'entrée de la pièce,

BBS : bavures au bord de sortie de la pièce,

BL : bavures au bord latéral de la pièce,

BS : bavures au bord supérieur,

BC : bavures centrales (*cut- off burrs).*

La connaissance des lieux où les bavures peuvent être formées est considérablement utile pour le choix des opérations d'ébavurage et d'inspection, puisque l'aspect d'accessibilité aux arêtes de la pièce et la proximité à d'autres surfaces importantes est pris en considération lors de la finition et le contrôle de la pièce. L'importance de ces aspects devient plus imposante lorsque la pièce commence à devenir plus complexe.

1.5 Mesure des bavures

1.5.1 Introduction

Pour étudier en profondeur la formation des bavures, et pour réussir à comprendre leur comportement et leurs interactions avec d'autres paramètres d'usinage, il faut trouver un moyen de les quantifier. La plupart des études faites jusqu'à présent ont été concentrées sur la caractérisation géométrique des bavures. Toutefois, quelques auteurs se sont intéressés à la caractérisation mécanique.

1.5.2 Mesure géométrique

Les deux paramètres importants pouvant décrire la caractérisation géométrique des bavures peuvent être : la forme et la dimension des bavures. Comme mentionné plus haut dans la section classification des bavures d'usinage; Schäfer (1975), Gillespie (1981) et plus tard Hassamontr (1998), Kim (2000) se sont penché sur l'aspect forme des bavures où la continuité, discontinuité et profil des bavures ont été étudiés. Chern (1994) a décri les bavures suivantes: *knife burrs, wavy burrs, curl burrs et breakout burrs*. Hashimura et Dornfeld (1999) avaient reconnu les bavures uniformes, périodiques, *leaned burrs,* et *random burrs*. Kim et Dornfeld (2002), Aurich *et al*. (2005) avaient identifié plusieurs profils des bavures tels que: le profil spiral, longitudinal, et déchiqueté. Tous les auteurs soutiennent l'idée que la variation de la forme des bavures varie selon le type d'opération et les paramètres d'usinage utilisés.

La mesure des bavures est également mentionnée dans plusieurs études puisqu'elle permet d'évaluer leur variation dimensionnelle en fonction des variations des paramètres d'usinage. La hauteur et l'épaisseur des bavures sont les deux principaux paramètres dimensionnels utilisés dans la caractérisation des bavures; toutefois dans des études plus approfondies, d'autres éléments dimensionnels sont introduits pour compléter l'étude. Przyklenk (1986) a caractérisé les bavures d'usinage selon 5 paramètres dimensionnels (α, b_f, b_g, r_f, h_o), où α est

l'angle du bord de la pièce, b_f est la longueur de la fissure, b_g est l'épaisseur de la bavure, r_f est le rayon de la bavure et h_o est la hauteur de la bavure (figure 1.9).

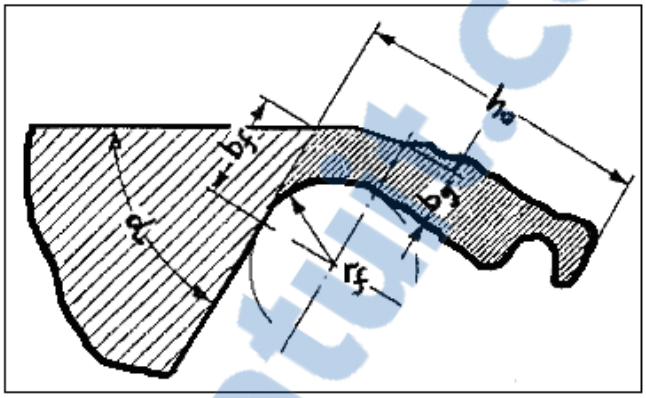


Figure 1.9 Caractéristiques dimensionnelles de la bavure d'usinage.
Tirée de Przyklenk (1986)

La caractérisation de Aurich *et al*. (2005) ressemble à celle de Przyklenk (1986) mais elle est plus simplifiée, où la hauteur, l'épaisseur, la longueur de la bavure, et l'angle au bord de la pièce étaient mieux définis (figure 1.10). La symbolisation des paramètres dimensionnels des bavures diffère légèrement d'un auteur à un autre, mais ceci n'affecte pas leur représentation ni même leur étude.

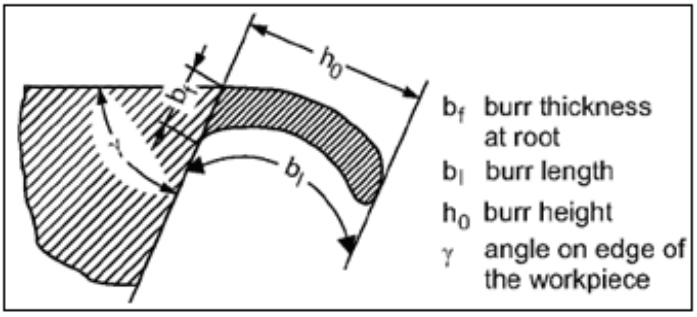


Figure 1.10 Caractérisation dimensionnelle de la bavure d'usinage.
Tirée de Aurich *et al*. (2005)

Rapport-Gratuit.com

La forme des bavures produites lors du processus d'usinage est souvent complexe, ce qui rend leur mesure difficile. Dans son étude, Safranas (1975) a mesuré la hauteur des bavures H et l'épaisseur B; expliquant que dans la majorité des cas, il est plus facile de mesurer la hauteur des bavures H que de mesurer l'épaisseur des bavures B. Kim (2000) a également mesuré dans son étude la hauteur des bavures H, l'épaisseur B et le volume des bavures pour calculer le temps et le coût d'ébavurage. Selon Wygowski (2004), le choix de la méthode de mesure peut dépendre de l'opération d'usinage, la localisation et l'accès aux bavures. Plusieurs auteurs ont expérimenté différents moyens pour mesurer les bavures; Shilling (2006) a résumé les trois principaux modes de mesure pouvant être appliqués à l'évaluation des bavures (Tableau. 1.3) : la méthode de mesure sans contact, la méthode de mesure avec contact et la méthode de mesure destructive.

Tableau 1.3 Techniques de mesure des bavures
Adapté de Shilling (2006)

Sans contact	**Avec contact**	**Destructive**
• Microscopie optique (*Optical Microscopy)* • Microscopie à balayage (*Scanning Electron Microscopy*) • Microscopie à force atomique (*Atomic Force Microscopy*) • Interferometrie à balayage (*Scanning White Light Interferometry*) • Microscopie à balayage laser (*Confocal Laser Scanning Microscopy*) • Tomographie (*Tomography*)	• Sonde à foyer automatique (*Autofocusing Probe* - DVD) • Micro – balayage interféromètre à grille (*Micro-Scanning Grating Interferometer)*	• Image numérique volumétrique (*Digital Volumetric Imaging*)

Dans cette section, nous allons décrire le principe de fonctionnement des principales méthodes de mesure fréquemment rencontrées dans l'étude des bavures.

Mesure optique (MO)

La méthode de mesure optique est basée sur le principe d'émission et de réflexion de la lumière. La pièce à mesurer est placée sous un faisceau lumineux; dépendamment de la forme de la pièce et particulièrement la forme des bavures, la lumière heurte l'objet puis elle est réfléchie selon différents angles et directions. L'intensité du faisceau lumineux reçu par le récepteur est affaiblie dans certaines zones, cette diminution de l'intensité lumineuse constitue l'indice permettant de tracer le relief des bavures (figure 1.11).

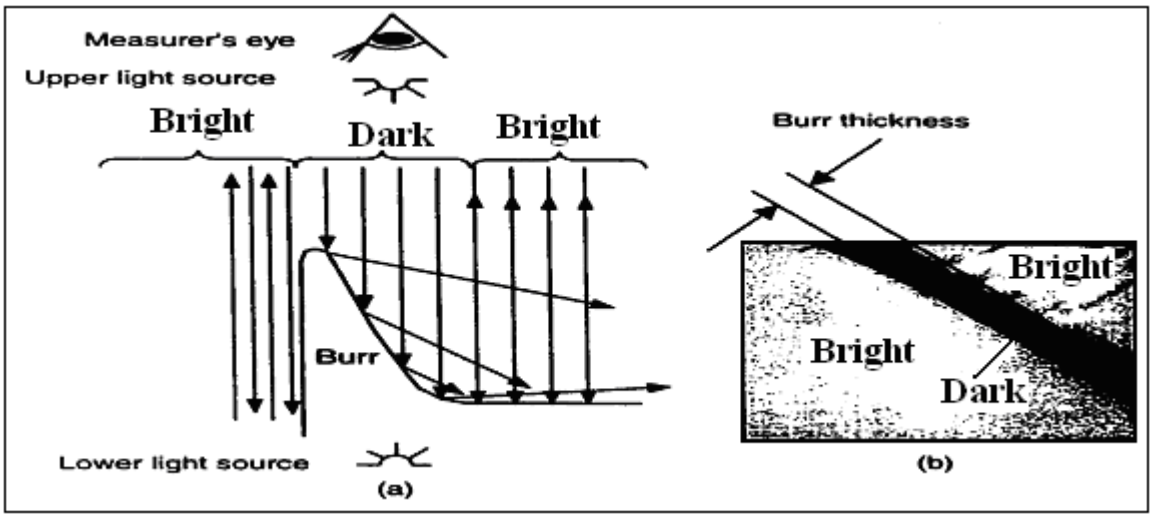


Figure 1.11 Méthode de mesure optique.

(a) principe de réflexion lumineux, (b) épaisseur des bavures en gras
Tirée de Kim (2000)

Selon Kim (2000), la méthode de mesure optique est couramment utilisée pour estimer la hauteur h_o, l'épaisseur b_o et le rayon et la courbe des bavures r_o.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Mesure électronique à balayage (MEB)

La formation de l'image du microscope électronique à balayage est entièrement différente de celle de l'image du microscope optique. Son principe de fonctionnement repose sur l'émission d'un faisceau d'électrons primaire focalisée sur l'échantillon à l'aide de lentilles électromagnétiques (figure 1.12). Les électrons réémis (rétrodiffusées ou secondaires) sont collectés par un détecteur approprié. Des bobines de balayage permettent au faisceau incident de couvrir ligne par ligne la région à étudier, et le signal ainsi obtenu est amplifié et sert à moduler l'intensité du faisceau d'électrons d'un écran cathodique pour créer une d'image en noir et blanc.

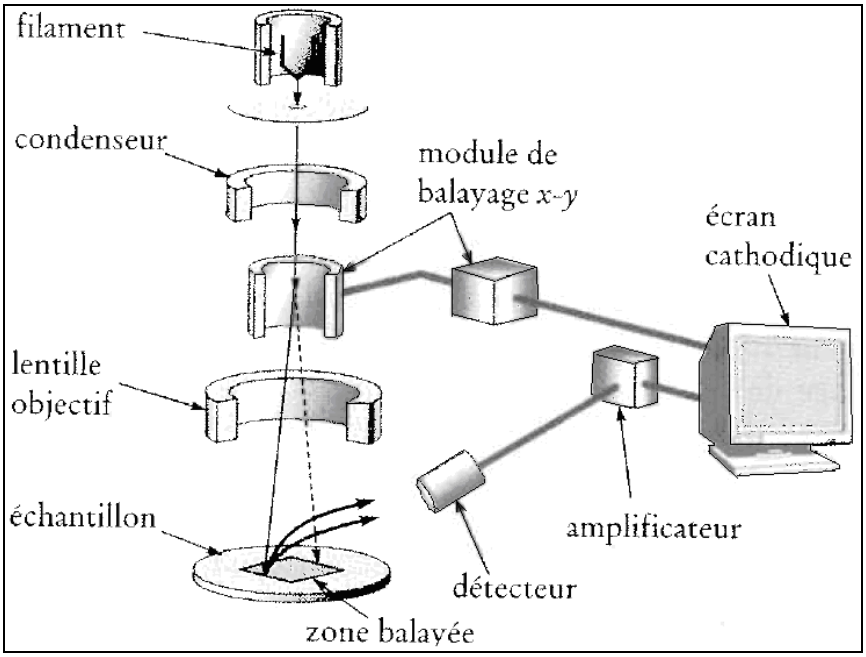


Figure 1.12 Représentation schématique du microscope électronique à balayage.
Tirée de Bailon et Dorlot (2000)

Dornfeld et son groupe de recherche de l'université de Berkeley ont beaucoup utilisé dans leurs travaux de recherche la méthode de mesure à balayage électronique (SEM) pour mesurer la taille des bavures et pour comprendre le mécanisme de leur formation.

Méthode de mesure par contact

La méthode de mesure par contact est basée sur le principe d'ajustement perpendiculaire d'une jauge de contact permettant de mesurer la distance entre deux points : le premier point est positionné au niveau de la surface de la pièce, et le second touche le sommet de la bavure (figure 1.13). Une moyenne des valeurs mesurées le long du bord de la pièce nous donne la hauteur moyenne des bavures, alors que la mesure du plus haut sommet permettra de mesurer la hauteur maximale des bavures.

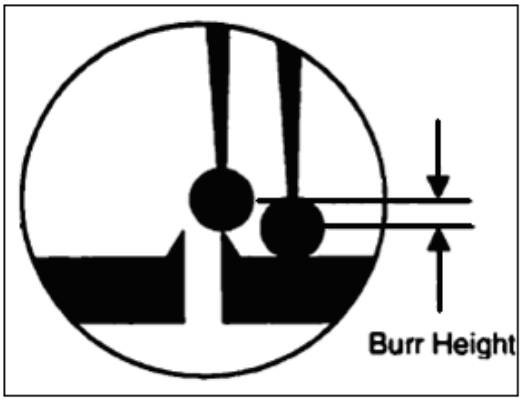


Figure 1.13 Mesure des bavures par la méthode de contact.
Tirée de Kim (2000)

Selon Kim (2000), la méthode de mesure par contact est recommandée pour mesurer la hauteur maximale des bavures, et pourrait être implémentée dans la mesure automatique; cependant, elle n'est pas utilisée dans la mesure de l'épaisseur. Selon Ko (2000), il est difficile de mesurer la taille des bavures avec la méthode par contact à cause de l'irrégularité du profil des bavures et de leur forme aiguë; il est également intéressant de mentionner que la méthode de mesure par contact peut générer continuellement une déformation plastique du matériau sur le sommet des bavures due au contact, ce qui peut engendrer des erreurs de mesure.

Mesure par procédé de moulage (RCM - Rubber Casting Method)

Cette méthode de mesure a été utilisée initialement par Schäfer (1975), pour mesurer le volume des bavures; son principe consiste à couler la pièce dans du caoutchouc pour ressortir des détails sur la géométrie des bavures; l'image négative de l'empreinte obtenue dans le moule reflète fidèlement la forme des bavures qui est mesurée ensuite par un moyen optique. Cette méthode est généralement utilisée dans l'estimation du coût d'ébavurage.

Przyklenk et Schlatter (1986) ont utilisé la méthode de mesure par camera à balayer pour mesurer les bavures d'usinage, cette méthode de mesure commence à être largement intégrée dans l'ébavurage robotisé. Ko (2000) a expérimenté dans ses travaux trois méthodes de mesure sans contact: la méthode de mesure par triangulation, la méthode de mesure conoscopique- holographie, et la méthode interférométrique. L'auteur a présenté les avantages et les inconvénients de chaque procédé, il a également expliqué que dans ces méthodes, on se sert du laser comme source de lumière, et elles sont recommandées pour les géométries complexes où l'accès à la mesure est difficile. Kiha (2004) s'est servit d'un prophilomètre pour mesurer l'uniformité des microbavures issues des opérations d'usinage.

Nous avons présenté dans cette section les principales méthodes de mesure utilisées dans l'étude des bavures, mais le choix de la méthode de mesure dépend en réalité des facteurs suivants :

- Type de recherche désirée (mesure ou observation du mécanisme);
- Précision de mesure désirée;
- Matériau, complexité de la forme et accès à la mesure;
- Coût des équipements.

1.5.3 Méthodologie de la mesure géométrique

Plusieurs procédures de mesure ont été générées dans les diverses études des bavures dans le but de permettre la reproduction fidèle et réelle de leur géométrie. Bansal et Lee (2002),

Lee (2004) ont montré que l'épaisseur de la bavure b_o est proportionnelle à sa hauteur h_o. On privilégie souvent l'épaisseur b_o dans la mesure, car la mesure de la hauteur h_o est moins fiable que la mesure de la racine qui est l'épaisseur b_o. Cependant dans la plus part des cas en production, la mesure de la hauteur des bavures h_o peut être suffisante et reste plus pratique pour l'inspection des pièces. Selon Hashimura *et al*. (1999), Shefelbine et Dornfeld (2004), la procédure la plus appropriée pour la mesure des bavures dans le cas des matériaux fragiles présentant des fractures consiste à mesurer l'épaisseur b_o correspondant au creux du vide laissé par la rupture de la bavure (figure 1.14).

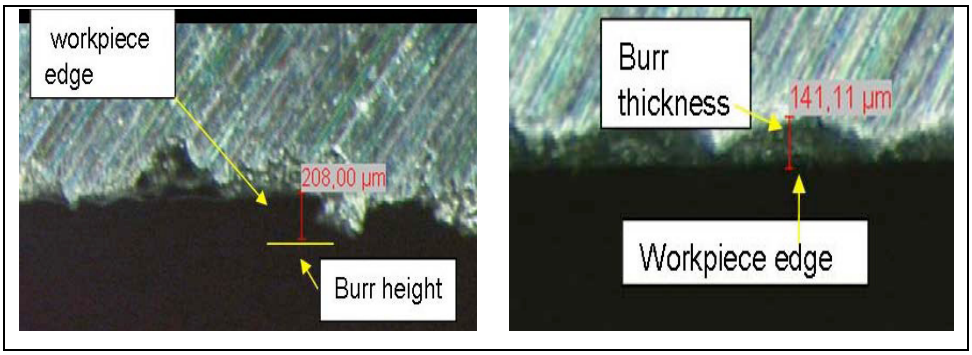


Figure 1.14 Méthode de mesure des bavures à fractures.
Tirée de Dornfeld et Shefelbine (2004)

Selon Benati (1999), la mesure de la hauteur maximale h_o des bavures sur une arête est plus simple et plus représentative que la mesure de la moyenne des hauteurs des bavures sur la même arête. Cependant, si le calcul du volume des bavures est nécessaire, la mesure de la hauteur maximale des bavures h_o ne sera pas efficace.

Présentement dans l'industrie, un grand intérêt est montré dans implémentation des méthodes de mesure des bavures dans les installations flexibles d'ébavurage, puisque de nos jours l'inspection des pièces reste très manuelle et prend beaucoup de temps.

1.5.4 Mesure mécanique des bavures

Les propriétés mécaniques des bavures dépendent principalement de la qualité du matériau de base ainsi que de l'ensemble des transformations que ce dernier a subies durant les opérations d'usinage. Selon Kim et Dornfeld (2002), le manque d'information complète concernant les propriétés du matériau peut constituer un obstacle majeur dans la caractérisation mécanique des bavures d'usinage, puisque les propriétés physico-chimiques précises du matériau ne sont pas tout à fait connues. Le comportement du matériau vis-à-vis des variations de la température, l'état réel des contraintes et le niveau d'homogénéité du matériau sont difficiles à déterminer. La dureté, la résistance, la malléabilité, la ténacité, la ductilité et également la rugosité des bavures peuvent constituer les éléments de base de la caractérisation mécanique. La connaissance des propriétés mécaniques des bavures peut aider à sélectionner le moyen d'ébavurage approprié.

Très peu de recherches ont été faites sur la caractérisation mécanique des bavures, probablement parce que la priorité a été donnée à la réduction de la taille des bavures pendant leur génération. Cependant, quelques études sur la dureté des bavures existent déjà, comparant la dureté du matériau de base à celle du matériau de la bavure.

Dureté des bavures

Les expériences menées par Sofranas (1975) sur l'acier 1018 montrent que les sommets des bavures de perçage peuvent être plus durs que leurs bases (figure 1.15), ceci est causé par les hautes températures et contraintes engendrées à l'extrémité des bavures. L'auteur explique qu'au fur et à mesure qu'on s'approche de la base des bavures, la dureté diminue, car on s'approche de la zone de déformation plastique.

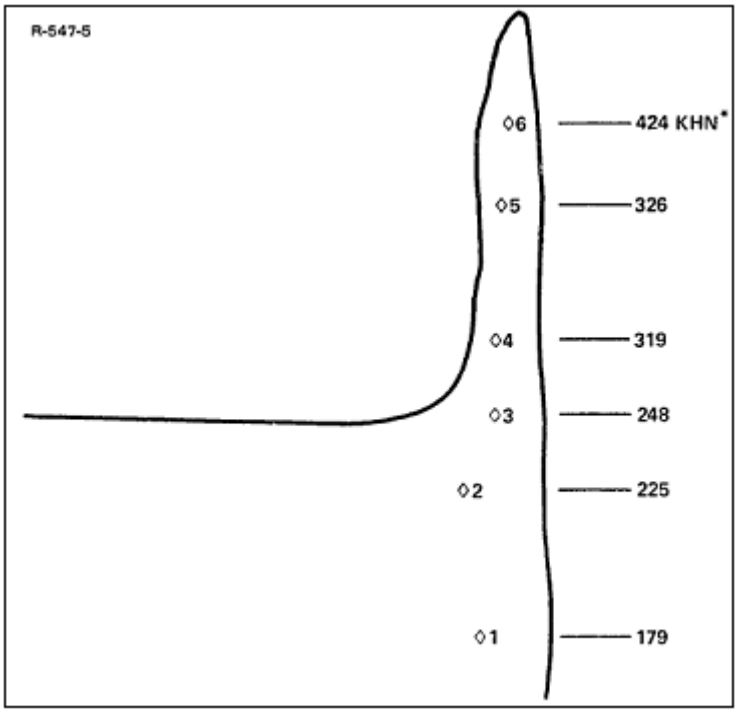


Figure 1.15 Distribution de microdureté sur une bavure.
(Bavure de sortie sur acier 1018), tirée de Sofranas (1975)

Selon Aurich *et al*. (2005), les micros duretés mesurées à la racine de la bavure de meulage conduite sur une pièce en acier de type 90 MnCrV8 ont révélé que la bavure est plus dure que le matériau de base. Toutefois, il a été mentionné que la taille des bavures était considérablement petite pour être mesurées dans les normes (figure 1.16). La zone triangulaire de la pièce colorée en blanc sur la figure 1.16 montre une zone de dureté élevée, engendrée par la grande température atteinte durant le processus de meulage. Le durcissement est le résultat du processus martensitique, métastable, généré par le refroidissement rapide de la pièce à l'aide du lubrifiant.

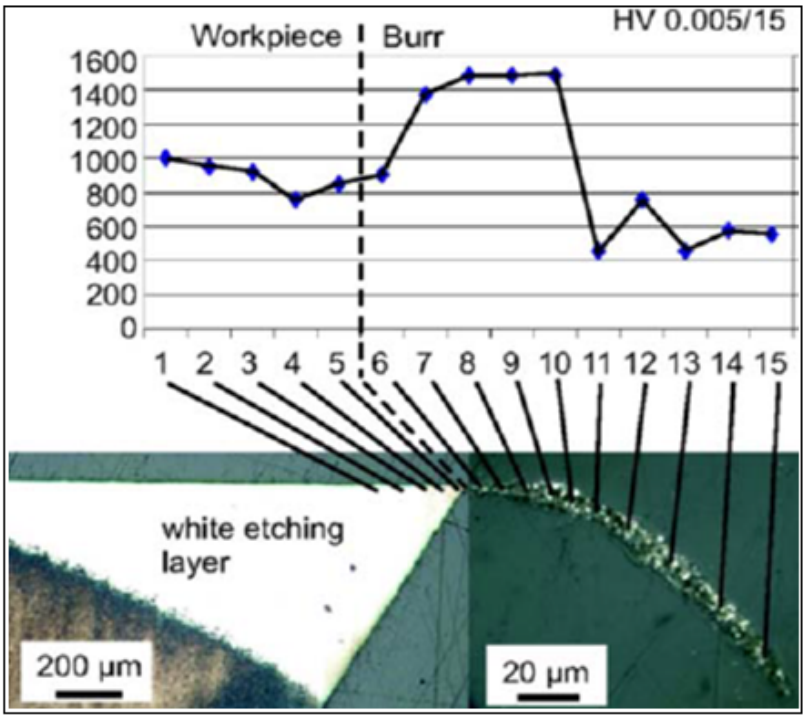


Figure 1.16 Mesure de micro dureté sur la bavure de meulage.
Tirée de Aurich *et al*. (2005)

Selon Gillespie (2006), la dureté des bavures d'usinage peut être inversement proportionnelle à leur taille, puisque leur dureté augmente lorsque leur taille diminue; ceci a été vérifié pendant les opérations d'ébavurage.

La dureté des bavures et sa variation le long de sa hauteur dépendent principalement du type de matériau utilisé et parfois des paramètres de coupe, car les matériaux réagissent différemment aux conditions d'usinage et surtout à l'augmentation de la température; autrement dit : les bavures peuvent être plus dures ou moins dures que le matériau de base, cela dépend de la nature du matériau et des conditions de coupe.

La méthode de mesure de la dureté utilisée par la plupart des chercheurs dans le domaine des bavures était la méthode mécanique destructive « Essais Brinell, Rockwell, et Vickers ». Aurich *et al*. (2005) a mesuré la dureté des bavures de meulage (figure 1.16) en se servant de

la méthode de Vickers qui est basée sur le principe de mesure de l'empreinte laissée par la pénétration d'une pointe pyramidale en diamant dans la surface à mesurer. Cependant, il existe d'autres méthodes de mesure non destructive moins utilisées, par exemple : les méthodes magnétiques et les méthodes ultrasoniques. Selon Thomas et Nguyen (2000), la méthode ultrasonique serait efficace pour la mesure de la dureté, puisque son principe acousto élastique permet de produire un écho à partir d'un signal ultrasonique; la réflexion de cet écho peut donner des informations sur l'aspect physique et mécanique du matériau testé. Mais jusqu'à présent nous n'avons pas encore trouvé de travaux expérimentaux mesurant la dureté des bavures à l'aide de cette méthode. Pareillement, aucune documentation traitant de la résistance des bavures n'est disponible dans la littérature; nous pensons que la connaissance de toutes les caractéristiques mécaniques des bavures peut énormément aider à la planification des opérations d'ébavurage.

1.6 Influence des facteurs technologiques sur la formation des bavures

La formation des bavures est considérée comme un problème crucial pour les industriels; les recherches menées dans ce domaine montrent qu'il est presque impossible d'éviter la formation des bavures, cependant trois situations peuvent apparaître dans l'étude des bavures :

- situation où on cherche à réduire les bavures;
- situation où on cherche à réguler et uniformiser les bavures;
- situation où on cherche à enlever les bavures (ébavurage).

Pour pouvoir examiner ces différentes situations, il serait important d'identifier les différents facteurs technologiques influençant leur génération, et comprendre leur comportement en fonction de la variation des différents facteurs. Nous allons aborder dans les sections qui suivent ces différents points et d'une façon plus en détail.

Le plus grand volume des travaux effectués à ce jour dans le domaine des bavures était concentré sur l'aspect «réduction des bavures» pendant les opérations de fabrication, en

Rapport-Gratuit.com

particulier l'usinage. Selon Sofronas (1975), Tseng et Chiou (2003) et Wygowski (2004), les principaux facteurs technologiques suivants exercent une influence directe sur la formation des bavures qui concerne en particulier les opérations de finition :

- paramètres liés à la pièce;
- conditions de coupe;
- paramètres d'outil;
- paramètres liés à la machine;
- stratégie de fabrication.

Nous avons résumé dans le graphique illustré sur la figure 1. 17 tous les facteurs (principaux et secondaires) pouvant influencer la formation des bavures d'usinage. Toutefois, cette récapitulation serait insuffisante si on ne tient pas compte des différentes interactions existantes entre les facteurs, puisque leur degré d'influence peut varier énormément par un simple ajout ou retrait d'un autre facteur; il est par conséquent important d'analyser le comportement des bavures en tenant compte de la totalité les aspects existants sans aucune exclusion.

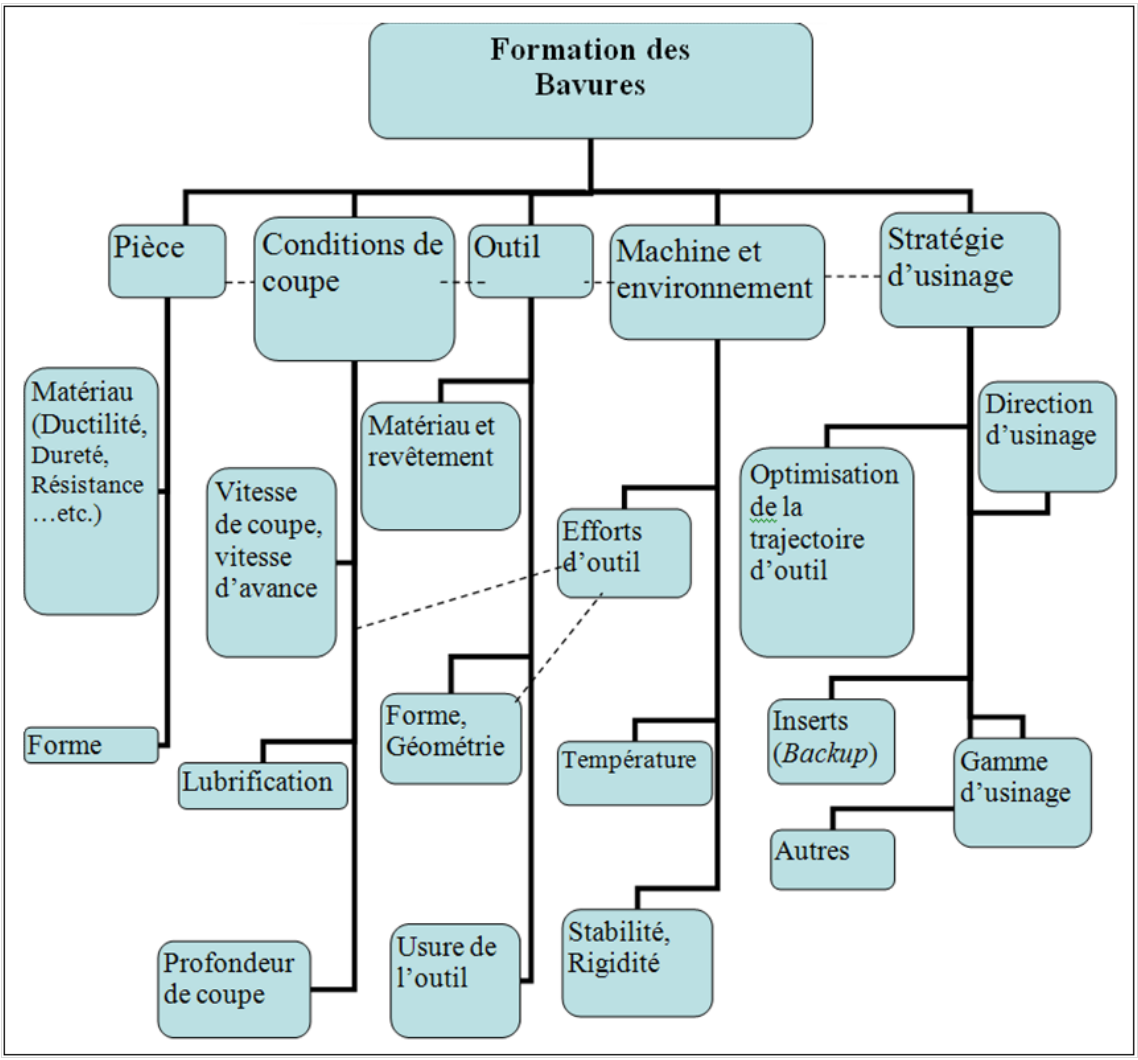


Figure 1.17 Influence des facteurs technologiques sur la formation des bavures.

Dans les sections qui suivent, nous allons voir en détail l'ensemble des éléments rapportés dans la figure 1.17 et expliquer en profondeur ce qui a été fait lors des différentes études.

1.6.1 Paramètres liés à la pièce

Les paramètres liés à la pièce peuvent influencer la formation des bavures; nous retrouvons : le matériau de la pièce, ses traitements thermiques, superficiels et sa géométrie.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Le matériau de la pièce.

Les propriétés du matériau à usiner ont une grande influence sur la formation des bavures. Les caractéristiques mécaniques habituellement rapportées dans la littérature incluent : la dureté vs ductilité, la limite élastique, la résistance, et l'allongement constituent les principales propriétés du matériau affectant la génération des bavures. Toutefois dans les études expérimentales menées par les nombreux chercheurs, on ne tient compte que de l'aspect dureté vs ductilité du matériau de la pièce. Le tableau 1.4 indique les types de matériaux généralement retrouvés dans le domaine aéronautique.

Tableau 1.4 Quelques matériaux retrouvés dans le domaine aéronautique
ASM International Handbook (2007)

Matériaux
- Alliages d'aluminium
- Aciers inoxydables
- Alliages de titane
- Alliages de Nickel
- Matériaux composites

Selon Kim et Dornfeld (2002), l'usinage des matériaux ductiles tend à former des bavures de grandes tailles, ce phénomène s'amplifie lorsqu'on augmente la vitesse de coupe et la vitesse d'avance. Cependant lorsque le matériau est fragile, des fractures de bavures se créent au bord de la pièce, le phénomène s'amplifie également avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance, créant ainsi de grands creux et bavures de relief irrégulier. L'auteur explique aussi que le sens métallographique du matériau de la pièce pourrait influencer la formation des bavures, car l'orientation de l'usinage dans le sens métallographique pourrait générer moins de déformations, par conséquent moins de formation de bavures.

Géométrie de la pièce

Il est confirmé que la géométrie de la pièce à usiner influence la formation des bavures, et l'élément géométrique le plus important qui a beaucoup d'influence sur la taille des bavures, est l'angle du bord de la pièce. Selon Przyklenk et Schlatter (1986), Wygowski (2004), un angle du bord de la pièce inferieur à 90° peut engendrer de longues bavures avec de petites épaisseurs; par contre, un angle de bord de la pièce supérieur à 90° crée de courtes bavures (figure 1.18).

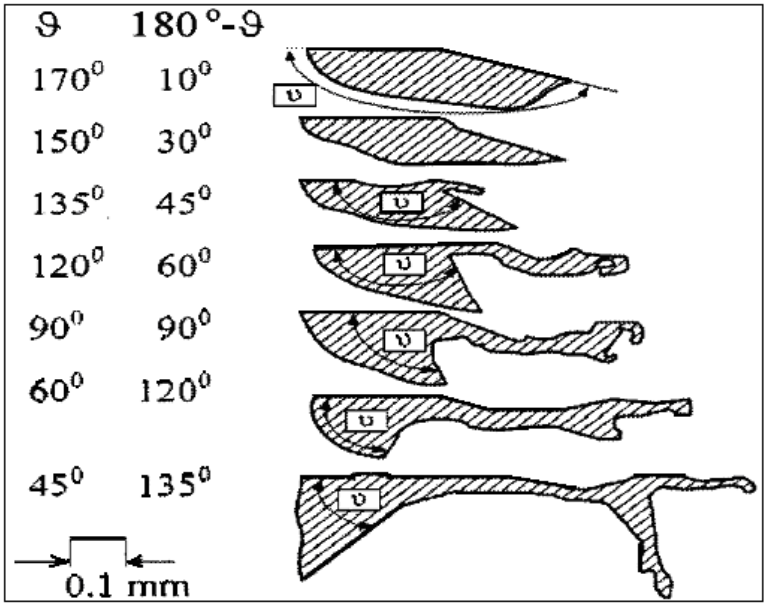


Figure 1.18 Influence de la géométrie de la pièce sur la taille des bavures.
Tirée de Przyklenk et Schlatter (1986)

Dans l'industrie on chanfreine souvent la pièce avant l'usinage final afin d'éviter des angles de bord près de 90° et réduire par conséquent la probabilité de formation des bavures.

Traitement superficiel de la pièce

Selon Sofranas (1975), la taille des bavures augmente avec l'accroissement du rapport de la contrainte de cisaillement du copeau sur celui de la pièce (τ_c / τ_w); pour réduire la taille des bavures, il faut soit augmenter la contrainte de cisaillement de la pièce $\tau_{w,}$ soit diminuer la contrainte de cisaillement du copeau τ_c. L'auteur a expérimenté un traitement thermique par la trempe pour augmenter la dureté superficielle du matériau de la pièce, cette expérience a permis de diminuer sensiblement la taille des bavures en hauteur et en épaisseur (figure 1.19). Le matériau expérimenté était l'acier AISI 1018, trempé à une profondeur de 0,0075 pouce supérieure à la profondeur de passe qui était de 0.006 pouces, le matériau obtenu était 2.5 fois plus dur que le matériau de base.

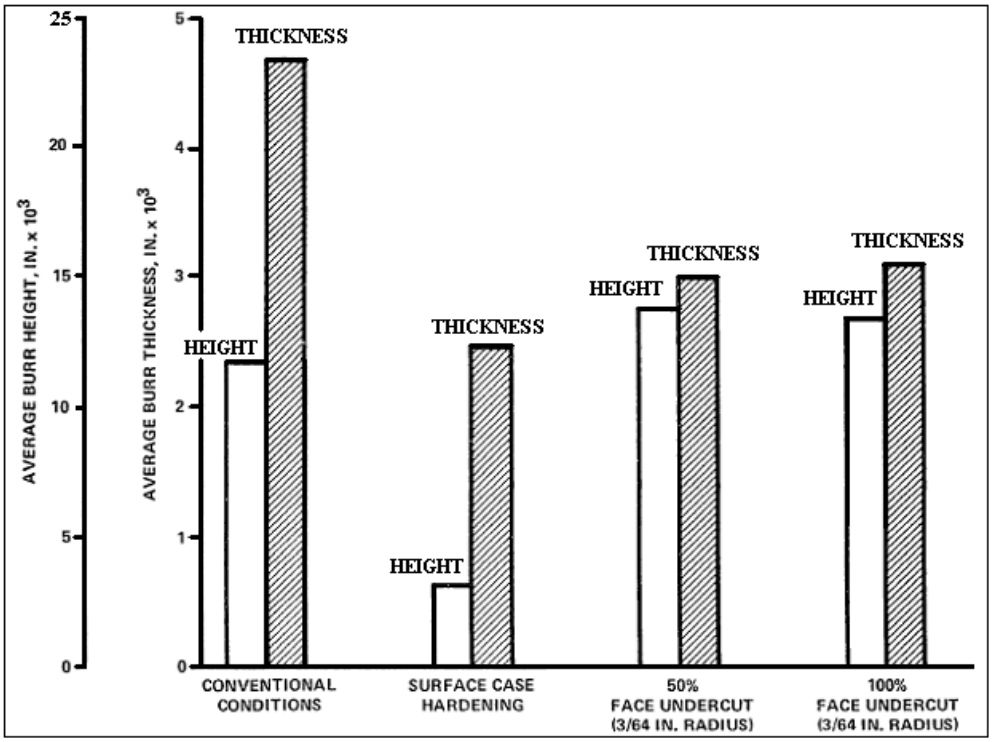


Figure 1.19 Effet du durcissement du matériau sur la taille des bavures.

Tirée de Sofranas (1975)

L'inconvénient de ce procédé est que des fissures peuvent se développer sur les surfaces durcies de la pièce, ce qui rend le processus plus complexe à contrôler; la trempe durcit la plupart des matériaux, ce qui affecte leur usinage et leur ébavurage même si les bavures engendrées sont de petite taille.

Gillespie (2006) explique que tout moyen pouvant prévenir la déformation plastique du matériau, réduira la taille des bavures; l'auteur a cité les techniques de durcissement comprenant les traitements par laser, les procédés mécaniques localisés, les traitements chimiques et thermiques et l'usinage dur. Effectuer un chanfrein sur les arêtes de sortie de la pièce avant l'opération d'usinage dans le but de prévenir la déformation du matériau au bord de la pièce peut aussi constituer une bonne approche pour réduire la taille des bavures à la sortie de la pièce.

1.6.2 Conditions de coupe

La plupart des auteurs affirment que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de coupe et le mode de lubrification peuvent influencer la formation des bavures d'usinage. L'étude réalisée par Chern (1994) montre que la hauteur des bavures de perçage peut être assez importante à faible ou à grande vitesse d'avance (figure 1.2). Des valeurs intermédiaires de la vitesse d'avance peuvent réduire au minimum la hauteur des bavures. L'auteur a également montré que le profil des bavures obtenu change en fonction de la variation du matériau de la pièce et des conditions de coupe. Les expériences menées par Kim et Dornfeld (2002) sur quatre matériaux différents «acier faiblement allié 4118, acier inoxydable 304L, alliage de titane Ti-6Al-4V et l'alliage d'aluminium Al 6061», montrent que le perçage à grandes vitesses de coupe et d'avance génère des bavures de grandes tailles non uniformes, alors que l'usinage à petites vitesses de coupe et d'avance, génère des bavures de petite taille, plus uniforme.

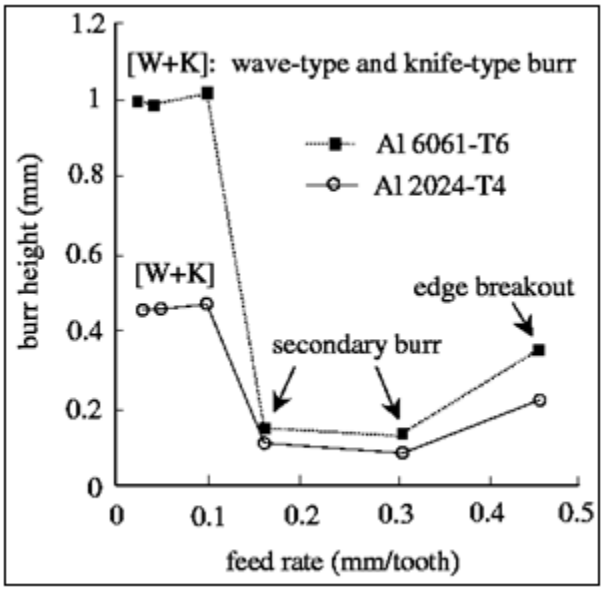


Figure 1.20 Influence de la vitesse d'avance sur les bavures de perçage.
(P = 1.02 mm pour l'Al 6061-T6; P = 0.64 mm pour l'Al 2024-T4;
V_c = 2.48 m/s; lubrification à air), tirée de Chern (1994)

Selon Avila et Dornfeld (2003), la hauteur des bavures varie d'une manière non régulière en fonction de la variation des conditions de coupe. Le graphique (figure 1.21) montre que l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à 2513 m/min, augmente au maximum la hauteur des bavures, mais au-delà de cette valeur, la hauteur des bavures commence à diminuer jusqu'à atteindre une petite valeur autour de 3927 m/min. Selon l'auteur, la diminution de la hauteur des bavures pendant l'usinage à haute vitesse de coupe peut s'expliquer par un phénomène de transition du matériau d'un comportement ductile à un comportement fragile, où la surface usinée de la pièce est durcie.

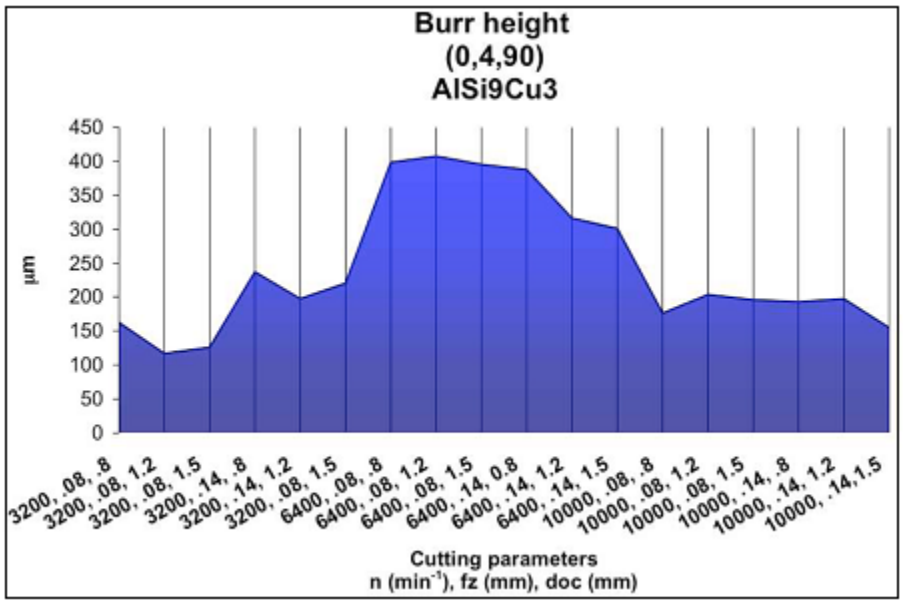


Figure 1.21 Hauteur des bavures en fonction de la variation des conditions de coupe.
Matériau de la pièce : AlSi9Cu3, tirée de Avila et Dornfeld (2003)

Gillespie (2006) a remarqué que l'usinage à grande/très grande vitesse de coupe «appelé souvent usinage dur - plus de 10000 pieds par minutes dans le cas du tournage par exemple» est une technique pouvant générer des micros-bavures, dépendamment des matériaux utilisés. Selon King *et al*. (1984) la température d'usinage augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe, jusqu'à atteindre un certain pic de température; à partir de ce sommet, une plus grande vitesse de coupe diminue davantage la température. L'auteur explique que ce phénomène peut influencer la ductilité du matériau pendant l'usinage, l'usure de l'outil, la formation du copeau et même la formation des bavures. Selon Wang and Zhang (2004), la taille des bavures peut dans certains cas augmenter à très petites vitesses d'avance, car au moment de la génération des petits copeaux, l'outil commence à brouter au lieu de couper le matériau, ce qui produit de larges bavures très difficiles à enlever.

Kim et Dornfeld (2002), Wygowski (2004) ont montré que l'augmentation de la profondeur de coupe pendant l'usinage augmente la taille des bavures. Mais cette augmentation peut varier en fonction d'autres paramètres de coupe utilisés. Tseng et Chiou (2003) considèrent

que dans certaines situations, l'influence de la profondeur de coupe sur la taille des bavures peut être plus importante que l'influence de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance. Chern (1994), Olvera et Barrow (1996) montrent que dans certains cas de fraisage, il est possible de diminuer la taille des bavures par l'application d'une grande profondeur axiale, mais en pratique cette méthode est difficile à implémenter à cause des dommages qu'elle peut engendrer; des dommages liés à la pièce, à l'outil et à la machine. Toutefois, dans le cas de l'usinage des matériaux ductiles, on recommande une profondeur de coupe assez importante pour éviter le phénomène de flexion de la pièce qui pourrait probablement influencer la formation des bavures.

Selon Olvera et Barrow (1996), Tseng et Chiou (2003), les conditions de coupe n'influencent pas les bavures supérieures dans le cas du fraisage, car ces bavures sont considérées comme des bavures de *poisson,* elles sont le résultat de la déformation latérale de l'outil au moment de l'usinage.

Les recherches faites dans le domaine de l'usinage montrent qu'en général, l'usage des très grandes et/ou très faibles vitesses de coupe et d'avance ne peut pas être une approche d'usinage économique, ceci à cause des préjudices que peut générer à l'encontre de l'outil et de la pièce; cependant, il serait possible d'optimiser ces paramètres à fin de réduire les coûts d'usinage engendrés et augmenter la productivité.

La lubrification

Selon Simon *et al*. (2004), une lubrification appropriée réduit la chaleur par son effet de refroidissement et réduit les frottements entre la pièce et l'outil, ce qui minimise la formation des bavures. Les essais de perçage réalisés par Sofranas (1975) en se servant de plusieurs types de lubrifiants ont montré que le *sulfochlorinated minéral oil* minimise la taille des bavures, ceci serait probablement dû à la grande qualité du lubrifiant de diminuer l'énergie mise dans le processus d'usinage, ainsi que de réduire les forces de frictions entre l'outil et le copeau. Selon Aurich *et al*. (2005), la lubrification peut dans le cas de certains matériaux

augmenter la dureté des bavures, ce qui les rend plus difficile à enlever. Selon Klocke et Eisenblätter (1997), la température pendant le perçage d'un acier AISI 1045 peut atteindre 150° C avec lubrification, mais 400° C sans lubrification, ce qui peut affecter l'état de surface de la pièce, influencer la formation des copeaux, la formation des bavures et l'usure des outils. L'auteur explique que l'usinage à sec est possible pour les alliages d'aluminium principalement ceux à forte teneur en si à cause de leur ductilité.

L'étude réalisée par Dornfeld et Shefelbine (2004) montre que l'usinage à sec peut être économiquement avantageux, puisque le coût du lubrifiant est élevé (peut atteindre 16 % du coût de fabrication). L'utilisation du lubrifiant a également des effets négatifs sur la santé des opérateurs par la vapeur toxique engendrée, les risques de maladies dermatologiques et le phénomène de culture bactérienne dans le lubrifiant. Le côté environnemental est également affecté par la pollution atmosphérique et la pollution des eaux produite. Cependant, l'usinage à sec à aussi des inconvénients tels que : l'augmentation de la température, donc accélération de l'usure de l'outil, modification des propriétés mécaniques du matériau, par conséquent formation des bavures. Selon Graham (2000), le coût associé à l'outil peut attendre 4% du coût de total de fabrication, ce qui est moins élevé que le coût de la lubrification. La réduction de la quantité du lubrifiant peut être une solution intéressante, mais pas suffisante; le (MQL) *minimum quantity lubricant* est une méthode basée sur le principe de pulvérisation d'une petite quantité de lubrifiant dans l'air comprimé, le processus peut utiliser 10 à 40 ml d'huile par heure et peut être utilisé là où l'usinage à sec n'est pas permis; cette méthode pourrait générer moins de bavures comparativement à l'usinage à sec.

On déduit que l'usinage à sec peut être très avantageux à cause des économies pouvant être faites par rapport au coût du lubrifiant, ses bienfaits sur la santé publique et l'environnement. Cependant, les coûts liés à l'outil peuvent augmenter rapidement à cause de l'usure engendrée, mais ces coûts peuvent être largement récupérés par les différentes économies liées à l'usinage à sec, en choisissant les bonnes conditions de coupe. Cette déduction concorde avec la conclusion faite par Zaghbani *et al*. (2009) dans son article sur la comparaison entre l'usinage à sec et l'usinage lubrifié.

Rapport-Gratuit.com

1.6.3 Paramètres d'outil

Les études faites dans le domaine des bavures montrent que l'outil d'usinage peut avoir une grande influence sur la formation des bavures. Le matériau de l'outil, son revêtement, sa géométrie et son taux d'usure constituent les principaux paramètres liés à l'outil. Cependant, le choix de ces paramètres dépend principalement du matériau de la pièce à usiner, de l'opération d'usinage et des conditions de coupe.

Les principales performances d'outils de coupe espérée se résument généralement dans : la longévité, la résistance thermique, la résistance à l'oxydation, la dureté et l'état de surface générée. Le coût des outils est également un critère très important dans la sélection des outils. Les fabricants d'outils utilisent une base standard des matériaux à usiner pouvant aider les industriels dans leurs choix d'outils ; on attribue à chaque groupe de matériau une lettre pour le distinguer des autres matériaux (Tableau. 1.5).

Tableau 1.5 Classification industrielle des matériaux à usiner
(Disponible dans la plupart des catalogues d'outils de coupe)

Symbole	Description
P	Usinage des aciers
M	Usinage des inoxydables
K	Usinage des fontes
N	Usinage des non ferreux
S	Usinage des super alliages
H	Usinage des matières traitées

Plusieurs revêtements à base de nitrure, de chrome, de titane, d'oxyde d'aluminium, etc. ont été introduits pour améliorer la qualité des outils. Présentement une grande variété d'outils de coupe est disponible sur le marché; chaque type de revêtement est utilisé selon les besoins de l'application.

On retrouve dans l'industrie trois principales méthodes de revêtement :

- PVD (dépôt physique en phase vapeur);
- CVD (dépôt chimique en phase vapeur);
- MTCVD (dépôt chimique en phase vapeur à moyenne température).

Il est conseillé de choisir un revêtement PVD pour les opérations fines (faible épaisseur de copeau ex : filetage), un revêtement CVD ou MTCVD pour les opérations plus lourdes où l'outil est sollicité à fournir plus d'effort. Les outils CBN (nitrure de bore cubique) sont recommandés pour l'usinage des matériaux traités (>1500 Mpa). Les outils PCD (diamant polycristallin) pour l'usinage des matériaux non ferreux et les matériaux composites. (Référence : Catalogue d'outillage Minicutt (2007), Iscar (2006), et Kennametal (2008)).

Les revêtements de titane sont les revêtements les plus utilisés dans l'usinage. Les revêtements les plus communs sont : TiN, TiAlN et TiCN (voir description au tableau 1.6).

Tableau 1.6 Description des revêtements de titane
Catalogue d'outillage Sandvik (2008)

Revêtement	**Description**	**Couleur**	**Dureté**	**Utilisation**
TiN	*Titanium Nitride*	Dorée	2400 HV	Universel, avec conditions de coupe modérées
TICN	*Titanium Carbon Nitride*	Gris magenta	3000 HV	Résistant à l'usure, recommandée pour l'acier inoxydable
TIAIN	*Titanium Aluminum Nitride*	Noir magenta	3000HV	Résistant à l'oxydation et aux hautes températures d'usinage, recommandées pour la fonte et pour les alliages d'aluminium à forte teneur en silicium.

Très peu de recherche a été faite pour déterminer l'influence du matériau et revêtement de l'outil sur la formation des bavures. Par ailleurs, plusieurs recherches ont été menées pour déterminer l'influence de la géométrie de l'outil sur la formation des bavures. Dans le passé

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

l'étude des copeaux d'usinage occupait une grande place parmi les recherches faites dans le domaine de l'usinage, cependant ces dernières années plusieurs auteurs ont expérimenté plusieurs formes d'outils pour déterminer leurs influences sur la formation des bavures.

Selon Kim et Dornfeld (2002), l'augmentation de l'angle de pointe, et la diminution de l'angle d'hélice pendant le perçage augmentent la force de poussée de l'outil, par conséquent augmentent le volume du matériau déformé, se qui génère de grandes bavures (figure 1.22). On remarque qu'autour d'un angle de pointe de 150^0, l'outil génère une grande taille de bavures, et l'augmentation de l'angle d'hélice diminue la taille des bavures.

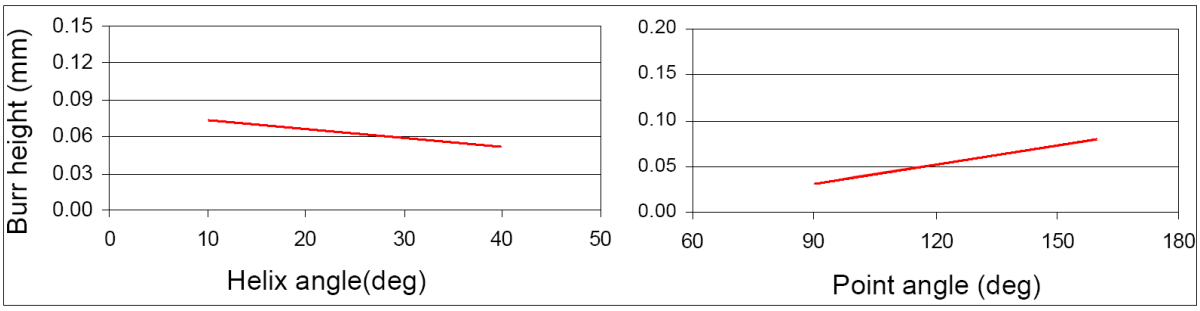


Figure 1.22 Influence de la géométrie de l'outil sur les bavures de perçage.
(Matériau : Acier AISI4118; diamètre de l'outil : 3.9688 mm;
f/d = 0.02 [mm/tr x 1/mm]), tirée de Kim et Dornfeld (2002)

Il a été mentionné que la variation du diamètre de l'outil n'affectait pas la taille des bavures. Selon Kim et Dornfeld (2002); Kim. (2000); Kishimoto *et al*. (1981); Chern (1994); Wang et Zhang (2004), la diminution du rayon de l'arrête de l'outil r, diminue la taille des bavures. Selon Shefelbine et Dornfeld (2004) l'augmentation de l'angle d'inclinaison axiale **α** et l'augmentation de l'angle d'inclinaison radiale β dans le cas du surfaçage diminuent la taille des bavures. Pande et Relekar (1986) expliquent que le diamètre de l'outil, le rapport de la longueur de coupe et du diamètre de l'outil, la dureté de l'outil et la vitesse d'avance peuvent influencer la formation des bavures de perçage. Les auteurs montrent qu'il existe un intervalle de paramètres de coupe optimums où la formation des bavures peut être réduite au minimum.

Wygowski (2004) a montré que le choix du type d'outil de coupe peut influencer la taille des bavures; l'auteur a essayé deux types de fraise (fraise- disque et fraise en bout) pendant l'opération de rainurage, il a observé que la fraise- disque produit moins de bavures que la fraise en bout. Le choix de la fraise-disque peut être très avantageux s'il n y a pas de contraintes de design. Sofranas (1975) a expérimenté un outil de perçage à coins arrondis au niveau des extrémités des lèvres pour réduire la formation des bavures; il a été remarqué qu'une modification de la forme de l'outil peut générer moins de bavures à la sortie du trou. Ko *et al*. (2003) ont expérimenté un outil de perçage étagé avec deux diamètres différents; l'outil proposé a généré moins de bavures à la sortie du trou qu'un outil standard. Kim (2000) a étudié un outil de perçage désaxé (*gun drill*), avec une pointe décentrée; selon l'auteur, cet outil a réduit considérablement la taille de bavures à la sortie du trou. Gillespie (2006) a montré qu'un outil de perçage ayant divers angles d'hélice, notamment un angle d'hélice au niveau de la partie supérieure de l'outil, et deux angles d'hélice au niveau inférieur peut générer moins de bavures qu'un outil standard, car il permet une coupe en double sens plus équilibrée.

Usure de l'outil

Plusieurs études montrent que l'usure de l'outil peut influencer la formation des bavures. Selon Gillespie (2006), Kim et Dornfeld (2002), Wang and Zhang (2004), l'usure de l'outil et les conditions de coupe utilisées, en particulier la vitesse d'avance peuvent être les principaux facteurs influençant la formation des bavures. Les auteurs expliquent qu'un outil vif réduit les efforts de coupe, ce qui peut réduire considérablement la formation des bavures. Un outil neuf avec une géométrie appropriée, comme un angle de coupe positif dans le cas d'une fraise peut éviter la formation de l'arête rapportée; par conséquent, diminuer la formation des bavures.

La durée de vie de l'outil tel qu'exprimé par Taylor et rapportée par Marksberry et Jawahir (2008) montre que la vie utile de l'outil dépend de la vitesse de coupe pendant l'usinage, du matériau de l'outil et de la pièce, et également de la vitesse d'avance :

$$V_c * T^n = C_t \quad (1.1)$$

Où :

V_c : Vitesse de coupe

T : Durée de vie de l'outil

n et C_t sont des constantes trouvées expérimentalement; elles dépendent des matériaux de l'outil, du matériau de la pièce et de la vitesse d'avance.

Les différents modes d'usure répertoriée jusqu'à présent peuvent être :

- l'usure par abrasion;
- l'usure par diffusion (chimique);
- l'usure par oxydation (chimique);
- l'usure par fatigue statique ou dynamique (mécanique);
- l'usure par adhérence (mécanique et thermique).

Physiquement sur l'outil, l'usure survient essentiellement sur les deux principales parties actives de l'outil, la face de coupe et la face de dépouille, formant ainsi l'usure de cratère et l'usure de flanc (figure. 1.23).

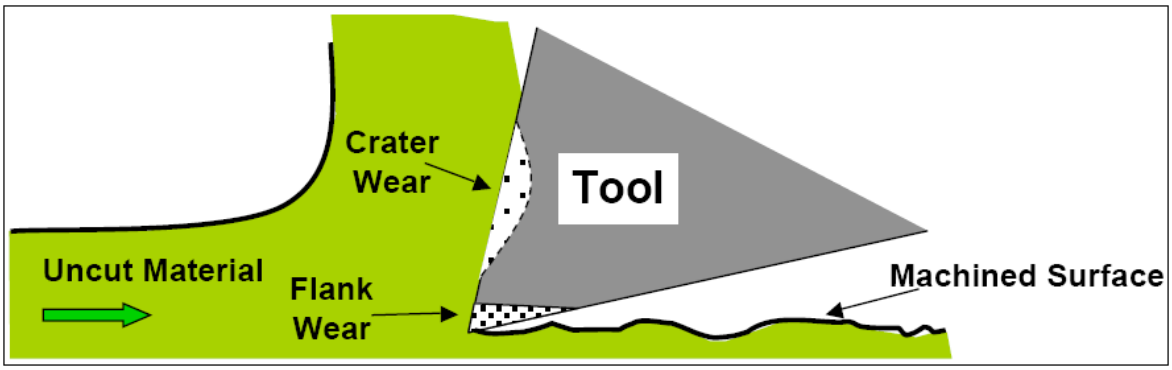


Figure 1.23 Usure de la pointe de l'outil.
Tirée de Choi *et al*. (1990)

Selon Choi *et al.* (1990), la formation des bavures générée à l'entrée et à la sortie de la pièce est fonction de l'usure de l'outil; la figure 1.24 nous montre des relations entre la taille des

bavures et la durée de vie de l'outil. Selon l'auteur, les bavures de sortie de la pièce peuvent être plus influencées par l'usure de l'outil que les bavures de d'entrée.

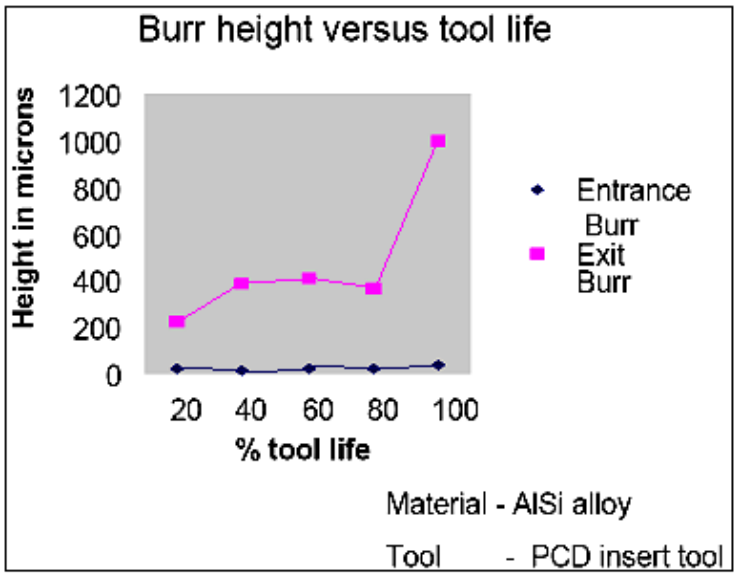


Figure 1.24 Relation entre la formation des bavures et l'usure de l'outil.
Tirée de Choi *et al*. (1990)

Selon Tseng et Chiou (2003), Kim et Dornfeld (2002), Gillespie (1976), les conditions de coupe extrêmes comme l'augmentation de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance dans le cas de certains matériaux peuvent augmenter la température d'usinage; par conséquent, la durée de vie de l'outil devient courte à cause de l'usure. Le taux de contraintes dans le matériau augmente et la taille des bavures devient plus importante. Les mêmes problèmes peuvent réapparaître lorsque l'usinage est effectué à sec et lorsque la géométrie de l'outil est inadéquate. Toutefois, selon Lee et Dornfeld (2005), un outil usé produit parfois moins de bavures lorsque la condition $P/r < 1$ est satisfaite (où : P est la profondeur de coupe, r est le rayon de la pointe de l'outil). La modification du rayon de l'outil r est parfois utilisée dans des expériences pour simuler l'usure de l'outil. Cependant, vu que le phénomène d'usure est complexe, cette méthode de simulation ne peut refléter d'une manière fidèle l'influence de l'usure de l'outil sur les différentes variables d'usinage.

L'outil de coupe joue un rôle important dans le processus de formation des bavures, plusieurs types d'outils ont été expérimentés dans le but de réduire la taille des bavures générées. Cependant, très peu de travaux abordent l'influence du matériau de l'outil et de son revêtement sur la formation des bavures.

1.6.4 Paramètres liés à la machine et son environnement

La formation des bavures d'usinage peut être influencée par la machine et son environnement immédiat; on distingue :

- l'état, la stabilité et la rigidité de la machine;
- la température ambiante environnante l'usinage.

Selon Chern (2006), la stabilité et la rigidité de la machine peuvent influencer le processus de formation des bavures, néanmoins cette influence peut être à un moindre degré comparativement aux autres paramètres essentiels tels que le matériau de la pièce, l'outil est les conditions de coupe. Tseng et Chiou (2003) affirment que l'instabilité de la machine, le manque de précision en particulier le décalage axial et les différentes vibrations liées à l'usinage peuvent influencer la formation des bavures. L'expérience d'usinage menée par Sofranas (1975) sur l'acier AISI 1080, montre que la température environnante l'usinage peut influencer la formation des bavures; l'auteur a essayé un environnement d'usinage refroidi à -100 ^{o} F à l'aide de l'azote, il a remarqué que la taille des bavures a légèrement diminué. L'auteur a conclu qu'en termes de formation des bavures, les conditions de coupe, l'outil et le matériau de la pièce peuvent représenter les facteurs les plus influents comparativement à l'aspect environnement d'usinage.

1.6.5 Stratégie de coupe

Wygowski (2004), Wang et Zhang (2004), Chu et Dornfeld (2004), Simon *et al*. (2005) ont montré que le choix d'une stratégie d'usinage peut influencer la formation des bavures; les principales stratégies ayant été appliquées jusqu'à présent incluent :

- L'optimisation de la trajectoire de l'outil;
- L'utilisation d'inserts (backup material);
- Le choix de la direction d'usinage et l'angle de désengagement de l'outil;
- La modification de la gamme d'usinage;
- Les procédés non conventionnels.

Optimisation de la trajectoire de l'outil

Les recherches menées par Narayanaswami et Dornfeld (1997), Hassamontr (1998), Chu et Dornfeld (2004), Rangarajan (2005), Tripathi et Dornfeld (2006) ont montré que le choix de la trajectoire de l'outil pendant l'usinage peut influencer la formation des bavures. En effet, tout parcours de l'outil favorisant l'entrée dans la matière au lieu de la sortie, peut réduire la taille des bavures. La pénétration arquée (figure 1.25) et l'usinage en avalant, peuvent diminuer considérablement la formation des bavures.

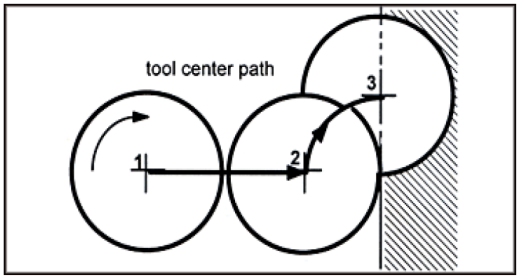


Figure 1.25 Optimisation de la trajectoire de l'outil - entrée arquée.
Tirée de Hassamontr (1998)

Plusieurs algorithmes ont été développés dans le but de réduire la taille des bavures, principalement pour les pièces à géométrie complexe, et ceci, en se basant sur les principes d'optimisation de la trajectoire de l'outil pendant l'usinage.

Sofranas (1975) a proposé de planifier différentes vitesses d'avance pour optimiser la trajectoire de l'outil de perçage dans le but de réduire la formation des bavures. Il a proposé de commencer le perçage par une grande vitesse d'avance et finir par une petite sans pour

autant expérimenter son idée; le principe derrière était de donner à l'outil plus de temps pour couper le métal, par conséquent moins de formation de bavures.

Wygowski (2004) a montré qu'une pénétration échelonnée de l'outil pendant le rainurage peut influencer considérablement la formation des bavures (figure 1.26). Partant du principe que les bavures de sortie sont souvent plus importantes que les bavures d'entrée; l'auteur a montré que l'approche serait meilleure que l'approche conventionnelle. En effet, la manœuvre de l'outil constituée de 7 étapes visait à remplacer le dégagement de l'outil par un engagement :

- (1) contact initial;
- (2) première passe de l'outil avec une profondeur ap1;
- au lieu d'un dégagement, l'outil effectue un engagement (3) avec une profondeur ap_2 pour éviter de former les bavures de sortie;
- ensuite, faire une autre passe (4);
- un engagement (5) avec une profondeur ap_3 plus importante;
- une dernière passe (6);
- et finir par un retrait de l'outil (7) qui n'a pas une grande incidence sur la formation des bavures.

L'auteur explique que l'étape (7) a contribué à éliminer le *Mismatch* (MM) appelé aussi **surfaces de non-coïncidence** pendant l'usinage de deux surfaces adjacentes. L'irrégularité des profondeurs de coupe sélectionnées avait pour objectif d'esquiver l'épaulement de la pièce, par conséquent éviter les chocs d'usinage.

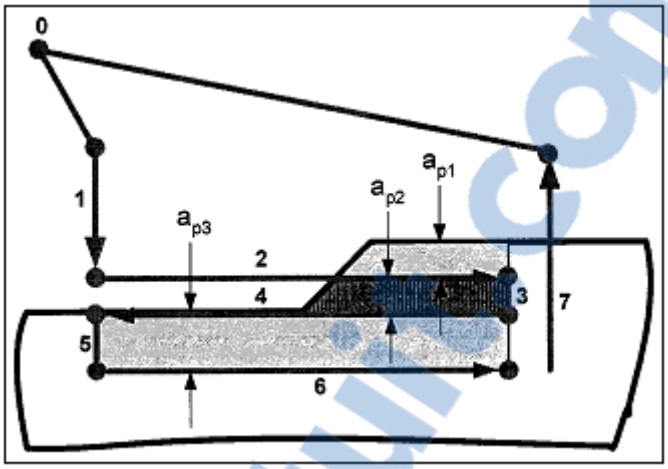


Figure 1.26 Cheminement échelonné de l'outil lors d'une opération de rainurage.
(a_{p1}=a_{p2}= 0.0535 pouces, a_{p3}=0.063 pouces), tirée de Wygowski (2004)

Avila et Dornfeld (2004) montrent qu'un petit diamètre d'outil peut mieux aider et faciliter l'application des techniques d'optimisation de la trajectoire de l'outil, comparativement à un grand diamètre. Cependant, le temps de cycle risque d'être plus long. Pour réduire les bavures de tournage, Gillespie (2006) a contourné l'arête de la pièce, au lieu d'effectuer un chariotage, puis un dressage séparément; cette approche avait créé juste un petit chanfrein ou arrondi au coin de la pièce sans toutefois créer des bavures.

L'optimisation de la trajectoire de l'outil peut constituer une très bonne technique pour réduire la taille des bavures. Cependant, son inconvénient réside dans le temps de cycle qui est souvent augmenté. Par conséquent, augmentation du coût d'usinage.

Utilisation d'inserts (*backup material*)

La technique d'insert appelée aussi élément de soutien consiste à soutenir le matériau de la pièce pendant l'usinage dans le but de prévenir sa déformation; lorsqu'il y a moins de déformation du matériau, il y a moins de formation de bavures. Les inserts doivent être placés dans des endroits stratégiques déterminés par le sens de l'usinage. L'expérience menée par Wygowski (2004) montre que le placement d'inserts coulés dans deux cavités de

Rapport-Gratuit.com

la pièce ainsi que l'ajout d'un bloc accoté à l'extérieur de la pièce dans le but de prévenir la déformation du matériau, peut réduire considérablement la taille des bavures pendant les opérations de surfaçage (figure 1.27).

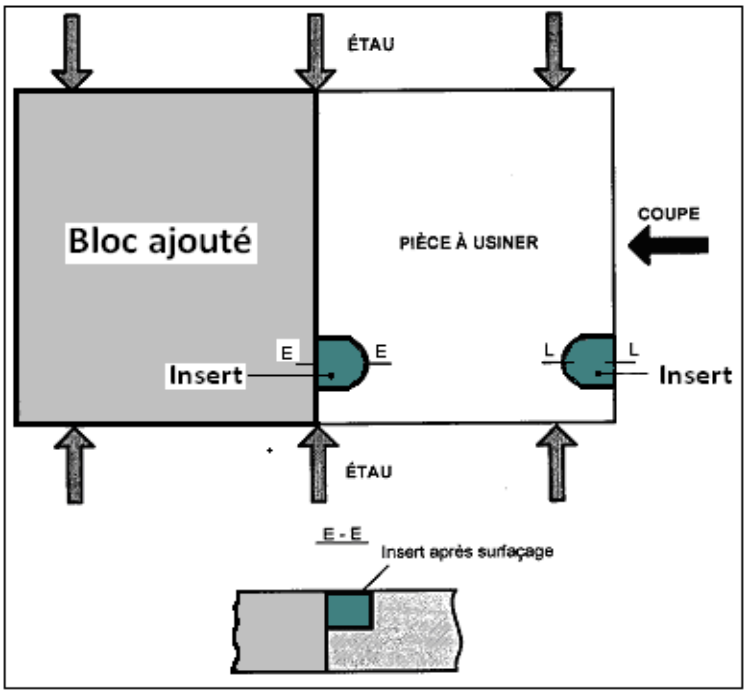


Figure 1.27 Emmanchement d'inserts pendant une opération de surfaçage.
Tirée de Wygowski (2004)

Gillespie (2006) a expérimenté un élément de soutien pendant une opération de perçage pour prévenir la déformation du matériau à la sortie du trou; l'auteur a remarqué que lorsque la dureté de l'élément de soutien augmente, la taille des bavures diminue.

La méthode d'inserts peut devenir une solution très prometteuse dans certaines situations; cependant, elle peut être désavantagée par le coût des éléments de soutien, le temps d'entreposage parfois élevé, et la difficulté à être adaptée pour des pièces complexes.

Choix de la direction d'usinage et angle de désengagement

Selon Luo *et al*. (2008), la direction d'usinage peut sensiblement influencer la formation des bavures de fraisage (figure 1.28); l'auteur a expérimenté plusieurs directions d'usinage en variant l'angle oblique de coupe ξ Selon plusieurs niveaux (50°, 60°, 70°, 80° et 90°). L'expérience a montré que les bavures de sortie latérales diminuent avec la diminution de l'angle oblique de coupe ξ; la plus petite et la plus grande taille des bavures générées correspondaient aux valeurs $\xi = 50^0$ et 90^0 respectivement.

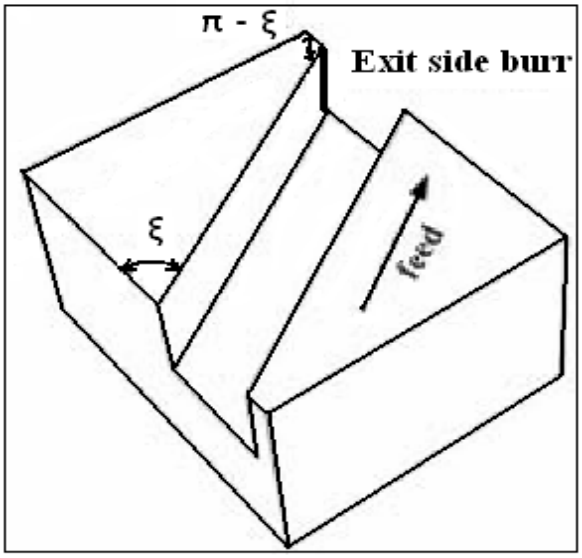


Figure 1.28 Influence de la direction de coupe sur la formation des bavures.
Tirée de Luo *et al*. (2008)

L'expérience menée par Chern (1994) montre que l'augmentation de l'angle de désengagement Ψ Pendant les opérations de fraisage peut augmenter la taille des bavures. Une valeur critique de l'angle de désengagement est notée autour de $\Psi = 90^o$ (figure 1.29).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

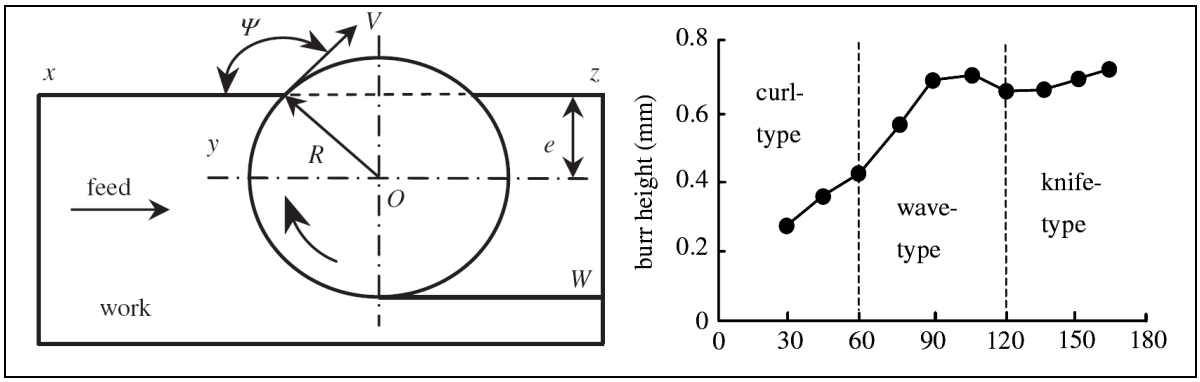


Figure 1.29 Influence de l'angle de désengagement.

(Droite : Définition de l'angle de désengagement ;
Gauche : Influence de Ψ sur la taille des bavures), tirée de Chern (2006)

L'angle de désengagement Ψ peut-être calculé par la formule suivante:

$$\Psi = 90^{o} + \sin^{-1}(e/R)) \tag{1.2}$$

Où :

R rayon de l'outil ;

e décalage d'engagement (*Offset).*

Selon Ragarajan (2005), un angle de désengagement avoisinant la valeur Ψ = 135° peut générer le minimum de bavures si l'usinage en avalant est appliqué ; cependant Ψ Serait mesuré du coté intérieur de la pièce. Selon Kishimoto *et al*. (1981), la transition des bavures primaires vers les bavures secondaires est hautement influencée par l'angle de désengagement Ψ est la profondeur de coupe P.

Modification de la gamme d'usinage

Selon Wygowski (2004), Gillespie (1981), l'ordre d'usinage peut influencer la formation des bavures; ces chercheurs expliquent que la priorisation de certaines opérations d'usinage par rapport à d'autres peut engendrer moins de déformation de matériau, par conséquent, moins

de formation de bavures. Cette approche est couramment utilisée dans l'orientation des bavures dans le but de faciliter leur enlèvement pendant les opérations d'ébavurage. Dépendamment de la géométrie de la pièce et des contraintes de design; les opérations de surfaçage peuvent devancer les opérations de perçage, et les opérations de rainurage peuvent devancer les opérations de surfaçage, etc. L'expérience menée par Aurich et Dornfeld (2009) montre qu'il est possible de réduire la taille des bavures pendant le perçage de deux trous en intersection de diamètre différent, simplement en commençant le perçage par le plus petit trou, et finir par le plus grand.

La modification de la gamme d'usinage dans le but de réduire la taille des bavures peut être une approche très avantageuse, cependant des contraintes de conception et de fabrication peuvent rendre cette solution technologique plus difficile à implémenter.

Autres stratégies de fabrication

Le problème de la formation des bavures a poussé de nombreux chercheurs à explorer d'autres méthodes non conventionnelles, telles que la méthode ultrasonique et l'extrusion.

L'aide ultrasonique pendant les opérations d'usinage est une méthode récente et peut être prometteuse pour réduire la formation des bavures; son principe repose sur l'émission de fréquences vibratoires élevées à faible amplitude; ajoutés dans la direction de l'avance de l'outil afin de réduire la taille des bavures. Chang et Bone (2005) ont réussi à réduire les bavures de perçage en utilisant la méthode ultrasonique, ils expliquent que cette méthode nécessite beaucoup d'études pour l'adapter dans l'usinage conventionnel. Selon Gillespie (2006), remplacer les opérations d'usinage par des techniques d'extrusion ou de déformation à froid tel que l'emboutissage et l'estampage sur certaines formes spécifiques de la pièce, peuvent prévenir la formation des bavures, par conséquent réduire le coût de l'ébavurage; l'inconvénient de ces techniques est qu'elles ne conviennent pas à tous les types pièces.

Nous avons étudié les différents facteurs technologiques pouvant influencer la formation des bavures; cependant, l'implémentation de ces techniques peut être affectée par le coût élevé engendré par chaque technique, une étude de rentabilité doit donc être engagée en parallèle pour pouvoir déterminer si telle ou telle technique serait possible et profitable.

1.7 Bavures uniformes et bavures régulières

Kim (2000) distingue deux types de bavures : les bavures uniformes et les bavures dentées. L'auteur explique que l'uniformisation des bavures peut faciliter leur modélisation, leur mesure, leur préparation à l'inspection et à l'ébavurage. Selon Kim et Dornfeld (2002), Wygowski (2004), la ductilité du matériau peut être le paramètre le plus important pouvant influencer l'uniformité des bavures; un matériau ductile produit plus de grandes bavures plus ou moins uniformes; toutefois dans le cas d'un matériau fragile, il y a moins de déformation et plus de ruptures, d'où création des bavures non uniformes; le phénomène peut être amplifié lorsque la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe augmentent. L'expérience menée par Avila et Dornfeld (2004) montre que dans le cas du fraisage, l'angle de désengagement de l'outil Ψ Et la ductilité du matériau peuvent influencer l'uniformité des bavures. Par ailleurs, l'uniformité des bavures peut varier sur une même pièce, et d'une arête à une autre.

Nous avons remarqué que quelques auteurs utilisent l'expression «**uniformité**» des bavures, par contre d'autres auteurs utilisent l'expression «**régularité**» des bavures. Toutes les précédentes constatations nous amènent à penser que si on veut uniformiser les bavures et produire des bavures de petite taille, il faut usiner en petites passes, en petites vitesses de coupe et d'avance. Nous pensons également que, la stabilité de la machine, la répartition des efforts de coupe, le type d'outil et son sens de rotation et le régime d'usinage peuvent affecter l'uniformité des bavures.

1.8 Prédiction des bavures

Pour éviter les nombreux problèmes causés par les bavures d'usinage, la prévision et le contrôle de la taille des bavures s'avèrent très souhaitables. La plupart des études effectuées dans le domaine des bavures traitent directement ou indirectement la prédiction des bavures; la prédiction analytique, mécanique, cinématique, probabilistique, graphique et par éléments finis constituait les principales méthodes directement utilisées dans l'étude des bavures. Kim et Dornfeld (2000-2001) ont élaboré une méthode graphique pour prédire et contrôler les bavures de perçage de plusieurs matériaux «*Drilling burr control chart*»; cette méthode graphique permet de savoir quel type de bavures pouvant être générées en sélectionnant des paramètres de coupe donnés, elle permet également de prédire les éventuelles frontières entre les bavures uniformes, non uniformes et intermédiaires de transition. Pour faciliter l'accès aux informations et pour accéder aux solutions rapides, un site Internet a été créé à cet effet *«Burrexpert.com»*. Kim et Dornfeld (2002) ont développé un modèle analytique pour étudier le mécanisme de formation des bavures de perçage; le modèle était basé sur le principe de conservation d'énergie et les résultats de la simulation obtenus étaient très proches des résultats expérimentaux. Avila et Dornfeld (2005) ont mis en œuvre un algorithme pour calculer la séquence d'ordre de sortie de l'outil (EOS) pendant les opérations de fraisage. Le calculateur permet de prédire la taille des bavures en fonction de l'orientation instantanée de l'outil par rapport à la pièce. Deng *et al*. (2009) se sont servies de la simulation par éléments finis pour étudier le mécanisme de la formation des bavures, obtenir une analyse quantitative des bavures de sortie d'une coupe orthogonale, et aussi prédire la formation des bavures pour des composantes aéronautiques.

La prédiction et le contrôle des bavures peuvent garantir une meilleure optimisation des conditions de coupe. Elles permettent également de contrôler les bavures, de créer les tailles et types de bavures souhaitées. De tels objectifs peuvent être considérablement pertinents pour les industriels et pour les futurs travaux de recherche.

1.9 Autres facteurs influençant la formation des bavures

1.9.1 Force de coupe

La formation des bavures est grandement influencée par les efforts de coupe présents pendant l'usinage. Leurs sens et leur intensité peuvent avoir une incidence sur le volume du copeau engendré, et peuvent aussi jouer un grand rôle dans la déformation du matériau au bord de la pièce. Par conséquent, génération des bavures. Les forces de coupe peuvent essentiellement être influencées par la vitesse d'avance, la profondeur de coupe, la géométrie de l'outil et les propriétés du matériau.

Il existe plusieurs méthodes mathématiques et graphiques pour déterminer les composantes de force dans le cas du fraisage sans toutefois utiliser la méthode dynamométrique. Cependant, des erreurs peuvent être causées par des changements dans l'épaisseur et la forme du copeau pendant la coupe. La plupart des modèles tiennent compte de trois forces principales selon trois directions : force tangentielle F_T, appelée force de puissance qui est considérée comme la plus importante, F_r force radiale, et F_a force axiale appelée forces de poussée. La force tangentielle F_T telle que présentée par Pylkkänen (1984) peut être estimée par la formule suivante:

$$\boxed{F_T = \frac{P.h_m.C_s}{\sin k}} \tag{1.3}$$

Où :

P [mm]: profondeur de coupe

h_m [mm]: épaisseur du copeau

C_S [N/ mm^2]: force de coupe par unité de section transversale

k [°] : angle d'approche de l'outil

La force de coupe par unité de section transversale C_S est un paramètre qui dépend de la géométrie de l'outil, du matériau de la pièce, de l'épaisseur du copeau et de la profondeur de coupe.

Selon Pylkkänen (1984), les forces de coupe peuvent être exprimées par :

$$F_T = P\, C_{SI}\, f_z^{r} \sin^{r-1} k\,(1-0.01\alpha) \sin^{r} \varphi \tag{1.4}$$

$$F_R = F_T\,(0.44 - 0.013\,\alpha_r) \tag{1.5}$$

$$F_A = F_T \frac{f_z + w.\cot k}{P}\,(0.88-0.013\,\alpha_a) \tag{1.6}$$

Où :

F_T [N] : Force tangentielle

F_R [N] : Force radiale

F_A [N] : Force axiale

P [mm]: profondeur de coupe

α_a et α_r [^{o}] : angle de coupe axial et radial respectivement

C_{SI} [N/mm^2] : force de coupe spécifique du matériau

q : facteur qui dépend du matériau à usiner et de la méthode de coupe (q = 1- r)

f_z [mm/dent]: vitesse d'avance

φ [^{o}] : angle de rotation de l'arête de coupe

Pendant des essais de fraisage par exemple, il est possible de mesurer les composantes instantanées des forces d'usinage à l'aide d'une table dynamométrique, et ceci suivant les différents axes X, Y et Z; la force de coupe F_c (t) qui est aussi la résultante des trois forces pourrait être exprimée par :

$$F_c(t) = [(Fx(t))^2 + (Fy(t))^2 + (Fz(t))^2]^{1/2} \quad (1.7)$$

Dépendamment de la destinée à laquelle les forces mesurées seront affectées, dans certains cas, les forces enregistrées suivant deux axes seulement peuvent suffire et peuvent être plus significatives.

Si on arrive à réduire les efforts de coupe pendant l'usinage, les bavures engendrées seront surement réduites. Pour se faire, il faut intervenir au niveau des conditions de coupe, en particulier la vitesse d'avance.

1.9.2 La rugosité

Les surfaces usinées ne sont pas tout à fait parfaites. Elles peuvent présenter des défauts et irrégularités dues aux opérations d'usinage précédentes, aux outils utilisés et à leur usure, au matériau de la pièce et aux conditions de coupe. Les défauts peuvent être des stries et des sillons creusés par les arêtes coupantes des outils. La rugosité présente l'ensemble des irrégularités à caractère micrographique et macrographique. Plus l'indice de rugosité est faible, plus il serait difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication.

La rugosité arithmétique telle qu'estimée dans la célèbre équation de Montgomery et rapportée par Lee (2004), permet de reconnaître les principaux facteurs pouvant influencer l'état de surface d'une pièce usinée:

$$Ra = \frac{f_t^2}{32(R \pm f_t Z / \pi)} \quad (1.8)$$

Où :

Ra est la rugosité ou écart moyen arithmétique de la surface usinée ;

Z est le nombre de dent de l'outil ;

R est le rayon de l'outil ;

f_t est l'avance par dent ;

Positif (+) pour le fraisage en opposition, négatif (-) Pour le fraisage en avalant.

Il y a plusieurs méthodes pour évaluer un état de surface :

- méthode par comparaison (échantillons viso-tactile);
- méthode par mesure (appareils électroniques à capteurs ou appareils optiques) : Rugosimètre.

Il est plus facile d'enlever une bavure rugueuse que d'enlever une bavure lisse, en particulier lorsque certains procédés d'ébavurages tels que le brossage, l'ébavurage par écoulement abrasif, etc. sont utilisés. Malheureusement, très peu de recherches ont été effectuées dans cette direction; en particulier, l'estimation de la rugosité des bavures obtenues après l'usinage. Par ailleurs, Hewson (1998) a observé qu'il peut y avoir une relation très étroite entre la formation des bavures, l'état de surface de la pièce et la rugosité des bavures. Pour trouver cette relation, l'auteur donne la piste de mesurer la température que pourrait atteindre le matériau de base et la bavure pendant le processus d'usinage. Cependant, la taille de certaines petites bavures et leur relief complexe peut rendre cette idée difficile.

1.10 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre les différents aspects liés aux bavures d'usinage; nous avons rapporté ce qui a été fait dans ce domaine en décrivant le mécanisme de la formation des bavures, les principales classifications faites par les différents auteurs, répertorié les différents facteurs technologiques pouvant influencer la formation des bavures, aborder les notions de formation de bavures uniformes et régulières, et enfin décrire quelques notions sur les forces de coupe et la rugosité des surfaces.

Ce travail nous a amené à conclure que :

- Il existe un grand besoin de limiter, prévenir et éliminer les bavures d'usinage. Se baser sur cette optique peut être très bénéfique pour l'industrie de l'usinage dans le sens où les

Rapport-Gratuit.com

opérations d'ébavurage peuvent être éliminées ou réduites. Cependant, l'intervention par des opérations d'ébavurage dans certains cas est obligatoire;

- La plupart des études faites dans le domaine des bavures sont spécifiques aux opérations d'usinage bien définies; cependant, il n'existe pas de modèle général pouvant être utilisable pour toutes les opérations d'usinage;

- L'usinage est un processus complexe, il peut y avoir une grande interaction entre les différents paramètres de coupe présents pendant l'usinage, et le niveau d'influence de chaque paramètre peut varier d'une situation à une autre;

- Très peu d'études étaient concentrées sur l'influence du revêtement de l'outil et de son usure sur la formation des bavures;

- La plupart des recherches expérimentales abordant la formation des bavures utilisent de faibles vitesses de coupe, et avec lubrification;

- Très peu d'études étaient concentrées sur l'influence des paramètres d'usinage sur l'uniformisation et/ou régularisation des bavures.

En tenant compte des éléments mentionnés précédemment, une étude expérimentale capable de traiter la caractérisation des bavures, simple et facile à implémenter serait nécessaire. Cette étude devrait être capable de répondre positivement aux différents manques cités plus haut, et fournir suffisamment d'informations pour pouvoir analyser les résultats. Par la suite, nous nous servirons des informations recueillies dans la littérature et les résultats de notre étude expérimentale pour analyser les problèmes liés à la formation des bavures et à l'ébavurage dans une entreprise locale (Pratt & Whitney Canada). Pour ce faire, un chapitre dédié à l'ébavurage et finition de pièces serait nécessaire pour compléter notre revue de littérature et permettre de couvrir ce domaine.

CHAPITRE 2

ÉBAVURAGE ET FINITION DES PIÈCES

2.1 Introduction

Les bavures ont toujours été un grand souci dans la finition des pièces, l'enlèvement de ces bavures ou bien l'**ébavurage** est considéré comme un travail de reprise. Les raisons de l'ébavurage sont souvent d'ordres fonctionnels, ergonomiques et esthétiques. Trop souvent manuel, et de ce fait, très coûteux. Les exigences croissantes au niveau des coûts et la qualité des pièces nécessitent désormais la réduction des bavures à la source. Malgré les meilleures technologies d'usinage et les diverses techniques de prévention des bavures, on n'arrive toujours pas à éliminer complètement leur génération. D'autre part, même si les bavures formées sont négligeables, les vives arêtes produites par les processus d'usinage ne peuvent pas généralement être acceptées, d'où la nécessité de recourir aux procédés d'ébavurage et finition des pièces. Les solutions d'ébavurage et finition des pièces ne sont également pas parfaites, elles admettent beaucoup d'avantages, mais aussi beaucoup d'inconvénients. Cependant de nos jours, recourir à des solutions d'ébavurage automatisées reste grandement d'actualité.

Selon Gillespie (1999), l'**ébavurage** consiste à enlever les bavures formées au bord de la pièce tout en respectant les exigences de fabrication. Toutefois, la **finition des pièces** concerne à la fois les arêtes et les surfaces de la pièce. En pratique, il est souvent nécessaire de combiner plusieurs opérations d'ébavurage et finition des pièces pour pouvoir compléter la pièce.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.2 Caractéristiques de l'ébavurage

2.2.1 Exigences de finition

Le niveau de précision d'une pièce dépend généralement de son utilisation dans les différents mécanismes. La précision des arêtes fait partie intégrante de la précision de la pièce. Les exigences géométriques et dimensionnelles de la pièce sont fondées sur des bases de fonctionnalité, qualité, économie et même de sécurité. Les opérations d'ébavurages et de finition des pièces sont parmi les méthodes de fabrication permettant de remplir ces exigences. Cependant, selon Gillespie (1981), atteindre une excellente qualité des arrêtes par les procèdes d'ébavurage, en particulier par l'ébavurage manuel est souvent difficile. Il est très important de bien définir au préalable les exigences de qualité des pièces.

Les arêtes des pièces peuvent être chanfreinées, arrondies, vives ou acceptant une légère bavure (figure 2.1). Généralement dans les gammes de fabrications, toutes les exigences dimensionnelles et tolérancielles y sont mentionnées, en tenant compte des moyens et équipements disponibles.

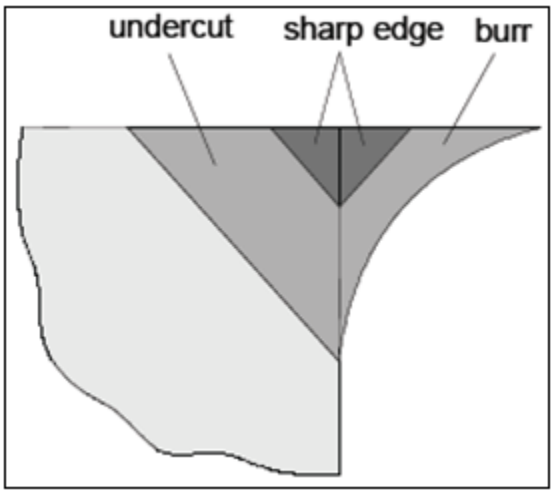


Figure 2.1 Exigences géométriques sur l'arête de la pièce.
Tirée de Ko et Dornfeld (1995)

Les formes arrondies des arêtes sont très recherchées par les industriels, elles sont souvent considérées comme des arêtes de meilleure qualité, contrairement au chanfreinage qui est souvent une méthode d'ébavurage engendrant des petites bavures secondaires. Les arêtes vives sont plus difficiles à produire, elles sont très demandées dans les systèmes hydrauliques.

2.2.2 Nombre d'arêtes et quantité linéaire d'ébavurage

Même si la pièce est parfois petite, elle peut avoir un nombre d'arêtes assez important, et une quantité linéaire d'ébavurage assez impressionnante, en particulier lorsque la pièce subit plusieurs opérations mixtes telles que : le surfaçage - perçage, le surfaçage – taillage, etc. Une roue d'entée en est un très bon exemple (figure 2.2).

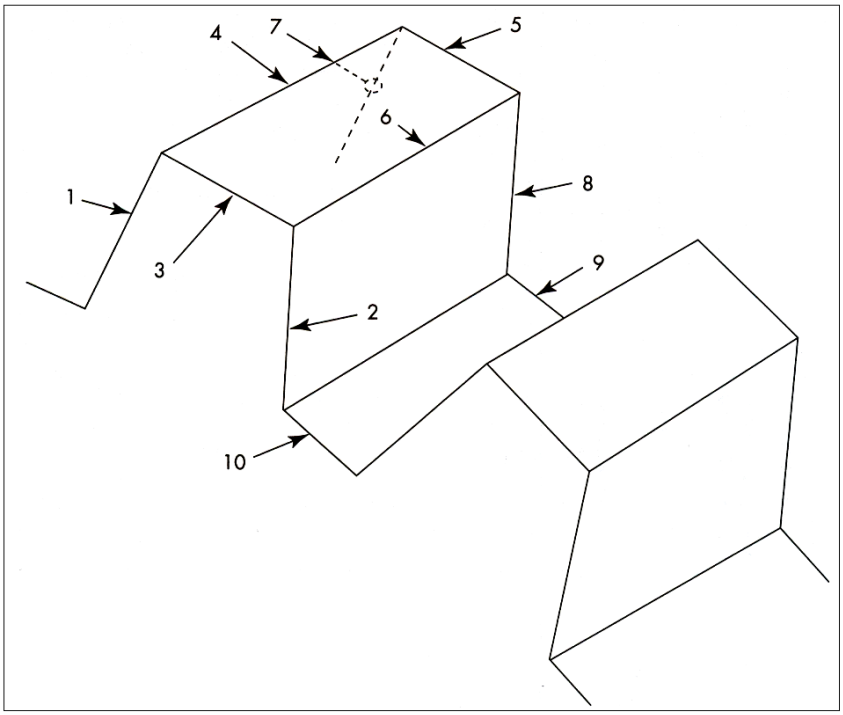


Figure 2.2 Nombre d'arêtes à ébavurer sur une roue d'entée.
Tirée de Gillespie (1999)

Le temps et le coût de l'ébavurage sont amplement dépendants de la géométrie de la pièce, en particulier du nombre d'arêtes et de la quantité linéaire d'ébavurage.

2.2.3 Effort d'ébavurage

En se basant sur les caractéristiques géométriques des bavures, Link (1992) a proposé une méthode de calcule d'un paramètre pouvant aider à estimer l'effort d'ébavurage g, c'est un paramètre pouvant servir dans le choix du procédé d'ébavurage et le calcul du coût de l'ébavurage (figure 2.3).

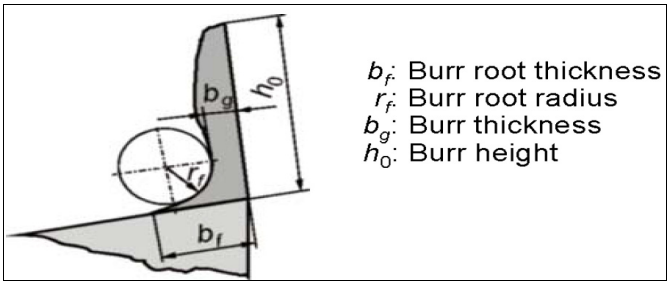


Figure 2.3 Section transversale d'une bavure.
(Calcul de l'effort d'ébavurage g), tirée de Link (1992)

$$g = \frac{4b_f + 2r_f + h_o + b_g}{8} \tag{2.1}$$

L'équation 2.1 nous montre que l'effort d'ébavurage g dépend grandement des paramètres géométriques des bavures, il augmente lorsque la taille des bavures augmente, et diminue lorsque la taille des bavures diminue.

2.2.4 Système de contrôle de la qualité d'ébavurage

Il existe de nombreux systèmes permettant de contrôler la qualité de l'ébavurage, les plus connus sont ceux basés sur le principe de la vision (optique et numérique), ou sur la

comparaison à l'aide d'un comparateur. Schäfer (1975) a développé un système de contrôle intéressant, son principe repose sur l'observation de l'arête ébavurée de la pièce tout en la comparant à un modèle de qualité préétabli (figure 2.4).

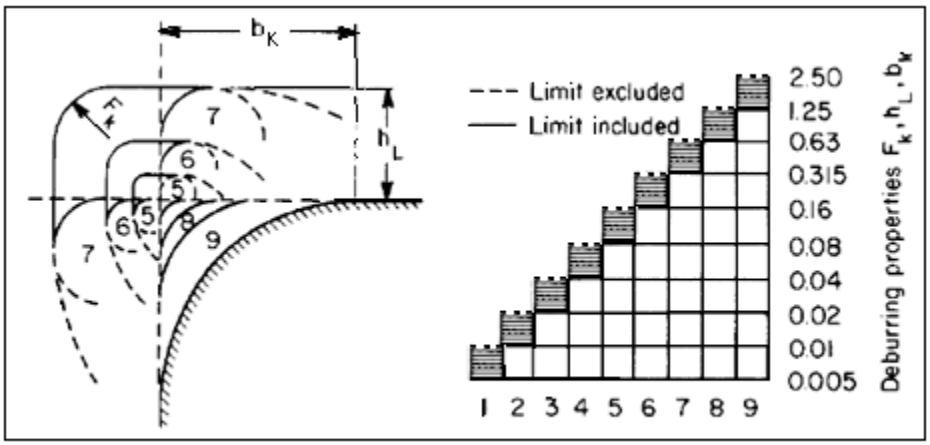


Figure 2.4 Système de qualité d'ébavurage à 9 classes
Tirée de Schäfer (1975)

Le rayon où le contour typique formé au bord de la pièce par les procédés d'ébavurage, peut avoir plusieurs allures. Le système proposé par l'auteur utilise le référentiel de **l'arête vive** comme base de comparaison, dans le but de déterminer s'il y a eu ébavurage excessif, acceptable ou insuffisant. Un rayon d'arête de 0.45 mm par exemple est classé 7, car il correspond à un ébavurage insuffisant. Cependant, un ébavurage excessif générant un rayon d'arête de 2.4 mm par exemple, peut être classé 9.

Comme mentionné précédemment, les opérations d'ébavurage peuvent modifier les dimensions et finis de surface de la pièce. Elles peuvent aussi générer des micros bavures, des brûlures, des contraintes résiduelles et changer la couleur de la pièce. La résistance à la corrosion, la résistance à la fatigue et la résistance électrique peuvent également être affectées, alors que les pièces ébavurées peuvent être contaminées par les matériaux abrasifs utilisés. Tous ces inconvénients varient selon la méthode d'ébavurage utilisée. Un système d'inspection performant peut beaucoup aider à prévenir et minimiser ces inconvénients.

2.3 Classification des procédés d'ébavurage

Dans la littérature on retrouve plusieurs classifications des procédés d'ébavurage établies par plusieurs auteurs. On peut citer la classification faite par Schäfer (1975), Przyklenk et Schlatter (1986), Kittredge (1987), Schulz (1988), et puis Dornfeld et Lisiewicz (1992). La classification la plus complète et la plus détaillée reste celle réalisée par Gillespie (1999). Elle englobe toutes les méthodes d'ébavurage connues, à commencer par le simple ébavurage manuel, et finir par la haute technologie de finition par CNC et l'ébavurage robotisées. L'auteur a recensé 122 procédés d'ébavurage et finition des pièces. La figure 2.5 montre les principaux procédés dénombrés, répertoriés selon les quatre processus d'enlèvement de la matière : mécanique, thermique, électrique et chimique.

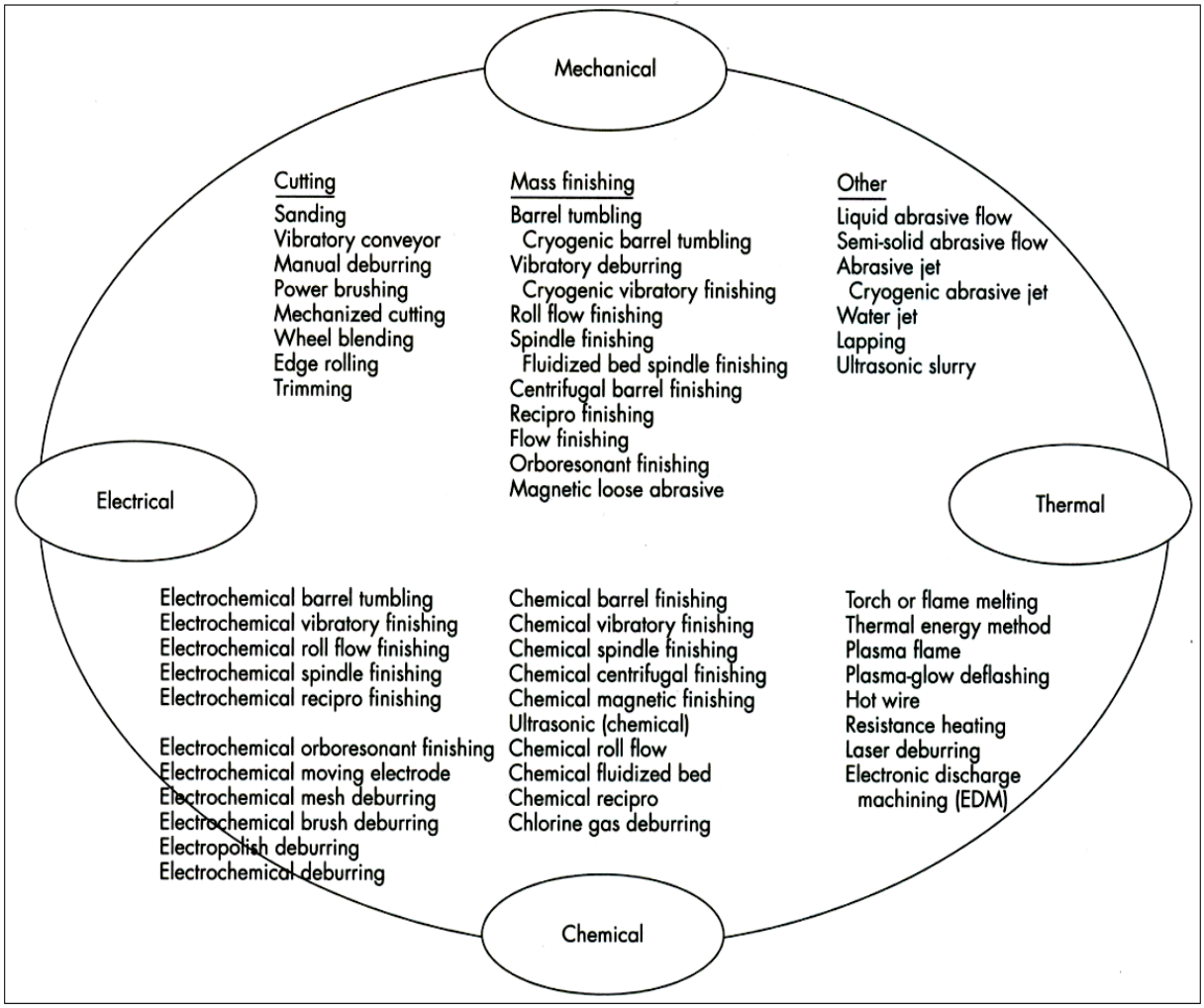


Figure 2.5 Principaux procédés d'ébavurage.

(Classification basée sur le mode d'enlèvement de la matière), tirée de Gillespie (1999)

Pour situer l'intérêt que portent les industriels envers ces différentes techniques d'ébavurage, Gillespie (1999) a recensé les dix premiers procédés d'ébavurage les plus utilisés dans le monde (Tableau. 2.1).

Tableau 2.1 Les dix procédés d'ébavurage les plus utilisés dans le monde
Adapté de Gillespie (1999)

Procédés d'ébavurage	**Quantité dans le monde***
Ébavurage manuel (*Manual deburring*)	800,000
Brosse (B*rushing*)	100,000
Sablage (*Sanding*)	50,000
Jet abrasif (*Abrasive jet*)	40,000
Finition par vibration (*Vibratory finishing*)	30,000
Coupe mécanisée (*Mechanised cutting*)	20,000
Tonneau d'ébavurage (*Barrel tumbling*)	16,000
Tonneau de finition centrifuge *(Centrifugal barrel finishing)*	2,000
Broche de finition *(Spindle finishing)*	1,200
Ébavurage électrochimique (*Electrochemical deburring*)	1,200

(*) Année 1997

L'ébavurage manuel occupe une grande place dans le processus de finition des pièces, suivi par le brossage. Ces deux procédés sont connus pour leurs grandes flexibilités et leurs bas coûts. Les autres procédés sont aussi très connus dans l'industrie, certains d'entre eux peuvent procurer une grande qualité de finition des pièces, mais leurs coûts restent relativement chers.

Dans la prochaine section, nous présentons les principaux procédés d'ébavurage, leurs avantages et leurs inconvénients.

2.4 Principaux procédés d'ébavurage

2.4.1 Ébavurage manuel

L'ébavurage manuel est très utilisé dans l'industrie, il n'y a pas de machine qui peut remplacer l'ébavurage manuel, il n'y a pas de machine aussi flexible et fonctionnelle comme l'opérateur. Cependant de nos jours, la question que la plupart des industriels se posent, n'est

pas : «comment peut-on éliminer l'ébavurage manuel?», mais plutôt : «comment peut-on contrôler le travail manuel?». Cette problématique peut être partiellement résolue par l'établissement d'une procédure d'ébavurage manuelle efficace. Dans la pratique, l'approche conjointe (ébavurage manuel /processus mécanique) est très convoitée.

Selon Engel *et al.* (1992), la compagnie *Pratt and Whitney* a estimé que l'ébavurage manuel peut atteindre 12% du nombre total d'heures d'usinage. De 10 à 30 % des pièces fabriquées ont besoin d'être retravaillées après les opérations manuelles de finition. Et les coûts de soins de santé liés à la finition manuelle augmentent considérablement les charges des manufacturiers. Selon Gillespie (1999), l'ébavurage manuel est aussi synonyme de beaucoup de temps perdu, de coûts élevés, fatigue, frustration, etc. D'ailleurs, la plupart des industriels attribuent cette tache à des personnes n'ayant pas beaucoup de qualifications. Le rejet des pièces par excès d'ébavurage manuel est très élevé, ces rejets sont causés par : l'irrégularité de l'effort que l'opérateur fourni pendant le travail, le manque de qualification du personnel, l'outillage manuel inadéquat ou abîmé, etc. Cette situation entraîne des retards dans la production, ainsi que beaucoup de perte d'argent, ce qui est souvent inacceptable dans l'industrie d'aujourd'hui. Toutefois, l'ébavurage manuel reste irremplaçable dans certaines situations comme dans le cas des pièces complexes et excessivement déformables.

Pendant l'ébavurage manuel, la pièce est généralement fixée sur un bâti, l'opérateur utilise soit un outil de coupe manuel, soit un outil motorisé pour effectuer la finition. La plupart des opérations d'ébavurage sont réalisées à sec (figure 2.6).

Rapport-Gratuit.com

Figure 2.6 Ébavurage manuel.

Réf : http://www.directindustry.com/prod/noga-engineering/manual-deburring-tool-11972-46302.html. Consulté le 18 février 2010.

Le tableau 2.2 indique la liste des outils fréquemment utilisés dans l'ébavurage manuel.

Tableau 2.2 Liste des différents types d'outils d'ébavurage manuel
Adapté de Gillespie (1981)

Outil de coupe manuel		**Outil de coupe motorisé**
Couteau	Mini brosse	Minisableuse à ruban
Outil d'ébavurage manuel	Racleur	Sableuse croisée
Papier verre	Lime	Lime croisée
Pierre abrasive	Lime abrasive à ruban	Ponceuse motorisée
Foret manuel	Arracheuse	, etc.
Alésoir manuel	Meule à tige	
Lime rotative	, etc.	

Selon Gillespie (1981), l'ébavurage manuel est recommandé dans les situations suivantes :

- Les opérations manuelles sont plus flexibles que d'autres procédés;

- les bavures sont difficiles à accéder;
- les pièces sont miniatures (petites);
- il y a un besoin de retravailler la pièce après ébavurage;
- il y a une grande variation dans la taille des bavures;
- l'ébavurage manuel ne prend pas beaucoup de temps;
- l'ébavurage manuel coûte moins cher pour les petites bavures;
- la grosseur de la pièce ne permet pas l'ébavurage sur machine;
- la pièce est délicate et admet des tolérances très serrées;
- un certain niveau de précision de la pièce est demandé;
- il est important de prévenir la contamination de la pièce.

Cependant, Gillespie (1981) a résumé les inconvénients de l'ébavurage manuel comme suit :

- il génère beaucoup de rejets;
- le temps d'ébavurage est élevé;
- il est difficile de fixer les pièces (pièces miniatures par exemple);
- il est difficile de définir les standards de l'ébavurage manuel;
- il existe un manque d'étude sur l'ébavurage manuel;
- il représente une tache pas très motivante pour les ouvriers;
- il est difficile d'ébavurer certaines pièces complexes;
- le résultat d'ébavurage est parfois inconsistant;
- l'ébavurage obtenu sur les arêtes est non uniforme.

Pour améliorer l'ébavurage manuel, il faut investir dans la formation des opérateurs, définir des standards de travail, fournir des outils manuels appropriés et ne pas hésiter de compléter l'ébavurage par d'autres procédés.

2.4.2 Ébavurage par brosse

L'ébavurage par brosse est très répondu dans l'industrie, il est particulièrement recommandé dans la production en série et pour les bavures volumineuses. Ce procédé a été répertorié

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

dans l'ébavurage mécanique par Gillespie (1999). Il est affecté à l'ébavurage, le nettoyage, le décalaminage et le polissage. Il permet aussi de raccorder les arêtes des pièces, et d'aider à la texturation (figure 2.7).

Figure 2.7 Ébavurage par brosse.

Réf :http://www.globalspec.com/supplier/ProductAnnouncements/JasonFinishingGroupOsbornJacksonLea. Consulté le 18 février 2010

Selon Gillespie (1999), la sélection du type de brosse se fait en tenant compte de l'utilisation ou non de la lubrification, des additifs (tels que les poudres), et du type de finition souhaitée.

Le procédé d'ébavurage par brosse a plusieurs avantages :

- la rapidité d'exécution;
- il n'est relativement pas cher;
- il admet une grande variété de brosses;
- dans certains cas, ne contamine pas la pièce;
- il crée un rayon au niveau de l'arête (souvent c'est meilleur qu'un chanfrein);
- dans certains cas, il améliore l'état de surface;
- il est adaptable aux équipements manuels ou automatiques;
- s'il est utilisé proprement, il ne produit pas d'autres bavures.

Le fait qu'il peut être utilisé en rotation, plusieurs variétés de brins et longueur de brins, diamètres, formes, vitesses et pressions sur la pièce peuvent être appliquées, ce qui permet une vaste gamme de résultats, Gillespie (1999).

Les inconvénients de l'ébavurage par brosse sont répertoriés par Gillespie (1999) comme suit :

- changement de l'état de surface;
- changement de l'état de la texture de la surface;
- changement de l'état des contraintes résiduelles;
- durcissement de la pièce;
- affecte la résistance à la fatigue;
- contamination des surfaces de la pièce;
- dégagement de poussière;
- changement des dimensions de la pièce;
- parfois génération de nouvelles bavures;
- changement de couleur de la pièce.

L'auteur explique aussi que l'ébavurage par brosse favorise dans certains cas le dépôt et collage de particules étrangères sur la pièce. Ces particules deviennent plus difficiles à enlever que les bavures initiales. Les filaments de la brosse se détachent plus souvent, se logent dans les trous et cavités de la pièce, et leur enlèvement est parfois long et difficile.

2.4.3 Ébavurage par sablage

De nos jours, on attribue plus souvent le nom d'ébavurage par abrasif collé au procédé de sablage, ceci est dans le but d'élargir son champ de définition. Les produits de sablage sont rencontrés dans pratiquement tous les ateliers de fabrication à cause de leur grande flexibilité, convenance, bas prix, et la grande variété de formes et dimensions. La variété des abrasifs collés peut aller d'un simple abrasif jusqu'à la gamme d'abrasifs de grande précision. Ces produits donnent de très bons résultats à la fois en travail manuel et automatique. Ils peuvent

être utilisés en ébavurage ou/et en finition de surface. Trois principaux types de matériaux abrasifs sont utilisés dans leur composition: l'oxyde d'aluminium, le carbure de silicium et la zircone. Les structures de base des abrasives collées peuvent être en papier, tissus, fibres, ou en combinaison des trois. Le liège, le polyester et le crible à sable sont également utilisés en structure de base. Selon Gillespie (1999), ces produits sont utilisés avec ou sans lubrifiants. Leurs formes varient entre les feuilles, les bondes, les disques, les roues, les cylindres, les bobines, les manchons, les tampons, les papillons, les cônes, les cordes, et les rubans (figure 2.8).

Figure 2.8 Outil de sablage.

Réf : http://www.abrasiveexpress.com/sanding_stars.htm. Consulté le 19 février 2010

Selon Gillespie (1999), les avantages de l'ébavurage par sablage peuvent être :

- son bas prix;
- la rapidité d'exécution;
- il admet un grand choix de variété;
- certaines variétés améliorent l'état de surface;
- il est adaptable aux équipements manuels ou automatiques.

Les inconvénients de l'ébavurage par sablage sont répertoriés comme suit :

- parfois, affecte l'état de surface;

- crée des contraintes résiduelles;
- contamination des surfaces de la pièce;
- dégagement de poussière;
- changement de dimensions de la pièce;
- parfois génération de nouvelles bavures;
- changement de couleur de la pièce;
- manque d'accessibilité sur certaines pièces;
- faible durée de vie.

Une des caractéristiques les plus importantes de l'ébavurage par sablage et que certains types d'abrasifs peuvent être modifiées de façon à atteindre certaines formes complexes, par conséquent accommoder des surfaces sensibles et difficilement accessibles de la pièce.

2.4.4 Ébavurage par jet abrasif

Selon Gillespie (1999), le jet abrasif peut être utilisé pendant l'ébavurage, la coupe, et le nettoyage des pièces. C'est un processus qui ne nécessite pas d'outils. L'ébavurage par jet abrasif a pour principe, l'enlèvement de la matière (les bavures) à l'aide d'un jet d'aire ou de liquide à haute pression contenant des abrasifs. Le processus est capable d'enlever des bavures à partir des racines sans formation de rayon au bord de la pièce. Pour ce faire, la pièce devrait être solidement fixée pendant l'ébavurage. Plusieurs côtés de la pièce peuvent être ébavurés par une simple orientation du jet abrasif. Le volume de matériau à enlever peut être contrôlé par le temps d'exposition, le type d'abrasif, et la pression du jet. Un grand choix de qualité d'ébavurage peut être obtenu sur la pièce par la simple variation de la nature du jet. Ce procédé est recommandé pour les matériaux fragiles et les pièces miniatures. Il est rapide, mais généralement une seule pièce peut être ébavurée à la fois. Sa consommation d'énergie est relativement faible. Comme tout procédé, il a évidemment des limitations : il peut contaminer la pièce, les surfaces et dimensions de la pièce peuvent être modifiées. S'il n'est pas automatisé, il nécessite une grande attention de la part de l'opérateur. Il n'est pas recommandé pour les bavures épaisses.

2.4.5 Finition de masse

Les procédés de finition de masse englobent : la finition par vibration, le tonneau d'ébavurage, le tonneau de finition centrifuge et le disque centrifuge de finition. Ils sont généralement destinés à la production en masse. Un grand nombre de pièces sont placées dans la machine contenant des abrasifs, où elles sont toutes ébavurées au même temps. La finition est effectuée au niveau des arêtes et surfaces des pièces. Ce sont des procédés qui procurent une grande répétabilité. Leurs coûts de finition sont parmi les coûts les plus bas des processus de finition. Les équipements sont très performants et faciles à opérer et le processus est généralement considéré comme non nuisible à l'environnement.

Finition par vibration

La particularité de ce procédé réside dans sa rapidité comparativement aux autres procédés de finition de masse. Les pièces sont mises dans un système vibrant, accélérant ainsi le processus d'enlèvement de la matière. Les pièces reçoivent un cycle de vibration complet dans plusieurs sens (figure 2.9). Il peut finir des pièces de petites ou grandes tailles. Il s'ouvre facilement pour les étapes d'inspection. Cependant, son cycle de travail est considéré comme lent, il peut aller de 0.25 à 3 heures. La machine est bruyante, et le processus d'enlèvement de la matière se fait inévitablement sur des surfaces et arêtes non souhaité.

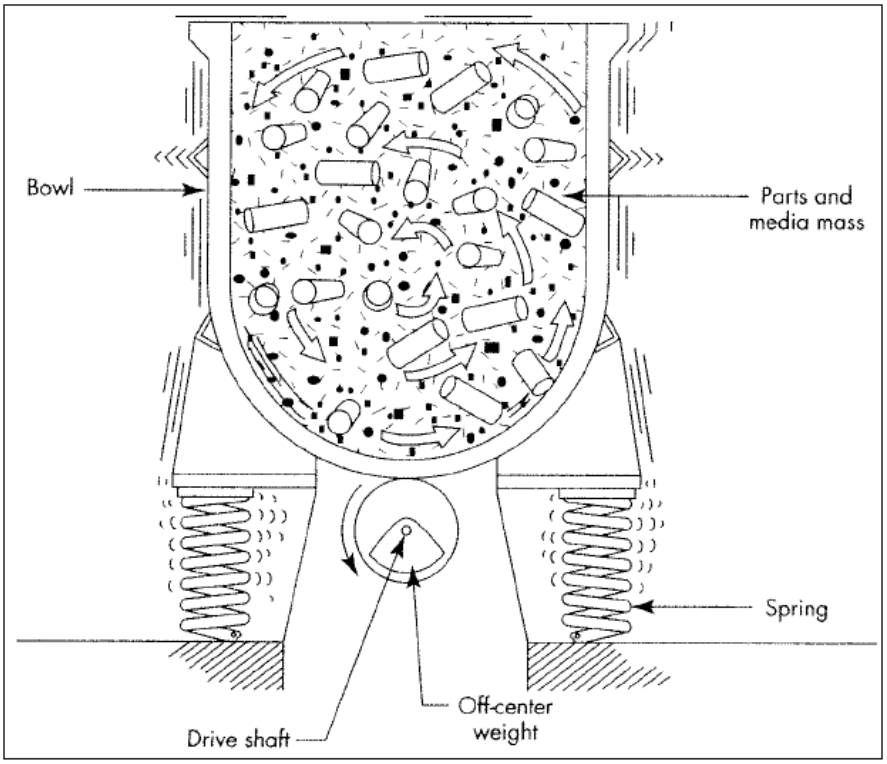


Figure 2.9 Finition par vibration.

Tirée de Gillespie (1999)

Tonneau d'ébavurage

L'équipement du procédé de finition par tonneau d'ébavurage est relativement simple, c'est un grand contenant en rotation de forme hexagonale, octogonale ou polygonale, pouvant recevoir au même temps les pièces en vrac, les abrasifs et les liquides de finition. C'est un procédé souhaitable pour les petites et moyennes pièces. Cependant, il est lent, occupe beaucoup d'espace, il ne permet pas d'inspection durant son fonctionnement et n'est pas recommandé pour les grandes pièces, Gillespie (1999).

Tonneau de finition centrifuge

Le principe de fonctionnement du tonneau de finition centrifuge est très proche de celui du tonneau d'ébavurage, sauf que la nature du mouvement du contenant diffère légèrement. La vitesse de rotation du contenant est plus élevée, elle se fait par rapport à l'axe vertical. Son cycle de finition est plus court, donc rapide, il est de l'ordre de 10 à 30 min. Sa capacité de finir une grande quantité de pièces lui procure une place importante dans l'industrie. L'équipement n'est pas volumineux. Ce procédé est recommandé pour les grandes et moyennes pièces. Cependant, il ne permet pas d'inspection durant le fonctionnement. Le coût de l'équipement est relativement cher, il ne peut pas finir de longues pièces, et les moyens de manutention sont généralement nécessaires, Gillespie (1999).

2.4.6 Coupe mécanisée

Gillespie (1999) a défini la finition par coupe mécanisée comme étant un procédé pouvant être réalisé sur les machines-outils à commande numérique CNC, sur les robots et sur les machines à usage spécifique. Ces dernières sont conçues pour ébavurer des pièces spécifiques (roues d'entées par exemple). Dans la majorité des cas, des chanfreins sont formés au bord de la pièce. Les brosses et abrasifs sont également utilisés pour ébavurer les pièces, former des arrondis, et améliorer la finition des surfaces.

Ébavurage sur les machines-outils à commande numérique CNC

Les machines-outils à commande numérique CNC destinées à l'usinage des pièces peuvent dans la plupart des cas être utilisées pour l'ébavurage ou la finition des surfaces. Ce qui peut être très avantageux puisque l'opération d'ébavurage arrive immédiatement après l'usinage, donc moins de temps perdu dans la manipulation des pièces. L'ébavurage sur machine outil maximise le temps de service des équipements ce qui augmente le cumul des opérations à forte valeur ajoutée. Plusieurs types d'outils d'ébavurage ont été développés pour être intégrés dans les CNC. Avila *et al.* (2004) ont développé un outil appelé *Orbitool* (voir

figure 2.10) principalement destiné à l'ébavurage des intersections des trous de perçage. L'outil crée un chanfrein au bord de l'intersection des trous à l'aide d'interpolation et mouvement de rotation soutenu par un support flexible.

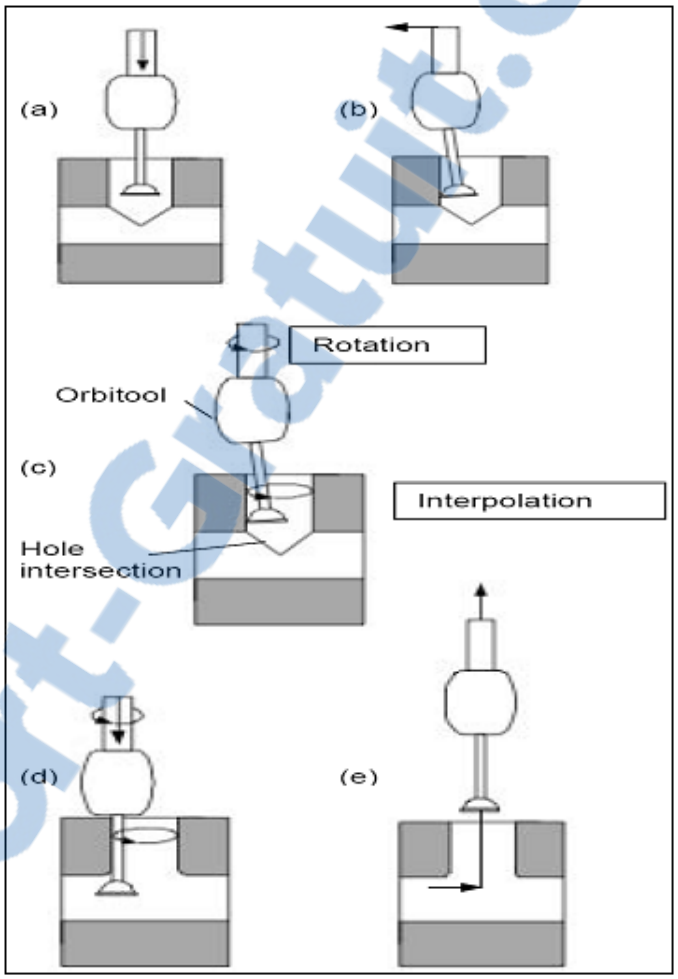


Figure 2.10 Principe de fonctionnement de l'outil Orbitool.

(a) introduction dans le trou, (b) chargement, (c) début d'ébavurage, rotation et interpolation, (d) fin d'ébavurage, (e) retrait), tirée de Avila *et al.* (2004).

Comme tout procédé, l'ébavurage sur machine-outil à commande numérique CNC présente aussi des inconvénients. Les pièces à géométrie complexes ne peuvent pas être complètement ébavurées sur la machine, recourir à d'autres moyens d'ébavurage et finition de pièces additionnels est souvent inévitable. Le coût des machines CNC et la main d'œuvre associée

Rapport-Gratuit.com

sont très dispendieux, car une CNC peut coûter dix fois plus cher qu'une simple machine d'ébavurage. Intégrer plus d'opérations d'ébavurage dans les CNC, se traduit souvent par un investissement supplémentaire dans l'outillage et l'extension du magasin d'outils, ce qui augmente le coût de l'ébavurage.

Ébavurage robotisé

Beaucoup d'industriels commencent à s'orienter vers l'ébavurage robotisé pour ses multiples avantages. L'ébavurage robotisé est souvent utilisé pour le chanfreinage des arêtes de la pièce, le brossage et le polissage (figure 2.11). En général, une seule pièce est exécutée à la fois. Les robots sont moins chers, mais moins précis que les machines-outils à commande numérique CNC. L'avantage de l'ébavurage robotisé est dans la consistance et la répétabilité de la même précision d'ébavurage. Les robots sont rapides, peuvent travailler sans arrêt et dans des environnements bruyants et sales. Ils nécessitent un minimum d'intervention humaine. Cependant, à cause que le robot ne peut pas enlever tous les types de bavures, les pièces complexes ne peuvent pas être toutes ébavurées sur un robot. En général, le robot est utilisé pour l'enlèvement des bavures extérieures, apparentes, uniformes et souvent produites dans de faibles volumes de production.

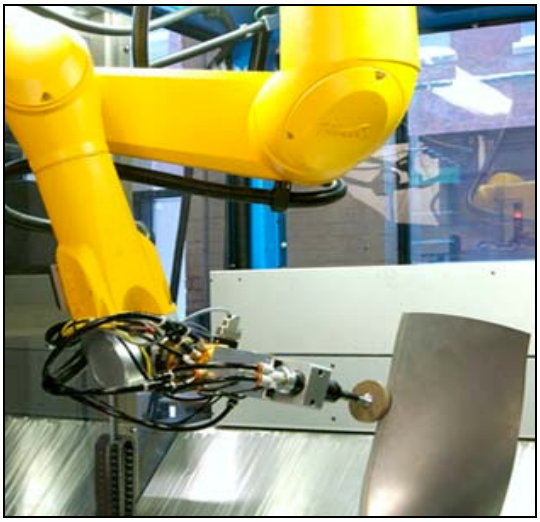


Figure 2.11 Ébavurage robotisé.

http://www.avr-vr.com/fr/usinage_robotise.php. Consulté le 22 février 2010.

Présentement, plusieurs industriels souhaitent automatiser les cellules d'ébavurage. Mais remplacer l'ébavurage manuel, qui est considéré comme très flexible, par l'ébavurage robotisé reste un grand défit. De nos jours beaucoup de recherches se concentrent sur l'amélioration de la précision de l'ébavurage robotisé, notamment dans l'implémentation des systèmes de contrôle des forces et dans la vision.

2.4.7 Broche de finition

L'ébavurage et finition de surface par broche de finition est considéré comme un processus énergique, il permet un bon contrôle du processus comparativement aux autres procédés de la même famille. Il génère un bon état de surface et permet un haut niveau de fiabilité et d'uniformité. Son principe consiste à faire tourner la pièce dans un contenant d'abrasif en rotation, les frottements des abrasifs sur la pièce engendrent l'ébavurage des arêtes et l'amélioration de la finition de la pièce. Le processus est très rapide, car il excède rarement 5 min, en plus l'automatisation du chargement et déchargement des pièces par un robot ou par un autre moyen d'automatisation est très possible.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

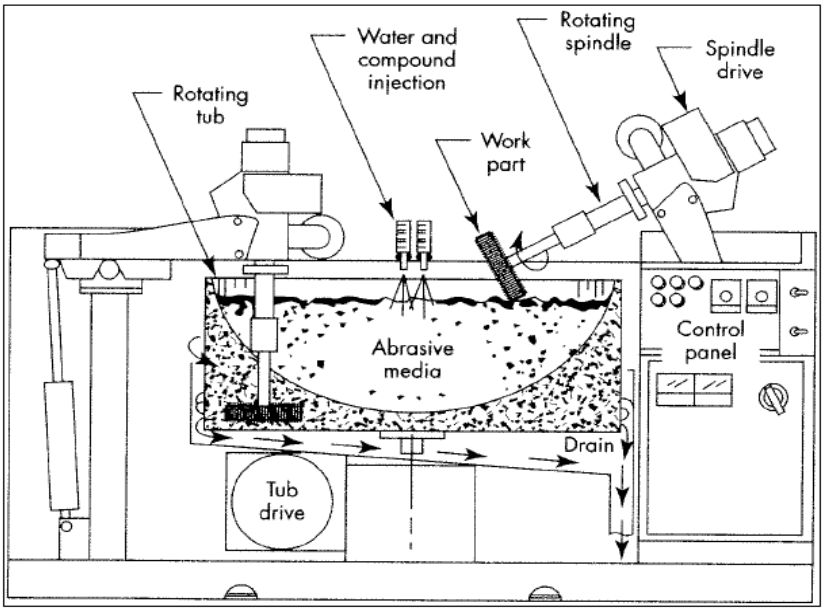


Figure 2.12 Broche de finition.

Tirée de Gillespie (1999)

Cependant, ce procédé est utilisé pour la finition des pièces cylindriques seulement, il n'est pas recommandé pour les pièces de forme prismatique, longues, très petites et lourdes. Il est utilisé dans l'ébavurage extérieur des pièces, mais pas pour ébavurer les parties confinées de la pièce. Pendant la finition, une seule pièce est montée à la fois.

2.4.8 Ébavurage électrochimique

Son principe d'enlèvement de matière est basé sur l'électrolyse ou bien l'action électrochimique. La pièce et l'outil constituent respectivement l'anode et la cathode, ils ne se touchent jamais, ce qui n'engendre pas de stress sur la pièce comme dans le cas de l'ébavurage mécanique. Les surfaces de la pièce où l'ébavurage n'est pas toléré peuvent être masquées pendant le processus. Ce procédé est recommandé pour les pièces complexes ayant des contours délicats, des filetages, des intersections de trous, des rainures et des matériaux difficiles à ébavurer. C'est un procédé rapide, mais une seule pièce est généralement chargée à la fois. Les pièces doivent être conductrices d'électricité, propres, et ayant des bavures petites et uniformes. Sur certains matériaux, ce processus laisse des taches noires, pas très

souhaitables du point de vue esthétique. Dans certains cas le processus d'enlèvement de la matière sur les diverses surfaces de la pièce n'est pas bien maîtrisé.

Dans cette section nous avons passé au travers des procédés d'ébavurage et finition de surfaces les plus utilisés dans l'industrie. Cependant, il reste encore de nombreux autres procédés intéressants; il existe parmi eux ceux qui coûtent cher, comme l'ébavurage thermique et l'ébavurage par jet abrasif cryogénique. D'autres sont encore en stade de développement comme tous les processus d'ébavurage hybrides (processus électrochimiques, broches, vibrations et cryogéniques associés). D'autres sont émergents comme le sablage par micro abrasifs (AMB) et l'ébavurage par fibres magnétiques.

Dans les études économiques faites par les industriels en rapport avec l'investissement, la rentabilité, la recherche et le développement, la notion de coût de l'ébavurage devrait impérativement être estimé et inclus pour garantir un meilleur choix technologique.

2.5 Coût d'ébavurage

Le coût d'ébavurage est fonction de plusieurs paramètres, on peut citer parmi ces paramètres : la taille des bavures, le besoin de finition de la pièce, et les paramètres liés au processus d'ébavurage sélectionné. Selon Gillespie (1999), les éléments de base composant le coût de l'ébavurage sont similaires à ceux utilisés pour déterminer le coût de n'importe quel processus de fabrication, il peut contenir les coûts de :

- main d'œuvre;
- frais généraux;
- équipement;
- fournisseurs;
- énergie;
- services d'approvisionnement.

Nous présentons dans cette section un exemple de calcul du coût de l'ébavurage pour un processus donné afin de mieux illustrer la méthode. Nous avons choisi le coût de l'ébavurage associé à la brosse pour la raison qu'elle englobe la plupart des éléments cités précédemment.

Ébavurage par brossage

Selon Gillespie (1981), l'ébavurage par brossage est considéré comme un des procédés les plus utilisés dans l'industrie. Le modèle d'estimation du coût d'ébavurage par pièce C inclut le coût de dépréciation de la machine, le coût de l'outillage, le coût de la main d'œuvre, le coût de la maintenance, le coût de l'énergie, etc.

$$\boxed{C = \frac{C_D + C_M + WC_P}{N} + \left[\frac{C_B}{N_P} + \frac{C_L}{N} + \frac{C_A}{N_C} + \frac{C_L}{n} T_S\right]\left[1 + D_o\right] + \frac{A\left(F + H + L_i + I + G\right)}{H_y N}} \qquad (2.1)$$

Où :

C : coût d'ébavurage par pièce;

C_D : coût de dépréciation de la machine par heure/ heure d'opération;

C_M : coût de maintenance par heure d'opération;

C_L : coût de la main d'œuvre par heure;

C_p : coût de l'énergie utilisée ($ / Kilowatt- heure);

C_A : coût de nettoyage par heure après ébavurage (travail et matériel);

C_B : coût de la brosse;

D_o : charge indirecte du taux de travail en pourcentage;

N : nombre de pièces passées par heure;

N_p : durée de vie de la brosse (nombre de pièces faites);

N_c : nombre de pièce nettoyée par heure;

n : nombre de pièces par réglage;

T_S : temps de réglage;

W : énergie utilisée, kilowatts (1 hp =0.75 kw);

F : coût annuel de la plateforme ($ / sq ft / yr);

H : coût annuel de chauffage pour la zone d'ébavurage ($/ sq ft/ yr);

L_i : coût annuel d'éclairage pour la zone d'ébavurage ($/ sq ft / yr);

G : tout autre coût de charge indirecte ($ / sq ft / yr);

H_y : heure par année d'utilisation d'ébavurage;

A : surface de plateforme d'opération (sq ft).

Il est possible de réduire le coût total de l'ébavurage de plusieurs façons. Si par exemple on réduit le coût de la main-d'œuvre, ou bien on augmente la durée de vie de la brosse, le coût total de l'ébavurage se voit automatiquement diminuer.

Certains paramètres non quantifiables par exemple : l'accessibilité, la proximité à d'autres surfaces sensibles, la difficulté d'ébavurage, etc. peuvent influencer le temps d'ébavurage, par conséquent, le coût de l'ébavurage. Si on arrive à quantifier d'une façon précise ces paramètres, nous pourrions avoir une meilleure maîtrise du coût de l'ébavurage et un meilleur contrôle du processus.

Dans le domaine industriel, il est souvent difficile de sélectionner le moyen d'ébavurage convenable, capable de satisfaire les divers volets économiques, qualitatifs et environnementaux de la fabrication. Dans la section suivante, nous abordons cette question plus en détail.

2.6 Analyse et critères de sélection des méthodes d'ébavurage

Une fois que tous les aspects précédant l'ébavurage et finition de surfaces sont abordés, tels que les questions de conception pour faciliter l'ébavurage, la limitation de la formation des bavures pendant l'usinage, la génération des bavures uniformes dans le but de faciliter l'ébavurage. Il resterait la question relative aux critères de sélection de la méthode d'ébavurage et finition de surfaces appropriée. Il est très problématique dans l'industrie de déterminer parmi les 122 procédés d'ébavurage et finition de surface, lequel est le procédé le

mieux adapté pour satisfaire les standards de qualité, tout en restant concurrentiel par la livraison des pièces dans les délais à des prix abordables.

Dans la section suivante, nous présentons des recommandations utiles permettant de sélectionner les meilleures méthodes d'ébavurage et finition de surface possible, en tenant compte du type de pièce à finir, de la qualité désirée, des moyens disponibles, etc. Cependant, pour des raisons de confidentialité, nous sommes contraints de cacher certaines données liées à l'étude réalisée dans un milieu industriel (Pratt & Whitney Canada), mais ceci n'altérerait en aucun cas le principe général de l'approche.

Recommandations

Nous avons structuré les critères de sélection des méthodes d'ébavurage et finition de surface selon plusieurs concepts pratiques, inspirés des applications et approches manufacturières.

Premier concept

On se basant sur les données du tableau 2.1 du chapitre précédant, on peut déjà avoir une idée claire des procédés d'ébavurage les plus utilisés dans le monde, ceci pourrait constituer un repère important dans la sélection de la méthode d'ébavurer la pièce. L'ordre apparent des procédés d'ébavurage sur le tableau est régi principalement par le rapport qualité – prix. L'exemple de l'ébavurage manuel représentant le procédé le plus utilisé dans l'industrie peut d'ailleurs accommoder presque toutes les exigences économiques et de qualité.

Deuxième concept

On se basant sur les exigences géométriques et qualitatives de la pièce (tolérances, forme, grandeur, etc.), on pourra choisir le procédé adéquat pouvant satisfaire les besoins de la pièce. Selon Gillespie (1999), l'ébavurage sur machine-outil à commande numérique CNC peut atteindre une précision de 50 µm. Alors que l'ébavurage thermique peut performer juste 125 µm de précision.

Troisième concept

La notion de coût du procédé d'ébavurage pèse lourd dans les décisions relatives à la sélection du moyen de finition de la pièce. Un procédé d'ébavurage cher ne peut pas être forcement le meilleur. Selon Gillespie (1999), pour une même pièce, l'ébavurage manuel peut coûter 0.6 $ / pièce, alors que l'ébavurage chimique ne coûterait que 0.5 $ / pièce.

Quatrième concept

Le volume de production peut constituer un indice important dans le choix du procédé d'ébavurage, car il existe des procédés destinés uniquement à la production unitaire, comme dans le cas de l'ébavurage par jet abrasif. Cependant, l'ébavurage chimique est destiné à la production en masse, et l'ébavurage par brosse peut être utilisé dans les deux cas.

Cinquième concept

Le matériau de la pièce peut jouer un grand rôle dans la sélection du procédé d'ébavurage. Certains procédés ne permettent pas l'ébavurage de certains types de matériaux. Les procédés électrochimiques par exemple, ne s'appliquent que sur des pièces conductrices de courant.

Sixième concept

Se baser sur les limitations des procédés d'ébavurage, est une approche très répondue dans l'industrie. Si par exemple on veut ébavurer l'intersection de deux trous sur une pièce donnée. Le tonneau d'ébavurage ne pourra pas effectuer cette tâche. Par contre, les procédés d'ébavurage par flux abrasif sont très recommandés dans ce cas.

Septième concept

Il y a une différence entre l'ébavurage et la finition de surface. Quelques procédés ne peuvent être utilisés que pour l'ébavurage des arêtes, par exemple les procédés d'ébavurage mécanisés et l'ébavurage par formation d'arêtes (très répondu dans l'ébavurage des tôles). Toutefois, la plupart des procédés de finition peuvent à la fois ébavurer et finir les surfaces.

Huitième concept

Le type de bavures produites sur les arêtes de la pièce peut aider à sélectionner le procédé d'ébavurage convenable. Car certains procédés sont capables d'enlever des bavures de petites épaisseurs seulement, comme dans le cas de l'éléctropolissage. Par ailleurs, l'ébavurage thermique est recommandé pour les bavures épaisses.

Neuvième concept

L'espace disponible dans l'atelier peut limiter le choix du procédé d'ébavurage, car certains équipements occupent de grandes surfaces, ce qui n'est pas toujours disponible dans les ateliers. Un minimum d'espace est nécessaire pour l'ébavurage manuel, alors que l'équipement du tonneau d'ébavurage nécessite plusieurs fois plus d'espace.

Les exigences de fabrication diffèrent d'un domaine à un autre. Dans le domaine aéronautique, les exigences de fabrication liées à la fiabilité des systèmes, la qualité et la sécurité priment sur toutes autres exigences. Dans l'industrie automobile, le respect des délais de livraison et le besoin de réduction des coûts de fabrication peuvent probablement dominer dans les décisions finales liées aux choix du processus d'ébavurage à utiliser.

Enfin, une matrice de décision englobant toutes les données de fabrication ainsi que les concepts cités précédemment pourrait être dressée de façon à attribuer des poids pour chaque paramètre, et décider du choix final.

D'autres industriels préfèrent envoyer un échantillon de leur produit pour ébavurage auprès des fournisseurs de la solution technologique, ces tests sont souvent gratuits. Et selon les résultats obtenus, les décisions finales seront prises.

2.7 Conclusion

Cette étude nous a permis de conclure que l'approche la plus efficace pour procéder à la finition des pièces devrait inclure tous les aspects de fabrication de la pièce, sans exclusion :

la conception, la fabrication / l'usinage, et enfin l'ébavurage. Chaque élément constitue un palier important pouvant directement influencer la finition de la pièce. Une conception efficace de la pièce pourrait résoudre plusieurs problèmes liés à l'usinage et à l'ébavurage. Un usinage performent incluant les techniques de réduction, d'orientation, d'uniformisation et d'enlèvement des bavures pendant le processus de coupe peut énormément faciliter l'ébavurage. Enfin, choisir le bon processus d'ébavurage et finition de surfaces génère non seulement une meilleure qualité de pièces, mais aussi réduit le coût total de fabrication des pièces.

Les concepts proposés dans ce chapitre représentent un excellent moyen permettant de sélectionner la méthode d'ébavurage et finition de surface convenable. Définitivement, procéder par élimination serait incontournable. Cependant, la connaissance de chaque méthode d'ébavurage, ainsi que les exigences du produit fini sont très importantes pour pouvoir effectuer le bon choix. La variation de la taille des bavures dans le temps pourrait relativement altérer le bon choix du procédé d'ébavurage, il faudrait donc inclure cette variable dans les choix qui s'imposent. En plus, il ne faut pas hésiter à combiner plusieurs procédés d'ébavurage pour finir la pièce, cette approche généralement donne de meilleurs résultats.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 3

FORMATION DES BAVURES : PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

3.1 Problématique et objectif

Les bavures d'usinage sont indésirables dans la fabrication des pièces. Déterminer les facteurs influençant leur génération dans le but de les éliminer ou de les réduire est d'une importance capitale. Le but principal de ce travail est d'étudier l'influence de la grande vitesse de coupe, de l'usinage à sec, des revêtements de l'outil et de l'usure sur la formation des bavures pendant l'usinage des alliages d'aluminium.

Dans les sections qui suivent, nous présenterons notre méthodologie et la procédure expérimentale à utiliser.

3.2 Procédure expérimentale

Pour arriver à comprendre le comportement des bavures d'usinage en fonction de la variation des différents facteurs et paramètres de coupe préalablement mentionnés et déterminer les interactions éventuelles entre les paramètres d'entrée, un plan factoriel complet a été dressé pour mener l'étude. Une attention particulière a été attribuée à l'usinage à grande vitesse et au revêtement des outils pour les six bavures les plus importantes générées pendant l'opération de rainurage (figure 3.1).

- Bavures d'entrée centrale EC
- Bavures de sortie centrale SC
- Bavures d'entrée latérale (en avalant) ED
- Bavures de sortie latérale (en opposition) SG
- Bavures supérieures (en opposition) G-sup
- Bavures supérieures (en avalant) D-sup

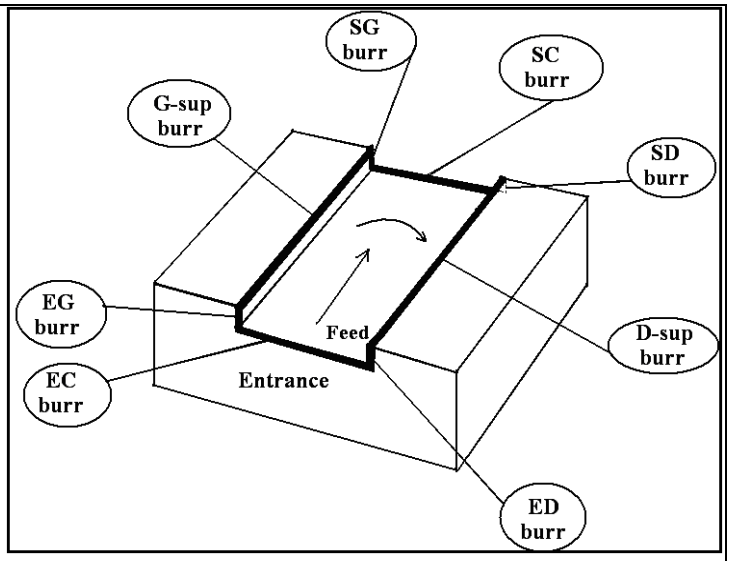


Figure 3.1 Définition des principales bavures de rainurage.

3.2.1 Pièces et montage

Les pièces utilisées pendant l'expérience étaient des blocs de forme parallélépipédique en alliage d'aluminium, selon les propriétés mécaniques mentionnées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Propriétés mécaniques des trois alliages d'aluminium
Adapté de ASM International Handbook (2007)

Matériau	Dureté Brinell	Limite élastique
Al 6061- T6	95 HB	275 MPa
Al 2024- T351	120 HB	325 MPa
Al 7075- T6	150 HB	505 MPa

Les dimensions des pièces étaient de 38 x 38 x 12 mm. Fixées sur la machine selon des séries de six pièces à l'aide d'un montage spécial comme illustré dans la figure 3.2.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 3.2 Montage spécial utilisé pour maintenir les pièces.
ÉTS (2009)

3.2.2 Plan d'expérience

Comme l'étude de la formation des bavures est essentiellement liée aux opérations de finition, une première coupe d'ébauche était effectuée en une seule passe de surfaçage sur l'ensemble des échantillons, avec un enlèvement de matière de 0.5 mm de profondeur. L'opération de rainurage est également effectuée en une seule passe de finition.

L'outil de coupe utilisé était une fraise en bout au carbure à trois dents d'ISCAR, ¾ de pouce de diamètre à pastilles interchangeables. Les caractéristiques des revêtements des diverses pastilles sont présentées en détail dans la figure 3.3. La sélection des revêtements est basée sur leur performance aux frottements et leur résistance à la chaleur. En effet, la température lors de l'usinage à sec des alliages d'aluminium peut facilement atteindre 600°C, il est nécessaire d'utiliser des outils de coupe ayant des revêtements agissant comme barrière thermique et donc limitent la détérioration des outils. On se basant sur la figure 3.3, on remarque que la stabilité thermique et la résistance chimique à l'usure des outils en alumine (Al_2O_3) sont préférables (Figure 3.3a), suivis par les revêtements de type TiAlN. Afin d'obtenir une meilleure finition de surface ou de réduire le frottement à l'interface outil / copeau, réduire ainsi les efforts de coupe; le revêtement de type dépôt physique en phase

vapeur (PVD), tels que le TiN et TiCN peuvent être plus appropriés (figure 3.3b). La résistance à l'usure de l'ensemble des revêtements est pratiquement la même (figure 3.3c). Il est important de mentionner que les revêtements choisis sont recommandés pour l'usinage à la fois sec et lubrifié.

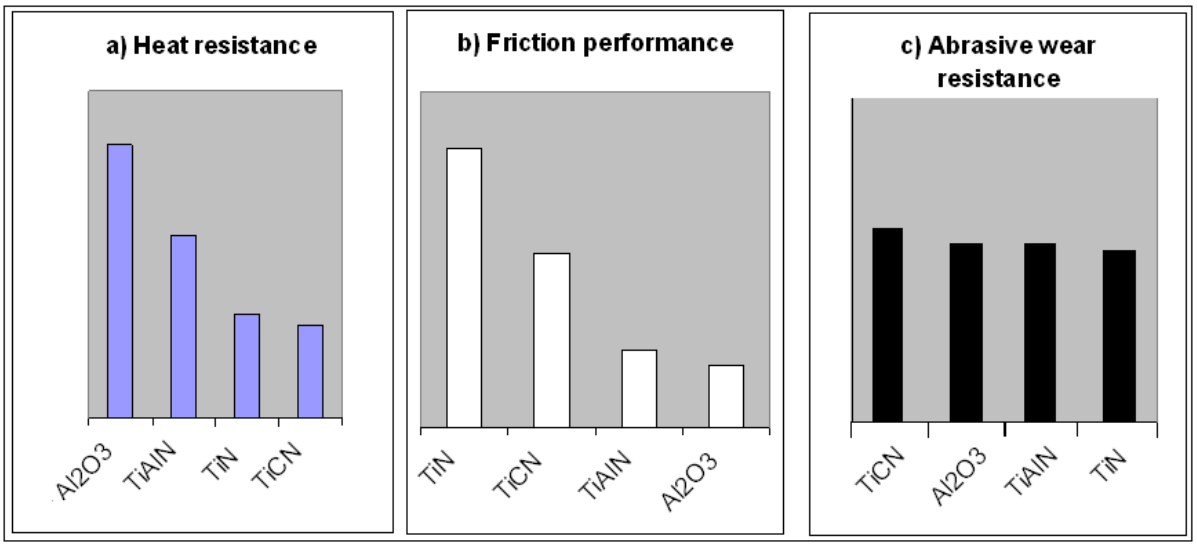


Figure 3.3 Comparaison des performances d'outils par leurs revêtements.
Adaptée de Songmene *et al.* (2007)

Nous avons résumé dans le tableau 3.2 l'ensemble des paramètres d'usinage utilisés selon plusieurs niveaux. Trois niveaux de vitesse de coupe et vitesse d'avance ont été testés conjointement avec deux niveaux de profondeur de coupe, trois alliages d'aluminium et trois outils de coupe de revêtements différents. Chaque 18 essais, de nouvelles pastilles d'outils ont été systématiquement montées. Tous les essais ont été réalisés sans lubrification. Le nombre total des expériences réalisées était de 162 expériences avec 33 expériences répétées pour confirmer les résultats.

Tableau 3.2 Conditions de coupe utilisées

Facteurs		**Niveaux des facteurs**		
		1	**2**	**3**
A: Vitesse de coupe (m/min)		300	750	1200
B: Avance par dent (mm)		0.010	0.055	0.100
C: Profondeur de coupe (mm)		1	-	2
D: Matériau de la pièce		Al 6061-T6	Al 2024-T351	Al 7075-T6
E: Outil de coupe (Iscar Réf. E90 A-D.75-W.75-M); 3 dents; Ø ¾ de pouce	Réf. des pastilles	IC 328	IC 908	IC 4050
	Dureté des revêtements	TiCN 2400 HV	TiAlN 3000 HV	TiCN+Al203+TiN 2400 HV (revêtement supérieur)
	Rayon de l'arête de la pastille r [mm]	0.5	0.83	0.5
Lubrification		Néant		

La machine-outil utilisée était la HURON - K2X10, 3 axes (figure 3.4). Elle permet une grande vitesse de coupe et d'avance (vitesse de rotation de 28.000 tr / min; avance de 60 m/mn; 50 kW).

Figure 3.4 Machine-outil utilisée.
ÉTS (2009)

3.2.3 Mesures

La seule mesure effectuée pendant l'usinage est celle des efforts de coupe, elles ont été recueillies à l'aide d'une table dynamométrique à trois axes (Kistler-9255B), fixée directement sur la table de la machine (Fiche technique présentée dans l'annexe I). Lorsque la table dynamométrique est connectée au système d'acquisition *plaque Kistler-9255B,* elle permet les mesures et l'enregistrement des forces selon l'axe X, Y et Z (figure 3.5).

Figure 3.5 Interface de *plaque Kistler-9255B* pour la mesure des forces.
ÉTS (2009)

Après usinage, la rugosité moyenne arithmétique Ra de la surface horizontale de base de la rainure a été mesurée pour chaque pièce (figure 3.6). Quatre différents balayages ont été effectués dans le but d'avoir une moyenne représentative de l'état de surface mesurée; une mesure est perpendiculaire à l'avance (figure 3.6a), l'autre mesure est parallèle à l'avance (figure 3.6b). La rugosité moyenne arithmétique Ra finale de chaque pièce est calculée par la moyenne des mesures dans les deux directions.

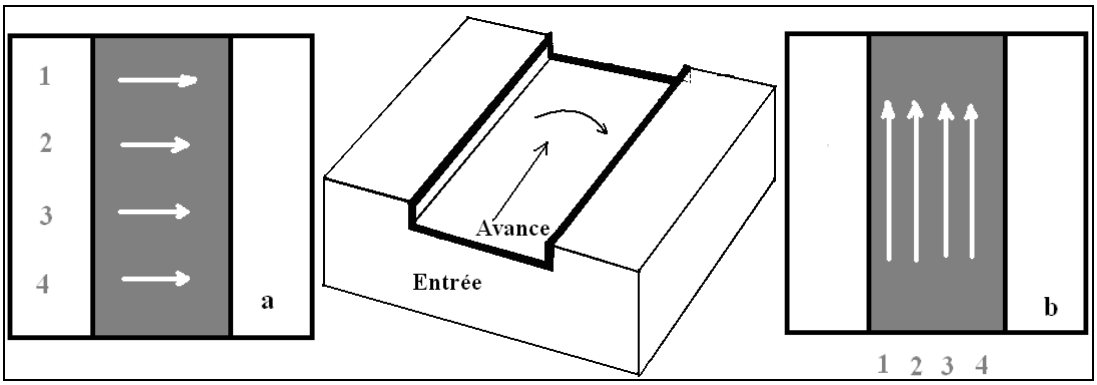


Figure 3.6 Mesure de la rugosité.

(a) mesure perpendiculaire à l'avance, (b) mesure parallèle à l'avance
Adaptée du mémoire de Kamguem (2010)

L'instrument de mesure utilisé pour évaluer l'état de surface de la pièce est un Rugosimètre Mitutoyo - SV SUFTEST 600 (figure 3.7). L'instrument est lié à un système d'acquisition permettant de stocker toutes les données mesurées. Les paramètres de réglage utilisés pendant la mesure étaient (longueur de mesure: 204 mm, gamme : 800 µm, vitesse: 1 mm / s, nombre de points: 4800).

Figure 3.7 Rugosimètre utilisé lors des essais.

ÉTS (2009)

La mesure des bavures était concentrée sur l'estimation de la hauteur maximale des bavures h_o. Comme expliqué précédemment, il existe une relation linéaire entre la hauteur des bavures h_o et l'épaisseur des bavures b_o. La façon la plus répandue dans la mesure de la hauteur maximale des bavures h_o est l'évaluation de la distance entre le point le plus élevé de la bavure et le bord de la pièce (figure 3.8). En effet, la mesure du pic maximal des bavures peut être plus représentative que la mesure de la hauteur moyenne des bavures dispersées le long du bord de la pièce. Les types de bavures étudiées étaient les six bavures illustrées précédemment dans la figure 3.1: les bavures EC, SC, ED, SG, D-sup et G-sup.

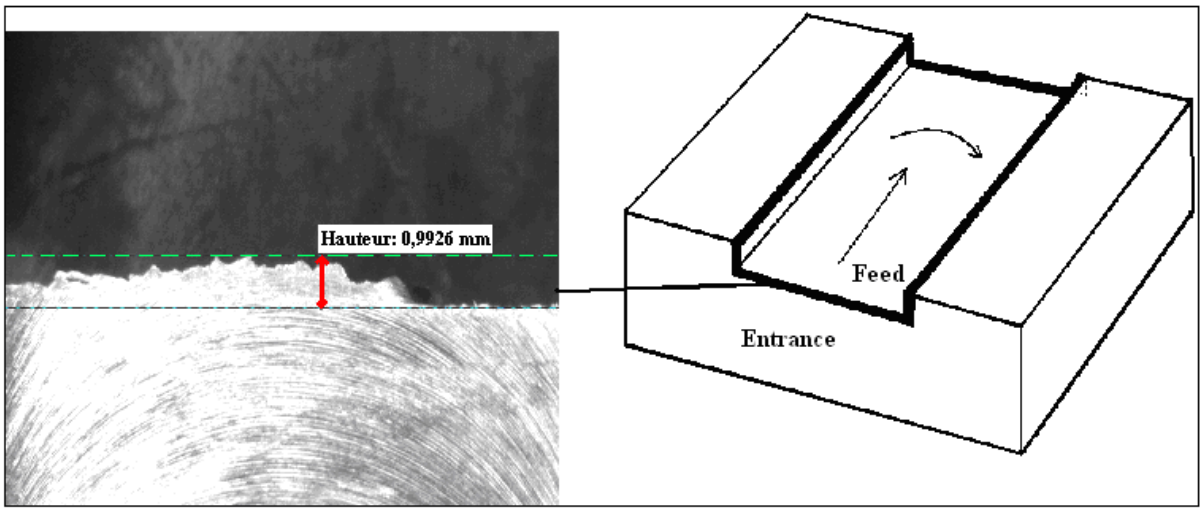


Figure 3.8 Mesure des bavures le long de l'arête de la pièce.
(Al 2024 T351, V_c : 300 m/min, f_z : 0.1 mm/dent, P : 2 mm, outil: TiAlN)

L'instrument utilisé pour mesurer la hauteur des bavures était un microscope optique de grossissement 70 X (figure 3.9), connectés à un système d'acquisition d'image (CLIMEX. Captiva 3,5 V .029). Le système permet la visualisation, la mesure et le stockage des images sur un ordinateur.

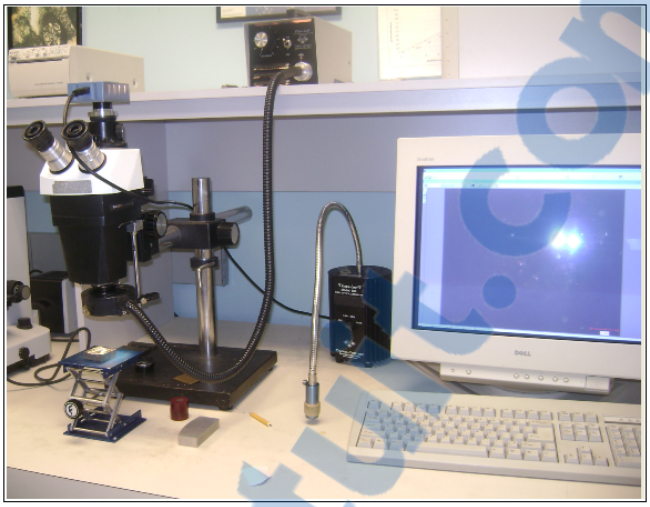


Figure 3.9 Microscope optique utilisé pour la mesure des bavures.
ÉTS (2009)

Pendant l'analyse des résultats, nous nous servons de l'indice d'occupation des bavures η_s **(Éta%)** pour étudier la fréquence d'apparition des bavures, ainsi que leurs lieux dominants.

Indice d'Occupation des bavures η_s (Éta%)

L'indice d'occupation des bavures η_s **(Éta%)** permet de fournir des informations pertinentes pouvant servir au moment des opérations d'ébavurage. Il représente le pourcentage de la longueur des arêtes de la pièce occupée par les bavures (figure 3.10). L'occupation des bavures η_s est définie par la formule suivante :

$$\eta_s = \frac{\sum_{i=1}^{6} l_i}{\sum_{i=1}^{6} L_i}.100 \qquad (3.1)$$

Où :

l_i: Représente la longueur de l'arête i de la pièce occupée par les bavures

L_i: Représente la longueur totale de l'arête i

Rapport-Gratuit.com

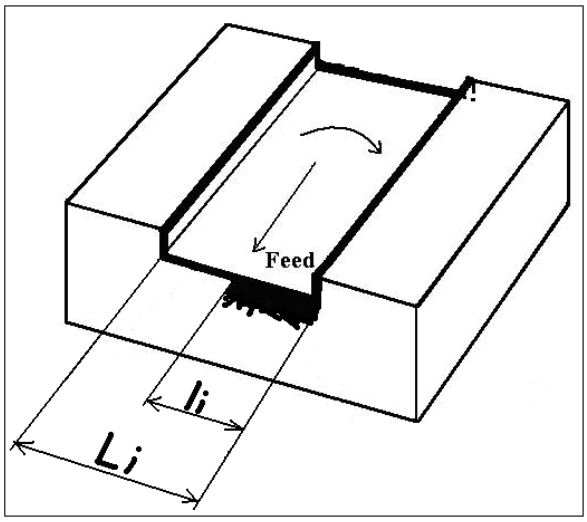


Figure 3.10 Définition de l'indice d'occupation des bavures η_s (Éta%).

Pour pouvoir attribuer une valeur à l_i, les bavures doivent avoir un minimum de 0.1 mm de hauteur pour être comptées. La logique derrière $\boldsymbol{\eta_s}$ fait que : plus elle est proche de 100%, l'outil d'ébavurage devrait parcourir toutes les arêtes de la pièce.

Les résultats et analyse des essais réalisés sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

FORMATION DES BAVURES : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Introduction

Les expériences réalisées sur la formation des bavures se sont déroulées dans de bonnes conditions. Nous avons pu enregistrer pendant l'usinage toutes les données relatives aux forces de coupe. Les pièces ont été manipulées avec soins dans le but de ne pas endommager leurs bavures. À premier coup d'œil, nous avons remarqué qu'il existe une grande variabilité dans la taille des bavures. La mesure des bavures pour l'ensemble des tests à pris beaucoup de temps vu que le nombre des mesures à effectuer été important (de l'ordre de 1000 mesures). Dans ce qui suit, chaque type de bavure est étudié séparément.

4.2 Forme et mécanisme de formation des bavures

La figure 4.1 présente les géométries typiques des bavures observées sur les pièces usinées. On remarque clairement que les conditions de coupe ont une influence directe sur la hauteur des bavures. Pour un matériau de pièce donné, un outil donné et des conditions de coupe variées, les bavures peuvent être excessivement hautes et irrégulières, comme indiqué par les notifications 1 et 2 pour les bavures supérieures, et la notification 3 pour les bavures latérales (figure 4.1a). Les bavures peuvent être très limitées en hauteur, régulières et parfois pas visibles, comme indiqué par les notifications 4 et 5 dans le cas des bavures supérieures, et la notification 6 dans le cas des bavures latérales (figure 4.1b). Dans ce cas particulier, en augmentant l'avance par dent, ou en réduisant la vitesse et la profondeur de coupe, on voit que la qualité de la pièce est considérablement améliorée.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

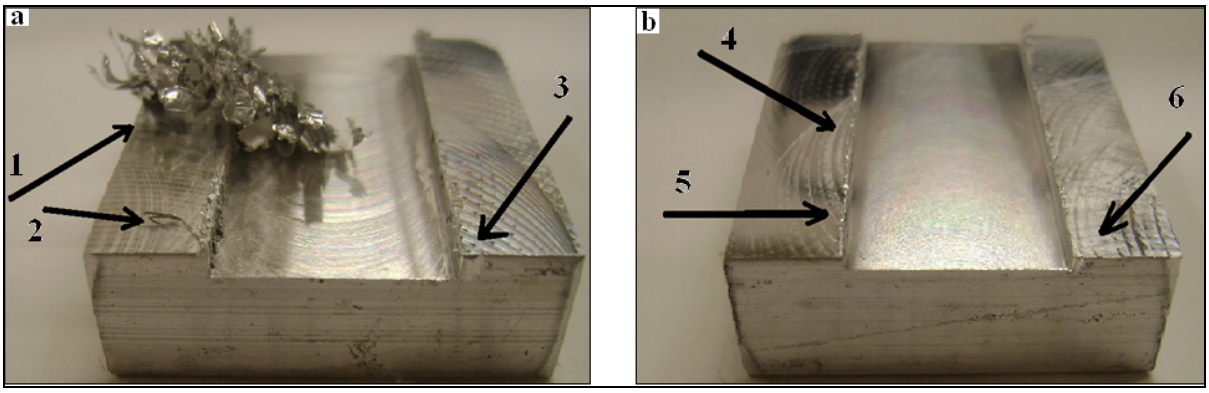


Figure 4.1 Géométries typiques des bavures obtenues.

(Matériau : Al 6061 – T6, outil à revêtement TiCN)
(a) V_c = 1200 m/min, f_z = 0.01 mm/z, P = 2 mm
(b) V_c = 750 m/min, f_z = 0.10 mm/z, P = 1 mm

Six types de bavures différentes ont été observés: bavures d'entrée centrales EC, bavures de sortie centrales SC, bavures d'entrée latérales (en avalant) ED, bavures de sortie latérales (en opposition) SG, bavures supérieures (en opposition) G-sup, bavures supérieures (en avalant) D-sup.

La transition des bavures primaires vers des bavures secondaires a été observée sur les arêtes de sortie latérale générant SG et SD. Le matériau subit un processus d'étirement à la fin de l'usinage, où une couche mince de matériau est allongée au lieu d'être coupée. L'outil pousse cette mince couche en dehors de la pièce jusqu'à la rupture, créant ainsi les deux types de bavures SG et SD. Dans la plupart du temps, seulement SG sont rencontrés. Le sens de rotation de l'outil affecte grandement le lieu de rupture de cette couche mince qui est divisée en deux bavures latérales non égales (figure 4.2). Dans le sens horaire de coupe, une grande partie de la couche se plie à gauche pendant que l'outil quitte la pièce, formant par conséquent les bavures SG qui sont plus grandes que les bavures SD. Cependant, la hauteur maximale des bavures SG ou SD ne dépasse jamais le diamètre de l'outil.

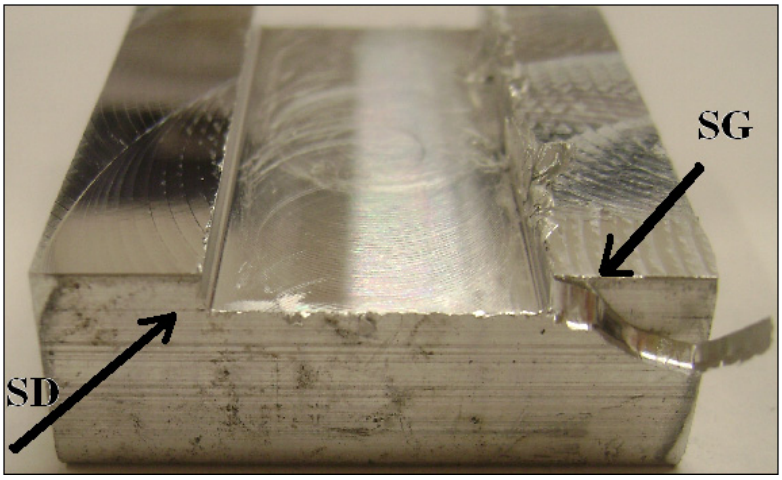


Figure 4.2 Bavures de sortie latérale SG et SD.

(Al 6061 T6; V_c = 750m/min; f_z = 0.1mm/z; P = 2mm; revêtement de l'outil = TiAlN)

Les bavures SG sont considérées comme des bavures de type roulé (*rollover burrs*), cette caractéristique devient plus prononcée lorsque les bavures sont petites. La non-constance dans la fréquence d'apparition des bavures de sortie et d'entrée latérale est due aux ruptures des bavures très souvent observées au bord de la pièce. Ce phénomène de rupture des bavures et/ou copeaux non évacués laisse de courtes bavures secondaires causées principalement par les conditions de coupe utilisées et par l'aspect ductile/fragile du matériau de la pièce. Il se produit quand l'effort de flexion appliqué dépasse les contraintes nécessaires pour rompre le copeau. Les paramètres d'outils et le processus de vibration présent pendant l'usinage peuvent aussi amplifier la progression de la rupture. Les bavures d'entrée latérales (en avalant) ED, sont aussi formées selon le processus de formation des bavures roulées (*rollover burrs*) comme indiqué sur la figure 4.3. Cela arrive lorsqu'il est plus facile pour le copeau de se plier au lieu de se couper, ou alors plus facile de fracturer l'arête de la pièce.

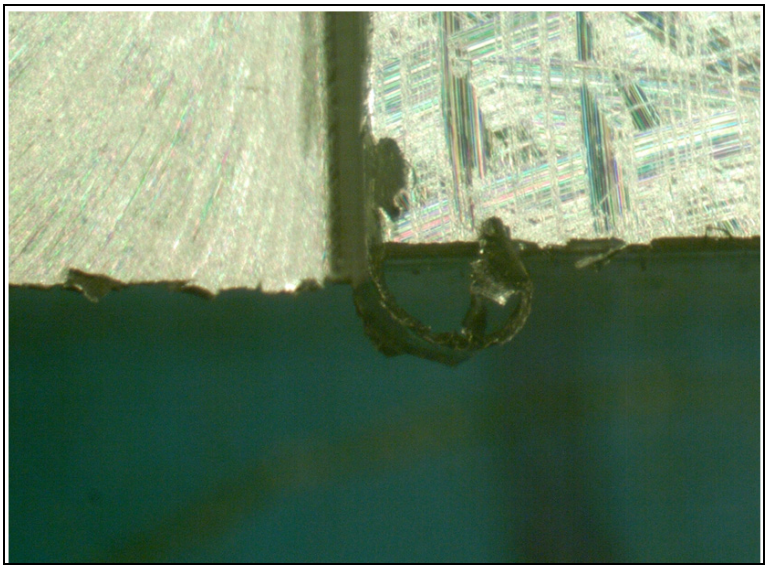


Figure 4.3 Formation des bavures roulées en ED.

(Al 2024-T351, Vc: 1200 m/min; fz: 0.01 mm/dent;
P = 1mm; Revêtement de l'outil TiCN-Al_2O_3-TiN)

Les bavures supérieures (en opposition) G-sup, et les bavures supérieures (en avalant) D-sup, sont considérées comme des bavures de type Poisson (*Poisson burrs*) résultant d'une déformation latérale du matériau de la pièce comprimé par l'outil. Les bavures supérieures sont généralement influencées par le matériau de la pièce et la charge appliquée associée aux conditions de coupe. Elles ont la tendance de se former suivant une forme longitudinale comme présenté sur la figure 4.4.

L'usinage des alliages d'aluminium selon des conditions de coupe déterminées génère un phénomène d'accumulation de copeau sur l'arête supérieure des bavures G-sup ainsi que sur sa face verticale correspondante (figure 4.5). Cette accumulation peut être expliquée par le mauvais choix des conditions de coupe et des paramètres d'outil, générant ainsi un bouleversement du régime d'usinage et de la dynamique d'évacuation du copeau.

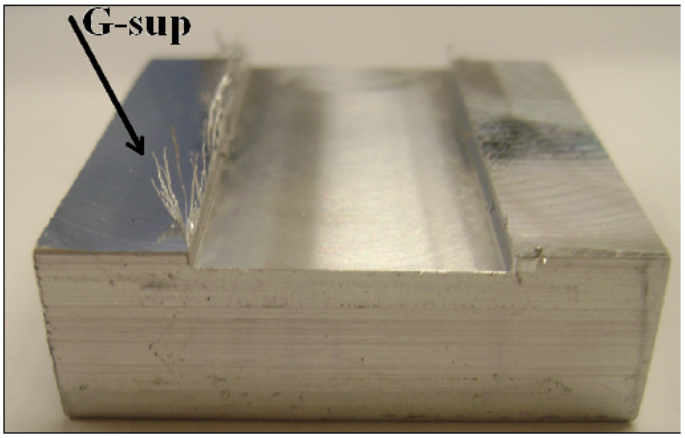


Figure 4.4 Forme longitudinale observée sur les bavures supérieures.
(G-sup et D-sup)

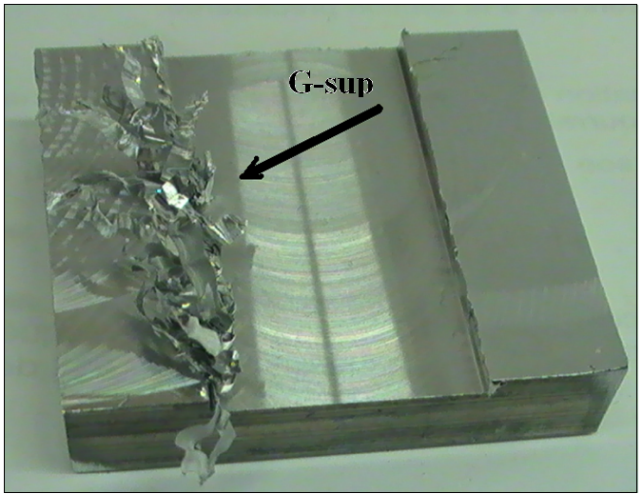


Figure 4.5 Accumulation du copeau sur la pièce.
(Vc = 750 m / min; fz = 0.01 mm / dent;
P = 2mm; Al 7075 - T6; revêtement de l'outil TiCN)

Le copeau ne s'évacue pas facilement hors de la pièce, il reste coincé sur l'arête supérieure ainsi que la face latérale usinée correspondante aux bavures G-sup. Ce phénomène est observé particulièrement lorsque la vitesse de coupe, la profondeur de passe sont élevées, et l'avance par dent est petite. La piètre qualité de surface obtenue sur la face latérale usinée amplifie davantage le phénomène si ce n'est la source du phénomène, puisque les copeaux

dégagés sont capturés et emprisonnés sur la face en question tout juste après le passage de l'outil, lequel racle le copeau en cette direction. La mauvaise qualité de surface de la face latérale de la rainure est principalement causée par les conditions de coupe inappropriées et éventuellement l'usinage à sec. L'autre paramètre important affectant la mauvaise qualité de surface est l'outil; car premièrement, un outil de rainurage ne peut générer une bonne qualité de surface dans les deux directions (face horizontale et face verticale). Dans notre cas, la qualité de surface de la face horizontale est relativement bonne contrairement à celle des murs de la rainure (face verticale correspondante à la bavure G-sup de l'usinage en opposition). La géométrie de l'outil et son nombre de dents peut jouer un rôle important dans ce phénomène; puisqu'un outil ayant deux dents pourrait être meilleur qu'un outil à trois dents, car ce dernier a moins d'espace disponible pour l'évacuation du copeau. L'importante température que peut atteindre le copeau pendant l'usinage peut également favoriser le processus de collage des copeaux sur la face latérale usinée. La présence de petits fragments de matériaux collés sur des surfaces déjà finies confirme cette théorie. Ces petits fragments dégagés pendant l'usinage doivent être tellement chaud qu'ils fondent sur les surfaces limitrophes à la coupe y compris les surfaces finies. Nous pensons qu'un outil de coupe à deux dents pourrait réduire considérablement ce phénomène d'accumulation, puisqu'il permet un meilleur dégagement des copeaux.

Les bavures d'entrée centrale EC sont considérées comme des bavures de Poisson. Un comportement intermittent du matériau entre le *fragile* et le *ductile* est observé sur les bavures d'entrée centrale EC et les bavures de sortie centrale SC. La figure 4.6a montre l'excès et la dépression du matériau au bord de la pièce illustrant respectivement les bavures positives est les bavures négatives.

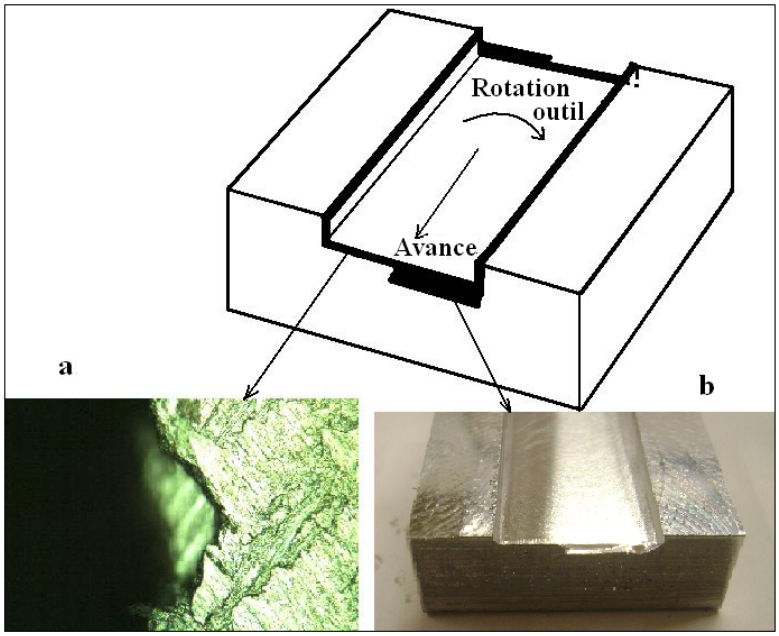


Figure 4.6 Formation des bavures d'entrée EC et de sortie SC.

(a) comportement ductile et fragile sur l'Al 6061 T6
(b) bavures de direction de coupe sur la moitié de l'arête de la pièce de l'Al 6061 T6

La géométrie des bavures dépend du processus de déformation plastique du matériau, et également du comportement ductile et fragile des bavures, ce qui est directement lié aux propriétés du matériau. L'alliage d'aluminium Al 7075-T6 qui est le moins ductile des trois alliages montre davantage de ruptures des bavures comparativement à l'alliage Al 6061-T6 lequel est plus ductile. Par ailleurs, l'alliage d'aluminium Al 2024-T351 montre un comportement intermédiaire. Les bavures d'entrée centrale EC et les bavures de sortie centrale SC sont généralement formées sur la moitié de l'arête de sortie et d'entrée du bord de la pièce, elles sont considérées comme des bavures de direction de coupe (figure 4.6b).

La forme des bavures générées prend parfois des configurations très complexes, l'annexe II illustre d'autres formes de bavures formées sur les différentes arêtes de la pièce.

4.3 Analyse statistique des bavures

Nous présentons dans cette section l'influence des divers paramètres d'usinage sur les différents types de bavures, le Pareto pour déterminer quels sont les paramètres les plus influents, et aussi les interactions possibles entre les divers paramètres.

4.3.1 Bavures d'entrée latérales ED

La figure 4.7 montre l'analyse graphique de Pareto, concernant les effets des principaux facteurs testés sur les bavures d'entée latérales ED. L'intervalle de confiance utilisé pour fixer le niveau de signification des facteurs est de 95%. À partir du graphique, il apparaît que le matériau de la pièce, l'avance f_z puis la profondeur de coupe P sont les paramètres les plus importants influençant les bavures d'entrée latérales ED à l'intervalle de confiance de 95%, tandis que les revêtements d'outils et la vitesse de coupe ne montrent aucune influence significative.

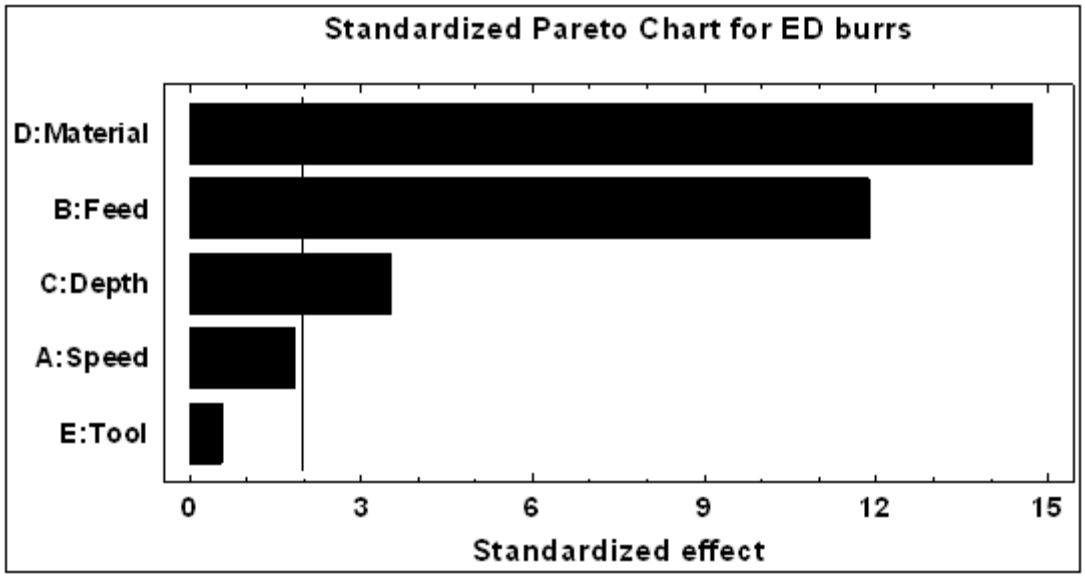


Figure 4.7 Analyse de Pareto pour les bavures d'entrée latérales ED.

L'alliage d'aluminium Al 7075 - T6 considéré comme moins ductile que les autres matériaux testés, génère moins de bavures ED (figure 4.8). L'augmentation de la vitesse d'avance f_z diminue les bavures ED, et l'augmentation de la profondeur de coupe P conduit à une augmentation des bavures ED. L'effet de la vitesse de coupe V_c était à la frontière du niveau de signification, car l'augmentation de V_c de 300 à 750 m / min fait augmenter les bavures ED, puis commencent à diminuer à partir de 750 m / min. Les grandes vitesses de coupe n'affectent pas les bavures ED. Le premier et le deuxième outil de revêtement TiCN et TiAlN respectivement produisent moins de bavures ED que le troisième outil de revêtement TiCN + Al_2O_3 + TiN, mais la différence n'était pas statistiquement significative.

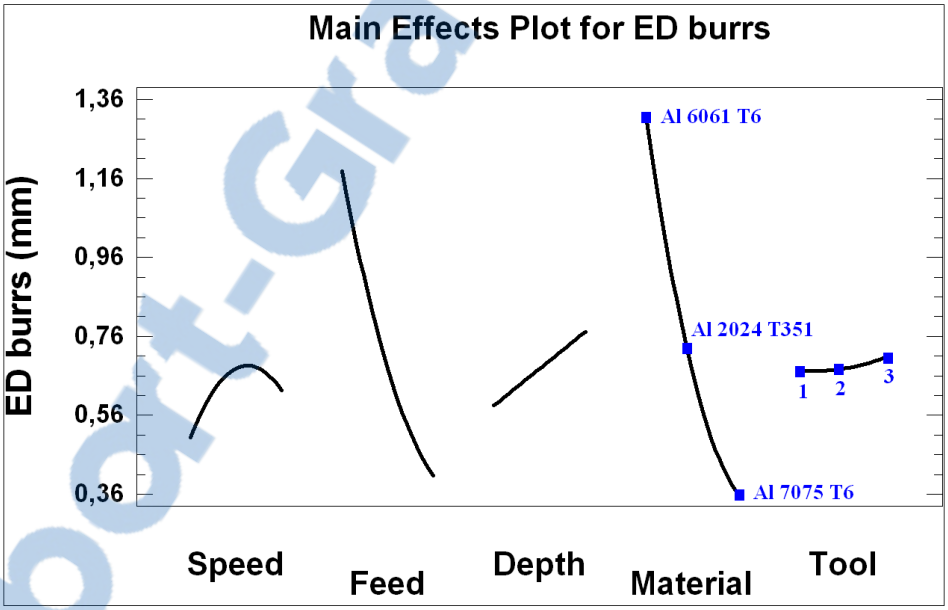


Figure 4.8 Influence des paramètres sur les bavures ED.

La figure 4.9 montre les principales interactions entre les facteurs testés pour les bavures ED. On parle d'interactions entre les facteurs lorsque l'effet d'une variable change en fonction d'une autre variable. La figure nous montre qu'il y a deux fortes interactions pour les bavures ED. La première interaction est entre la vitesse d'avance (facteur B) et la profondeur de coupe (facteur C), la deuxième interaction est celle entre la vitesse d'avance (facteur B) et le matériau de la pièce (facteur D), mais cette dernière interaction n'est pas visible dans le

Rapport-Gratuit.com

domaine choisi. Le reste des interactions pour les bavures ED sont très faibles sinon inexistantes.

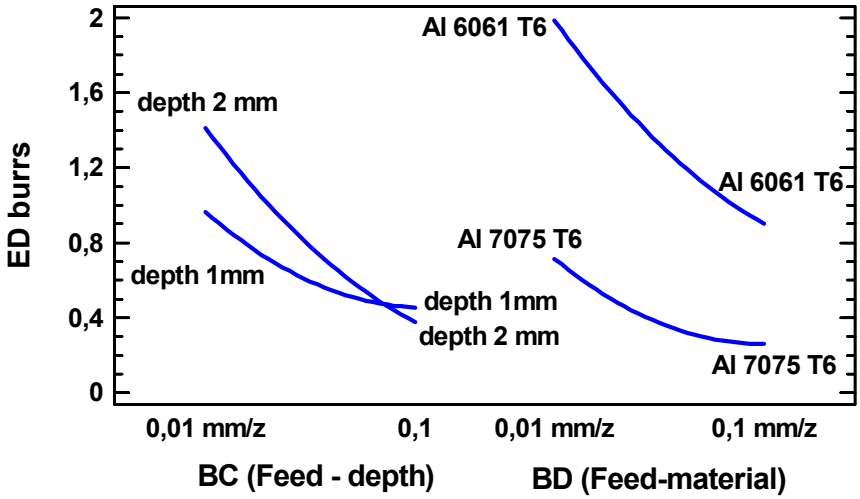


Figure 4.9 Interactions des paramètres pour les bavures ED.

4.3.2 Autres types de bavures

Une analyse similaire à celle présentée pour les bavures d'entrée latérales ED a été faite pour tous les autres types de bavures observées. Le tableau 4.1 résume les facteurs les plus influents sur les différents types de bavures. Pour chaque réponse, les facteurs sont classés de 1 à 5; le chiffre 1 est attribué au facteur le plus influent, et le chiffre 5 est attribué au facteur le moins influent. Les facteurs non influents statistiquement à l'intervalle de confiance de 95% sont aussi indiqués.

En se basant sur les données du tableau 4.1, les commentaires suivants peuvent être bâtis :

- Les bavures d'entrée EC et les bavures de sortie SC sont gouvernées par différents facteurs: la vitesse de coupe et la profondeur pour les bavures de sortie SC, le matériau de la pièce et le revêtement de l'outil pour les bavures d'entrée EC.

- Les bavures de sortie SC et les bavures supérieures D-sup sont gouvernées par les mêmes facteurs (vitesse de coupe, profondeur de coupe et revêtement de l'outil); au fait, ces deux bavures sont toutes les deux des bavures de sortie; puisque les bavures SC se forment

lorsque l'outil quitte la pièce, tandis que les bavures D-sup ont lieu quand l'arête latérale de l'outil quitte la pièce après chaque portion de rotation (voir figure 4.1).

- Les bavures latérales d'entrée ED et de sortie SG sont aussi gouvernées par les mêmes facteurs, à savoir le matériau, la profondeur de coupe et/ou la vitesse d'avance. L'usinage d'un matériau dur (7075-T6, par exemple) avec une vitesse d'avance élevée conduit à réduire les bavures d'entrée ED (voir figure 4.8).

- L'indice d'occupation des bavures **ηs** définie par le pourcentage des arêtes occupées par les bavures (expliqué profondément dans le chapitre précèdent) et les forces de coupe F_c sont significativement influencés par tous les facteurs testés (vitesse de coupe, vitesse d'avance, la profondeur de coupe, le matériau de la pièce et le revêtement de l'outil).

- Comme prévu, il a été aperçu que le fini de surface dépendait principalement de la vitesse d'avance utilisée, et du type de revêtement de l'outil de coupe.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 4.1 Résumé des facteurs les plus influents sur les six types de bavures

Type et localisation des bavures	**Facteurs testés**				
	A Vitesse de coupe	**B** Vitesse d'avance	**C** Profondeur de coupe	**D** Matériau de la pièce	**E** Revêtement de l'outil
SC Bavures de sortie	2	4*	1	5*	3
EC Bavures d'entrée	4*	3	5*	1	2
ED Bavures d'entrée latérales	4*	2	3	1	5*
SG Bavures de sortie latérales	5*	3*	2	1	4*
G-sup Bavures supérieures	2	1	3*	5*	4*
D-sup Bavures supérieures	3	4*	2	5*	1
η_s Indice d'occupation des bavures	2	5	3	4	1
Autres facteurs					
F_c Force de coupe	5	1	2	3	4
Ra Fini de surface	3*	1	5*	4*	2

(*) indique que les facteurs sont statistiquement non influents à l'intervalle de confiance de 95%.

4.3.3 Sommaire des résultats des autres types de bavures

Les divers graphiques de l'analyse statistique des résultats pour les autres types de bavures observées sont présentés aux annexes (III, IV …X).

Bavures d'entrée EC (Annexe III)

Le type de matériau, les paramètres de l'outil, puis la vitesse d'avance sont les facteurs les plus importants influençant la formation des bavures d'entrée EC. L'alliage d'aluminium Al 2024 - T351 génère moins de bavures d'entrées EC que les deux autres matériaux. Le premier outil à revêtement TiCN génère moins de bavures d'entrée EC que les deux autres outils. L'augmentation de la vitesse d'avance f_z de 0,01 à 0,055 mm / dent entraîne une diminution des bavures d'entrée EC, mais elles commencent à augmenter à partir de 0,055 mm / dent. La vitesse de coupe V_c et la profondeur de coupe P montrent une petite influence sur les bavures d'entrée EC. En augmentant la vitesse de coupe V_c de 300 à 1200 m / min, les bavures d'entrée EC diminuent, et l'augmentation de la profondeur de coupe P de 1 à 2 mm entraîne une augmentation des bavures d'entrée EC.

Bavures de sortie SC (Annexe IV)

La profondeur de coupe P, puis la vitesse de coupe V_c sont les paramètres les plus importants influençant les bavures de sortie SC. L'augmentation de la profondeur de coupe P de 1 à 2 mm diminue les bavures de sortie SC; l'augmentation de la vitesse de coupe V_c de 300 à 750 m / min augmente les bavures de sortie SC, puis diminue de 750 m / min à 1200 m / min. Les paramètres d'outil, la vitesse d'avance, ensuite le matériau de la pièce ont une petite influence sur les bavures de sortie SC; le premier outil de revêtement TiCN produit moins de bavures de sortie SC que les deux autres outils. Augmenter la vitesse d'avance f_z de 0,01 à 0,1 mm / dent diminue les bavures de sortie SC, et l'alliage d'aluminium Al 7075 - T6 génère moins de bavures de sortie SC que les deux autres matériaux.

Bavures de sortie latérale SG (Annexe V)

Le matériau de la pièce, puis la profondeur de coupe P constituent les deux plus importants paramètres influençant les bavures de sortie latérale SG. L'alliage d'aluminium Al 7075 - T6 génère moins de bavures SG que les deux autres matériaux. L'augmentation de la profondeur

de coupe P augmente les bavures SG. La vitesse d'avance F_z, les paramètres d'outil et la vitesse de coupe V_c ont moins d'influence sur les bavures de sortie latérale SG. Augmenter la vitesse d'avance f_z de 0,01 à 0,055 mm / dent diminue les bavures SG, puis commence à augmenter à partir de 0,055 mm / dent. Le deuxième outil de revêtement TiAlN produit moins de bavures SG que les deux autres outils. L'augmentation de la vitesse de coupe V_c augmente les bavures SG.

Bavures supérieures G-sup (Annexe VI)

La vitesse d'avance f_z, puis la vitesse de coupe V_c sont les deux principaux paramètres influençant les bavures supérieures G-sup. Augmenter la vitesse d'avance f_z diminue les bavures supérieures G-sup. Augmenter la vitesse de coupe V_c de 300 à 750 m / min augmente les bavures G-sup, puis commence à diminuer à partir de 750 m / min. La profondeur de coupe P, les paramètres d'outil, puis le matériau de la pièce ont moins d'influence sur les bavures supérieures G-sup. L'augmentation de la profondeur de coupe P augmente les bavures supérieures G-sup. Le deuxième outil de revêtement TiAlN produit moins de bavures supérieures G-Sup que les deux autres outils. L'alliage d'aluminium Al 2024 - T351 génère moins de bavures supérieures G-Sup que les deux autres matériaux.

Bavures supérieures D-sup (Annexe VII)

Les paramètres d'outil, la profondeur de coupe P, puis la vitesse de coupe V_c sont les principaux facteurs influençant les bavures supérieures D-sup. Le deuxième outil de revêtement TiAlN génère moins de bavures supérieures D-sup que les deux autres outils. L'augmentation de la profondeur de coupe P diminue les bavures supérieures D-sup, et l'augmentation de la vitesse de coupe V_c de 300 à 750 m / min diminue légèrement les bavures supérieures D-sup, puis commence à augmenter à partir de 750 m / min. La vitesse d'avance f_z et le matériau de la pièce ont moins d'influence sur les bavures supérieures D-sup. L'augmentation de la vitesse d'avance f_z de 0,01 à 0,055 mm / dent augmente les bavures supérieures D-sup, mais commence à diminuer à partir de 0,055 mm / dent. L'alliage

d'aluminium Al 2024 - T351 génère moins de bavures supérieures D-sup que les deux autres matériaux.

La comparaison en terme de hauteur par type de bavures montre que les bavures supérieures G-sup et les bavures de sortie latérales SG sont les plus hautes bavures formées au bord de la pièce, tandis que les plus petites bavures observées étaient les bavures d'entrée EC et ED. Pour les deux autres bavures restantes: les bavures de sortie SC et les bavures supérieures D-sup, elles sont considérées comme des bavures de taille intermédiaires.

Dans cette section, nous avons déterminé les principaux facteurs influençant séparément chaque type de bavure. Quoique, la tendance globale des bavures sur toute la pièce en fonction de la variation de chaque facteur peut être évaluée comme suit:
On remarque que la majorité des bavures diminuent à la diminution de la vitesse de coupe de 1200 à 300 m / min, à l'augmentation de l'avance par dent de 0.01 à 0.1 mm / dent et à la diminution de la profondeur de coupe de 1 à 2 mm. En ce qui concerne le matériau de la pièce, il est clair que l'alliage d'aluminium Al 7075 T6 génère moins de bavures que les deux autres matériaux, suivi de l'alliage Al 2024 T35, puis de l'alliage Al 6061 T6. Pour l'outillage utilisé, l'outil 1 de revêtement TiCN génère moins de bavures que les deux autres outils, suivi de l'outil 3 de revêtement TiCN + Al_2O_3 + TiN, puis de l'outil 2 de revêtement TiAlN.

4.3.4 Autres facteurs

Indice d'occupation des bavures ηs (Annexe X)

L'analyse de Pareto montre que l'indice d'occupation des bavures η_s est fortement influencé par les paramètres d'outil, suivi de la vitesse de coupe V_c, la profondeur de coupe P, le matériau de la pièce, et enfin la vitesse d'avance f_z. L'indice d'occupation des bavures η_s peut être minimisé par l'utilisation du premier outil de revêtement TiCN et de rayon d'arête r = 0.5mm, combiné avec les grandes vitesses de coupe, faibles profondeurs de coupe et

faibles vitesses d'avance. L'alliage d'aluminium 2024 - T351 génère les valeurs minimales de η_s, suivit de Al 7075- T6.

Fini de surface (Annexe VIII)

La rugosité moyenne arithmétique Ra obtenue est principalement influencée par la vitesse d'avance f_z et les paramètres d'outil. Comme prévu, Ra augmente lorsque la vitesse d'avance f_z augmente. Le deuxième outil de revêtement TiAlN et de rayon d'arête de 0,83 mm produit le meilleur état de surface suivi du premier outil de revêtement TiCN et de rayon d'arête de 0,5 mm. La vitesse de coupe V_c, le matériau de la pièce puis la profondeur de coupe P ont peu d'influence sur la rugosité Ra. Le meilleur état de surface a été obtenu sur l'alliage d'aluminium Al 7075-T6 suivi par Al 6061-T6, et enfin Al 2024-T351. Nous avons remarqué qu'il y a une forte interaction entre la vitesse d'avance f_z et le matériau de la pièce, mais une faible interaction entre la vitesse de coupe V_c et la profondeur de coupe p. Pour plus de détails concernant le fini de surface engendré pendant les expériences, on peut se référer au mémoire de maîtrise de Kamguem (2010).

La réduction de la taille des bavures et la génération d'un meilleur fini de surface sont deux besoins importants dans l'industrie. Il est souvent difficile de trouver un compromis entre ces deux besoins, car si on se concentre sur la limitation des bavures pendant l'usinage, on risque de créer une qualité de surface médiocre. À travers ce volet, nous avons remarqué que le compromis entre la prévention des bavures et la génération d'un bon état de surface peut se faire par l'utilisation de vitesses d'avance intermédiaires (f_z autour de 0.055 mm/ dent), et à un degré moindre : l'augmentation du rayon de l'arête de l'outil.

Forces de coupe (Annexe IX)

Le paramètre le plus important influençant la force de coupe F_c pendant l'usinage est la vitesse d'avance f_z, suivi par la profondeur de coupe P, le matériau de la pièce, les paramètres d'outil, et enfin la vitesse de coupe V_c. Comme prévu, la force de coupe F_c augmente lorsque

la vitesse d'avance f_z et la profondeur de coupe P augmentent. Ces deux paramètres définissent la section du copeau et gouvernent les efforts de coupe. L'usinage de l'alliage d'aluminium Al 6061-T6 qui est le matériau le moins dur des trois génère moins d'efforts comparativement aux deux autres matériaux, Al 2024 T-351 génère un peu plus d'efforts de coupe en comparaison avec l'alliage Al 7075-T6 qui est plus dur. L'outil 2 (revêtement TiAlN et de rayon d'arête d'outil r = 0,83 mm) génère moins d'efforts comparativement aux deux autres outils, cette variation dans la force de coupe peut être expliquée par la différence de rayon d'arête de l'outil. La vitesse de coupe a peu d'influence sur la force de coupe générée.

4.3.5 Paramètres d'outil et usure

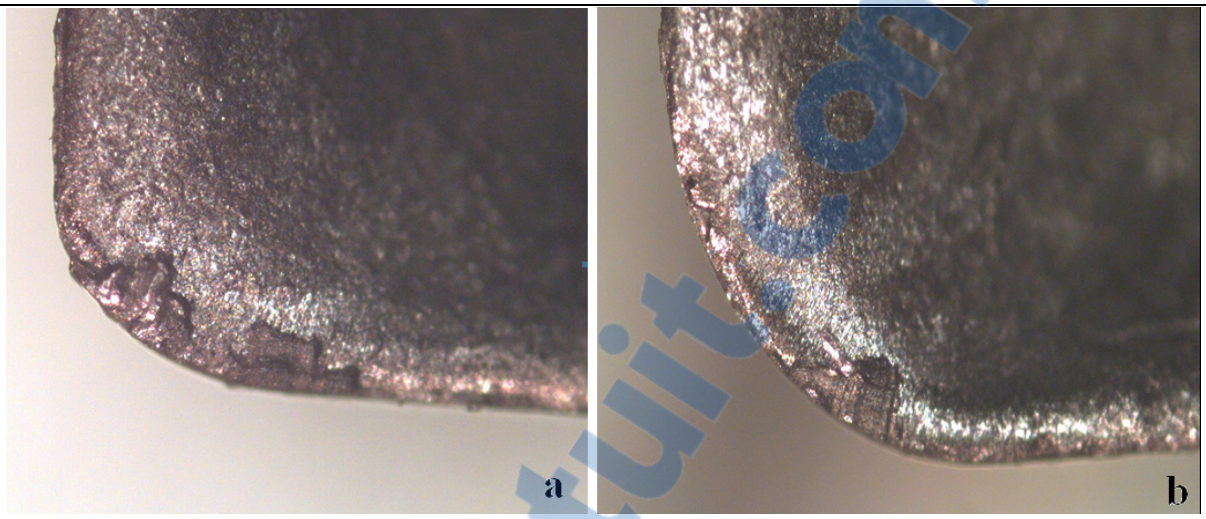
L'outil 1 de revêtement TiCN et l'outil 3 de revêtement TiCN+Al_2O_3+TiN possèdent la même géométrie, en particulier le rayon de l'arête de l'outil (r = 0,5 mm). Mais comme mentionné précédemment, l'outil 1 produit moins de bavures que l'outil 3. L'outil 2 de revêtement TiAlN génère généralement plus de bavures que les deux autres outils, cela pourrait être dû à son large rayon d'arête (r = 0.83mm). La formation d'arête rapportée couramment rencontrée dans l'usinage des alliages d'aluminium a été observée sur les outils. L'arête des outils était fréquemment recouverte de matériau usiné (voir illustration à annexe XI). À la longue, l'excès d'accumulation du matériau sur l'arête de l'outil emprisonne aussi du copeau sur le coté latéral de l'arête, jusqu'à saturation. La cause principale de cette formation est probablement due à la basse température de fusion du matériau de base la pièce. Par ailleurs, cette accumulation de matériau a été particulièrement observée pendant l'usinage à faible vitesse de coupe (300 m/min). Deux autres facteurs importants peuvent être liés à ce phénomène: l'usinage à sec et les paramètres de l'outil (revêtement et géométrie, en particulier l'angle de coupe). Le phénomène d'arête rapportée conduit à une augmentation du rayon de l'arête de l'outil pendant l'usinage. Par conséquent, une modification de la qualité de surface usinée, et amplification de la formation des bavures.

Usure de l'outil

Après usinage de 18 pièces avec différentes conditions de coupe, l'usure de l'outil a été observée sur toutes les pastilles, en particulier pendant l'usinage des dernières pièces (figure 4.10 a, b et c). L'endommagement d'outil le plus important a été observé sur l'outil 3 de revêtement TiCN + Al_20_3 + TiN. L'outil 2 de revêtement TiAlN a montré une meilleure résistance à l'usure comparativement aux deux autres outils. Le type d'usure observé sur les trois outils est l'usure en forme de cratère de la face de coupe.

L'usure en cratère augmente la température pendant l'usinage, la friction entre l'outil et le copeau, l'angle de coupe, et peut aussi diminuer les efforts de coupe. Nous avons remarqué que pendant l'usinage des dernières pièces, c'est à dire juste avant le changement d'outil où l'usure est assez prononcée, la qualité de surface produite est moins bonne que lorsque l'outil est neuf, et la taille des bavures est également augmentée. Par conséquent, le contrôle de l'usure reste très important si on veut produire des pièces de bonne qualité.

Dans notre cas, la méthode la plus connue pour réduire l'usure en forme de cratère est d'augmenter la résistance à l'usure de l'outil. L'application de la lubrification est aussi valable, mais elle présente beaucoup d'inconvénients associés à l'environnement et au coût d'usinage.



(a) Usure de l'outil observée sur le revêtement TiCN

(b) Usure de l'outil observée sur le revêtement TiAlN

(c) Usure de l'outil observée sur le revêtement TiCN+ $Al_2 0_3$+ TiN

Figure 4.10 Usure des outils observée après usinage de 18 pièces.

4.4 Prédiction des bavures

Après analyse de Pareto, identification des facteurs les plus influents et leurs interactions, puis l'analyse des variances, des modèles empiriques de prédiction des bavures ont été

Rapport-Gratuit.com

adoptés et utilisés pour dresser des surfaces de réponse (figure 4.11). Les modèles retenus pour ces graphiques sont ceux des statistiques R-carré indiquant que lorsque le modèle est intégré, il peut expliquer plus de 80% de la variabilité de R et de R-carré ajustées; plus adaptée pour comparer des modèles avec différents nombres de variables indépendantes également près de 80%.

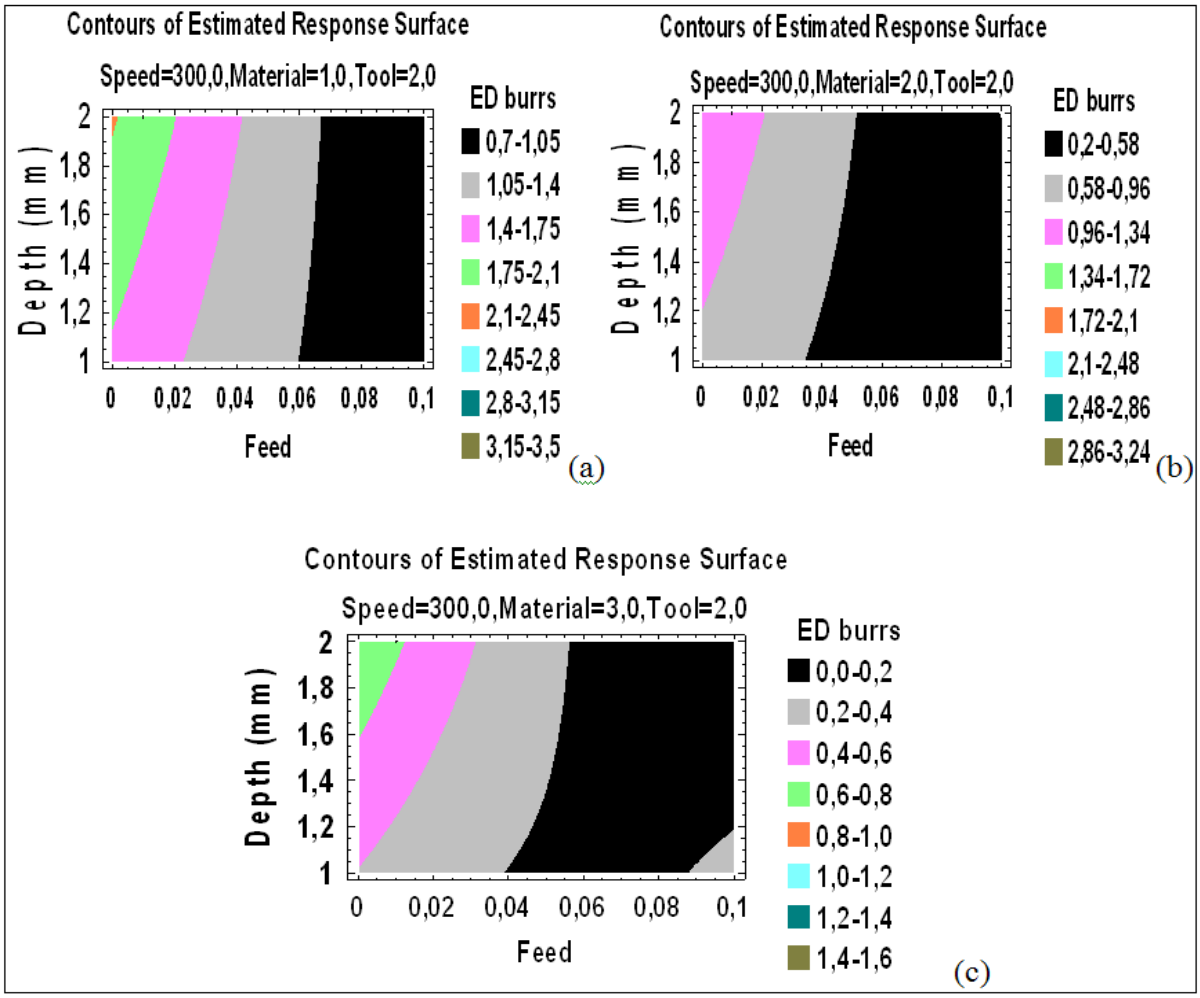


Figure 4.11 Surfaces de réponse pour prédiction des bavures d'entrée latérales ED.
(Outil -2: TiCN, V_c : 300 m/min, (a) Al 6061-T6, (b) Al 2024-T351 et (c) Al 7075-T6)

Ces graphiques peuvent permettre l'identification des fenêtres opératoires des paramètres d'usinage optimaux pouvant réduire les diverses bavures générées, ou bien aider à choisir les bonnes conditions de coupe permettant de générer des bavures de taille acceptable.

La figure 4.11 (a, b et c) montre les surfaces de réponse des bavures d'entrée latérales ED pour chacun des matériaux de la pièce testés. L'utilisation des vitesses d'avance élevées (supérieur à 0,05 mm) est censée produire de petites bavures d'entrée sur chacun des trois alliages d'aluminium (Al 6061-T6, Al 2024-T351 et Al 7075-T6), ceci indépendamment de la profondeur de coupe utilisée, pourvu qu'elle soit comprise entre 1 et 2 mm.

La figure 4.12 (a, b, c, d, e et f) présente la prédiction des bavures d'entrée EC en fonction de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe pour les trois alliages d'aluminium testés à l'aide des outils de revêtement TiCN et multi - couche TiCN-Al_2O_3-TiN. Les hauteurs maximales des bavures d'entrée EC comprises entre 0,05 mm et 0.1 mm peuvent aisément être obtenues sur les alliages d'aluminium Al 2024-T351 et Al 7075-T6 (figure 4.12b, c), en particulier à des valeurs moyennes et élevées de la vitesse d'avance. Tandis que dans le cas des alliages d'aluminium Al 6061-T6, qui sont moins dur; de telles petites tailles des bavures ne peuvent être obtenues (figure 4.12a). En effet, la hauteur minimale des bavures d'entrée EC prédite pour cet alliage Al 6061-T6 est d'environ 0.15 à 0.17 mm, et peut être obtenue pendant l'usinage à grande vitesse de coupe et à des vitesses d'avance modérées à élevées. Changer le premier outil de coupe de revêtement TiCN par le troisième outil de revêtement TiCN-Al_2O_3-TiN peut donner plus de chance d'obtenir de petites bavures sur l'alliage d'aluminium Al 2024 T351 et Al 7075 T6 (comparaison des figures 4.12e et 4.12f par rapport aux figures 4.12b et 4.12c).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

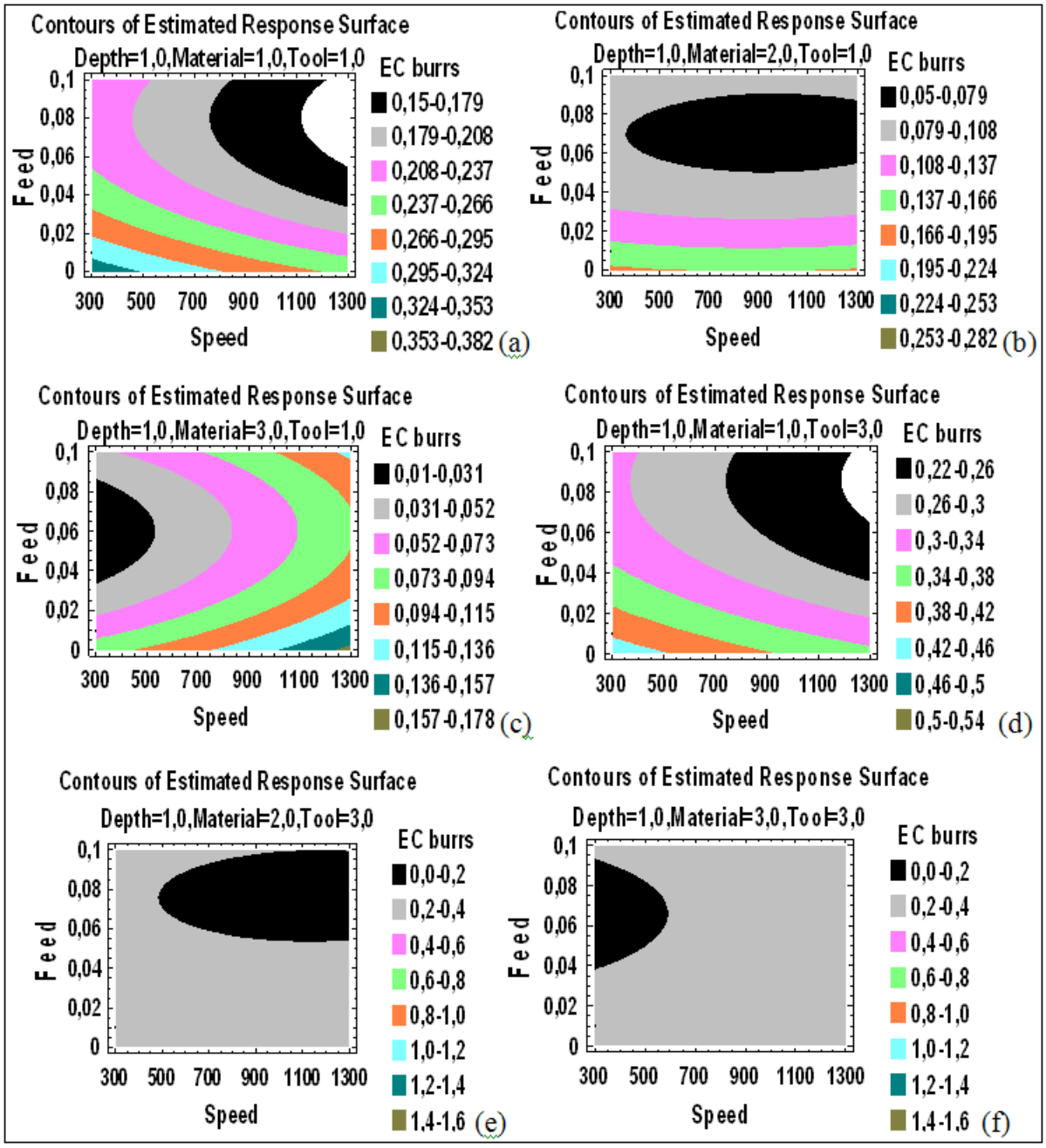


Figure 4.12 Surfaces de réponse pour prédiction des bavures d'entrée EC.

(a) matériau 6061-T6, revêtement TiCN, (b) matériau 2024-T351, revêtement TiCN.
(c) matériau 7075-T6, revêtement TiCN, (d) matériau 6061-T6, revêtement multi couches.
(e) 2024-T351, revêtement multi couches, (f) 7075-T6, revêtement multi couches.

La figure 4.13 (a, b, et c) présente les surfaces de réponse des bavures de sortie SC pour l'alliage d'aluminium Al 7075-T6, usiné en utilisant une vitesse d'avance fixe de 0,1 mm/dent avec différents outils. Pour chacun des trois outils, la hauteur minimale des bavures est obtenue à une profondeur de coupe d'environs 2mm, et ceci, indépendamment de la vitesse de coupe utilisée. Cela est dû au fait que les bavures de sortie SC sont largement tributaires de la profondeur de coupe P et de la vitesse de coupe V_c. Les hauteurs maximales des bavures comprises entre 0,5 et 1,0 mm peuvent être obtenue sur l'Al 7075-T6 avec une vitesse d'avance f_z = 0,1 mm / dent, une profondeur de coupe supérieure à 1,2 mm et l'outil de revêtement TiCN (figure 4.13a). Le changement d'outil par celui de revêtement TiAlN ne permettra pas l'obtention de telles petites bavures (figure 4.13b), tandis que le changement d'outil par celui de revêtement TiCN- Al_2O_3-TiN peut donner de bien meilleurs résultats comparativement aux deux autres outils (figure 4.13c).

Les bavures de sortie latérales SG sont fortement influencées par le matériau de la pièce et la profondeur de coupe, les deux plus importants facteurs parmi les cinq facteurs testés (Tableau 4.1). La figure 4.14 (a, b et c) montre les surfaces de réponse des bavures de sortie latérales pour chacun des alliages d'aluminium testés ((a) Al 6061-T6, (b) Al 2024 T351, et (c) Al 7075-T6). Parmi ces trois alliages, l'aluminium Al 6061-T6 montre la plus grande hauteur des bavures de sortie latérales SG (figure 4.14a). Pour cet alliage, la hauteur minimale des bavures est principalement obtenue à grande profondeur de coupe et à faible vitesse d'avance. Alors que pour l'Al 2024-T351, une faible hauteur des bavures de sortie latérales SG peut être obtenue à grande profondeur de coupe et à faible vitesse d'avance, ou bien à haute vitesse d'avance et faible profondeur de coupe (figure 4.14b). Dans le cas de l'alliage Al 7075-T6, l'ampleur de la fenêtre admettant la génération de faibles bavures SG de hauteur maximale 2 mm est plus grande que celle obtenue dans le cas des deux autres alliages (Al 6061-T6 et Al 2024-T351).

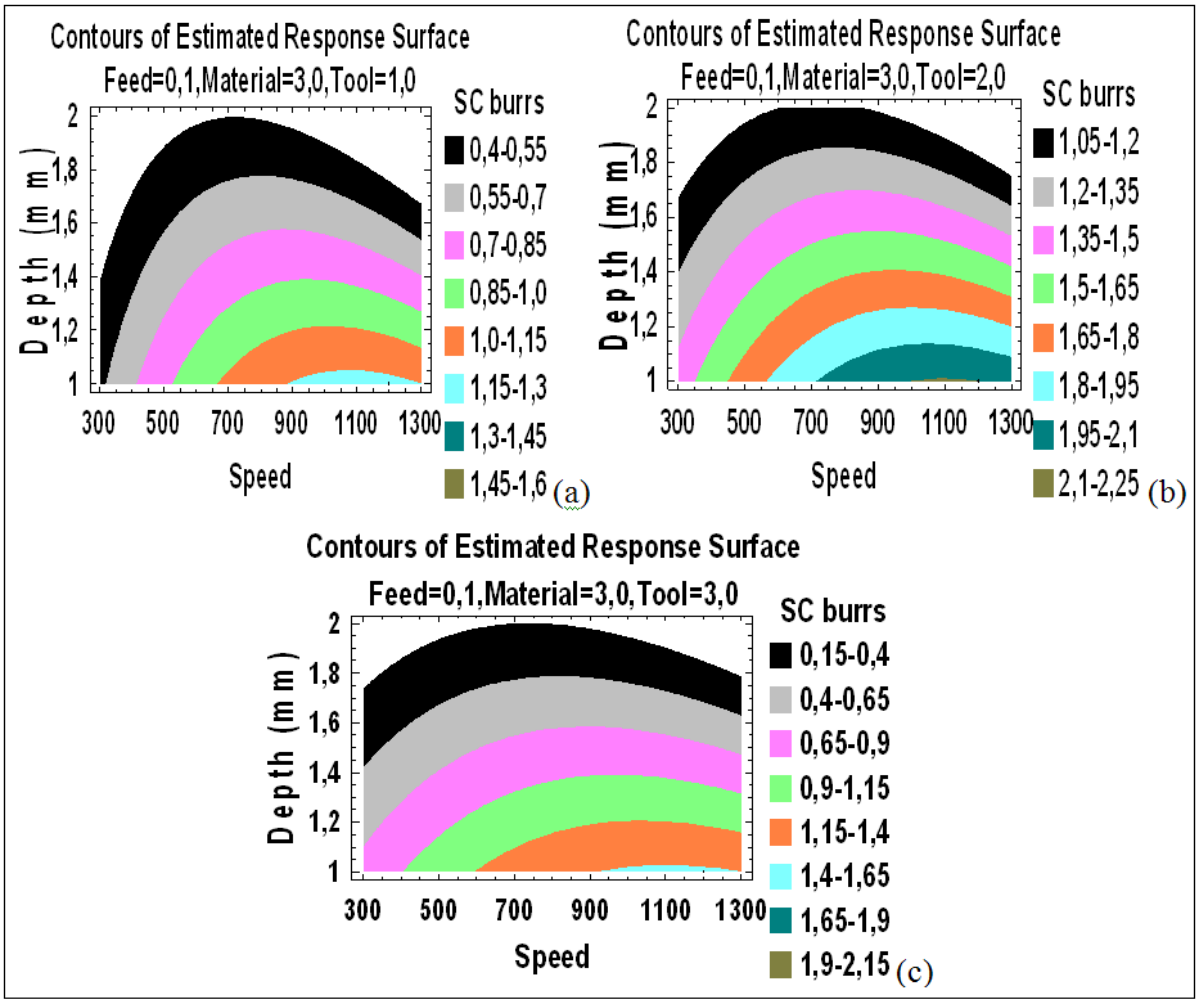


Figure 4.13 Surface de réponse pour prédiction des bavures de sortie SC.

(a) outil 1- revêtement TiCN, (b) revêtement TiAlN, (c) revêtement TiCN-Al_2O_3-TiN

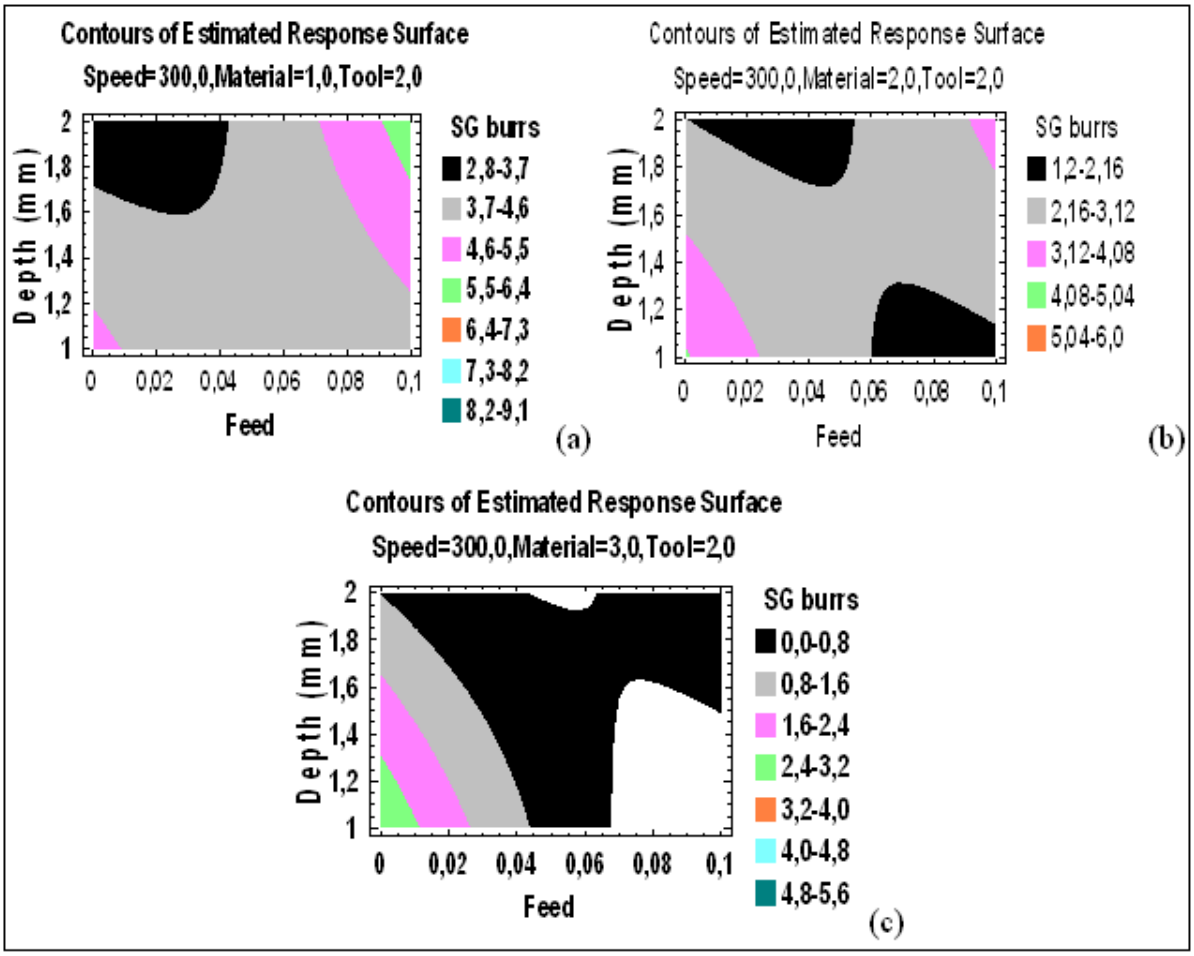


Figure 4.14 Surface de réponse pour prédiction des bavures de sortie latérale SG.
(a) Al 6061-T6, (b) Al 2024-T351 et (c) Al 7075-T6

Le reste des modèles graphiques pour la prédiction des bavures supérieures : D-sup et G-sup, sont présentés dans les annexes XII et XIII.

4.5 Régularité et uniformité des bavures

Nous définissons la **régularité des bavures** par la tendance à obtenir la même répartition des bavures le long du même bord de la pièce, simplement en répétant l'usinage avec les mêmes conditions de coupe. Nous avons observé que les bavures de sortie latérales (usinage en opposition) SG et (usinage en avalant) SD, les bavures d'entrée latérales (usinage en avalant) ED et (usinage en opposition) EG sont les bavures les moins régulières. Pour le reste

des bavures, l'aspect régularité peut être classés comme suit: les bavures les plus régulières sont les bavures d'entrée EC, suivi par les bavures supérieures G-Sup et D-sup, et enfin les bavures de sortie SC. Nous avons remarqué que la régularité des bavures de sortie SC est fortement influencée par la profondeur de coupe P.

Si nous définissons **l'uniformité des bavures** par la possibilité d'obtenir la même hauteur des bavures le long de la même arête de la pièce, ou bien moins de variations possible de la hauteur des bavures le long de la même arête de la pièce; les bavures d'entrée latérales ED et les bavures de sortie latérales SG sont les bavures les plus uniformes, suivi des bavures d'entrée EC, des bavures supérieures D-sup, des bavures de sortie SC, et enfin des bavures supérieures G-sup.

4.6 Conclusion

On ne peut pas empêcher les bavures de se produire, et ceci, dans la plupart des opérations d'usinage. Ce document a fourni des indications considérablement utiles pour permettre de réduire la formation des bavures, ainsi que de permettre d'importantes économies en évitant d'être dans des situations défavorables génératrices de bavures. Plusieurs types de bavures ont été étudiés en détail, leur mécanisme de formation et les plus importants paramètres influençant leur création. Des surfaces de réponse pour la prédiction des bavures ont été proposées afin de réduire la taille des bavures avant même l'usinage. L'aspect régularité et uniformité des bavures liées aux différents types générés, et les principaux paramètres influençant la qualité de surface ont été identifiés. L'indice d'occupation des bavures en termes de pourcentage des bavures générées occupant l'arête de la pièce a également été défini et analysée, c'est un facteur pouvant être utile pour les processus d'ébavurage tout comme les surfaces de réponse pour la prédiction des bavures.

À partir de l'étude de recherche expérimentale réalisée, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- La taille des bavures peut être réduite de manière significative simplement par la sélection des paramètres de coupe appropriés. L'usinage à grande vitesse combiné à de faibles vitesses d'avance et faible profondeur de coupe est une approche intéressante permettant de réduire la formation de certains types de bavures. L'indice d'occupation des bavures est également réduit à son plus faible niveau lorsqu'une telle combinaison est appliquée.

- L'outil 1 de revêtement TiCN montre de meilleurs résultats en termes de formation des bavures, suivi de l'outil 3 de revêtement TiCN-Al_2O_3-TiN, et puis de l'outil 2 de revêtement TiAlN.

- L'Al 7075 T6 génère moins de bavures que les deux autres matériaux car la formation des bavures est proportionnelle à la dureté du matériau.

- Les bavures d'entrée EC et les bavures de sortie SC sont gouvernées par des facteurs totalement différents et indépendants : la profondeur et la vitesse de coupe pour les bavures de sortie SC; le matériau de la pièce, l'outil et la vitesse d'avance pour les bavures d'entrée EC.

- Les bavures de sortie SC et les bavures supérieures D-sup sont régies par les mêmes facteurs (vitesse de coupe, profondeur de coupe et revêtement d'outil). Au fait, ces deux bavures sont toutes les deux des bavures de sortie, puisque les bavures SC se forment lorsque l'outil quitte la pièce. Tandis que les bavures D-sup ont lieu quand l'arête latérale de l'outil quitte la pièce après chaque portion de rotation.

- Les bavures latérales, que ce soit d'entrée ED ou de sortie SG sont régies par la ductilité du matériau, la profondeur de coupe et/ou la vitesse d'avance.

Les bavures supérieures G-Sup et D-sup dépendent principalement de la variation des conditions de coupe, de la dynamique d'évacuation du copeau, puis de la forme de l'outil et de la vibration du système.

CHAPITRE 5

ÉTUDE DE CAS EN MILIEU INDUSTRIEL

5.1 Introduction

Cette étude de cas fait partie du projet MANU 409 plan C, initié par le CRIAQ (Consortium de recherche et d'innovation en aérospatial au Québec). Elle a pour objectif d'automatiser l'ébavurage et la finition des pièces "*Automatic deburring and part finishing* ". C'est une collaboration entre plusieurs universités et partenaires industriels. Ce travail a été réalisé pour la compagnie Pratt and Whitney Canada (P&WC) en vue d'évaluer ses besoins en ébavurage et finition de pièces, puis tenter d'améliorer ses processus en mettant en œuvre de nouvelles technologies lui permettant d'être plus compétitive.

Produire des pièces de bonne qualité par l'utilisation d'outils performants a toujours été un besoin très recherché par les industriels. En effet, certaines opérations d'usinage engendrent des marques de copeau sur les surfaces déjà finies, conduisant ainsi à des réparations de pièces, et parfois même à des rejets. L'amélioration des performances de l'outillage et le contrôle de leur usure permettent non seulement d'accroître la qualité des pièces, mais aussi de générer beaucoup d'économies.

Concernant la formation des bavures, il est connu que plusieurs paramètres peuvent amplifier leur génération. Les paramètres d'outil et son usure affectent grandement leur création. Un outil tranchant produit moins de bavures qu'un outil usé. La présence de grandes bavures affecte fortement les opérations d'ébavurage. Les pièces ayant beaucoup de bavures nécessitent plus de finition; dans la plupart des cas des opérations d'ébavurage supplémentaires doivent être appliquées, ce qui augmente inévitablement le coût de fabrication ainsi que le risque d'endommagement de la pièce à cause des manipulations excessives.

Rapport-Gratuit.com

Pour des raisons de confidentialité, nous avons caché quelques données techniques dans cette section, mais ceci n'altère en aucun cas le sens et la qualité de l'étude menée.

5.2 Problèmes rencontrés et pistes de solutions

Un certain type de pièces produites chez P&WC présentent des grattures profondes menant souvent à des rejets (figure 5.1). C'est un problème très coûteux pour la compagnie. L'autre difficulté est liée au fait qu'on ne sait pas si ces grattures sont causées par l'outillage (*Tool marks*) ou bien par la mauvaise évacuation des copeaux pendant l'usinage.

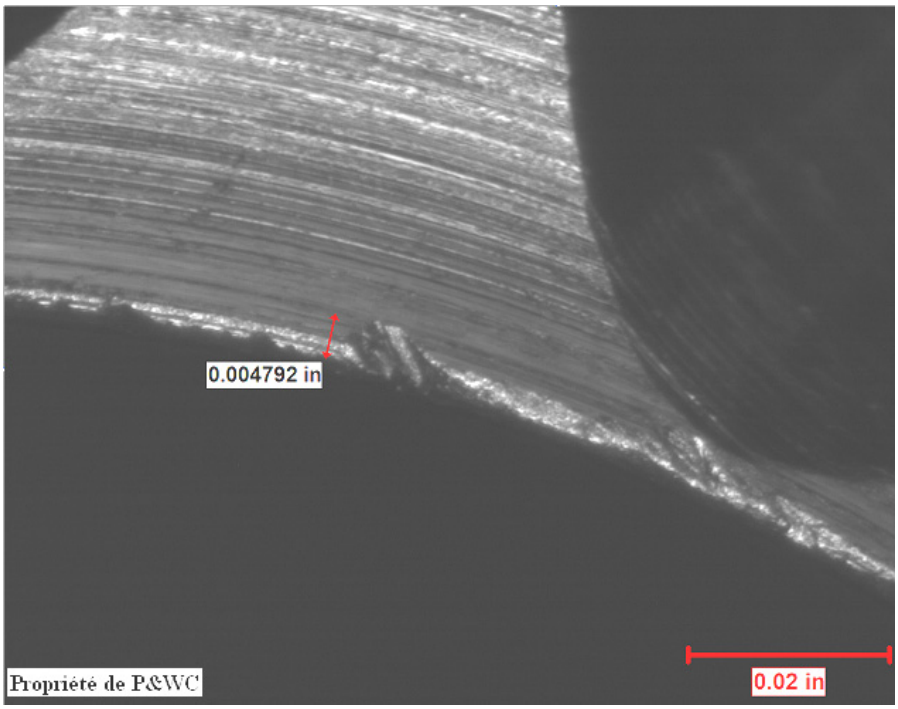


Figure 5.1 Grattures observées sur la pièce.
Pratt & Whitney Canada (2009)

Au préalable, nous devons comprendre le problème et tenter de le résoudre par la réduction ou par l'élimination de ces grattures afin de produire des pièces de meilleure qualité avec un moindre coût. L'usure des outils, les cassures d'outils pendant l'usinage et la formation des bavures représentent également d'autres problèmes importants nécessitant beaucoup d'attention.

Les grandes tendances de recherche concernant les technologies de l'usinage ce sont orientées vers l'amélioration de la précision des pièces, le fini de surface, et l'augmentation de la durée de vie des outils. Moins d'attention a été accordée à la caractérisation des copeaux. Il est connu que le type de copeau souhaité pendant l'usinage est celui pouvant être facilement évacué, et surtout moins dommageable aux surfaces finies adjacentes. De ce fait, les techniques basées sur le contrôle de la forme du copeau et de son évacuation peuvent s'avérer très intéressantes dans certaines situations, car un copeau bien dégagé engendre habituellement une meilleure qualité de pièces.

Processus de formation des copeaux

Les copeaux sont formés suite à un processus de segmentation dans la direction du plan de cisaillement. La figure 5.2 montre une micrographie prise pendant une opération de tournage brusquement interrompue. Le copeau n'est pas déformé d'une façon homogène, mais d'une manière fortement dentelée.

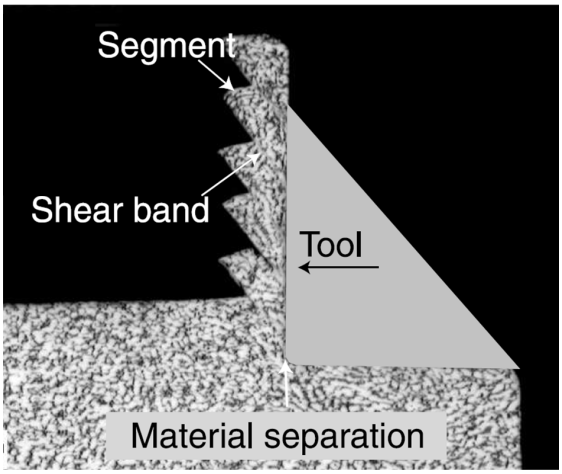


Figure 5.2 Processus de segmentation du copeau.
(Matériau : Ti6Al4V, vitesse de coupe 20 m/s, profondeur de coupe 126 µm et l'angle de coupe 0°), tirée de Baker (2003)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Selon Baker (2003), le processus de segmentation est particulièrement accentué à des vitesses de coupe élevées. En général, un copeau segmenté ne peut se produire en cas de ramollissement du matériau pendant l'usinage. Selon Shaw (2005), certains types de copeaux générés pendant l'usinage sont jugés convenables, et d'autres non convenables (voir annexe XIV) :

- copeaux convenables : ruban court, tubulaire court, hélicoïdal (rondelle et conique) court, élémentaire, en arc attaché et détaché;
- copeaux inconvenables : ruban long et enchevêtré, tubulaire long et enchevêtré, en spirale plat et conique, aiguille, hélicoïdal (rondelle et conique) long et enchevêtré.

Contrôle des copeaux

Selon Jawahir et Luttervelt (1993), le développement et l'utilisation des machines-outils à commande numérique et les cellules d'usinage automatisées ont grandement amélioré la productivité, c'est un aspect qui a considérablement affecté l'efficacité des ateliers d'usinage, ainsi que le contrôle des copeaux. Selon les auteurs, les copeaux infavorables peuvent causer:

- des blessures aux opérateurs pendant la manipulation;
- une mauvaise qualité de surface;
- des dommages pour l'outillage, la pièce et la machine.

Tous ces effets peuvent engendrer des coûts supplémentaires dus au :

- rejets des pièces;
- perte de temps d'usinage;
- retards dans les livraisons des pièces.

En ces derniers temps, l'accent a été mis sur le contrôle des copeaux dégagés pendant l'usinage, c'est une bonne raison pour justifier la tendance permettant d'automatiser l'usinage. Le besoin de recherche sur l'amélioration des méthodes de contrôle des copeaux est aussi dû aux situations spécifiques suivantes:

1- Le contrôle du copeau devient plus difficile dans les opérations portant sur:

- un gros volume de copeaux dégagé;
- une large gamme de matériaux à usiner;
- les matériaux ayant une résistance élevée ou une forte ténacité.

2- Une grande répétitivité dans les copeaux dégagés est nécessaire pour:

- la production en lots de pièces;
- la sélection automatique des outils de coupe et conditions de coupe;
- l'usinage avec un minimum de supervision humaine.

Divers techniques de contrôle des copeaux ont été élaborées et mis en œuvre. Certaines techniques ont abouti à des applications dans l'industrie. D'autres sont encore au stade de développement, ou servent comme base scientifique pour comprendre les approches expérimentales. Produire des copeaux **courts et cassants** s'avère une des meilleures façons de contrôler les copeaux. Par conséquent, génération des pièces de bonne qualité. Le frottement des copeaux sur certaines zones sensibles de la pièce peut engendrer un endommagement pendant l'évacuation du copeau (figure 5.3). Le niveau d'endommagement des zones en question est grandement influencé par la nature du copeau dégagé.

Dans les techniques de contrôle du copeau, les solutions spécifiques suivantes donnent généralement de très bons résultats :

- Les outils brise-copeaux ayant une géométrie permettant la génération de copeaux favorables. Ces outils commencent maintenant à être très utilisés dans l'industrie;
- Sélection des conditions de coupe adéquate telle que : l'augmentation de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe;
- Augmentation de la dureté du matériau de la pièce. Plus la dureté du matériau est élevée, courts et cassants sont les copeaux générés.

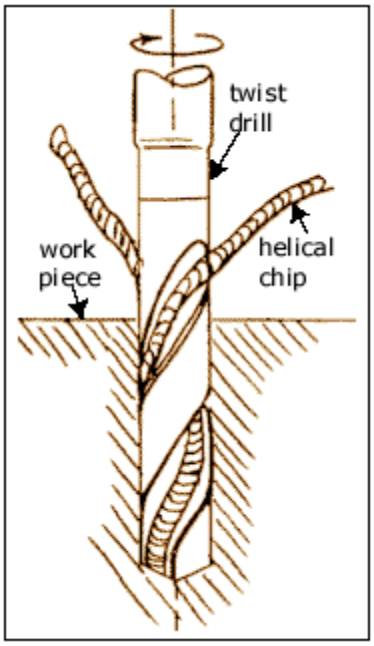


Figure 5.3 Dégagement du copeau pendant le perçage.
Tirée de www.efunda.com

Analyse de dureté de la pièce

La grande variation dans la dureté du matériau brut de la pièce constitue un important obstacle prévenant la génération de pièces de bonne qualité. Le matériau brut servant à fabriquer un certain type de pièces arrive sous forme de barres; bien qu'il subit chez le fournisseur un traitement de revenu, la mesure de sa dureté dans la section transversale montre une grande variation en allant du centre de la barre vers l'extrémité (figure 5.4).

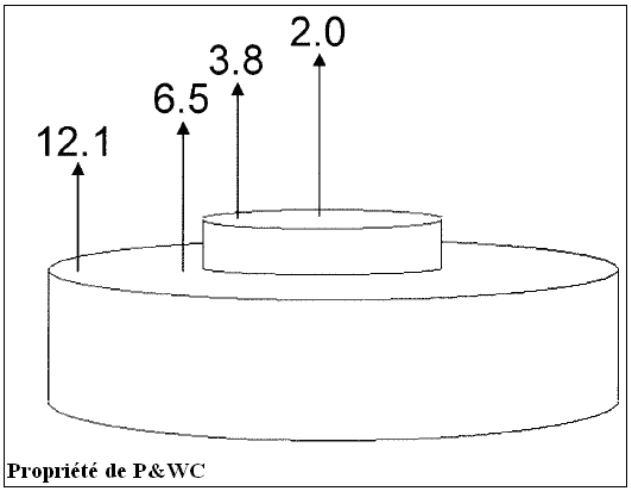


Figure 5.4 Répartition de la dureté sur une section transversale du matériau brut.
(Matériau : Acier inoxydable, dureté en HRC), Pratt & Whitney Canada (2009)

Dans certains cas, la dureté du matériau peut même varier le long de la barre du matériau, et peut aussi varier d'un lot de barres à un autre. Cette irrégularité dans la dureté du matériau engendre beaucoup de difficultés pendant l'usinage, tel que l'endommagement des outils (usure et parfois cassure). Dans la plupart des cas, les conditions de coupe doivent être modifiées pour accommoder l'usinage dur. Le nombre de pièces rejetées est accentué, la taille et la régularité des bavures sont affectées, ce qui affecte directement le processus d'ébavurage. La figure 5.5 montre un outil brisé pendant l'usinage à cause de l'irrégularité de dureté du matériau, la dureté du matériau à l'extrémité de la pièce était plus dure que la normale.

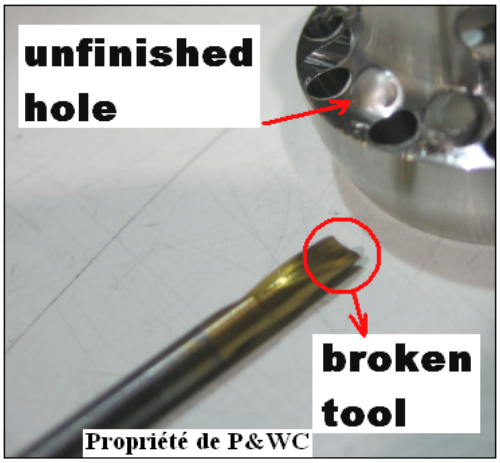


Figure 5.5 Outil brisé à cause de l'irrégularité dans la dureté du matériau.
Pratt & Whitney Canada (2009)

Les grattures enregistrées sur des surfaces finies de la pièce peuvent être dues aux frottements des copeaux, ceci devrait être vérifié par une expérimentation. Si cette hypothèse est vraie, les grattures peuvent aussi être engendrées par des copeaux durs issus d'une zone ayant la dureté élevée sur une zone ayant une dureté moins élevée. La précédente figure 5.1 montre un grand plan de la zone affectée par le problème des grattures générées pendant l'usinage. À première vue, nous soupçonnons que ces grattures sont causées par les frottements du copeau de perçage, car la zone affectée est adjacente au trou percé, mais comme mentionné plus haut, nous devons effectuer des tests pour vérifier cette hypothèse.

Usinage de l'inconel

Le problème de grattures est dans la plupart des cas enregistrés sur des pièces en Inconel. L'inconel est un matériau largement utilisé dans l'industrie aéronautique. Cependant, il est difficile à usiner; selon le rapport Nickel and Nickel Alloys (2002), l'Inconel est un alliage de Nickel qui durcit rapidement pendant l'usinage, ceci est causé par la pression qu'exerce l'outil sur la pièce et aux hautes températures atteintes pendant l'usinage. L'une des principales méthodes appliquées pour résoudre ce genre de problème est de durcir le matériau à froid avant l'usinage, ceci peut se faire par écrouissage ou par un autre procédé.

Cependant, cette approche ne peut pas être toujours applicable pour tout type de pièces. La deuxième solution pouvant être plus intéressante serait d'intervenir au niveau des paramètres de coupe pour permettre une meilleure usinabilité du matériau. Ceci peut se faire par l'utilisation d'outils tranchants ayant des angles d'attaque positifs capables de couper le matériau au lieu de le refouler. Un angle de pointe de l'outil avoisinant 135° dans le cas du perçage serait aussi préférable. La vitesse d'avance et la profondeur de coupe doivent être suffisantes pour empêcher l'effet de ponçage où l'outil ne devrait pas frotter pendant la coupe.

Usure de l'outil

Les outils les plus performants en termes d'usure sont ceux capables de produire un maximum de pièces sans être remplacés. Comme présenté dans les chapitres précédents, l'usure de l'outil est influencée par plusieurs facteurs, à savoir : les conditions de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, lubrification, etc.), les paramètres de l'outil (géométrie, matériau et revêtement), et la pièce à usiner (forme, propriétés mécaniques et chimiques). Pour satisfaire un certain rapport qualité / coût d'usinage, la plupart des industriels notamment P&WC, mettent en place un calendrier de changement d'outils afin d'ajuster la cadence des remplacements après un certain nombre bien défini de pièces usinées. Mais vu que l'usinage est plein de surprises, à la fois venant du matériau de la pièce, de l'outil et de la machine; faits en sorte que dans certains cas ces calendriers sont devancés, les opérateurs des CNC / NC jugent par eux même le moment du changement d'outil en se basant sur l'observation de l'état d'usure des outils.

Les opérations d'ébavurage et finition de surfaces ne peuvent pas réparer les grattures générées pendant l'usinage. Par conséquent, un grand nombre de pièces peut être rejeté, engendrant de grandes pertes pour la compagnie. Il serait nécessaire de résoudre ce problème à la source, c'est à dire au niveau de l'usinage. L'usure de l'outil nécessite également un meilleur contrôle pour permettre une longue vie aux outils, cela contribuera à réduire la

formation des bavures, et par voie de conséquence réduira l'effort d'ébavurage. La section suivante est consacrée à l'étude expérimentale traitant tous ces aspects.

5.3 Expérimentation en milieu industriel

5.3.1 Introduction

Ce qui a été développé précédemment montre que le problème des grattures générées pendant l'usinage devrait être résolu au niveau de l'usinage, d'abord par une confirmation que l'origine des grattures vient du dégagement du copeau, puis implémenter des techniques de contrôle de copeau permettant de créer des copeaux courts et cassants; par conséquent, moins nuisibles aux surfaces et arêtes de la pièce. L'intervention peut se faire par la modification de la géométrie de l'outil, ou alors par la variation des conditions de coupe. Le changement du matériau de la pièce où au moins ses propriétés mécaniques peuvent donner de bons résultats, mais dans notre cas, ça ne sera pas possible à cause des contraintes liées à la conception. Le contrôle de l'usure d'outil est également très important pendant l'usinage. Toute modification dans les paramètres d'usinage de l'inconel doit tenir compte de sa particularité de coupe, car c'est un matériau qui est favorable à un usinage plutôt agressif. Il est aussi utile de signaler qu'une solution apportée à ce problème pourrait être très avantageuse pour la compagnie puisqu'un grand nombre de variétés de pièces peut être touché, car les opérations d'usinage ainsi que la morphologie de certaines parties des pièces sont souvent les mêmes. En nous basant sur cette problématique, les besoins de la compagnie, ses tendances manufacturières et les attentes de ses clients, nous avons construit le plan d'expérience qui suit.

5.3.2 Approche expérimentale

L'opération d'usinage concernée par l'approche expérimentale est le perçage du trou oblique montré sur la figure 5.6. La partie sensible de la pièce où les grattures sont fréquemment enregistrées est également illustrée sur la figure. La pièce contient plusieurs trous de même diamètre effectués avec le même outil de perçage.

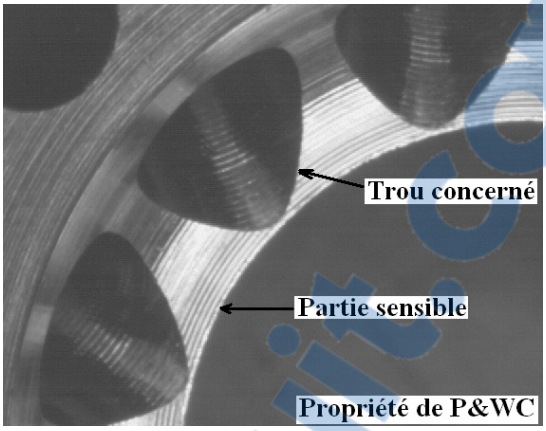


Figure 5.6 Trou de perçage concerné par l'expérience.
Pratt & Whitney Canada (2009)

Les conditions de coupe et les paramètres d'outil ont été variés selon différents niveaux comme illustré dans le tableau 5.1. La vitesse de rotation de l'outil est variée suivant deux niveaux, l'outil est varié suivant trois niveaux, et le reste des paramètres (vitesse d'avance, matériau de la pièce et lubrification) n'ont pas été variés, mais maintenus dans les mêmes conditions d'usinage standard, c'est-à-dire dans les conditions usuellement utilisées dans l'usinage. La vitesse d'avance n'a pas été augmentée, parce que le risque de casser l'outil au cours du perçage est toujours présent dû à l'important effort que pourrait générer l'usinage.

Les propriétés mécaniques du matériau sont présentées dans le tableau 5.2.

Rapport-Gratuit.com

Tableau 5.1 Paramètres de coupe

Facteurs	**Niveau des facteurs**		
	1	2	3
Vitesse de rotation (tr/min)	n1	n2	----
Avance par minute (in/min)	f_z1	----	----
Matériau de la pièce	Inconel		
Outil (Metal removal, 2 lèvres, spirale à droite)	Outil 1	Outil 2	Outil 3
	Ø1	Ø1	Ø1
	Revêtement: TiN	Revêtement: TiAlN	Revêtement: TiN
	Angle d'hélice : 22-28 ^{o}	Angle d'hélice: 22-28 ^{o}	Angle d'hélice: 12-18 ^{o}
	Angle de pointe 118 ^{o}	Angle de pointe 118 ^{o}	Angle de pointe 135 ^{o}
	Coût: 11.96$	Coût: 11.45$	Coût: 11.31$
	Dureté: 3300Hv	Dureté: 2300Hv	Dureté: 2300Hv
Lubrification	Lubrification extérieure	Lubrification extérieure	Lubrification extérieure

Tableau 5.2 Propriétés mécaniques du matériau (inconel)
Nickel and Nickel Alloys (2002)

	Résistance à la traction		Limite élastique (0.2 % écart)		Élongation en 50 mm (%)	Module d'élasticité (tension)		Dureté
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6 psi	
Inconel	930	135	517	75	42.5	207	30	190 HB

L'outil de perçage 1 illustré dans la figure 5.7 est l'outil standard habituellement utilisé pour percer le trou montré sur la figure 5.6. Son revêtement est le TiN. Par ailleurs, son angle de pointe et angle d'hélice est respectivement autour de 118° et 24°.

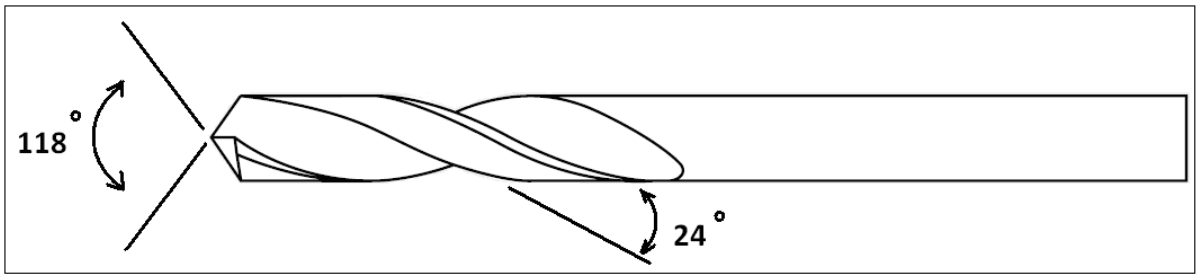


Figure 5.7 Outil standard de perçage 1 habituellement utilisé.
Adaptée de Metal removal (2008)

Lorsque le matériau de la pièce est dans de bonnes conditions, c'est-à-dire que sa dureté est conforme aux standards de qualité usuels, ou bien uniformément répartie sur la pièce; l'outil est prévu percer 12 pièces ayant plusieurs trous chaque avant d'être changé. En sa fin de vie, l'outil génère d'importantes bavures apparentes à la sortie du trou.

La géométrie de l'outil 2 est pratiquement la même que celle de l'outil 1, sauf que son revêtement est du TiAlN. Selon la figure 3.3 présentée précédemment, la résistance à la chaleur du revêtement TiAlN est plus élevée que celle du revêtement TiN, mais les performances à la friction du revêtement TiN sont meilleures que celles du revêtement TiAlN. Toutefois, la résistance à l'usure des deux revêtements est presque la même. L'introduction d'un autre revêtement d'outil dans ces expériences a pour but de déterminer quel type d'outil performera mieux lors de l'usinage de l'inconel, et quel outil aura une meilleure longue vie.

L'outil 3 est celui dont la géométrie a été modifiée (figure 5.8). La pointe de l'outil et l'angle d'hélice sont autour de 135° et 17° respectivement, le revêtement est resté le même, c'est à dire le TiN.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

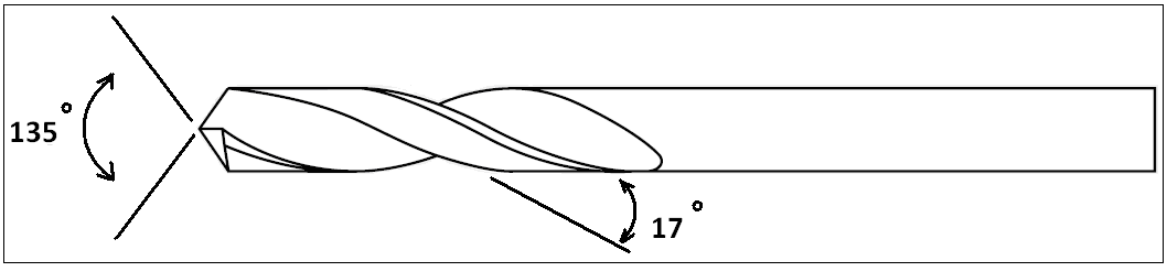


Figure 5.8 Outil 3 géométriquement modifié.

Adaptée de Metal removal (2008)

Le prix d'achat des différents outils est approximativement le même. 11,31 $/chaque incluant les taxes est le prix de l'outil géométriquement modifié. Cet outil est légèrement moins cher que les deux autres outils.

La mesure de la taille des grattures et celle des bavures est effectuée sur un microscope optique ***Leica***, disponible au niveau du laboratoire d'inspection de P & WC (figure 5.9).

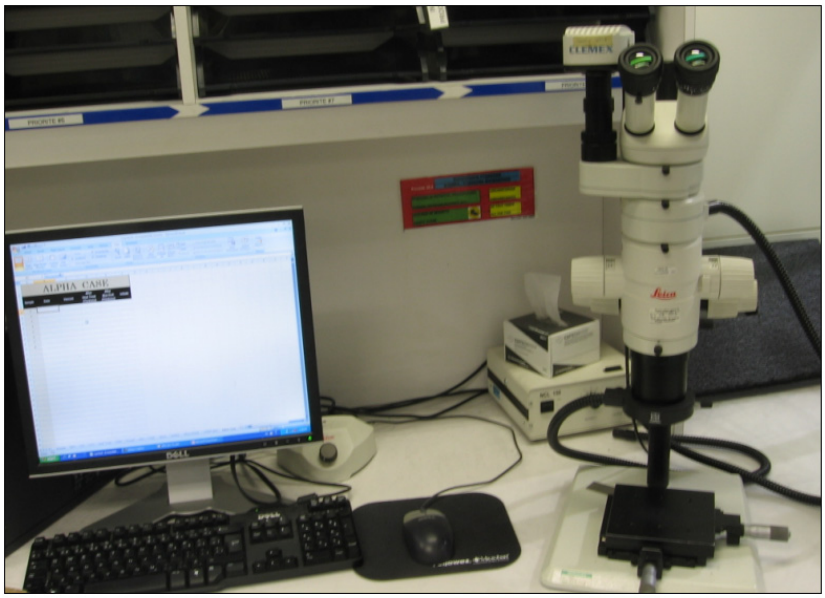


Figure 5.9 Microscope optique utilisé pendant les mesures.

Pratt & Whitney Canada (2009)

Le microscope est relié à un ordinateur muni d'un système d'acquisition ***Climex Captiva V 5.0***. Le système peut mesurer les caractéristiques des grattures et bavures avec un grossissement de 70 X. Il peut aussi prendre des photos, et stocker des images. Les tests se sont déroulés suivant l'ordre indiqué dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 Séquences des essais

Essai	**Outil**	**Nombre de pièces**	**Conditions de coupe**
1	Outil 1	01	Vitesse n1; avance f_z1
2	Outil 1	01	Vitesse n1; avance f_z1
3	Outil 2	01	Vitesse n1; avance f_z1
4	Outil 2	01	Vitesse n2; avance f_z1
5	Outil 3	03	Vitesse n1; avance f_z1

Les cinq différents essais de perçage ont été réalisés sur des pièces de production. Les essais réalisés sont censés couvrir les divers thèmes de recherche mentionnés précédemment : les grattures, l'usure de l'outil, la rupture des outils et aussi la formation des bavures. L'outil 3 a été testé sur plus d'une pièce, car il a montré pendant l'usinage une meilleure performance comparativement aux deux autres outils.

5.3.3 Résultats et discussions

Les expériences menées nous ont permis d'observer qu'en termes d'usure et cassure d'outils, le perçage des trous à entrée oblique et le perçage des trous à entrée droite ne sont pas pareils. Les trous à entrée oblique sont plus problématiques, car ils affectent négativement l'outillage, ceci même si le perçage est réalisé sur une même pièce avec les mêmes conditions de coupe. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que pendant le perçage oblique, l'outil pénètre diagonalement la surface de la pièce représentant une pénétration non équilibrée, et avec chocs. Pendant le début du perçage, une grande charge est également

concentrée sur une seule lèvre de l'outil, ce qui augmente son usure et aussi le risque de cassure.

Cassure des outils

Le matériau brut (figure 5.10) sur lequel les expériences ont été réalisées était très difficile à usiner, car l'inconel était très dur. Comme mentionné précédemment la variation de dureté du matériau brut fourni par les vendeurs de métaux était très prononcée, ce qui a engendré beaucoup de problèmes lors de l'usinage.

Figure 5.10 Matériau brut utilisé pour l'usinage des pièces.
Pratt & Whitney Canada (2009)

Le test de dureté effectué au laboratoire d'inspection de P & WC a révélé que l'inconel brut été excessivement dur comparativement à celui habituellement reçu. La figure 5.11 montre la répartition de dureté sur la section transversale de la barre du matériau. La valeur maximale de la dureté enregistrée était plus de 35 HRC sur le côté extérieur de la barre. La valeur minimale enregistrée était de 21,5 HRC au centre de la barre.

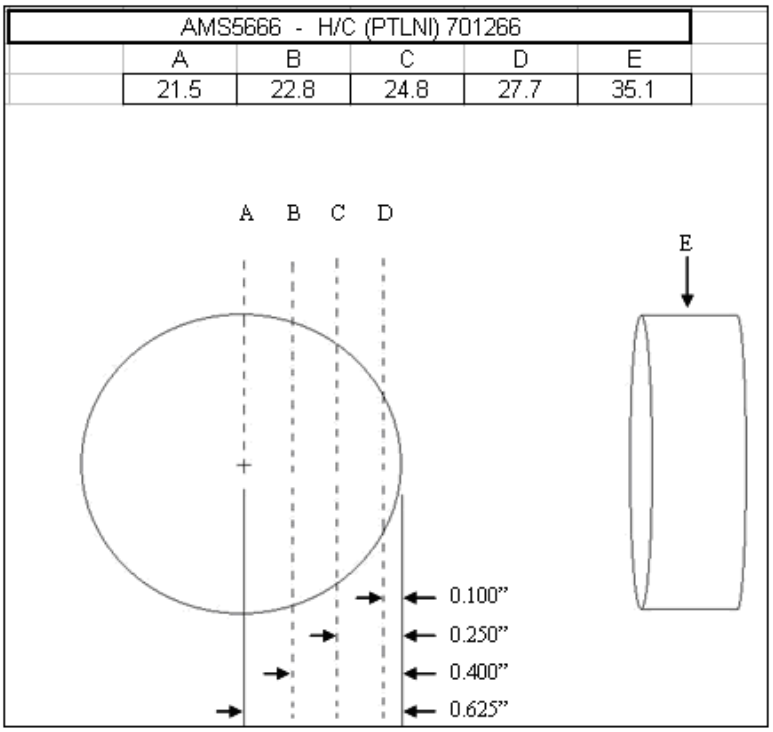


Figure 5.11 Résultat de test de dureté sur l'inconel brut.
Pratt & Whitney Canada (2009)

Dans certaines situations normales où l'usinage du matériau brut était favorable à la coupe, l'inconel avait une moyenne de dureté de l'ordre de 16 HRC, mesurée sur le côté externe ou interne de la barre, ce qui met en évidence la différence entre un matériau favorable est un matériau infavorable.

Puisqu'il s'agit de pièces de production, nous avant observé que les outils de perçage se cassaient fréquemment pendant l'usinage à cause de la mauvaise condition du matériau. Quatre outils standards (outil 1) ont été cassés pendant l'usinage d'un total de 18 pièces produites. Cette situation a évidemment engendré en parallèle un rejet de 4 pièces. Cependant, nous n'avons enregistré aucune cassure d'outil pendant le déroulement des divers essais réalisés, particulièrement pendant l'usinage de 3 pièces consécutives réalisées avec l'outil 3.

En observant les pièces précédentes rejetées suite à la rupture de l'outil 1 pendant le perçage, on remarque que les ruptures ne survenaient pas pendant l'usinage du premier trou de la pièce, mais au contraire, elles survenaient dans les trois derniers trous de la pièce (comme illustré précédemment sur la figure 5.5). Ceci nous amène à dire qu'une usure accélérée de l'outil peut être la principale cause de cette rupture, puisqu'un outil usé frotte plus qu'il n'en coupe, ce qui augmente inévitablement la température du matériau de la pièce. Par conséquent, durcissement local du matériau et augmentation excessive des efforts de coupe. Ce qui conduit à la rupture de l'outil.

Grattures

Les essais 1 et 2 effectués à l'aide de l'outil standard 1 dans le but principal est de déterminer l'influence de l'outil sur la génération des grattures, ont révélé que l'outil 1 crée systématiquement des grattures. Les images prises à l'intérieur de la pièce par le microscope (figures 5.12 et 5.13) illustrent les grattures engendrées et l'ampleur de l'endommagement causé.

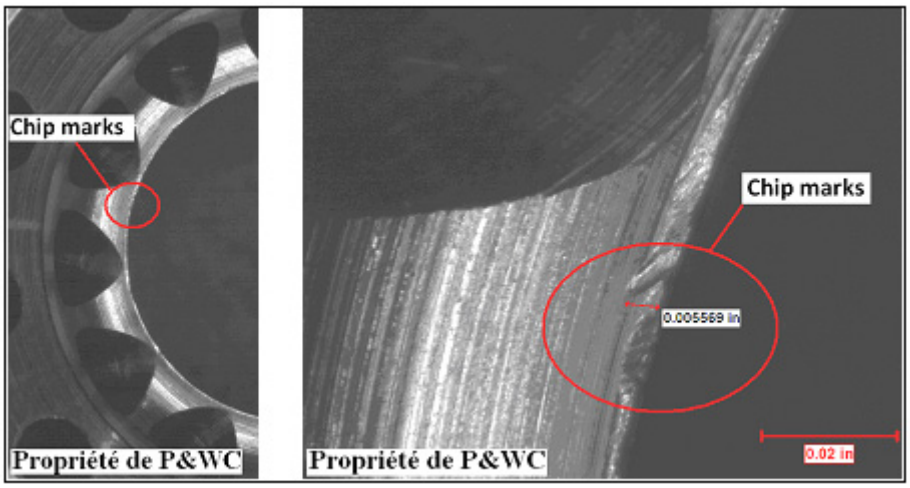


Figure 5.12 Grattures de copeaux générées par l'outil standard 1 (essai 1).
Pratt & Whitney Canada (2009)

On remarque que la position des grattures n'est ni loin ni près des trous de perçage, et l'utilisation d'un outil neuf et tranchant n'a pas empêché leurs apparitions.

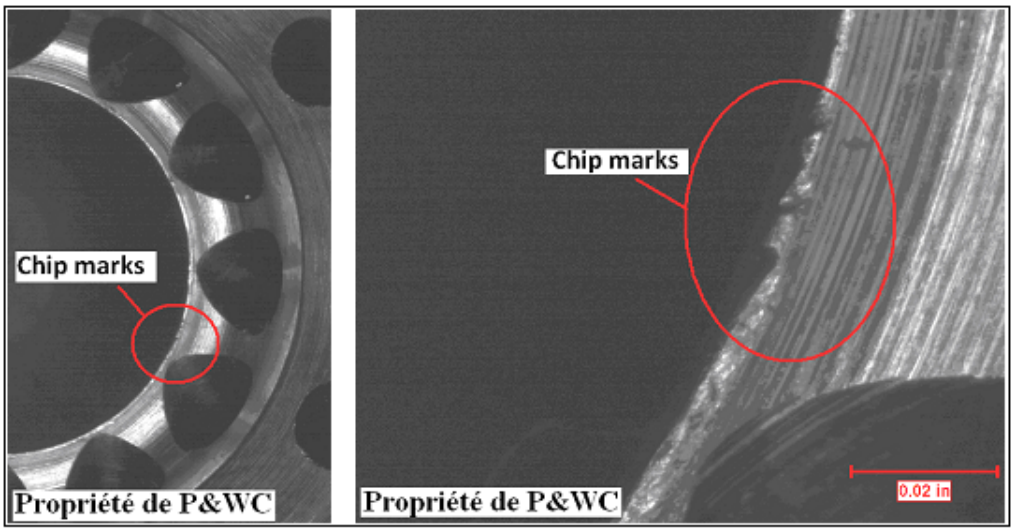


Figure 5.13 Grattures de copeaux générées par l'outil standard 1 (essai 2).
Pratt & Whitney Canada (2009)

La taille des grattures observées est très impressionnante, et nous pouvons confirmer qu'elles sont causées par les copeaux de perçage évacués du trou oblique, et non par d'autres copeaux ou outils, ceci pour les raisons suivantes :

- avant de commencer le perçage, l'arête sensible été en bon état, il n'y avait aucune trace de grattures. Ce qui veut dire que toutes les opérations précédentes n'en sont pas les causes;
- l'outil de perçage oblique ne peut pas atteindre l'arête sensible, ce qui exclut une possibilité de grattures par cet outil;
- l'opération de perçage est suivie par une légère opération d'alésage pour finir la pièce, cette opération d'alésage ne peut pas engendrer des grattures de copeaux du moment que c'est juste une mince couche usinée et avoir été dégagée pendant la coupe. La seconde raison est que : la présence des grattures de copeaux a été observée avant de commencer l'opération d'alésage, c'est-à-dire après l'opération de perçage.

Les performances de l'outil 2 à travers l'essai 3 sur une seule pièce n'ont pas été satisfaisantes, car les grattures de copeaux ont été observées sur la pièce (figure 5.14). Ces grattures de copeaux avaient pratiquement les mêmes allures que celles générées pendant les essais 1 et 2.

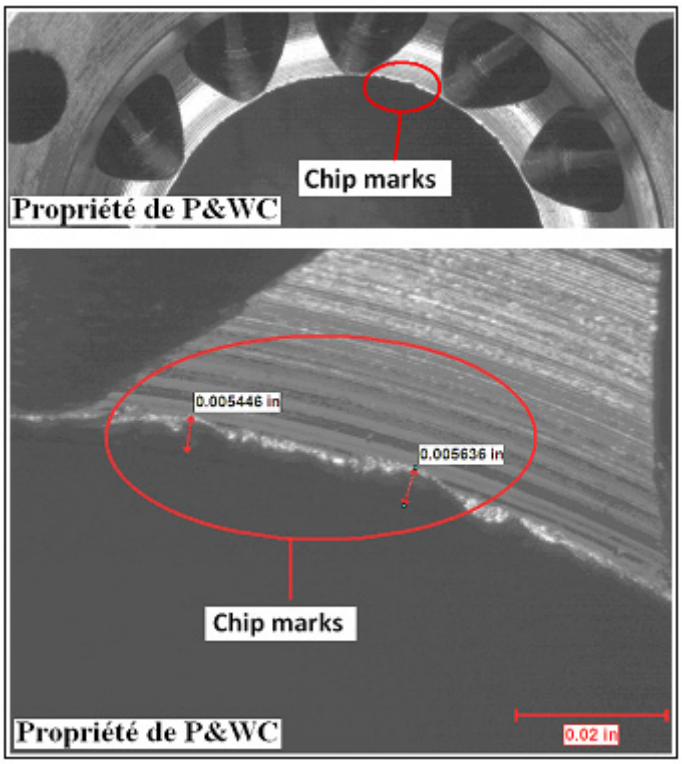


Figure 5.14 Grattures de copeaux générées par l'outil 2 (essai 3).
Pratt & Whitney Canada (2009)

Pendant l'essai 4, nous avons modifié les conditions de coupe en augmentant la vitesse de rotation de l'outil 2 de 500 tr/min, le résultat était intéressant, puisqu'il y a eu moins de grattures de copeaux comparativement aux essais précédents (figure 5.15), car le nombre des grattures et leurs profondeurs étaient moins importants.

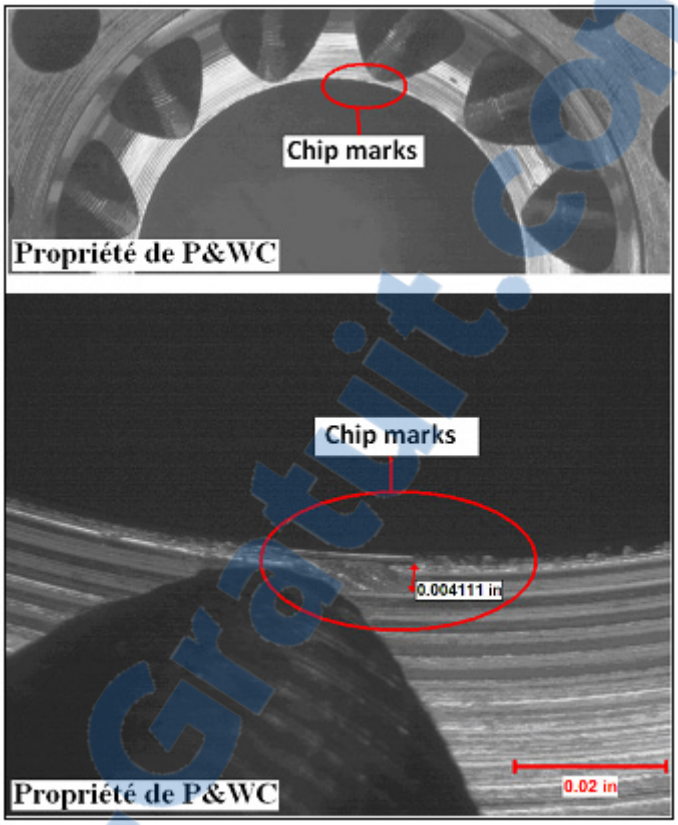


Figure 5.15 Grattures de copeaux générées par l'outil 2 à la vitesse n2 (essai 4).
Pratt & Whitney Canada (2009)

Le meilleur résultat obtenu parmi toutes les expériences menées était celui conduit par l'outil 3 à travers l'essai 5. En effet, l'outil a usiné 3 pièces de suite au lieu d'une seule pièce comme été le cas pendant les autres essais. Il n'y avait aucune trace de grattures sur les deux premières pièces, jusqu'à la troisième pièce où on a commencé à apercevoir une seule gratture engendrée par le copeau (figures 5.16, 7.17 et 5.18).

Rapport-Gratuit.com

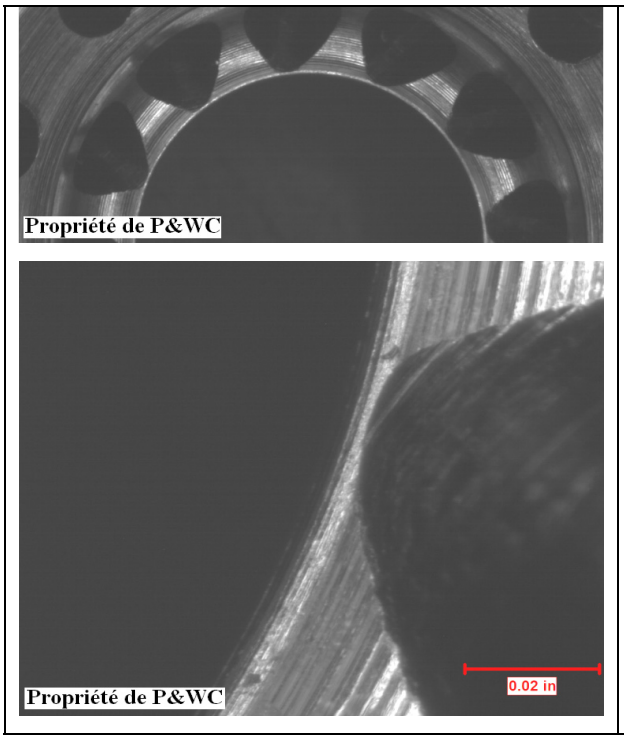


Figure 5.16 Absence de grattures de copeaux sur la première pièce.

(Outil 3; essai 5),
Pratt & Whitney Canada (2009)

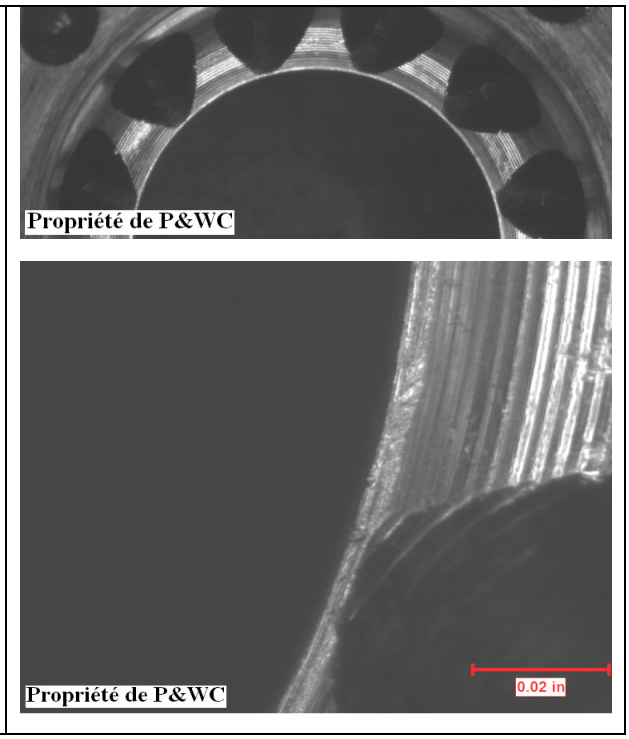


Figure 5.17 Absence de grattures de copeaux sur la deuxième pièce.

(Outil 3; essai 5),
Pratt & Whitney Canada (2009)

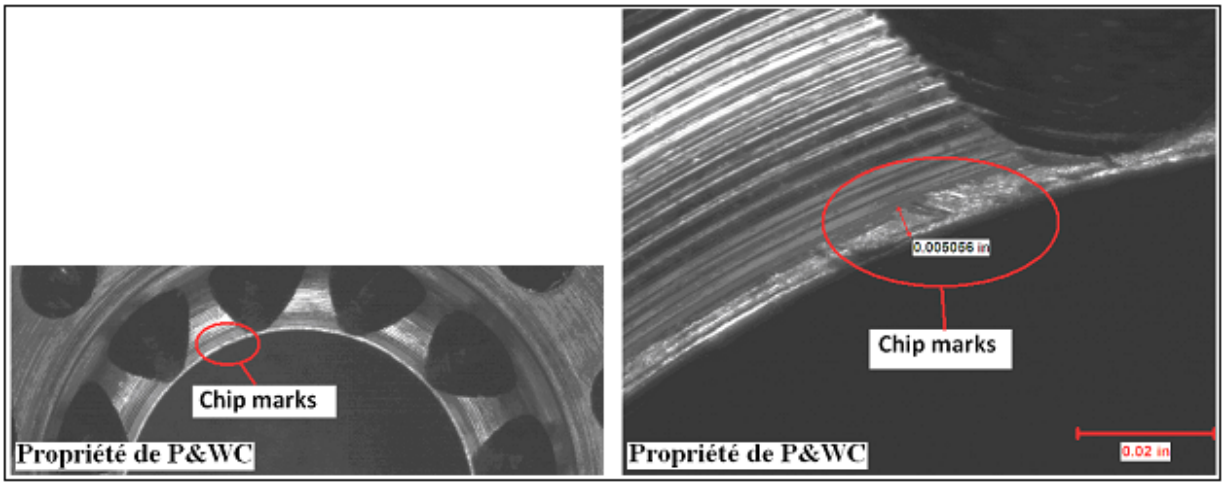


Figure 5.18 Gratture engendrée sur la troisième pièce.

(Outil 3; essai 5), Pratt & Whitney Canada (2009)

Selon les données existantes déjà au niveau de P&WC, le problème de grattures ne survient pas lorsque le matériau de la pièce et autre que l'inconel (acier inoxydable par exemple), ceci montre que le matériau de la pièce a une influence capitale sur la génération des grattures de copeaux. Ceci s'explique par le fait que le mode de segmentation et les caractéristiques des copeaux générés lors de l'usinage des matériaux autres que l'inconel sont moins nuisibles aux zones sensibles de la pièce.

Propriétés des copeaux générés

Selon la classification ISO – 3685, le type de copeaux générés pendant les essais 1, 2 et 3 est le **copeau hélicoïdal long** (figure 5.19). Toutefois, les copeaux générés pendant les essais 4 et 5 en variant les conditions de coupe et les paramètres de l'outil respectivement sont de types **copeau hélicoïdaux à tendance courte** (figure 5.20 et 5.21).

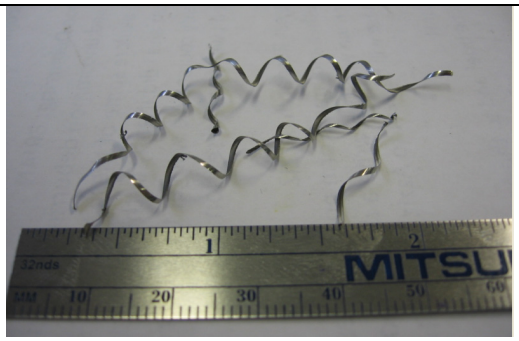


Figure 5.19 Copeau hélicoïdal long généré pendant les essais 1, 2 et 3.

Pratt & Whitney Canada (2009)

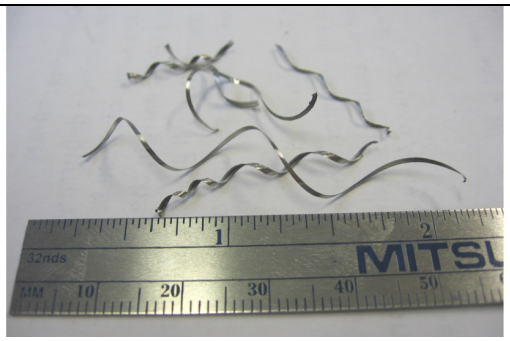


Figure 5.20 Copeau hélicoïdal à tendance courte généré pendant l'essai 4.

Pratt & Whitney Canada (2009)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

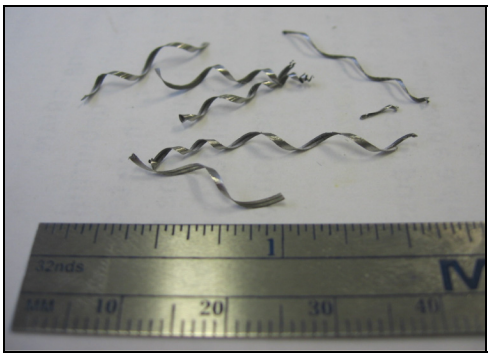


Figure 5.21 Copeau hélicoïdal à tendance courte généré pendant l'essai 5.
Pratt & Whitney Canada (2009)

Si on arrive à produire des copeaux plus courts et plus cassants que les copeaux générés pendant les expériences, le problème de grattures sera entièrement résolu. Pour se faire, il faudrait augmenter davantage la vitesse de coupe ou bien la vitesse d'avance. Mais augmenter la vitesse d'avance n'est pas très recommandé, car on risque de casser l'outil. En ce qui concerne la modification des paramètres géométriques de l'outil, l'essai 5 réalisé à l'aide de l'outil 3 a déjà fait ses preuves, aucune gratture n'a été observée dans le perçage des deux premières pièces.

Usure des outils

L'usure a été observée sur pratiquement tous les trois outils, mais le niveau d'importance varie d'un outil à un autre. L'usure en cratère et en dépouille est les deux types d'usure observée sur les divers outils. Les outils 1 et 2 ont montré les performances les plus médiocres comparativement à l'outil 3 (voir figures 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26). On se basant sur les expériences réalisées dans cette étude, on déduit que le revêtement TiAlN de l'outil 2 n'est pas recommandé pour l'usinage de l'inconel. Cependant, le revêtement TiN est recommandé.

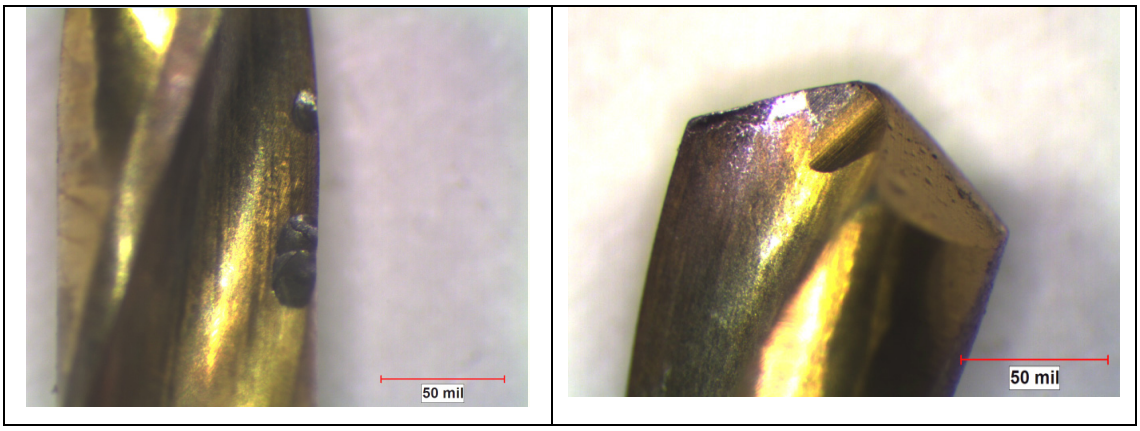


Figure 5.22 Usure constatée sur l'outil standard 1 (test 1).
Pratt & Whitney Canada (2009)

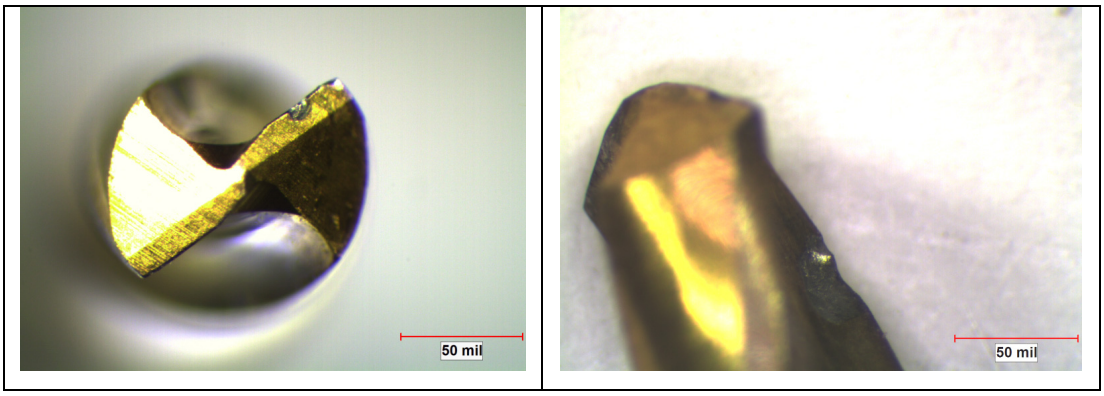


Figure 5.23 Usure constatée sur l'outil standard 1 (test 2).
Pratt & Whitney Canada (2009)

L'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil peut résoudre le problème de grattures de copeaux, mais peut aussi augmenter l'usure de l'outil (figure 5.25).

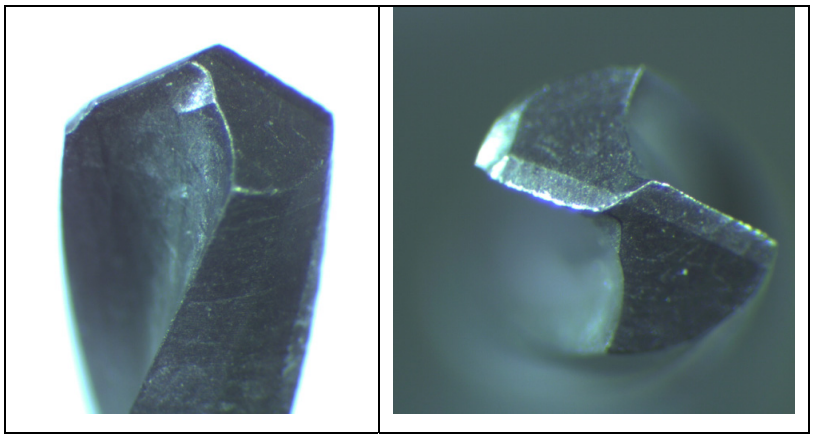


Figure 5.24 Usure constatée sur l'outil 2 (test 3).
(Vitesse de rotation n1), Pratt & Whitney Canada (2009)

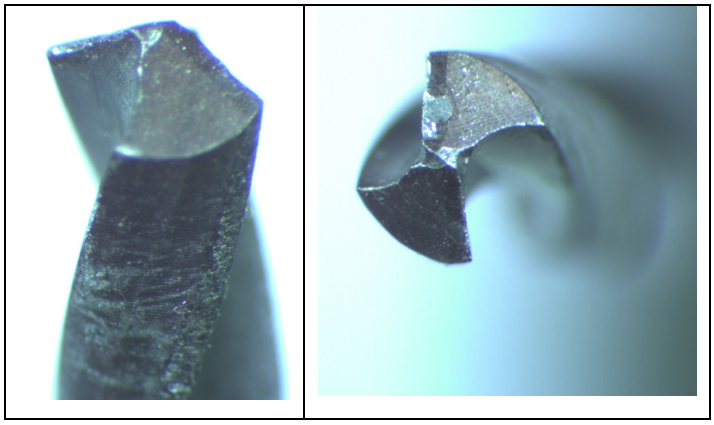


Figure 5.25 Usure constatée sur l'outil 2 (test 4).
(Vitesse de rotation augmentée à n2), Pratt & Whitney Canada (2009)

Modifier les paramètres de l'outil, en particulier l'augmentation de l'angle de pointe à 135° permet à l'outil une meilleure résistance à l'usure (figure 5.26). En modifiant sa géométrie, l'outil montre une allure plus robuste qu'un outil standard, ce qui lui permet d'affronter l'usinage avec une meilleure consistance.

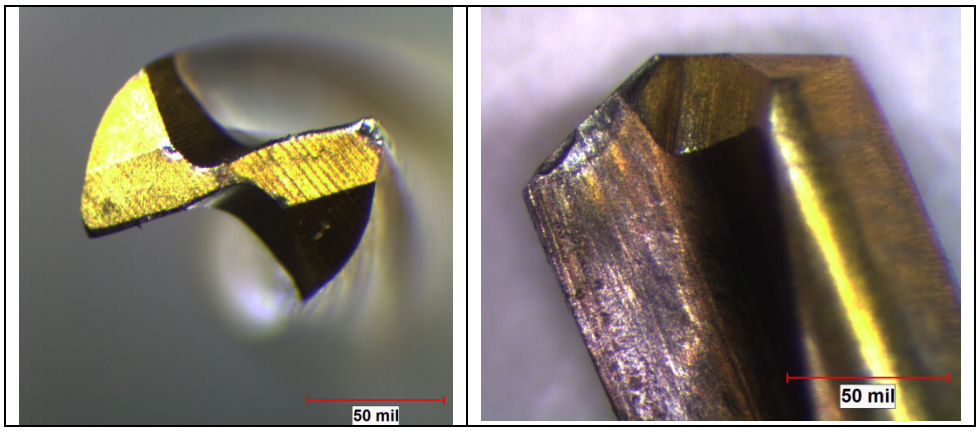


Figure 5.26 Usure constatée sur l'outil 3 (test 5).
(Outil géométriquement modifié), Pratt & Whitney Canada (2009)

Se servir d'outils plus performants pendant l'usinage peut être une approche très bénéfique, puisque de tels outils permettent l'usinage d'un grand nombre de pièces sans procéder au changement d'outil. Ainsi, l'outil domine toutes les situations d'usinage, même s'il existe une importante variation dans les propriétés du matériau de la pièce.

Formation des bavures

Dans le cas du perçage, les bavures de sortie sont toujours plus importantes que les bavures d'entrée. Cependant, dans notre cas les bavures formées à l'entrée et à la sortie du trou oblique sont principalement générées par l'outil d'alésage qui vient juste après l'outil de perçage dans le but de finir le trou. La passe effectuée pendant l'alésage est très minime, elle est de l'ordre de 5 millièmes de pouce, mais elle reste tout de même la source principale de la formation des bavures à la sortie du trou. Dans cette étude on ne tient pas compte des bavures générées à l'entrée du trou puisqu'elles sont négligeables devant les bavures de sortie du trou.

Nous avons remarqué que lorsque l'outil d'alésage est neuf, les bavures formées à la sortie du trou sont pratiquement négligeables, elles sont de l'ordre de 0.0046 pouce de hauteur (figure 5.27). Cependant, lorsque l'outil commence à s'user, on aperçoit la formation

d'importantes bavures à la sortie du trou, allant au-delà de 0.0194 pouce de hauteur (figure 5.28).

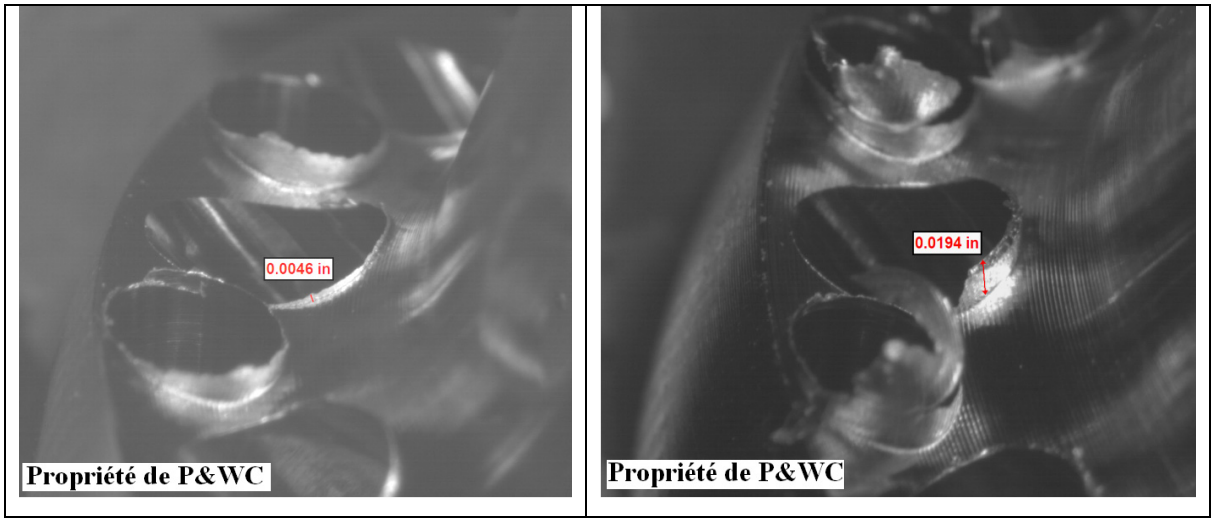


Figure 5.27 Bavures générées à la sortie du trou oblique par un alésoir neuf.
Pratt & Whitney Canada (2009)

Figure 5.28 Bavures générées à la sortie du trou oblique par un alésoir usé.
Pratt & Whitney Canada (2009)

Il est donc clair qu'il existante une relation étroite entre l'usure des outils et la formation des bavures, cette relation pourrait se rapprocher d'une relation linéaire (figure 5.29). Lorsque le matériau de la pièce est dans de bonnes conditions et permet une bonne usinabilité, l'alésoir est censé produire 18 pièces avant d'être changé. Si toutefois la dureté du matériau est élevée et aussi non uniformément repartie, l'outil s'use rapidement; par conséquent, un changement d'outil s'impose. Mais si les performances des outils sont améliorées, ces derniers résisteront plus longtemps à l'usure, donc moins de bavures seront formées, et moins d'opérations d'ébavurage seront appliquées.

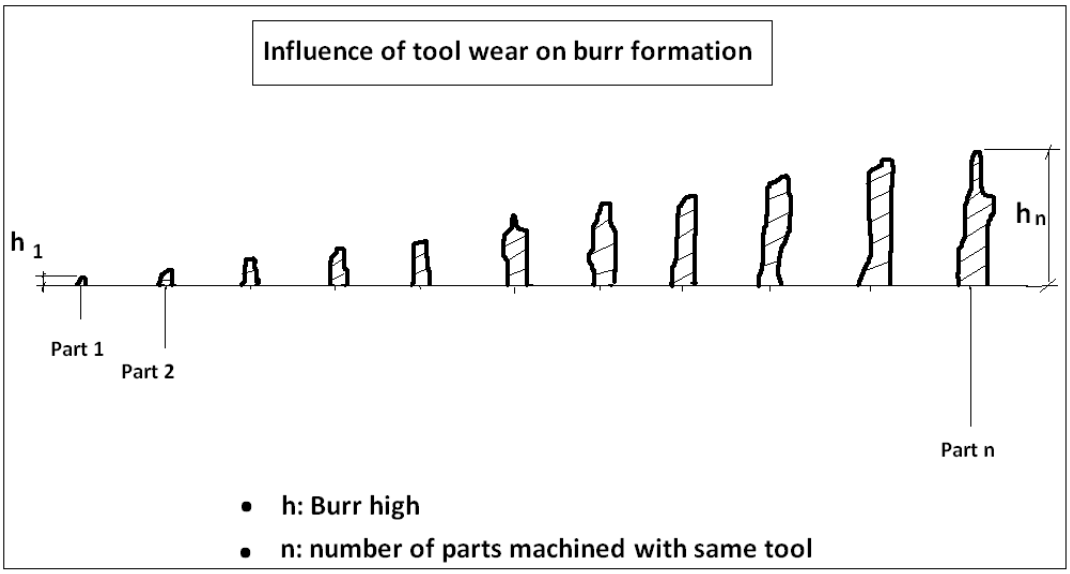


Figure 5.29 Relation entre l'usure de l'outil et formation des bavures.
Pratt & Whitney Canada (2009)

Dans cette étude nous avons discuté des propriétés du matériau de la pièce uniquement, c'est parce qu'en réalité c'est le principal facteur montrant une très importante irrégularité dans les propriétés mécaniques en particulier, mais cette irrégularité peut aussi survenir des paramètres géométriques et qualitatifs des outils, ce qui pourrait avoir une importance capitale.

Sommaire des résultats obtenus et commentaire

Le tableau 5.4 résume tous les essais effectués dans cette étude, il montre également les résultats obtenus par chaque outil, et l'influence des conditions de coupe sur : la rupture des outils, l'usure des outils, les grattures de copeau et la caractérisation des copeaux. Le résultat montre que l'outil 3 donne les meilleures performances, il résiste mieux à l'usure et génère moins de grattures que les deux autres outils. Varier les conditions de coupe pendant l'usinage est également une bonne approche pour réduire les grattures.

Tableau 5.4 Sommaire des résultants obtenu

Essai	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Outil	Outil 1	Outil 1	Outil 2	Outil 2	Outil 3
Nombre de pièces usinées	1	1	1	1	3
Conditions de coupe	Vitesse n1; avance f_z1	Vitesse n1; avance f_z1	Vitesse n1; avance f_z1	Vitesse n2; avance f_z1	Vitesse n1; avance f_z1
Cassure des outils	4 outils standards ont été cassés pendant l'usinage de 18 pièces	4 outils standards ont été cassés pendant l'usinage de 18 pièces	aucune cassure d'outil n'a été enregistrée pendant les essais	aucune cassure d'outil n'a été enregistrée pendant les essais	aucune cassure d'outil n'a été enregistrée pendant les essais
Génération des grattures de copeaux	Oui	Oui	Oui	Légères grattures	Pas de grattures
Caractérisation des copeaux	Copeau hélicoïdal long	Copeau hélicoïdal long	Copeau hélicoïdal long	Copeau hélicoïdal légèrement court	Copeau hélicoïdal court
Usure de l'outil	Très prononcée après usinage d'une pièce	Très prononcée après usinage d'une pièce	Très prononcée après usinage d'une pièce	Très prononcée après usinage d'une pièce	Prononcée après usinage de trois pièces

5.4 Conclusion

L'expérience menée dans le milieu industriel nous a permis de conclure ce qui suit:

- L'inconel est un matériau difficile à usiner, en particulier lorsque le matériau brut de la pièce arrive dans de mauvaises conditions d'usinabilité; bien qu'il subit chez le fournisseur un traitement de revenu, une grande variabilité dans ses propriétés mécaniques est observée. La sélection de certains paramètres de coupe permettant un usinage agressif peut réduire la température et les frottements pendant la coupe. Par

conséquent, un meilleur comportement du matériau à l'égard de l'usinage. Il a également été déduit que l'usure de l'outil peut augmenter la dureté du matériau pendant l'usinage, causant ainsi des dommages à l'outil et à la pièce, et engendrant d'importantes bavures nécessitant d'importants efforts d'ébavurage. Le contrôle de l'usure des outils constitue une approche très intéressante, car il permet l'usinage d'un grand nombre de pièces avec un même outil. La modification de la géométrie de l'outil comme présentée dans l'expérience, augmente la résistance à l'usure de l'outil, sans aucun coût supplémentaire associé à l'outillage.

- Les essais réalisés nous ont permis de conclure que les grattures observées sur la pièce viennent de l'opération de perçage du trou oblique. Par ailleurs, il est possible de réduire les grattures de copeau en modifiant la géométrie de l'outil et en variant les conditions de coupe, permettant ainsi de produire des pièces de meilleure qualité avec un minimum de rejets. Entre la modification de la géométrie de l'outil et la variation des conditions de coupe, l'expérience menée a montré que: modifier la géométrie de l'outil donne les meilleurs résultats possible. Mais cette conclusion est basée sur l'hypothèse que les outils utilisés sont conformes aux exigences qualitatives souhaitées. Toutefois dans la réalité, la qualité de l'outillage ne satisfait pas toujours les exigences de répétitivité, il est aussi difficile de gérer ce détail dans l'industrie. Concernant la variation des conditions de coupe, la vitesse de rotation de l'outil a été augmentée de 500 tr / min, et le résultat généré est relativement intéressant. Augmenter la vitesse de rotation de l'outil au-delà de cette valeur peut donner de meilleurs résultats quant aux grattures de copeau. Cependant, l'usure de l'outil pourrait davantage être accentuée. Il est donc difficile de définir une limite optimale permettant de satisfaire tous les paramètres d'usinage.

Rapport-Gratuit.com

CONCLUSION

La formation des bavures est inévitable dans bien des opérations d'usinage. Toutefois, les réduire, les prédire, et/ou les orienter avant même leur formation est bien possible. Cette étude nous a permis de générer des recommandations efficaces pour parvenir à réduire la formation des bavures et de faire des économies non négligeables en évitant de nous trouver dans diverses situations indésirables génératrices de bavures. Plusieurs types de bavures de rainurage ont été étudiés en détail, et quelques nouvelles contributions ont été introduites, tels que : l'influence des grandes vitesses de coupe et les revêtements d'outils sur la formation des bavures, l'aspect régularité et uniformité des bavures liées aux différents types de bavures générées, et enfin l'indice d'occupation des bavures en termes de pourcentage des bavures générées occupant l'arête de la pièce a également été définie et analysée.

L'étude nous a permis aussi de conclure que : l'usinage à grande vitesse combiné à de faibles vitesses d'avance et faibles profondeurs de coupe permet de réduire la formation de plusieurs types de bavures. Les bavures d'entrée et les bavures de sortie sont gouvernées par des facteurs totalement différents et indépendants. La ductilité du matériau, la profondeur de coupe et/ou la vitesse d'avance affectent grandement les bavures latérales. Les bavures supérieures dépendent principalement de la variation des conditions de coupe, de la dynamique d'évacuation du copeau, de la forme de l'outil et de la vibration du système d'usinage.

L'étude expérimentale menée dans le milieu industriel nous a permis de mettre en pratique les connaissances acquises en laboratoire relatives à la formation des bavures et la finition de pièces, proposer des concepts permettant de sélectionner le processus d'ébavurage convenable, résoudre le problème des grattures de copeaux par la sélection de certains types d'outils et conditions de coupe adéquats, et recommander certains types d'outils permettant une meilleure résistance à l'usure.

RECOMMANDATIONS

1- Recommandations et suggestions pour la formation des bavures

- Il existe possiblement une relation très étroite entre la formation des bavures, l'état de surface de la pièce et la rugosité des bavures. Pour trouver cette relation, quelques auteurs ont suggéré la piste de la température que pourrait atteindre le matériau de base ainsi que la bavure pendant le processus d'usinage. En effet, ce facteur peut avoir un lien étroit entre les trois paramètres mentionnés.

- Très peu de recherches ont été concentrées sur la caractérisation mécanique des bavures (dureté, résistance, etc.), ces informations sur les bavures produites suite aux opérations d'usinage peuvent être très utiles pour les étapes d'ébavurage et finition de pièces.

- L'utilisation des matériaux composites en industrie, particulièrement dans le domaine aérospatial, est en augmentation continue. Toutefois, très peu de recherches ont été faites sur ce type de matériaux dans le but de résoudre leurs problèmes de bavures et développer les méthodes d'ébavurage adéquates.

- D'importantes informations relatives à l'ébavurage sont disponibles dans le milieu industriel, souvent issues d'une longue expérience pratique, pouvant décrire avec précision les divers volets du processus d'ébavurage (méthodologie de l'ébavurage, outillage adéquat, le type de bavures favorables pour chaque procédé, l'ajustage, les inconvénients et limitations de chaque procédé, les coûts réels des divers procédés, etc.). Malheureusement, la plupart de ces informations ne sont pas documentées, disparaissent souvent lorsque les personnes détentrices de ces informations quittent le milieu industriel. Il est très utile de créer un outil capable de réunir et documenter ce genre d'informations précieuses.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2- Recommandations et suggestions pour le milieu industriel

Trois améliorations possibles ont été discutées dans le tableau 5.5 : L'usure de l'outil affectant directement le coût de fabrication, les grattures de copeaux générant des rejets de pièces, et enfin l'irrégularité dans les propriétés mécaniques du matériau brut causant des perturbations pendant d'usinage.

Tableau 5.5 Suggestions et recommandations pour les travaux futures

Thème	Suggestions pour amélioration
Contrôle de l'usure de l'outil	Pour augmenter la durée de vie de l'outil, l'utilisation des *coolant through tools* ou bien les outils à lubrification interne peuvent être très prometteurs (voir la photo ci-dessous). Ces outils sont mieux refroidis pendant l'usinage, ce qui leur permet une meilleure résistance à l'usure. Un angle de pointe augmenté à 135° accentue encore davantage les performances des outils lors de l'usinage de l'inconel. Enfin, un revêtement en diamant procure une meilleure résistance à l'usure, mais avant d'opter pour de tels changements, une étude de profitabilité devrait être faite au préalable, puisque ces outils coûtent plus cher que les outils standards. Toutefois, leur résistance à l'usure peut être de 80 % supérieure à celle des outils standards. (coolant through tool) www.mitsubishicarbide.com

	Ces outils sont généralement disponibles à partir du diamètre 3 mm à 20 mm, sans et avec revêtement (comme le : TiAlN, TiCN, TiN, AlTiN, Diamant et multicouches).
Grattures de copeaux	Les outils brise-copeaux peuvent constituer une bonne alternative pour résoudre le problème des grattures de copeau, leur rôle est de générer des copeaux courts et cassants de manière à faciliter leur évacuation. Chip breaker tool www.somta.co.za Les *coolant through tools* ou bien les outils à lubrification interne mentionnés précédemment peuvent dans certaines situations résoudre le problème des grattures, puisque les copeaux sont mieux dégagés. Tous ces outils sont généralement disponibles à partir du diamètre 2 mm à 20 mm, sans et avec revêtement (comme le : TiAlN, TiC, TiCN, TiN, AlTiN, Diamant et multicouches).
Contrôle de qualité du matériau brut	Comme expliqué précédemment, le problème de l'irrégularité dans les propriétés mécaniques du matériau brut (inconel), cause d'énormes problèmes pendant l'usinage, effectuer des traitements thermiques sur le matériau avant de procéder à l'usinage dans le but de le ramener à des conditions de coupe optimales peut résoudre le problème.

ANNEXE I

FICHE TECHNIQUE DE LA TABLE DYNAMOMÉTRIQUE

Force – FMD

KISTLER

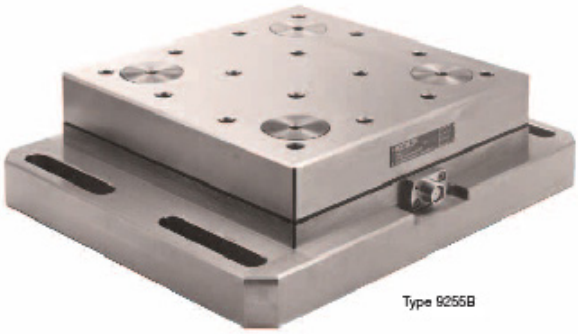
3-Komponenten-Dynamometer F_x, F_y, F_z
Dynamomètre à 3 composantes F_x, F_y, F_z
3-Component Dynamometer F_x, F_y, F_z

9255B

Quarzkristall-Dreikomponenten-Dynamometer zum Messen der drei orthogonalen Komponenten einer Kraft. Das Dynamometer besitzt eine grosse Steifheit und demzufolge eine hohe Eigenfrequenz. Das grosse Auflösungsvermögen ermöglicht das Messen von kleinsten dynamischen Änderungen grosser Kräfte.

Dynamomètre à cristal de quartz à trois composantes pour mesurer des trois composantes orthogonales d'une force. Le dynamomètre possède une grande rigidité et par conséquent une fréquence propre élevée. Sa très haute résolution permet de mesurer les moindres variations de larges forces.

Quartz three-component dynamometer for measuring the three orthogonal components of a force. The dynamometer has a great rigidity and consequently a high natural frequency. Its high resolution enables the smallest dynamic changes in large forces to be measured.



Type 9255B

Technische Daten	Données techniques	Technical Data			
Bereich	Gamme	Range	F_x, F_y F_z	kN kN	–20 ... 20 *) –10 ... 40 *)
Kalibrierter Teilbereich	Gamme partielle étalonnée	Calibrated partial range	F_x, F_y F_z	kN kN	0 ... 2 0 ... 4
Überlast	surcharge	Overload	F_x, F_y F_z	kN kN	–24/24 –12/48
Ansprechschwelle	Seuil de réponse	Threshold		N	<0,01
Empfindlichkeit	Sensibilité	Sensitivity	F_x, F_y F_z	pC/N pC/N	≈–9 ≈–3,7
Linearität, alle Bereiche Hysterese, alle Bereiche Übersprechen	Linéarité, toutes les gammes Hystérésis, toutes les gammes Cross talk	Linearity, all ranges Hysteresis, all ranges Cross talk		% FSO % FSO %	≤±1 ≤0,5 ≤±2
Steifheit	Rigidité	Rigidity	c_x, c_y c_z	kN/µm kN/µm	>2 >3
Eigenfrequenz	Fréquence propre	Natural frequency	f_o (x, y, z)	kHz	≈3
Eigenfrequenz (montiert an Flanschen)	Fréquence propre (installé sur brides)	Natural frequency (mounted on flanges)	f_o (x, y) f_o (z)	kHz kHz	≈1,7 ≈2
Eigenfrequenz (montiert an Flanschen u. durch Deckplatte)	Fréquence propre (installé sur brides et à travers la plaque supérieure)	Natural frequency (mounted on flanges and through top plate)	f_o (x, y) f_o (z)	kHz kHz	≈2 ≈3,3
Betriebstemperaturbereich Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit	Gamme de température d'utilisation Coefficient de température de la sensibilité	Operating temperature range Temperature coefficient of sensitivity		°C %/°C	0 ... 70 –0,02
Kapazität (pro Kanal) Isolationswiderstand (20 °C) Masseisolation	Capacité (de canal) Résistance d'isolement (20 °C) Isolé à la masse	Capacitance (of channel) Insulation resistance (20 °C) Ground insulation		pF Ω Ω	≈500 >10^{13} >10^{8}
Schutzart Gewicht	Classe de protection Poids	Protection class Weight		– kg	IP 67 **) 52

*) Kraftangriff innerhalb und max. 100 mm oberhalb der Deckfläche.
**) Mit Anschlusskabel Typen 1687B5, 1689B5

*) Point d'application de la force au-dedans et max. 100 mm au-dessus de la plaque supérieure.
**) Avec câble de connexion types 1687B5, 1689B5

*) Application of force inside and max. 100 mm above top plate area.
**) With connecting cable Types 1687B5, 1689B5

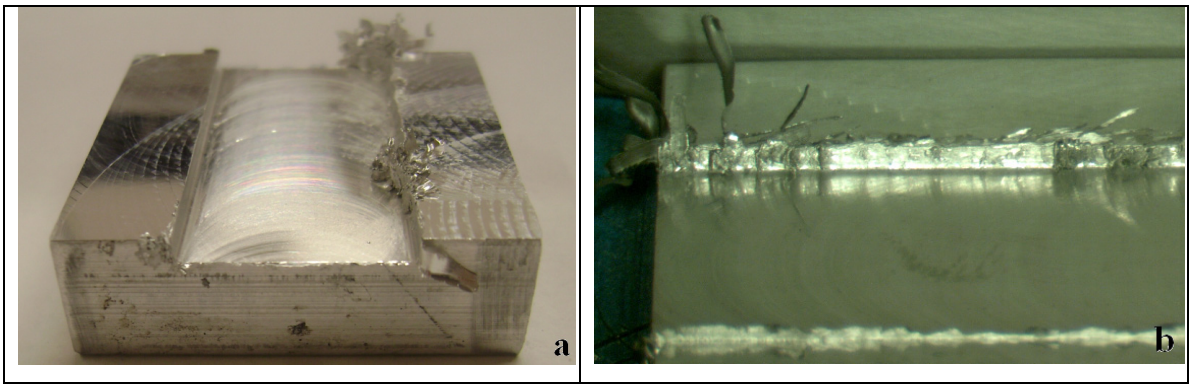
1 N (Newton) = 1 kg · m · s^{-2} = 0,1019... kp = 0,2248... lbf; 1 inch = 25,4 mm; 1 kg = 2,2046... lb; 1 Nm = 0,73756... lbft

000-148m-02.91 (DB06.9255Bm

Kistler Instrumente AG Winterthur, CH-8408 Winterthur, Switzerland, Tel. (052) 224 11 11 Kistler Instrument Corp., Amherst, NY 14228-2171, USA, Phone (716) 691-5100

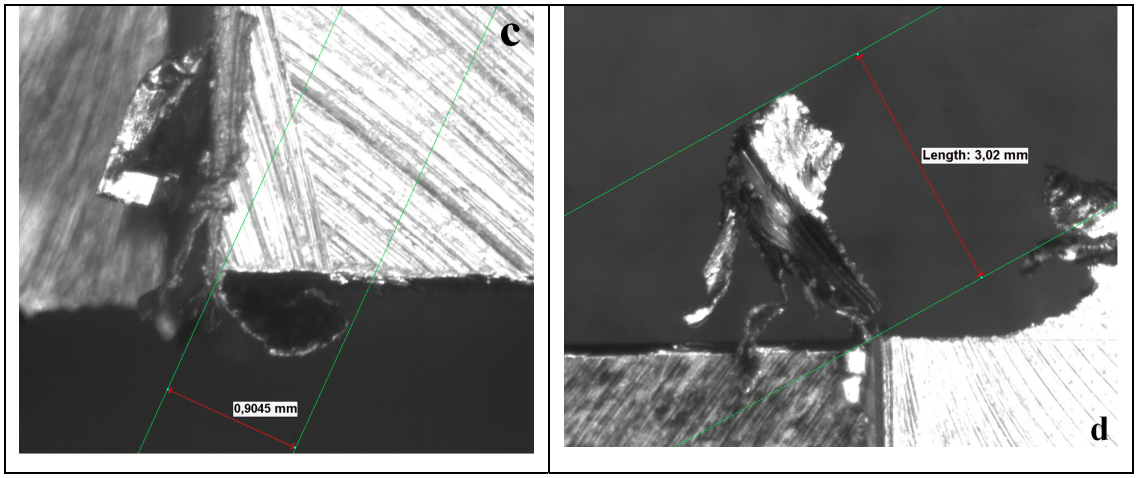
ANNEXE II

AUTRES PHOTOS DES BAVURES GÉNÉRÉES



(a) Bavures de sortie et bavures supérieures sur l'Al 6061 T6; outil 2 (TiAlN); 750 m/min; 0.01 mm/dent; 2mm de profondeur.

(b) Bavures supérieures et bavures d'entrée latérales sur l'Al 6061 T6; outil 1 (TiCN); 750 m/min; 0.01 mm/dent; 1mm de profondeur.



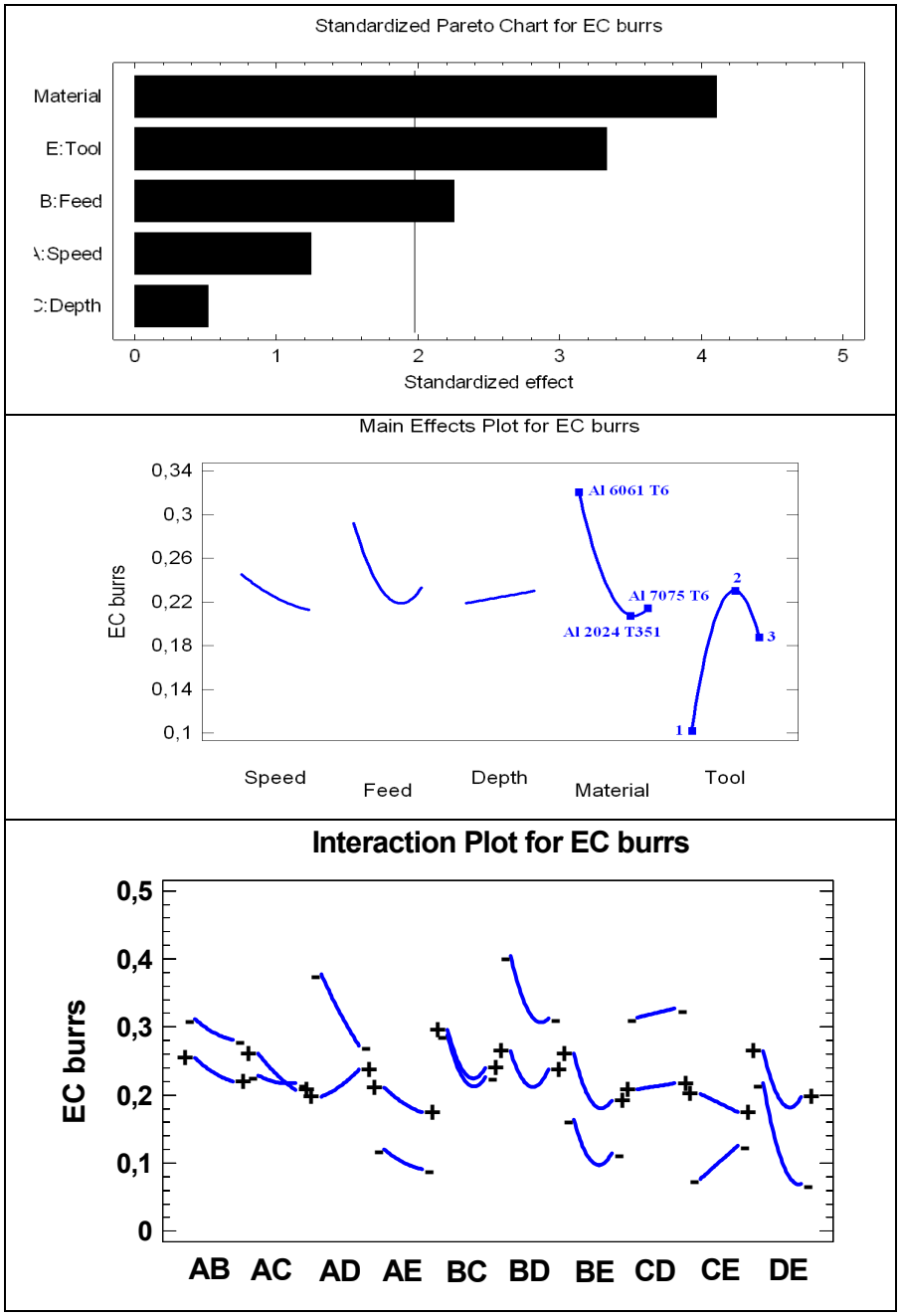
(c) Bavures d'entrée latérale sur l'Al 7075 T6; outil 3 ($TiCN+Al_2O_3+TiN$); 1200 m/min; 0.01mm/dent; 2mm de profondeur.

(d) Bavures de sortie latérales sur l'Al 2024 T351; outil 3 ($TiCN+Al_2O_3+TiN$); 1200 m/min; 0.1mm/dent; 1mm de profondeur.

ANNEXE III

ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES D'ENTRÉE EC

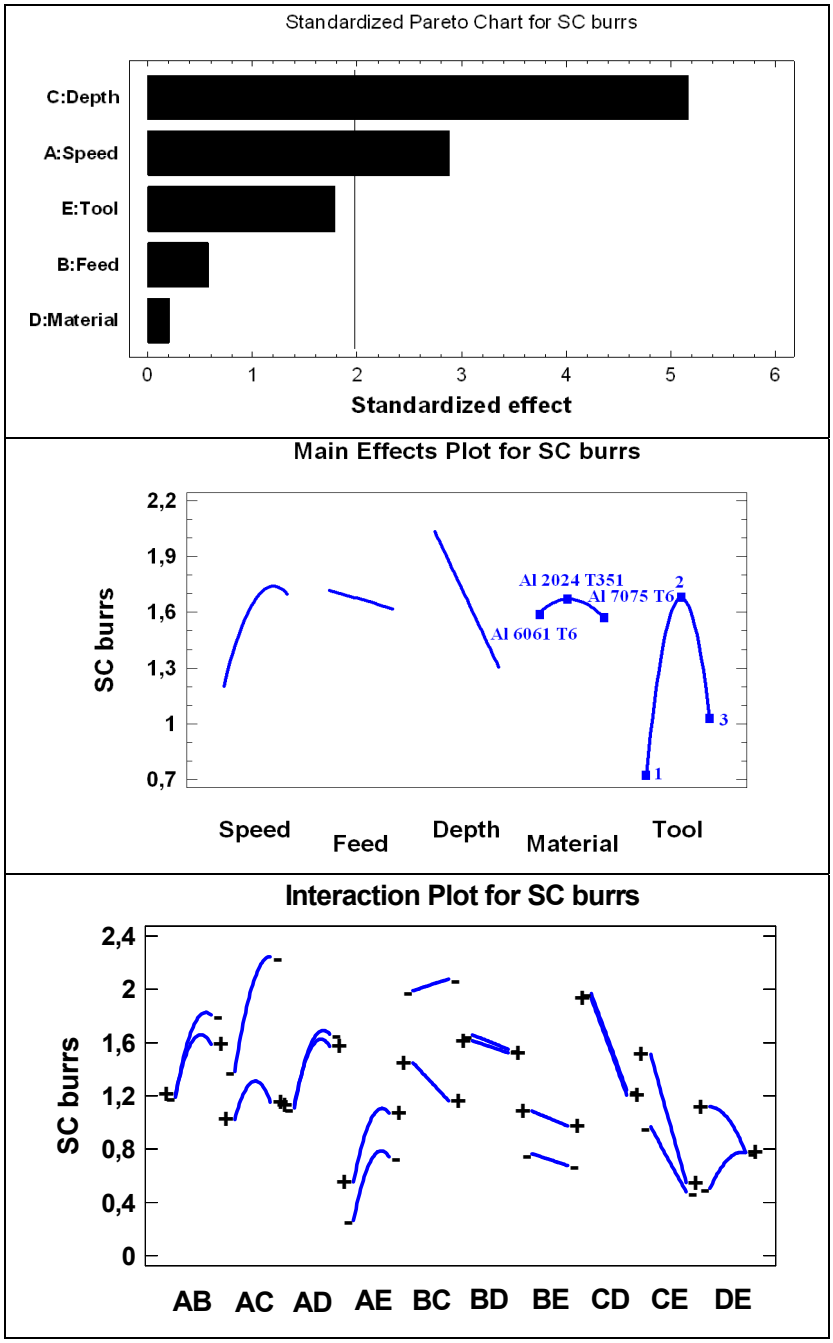
Divers graphiques relatifs aux bavures d'entrée EC



ANNEXE IV

ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES DE SORTIE SC

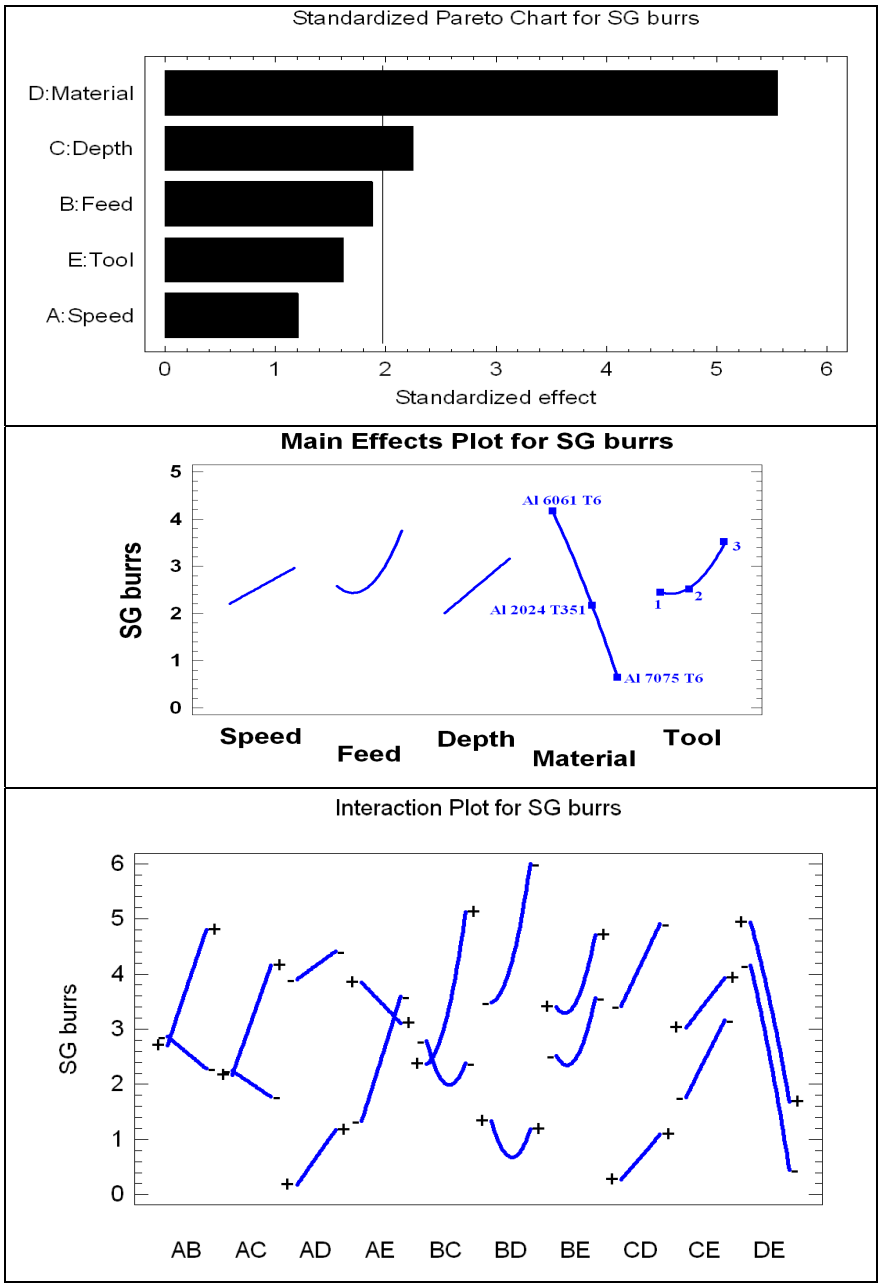
Divers graphiques relatifs aux bavures d'entrée SC



ANNEXE V

ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES DE SORTIE LATÉRALES SG

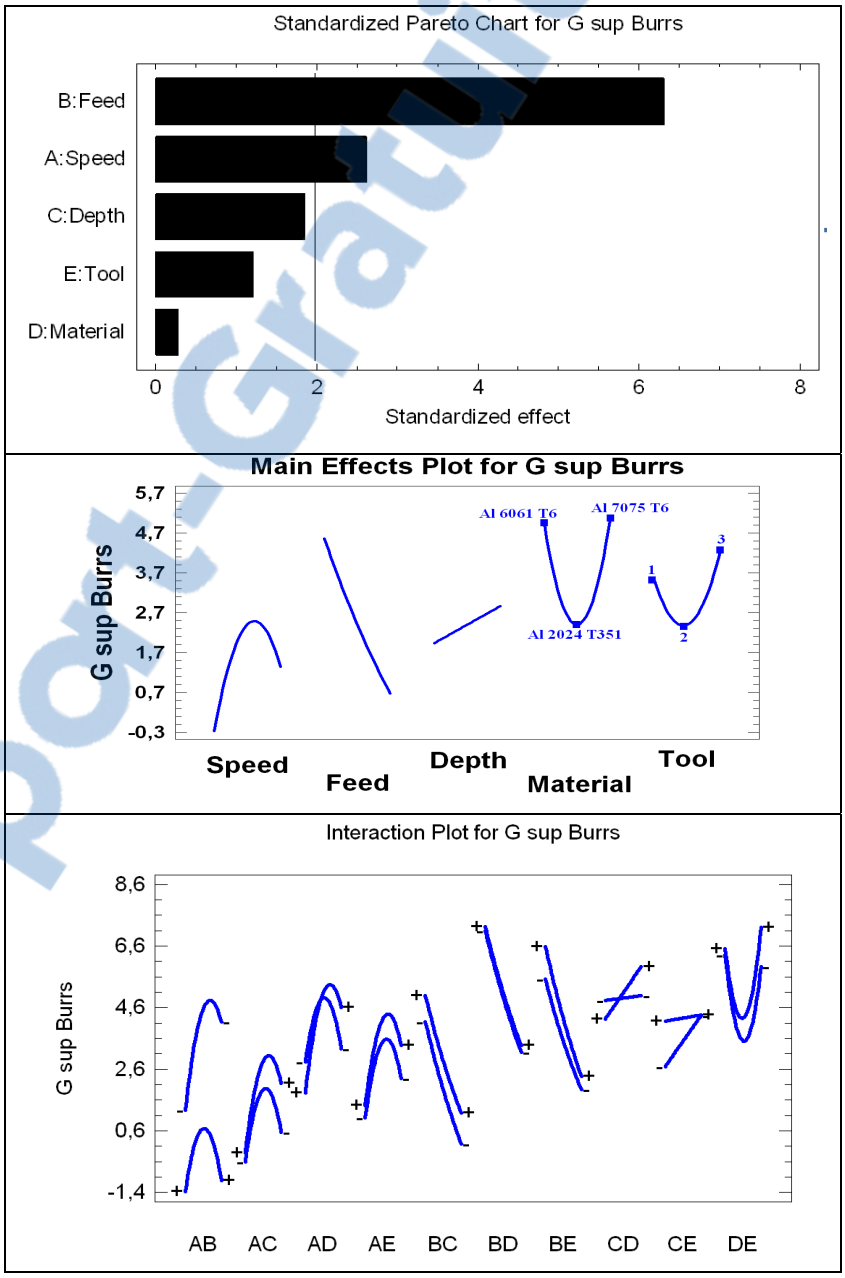
Divers graphiques relatifs aux bavures de sortie latérale SG



ANNEXE VI

ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES SUPÉRIEURES G - SUP

Divers graphiques relatifs aux bavures supérieures G – sup

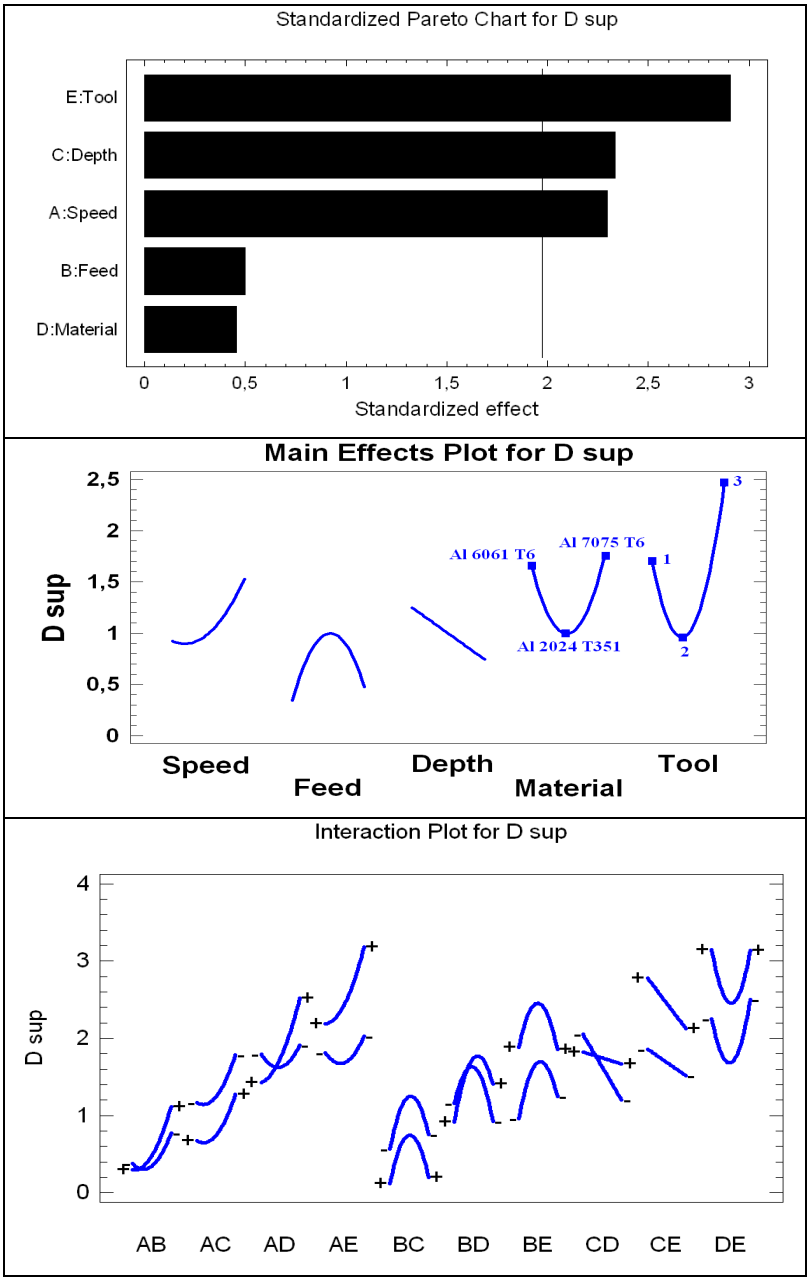


Rapport-Gratuit.com

ANNEXE VII

ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LES BAVURES SUPÉRIEURES D - SUP

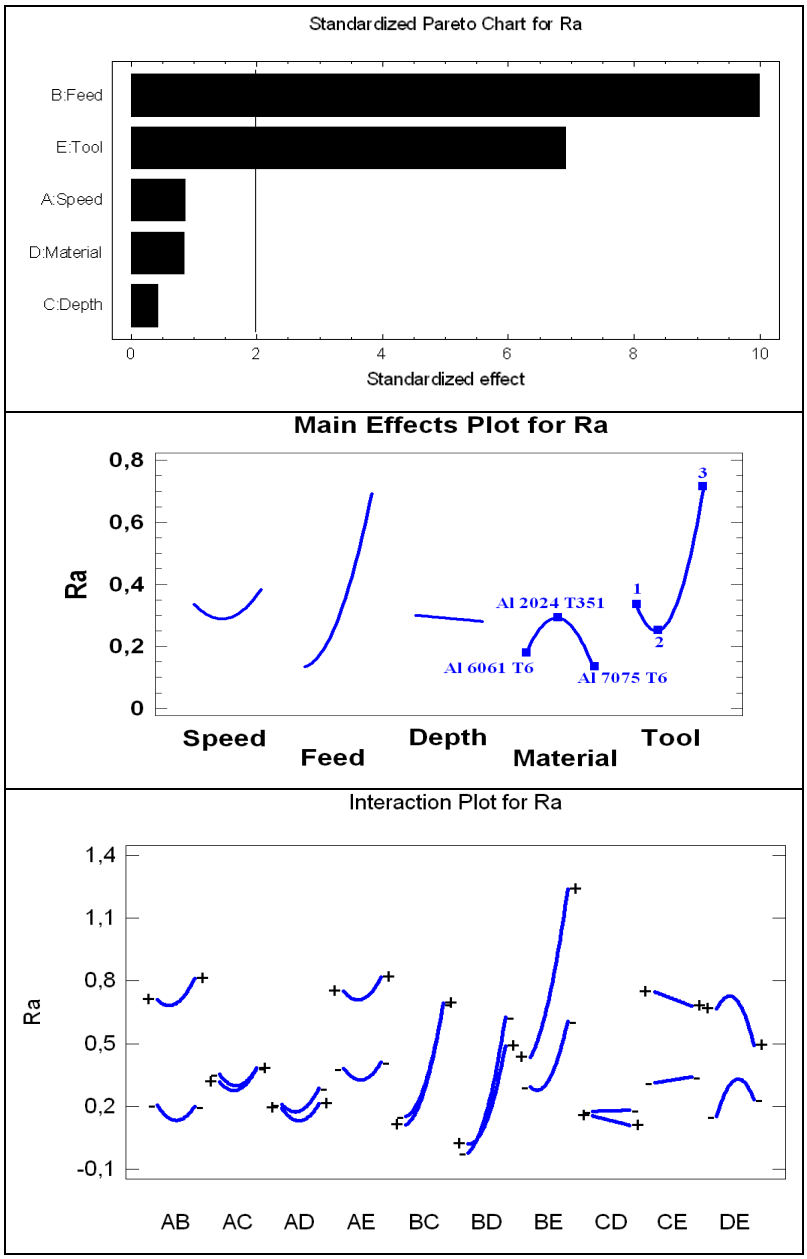
Divers graphiques relatifs aux bavures supérieures D – sup



ANNEXE VIII

ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LA RUGOSITÉ ARITHMÉTIQUE

Divers graphiques relatifs à la rugosité arithmétique $\mathbf{R_a}$

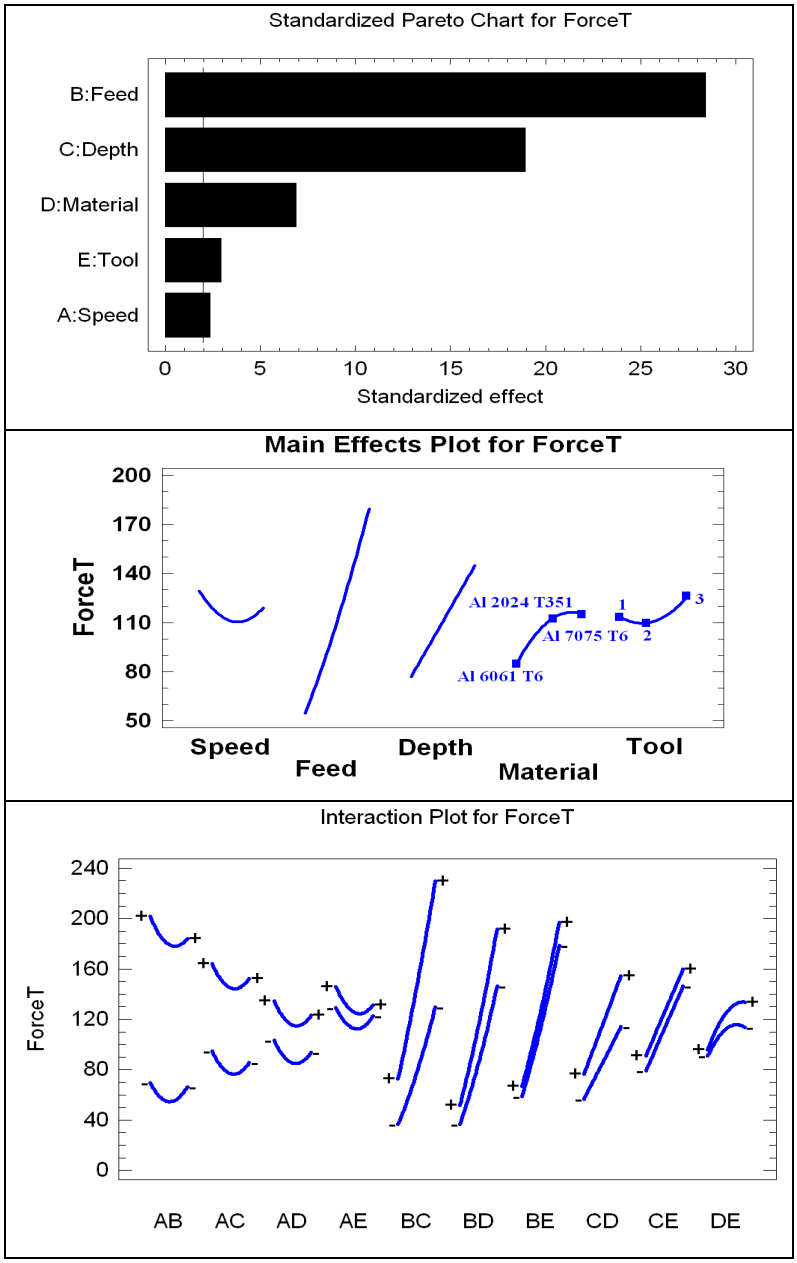


Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

ANNEXE IX

ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR LA FORCE DE COUPE

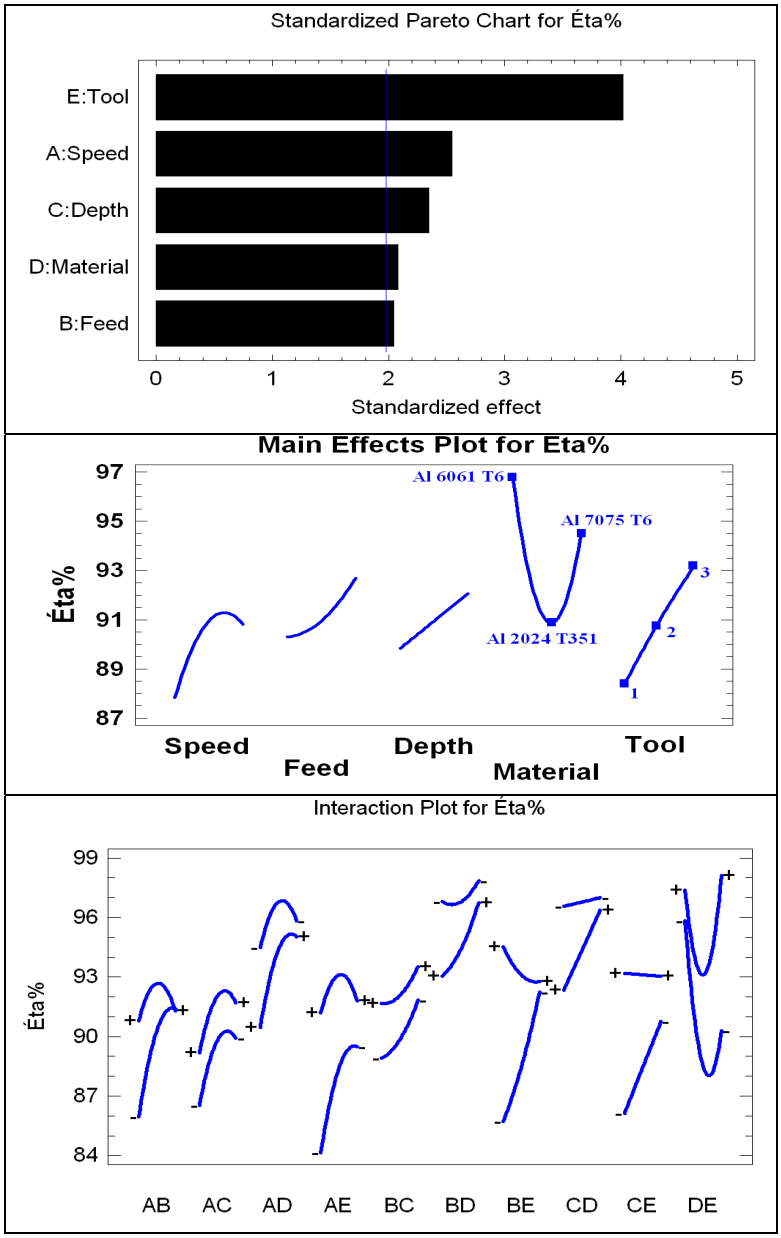
Divers graphiques relatifs à la force de coupe $\mathbf{F_c}$



ANNEXE X

ANALYSE D'INFLUENCE DES FACTEURS POUR L'INDICE D'OCCUPATION

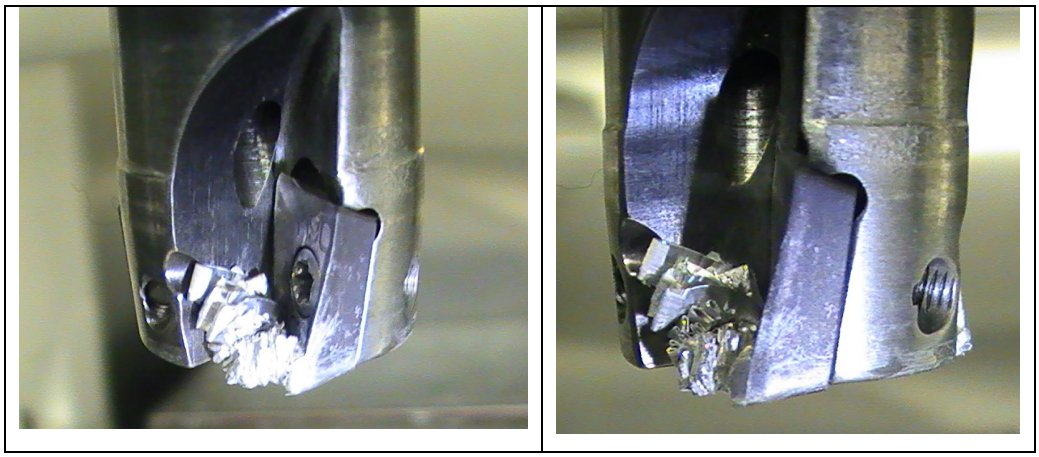
Divers graphiques relatifs à l'indice d'occupation des bavures η_s



ANNEXE XI

FORMATION D'ARÊTE RAPORTÉE

Arête rapportée et accumulation du copeau sur l'outil.

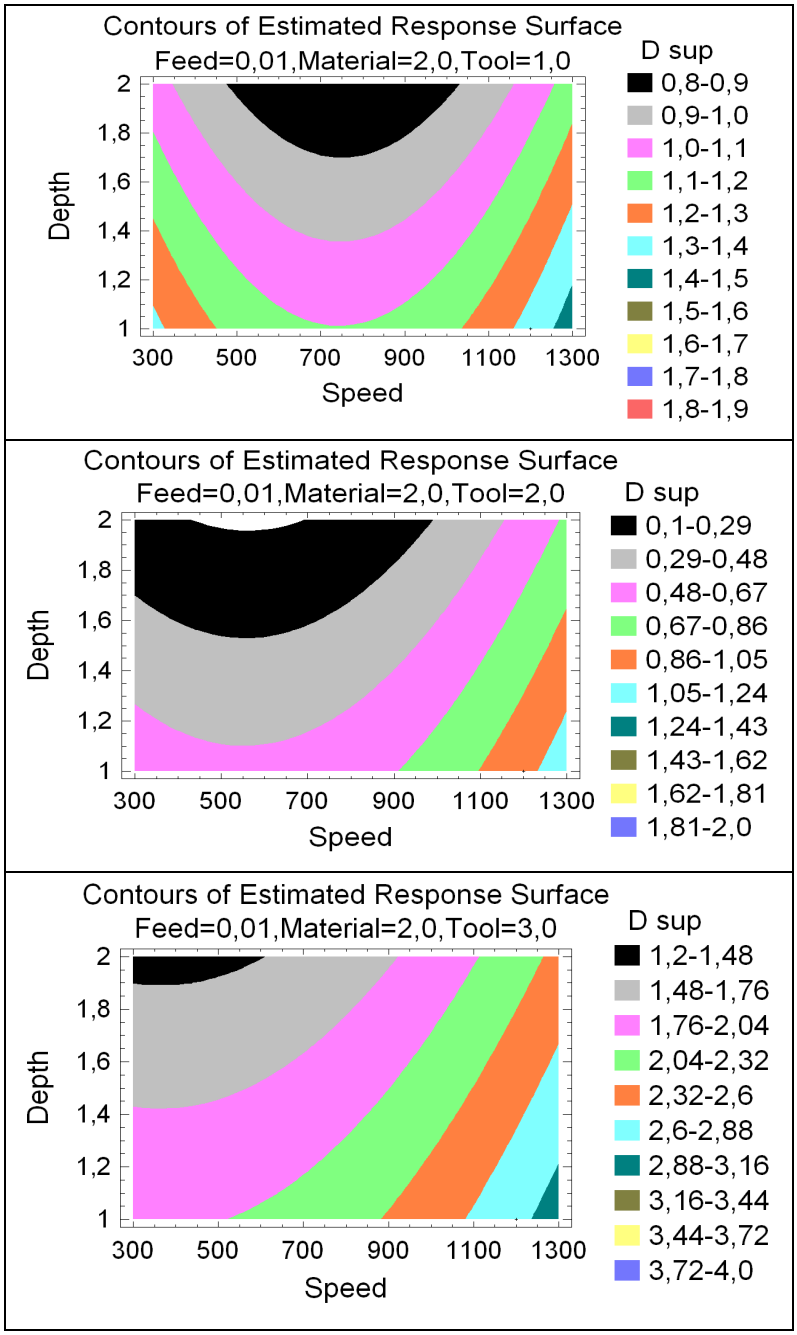


Matériaux de la pièce Al 2024 T351; vitesse de coupe 300 m /min; avance 0.055 mm / dent; profondeur 2 mm, revêtement de l'outil TiAlN.

ANNEXE XII

ANALYSE SURFACIQUE DES BAVURES SUPÉRIEURES D - SUP

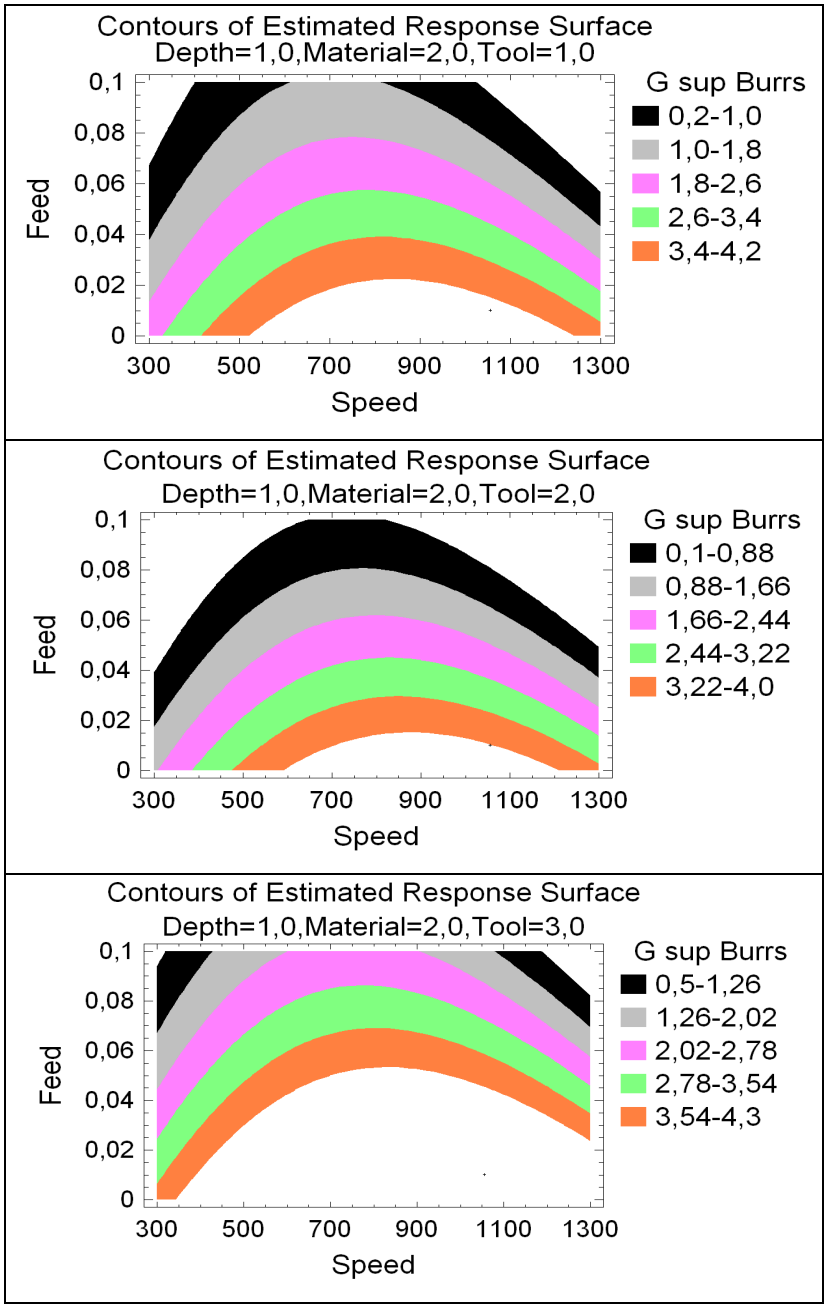
Modèle graphique de prédiction des bavures supérieures D – sup



ANNEXE XIII

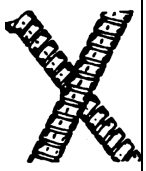
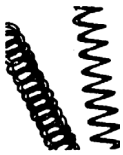
ANALYSE SURFACIQUE DES BAVURES SUPÉRIEURES G – SUP

Modèle graphique de prédiction des bavures supérieures G – sup



ANNEXE XIV

CARACTÉRISTIQUES DES COPEAUX

1 **Ribbon chips**	2 **Tubular chips**	3 **Spiral chips**	4 **Washer-type helical chips**	5 **Conical helical chips**	6 **arc chips**	7 **Elemental chips**	8 **Needle chips**
1.1 Long	**2.1** Long 	**3.1** Flat	**4.1** Long 	**5.1** Long	**6.1** Con-nected		
1.2 Short	**2.2** Short	**3.2** Conical	**4.2** Short	**5.2** Short	**6.2** Loose		
1.3 Snarled	**2.3** Snarled		**4.3** Snarled	**5.3** Snarled			

(*ISO standard 3685*)

LISTE DE RÉFÉRENCES

Aurich, J. C., D. Dornfeld, P. J. Arrazola, V. Franke, L. Leitz et S. Min. 2009. « Burrs-Analysis, control and removal ». CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 58, n° 2, p. 519-542.

Aurich, J. C., H. Sudermann et H. Bil. 2005. « Characterisation of burr formation in grinding and prospects for modelling ». CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 54, n° 1, p. 313-316.

Avila, M. C., J. Choi, D. A. Dornfeld, M. Kapgan et R. Kosarchuk. 2004. « Deburring of Cross-Drilled Hole Intersections by Mechanized Cutting ». UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Retrieved from: http://www.escholarship.org/uc/item/5d55v1d9. Consulté le 15 janvier 2010.

Avila, Miguel C., et David A. Dornfeld. 2004. « On The Face Milling Burr Formation Mechanisms and Minimization Strategies at High Tool Engagement ». In *Research Reports* 2003/04, sous la dir. de Avila, Miguel C., et David A. Dornfeld. p. 21-30. Berkeley: University of California, Laboratory for manufacturing automation. http://lma.berkeley.edu/research/2003/compendium_03-04.pdf. Consulté le 11 mars 2010.

Avila, M. C., et D. A. Dornfeld. 2003. « The Effect of Kinematical Parameters and Tool Geometry on Burr Height in Face Milling of Al-Si Alloys ». UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Retrieved from: http://www.escholarship. org/uc/item/8fh6z714. Consulté le 15 janvier 2010.

Avila, M. C., et D. A. Dornfeld. 2005. « Exit Order Sequence Burr Prediction Algorithm Based on Rectangular Coordinates ». UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Retrieved from: http://www. escholarship. org/uc/item/0xn3m83s. Consulté le 15 janvier 2010.

Avila, M. C., J. D. Gardner, C. Reich-Weiser, A. Vijayaraghavan et D. Dornfeld. 2006. « Strategies for burr minimization and cleanability in aerospace and automotive manufacturing ». UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Retrieved from: http://www. escholarship. org/uc/item/9ks6b6dp. Consulté le 15 janvier 2010.

Baïlon, Jean-Paul, et Jean-Marie Dorlot. 2000. *Des matériaux,* 3e éd. [Montréal]: Presses internationales Polytechnique, 736 p.

Bäker, M. 2003. « An investigation of the chip segmentation process using finite elements ». Technische Mechanik, vol. 23, n° 1, p. 1-9.

Bansal, A., et K. Lee. 2002. « Study of Burr Size and Surface Roughness in High Speed Face Milling ». In *Research Reports* 2001-2002, sous la dir de David A. Dornfeld. p. 1-5. Berkeley: University of California, Laboratory for manufacturing automation. http://www.escholarship.org/uc/item/8fh6z714. consulté le 11 mars 2010.

Chen, Seng-Chi, et Pi-Cheng Tung. 2000. « Application of a rule self-regulating fuzzy controller for robotic deburring on unknown contours ». Fuzzy Sets and Systems, vol. 110, n° 3, p. 341-350.

Chern, Gwo-Lianq. 1993. « Analysis of burr formation and breakout in metal cutting ». Doctor of Phylosopy in Engineering-Mechanical Engineering, California, TX, University of California, Berkeley, 180 p.

Chern, G. L. 2006. « Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys ». International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46, n° 12-13, p. 1517-1525.

Choi, G. S., Wang, Z. X., Dornfeld, D. A and Tsujino, K. 1990. « Development of an intelligent on-line tool wear monitoring system for turning operations ». Proc. Japan-US Symposium on Flexible Automation, ISCIE, Kyoto, Japan, p. 683-690.

Chu, C. H., et D. Dornfeld. 2004. « Linking tool paths generated with different offset distances for edge quality enhancement in planar milling ». Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 218, n° 7, p. 721-730.

Deng, W. J., W. Xia et Y. Tang. 2009. « Finite element simulation for burr formation near the exit of orthogonal cutting ». International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 43, n° 9-10, p. 1035-1045.

Dornfeld, D. A., et W. Shefelbine. 2004. « The Effect of Dry Machining on Burr Size ». Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley. p. 1-5. http://escholarship.org/uc/item/603201b9. Consulté le 11 mars 2010.

Furness, R. 1998. « High Speed Video of Drilling Burr Formation ». AMTD, Ford Motor Company. http://www.escholarship.org/uc/item/6f30942c. Consulté le 11 mars 2010.

Gillespie, L. K. 1976. *Burrs produced by end milling*. Technical report: BDX-613-1503, Bendix Corp., Kansas City, Mo.(USA).

Gillespie, L. K. 1978. *Advances in deburring.* Ei=Dearborn, Mich: Society of Manufacturing Engineers, 513 p.

Rapport-Gratuit.com

Gillespie, L. K. 1981. *Deburring technology for improved manufacturing*. 1st ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 646 p.

Gillespie, L. K. 2006. « Burr down [burr minimization] ». Cutting Tool Engineering, vol. 58, n° 12, p. 54-9.

Gillespie, L. K., et P. T. Blotter. 1976. « Formation and properties of machining burrs ». J. Eng. Ind.(Trans. ASME, B), vol. 98, n° 1, p. 66-74.

Gillespie, L. R. K. 1999. *Deburring and edge finishing handbook*. 1st ed. Dearborn, Mich Society of Manufacturing Engineers, US. 404 p.

Graham, Don. 2000. « Going dry ». Manufacturing Engineering, vol. 124, n° 1, pp.4.

Gwo-Lianq, Chern. 2006. « Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys ». International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, n° 12-13, p. 1517-25.

Hashimura, M., Y. P. Chang et D. Dornfeld. 1999. « Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting ». Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 121, p. 1.

Hashimura, M., et D. A. Dornfeld. 1999. « Proposal of a Burr Classification Method Based on the Formation Mechanisms in Face Milling.(2nd Report). Application of the Proposed Method for Side, Top, Entrance and Entrance Side Burrs ». Journal of the Japan Society for Precision Engineering, vol. 65, n° 7, p. 1002-1007.

Hashimura, M., K. Ueda, D. Dornfeld et K. Manabe. 1995. « Analysis of three-dimensional burr formation in oblique cutting ». CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 44, n° 1, p. 27-30.

Hassamontr, Jaramporn. 1998. « Edge finishing planning in milling ». Ph.D., United States -- California, University of California, Berkeley, 138 p. http://proquest.umi.com/pqdweb?did=732828551&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD.

Hewson, J. 1998. « Surface Roughness (Ra) Analysis in Dry Drilling of Ti-6Al-4V ». In *Research Reports* 1998/99, sous la dir. de David A. Dornfeld. p. 37-38. Berkeley: University of California, Laboratory for manufacturing automation. http://lma.berkeley.edu/research/1998/98_Hewson_2/index.html. Consulté le 11 mars 2010.

Jawahir, I. S., et C. Luttervelt. 1993. « Recent developments in chip control research and applications ». 43 rd General Assembly of CIRP, p. 659-693.

Kamguem. René.2010. « Qualité de surface et émission acoustique en fraisage haute vitesse des alliages d'aluminium », Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École de technologie supérieure, 169 p.

Kim, J., et D. Dornfeld. 2002. « Development of an analytical model for drilling burr formation in ductile materials ». UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Retrieved from: http://escholarship. org/uc/item/1cq5k23b. Consulté le 15 janvier 2010.

Kim, J., et D. A. Dornfeld. 2000. « Development of a drilling burr control chart for stainless steel ». Transactions-North American Manufacturing Research institution of SME, p. 317-322.

Kim, Jin-Soo. 2000. « Optimization and control of drilling burr formation in metals ». Ph.D., United States-California, University of California, Berkeley, 156 p. http:// proquest. umi.com/pqdweb?did=727937381&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD.

Kim, Jin-Soo, Sangkee Min et David A. Dornfeld. 2001. « Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts ». International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 41, n° 7, p. 923-936.

King, R. I., et R. L. Vaughn. 1984. « A synoptic review of high-speed machining from Salomon to the present ». High Speed Machining, p. 1-13.

Kishimoto, W., T. Miyake, A. Yamamoto, K. Yamanaka et K. Takano. 1981. « Study of Burr Formation in Face Milling. Conditions for the Secondary Burr Formation ». Bull. Jpn. Soc. Precis. Eng., vol. 15, n° 1, p. 51-52.

Klocke, F., et G. Eisenblätter. 1997. « Dry cutting ». CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 46, n° 2, p. 519-526.

Ko, S. L. 2000. « Measurement and effective deburring for the micro burrs in piercing operation ». International Journal the Korean Society of Precision Engineering, vol. 1, n° 1, p. 152-159.

Ko, S. L., J. E. Chang et G. E. Yang. 2003. « Burr minimizing scheme in drilling ». Journal of Materials Processing Tech., vol. 140, n° 1-3, p. 237-242.

Ko, S. L., et D. A. Dornfeld. 1991. « A study on burr formation mechanism ». Journal of Engineering materials and technology, vol. 113, p. 75.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Ko, Sung-Lim, et David A. Dornfeld. 1996. « Analysis of fracture in burr formation at the exit stage of metal cutting ». Journal of Materials Processing Technology, vol. 58, n° 2-3, p. 189-200.

Lan, M. S., et D. A. Dornfeld. 1982. « Experimental studies of tool wear via acoustic emission analysis ». Proceedings of the North American Manufacturing Research Con ference, vol. 10, p. 305—311.

Lee, Kiha. 2004. « Integrated precision machining and burr minimization in metals ». Ph.D., United States-California, University of California, Berkeley, 176 p. http://proquest.umi.com/pqdweb?did=795954721&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD. Consulté le 15 janvier 2010.

Lee, Kiha, et David A. Dornfeld. 2005. « Micro-burr formation and minimization through process control ». Precision Engineering, vol. 29, n° 2, p. 246-252.

Luo, M., G. Liu et M. Chen. 2008. « Mechanism of burr formation in slot milling Al-alloy ». International Journal of Materials and Product Technology, vol. 31, n° 1, p. 63-71.

Marksberry, P. W., et I. S. Jawahir. 2008. « A comprehensive tool-wear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing ». International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 48, n° 7-8, p. 878-886.

Metal removal. 2008. «Tooling catalogue». In *le site de Kennametal*. En line. https://www.kennametal.com/en-US/products_services/metalworking/brands/Metal_Removal_brands_page.jhtml;jsessionid=G3R04PNXJLEBLLAUCYOSFEVMCQFB0IV0. Consulté le 15 janvier 2010.

Nakayama, K., et M. Arai. 1987. « Burr formation in metal cutting ». CIRP Ann., vol. 36, n° 1, p. 33-36.

Narayanaswami, R., et D. Dornfeld. 1997. « Burr minimization in face milling: a geometric approach ». Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 119, p. 170.

Nguyen, Thomas L. 2000. « Development of an ultrasonic technique for the measurement of machining induced surface residual stresses ». Ph.D., United States -- Indiana, Purdue University, 224 p. http://proquest.umi.com/pqdweb?did=728848281&Fmt=7&clientId =46962&RQT=309&VName=PQD.

« Nickel and Nickel Alloys ». 2002. In *Metals Handbook Desk Edition*, sous la dir. de Davis, Joseph R., 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International®. http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp. Consulté le 15 janvier 2010.

Olvera, O., et G. Barrow. 1996. « An experimental study of burr formation in square shoulder face milling ». International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 36, n° 9, p. 1005-1020.

Pande, S. S., et H. P. Relekar. 1986. « Investigations on reducing burr formation in drilling ». International journal of machine tool design & research, vol. 26, n° 3, p. 339-348.

Park, Ilwhan. 1996. « Modeling of burr formation processes in metal cutting ». Ph.D., United States -- California, University of California, Berkeley, 157 p. http://proquest.umi.com/pqdweb?did=739439711&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD. Consulté le 15 janvier 2010.

Przyklenk, K., et M. Schlatter. 1986. « Deburring of Aluminium Workpieces. XI ». Aluminium, vol. 62, n° 12, p. 746-751.

Pylkkänen, J. 1984. « Cutting Forces in Face Milling ». Ph.D., University of Oulu, Department of Mechanical Engineering, 121. p.

Rangarajan, Arvind. 2005. « Optimization of face milling process: Tool path and process planning techniques ». Ph.D., United States-California, University of California, Berkeley, 182 p. http://proquest.umi.com/pqdweb?did=982819561&Fmt=7& clientId =46962&RQT=309&VName=PQD. Consulté le 15 janvier 2010.

Schafer, F. 1975. « Product design influences on deburring ». SME Technical Paper MR75, vol. 483.

Shaw, Milton Clayton. 2005. *Metal cutting principles*, 2nd ed. Coll. « Oxford series on advanced manufacturing ». New York: Oxford University Press, 651 p.

Shefelbine, W., et D. Dornfeld. 2004. « Influences on Burr Size During Face-Milling of Aluminum Alloys and Cast Iron ». UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Retrieved from: http://www.escholarship.org/uc/item/8rv3v19r. Consulté le 15 janvier 2010.

Shilling, Katharine Meghan. 2006b. « Mesoscale edge characterization ». Ph.D., United States -- Georgia, Georgia Institute of Technology, 178 p. http://proquest.umi.com/pqdweb?did=1115119001&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD. Consulté le 15 janvier 2010.

Sofronas, Anthony Steve. 1975. « The formation and control of drilling burrs ». D. Engr., United States. Michigan, University of Detroit Mercy, 130 p. http://proquest.umi.com/pqdweb?did=751923161&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD. Consulté le 15 janvier 2010.

Songmene, V., Masounave, J. et R. Khettabi, 2007. « Dry Machining and its Effects on Productivity, Costs, Environment and Machine-Shop Air Quality », in N. Tounsi and C. Fisher, proc. Of the 1st international conference on Sustainable Manufacturing, Aerospace manufacturing Technology centre, Montreal, Canada, 17-18 octobre 2007, p. 51-60.

Tripathi, S., et D. A. Dornfeld. 2006. « Review of geometric solutions for milling burr prediction and minimization ». Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 220, n° 4, p. 459-466.

Tseng, P. C., et I. C. Chiou. 2003. « The burrs formation prediction and minimization based on the optimal cutting parameters design method ». JSME International Journal Series C, vol. 46, n° 2, p. 779-787.

Wang, G. C., et C. Y. Zhang. 2004. « Mechanism of Burr Formation in Milling ». Key Engineering Materials, p. 278-281.

Wygowski, Walery. 2005. « Strategie de limitation de bavures pendant l'usinage ». Ph.D., Canada, Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 143 p. http://proquest.umi.com/pqdweb?did=932396831&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD. Consulté le 15 janvier 2010.

Yamakawa, J., S. Kawamura et S. Okuyama. 1989. « Effect of plastic zone near workpiece ends on grinding burrs (Model for calculating the stress distribution near work end and results) ». Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, vol. 23, n° 3, p. 224-229.

Zaghbani, I., V. Songmene, G. Kientzy et H. Lehuy.2009. « Evaluation of sustainability of mould steels based on machinability data ». International Journal of Machining and Machinability of Materials, vol. 7, no 1, p. 58-81.