

Stratégie de sélection des meilleures méthodes d'ébavurage

PAR

Abdellatif BOUZID

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 30 NOVEMBRE 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Bouzid Abdellatif, 2017



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Victor Songmene, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Pierre Kenné, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Yvan Beauregard, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Anh-Dung Ngô, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 07 NOVEMBRE 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Victor Songmene ainsi qu'à mon codirecteur, le professeur Jean-Pierre Kenné de m'avoir accepté comme leur étudiant de maîtrise, pour leurs disponibilités, leurs précieuses orientations, leurs encouragements et leur soutien financier m'ayant permis de mener ce travail jusqu'au bout.

Je tiens de remercier aussi le membre de jury, le professeur Yvan Beauregard qui a eu la bienveillance de m'honorer en président de jury ainsi qu'au professeur Anh-Dung Ngô pour avoir accepté d'évaluer ce travail en tant que membre de jury.

J'exprime ma gratitude approfondie à tous les membres de famille, en particulier à mon cher père Hamed Bouzid et ma chère mère Asia Labidi qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager pendant ce travail, je leur remercie énormément pour leurs patiences, leurs efforts et leurs sacrifices. Je remercie également mes chers frères Ramzi et Chiheb pour leurs encouragements, un grand merci à mon cher frère Aymen pour son appui financier sans lequel je n'aurais pu continuer mon chemin.

J'adresse également mes sincères remerciements à mon cher ami Dr. Omar Miladi pour son soutien financier et moral et ses précieux conseils. Un grand merci à tous mes amis qui m'ont permis de me changer les idées et de profiter des nombreux loisirs et activités de Montréal. Je tiens à donner une mention spéciale pour mes amis Achraf, Oussama, Yacine et Ali et son épouse Marwa pour leur soutien moral régulier. Je tiens à remercier également Mouhamed Zemzem et son épouse Emna, Oussama Chaieb, Oussama ben Tanfous et Aymen Dridi pour leurs aides précieuses.

Mes reconnaissances à mes collègues au laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes (LIPPS) de l'ÉTS au sein duquel j'ai travaillé dans une ambiance conviviale.

Je remercie tous ceux-là, qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail, trouvez en ces mots, ma profonde gratitude.

STRATÉGIE DE SÉLECTION DES MEILLEURES MÉTHODES D'ÉBAVURAGE

Abdellatif BOUZID

RÉSUMÉ

Les industrielles dans la plupart des domaines et spécialement dans le domaine aéronautique souffrent d'importants obstacles à fabriquer des pièces d'excellente finition : la formation des bavures, le choix de méthode d'ébavurage inappropriée, le manque de données sur l'ébavurage. Les bavures sont nuisibles à la fabrication des pièces, leurs existences réduit la qualité de l'ajustage des composants dans un assemblage, 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, et également réduit la durée de vie des outils, ce qui réduit significativement la productivité. Éliminer les bavures ou limiter leur génération est par conséquent indispensable.

Il existe une grande variété de procédés d'ébavurage et finition de surface ce qui rend difficile de déterminer parmi eux, lequel est le procédé le mieux approprié pour satisfaire les exigences de qualité, tout en restant concurrentiel. Pour cet effet, le but de cette étude est de développer une stratégie permettant la sélection de la meilleure méthode d'ébavurage pour répondre aux exigences industrielles et contribuer à leurs évolutions.

Pour atteindre notre objectif, une étude approfondie de la littérature a été menée, afin d'établir une base de données regroupant les informations nécessaires concernant les bavures, l'ébavurage et les données de différentes expériences effectuées auparavant dans cette fin. En nous basant sur ces données, nous avons déterminé les critères de choix des méthodes d'ébavurage (matériaux de bavure, hauteur, position, etc.). Ensuite, un programme sous Matlab a été développé permettant la sélection de la méthode d'ébavurage appropriée pour une application donnée en s'appuyant sur les critères préalablement déterminés. Un modèle de détermination et répartition des charges sur les procédés d'ébavurage a été fait.

Enfin, une interface graphique a été conçue pour faciliter la communication entre le programme et l'utilisateur. Sélectionner le meilleur procédé d'ébavurage et finition de surfaces permet d'avoir une meilleure qualité de pièce, ainsi que réduire le coût total de fabrication de pièce.

Mots clés : usinage, qualité des pièces, méthodes d'ébavurage, bavure, coût.

STRATEGY FOR SELECTING THE BEST METHODS OF DEBURRING

Abdellatif BOUZID

ABSTRACT

Manufacturers in the aeronautical field, as in many other fields, encounter important obstacles in making parts with excellent finishing: the formation of burrs, the lack of data on deburring and the use of inappropriate deburring method. Burrs are undesirable in the manufacture of parts, their existences reduce the quality of the fitting of components in an assembly, the dimensional and surface quality of the part, can cause injuries to workers during handling, reduces the life of the components in operation, and also reduces tool life, which significantly reduces productivity. Eliminating burrs or limiting their generation is therefore of great importance.

There are a wide variety of deburring and surface finishing processes which makes it difficult to determine among them which process is best suited to meet quality standards while remaining competitive. For this purpose the aim of this study is to develop a strategy allowing the selection of the best deburring method to meet the industrial requirements and contribute to their evolution.

To achieve our objective a thorough study of the literature was carried out, in order to establish a database gathering the necessary information concerning burrs and deburring and the data from different experiments carried out previously for this purpose. Based on this data base, we have determined the criteria for choosing deburring methods (burr material, height, position, etc.). Then a program under Matlab was developed allowing the selection of the method of deburring suitable for a given application based on the previously determined criteria. A model for the determination and distribution of loads on deburring processes has been made.

Finally, a graphical interface has been designed to facilitate communication between the program and the user. Choosing the suitable deburring and surface finishing process not only results in better parts quality but also reduces the total cost of manufacturing parts.

Key words: Machining, part quality, burr, deburring quality and cost.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Formation de bavure	3
1.2.1 Définition de bavure	3
1.2.2 Mécanisme de formation.....	5
1.2.3 Classification des bavures.....	8
1.2.4 Mesure de bavure.....	12
1.2.5 Propriété mécanique de bavure.....	13
1.3 Ébavurage	15
1.3.1 Introduction.....	15
1.3.2 Qualité d'ébavurage	15
1.3.3 Classification des procédés d'ébavurage	17
1.4 Principaux procédés d'ébavurage	20
1.4.1 Méthode d'ébavurage manuelle.....	20
1.4.2 Ébavurage par brosse	22
1.4.3 Ébavurage par sablage	23
1.4.4 Ébavurage par jet abrasif	25
1.4.5 Finition de masse	25
1.4.6 Coupe mécanisée : usinage CNC et ébavurage robotisé.....	27
1.4.7 Broche de finition	30
1.4.8 Ébavurage électrochimique.....	31
1.5 Coût d'ébavurage	32
1.6 Sélection des méthodes d'ébavurage	37
1.7 Conclusion	41
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	43
2.1 Introduction.....	43
2.2 Construction d'une base de données.....	43
2.3 Conception d'un outil d'aide à la décision	43
2.4 Conception d'une interface graphique	44
2.5 Établissement d'un modèle d'optimisation d'allocation de ressource.....	44
2.6 Conclusion	44
CHAPITRE 3 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES FACTEURS TECHNOLOGIQUE SUR LA FORMATION DE BAVURE.....	45
3.1 Introduction.....	45
3.2 Influence des facteurs technologiques sur la formation des bavures	45
3.2.1 Paramètres liés à la pièce	47
3.2.2 Conditions de coupe et lubrification	51

3.2.3	Paramètres d'outil et usures	55
3.2.4	Paramètres liés à la machine, son environnement et aux stratégies de coupe	61
3.3	Caractérisation des bavures.....	62
3.3.1	Forme de la bavure.....	62
3.3.2	Dimension de bavure	63
3.3.3	Localisation de bavure	67
3.4	Critères de sélection de méthode d'ébavurage proposés	68
3.5	Conclusion	76
CHAPITRE 4	STRATÉGIE DE SÉLECTION DES MEILLEURES MÉTHODES D'ÉBAVURAGE.....	77
4.1	Introduction.....	77
4.2	Conception d'outil d'aide à la décision	77
4.2.1	Stratégie de sélection	77
4.2.2	Exemple d'application	80
4.2.3	Interface graphique de communication.....	86
4.3	Optimisation de l'allocation de ressource.....	89
4.3.1	Formulation de problème de sélection.....	89
4.3.2	Modélisation de problème de sélection.....	90
4.3.3	Résolution de modèle d'optimisation	92
4.3.4	Analyse de sensibilité	93
4.4	Conclusion	100
CONCLUSION.....		101
RECOMMANDATIONS		103
ANNEXE I	CONSIDÉRATION RELATIVE À LA SÉLECTION DES ÉQUIPEMENTS DE FINITION	105
ANNEXE II	PROPRIÉTÉS DES MÉTHODES D'ÉBAVURAGE LES PLUS UTILISÉES.....	109
ANNEXE III	APERÇU SUR LES EXIGENCES DE QUALITÉ D'ARÊTE	111
ANNEXE IV	LES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX, SANTÉS ET SÉCURITÉS, D'ÉBAVURAGE	113
ANNEXE V	PROGRAMME DE SÉLECTION SUR MATLAB	115
ANNEXE VI	PROGRAMME D'AFFICHAGE	121
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		123

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Récapitulation de différents types de bavure selon l'opération.....	11
Tableau 1.2	Propriété de matériau relié à la taille de bavure.....	14
Tableau 1.3	Les quinze procédés d'ébavurage les plus utilisés dans le monde	19
Tableau 1.4	Liste de différents types d'outil d'ébavurage manuel (Tiabi, 2010).....	21
Tableau 1.5	Coût typique de différentes méthodes d'ébavurages (en \$ U.S).	36
Tableau 1.6	Regroupement de méthodes d'ébavurage.....	40
Tableau 3.1	Classification industrielle des matériaux à usiner.....	55
Tableau 3.2	Description des revêtements de titane.....	56
Tableau 3.3	Localisation des bavures d'usinage	67
Tableau 3.4	Performance des méthodes d'ébavurages avec le matériau de la pièce. ...	69
Tableau 3.5	Performance des méthodes d'ébavurages avec l'épaisseur de bavure.	70
Tableau 3.6	Performance des méthodes d'ébavurages avec la hauteur de bavure.....	71
Tableau 3.7	Performance des méthodes d'ébavurages avec la hauteur de bavure	72
Tableau 3.8	Performance des méthodes d'ébavurages avec la hauteur de bavure	73
Tableau 3.9	Performance des méthodes d'ébavurages avec différente application	74
Tableau 3.10	Performance des méthodes d'ébavurages avec différente application	75
Tableau 4.1	Fixation des paramètres d'entrées	93
Tableau 4.2	Variation de coût.....	94
Tableau 4.3	Variation de temps	94
Tableau 4.4	Correspondance de machine M1 avec les produits P1 et P2	97
Tableau 4.5	Correspondance de machine M1 avec les produits P1, P2 et P3	98
Tableau 4.6	Correspondance de machines M1 et M2.....	99

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Définition de bavure par ISO 13175 4
Figure 1.2	Exemple des bavures (J. C. Aurich et al., 2009)..... 4
Figure 1.3	Mécanisme de formation de la bavure (Tiabi, 2010)..... 5
Figure 1.4	Mécanisme de formation de bavure des matériaux..... 6
Figure 1.5	Formation de bavure en rainurage 7
Figure 1.6	Géométrie de bavure en meulage..... 7
Figure 1.7	Formation de bavure en perçage (Tiabi, 2010)..... 8
Figure 1.8	les quatre types des bavures d'usinage 9
Figure 1.9	Types des bavures de différentes opérations d'usinage..... 10
Figure 1.10	Méthodes de mesure et détection de bavure (J. C. Aurich et al., 2009) 13
Figure 1.11	Les classes de qualités des arêtes (Schäfer et al., 1975). 16
Figure 1.12	Principaux procédés d'ébavurage (L. K. Gillespie, 1999) 18
Figure 1.13	Ébavurage manuel, tiré de (youtube) 20
Figure 1.14	Ébavurage par brosse, tiré de (youtube) 22
Figure 1.15	Outil de sablage,..... 24
Figure 1.16	Finition par vibration (Tiabi, 2010). 26
Figure 1.17	Tonneau d'ébavurage, 27
Figure 1.18	les étapes de fonctionnement de l'outil <i>Orbitool</i> 28
Figure 1.19	Ébavurage robotisé,..... 30
Figure 1.20	Broche de finition (Tiabi, 2010) 31
Figure 1.21	Influence des paramètres de la bavure sur le choix 39
Figure 1.22	Caractéristiques relatives du rayon d'arrondi (r_k) 40

Figure 3.1	Influence des facteurs technologiques sur la formation des bavures	47
Figure 3.2	Influence de la géométrie de la pièce sur la taille	49
Figure 3.3	Effet du durcissement du matériau sur la taille des bavures	50
Figure 3.4	Influence de la vitesse d'avance	51
Figure 3.5	Hauteur des bavures en fonction de la variation	52
Figure 3.6	Influence de la géométrie de l'outil sur les bavures de perçage.	57
Figure 3.7	Usure de la pointe de l'outil. Tirée de.....	59
Figure 3.8	Relation entre la formation	60
Figure 3.9	Classification géométrique et visuelle des bavures.	62
Figure 3.10	Hauteur de la bavure après le fraisage de finition.....	63
Figure 3.11	Influence de l'épaisseur de coupe h	63
Figure 3.12	Caractéristiques dimensionnelles de la bavure d'usinage.	64
Figure 3.13	Caractérisation dimensionnelle de la bavure d'usinage.	65
Figure 3.14	Mesure de bavure (J. C. Aurich et al., 2009)	66
Figure 3.15	La taille de bavure selon ISO 13715.....	66
Figure 3.16	Critères de choix proposés	68
Figure 4.1	Stratégie de sélection de méthode d'ébavurage	79
Figure 4.2	La capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer l'aluminium	80
Figure 4.3	La capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer	81
Figure 4.4	La capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer	82
Figure 4.5	la capacité des méthodes d'ébavurage	83
Figure 4.6	la capacité des méthodes d'ébavurage	84
Figure 4.7	la capacité des méthodes d'ébavurage à réaliser l'application	85
Figure 4.8	Les différentes sections d'interface de sélection	86

Figure 4.9	Sélection de critères de choix	87
Figure 4.10	Exécution de programme de recherche.....	87
Figure 4.11	Affichage des résultats.....	88
Figure 4.12	Modification des critères de choix.....	88
Figure 4.13	Interface graphique de modèle d'optimisation	92
Figure 4.14	Répartition de produit P1	93
Figure 4.15	Répartition de produit P1 sur les machines M1, M2 et M3	94
Figure 4.16	Répartition de produit P1 sur les machines M1, M2 et M3	95
Figure 4.17	Comportement de coût total.....	96
Figure 4.18	Répartition des pièces sur les différentes machines.....	97
Figure 4.19	Comportement de modèle avec le scénario 1	98
Figure 4.20	Comportement de modèle avec le scénario 2	99
Figure 4.21	Comportement de modèle avec le scénario 3	100

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CNC	Machine à commande numérique
TiN	Titanium nitride
TiCN	Titanium carbon nitride
TiAlN	Titanium aluminium nitride
PVD	Dépôt physique en phase vapeur
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur
MTCVD	Dépôt chimique en phase vapeur à moyenne température
CBN	Nitrure de bore cubique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

F_f	La force d'avance (N)
a	Profondeur de coupe (mm)
f	Vitesse d'avance (m/min)
t	L'épaisseur de bavure (mm)
H	Hauteur de bavure (mm)
r_k	Rayon de la bavure (mm)
b_k	Épaisseur de la bavure (mm)
h_k	Hauteur de la bavure (mm)
n	Nombre total des pièces à ébavurer.
P_i	Ensemble des pièces à ébavurer.
N_{ij}	Type des pièces à ébavurer.
M_{ij}	Machine sélectionnée pour effectuer l'ébavurage.
V_{ij}	Volume de production maximale d'une machine.
C_{ij}	Coût d'ébavurage minimal d'une pièce.
V_c	Vitesse de coupe
T	Durée de vie de l'outil
n et C_t	Constantes
A	L'angle de bord à la bavure
α	L'angle du bord de la pièce
b_f	L'épaisseur de la racine de la bavure
b_g	L'épaisseur de la bavure
h_0	La hauteur de la bavure
r_f	Le rayon de la bavure

INTRODUCTION

Aujourd'hui, en raison de la concurrence mondiale, les industries manufacturières doivent fournir des produits de haute qualité et à prix abordable en respectant les délais pour rester compétitifs. Les pièces mécaniques de bonne qualité incluent celles ayant une meilleure finition et texture de surface, des précisions de dimension et de forme, une contrainte résiduelle réduite et des pièces sans bavure. La formation de bavures est l'un des phénomènes indésirables les plus fréquents qui se produisent dans les opérations d'usinage, ce qui réduit la qualité des pièces usinées et celle des assemblages. Par conséquent, il est souhaitable d'éliminer les bavures ou de réduire l'effort nécessaire pour les enlever.

Généralement, pour obtenir une pièce propre (sans bavure), le passage d'une opération d'ébavurage après l'usinage est nécessaire. Toutefois, selon (L. K. Gillespie, 1981), les opérations d'ébavurage sont longues et coûtent cher, elles sont considérées comme des opérations non productives, sans aucune valeur ajoutée. (L. K. Gillespie, 1999) dit que les opérations d'ébavurage peuvent atteindre 30% du coût total de l'usinage d'une pièce, spécialement quand les pièces sont petites ou les bavures sont épaisses, et que l'accès aux bavures est difficile. Pour remédier à ces problèmes, il convient de bien connaître le domaine technico-économique des différents procédés d'ébavurage pour choisir la solution adaptée à la configuration des pièces, à la forme des bavures et à leur accessibilité tout en respectant l'intégrité des surfaces et les caractéristiques dimensionnelles des pièces.

Il existe plusieurs informations et données relatives à l'ébavurage dans le milieu industriel, ces informations sont très utiles dans l'amélioration de qualité de surface de la pièce, ainsi que l'optimisation des méthodes d'ébavurage. Malgré leurs importances, il n'existe pas un outil qui permet le stockage et la protection de ces données précieuses. D'où l'idée de ce projet, nous avons commencé par la collecte des données afin d'établir une base de données solide est fiable, réuni les informations nécessaires à la bavure et aux méthodes d'ébavurage. En deuxième étape, nous étudions le mécanisme de formation de bavure et de caractéristique de différentes méthodes d'ébavurage dans le but de proposer des critères de choix de

méthodes d'ébavurage. Par la suite et en nous basant sur la base de données préalablement établie, nous développons un programme sous Matlab permettant la sélection des meilleures méthodes d'ébavurage pour une application donnée. Ensuite nous allons établir un modèle d'optimisation afin d'assurer la bonne répartition des pièces sur les machines et minimiser le coût d'ébavurage. Enfin nous concevons une interface graphique pour faciliter la communication entre le programme et l'utilisateur.

Ce rapport est constitué de 3 chapitres, suivi d'une conclusion finale. Dans le premier chapitre, une revue de littérature sur le mécanisme de formation des bavures d'usinage et les caractéristiques des méthodes d'ébavurage est bien détaillée. Le chapitre 2 est dédié à étudier les facteurs qui influence la formation de bavure et leur caractérisation afin de proposer des critères de choix des méthodes d'ébavurage. Le chapitre 3 est consacré au développement d'une stratégie de sélection de meilleures méthodes d'ébavurage, ainsi que l'optimisation de coût d'ébavurage.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Les bavures sont générées par tous les procédés de fabrication, et ce phénomène est indésirable et inévitable, ils causent de nombreux problèmes dans l'assemblage, l'inspection, l'automatisation des processus, l'interférence avec l'écoulement du fluide, le fonctionnement des composants de précision et sont une cause fréquente de blessures chez les travailleurs. En plus quand leur taille est très petite, le problème de bavure devient plus compliqué à résoudre. Pour aborder ce problème, plusieurs méthodes d'ébavurage ont été introduites, parmi ces méthodes on trouve l'ébavurage mécanique, manuel, ultrasonique, magnétique, et électrochimique. Cependant, ces méthodes ont quelques lacunes, telles que les dommages mécaniques au cours d'usinage, des changements dans les propriétés du matériau de la surface finie, et la nécessité d'un traitement ultérieur pour éliminer les résidus chimiques. Le choix adéquat de la méthode convenable d'ébavurage aide beaucoup à minimiser les effets néfastes d'ébavurage. Cependant, cela demande beaucoup de connaissance sur le mécanisme de formation de bavure, la caractérisation de bavure, les exigences dimensionnelles de la pièce, les limitations de procédés d'ébavurages, les critères de choix des procédés d'ébavurage appropriés, etc.

1.2 Formation de bavure

1.2.1 Définition de bavure

Une bavure c'est le reste rugueux du matériau en dehors de la forme géométrique idéale d'un bord externe, résidu d'usinage ou d'un procédé de formage (ISO, 2000), non désiré, mais inévitable.

L'ISO 13715 définit l'arête d'une pièce à usiner comme bavure si elle a un surplus supérieur à zéro (Figure 1.1).

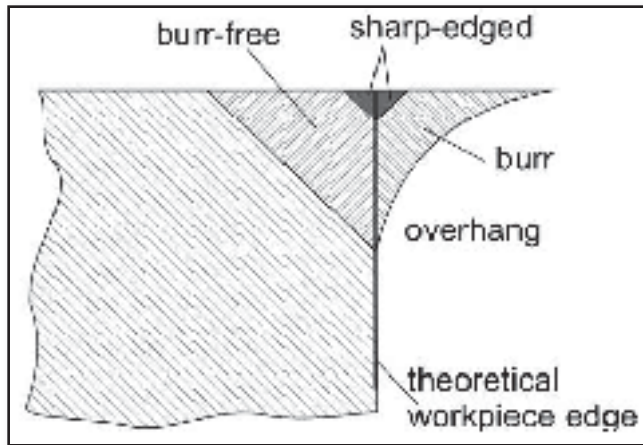


Figure 1.1 Définition de bavure par ISO 13175
(J. C. Aurich et al., 2009)

(Schäfer, Brauner, & Breuninger, 1975) donnent une des premières descriptions techniques d'une bavure. Ils décrivent une bavure comme la partie d'une pièce qui est produite par des procédés de fabrication sur un bord ou une surface et qui se trouve en dehors de la géométrie désirée.

La définition de Gillespie de la bavure est limitée à des procédés de coupe et de cisaillement. Une bavure produite par ces opérations comprend tous les matériaux étendant au-delà de l'intersection théorique des deux surfaces qui entoure la bavure. La référence dans ce cas est l'intersection théorique des deux surfaces et non la surface désirée. En outre, la définition de Gillespie comprend les bavures qui se trouvent à l'intérieur de l'intersection théorique comme le montre la Figure 1.2.

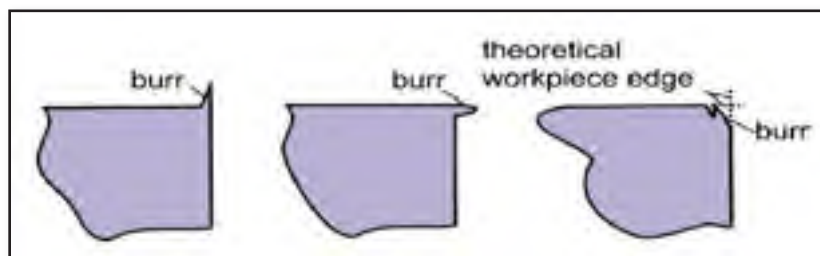


Figure 1.2 Exemple des bavures (J. C. Aurich et al., 2009)

1.2.2 Mécanisme de formation

La bavure est définie comme une projection indésirable du matériau formée à la suite de déformation plastique au cours d'une opération d'usinage, formage, découpage ou cisaillement (L. K. Gillespie, 1981).

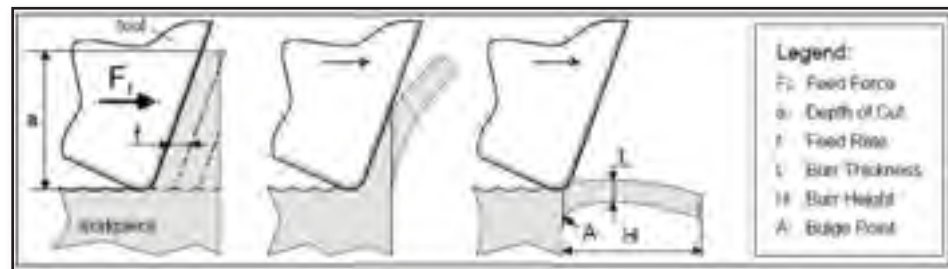


Figure 1.3 Mécanisme de formation de la bavure (Tiabi, 2010)

(Beier, 1999) et (Thilow et al., 2005) ont observé qu'au cours des opérations d'usinage, les bavures se produisent toujours quand l'outil de coupe quitte le matériau, et se produit à l'entrée et à la sortie d'outil. Donc ils ont conclu que :

- Le matériau tend à former de plus large bavure avec l'augmentation de la ductilité;
- La formation de bavure diminue si le matériau se déforme dans le même sens de la force de coupe due à la géométrie de la pièce et aux conditions d'usinage.

(L. K. Gillespie, 1999) a fait des recherches intensives sur les mécanismes de formation de bavure. Il a trouvé six processus physiques qui sont responsables de formation des bavures :

1. Flux latéral de matériau, se produit quand la pièce soumise sous compression;
2. Flexion de matériau (comme l'extension de copeau);
3. Cisaillement du copeau de la pièce;
4. La fondation de matériaux;
5. Découpage incomplet;
6. Flux de matériaux dans les fissures.

Les trois premiers processus décrivent la transformation plastique de matériau de la pièce. La fondation de matériau, comme dans les procédés de moulage par exemple, produit des

bavures sur les arêtes de la pièce à cause de la solidification de matériau. Le sixième processus concerne les bavures produites par moulage ou formage primaire.

(Hassamontr & Dornfeld, 1999) considèrent que le mécanisme de formation de bavure n'est pas affecté seulement par les conditions de coupe, la géométrie de la pièce et l'outil de coupe, mais également par les propriétés mécaniques de la pièce.

Par la suite l'illustration de quelques exemples de mécanisme de formation de bavure de différents procédés d'usinage.

En cas de Tournage :

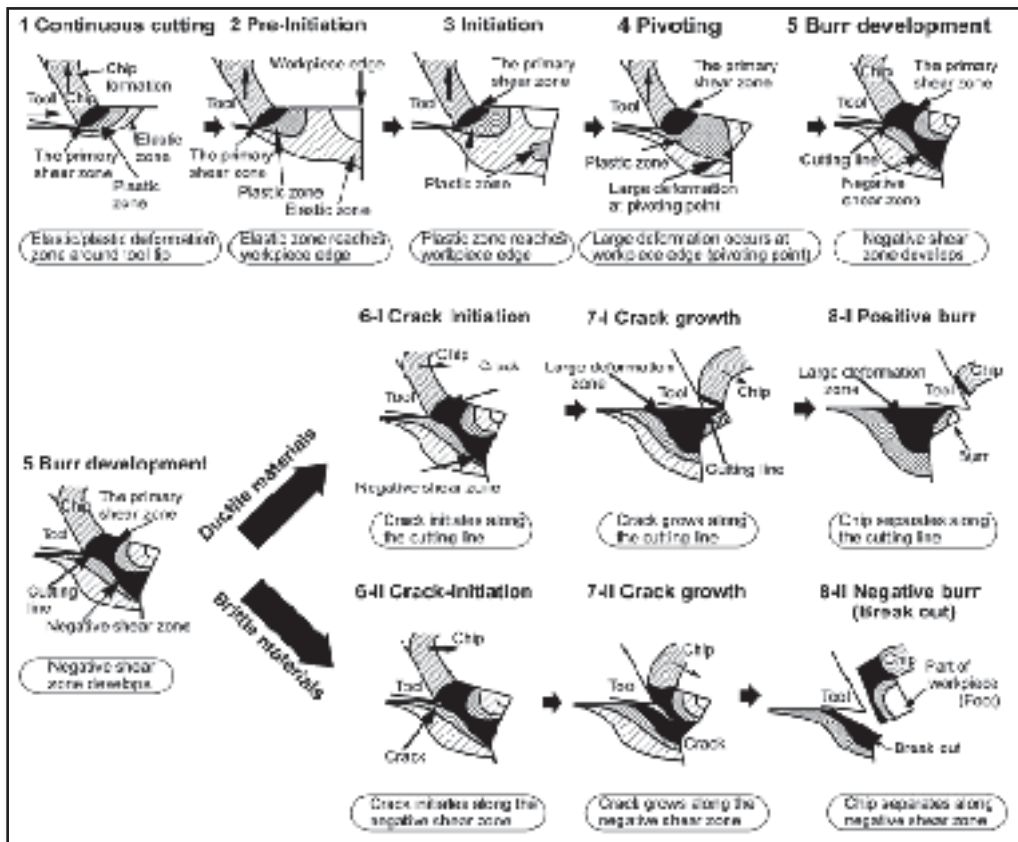


Figure 1.4 Mécanisme de formation de bavure des matériaux ductile et fragile (Niknam, 2013)

En cas de Rainurage :

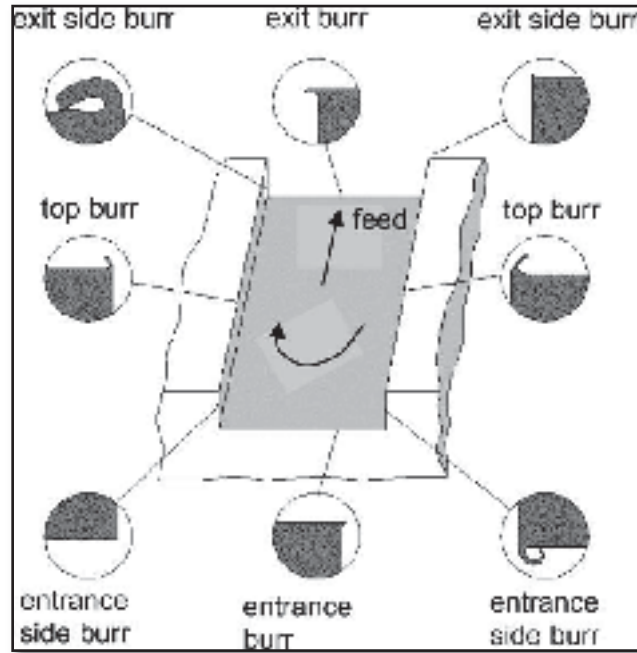


Figure 1.5 Formation de bavure en rainurage
(J. C. Aurich et al., 2009)

En cas de Meulage :

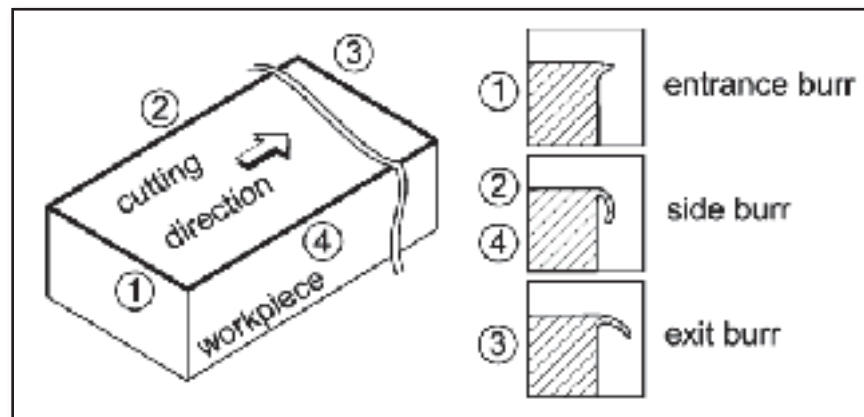


Figure 1.6 Géométrie de bavure en meulage
(J. C. Aurich et al., 2009)

En cas de Perçage:

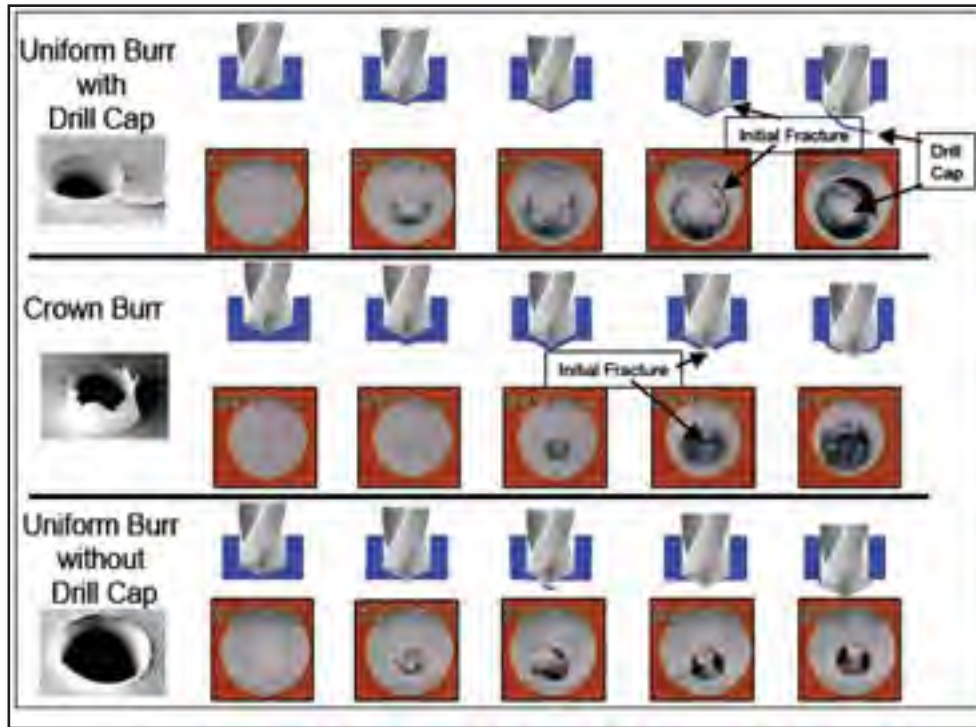


Figure 1.7 Formation de bavure en perçage (Tiabi, 2010)

1.2.3 Classification des bavures

Aujourd'hui, il existe plusieurs différentes descriptions de bavures selon l'application, le processus de fabrication, la forme, le mécanisme de formation et les propriétés des matériaux.

(L. K. Gillespie, 1981) est parmi les premiers qui ont décrit les différents types de bavure, il a classifié les bavures selon leurs mécanismes de formation. La figure 1.8 présente les types de bavures qu'il a décrits :

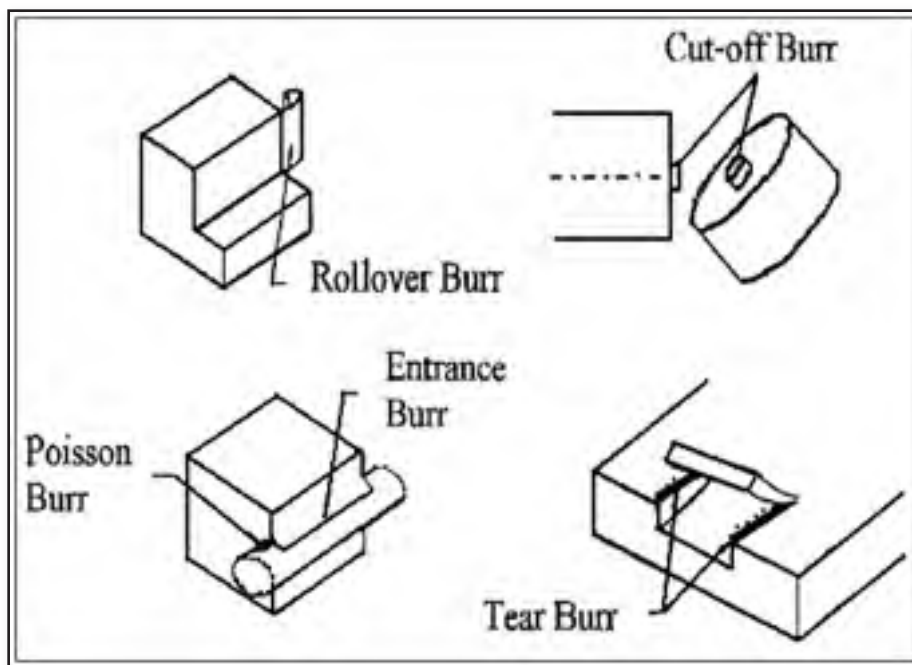


Figure 1.8 les quatre types des bavures d'usinage classifiés par Gillespie (Tiabi, 2010)

- *Poisson burr* : est le résultat d'une déformation latérale du matériau quand 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* : est essentiellement un copeau qui est fléchi plutôt que coupé, ce qui donne une bavure relativement importante. Ce type de bavure est également connu comme une bavure de sortie, parce qu'il est habituellement formé à la fin d'une coupe.
- *Tear burr* : est le résultat de la déchirure du matériau détachée de la pièce plutôt que de son cisaillement. Il est similaire à la bavure formée dans les opérations de poinçonnage.
- *Cut-off burr* : résulte de la séparation de la pièce à partir de la matière première avant la fin de la coupe, ce processus est couramment rencontré dans le cas du dressage.

(Nakayama & Arai, 1987) ont classifié la formation de bavures dans les différents procédés d'usinage en considérant l'arête de coupe de l'outil lié à la formation de bavure correspondante ainsi que le fléchissement et déchirement du copeau.

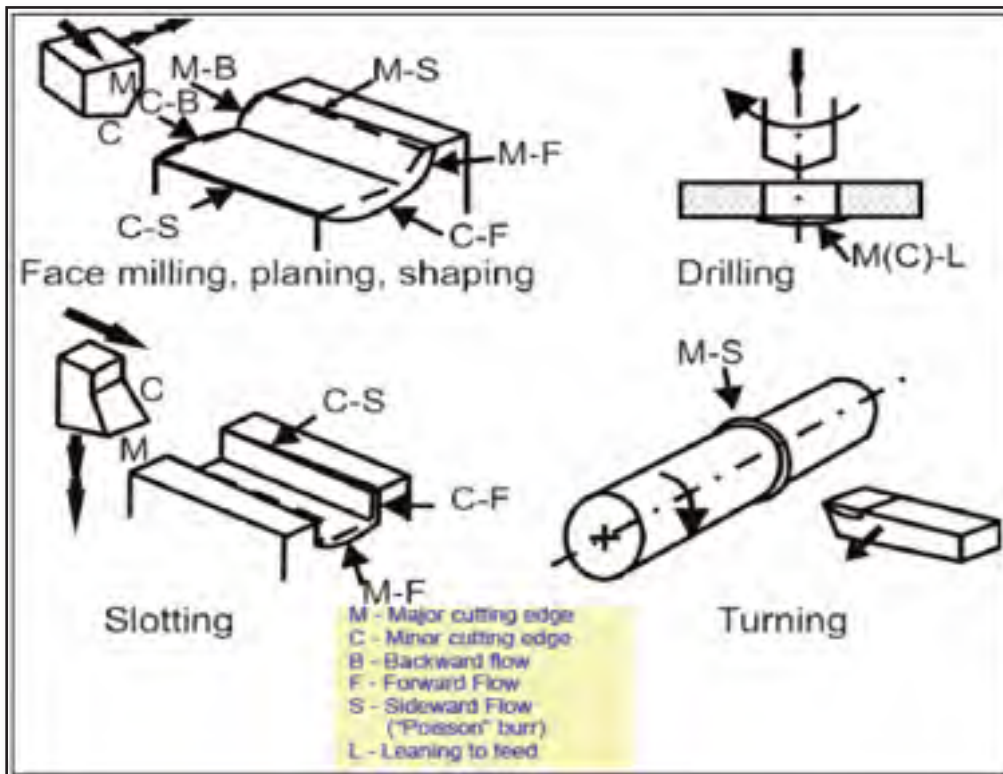


Figure 1.9 Types des bavures de différentes opérations d'usinage (Tiabi, 2010)

La classification présentée par (Kishimoto, 1981) se résume brièvement dans deux types de bavures : bavures primaires et bavures secondaires.

D'après (J. C. Aurich et al., 2009) les premières et dernières bavures sont connues sous le nom de bavures primaires et secondaires respectivement. (Beier, 1999) a décrit une bavure primaire comme un matériau restant au bord d'une pièce après ébavurage, elles sont considérées comme plus grandes en taille que les bavures secondaires. Selon (J. C. Aurich et al., 2009) les bavures secondaires sont formées après la rupture des bavures primaires. Cependant, ils sont plus petits que la profondeur de coupe.

Tableau 1.1 Récapitulation de différents types de bavure selon l'opération

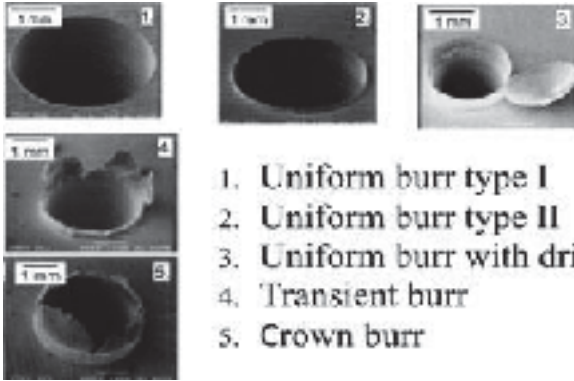
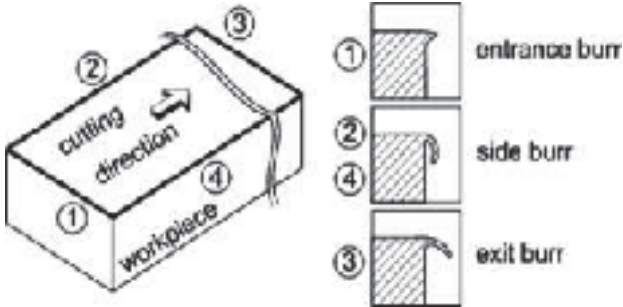
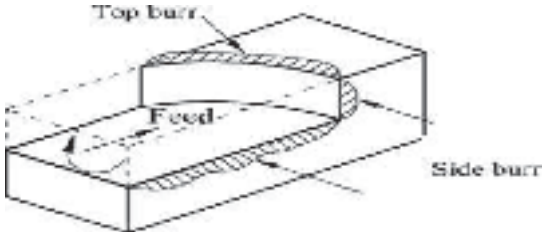
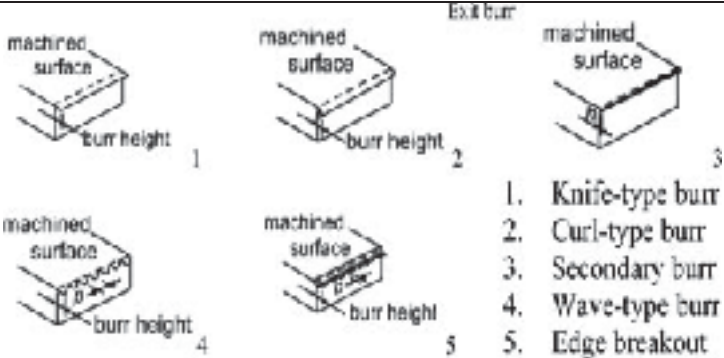
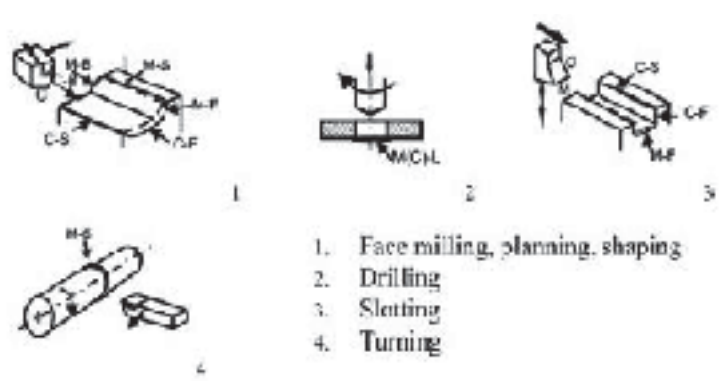
Opération	Auteur	Type de bavure
Perçage	(J. Kim, Min, & Dornfeld, 2001)	 <ol style="list-style-type: none"> 1. Uniform burr type I 2. Uniform burr type II 3. Uniform burr with drill cap 4. Transient burr 5. Crown burr
Meulage	(Barth, Dollmeier, & Warnecke, 2001)	 <p>entrance burr side burr exit burr</p>
fraisage	(Hashimura, Chang, & Dornfeld, 1999)	 <p>Top burr Feed Side burr</p>
Surfaçage	(Gwo-Lianq Chern, 2006)	 <ol style="list-style-type: none"> 1. Knife-type burr 2. Curl-type burr 3. Secondary burr 4. Wave-type burr 5. Edge breakout

Tableau 1.1 (Suite)

Opération	Auteur	Type de bavure
Divers	(Nakayama & Arai, 1987)	 <p>1. Face milling, planing, shaping 2. Drilling 3. Slitting 4. Turning</p>

1.2.4 Mesure de bavure

En raison du rôle essentiel de la qualité des produits, plus d'attention a été accordée aux méthodes de mesure de la taille de bavure en accordant une attention particulière à la caractérisation géométrique des bavures. La sélection correcte des méthodes de mesure de la taille de bavure dépend d'un certain nombre de facteurs tels que le niveau de qualité souhaité et la précision de mesure demandée.

Trois principales méthodes de mesure de bavure souvent utilisées sont les suivantes :

- Méthode mécanique ;
- Méthode électrique ;
- Méthode optique.

La figure 1.10 résume les différentes méthodes de mesure de bavure :

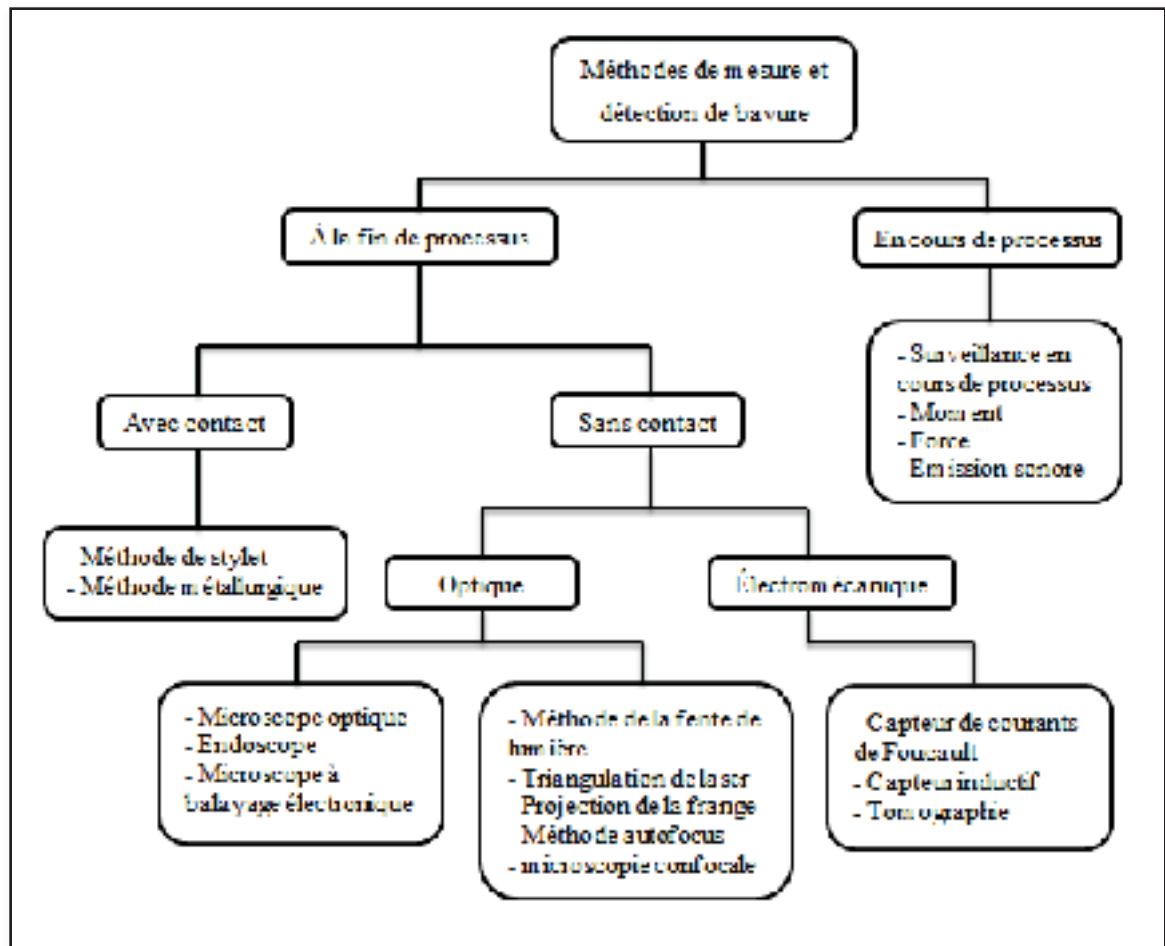


Figure 1.10 Méthodes de mesure et détection de bavure (J. C. Aurich et al., 2009)

1.2.5 Propriété mécanique de bavure

Les propriétés mécaniques des bavures changent à cause des transformations que le matériau a subies lors de l'opération de l'usinage.

Selon (Dornfeld, 2002), la caractérisation mécanique des bavures est très difficile à cause de manque de données relatives aux propriétés mécaniques du matériau.

La détermination de comportement du matériau contre des variations de la température, l'état réel des contraintes et le niveau d'homogénéité du matériau est difficile. Afin de caractériser la bavure, il faut déterminer les propriétés mécaniques de base de ce dernier, qui constitue les éléments suivants : la dureté, la résistance, la malléabilité, la ténacité, la ductilité et

également la rugosité des bavures. La connaissance des propriétés mécaniques des bavures peut aider à sélectionner le moyen d'ébavurage approprié.

Généralement les recherches sont concentrées sur la limitation des bavures et la réduction de leur taille, par contre ils ont ignoré la caractérisation des bavures malgré son importance.

(L. K. Gillespie, 1999), à trouver dans ces études qu'il y'a deux propriétés mécaniques qui influencent directement sur la taille de bavure, la ductilité et le coefficient d'écroutissage de matériau de la pièce. Le tableau suivant représente la relation entre les propriétés mécaniques de quelques matériaux et la tendance de bavure.

Tableau 1.2 Propriété de matériau relié à la taille de bavure.
Tiré de (L. K. Gillespie, 1999)

Matériau	Limite d'élasticité (ksi)	Résistance à la traction (ksi)	Allongement %	Coefficient d'écroutissage	Tendance de bavure
Fonte	55	80	6	0	Faible
Acier 1020	30	55	25	0.22	Moyen
303 Se inoxydable	60	180	50	0.56	Élevé
Kovar (Alliage nickel-cobalt)	50	105	72	0.42	Élevé
Hiperco 50	57	57	0.87	0	Faible
BeCu	95	102	26	0.10	Moyen
Aluminium 2024	11	27	20	0.15	Moyen
Cuivre doux	10	32	45	0.50	Élevé
Acier 4340	69	108	22	0.09	Moyen
Vanadium (Recuit)	66	78	20	0.35	Élevé

1.3 Ébavurage

1.3.1 Introduction

Les bavures représentent un grand obstacle devant la finition des pièces, l'enlèvement de ces bavures ou bien **l'ébavurage** est considéré comme un travail sans valeur ajoutée.

D'après (L. K. 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, pour avoir une meilleure qualité de surface, il est nécessaire de combiner plusieurs opérations d'ébavurage.

1.3.2 Qualité d'ébavurage

Il y a diverses normes standards pour l'évaluation de la qualité des arêtes des pièces mécaniques et pour le classement des bavures générées par un procédé de mise en forme. Ci-dessous, les propositions déjà existantes pour le classement des arêtes des pièces mécaniques :

La classification de (Schäfer et al., 1975) prévoit neuf classes de qualité d'ébavurage. La limite de classe est déterminée quantitativement en utilisant des séries de nombres préférés afin d'obtenir un espacement homogène et de maintenir le nombre de classes petit. Cela garantit que la classification est applicable dans la pratique. De plus, les paramètres de mesure de la qualité d'ébavurage sont introduits dans quatre quadrants d'un système de coordonnées.

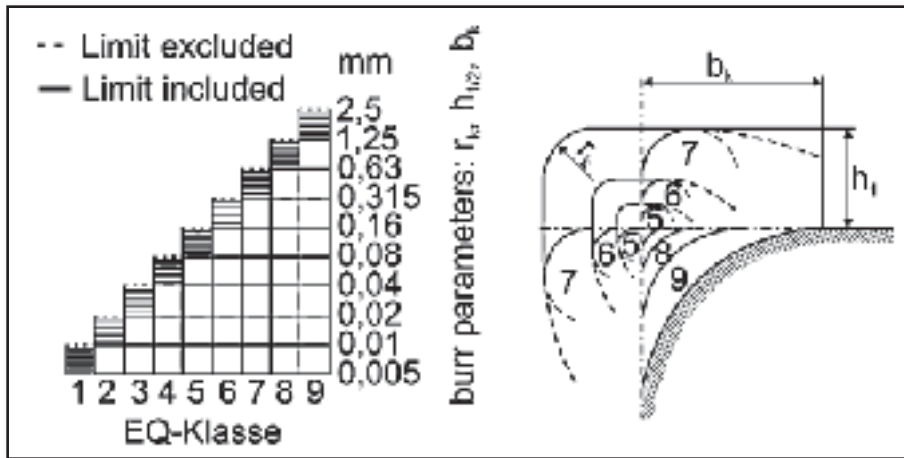


Figure 1.11 Les classes de qualités des arêtes (Schäfer et al., 1975).

Une proposition d'évaluation de la qualité des arêtes issue du point de vue d'ingénierie de la qualité est donnée dans (Ohmori, 1998). Cette proposition de normalisation est basée sur des études de cas. En utilisant des tableaux de codes et des instructions de travail, des hauteurs de bavures acceptables et des états de bavures sont définis.

Une norme supplémentaire pour le classement de la qualité de l'ébavurage est donnée par (Kato, Ohmri, Hatano, & Takazawa, 2007). Ils décrivent les états d'arête de façon uniforme à travers de nombreuses fonctions importantes remplies par les arêtes des composants. Ils présentent des tableaux décrivant des étapes de qualité des arêtes de composants usinés qui sont divisés en arêtes avec des fonctions critiques et non critiques. En outre, le système subdivise les arêtes critiques en cinq étapes de qualité et les arêtes non critiques en trois étapes de qualité. Les dimensions d'arête sont indiquées quantitativement et une plage de tolérance est définie.

Un autre système utilise des symboles pour les zones de composant ou les bords qui contiennent toutes les données pertinentes requises pour l'usinage et l'évaluation. Il couvre principalement les différentes applications de l'industrie automobile et de ses fournisseurs. La qualité nécessaire pour une fonction telle que des paramètres géométriques, des tolérances

acceptables et des méthodes d'évaluation peuvent être définis en utilisant cette standardisation (Berger, 2004).

Enfin, dans ce contexte, il convient de mentionner que l'enquête sectorielle réalisée dans le projet «SpanSauber» (en allemand) a montré qu'en raison de l'absence d'une classification globale des bavures, environ 45% des entreprises utilisent une classification interne (J. Aurich, 2006).

1.3.3 Classification des procédés d'ébavurage

Il existe plusieurs travaux sur la classification des procédés d'ébavurage. On peut citer par exemple celle faite par (Schäfer et al., 1975), (K. Przyklenk, et M. Schlatter, 1986), et (Dornfeld,1992). La meilleure classification reste celle de (L. K. Gillespie, 1999). Elle rassemble toutes les méthodes d'ébavurage connues, telles que l'ébavurage manuel, ébavurage par jet abrasif, brossage, sablage, ébavurage thermique, ébavurage mécanisé CNC et l'ébavurage robotisées. L'auteur a regroupé 122 procédés d'ébavurage et finition des pièces. La figure 1.12 présente les principaux procédés d'ébavurage organisés selon les quatre catégories suivant:

1. Procédés d'ébavurage mécanique;
2. Procédés d'ébavurage thermique;
3. Procédés d'ébavurage électrique;
4. Procédés d'ébavurage chimique.

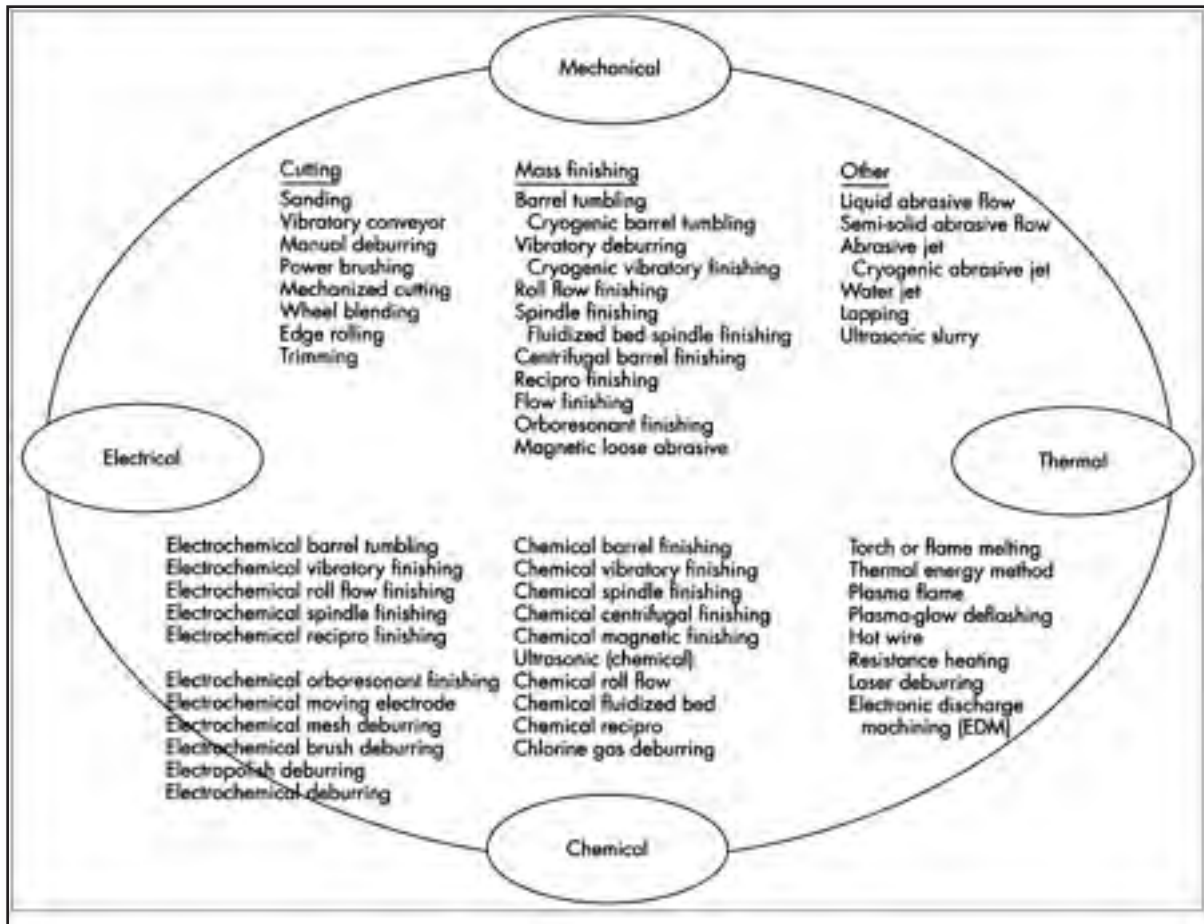


Figure 1.12 Principaux procédés d'ébavurage (L. K. Gillespie, 1999)

Afin d'obtenir la meilleure qualité de finition des surfaces et des arêtes, il est essentiel de choisir les procédés d'ébavurage appropriés. (L. K. Gillespie, 1999) à identifier les processus d'ébavurage les plus fréquemment utilisés dans l'industrie (Tableau. 1.3).

Tableau 1.3 Les quinze procédés d'ébavurage les plus utilisés dans le monde
(L. K. Gillespie, 1999)

N°	Procédés d'ébavurage	Quantité dans le Monde (1997)
1	Ébavurage manuel (<i>Manual deburring</i>)	800 000
2	Ébavurage par brosse (<i>Brushing</i>)	100 000
3	Sablage (<i>Sanding</i>)	50 000
4	Ébavurage par jet abrasif (<i>Abrasive jet</i>)	40 000
5	Finition par vibration (<i>Vibratory finishing</i>)	30 000
6	Ébavurage par coupe mécanisée (<i>Mechanised cutting</i>)	20 000
7	Tonneau d'ébavurage (<i>Barrel tumbling</i>)	16 000
8	Ébavurage par tonneau de finition centrifuge (<i>Centrifugal barrel finishing</i>)	2000
9	Ébavurage par broche de finition (<i>Spindle finishing</i>)	1200
10	Ébavurage électrochimique (<i>Electrochemical deburring</i>)	1200
11	Ébavurage électrochimique	1200
12	Jet d'eau	800
13	Ébavurage thermique	700
14	Grenaillage (<i>Abrasive blasting</i>)	?
15	Ébavurage ultrasonique	30

? : Manque de donnée publié

Comme il est clair dans le tableau, l'ébavurage manuel est le plus utilisé dans le monde grâce à son coût raisonnable et sa grande flexibilité, suivi par le brossage.

Le reste des 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 partie, nous présentons les avantages et les inconvénients de principaux procédés d'ébavurage.

1.4 Principaux procédés d'ébavurage

1.4.1 Méthode d'ébavurage manuelle

La méthode d'ébavurage manuelle est encore connue comme l'opération la plus largement utilisée pour de nombreuses raisons, notamment la flexibilité extrême, le faible coût et le manque de technologie nécessaire.

Selon (Roberts, Engel, & Proctor, 1992), les statistiques de la compagnie Pratt and Whitney disent que l'ébavurage manuel peut atteindre 12% du nombre total d'heures d'usinage. Après les opérations d'ébavurage et de finition manuelle, jusqu'à 30% des pièces ont besoin d'être retravaillées. Et les charges de l'entreprise augmentent énormément à cause des coûts de soins de santé relative à l'ébavurage manuel. D'après (L. K. Gillespie, 1999), la frustration, la fatigue, le temps perdu, le coût élevé, etc., sont des définitions de l'ébavurage manuel. De plus, dans la plupart des secteurs industriels, l'ébavurage manuel est mis en œuvre par des opérateurs non qualifiés. Ceci augmente par conséquent le rejet des pièces, ainsi que les retards dans la production. Malgré ses inconvénients l'ébavurage manuel reste irremplaçable spécialement dans le cas des pièces complexes et déformables.

Généralement, les opérations d'ébavurage sont réalisées à sec. La pièce doit être fixée sur un étau, l'opérateur commence à performer l'opération d'ébavurage manuel en utilisant les outils convenables (Figure 1.13).



Figure 1.13 Ébavurage manuel, tiré de (youtube)

Dans le tableau 1.4 ci-dessous, vous trouvez la liste des outils fréquemment utilisés dans l'ébavurage manuel.

Tableau 1.4 Liste de différents types d'outil d'ébavurage manuel (Tiabi, 2010)

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

D'après (L. K. Gillespie, 1981), l'ébavurage manuel est recommandé dans les situations suivantes :

- La flexibilité des opérations manuelles;
- La difficulté d'atteindre les bavures avec les autres procédés;
- La taille réduite des pièces;
- La nécessité de retravailler la pièce après ébavurage;
- La grande variation dans la taille des bavures;
- La rentabilité d'ébavurage manuel (Temps, coût...);
- Dans le cas des grandes pièces;
- Dans le cas des pièces déformables et de forme complexe;
- Exigence de précision de la pièce est demandée.

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

- Beaucoup de pièces doivent être retravaillées;
- La difficulté de fixation de petites pièces;
- La difficulté de contrôler la précision dimensionnelle de l'ébavurage manuel;
- Le manque des informations sur l'ébavurage manuel;

- C'est une tâche ennuyante pour les opérateurs;
- La difficulté d'ébavurer certaines pièces complexes;
- L'inconsistance de certains résultats d'ébavurage;
- L'irrégularité des arêtes obtenues par l'ébavurage manuel.

Dans le cadre de perfectionner la technique d'ébavurage manuel, il est nécessaire de bien former les opérateurs, établir des normes de travail, fournir des instruments manuels adéquats et compléter l'ébavurage par d'autres procédés.

1.4.2 Ébavurage par brosse

La technique d'ébavurage par brosse ou bien le brossage est très utilisé dans l'industrie, il est recommandé dans la production en masse et pour les bavures de grandes tailles. Cette technique a été classée dans l'ébavurage mécanique par (L. K. Gillespie, 1999). Cette technique permet d'effectuer d'autres tâches que l'ébavurage, comme le nettoyage, le décalaminage et le polissage. Elle permet aussi le raccordement des arêtes des pièces et la texturation (figure 1.14).



Figure 1.14 Ébavurage par brosse, tiré de (youtube)

Selon (L. K. Gillespie, 1999), le choix du type de brosse dépend de l'utilisation ou non de la lubrification, des additifs, et de la qualité de la pièce désirée.

Les avantages de l'ébavurage par brosse se présentent comme suit :

- C'est un procédé très rapide;
- Son coût n'est pas cher;
- Grand choix de type de brosse;
- La création d'un rayon sur l'arête (meilleur qu'un chanfrein);
- Amélioration de l'état de surface;
- La bonne maîtrise de ce procédé évite la génération de nouvelle bavure;
- Il peut être utilisé avec les équipements manuels ou automatiques.

Puisque ce procédé fonctionne en rotation, plusieurs types et longueurs de filaments, diamètres, formes, vitesses et pressions sur la pièce peuvent être appliqués, ce qui donne une grande variété de résultats (L. K. Gillespie, 1999).

La classification de (L. K. Gillespie, 1999) des inconvénients de brossage est la suivante :

- Affecte l'état de surface et change la texture;
- Affecte la dureté et les contraintes résiduelles de la pièce;
- Change la résistance à la fatigue de la pièce;
- Contamine la pièce;
- Affecte les dimensions de la pièce;
- Génère de nouvelles bavures en cas mauvaise manipulation;
- Affecte la couleur de la pièce;
- Génère de poussières.

Selon l'auteur, en cas d'utilisation non appropriée de ce procédé, il peut affecter l'état de la pièce. Des particules étrangères peuvent être collées sur la pièce lors d'ébavurage, les filaments de la brosse peuvent être détachés et coincés dans les trous de la pièce, etc.

1.4.3 Ébavurage par sablage

Appeler aussi l'ébavurage par abrasive collé, ce procédé est fréquemment utilisé dans les ateliers de fabrication grâce à sa grande variété, flexibilité, simplicité d'utilisation, coût abordable, etc. Il existe une vaste gamme d'abrasive, qui peut aller d'un simple abrasif

jusqu'au plus précis abrasif. Plus souvent, cette technique d'égavurage donne autant de bons résultats en travail manuel qu'en travail automatique. Ils peuvent être employés en enlèvement de bavure comme en finition de surface. L'oxyde de l'aluminium, le carbure de silicium, et le zircon constituent les matériaux de base des abrasifs. Ces produits admettent une grande variété de formes ; disques, bandes, feuilles, roues, etc. D'après (L. K. Gillespie, 1999) ces produits peuvent être employés avec ou sans lubrification (figure1.15).



Figure 1.15 Outil de sablage,
tiré de (Internet)

Les avantages de l'égavurage par sablage recensés par (L. K. Gillespie, 1999) sont les suivants :

- Coût pas cher;
- Processus rapide;
- Flexibilité de forme et de type d'abrasifs;
- Amélioration de l'état de surface;
- Peut être utilisé en manuel ou en automatique.

Les inconvénients sont les suivants:

- Change l'état de surface;
- Génère de poussière et des contraintes résiduelles;
- Contamine la pièce;
- Affecte la dimension de la pièce ;
- En cas de mauvaise manipulation peut créer d'autres bavures ;

- Affecte la couleur de la pièce;
- Difficulté de performer certaines pièces.

L'avantage le plus important de ce procédé est qu'il existe certains types d'abrasifs qui ont des formes complexes ce qui leur permet d'atteindre des surfaces sensibles et difficilement accessibles de la pièce.

1.4.4 Ébavurage par jet abrasif

D'après (L. K. Gillespie, 1999), les principales applications pour le jet abrasif sont l'ébavurage, la coupe, et le nettoyage des pièces. Le principe de fonctionnement de l'ébavurage par jet abrasif se repose sur le jet d'air ou de liquide avec des abrasifs à haute pression afin d'enlever la matière ou les bavures. Le processus est capable de déraciner les bavures sans formation de rayon sur l'arête de la pièce. La bonne fixation de la pièce est très importante pour réussir l'opération d'ébavurage. Pour assurer l'ébavurage de l'entièreté de la pièce, il suffit d'orienter le jet abrasif. Le contrôle de volume d'enlèvement de matériau se fait par le type d'abrasif, la pression, et le temps d'exposition de jet. Par une simple variation de la nature de jet, on peut obtenir une grande variété de qualité d'ébavurage. Ce procédé est rapide, recommandé pour les petites pièces et les matériaux fragiles. Cependant, il est capable d'ébavurer une seule pièce à la fois et n'est pas recommandé pour les grandes bavures. Il ne consomme pas beaucoup d'énergie. Ses principaux inconvénients sont comme suite : risque de modification des dimensions de la pièce, contamination de la pièce, les opérateurs doivent accorder une grande attention lors de l'ébavurage.

1.4.5 Finition de masse

Généralement, la production en masse se fait à travers les techniques de finition qui consistent en : la finition par vibration, le tonneau d'ébavurage, et le tonneau de vibration centrifuge. Comme son nom l'indique, ce procédé est capable d'ébavurer une grande quantité des pièces à la fois, en plaçant les pièces dans l'enceinte de la machine avec les abrasifs. Ce procédé assure la finition non seulement des surfaces, mais également des arêtes de la pièce.

Les procédés de finition de masse sont parmi les procédés de finition les moins chers et les plus performants. Ils sont aussi considérés comme non nuisibles à l'environnement.

➤ Finition par vibration

Par rapport aux autres techniques de finition, cette technique se caractérise par sa rapidité. Le principe de fonctionnement de cette technique se présente dans la vibration d'une grande enceinte qui contient à la fois les abrasifs et les pièces à ébavurer (figure 1.16). L'avantage de ce procédé est qu'il est capable d'ébavurer plusieurs pièces de différentes tailles en même temps. De plus l'accès pour l'inspection des pièces est facile. Cependant, la machine fait beaucoup de bruit, et l'ébavurage se fait obligatoirement sur des surfaces et arrêtes non désiré.

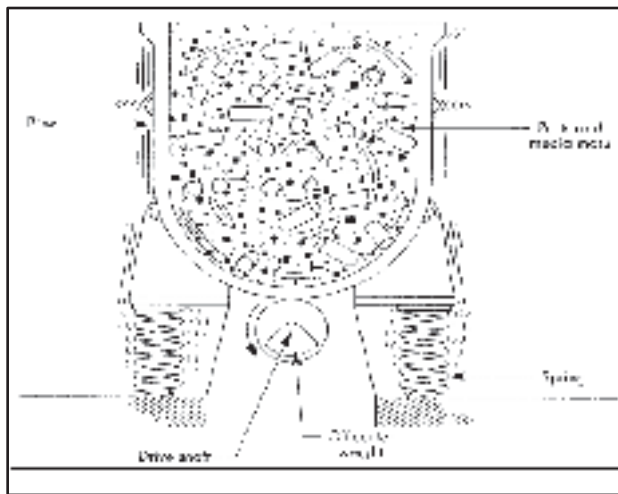


Figure 1.16 Finition par vibration (Tiabi, 2010).

➤ Tonneau d'ébavurage

La finition par tonneau d'ébavurage est la technique originale de finition de masse, se compose d'un grand contenant en rotation, qui contient les pièces, les abrasifs et les liquides de finition. Ces équipements sont simples et peu chers. C'est une technique recommandée pour les pièces de moyennes et petites tailles et pas pour les grandes tailles.

Cependant, elle est lente, volumineuse et elle ne permet pas l'inspection durant son fonctionnement (L. K. Gillespie, 1999).



Figure 1.17 Tonneau d'ébavurage,
tiré de (youtube)

➤ **Tonneau de finition centrifuge**

Le tonneau de finition centrifuge, comme d'autres procédés de finition de masse, utilise des abrasifs et de liquide d'ébavurage pour ébavurer ou faire la finition de surface des pièces. La différence entre ce procédé et le tonneau d'ébavurage est que l'action centrifuge entraîne une opération plus rapide et plus contrôlable.

Le procédé est très précis, permettant de produire des pièces à grande qualité de surface. Un autre avantage important est sa capacité à conférer des contraintes de compression élevées qui favorise la tenue en fatigue de la pièce. Cependant, le contrôle en cours de fonctionnement est difficile, le coût de l'équipement est élevé, et les moyens de manutention sont généralement nécessaires (L. Gillespie, 2006).

1.4.6 Coupe mécanisée : usinage CNC et ébavurage robotisé

Selon (L. K. Gillespie, 1999) la technique d'ébavurage par coupe mécanisée englobe l'ébavurage par les centres d'usinage (machine CNC), les robots et les machines à usage spécifique, dans le but d'ébavurer des pièces spécifiques (ex : roues dentées).

➤ **Technique d'ébavurage sur les centres d'usinage (machine CNC)**

Étant donné que la phase d'ébavurage vient directement après la phase de l'usinage, donc c'est mieux de garder le même montage de fixation de la pièce afin d'éviter de perdre du temps, et les problèmes de fixation qui peuvent causer des défauts géométriques de la pièce, augmenter le temps de production et améliorer la qualité de surface. Une grande variété d'outils d'ébavurage ont été adaptés pour être intégrés dans les centres d'usinage.

L'outil d'ébavurage appelé *Orbitool* (figure 1.18) développé par (Avila, Choi, Dornfeld, Kapgan, & Kosarchuk, 2004) , est destiné à l'ébavurage des intersections des trous de perçage. Le principe de fonctionnement de cette technique est de chanfreiner les arêtes à l'intérieur des trous en faisant un mouvement de rotation et d'interpolation à la fois.

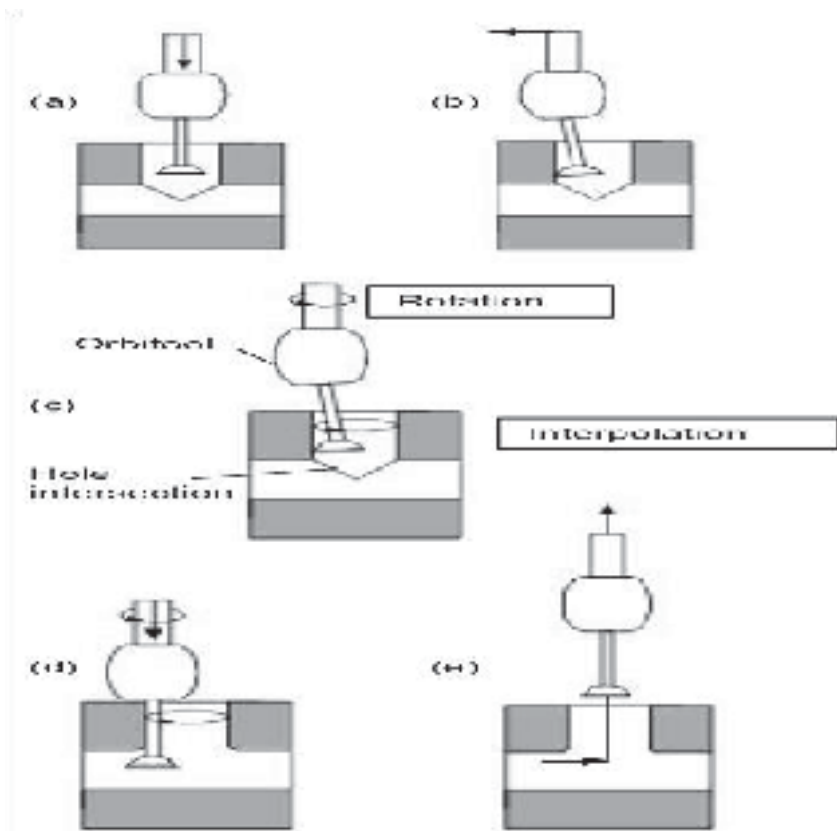


Figure 1.18 les étapes de fonctionnement de l'outil *Orbitool*
 (a) entrée dans l'intersection de trou, (b) chargement,
 (c) début d'ébavurage, rotation et interpolation, (d)
 fin d'ébavurage, (e) retour, tirée de (Tiabi, 2010).

L'inconvénient de l'ébavurage sur machine à commande numérique est que ce procédé n'est pas capable d'ébavurer les pièces de forme complexes, ce qui oblige l'industriel à faire appel à des méthodes d'ébavurage supplémentaire pour pouvoir accomplir son travail. En plus, les machines à commande numérique et la main-d'œuvre associée sont très coûteux, car une CNC peut coûter dix fois plus cher qu'une simple machine d'ébavurage. En outre, pour intégrer plus d'opération d'ébavurage dans les CNC, il faut investir dans l'outillage et l'extension du magasin d'outils, ce qui augmente le coût de l'ébavurage.

➤ **Ébavurage robotisé**

L'ébavurage robotisé devient de plus en plus répandu dans les secteurs industriels grâce à ses multiples avantages. Les tâches principales réalisées par l'ébavurage robotisé sont le chanfreinage des arêtes de la pièce, le brossage et le polissage (figure 1.19). L'avantage de l'ébavurage robotisé est dans la consistance et la répétabilité de la même précision d'ébavurage. La rapidité des robots et leurs capacités de travailler sans arrêt dans des conditions défavorables (bruit, saleté, etc.) les favorisent sur les autres procédés. Ils nécessitent un minimum d'intervention humaine. Cependant, une seule pièce est exécutée à la fois. Les robots sont moins chers, mais moins précis que les machines-outils à commande numérique CNC. La contrainte de ce procédé est qu'il n'est pas capable d'enlever tous les types de bavures et ébavurer certaines pièces complexes. Ils sont capables seulement d'enlever les bavures extérieures, apparentes, uniformes et souvent produites dans de faibles volumes de production.



Figure 1.19 Ébavurage robotisé,
tiré de (youtube)

Actuellement, plusieurs industriels commencent à s'orienter vers l'automatisation des cellules d'ébavurage. Cependant le remplacement de l'ébavurage manuel, qui est très utilisé grâce à sa flexibilité, par l'ébavurage robotisé reste un grand défi. Présentement les études de recherches se concentrent sur l'amélioration de la précision de l'ébavurage robotisé.

1.4.7 Broche de finition

Le principe de fonctionnement de procédé d'ébavurage par broche de finition consiste à faire tourner la pièce dans un contenant d'abrasifs en rotation, les frottements des abrasifs sur la pièce engendrent l'ébavurage des arêtes et l'amélioration de la finition de surface de la pièce. L'avantage de ce processus qu'il est très rapide, il nécessite au maximum 5 min pour effectuer l'ébavurage des pièces. Ce procédé génère un bon état de surface et permet un haut niveau de fiabilité et d'uniformité. L'automatisation du chargement et déchargement des pièces est toujours possible et facile.

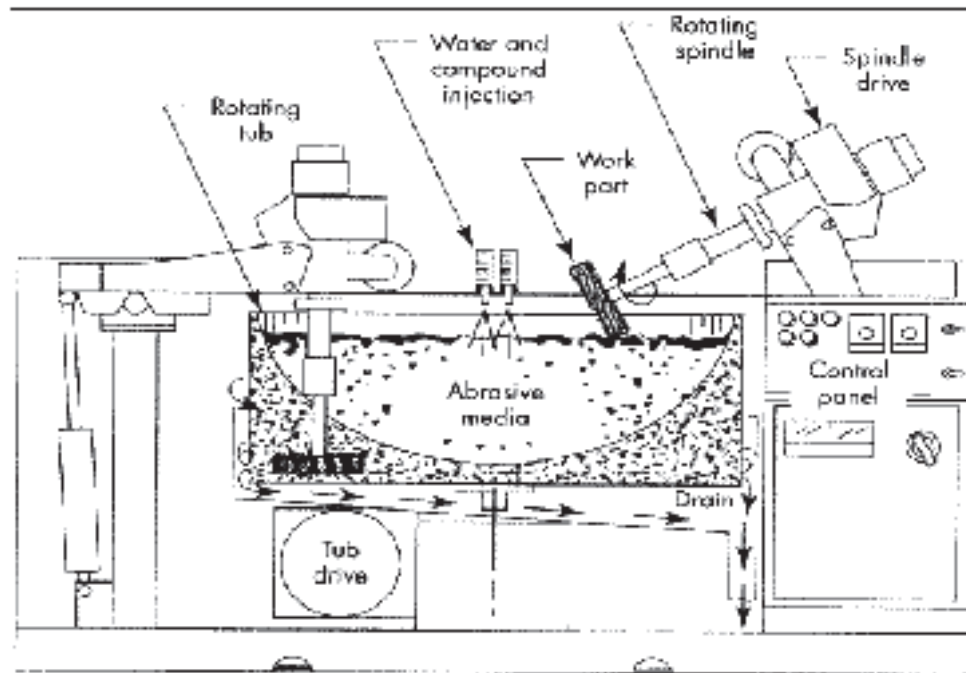


Figure 1.20 Broche de finition (Tiabi, 2010)

L'inconvénient de ce procédé qu'il est capable d'ébavurer seulement les pièces cylindriques, il n'est pas recommandé pour les pièces de forme prismatique, longues, très petites et lourdes. Il est capable aussi d'ébavurer seulement la partie extérieure de la pièce. Pendant la finition, une seule pièce est montée à la fois.

1.4.8 Ébavurage électrochimique

Le principe de fonctionnement de l'ébavurage électrochimique se base sur l'électrolyse ou bien l'action électrochimique. L'avantage de ce procédé est qu'il n'engendre pas des contraintes résiduelles sur la pièce, car il n'y a pas un contact direct entre l'outil et la pièce, mais le contact se fait à l'aide d'une solution électrolytique qui contient l'anode et la cathode constitue respectivement la pièce et l'outil. Les surfaces de la pièce où l'ébavurage n'est pas souhaité peuvent être cachées durant le processus. Ce procédé est utilisé pour les pièces complexes ayant des formes délicates, des filetages, des rainures, des intersections de trous et des matériaux difficiles à ébavurer. L'inconvénient de ce procédé est qu'une seule pièce y

chargée à la fois. Seules les pièces conductrices d'électricité et propres peuvent être ébavurées, les bavures doivent être petites et uniformes. Ce procédé laisse des tâches noires sur certains matériaux, pas très préférable de point de vue esthétique.

Dans cette partie nous avons présenté les avantages, les inconvénients et les applications des procédés d'ébavurage et finition de surfaces les plus utilisés dans l'industrie. Cependant, il existe aussi plusieurs autres procédés intéressants, tels que l'ébavurage thermique, l'ébavurage ultrasonique et l'ébavurage par jet abrasif cryogénique. D'autres sont encore en cours de développement comme tous les processus d'ébavurage hybrides (processus électrochimiques, broches, vibrations et cryogéniques associés). D'autres qui apparaissent ces dernières années comme le sablage par micro abrasif (AMB) et l'ébavurage par fibres magnétique.

1.5 Coût d'ébavurage

Le coût d'ébavurage dépend de plusieurs paramètres, par exemple : la taille de bavures, le besoin de finition de la pièce, et les paramètres liés au processus d'ébavurage sélectionné. D'après (L. K. Gillespie, 1999), les éléments de base constituant le coût de l'ébavurage sont similaires à ceux utilisés pour calculer le coût de n'importe quel processus de fabrication, il peut contenir le coût de :

- Main d'œuvre;
- Frais généraux;
- Équipement;
- Fournisseurs;
- Énergie;
- Service d'approvisionnement.

Selon (L. K. Gillespie, 1999), les équations suivantes fournissent une raisonnable estimation des couts des différents processus d'ébavurage :

❖ **Ébavurage par vibration**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + WC_P + C_B + C_E + C_C + C_W}{N} \right] + \left[\frac{C_L(1 + D_0)(K_1 + K_2)}{N} \right] \quad (1.1)$$

❖ **Ébavurage par énergie thermique**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + C_L(1 + D_0)WC_P + C_A}{N} \right] + \frac{C_g}{n} + \frac{C_t}{N_p} \quad (1.2)$$

❖ **Ébavurage par brossage**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + C_L(1 + D_0)WC_P + C_A}{N} \right] + \frac{C_b}{N_{p1}} \quad (1.3)$$

❖ **Ébavurage par Flamme**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + C_L(1 + D_0)WC_P + C_A}{N} \right] + \frac{C_g}{n} \quad (1.4)$$

❖ **Ébavurage manuel**

$$C = \left[\frac{C_L(1 + D_0) + C_A}{N} \right] + \frac{C_t}{N_p} \quad (1.5)$$

❖ **Ébavurage mécanisé**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + WC_P + C_A + C_L(1 + D_0)}{N} \right] + \frac{C_t}{N_p} \quad (1.6)$$

❖ **Ébavurage chimique**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + WC_P + C_A + C_L(1 + D_0)}{N} \right] + \frac{C_s}{N_p} \quad (1.7)$$

❖ **Ébavurage électrochimique**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + WC_P + C_A + C_L(1 + D_0)}{N} \right] + \frac{C_t}{N_p} + \frac{C_s}{N_{p1}} \quad (1.8)$$

❖ **Ébavurage par électro-polissage**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + WC_P + C_A + C_L(1 + D_0)}{N} \right] + \frac{C_t}{N_p} + \frac{C_s}{N_{p1}} \quad (1.9)$$

❖ **Ébavurage par jet abrasive**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + WC_P + C_B + C_E + C_a}{N} \right] + \frac{C_L(1 + D_0)(K_1 + K_2)}{N} \quad (1.10)$$

❖ **Ébavurage par jet d'eau**

$$C = \left[\frac{C_D + C_M + C_L(1 + D_0) + WC_P + C_A + C_C + C_W}{N} \right] + \frac{C_t}{N_p} \quad (1.11)$$

Où :

C : Coût de dépréciation de la machine par heure/ heure d'opération;

C_D : Coût d'ébavurage par pièce;

C_M : Coût de maintenance par heure d'opération;

C_L : Coût de la main-d'œuvre par heure;

- C_P : Coût de nettoyage par heure après ébavurage (travail et matériel);
 C_A : Coût de l'énergie utilisée (\$ / Kilowatt- heure);
 C_E : Coût d'abrasif = coût d'abrasif \times pourcentage d'attrition horaire ;
 C_c : Coût de composant par heure;
 C_W : Coût d'eau par heure;
 C_B : Coût de nettoyage de matériau par heure;
 C_b : Coût de brosse;
 C_g : Coût de gaze par cycle;
 C_t : Coût total d'outil;
 C_s : Coût total de solution chimique;
 D_0 : Charge indirecte du taux de travail en pourcentage;
 N : Nombre de pièces passées par heure;
 N_P : Nombre total des pièces faites;
 N_{P1} : Nombre des pièces faites pour une quantité bien déterminée de solution chimique ;
 n : Nombre des pièces faites par cycle;
 t : Temps (heure) par cycle;
 W : Énergie utilisée, kilowatts (1 hp =0.75 kw);
 K_1 : Pourcentage de temps de cycle que l'opérateur passe effectivement pour contrôler le fonctionnement d'ébavurage;
 K_2 : Pourcentage de temps de cycle que l'opérateur passe pour nettoyer les pièces.
 C_a : Coût de l'air utilisé / heure

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 comme : 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. La quantification et la modélisation de ces paramètres nous permettent de maîtriser le coût d'ébavurage et de contrôler le processus d'ébavurage.

Tableau 1.5 Coût typique de différentes méthodes d'ébavurages (en \$ U.S).
(L. K. Gillespie, 1999)

Paramètre de coût	Méthode d'ébavurage			
	Vibratoire	Énergie thermique	Manuelle	Chimique
C_D	0.40	5	-	-
C_M	0.04	1	-	-
C_L	5	5	5	5
C_P	0.04	0.04	0.04	0.04
C_A	-	5.8	5.5	5.5
C_E	0.60	-	-	-
C_c	0.30	-	-	-
C_W	0.15	-	-	-
D_0	0.80	0.8	0.8	0.8
N	50	1500	12	400
n	100	6	1	100
t (h)	2	00.004	0.08h (4.8min)	0.25
C_g	-	0.024	-	-
W	4	4	0	0
C_t	-	1000	1.000	-
N_P	400 000	400 000	400 000	400 000
C_s	-	-	-	6000
N_{P1}	0.17	-	-	-
C_b	0.17	-	-	-
C_B	0.60	0.8	0.60	0.50
C calculé (\$/h)	0.106	0.20	1.21	0.052

Stratégie pour diminuer le coût d'ébavurage

(L. K. Gillespie, 1999), les étapes à suivre pour réduire le cout d'ébavurage sont :

1. Une bonne conception des pièces mécaniques;
2. Maitriser la prévention de bavure;
3. Minimiser la taille de bavure;
4. Améliorer les processus d'ébavurage.

Sélectionner la technique d'ébavurage convenable qui satisfait les exigences économiques, qualitatives et environnementales de la fabrication reste toujours un défi pour l'industriel. Nous abordons cette problématique plus en détail dans la section suivante.

1.6 Sélection des méthodes d'ébavurage

La plupart des outils et des procédés d'ébavurage sont développés pour des matériaux à des géométries spécifiques. Par conséquent, la sélection correcte du processus d'ébavurage est essentielle. Une première approche pour la sélection des processus d'ébavurage a été proposée par (Schäfer et al., 1975). Ainsi, une stratégie de décision basée sur les graphes de décision est développée par (Ioi, Matsunaga, & Kobayashi, 1981), qui a mis en œuvre un outil (logiciel) pour la sélection de la méthode d'ébavurage. A cet effet, les données pertinentes pour l'ébavurage comme le matériau de la pièce, l'opération d'usinage avant l'ébavurage, la forme de bavures, le poids et le volume des pièces, la rugosité de surface, l'accessibilité d'ébavurage, le classement de bavures et les objectifs de l'ébavurage sont prises en considération dans la sélection de méthode d'ébavurage. Les données de sortie comprennent une liste des méthodes d'ébavurages possibles triés en fonction des coûts de traitement et des conditions d'ébavurage.

La stratégie de sélection de méthode d'ébavurage établi par (L. K. Gillespie, 1981), se présente comme suit :

1. Déterminer la taille de bavure.
2. Déterminer la dimension de l'arête demandée.

3. Éliminer les méthodes d'ébavurages inappropriés (suivant leur limitation).
4. Utiliser les tableaux de critère d'ébavurage pour sélectionner les méthodes qui convient avec la conception de la pièce.
5. Faire le choix de meilleures méthodes d'ébavurage par élimination.
6. Comparer les coûts des méthodes récupérées.
7. Sélectionner la meilleure méthode ou chercher plus des détails chez l'industriel, le distributeur, le magasinier... etc.
8. Vérifier la méthode choisie avec un personnel expérimenté.
9. Valider la méthode avec l'expérience.

Selon (L. K. Gillespie, 1999), la connaissance des facteurs suivants est essentielle pour la sélection de méthode d'ébavurage :

- La relation entre la propriété, l'épaisseur, la hauteur, la dureté de bavure et la dureté de la pièce.
- Les variations dimensionnelles admissibles résultant des opérations d'ébavurage.
- Rayon exigé de l'arête/courbure.
- Les exigences de la finition de surface finale de la pièce.

(Wygowski, 2006) a présenté les indicateurs de procédé d'ébavurage comme suit :

- État de surface;
- Hauteur et largeur de bavures;
- Accès à la zone d'ébavurage;
- Fiabilité du processus d'ébavurage.

Le choix du procédé d'ébavurage peut être réalisé à l'aide de la table suivante :

Indicateur	Caractéristique	Procédé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Etat de bavure	Forme définie	○	○	●	○	○	○	●	○	●	●
	Forme pas définie	●	●	●	●	●	●	○	●	●	○
Hauteur de bavure	$0 < h < 1 \text{ mm}$	●	●	○	●	●	●	○	●	○	○
	$0 < h < 10 \text{ mm}$	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○
	$10 < h \text{ mm}$	○	○	●	●	●	○	○	○	●	○
Largeur de bavure	$0 < b < 1 \text{ mm}$	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○
	$0 < b < 10 \text{ mm}$	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○
	$10 < b \text{ mm}$	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○
Après	bon	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	moyen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	mauvais	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Finition du processus	bon	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	moyen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Assurance de forme	bon	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	moyen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Largeur de découpage	$0 < b < 1 \text{ mm}$	○	○	●	○	○	○	●	○	●	●
	$0 < b < 10 \text{ mm}$	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	$b > 10 \text{ mm}$	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○ possible ○ difficilement réalisable ● impossible

Figure 1.21 Influence des paramètres de la bavure sur le choix du procédé d'ébavurage (Wygowski, 2006)

(Wygowski, 2006) a présenté dans la figure 1.22, une comparaison de divers procédés d'ébavurage en fonction du temps d'ébavurage et du rayon d'arrondi d'arrêt (r_k).

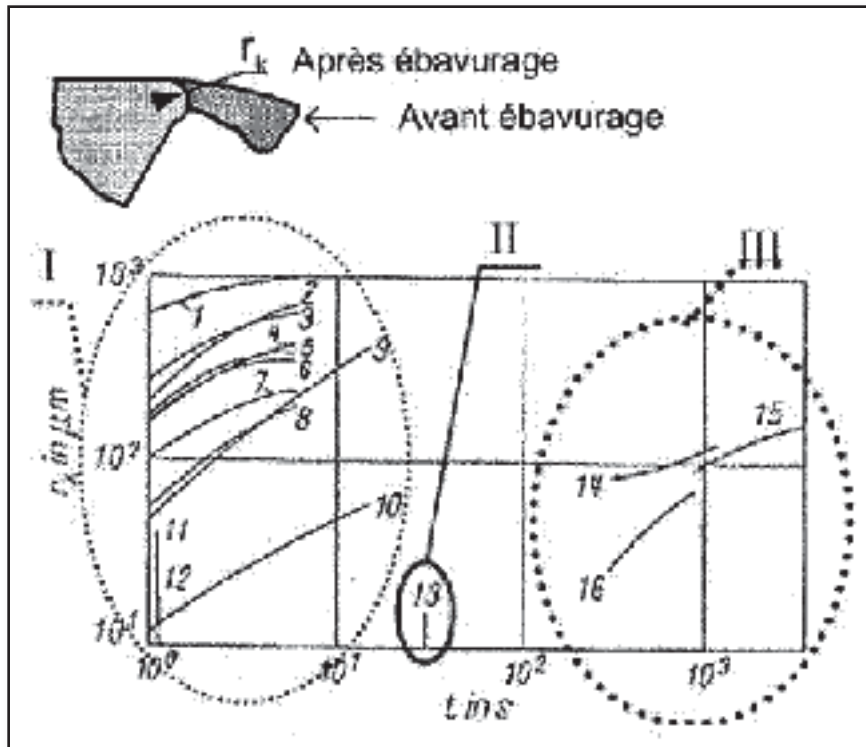


Figure 1.22 Caractéristiques relatives du rayon d'arrondie (r_k) du bord de la pièce en acier St 15-05 ébavurée par divers outils et procédés (Wygowski, 2006)

Tableau 1.6 : Regroupement de méthodes d'ébavurage

Groupe I	Groupe II	Groupe III
1 - disque de meulage en élastomère	13- ébavurage thermochimique	14- glissoir de vibration
2- brosse métallique		15- tambour rotatif de meulage
3- gratte - brosse en acier		16- ébavurage électrochimique
4- matériau abrasif de meulage collé sur la courroie		
5- disque - courroie abrasive		
6- brosse en fil d'acier et plastique		
7- disque - abrasif "scotch-brite"		
8- brosse en nylon et en abrasif		

Groupe I	Groupe II	Groupe III
9 - sablage sec		
10- sablage mouillé		
11- bande de meulage (en opposition)		
12- bande de meulage (en concordance)		

Cette figure montre trois groupes d'égavurage. Le premier groupe (par exemple le brossage par brosse métallique #2) est caractérisé par un grand rayon r_k d'arrondi et un temps d'opération court. Le deuxième groupe (l'égavurage thermochimique #13) prend une position intermédiaire. Le troisième groupe (l'égavurage électrochimique #16) augmente le rayon r_k , cependant le temps d'opération est long.

1.7 Conclusion

Cette étude nous a permis de conclure que les processus d'égavurage peuvent déformer la pièce, changer ses dimensions, finitions de surface, les contraintes résiduelles, la couleur et la résistance à la corrosion. Ils peuvent également augmenter la résistance à la fatigue et la résistivité électrique, réduire la limite d'élasticité, imprégner la matière dans la pièce à usiner et contaminer les surfaces de la pièce. Ces effets peuvent à leur tour réduire la vie de l'outil, dégrader la finition de surface, la soudure ou l'adhérence de la peinture.

Malheureusement, aucune opération d'égavurage ne peut accomplir toutes les conditions requises de l'arête et de bavure sans effets secondaires. La plupart des processus et des outils d'égavurage sont développés pour des géométries de pièces spécifiques et ne peuvent être utilisés pour une large gamme de géométries et de matériaux. Dans le but de minimiser les effets secondaires générés par les méthodes d'égavurage et assurer une meilleure qualité géométrique et dimensionnelle de la pièce. En fonction de la qualité d'égavurage nécessaire, la décision finale de choix de procédé d'égavurage doit aussi tenir compte de l'aspect économique lié à chaque procédé.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la méthodologie de travail qu'on va suivre afin d'atteindre notre objectif final. Cette étude consiste à regrouper le maximum des informations utiles relatives aux bavures, ébavurage et méthode d'ébavurage dans une base de données. Cette base de données sera utile comme historique des opérations d'ébavurage, afin d'aider l'industriel à résoudre les problèmes relatifs à l'ébavurage. En plus elle sera utile pour développer un outil d'aide à la décision ou bien une stratégie de sélection de meilleures méthodes d'ébavurage pour une application donnée. Une interface graphique sera conçue afin de faciliter la communication avec l'outil de décision. Enfin nous allons traiter un problème d'allocation de ressource afin d'optimiser le coût d'ébavurage.

2.2 Construction d'une base de données

Tout d'abord nous allons commencer par chercher dans la littérature les informations relatives aux bavures, ébavurage et méthode d'ébavurage, identifier les méthodes d'ébavurage les plus utilisées dans le monde et sur lesquelles notre étude sera effectuée, déterminer la capacité de chaque méthode, leurs avantages et leurs inconvénients. Après l'étude de mécanisme de formation de bavure, et l'influence des facteurs technologiques sur la formation de bavure, nous allons proposer des critères de choix de méthodes d'ébavurage.

2.3 Conception d'un outil d'aide à la décision

Après l'établissement d'une base de données et la proposition de critères de choix de méthodes d'ébavurage, nous serons à la mesure de développer un outil d'aide à la décision. Cet outil présente un algorithme qui permet la saisie de critères de choix, la recherche dans la

base de données et la sélection des méthodes d'ébavurage qui répondent aux critères de choix préalablement saisis. Nous allons utiliser Matlab afin de programmer cet algorithme. 44

2.4 Conception d'une interface graphique

Afin de faciliter la communication de l'utilisateur avec le programme de sélection, nous allons utiliser la commande «GUI» de Matlab pour concevoir une interface graphique permettant de saisir les critères de choix, de lancer la recherche des méthodes d'ébavurage adéquates dans la base de données et d'afficher les résultats trouvées.

2.5 Établissement d'un modèle d'optimisation d'allocation de ressource

Une fois nous avons en main les méthodes ou bien les machines d'ébavurage appropriées pour travailler un produit spécifique, nous allons essayer de répartir ce produit sur les différentes machines d'une façon optimale afin de minimiser le coût d'ébavurage. Cette allocation des produits sera effectuée à l'aide d'un modèle d'optimisation. Nous allons utiliser la commande «Solveur» d'Excel et spécifiquement la programmation linéaire afin d'établir ce modèle. Le même travail peut être réalisé sur le logiciel de programmation «Lingo».

2.6 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre la méthodologie suivie dans ce travail, passant par la collection des données jusqu'à l'établissement de modèle d'optimisation de coût d'ébavurage, en citant les différents techniques et méthodes utilisées afin d'atteindre nos objectifs.

L'influence des facteurs technologiques sur la formation de bavure sera étudiée dans le chapitre suivant, afin de proposer des critères qui aident à choisir les méthodes d'ébavurages

CHAPITRE 3

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES FACTEURS TECHNOLOGIQUE SUR LA FORMATION DE BAVURE

3.1 Introduction

Il est très problématique dans l'industrie de déterminer parmi plusieurs procédés d'ébavurage et finition de surface existants, lequel est le procédé le mieux adapté pour satisfaire les standards de qualité. Pour cet effet nous allons étudier dans ce chapitre les facteurs qui influencent la formation de bavure, la caractérisation de bavure et enfin nous allons proposer des nouveaux critères qui nous aident à sélectionner les meilleures méthodes d'ébavurage pour une application donnée.

3.2 Influence des facteurs technologiques sur la formation des bavures

La formation des bavures est un problème très répandu dans l'industrie; en fait, c'est quasiment impossible d'éviter la formation de bavure, cependant les études sur ce problème se composent en trois parties :

- Chercher à réduire les bavures;
- Chercher à réguler et uniformiser les bavures;
- Chercher à enlever les bavures (ébavurage).

Pour pouvoir étudier ces trois cas, il faut identifier les différents facteurs technologiques qui causent la génération des bavures, et comprendre le comportement de la formation des bavures en fonction de la variation de ces facteurs. Nous allons aborder dans les sections qui suivent ces différents points et d'une façon plus en détail.

Le plupart des études réalisées dans le domaine des bavures était concentré sur l'aspect « réduction de bavure » durant les opérations de fabrication, en particulier l'usinage. Selon (Sofronas, 1975), (Tseng & Chiou, 2003) et (Wygowski, 2006) les principaux facteurs technologiques suivants exercent une influence directe sur la formation des bavures qui concerne et 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.

(Tiabi, 2010) a résumé dans le graphique suivant tous les facteurs influençant la génération des bavures d'usinage. Toutefois, il faut tenir compte de différentes interactions entre les facteurs, car ils peuvent influencer énormément la variation de ces facteurs et par la suite la génération des bavures. Il est donc nécessaire de prendre en considération tous les aspects existants pouvant influencer la génération de bavure.

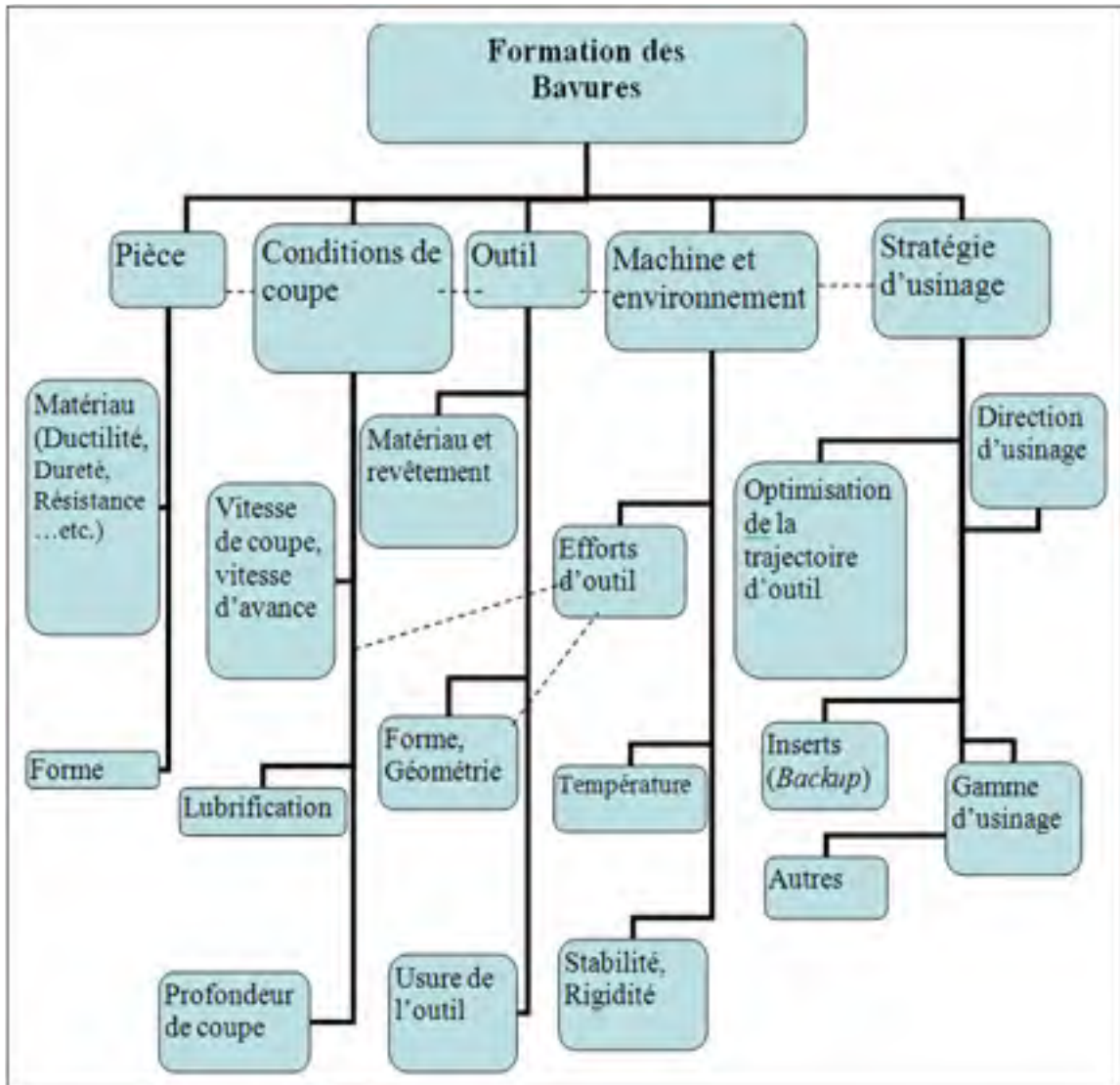


Figure 3.1 : Influence des facteurs technologiques sur la formation des bavures (Tiabi, 2010).

Dans les sections qui suivent, nous allons voir en détail l'ensemble des éléments rapportés dans la figure 3.1 et expliquer en profondeur ce qui a été fait lors des différentes études.

3.2.1 Paramètres liés à la pièce

Le matériau, les différents traitements thermiques et la géométrie de la pièce, sont des paramètres qui influent directement la formation des bavures.

❖ Le matériau de la pièce

Les principales propriétés mécaniques de matériau sont la dureté, la résistance, la limite élastique, l'allongement, et le module d'Young. Ces propriétés ont une grande influence sur la génération des bavures. Tandis que dans la littérature peu des études qui tiennent compte de tous ces propriétés.

Selon ASM International Handbook (2007), les matériaux généralement utilisés dans le domaine aéronautique sont l'alliage d'aluminium, l'alliage de titane, l'alliage de nickel, l'acier inoxydable, et les matériaux composites.

D'après (Dornfeld, 2002), la ductilité de matériau favorise la génération des bavures de grandes tailles, toute en augmentant la vitesse de coupe et la vitesse d'avance ce phénomène s'amplifie. Cependant des fractures de bavures se créent au bord de la pièce en cas d'un matériau fragile, l'augmentation de vitesse de coupe et de vitesse d'avance favorise également l'apparition de ce phénomène. Selon l'auteur aussi, le sens métallographique du matériau de la pièce pourrait influencer la formation des bavures.

❖ Géométrie de la pièce

D'après (K. Przyklenk, et M. Schlatter 1986) et (Wygowski, 2006), les angles de bord d'une pièce supérieur à 90° engendrent des bavures courtes, tandis que les angles de bord d'une pièce inférieur à 90° engendrent des bavures longues avec de petites épaisseurs. En effet les études confirment que la géométrie de la pièce influence la génération des bavures, et particulièrement, l'angle de bord est l'élément géométrique le plus influençant à la taille de bavure. Voir figure 3.2. Afin de remédier à ce problème, on chanfreine souvent la pièce avant l'usinage final.

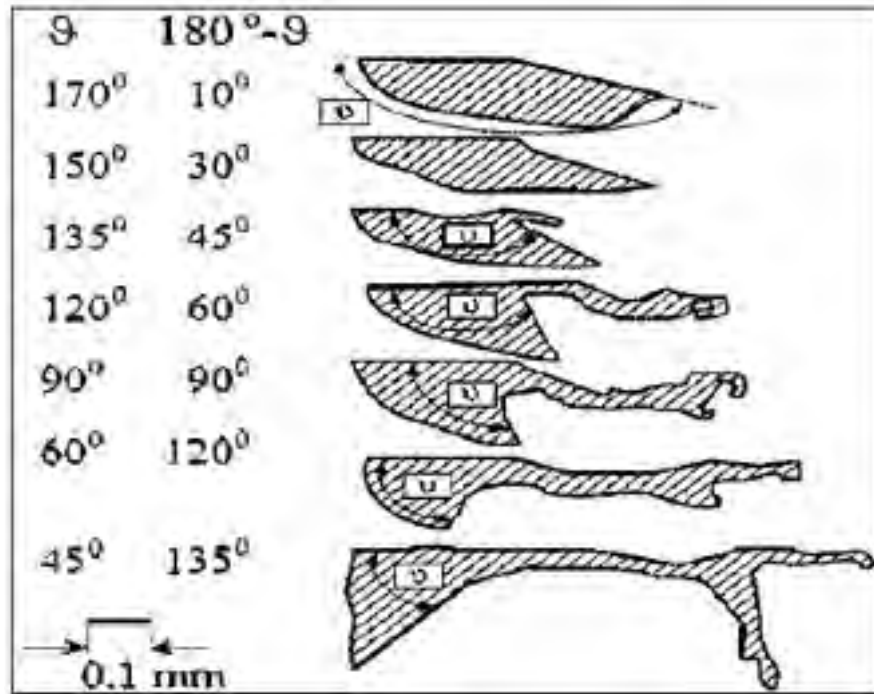


Figure 03.2 : Influence de la géométrie de la pièce sur la taille
(K. Przyklenk, et M. Schlatter 1986)

❖ Traitement superficiel de la pièce

D'après (Sofronas, 1975), le rapport de la contrainte de cisaillement du copeau sur la contrainte de cisaillement de la pièce (τ_c / τ_w) est un facteur important qui influence l'augmentation de la taille des bavures. Pour remédier à ce problème, il faut soit augmenter la contrainte de cisaillement du copeau τ_c soit diminuer celle de la pièce τ_w . Pour étudier l'effet de traitement thermique sur la taille des bavures, l'auteur a fait des tests de trempe sur l'acier AISI 1018 pour augmenter la dureté de ce matériau, il a constaté que la taille de bavure a diminué en hauteur et en épaisseur (figure 3.3).

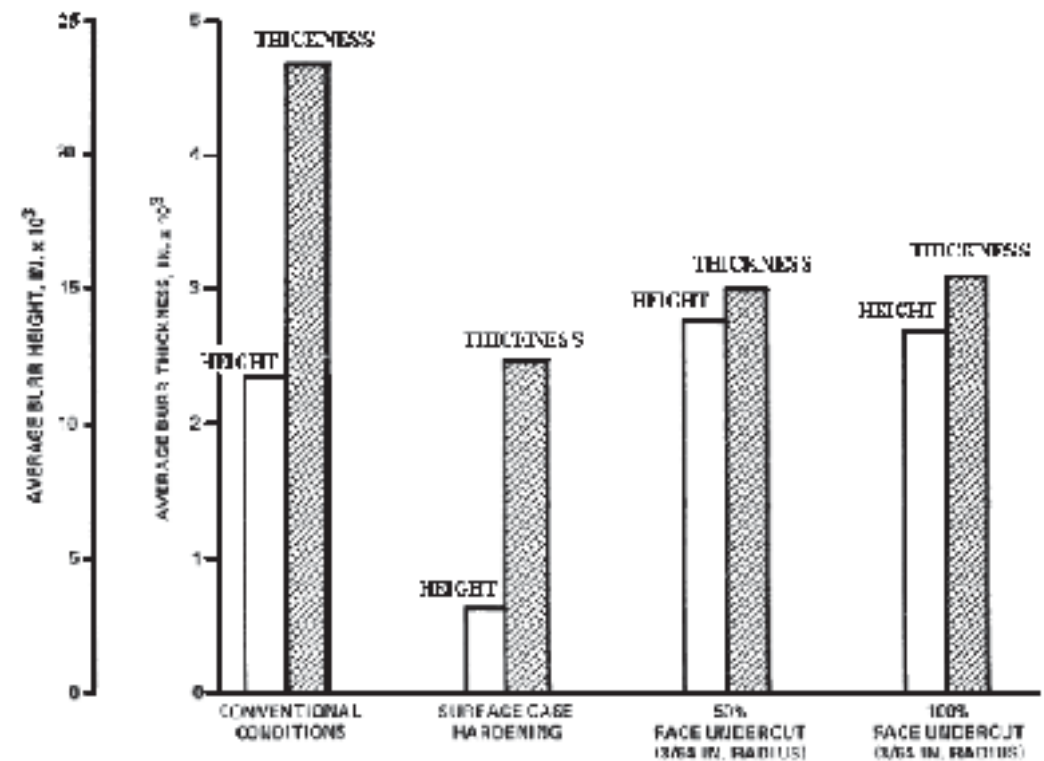


Figure 3.3 Effet du durcissement du matériau sur la taille des bavures.
Tirée de (Sofronas, 1975)

L'inconvénient de ce procédé c'est qu'il permet l'apparition des fissures sur les surfaces durcies de la pièce. Et par conséquent l'usinage et l'ébavurage seront affectés par ce phénomène.

(L. 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.

3.2.2 Conditions de coupe et lubrification

Il est confirmé que la formation des bavures est influencée par la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de coupe et le mode de lubrification. Selon (Gwo-Liang Chern, 1993) la hauteur de bavure est importante à faible et à grande vitesse d'avance. Par contre à une vitesse d'avance intermédiaire on peut avoir des hauteurs des bavures minimales (figure 3.4). L'auteur a montré que la variation de matériau de la pièce et des conditions de coupe influe également sur le profil des bavures obtenu. Les expériences menées par (Dornfeld, 2002) sur quatre matériaux différents « acier faiblement allié 4118, acier inoxydable 304L, alliage de titane TI-6Al-4V et l'alliage de l'aluminium Al 6061 », montrent que l'usinage à petites vitesses de coupe et d'avance, génère des bavures de petite taille uniforme, tandis que le perçage à grandes vitesses de coupe et d'avance génère des bavures de grandes tailles non uniformes.

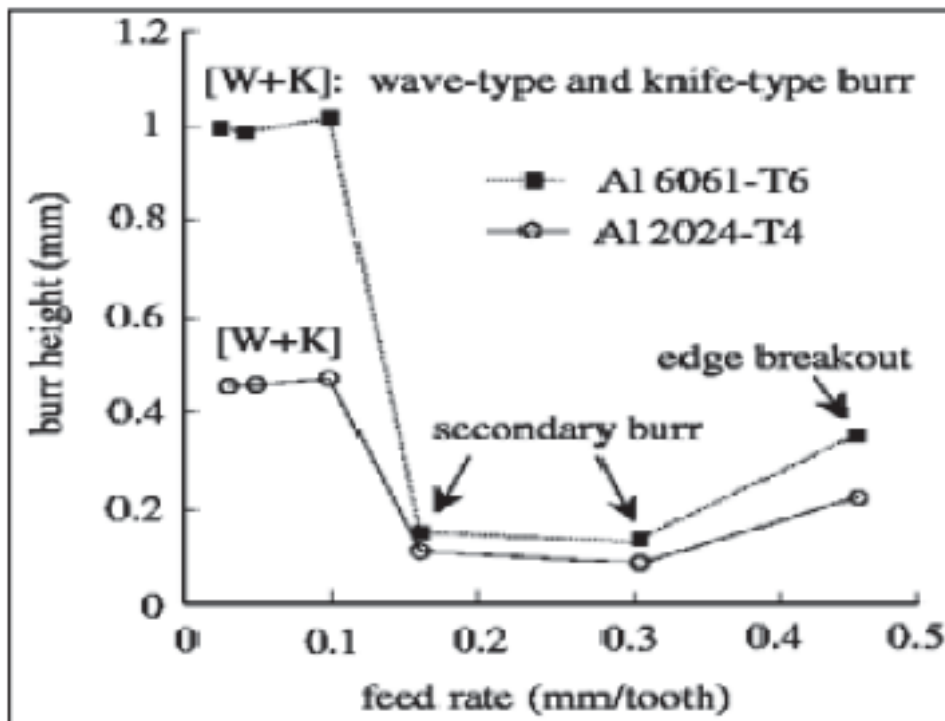


Figure 3.4 Influence de la vitesse d'avance sur les bavures de perçage.
 (P = 1.02 mm pour l'Al 6061-T6; P = 0.64 mm pour l'Al 2024-T4;
 Vc = 2.48 m/s; lubrification à air), tirée de (Gwo-Liang Chern, 1993)

Selon (Avila & Dornfeld, 2003), la hauteur des bavures varie d'une manière non régulière en fonction de la variation des conditions de coupe. La figure 3.5 montre que la hauteur de bavure est au maximum lorsque la vitesse de coupe atteint 6400 m/min, cependant si la vitesse de coupe dépasse le 6400 m/min, la hauteur de bavure commence à diminuer jusqu'à atteindre une petite valeur autour de 160 μm . Selon l'auteur, la diminution de hauteur de bavure 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.

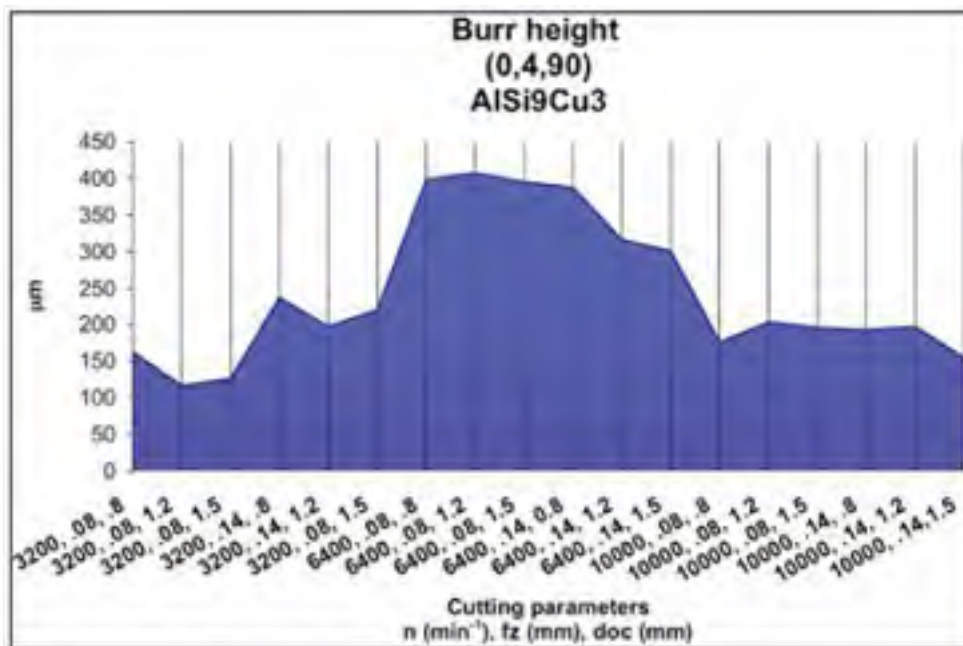


Figure 3.5 Hauteur des bavures en fonction de la variation des conditions de coupe. Matériau de la pièce : AlSi9Cu3, tirée de (Avila & Dornfeld, 2003)

Selon (L. Gillespie, 2006) des micros-bavures peuvent être générés lors de l'usinage à grande vitesse de coupe ou bien (l'usinage dur). Selon (King & Vaughn, 1984) l'augmentation de la vitesse de coupe, engendre l'augmentation de la température d'usinage, jusqu'à atteindre un certain niveau de température. Une plus grande vitesse de coupe diminue d'avantage la température. L'auteur explique que ce phénomène peut influencer la ductilité du matériau, l'usure de l'outil, la formation du copeau et la génération des bavures. Selon (Wang & Zhang, 2004), au moment de la génération des petits copeaux à cause de très petites vitesses

d'avance, l'outil commence à brouter ce qui génère des larges bavures très difficiles à enlever.

(Dornfeld, 2002), (Wygowski, 2006) ont montré que l'augmentation de profondeur de coupe pendant l'usinage permet l'augmentation de la taille des bavures. Cependant cette variation dépend également des autres paramètres de coupe. (Tseng & 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. (Gwo-Liang Chern, 1993), (Olvera & Barrow, 1996) montrent que l'application d'une grande profondeur axiale en cas de fraisage, permet la diminution de la taille des bavures, mais cette méthode peut causer des dommages liés à la pièce, à l'outil et à la machine. Une profondeur de coupe assez importante est recommandée dans le cas d'usinage des matériaux ductiles afin d'éviter la formation des bavures.

Selon (Olvera & Barrow, 1996), (Tseng & 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.

D'après les études précédentes on peut constater que la formation des bavures est influencée par la variation de paramètres de coupes, particulièrement par la vitesse de coupe et d'avance, toutefois, il serait possible d'optimiser ces paramètres à fin de minimiser la formation des bavures.

❖ **La lubrification**

Selon (Simon & al. 2004), parmi les facteurs qui minimisent la formation de bavures, une lubrification appropriée qui permet la réduction de frottements entre la pièce et l'outil, et par conséquent la réduction de chaleur. Les essais de perçage réalisés par (Sofronas, 1975), à réaliser des essais de perçage en utilisant plusieurs types de lubrifiants ont montré que le *sulfochlorinated mineral 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 friction entre l'outil et le copeau. Selon (J. Aurich, Sudermann, & Bil, 2005), pour certains matériaux, la dureté des bavures peut être augmentée à cause de la

lubrification, ce qui les rend plus difficiles à enlever. Selon (Klocke & 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 (Shefelbine & Dornfeld, 2004) montre que l'usinage à sec peut être plus économique, 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. Le côté environnemental est également affecté par la pollution atmosphérique et la pollution des eaux produite. Cependant, l'usinage à sec a 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 & Dom, 2000), le coût associé à l'outil peut atteindre 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, Songmene, Kientzy, & LeHuy, 2009) dans son article sur la comparaison entre l'usinage à sec et l'usinage lubrifié.

3.2.3 Paramètres d'outil et usures

Les études 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. 3.1).

Tableau 3.1 : Classification industrielle des matériaux à usiner

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 (Dureté >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 3.2).

Tableau 3.2 : Description des revêtements de titane Sandvik (2008)

Revêtement	Description	Couleur	Dureté	Utilisation
TiN	<i>Titanium Nitride</i>	Dorée	2400 HV	Universel, avec conditions de coupe modérées
TiCN	<i>Titanium Carbon Nitride</i>	Gris magenta	3000 HV	Résistant à l'usure, recommandée pour l'acier inoxydable
TiAlN	<i>Titanium Aluminum Nitride</i>	Noir magenta	3000 HV	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

Plusieurs recherches ont été faites pour déterminer l'influence de la géométrie de l'outil sur la formation des bavures. Par contre, très peu de recherche a été menée pour déterminer l'influence du matériau et revêtement de l'outil sur la formation des bavures.

Selon (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, ce qui génère de grandes bavures (figure 3.6). On remarque qu'autour d'un angle de pointe de 150° , l'outil génère une grande taille de bavures, et l'augmentation de l'angle d'hélice diminue la taille des bavures.

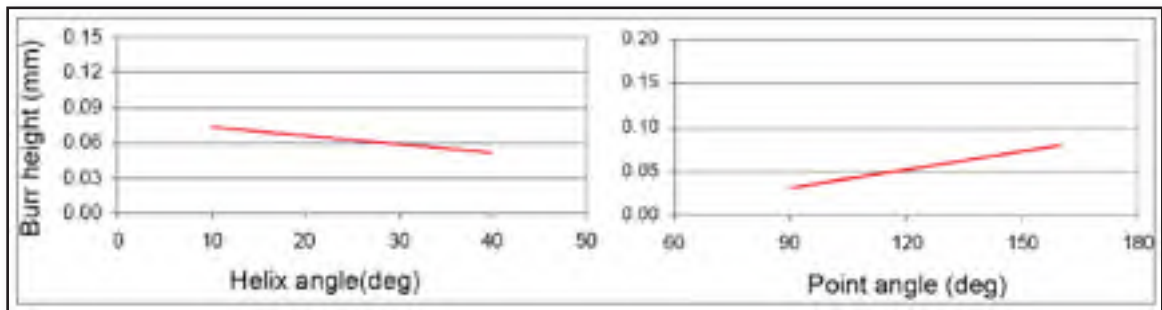


Figure 3.6 Influence de la géométrie de l'outil sur les bavures de perçage.
(Matériau : Acier AISI4118; diamètre de l'outil : 3.9688 mm;
 $f/d = 0.02$ [mm/tr x 1/mm]), tirée de (Dornfeld, 2002)

Il a été mentionné que la variation du diamètre de l'outil n'affectait pas la taille des bavures. Selon (Dornfeld, 2002), (C.-s. Kim, 2000), (Kishimoto, 1981), (Gwo-Liang Chern, 1993), (Wang & Zhang, 2004), la diminution du rayon de l'arrête de l'outil r , diminue la taille des bavures. Selon (Shefelbine & 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 surfacage diminuent la taille des bavures. Selon (Pande & Relekar, 1986), la formation des bavures de perçage sont influencées par 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. Les auteurs montrent qu'il existe un intervalle de paramètres de coupe optimaux où la formation des bavures peut être réduite au minimum.

Les essais de rainurage faits par (Wygowski, 2006) ont montré que la taille des bavures est influencée par le type d'outil de coupe ; l'auteur a observé lors de ses essais 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. (Sofronas, 1975) a expérimenté un outil de perçage à coins arrondis au niveau des extrémités des lèvres pour réduire la

formation des bavures; il a remarqué que la génération des bavures est influencée par la forme de l'outil. (C.-s. 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. (L. Gillespie, 2006) a montré que la génération des bavures est influencée par le nombre d'hélices sur l'outil ; en effet 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 (L. Gillespie, 2006), (Dornfeld, 2002), (Wang & Zhang, 2004), l'usure de l'outil et les conditions de coupe utilisés, 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 & 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.

$$V_c \times T^n = C_t \quad (3.1)$$

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 3.7).

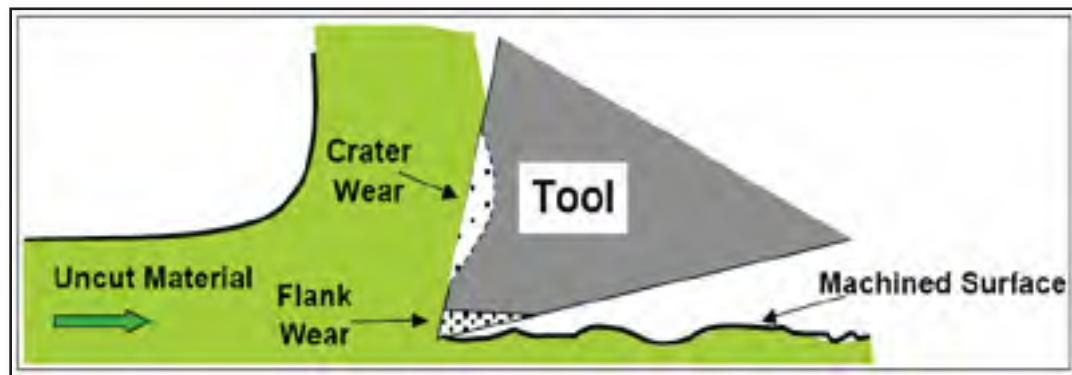


Figure 3.7 Usure de la pointe de l'outil. Tirée de (Choi, Wang, Dornfeld, & Tsujino, 1990)

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 3.8 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 d'entrée.

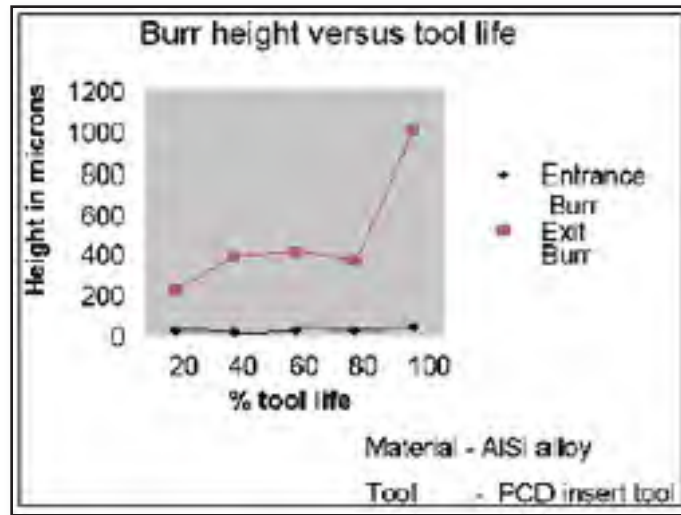


Figure 3.8 Relation entre la formation des bavures et l'usure de l'outil.
Tirée de (Choi et al., 1990)

Selon (Tseng & Chiou, 2003), (Dornfeld, 2002), (L. K. Gillespie, 1981), 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 & 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.

3.2.4 Paramètres liés à la machine, son environnement et aux stratégies de coupe

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 (Gwo-Lianq 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 et les conditions de coupe. (Tseng & 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 (Sofronas, 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 °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.

❖ Stratégie de coupe

(Wygowski, 2006), (Wang & Zhang, 2004), (Chu & Dornfeld, 2004) 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.

3.3 Caractérisation des bavures

Une bavure peut être définie par les grandeurs caractéristiques suivantes; sa géométrie, sa dimension et sa localisation.

3.3.1 Forme de la bavure

(Schäfer et al., 1975) ont 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 3.9.

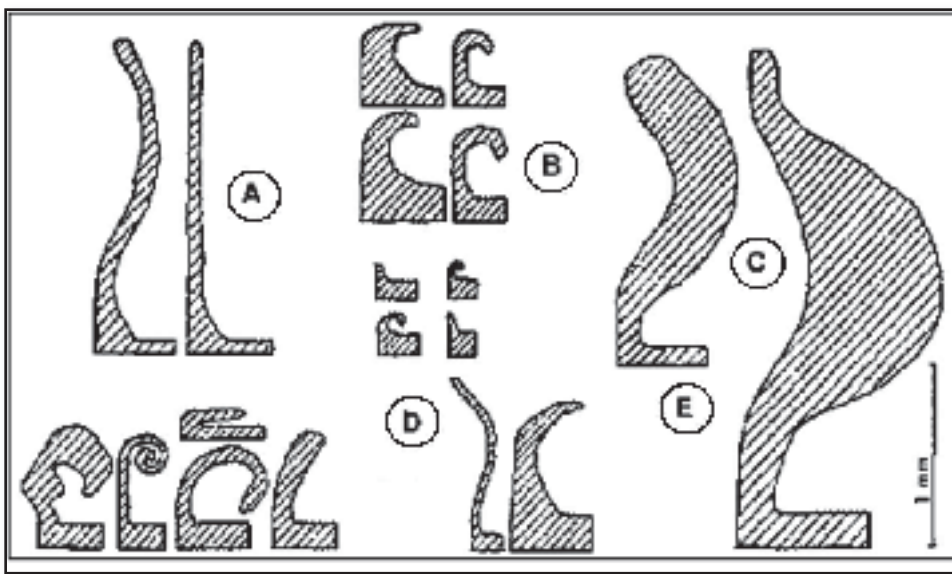


Figure 3.9 Classification géométrique et visuelle des bavures.
(A) perçage, (B) tronçonnage, (C) tournage, (D) rectification,
(E) rabotage), tirée de (Schäfer et al., 1975)

Selon (K. Przyklenk, et M. Schlatter 1986), A = l'angle de bord à la bavure (figure 2.10) et l'épaisseur de coupe (figure 3.11) influencent la hauteur de bavure lors de fraisage de finition.

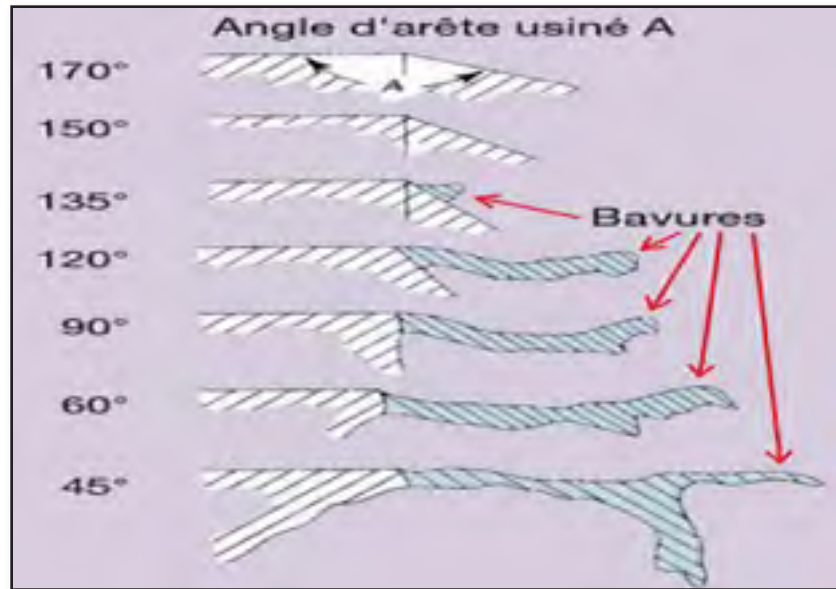


Figure 3.10 Hauteur de la bavure après le fraisage de finition
(K. Przyklenk, et M. Schlatter 1986)

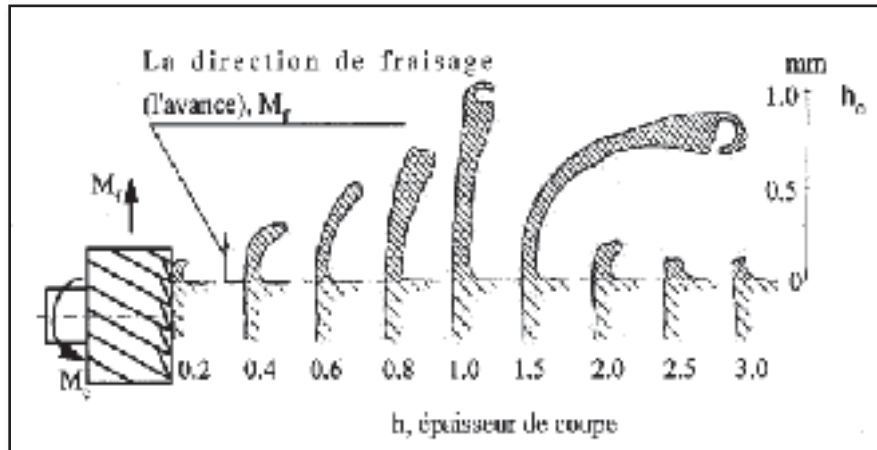


Figure 3.11 Influence de l'épaisseur de coupe h
sur la hauteur de la bavure h_b après le fraisage de finition
(K. Przyklenk, et M. Schlatter 1986)

3.3.2 Dimension de bavure

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. (K. Przyklenk, et M. Schlatter 1986) a caractérisé les bavures d'usinage selon 5 paramètres dimensionnels (α , bf , bg , rf , ho), où α est l'angle du bord de la pièce, bf est l'épaisseur de la racine de la bavure, bg est l'épaisseur de la bavure, r est le rayon de la bavure et ho est la hauteur de la bavure (figure 3.12).

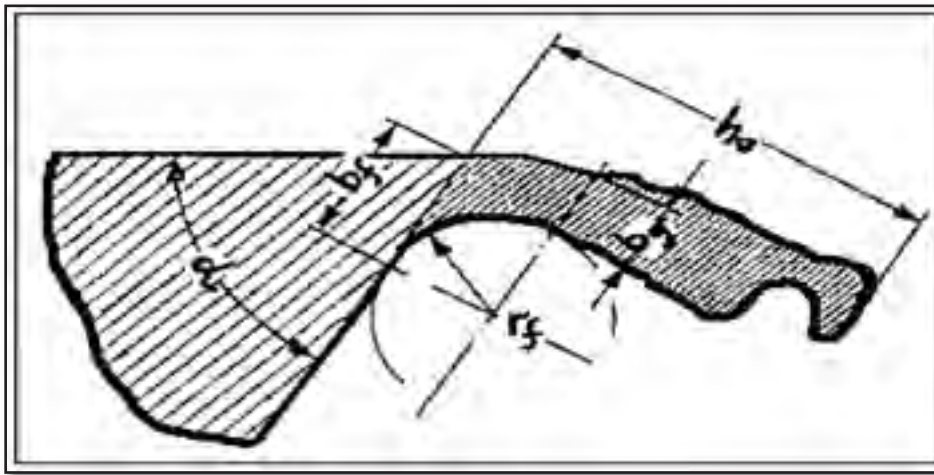


Figure 3.12 Caractéristiques dimensionnelles de la bavure d'usinage.
Tirée de (K. Przyklenk, et M. Schlatter 1986)

La caractérisation de (J. Aurich et al., 2005) ressemble à celle de (K. Przyklenk, et M. Schlatter 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 3.13). 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.

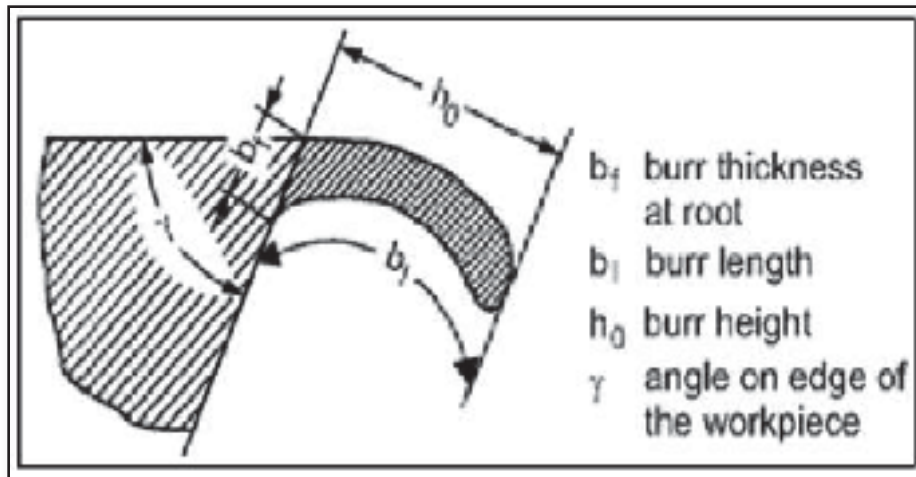


Figure 3.13 Caractérisation dimensionnelle de la bavure d'usinage.
Tirée de (J. Aurich et al., 2005)

Parmi les facteurs qui influencent la formation de bavure est la géométrie de la pièce. Selon (Schäfer et al., 1975) pour mieux décrire la bavure, un nouveau terme nommé la valeur de bavure *Burr value* est défini comme suit :

$$g = \frac{4 \cdot b_f + 2 \cdot r_f + b_g + h_0}{8} \quad (3.2)$$

Avec :

- b_f : L'épaisseur de la bavure.
- r_f : Rayon de la bavure.
- b_g : L'épaisseur de la bavure.
- h_0 : La hauteur de la bavure.

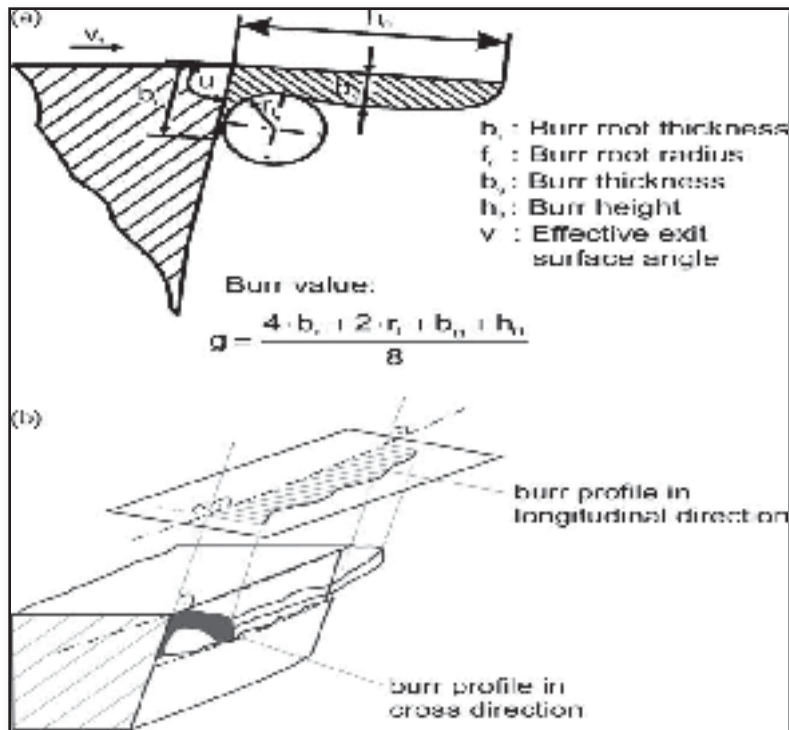


Figure 3.14 Mesure de bavure (J. C. Aurich et al., 2009)

Ces grandeurs permettent de caractériser les bavures et d'étudier les possibilités de chaque procédé.

La norme ISO 13715 utilise seulement une seule valeur pour décrire la dimension de bavure, voir (figure 3.15). La taille de bavure est nommée *edge measure* (a). Cette valeur est mesurée à partir de la pointe de la bavure perpendiculairement à la surface depuis laquelle la bavure est projetée.

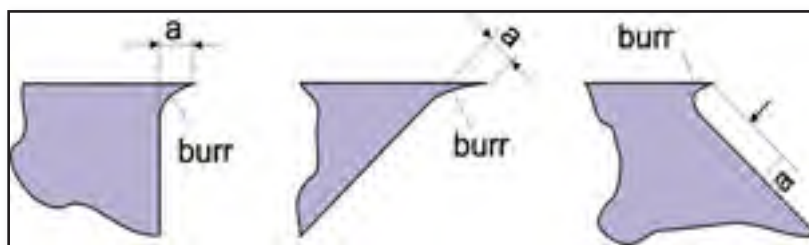


Figure 3.15 La taille de bavure selon ISO 13715

3.3.3 Localisation de bavure

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 (C.-s. Kim, 2000), le seul aspect positif rencontré dans l'étude des bavures est leur localisation puisque leur lieu de génération est souvent prévisible. (Tiabi, 2010) a récapitulé dans le tableau 3.3 les divers lieux où les bavures peuvent être susceptibles de se former suivant les multiples procédés d'usinage couramment utilisés.

Tableau 3.3 : Localisation des bavures d'usinage

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

3.4 Critères de sélection de méthode d'ébavurage proposés

Pour pouvoir sélectionner une méthode d'ébavurage adéquate nous devons nous baser sur des critères solides et pertinents, en nous basant sur l'étude de différents procédés d'ébavurages, la formation et la caractérisation de bavure précédente nous avons conclu que :

Le choix d'un procédé d'ébavurage doit tenir compte des critères déterminants liés à la bavure, à la pièce et au procédé d'ébavurage récapitulés ci-dessous.

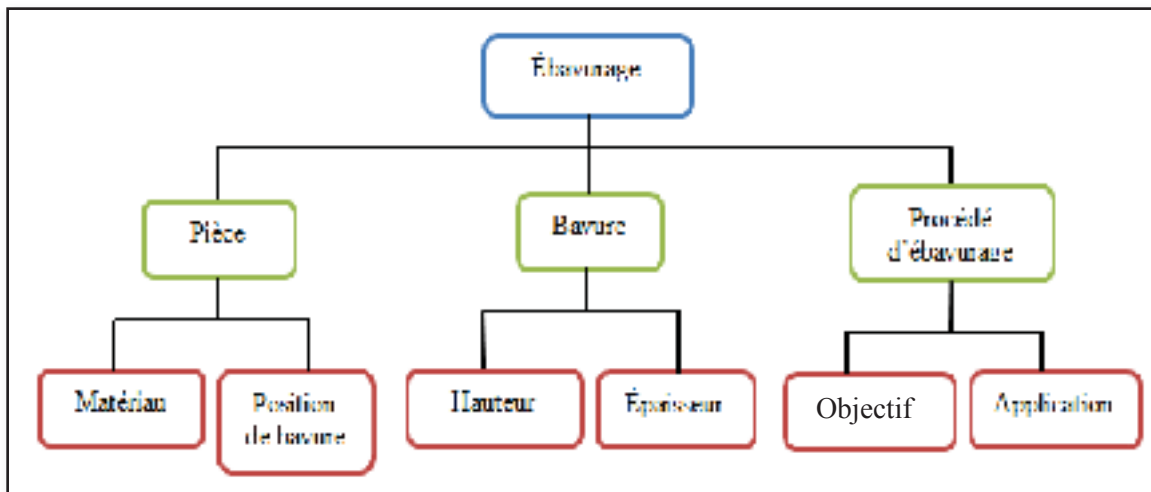


Figure 3.16 Critères de choix proposés

Nous allons travailler sur les quinze procédés d'ébavurage les plus utilisés au monde recensés par (L. K. Gillespie, 1999) présentés dans le tableau 1.3 page 19.

Dans la section suivante, on présentera les performances des méthodes d'ébavurages avec les différents critères de sélection retenus selon l'étude précédente.

Les tableaux présentés dans la section suivante sont considérés comme une base de données qui englobe des informations relatives aux différentes méthodes d'ébavurage, et décrivent les capacités et les limites de chaque méthode d'ébavurage vis-à-vis les critères de sélection choisis. Cela nous facilite l'évaluation des méthodes d'ébavurage et nous permet d'établir une stratégie de sélection de la meilleure méthode d'ébavurage pour une application donnée.

❖ Correspondance entre les méthodes d'ébavurage et les critères de sélection

Tableau 3.4 : Performance des méthodes d'ébavurages avec le matériau de la pièce.

Méthode D'ébavurage	Matériaux										
	Fer	Fer doux	Ac. dure	Ac. inoxy	Lait.	Zinc	Alum	Plas	Cér.	Cui.	Fon.
Ébavurage Manuel											
Brossage											
Sablage											
Jet abrasive											
Finition par vibration											
Coupe mécanisée											
Tonneau d'ébavurage											
Tonneau de vibration centrifuge											
Ébavurage robotique											
Broche de finition											
Ébavurage électrochimique											
Jet d'eau											
Ébavurage thermique											
Grenailage											
Ébavurage ultrasonique	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

? : Manque de données publiées



: Certains plastiques



: Réalisable



: Non réalisable

Tableau 3.5 : Performance des méthodes d'ébavurages avec l'épaisseur de bavure.

Méthode D'ébavurage	Épaisseur de bavure (mm)										
	[0.005 - 0.009]	[0.010 - 0.019]	[0.020 - 0.039]	[0.040 - 0.079]	[0.080 - 0.159]	[0.160 - 0.314]	[0.315 - 0.629]	[0.630 - 1.249]	[1.250 - 2.490]	[2.500 - 6.500]	[6.500- 12.500]
Ébavurage Manuel											
Brossage											
Sablage											
Jet abrasive											
Finition par vibration											
Coupe mécanisée											
Tonneau d'ébavurage	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Tonneau de vibration centrifuge											
Ébavurage robotique											
Broche de finition	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Ébavurage électrochimique											
Jet d'eau											
Ébavurage thermique											
Grenailage											
Ébavurage ultrasonique											

? : Manque de données publiées



: Réalisable



: Non réalisable

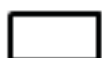
Tableau 3.6 : Performance des méthodes d'ébavurages avec la hauteur de bavure

Méthode D'ébavurage	Hauteur de bavure en (mm)										
	[0.005-0.009]	[0.010-0.019]	[0.020-0.039]	[0.040-0.079]	[0.080-0.159]	[0.160-0.314]	[0.315-0.629]	[0.630-1.249]	[1.250-2.490]	[2.500-6.500]	[6.500-12.500]
Ébavurage Manuel											
Brossage											
Sablage											
Jet abrasive											
Finition par vibration											
Coupe mécanisée											
Tonneau d'ébavurage	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Tonneau de vibration centrifuge											
Ébavurage robotique											
Broche de finition	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Ébavurage électrochimique											
Jet d'eau											
Ébavurage thermique											
Grenaillage											
Ébavurage ultrasonique											

? : Manque de données publiées



: Réalisable



: Non réalisable

Tableau 3.7 : Performance des méthodes d'ébavurages avec la position de bavure

Méthode D'ébavurage	Position de bavure					
	BBE	BBS	BL	BS	BC	BI
Ébavurage Manuel						
Brossage						
Sablage						
Jet abrasive						
Finition par vibration						
Coupe mécanisée						
Tonneau d'ébavurage						
Tonneau de vibration centrifuge						
Ébavurage robotique						
Broche de finition	?	?	?	?	?	?
Ébavurage électrochimique						
Jet d'eau						
Ébavurage thermique						
Grenailage						
Ébavurage ultrasonique						

? : Manque de données publiées



: Réalisable



: Non réalisable

Tableau 3.8 : Performance des méthodes d'ébavurages
avec l'état finale de la surface

Méthode D'ébavurage	Objectif d'ébavurage (intégrité de surface)		
	Finition	Semi-finition	Ébauche
Ébavurage Manuel			
Brossage			
Sablage			
Jet abrasive			
Finition par vibration			
Coupe mécanisée			
Tonneau d'ébavurage	?	?	?
Tonneau de vibration centrifuge			
Ébavurage robotique			
Broche de finition	?	?	?
Ébavurage électrochimique			
Jet d'eau			
Ébavurage thermique			
Grenailage			
Ébavurage ultrasonique			

? : Manque de données publiées

: Réalisable : Non réalisable

Tableau 3.9 : Performance des méthodes d'ébavurages avec les différentes applications

Méthode D'ébavurage	Applications									
	Intersection des trous	Contour meubler	Contour extérieur	Flansures extérieur	Surfaces plates	Trous intérieur	Toune complexe	Arêtes extérieur	Pièce déformable	Roue denté
Ébavurage Manuel										
Drossage										
Sablage										
Jet abrasif										
Finisou par vibration										
Coupe mécanique										
Touneau d'ébavurage	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Touneau de vibration centrifuge										
Ébavurage rhéologique										
Brocne de finition										
Ébavurage électrochimique										
Jet d'eau										
Ébavurage thermique										
Grenaillage										
Ébavurage ultrasonique	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

? : Manque de données publiées

Tableau 3.10 : Performance des méthodes d'ébavurages avec les différentes applications (Suite)

Méthode d'ébavurage	Applications (Suite)									
	Pièce à grand volume	Pièce à petit volume	Travaux de finition	Ébavure mince industrielle	Bavure mince artisanale	Charbonnage	Pièce cylindrique	Surface arrondie	Production en masse	Production unitaire
Ébavurage Manuel										
Erosage										
Sablage										
Jet abrasif										
Finition par vibration										
Coupe mécanisée										
Tonneau d'ébavurage	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Tonneau de vibration centrifuge										
Ébavurage robotique										
Bloc de finition										
Ébavurage électrochimique										
Jet d'eau										
Ébavurage thermique										
Grenillage										
Ébavurage ultrasonique	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

? : Manque de données publiées

3.5 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 les différents facteurs technologiques pouvant influencer la formation des bavures. Ensuite, nous avons discuté les caractéristiques de bavure.

Cette étude nous a permis de conclure que : les exigences géométriques et qualitatives de la pièce (tolérances, forme, grandeur, etc.), nous permettent de choisir la technique d'égavurage adéquate pouvant satisfaire les besoins de la pièce. Selon (L. K. Gillespie, 1999), l'égavurage sur machine-outil à commande numérique CNC peut atteindre une précision de 50 μm alors que l'égavurage thermique peut performer juste 125 μm de précision. La notion de coût du procédé d'égavurage est très importante dans les décisions relatives à la sélection des méthodes d'égavurage. Un procédé cher ne peut pas être forcément le meilleur. Selon (L. K. Gillespie, 1999), pour une même pièce, l'égavurage manuel peut coûter 0.6\$/pièce, alors que l'égavurage chimique ne coûterait que 0.5\$/pièce. Le matériau de la pièce peut jouer un grand rôle dans la sélection des méthodes d'égavurage. Certaines méthodes ne permettent pas l'égavurage de certains types de matériaux. Par exemple, les méthodes électrochimiques ne s'appliquent que sur des pièces conductrices de courant. Le volume de production peut aider à choisir le procédé d'égavurage, car il existe des procédés destinés uniquement à la production unitaire, par exemple l'égavurage par jet abrasif. Cependant, le tonneau d'égavurage est destiné à la production en masse, et l'égavurage par brosse peut être utilisé dans les deux cas. Le type de bavure produit sur les arêtes de la pièce peut constituer un indice très important dans le choix de procédé d'égavurage convenable. Car certains procédés sont capables d'enlever des bavures de petite épaisseur seulement, comme dans le cas de l'électro-polissage. En outre, l'égavurage thermique est recommandé pour les bavures épaisses.

Nous avons construit des tableaux qui présentent les capacités des méthodes d'égavurage versus les critères de sélection, sur lesquels nous allons nous baser pour établir une stratégie de sélection.

CHAPITRE 4

STRATÉGIE DE SÉLECTION DES MEILLEURES MÉTHODES D'ÉBAVURAGE

4.1 Introduction

L'un des principaux objectifs de la recherche sur l'ébavurage consiste à élaborer un outil de décision permet de sélectionner des méthodes d'ébavurage fiable et efficace. Une stratégie efficace contribuera à réduire le coût d'ébavurage en ayant une meilleure qualité de surface. Après avoir déterminé les critères de choix nécessaires pour sélectionner une méthode d'ébavurage, nous avons mis en place une stratégie permettant de sélectionner la meilleure méthode d'ébavurage pour une application donnée, en nous basant sur les critères identifiés au préalable dans le chapitre précédent. Puis nous avons implémenté cette stratégie sur Matlab. Ensuite un modèle d'optimisation a été établi dans le but de minimiser le cout d'ébavurage. Enfin une interface graphique a été conçue sur Matlab afin de faciliter la communication entre l'application et le client.

4.2 Conception d'outil d'aide à la décision

4.2.1 Stratégie de sélection

Le fonctionnement de la stratégie est comme suit : au début le programme demande au client de saisir les critères de choix selon ses exigences d'ébavurage. Dans la deuxième étape, le programme commence à balayer les tableaux de base de données pour vérifier la validité des critères de choix saisi par le client. S'il trouve des méthodes d'ébavurage qui sont compatible aux exigences de client, donc il va les classer selon leur performance puis il les affiche. Si au moins un seul critère qui n'est pas compatible avec les performances des méthodes d'ébavurage, le programme affichera le résultat « Méthode non disponible », ensuite il demande au client de changer les critères de choix.

Une explication plus détaillée sur le fonctionnement de programme sera présentée dans la section suivante.

Le diagramme illustré sur la figure 4.1 suivant résume le fonctionnement de programme de sélection des méthodes d'ébavurage.

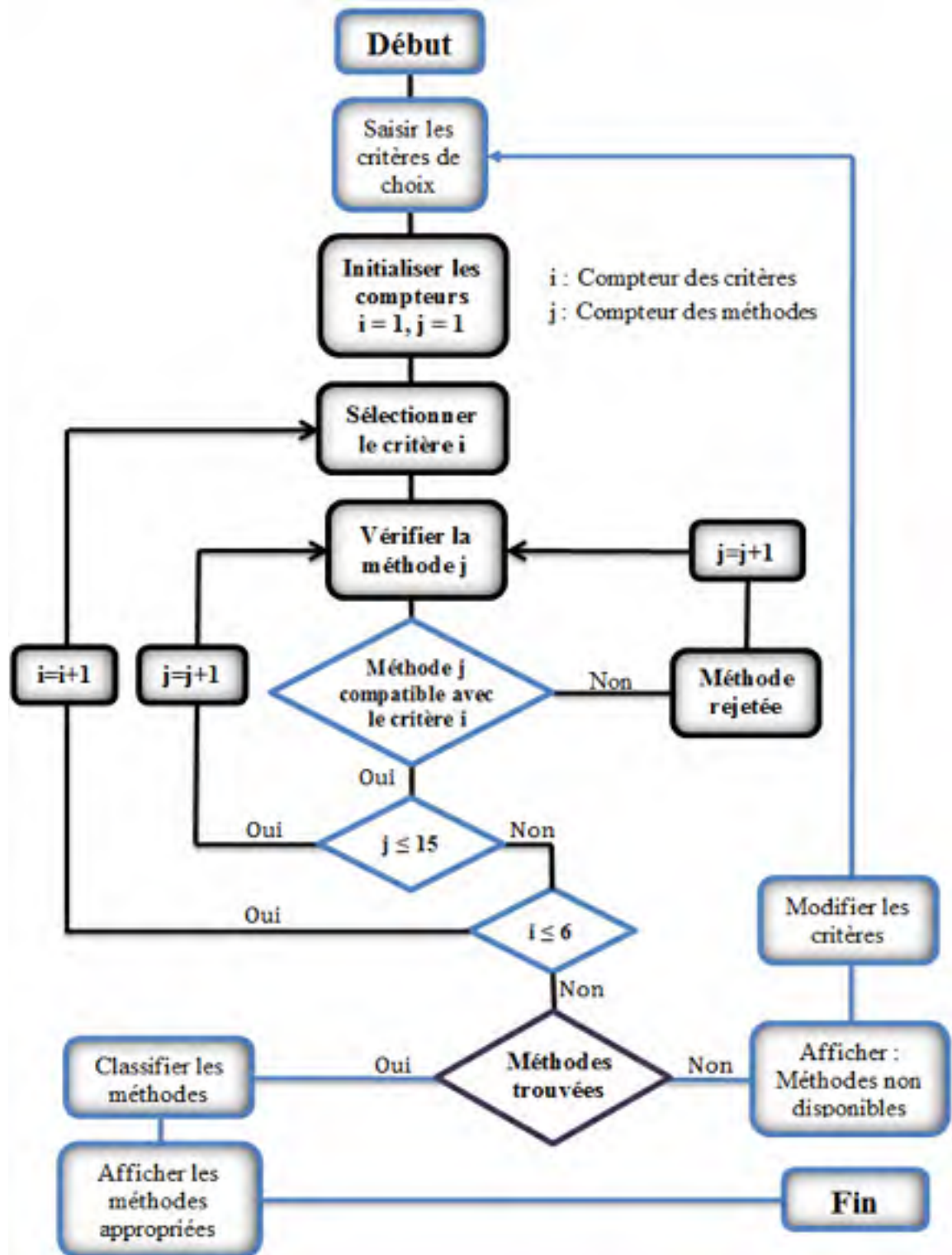


Figure 4.1 Stratégie de sélection de méthode d'ébavurage

4.2.2 Exemple d'application

Dans cette partie nous allons présenter un exemple d'application pour mieux expliquer le fonctionnement de programme de sélection. La fiabilité de résultat de cette application dépend fortement de la richesse des données utilisées.

Soit un client qui exige les critères suivants :

- Matériaux : Aluminium ;
- Épaisseur de bavure : [0.040 – 0.079 mm];
- Hauteur de bavure : [0.630 – 1.249 mm];
- Position de bavure : BL (Bavure latérale);
- Objectif d'ébavurage : Semi-finition;
- Application d'ébavurage : Surface plate.

➤ **Première étape :** Vérifier la capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer l'aluminium.

Méthode D'ébavurage	Matériaux										
	Fer	Fer doux	Ac. dure	Ac. inoxy.	Laît.	Zinc	Alum.	Plas.	Cér.	Cui.	Fon.
Ébavurage Manuel											
Brossage											
Sablage											
Jet abrasive											
Finition par vibration											
Coupe mécanisée											
Tonneau d'ébavurage											
Tonneau de vibration centrifuge											
Ébavurage robotique											
Broche de finition											
Ébavurage électrochimique											
Jet d'eau											
Ébavurage thermique											
Grenailage											
Ébavurage ultrasonique	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?


? : Manque de données publiées
 : Certains plastiques

Figure 4.2 La capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer l'aluminium

Comme en remarque dans ce tableau, toutes les méthodes d'ébavurage sont capables d'ébavurer l'aluminium. Donc le programme va retenir toutes les méthodes et passe à l'étape suivante.

- **Deuxième étape :** Vérifier la capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer l'épaisseur [0.04 – 0.79 mm] de bavure.

Méthode D'ebavurage	Épaisseur de bavure (mm)										
	[0.001-0.009]	[0.010-0.019]	[0.020-0.039]	[0.040-0.079]	[0.080-0.159]	[0.160-0.314]	[0.315-0.629]	[0.630-1.249]	[1.250-2.490]	[2.500-6.500]	[6.500-12.500]
Ébavurage Manuel											
Brossage											
Sablage											
Jet abrasive											
Finition par vibration											
Coupe mécanisée											
Tonneau d'ebavurage	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Tonneau de vibration centrifuge											
Ébavurage robotique											
Broche de finition	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Ébavurage électrochimique											
Jet d'eau											
Ébavurage thermique											
Grenailage											
Ébavurage ultrasonique											

? : Manque de données publiées

Figure 4.3 La capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer l'épaisseur [0.040 – 0.079 mm]

Les méthodes d'ébavurage qui vont être retenues dans cette étape sont : ébavurage manuel, brossage, sablage, jet abrasive, finition par vibration, coupe mécanisée, tonneau de vibration centrifuge, ébavurage robotique, ébavurage électrochimique, ébavurage thermique. Les restent ils vont être éliminés automatiquement.

- **Troisième étape :** Vérifier la capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer la hauteur [0.630 – 1.249 mm] de bavure.

Méthode D'ebavurage	Hauteur de bavure en (mm)										
	[0.005-0.009]	[0.010-0.019]	[0.020-0.039]	[0.040-0.079]	[0.080-0.159]	[0.160-0.314]	[0.315-0.629]	[0.630-1.249]	[1.250-2.490]	[2.500-6.500]	[6.500-12.500]
Ébavurage Manuel											
Brossage											
Sablage											
Jet abrasive											
Finition par vibration											
Coupe mécanisée											
Tonneau d'ebavurage	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Tonneau de vibration centrifuge											
Ébavurage robotique											
Broche de finition	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Ébavurage électrochimique											
Jet d'eau											
Ébavurage thermique											
Grenaillage											
Ébavurage ultrasonique											

? : Manque de données publiées

Figure 4.4 La capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer la hauteur [0.630 – 1.249 mm]

Les méthodes d'ébavurage qui vont être retenues dans cette étape sont : ébavurage manuel, brossage, finition par vibration, coupe mécanisée, tonneau de vibration centrifuge, ébavurage robotique, ébavurage thermique.

- **Quatrième étape :** Vérifier la capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer la localisation BL (Bavure latérale) de bavure.

Méthode D'ébavurage	Position de bavure					
	BBE	BBS	BL	BS	BC	BI
Ébavurage Manuel						
Brossage						
Sablage						
Jet abrasive						
Finition par vibration						
Coupe mécanisée						
Tonneau d'ébavurage						
Tonneau de vibration centrifuge						
Ébavurage robotique						
Broche de finition	?	?	?	?	?	?
Ébavurage électrochimique						
Jet d'eau						
Ébavurage thermique						
Grenaillage						
Ébavurage ultrasonique						

? : Manque de données publiées

Figure 4.5 la capacité des méthodes d'ébavurage à ébavurer la localisation BL (Bavure latérale)

Dans cette étape le programme va garder les mêmes méthodes d'ébavurage de l'étape précédente.

- **Cinquième étape :** Vérifier la capacité des méthodes d'ébavurage à réaliser l'objective « Semi-finition » de l'ébavurage.

Méthode D'ébavurage	Objectif d'ébavurage (intégrité de surface)		
	Finition	Semi-finition	Ébauche
Ébavurage Manuel			
Brossage			
Sablage			
Jet abrasive			
Finition par vibration			
Coupe mécanisée			
Tonneau d'ébavurage	?	?	?
Tonneau de vibration centrifuge			
Ébavurage robotique			
Broche de finition	?	?	?
Ébavurage électrochimique			
Jet d'eau			
Ébavurage thermique			
Grenaillage			
Ébavurage ultrasonique			

? : Manque de données publiées

Figure 4.6 la capacité des méthodes d'ébavurage à réaliser l'objectif (Semi-finition) de l'ébavurage.

Les méthodes d'ébavurage qui vont être retenues dans cette étape sont : brossage, finition par vibration, coupe mécanisée, tonneau de vibration centrifuge, ébavurage robotique, ébavurage thermique.

- **Sixième étape :** Vérifier la capacité des méthodes d'ébavurage à réaliser l'application « Surface plate » de l'ébavurage.

Méthode D'ébavurage	Application									
	Intersection des trous	Contour irrégulier	Contour extérieur	Bavures extérieur	Surfaces plates	Trous intérieur	Forme complexe	Arêtes extérieur	Pièce déformable	Roue denté
Ebavurage Manuel										
Brossage										
Sablage										
Jet abrasive										
Finibon par vibration										
Coupe mécanisée										
Tonneau d'ébavurage	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Tonneau de vibration centrifuge										
Ebavurage robotique										
Broche de finition										
Ebavurage électrochimique										
Jet d'eau										
Ebavurage thermique										
Grenailage										
Ebavurage ultrasonique	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

? : Manque de données publiées

Figure 4.7 la capacité des méthodes d'ébavurage à réaliser l'application (Surface plate) de l'ébavurage

Finalement les trois méthodes qui répondent aux exigences du client seront sélectionnées pour effectuer l'ébavurage des pièces sont : Brossage, Coupe mécanisée, et Ébavurage robotique.

Une interface graphique a été conçue afin de manipuler le programme de sélection et afficher les résultats trouvés.

4.2.3 Interface graphique de communication

Après l'implémentation du programme de sélection des méthodes d'ébavurage sur Matlab, nous avons conçu une interface graphique en utilisant l'outil « GUI » sur Matlab afin de faciliter l'interaction entre le programme et le client. Comme l'indique la figure 4.8 suivante cette interface se compose de trois sections, section 1 permettant la sélection de différents critères de choix, section 2 un bouton poussoir qui provoque l'exécution de programme, et section 3 un champ vide consacré à l'affichage des résultats.



Figure 4.8 Les différentes sections d'interface de sélection

Dans la prochaine partie, nous présentons les différentes étapes de fonctionnement d'interface graphique

Première étape : Choisir les critères de sélection convenable aux exigences de fabrication du client.



Figure 4.9 Sélection de critères de choix

Deuxième étape : Lancer le programme de recherche.



Figure 4.10 Exécution de programme de recherche

Troisième étape : Afficher les méthodes d'égavurage appropriées



Figure 4.11 Affichage des résultats

Quatrième étape : Modifier les critères de choix en cas où les critères ne sont pas valides.



Figure 4.12 Modification des critères de choix

Dans la prochaine section nous allons élaborer un modèle d'optimisation permettant de faire la répartition optimale des pièces à ébavurer sur les trois machines déjà sélectionnées au préalable par l'application, et par conséquent l'obtention de coût minimale d'ébavurage.

4.3 Optimisation de l'allocation de ressource

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 estimés et incluses pour garantir un meilleur choix technologique. Dans cet objectif nous avons établi un modèle permettant la minimisation du coût d'ébavurage en déterminant la solution d'ébavurage optimale.

4.3.1 Formulation de problème de sélection

➤ Présentation de problème

Une entreprise spécialisée dans l'ébavurage des pièces mécaniques dispose de dix machines d'ébavurage de différents types (M1, M2, ... M10). L'entreprise reçoit un mandat d'un client pour ébavurer n pièces qui se compose de plusieurs types de pièce.

Dans une première étape, l'entreprise commence par déterminer les méthodes d'ébavurage appropriées pour ébavurer chaque type de pièce. L'application utilisée peut fournir trois procédés d'ébavurage, pour chaque type de pièce.

Dans un deuxième temps l'entreprise veut sélectionner parmi les méthodes d'ébavurage déjà déterminées à l'étape précédente, celle l'optimale en respectant les contraintes suivantes :

- N n'est pas dépassé le volume/ la capacité de production (V) de chaque machine.
- N n'est pas dépassé le temps de disponibilité (D) de chaque machine.

L'objectif de l'entreprise est de minimiser le coût (C) d'ébavurage d'une pièce.

➤ Définition des variables

n : Nombre total des pièces à ébavurer.

P : Ensemble de pièces à ébavurer.

N : Type des pièces à ébavurer.

M : Machine sélectionnée pour effectuer l'ébavurage.

V : Volume/Capacité de production maximale d'une machine.

C : Coût d'ébavurage minimal d'une pièce.

D : Disponibilité de machine.

T : Temps d'ébavurage.

La variable de décision sera la quantité des pièces allouée à chaque machine.

4.3.2 Modélisation de problème de sélection

➤ Fonction objective

La fonction objective est une mesure quantitative du critère de performance associé au problème posé. Ce critère peut être relié au coût de production, au profit total généré par un plan de production, à l'utilisation des machines, etc., la forme générale de la fonction objective est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Min } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n = \sum_{j=1}^n C_jX_j \quad (4.1)$$

Ce critère peut être maximisé ou minimisé, dans notre cas nous voulons minimiser le coût d'ébavurage. La fonction objective suivante sera appliquée :

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 C_{ij}T_{ij}P_{ij}M_{ij} \quad (4.2)$$

Ce modèle de minimisation de coût contient les variables suivants :

C_{ij} : Le coût associé à la machine d'ébavurage.

T_{ij} : Le temps d'ébavurage d'une pièce.

P_{ij} : La quantité des pièces i associée à la machine j .

i : Numéro de pièce

j : Numéro de machine

M_{ij} : La machine j associée à la pièce i.

La variable de décision dans cette fonction est P_{ij} , la quantité des pièces allouée à chaque machine.

➤ **Identification des contraintes**

Une contrainte est une inégalité ou égalité qui restreint les variables de décision. Les contraintes en production manufacturière traitent de la limite des ressources, des obligations contractuelles, des lois physiques, etc. Pour notre modèle on a les contraintes suivantes :

- Le temps d'ébavurage doit être inférieur à la disponibilité de la machine :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 P_{ij} T_{ij} \leq D_{ij}$$

- La quantité des pièces à ébavurer doit être inférieure à la capacité maximale de machine :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 P_{ij} \leq V_{ij} \quad (4.3)$$

- Le nombre des machines fonctionnelles est fixé à trois. :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 M_{ij} = 3$$

Donc le modèle complet est le suivant :

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 C_{ij} T_{ij} P_{ij} M_{ij} \quad (4.4)$$

Sujet à

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 P_{ij} T_{ij} \leq D_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 P_{ij} \leq V_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 M_{ij} = 3$$

4.3.3 Résolution de modèle d'optimisation

Pour résoudre ce modèle, nous avons utilisé la commande « Solveur » d'Excel. Le solveur permet de trouver une valeur optimale (maximale ou minimale) pour une formule dans une seule cellule, appelée cellule objective. Nous avons défini notre modèle comme fonction objective, les contraintes et les variables de décision dans le solveur afin de minimiser le coût d'ébavurage de différentes pièces.

		Machine 1	Machine 2	Machine 3	Quantité pièces	Quantité Max
P1	Machine(s) opérationnelle (s)	M1	M2	M4	5300	5400
	Disponibilité des machines (h)	600	600	600		
P2	Machine(s) opérationnelle (s)	M5	M7	M8	9500	9600
	Disponibilité des machines (h)	600	600	600		
P3	Machine(s) opérationnelle (s)	M3	M6	M9	9100	9200
	Disponibilité des machines (h)	600	600	600		
Répartition des pièces sur les machines						
	Machine(s) sélectionnée (s)	M1	M2	M4	Temps/ Produit (h)	Coût/ Produit (\$)
P1	Répartition des pièces	500	2400	2400	1700	1220
	Temps d'ébavurage/Machine (h)	500	600	600		
	Coût d'ébavurage / unité (\$)	0,6	0,25	0,15		
P2	Machine(s) sélectionnée (s)	M5	M7	M8	1750	1520
	Répartition des pièces	2400	6000	1100		
	Temps d'ébavurage/Machine (h)	600	600	550		
	Coût d'ébavurage / unité (\$)	0,7	0,5	1		
P3	Machine(s) sélectionnée (s)	M3	M6	M9	1725	590
	Répartition des pièces	6000	700	2400		
	Temps d'ébavurage/Machine (h)	525	600	600		
	Coût d'ébavurage / unité (\$)	0,34	1,5	0,5		
P1 P2 P3					Coût Optimisé	3339 \$

Figure 4.13 Interface graphique de modèle d'optimisation

La figure 4.13 ci-dessus présente une interface graphique qui permet l'interaction avec le solveur, comme il est clair sur la figure dans la première section (Saisir les données d'entrées), on doit identifier les machines que seront opérationnelles, les temps de disponibilité de chaque machine et la quantité des pièces à ébavurer de chaque produit. On obtiendrait

comme résultat dans la deuxième section (Répartition des pièces sur les machines) la répartition optimale de chaque produit sur les machines respectives et le coût d'ébavurage minimal de tous les produits.

4.3.4 Analyse de sensibilité

L'objectif de cette analyse est de quantifier l'influence de variables d'entrées de notre modèle sur la variable de sortie. Elle consiste à changer la valeur d'une seule variable d'entrée en fixant les autres paramètres, puis en mesure le comportement de la sortie en fonction de ce changement.

Dans l'exemple suivant, nous allons étudier l'effet de variation de coût et de temps de produit (P1) sur la répartition des pièces sur les machines (M1, M2, et M3).

Tous d'abord on commence par fixer les valeurs de coût et de temps sur toutes les machines (tableau 4.1), puis on relève le résultat de répartition des pièces (figure 4.14).

Tableau 4.1 Fixation des paramètres d'entrées

Machine	M1	M2	M3
Coût (\$) / pièce	1	1	1
Temps (h) / pièce	0.25	0.25	0.25

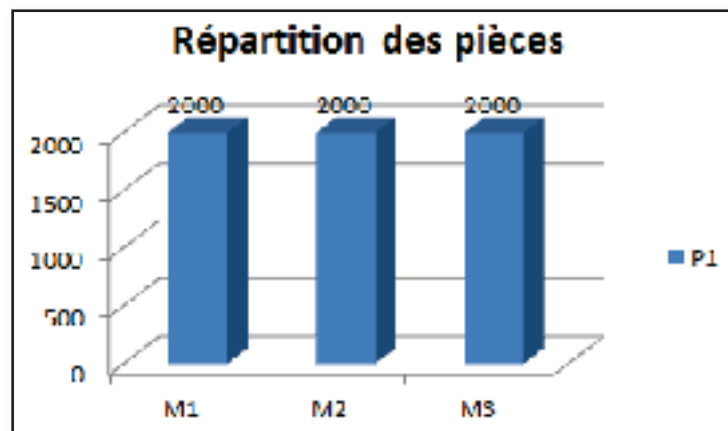


Figure 4.14 Répartition de produit P1 sur les machines M1, M2 et M3, (Temps et coût fixe)

Ensuite on augmente la valeur de coût en laissant les valeurs des autres paramètres fixes (tableau 4.2), puis on relève le résultat (figure 4.15).

Tableau 4.2 Variation de coût

Machine	M1	M2	M3
Coût (\$) / pièce	2	1	1
Temps (h) /pièce	0.25	0.25	0.25

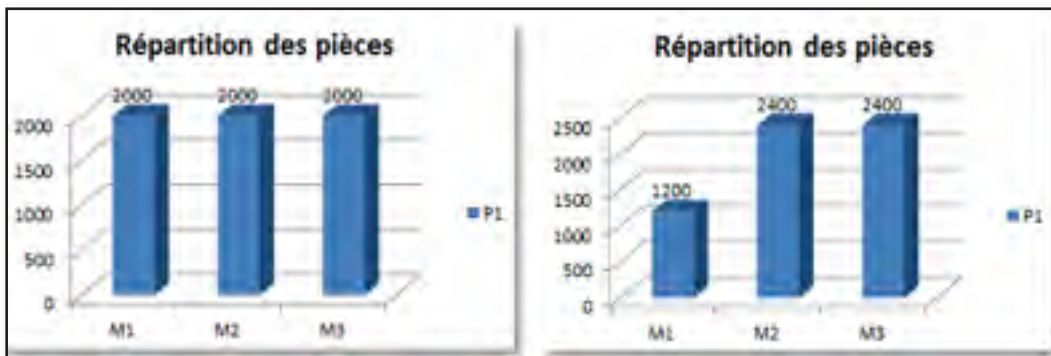


Figure 4.15 Répartition de produit P1 sur les machines M1, M2 et M3 (temps fixe, coût variable)

On remarque dans la figure précédente que la quantité des pièces allouées à la machine M1 a diminué par rapport aux autres machines, c'est à cause d'augmentation de coût d'ébavurage sur cette machine.

Dans l'exemple suivant, nous allons augmenter la variable de temps de la machine M2 pour voir son influence sur la répartition des pièces.

Tableau 4.3 Variation de temps

Machine	M1	M2	M3
Coût (\$) / pièce	1	1	1
Temps (h) /pièce	0.25	1	0.25

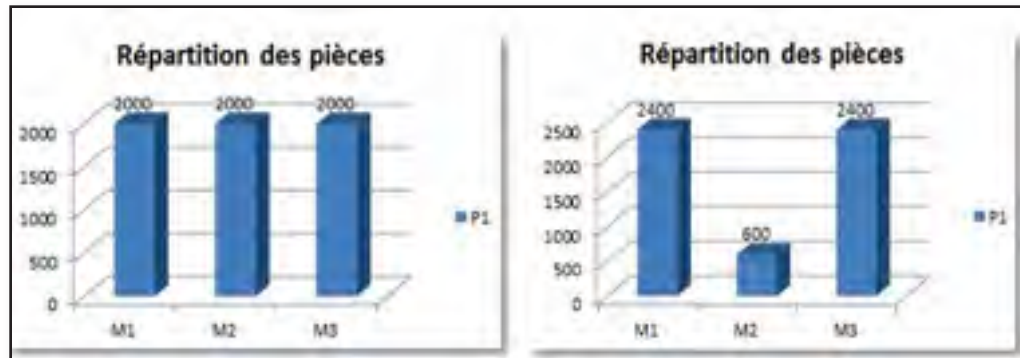


Figure 4.16 Répartition de produit P1 sur les machines M1, M2 et M3 (temps variable, coût fixe)

On remarque dans la figure 4.16 que la quantité des pièces allouées à la machine M2 a chuté à cause d'augmentation de temps d'ébavurage sur cette machine.

Les exemples précédents démontrent que la variation de variables d'entrées de modèle d'optimisation influe directement sur la sortie, en effet chaque augmentation de coût ou de temps d'ébavurage sur une machine particulière, permet la diminution de la quantité des pièces allouées à cette machine. Par conséquent, on obtient une répartition optimale de pièces sur l'ensemble des machines et par la suite un coût minimal.

La figure ci-dessous montre la variation de coût total en fonction de l'augmentation de la quantité des pièces à ébavurer, et aussi l'évolution de la répartition de ces pièces sur les différentes machines. On remarque que jusqu'à la quantité 2500 pièces le modèle nous donne un coût optimal, puis le coût commence à évoluer rapidement à cause de la saturation de la machine M3.

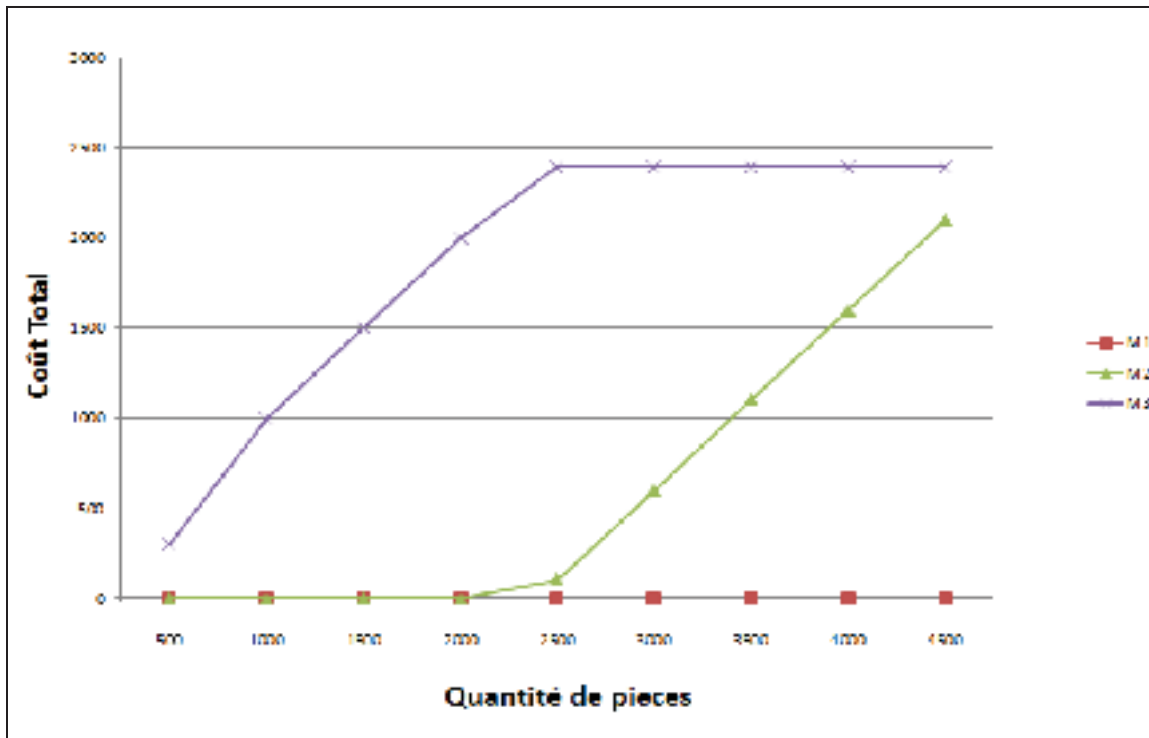


Figure 4.17 Comportement de coût total en fonction de variation de quantité de pièces

La combinaison entre trois produits et dix machines afin d'avoir la répartition optimale et le moindre coût, demande un calcul long et lourd. Ce modèle d'optimisation permet d'avoir la meilleure répartition des produits sur les différentes machines afin de sauver le temps et l'argent. Pour démontrer l'intérêt de notre modèle, nous allons faire une étude de quelques scénarios possibles. Le graphe suivant présente la répartition des produits sur les différentes machines sans aucune correspondance des machines. Le produit P1 est distribué sur les machines M1, M2 et M3, le produit P2 est distribué sur les machines M4, M5 et M6 et le produit P3 est distribué sur les machines M7, M8 et M9. Voir la répartition figure suivante.

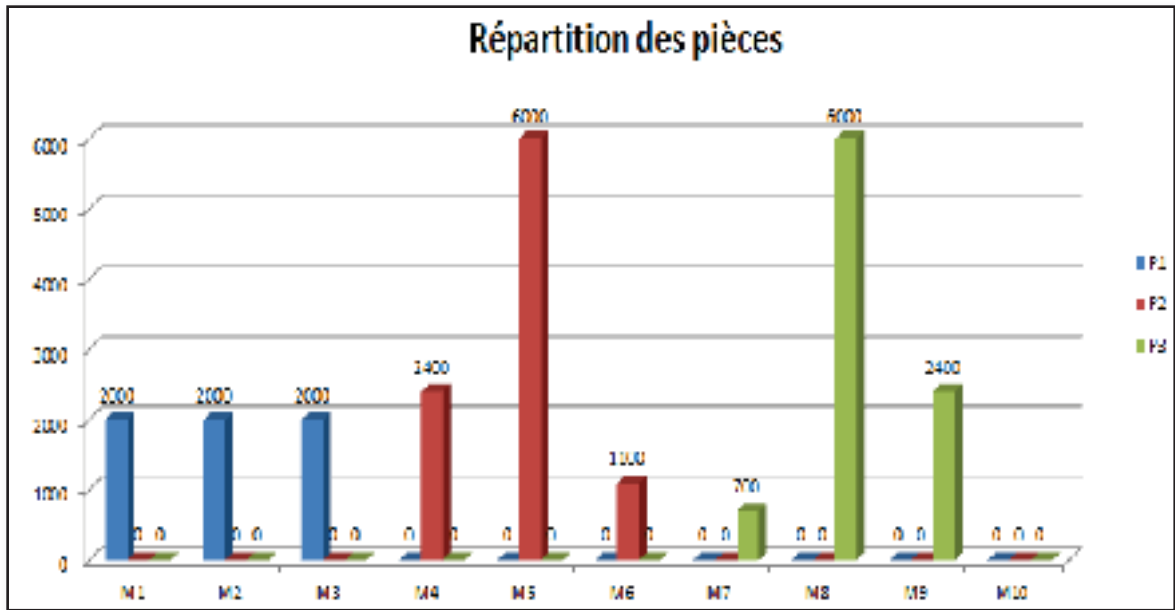


Figure 4.18 Répartition des pièces sur les différentes machines

Le premier scénario consiste à faire correspondre la machine M1 avec les deux produits P1 et P2 pour examiner la consistance de modèle.

Scénarios 1 : une machine en correspondance avec deux produits

Tableau 4.4 Correspondance de machine M1 avec les produits P1 et P2

Pièces	Machines		
P1	M1	M2	M3
P2	M1	M5	M6
P3	M7	M8	M9

Dans la figure ci-contre on remarque que le modèle à comparer entre les trois machines M1, M5 et M6 de produit P2, pour qu'il affecte 6000 pièces à la machine M6 et 1200 pièces à la machine M1 grâce à leur rapport prix/temps réduit. On remarque aussi qu'un petit ajustement de répartition de produit P1 a été fait afin de donner la meilleure solution.

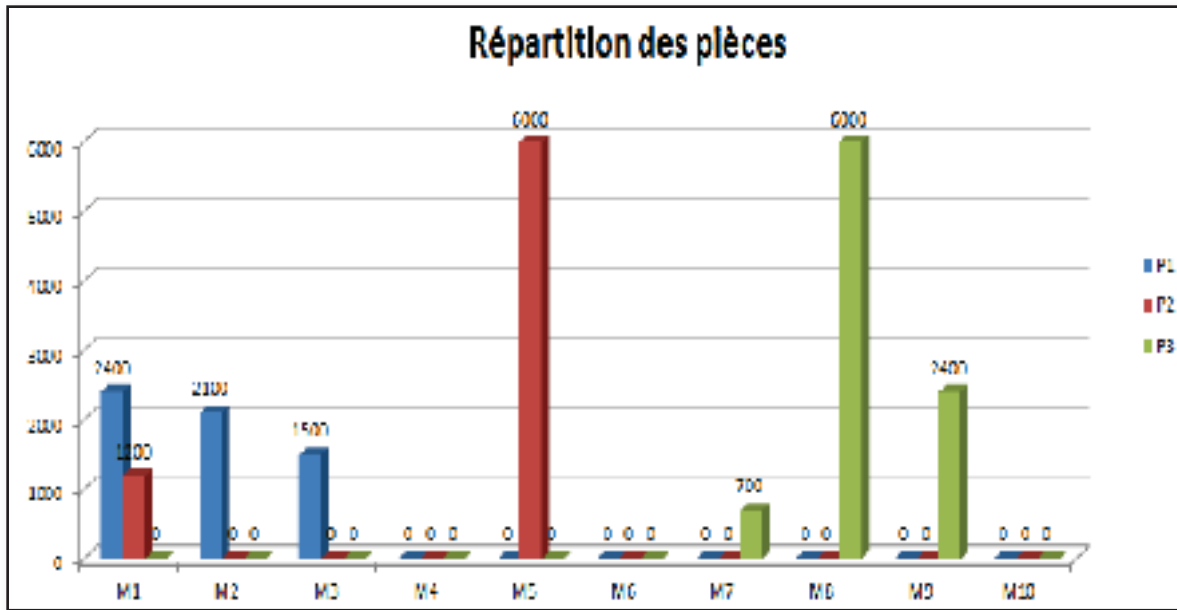


Figure 4.19 Comportement de modèle avec le scénario 1

Le deuxième scénario consiste à faire correspondre la machine M1 avec les trois produits P1, P2 et P3.

Scénario 2 : une machine en correspondance avec trois produits

Tableau 4.5 Correspondance de machine M1 avec les produits P1, P2 et P3

Pièces	Machines		
P1	M1	M2	M3
P2	M1	M5	M6
P3	M1	M8	M9

Dans ce scénario, on a une machine qui pourrait servir pour les trois produits P1, P2 et P3 en même temps. Dans ce cas-là, ça devient plus complexe de gérer la répartition des produits sur les machines d'une façon optimale. Notre modèle a calculé et comparé le coût et le temps d'ébavurage de chaque produit sur les différentes machines, puis il a affecté la répartition optimale des produits sur les machines adéquates. Comme il est clair dans la figure ci-dessous, le modèle a affecté la quantité la plus importante (4800 pièces) de produit P3 sur la machine M1 grâce à son coût minimal.

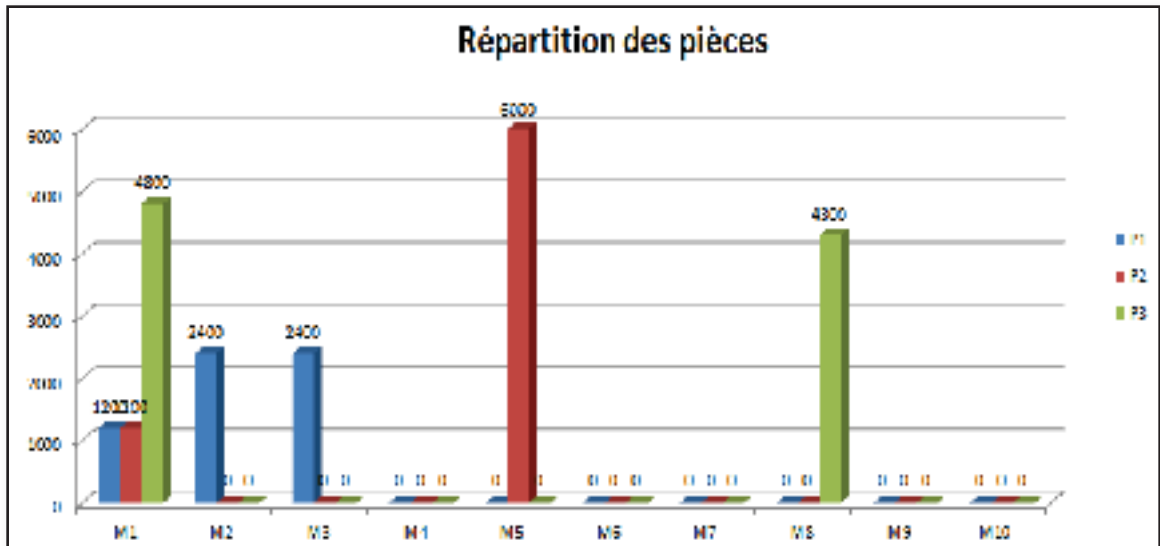


Figure 4.20 Comportement de modèle avec le scénario 2

Le troisième scénario consiste à faire correspondre les machines M1 et M2 avec les produits P1 et P2.

Scénario 3 : Deux produits en correspondance avec deux machines

Tableau 4.6 Correspondance de machines M1 et M2 avec les produits P1 et P2

Pièces	Machines		
P1	M1	M2	M3
P2	M1	M2	M6
P3	M7	M8	M9

Dans ce scénario nous allons voir le comportement de modèle suite à l'intersection de deux machines avec deux pièces. Dans cette situation le modèle a essayé de combiner entre les produits P1 et P2 sur chaque machine M1 et M2 afin d'avoir la meilleure solution.

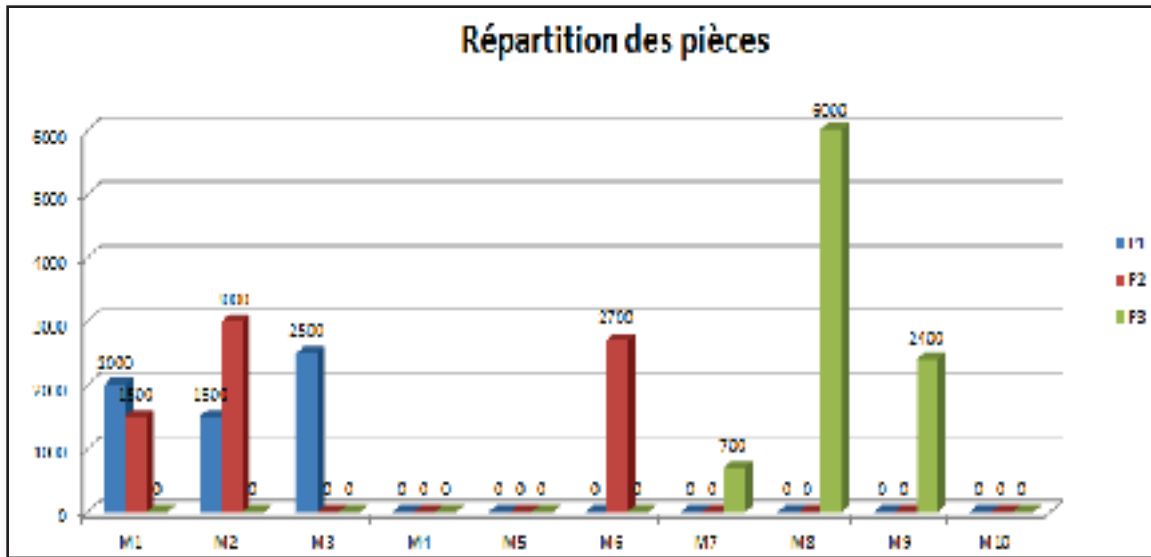


Figure 4.21 Comportement de modèle avec le scénario 3

4.4 Conclusion

Ce travail nous a permis de développer un programme permettant de sélectionner parmi plusieurs méthodes d'ébavurage celles qui obéissent aux exigences de client, établir un modèle d'optimisation assurant la bonne répartition des pièces sur les machines d'ébavurage de façon à minimiser le coût d'ébavurage, ce modèle permet également d'avoir une idée sur le temps et le coût d'ébavurage de chaque produit et sur chaque machine, planifier les tâches de maintenance des machines et de production des pièces. Enfin nous avons conçu une interface graphique qui aide à saisir les données d'entrées et afficher les résultats, afin de faciliter la communication avec le programme.

CONCLUSION

L'un des principaux objectifs des problèmes d'ébavurage est l'établissement d'une base de données qui regroupe le maximum des informations possible sur les bavures, l'ébavurage, et les différentes techniques d'ébavurage.

Ce travail est une tentative de construire une base de données relative à l'ébavurage et les méthodes d'ébavurage, nous avons commencé par chercher dans les ouvrages qui traitent ce sujet, et ramasser le maximum de données afin de réaliser l'objectif voulu. En utilisant cette base de données, toutes les données d'ébavurage peuvent être accumulées dans un ordinateur, et les informations nécessaires concernant les méthodes et les spécifications d'ébavurage peuvent être dérivées de cette base de données.

Notre contribution dans ce travail est : la proposition des nouveaux critères de choix des méthodes d'ébavurage, cette proposition se base sur l'étude de l'influence des facteurs technologique sur la formation des bavures et la caractérisation des bavures. Le développement d'un programme sur Matlab, permettant la sélection de meilleures méthodes d'ébavurage pour une application donnée en se basant sur la base de données préalablement établie. L'optimisation de coût d'ébavurage à travers un modèle qui assure la bonne gestion et la planification des opérations d'ébavurage. Enfin, la conception d'une interface graphique permettant la communication avec le programme de sélection de méthodes d'ébavurage.

Il est crucial d'établir une base de données dans toutes les entreprises de fabrication qui utilisent les procédés d'ébavurage. Ça permet non seulement de réunir et protéger tous les informations et les données importantes relatives à l'ébavurage, mais également d'avoir un historique des opérations d'ébavurage effectuées à l'entreprise. Cette base de données contribue significativement à la planification des opérations d'ébavurage, l'amélioration de qualité de surface de la pièce, la diminution de temps d'ébavurage et par la suite de temps d'usinage, la minimisation de coût d'ébavurage et par conséquent l'augmentation de revenu de l'entreprise.

RECOMMANDATIONS

- 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.
- Il faut travailler plus sur la minimisation, l'uniformisation et la localisation des bavures pour faciliter l'opération et diminuer le temps d'ébavurage.
- 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'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.

ANNEXE I

CONSIDÉRATION RELATIVE À LA SÉLECTION DES ÉQUIPEMENTS DE FINITION

Source : (Internet)

	Deburring Méthodes						
	Horizontal barrel	Oblique barrel	Round vibrator	Tub vibrator	Centrifugal barrel	Centrifugal disk	Spin/spindle finish
Time cycles	Long	Longer	Medium	Medium	Short	Short	Very Short
Media wear	Slow	Very slow	Moderate	Moderate	High	Very High	Very High
Media size	Large	Large	Medium	Medium	Small	Small	Very small
Equipment cost	Low	Low	Moderate	Moderate	High	High	High
Typical kinds of processes	Heavy radiusing, burnishing, dry polishing	Drying, part-on-part finishing	Deburring, smoothing, burnishing, preplate	Deburring, stock removal, large parts	Micro-finishing, polishing, fast stock removal	Aggressive stock removal, smoothing, deburring	Aggressive deburring, stock
Part size limitations	Medium	Small to medium	Restricted length by bowl diameter; flat parts nest	Almost unlimited, very large per machine	Small to moderate, fixturing or compartments possible	Part length severely restricted by the size of the chamber	Some part geometry restriction.
Type of energy	Rotational, gravity slide	Rotational, gravity slide	Kinetic, vibratory	Kinetic, vibratory	Centrifugal, pressure	Centrifugal, toroidal	Spin, media resistance
Continuous or batch	Batch	Batch	Continuous possible	Continuous possible	Batch	Batch	Batch Liquid
Compound usage	Low	Low	High with flow-through systems	High with flow-through systems	Low	High with flow-through systems	Medium

	Deburring Méthodes						
Working capacity	50%	30%	80-90%	80-90%	60%-Wet, 80-90%Dry	30-40%	N/A; Fixtured
Exterior or interior part areas	Concentrates on exterior corners, edges	Concentrates on exterior corners, edges	Interior and exterior	Interior and exterior	Exterior; some interior	Exterior and interior similar	Dependent on fixture orientation
Media/parts material handling	Awkward with external separation	Easier unloading than horizontal barrel	Automated internal separation	Discharge chute to exterior separation	Manual load, machine unload	Manual or automatic	Manual or robotics
In-process inspection ?	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes, usually	Not usually

APERÇU DES VARIABLES CLÉS UTILISÉS POUR LA PRÉCISION DE LA PIÈCE

(L. K. Gillespie, 1999)

Méthodes	Nbre de variables clés	Épaisseurs de bavure typique enlevée (µm)	Effet sur la dimension de la pièce (µm)	Fracture d'arête (µm)	Rayon d'arête (µm)	Intervalle de surface de finition (µm)	dimension de la pièce (mm)	Matériau de la pièce
Grenailage	7-10	25-75	Aucun	75-250	±75	1-7	> 1-1000	Zinc, Acier, Plastic, métal dur
Flux Abrasive	5-7	75	5	75-250	±38	0.4	20-500	Tous les métaux
Sablage	8-12	25-75	2-50	75-250	-	0.8-1.6	50-500	Tous les métaux, plastiques, caoutchouc
Brossage	5-10	5-75	0-2	50-250	±50	0.4	20-500	Tous les métaux, céramiques, qlq plastic
Baril centrifuge	14-15	5-75	0-12	75-250	-	0.05-0.8	1.5-200	Tous les métaux, céramiques, qlq plastic
Chimique	4-5	2-12	1-50	25	-	0.15-0.2	20-500	Quelques métaux
Cryogénique vibratoire	15-16	-	-	-	-	-	20-200	-
Électrochimique	5-6	7-127	0	0	±50	0.4	20-500	Tous métaux sauf titanium
Électropolissage	5-7	2-25	5-12	25-125	±1	0.05	20-200	Plusieurs métaux
Manuel	20-50	5-75	0	50-250	±50	-	5-500	Tous les métaux, céramiques, plastiques, caoutchoucs
Abrasive magnétique	5-10	5-25	1-12	5-40	-	0.1	50-200	Métaux
Coupe mécanisé	5-10	75-250	0	125-750	-	-	50-500	Tous les métaux, plastiques
Robotique	5-10	75-250	0	125-750	-	-	50-500	Tous les métaux, plastiques
Broche de finition	10-15	25-125	-	75-750	±30	0.2-1.0	20-200	Tous les métaux
Énergie thermique	3-6	5-50	0-10	25-75	-	0.8-2.0	20-200	Plusieurs métaux, quelques plastiques
Vibratoire	12-15	25-125	1-12	75-750	±30	0.2-1.0	20-200	Tous métaux, quelques plastiques
Jet d'eau	4-6	12-50	0	50-125	-	-	50-500	Tous les métaux, plastiques

ANNEXE II

PROPRIÉTÉS DES MÉTHODES D'ÉBAVURAGE LES PLUS UTILISÉES

(L. K. Gillespie, 1999)

Méthodes	Outillage	Production	Applications	Limitations
Flux Abrasive	Simple	En masse / Unitaire	Intersection des trous, contour irrégulier, plaques percées, finition fine	Difficulté d'ébavurer les surfaces aveugles
Grenailage	Aucun / Simple	En masse / Unitaire / continue	Bavure externe	Émission des particules abrasives, contrainte résiduelle
Sablage	Aucun	Unitaire / continue	Surface plane, arêtes accessibles	Non adapté pour les surfaces intérieures
Brossage	Aucun	En masse / Unitaire / continue	Arête extérieure, trous intérieurs,	Non adapté pour les bavures larges
Baril centrifuge	Aucun	En masse	Surfaces extérieures	Non adapté pour les surfaces intérieures
Chimique	Aucun	En masse / contenu	Changement dimensionnel toléré	Limité aux pièces métalliques
Cryogénique vibratoire	Aucun	En masse / contenu	Pièces en plastique ou métal conducteur mince	Non applicable pour les normales
Électrochimique	Oui, Simple et complexe	Unitaire	Trous, intersection des trous, rainures, roues dentées, contours complexes	Non adapté pour les formes complexes
Électropolissage	Oui, Contacte	En masse / contenu	Grand volume, pièces à haute finition avec des bavures minces	Déformation de dimension
Manuel	Outil manuel	Unitaire	Petit volume, toutes les tailles des bavures	Perd de temps, possibilité d'erreur
Abrasive magnétique	Oui	Unitaire	Pièces à haute finition avec des petites et minces bavures	Chaque pièce demande son propre setup

Méthodes	Outillage	Production	Applications	Limitations
Coupe mécanisée	Oui, Fixation, coupe	En masse / Unitaire / continue	Bavures extérieures	Les tailles et les locations variables de bavure
Robotique	Oui	Unitaire	Bavures extérieur	Surfaces intérieures, petit volume
Broche de finition	Non	Unitaire	L'extérieur de pièce cylindrique	Non adapté pour les surfaces intérieures et les pièces prismatiques
Énergie thermique	Oui, Simple	En masse	Bavures minces extérieures, certaines bavures intérieures	Non adapté pour les bavures épaisses, certains métaux, précision de finition
Vibratoire	Non	En masse / contenu	Arêtes extérieures	Non adapté pour les surfaces intérieures
Jet d'eau	Oui, Fixation	Unitaire	Bavures minces des pièces plastiques ou métalliques	Non adapté pour les bavures épaisses

ANNEXE III

APERÇU SUR LES EXIGENCES DE QUALITÉ D'ARÊTE

(L. K. Gillespie, 1999)

Classe	Grade	Définition sur dessin	Intervalle de tolérance de rayon	Application typique
E0	Arête à haute qualité exceptionnelle	0,0002R	0,01 - 0,02 mm	Arête du couteau microtome en diamant
E1	Arête à haute qualité	0,002R	0,3 - 5 mm	Arête des outils de coupe, Arête des filières
E2	Arête aiguë	0,02R	8 - 30 mm	Arête des orifices hydraulique
E3	Arête arrondie	0,2R ou chanfrein	0,08 - 0,3 mm	Les pièces mécaniques, segments du piston, bobines hydrauliques
E4	Arête chanfreinée	0,5R ou chanfrein	0,4 - 0,6 mm	Les pièces mécaniques
E5	Arête usée			Pièces automobiles

ANNEXE IV

LES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX, SANTÉS ET SÉCURITÉS, D'ÉBAVURAGE

(L. K. Gillespie, 1999)

Méthodes	Problèmes environnementaux	Problèmes de sécurité	Problèmes de santé
Grenaillage	-	-	Respiration de particules de poussière
Flux Abrasive	-	Verrouillage hydraulique	-
Sablage	-	-Explosions à cause de poussière excessive dans l'air. -Accumulation de poussière métallique qui peut causer d'incendie.	Respiration de poussière
Brossage	-	Des poils métalliques volants peuvent blesser	-
Baril centrifuge	Rejet de déchet dans l'eau	-	-
Chimique	Pollution de composant métallique	Éclaboussures d'acide	Respiration de vapeur d'acide
Cryogénique vibratoire	-	-	Bas températures peut endommagées la peau de corps
Électrochimique	Disposition des composants métalliques dans la solution	Irritation de la peau à partir de solutions de sel	L'effet à long terme de rupture de glycol peut être un problème
Électropolissage	Disposition des composants métallique	Acide sur la peau	Irritation de la peau
Manuel	-	Des pièces ou des outils sont lancés par des moteurs à la main	Dommages ergométrique tels que les dommages aux mouvements répétitifs
Coupe mécanisée	-	Copeaux volants	-
Robotique	-	Des mouvements inattendus de robot qui peuvent blesser l'opérateur	-
Broche de finition	Disposition de déchet dans l'eau	-	-

Méthodes	Problèmes environnementaux	Problèmes de sécurité	Problèmes de santé
Énergie thermique	-	Possibilité d'explosion Gaze explosive	-
Vibratoire	Disposition de déchet dans l'eau	-	-
Jet d'eau	-	Haute pression peut blesser la peau	-

ANNEXE V

PROGRAMME DE SÉLECTION SUR MATLAB

```
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global saisi Application Epaisseur Hauteur Materiaux Objective Position affiche a
Application = evalin('base','Application');
Epaisseur = evalin('base','Epaisseur');
Hauteur = evalin('base','Hauteur');
Materiaux = evalin('base','Materiaux');
Objective = evalin('base','Objective');
Position = evalin('base','Position');
%% Selection
saisi
for i=1:15
    a=true;
    if any(Materiaux(:,i)==saisi(1))==0
        a=false;
    end
    if any(Hauteur(:,i)==saisi(2))==0
        a=false;
    end
    if any(Epaisseur(:,i)==saisi(3))==0
        a=false;
    end
    if any(Position(:,i)==saisi(4))==0
        a=false;
    end
    if any(Objective(:,i)==saisi(5))==0
        a=false;
    end
    if any(Application(:,i)==saisi(6))==0
        a=false;
    end
    end
    if a==true
        affiche(i)=1;
    else
        affiche(i)=0;
    end
end
set(handles.text11,'string',affiche)
```

SÉLECTION DE MATÉRIAUX

```
* Exemple en sélection change in popupmenu1.  
Function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
global s1s1  
  
s1s1 = get(handles.popupmenu1, 'String');  
popupmenu1value = contents(get(handles.popupmenu1, 'Value'));  
switch popupmenu1value  
    case 'Acier dure'  
        s1s1(1) = 1  
    case 'Acier inoxydable'  
        s1s1(1) = 2  
    case 'Aluminium'  
        s1s1(1) = 3  
    case 'Céramique'  
        s1s1(1) = 4  
    case 'Cuivre'  
        s1s1(1) = 5  
    case 'Fer'  
        s1s1(1) = 6  
    case 'Fer doux'  
        s1s1(1) = 7  
    case 'Fonte'  
        s1s1(1) = 8  
    case 'Laiton'  
        s1s1(1) = 9  
    case 'Plastique'  
        s1s1(1) = 10  
    case 'Zinc'  
        s1s1(1) = 11  
  
end
```

SÉLECTION DE HAUTEUR

```

% Exécutez un selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
    global saisi
    % Application = evalin('base','Application');
    contents = get(handles.popupmenu2, 'String');
    popupmenuValue = contents{get(handles.popupmenu2, 'Value')};
    switch popupmenuValue
        case {'[0.000 - 0.009]'}
            saisi(2) = 1
        case {'[0.010 - 0.019]'}
            saisi(2) = 2
        case {'[0.020 - 0.059]'}
            saisi(2) = 3
        case {'[0.040 - 0.079]'}
            saisi(2) = 4
        case {'[0.080 - 0.159]'}
            saisi(2) = 5
        case {'[0.160 - 0.319]'}
            saisi(2) = 6
        case {'[0.320 - 0.619]'}
            saisi(2) = 7
        case {'[0.620 - 1.249]'}
            saisi(2) = 8
        case {'[1.250 - 2.499]'}
            saisi(2) = 9
        case {'[2.500 - 6.000]'}
            saisi(2) = 10
        case {'[6.000 - 12.000]'}
            saisi(2) = 11
    end

```

SÉLECTION D'ÉPAISSEUR

```

* Formulation en sélection changeur in poppamenu8.
E Fonction poppamenu8 CallBack (h08jvent, eventdata, handle)
global saisi
* Application = evalin ('base', 'Application');
contenue = get(handles.poppamenu8, 'String');
poppamenu8value = contenueiget(handles.poppamenu8, 'Value');
switch poppamenu8value
case '[0.000 - 0.009]'
    saisi(0)=1
case '[0.010 - 0.019]'
    saisi(0)=2
case '[0.020 - 0.029]'
    saisi(0)=3
case '[0.040 - 0.079]'
    saisi(0)=4
case '[0.000 - 0.159]'
    saisi(0)=5
case '[0.160 - 0.314]'
    saisi(0)=6
case '[0.315 - 0.629]'
    saisi(0)=7
case '[0.630 - 1.249]'
    saisi(0)=8
case '[1.250 - 2.499]'
    saisi(0)=9
case '[2.500 - 6.500]'
    saisi(0)=10
case '[6.500 - 12.500]'
    saisi(0)=11
end

```

SÉLECTION D'APPLICATION

```

*   Exécution en action change in popupmenu6.
function popupmenu6_Callback(hObject, eventdata, handles)
global saisi
* Application = evalin('base','Application');
contents = get(handles.popupmenu6, 'String');
popupmenu6value = contents{get(handles.popupmenu6, 'Value')};
switch popupmenu6value
case 'Arêtes extérieur'
    saisi(6) = 1
case 'Bavures extérieur'
    saisi(6) = 2
case 'Bavure miroir intérieur]'
    saisi(6) = 3
case 'Bavure miroir extérieur'
    saisi(6) = 4
case 'Contour extérieur'
    saisi(6) = 5
case 'Contour irrégulier'
    saisi(6) = 6
case 'Chamfrainage'
    saisi(6) = 7
case 'Intersection des trous]'
    saisi(6) = 8
case 'Pièce déformable'
    saisi(6) = 9
case 'Pièce cylindrique'
    saisi(6) = 10
case 'Pièce à grand volume]'
    saisi(6) = 11
case 'Pièce à petite volume'
    saisi(6) = 12
end

```

SÉLECTION D'OBJECTIVE

```
% --- Executes on selection change in popupmenu5.
function popupmenu5_Callback(hObject, eventdata, handles)
global saisi
% Application = evalin('base','Application');
contents = get(handles.popupmenu5,'String');
popupmenuvalue = contents(get(handles.popupmenu5,'Value'));
switch popupmenuvalue

    case 'Finition'
        saisi(5) = 1
    case 'Sema-finition'
        saisi(5) = 2
        next = 'Rendu'
        saisi(2) = 1
    case 'Chonfreinage'
        saisi(3) = 1
end
```

ANNEXE VI

PROGRAMME D'AFFICHAGE

```
% Affichage
j=0;
n=1000;
[ Lox 11 1:15

    if affiche(ii)==0
        continue;
    end
    i = ii;
    switch affiche(ii)
    case 1
        num2str(i);
        p(i,:)=cellstr([a,' Ébavurage manuel' ']);
        case 2
            s = num2str(j);
            p(i,:)=cellstr([a,' - Brochage' ']);
        case 3
            s = num2str(j);
            p(i,:)=cellstr([a,' - Sablage' ']);
        case 4
            s = num2str(i);
            p(i,:)=cellstr([a,' Jet abrasif' ']);
        case 5
            s = num2str(j);
            p(i,:)=cellstr([a,' - Finition par vibration' ']);
        case 6
            s = num2str(j);
            p(i,:)=cellstr([a,' - Coupe mécanisé' ']);
        case 7
            s = num2str(i);
            p(i,:)=cellstr([a,' Tonnau d'ébavurage' ']);
        case 8
            s = num2str(i);
            p(i,:)=cellstr([a,' Tonnau de vibration contrôlée' ']);
        case 9
            s = num2str(j);
            p(i,:)=cellstr([a,' - Ébavurage robotisé' ']);
        case 10
            s = num2str(j);
            p(i,:)=cellstr([a,' Broche de finition' ']);
        case 11
            s = num2str(i);
            p(i,:)=cellstr([a,' Ébavurage électrochimique' ']);
        case 12
```


LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aurich, J. (2006). Untersuchung zur Beherrschung der Sauberkeit von zerspanend hergestellten Bauteilen. *Ergebnisworkshop, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Kaiserslautern Technische Universität*.
- Aurich, J., Sudermann, H., & Bil, H. (2005). Characterisation of burr formation in grinding and prospects for modelling. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54(1), 313-316.
- Aurich, J. C., Dornfeld, D., Arrazola, P., Franke, V., Leitz, L., & Min, S. (2009). Burrs—Analysis, control and removal. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(2), 519-542.
- Avila, M. C., Choi, J., Dornfeld, D. A., Kapgan, M., & Kosarchuk, R. (2004). Deburring of cross-drilled hole intersections by mechanized cutting. *Laboratory for Manufacturing and Sustainability*.
- Avila, M. C., & Dornfeld, D. A. (2003). The effect of kinematical parameters and tool geometry on burr height in face milling of Al-Si alloys. *Laboratory for Manufacturing and Sustainability*.
- Barth, C., Dollmeier, R., & Warnecke, G. (2001). Burr formation in grinding of hardened steel with conventional and superabrasive wheels. *TRANSACTIONS-NORTH AMERICAN MANUFACTURING RESEARCH INSTITUTION OF SME*, 273-278.
- Beier, H.-M. (1999). *Handbuch Entgrattechnik: Wegweiser zur Gratminimierung und Gratbeseitigung für Konstruktion und Fertigung*: Hanser.
- Berger, K. (2004). *Proposal for a standard for the description of edges in automotive engineering*. Paper presented at the Proc. of the 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing.
- Chern, G.-L. (1993). *Analysis of burr formation and breakout in metal cutting*. University of California, Berkeley Berkeley, CA.
- 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*, 46(12), 1517-1525.

- Choi, G. S., Wang, Z. X., Dornfeld, D., & Tsujino, K. (1990). *Development of an intelligent on-line tool wear monitoring system for turning operations*. Paper presented at the Proc. USA–Japan Symposium on Flexible Automation, A Pacific Rim Conference ISCIE Kyoto.
- Chu, C., & Dornfeld, D. (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*, 218(7), 721-730.
- Dornfeld, D. A. (2002). Development of an analytical model for drilling burr formation in ductile materials.
- Gillespie, L. (2006). *Mass finishing handbook*: Industrial Press.
- Gillespie, L. K. (1981). *Deburring technology for improved manufacturing*: Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI.
- Gillespie, L. K. (1999). *Deburring and edge finishing handbook*: Society of Manufacturing Engineers.
- Graham, D., & Dom, K. (2000). Going dry. *Manufacturing Engineering*, 124(1), 4.
- Hashimura, M., Chang, Y., & Dornfeld, D. (1999). Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING*, 121, 1-7.
- Hassamontr, J., & Dornfeld, D. (1999). Effect of in-plane exit angle and rake angles on burr height and thickness in face milling operation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 121, 13.
- Internet. La sélection des équipements de finition. from En ligne <<http://connect.sme.org/blogs/david-davidson/2016/01/02/mass-media-finishing-processes>> Consulté le 31 janvier 2017
- Internet. Outils de sablage. from En ligne < <https://www.banggood.com/fr/30mm-Sanding-Sandpaper-Flap-Wheel-Disc-80-Grit-For-Dremel-Rotary-Tools-p-976285.html> > Consulté le 31 janvier 2017
- Ioi, T., Matsunaga, M., & Kobayashi, H. (1981). Computer-Aided Selection of Deburring Methods. *Deburring and Surface Conditioning* 81, 1981.

- ISO. (2000). from En ligne <<https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:13715:ed-3:v1:en>>
Consulté le 05 01 2017
- Kato, Y., Ohmri, K., Hatano, E., & Takazawa, K. (2007). *The standardization for the edge quality of the precise machining products*. Paper presented at the Advanced Materials Research.
- Kim, C.-s. (2000). *Optimization and control of drilling burr formation in metals*: University of California, Berkeley.
- Kim, J., Min, S., & Dornfeld, D. A. (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*, 41(7), 923-936.
- King, R., & Vaughn, R. (1984). A synoptic review of High-speed machining from Salomon to the present. *High Speed Machining*, 1-13.
- Kishimoto, W. (1981). Study of Burr Formation in Face Milling-Conditions for the Secondary Burr Formation. *Bull. Japan Soc. Prec. Eng.*, 15, 51.
- Klocke, F., & Eisenblätter, G. (1997). Dry cutting. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 46(2), 519-526.
- Ko, S.-L., Chang, J.-E., & Yang, G.-E. (2003). Burr minimizing scheme in drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1), 237-242.
- Lee, K., & Dornfeld, D. A. (2005). Micro-burr formation and minimization through process control. *Precision Engineering*, 29(2), 246-252.
- Marksberry, P., & Jawahir, I. (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*, 48(7), 878-886.
- Nakayama, K., & Arai, M. (1987). Burr formation in metal cutting. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 36(1), 33-36.
- Niknam, S. A. (2013). *Burrs understanding, modeling and optimization during slot milling of aluminium alloys*. École de technologie supérieure.

- Ohmori, K. (1998). *The movements of ISO 13715 as the only one international standard for edge quality (EQ)*. Paper presented at the Proceedings of the 5th International Conference on Deburring and Surface Finishing.
- Olvera, O., & Barrow, G. (1996). An experimental study of burr formation in square shoulder face milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(9), 1005-1020.
- Pande, S., & Relekar, H. (1986). Investigations on reducing burr formation in drilling. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 26(3), 339-348.
- Przyklenk, K., et M. Schlatter. (1986). Deburring of Aluminium Workpieces. XI *Aluminium*, no 12., vol. 62, p. 746-751.
- Przyklenk, K., et M. Schlatter (1986). *Deburring of Aluminium Workpieces. Aluminium*, (Vol. 62).
- Roberts, R. K., Engel, T., & Proctor, F. (1992). *Specification of an active force control tool for performing deburring and chamfering on a robot platform*. Paper presented at the Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992. Power Electronics and Motion Control., Proceedings of the 1992 International Conference on.
- Schäfer, F., Brauner, H. U., & Breuninger, F. (1975). Entgraten: Theorie. *Verfahren. Anlagen. Mainz, Verlag: Krausskopf*.
- Shelfbine, W., & Dornfeld, D. (2004). The effect of dry machining on burr size. Consortium on deburring and edge finishing. Laboratory for Manufacturing and Sustainability. *University of California, Berkeley*.
- Sofronas, A. S. (1975). *The formation and control of drilling burrs*.
- Thilow, A., Berger, K., Prüller, H., Maier, R., Przyklenk, K., Schäfer, F., & Pieblinger-Schweiger, S. (2005). Entgrat-Technik. *Entwicklungsstand und Problemlösungen expert Verlag*.
- Tiabi, A. (2010). Formation des bavures d'usinage et finition de pièces. .
- Tseng, P.-C., & Chiou, I.-C. (2003). The burrs formation prediction and minimization based on the optimal cutting parameters design method. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(2), 779-787.

Wang, G. C., & Zhang, C. Y. (2004). *Mechanism of burr formation in milling*. Paper presented at the Key Engineering Materials.

Wygowski, W. (2006). *Stratégie de limitation de bavures pendant l'usinage*.

youtube (Producer). Méthode d'ébavurage manuel. Retrieved from En ligne < <https://www.youtube.com/watch?v=8gLC07XIH78>> Consulté le 31 janvier 2017

youtube. Méthode d'ébavurage par brosse. from En ligne < <https://www.youtube.com/watch?v=9vKrAlowQ8s>> Consulté le 31 janvier 2017

youtube. Méthode d'ébavurage robotique. from En ligne < <https://www.youtube.com/watch?v=97mZ6yWezmo>> Consulté le 31 janvier 2017

youtube. Tonneau d'ébavurage. from En ligne < <https://www.youtube.com/watch?v=smd4CGs7wD4>> Consulté le 31 janvier 2017

Zaghbani, I., Songmene, V., Kientzy, G., & LeHuy, H. (2009). Evaluation of sustainability of mould steels based on machinability data. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 7(1-2), 58-81.