

**REPUBIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE LAGHROUR ABBES KHENCHELA
FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER (LMD)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique.

Thème

**CONCEPTION ET FABRICATION MECANIQUE (CFM)
D'UNE FRAISE CYLINDRIQUE EN BOUT 2T, A QUEUE
CONIQUE PAR TECHNIQUE D'ENLEVEMENT DE
MATIERE.**



Réalisé par :

- OUCIF Nadji
- GHARBI Rami

Dirigé par : Dr. GHELANI.L

Membres de jury :

- Mr. M. Chitour Président.
- Mr. A. Berkia Examineur.

Année universitaire : 2019-2020

Dédicace

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
"رَبِّ أَوْزَعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَى وَالِدِي وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا
تَرْضَاهُ"

C'est avec une grande joie que je dédie ce modeste mémoire, fruit de mes études en exprimant ma profonde reconnaissance à tous mes proches particulièrement :

*A mon seul et unique abri d'enfance, à celle qui n'a jamais cessé de me lancer l'appel d'amour et tendresse, de me soutenir dans les moments difficiles. A ma très chère mère **NAFISSA** et ma grande mère **BRIKA**.*

*A l' 'esprit de mon très cher père **CHERIF**, qui est toujours présent dans ma mémoire.*

*A mes frères **OMAR, KAMEL ET KHALED**.*

*A mes sœurs **MARIEM, SIHEM, NAIMA, SAMIA, KHALISSA ET SAMAH**.*

*Aux enfants : **ISLEM, ABD MOUNIB, OBEY, TAHA, MAHMOUD, MOHMED, AMIN, MAHDI, MARAM, HADJER, SABIL, ASMA, SADJIDA, ARWA, RAZAN, INSAF, YAZAN, KAMAR**.*

*A toute la famille **OUCIF**.*

*A mon binôme **RAMI**.*

*A mes meilleurs amis **RAFIK, LAHCEN, OUSSAMA, FATEH, ILIES, WALID, MAHDI, Kheir eddine, AIMED, HAMZA, BAHAE, SALAH, MOUSSA, KAMEL, YUCEF, BILEL, FARES, SOUFIANE, RAMZI, SOUFIANE, SAMI, SAMIR, SIF, OUSSAMA, AMIN, RAMZI, BRAHIM**.*

A Tous Mes collègues de la promotion 2017-2018.

A Tous ceux qui je respect.

A Tous ceux qui j'aime.

A Tous ceux qui portent dans mon cœur.

OUCIF NADJI

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
"رَبِّ أَوْزَعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَى وَالِدِي وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا
تَرْضَاهُ"

C'est avec une grande joie que je dédie ce modeste mémoire, fruit de mes études en exprimant ma profonde reconnaissance à tous mes proches particulièrement :

A mon seul et unique abri d'enfance, à celle qui n'a jamais cessé de me lancer l'appel d'amour et tendresse, de me soutenir dans les moments difficiles. A ma très chère mère تافاهة.

A l' esprit de mon très cher père ABD ELHAMID, qui est toujours présent dans ma mémoire.

A mes frères HALIM, AIMED ET KHALED.

A mes sœurs ILHEM, LINDA ET NAIMA MOUNIRA .

A toute la famille GHARBI.

A mon binôme NADJII.

A mes meilleurs amis BADIS, AMMAR, ALA EDDINE, LAHCEN, ILIES, WALID,

MAHDI, , Kheir eddine, AIMED, HAMZA, , BAHAE, SALAH, MOUSSA,

*KAMEL, YUCEF, BILEL, FARES, SOUFIANE , RAMZI, SOUFIANE, SAMI,
SAMIR, SIF, OUSSAMA, AMIN, RAMZI, BRAHIM .*

A Tous Mes collègues de la promotion 2017-2018.

A Tous ceux qui je respecte.

A Tous ceux qui j'aime.

A Tous ceux qui portent dans mon cœur.

GHARBI RAMI

Remerciements

Remerciement

*Notre remerciements avant, après, et à l'infini **DIEU** de nous entouré*

De ses grâce et claire de ses lumière, et nous avoir donné la patience,

Le courage, pour établir ce modeste travail.

Nous remercions chaleureusement notre cher encadreur et

Enseignant :

Mr : Dr. GhELANI laala

Nous tenons à remercier l'enseignant : Dr. ABBOUDI Abdelaziz, CHITOUR Mourad

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes de nous avoir

Aidés durant la réalisation de ce travail de près et de loin.

Nous remercions tous les professeurs de notre spécialité

"GENIE MECANIQUE"

Nous remercions tous ceux qui méritent d'être cités sur cette page.

Sommaire

Liste des figures	1
Introduction générale	1
Chapitre I : Différents procédés de fabrication mécanique.	
I.1 Généralité	2
I.2. Partie I– Mise en forme par méthodes conventionnelles	3
I.2.1. Obtention par Usinage	3
I.2.1.1. Tournage	3
(a) Tournage extérieur	4
(b) Tournage intérieur.....	4
I.2.1.2. Tournage de pièces métalliques	5
I.2.1.3. Principaux usinages réalisables sur un tour.....	5
(a) Chariotage	6
(b) Dressage	6
(c) Chanfreinage	6
(d) Centrage.....	7
(e) Perçage	7
(f) Alésage	7
(g) Rainurage	8
(h) Tronçonnage	8
(i) Filetage et taraudage	9
(j) Tournage de forme.....	9
(k) Détalonnage	9
I.2.1.2.Fraisage.....	10
I.2.1.2.1.Principe de travail	10
I.2.1.2.2.Modes de fraisage	10
(a) Fraisage de face.....	10
(b) Fraisage de profil.....	11
(c) Fraisage en opposition.....	12
(d) Fraisage en concordance ou « en avalant »	12
I.2.1.3. Perçage.....	12
I.2.3.1. Principe de travail	13
I.2.1.4.Brochage.....	13
I.2.1.5. Rectification	14
I.2.1.5.1.Principe de la rectification	14
I.2.1.5.2. Schéma de principe et fonctionnement	14
I.2.1.5.3. Mode d’action de l’outil meule.....	14
(a) Rectification plane	15
(b) Rectifieuse cylindrique.....	16
(c) Rectifieuse sans centres.....	17
I.2.1.5.4. Avantages de la rectification	19
I.2.2. Obtention par déformation.....	19
I.2.2.1. Forgeage	19
I.2.2.2. Laminage	20
I.2.2.3. Emboutissage	21

I.2.2.4. Estampage	21
I.2.2.5 Matriçage	22
I.2.2.6. Filage	23
(a) Filage direct	23
(b) Filage inverse	23
(c) Filage inverse en conteneur	24
(d) Filage sur aiguille	24
I.2.2.7. Tréfilage	24
I.2.2.8 Cintrage	25
I.2.2.9. Pliage	25
I.2.2.10 Extrusion	26
I.2.3. Obtention par fusion (fonderie) Moulage.....	27
I.2.3.1. Moulage non permanent (moulage au sable).....	27
I.2.3.2. Moules permanents	28
(a) Moulage en coquille par gravité.....	29
(b) Moulage sous pression	29
I.2.4. Obtention par assemblage.....	30
I.2.4.1 Soudage	30
I.2.4.2 Collage.....	31
I.2.4.3 Rivetage.....	31
I.2.4.4 Agrafage	32
I.3. Partie II – Mise en forme par méthodes non -conventionnelles	33
I.3.1.Obtention par Usinages (Très) Grande Vitesse (UGV)	33
I.3.1.1.Introduction	33
I.3.1.2. Caractéristiques de l’UGV	34
I.3.1.3. Phénomènes thermiques.....	35
I.3.2. Obtention par Électroérosion	36
I.3.2.1.Usinage en plongée (Enfonçage).....	36
I.3.2.2. Usinage par découpage à fil	37
I.3.3. Obtention par frittage	38
I.3.4 Obtention par Découpage	40
I.3.4.1. Découpage laser	40
I.3.4.2. Découpage jet d'eau	41
I.3.4.3. Découpage plasma	42
I.3.5.Usinage photochimique.....	42
I.3.5.1. Principe.....	43
I.3.5.2. Objectifs	43
I.3.5.3. Avantages de l’usinage photochimique.....	43
I.3.5.4. Secteurs d'activités	44
Chapitre II : Etude et conception des outillages de fraisage.	
II.1 Introduction	45
II.2 Définition	45

II.3. Principe	45
II.4. Modes de coupe	47
II.4.1 Fraisage en opposition	47
II.4.2 Fraisage en concordance ou fraisage (en avalant).....	47
II.4.3. Fraisage hémisphérique	48
II.5. Machines – outils de fraisage	48
II.5.1. Classification des machines de fraisage	49
II.6. Type de montage	49
II.7. Techniques de fraisage	51
II.7.1. Surfaçage	51
II.7.2. Plans épaulés.....	51
II.7.3. Rainure.....	52
II.7.4. Poche.....	52
II.7.5. Perçage.....	52
II.7.6. Filetage	53
II.8. Outil de coupe	53
II.9. Paramètres de coupe	54
II.10. Paramètres géométriques de coupe	54
II.11. Éléments d’outil	55
II.11.1. Faces et arêtes d’outil	55
II.11.2. Outil de coupe à plaquette rapportée	57
II.12. Matériaux de l’outil	58
II.12.1. Aciers rapides (ARS).....	59
II.12.2. Carbures métalliques	59
II.12.3. Céramiques	59
II.12.4. Nitrure de bore cubique	60
II.12.5. Diamant	60
II.13. Principe de la coupe des métaux	60
II.14. Paramètres techno-économiques d’usinage	61
II.14.1 Temps d’usinage	61
II.14.2 Coût d’usinage.....	62
II.15. Durée de vie d’un outil de coupe	63
II.16. Mécanisme d’usure	64
II.16.1. Processus d’abrasion	64
II.16.2. Processus d’adhésion.....	64
II.16.3. Processus de fissuration	65
II.17. Différents types d’usure des outillages	65
II.17.1. Usure en dépouille	65
II.17.2. Usure en entaille	66
II.17.3. Usure en cratère.....	67
II.17.4. Ecaillage de l’arête de coupe	67
II.17.5. Arêtes rapportées.....	68
II.17.6. Déformation plastique	68

II.17.7. Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne	69
II.18. Dépendance entre l'usure et le temps.....	69
II.19. Outils de fraisage	70
II.20. Affûtage	71
II.20.1. Machine d'affûtage	71
II.21. Caractéristiques des fraises	72
II.22. Classification des fraises	73
II.23. Mode de fixation	77
II.24. Construction	77
Chapitre III : Gamme d'usinage et modélisation numérique.	
III.1 Introduction	78
III.2 Description d'une fraise cylindrique 2 taille	78
III.2.1 Arête et faces de coupe et dépouille	78
III.2.2 Etapes de réalisation la fraise cylindrique 2T	79
III.2.2.1. Dessin de définition	79
III.2.2.2 Gamme d'usinage	80
III.2.2.3. Etapes de réalisation d'un outil	80
III.3. Dessin (solidworks)	86
III.3.1.Introduction.....	86
III.3.2.Mise en plan	86
III.3.3.Caractéristiques d'une fraise cylindrique à queue conique	86
III.4 Abaqus	87
III.4.1 Introduction.....	87
III.4.2 Principes de base de l'analyse.....	87
III.4.3 Contraintes de Von Mises	88
III.4.4. Simulation de la fraise cylindrique 2T (étude statique).....	89
III.4.5. Maillage.....	89
III.4.6. Chargement de la fraise.....	90
III.4.7. Résultats et discussion	90
III.4.7.1. Contraintes selon ZZ.....	91
III.4.7.2. Contraintes selon YY	91
III.4.7.3. Contraintes selon XX.....	92
III.4.7.4. Contraintes selon ZY	92
III.4.7.5. Contraintes selon ZX	93
III.4.7.6. Contraintes selon YX.....	93
III.5.Discussion.....	94
Conclusion Générale.....	95
Bibliographie	97
Annexes	99

**Chapitre I : Différents procédés de fabrication
mécanique.**

Fig. I.1.Schéma d'élaboration de tournage mécanique.....	3
Fig. I.2.Principales opération de tournage externe.....	4
Fig. I.3.Principales opération de tournage interne sur tour.....	5
Fig. I.4 .Schéma représenté l'opération de chariotage.....	6
Fig. I.5.Schéma d'élaboration de dressage.....	6
Fig. I.6.Opération de Chanfreinage.....	6
Fig. I.7.Opération de centrage.....	7
Fig. I.8.Opération de perçage.....	7
Fig. I.9.Schéma de réalisation d'un alésage.....	8
Fig. I.10 Schéma montré l'opération de rainurage.....	8
Fig. I.11 Opération de tronçonnage.....	8
Fig. I.12. Opérations de filetage.....	9
Fig. I.13 . Tournage de forme.....	9
Fig. I.14 Profil d'une fraise de forme à denture détalonnée.....	9
Fig. I.15.Principe de fraisage.....	10
Fig. I.16 Schéma de fraisage de face.....	11
Fig. I.17. Fraisage de profil.....	11
Fig. I.18. Fraisage combiné.....	11
Fig. I.19. Fraisage en opposition.....	12
Fig. I.20. Fraisage en avalant.....	12
Fig. I.21.Schéma de perçage.....	13
Fig I.22.Nomenclature des broches.....	13
Fig. I.23. Principe de rectification.....	14
Fig. I.24. Opération de la rectification plane.....	15
Fig. I.25. Schéma d'une rectifieuse plane.....	15
Fig. I.26. Schéma d'une rectifieuse cylindrique.....	16
Fig. I.27. Opérations de rectification extérieure.....	16
Fig. I.28. Rectification Intérieure.....	17
Fig. I.29. Schéma d'une rectifieuse sans centre.....	17
Fig. I.30. Rectification sans centres extérieure.....	18
Fig. I.31. Rectification sans centres intérieure.....	18
Fig. I.32. Principe rectifieuse sans centres.....	19
Fig. I.33.Schéma d'élaboration par forgeage.....	20
Fig. I.34 Schéma d'élaboration de laminage.....	20
Fig. I.35 Principe d'emboutissage.....	21
Fig. I.36 Schéma d'élaboration par estampage.....	22
Fig. I.37. Schéma d'élaboration par matriçage.....	22
Fig. I.38. Produits filés en alliage d'aluminium.....	23

Fig. I.39. Atelier de tréfilage	25
Fig. I.40. Procédés de cintrage	25
Fig. I.41. Schéma d'élaboration de pliage de tôles	26
Fig. I.42. Extrusion des pièces de différentes formes	26
Fig. I.43. Pièce plastique moulée par injection.....	27
Fig. I.44 Moulage en sable	28
Fig. I.45.Moulage en coquille	29
Fig. I.46.Moulage sous pression	30
Fig. I.47.Schéma d'assemblage par soudage	31
Fig. I.48.Schéma d'assemblage par collage	31
Fig. I.49.Schéma d'assemblage par rivets	32
Fig. I.50. Schéma d'une agrafeuse manuelle professionnelle.....	32
Fig. I.51. Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux.....	33
Fig. I.52 Principe de fonctionnement électroérosion (Enfonçage)	37
Fig. I.53. Principe de fonctionnement électroérosion (Robot- fil)	37
Fig. I.54 Schéma d'élaboration par frittage.....	39
Fig. I.55 Plaquette de coupe amovible pour outil d'usinage en céramique frittée	39
Fig. I.56 Presse hydraulique à découper	40
Fig. I.57 Machine de découpage laser	41
Fig. I.58. Découpage par jet d'eau	41
Fig. I.59.Découpage plasma réalisé par un robot industriel.....	42
Fig. I.60.Pièces réalisées par usinage photochimique.....	43
Fig. I.61. Illustration des secteurs d'activités.....	44

**Chapitre II : Etude et conception des outillages
de fraisage.**

Fig. II.1. Principes de fraisage de face(en bout)	46
Fig. II.2. Principes de fraisage de profil	46
Fig. II.3.Fraisage en opposition	47
Fig. II.4 Fraisage en avalant	48
Fig. II.5. Fraise à bout sphérique (Hémisphérique)	48
Fig. II.6 Fraiseuse universelle	49
Fig. II.7. Étau.....	50
Fig. II.8.Schéma d'une plaque support	50
Fig. II.9. Mandrin.....	51
Fig. II.10. Opération de surfaçage	51
Fig. II.11. Fraisage d'épaulements	51
Fig. II.12. Fraisage de rainures	52
Fig. II.13. Schéma d'élargissement d'une cavité / poche.....	52
Fig. II.14.Opération de perçage	52
Fig. II.15. Opération de filetage.....	53
Fig. II.16. Types de Fraises	53

Fig. II.17. Illustration des paramètres de coupe.....	54
Fig. II.18 Paramètres géométriques de coupe	55
Fig. II.19. Illustration des plans et angles en main d'une fraise	56
Fig. II.20. Schéma des plaquettes	58
Fig. II.21 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant	59
Fig. II.22 Géométrie de la formation d'un copeau	61
Fig. II.23. Paramètres de temps technologique (fraisage en roulant)	62
Fig. II.24 Critère d'usure VB	63
Fig. II.25. Processus d'usure par abrasion	64
Fig. II.26. Processus d'usure par adhésion	65
Fig. II.27 Usure en dépouille (abrasion)	66
Fig. II.28 Usure en entaille (adhérence)	66
Fig. II.29. Usure en cratère (chimique)	67
Fig. II.30.Usure mécanique (Ecaillage)	67
Fig. II.31. Usure par adhérence (Arête rapportée)	68
Fig. II.32. Usure thermique (déformation plastique)	69
Fig. II.33 Usure en peigne	69
Fig. II.34 Courbe d'usure par apport le temps	70
Fig. II.35. Affûteuse universelle	71
Fig. II.36.Schéma de Fraise une taille et deux tailles	72
Fig. II.37.Formes de fraises.....	72
Fig. II.38 . Types de fraises.....	73
Fig. II.39 Fraise monobloc à denture taillé	73
Fig. II.40 Schéma d'une fraise à plaquettes rapportés	74
Fig. II.41. Schéma d'une fraise rouleau.....	74
Fig. II.42. Fraise à surfacer.....	74
Fig. II.43. Fraise 2T à queue cylindrique	75
Fig. II.44. Fraise à queue conique, 2T	75
Fig. II 45.Fraise à rainurer	75
Fig. II.46. Fraise cylindriques 2T, à entraînement par tenons	75
Fig. II.47. Fraise cloche à entraînement par tenons	76
Fig. II.48.Fraise-disque, 3T	76
Fig. II.49. Fraise-disque 3T, à dentures alternées	76

Chapitre III : Gamme d'usinage et modélisation numérique.

Fig. III.1 Schéma descriptive d'une fraise cylindrique 2T à queue conique	79
Fig. III.2 Schéma descriptive le Profil de la fraise cylindrique	80
Fig.III.3 : Débitage de la matière première (en ARS + 45)	80
Fig.III.4 Dressage la surface plane	81
Fig.III.5 : Soudage en bout de deux morceaux	81
Fig.III .6 : Chariotage et dressage et centrage	81
Fig.III .7 : Perçage et taraudage	82

Fig.III .8 : Tournage cylindrique et conique	82
Fig.III.9 : Fraise après l'opération de fraisage	83
Fig.III.10 : Fraise après traitement thermique	83
Fig.III.11 : Pièce après sablage	84
Fig.III.12 : Pièce rectifiée	84
Fig.III.13 : Affûtage des angles	85
Fig.III.14 : Fraise réalisée par Solidworks	89
Fig.III.15 : Forme de maillage de la fraise	89
Fig.III.16 : Mode de chargement	90
Fig.III.17 : Influence des contraintes sur la fraise	90
Fig.III.18 : Contraintes selon plan ZZ	91
Fig.III.19 : Contraintes selon plan YY	91
Fig.III.20 : Contraintes selon plan XX	92
Fig.III.21 : Contraintes selon plan ZY	92
Fig.III.22 : Contraintes selon plan ZX	93
Fig.III.23 : Contraintes selon plan YX	93

Introduction générale

Introduction générale

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans une fourchette de tolérance donnée. D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance non négligeable puisqu'il produit environ 2,5 % du produit national brut d'un pays développé. L'usinage concerne au premier chef les matériaux métalliques et la plupart des objets métalliques d'utilisation courante ont subi une ou plusieurs opérations d'usinage. Ces opérations s'insèrent dans la succession des opérations de mise en forme à deux niveaux principalement soit comme opération de:

- Découpe d'une ébauche destinée à être laminée, forgée, emboutie...
- Mise à la cote de pièces préalablement moulées, frittées, embouties, ou assemblées par soudage ;

Elles peuvent alors précéder ou suivre des traitements thermiques et/ou de surface Il faut noter qu'une catégorie importante (d'un point de vue industriel et économique) de pièces usinées, avec très souvent de grandes difficultés techniques, est constituée des outillages de mise en forme. Lors de la conception d'une pièce, le constructeur doit veiller à ce que ses différentes formes soient réalisables afin éviter, plus tard, toute complication. De ce fait, la connaissance des différents procédés de fabrication qui existent se montre nécessaire. Le choix de la technique dépend, de la complexité de la pièce, les matériaux utilisés, le temps de réalisation, le coût de fabrication...etc.

Notre objectif, en procédant à ce travail, est d'utiliser les moyennes possibles pour la conception et la réalisation d'une fraise cylindrique 2T à queue conique , nous avons proposé une gamme d'usinage développée, a l'aide des mesures expérimentales fiable basé sur des logiciels numériques, Conception et Fabrication Assisté par Ordinateur « CFAO » et des Machines-Outils à Commande Numérique «MOCN».

Ce manuscrite est divisé en trois chapitres :

- Le 1^{er} chapitre : donne une idée générale sur les différents procédés d'usinage mécanique et rappels sur les notions de base de la fabrication mécanique;
- Le 2^e chapitre : est réservé à l'étude approfondie des techniques de fraisage, la géométrie ; la conception d'une fraise, et leur endommagement.
- Le 3^e chapitre donne une présentation générale de la gamme d'usinage et le profil des contraintes de **Von mises** appliquées sur l'arrête tranchante de la fraise considérée. Cette recherche sera parachevée par une conclusion générale.

**Chapitre I:
Différents procédés de fabrication
mécanique.**

I.1 Généralité

Ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication. Ces procédés de fabrication font partie de la construction mécanique. Les méthodes de fabrication varient de temps en temps pour augmenter et d'évoluer et de devenir la productivité beaucoup plus facile et plus rapide et une consommation réduite de matières premières, limitée à ces méthodes dans les quatre grands groupes qui sont :

(a) Partie I – Mise en forme par méthodes conventionnelles : Parmi les différentes techniques de transformation de la matière, la mise en forme par enlèvement de matière (usinage) présente un poste onéreux tant par le parc de machines mobilisé que par les outils de coupe utilisés ou la perte inévitable de la matière par formation de copeaux, mais néanmoins c'est la seule méthode qui permet de produire des formes complexes avec des tolérances très serrées.

- Usinage ;
- Déformation plastique ;
- Fusion (fonderie) ;
- Assemblage (Rivetage, Boulonnage, Soudage,...).

(b) Partie II – Mise en forme par méthodes non – conventionnelles : Quand on parle usinage ou machine outil, on pense souvent au tournage, fraisage, rectification,...or ne pense pas aux procédés d'usinage avancées tels que l'électroérosion, l'ultrason, l'électrochimique, pour ne citer que trois procédés modernes. Les procédés d'usinage conventionnels mettent en jeu, pour l'enlèvement de copeaux, des efforts de coupe importants, deviennent difficiles pour l'usinage des matériaux durs ne permettent pas l'obtention des formes complexes. Les procédés d'usinage modernes ne nécessitent pratiquement aucun effort de coupe, mais leurs débits de matière enlevée est très faible comparativement au dédit de tournage par exemple. Cependant dans certains cas, seuls les usinages modernes peuvent être envisagés :

- (a) Usinages à Grande Vitesse (UGV) ;
- (b) Électroérosion ;
- (c) Découpage ;
- (d) Frittage ;
- (e) Usinage photochimique ;

I.2. Partie I– Mise en forme par méthodes conventionnelles

I.2.1. Obtention par Usinage

Consiste à obtenir la forme finale par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux). De manière générale on appelle usinage ces procédés. On y distingue :

- Tournage ;
- Fraisage ;
- Perçage ;
- Rectification ;
- Brochage

I.2.1.1. Tournage

La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme c'est le mouvement de coupe M_c . L'outil est animé d'un mouvement de translation parallèle ou oblique par rapport à l'axe de rotation c'est le mouvement d'avance M_f . Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice qui transforme la pièce en un solide de révolution, en faisant varier le déplacement de l'outil (mouvement radial) il sera possible d'obtenir tous les solides de révolution tels que cylindre, cône, sphère, etc.

Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage. En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant. La combinaison de ces deux mouvements permet l'enlèvement de matière sous forme de copeaux voir (Fig. I.1).

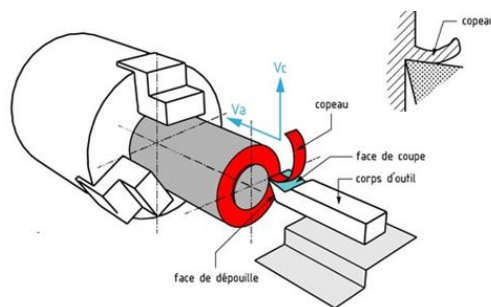


Fig. I.1 Schéma d'élaboration de tournage mécanique.

(a) Tournage extérieur

On distingue (Fig. I.2) :

- Tournage longitudinal (chariotage, axe z), réalisation d'un diamètre ;
- Tournage transversal (dressage, axe x), réalisation d'une face, d'un épaulement ;
- Tournage par profilage ou contournage, réalisé par copiage ou utilisation d'une commande numérique ;
- Tournage de gorges, dégagements ;
- Filetage, réalisation d'un pas de vis ;
- Tronçonnage.

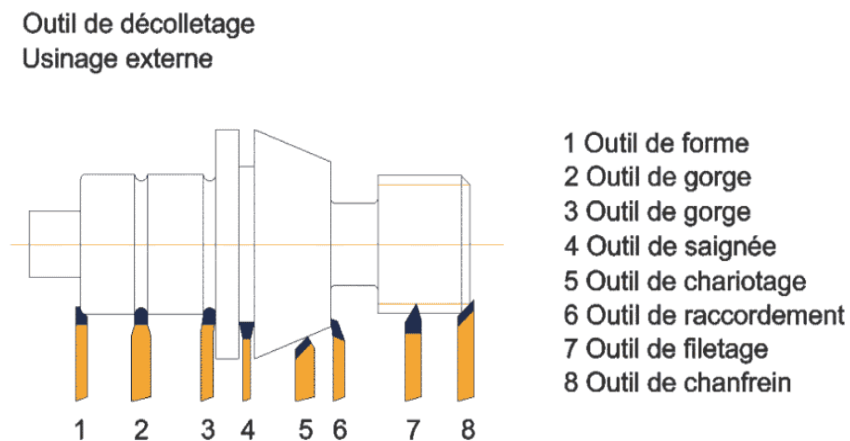


Fig. I.2. Usinage externe sur tour.

(c) Tournage intérieur

Usinage interne sur tour (Fig. I.3) :

- Alésage ;
- Dressage ;
- Tournage intérieur par contournage ;
- Tournage de dégagement, gorges ;
- Taraudage, réalisation
- d'un filetage intérieur ;
- Chambrage.

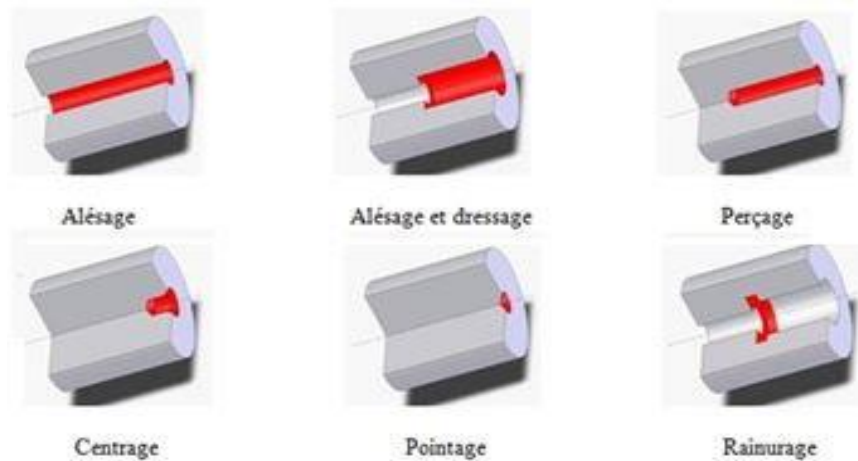


Fig. I.3. Principales opération de tournage interne sur tour.

I.2.1.2. Tournage de pièces métalliques

La fabrication d'une pièce métallique brute en tournage conventionnel se fait typiquement en cinq opérations :

- (1) Ecroûtage du brut : on enlève la couche extérieure, qui a un mauvais état de surface et contient de nombreux défauts (calamine, corrosion, fissures, inclusions, écrouissage important, ...) ; il s'agit d'une passe d'environ 0.5 à 1 mm ;
- (2) Contrôle du diamètre obtenu, ce qui permet de déterminer combien il faut enlever de matière pour arriver à la cote visée ;
- (3) Passes d'ébauche d'une profondeur de plusieurs mm, pour enlever la matière ;
- (4) Contrôle du diamètre avant finition ;
- (5) Passe de finition, d'une profondeur inférieure à 0.5 mm mais supérieure au copeau minimum, afin d'avoir une bonne tolérance dimensionnelle et un bon état de surface.

I.2.1.3. Principaux usinages réalisables sur un tour

- Tournage cylindrique extérieur avec pointe et contre-pointe (entre pointes), appelé chariotage, avec passes de dégrossissage et de finition ;
- Dressage avec passes de dégrossissage et de finition ;
- Chariotage conique ou tournage conique par orientation du chariot porte outil avec passes de dégrossissage et finition ;
- Filetage, tronçonnage, perçage et tournage intérieur (alésage).

(a) Chariotage

Le chariotage donne une surface latérale cylindrique, l'alésage, une surface intérieure cylindrique ou cambrage. (Fig. I.4)

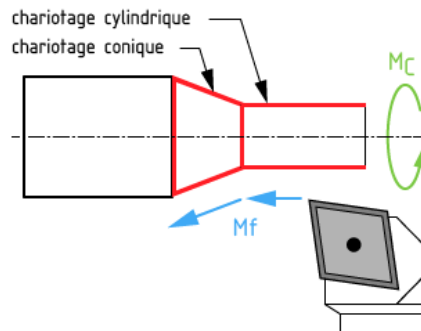


Fig. I.4 Schéma représenté l'opération de chariotage.

(b) Dressage

Le dressage donne des surfaces planes perpendiculaires à l'axe, extérieur ou intérieur (Fig. I.5).

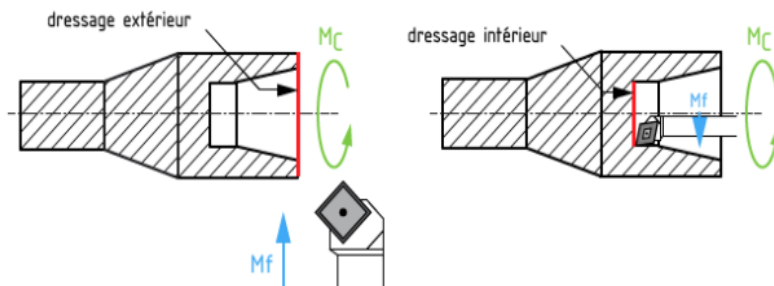


Fig. I.5 Schéma d'élaboration de dressage.

(c) Chanfreinage

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif (voir Fig. I.6).

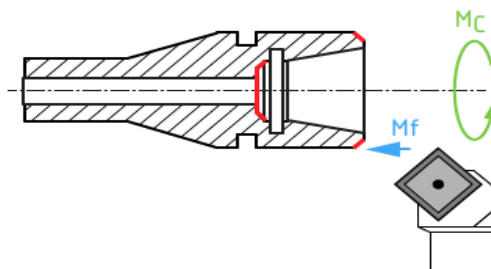


Fig. I.6 Opération de Chanfreinage.

(d) Centrage

L'opération consiste à usiner à l'extrémité de la pièce à dresser un centre qui servira de logement à la pointe. Les axes des deux centres doivent se confondre avec l'axe géométrique de la pièce (Fig. I.7).

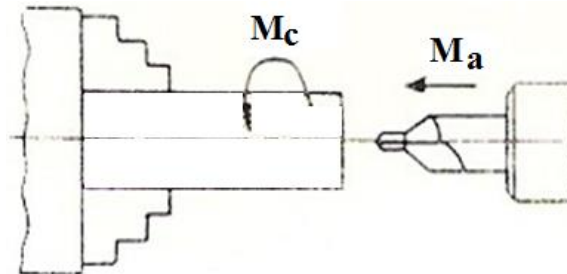


Fig. I.7 Opération de centrage.

(e) Perçage

Le terme de perçage regroupe toutes les méthodes ayant pour objet d'exécuter des trous cylindriques dans une pièce avec des outils de coupe par enlèvement de copeaux. En plus du perçage de trous courts et du forage de trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que brochage, alésage, réalésage et certaines formes de finition comme le calibrage et le galetage (Fig. I.8).

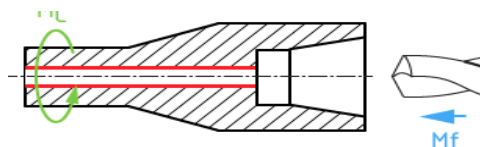


Fig. I.8 Opération de perçage

(f) Alésage

Lorsque le trou a été percé avec assez de précision, on peut calibrer au diamètre voulu avec un alésoir, ce qui est une opération rapide mais qui nécessite l'outil exactement approprié au diamètre ; cette méthode n'est en général employée que jusqu'à 20, voire 30 mm de diamètre. Sinon on utilise un grain d'alésage réglable assurant une très bonne précision du trou en position mais qui nécessite plusieurs passages, donc plusieurs porte outils: 1 ou 2 à partir d'un trou percé, 2 ou 3 pour un trou brut de fonderie. Il existe des têtes à aléser portant un seul outil réglable en diamètre soit manuellement, soit par la CN ; dans ce dernier cas, on

peut réaliser des opérations de surfacage et d'alésage à différents diamètres ayant éventuellement un profil non rectiligne (Fig. I.9).

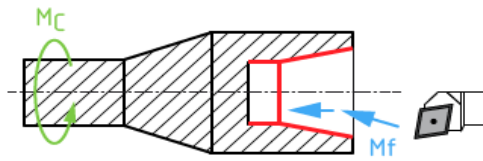


Fig. I.9 Schéma de réalisation d'un alésage.

(g) Rainurage

Opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple (Fig. I.10).

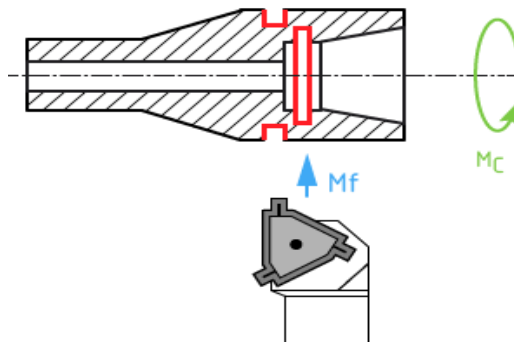


Fig. I.10 Schéma montrant l'opération de rainurage.

(h) Tronçonnage

Le tronçonnage consiste à sectionner une barre ou à détacher la pièce du reste de la barre. Le saignage consiste à usiner des gorges ou saignées sur la surface de la pièce (Fig. I.11).

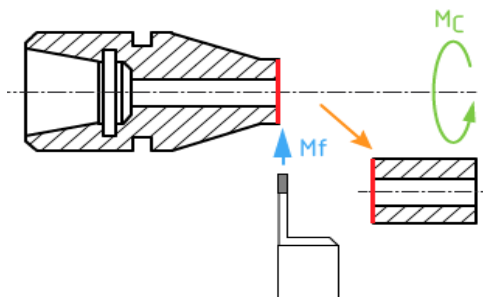


Fig. I.11 Opération de tronçonnage.

(i) Filetage et taraudage

L'outil, dont le déplacement est longitudinal, creuse sur la pièce des rainure hélicoïdales laissant leur relief le filet, suivant la forme de l'outil on obtient un filet triangulaire, trapézoïdale, rond, carré (Fig. I.12).

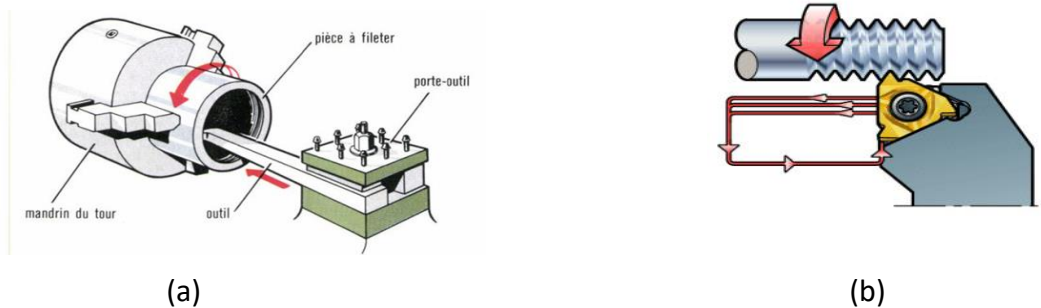


Fig. I.12. Opération de filetage : a) intérieur (taraudage), b) extérieur (filetage).

(j) Tournage de forme

Consiste à exécuter des pièces de révolution complexe: sphère, cylindre, plan, cône... (Fig. I.13).

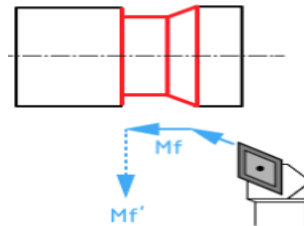


Fig. I.13. Tournage de forme.

(k) Détalonnage

C'est une opération qui consiste à réaliser un angle de dépouille de la fraise et pour but de faire l'arrête de ce dernier (fraise) plus haute que le dos de la dent de façon à permettre à la fraise d'exécuter le découpage normale. Le détailonnage est plus employé pour l'usinage des fraises de forme (Fig. I.14).



Fig. I.14 Profil d'une fraise de forme à denture détailonnée.

I.2.1.2.Fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de la matière. Il est caractérisé par le recours à une machine-outil appelée fraiseuse et l'utilisation d'un outil de coupe spécial (à arêtes multiples) appelé fraise (Fig. I.15). La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage des surfaces plates et permet également, si la machine est équipée de commande numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes. La coupe en fraisage s'effectue habituellement avec des dents placées sur le périphérique et / ou sur l'extrémité d'un disque ou d'un cylindre.

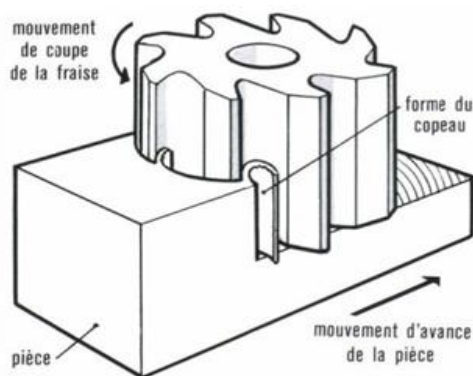


Fig. I.15.Principe de fraisage.

I.2.1.2.1.Principe de travail

Lors d'une opération de fraisage, l'enlèvement de la matière – sous forme de copeau – résulte de la combinaison de deux mouvements : le mouvement de rotation de l'outil sur son axe d'une part et le mouvement d'avance de la pièce suivant trois axe orthogonaux d'autre part.

I.2.1.2.2.Modes de fraisage

On distingue deux modes : le fraisage de face et le fraisage de profil.

(e) Fraisage de face

Dans ce mode, l'axe de la fraise est perpendiculaire au plan fraisé (Fig.I.I6). C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où l'on ne retrouve aucune trace de la forme de la génératrice de la fraise. Ce mode de fraisage est également appelé « fraisage en bout ».

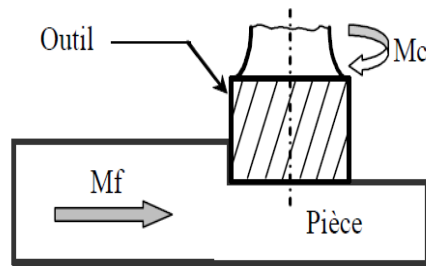


Fig. I.16 Schéma de fraisage de face.

(f) Fraisage de profil

Dans ce mode, la génératrice de la fraise est parallèle à la surface usinée (Fig. I.17). C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où quelconques dans des positions diverses. Ce mode de fraisage est également appelé « fraisage en roulant ».

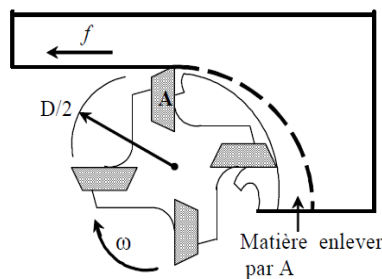


Fig. I.17. Fraisage de profil.

On peut également effectuer **un fraisage combiné**, c'est-à-dire de face et de profile en même temps. C'est le cas des fraises **2 tailles**, **3 tailles**, travaillant simultanément en bout et en roulant : c'est le fraisage combiné (Fig. I.18).

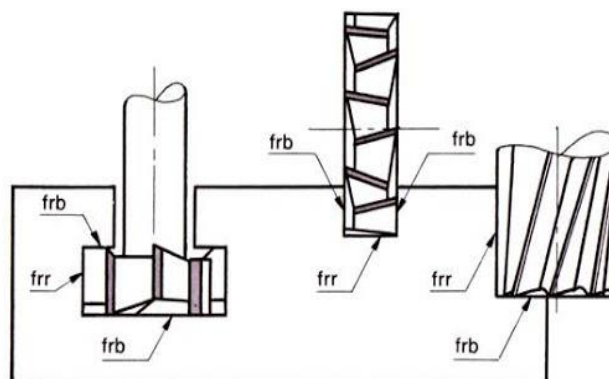


Fig. I.18. Fraisage combiné.

Lors d'une opération de fraisage de profil et selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce, Il existe deux manières de procéder :

(g) Fraisage en opposition

La direction d'avance de la pièce est à l'opposé du sens de rotation de la fraise dans la zone de coupe. L'épaisseur des copeaux est nulle au départ, puis maximale à la fin de la passe (Fig. I.19).

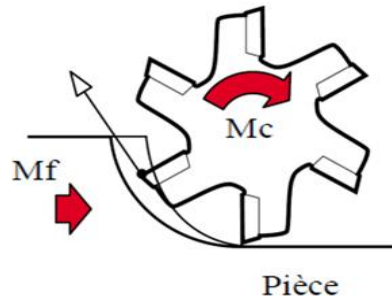


Fig. I.19. Fraisage en opposition.

(h) Fraisage en concordance ou « en avalant »

Dans le cas de fraisage en avalant, la direction d'avance est la même que le sens de rotation de la fraise. L'épaisseur de copeau va donc diminuer jusqu'à être égale à zéro à la fin de la passe (Fig. I.20).

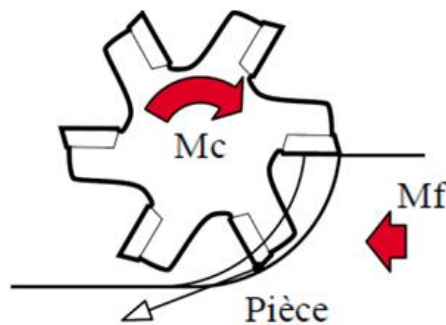


Fig. I.20. Fraisage en avalant.

I.2.1.3. Perçage

Le terme de perçage regroupe toutes les méthodes ayant pour objet d'exécuter des trous cylindriques dans une pièce avec des outils de coupe par enlèvement de copeaux (Fig. I.21). En plus du perçage de trous courts et du forage de trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que brochage, alésage, réalésage et certaines formes de finition comme le calibrage et le galetage.

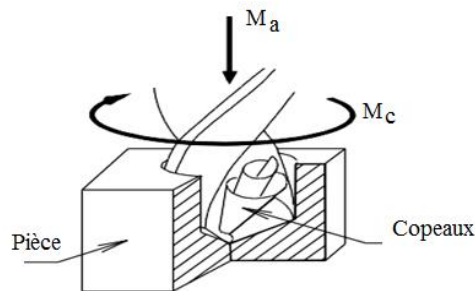


Fig. I.21 Schéma de perçage .

I.2.3.1. Principe de travail

L'enlèvement de la matière lors de l'opération de perçage s'effectue par la combinaison d'un mouvement rotatif et d'un mouvement d'avance linéaire. Pour le perçage de trous courts sur les machines conventionnelles, ce double mouvement de rotation et d'avance est donné à l'outil . Mais l'utilisation de tours universels CN et CNC à toute fois conduite à recourir de plus en plus fréquemment à la combinaison d'une pièce en rotation et d'un foret qui ne tourne pas.

I.2.1.4. Brochage

Le brochage est un procédé d'usinage à l'aide d'un outil de forme à tranchants multiples appelé « broche ». L'outil broche possède des dents qui augmentent de hauteur progressivement, de sorte que chacune entaille plus profondément la pièce que celle qui la précède (Fig. I.22). Le brochage intérieur nécessite que la broche puisse traverser la pièce. Il est donc nécessaire de réaliser au préalable un trou débouchant.



Fig I.22 Nomenclature des broches, (a) Broches de formes internes,(b) Broches de formes externes.

I.2.1.5. Rectification

I.2.1.5.1.Principe de la rectification (Fig. I.23)

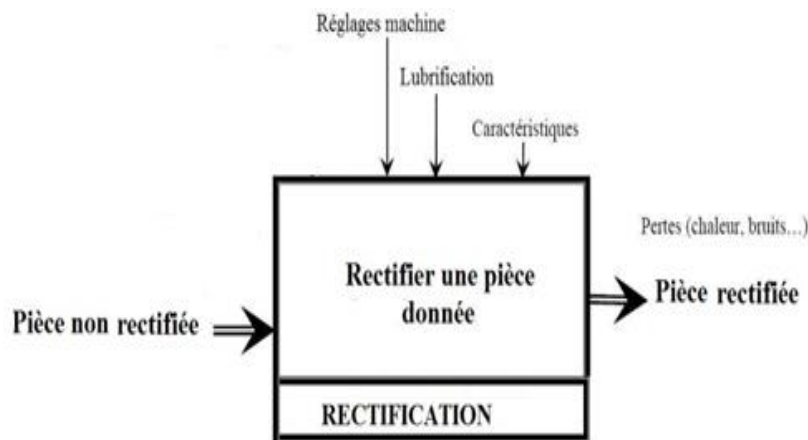


Fig. I.23. Principe de rectification.

I.2.1.5.2. Schéma de principe et fonctionnement

La rectification est un procédé d'usinage sur machines-outils qui consiste à enlever la matière, sous forme de petits copeaux (grains), au moyen d'un outil particulier appelé meule. On fait appel à ce procédé pour des raisons de précision qui tiennent à la fois aux dimensions, aux états de surfaces et aux conditions de dureté des pièces .

I.2.1.5.3. Mode d'action de l'outil meule

Une meule est constituée de **matière abrasive** vient arracher à la pièce de minuscules fragments qui sont éjectés (contrairement à l'usinage par arrachement de copeaux) (voir figure ci-dessous) , les températures associées à ce procédé sont très élevées dans la zone de coupe, c'est pourquoi les copeaux ont l'apparence d'étincelles . À la différence des autres procédés d'usinage où le nombre de lèvres de l'outil est bien défini et limité, dans le cas de la rectification, l'outil présente à la pièce un nombre très élevé d'arrête de coupe, chaque arrête étant **un grain d'abrasif** sur la meule (Fig I.24). De par son faible taux d'enlèvement de matière, le procédé de rectification est très lent mais produit des pièces d'une haute précision avec un excellent fini de surface. On utilise la rectification pour réaliser les usinages de précision des surfaces **après trempe** ou afin d'obtenir des IT (intervalles de tolérances) extrêmement serrés. Toutefois, on doit tenter de minimiser l'utilisation de ce procédé car sa faible productivité augmente de manière importante les coûts de production de la pièce associée.

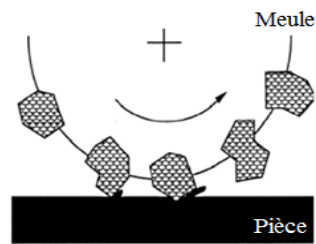
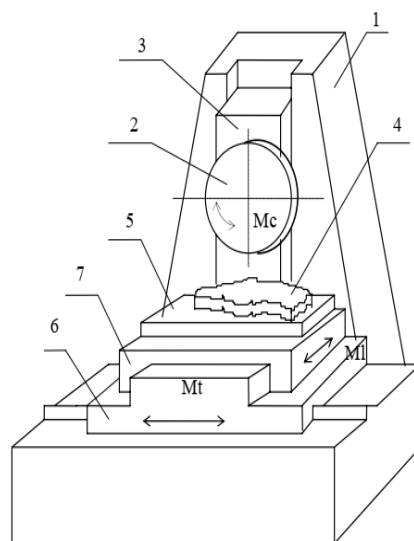


Fig. I.24. Opération de la rectification plane.

Au cours de la **rectification**, l'outil de coupe appelé meule est animé d'un mouvement de rotation, la pièce se déplace en translation (**rectification plane**) ou tourne autour de son axe tout en se déplaçant en translation le long de son axe (**rectification cylindrique**). La rectification se fait sur des rectifieuses planes et cylindriques. Il a trois types de formes principales que l'on rectifie : **surfaces planes**, de **révolutions intérieures** et **extérieures** (voir ci-dessous).

(d) Rectification plane

Elle est constituée d'un bâti de fonte, d'une poupée porte-meule et d'une table horizontale mobile sur les glissières du bâti. La pièce est immobilisée sur la table au cours du travail grâce à l'attraction exercée par une plaque électromagnétique (Fig I.25). Un moteur électrique entraîne en rotation la broche et la meule au moyen d'une transmission par courroie. L'avance est assurée par le déplacement transversal de la poupée porte-meule commandé par une vis.



1. Bâti ;
2. Meule ;
3. Chariot porte meule ;
4. Pièce ;
5. Porte pièce ;
6. Table longitudinale ;
7. Chariot transversal.

Fig. I.25. Schéma d'une rectifieuse plane.

(e) **Rectifieuse cylindrique**

La construction de la rectifieuse cylindrique est plus complexe (Fig I.26). En plus d'une poupée porte-meule montée sur les glissières du bâti, et d'une table à commande hydraulique mobile en direction longitudinale, cette machine comprend une poupée fixe et une poupée mobile fixée sur la table. La pièce montée entre les centres de ces poupées est entraînée en rotation à une vitesse atteignant 3000 Tr/min. La poupée porte-meule est déplacée en sens transversal au moyen d'un mécanisme d'avance transversale.

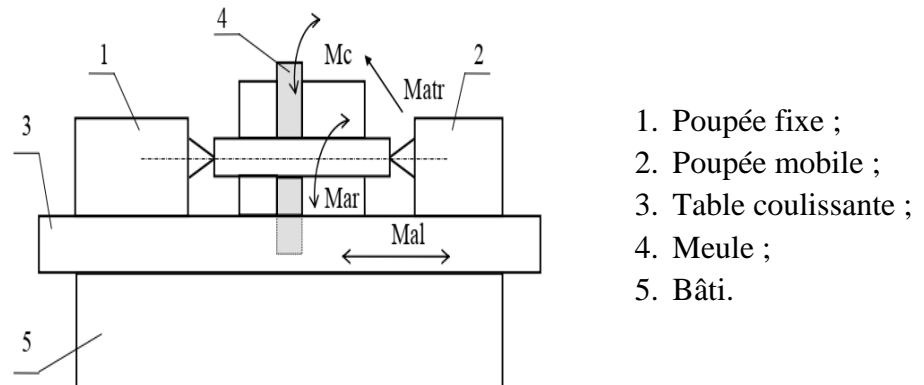


Fig. I.26. Schéma d'une rectifieuse cylindrique

Il existe différents types de rectification cylindrique :

- **Rectification externe cylindrique** : permet de rectifier les parties extérieures d'une pièce cylindrique (Fig. I.27).

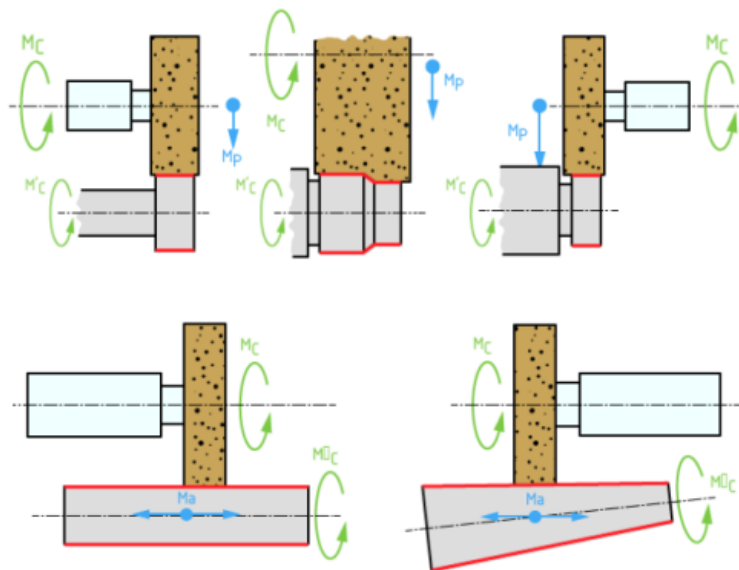


Fig. I.27. Opérations de rectification extérieure.

- **Rectification intérieure cylindrique** : permet de rectifier les parties intérieures d'une pièce cylindrique. La meule tourne à l'intérieur de l'alésage à rectifier fixe. On procède de même avec un cône intérieur à la différence que la pièce est inclinée de l'angle de la conicité divisé par deux sur le porte-pièce (fig.I.28).

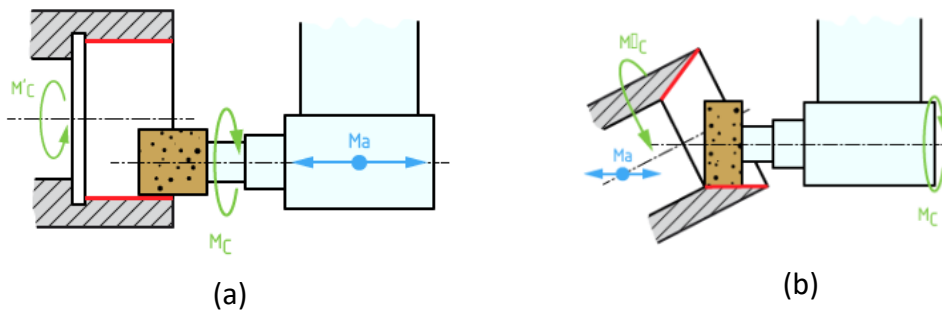


Fig. I.28. Rectification Intérieure, a) cylindrique, b) conique.

(f) **Rectifieuse sans centres**

C'est une variante de la rectifieuse cylindrique. Elle porte deux meules animées de rotation dans un même sens, mais une meule constitue l'outil de travail, tandis que l'autre assure l'entraînement (Fig I.29). La pièce à rectifier est fixée entre la lame et la roue régulatrice. La rotation de la roue régulatrice provoque la rotation de la pièce usinée. Une rotation contraire est imposée à la meule pour réaliser l'opération de rectification

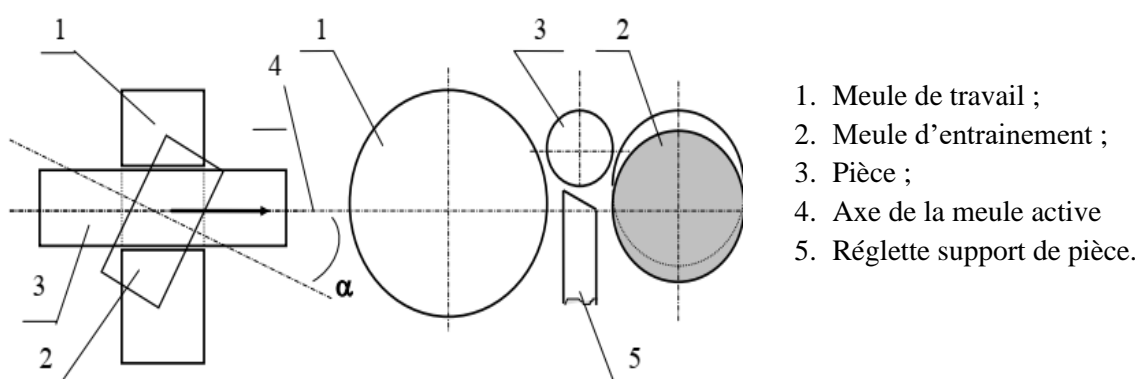


Fig. I.29. Schéma d'une rectifieuse sans centre.

Il y'a deux types de rectification sans centre :

- **Rectification sans centre extérieure** (Fig. I.30)

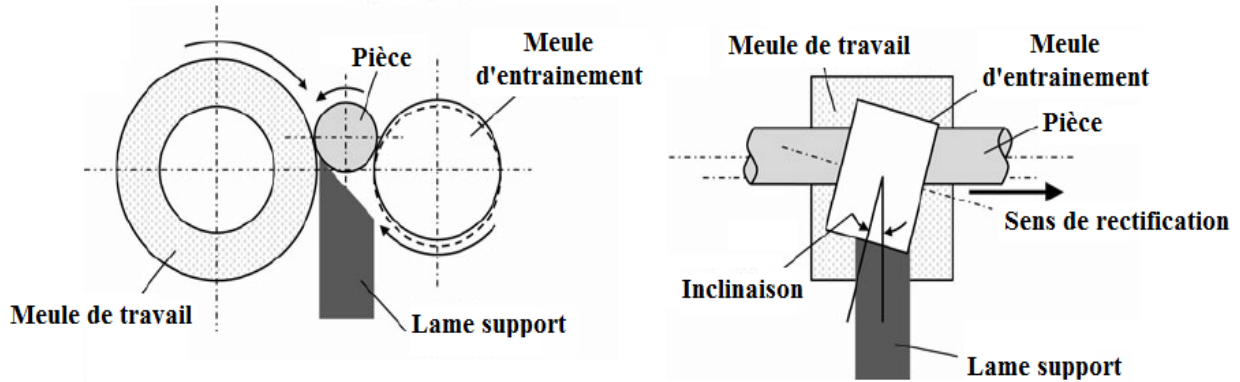


Fig. I.30. Rectification sans centres extérieure.

- **Rectification sans centres intérieure** (Fig. I.31)

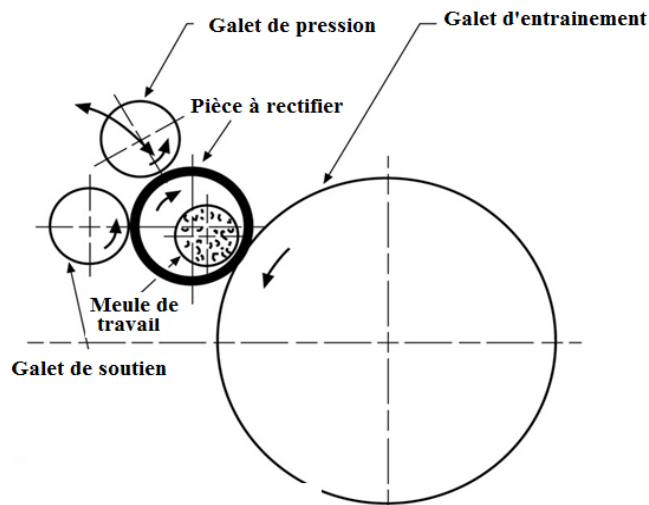


Fig. I.31. Rectification sans centres intérieure.

Le principe de fonctionnement est le suivant (Fig. I.31) :

- La pièce à rectifier se trouve entre deux meules, prenant appui sur lame support ;
- La pièce entraînée en rotation se voit imprimer un déplacement axial entre les meules, qui est en l'occurrence le mouvement d'avance.

- Le mouvement d'avance est communiqué principalement par **la meule d'entraînement**, tandis que la meule de travail coupe le métal. Ce mouvement est réalisé en faisant tourner l'axe de la meule d'entraînement dans un plan vertical d'un angle : $\alpha = 1,5$ à 6° pour la rectification ébauche, et d'un angle : $\alpha = 0,5$ à $1,5^\circ$ pour la finition (Fig. I.32).

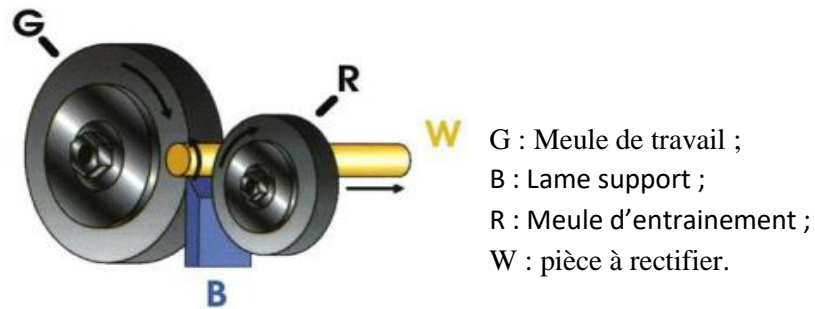


Fig. I.32. Principe rectifieuse sans centres.

Ces trois exemples simples ne sont qu'un bref aperçu des multiples situations de rectification possible.

I.2.1.5.4. Avantages de la rectification

- Possibilité de s'attaquer aux matériaux les plus durs ;
- Pouvoir atteindre des tolérances de l'ordre du micromètre (0,001 mm) ;
- Obtenir un état de surface poussé ($< 0,1 Ra$) ;
- Permet d'être plus précis sur l'usinage ;
- Usinage des matériaux les plus durs.

I.2.2. Obtention par déformation

I.2.2.1. Forgeage

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un matériau, à froid ou à chaud, afin de le contraindre à épouser la forme voulue. Sous l'action d'une forte pression ou d'une succession de chocs, un bloc de métal chauffé (800 à 1200 °C) se déforme plastiquement vers les surfaces restées libres. Aucune matrice ne délimite la déformation du matériau, et la forme obtenue dépend fortement du savoir-faire de l'opérateur (Fig I.33). L'opération peut s'effectuer avec un outillage manuel ou à l'aide d'un marteau-pilon ou d'une presse hydraulique. La forge libre permet d'obtenir des ébauches ou des pièces brutes, et n'est pas adapté au travail en série.

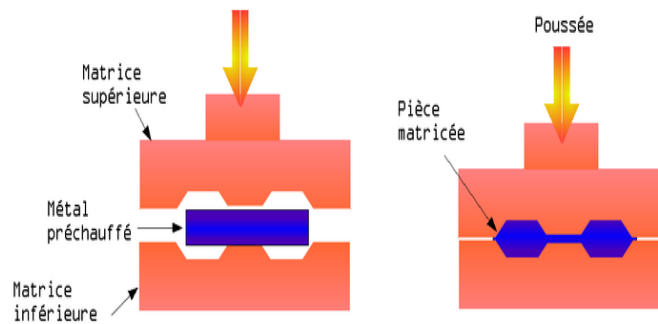


Fig. I.33 Schéma d'élaboration par forgeage (pièces forgées).

□ **Avantages**

- Pas d'outillage spécialisé selon la pièce à obtenir ;
- Les pièces forgées ont une résistance mécanique supérieure aux mêmes pièces usinées, du fait du fibrage de la pièce consécutif au forgeage .

□ **Inconvénients**

- Nécessite beaucoup d'énergie (métal chauffé).
- La précision est médiocre.

I.2.2.2. Laminage

Le matériau est déformé par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelés laminoiners. Le laminage peut s'effectuer à froid ou à chaud. Les laminoiners sont souvent utilisés les uns à la suite des autres afin de réduire progressivement l'épaisseur des profilés. La plupart des tôles plates brutes sont obtenues par laminage. (Fig I.34).

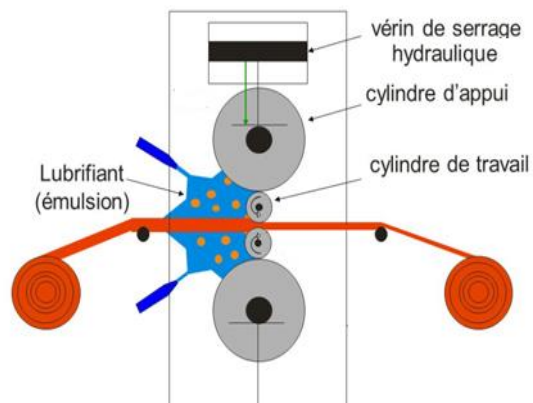


Fig. I.34 Schéma d'élaboration de laminage.

I.2.2.3. Emboutissage

L'emboutissage est une technique de fabrication permettant d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle plane et mince, un objet dont la forme n'est pas développable. L'ébauche en tôle est appelée « Becker », c'est la matière brute qui n'a pas encore été emboutie. La température de déformation se situe entre le tiers et la moitié de la température de fusion du matériau. L'emboutissage est un procédé de fabrication très utilisé dans l'industrie automobile, dans l'électroménager, etc.

Le principe est fondé sur la déformation plastique du matériau (en général un métal), déformation consistant en un allongement ou un rétreint local de la tôle pour obtenir la forme (Fig I.35).

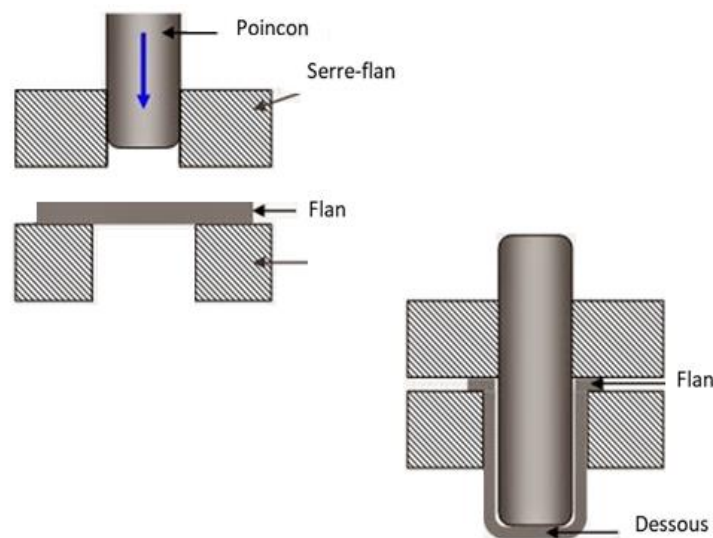


Fig. I.35 Principe d'emboutissage (pièces forgées) .

I.2.2.4. Estampage

On commence par faire l'ébauche de la pièce désirée, en plaçant le lopin dans la matrice d'ébauche. Une fois celle-ci prête, on la met dans la matrice ayant la forme de la pièce voulue. Puis, on vient découper les cordons de bavures (voir Fig. I.36). Le matriçage, réservé aux métaux non ferreux, est une variante de l'estampage (on dit aussi « estampage de précision »). Dans ce cas, la presse hydraulique lente se substitue au marteau-pilon et la pièce est insérée par force dans un outillage (matrice) démontable. L'intérêt technique de ces procédés est la compression des molécules de matière selon la forme de la pièce d'où des résistances extrêmes aux efforts mécaniques.

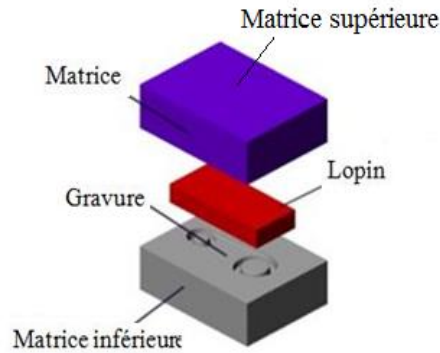


Fig. I.36 Schéma d'élaboration par estampage.

□ **Avantages**

- Les mêmes que pour le forgeage libre, avec plus de rapidité et une meilleure précision.

□ **Inconvénients**

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Prix de revient élevé des matrices rapidement « usées ».

I.2.2.5 Matricage

La forge par matricage consiste à former par déformation plastique après chauffage des pièces brutes réalisées en alliages tels que les alliages d'acier d'aluminium, de cuivre, de titane, de nickel, etc.

Le matricage est une opération de forge effectuée à l'aide d'outillages appelés des matrices (demi-matrice supérieure et demi-matrice inférieure). Les matrices portent en creux la forme de la pièce (Fig. I.37).

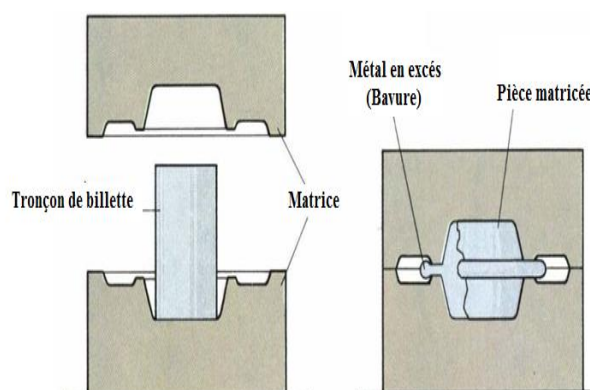


Fig. I.37 Schéma d'élaboration par matricage.

I.2.2.6. Filage

Le filage à chaud des métaux et alliages est un procédé de transformation utilisé industriellement pour la fabrication de tubes et de barres pleines ou creuses de sections diverses (fig. I.38). À son origine, le procédé a été utilisé pour la transformation des métaux non ferreux, puis, grâce à une invention française dans les années 1940, pour la transformation des aciers et des métaux réfractaires. Les progrès réalisés depuis la Seconde Guerre mondiale permettent aujourd'hui d'envisager l'utilisation du filage pour la fabrication de tubes en acier ordinaire, en parallèle avec les procédés classiques de laminage. Ce mode de fabrication permet d'obtenir de grandes longueurs d'un profil quelconque ou d'un tube en partant d'un bloc de métal de section circulaire ou carrée, et cela en une seule opération, alors que les autres procédés nécessitent plusieurs passages successifs du produit dans la ou les machines servant à la transformation.

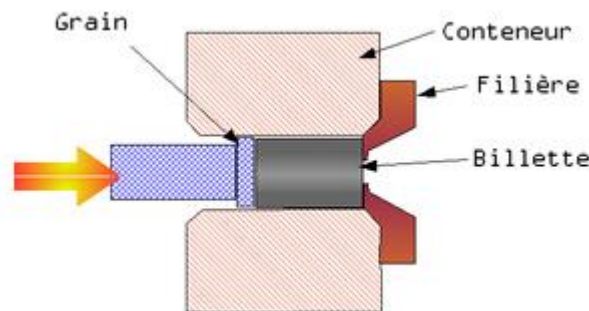


Fig. I.38 Produits filés en alliage d'aluminium

(e) Filage direct

C'est le procédé de filage le plus simple. Il présente des inconvénients principalement à cause du frottement du métal sur la surface interne du conteneur. Ce frottement pouvant avoir des conséquences sur les outillages eux-mêmes mais également sur la structure du métal. La maîtrise de la lubrification modère cet inconvénient.

(f) Filage inverse

Dans le cas du filage inverse, la filière est placée à l'extrémité d'un poinçon. La billette chauffée est placée dans le conteneur. L'on plaque une tête sur le conteneur. C'est donc l'ensemble, billette, conteneur et tête qui avance vers la filière. Le métal file à l'intérieur du poinçon.

Le gros avantage de la méthode réside dans la suppression des frottements entre la billette et le conteneur. L'effort de filage est minoré ce qui permet l'utilisation de presses de moins forte puissance. L'absence de frottement supprime une partie des échauffements ce qui permet

une meilleure maîtrise de la structure métallique et limite le risque de défauts de surface. Dans le cas de l'aluminium, on peut supprimer presque complètement la zone corticale à gros grains. Il est plus facile de maîtriser les tolérances géométriques.

L'inconvénient provient du poinçon qui compte tenu de sa forme creuse est plus fragile et travaille au flambage. De plus le montage des outillages est plus complexe et nécessite des alignements plus rigoureux que la méthode en direct. De plus, le nombre de formes possibles est plus limité que le filage direct.

(g) Filage inverse en conteneur

Il s'agit là d'une méthode beaucoup moins utilisée que les deux précédentes. L'objectif est différent puisque le produit obtenu est un tube avec un fond (appelé étui). Les longueurs de filage sont forcément plus courtes. Cette méthode est utilisée pour la fabrication de composants d'armement (douille d'obus, ogive), de bouteilles à gaz en acier ou en alliage d'aluminium. Les formes sont limitées.

La billette chauffée ou froide et lubrifiée est placée dans une matrice fermée à une extrémité par un tasseau. Un poinçon vient pousser sur la billette qui file le long du poinçon en formant un étui. Il est éjecté grâce à une poussée sur le tasseau.

(h) Filage sur aiguille

Le filage sur aiguille permet de filer des tubes. Le matériau de départ est une billette évidée. Elle peut être évidée par perçage, usinage ou forgeage. Le poinçon est équipé d'une aiguille qui est emmanchée sur la billette creuse. En poussant dans la filière, le métal est contenu entre la filière et l'aiguille. On obtient un tube monobloc sans soudure.

Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe.

I.2.2.7. Tréfilage

Le tréfilage est la réduction de la section d'un fil en métal par traction mécanique sur une machine à tréfiler (Fig. I.39). Les usines spécialisées dans le tréfilage sont appelées des tréfileries. L'érouissage y est important et nécessite un traitement thermique (type de recuit pour les faibles sections) évitant au fil d'être trop cassant et améliorant sa plasticité.

Le fil machine, sous forme de bobine, est enroulé sur un ou des cabestans, qui, par frottement, exercent une traction sur le fil. Le fil passe dans une filière, en amont du cabestan, qui impose au fil une déformation par réduction de section. La filière est abondamment lubrifiée, pour assurer le maintien d'un bon état de surface du fil métallique et pour assurer le refroidissement et contrer l'échauffement provoqué par l'érouissage du métal. Le tréfilage est également utilisé dans la fabrication des pâtes alimentaires industrielles.



Fig. I.39 Atelier de tréfilage.

I.2.2.8 Cintrage

Le cintrage est un procédé mécanique de déformation d'un tube ou d'une barre, suivant un rayon et un angle avec une cintruse. Le terme cintrage est aussi utilisé pour désigner globalement la transformation d'un produit cintré. Il existe plusieurs techniques : par enroulement, par poussée, par roulage et par emboutissage (Fig. I.40).

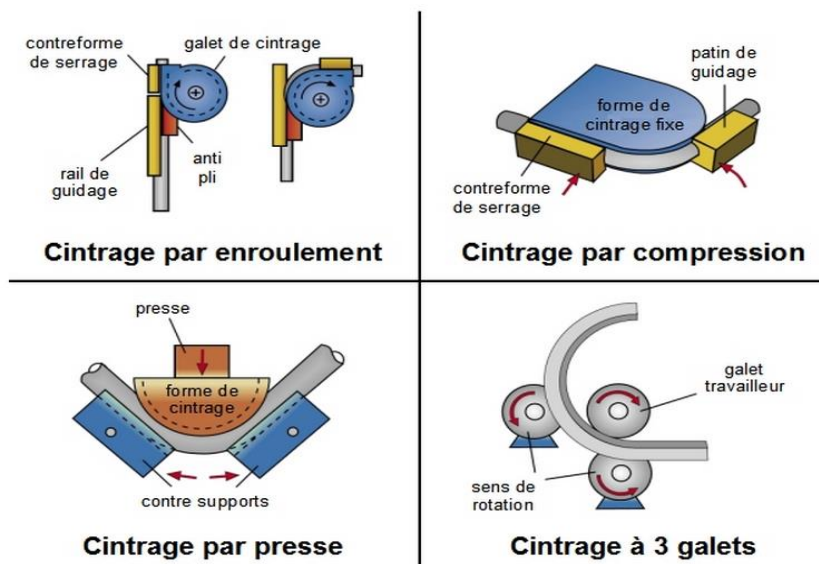


Fig. I.40 Procédés de cintrage.

I.2.2.9. Pliage

Le pliage est une déformation obtenue grâce à une force appliquée sur la longueur de la pièce. Celle-ci sera en appui sur 2 lignes d'appuis et s'apparente à la flexion. Il faudra dépasser la limite élastique pour obtenir l'angle voulu (fig. I.41).

□ Avantages

- Outillage simple : presses hydrauliques avec différents poinçons et matrices.

□ Inconvénients

- Ressaut élastique résiduel difficile à prévoir ;
- Longueur de pliage limitée.

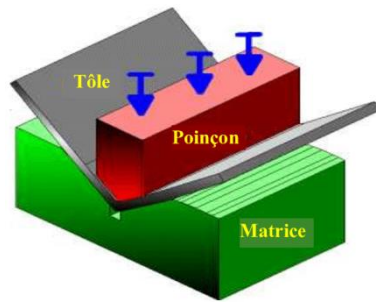


Fig. I.41 Schéma d'élaboration de pliage de tôles.

I.2.2.10 Extrusion

Un matériau chauffé et compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. Cette technique permet d'obtenir en continu un produit pouvant être très long (barre, tube, profilé, tôle...), (Fig. I.42).

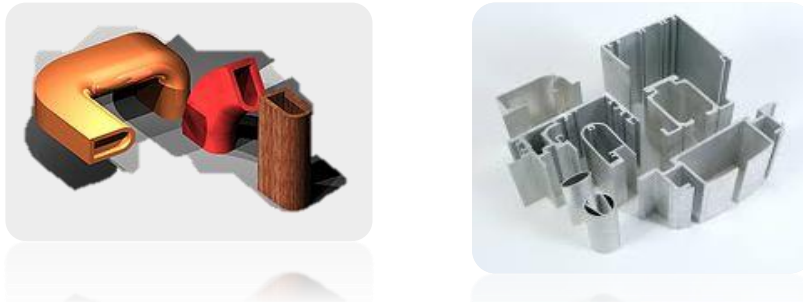


Fig. I.42 Extrusion des pièces de différentes formes.

□ Avantages

- Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;
- Bons états de surface ;
- Sections des profilés pouvant être creux et très complexes.

□ Inconvénients

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Formes limitées à des « extrusions » (voir figure ci-dessous).

I.2.3. Obtention par fusion (fonderie) Moulage

Le moulage est un procédé de fabrication qui permet de réaliser des pièces par coulée du métal en fusion dans un moule. On s'adresse à lui pour : la fabrication de pièces de formes compliquées qu'il serait difficile ou impossible de réaliser par tout autre procédé, ou pour la production à des prix de revient plus intéressants de pièces plus simples ; profiter des propriétés physiques ou d'utilisation (dilatation, corrosion, frottement, usure, basses et hautes températures) et des propriétés mécaniques des divers métaux et alliages coulés ; couler des alliages difficilement usinables. La plupart des pièces de fonderie sont des ébauches qui sont ensuite partiellement usinées comme, par exemple, les carters de moteur automobile (produits en alliage d'aluminium pour alléger le moteur). (Fig. I.43).

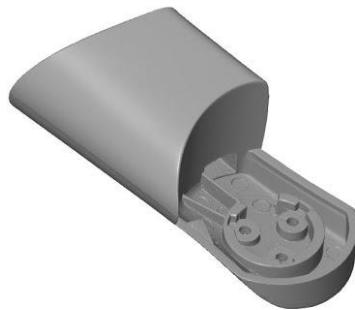


Fig. I.43. Pièce plastique moulée par injection.

Les procédés de moulage sont classés en deux grandes catégories. On distingue principalement la fonderie effectuée avec :

- Des moules non permanents, ou "moules perdus", généralement en sable ;
- Des moules permanents en métal, qu'on appelle aussi "coquilles".

I.2.3.1. Moulage non permanent (moulage au sable)

C'est le procédé de moulage le plus universel et le plus couramment employé, et qui reste toujours très compétitifs avec d'autres procédés plus modernes. Il permet de couler aussi bien de grosses pièces unitaires, que de petites et moyennes pièces en série, sur chantiers de moulage mécanisés, quel que soit l'alliage. Cette technique utilise des moules en sable lié avec de l'argile et de l'eau. Le moulage peut se faire avec ou sans modèle. Il peut être en bois, en plâtre ou métallique. Pour que le modèle puisse être démoulé sans abîmer l'empreinte, on est amené à donner de la «dépouille» aux plans orientés dans le sens du démoulage, c'est-à-dire à les rendre légèrement obliques ; lorsque des faces sont en «contre dépouille », le

modèle est réalisé en plusieurs parties démontables. Dans les cas de moulage sans modèle les empreintes et les noyaux sont obtenus par taillage du sable de moulage.

Les principaux avantages de cette méthode résident dans la rapidité de moulage et le taux de récupération très élevé du sable. Il est utilisé pour le moulage des pièces en fonte, acier et métaux non ferreux (fig. I.44).



Fig. I.44 Moulage en sable.

I.2.3.2. Moules permanents

Un moule réutilisable est utilisé pour la coulée en moule permanent. Les avantages de ce procédé incluent les suivants :

- Composants près des cotes ;
- Meilleure finition de la surface ;
- Propriétés mécaniques améliorées.
- Les produits finis ne présenteront pas de détails fins.

En matière de fonderie à coulée en moule permanent, un moule réutilisable est fabriqué à partir de métal, généralement de la fonte grise. Il est construit à partir de deux ou plusieurs pièces et doté d'une charnière pour pouvoir extraire le moulage du moule. Le métal liquide est versé dans le moule par simple gravité. La fonderie en moule permanent est utilisée pour produire des moulages à partir d'alliages d'aluminium, de magnésium et de cuivre. Les pièces d'acier et de fer peuvent être coulées dans des moules en graphite. Le terme de fonderie en moule permanent et de coulée en coquille sont souvent employés pour désigner le même procédé.

Les moules sont métalliques (en fonte ou en aciers spéciaux réfractaires), permettent de couler un grand nombre de pièces. On distingue les procédés suivants :

- Moulage en coquille par gravité ;
- Moulage sous pression.

(c) Moulage en coquille par gravité

C'est le procédé de moulage en coquille le plus simple. On coule directement le métal liquide à l'aide d'une louche ou d'une petite poche de coulée dans l'empreinte d'un moule métallique qui peut comporter ou non des noyaux métalliques ou en sable suivant les pièces à fabriquer et leur complexité. (Fig. I.45).

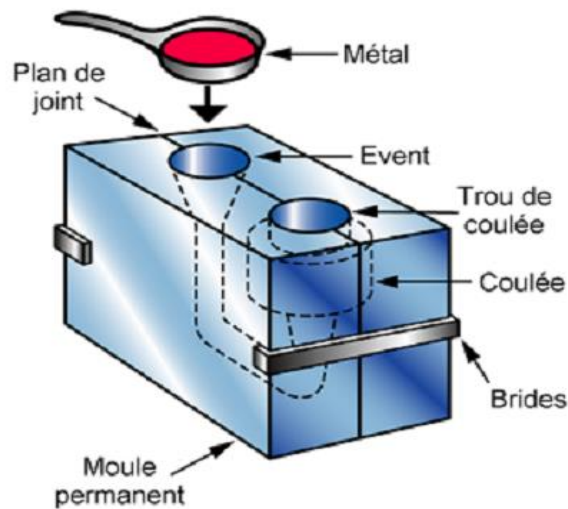


Fig. I.45. Moulage en coquille.

(d) Moulage sous pression

Le métal est injecté sous forte pression dans le moule par l'intermédiaire d'un piston agissant sur le métal liquide versé dans un conteneur (voir Fig. I.36). Les avantages sont nombreux ; citons parmi les plus significatifs :

- Bel aspect des pièces ;
- Très grande précision,
- Réduisant les masses et limitant l'usinage ;
- Possibilité d'inserts ;
- Meilleure étanchéité des pièces (carburateurs en zamak par exemple) ;
- Faibles dépouilles permettant d'économiser la matière, etc.

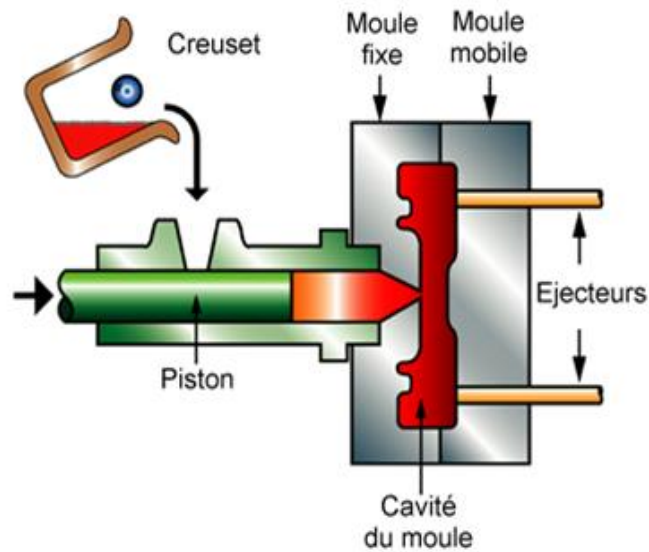


Fig. I.46 Moulage sous pression.

I.2.4. Obtention par assemblage

I.2.4.1 Soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage par fusion des parties des deux pièces en contact. Cette mise en fusion est faite par chauffage, par pression, ou par une combinaison des deux. Le soudage par chauffage est la méthode la plus employée aujourd'hui. Le soudage assure la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques (Fig. I.47).

Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue trois techniques d'assemblages par soudage peuvent être ainsi clairement définies :

- **Le soudage** : opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de natures très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé ;
- **Le brasage** : opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération ;
- **Le soudobrasage** : technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

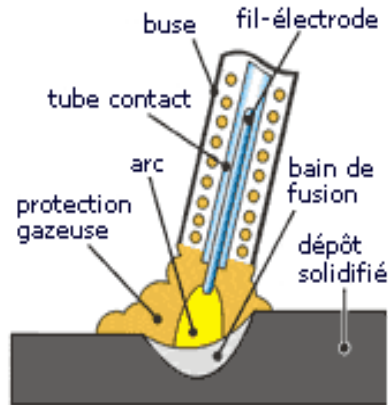


Fig. I.47 Schéma d'assemblage par soudage .

I.2.4.2 Collage

On peut définir le collage comme le procédé permettant de maintenir de façon durable et solide deux substrats entre eux. La liaison entre ces deux supports est alors d'origine chimique, et non mécanique. La colle est déposée sur le ou les substrats, Mais pour obtenir de bonnes performances, la colle doit être compatible avec le support. L'adhésion sur un solide fait ainsi intervenir deux notions principales (fig. I.48):

- L'interaction liquide solide, qui caractérise l'adhésion ;
- Le mouillage, qui caractérise l'étalement du liquide sur le solide.

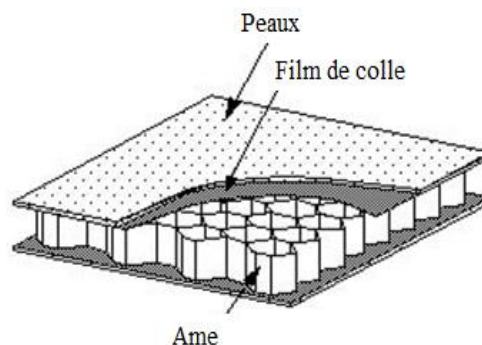


Fig. I.48 Schéma d'assemblage par collage .

I.2.4.3 Rivetage

Le rivetage est un assemblage de pièces à l'aide de rivets. C'est un assemblage définitif, c'est-à-dire non démontable sans destruction de l'attache (voir Fig. I.49). Quoiqu'il existe depuis peu un type de rivet imprimant une empreinte hélicoïdale, lors du montage, dans son logement, permettant ainsi un démontage et un remontage ultérieur sans destruction du rivet.

Un autre procédé beaucoup plus élaboré est le rivetage par fluage radial : ce système est de nos jours le plus fiable des assemblages rivetés.

Les avantages du rivetage par apport aux autres types d'assemblages sont :

- Il n'y a pas de risque de changement de structure de matériau (trempe) comme dans le cas du soudage ;
- Il n'y a pas de retrait ;
- Assemblages rivetés sont faciles et sûres à contrôler et aussi faciles et peu coûteux à réaliser sur chantier, l'assemblage peut être démonté, si besoin, en ôtes les têtes (en détruisant le rivet).

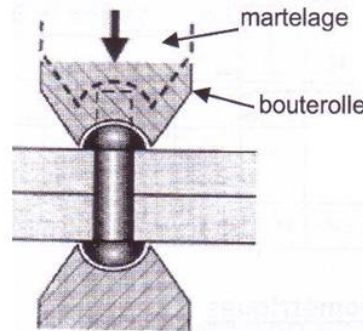


Fig. I.49 Schéma d'assemblage par rivets.

I.2.4.4 Agrafage

L'assemblage par agrafe présente une légère précontrainte et est quasiment étanche aux liquides et à l'air. Le pliage s'effectue en trois étapes : à 30°, 75° et 90°. La structure de la surface ne sera pas endommagée et la machine s'adapte automatiquement aux différentes épaisseurs de tôle. Elle permet de façonner les bords des éléments en tôle. Ensuite une tôle assemblée par agrafage sur bords relevés est placée sur l'agrafe. De la sorte on peut assembler au minimum deux pièces l'une avec l'autre (fig. I.50).



Fig. I.50. Schéma d'une agrafeuse manuelle professionnelle.

I.3. Partie II – Mise en forme par méthodes non -conventionnelles (avancées)

I.3.1.Obtention par Usinages (Très) Grande Vitesse (UGV)

I.3.1.1.Introduction

L'usinage à Grande Vitesse, aussi appelé UGV, est une opération d'enlèvement de matière à des vitesses de coupe élevées à ceux utilisés en usinage conventionnel, ces grandes vitesses engendrant un phénomène de coupe spécifique permettant des gains de qualité et de productivité. L'augmentation de la V_c améliore la qualité. L'augmentation de la V_f améliore la productivité. En règle générale, on estime ces vitesses sur UGV par rapport à celles utilisées sur CUCN :

- $V_c \times 5 \text{ à } 10$
- $V_f \times 10$

Par exemple, lors d'usinage d'acier à des vitesses de coupe de 30 à 200 m/min, on parle d'usinage conventionnel, alors que des vitesses de coupe de 500 à 2000 m/min correspondent au domaine de l'UGV (fig. I.51).

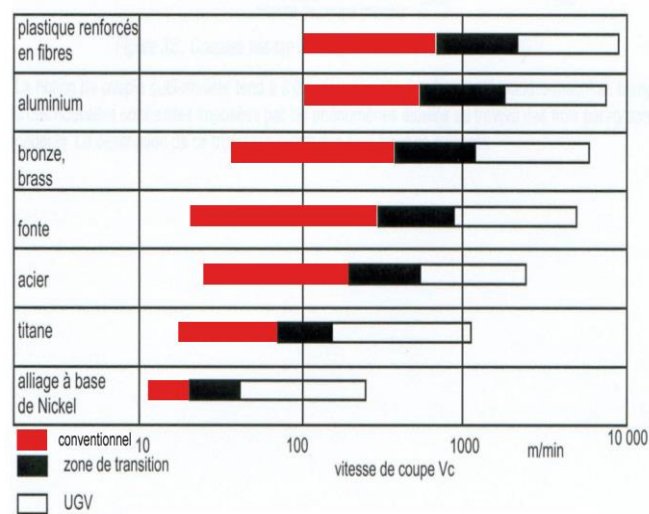


Fig. I.51. Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux.

Cependant, l'intégration de l'usinage à grande vitesse dans un atelier de fabrication impose le respect de certaines contraintes, sans lesquelles le procédé peut devenir dangereux et économiquement peu rentable. Augmenter la vitesse peut paraître simple, mais les mécanismes physiques qui interviennent ne sont plus les mêmes qu'en usinage traditionnel et ils se révèlent relativement complexes. En effet, les paramètres d'usinage ont une réelle influence sur les efforts de coupe, la puissance de la machine, la température atteinte sur la surface usinée et dans l'outil, l'usure des outils, le frottement entre l'outil de coupe et le

copeau et l'intégrité de la surface usinée, entre autres. Pour réaliser des applications en UGV, on a recours à des machines-outils rigides et optimisées pour ce type d'usinage ainsi que des commandes numériques offrant des options et des caractéristiques spécifiques. Il est également nécessaire d'utiliser une méthode de programmation de pointe permettant des trajectoires d'outils optimales et une surépaisseur d'usinage constante pour chaque opération et outil. Il s'agit là d'une condition indispensable pour garantir la sécurité et la qualité du processus d'usinage avec une productivité élevée. Tout l'équipement de production, y compris les outils de coupe et les attachements, doit être spécialement conçu pour l'UGV. Malgré la complexité du procédé et les contraintes liées à sa mise en place, l'usinage à grande vitesse assure des gains importants en performances techniques et économiques.

L'UGV impose donc une augmentation des performances des algorithmes de calcul. Le choix du logiciel de FAO est essentiel car l'utilisation d'un logiciel non adapté peut amener des défauts sur la pièce fabriquée. Un logiciel adapté à l'UGV doit permettre de calculer les trajectoires sur une machine à CN (MICN) en prenant en compte les effets dynamiques, et permettre le choix des stratégies d'usinage adaptées à l'UGV.

I.3.1.2. Caractéristiques de l'UGV

□ Machine

- Rigide et amortie ;
- Broche rapide et puissante ;
- Bâti très stable ;
- Parties mobiles en translation rapides et légères (accélé. De 1g) ;
- CNC de très grande qualité ;
- Montage des outils précis, indéformable et de sécurité ;
- Arrosage très abondant ;
- Evacuation des copeaux adaptée ;
- Sécurité.

□ Outils :

Composites (phase dure + liant) :

- Carbure (Tungstène, Titane) + Nitrure = Cermets.
- Nitrure (titane, silicium, diamant (PKD) bore cubique) + oxydes ;
- Carbure (tungstène, titane) + oxydes = céramiques (blanches, noires, oxydes renforcés).

I.3.1.3. Phénomènes thermiques

Les sollicitations thermiques sont générées lors de la coupe par l'auto-échauffement au sein du matériau de la pièce et par les frottements à l'interface outil/pièce.

En usinage conventionnel, l'énergie calorifique s'évacue dans les copeaux mais également dans la pièce et l'outil dans des proportions non négligeables. Ainsi, le matériau subit un traitement thermique local (trempe superficielle) qui modifie les caractéristiques de la pièce finie. En UGV, la nature de la formation du copeau est différente et l'énergie de la coupe s'évacue à plus de 80% dans les copeaux. Bien que des énergies plus importantes soient mises en jeu, les échanges thermiques entre le copeau et la pièce n'ont plus le temps d'avoir lieu: celle-ci reste pratiquement à température ambiante.

□ Avantage :

Globalement, l'UGV apporte :

- l'obtention d'un excellent état de surface de l'ébauche jusqu'à la finition (souvent sur une même machine) ce qui permet une réduction du temps de polissage de finition,
- une précision dimensionnelle plus grande et une meilleure répétabilité pour la production de séries,
- une meilleure qualité des pièces usinées en termes d'intégrité de surface,
- une réduction des efforts d'usinage,
- l'usinage de matériaux très durs, difficilement usinés auparavant,
- l'usinage de formes complexes et de parois minces,
- l'obtention de copeaux fragmentés, plus simples à évacuer,
- une réduction des délais de fabrication qui se traduit par une augmentation de la productivité,
- Réduction des coûts de production.

□ Gains de productivité

- augmentation du volume unitaire de copeaux.
- usure moindre des outils.
- nouvelle conception des gammes d'usinage.
- forces de coupe plus faibles.
- réduction des coûts et des temps principaux d'usinage.
- évacuation de la chaleur avec le copeau.

□ Inconvénients

Parmi les principaux inconvénients liés à la pratique de l'usinage à grande vitesse on peut signaler :

- Les opérateurs et programmeurs des machines doivent suivre des formations particulières qui diffèrent considérablement de celles nécessaires pour l'usinage conventionnel,
- Une erreur humaine peut avoir des conséquences très significatives sur la machine, du fait des importantes vitesses et des accélérations mises en jeu lors du déplacement des différents composants,
- Des précautions maximales au niveau de la sécurité doivent être adoptées : les machines doivent être dotées de carters résistant à des sollicitations du type impact. De même, les outils et pièces tournantes doivent faire l'objet de contrôles fréquents afin de détecter de possibles défaillances par fatigue.
- Différentes techniques de mise au point,
- Problèmes humains pour valoriser cette technique,
- Coûts d'installation (environ 50 000 à 300 000 €),
- Protection de l'utilisateur contre les risques de bris accidentels d'outils ou d'éjection de plaquettes ; évacuation des copeaux,
- Surveillance continue de la broche, des outils et de la machine.

I.3.2. Obtention par Électroérosion

- La pièce à usiné et l'électrode sont plongées dans un liquide diélectrique qui circule en permanence ;
- Un générateur à impulsion fournit les décharges électriques dont la durée et la tension sont réglées en fonction du matériau de la pièce qui est relié à l'anode et l'outil qui relie à la cathode ;
- A chaque impulsion il se produit une décharge électrique entre la pièce et l'outil qui provoque l'érosion de la pièce pour environ 99% et de l'outil pour environ 1%.
- L'électrode a la forme complémentaire de la forme à réaliser ;
- Les particules du métal brûlé sont entraînées par le liquide diélectrique.

I.3.2.1. Usinage en plongée (Enfonçage)

L'électroérosion met en œuvre l'énergie électrique pour enlever du métal de la surface d'une pièce, sans établir de contact avec cette pièce. Un courant électrique de haute fréquence

est appliqué entre l'électrode de l'outil et la pièce, créant des étincelles qui franchissent l'intervalle et vaporisent de petites zones de la pièce (fig. I.52).

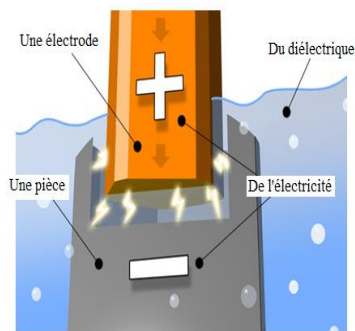


Fig. I.52 Principe de fonctionnement électroérosion (Enfonçage).

I.3.2.2. Usinage par découpage à fil

L'électroérosion à fil est une autre variante très répandue. Elle consiste à utiliser comme électrode-outil un fil métallique généralement en cuivre ou bien alliage de cuivre zinc « laiton » parfaitement calibré (0.05 à 0.35) en circulation continue. Un jet de liquide diélectrique (eau dé-ionisée) permet d'enlever les débris d'usinage entre le fil et le bloc de matière à usiner. Un mouvement du fil par rapport à la pièce permet de modifier l'angle d'attaque et d'usiner des formes réglées variées. La manipulation du fil se fait à l'aide d'un système multiaxial complexe permettant d'orienter le fil de découpe pour obtenir des pièces complexes 3D (Fig. I.53). Cette technique est très utilisée pour l'obtention de micro-pièces de haute précision ainsi que pour l'élaboration des micro-outils que nous retrouvons sur les machines de fraisage ou de perçage.

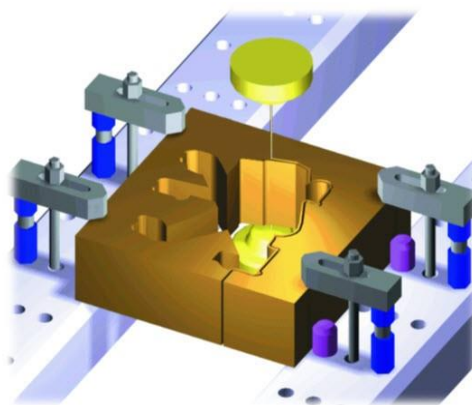


Fig. I.53. Principe de fonctionnement électroérosion (Robot- fil).

□ **Avantage**

- Usinage possible de matériaux trempés et durs, impossibles à usiner avec les procédés par enlèvement de copeaux ;
- Usinage de formes tridimensionnelles « démoulables » (l'outil pénètre dans la pièce et y laisse sa forme complémentaire) et hélicoïdales (en donnant à l'outil un mouvement de rotation conjuguée avec son mouvement de translation) ;
- Bons états de surface ($R_a \gg 2 \text{ mm}$) et précision ($\gg 20\text{mm}$).
- Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, précises et saines, qui peuvent être utilisées à l'état brut ;
- La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants ;

□ **Inconvénients**

- Ce procédé ne s'applique qu'aux matières conductrices de l'électricité ;
- Coût du matériel (spécifique à chaque forme de pièce à obtenir) et usure de l'outil électrode ;
- La porosité naturelle peut devenir un inconvénient dans le cas de problèmes d'étanchéité par exemple ;
- Le principe de la compression conduit à des pièces non homogènes (porosité plus élevée au milieu), et dont les qualités de résistance mécanique sont faibles pour les métaux frittés.

I.3.3. Obtention par frittage

Une poudre (ou un mélange de poudre), généralement métallique, est comprimée dans un moule, puis chauffée dans un four à vide (ou à atmosphère contrôlée) à une température inférieure à la température de fusion du principal constituant (fig. I.54).

La métallurgie des poudres se décompose en deux étapes :

- **Etape 1 :** Le pressage ou la compaction des poudres, puis le frittage ou une consolidation à haute température.
- **Etape 2 :** La poudre de base est d'abord mélangée avec des poudres d'alliages (et un lubrifiant). La mise en forme à froid est effectuée par une presse de 100 à 10000 tonnes suivant la pièce finale. Par ce système, on obtient directement une pièce formée sans usinage (pièce finie).

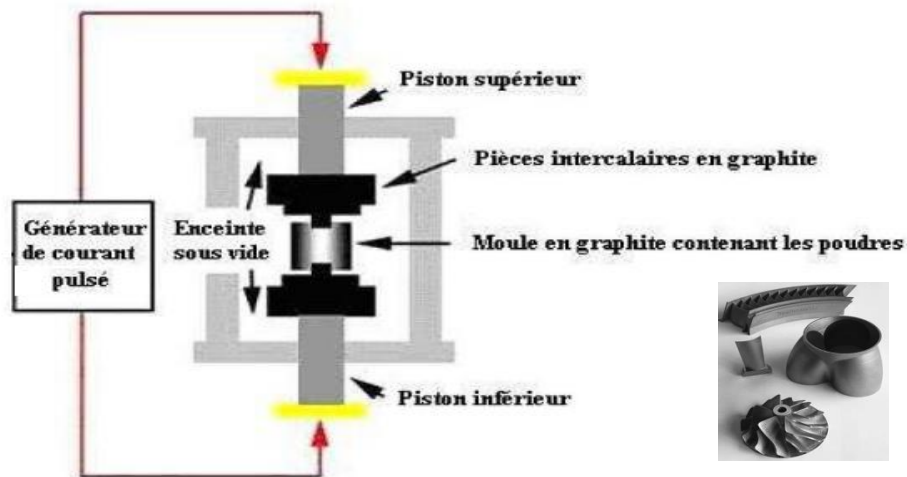


Fig. I.54 Schéma d'élaboration par frittage.

Le frittage ou la consolidation est réalisé dans un four à une température proche de la fusion du métal. Il est souvent réalisé sous vide ou sous atmosphère protectrice pour éviter l'oxydation par l'oxygène de l'air. Il existe également une méthode de frittage par laser (prototypage rapide). Dans ce cas, on applique sur une surface plate une mince couche de poudre de métal mélangée à un liant (fig. I.55). Les lasers, dont la précision n'est plus à démontrer délimitent la pièce et solidifient la poudre. Une autre couche de poudre est ensuite appliquée jusqu'à l'obtention de la pièce finale. Cette technique permet notamment de former des cavités avec une bonne précision. Au final, la pièce est "agitée" pour éliminer les poudres non agglomérées. Il faut tenir compte également de la porosité résiduelle, de l'ordre de 5 à 10% en fonction des alliages utilisés. Cette porosité est parfois volontaire notamment pour la fabrication de filtres, mais éliminée au maximum dans certaines productions nécessitant un matériau dur (Carbure de tungstène).



Fig. I.55 Plaquette de coupe amovible pour outil d'usinage en céramique frittée.

□ **Avantage :**

- Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, précises et saines, qui peuvent être utilisées à l'état brut.

- La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants.
- Autorise l'obtention de nouveaux alliages.

□ **Inconvénients :**

- La porosité naturelle peut devenir un inconvénient dans le cas de problèmes d'étanchéité par exemple ;
- Le principe de la compression conduit à des pièces non homogènes (porosité plus élevée au milieu), et dont les qualités de résistance mécanique sont faibles pour les métaux frittés.

I.3.4 Obtention par Découpage

Le découpage est un procédé de fabrication de pièces. C'est une sorte de cisailage sur un contour fermé. Une différence est faite sur les termes :

- Découpage, afin d'obtenir un pourtour défini selon une forme et des cotes précises ;
- Poinçonnage, afin d'ajouter une pièce (exemple : une perforation).

Le poinçon poinçonne la plaque (tôle, papier, carton, mousse, etc.) et une pièce découpée est obtenue (fig. I.56).

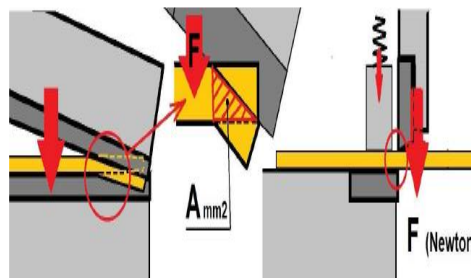


Fig. I.56 Presse hydraulique à découper.

I.3.4.1. Découpage laser

Ce procédé permet une découpe précise, nette et rapide de nombreux matériaux jusqu'à 25 mm. La découpe se fait sans effort sur la pièce et la zone affectée thermiquement (ZAT) est assez faible (de l'ordre de 0,5 mm sur les métaux) ce qui permet d'avoir des pièces très peu déformées. La réalisation de trou est facile mais leur diamètre doit être au moins égal à l'épaisseur de la tôle quand cette tôle est supérieure à 10 mm. Souvent, il est aussi possible de graver (texte, etc.) avec la même machine. La découpe s'effectue sur des plaques de matière ce qui donne généralement des objets plats une fois découpés. Certains matériaux, comme l'argent, ou le cuivre, sont toutefois plus difficiles à découper au laser à cause de leur fort

pouvoir réfléchissant, dans ce cas, mieux vaut utiliser la découpe par jet d'eau haute pression (fig. I.57).

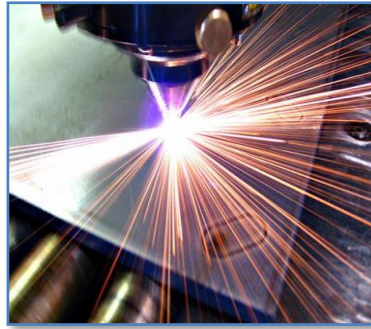


Fig. I.57 Machine de découpe laser.

I.3.4.2. Découpage jet d'eau

L'eau, ou plus exactement le fluide, peut contenir des additifs, notamment pour faciliter la coupe du matériau. La découpe au jet d'eau additionnée d'abrasif, permet la découpe de métaux, pierres, marbres, verre dans des épaisseurs allant jusqu'à 600 millimètres.

On distingue deux techniques de découpage (fig. I.58) :

- La découpe à l'eau pure (tous les matériaux se coupant au cutter) ; buse de coupe de 0,08 mm à 0,30 mm ;
- La découpe à l'eau chargée d'abrasif (tout matériaux) ; l'eau passe par la buse, on y adjoint le sable, l'eau et le sable passent par le canon de focalisation qui assure une cylindricité du mélange ; buse de coupe de 0,20 mm à 0,40 mm ;
- Un seul matériau ne peut être découpé au jet d'eau : le verre trempé, qui casse dès les premiers millimètres de découpe à cause des trop fortes contraintes présentes dans le matériau ;
- L'eau sous très haute pression (jusqu'à 6150 bars) sort de la buse de découpe.



Fig. I.58. Découpage par jet d'eau.

I.3.4.3. Découpage plasma

Le découpage plasma diffère par les mélanges gazeux utilisés. Le jet de plasma est généré par l'arc électrique qui s'établit entre une électrode intérieure à la torche de coupage et la pièce. Le mélange gazeux ionisé à la sortie de la tuyère forme le plasma. Le pouvoir calorifique du jet (environ 18 000 °C) provoque une fusion quasi instantanée qui se propage dans toute l'épaisseur de la pièce. Le découpage plasma est principalement utilisé par les entreprises du secteur de la Métallerie. Il permet la découpe de tôles en métal sur des épaisseurs de 0 à 160 mm avec une précision de plus ou moins 0,2 mm (fig. I.59).



Fig. I.59 Découpage plasma réalisé par un robot industriel.

Sur une machine de découpe plasma, la température extrêmement élevée fait fondre instantanément le métal tandis que le gaz sous pression chasse au fur et à mesure les gouttelettes de métal en fusion. L'usage de la torche de découpage au plasma doit se faire impérativement dans des locaux spécialement ventilés ou en plein air à cause de dégagement de gaz toxiques générés par les très hautes températures de travail. Certains systèmes de découpe au plasma comprennent un apport d'eau sous forme d'un jet calibré qui, jaillissant de la torche plasma, permet de refroidir le métal sitôt après sa découpe plasma, évitant également le dégagement de ces gaz toxiques.

I.3.5. Usinage photochimique

L'usinage chimique est une technologie qui permet d'obtenir des pièces découpées et/ou gravées, très précises et sans bavure, dans du métal. La découpe photochimique présente avantages considérables comparés aux autres technologies présentes sur les marchés tels que la découpe mécanique, l'étampage, l'électroérosion à fil ou la découpe laser. Les deux éléments principaux du procédé d'usinage photochimique sont les solutions d'attaques chimiques et les résines photosensibles (ou photorésist) (fig. I.60).



Fig. I.60 Pièces réalisées par usinage photochimique.

I.3.5.1. Principe

Les deux éléments principaux du procédé d'usinage photochimique sont les solutions d'attaques chimiques et les résines photosensibles (ou photorésist). De manière simplifiée, cette méthode de fabrication peut être décomposée en quatre phases :

- La préparation de surface qui consiste à optimiser la surface du matériel afin d'obtenir la meilleure adhérence avec le photorésist.
- L'opération de photolithographie.
- La phase de gravure chimique.
- Le strippage qui consiste à retirer le photorésist et assurer le nettoyage final des pièces.

I.3.5.2. Objectifs

L'usinage photochimique permet la fabrication de pièces dans quasiment tous les métaux mais également dans certains matériaux comme par exemple le verre ou le polyimide. Mais ce sont les aciers inoxydables, les métaux ferreux et les métaux cuivreux qui représentent la majorité des productions en usinage photochimique. On utilise, principalement dans l'industrie, des panneaux de quelques microns à 2mm d'épaisseur. Appliquée à des matériaux de faibles épaisseurs (inférieures à 0.1mm) et combinée à la précision de la photolithographie, cette méthode assure la production de pièces avec des formes géométriques très complexes et aux tolérances serrées. Généralement, les tolérances données pour des pièces en usinage photochimique sont de +/- 10% de l'épaisseur du matériel usiné.

I.3.5.3. Avantages de l'usinage photochimique :

- Pratiquement tous les métaux peuvent être usinés ;
- Pas de bavure ;
- Haute précision ;

- Pas de modification des propriétés physiques du matériel de base ;
- Possibilité de géométrie très complexe ;
- Le procédé peut être utilisé pour des feuilles de métal allant de 0.01mm à 2mm ;
- Réalisation de pièces en vrac (sans attache) ;
- Réalisation de l'outillage rapide et peu coûteux ;
- Découpe et gravure en un seul procédé.

I.3.5.4. Secteurs d'activités (fig. I.61)

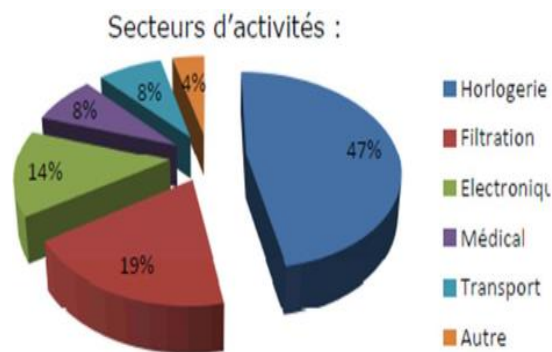


Fig. I.61. Illustration des secteurs d'activités

Chapitre II:
Etude et conception des outils
De fraisage.

II.1 Introduction

L'usinage par enlèvement de matière consiste à réduire progressivement les dimensions et le poids de la pièce par enlèvement du métal à froid et sans déformation en utilisant un outil. La quantité de matière enlevée est dite copeaux et l'instrument avec lequel est enlevée la matière est appelé outil de coupe. L'opérateur utilise des machines dites machines-outils pour réaliser l'usinage d'une pièce. Dans ce chapitre nous présentons généralité sur le fraisage, qui contient les techniques de fraisage et des définitions, les conditions de coupe et la géométrie d'outil.

II.2 Définition

Le fraisage est dans son principe un procédé de fabrication faisant intervenir simultanément, le mouvement de rotation d'un outil possédant une ou plusieurs arêtes de coupe (mouvement de coupe) et la combinaison de translations rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance). Aujourd'hui, toutefois, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction. L'outil de fraisage (fraise), comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux. Les avantages du fraisage sont un rendement élevé, un bon fini de surface et une haute précision, ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des gorges, mais son efficacité en contournage va croissante grâce à l'utilisation des techniques CNC.

II.3 Principe

Les fraises peuvent présenter des arêtes tranchantes soit sur leur surface latérale, soit en bout, soit latéralement et en bout simultanément les fraises peuvent donc produire des :

- surfaces planes parallèles à leur axe ;
- surfaces planes obliques à l'axe de rotation ;
- surfaces perpendiculaires à l'axe de la fraise ;
- surfaces quelconques de forme indifféremment positionnées par rapport à l'axe.

Sur toutes les fraiseuses, la production de ces différentes surfaces est réalisée grâce à la rotation de la fraise et l'avance de la pièce.

Ces différentes possibilités font apparaître deux grands principes de fraisage :

- (1) **Fraisage de face** ou fraisage en bout, l'axe de rotation de l'outil est perpendiculaire au plan raies voir (Fig. II.1).

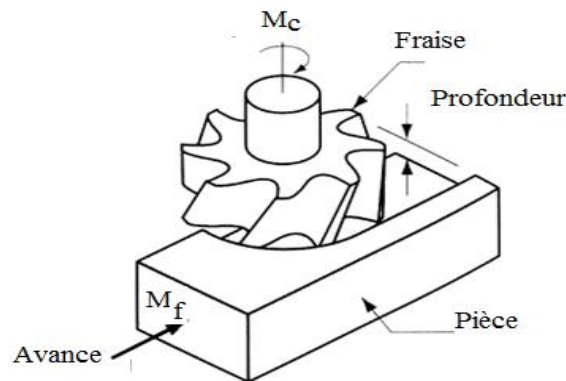


Fig. II.1. Principes de fraisage de face(en bout).

On distingue les points suivant :

- Série de courbes sécantes appelées cycloïde (traces laissées par les dents de la fraise sur la pièce) ;
- Bonnes conditions de coupe (état de surface bon).

- (2) **Fraisage de profil** ou fraisages en roulant, l'axe de rotation de la fraise est parallèle à la surface usinée (Fig. II.2).

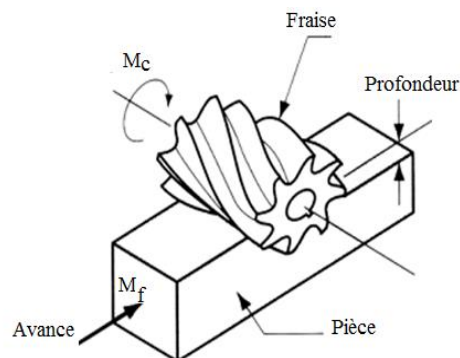


Fig. II.2. Principes de fraisage de profil.

On distingue les points suivant :

- Série d'ondulations (traces laissées par les dents de la fraise sur la pièce) ;
- Chaque dent de la fraise taille un copeau d'épaisseur soit croissant, soit décroissant ;
- État de surface moins bon.

II.4. Modes de coupe

La fraise effectue un mouvement de rotation tandis que la pièce avance dans sa direction. La coupe est donc ainsi définie par les paramètres impliqués. Il existe deux manières de procéder, selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce. Cette différence joue un rôle fondamental et affecte le processus de fraisage sous divers aspects. La pièce peut avancer, selon le cas, dans le sens de la rotation ou dans le sens opposé, ce qui a tout spécialement son importance en début et en fin de coupe.

II.4.1 Fraisage en opposition

Le mouvement d'avance de la pièce à fraiser est opposé au sens de rotation de la fraise. Cette dernière attaque le copeau au point d'épaisseur minimal. Dans ce cas, les dents glissent sur la surface usinée avant rotation de la fraise. Cette façon de faire provoque un grand frottement d'où une usure plus rapide des tranchants de la fraise. De plus, l'effort de coupe en fraisage horizontal tend à soulever la pièce à usiner. Les copeaux peuvent également être entraînés par la fraise et se coincer entre la pièce et les arêtes de coupe, endommageant la pièce et la fraise (Fig. II.3).

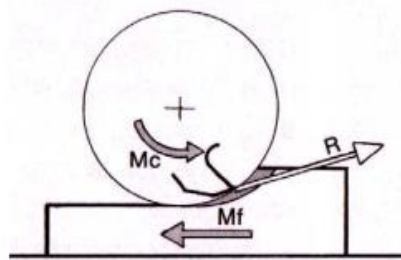


Fig. II.3. Fraisage en opposition.

II.4.2 Fraisage en concordance ou fraisage (en avalant)

Le sens de rotation de la fraise et celui du déplacement de la pièce à fraiser vont dans la même direction. Les tranchants de la fraise attaquent le copeau au point d'épaisseur maximal. Cette façon de faire, en fraisage horizontal, plaque la pièce sur la table de la fraiseuse et donne des surfaces finies de bonne qualité. Ce principe nécessite l'utilisation d'une machine robuste disposant d'une table équipée d'un système de translation avec rattrapage de jeu, ce qui est le cas sur les machines modernes. Ainsi on évite que la pièce soit "tirée" dans la fraise (Fig. II.4).

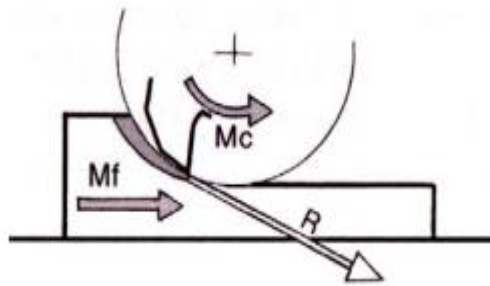


Fig. II.4 Fraisage en avalant.

II.4.3. Fraisage hémisphérique

Une fraise à bout hémisphérique aussi appelée fraise sphérique (Fig. II.5), a une demi sphère au bout de l'outil. Les fraises à bout hémisphérique sont beaucoup utilisées dans l'usinage moules, et des pièces avec des surfaces complexes. Une fraise à bout hémisphérique aussi appelée fraise sphérique, a une demi sphère au dans l'automobile, l'aérospatial et la défense. Le diamètre effectif est affecté par deux paramètres : rayon de l'outil et la profondeur de coupe axiale.

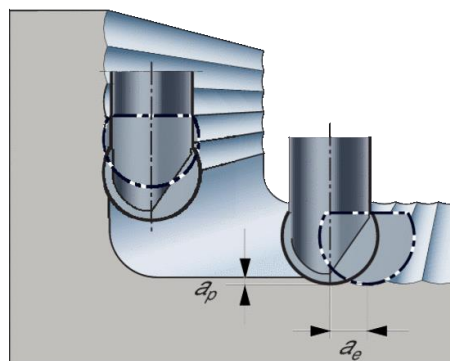


Fig. II.5. Fraise à bout sphérique (Hémisphérique).

II.5. Machines – outils de fraisage

Les fraiseuses ont supplanté certaines machines (raboteuses, étaux limeurs) pour l'usinage de surfaces planes. Ces machines (Fig. II.6) peuvent également servir pour des opérations de contournage. L'outil, une fraise, est fixé dans la broche et est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe). Il peut se déplacer en translation par rapport à la pièce suivant trois directions.



Fig. II.6 Fraiseuse universelle.

II.5.1. Classification des machines de fraisage

En général, la classification normalisée n'est pas respectée dans les dénominations commerciales. Compte tenu de la grande variété de modèles, plusieurs critères sont nécessaires pour caractériser une machine et ceux qui sont le plus souvent utilisés par les constructeurs sont indiqués ci-dessous. Nous attirons cependant l'attention du lecteur sur le manque de rigueur des dénominations commerciales par.

- Position de la broche (à broche horizontale, verticale, orientable) ;
- Type de commande (commande manuelle, numérique (CN) ;
- Dimensions (par la course de déplacement sur l'axe X, par la course de déplacement sur les trois axes principaux X, Y, Z) ;
- Architecture (à console, à banc, à table croisée, à table inclinable à montant mobile, à portique fixe, à portique mobile).

II.6. Type de montage

Actuellement en production, il existe trois types de montage :

(a) Etau

On l'utilise pour les pièces prismatiques. Ce porte-pièce est composé de 2 mors. Le mors fixe est lié au bâti. Le mors mobile, en liaison glissière avec le bâti permet le serrage de la pièce. La pièce est donc placée entre les deux mors de l'étau. En fonction de la morphologie de la pièce, il peut être nécessaire de placer des cales pour surélever les surfaces à usiner (Fig. II.7).

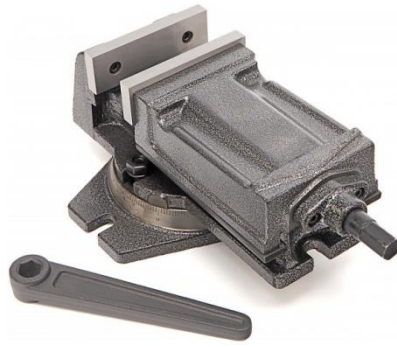


Fig. II.7. Étau.

(b) Plaque support pour fraiseuse

Elle permet de fixer les pièces minces grâce aux trous taraudés M8 situés tous les 30mm. La plaque est ensuite mise en position dans l'étau de la fraiseuse pour l'usinage. Plaque : 250x150 (8 trous x 5 trous), trous distants de 30 mm et taraudés M8 (Fig. II.8).



Fig. II.8. Schéma d'une plaque support.

(c) Mandrin

On l'utilise pour les pièces de formes extérieures cylindriques. Cela permet de monter des pièces cylindriques sur une fraiseuse pour usiner des poches, ou des trous de passage pour les vis (4 trous à 120°) (Fig. II.9).

Diamètre maxi :

- Avec mors normal = 120 mm ;
- Avec mors grand = 220 mm ;
- Le mandrin dédié au perçage sur une machine conventionnelle.

On l'utilise pour les pièces de formes extérieures cylindriques. On usine une succession de trous situés sur un espace d'un angle constant (multiple de 45° ou 60°).

Diamètre maxi : avec mors normal = 080m.



Fig. II.9. Mandrin.

II.7. Techniques de fraisage

II.7.1. Surfaçage

Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise (Fig. II.10).



Fig. II.10. Opération de surfaçage.

II.7.2. Plans épaulés

C'est l'association de deux plans perpendiculaires. (Surfaces vertes) (Fig. II.11).

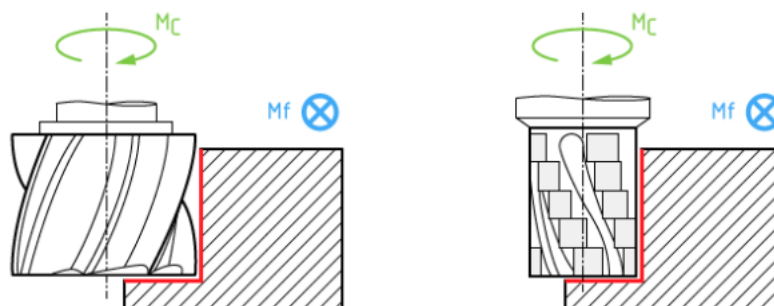


Fig. II.11. Fraisage d'épaulements.

II.7.3. Rainure

C'est l'association de trois plans. Le fond est perpendiculaire au deux autres plans (Fig. II.12).

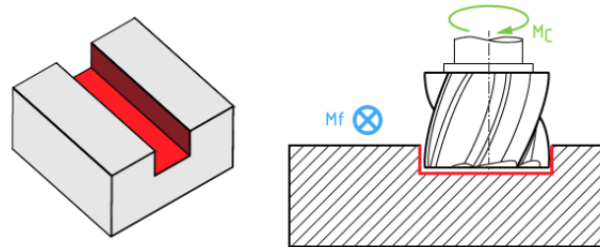


Fig. II.12. Fraisage de rainures.

II.7.4. Poche

La poche est délimitée par des surfaces verticales quelconques (cylindre et plan). C'est une forme creuse dans la pièce (Fig. II.13).

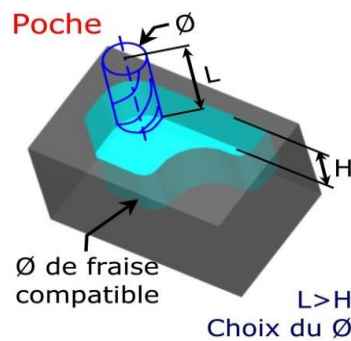


Fig. II.13. Schéma d'élargissement d'une cavité / poche.

II.7.5. Perçage

Ce sont des trous. Ils sont débouchant (surface bleu) ou Borgnes. (Surface jaune) (Fig. II.14).

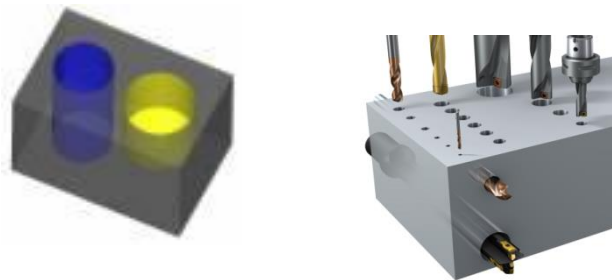


Fig. II.14. Opération de perçage.

II.7.6. Filetage

Le filetage à la fraise est une bonne alternative au taraudage pour les pièces qui ne peuvent pas être mises en rotation. Il peut aussi être utile comme alternative au filetage au tour (Fig. II.15).

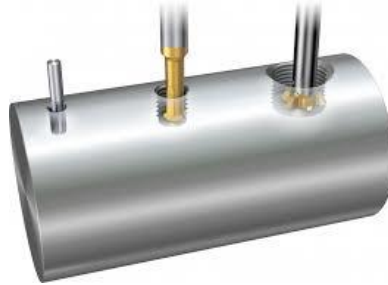


Fig. II.15. Opération de filetage.

II.8. Outil de coupe

Les outils de coupe généralement actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée et d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe (Fig. II.16). Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance.

Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants:

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

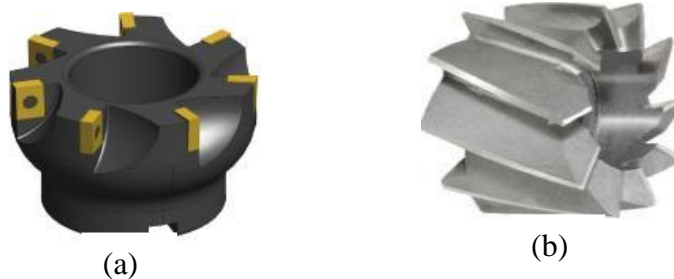


Fig. II.16. Types de fraise, a) à plaquette en carbure amovibles, b) en acier rapide (ARS).

II.9. Paramètres de coupe

Les paramètres de coupe sont des grandeurs primordiales lors de l'usinage. Ces paramètres conditionnent les phénomènes physiques rencontrés lors de la coupe. Leur choix est directement lié à l'intégrité de l'outil et à la qualité géométrique de la surface usinée tout en assurant une production optimale à moindre coût. Le mouvement de coupe anime l'outil (fraise tournante). Le mouvement d'avance est un mouvement de translation de l'outil (Fig. II.17).

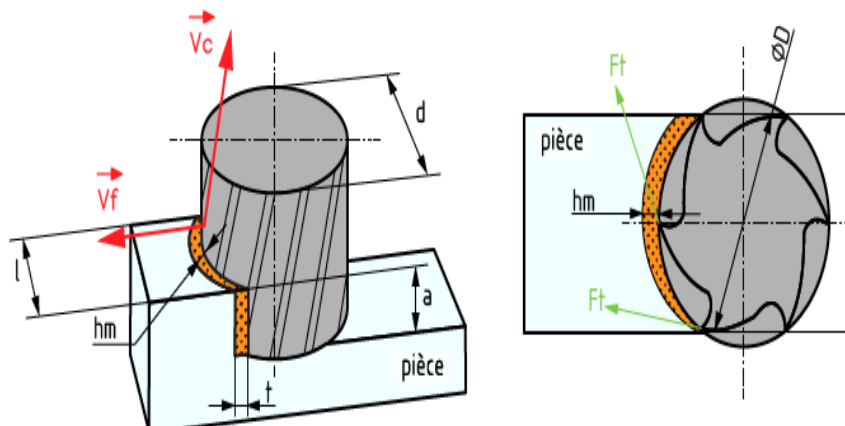
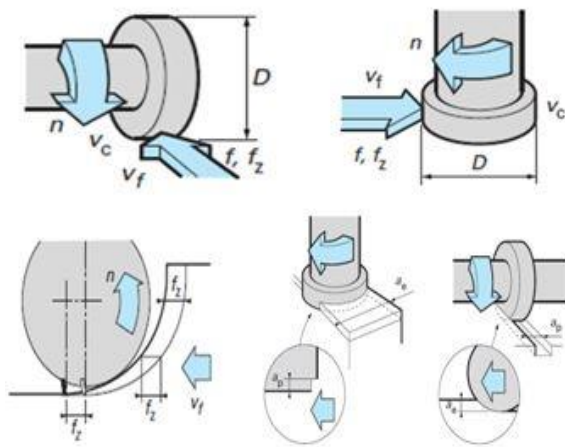


Fig. II.17. Illustration des paramètres de coupe.

II.10. Paramètres géométriques de coupe

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée profondeur de passe a . Cependant, afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil de coupe. La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires) est appelée surépaisseur d'usinage. On appelle la coupe la couche de matière qui est enlevée par une action unique de la partie active et transformée en copeaux. Ces différents paramètres sont illustrés à la figure II.18.



- n : vitesse de broche (tr/min) ;
- v_c : vitesse de coupe (m/min) ;
- D : diamètre de l'outil (m) ;
- v_f : avance par minute (mm/min) ;
- f : avance par tour (mm/tr) ;
- f_z : avance par dent (mm/dent) ;
- a_p : la profondeur de coupe axiale (surfaçage) ;
- a_e : la profondeur de coupe radiale (épaulement) ;
- a_e : la largeur de coupe radiale (surfaçage) ;
- a_p : la largeur de coupe radiale (épaulement) ;

Fig. II.18 Paramètres géométriques de coupe.

II.11. Éléments d'outil

Il existe une grande diversité d'outils de coupe. Toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables. Ainsi, afin de simplifier la compréhension de différents éléments définissant un outil quelconque, nous nous baserons sur un outil de coupe en fraisage. Les définitions peuvent ensuite être déduites pour tout autre type d'outil.

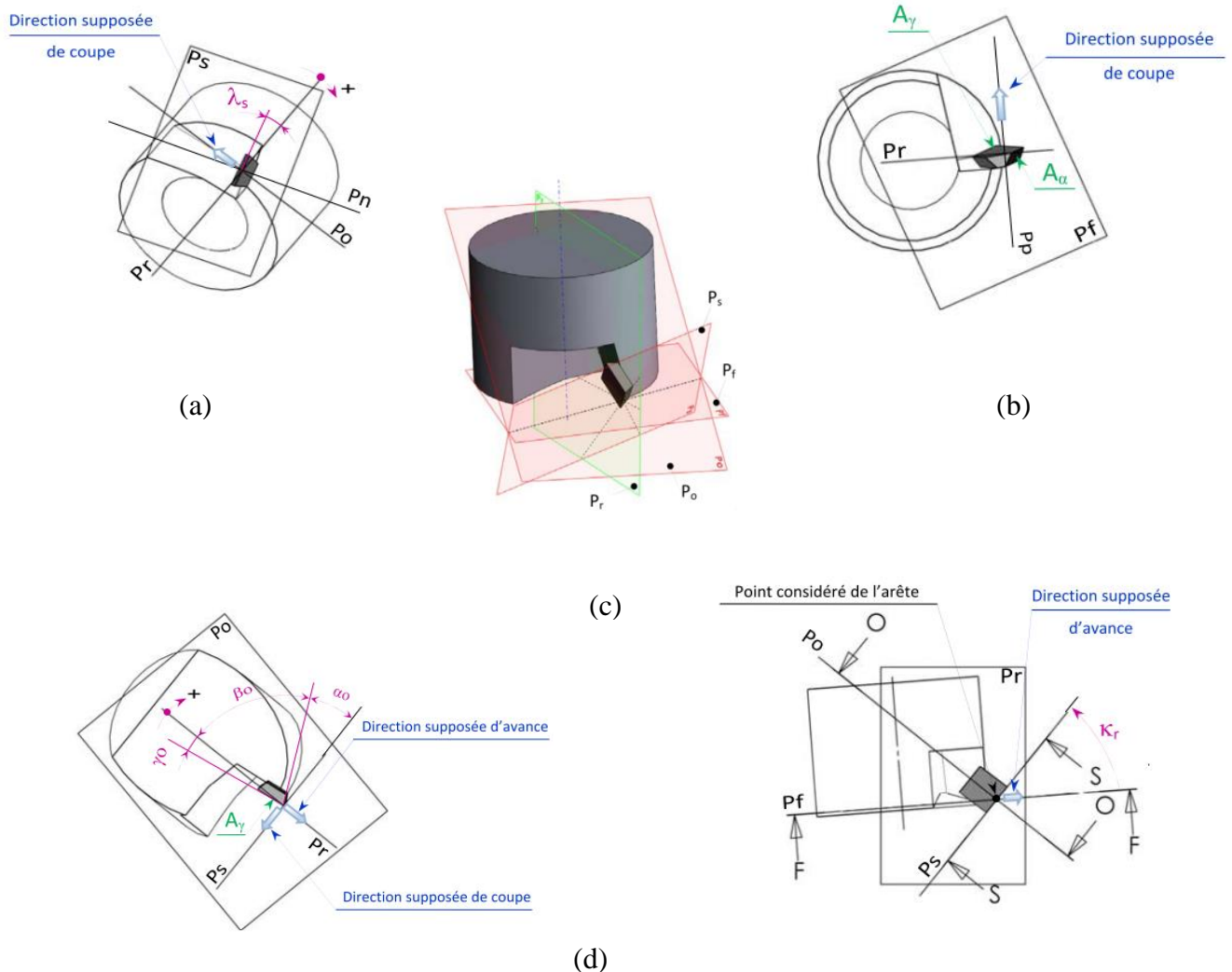
II.11.1. Faces et arêtes d'outil

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil et une parties actives, La partie active peut être constituée du même matériau que le corps, on parle alors d'outils monoblocs (carbures et aciers rapides) ou d'un matériau différent (inserts rapportés ou plaquettes pour les carbures, les cermets, les céramiques, les poly-cristallins de bore ou de diamant). La (Fig II.15) précise le vocabulaire relatif aux différentes parties actives d'un outil de fraisage.

Les différents plans et angles de l'outil sont définis par rapport au plan de référence. Deux systèmes peuvent être définis : l'outil en main et l'outil en travail. Ces deux systèmes permettent respectivement de définir la position de l'arête de coupe lorsque l'outil est au repos ou lorsqu'il usine. L'orientation, dans la configuration outil en main, de l'arête de l'outil de coupe, de la face de coupe (A_γ) et de la face de dépouille (A_α) (Fig II.16) est définie par l'expression de différents angles caractéristiques. Pour définir ces angles, des plans de références (Pr , Ps , Po , Pf , Pp , Pn) doivent être introduits (fig II.19).

Les angles positionnant l'arête de coupe sont donc définis grâce à ces différents plans. L'angle de direction d'arête de l'outil K_r est l'angle projeté dans dans le plan Pr entre l'arête de coupe et la direction d'avance, définit par la direction de la vitesse d'avance.

L'angle d'inclinaison d'arête de l'outil λ_s est l'angle dans le plan P_s entre l'arête de coupe le plan de référence de l'outil P_r (Fig. II.20).



- (a) Vue dans le plan d'arête de l'outil, P_s ;
- (b) Vue dans le plan de travail de l'outil, P_f ;
- (c) Vue dans le plan de référence de l'outil, P_r ;
- (d) Vue dans le plan orthogonal de l'outil, P_o .

Fig. II.19. Illustration des plans et angles en main d'une fraise.

Les caractéristiques géométriques de la partie active de l'outil de coupe sont définies dans le plan orthogonal P_o par trois angles :

- **Angle de coupe γ_o** entre la face de coupe (A_γ) et le plan de référence P_r ;
- **Angle de taillant β_o** entre la face de coupe (A_γ) et la face de dépouille (A_α) ;

- **Angle de dépouille principal α_o** , entre la face de dépouille (A_α) et le plan perpendiculaire au plan de référence P_r .

La somme de ces trois angles est égale à 90° .

Lorsque l'on considère l'outil en travail, le plan de référence est défini par rapport à la cinématique de la coupe.

Le plan de référence en travail, P_{re} est défini perpendiculaire à la direction de la vitesse résultante de coupe \vec{v}_c au point P (fig.II.19).

La vitesse effective de coupe instantanée est la composition à tout instant de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance (équation (II.1)).

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f \quad (\text{II.1})$$

La vitesse effective présente une inclinaison d'un angle δ résultant de la composition des vitesses. Ainsi, la géométrie de l'arête de coupe peut être définie lorsque l'outil est en travail ; Des plans et angles dont la définition et la position sont semblables peuvent alors être définis.

Le plan d'arête en travail P_{se} est tangent à l'arête et perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} au point P. Ce plan contient la direction de la vitesse résultante de coupe, \vec{v}_c . Le plan de travail, P_{fe} , contient la direction de la vitesse d'avance et la direction de la vitesse de coupe au point considéré de l'arête.

Ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} . Le plan vers l'arrière en travail, P_{pe} , est perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} et au plan de travail P_{fe} , au point P. Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90° .

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (\text{II.2})$$

Dans le cas où la somme est supérieure à 90° , on parle de coupe négative (γ négatif)

II.11.2. Outil de coupe à plaquette rapportée

Les outils de coupe généralement actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe voir la (Fig II.20). Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a

atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance. Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants :

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



Fig. II.20. Schéma des plaquettes.

II.12. Matériaux de l'outil

La partie active des outils de coupe et donc les matériaux servant à leur constitution doivent posséder certaines propriétés:

- Une bonne résistance mécanique au frottement - résistance à l'usure ;
- Une bonne résistance aux chocs – ténacité ;
- Une bonne résistance à la pénétration – dureté ;
- Une bonne résistance à la chaleur - garder ces propriétés à haute température (par exemple dureté à chaud) ;
- Une bonne résistance à la pression ;
- Une grande stabilité chimique vis-à-vis du matériau usiné et de l'atmosphère environnante (air, liquide de coupe, etc.....).
- Une faible adhésion avec le matériau usiné sous haute pression et haute température.
- Un bas prix d'achat et de mise en forme, ainsi que l'abondance des éléments de composition.

Le diagramme (fig. II.21) est donné à titre indicatif pour situer les différents domaines des matériaux à outil. Il est représentatif des conditions normales d'utilisation de ces outils, en

ébauche, pour les aciers et les fontes. Il ne peut être utilisé pour choisir les conditions de coupe. Il existe cinq grandes classes de matériaux utilisés comme outil de coupe soit :

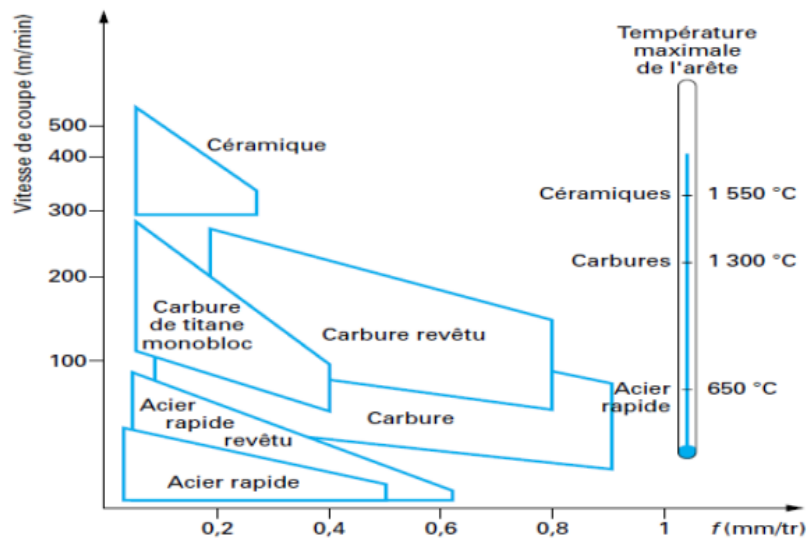


Fig. II.21. Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant.

II.12.1. Aciers rapides (ARS)

Ce sont des alliages d'acier composés de tungstène ou de molybdène. Une trempe leur permet d'obtenir une très grande dureté qu'ils maintiennent jusqu'à une température de 600°C.

II.12.2. Carbures métalliques

Les outils en carbures métalliques sont composés de particules dures agglomérées par un liant. Les particules dures sont généralement des carbures de tungstène, de titane, de tantale ou de niobium. Les outils en carbures métalliques possèdent une dureté très supérieure aux outils en acier rapide et maintiennent cette dureté jusqu'à une température de 1000°C. Ils sont très employés dans l'industrie.

II.12.3. Céramiques

Les outils en céramiques sont généralement composés à base d'alumine ou de nitrure de silicium. Ils ont une très bonne dureté se traduisant par une bonne résistance à l'usure, mais une faible résistance aux chocs. Ils maintiennent leurs propriétés jusqu'à 800°C.

II.12.4. Nitrure de bore cubique

Le nitrure de bore cubique est très dur et garde cette dureté jusqu'à des températures de 2000°C. Il est très résistant à l'usure, stable chimiquement, mais relativement fragile. Il est très coûteux et utilisé uniquement que pour les matériaux non usinables par d'autres matériaux de coupe.

II.12.5. Diamant

Le diamant est le matériau le plus dur connu. Il est recommandé pour la finition et la semi-finition des métaux non ferreux (Aluminium, Cuivre, Plomb) et pour les matières non métalliques telles que le graphite .

II.13. Principe de la coupe des métaux

La coupe du métal s'effectue lorsqu'un outil dur et acéré est introduit dans un matériau plus souple. Les forces qu'engendre cette interférence créent une zone de cisaillement qui détache une petite quantité de métal, appelé copeau, de la pièce de base. On peut voir à la figure ci-dessous (Fig II.22), l'interface de la géométrie outil/copeau/pièce lors de la formation d'un copeau. On peut voir trois zones principales soit :

- **Zone de cisaillement (I) :** Dans cette zone, les contraintes appliquées par l'outil réorientent les grains du métal selon le plan de cisaillement. Par la suite le cisaillement sépare le copeau de la pièce de base. L'angle du plan de cisaillement dépend de différentes géométries à l'interface de coupe, mais aussi du matériau de l'outil et du matériau usiné. La déformation plastique au sein de cette zone consomme une grande partie de l'énergie de coupe. Pour cette raison, beaucoup de chaleur est générée dans cette zone ce qui tend à adoucir le métal permettant de plus grandes déformations du matériau.
- **Zone d'écrouissage du copeau (II) :** Dans cette zone, un frottement intense s'effectue entre le copeau et l'outil. Ce frottement est à l'origine de l'usure de l'outil sur la face de coupe et aussi d'une génération de chaleur.
- **Zone d'écrouissage de la pièce (III) :** Dans cette zone, un frottement s'effectue entre la surface nouvellement usinée et la face de dépouille de l'outil.

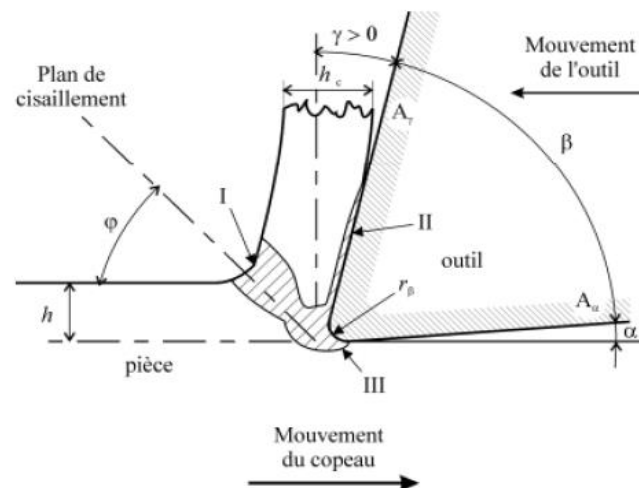


Fig. II.22. Géométrie de la formation d'un copeau.

II.14. Paramètres techno-économiques d'usinage

Le coût d'usinage et le temps d'usinage sont les paramètres techno-économiques d'usinage. Ces les paramètres qui déterminent l'important économique des pièces usinées.

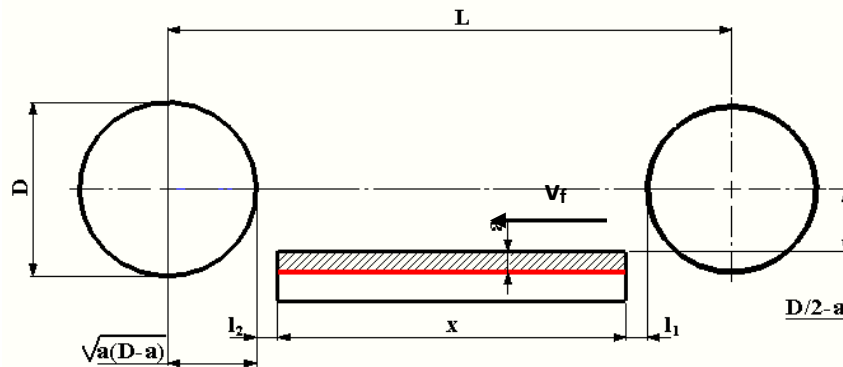
II.14.1 Temps d'usinage

Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. Il s'exprime par la relation :

$$T_u = t_m + t_{cs} \left(\frac{t_m}{T} \right) + t_h \quad (\text{min}) \quad (\text{II.3})$$

- t_{cs} (temps outil) : temps de changement d'outil y compris le temps de réaffûtage si nécessaire,
- T : durée de vie de l'outil de coupe ;
- t_h : temps auxiliaires (montage et démontage pièce, prise de passes) ;
- t_m (Temps technologique) : temps de machine (temps de coupe avec une avance) ;
puisque. On déterminer le temps technologique comme suite (Fig. II.23) :

□ Cas de fraisage en roulant



- L : Longueur totale de déplacement de la fraise ;
- l_1 : Longueur d'approche (Distance de sécurité) ;
- l_2 : Longueur de dégagement ;
- V_f : vitesse d'avance.

Fig. II.23. Paramètres de temps technologique (fraisage en roulant).

Temps technologique d'usinage d'une pièce :

$$t_m = \left(\frac{L}{v_f} \right) \tag{II.4}$$

$$t_m = \frac{\pi \times D \times (X + l_1 + l_2 + 2\sqrt{a(D-a)})}{1000 \times f_z \times z \times v_c} \tag{II.5}$$

II.14.2 Coût d'usinage

Généralement, la formule du coût d'usinage sous la forme :

$$\text{Coût total} = \text{Frais fixes} + \text{Coût machine} + \text{Coût outil}$$

Le coût d'usinage unitaire est le coût nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce, il s'écrit comme suit:

$$C_u = (C_0 \times t_m) + (C_0 \times t_{cs}) + C_t \times \left(\frac{t_m}{T} \right) + C_0 \times (t_h) \tag{II.6}$$

Avec :

- C_u : Coût d'usinage unitaire ;
- C_0 : Coût de machine en \$/ min ;
- C_t : Coût d'une arrête de coupe en \$/ arrête.

II.15. Durée de vie d'un outil de coupe

Compte tenu de la complexité du phénomène, il n'existe pas de loi mathématique simple permettant de calculer la "durée de vie" de l'outil. La durée de vie d'un outil est caractérisée par le temps mis pour atteindre la valeur limite du critère d'usure considérée dans des conditions de coupe données.

Généralement on choisit comme critère d'usure l'un des trois critères suivants :

- Défaillance brutale due à la déformation plastique de l'arête. Ce critère n'est employé que pour les outils en acier rapide ou les outils en céramique ;
- Usure frontale, employé pour tous les outils, caractérisés soit par l'usure frontale moyenne soit par l'usure frontale maximale ;
- Usure en cratère, employé seulement pour les outils en carbure métallique, caractérisé par la profondeur du cratère.

La durée de vie est mesurée sur l'usure en dépouille dans la zone b (Fig II.24) VB en mm.

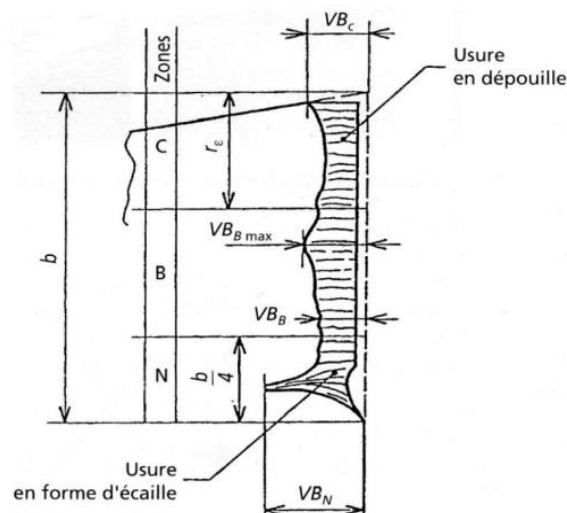


Fig. II.24. Critère d'usure VB.

En fait la durée de vie de l'outil est fonction des différents paramètres, soit:

- Conditions de coupe ;
- Matériau et la géométrie de l'outil ;
- Matériau et l'état physique de la pièce ;
- Lubrification.

Généralement seules les conditions de coupe sont prises en considération et on établit des lois d'usure pour des outils parfaitement définis pour un matériau usiné donné et dans des conditions de lubrification déterminées.

On arrive donc des lois d'usure de la forme :

$$T = f(V_c, f, a_p) \quad (\text{II.7})$$

Remarque :

La vitesse de coupe étant en fait le paramètre le plus important on trouve aussi des lois d'usure sous la forme :

$$T = f(V_c) \quad (\text{II.8})$$

II.16. Mécanisme d'usure

L'usure des outils est la conséquence de divers mécanismes décrits ci-dessous.

II.16.1. Processus d'abrasion

Lors de l'usinage, la matière (pièce usinée et copeau) frotte avec des pressions de contacts importantes sur l'outil. Suivant la constitution physico-chimique et la structure (répartition et agencement des composants de l'alliage : forme, dimension, arrangement) la matière est plus ou moins abrasive par rapport à l'outil (Fig II.25). Si la matière comporte des constituants durs (écrouissage, aluminate, nitrure, carbure, oxyde par exemple) et que ces derniers sont plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil.

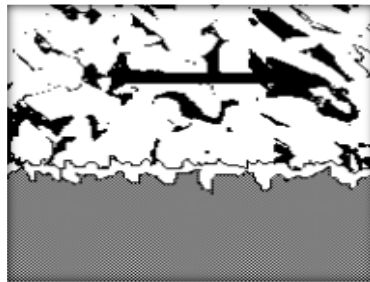


Fig. II.25 Processus d'usure par abrasion.

II.16.2. Processus d'adhésion

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. En effet lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Or les rugosités et microrugosités de ces surfaces, par contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des microsoudures (Fig. II.26).

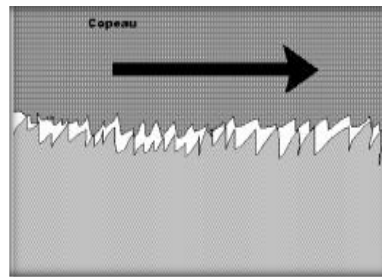


Fig II.26 Processus d'usure par adhésion.

Ces microsoudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus continu génère :

- l'apparition d'arêtes rapportées si les microsoudures sur l'outil sont plus résistantes que celles du copeau;
- l'usure de l'outil si la microsoudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil, Cette usure est très faible et généralement négligeable.

II.16.3.Processus de fissuration

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent flexions et vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes. Il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil.

II.17. Différents types d'usure de l'outillage

En fonction des conditions de coupe, l'usure peut se produire suivant la surface de dépouille, suivant la surface d'attaque ou suivant les deux surfaces en même temps.

II.17.1. Usure en dépouille

Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe (Fig. II.27). Elle influe sur l'état de surface de la pièce usinée et sur la précision dimensionnelle de l'usinage car elle modifie la position de l'arête de coupe. C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible VB. Les valeurs indiquées se rapportent généralement à une tenue d'outil

(Durée de vie $T=15$ min). VB critique = 0,6 mm en ébauche et 0,3 mm en finition. Cela est dû à une vitesse de coupe excessive ou à une mauvaise position angulaire de l'outil (face de coupe / pièce)

□ **Mesures correctives**

- Choisir une nuance présentant une meilleure résistance à l'usure.
- Réduire la vitesse de coupe.

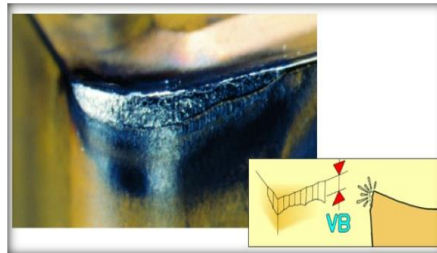


Fig. II.27. Usure en dépouille (abrasion).

II.17.2. Usure en entaille

Ce type d'usure se caractérise par une entaille localisée tant sur la face de coupe que sur la face de dépouille, au niveau de la profondeur de coupe voir (Fig II.28). Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires. Ce genre d'usure due à des phénomènes métallurgiques (calamine des pièces forgées, différence de taille de grain des pièces moulées)

Remarque : cette usure en entaille est souvent accompagnée d'une usure en dépouille.

□ **Mesures correctives**

- Accroître la rigidité de l'arête de coupe.
- Réduire l'avance.

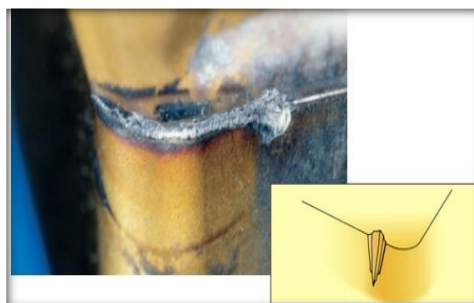


Fig. II.28 Usure en entaille (adhérence).

II.17.3. Usure en cratère

C'est une usure en creux sur la face de coupe, caractérisée par la profondeur de cratérisation (indice K_T). Lors de l'usinage, la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoquent une diffusion importante (réaction chimique) de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion (fig II.29).



Fig. II.29 : Usure en cratère (chimique).

L'usure est souvent constatée sur les outils carbures, elle provoque généralement la rupture de la pointe de l'outil. Généralement l'usure due à une vitesse de coupe excessive ou à une avance trop faible.

Mesures correctives :

- Utiliser des nuances de métal dur revêtu ;
- Choisir des plaquettes à géométrie positive ;
- Réduire la vitesse de coupe ou augmenter l'avance.

II.17.4. Ecaillage de l'arête de coupe

L'écaillage ou la rupture de l'arête survient en cas de surcharge des contraintes de traction mécanique. Celles-ci sont dues à différentes causes telles que le martèlement des copeaux, une profondeur de coupe ou une avance excessive, des inclusions de sable dans la matière de la pièce, des vibrations ou une usure excessive de la plaquette (Fig II.30).



Fig. II.30.Usure mécanique (Ecaillage).

□ Mesures correctives

- Choisir une nuance plus tenace.
- Utiliser une plaquette présentant une géométrie d'arête plus stable.
- Réduire l'avance en début de coupe, en cas d'écaillage par impact de copeaux.
- Choisir une géométrie brise-copeaux différente.
- Modifier l'angle de direction d'arête de l'outil.
- Faire une préparation d'arête de coupe (rodage de l'arête de 0,04 mm par exemple).

II.17.5 Arêtes rapportées

Les arêtes rapportées résultent d'une accumulation de métal de la pièce usinée sur la face de coupe, en particulier dans le cas de matériaux difficilement usinables. Il arrive parfois que cet apport de métal se détache et détériore l'arête de coupe. Il mène en outre à des états de surface médiocres. Le phénomène est dû à une vitesse de coupe et une avance trop faible ou des angles de coupe non appropriés (Fig II.31)



Fig. II.31. Usure par adhérence (Arête rapportée).

□ Mesures correctives

- Accroître la vitesse de coupe ;
- Utiliser des métaux durs revêtus ou des cermets ;
- Choisir une géométrie d'arête positive ;
- Travailler avec arrosage.

II.17.6. Déformation plastique

Elle est occasionnée par une sollicitation trop importante de l'arête de coupe (matériaux usinés trop durs) en combinaison avec des températures d'usinages élevées. La zone de déformation plastique du matériau dépassée (Fig II.33).



Fig. II.32. Usure thermique (déformation plastique)

□ **Mesures correctives**

- Réduire la vitesse de coupe ;
- Réduire l'avance ;
- Utiliser une nuance de métaux durs plus résistante à l'usure.

II.17.7. Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne

Lorsque l'arête de coupe subit des refroidissements brusques, des fissures perpendiculaires à l'arête apparaissent. Ce type de fissure est fréquent en cas de coupes interrompues, ce qui est courant en fraisage. L'utilisation de l'arrosage aggrave ce phénomène (Fig II.33).



Fig. II.33 Usure en peigne.

□ **Mesures correctives**

- Utiliser une nuance présentant une meilleure résistance aux chocs thermiques ;
- Contrôler l'arrosage.

II.18. Dépendance entre l'usure et le temps

La relation entre la valeur de l'usure et le temps représentée par la courbe (Fig. II.34) peut-être divisée en trois périodes :

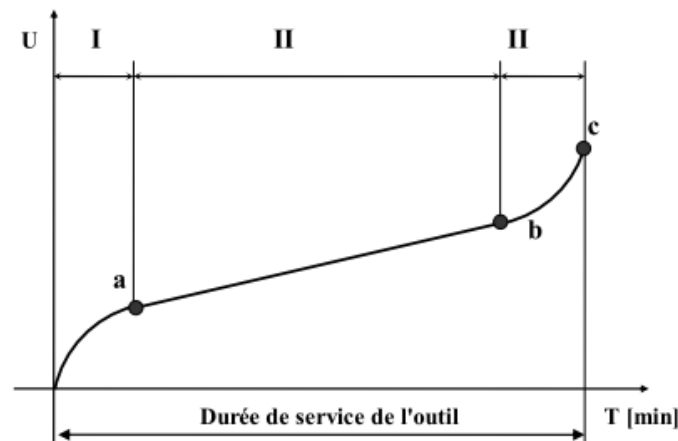


Fig. II.34 Courbe d'usure par rapport le temps.

- **Période I** : Usure initiale ou rodage (à éviter pour les réglages) ;
- **Période II** : Usure normale ou domaine normal d'utilisation de l'outil ;
- **Période III** : Usure accélérée (catastrophique) danger de rupture.

- (a) **La première période** : est celle du rodage (usure initiale) qui donne lieu à une usure intense, plus les surfaces de frottements sont nettes, et plus l'évolution de l'usure est faible dans le même intervalle de temps.
- (b) **La deuxième période** : est celle de l'usure normale, elle est définie par la progression de l'usure en fonction de la durée de travail pendant la deuxième période, l'augmentation de l'usure en unité de temps est une constante.
- (c) **La troisième période** : est celle où l'usure atteint un certain degré. Les conditions de coupe et de frottements changent pour établir la troisième périodes qui est celle de l'usure accélérée (usure catastrophique).

Le temps des deux premières périodes ou l'outil peut travailler sans réaffûtage constitue la durée de service de l'outil qui est le temps de travail.

II.19. Outils de fraisage

Le choix des outils est généralement déterminé par le matériau à usiner et les opérations associées, ainsi que les conditions de coupe souhaitées tout en considérant les limitations de la machine-outil. Il existe toutefois deux types de fraises, les fraises monoblocs et les fraises plaquettes. Pour les outils monoblocs, trois géométries classiques sont à considérer, les fraises deux tailles, les fraises rayonnées ou toriques et les fraises hémisphérique, et pour les opérations d'ébauche où la plus grande durée de vie des outils porte-plaquettes et le peu d'intérêt d'être compact et précis favorise leur.

II.20. Affûtage

L'affûtage est une opération d'usinage par abrasion qui consiste à donner ou à rendre à l'arête ou aux diverses arêtes tranchantes d'un outil de coupe la forme et l'état de surface nécessaires à leur bonne utilisation. L'affûtage est par conséquent une opération de meulage qui intervient tant au stade de la fabrication de l'outil qu'au stade de son utilisation.

Son importance vient du fait que la façon dont l'outil est usiné pour obtenir la forme voulue de sa ou de ses arêtes tranchantes a au moins autant d'influence sur le rendement de cet outil que les caractéristiques du métal le constituant. L'utilisation d'un outil mal ou trop rapidement affûté conduit toujours à une chute de production de la machine utilisatrice. Il faut en conséquence que la qualité de l'affûtage prime sur sa rapidité et éviter ainsi qu'une faible économie réalisée sur l'affûtage se traduise en fin de compte sur la machine utilisatrice par une perte d'argent beaucoup plus importante que cette économie par suite :

- de réaffûtages plus fréquents ;
- d'un rejet prématuré du ou des outils ;
- d'un accroissement du pourcentage de pièces rejetées.

II.20.1. Machine d'affûtage

Les machines employées pour l'affûtage des outils de coupe à dents multiples sont des machines de type universel et classique voir (Fig. II.35).



Fig. II.35. Affûteuse universelle.

Elles comportent comme organes essentiels :

- Une tête porte-meule réglable en hauteur et orientable par pivotement dans le plan horizontal ;

- Une table porte-pièce animée d'un mouvement longitudinal alternatif et d'un mouvement transversal en outre la table peut être orientée à divers angles dans le plan horizontal.

Mais maintenant il ne fait plus aucun doute les outils de coupe mis en œuvre sur les machines outils de conceptions les plus récentes exigent une qualité et une régularité de l'affûtage ayant nécessité de transférer l'habilité et l'expérience des affûteurs à la commande numérique.

II.21. Caractéristiques des fraises

(a) Taille

Suivant le nombre d'arêtes tranchantes par dent, on distingue les fraises : une taille, deux tailles ou trois tailles (Fig. II.36).



Fig. II.36 Schéma de Fraise une taille et deux tailles.

(b) Forme

Suivant le profil des génératrices par rapport à l'axe de l'outil, on distingue : Les fraises cylindriques, coniques et les fraises de forme (Fig. II.37).

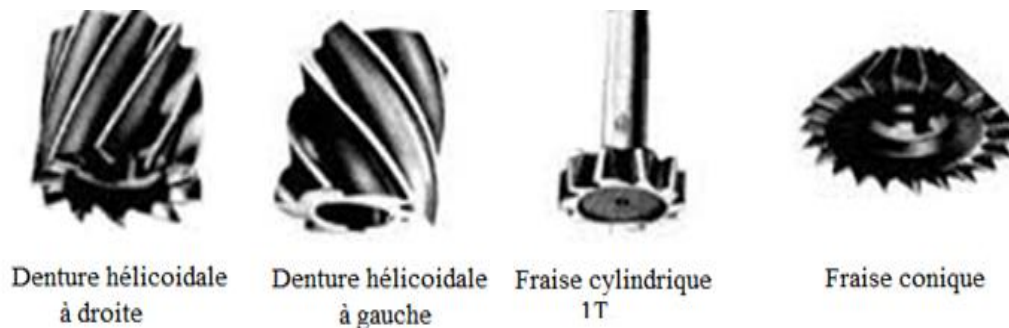


Fig. II.37. Formes des fraises.

(c) Denture

Suivant le sens d'inclinaison des arêtes tranchantes par rapport à l'axe de la fraise, on distingue les dentures hélicoïdales à droite ou à gauche (Fig. II.38) et les dentures à double hélice alternée. Si l'arête tranchante est parallèle à l'axe de la fraise, la denture est droite. Une fraise est également caractérisée par son nombre de dents.



Fig. II.38. Fraises a, a) dentures hélicoïdales à gauche, b) Dentures hélicoïdales à droite.

(d) Mode de fixation

A trou lisse ou taraudé, à queue cylindrique ou conique.

(e) Construction

Les fraises peuvent être à denture fraisée (ex. : fraise conique deux tailles α 60°), ou à denture détalonnée et fraisée (ex. : fraise-disque pour crémaillères). Elles sont en acier rapide. Pour les fraises à outils rapportés sur un corps de fraise, les dents fixées mécaniquement sont en acier rapide, ou le plus souvent en carbure métallique.

II.22. Classification des fraises**(d) Fraises monoblocs**

Ce sont des fraises dont la denture est taillée dans la masse on rencontre 2 types de fraises monoblocs.

- Fraise à denture taillé ou fraisée (Fig. II.39);
- Fraise à profil constant.



Fig. II.39. Fraise monobloc à denture taillé.

(e) Fraises à denture rapportée

Sont intéressantes du fait de la fabrication du corps de fraise en acier ordinaire au carbone et des dents en acier à coupe rapide ou alliage spécial.

Deux types se rencontrent souvent :

- Fraises à outils rapportés voir le schéma ci-dessous (Fig. II.40) ;
- Fraises à plaquettes rapide.



Fig. II.40. Schéma d'une fraise à plaquettes rapportés.

(f) Fraises rouleaux

C'est une fraise monobloc cylindrique à trou lisse pourvu d'une rainure pour clavette d'entraînement. Les fraises plus larges possèdent un alésage chambré qui assure un meilleur guidage fraise/arbre (Fig. II.41).



Fig. II.41 Schéma d'une fraise rouleau.

(g) Fraises à surfacer et à surfacer et dresser

Elles sont robustes et permettent un grand rendement.

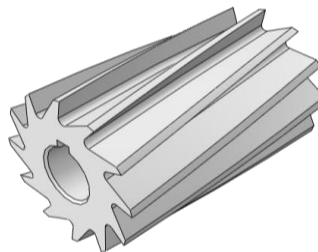


Fig. II.42. Fraise à surfacer.

(h) Fraises 2 T , à queue cylindrique

Elles sont utilisées pour tous travaux de fraisage en bout, ou en roulant



Fig. II .43 : Fraise 2T à queue cylindrique

(i) Fraises 2 T à queue cône morse

Fig. II.44 : Fraise à queue conique, 2T.

(j) Fraises à rainurer

Fig. II 45 : Fraise à rainurer.

(k) Fraises 2T cylindriques à entraînement par tenons

Fig. II.46 : Fraise cylindriques 2T, à entraînement par tenons.

(l) Fraises cloches à entraînement par tenons

Utilisation : Le profil de la denture réduit la puissance absorbée. Elles ont un grand rendement. On les utilise principalement pour l'usinage des alliages légers.

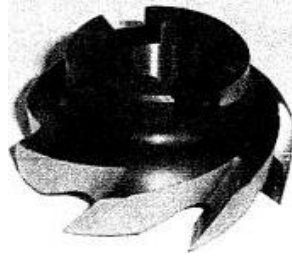


Fig. II.47 : Fraise cloche à entraînement par tenons.

(m) Fraises-disques 3 T, à denture droite, à entraînement par clavette

Utilisation : Réalisation de rainures en : Ebauche et en Finition.



Fig. II.48 : Fraise-disque, 3T.

(n) Fraises-disques 3 T, à dentures alternées, à entraînement par clavette

Fig. II.49 : Fraise-disque 3T, à dentures alternées.

(o) Fraises en carbure

On distinguera les fraises carbures : Monoblocs et à plaquettes amovibles. Pour ce qui concerne les fraises carbures monoblocs, ce sont principalement des fraises à rainurer. Nous allons nous intéresser maintenant aux fraises carbures à plaquettes amovibles. L'avantage de ce type d'outils par rapport aux outils monoblocs (A.R.S. ou carbures) est le non réaffutage des arêtes de coupe. Lorsqu'une arête de coupe est usée, on la change et lorsqu'il n'y a plus d'arête neuve sur une plaquette, on la jette. Ceci est possible grâce à une fabrication en très grande série qui entraîne un prix de revient modique par arête (de plus le réaffutage coûterait plus cher qu'une plaquette neuve).

II.23. Mode de fixation

À trou lisse ou taraudé, à queue cylindrique ou conique.

II.24. Construction

Les fraises peuvent être à denture fraisée (ex. : fraise conique deux tailles α 60°), ou à denture détalonnée et fraisée (ex. : fraise-disque pour crémaillères). Elles sont en acier rapide. Pour les fraises à outils rapportés sur un corps de fraise, les dents fixées mécaniquement sont en acier rapide, ou le plus souvent en carbure métallique.

**Chapitre III: Gamme d'usinage &
modélisation numérique de la fraise
étudiée.**

III.1.Introduction

Concevoir et fabriquer un produit plus performant, plus robuste, à prix diminué ,avec un temps de main d'œuvre, de conception et de fabrication diminué, figurent parmi les objectifs de qualité de toute entreprise compétitive. L'offre d'un produit doit se faire rapidement. Le temps devient une option stratégique. La réalisation d'une aide à l'opérateur participe à cette objectif au même titre que le décloisonnement du travail et la mise en œuvre d'une meilleure synchronisation dans la productivité. De nos jours, ces objectifs peuvent être atteints, en utilisant des techniques de conception et de fabrication ultra sophistiquées appelés la CFAO (conception et fabrication assistées par ordinateur).

Ce logiciel intègre depuis quelques années des modules spécifiques à la fabrication (Cameworks - SurfCame). Toutes les tâches classiques comme la création de chaînes de cotes ou l'écriture de programmes machines sont automatisées, ce qui allège considérablement le travail.

En pratique, les gammes sont toujours validées expérimentalement avant de lancer la production. Cette phase de test est réalisée sur des préséries. Elle demande beaucoup d'investissements en temps et en moyens : réaliser les pièces brutes et les éléments du montage, usiner les pièces, contrôler les surfaces, ... En cas de non conformité, il faut alors modifier la gamme, voire même modifier la conception de la pièce, ce qui allonge énormément les temps de mise au point. L'intégration des erreurs géométriques et des aspects dynamiques dans la chaîne de CFAO permet de limiter fortement le risque de mauvaises conceptions.

III.2 Description d'une fraise cylindrique 2 tailles

III.2.1 Arête et faces de coupe et dépouille

Un outil coupant de forme (fraise cylindrique 2T) est constitué d'une partie active : c'est la partie qui agit sur la pièce pour provoquer un enlèvement de métal (voir fig. III.1). Elle est caractérisée par sa forme et son matériau. Sa durée de vie doit être plus grande que celle du métal à travailler.

L'élément essentiel de la partie active de l'outil est formé par :

- (1) **Arête de coupe** : est formée par l'intersection des faces de coupe et de dépouille ;
- (2) **Face de coupe** : est la face où vient « s'enrouler » le copeau lors de l'usinage ;
- (3) **Face de dépouille** : est compris entre le témoin et la tangente au cercle enveloppe des arêtes de la fraise au point de contact de ce cercle avec l'arête tranchante de la

dent considérée. L'angle de dépouille a une grande importance dans la bonne réalisation du travail de coupe puisqu'il a pour but d'éviter le talonnement des dents sur la surface usinée.

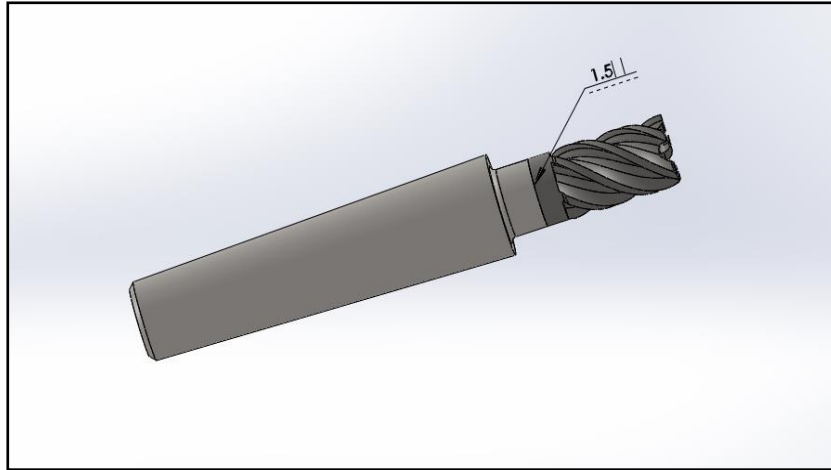


Fig. III.1 Schéma descriptive d'une fraise cylindrique 2T en bout à queue conique.

III.2.2 Etapes de réalisation la fraise cylindrique 2T

Suite aux analyses effectuées sur la pièce modèle (La nuance et la dureté), on procède de leur réalisation en élaborant leur gamme de fabrication à savoir :

- (1) Dessin de définition;
- (2) Gamme d'usinage;
- (3) Traitement thermique.

III.2.2.1. Dessin de définition

Dessin établis par les services de préparation du travail des usines. Ils indiquent le procédé de fabrication choisi et tous les renseignements nécessaires à sa réalisation. En particulier, en respectant les côtes fonctionnelles données par le dessin de définition, ils comportent des côtes, dites surabondantes ou complémentaires, destinées à faciliter le travail des exécutants ainsi que le choix des bases de référence (axe ou plan) qui conditionnent le procédé adopté, le profile de la fraise de forme est ci-dessous et les détails « voir les détails dans l'annexe » .

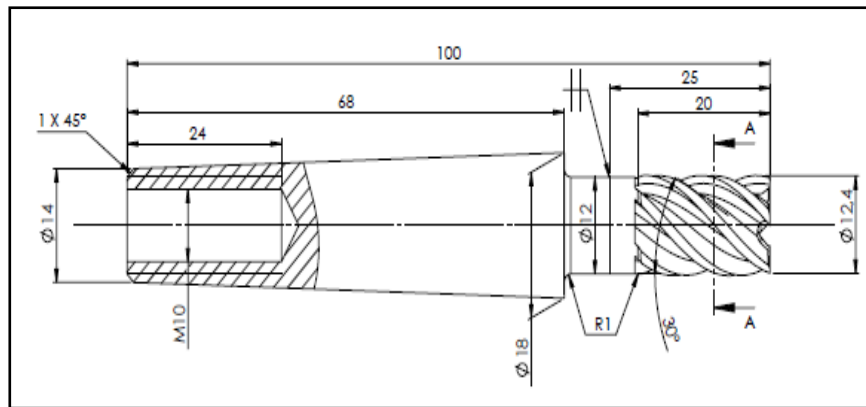


Fig. III.2 Schéma descriptive le Profil de la fraise cylindrique.

III.2.2.2 Gamme d'usinage

Pour réaliser notre pièce modèle (fraise de forme) on a suivi les différentes phases « voir les détails dans l'annexe»:

III.2.2.3. Etapes de réalisation d'un outil :

1^e Etape : Débitage (phase n°1 et phase n°2) « voir les détails dans l'annexe» :

Couper les deux matières (morceaux) :

- **Partie active :** Acier rapide (ARS) W18Cr4v : 26 mm ;
- **Queue :** Acier au carbone 45 : 77mm ; selon le dessin.

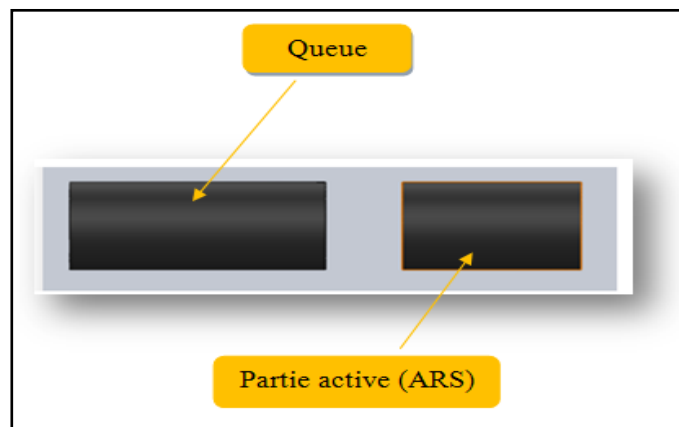


Fig.III.3 : Débitage de la matière première (en ARS + 45).

2^{ème} Etape (phase n° 3 et phase n°4) « voir les détails dans l'annexe» :

Dressage cylindrique selon le dessin de définition :

- Partie active : 25.5 mm ;
- La queue : 76mm.

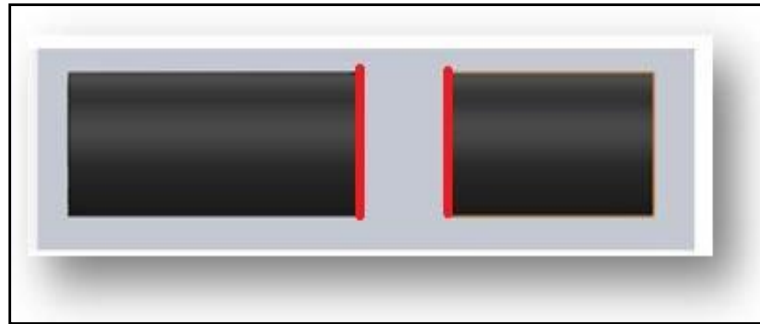


Fig.III.4 Dressage la surface plane

3^{ème} Etape (phase n° 5) « voir les détails dans l'annexe» : Soudage en bout
Souder les deux matériaux acier rapide et acier au carbone (ARC + 45).

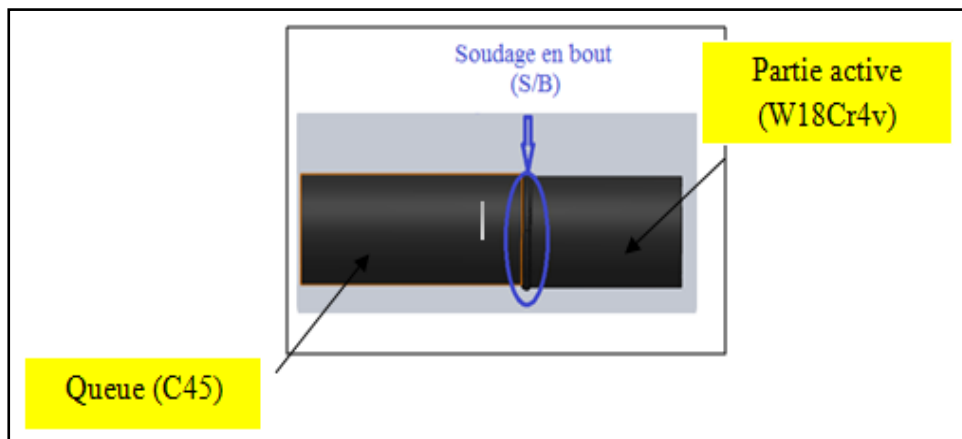


Fig.III.5 : Soudage en bout de deux morceaux.

4^{ème} Etape (phase n° 6) « voir les détails dans l'annexe» :
Chariotage et dressage et centrage selon le dessin de définition :

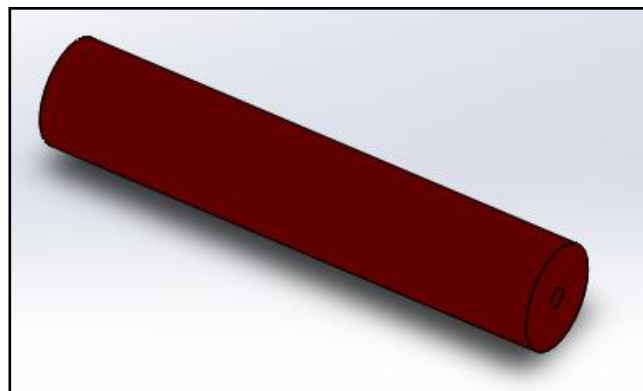


Fig.III.6 : Chariotage et dressage et centrage.

5^{ème} Etape (phase n° 7) « voir les détails dans l'annexe » :

Perçage et taraudage selon le dessin de définition :

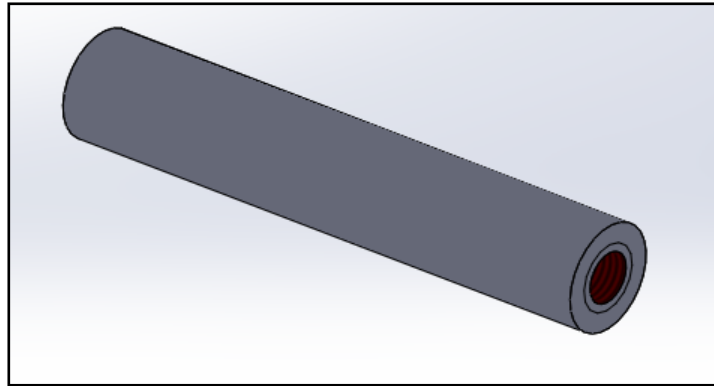


Fig.III .7 : Perçage et taraudage.

6^{ème} Etape (phase n° 8) « voir les détails dans l'annexe » :

Dressage et chariotage cylindrique et conique selon le dessin de définition :

- Longueur totale : 100 mm ;
- Partie active : 25 mm ;
- La queue : 75 mm.

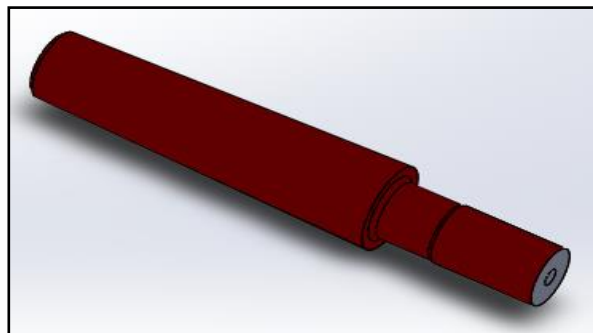


Fig.III .8 : Tournage cylindrique et conique.

7^{ème} Etape (phase n° 9) « voir les détails dans l'annexe » :

Fraisage de la partie active et angles (angle taillant – de coupe – de dépouille)

- Angle de coupe : 11° ;
- Angle de dépouille : 15° ;
- Angle taillant : 80° ;

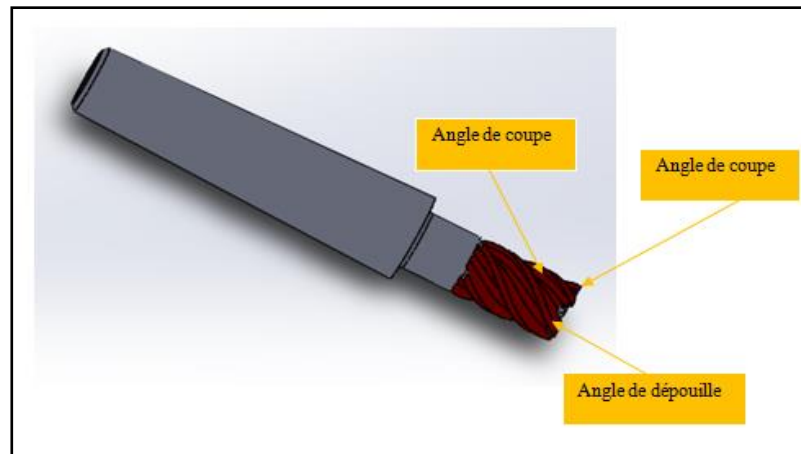


Fig.III.9 : Fraise après l'opération de fraisage.

8^{ème} Etape : Contrôle de dimensions réalisées

9^{ème} Etape (phase N°10) « voir les détails dans l'annexe » : Traitement thermique :

Cette phase consiste à élever la dureté de la pièce à usiner « fraise cylindrique 2T », est pour cela on a procédé au traitement la pièce avec une trempe plus revenu dans un bain de Huile, Nitrate à une température de $450^{\circ} \sim 550^{\circ}$ suivi par un revenu de température à 450° trois fois. Après le traitement il faut faire le Contrôle de dureté de la pièce suivant l'exigence technique de traitement.

- Partie active : 63 à 66 HRC ;
- Queue : 30 à 40 HRC ;

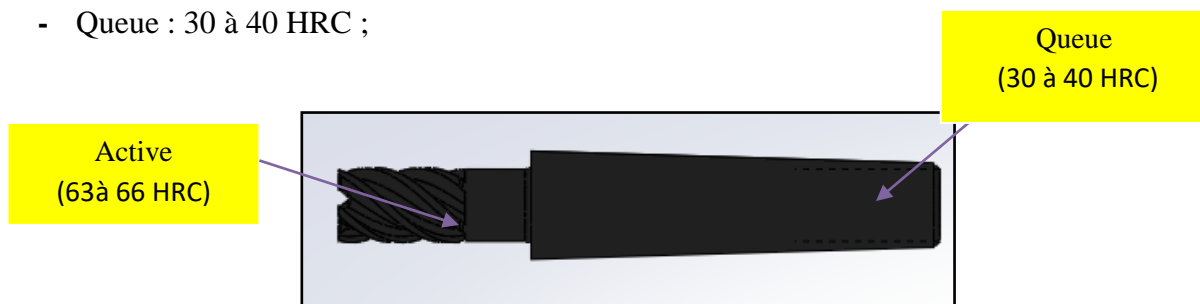


Fig.III.10 : Fraise après traitement thermique.

10^{ème} Etape (phase N°11) « voir les détails dans l'annexe » :

Nettoyage de la pièce après traitement thermique par le sablage.

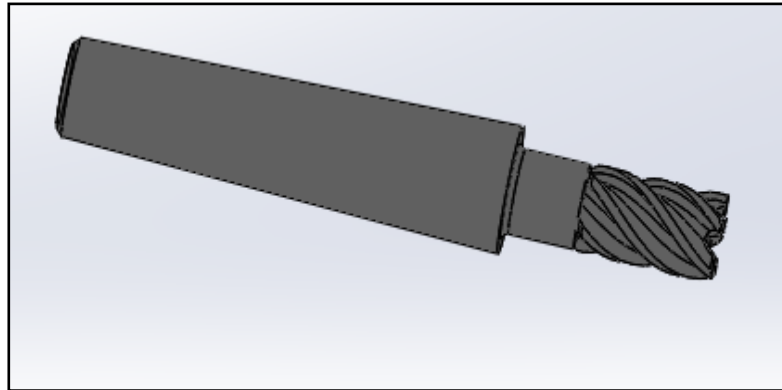


Fig.III.11 : Pièce après sablage.

11^{ème} Etape (phase N°12) « voir les détails dans l'annexe » :

Rectification cylindrique et conique de la fraise après T.Th.

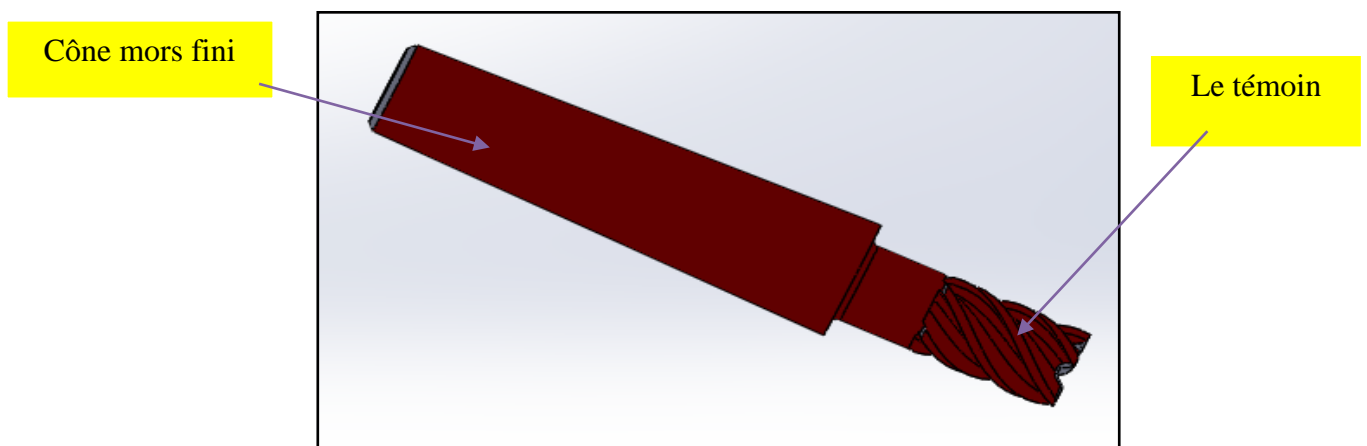


Fig.III.12 : Pièce rectifiée.

12^{ème} Etape (phase N°13) « voir les détails dans l'annexe » :

Rectification cylindrique et conique de la fraise après T.Th. Affutage des angles de coupe, de taillant et inclinaison.

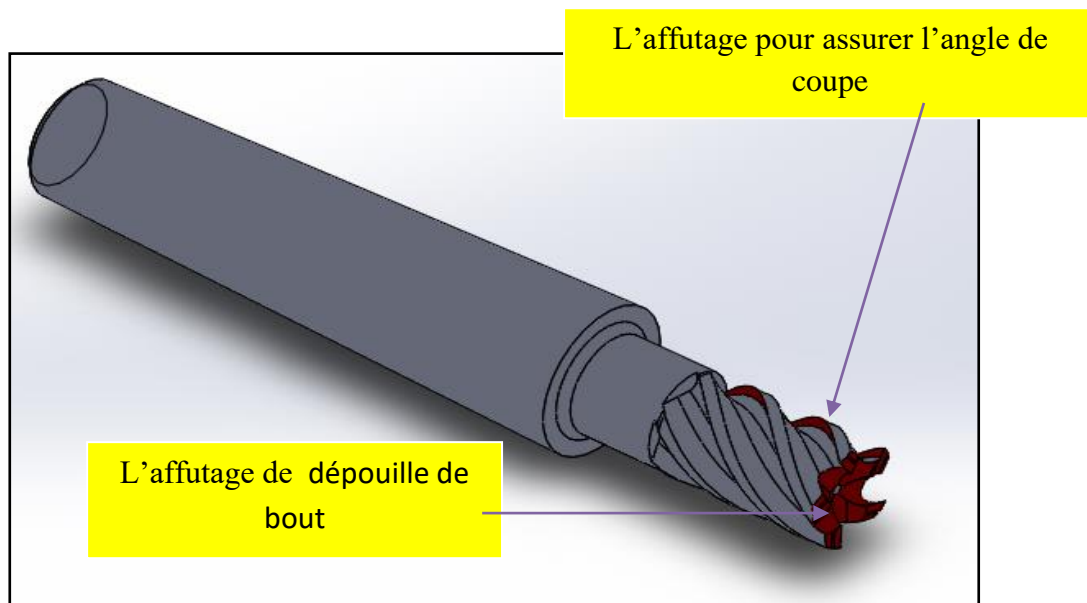


Fig.III.13 : Affûtage des angles.

13^{ème} Etape :

Contrôle finale de l'outil.

III.3.Dessin (SolidWorks)

III.3.1.Introduction

Le logiciel de conception mécanique Solidworks est un outil de modélisation volumique paramétré, basée sur des fonctions, qui tire partie des fonctionnalités de Windows, connu pour sa convivialité. Vous pouvez créer des modèles volumiques 3D entièrement intégrés avec ou sans contraintes tout en utilisant des relations automatiques ou définies par l'utilisateur pour saisir l'intention de conception.

Un modèle Solidworks est entièrement intégré par rapport aux mises en plan et aux assemblages qui le référencent. Les changements introduits dans le modèle sont entièrement reflétés dans les mises en plan et les assemblages qui lui sont associés. Inversement si vous effectuez des changements dans le contexte d'une mise en plan ou d'un assemblage, ces changements sont reflétés dans le modèle.

Les relations géométriques telles que les relations parallèles, perpendiculaires, horizontales, verticales, concentriques et coïncidentes sont des exemples des contraintes supportées par Solidworks.

Des équations peuvent également être utilisées pour établir des relations mathématiques entre les paramètres.

III.3.2.Mise en plan

- Longueur totale = 100mm ;
- La partie active = 25 mm ;
- Partie de fixation = 75 mm ;
- Angle de coupe $\Omega = 10^\circ$;
- Angle de dépouille $\alpha = 15^\circ$;
- Angle taillant $\beta = 65^\circ$.

III.3.3. Caractéristiques d'une fraise cylindrique à queue conique

- Partie active : acier rapide **ARC (W18Cr4v)** ; (25mm) ;
- Partie de fixation : acier au carbone **45** (75mm) ;
- Module de Young = 21000 ;
- Coefficient de poisson = 0.3.

III.4 Abaqus

III.4.1 Introduction

Abaqus est un outil de modélisation puissants permettant de concevoir de façon dynamique tous types d'éléments, depuis les dessins du styliste à la surface finale, prête pour les processus de fabrication. Ce logiciel nous permet de générer des courbes 3D, et les déformer, et d'analyser de façon statique et dynamique tous les éléments générés. Le module COSMOS/WORKS est conçu pour traiter des pièces 3D solides provenant de Abaqus .

- Abaqus Simulation est un système d'analyse de conception totalement intégré à Abaqus.
- Abaqus Simulation permet d'obtenir, à partir d'un seul écran, des solutions d'analyse fréquentielles, thermiques, de contraintes, de flambement et d'optimisation. Grâce à ses solveurs rapides Abaqus Simulation permet de résoudre rapidement des problèmes de grande ampleur, sur votre ordinateur personnel. Est proposé en plusieurs configurations pour répondre à vos besoins d'analyse.
- Abaqus Simulation raccourcit le délai de mise sur le marché en réduisant le temps et le travail nécessaires pour définir la solution optimale.

III.4.2 Principes de base de l'analyse

Le logiciel utilise la méthode des éléments finis (FEM, pour Finite Element Method). Cette méthode est une technique numérique d'analyse de conception. Elle est considérée comme la méthode standard d'analyse, du fait de sa généralité et de sa capacité à être traitée par l'informatique. La méthode des éléments finis divise un modèle en un grand nombre de petites entités de formes simples appelées éléments, et remplace ainsi un problème complexe par un ensemble de problèmes simples qui doivent être résolus simultanément.

Les éléments partagent des points communs appelés nœuds. Le processus qui consiste à diviser le modèle en petites entités est appelé maillage. Le comportement de chaque élément est connu dans tous les cas possibles de support et de chargement. La méthode des éléments finis utilise des éléments de différentes formes. La réponse en chaque point d'un élément est interpolée à partir de la réponse au niveau de ses nœuds. Chaque nœud est complètement décrit par un nombre de paramètres dépendant du type d'analyse et de l'élément utilisé. Dans le cas des analyses structurelles, la réponse d'un nœud est décrite en général par trois translations et trois rotations, Ces capacités à se déplacer sont appelées degrés de liberté (DDL). Une analyse utilisant la méthode des éléments finis est appelée Analyse par éléments finis (FEA).

Dans une analyse de contraintes, le solveur détermine les déplacements de chaque nœud, puis calcule les déformations et enfin les contraintes.

Le maillage est une étape fondamentale de l'analyse de conception. Le logiciel génère un maillage s'appuyant sur une taille d'élément globale, une tolérance globale ainsi que sur les spécifications locales de contrôle du maillage. Le contrôle du maillage vous permet de définir différentes tailles d'élément pour les composants, faces, arêtes et sommets.

Pour ce faire, le logiciel évalue une taille d'élément globale en tenant compte du volume du modèle, de sa surface et d'autres paramètres géométriques. La taille du maillage généré (nombre de nœuds et d'éléments) dépend de la géométrie et des dimensions du modèle, de la taille des éléments, de la tolérance de maillage, du contrôle du maillage et des spécifications de contact. Dans les premières étapes de l'analyse de conception, où des résultats approximatifs peuvent être suffisants, vous pouvez spécifier une taille d'élément plus importante pour atteindre plus rapidement une solution. En général, une petite taille d'élément est nécessaire pour obtenir des résultats plus précis.

Le maillage génère des éléments volumiques tétraédriques 3D, des éléments coque triangulaires 2D et des éléments poutre 1D. Un maillage est composé d'un type d'éléments à moins qu'il ne s'agisse d'un maillage mixte. Les éléments volumiques sont naturellement bien adaptés pour les modèles volumineux. Les éléments coque sont naturellement bien adaptés pour la modélisation de pièces minces (de tôlerie) et les poutres et les barres conviennent à la modélisation d'éléments mécano-soudés.

III.4.3 Contraintes de Von Mises

Le critère de Von Mises est basé sur la théorie de Mises-Hencky, connue aussi sous le nom de la théorie de l'énergie de distorsion maximale. En utilisant les contraintes principales σ_1 , σ_2 , et σ_3 , la contrainte de **Von Mises** s'exprime comme suit :

$$\sigma_{\text{VonMises}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]/2\}^{(1/2)}$$

La théorie prévoit qu'un matériau ductile commence à céder lorsque la contrainte de von Mises atteint un niveau égal à la contrainte limite. Dans la plupart des cas, la limite d'élasticité est utilisée comme contrainte limite. Cependant, le logiciel vous permet d'utiliser la limite de rupture en traction ou de définir votre propre contrainte limite.

$$\sigma_{\text{VonMises}} \geq \sigma_{\text{limite}}$$

La limite d'élasticité dépend de la température. La valeur spécifiée pour la limite d'élasticité doit tenir compte de la température du composant. Le coefficient de sécurité en un endroit est calculé comme suit : Coefficient de sécurité (CS) = $\sigma_{\text{limite}} / \sigma_{\text{vonMises}}$

III.4.4. Simulation de la fraise cylindrique 2T (étude statique)

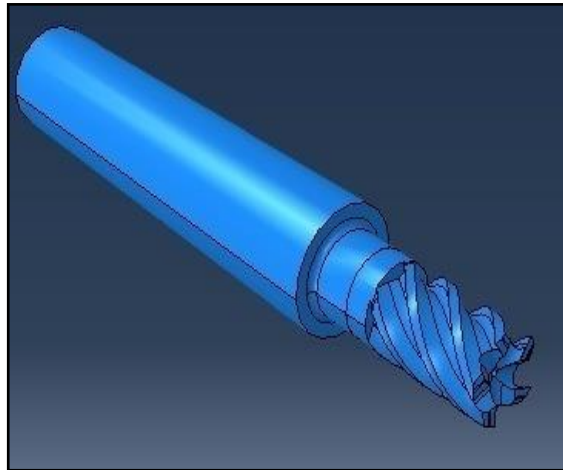


Fig.III.14 : Fraise réalisée par Solidworks.

III.4.5. Maillage

L'objet du maillage est de discrétiser géométriquement le domaine d'analyse de manière à pouvoir ultérieurement associer une formulation éléments finis au support géométrique. Concrètement cette discrétisation s'effectue par la création d'objets de type maillage (points, lignes, surfaces, volumes) à l'aide des opérateurs géométriques.

La technique à suivre est presque toujours la même :

- Construction des points ;
- Construction des lignes à partir des points ;
- Construction des surfaces à partir des lignes ;
- Construction des volumes à partir des surfaces.

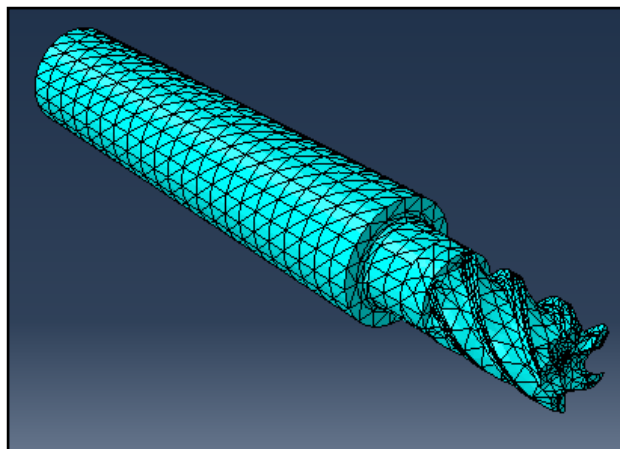


Fig.III.15 : Forme de maillage de la fraise.

III.4.6. Chargement de la fraise

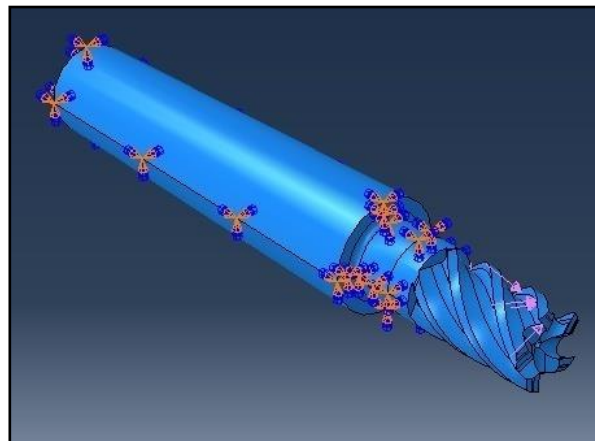


Fig.III.16 : Mode de chargement.

III.4.7. Résultats et discussion

Nous avons fait une coupe selon l'axe ZZ, pour montrer les zones dangereuses sur l'arrête de coupe. La zone la plus dangereuse est indiquée sur l'arrête (zone rouge). Cet endroit à éviter, on doit l'arrondir ou éviter l'angle vif, pour diminuer l'intensité de contraintes dans cette zone. Les zones dangereuses se situent sur les goujures et ainsi sur les listels, C'est pour cette raison nous devons prendre en considération ces zones pendant le traitement thermique.

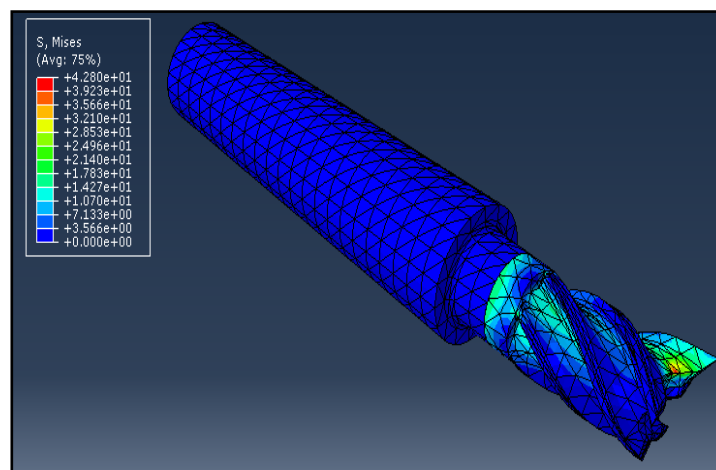


Fig.III.17. Influence des contraintes sur la fraise.

III.4.7.1. Contraintes selon ZZ

Dans ce cas nous avons considéré une seule dent.

Contrainte de Von Mises :

- **Min** : $-1.104e+1$ N/mm² (MPa),
- **Max** : $3.378e+1$ N/mm² (MPa).

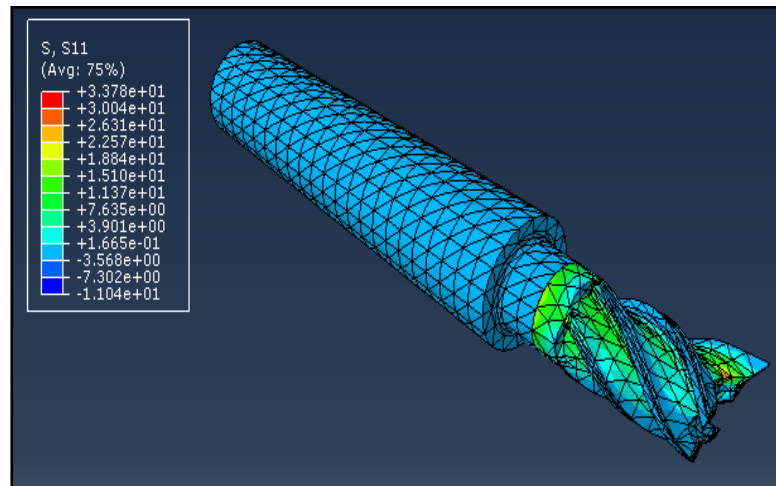


Fig.III.18 : Contraintes selon plan ZZ.

III.4.7.2. Contraintes selon YY

Contrainte de Von Mises :

- **Min** $-1.871e+1$ N/mm² (MPa)
- **Max** $2.644e+1$ N/mm² (MPa).

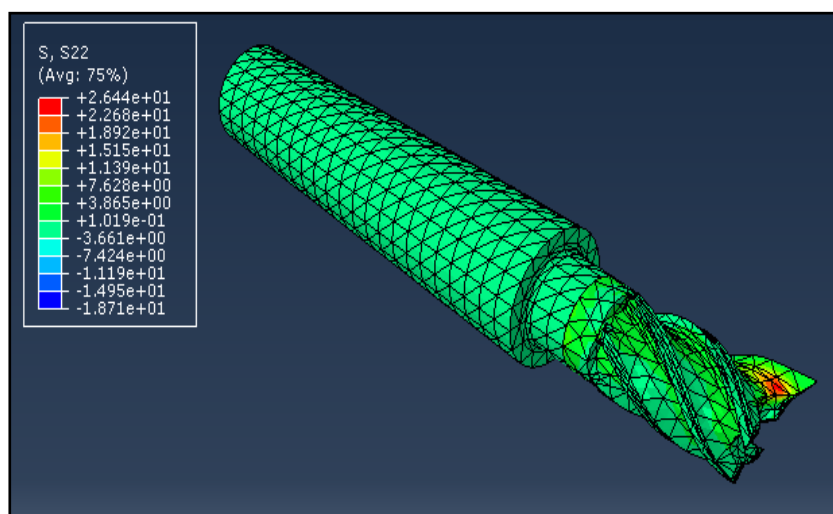


Fig.III.19 : Contraintes YY.

III.4.7.3. Contraintes selon XX

Contrainte de Von Mises :

- **Min** : $-1.603e+1$ N/mm² (MPa) ,
- **Max** : $2.057e+1$ N/mm² (MPa).

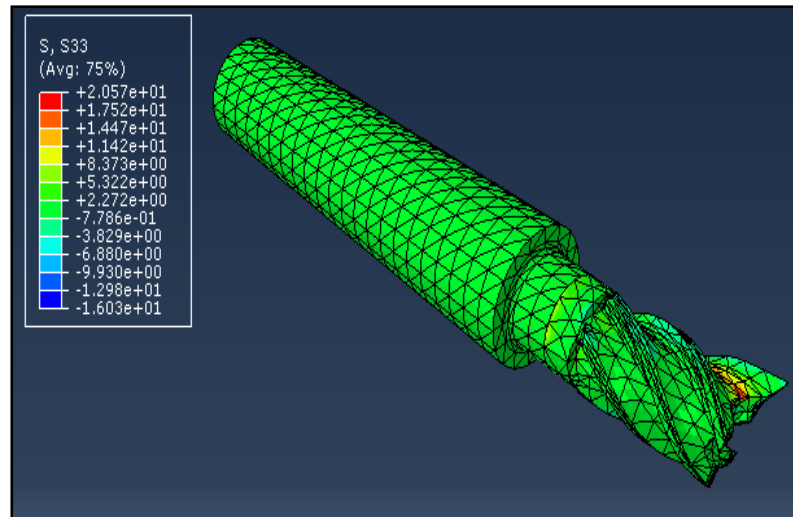


Fig.III.20 : Contraintes XX.

III.4.7.4. Contraintes selon ZY

Contrainte de Von Mises :

- **Min** : $1.198e+1$ N/mm² (MPa)
- **Max** : $1.685e+1$ N/mm² (MPa).

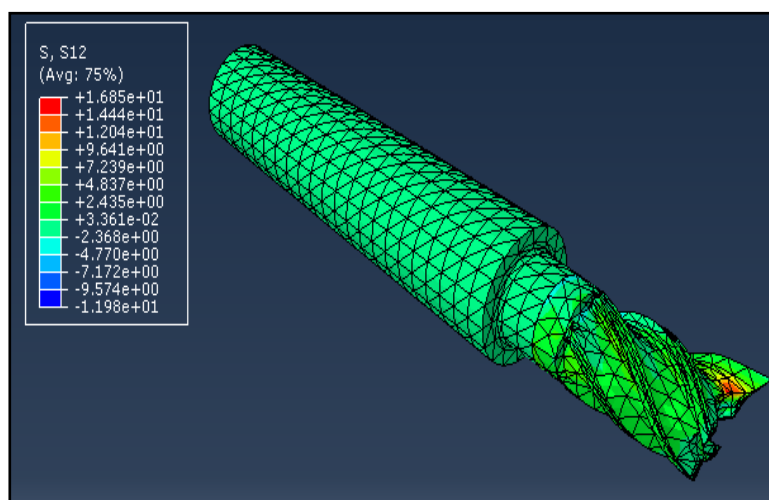


Fig.III.21 : Contraintes ZY.

III.4.7.5. Contraintes selon ZX

Contrainte de Von Mises :

- **Min** : -1.290×10^1 N/mm² (MPa)
- **Max** : 9.345×10^0 N/mm² (MPa).

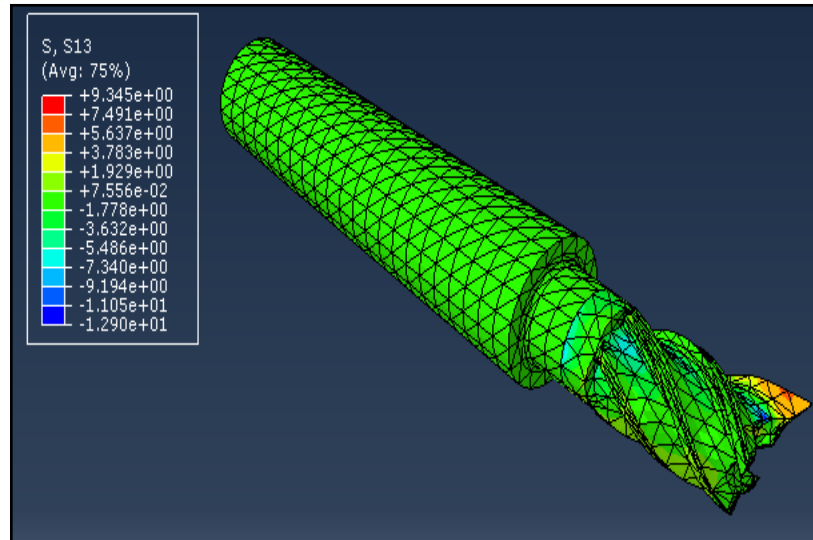


Fig.III.22 : Contraintes ZX.

III.4.7.6. Contraintes selon YX

Contrainte de Von Mises :

- **Min** : -1.003×10^1 N/mm² (MPa),
- **Max** : 7.414×10^0 N/mm² (MPa).

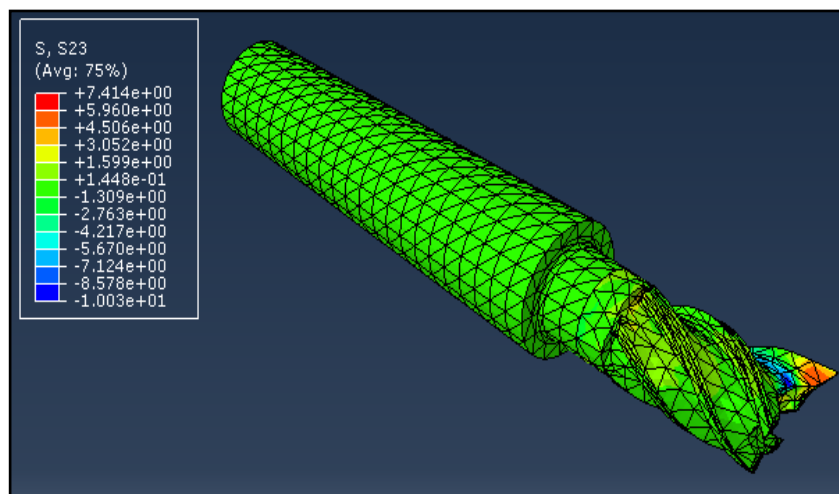


Fig.III.23 : Contraintes YX.

III.5. Discussion

Sur les figures illustrées ci-dessus, nous avons montrés les contraintes de **Von mises** et le déplacement sur l'arrête tranchante de la fraise de forme. Cette dernière à subie des efforts de coupe au moment d'usinage. Les zones rouges s'usent avant les autres zones et cette usure survient après un nombre des pièces réalisé prescrites dans la gamme d'usinage. Donc, nous devons **éviter les angles vifs**.

Conclusion générale

L'apparition de l'usinage par enlèvement de copeaux, le secteur de la machine-outil a tourné une page de son histoire. Les pièces sont désormais usinées très rapidement, avec une précision toujours croissante. Seulement, l'usinage ne représente que 15% du temps total de production. Changement d'outils, acheminement de la pièce, etc...

Pour une performance maximale, l'usinage doit prendre en compte non seulement le temps d'usinage proprement dit (temps copeaux), mais également, et surtout, le temps hors d'usinage, qui représente à lui les 85% restants du temps de cycle total de production .

C'est pourquoi on essaye d'obtenir maintenant des pièces de moulage ne nécessite pas d'usinage. Cela est possible avec les plastiques, mais les qualités techniques : résistance à la chaleur ou limite élastique sont encore loin d'égaliser celles de l'acier des alliages d'aluminium.

Actuellement parmi tous les axes de recherche en fabrication, on peut citer le processus de fabrication par enlèvement de copeaux qui offrent une grande importance dans la gamme d'usinage. La pièce usinée par enlèvement de matière est d'une précision supérieure. Tout d'abord les efforts de coupe sont réduits. Donc, la pièce subit moins de déformation. Ensuite les calories sont dissipées dans les copeaux avant d'avoir le temps de pénétrer dans la pièce. Moins de sollicitée en température, la pièce conserve sa stabilité dimensionnelle originale.

Références

- [1] L. Rimbaud, G.Layes, J.Moulin, Guide pratique de l'usinage (tournage, fraisage).
- [2] André Chevalier, Guide du dessinateur industriel (chevalier).
- [3] R.Butin, M. Pinot, «Fabrication Mécanique Technologie, Tome 3» .
- [4] Gilles Prod'Homme, « Commande Numérique des Machines-Outils»,
Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, B 7130.
- [5] Sandvik-Coromant, «Fraisage », Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique,
BM 7 082, 1997.
- [6] Jean-Pierre Cordebois, coll, «Fabrication par Usinage», DUNOD, 2003.
- [7] H.Longeot, L.Jourdan, Construction industrielle.
- [8] SwissMechanic, 4^eédition-juin 2009 Version pour apprenant, n°d'art.21104f.
- [9] G.Sabatier, F.Ragusta, H.Antz, Manuel de technologie mécanique.
- [10] SolidWorks Education, Conception mécanique et technologie.
- [11] Éric Felder, Procédés d'usinage.
- [12] A.Chevalier, J.Bohan,A.Molina Guide pratique de l'usinage (tournage, fraisage).
- [13] P.Boudrie, La coupe des métaux version n°5 octobre 2004.
- [14] A.Maurel-Pantel, Etude expérimentale et modélisation par EM du procédé de
fraisage 2009.
- [15] J.L.Jouret, Edition SOMAB NUM 1060 programmation.
- [16] A.Passeron, Techniques d'ingénieur, tournage.
- [17] Y. Altintas, Manufacturing Automation, Metal Cutting Mechanics, Machine Tool
Vibrations and CNC Design, Cambridge University Press, 2000.
- [18] S. Engin, Y. Altintas, Mechanics and Dynamics of General Milling Cutters. Part
II: Inserted Cutters, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.
41, pp. 2195-2212, 2001.
- [19] S.Hwan Suh, S.Kyoon Kang, Dae-Hyuk Chung, Theory and design of CNC
Systems.
- [20] Graham T.Smith, CNC machining technology 1design, Development and CIM
Stratégies.
- [21] Y.Altintas (University of British Columbia), Manufacturing Automation
Second Edition, Metal cutting mechanics, Machine tool vibration, and CNC design.

Annexes