



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ «Abbes LAGHROUR» DE KHENCHELA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE**

Département de Génie Mécanique

N° de série :.....

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

**Etude générale, conception et réalisation
simulée d'une fraise cylindrique à
denture hélicoïdale « Hélice droite 1T ».**

Dirigé par : Dr. Ghelani Laala

Réalisé par :

- Ghouari Chaabane*
- Kourdani Hadjer*

Membres de jury :

- Groune Brahim___ Président ;*
- Himeur Nabil___Examineur.*

Année universitaire 2017 - 2018

Dédicaces

A

- ✚ *Ma famille; mes parents ;*
- ✚ *Ma femme que a toujours était a mes cotés ;*
- ✚ *Mes enfants Karouan; Abdeljalil ;*
- ✚ *Tous mes frères et sœurs ; ainsi que leurs enfants ;*
- ✚ *Tous les étudiants de la promotion 2017/2018;*
- ✚ *Mon encadreur Dr. GHÉLANI Laala ;*
- ✚ *Chef de service ;*
- ✚ *Tous mes amis et collègues.*

Je dédie ce modeste travail.

GHOUARI Chaâbane

Dédicaces

A

- ✚ Mes parents ;*
- ✚ Mon fiancé NABTI Abdelwahed;*
- ✚ Ma petite famille ;*
- ✚ Mes cousins et mes cousines ;*
- ✚ Mes collègues de la promotion 2017/2018 ;*
- ✚ Mon encadreur Dr. GHÉLANI Laala.*

Je dédie ce modeste travail.

KOURDANI Hadjer

Remerciements

C'est un grand plaisir d'exprimer nos gratitudee à notre encadreur, Dr. Ghelani L de nous avoir fait confiance de mener à terme cette recherche sous sa direction.

C'est grâce à lui, que nous avons pu, en effet, découvrir le monde de la recherche et vivre cette expérience très riche sur le plan scientifique et humain. Nous somme très reconnaissant de sa méthode attentive et de ses qualités qui m'ont été d'un grand soutien ;

Aux membres de jury qui ont accepté de faire partie de ce jury de soutenance;

Nous adressons aussi toutes nos gratitudee au chef département de Génie Mécanique : Dr. Abboudi Abdelaziz pour son aide et ses conseils judicieux ;

A tous les enseignants du département de génie mécanique, particulièrement aux enseignants : Chitour. M, khadraoui F, Groune B, Himeur N ;

A tous les professeurs et cadres qui ont contribué à notre formation de prés au de loin ;

Sans oublier nos amis et collègues de la promotion 2017/2018.

Ghouari & Kourdani.

Table des matières

Liste des figures	06
Introduction générale.....	10
Chapitre I : Différents procédés de fabrication mécanique.	
I.1 Généralité.....	12
I.2 Technique de fabrication mécanique.....	12
I.2.1 Obtention par enlèvement de matière	12
I.2.1.1 Tournage.....	12
I.2.1.1.1 Les différents types d'opérations.....	13
(a) Tournage extérieur.....	13
(b) Tournage intérieur.....	14
I.2.1.1.2 Tournage de pièces métalliques.....	15
I.2.1.1.3 Principaux usinages réalisables sur un tour.....	15
(a) Chariotage.....	15
(b) Dressage.....	16
(c) Chanfreinage.....	16
(d) Centrage	16
(e) Le perçage.....	17
(f) Alésage.....	17
(g) Rainurage.....	18
(h) Tronçonnage.....	19
(i) Filetage et taraudage.....	19
(j) Tournage de forme.....	20
I.2.1.2 Fraisage.....	20
I.2.1.2.1 Principe de travail.....	21
I.2.1.2.2 Modes de fraisage.....	21
(a) Fraisage de face.....	21
(b) Fraisage de profil.....	21
(c) Fraisage en opposition.....	22
(d) Fraisage en concordance ou « en avalant ».....	23
I.2.1.3 Perçage.....	23

I.2.1.3.1 Principe de travail.....	24
I.2.1.4 Brochage.....	24
I.2.1.5 Rectification.....	24
I.2.1.6 Découpage.....	25
I.2.1.6.1 Découpage par laser.....	26
I.2.1.6.2 Découpage par jet d'eau.....	27
I.2.1.6.3 Découpage plasma	27
I.2.1.7 Electrifications.....	28
I.2.1.7.1 Usinage en plongée (enfouissement).....	28
I.2.1.7.2 Usinage par découpage à fil	28
I.2.2 Obtention par déformation.....	29
I.2.2.1 Forgeage.....	29
I.2.2.2 Laminage.....	30
I.2.2.3 Emboutissage.....	31
I.2.2.4 Estampage.....	32
I.2.2.5 Matriçage.....	33
I.2.2.6 Extrusion.....	34
I.2.3 Obtention par fusion (moulage).....	34
I.2.3.1 Moulage non permanent (moulage au sable).....	35
I.2.3.2 Moules permanents.....	36
I.2.3.2.1 Moulage en coquille par gravité.....	36
I.2.3.2.2 Moulage sous pression.....	37
I.2.4 Obtention par assemblage.....	37
I.2.4.1 Soudage.....	37
I.2.4.2 Collage.....	39
I.2.4.3 Rivetage.....	40
I.2.4.4 Agrafage.....	40
I.2.5 Obtention par frittage.....	41

Chapitre II : Etude et conception d'une fraise cylindrique à denture hélicoïdale.

II.1 Introduction.....	43
II.2 Définitions.....	43
II.2.1 Principe.....	43
II.3 Modes de coupe.....	45
II.3.1 Fraisage en opposition.....	45
II.3.2 Fraisage en concordance ou fraisage "en avalant".....	46
II.3.3 Fraisage hémisphérique.....	46
II.4 Machines à outils	47
II.4.1 Classification des machines de fraisage.....	47
II.4.2 Différents types de machines.....	48
II.5 Type de montage.....	49
II.5.1 Etau.....	49
II.5.2 Plaque support pour fraiseuse.....	49
II.5.3 Mandrin.....	50
II.6 Outil de coupe.....	50
II.7 Différentes opérations de fraisage.....	51
II.7.1 Surfaçage.....	51
II.7.2 Plans épaulés.....	51
II.7.3 Rainurage	52
II.7.4 Poche	52
II.7.5 Perçage.....	53
II.7.6 Filetage.....	53
II.8 Paramètres de coupe.....	53
II.8.1 Paramètres géométriques de coupe.....	54
II.8.2 Éléments d'outil.....	54
II.8.2.1 Faces et arêtes de l'outil.....	55
II.8.2.2 Outil de coupe à plaquette rapportée.....	58
II.9 Matériaux de l'outil.....	59
II.9.1 Acier Rapide supérieur (ARS).....	60
II.9.2 Carbures.....	60

II.9.3 Cermets.....	60
II.9.4 Céramiques.....	60
II.9.5 Nitrure de bore Cubique (CBN).....	61
II.9.6. Diamant.....	61
II.10 Principe de la coupe des métaux.....	61
II.11 Durée de vie d'un outil de coupe.....	63
II.11.1 Mécanisme d'usure.....	63
II.11.1.1 Processus d'abrasion.....	64
II.11.1.2 Processus d'adhésion.....	64
II.11. 1.3 Processus de fissuration.....	65
II.11.2 Différents types d'usure des outillages.....	65
II.11.2.1 Usure en dépouille.....	65
II.11.2.2 Usure en entaille.....	66
II.11.2.3 Usure en cratère.....	67
II.11.2.4 Ecaillage de l'arête de coupe.....	67
II.11.2.5 Arêtes rapportées.....	68
II.11.2.6 Déformation plastique.....	69
II.11. 2.7 Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne.....	69
II.11.3 Dépendance entre l'usure et le temps.....	70
II.12 Affûtage.....	71
II.12.1 Machine d'affûtage.....	72
II.13 Catégories des outils de fraisage.....	73
II.13.1 Les fraise aciers rapides (A.R.S).....	73
II.13.1.1 Fraises à surfacer	73
II.13.1.2 Fraises 2T.....	74
II.13.1.3 Fraises-disques 3 T.....	76
II.13.1.4. La forme.....	77
II.13.1.5 La denture.....	77
II.13.1.6 Dimensions.....	77
II.13.1.7 Mode de fixation.....	78
II.13.1.8 Construction.....	78
II.13.2 Fraises en carbure	78

Chapitre III : Gamme d'usinage d'un outil de fraisage & son modélisation (simulation)

III.1 Définition.....	79
III.2 Description d'une Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 1T».	79
III.2.1 Arête et faces de coupe et dépouille	79
III.2.2 Etapes de réalisation la Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Héli droit 01Taille».....	80
III.2.2.1 Dessin de fabrication.....	81
III.2.2.2 Gamme d'usinage.....	81
III.3 Caractéristiques technique de la Fraise cylindrique à dent Hélicoïdale « Hélice droite01T».....	87
III.3.1 Matière de la fraise	87
III.4 SOLIDWORKS.....	87
III.4.1 Introduction.....	87
III.4.2 Principes de base d'analyse.....	88
III.4.3 Contraintes de Von Mises.....	89
III.4.3.1Simulation Nom du modèle: Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01Taille»(étude statique).....	90
III.5 Contraintes selon ZZ	93
III.6 Contraintes selon XX.....	94
III.7 Contraintes selon YY.....	95
III.8 Contraintes selon XZ.....	96
III.9 Contraintes selon YZ.....	97
III.10 Contraintes selon XY	98
Conclusion	99
Références bibliographiques	100
Annexe I	101
Annexe II	104

Liste des figures

Chapitre I : Différents procédés de fabrication mécanique.

Fig. I.1 Schéma d'élaboration de tournage mécanique.....	13
Fig. I.2. Usinage externe sur tour.....	14
Fig. I.3.Principales opération de tournage interne sur tour.....	14
Fig. I.4 Schéma représenté l'opération de chariotage.....	15
Fig. I.5 Schéma d'élaboration de dressage.....	16
Fig. I.6 Opération de Chanfreinage.....	16
Fig. I.7 Opération de centrage.....	17
Fig. I.8 Opération de perçage.....	17
Fig. I.9 opération de réalisation d'un alésage.....	18
Fig. I.10 Schéma montré l'opération de rainurage.....	18
Fig. I.11 Opération de tronçonnage.....	19
Fig. I.12. Opération de filetage, (a) filetage extérieur, (b) filetage intérieur.....	19
Fig. I.13 Tournage de forme.....	20
Fig. I.14 Principe de fraisage.....	20
Fig. I.15 Schéma de fraisage de face.....	21
Fig. I.16. Fraisage de profil.....	22
Fig. I.17.Fraisage en opposition.	22
Fig. I.18 Fraisage en avalant.	23
Fig. I.19 Schéma de perçage.	23
Fig. I.20 Nomenclature des broches.....	24
Fig. I.21 Rectification extérieure.....	25
Fig. I.22 Presse hydraulique à découper.	26
Fig. I.23 Machine de découpage par laser.....	26
Fig. I.24 Découpage par jet d'eau.	27
Fig. I.25 Découpage plasma réalisé par un robot industriel.....	27
Fig. I.26 Principe de fonctionnement électroérosion (Enfonçage).....	28
Fig. I.27 Principe de fonctionnement électroérosion (Robot- fil).....	29
Fig. I.28 Schéma d'élaboration par forgeage (pièces forgées).....	29
Fig. I.29 Schéma d'élaboration de laminage.....	31
Fig. I.30 Principe d'emboutissage (pièces forgées).	31

Fig. I.31 Schéma d'élaboration par estampage.....	32
Fig. I.32 Schéma d'élaboration par matriçage.	33
Fig. I.33 Extrusion des pièces de différentes formes.	34
Fig. I.34 Pièce plastique moulée par injection.	34
Fig. I.35 Moulage en sable.....	35
Fig. I.36 Moulage en coquille.....	36
Fig. I.37 Moulage sous pression.....	37
Fig. I.38 Schéma d'assemblage par soudage.....	38
Fig. I.39 Classification des procédés de soudage.....	39
Fig. I.40 Schéma d'assemblage par collage.....	39
Fig. I.41 Schéma d'assemblage par rivetage.....	40
Fig. I.42 Schéma d'une agrafeuse manuelle professionnelle.....	40
Fig. I.43 Plaquette de coupe amovible en céramique frittée.....	41

Chapitre II : Etude et conception d'une fraise cylindrique à denture hélicoïdale.

Fig. II.1 Principes de fraisage de face(en bout).....	44
Fig. II.2 Principes de fraisage de profil.....	44
Fig. II.3 Fraisage en opposition.....	45
Fig. II.4 Fraisage en avalant.....	46
Fig. II.5 Fraise à bout sphérique (hémisphérique).....	46
Fig. II.6 Fraiseuse universelle.....	47
Fig. II.7.a Fraiseuse à console.....	48
Fig. II.8 étau.....	49
Fig. II.9 Plaque support.....	49
Fig. II.10Mandrin.....	50
Fig. II.11 A plaquettes en carbure amovible.....	51
Fig. II.12Plaquette en ARS.....	51
Fig. II.13 Opération de surfacage.	51
Fig. II.14 Fraisage d'épaulements.	52
Fig. II.15 Fraisage de rainures.	52
Fig. II.16 Schéma d'élargissement d'une cavité/poche.	52
Fig. II.17 Opération de perçage.	53

Fig. II.18 Opération de filetage.	53
Fig. II.19 Paramètres de coupe.	54
Fig. II.20 Paramètres géométriques de coupe.	54
Fig. II.21 Illustration des plans et angles en main d'une fraise, [AFNOR, 1993].....	55
Fig. II.22 Angles en travail de la partie active d'une fraise.....	57
Fig. II.23 Schéma des Plaquettes.....	58
Fig. II.24 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant.....	59
Fig. II.25 Géométrie de la formation d'un copeau	62
Fig. II.26 Critère d'usure VB.....	63
Fig. II.27 Processus d'usure par abrasion.	64
Fig. II.28 Processus d'usure par adhésion.....	64
Fig. II.29 Usure en dépouille (abrasion).....	66
Fig. II.30 Usure en entaille (adhérence).....	66
Fig. II.31 Usure en cratère (chimique).....	67
Fig. II.32 Usure mécanique (Ecaillage).....	68
Fig. II.33 Usure par adhérence (arrête rapportée).....	68
Fig. II.34 Usure thermique (déformation plastique).....	69
Fig. II.35 Usure en peigne	70
Fig. II.36 Courbe d'usure par rapport au temps.....	70
Fig. II.37 Affûteuse universelle.....	72
Fig. II.38 Fraise 1T	73
Fig. II.39 Fraise 2T.....	73
Fig. II.40 Fraise 3T.....	73
Fig. II.41 Fraise 1T.....	74
Fig. II.43 Fraise 2T à queue cylindrique.....	74
Fig. II.44 Fraise 2 Travageuse.....	74
Fig. II.45 Fraise 2 T à queue cône morse.....	75
Fig. II.46 Fraise à rainurer.....	75
Fig. II.47. Fraise 2T cylindriques à entraînement par tenons.....	75
Fig. II.48 Fraise cloche à entraînement par tenons.....	76
Fig. II.49 Fraise-disques 3T.....	76
Fig. II.50 Fraise – disque 3T, à dentures alternées.....	76
Fig. II.51 Fraise de forme.....	77

Fig. II.52 Fraise de différente denture, (a) Dentures hélicoïdales à gauche, (b) dentures hélicoïdales à droite.....	77
--	----

Chapitre III : Gamme d'usinage d'un outil de fraisage & Son modélisation (simulation).

Fig. III.1 Schéma descriptive d'une fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01T».....	80
Fig. III.2 Schéma descriptive le Profile de la fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01T».....	81
Fig. III.3 Débitage de la matière première en HSS.....	81
Fig. III.4 Dressage la surface plane.....	82
Fig. III.5 Opération de chariotage.....	82
Fig. III.6 Schéma de centrage.....	83
Fig. III.7 Opération de perçage	83
Fig. III.8 Opération d'alésage et chanfreinage.....	83
Fig. III.9 Opération de chambrage.....	84
Fig. III.10 Opération de taillage les dents.....	86
Fig. III.11 Opération de rectification plane.....	86
Fig. III.12 Opération de rectification intérieure.....	86
Fig. III.13 Opération d'affûtage de l'angle de coupe.....	86
Fig. III.14 Schéma de maillage volumique de la Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « «Hélice droite 01T ».....	91
Fig.III.15 Schéma de résultats de l'étude.....	92
Fig .III.16 Schéma de contraintes selon ZZ.....	93
Fig.III.17 Schéma de contraintes selon XX.....	94
Fig.III.18 Schéma de contraintes selon YY.....	95
Fig.III.19 Schéma de contraintes selon XZ.....	96
Fig.III.20 Schéma de contraintes selon YZ.....	97
Fig.III.21 Schéma de contraintes selon XY.....	98

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 à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01Taille», nous avons proposé une gamme d'usinage développée, à l'aide des mesures expérimentales fiable basé sur des logiciels numériques, Conception et Fabrication Assisté par Ordinateur « C.F.A.O » 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.

L'ensemble sera clôturé 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 :

- (1) Obtention par enlèvement de la matière qui est l'usinage ou coupe de matière et qui occupe une place de première importance en construction mécanique;
- (2) Obtention par sans enlèvement de matière et parmi lesquelles on peut citer:
 - (a) Déformation plastique ;
 - (b) Fusion (fonderie) ;
 - (c) Assemblage (rivetage, boulonnage, soudage,...);
- (3) Obtention par frittage. [1]

I.2 Technique de fabrication mécanique

I.2.1 Obtention par enlèvement de matière

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 ;
- Electroérosion....

I.2.1.1 Tournage

La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme c'est le mouvement de coupe M_e . 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). [1]

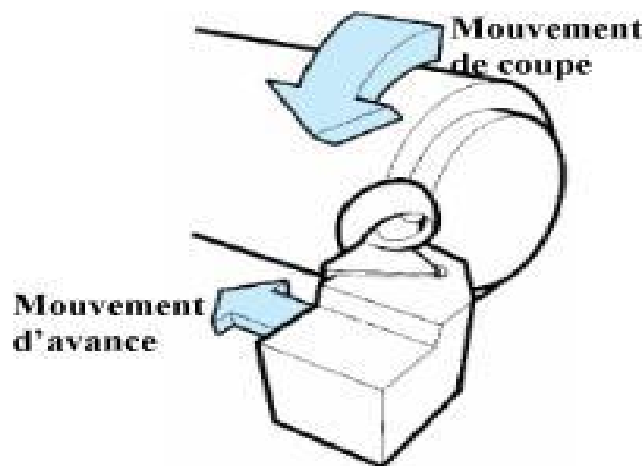


Fig. I.1 Schéma d'élaboration de tournage mécanique.

I.2.1.1.2 Les différents types d'opérations

(a) Tournage extérieur

On distingue :

- 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. [1]

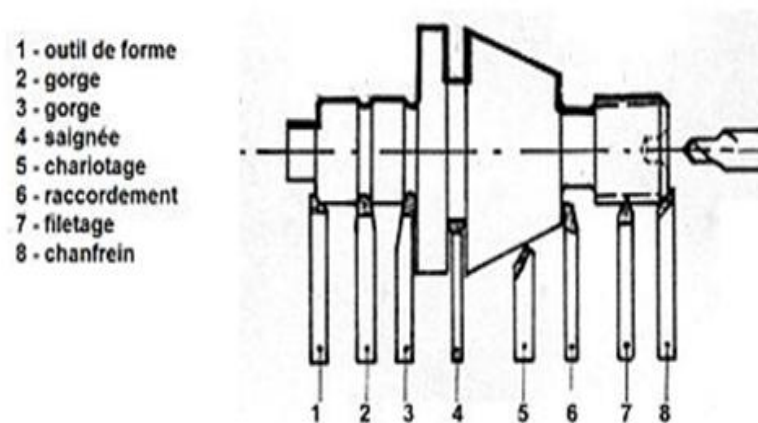


Fig. I.2. Usinage externe sur tour.

(b) Tournage intérieur

Usinage interne sur tour :

- Alésage ;
- Dressage ;
- Tournage intérieur par contournage ;
- Tournage de dégagement, gorges ;
- Taraudage, réalisation d'un filetage intérieur ;
- Chambrage. [1]

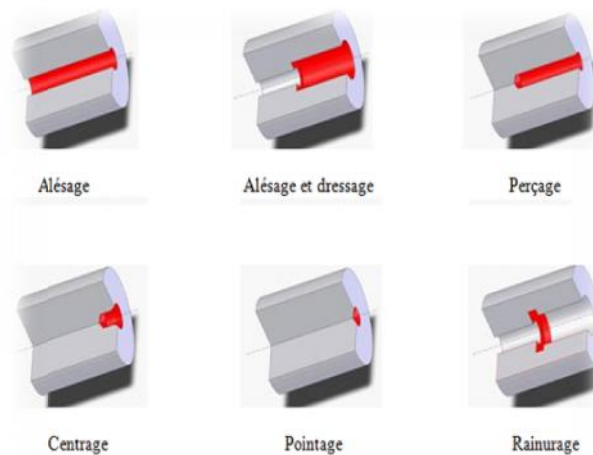


Fig. I.3.Principales opération de tournage interne sur tour.

I.2.1.1.3 Tournage de pièces métalliques

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

- (1) écroûtage 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. [1]

I.2.1.1.4 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). [2]

(a) Chariotage

Est une opération consistant à usiner sur un tour un cylindre d'un certain diamètre par déplacement de l'outil de coupe suivant un axe parallèle à l'axe de rotation de la pièce. .

(Voir Fig. I.4). [6]

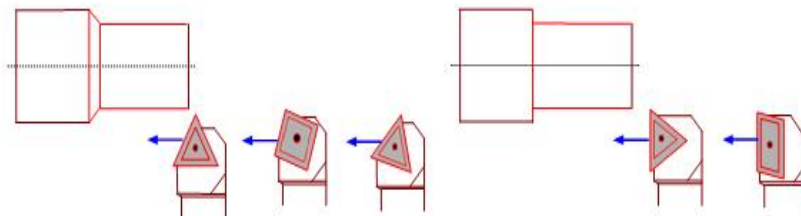


Fig. I.4 Schéma représenté l'opération de chariotage

(b) Dressage

Est l'opération qui consiste à usiner une surface plane (extérieure ou intérieure) perpendiculaire à l'axe de la broche. (Fig.I.5). [2]

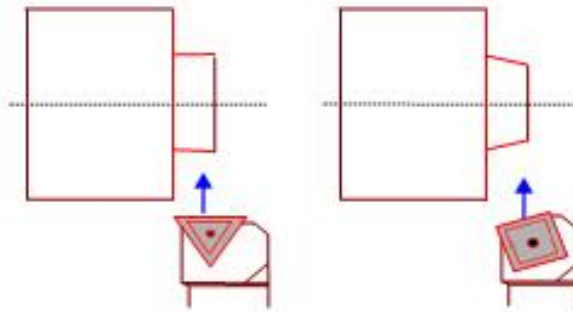


Fig. I.5 Schéma d'élaboration de dressage.

(c) Chanfreinage

Est l'opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension, de façon à supprimer un angle vif. (Voir Fig. I.6). [2]

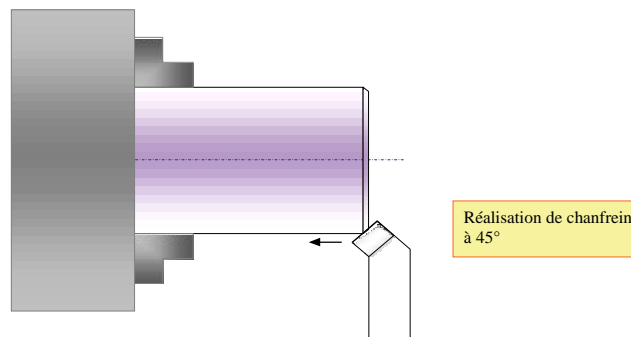


Fig. I.6 Opération de Chanfreinage.

(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 (voir Fig. I.7). [2]

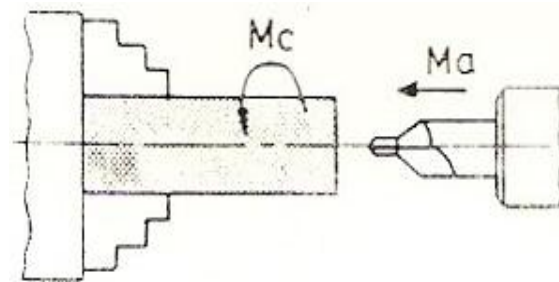


Fig. I.7 Opération de centrage.

(e) Le perçage

Est l'opération qui consiste à usiner un trou dans la pièce (débouchant ou borgne) à l'aide d'une forêt. Souvent, l'axe du trou est confondu avec celui de la pièce (Fig. I.8). [2]

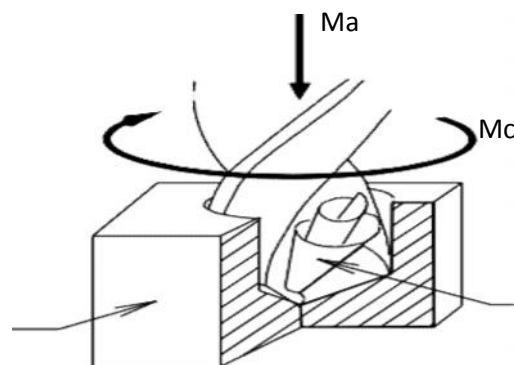


Fig. I.8 Opération de perçage.

(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). [2]



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

(g) Rainurage

Est l'opération qui consiste à usiner une rainure (association de 3 plans) intérieure ou extérieure. Celle-ci peut servir par exemple pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique (voir Fig. I.10). [3]



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

Tronçonnage

Est l'opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin de détacher un tronçon. (Fig. I.11). [3]

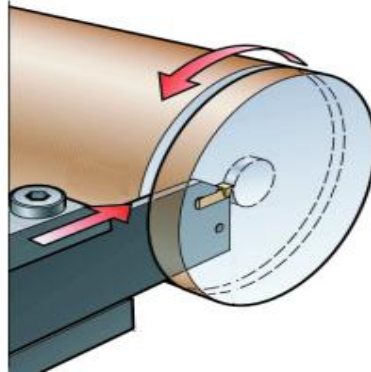


Fig. I.11 Opération de tronçonnage.

(h) Filetage et taraudage

L'outil, dont le déplacement est longitudinal, creuse sur la pièce des rainure hélicoïdales laissant leur relief le filet, suivent la forme de l'outil on obtient un filet triangulaire, trapézoïdale, rond, carré (Fig. I.12). [3]

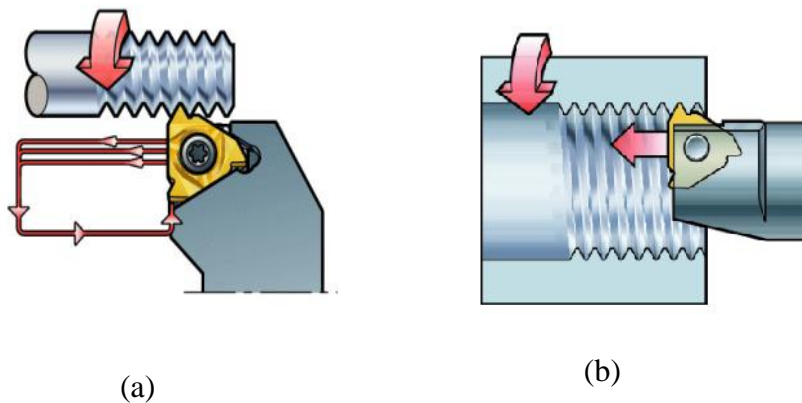


Fig. I.12. Opération de filetage, (a) filetage extérieur, (b) filetage intérieur.

(i) Tournage de forme

Consiste à exécuter des pièces de révolution complexe: sphère, cylindre, plan, cône... (Fig. I.13). [3]



Fig. I.13 Tournage de forme.

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.14). 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. [3]

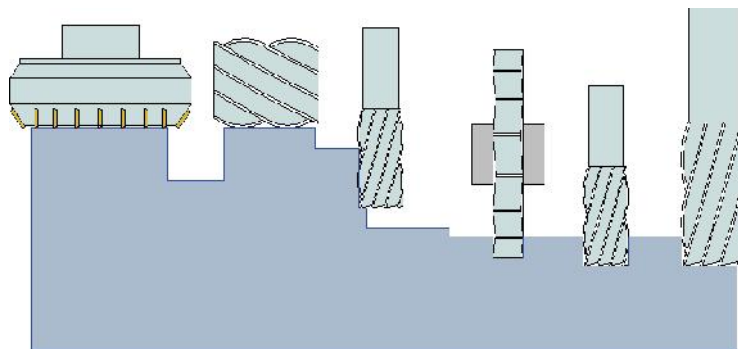


Fig. I.14 Principe de fraisage.

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 axes orthogonaux d'autre part. [3]

I.2.1.2.2 Modes de fraisage

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

(a) Fraisage de face

Dans ce mode, l'axe de la fraise est perpendiculaire au plan fraisé (Fig. I.15). 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 ». [4]

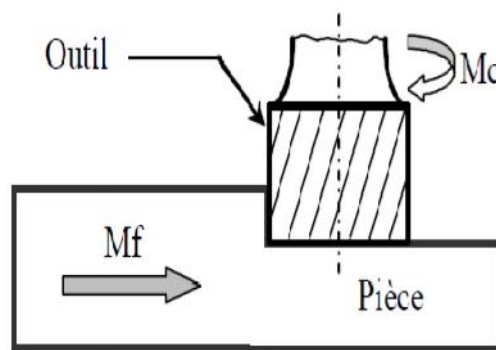


Fig. I.15 Schéma de fraisage de face.

(b) Fraisage de profil

Dans ce mode, la génératrice de la fraise est parallèle à la surface usinée (Fig. I.16). 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 ». [4]

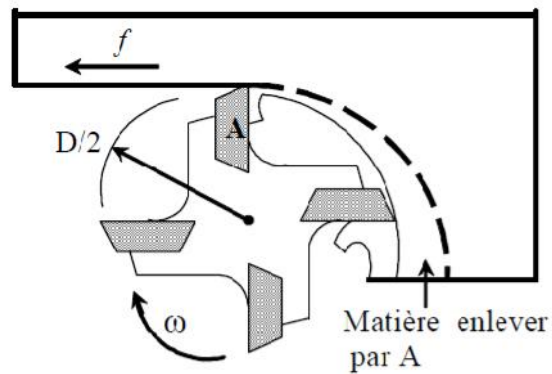


Fig. I.16. Fraisage de profile.

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

(c) 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.17). [5]

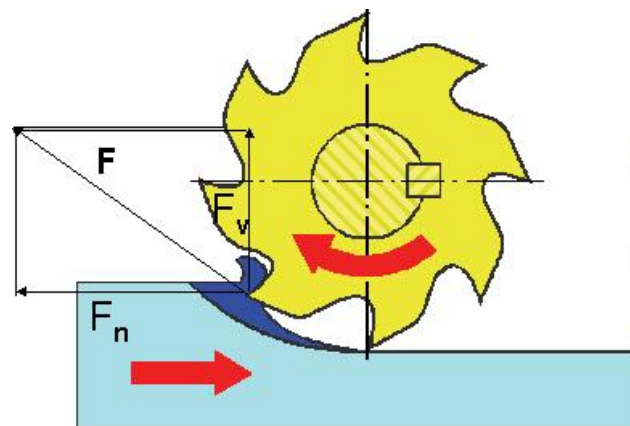


Fig. I.17.Fraisage en opposition.

(d) 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.18). [5]

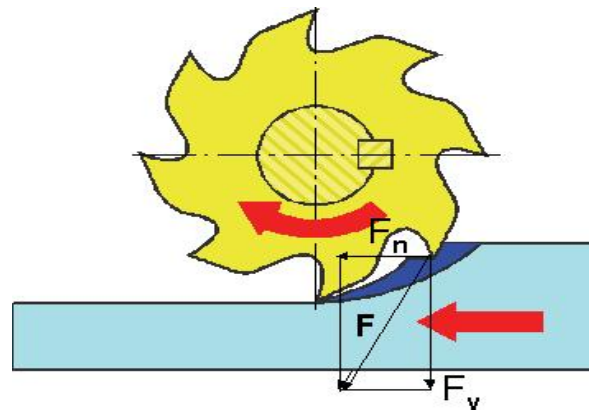


Fig. I.18 Fraisage en avalant.

On peut également effectuer un fraisage combiné, c'est-à-dire de face et de profilé en même temps.

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.19). 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. [6]

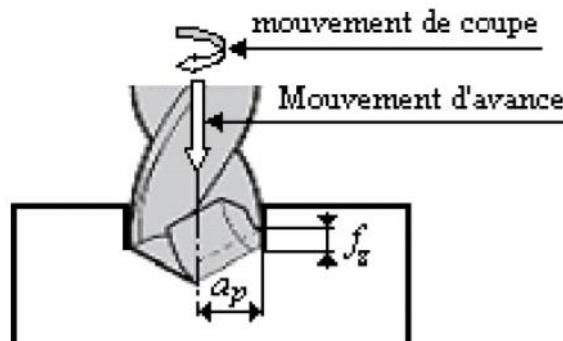


Fig. I.19 Schéma de perçage.

I.2.1.3.1 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. [6]

I.2.1.4 Brochage

Le brochage est un procédé d'usinage fondé sur l'utilisation d'un outil broche monté sur une brocheuse. 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.21). Le brochage intérieur nécessite que la broche puisse traverser la pièce. Il est donc nécessaire de réaliser au préalable un trou débouchant. [6]



Fig .I.20 Nomenclature des broches

I.2.1.5 Rectification

La rectification est bel et bien un procédé d'usinage par enlèvement de copeaux. Une meule constituée de matière abrasive vient arracher à la pièce de minuscules fragments qui sont éjectés (contrairement à l'usinage par arrachement de copeaux) , les températures associées à ce procédé sont très élevées dans la zone de coupe, c'est pourquoi les copeaux ont l'apparence d'étincelles (Fig. .I.21).

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.

La figure (Fig.I.21) illustre d'une manière grossière le procédé d'enlèvement de copeau associé à la rectification. 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. Il a trois types de formes principales que l'on rectifie : surfaces planes, de révolutions intérieures et extérieures. [6]



Fig. I.21 Rectification extérieure.

Avantages de la rectification

- Possibilité de s'attaquer aux matériaux les plus durs
- Pouvoir atteindre des tolérances dimensionnelles de l'ordre du micromètre (0,001 mm) et donc d'usiner des pièces plus précises
- Obtenir un état de surface poussé ($< 0,1 Ra$). [6]

I.2.1.6 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 (voir la figure ci-dessous). [6]



Fig. I.22 Presse hydraulique à découper.

I.2.1.6.1 Découpage par laser

Est un procédé de fabrication qui consiste à découper la matière grâce à une grande quantité d'énergie générée par un laser et concentrée sur une très faible surface. Cette technologie est majoritairement destinée aux chaînes de production industrielles, mais peut également convenir aux boutiques, aux établissements professionnels et aux tiers-lieux de fabrication. Les performances de la découpe laser sont en constante évolution : diversification des matériaux, augmentation de l'épaisseur de la découpe, finalisation du rendu. Ces critères d'amélioration sont liés notamment aux progrès réalisés en matière de sources laser. Le laser peut être pulsé (source de type YAG), continu (source CO₂ ou azote). (Fig. I.23). [6]



Fig. I.23 Machine de découpage par laser.

I.2.1.6.2 Découpage jet d'eau

Le découpage au jet d'eau est un procédé de fabrication qui utilise un jet d'eau hyperbare pour découper la matière (exemples : mousse, cuir, matériaux métalliques, matériaux composites, produits agroalimentaires, etc.).[7]



Fig. I.24 Découpage par jet d'eau.

I.2.1.6.3 Découpage plasma

Est une forme d'éclair domestiqué. Dans la nature, la gaine de l'éclair se déplace très rapidement sur une grande distance, cet arc électrique naturel ionise l'air qu'il traverse et libère jusqu'à 40 000 C et plus dans la gaine immédiate de l'éclair. Le principe de la découpe au plasma est semblable, où l'arc électrique géant de l'éclair se déplaçant sur de grandes distances, des kilomètres parfois, est cette fois fixe, de très petite taille (quelques Millimètres) et ce sont les gaz qu'on y frotte qui se déplacent à une vitesse proche du son. (Fig. I.25). [7]



Fig. I.25 Découpage plasma réalisé par un robot industriel.

I.2.1.7 Électroérosion

La pièce à usiner 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 reliée 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 à la forme complémentaire de la forme à réaliser ;

Les particules du métal brûlé sont entraînées par le liquide diélectrique. [7]

I.2.1.7.1 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.26). [3]

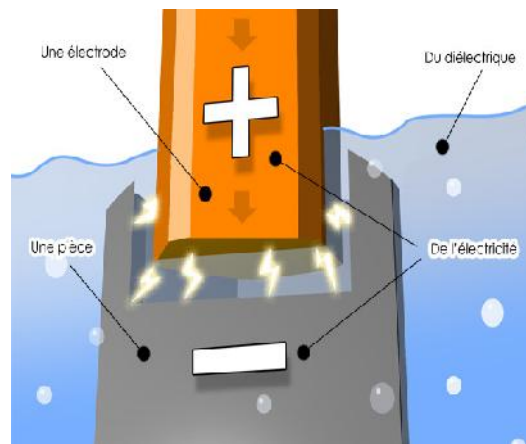


Fig. I.26 Principe de fonctionnement électroérosion (Enfonçage).

I.2.1.7.2 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.27). Cette technique est très utilisée pour l'obtention de micro-pièces de haute précision ainsi que pour l'élaboration des-outils que nous retrouvons sur les machines d'EE de fraisage ou de perçage. [7]

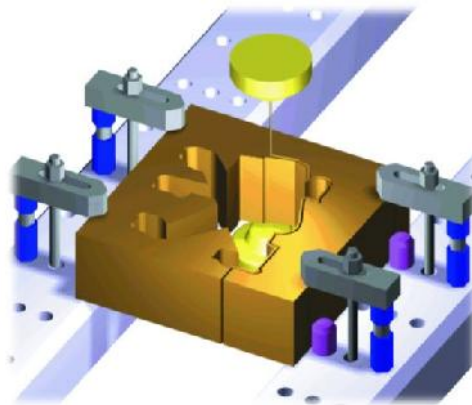


Fig. I.27 Principe de fonctionnement électroérosion (Robot- fil).

Avantage

- Très bonne précision et bon état de surface (identique à la rectification).
- Possibilité de percer des trous très fins.
- Présence d'une couche dite couche blanche en général dure dans laquelle les caractéristiques du matériau de base sont modifiées (risque de microfissures, départs d'amorces de rupture pour les pièces soumises à des sollicitations de fatigue).
- Pas d'actions mécaniques entre la pièce et l'outil donc pas de bridage nécessaire.

[7]

Inconvénients

- Enlèvement de matière lent.
- Consommation électrique élevée.
- Érosion rapide de l'électrode (même en cuivre). [7]

I.2.2 Obtention par déformation

I.2.2.1 Forgeage

Est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur une barre de métal, à froid ou à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme voulue

Le forgeage implique un dispositif de frappe (marteau, masse, martinet ou marteau-pilon) et un support (enclume ou matrice).

La forge ne permet pas d'obtenir les mêmes marges de tolérance que l'usinage, ce qui la réserve aux pièces requérant une forte résistance mais une faible précision (boulonnerie, outillage). Le forgeage se révèle inutilisable pour obtenir directement les pièces mécaniques ayant besoin d'une forte précision dimensionnelle.

En revanche, les pièces obtenues sont plus résistantes aux contraintes mécaniques car la déformation des métaux engendre un grand nombre de phénomènes métallurgiques, tant au niveau microscopique que macroscopique. Parmi ces phénomènes on trouve notamment le corroyage, qui lui-même est à l'origine du fibrage du métal. (Fig. I.28). [7]

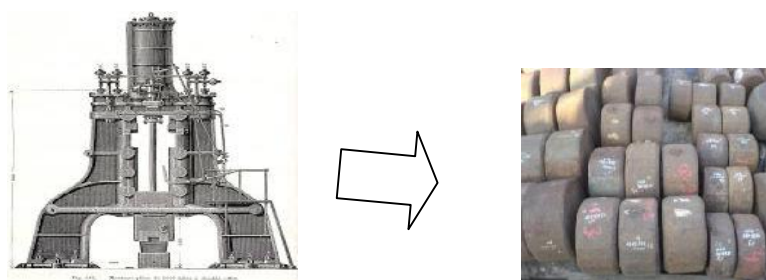


Fig. I.28 Schéma d'élaboration par forgeage (pièces forgées).

- **Avantages**

Les principaux avantages des procédés de forgeage sur les autres techniques sont :

- l'amélioration des caractéristiques mécaniques du métal,
- le gain de matière mise en œuvre et la réduction du temps d'usinage.

- **Inconvénients**

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

I.2.2.2 Laminage

Est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme du métal ou tout autre matériau sous forme pâteuse comme le papier ou les pâtes alimentaires. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres contrarotatifs appelés laminoir (Fig. I.29). [8]

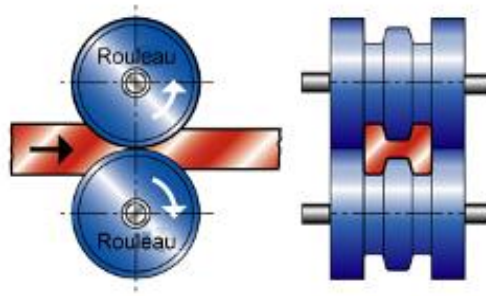


Fig. I.29 Schéma d'élaboration de laminage.

I.2.2.3 Emboutissage

Est un terme qui définit 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. (voir fig. I.30). [8]

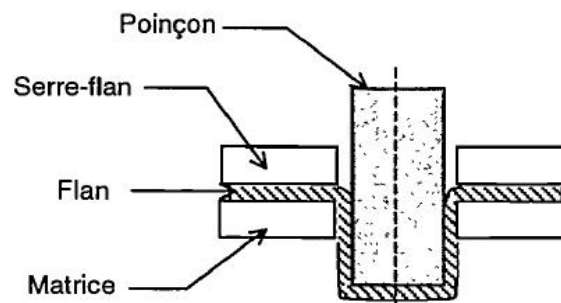


Fig. I.30 Principe d'emboutissage (pièces forgées) .

I.2.2.4 Estampage

La matrice inférieure est une pièce fixe, tandis que la partie supérieure est un pilon mobile qui vient frapper la pièce afin de la déformer. L'estampage peut être réalisé aussi bien à température ambiante qu'à une température plus élevée. Ce procédé de fabrication, utilisé depuis des centaines d'années, a une longue tradition dans l'industrie du façonnage des métaux.

Les mécanismes de ce procédé sont toujours les mêmes mais les techniques des machines employées ont grandement évolué, faisant de l'estampage un procédé de fabrication de haute précision. Semblable aux autres techniques de forge, l'estampage améliore les propriétés du matériau de la pièce finale (voir fig. I.31). [8]

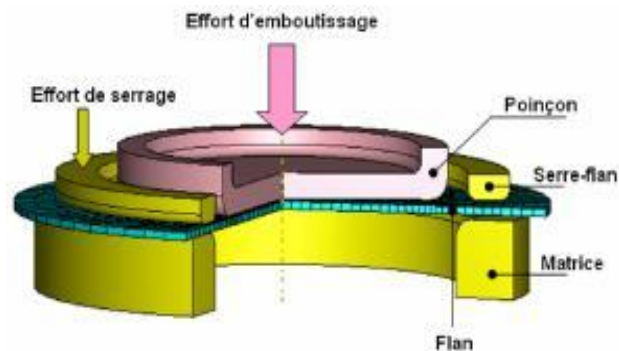


Fig. I.31 Schéma d'élaboration par estampage

• Avantages

L'estampage offre tous les avantages typiques du procédé de fabrication de forge. Les plus importants sont :

- Une bonne finition de surface ;
- Des propriétés mécaniques améliorées ;
- Des bavures recyclables ;
- Une amélioration de la résistance du métal grâce à l'alignement du grain le long des zones de stress potentiel.

• Inconvénients

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Prix de revient élevé des matrices rapidement « usées ». [8]

I.2.2.5 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. On présente dans l'outillage une ébauche. Celle-ci peut être préparée en forge libre (éventuellement à la main pour les pièces de petites dimensions) ou à l'aide de matrices d'ébauche. Cette opération a une très grande importance pour le corroyage et pour l'orientation des fibres et que l'on retrouvera dans la pièce finale.

L'excédent de métal file en bavure dans le logement prévu à cet effet. La bavure est ensuite découpée en suivant le contour de la pièce.

Les pièces matricées présentent des caractéristiques mécaniques remarquables suite à des déformations plastiques importantes et rapides que le matricage met en jeu, le matricage affine la structure et permet l'orientation des fibres; ceci confère aux pièces matricées des caractéristiques générales élevées avec, en particulier, une grande résistance à la fatigue. (Voir fig. I.32). [9]

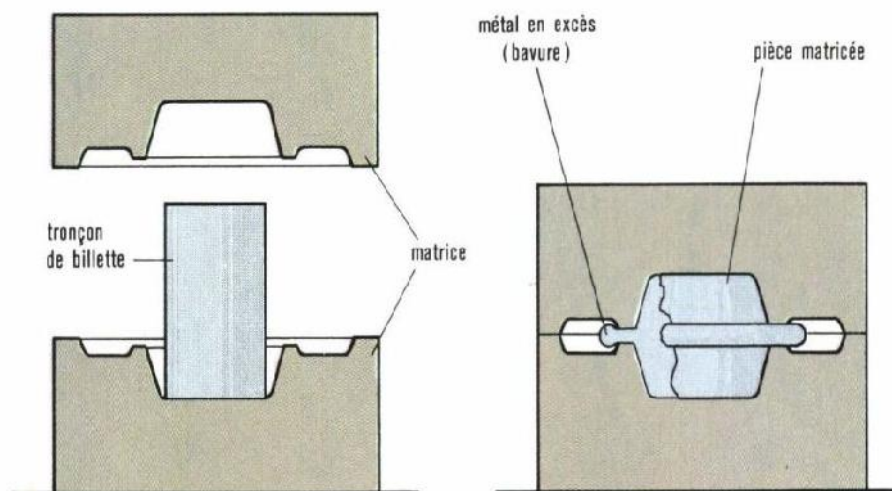


Fig. I.32 Schéma d'élaboration par matricage.

I.2.2.6 Extrusion

Est un procédé de fabrication mécanique par lequel un matériau compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. On forme en continu un produit long et plat. Les cadences de production sont élevées (voir fig. I.33). [9]



Fig. I.33 Extrusion des pièces de différentes formes.

Ñ **Avantages**

- Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;
- Bons états de surface ;

Sections des profilés pouvant être creux et très complexes. [9]

• **Inconvénients**

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

I.2.3 Obtention par fusion (moulage)

Est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera placé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un modèle. Le tirage consiste donc à placer un matériau (liquide, pâte, poudre, feuille, plaque, paraison, préforme, pastille, etc.) dans un moule dont il prendra la forme (Voir Fig. I.34). [9]



Fig. I.34 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. (Voir fig. I.35). [9]

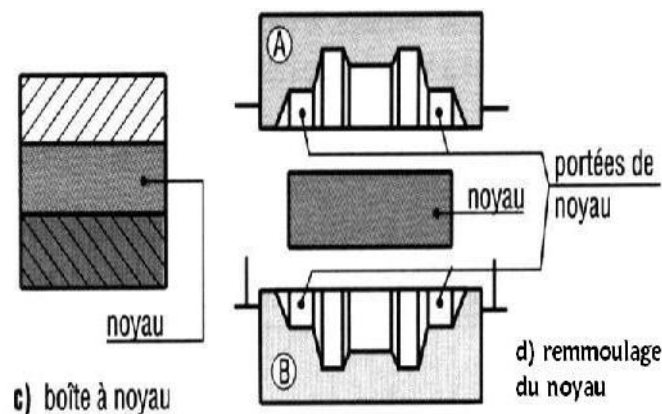


Fig. I.35 Moulage en sable.

I.2.3.2 Moules permanents

Est un moulage en métal réutilisable plusieurs fois et est souvent utilisé dans les productions de masse et dans les fonderies (carrosseries, usinage...). Le moule est le même pour toutes les pièces de la série. [9]

Un moule permanent en fonderie à une durée de vie de 150.000 injections pour les alliages d'aluminiums, 500.000 à 1 million pour les alliages de zinc et 20.000 à 40.000 pour les alliages de cuivre. Le moule est induit d'un poteyage (liquide de protection pour le moule) avant de mettre du métal en fusion dedans pour protéger le moule.

La dépouille est prévue pour extraire la pièce sans provoquer l'effritement lors de la sortie du moule. 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.

I.2.3.2.1 Moulage en coquille par gravité

Est du métal en fusion coulé à la pression atmosphérique (comme pour le moulage sable) dans un moule divisé en deux parties. Elle permet de donner la forme extérieure de la pièce moulée. On coule directement le métal liquide à l'aide d'une louche ou d'une petite poche de coulée par gravité dans l'empreinte du moule (Voir Fig. I.36). [9]

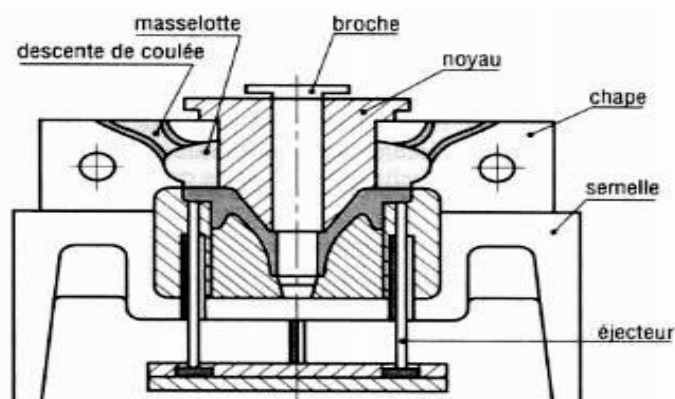


Fig. I.36 Moulage en coquille.

I.2.3.2.2 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. 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. (voir fig. I.37). [10]

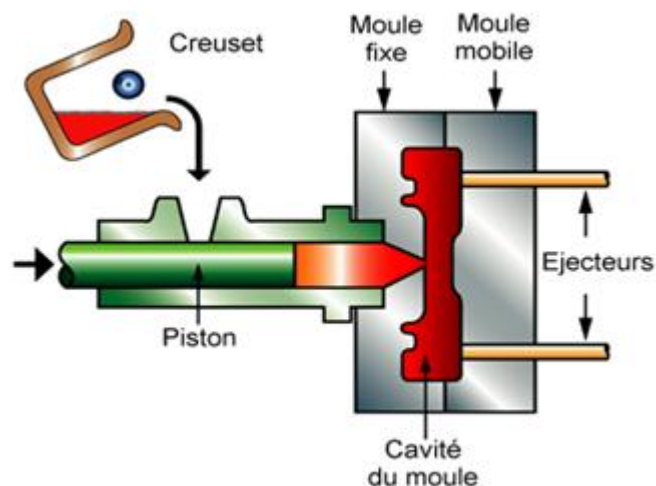


Fig. I.37 Moulage sous pression.

I.2.4 Obtention par assemblage

I.2.4.1 Soudage

Est un procédé d'assemblage permanent. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces interatomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact suivant des surfaces parfaitement compatibles et exemptes de toute pollution, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée

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 ; (voir fig. I.38). [10]
- **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).

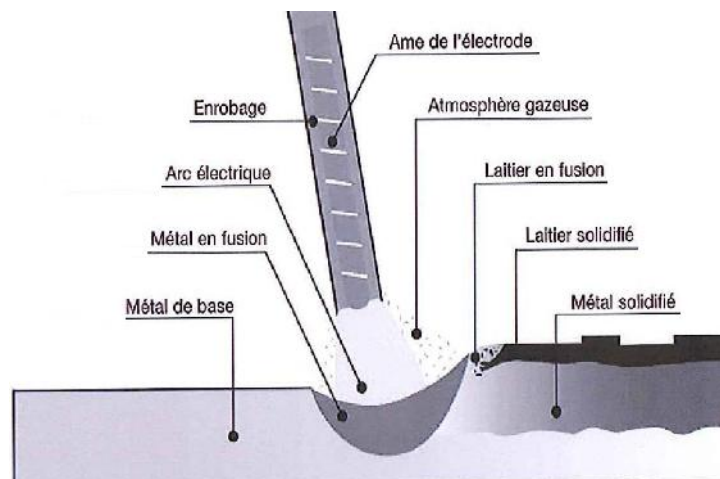


Fig. I.38 Schéma d'assemblage par soudage .

On peut classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la figure (I. 39). [10]

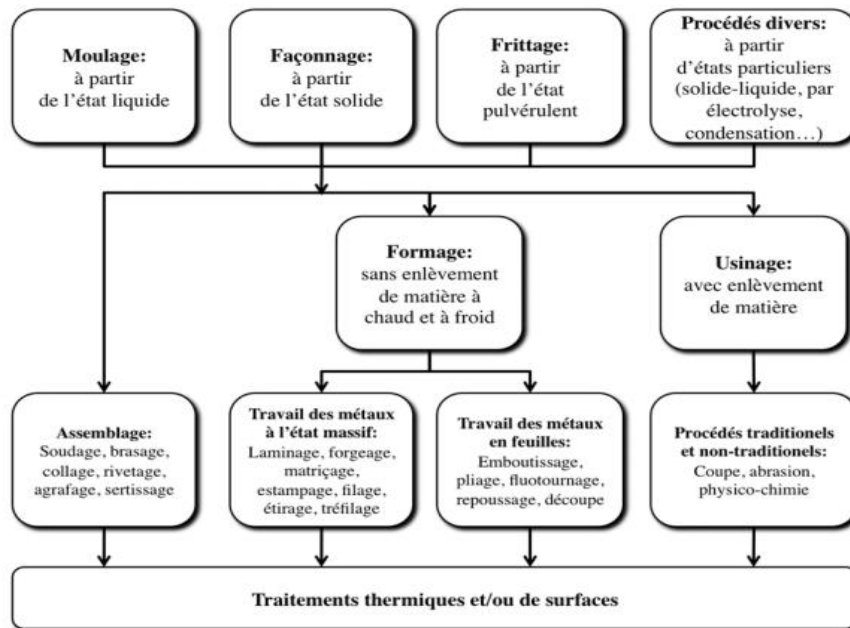


Fig. I.39 Classification des procédés de fabrication mécanique.

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 (voir fig. I.40): [10]

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

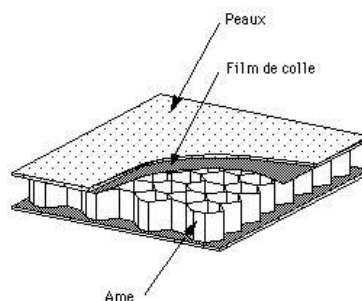


Fig. I.40 Schéma d'assemblage par collage.

I.2.4.3 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. 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. (Voir fig. I.41). [11]

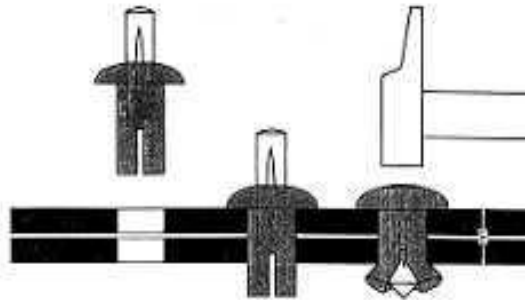


Fig. I.41 Schéma d'assemblage par rivetage.

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 (voir fig. I.42). [11]



Fig. I.42 Schéma d'une agrafeuse manuelle professionnelle.

I.2.5 Obtention par frittage

Bien qu'il n'existe pas de définition du frittage faisant l'unanimité, il peut être décrit comme une consolidation d'un matériau (par exemple une poudre), obtenue en minimisant (Fig. I.43) l'énergie du système grâce à un apport d'énergie (thermique, mécanique, avec un laser...).

Le frittage est une des meilleures méthodes pour obtenir des céramiques et des prototypes de pièces mécaniques. Voici deux définitions plus précises du frittage :

- Le frittage est un processus faisant évoluer par traitement thermique un système constitué de particules individuelles (ou un aggloméré poreux), en l'absence de pression externe exercée ou sous l'effet d'une telle pression, de sorte qu'au moins certaines des propriétés du système (sinon toutes) soient modifiées dans le sens d'une réduction de l'énergie libre globale du système. Parallèlement, cette évolution entraîne une diminution importante (sinon complète) de la porosité initiale. Enfin, le processus suppose qu'au moins une phase solide existe constamment pendant tout le traitement thermique, de façon à conserver une certaine stabilité de forme et de dimension au système considéré. » [12]
- Le frittage est la consolidation par action de la chaleur d'un agglomérat granulaire plus ou moins compact, avec ou sans fusion d'un ou de plusieurs de ses constituants ».



Fig. I.43 Plaquette de coupe amovible en céramique frittée.

- **Avantage :**

La métallurgie des poudres offre plusieurs avantages pour la réalisation de pièces mécaniques, notamment des avantages techniques comme :

- des tolérances semblables à celle des pièces usinées, une précision bien meilleure pour les dimensions situées dans des plans perpendiculaires au sens de compression,
- l'obtention de formes complexes sans répercussion sensible sur les coûts,
- la réalisation de formes et de profils irréalisables industriellement par d'autres méthodes,
- une très bonne reproductibilité quelle que soit la série,
- une très bonne résistance à l'usure, un faible coefficient de frottement, un bon état de surface, et leur corollaire : une réduction du temps de rodage,
- une possibilité de lubrification à vie. [12]

- **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. [12]

Chapitre II

Etude et conception d'une fraise cylindrique à denture hélicoïdale

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. [1]

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 . [1]

II.2.1 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 ;
- des surfaces planes obliques à l'axe de rotation ;
- des surfaces perpendiculaires à l'axe de la fraise ;
- des 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. [1]

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). [1]

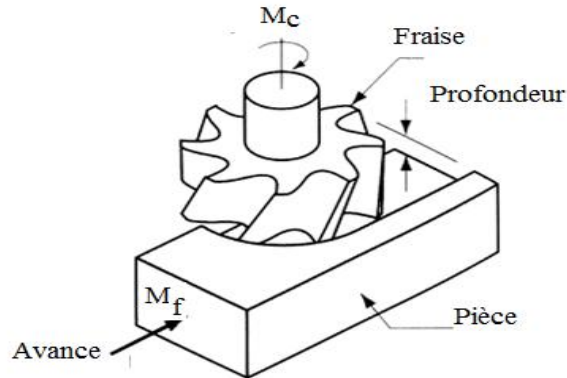


Fig. II.1 Principes de fraisage de face(en bout).

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 voir (Fig. II.2). [1]

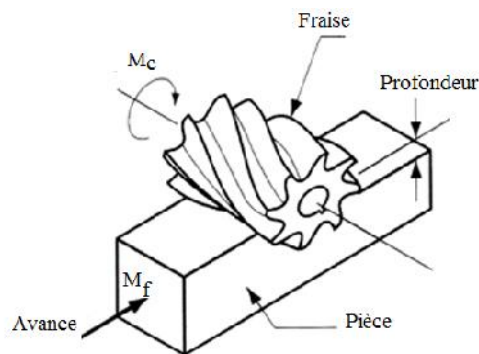


Fig. II.2 Principes de fraisage de profil.

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.3 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. [2]

II.3.1 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 (voir Fig. II.3). [2]

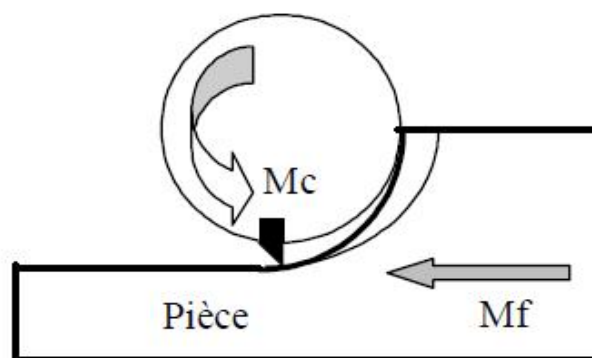


Fig. II.3 Fraisage en opposition.

II.3.2 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 (voir Fig. II.4). [2]

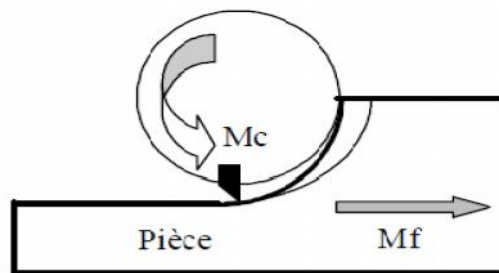


Fig. II.4 Fraisage en avalant.

II.3.3 Fraisage hémisphérique

Une fraise à bout hémisphérique aussi appelée fraise sphérique (voir 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. [3]



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

II.4 Machines – outils

Les fraiseuses ont supplanté certaines machines (raboteuses, étaux limeurs) pour l'usinage de surfaces planes. Ces machines (voir 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. [3]



Fig. II.6 Fraiseuse universelle.

II.4.1 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.

- Par position de la broche (à broche horizontale, verticale, orientable) ;
- Par type de commande (commande manuelle, numérique CN.) ;
- Par dimensions (par la course de déplacement sur l'axe X, par la course de déplacement sur les trois axes principaux X, Y, Z) ;
- Par architecture (à console, à banc, à table croisée, à table inclinable à montant mobile, à portique fixe, à portique mobile). [3]

II.4.2 Différents types de machines

La figure II.7 ci-dessous indique les éléments principaux d'une fraiseuse universelle à plateau tournant et palettes interchangeables. Ces machines comportent :

- une table destinée à recevoir la pièce ;
- une broche qui reçoit successivement les différents outils. La broche est logée dans un porte-broche que l'on nomme aussi poupée ou, lorsqu'il est de forme allongée, coulant ou bélier. La table et la broche se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre par au moins trois mouvements perpendiculaires (X, Y, Z).

La disposition des éléments varie beaucoup en fonction de l'architecture de chaque machine. [3]

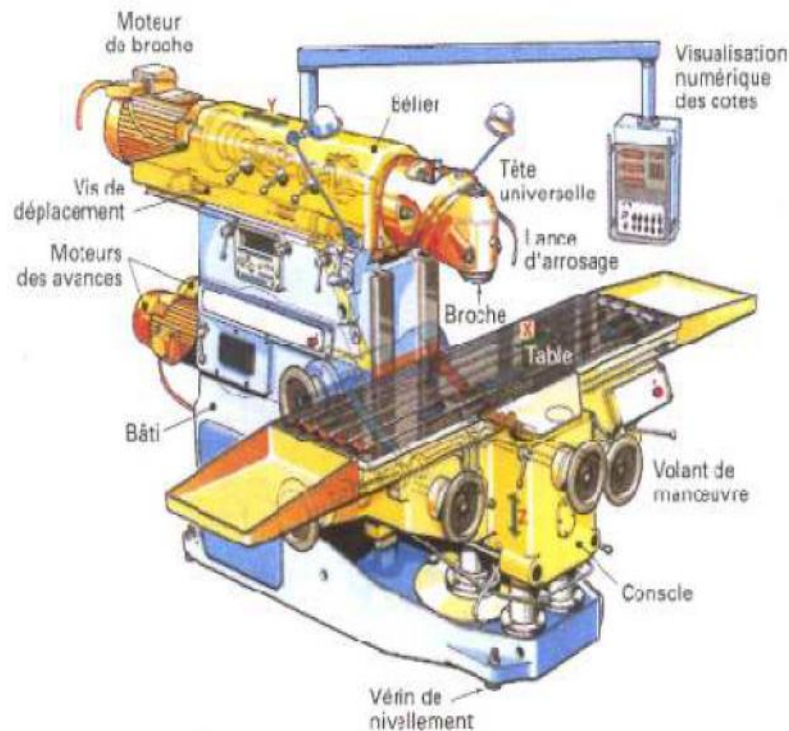


Fig. II.7. Fraiseuse à banc à commande numérique.

II.5 le type de montage

Actuellement en production, il existe trois types de montage :

II.5.1 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. [3]



Fig. II.8 étai.

II.5.2 Plaque support pour fraiseuse

Elle permet de fixer les pièces minces grâce aux trous taraudés M8 situés tous les 30 mm. La plaque est ensuite mise en position dans l'étau de la fraiseuse pour l'usinage. Plaque : 250x150 (8 x 5(trous)), trous distants de 30 mm et taraudés M8. [3]



Fig. II.9 Plaque support

II.5.3 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°).

Diamètre maxi :

- avec mors 0 normal = 120mm
- avec mors grand 0 = 220mm
- Le mandrin dédié au perçage sur une machine conventionnelle

On l'utilise pour les pièces de formes extérieures cylindriques.

On usine une succession de trou situé sur un 0 fixe et espacé d'un angle constant (multiple de 45° ou 60°).

Diamètre maxi :

- avec mors 0 normal = 80mm [3]



Fig. II.10 Mandrin.

II.6 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 voir la (Fig II.11) et d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe voir la (Fig II.12). 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 fraisage, 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, Etat De Surface ;
- Machine : Type, Puissance, Conditions D'utilisation Et Caractéristiques ;
- Stabilité, Rigidité De La Prise De Pièce Et De La Pièce. [4]



Fig. II.11 Plaquettes en carbure amovible.



Fig. II.12 Plaquette en ARS.

II.7 Différentes opérations de fraisage

II.7.1 Surfaçage

Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise. (Surface rouge) voir Fig. II.13. [4].



Fig. II.13 Opération de surfaçage.

II.7.2 Plans épaulés

C'est l'association de deux plans perpendiculaires. (Surfaces vertes) voir Fig. II.14. [4].

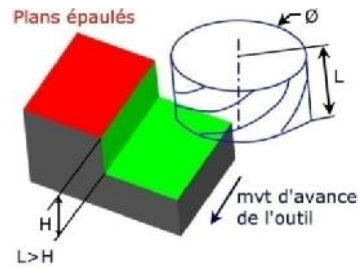


Fig. II.14 Fraisage d'épaulements.

II.7.3 Rainure

C'est l'association de trois plans. Le fond est perpendiculaire au deux autres plans. (Surfaces vertes) voir Fig. II.15. [4]

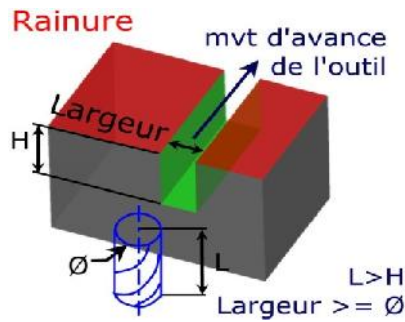


Fig. II.15 Fraisage de rainures.

II.7.4 Poche

La poche est délimitée par des surfaces verticales quelconques (cylindre et plan). C'est une forme creuse dans la pièce. (Surface cyan) voir Fig. II.16. [4]

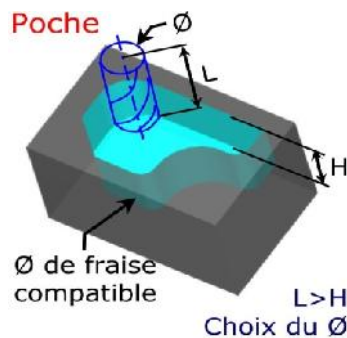


Fig. II.16 Schéma d'élargissement d'une cavité/poche.

II.7.5 Perçage

Perçer c'est réaliser un trou avec un foret, en utilisant une perceuse Voir Fig. II.17.

[5]

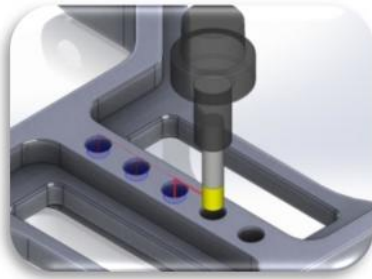


Fig. II.17 Opération de perçage.

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 (voir Fig. II.18). [5]

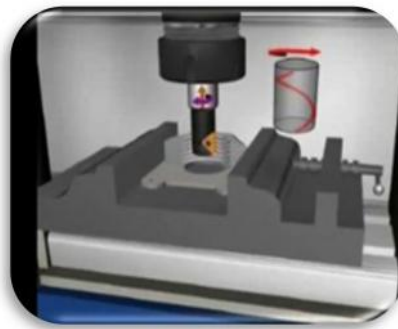


Fig. II.18 Opération de filetage.

II.8 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 voir Fig. II.19. [6]

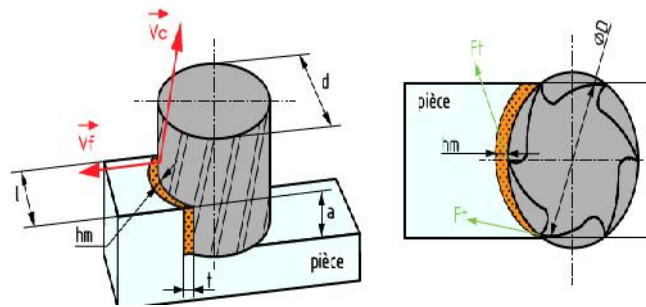


Fig. II.19 Paramètres de coupe.

II.8.1 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 Fig. II.20 [6]

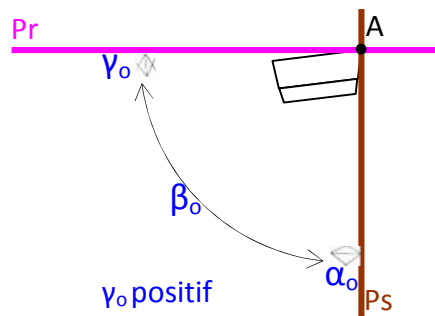


Fig. II.20 Paramètres géométriques de coupe.

II.8.2 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. [6]

II.8.2.1 Faces et arêtes de l'outil

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil et une partie active, 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 polycristallins de bore ou de diamant). La (Fig. II.20) 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) et de la face de dépouille (A) (Fig II.21) 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. 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 le plan Pr entre l'arête de coupe et la direction d'avance, défini par la direction de la vitesse d'avance. L'angle d'inclinaison d'arête de l'outil λ_c est l'angle dans le plan Ps entre l'arête de coupe et le plan de référence de l'outil Pr. [6]

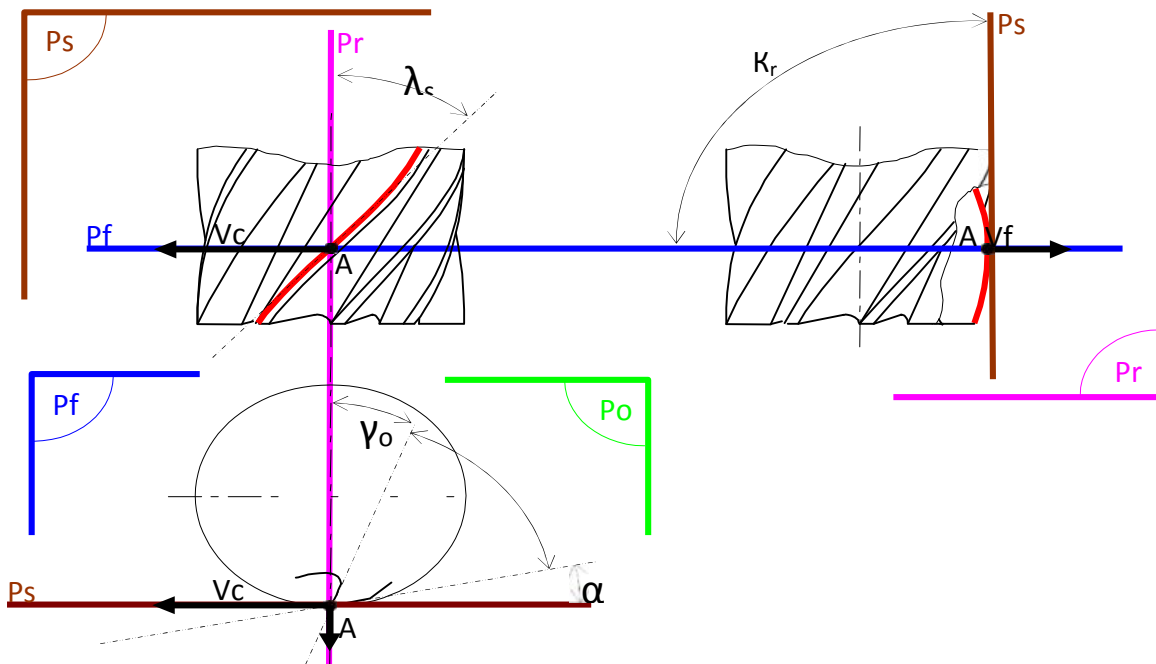


Fig. II.21 Illustration des plans et angles en main d'une fraise.

Tab. II.1 Table d'abréviation

Constantes de coupe	Trièdre de référence	Angles d'arêtes	Angles des faces
V _c : Vitesse de coupe.	Pr : Plan de référence V _c et passe par A	α_s : Angle d'inclinaison d'arête, mesuré dans Ps, entre Pr et S.	α_o : Angle de dépouille orthogonal : angle aigu mesuré dans Po, entre Ps et A .
V _f : Vitesse d'avance.	Pf : Plan de travail conventionnel \perp Pr, contient V _f et passe par A.	α_r : Angle de direction d'arête : angle aigu mesuré dans Pr, entre Ps et Pf.	α_o : Angle de taillant orthogonal: angle mesuré dans Po, entre A et A .
S: Arête tranchant principe.	Ps : Plan d'arête \perp Pr et contient la tangente à S (ou contient S, si S est rectiligne) au point A.	α_r : Angle de pointe, mesuré dans Pr, entre S et S' (S' : arête secondaire)	α_o : Angle de coupe orthogonal: angle aigu mesuré dans Po, entre Pr et A .
A : Point considéré de l'arête tranchante.	Po : Plan orthogonal \perp Pr et \perp Ps	-----	-----

Les caractéristiques géométriques de la partie active de l'outil de coupe sont définies (Fig. II.20) dans le plan orthogonal Po par trois angles :

- Angle de coupe α_o entre la face de coupe (A) et le plan de référence Pr ;
- Angle de taillant α_o entre la face de coupe (A) et la face de dépouille (A) ;
- Angle de dépouille principal α_o , entre la face de dépouille (A) et le plan perpendiculaire au plan de référence Pr.

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 (Fig. II.22). [6]

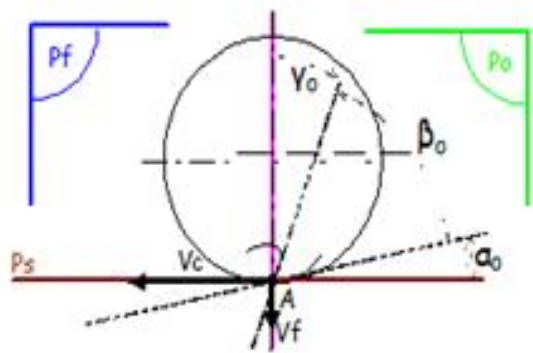


Fig. II.22 Angles en travail de la partie active d'une fraise.

Le plan de référence en travail, P_{re} est défini perpendiculaire à la direction de la vitesse résultante de coupe \vec{v}_e au point P (Fig II.21). La vitesse effective de coupe instantanée est la composition à tout instant de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance.

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f$$

La vitesse effective présente une inclinaison d'un angle 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}_e

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 influence sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil.

L'angle de coupe 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 affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90° . [6]

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

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

II.8.2.2 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.23). 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.
- (air, liquide de coupe, etc.....). [6]



Fig. II.23 Schéma d'une plaquette.

II.9 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 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. 24) 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. [7]

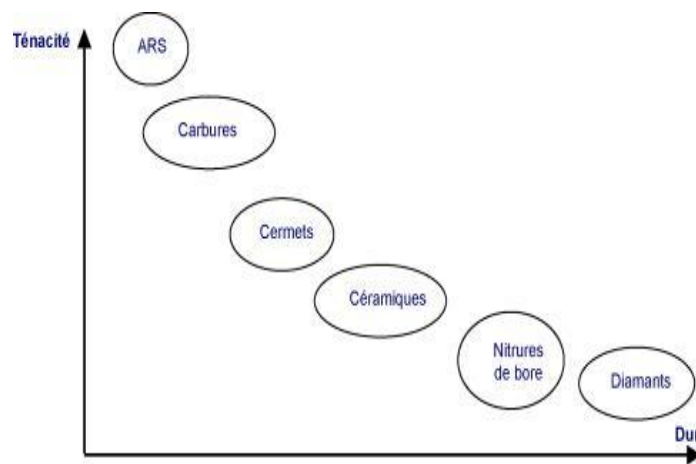


Fig. II.24 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant.

Il existe six grandes classes de matériaux utilisés comme outil de coupe soit :

II.9.1 Acier Rapides Supérieurs (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. [7]

II.9.2 Carbures

Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide. Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

- Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement
- Composition : Noyau en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°) ou en carbure de titane (3100°), ou tantale (3780°) ou niobium (3500°)
- Liant : cobalt : le plus courant ou nickel.
- Revêtement en oxyde d'aluminium (céramique appelée corindon : Al_2O_3)

II.9.3 Cermets

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitride de Titane ou de nitrure de Titane. [7]

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...).

II.9.4 Céramiques

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium. Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil). [7]

II.9.5 Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures. Son utilisation requiert :

- Une machine stable ;
- Une grande rigidité de la pièce et de la porte pièce ;
- Un arrosage. [7]

II.9.6. Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules. Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassement). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650 ° se transforme en un vulgaire morceau de graphite. On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à base température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables [7]

II.10 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 (II.25). L'interface de la géométrie outil / copeau /pièce lors de la formation d'un copeau. On peut voir trois zones principales soit :

Ñ Zone de cisaillement ou (zone de cisaillement primaire)

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. [8]

Ñ **Zone d'écroissage du copeau ou (zone de cisaillement secondaire)**

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. [8]

Ñ **Zone d'écroissage de la pièce ou (zone de cisaillement tertiaire)**

Dans cette zone, un frottement s'effectue entre la surface nouvellement usinée et la face de dépouille de l'outil. [8]

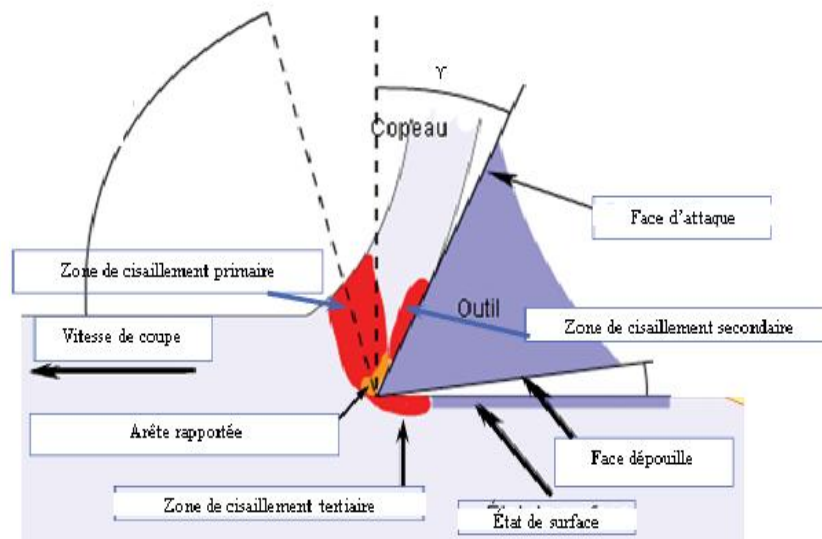


Fig. II.25 Géométrie de la formation d'un copeau.

II.11 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.26) VB en mm [8].

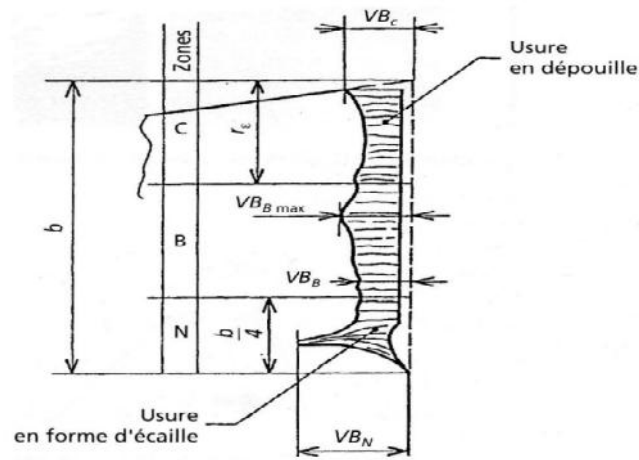


Fig. II.26 Critère d'usure VB.

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

- Les conditions de coupe ;
- Le matériau et la géométrie de l'outil ;
- Le matériau et l'état physique de la pièce ;
- La 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. [8]

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

$$T = f(V_c, f, a_p) \quad (\text{II.3})$$

Remarque

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

$$T = f(V_c) \quad (\text{II.4})$$

II.11.1 Mécanisme d'usure

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

II.11.1.1 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.27).

Si la matière comporte des constituants durs (écrouissage, aluminates, nitrure, carbure, oxyde par exemple) et que ces derniers sont plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil. [8]



Fig. II.27 Processus d'usure par abrasion.

II.11.1.2 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 (voir fig. II.28). [8]

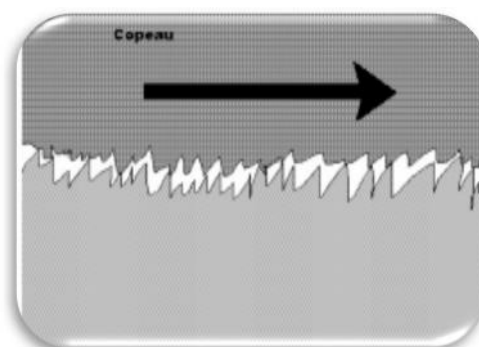


Fig. II.28 Processus d'usure par adhésion.

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.11. 1.3 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. [9]

II.11.2 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. [9]

II.11.2.1 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 (voir Fig. II.29). 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. [9]

C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible V_B . Les valeurs indiquées se rapportent généralement à une tenue d'outil (Durée de vie $T=15$ min). V_B 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.

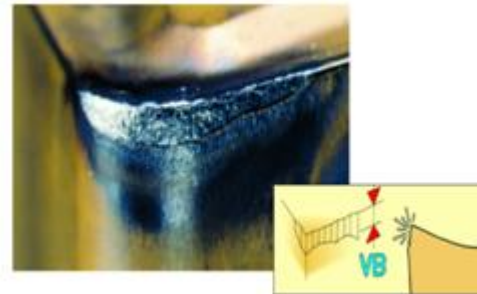


Fig. II.29 Usure en dépouille (abrasion).

II.11.2.2 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.30). 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) [9]

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.

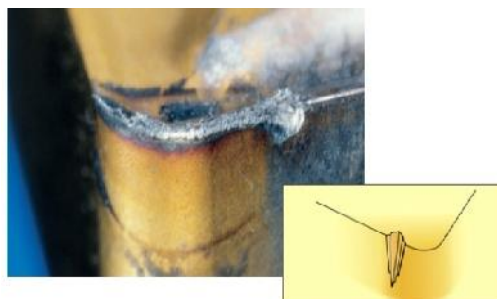


Fig. II.30 Usure en entaille (adhérence).

II.11.2.3 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 (voir Fig. II.31). [9]

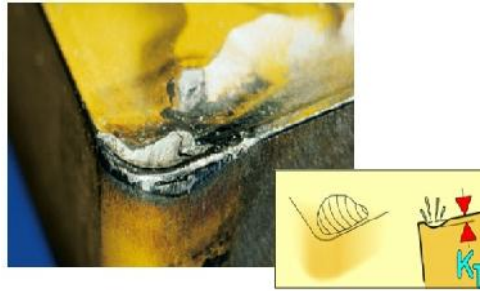


Fig. II.31 Usure en cratère (chimique).

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.11.2.4 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.32). [9]

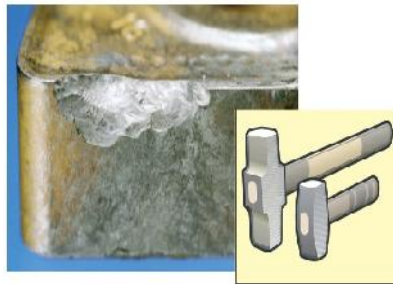


Fig. II.32 Usure mécanique (Ecaillage).

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.11.2.5 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 (voir Fig. II.33). [9]



Fig. II.33 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.11.2.6 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 (voir Fig. II.34). [9]

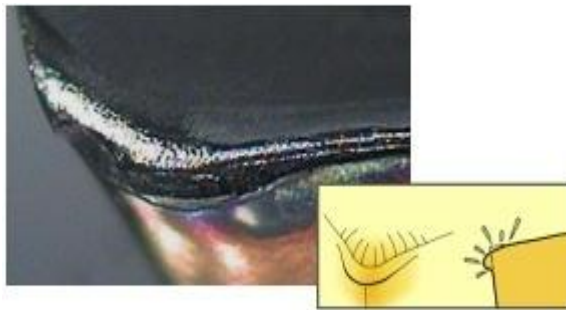


Fig. II.34 Usure thermique (Déformation plastique).

Mesures correctives

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

II.11. 2.7 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 (voir Fig. II.35). [9]



Fig. II.35 Usure en peigne.

Mesures correctives :

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

II.11.3 Dépendance entre l'usure et le temps

La relation entre la valeur de l'usure et le temps représentée par la courbe (Fig. II.36) peut-être divisée en trois périodes :

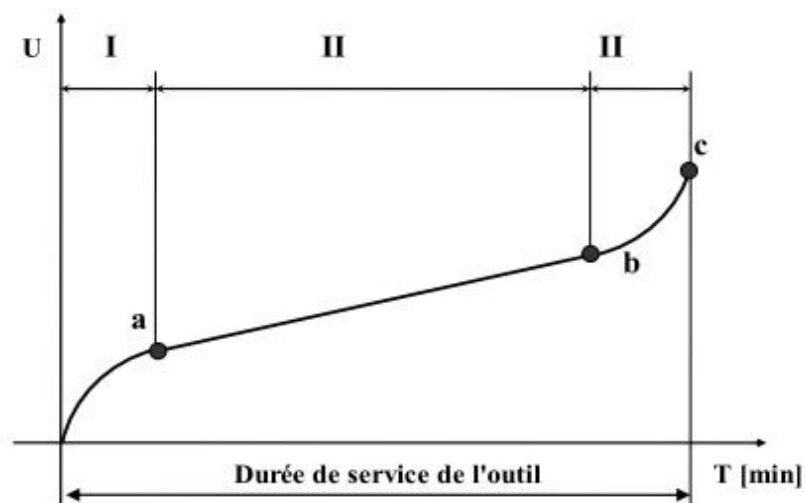


Fig. II.36 Courbe d'usure par rapport le temps.

- **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.

- 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 ;
- 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 ;
- La troisième période : est celle où l'usure atteint un certain degré.

Les conditions de coupe et de frottements changent pour établir la troisième période qui est celle de l'usure accélérée (usure catastrophique). Le temps des deux premières périodes où l'outil peut travailler sans réaffûtage constitue la durée de service de l'outil qui est le temps de travail. [10]

II.12 l'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. [10]

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.12.1 les 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.37). [11]



Fig. II.37 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.13 Catégories des outils de fraisage

Nous trouvons des fraises en aciers rapides (ARS monobloc), en carbures, en céramiques et en cermets. Nous allons nous intéresser aux fraises en ARS et en carbures à plaquettes amovibles. [12]

Parmi les outils de fraisage on distinguera, du point de vue de la coupe, 3 catégories :

- Fraises 1T (Fig. II.38) ;
- Fraises 2T (Fig. II.39) ;
- Fraises 3 T (Fig. II.40).

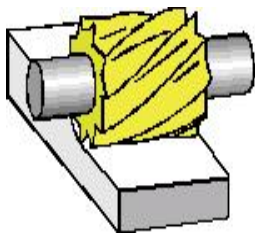


Fig .II.38 Fraise 1T

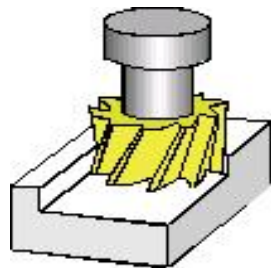


Fig .II.39 Fraise 2T

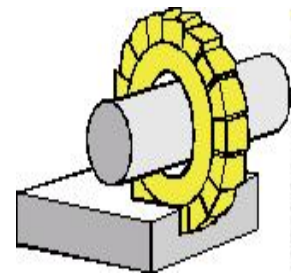


Fig .II.40 Fraise 3T

II.13.1 Les fraises aciers rapides (A.R.S)

On peut classer les fraises A.R.S. en 3 groupes :

- les fraises à surfacer et à surfacer et dresser ;
- les fraises à rainurer ;
- les fraises de formes.

II.13.1.1 Les fraises à surfacer et dresser :

- Fraise 1 taille à surfacer à entraînement par clavette (Fig. II 41)
- Classe de diamètres d 63-80-100 mm ;
- Utilisation : Tous travaux de surfacage, dans les limites des capacités dimensionnelles de la fraise. Elles sont robustes et permettent un grand rendement.

[12]

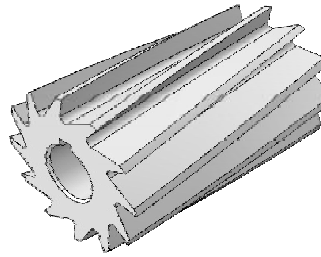


Fig. II 41 fraises 1 taille

II.13.1.2 Fraise 2T :

On trouve des fraises 2 tailles à :

- (a) queue ;
- (b) trou.

(a) Fraise 2T à queue cylindrique (Fig. II.42)

Ñ Classe de diamètres d : de 1,90 à 75,00 mm ;

Ñ Diamètres recommandés: 2-2,5-3-4-5-6-8-10-12-16-20-25 – 32 - 40-50-63.

Ñ Utilisation : Elles sont utilisées pour tous travaux de fraisage en bout, ou en roulant [12].



Fig. II .43 Fraise 2T à queue cylindrique

(b) Fraise 2 T (ARS) type « ravageuse »



Fig. II. 44 Fraise 2T ravageuse.

(c) Fraise 2 T à queue cône morse (Fig. 45)



Fig. II. 45 Fraise 2T à queue cône morse.

(d) Fraises à rainurer



Fig. II 46 La fraise à rainurer.

- Classe de diamètres d : de 5,00 à 75,00 mm.
- Diamètres recommandés : 6-8-10-12-16-20-25-32-40-50-63
- Utilisation :
- Identique aux fraises 2 tailles à queue cylindrique. [12]

(e) Fraise 2T cylindriques à entraînement par tenons (Fig.47) :



Fig. II.47. Fraise 2 T cylindriques à entraînement par tenons.

- Diamètres d : 40-50-63-80-100-125-160.
- Utilisation :
 - Surfaces planes,
 - Epaulements,
 - Rainures larges.

(f) Fraise cloches à entraînement par tenons (Fig. II.48) :

- Diamètres d : 63-80-100-125-160.
- 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. [12]

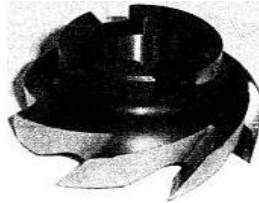


Fig. II.48 Fraise cloche à entraînement par tenons.

II.13.1.3 Fraise-disques 3T

(a) Fraise-disques 3T, à denture droite, à entraînement par clavette (Fig. II.49):

- Diamètres d : 50-63-80-100-125-160-200 ;
- Utilisation : Réalisation de rainures en :
 - Ebauche ;
 - Finition.



Fig. II.49 Les fraises-disques 3 tailles.

(b) Fraise-disques 3T, à dentures alternées, à entraînement par clavette (Fig. II.50)

- Diamètres d : 63-80-100-125-160-200 mm.
- Utilisation : Montées sur un arbre, elles sont souvent utilisées pour réaliser un train de fraises. [13]



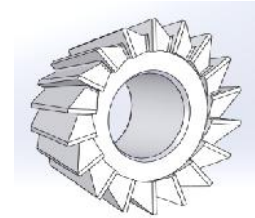
Fig. II.50 La fraise-disque 3 tailles, à dentures alternées.

II.13.1.4. 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 voir (Fig. II.51). [13]



(a) Fraise biconique

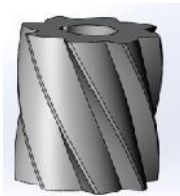


(b) Frais conique

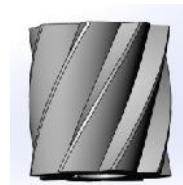
Fig. II.51 Fraises de forme.

II.13.1.5 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 voir (Fig. II.52) 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. [14]



(a)



(b)

Fig. II.52 Fraises de différente denture, a) dentures hélicoïdales à gauche, b) dentures hélicoïdales à droite.

II.13.1.6 Dimensions

Pour une fraise deux tailles : diamètre et hauteur taillée. Pour une fraise trois tailles : diamètre de l'outil, épaisseur, diamètre de l'alsage. Pour une fraise conique pour queue d'aronde : l'angle, le diamètre de l'outil et l'épaisseur. [14]

II.13.1.7 Mode de fixation

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

II.13.1.8 Construction [14]

Les fraises peuvent être à denture fraisée (ex. : fraise conique deux tailles 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.13.2 Fraise en carbure

On distinguera les fraises carbures :

- Monoblocs ;
- 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). [14]

Comme pour les fraises A.R.S., nous allons classer les fraises carbures en 3 groupes :

- Fraises à surfacer et à surfacer et dresser,
- Fraises à rainurer,
- Fraises de formes (pour le copiage principalement, non décrite dans ce chapitre).
- Géométrie des fraises carbures à plaquettes amovibles n'est guère différente des fraises en a.r.s.

On peut les classer en 3 catégories suivant la nature de l'usinage à effectuer :

- Ébauche, à coupe positive uniquement ;
- Demi-finition, à coupe positive ou négative ;
- Finition, à coupe positive ou négative. [14]

Chapitre III

Gamme d'usinage d'un outil de fraisage &
son modélisation (simulation)

III.1 Définition

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). Donc notre travail est basé sur des logiciels de CFAO (Solidworks) pour dessin la pièce et la gamme d'usinage plus performante .Et (l'ABACUS) pour faire la simulation. Pour étudier les résultats d'une action sur un élément sans réaliser l'expérience sur l'élément réel quelques années des modules spécifiques à la fabrication.

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. [16]

III.2 Description d'une Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01T».

III.2.1 Arête et faces de coupe et dépouille

Un outil coupant (fraise cylindrique à denture Hélicoïdal) est constitué d'une partie qui agit sur la pièce pour provoquer un enlèvement de métal. Sa durée de vie doit être plus grande que celle du métal à travailler. [17]

Les éléments essentiels de la partie active sont :

- **Arête de coupe** : est formée par l'intersection des faces de coupe et de dépouille ;
- **Face de coupe** : est la face où vient « s'enrouler » le copeau lors de l'usinage ;
- **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. [17]

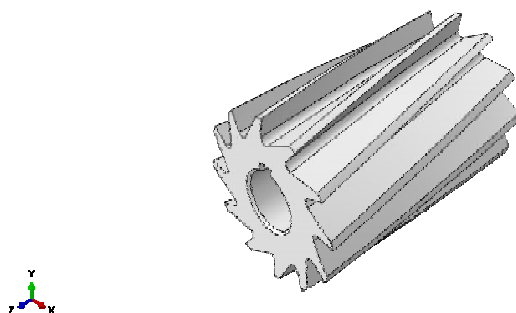


Fig. III.1 Schéma d'une fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droit 01T».

III.2.2 Etapes de réalisation

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 :

- (a) Dessin de définition;
- (b) Gamme d'usinage;
- (c) Traitement thermique;
- (d) Emballage et stockage. [17]

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 cylindrique à denture Hélicoïdale« Hélice droite 01T». Est ci-dessous et les détailles (voir annexe I). [17]

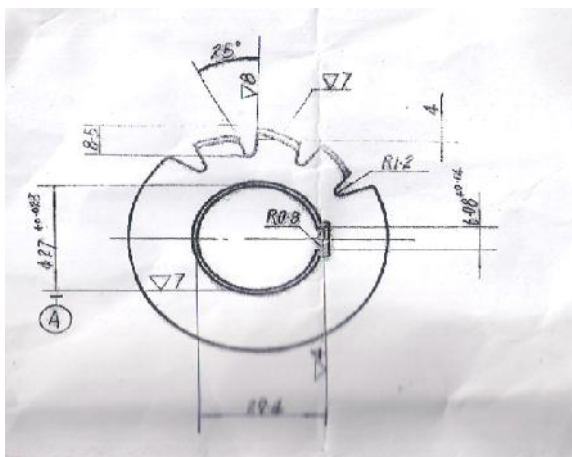


Fig. III.2 Profile de la fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01T».

III.2.2.2 Gamme d'usinage

Pour réaliser notre pièce modèle (Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale« Hélice droite 01Taille».) on a suivi les différentes phases « voir les détails sur l'annexe I »: [18]

1^{ère} phase : Débitage de la matière

Pour avoir la matière brute, il faut passer par l'ordonnancement où on a eut un bon de commande qui contient la nuance et les dimensions de la pièce brute voir (Fig. III.3). [18]

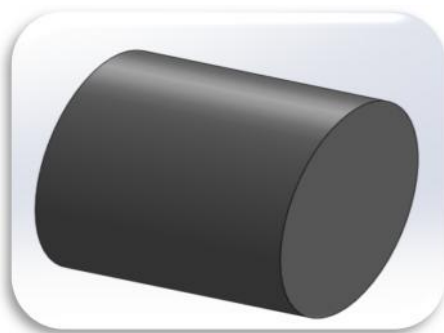


Fig. III.3 Débitage de la matière première en HSS.

Ces cotes sont : $\varnothing 70 \times 85$ (mm), la nuance de notre matière est Acier rapide (ARS) W18 équivalence de HS18-0-1 (1.3355) norme ISO 4957. Il faut contrôler les dimensions et la nuance.

2^{ème} phase

Cette phase contient deux opérations qui sont les suivantes :

- **Dressage**

Cette opération consiste à réaliser une surface plane de référence et la mise en longueur avec des passes d'ébauche et une passe de finition voir figure III.4 ci-dessous.

[18]

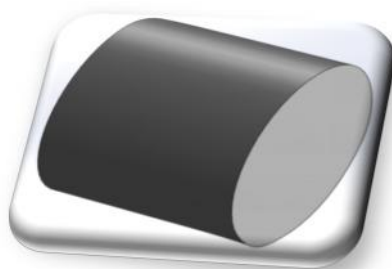


Fig. III.4 Dressage la surface plane.

- **Chariotage**

Cette opération consiste aussi à réaliser une surface cylindrique de référence et donner à la pièce le diamètre voulu avec des passes d'ébauche et semi finition, et on laisse une surépaisseur de 1mm (Fig. III.5). [18]

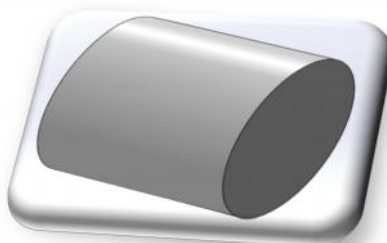


Fig. III.5 Opération de Chariotage.

Contrôle : Après chaque phase, la pièce doit être contrôlée et porter les mesures sur la feuille suiveuse de dessin.

3^{ème} phase : Le centrage

C'est l'opération de préparation pour le perçage (avant trou) où le montage mixte voir la figure ci-dessous.

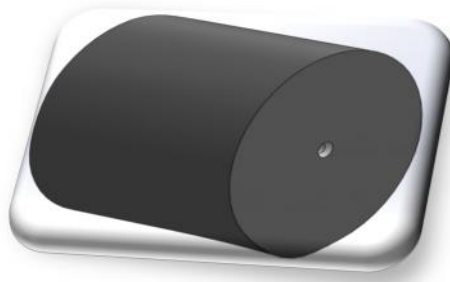


Fig. III.6 Schéma de Centrage.

4^{ème} phase

Elle contient trois opérations qui sont:

(1) Perçage

Cette opération consiste à enlever le maximum de matière avant de passer à l'alésage à l'aide de deux forets avec une longueur de $L=80$ mm figure III.7. [18]

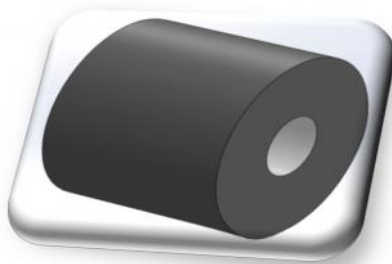


Fig. III.7 Opération de perçage.

(2) Alésage et chanfreinage

Cette opération consiste à aléser le diamètre $\text{Ø}27^{+0.073}$ mm avec surépaisseur de 0,5 mm pour la rectification intérieure après traitement thermique et le chanfrein voir la figure III.8. [18]

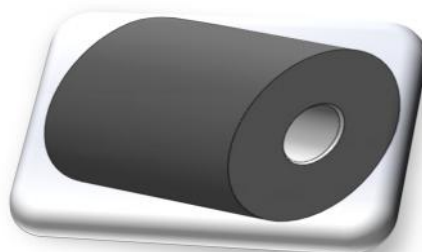


Fig. III.8 Opération d'alésage et chanfreinage.

(3) Chambrage

Cette opération consiste à réaliser le dégagement intérieur de diamètre $\varnothing=28\text{mm}$ voir figure III.9. [18]

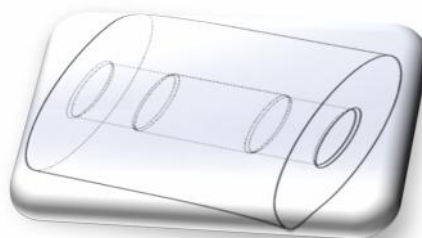


Fig. III.9 Opération de Chambrage.

Après cette phase d'usinage on contrôle les dimensions de la pièce avec leur surépaisseur.

6^{ème} phase : Fraisage, l'angle de coupe

Dans cette phase l'opération est comme suite :

Taillage de la denture ($Z=12$). Cette opération consiste à tailler les dents à l'aide d'une fraise conique de $\varnothing75 \times 25^\circ$ en utilisant le plateau diviseur $1/48^{\text{ème}}$.

- Angle de coupe : $0^\circ \sim 5^\circ$
- Calcul (nombre des dents)

D'après la fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droit 01Taille » modèle, on a nombre des dents $Z = 12$ dents, et on a aussi les formules théoriques suivantes : $\frac{K}{N}$

Avec ;

- N: Nombre de divisions ;
- K: Rapport de diviseur.

Donc le raisonnement est comme suite pour 1 tour de broche, il faut 48 tours de manivelle. Et pour $\frac{1}{2}$ tour de broche, il faut $48 \times \frac{1}{2} = 24$ tour de manivelle. Notre cas est simple pour la réalisation les deuz (12) dents donc il faut $48 \times \frac{1}{12} = 4$ tour de manivelle.

[19]

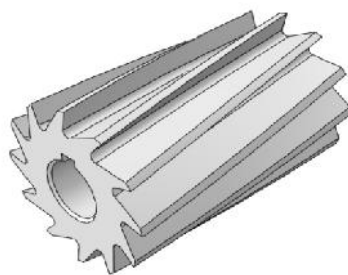


Fig. III.10 Opération de taillage les dents.

7^{ème} phase : Mortaisage

Cette opération consiste à réaliser la rainure de la clavette. Après cette phase d'usinage on contrôle les dimensions de la rainure à l'aide d'un instrument de contrôle spécifique. [19]

8^{ème} phase : Traitement thermique

Cette phase consiste à élever la dureté de la pièce à usiner « fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01Taille», est pour cela on a procédé au traitement la pièce avec une trempe plus revenu dans un bain de sel « BaCl₂ » à une température de 860° suivi par un revenu de température à 550°~570° trois fois.

Après le traitement il faut faire le Contrôle de dureté de la pièce « fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01T» suivant l'exigence technique de traitement. [19]

9^{ème} phase : Sablage

Cette opération consiste à maitre la pièce sous un jet d'un mélange des différents cas libre de sable (grains), il a pour but d'éliminer les bavures causées par le traitement thermique et d'améliorer l'état de surface. [20]

10^{ème} phase : La rectification

La rectification est un procédé d'usinage de finition qui utilise des meules abrasifs pour donner un bon état de surface et assurer les côtes de précision selon leur exigence technique. [20]

(a) Rectification plane

Cette opération consiste à finir la longueur de la fraise et préparer le plan de référence pour la rectification intérieur voir figure III.13. [20]

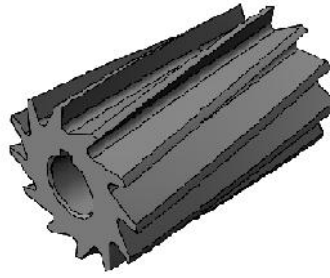


Fig. III.11 Opération de Rectification plane.

(b) La rectification cylindrique intérieure

C'est l'opération qui consiste à finir l'alésage de la fraise de forme (Fig. III.14). [20]

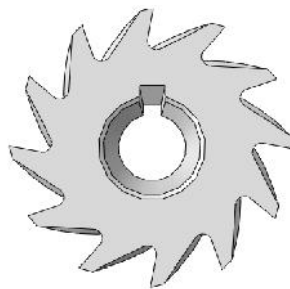


Fig. III.12 Opération de Rectification intérieure.

Après cette dernière phase d'usinage on contrôle les dimensions de la pièce a rectifiés. $\varnothing = 27^{+0.023}$ mm, L = 75 mm.

11^{ème} phase : Affûtage de l'angle de coupe

Cette opération consiste à donner ou à rendre à l'arête ou diverses arêtes tranchantes d'un outil de coupe l'état de surface ou la forme nécessaires à leur bonne utilisation voir la (Fig. III.15). [20]

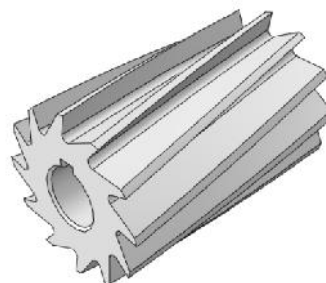


Fig. III.13 Opération d'affûtage l'angle de coupe.

12^{ème} phase

- **Contrôle final** : A la fin de toutes les opérations d'usinage et après ajustage, la Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droit 01Taille ». Doit être contrôlée.

13^{ème} phase : Marquage et Stockage

A l'aide d'un stylo électrique on procède au marquage la fraise de forme selon la désignation donnée. Ensuite nous avons rincé la fraise de forme dans un bain de nitrure de sodium à chaud de température de 120° et enrobé avec la cire pour protéger contre la corrosion enfin emballé le produit « la fraise de forme » avec leur certificat de qualité pour la le stockage et livraison. [20]

III.3 Caractéristiques technique de la fraise cylindrique à denture Hélicoïdale

« Hélice droit 01T ».

III.3.1 Matière de la fraise

Le plus souvent pour la fabrication des outils on utilise les nuances W18 (0.8% C, 18% W 4% Cr et 2 à 2.5% V) et W9 W6 (0.9% C, 6 à 9% W, 4% Cr et 2 à 2.5% V).

Ces aciers s'appellent rapides par ce que les outils qu'ils permettent de créer sont employés pour réaliser des vitesses de coupe élevées. Les propriétés de coupe de l'acier rapide sont assurées par un traitement thermique. Dans notre cas que nous avons étudié la matière est l'acier rapide **HSS**(Ø85x80) le module de Young =21000 N/mm² et le coefficient de poisson = 0.3. [21]

III.4 Solid Works

III.4.1 Introduction

SolidWorks 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 tous les éléments générés. [10]

- ABAQUS est un système d'analyse de conception ;
- ABQUS permet d'obtenir, à partir d'un seul écran, des solutions d'analyse fréquentiel, de contraintes, de flambement et d'optimisation. Grâce à ses solveurs rapides, ABAQUS 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 raccourcit le délai de mise sur le marché en réduisant le temps et le travail nécessaires pour définir la solution optimale. [16]

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 mailleur automatique du 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. [16]

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.

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \text{limite}$$

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 :

$$\text{Coefficient de sécurité (CS)} = \text{limite} / \sigma_{\text{vonMises}}$$

**III.4.3.1 Simulation Nom du modèle: Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale
« Hélice droite 01T». (Étude statique)**

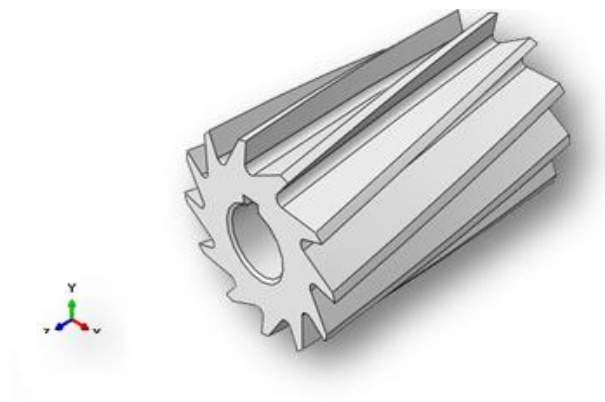


Fig.III.14 Nom du modèle : Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale« Hélice droit
01Taille».

CONTRAINTEConfiguration actuelle : Défaut

• **Propriétés volumétriques**

- Masse:1.42931 kg
- Volume:0.000185624 m³
- Masse volumique:7700 kg/m³
- Force :14.0072 N

• **Propriétés du matériau**

- Nom: Acier allié
- Type de modèle: Linéaire élastique isotopique
- Critère de ruine par défaut: Contrainte de von Mises max.
- Limite d'élasticité: 6.20422e+008 N/m²
- Limite de traction: 7.23826e+008 N/m²

• **Actions extérieures**

- Entités : 12 face(s)
- Type : Force normale
- Valeur : 40000 N

• Informations sur le maillage

- Type de maillage : Maillage volumique ;
- Mailleur utilisé : Maillage standard ;
- Taille d'élément : 2.85298 mm ;
- Qualité de maillage : Haute ;
- Nombre total de nœuds : 95978 ;
- Nombre total d'éléments : 62824 ;
- Durée de création du maillage (hh ; mm; ss) : 00:20:06.



Fig. III.15 Schéma de maillage volumique de la Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale« Hélice droite 01T».

• Résultats de l'étude

Nom	Type	Min	Max
Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale« Hélice droite 01Taille».	VON: contrainte de Von Mises	2.421 e-03 N/mm ² (MPa)	1.126 e+02 N/mm ² (MPa)

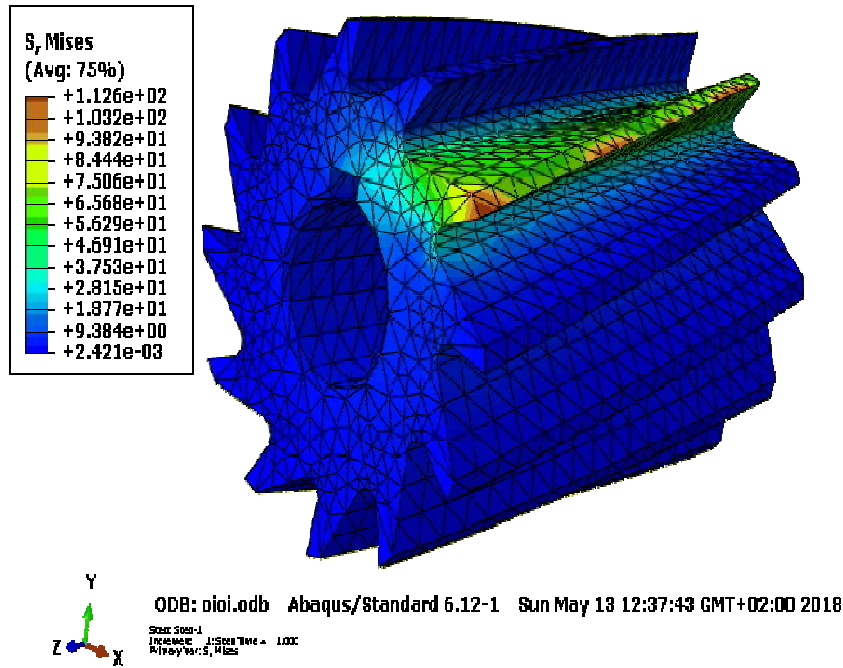


Fig. III. 16. Schéma de Résultats de l'étude.

III.5 Contraintes selon ZZ

Dans ce cas nous avons étudié une seule dent

Nom	Type	Min	Max
Fraise cylindrique denture Hélicoïdale« Hélice droite 01Taille».	VON: contrainte de Von Mises	1.243e+00 N/mm ² (MPa)	3.108 e +01 N/mm ² (MPa)

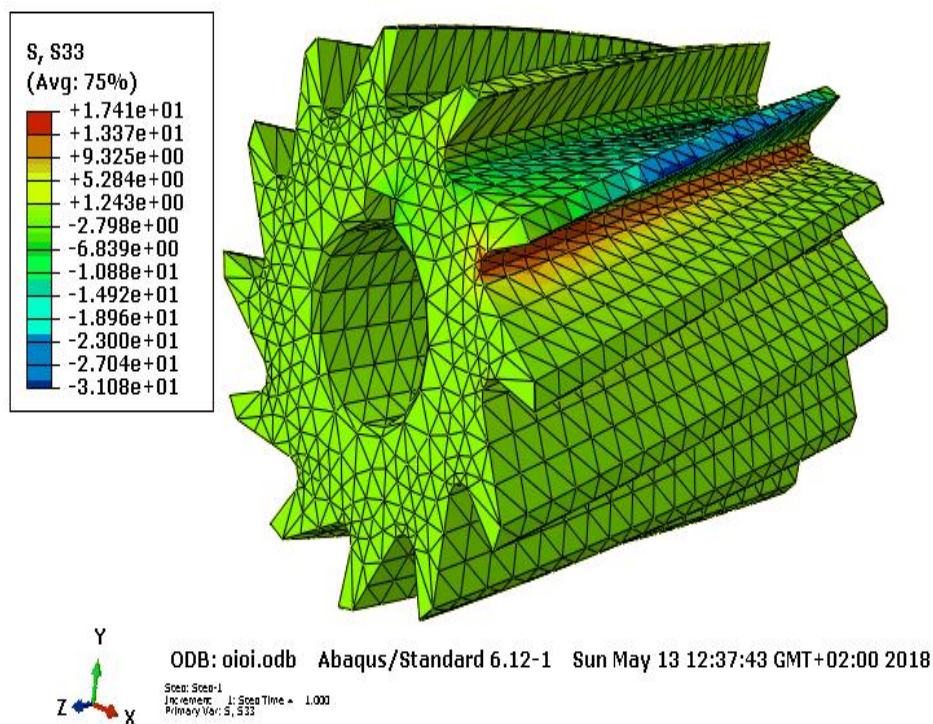


Fig. III. 17. Schéma de contraintes selon ZZ.

III.6 Contraintes selon XX

Dans ce cas, on considère une seule dent :

Nom	Type	Min	Max
Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale« Hélice droite 01Taille».	VON: contrainte de Von Mises	2.112 e +00 N/mm ² (Mpa)	1.100 e +02 N/mm ² (Mpa)

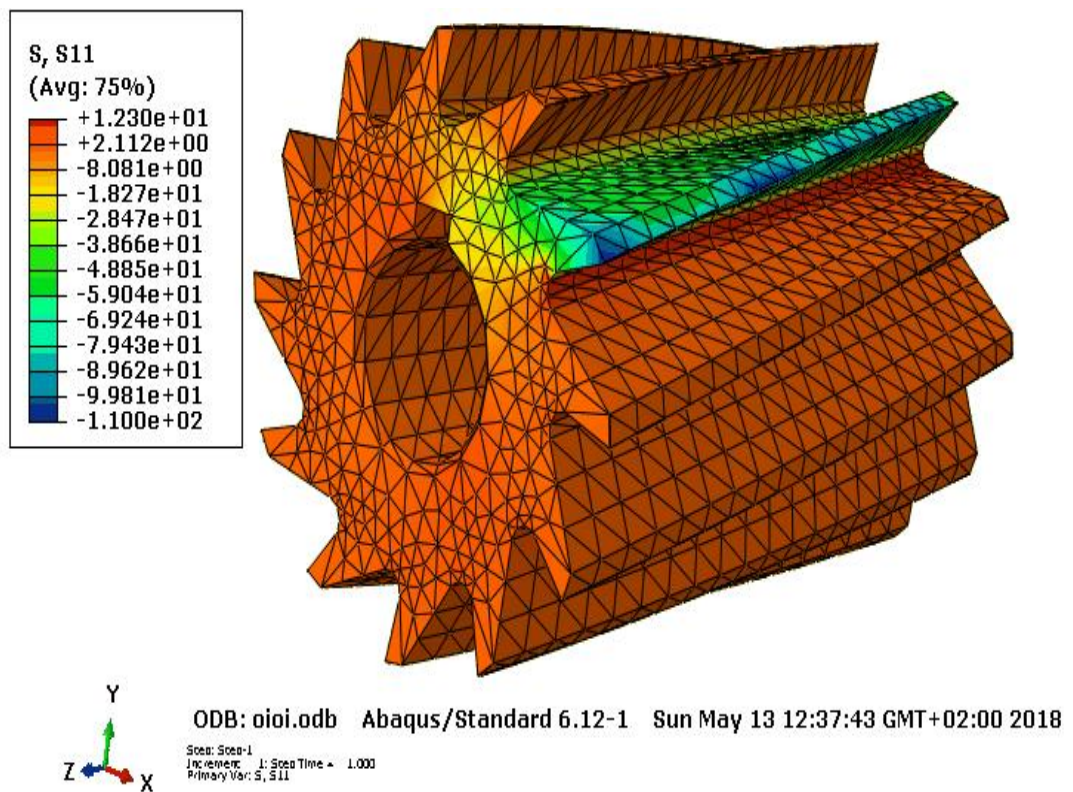


Fig. III. 18. Schéma de contraintes selon XX.

III.7 Contraintes selon YY

Résultats de l'étude

Nom	Type	Min	Max
Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale« Hélice droite 01Taille».	VON: contrainte de Von Mises	1.027 e+00 N/mm ² (MPa)	6.411 e+01 N/mm ² (MPa)

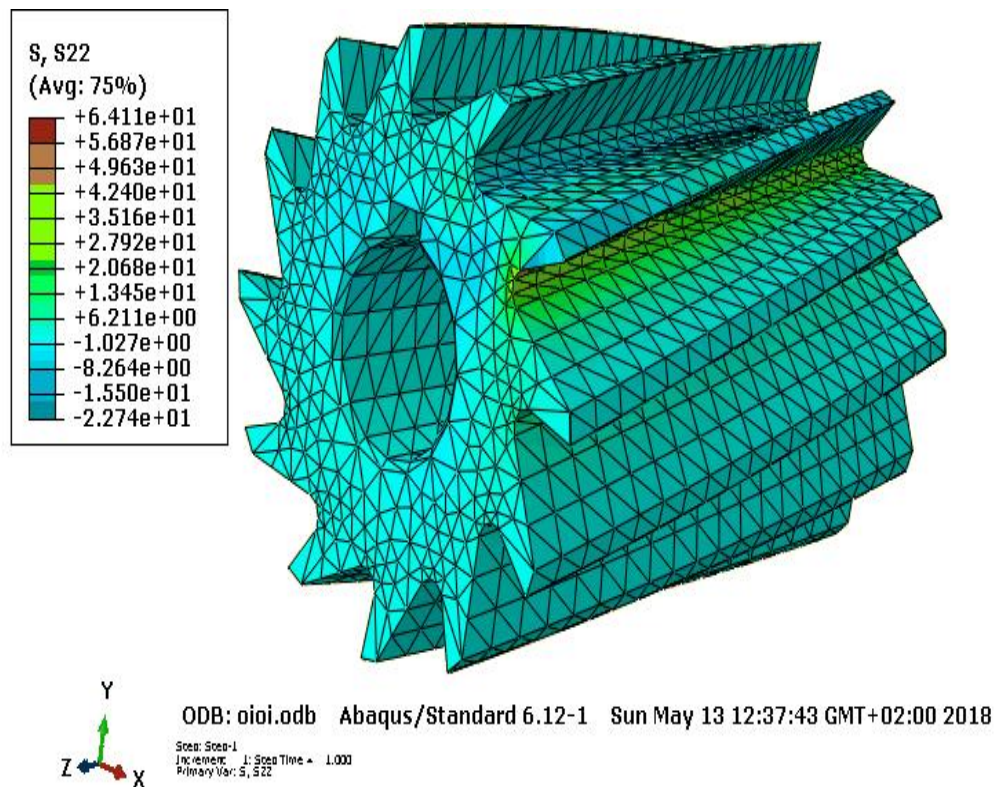


Fig. III. 19. Schéma de contraintes selon YY.

III.8 Contraintes selon XZ

Dans ce cas nous avons étudié une seule dent

Nom	Type	Min	Max
Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01Taille».	VON: contrainte de Von Mises	7.557 e-01 N/mm ² (Mpa)	+2.397 e +01 N/mm ² (Mpa)

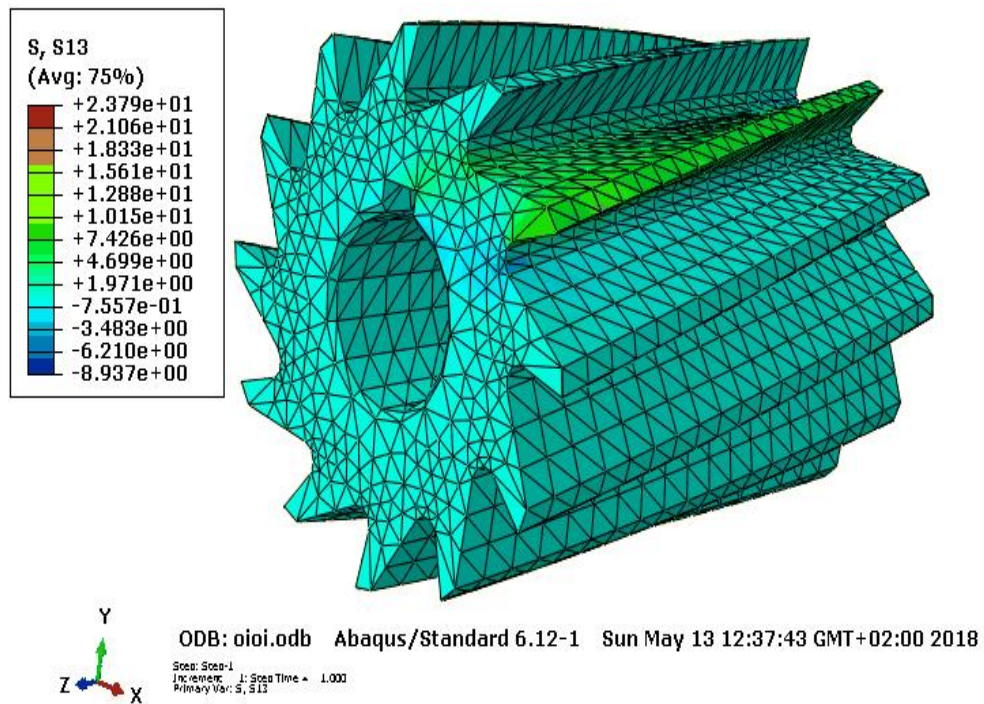


Fig. III. 20. Schéma de contraintes selon XZ.

III.9 Contraintes selon YZ

Dans ce cas nous avons étudié une seule dent

Nom	Type	Min	Max
Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale« Hélice droite 01Taille».	VON : contrainte de Von Mises	4.294 e-02 N/mm ² (Mpa)	8.571 e+00 N/mm ² (Mpa)

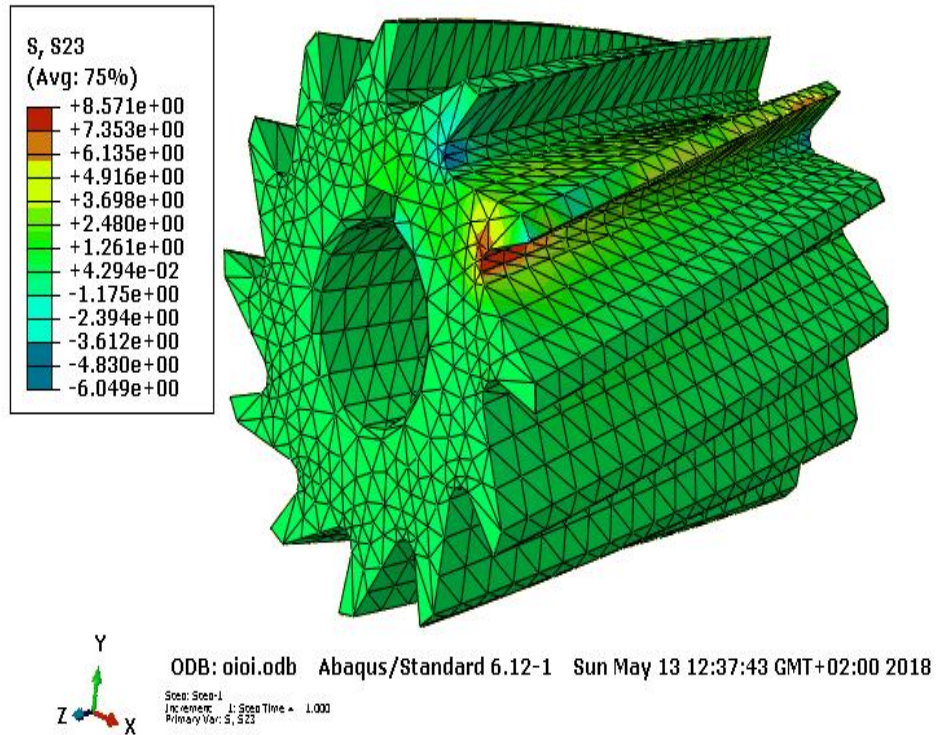


Fig. III. 21. Schéma de contraintes selon YZ.

III.10 Contraintes selon XY

Dans ce cas nous avons étudié une seule dent

Nom	Type	Min	Max
Fraise cylindrique à denture Hélicoïdale « Hélice droite 01Taille».	VON: contrainte de Von Mises	7.815 e-03 N/mm ² (Mpa)	3.504 e+01 N/mm ² (Mpa)

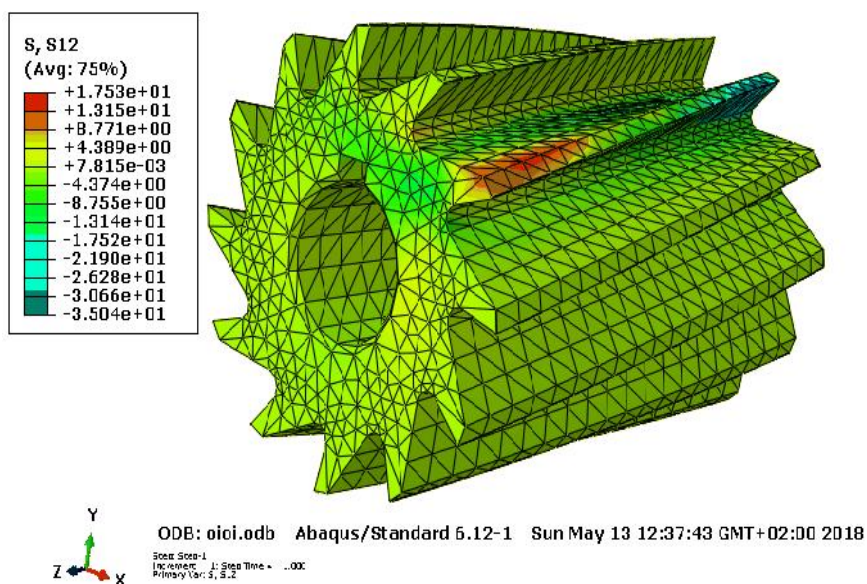


Fig. III. 22. Schéma de contraintes selon XY.

Sur les figures illustrées ci-dessus, nous avons montrés les contraintes de Von mises et le déplacement sur l'arrête tranchante de la fraise. 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 nécessitent 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.

Ouvrage bibliographique

- [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] A.Passeron, Techniques d'ingénieur, tournage
- [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] SolidWorks Education, Conception mécanique et technologie.
- [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 mecahnics, Machine tool vibration, and CNC design.

Annexe I

Gamme d'usinage d'une fraise cylindrique
à denture Hélicoïdale « Hélice droite
01Taille».

LANGAGE REPOND A LA NORME ISO 6983

FONCTIONS PREPARATOIRES G

G00	Interpolation linéaire en rapide
G01	Interpolation linéaire à la vitesse programmée
G02	Interpolation circulaire sens anti-trigonométrique (sens horaire)
G03	Interpolation circulaire sens trigonométrique (sens anti horaire)
G04	Fin de bloc Temporisation programmable avec F
G40	Annulation de la correction de rayon
G41	Correction de rayon (outil à gauche du profil)
G42	Correction de rayon (outil à droite du profil)
G52	Programmation absolue des cotes par apport à l'origine mesure
G64	Cycle d'ébauche paraxial
G65	Cycle d'ébauche de gorge
G66	Cycle de défonçage
G70	Entrée des données en pouce
G71	Entrée des données en millimètre
G77	Appel inconditionnel d'un sous-programme ou de blocs
G80	Annulation de cycle d'usinage
G81	Cycle de perçage centrage
G82	Cycle de perçage-chambrage
G83	Cycle de perçage avec déburrage
G84	Cycle de taraudage
G85	Cycle d'alésage
G87	Cycle de perçage avec brise-copeaux
G89	Cycle d'alésage avec arrêt temporisé
G90	Programmation absolue (origine programme)
G91	Programmation relative (point de départ bloc)
G94	Vitesse d'avance en mm/min
G95	Vitesse d'avance en mm/tour
G96	Vitesse de coupe constante
G97	Vitesse de broche en tr/min

FONCTIONS AUXILIAIRES M

M00	Arrêt programmé
M01	Arrêt optionnel
M02	Fin de programme pièce
M03	Rotation de broche sens anti trigonométrique
M04	Rotation de broche sens trigonométrique
M05	Arrêt de broche
M06	Changement d'outil
M07	Arrosage n° 2
M08	Arrosage n° 1
M09	Arrêt d'arrosage
M10	Blocage d'axe
M11	Déblocage d'axe

Composition maximum d'un bloc

N	Numéro de bloc ;
G	Fonction préparatoire ;
X	Mouvement radial ;
Z	Mouvement longitudinal ;
I	Surépaisseur de finition en + ou en – suivant l'axe X (– et inter) ;
K	Surépaisseur de finition en + ou en – suivant l'axe Z ;
F	Avance en chariotage ou en dressage ;
S	Vitesse d'avance ;
T	Numéro d'outil ;
D	Numéro de correcteur ;
M	Fonction auxiliaire.

Annexe II
LANGAGE REPOND A LA NORME
ISO 6983

FONCTIONS PREPARATOIRES G

- G00 Interpolation linéaire en rapide
- G01 Interpolation linéaire à la vitesse programmée
- G02 Interpolation circulaire sens anti-trigonométrique (sens horaire)
- G03 Interpolation circulaire sens trigonométrique (sens anti horaire)
- G04 Fin de bloc Temporisation programmable avec F
- G40 Annulation de la correction de rayon
- G41 Correction de rayon (outil à gauche du profil)
- G42 Correction de rayon (outil à droite du profil)
- G52 Programmation absolue des cotes par apport à l'origine mesure
- G64 Cycle d'ébauche paraxial
- G65 Cycle d'ébauche de gorge
- G66 Cycle de défonçage
- G70 Entrée des données en pouce
- G71 Entrée des données en millimètre
- G77 Appel inconditionnel d'un sous-programme ou de blocs
- G80 Annulation de cycle d'usinage
- G81 Cycle de perçage centrage
- G82 Cycle de perçage-chambrage
- G83 Cycle de perçage avec débouillage
- G84 Cycle de taraudage
- G85 Cycle d'alésage
- G87 Cycle de perçage avec brise-copeaux
- G89 Cycle d'alésage avec arrêt temporisé
- G90 Programmation absolue (origine programme)
- G91 Programmation relative (point de départ bloc)
- G94 Vitesse d'avance en mm/min
- G95 Vitesse d'avance en mm/tour
- G96 Vitesse de coupe constante
- G97 Vitesse de broche en tr/min

FONCTIONS AUXILIAIRES M

M00	Arrêt programmé
M01	Arrêt optionnel
M02	Fin de programme pièce
M03	Rotation de broche sens anti trigonométrique
M04	Rotation de broche sens trigonométrique
M05	Arrêt de broche
M06	Changement d'outil
M07	Arrosage n° 2
M08	Arrosage n° 1
M09	Arrêt d'arrosage
M10	Blocage d'axe
M11	Déblocage d'axe

COMPOSITION MAXIMUM D'UN BLOC

N	Numéro de bloc
G	Fonction préparatoire
X	Mouvement radial
Z	Mouvement longitudinal
I	Surépaisseur de finition en + ou en – suivant l'axe X (– et inter)
K	Surépaisseur de finition en + ou en – suivant l'axe Z
F	Avance en chariotage ou en dressage
S	Vitesse d'avance
T	Numéro d'outil
D	Numéro de correcteur
M	Fonction auxiliaire