

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
(MESRS)

Université ABBES LAGHROUR-KHENCHELA



Faculté des Sciences et Technologies
Département de Génie Mécanique

Mémoire

de fin d'études pour l'obtention du diplôme
Master (LMD)

Spécialité : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Mécanique Productique (GMP) .

Thème

**Etude, conception et réalisation d'une fraise 3T en
HSS, denture alternée (croisée), à queue conique,
incorporée dans la fabrication mécanique.**

Présenté par :

- MAACHE Ikram .
- OUANNES Radhia.

Dirigé par : Dr. GHELANI Laala.

Membres de jury :

- Dr. CHITOUR Mourad / Président.
- Dr. ALLAOUI Abdelhalim / Examineur.

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements



Nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a donné le courage, la patience ainsi que la force afin de parvenir à terminer ce travail.

Nous exprimons avant tout notre profonde gratitude à notre encadreur, Monsieur **GHELANI Laala**, pour avoir accepté de superviser notre travail. Nous le remercions sincèrement pour ses conseils avisés, son ouverture d'esprit ainsi que sa disponibilité constante. Son accompagnement bienveillant a grandement facilité le bon déroulement de notre projet;

Nous tenons également à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail :

✓ **Dr. Chitour Mourad**

✓ **Dr. Allaoui Abd el Halim**

Nous remercions aussi tous les enseignants qui nous ont encadrés, aidés et conseillés durant notre parcours à l'université.

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à toutes les institutions qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de recherche. Nous pensons particulièrement à :

- **L'Université ABBES LAGHROUR de Khenchela**, pour le cadre académique qu'elle nous a offert.
- **La Fondation des Constructions Mécaniques ECMK HESAN MARIR**, pour son accueil, sa collaboration et les moyens mis à notre disposition tout au long de notre stage.

Enfin, un grand merci à toute notre famille pour son soutien constant, aussi bien dans les moments faciles que difficiles.

IKRAM.RADHIA.





Dédicace

Je dédie cette thèse à mes chers parents qui ont toujours été à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tous leurs efforts et moyens de me voir réussir dans mes études.

Pour ceux que j'adore et respecte :

Mon grand-père et ma grand-mère

Mes frères khalil – AbdEljalil, et ma sœur Lina

Mes tantes et oncles

Mes cousins et mes cousines en particulier Soundousse et Selsabil

Mes copines Radhia, Rahma, Iman

À tous mes professeurs

Et pour tous ceux qui aiment le bon travail et qui ne reculent pas devant les obstacles de la vie.

IKRAM.





Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a

Jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour

son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes

études.

Mes dédicaces s'adressent également à mon cher frère et mes chères sœurs.

Et à tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom Ouannes

À tous mes amis de l'université avec qui j'ai partagé les meilleurs moments de ma

vie d'étude durant ma période d'éducation

Sans oublier quelqu'un.

À toute personne que j'aime et je respecte.

A la fin, mes dédicaces s'adressent également très chaleureusement à mon

Collègue dans ce travail.



RADHIA.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les différents procédés d'usinage	
I.1. Généralité	3
I.2 Technique de fabrication mécanique	3
I.2.1 Obtention par enlèvement de matière	3
I.2.1.1 Tournage	3
I.2.1.2 Fraisage	9
I.2.1.3 Perçage	12
I.2.1.4 Brochage	12
I.2.1.5 Rectification	13
I.2.1.6 Découpage	13
I.2.1.7 Électroérosion	16
I.2.2 Obtention par déformation	18
I.2.2.1 Forgeage	18
I.2.2.2 Laminage	19
I.2.2.3 Estampage	19
I.2.2.3 Emboutissage	20
I.2.2.5 Matriçage	21
I.2.2.6 Filage	21
I.2.2.7 Tréfilage	22
I.2.2.8 Cintrage	23
I.2.2.9 Pliage	24
I.2.2.10 Extrusion	24
I.2.3 Obtention par fusion (moulage)	25
I.2.3.1. Moulage non permanent (moulage au sable)	26
I.2.3.2 Moules permanents	26
I.2.4 Obtention par assemblage	28
I.2.4.1 Soudage	28
I.2.4.2 Collage	29
I.2.4.3 Rivetage	30
I.2.4.4 Agrafage	30

I.2.5 Obtention par frittage	31
Chapitre II :Etude et conception d'une fraise 3 tailles HSS denture alternée (croisée) a queue conique.	
II.1 Introduction	34
II.2 Principe	34
II.2.1. Fraisage de face ou fraisage en bout	34
II.2.2. Fraisage de profil ou fraisages en roulant	35
II.3 Modes de coupe	36
II.3.1 Fraisage en opposition	36
II.3.2Fraisage en concordance ou fraisage "en avalant"	36
II.3.3 Fraisage hémisphérique	36
II.4 Machines – outils de fraisage	37
II.4.1Classification des machines de fraisage	38
II.4.2 Types de machines	38
II.5 Techniques de fraisage	39
II.5.1 Surfaçage	39
II.5.2 Plans épaulés	40
II.5.3 Rainure	40
II.5.4 Poche	40
II.5.5 Perçage	41
II.5.6 Filetage	41
II.6 Paramètres de coupe	42
II.6.1 Paramètres géométriques de coupe	42
II.6.2 Éléments d'outil	43
II.6.2.1 Choix des outils de fraisages	43
II.7.1 Aciers rapides	44
II.7.2 Carbures métalliques	44
II.7.3 Céramiques	44
II.7.4 Nitrure de bore cubique	45
II.7.5 Diamant	45
II.7.6 Principe de la coupe des métaux	45
II.8 Paramètres techno-économiques d'usinage	46
II.8.1 Temps d'usinage	46
II.8.2 Coût d'usinage	48
II.9 Durée de vie d'un outil de coupe	49

II.9.1 Mécanisme d'usure	50
II.9.1.1 Processus d'abrasion	50
II.9.1.2 Processus d'adhésion	51
II.9.1.3 Processus de fissuration	51
II.9.1.4 Usure par corrosion	51
II.9.1.5 Usure par diffusion chimique	52
II.10. Différents types d'usure de l'outillage	52
II.9.2.1 Usure en dépouille	53
II.9.2.2 Usure en entaille	53
II.9.2.3 Usure en cratère	54
II.9.2.4 Arêtes rapportées	55
II.9.2.5 Déformation plastique	55
II.9.2.6 Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne	55
II.9.3 Dépendance entre l'usure et le temps	56
II.11 L'affûtage	56
II.11.1 Machines d'affûtage	57
II.12 Outils de fraisage	57
II.12.1 Caractéristiques des fraises	60
II.12.1.1 La taille	60
II.12.1.2 La forme	61
II.12.1.3 La denture	61
II.12.1.4 Dimensions	62
II.12.2 Mode de fixation	62
II.12.3 Construction	62
II.13 Conclusion	62

Chapitre III : Réalisation et modélisation numérique

III.1 Introduction	64
III.2 Description d'une fraise T a dentures alternées à queue conique	64
III.2.1 Arête, faces de coupe et dépouille	64
III.3 Etapes de réalisation la fraise T a dentures alternées à queue conique	65
III.3.1 Dessin de définition	65
III.2 Gamme d'usinage	66
III.4 Caractéristiques technique de la fraise T a dentures alternées à queue conique	74
III.4.1 Matière de la fraise	74

III.5SolidWorks	75
III.5.1 Introduction	75
III.5.2 SolidWorks Simulation	75
III.5.3 Simulation dela fraise T a dentures alternées à queue conique (étude statique)	76
Conclusion	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion générale	Erreur ! Signet non défini.

Liste des tableaux

CHAPITRE II : LES MATERIAUX COMPOSITES DANS L'INDUSTRIE

AUTOMOBILE

Tab.II.1. Les modèles de fraise-outils.

56-57

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les différents procédés d'usinage

Fig. I.1 Schéma de tournage	4
Fig.I.2. Usinage externe sur tour.	4
Fig.I.3. Principales opérations de tournage interne sur tour	5
Fig.I.4 Schéma représenté l'opération de chariotage	5
Fig.I.5 Schéma représenté l'opération de dressage	6
Fig. I.6 Opération de chanfreinage	6
Fig. I.7 Schéma représenté l'opération de centrage	7
Fig. I.8 Opération de perçage	7
Fig. I.9 Opération d'alésage,	7
Fig. I.10 Schéma montré l'opération de rainurage.	8
Fig. I.11 Opération de tronçonnage.	8
Fig.I.12 Opération de filetage, a) extérieur (filetage), b) intérieur (taraudage).	8
Fig. I.13 Tournage de forme.	9
Fig. I.14 Profil d'une fraise de forme à denture détalonnée.	9
Fig. I.15 Principe de fraisage.	10
Fig.I.16 Schéma de fraisage de face.	10
Fig. I.17 fraisage de profile.	11
Fig.I.18 : Fraisage en opposition.	11
Fig. I.19 : Fraisage en avalant.	11
Fig. I.20. Schéma de différentes formes de perçage	12
Fig. I.21 (a) Broches de formes externes,(b)Broches de formes internes.	12
Fig. I.22 Principe de rectification plane.	13
Fig. I.23 Presse hydraulique à découper.	14
Fig. I.24 : Découpage par jet d'eau.	14
Fig. I.25 Machine de découpage laser.	15
Fig. I.26 : Découpage plasma.	16
Fig. I.27 Principe de fonctionnement électroérosion (Enfonçage).	17
Fig. I.28 : Principe de fonctionnement électroérosion (Robot- fil).	17
Fig. I.29 Schéma d'élaboration par forgeage (pièces forgées).	18
Fig. I.30 Schéma d'élaboration de laminage.	19
Fig. I.31 Schéma d'élaboration par estampage.	19

Fig. I.32 Principe d'emboutissage (pièces forgées) .	20
Fig. I.33 Schéma d'élaboration par matriçage.	20
Fig.I.34 Principe de procédé de filage	21
Fig. I.35 Principe de tréfilage et fil dans la filière.	22
Fig.I.36 Procédés de cintrage.	23
Fig. I.37 Schéma d'élaboration de pliage de tôles.	23
Fig. I.38 Extrusion des pièces de différentes formes.	24
Fig. I.39 Pièce plastique moulée par injection.	25
Fig. I.40 Moulage en sable.	26
Fig. I.41 Moulage en coquille.	27
Fig. I.42 Moulage sous pression.	27
Fig. I.43 Schéma d'assemblage par soudage .	28
Fig. I.44 Schéma d'assemblage par collage .	29
Fig. I.45 Schéma d'assemblage par rivets.	29
Fig. I.46 Schéma d'une agrafeuse manuelle professionnelle.	30
Fig. I.47 Schéma d'élaboration par frittage.	30
Fig. I.48 Plaquette de coupe amovible pour outil d'usinage.	31

Chapitre II : Etude et conception d'une fraise 3 tailles HSS denture alternée (croisée) a queue conique.

Fig. II.1 Principes de fraisage de face (en bout)	34
Fig. II.2 Principes de fraisage de profil.	34
Fig. II.3 Fraisage en opposition	35
Fig. II.4 Fraisage en avalant	35
Fig. II.5 Fraise à bout sphérique (hémisphérique).	36
Fig. II.6 Fraiseuse universelle.	36
Fig. II.7. Types des machines de fraisage ; a) Fraiseuse à console, b) Fraiseuse à banc à commande numérique, c) Centre d'usinage.	37.38
Fig. II.8 Opération de surfaçage.	39
Fig. II.9 Fraisage d'épaulements.	39
Fig. II.10 Fraisage de rainures.	39
Fig. II.11 Schéma d'élargissement d'une cavité/poche.	40
Fig. II.12 Opération de perçage.	40
Fig. II.13 Opération de filetage.	40

Fig. II.14 Illustration des paramètres de coupe.	41
Fig. II.15 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant.	43
Fig. II.16. Zones de coupe	44
Fig. II.17. Les zone de cisaillement	44
Fig. II.18. Géométrie de la formation d'un copeau	45
Fig. II.19 Paramètres de temps technologique (fraisage en bout).	46
Fig. II.20 Paramètres de temps technologique (fraisage de profil).	46
Fig. II.21 Critère d'usure VB.	47
Fig. II.22 Processus d'usure par abrasion.	48
Fig. II.23 Processus d'usure par adhésion.	49
Fig. II. 24. Processus d'usure par oxydation.	50
Fig. II.25 Différents types d'usure de l'outillage	50
Fig. II.26 L'usure des outils	50
Fig. II.27 Usure en dépouille (abrasion)	51
Fig. II.28. Usure en entaille (adhérence).	52
Fig. II.29. Usure en cratère	52
Fig. II.30. Usure thermique (déformation plastique)	53
Fig. II.31 Usure en peigne.	54
Fig. II.32 Courbe d'usure par rapport le temps.	54
Fig. II.33 Affûteuse universelle.	55
Fig. II.34 Schéma de Fraise trois tailles et deux tailles.	57
Fig. II.35 Schéma représenté deux types fraises de forme.	58
Fig. II.36 Fraises de différents sens denture, a) Dentures hélicoïdales à gauche, b) Dentures hélicoïdales à droite, c) Dentures hélicoïdales à gauche et droite (alternées)	58

Chapitre III : Réalisation et modélisation numérique

Fig. III.1 Schéma descriptive d'une fraise T a dentures alternées à queue conique	62
Fig. III.2. Schéma descriptive le Profil de la fraise à queue conique	63
Fig. III.3. Débitage de la matière première (en ARS + 45).	63
Fig. III.4 Partie de fixation	64
Fig. III.5 Partie active	64
Fig. III.6 Dressage de partie de fixation	65

Fig. III.7 Chariotage de partie de fixation	65
Fig.III.8 Dressage de partie active	66
Fig.III.9 Chariotage de partie active	66
Fig.III.10 Soudage en bout de deux morceaux.	66
Fig.III.11 Chariotage et dressage et centrage	67
Fig.III.12 Chambrage extérieur	67
Fig.III.13 Perçage et taraudage	68
Fig.III.14 Tournage cylindrique et conique en CNC (Smart-turn 8)	68
Fig.III.15 Fraise après traitement thermique.	70
Fig.III.16 Pièce après sablage.	70
Fig.III.17 Pièce après rectification cylindrique extérieur.	71
Fig. III.18 Schéma de maillage volumique de la fraise de forme	76



Introduction générale

Introduction générale

Les techniques de fabrication mécanique constituent l'un des piliers fondamentaux de l'ingénierie moderne. Elles jouent un rôle essentiel dans la transformation des matières premières en composants techniques répondant aux exigences fonctionnelles et géométriques des produits industriels. Parmi ces techniques, l'usinage occupe une place de choix en raison de sa grande précision et de sa capacité à réaliser des formes complexes avec des tolérances serrées et une excellente qualité de surface.

Les outils de coupe représentent des éléments cruciaux dans les opérations d'usinage. Leur conception et leur fabrication exigent un haut niveau de compétence technique, notamment en matière de choix des matériaux, d'étude de la géométrie de l'outil, ainsi que de compréhension des mécanismes d'usure et des contraintes mécaniques appliquées lors de la coupe.

Dans ce contexte, le présent mémoire de fin d'études vise à étudier, concevoir et réaliser une fraise à trois tailles en acier rapide (HSS), dotée d'une denture croisée et d'une queue conique, en s'appuyant sur une méthodologie scientifique qui combine l'analyse théorique, la conception assistée par ordinateur et la modélisation numérique à l'aide d'outils avancés de CFAO.

Ce travail est structuré en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre traite des différentes techniques de fabrication et présente les principes généraux liés à l'usinage mécanique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude et à la conception de la fraise, en abordant sa géométrie, le type de denture, l'analyse mécanique ainsi que les phénomènes d'usure.

Le troisième chapitre décrit la gamme d'usinage développée ainsi que l'analyse des contraintes appliquées sur l'arête de coupe de la fraise étudiée.

Le mémoire se termine par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus, évalue les performances techniques de l'outil conçu, et propose des perspectives d'amélioration pour des applications industrielles futures plus avancées.

Chapitre I :

Généralités

sur les différentes techniques de

fabrication.

I.1. Généralité

Il s'agit d'un ensemble de techniques permettant d'obtenir une pièce ou un objet en transformant une matière brute. Pour atteindre le résultat souhaité, il est parfois nécessaire de faire appel à plusieurs procédés de fabrication successifs. Ces procédés font partie intégrante du domaine de la construction mécanique. Les méthodes de fabrication évoluent continuellement dans le but d'améliorer la productivité, de rendre la production plus simple et plus rapide, et de réduire la consommation de matières premières. Ces méthodes se divisent généralement en quatre grands groupes principaux, qui sont :

- a) Obtention par enlèvement de copeaux (usinage)
- b) Obtention par déformation
- c) Obtention par fusion (moulage)
- d) Obtention par assemblage
- e) Obtention par frittage

I.2 Technique de fabrication mécanique**I.2.1 Obtention par enlèvement de matière**

Consiste à atteindre la forme finale en enlevant de petites portions de matière (copeaux). De façon générale, ces procédés sont désignés sous le terme d'usinage. On y distingue :

I.2.1.1 Tournage

Le tournage est un procédé d'usinage par élimination de matière, permettant de fabriquer des pièces de forme cylindrique ou conique à l'aide d'outils tranchants, sur des machines appelées tours. La pièce à usiner est fixée soit dans un mandrin, une pince, ou entre deux pointes. Bien que ce ne soit pas sa fonction principale, le tournage permet également de réaliser des opérations de perçage. Le mouvement de coupe est généré par la rotation de la pièce maintenue dans le mandrin ou la pince, tandis que le mouvement d'avance est assuré par le déplacement de l'outil. Cette combinaison de mouvements permet d'enlever la matière progressivement sous forme de copeaux. Voir (**Fig. I.1**).

Ces pièces peuvent être :

- Métalliques ou en plastique (tour mécanique) ;
- En bois (tour à bois) ;
- En terre (tour vertical de potier).

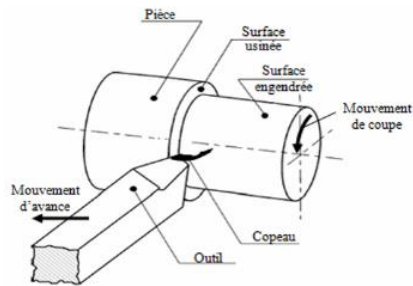


Fig. I.1 Schéma de tournage

I.2.1.1.1 Les différents types d'opérations

(a) Tournage extérieur

On distingue : (voir Fig. I.2)

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

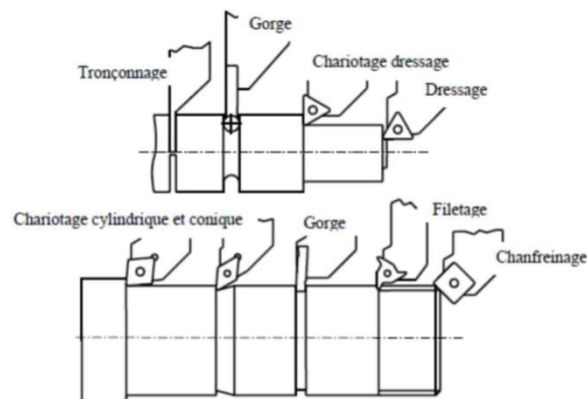


Fig.I.2. Usinage externe sur tour.

(b) Tournage intérieur

Usinage interne sur tour : voir Fig.I.3.

- Alésage ;
- Dressage ;
- Tournage intérieur par contournage ;

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

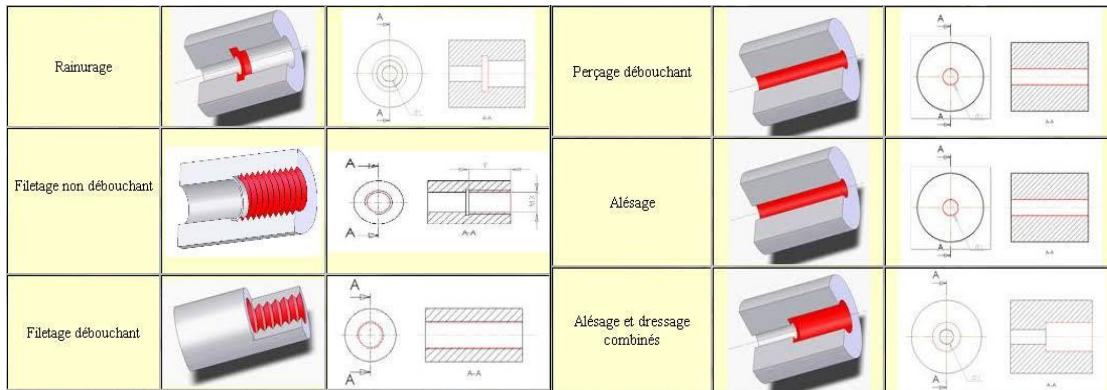


Fig.I.3. Principales opérations de tournage interne sur tour

I.2.1.1.2 Principaux usinages réalisables sur un tour

- Usinage cylindrique extérieur entre pointes, aussi appelé chariotage, comprenant des passes de dégrossissage suivies de passes de finition ;
- Réalisation de surfaces planes par dressage, avec étapes de dégrossissage et de finition ; Filetage, tronçonnage, perçage et tournage intérieur (alésage).
- Usinage conique (chariotage conique) en inclinant le chariot porte-outil, en deux phases : dégrossissage puis finition ;
- Exécution d'opérations telles que le filetage, le tronçonnage, le perçage ainsi que l'alésage (usinage intérieur).

I.2.1.1.3 Techniques de tournage

a) Chariotage

Le chariotage consiste à usiner une surface cylindrique extérieure par déplacement de l'outil parallèlement à l'axe de rotation de la pièce. (voir Fig. I.4).

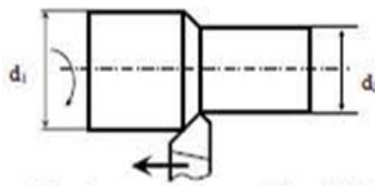


Fig.I.4 Schéma représenté l'opération de chariotage

b) Dressage

Le dressage permet d'obtenir une surface plane en bout de pièce. L'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de rotation de la pièce. (voir **Fig.I.5**).

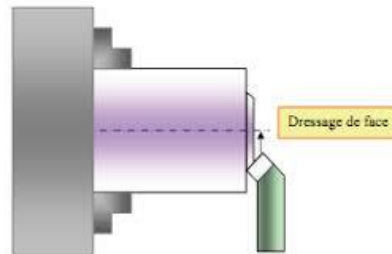


Fig.I.5 Schéma représenté l'opération de dressage

c) Chanfreinage

Le chanfreinage est une opération d'usinage qui consiste à enlever de la matière sur l'arête d'une pièce afin de former un biseau, généralement incliné à 45° par rapport à la surface, dans le but de faciliter l'assemblage, d'éliminer une arête vive ou de préparer une soudure. (voir **Fig. I.6**).

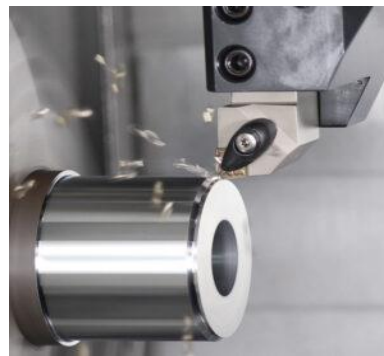


Fig. I.6 Opération de chanfreinage

d) Centrage

Le centrage est une opération d'usinage ou de préparation mécanique qui consiste à positionner une pièce de manière à ce que son axe soit parfaitement aligné avec l'axe de rotation de la machine-outil (comme un tour). Cette opération est essentielle pour assurer un usinage précis et symétrique, en particulier lors de perçage, tournage ou montage de pièces tournantes. (Voir **Fig. I.7**).

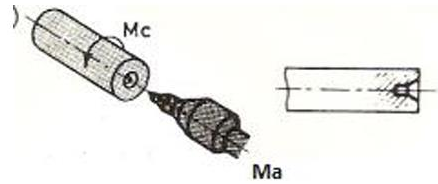


Fig. I.7 Schéma représenté l'opération de centrage

e) Perçage

Bien que souvent effectué sur une perceuse, le perçage peut aussi se faire sur un tour à l'aide d'un foret monté sur la contre-pointe pour créer un trou axial. (voir **Fig. I.8**)

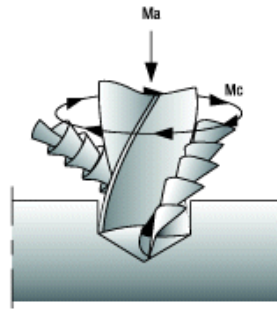


Fig. I.8 Opération de perçage

f) Alésage

Cette technique consiste à usiner ou rectifier un trou existant afin d'en améliorer la précision ou le diamètre. Il s'effectue souvent après un perçage. (Voir **Fig.I.9**)

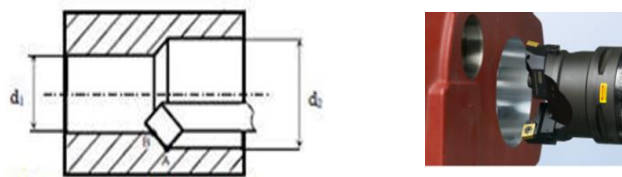


Fig. I.9. Opération d'alésage,

g) Rainurage

Le rainurage est une opération d'usinage qui consiste à créer une rainure (encoche étroite et longue) sur une surface cylindrique ou plane d'une pièce, généralement à l'aide d'un outil de

forme. Cette rainure peut être axiale, radiale ou périphérique selon la fonction mécanique recherchée (guidage, assemblage, logement de clavette, passage d'huile, etc.) (voir **Fig. I.10**).

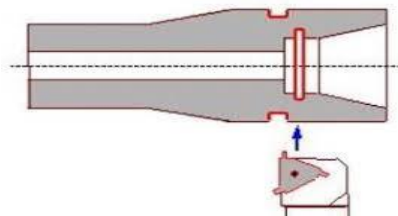


Fig. I.10 Schéma montrant l'opération de rainurage.

h) Tronçonnage

Le tronçonnage est l'opération qui permet de séparer une pièce de la barre ou de la détacher à la fin de l'usinage. (Voir **Fig. I.11**)

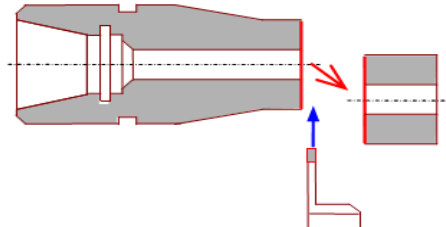


Fig. I.11 Opération de tronçonnage.

i) Filetage et taraudage

Le filetage au tour est une technique permettant de créer un filet (filetage extérieur ou intérieur) par déplacement coordonné de l'outil selon un pas déterminé. (voir **Fig. I.12**).

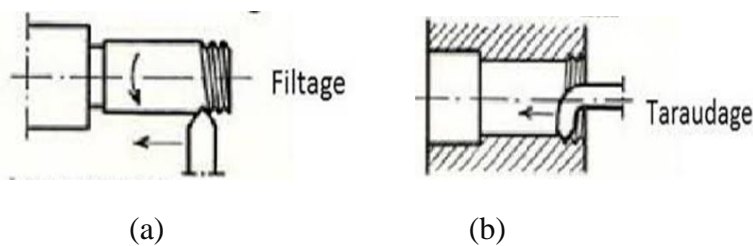


Fig. I.12 Opération de filetage, a) extérieur (filetage), b) intérieur (taraudage).

j) Tournage de forme

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

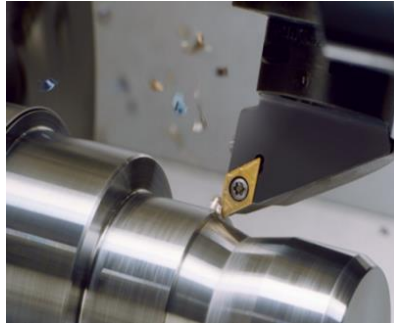


Fig. I.13 Tournage de forme.

k) Détalonnage

Le détalonnage est un défaut d'usinage qui se produit lorsque l'angle de dépouille de l'outil est trop grand, ce qui réduit le contact entre l'arête de coupe et la pièce. Cela provoque une perte de guidage de l'outil, une vibration de coupe, et peut entraîner un broutage, une diminution de la qualité de surface et une instabilité de l'usinage. (Voir Fig. I.14).



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

I.2.1.2 Fraisage

Le fraisage est une technique d'usinage qui consiste à retirer de la matière. Ce procédé utilise une machine-outil spécifique appelée fraiseuse, ainsi qu'un outil de coupe particulier doté de plusieurs arêtes : la fraise (voir Fig.I.15). La fraiseuse est idéale pour usiner des surfaces planes, et, lorsqu'elle est équipée d'une commande numérique, elle permet également de façonner des

formes variées, y compris les plus complexes. En général, l'enlèvement de matière s'effectue grâce à des dents situées sur la périphérie et/ou l'extrémité d'un disque ou d'un cylindre.

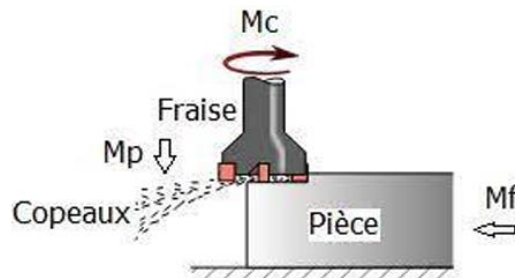


Fig. I.15 Principe de fraisage.

I.2.1.2.1 Principe de travail

Le fraisage est une méthode d'usinage par enlèvement de matière, où les copeaux sont produits grâce à la combinaison de deux mouvements : la rotation de l'outil de coupe (la fraise) autour de son propre axe, et le déplacement de la pièce à usiner suivant trois axes orthogonaux.

I.2.1.2.2 Modes de fraisage

On distingue deux principaux types de fraisage : le fraisage de face et le fraisage de profil

a) Fraisage de face

Le fraisage de face, Dans lequel l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface de la pièce. Il est utilisé pour usiner des surfaces planes et régulières. Cette opération est également appelée « fraisage en bout ». (Voir Fig.I.16)

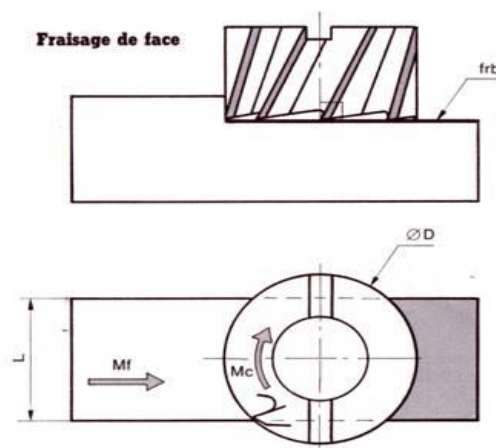
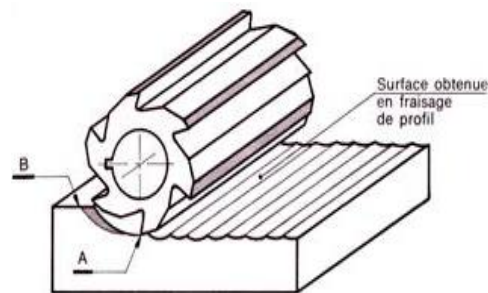


Fig.I.16 Schéma de fraisage de face.**b) Fraisage de profil**

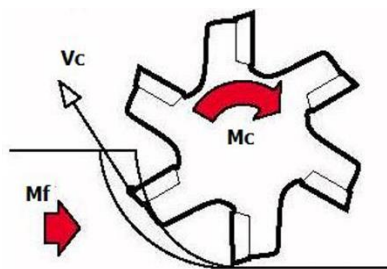
Dans lequel la fraise travaille parallèlement à la surface, permettant de réaliser des formes variées ou des surfaces planes, aussi appelé « fraisage en roulant ». (Voir **Fig. I.17**).

**Fig. I.17** fraisage de profile.

Dans le fraisage de profil, selon le sens de rotation de l'outil par rapport au déplacement de la pièce, on distingue

➤ **Fraisage en opposition**

La pièce avance dans un sens inverse à la rotation de l'outil. Le copeau naît mince et s'épaissit.(Voir **Fig. I.18**)

**Fig.I.18** : Fraisage en opposition.

➤ **Fraisage en concordance ou « en avalant »**

En fraisage avalant, la direction de l'avance est la même que celle de la rotation de la fraise. Le copeau est plus épais au début, et devient de plus en plus fin (voir **Fig. I.19**).

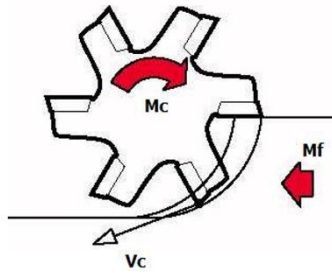


Fig. I.19 : Fraisage en avalant.

Il est également possible d'effectuer un **fraisage combiné**, associant à la fois les approches de face et de profil.

I.2.1.3 Perçage

Le perçage est une opération d'usinage utilisée pour créer un trou circulaire (cylindrique ou conique) au sein d'un matériau plein, au moyen d'un outil appelé foret. Ce dernier effectue un mouvement de coupe hélicoïdal relatif à la pièce.

Les trous réalisés peuvent remplir différentes fonctions : passage d'arbres, de fluides, ou encore permettre le montage par vissage.

Cette opération est souvent complétée par d'autres procédés comme l'alésage (finition du trou), le taraudage (création d'un filet intérieur), le lamage (élargissement partiel) ou le chanfreinage. Ces différents procédés sont représentés dans la **Figure. I.20.**

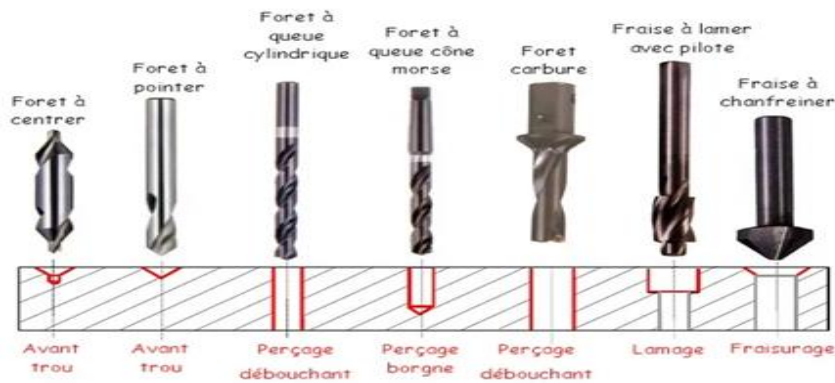


Fig. I.20. Schéma de différentes formes de perçage

I.2.1.4 Brochage

Le brochage est un procédé d'usinage de précision réalisé avec un outil spécifique appelé broche, comportant plusieurs arêtes tranchantes successives. Chaque dent de la broche enlève une fine couche de matière, la profondeur de coupe augmentant progressivement.

Dans le cas du brochage intérieur, il est impératif que la pièce dispose d'un trou débouchant permettant le passage complet de la broche à travers la pièce. (voir **Fig. I.21**)



(a)



(b)

Fig. I.21 (a) Broches de formes externes, (b) Broches de formes internes.

I.2.1.5 Rectification

La rectification est une opération d'usinage de finition de haute précision, qui permet d'améliorer la qualité géométrique et l'état de surface d'une pièce. Elle consiste à enlever de très fines couches de matière à l'aide d'une meule abrasive en rotation rapide. Cette technique est utilisée principalement pour atteindre des tolérances serrées sur les dimensions, les formes (cylindricité, planéité...) et pour obtenir un état de surface très lisse, souvent après des opérations d'usinage plus grossières comme le tournage ou le fraisage. (voir **Fig. I.22**).

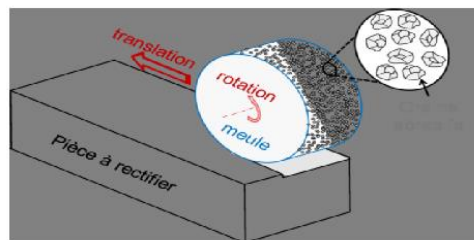


Fig. I.22 Principe de rectification plane.

- **Avantages de la rectification**

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

I.2.1.6 Découpage

Le découpage est un procédé de fabrication permettant de réaliser des pièces en cisillant la matière selon un contour fermé. On distingue généralement deux termes selon l'objectif de l'opération :

- Découpage : utilisé pour obtenir une pièce dont les contours sont définis par une forme précise et des dimensions spécifiques ;
- Poinçonnage : destiné à créer des ouvertures dans une pièce, comme par exemple des perforations.

Dans ce processus, un outil appelé poinçon vient exercer une pression sur la matière (telle que de la tôle, du papier, du carton ou de la mousse), la traversant pour en détacher une pièce de forme définie (voir la figure ci-dessous).

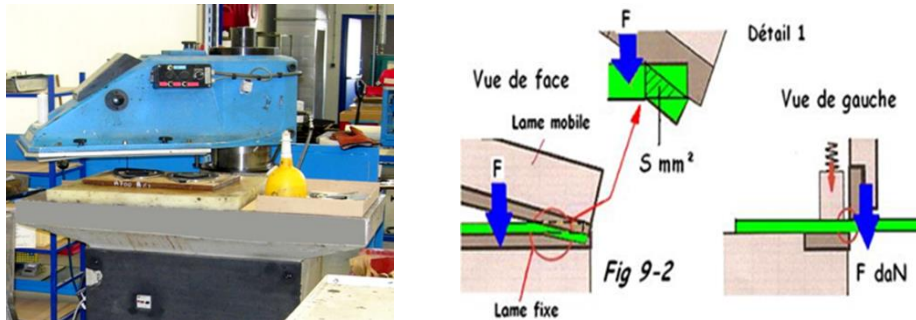


Fig. I.23 Presse hydraulique à découper.

I.2.1.6.1 Découpage jet d'eau

L'eau, ou plus précisément le fluide utilisé, peut être enrichie avec des additifs destinés à améliorer le processus de coupe. Lorsqu'un abrasif est ajouté au jet d'eau, cela permet de découper des matériaux durs comme les métaux, les pierres, le marbre ou encore le verre, et ce, sur des épaisseurs pouvant atteindre 600 millimètres.

On distingue deux techniques de découpage (voir le schéma ci-dessous) :

- La découpe à l'eau pure est utilisée pour les matériaux tendres, similaires à ceux que l'on peut trancher au cutter. Elle s'effectue à l'aide d'une buse de coupe dont le diamètre varie entre 0,08 mm et 0,30 mm.
- La découpe à l'eau additionnée d'abrasif permet de traiter pratiquement tous les types de matériaux. Dans ce procédé, l'eau traverse une buse, puis un abrasif (comme du sable) y est injecté. Le mélange est ensuite dirigé dans un canon de focalisation, qui garantit une

trajectoire cylindrique et précise du jet. Le diamètre de la buse utilisée se situe entre 0,20 mm et 0,40 mm.

- Un seul matériau résiste à cette technique : le verre trempé. Il se brise rapidement dès le début de la coupe en raison des fortes contraintes internes qu'il subit.
- L'eau est projetée à une pression extrêmement élevée, pouvant atteindre 6150 bars, au moment de son expulsion par la buse de découpe.

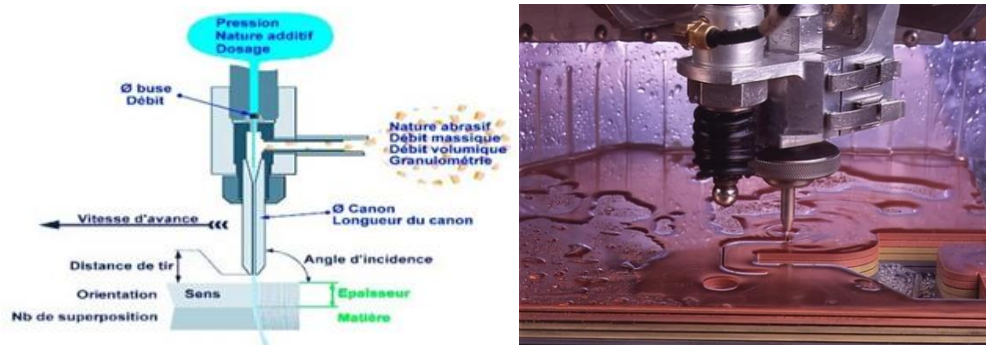


Fig. I.24 : Découpage par jet d'eau.

I.2.1.6.2 Découpage laser

Ce procédé permet de réaliser des coupes nettes, précises et rapides sur une grande variété de matériaux, jusqu'à une épaisseur de 25 mm. La découpe s'effectue sans contrainte mécanique sur la pièce, et la zone thermiquement altérée (ZAT) reste très réduite (environ 0,5 mm pour les métaux) ce qui limite considérablement les déformations. Il est également facile de percer des trous, à condition que leur diamètre soit au moins égal à l'épaisseur de la tôle lorsque celle-ci dépasse 10 mm.

De plus, la machine peut souvent être utilisée pour graver des éléments tels que du texte. La découpe se fait généralement sur des plaques de matériau, produisant ainsi des objets plats. Cependant, certains matériaux comme le cuivre ou l'argent, en raison de leur forte réflectivité, se prêtent mal à la découpe laser. Dans ces cas, la découpe au jet d'eau à haute pression constitue une alternative plus efficace. (Fig. I.25)



Fig. I.25 Machine de découpage laser.

I.2.1.6.3 Découpage plasma

Le découpage plasma se distingue par les types de gaz utilisés dans le procédé. Il repose sur la création d'un arc électrique entre une électrode située à l'intérieur de la torche de coupe et la pièce à usiner. Ce courant ionise le gaz à la sortie de la buse, générant ainsi un jet de plasma. Ce jet, atteignant des températures avoisinant les 18 000 °C, fait fondre instantanément le matériau et traverse l'épaisseur de la pièce.

Ce procédé est surtout employé dans le domaine de la métallerie, où il permet de découper des tôles métalliques d'une épaisseur allant de 0 à 160 mm, avec une précision de l'ordre de $\pm 0,2$ mm (**Fig. I.26**).

**Fig. I.26** : Découpage plasma.

Sur une machine de découpe plasma, la chaleur intense fait fondre instantanément le métal, tandis qu'un gaz propulsé à haute pression évacue les particules de métal en fusion au fur et à mesure. L'utilisation d'une torche plasma nécessite impérativement un environnement bien ventilé ou une installation en extérieur, en raison des gaz toxiques produits par les températures extrêmement élevées. Certains systèmes intègrent un jet d'eau calibré qui jaillit de la torche pour refroidir immédiatement le métal après la découpe, ce qui permet également de limiter l'émission de ces gaz nocifs.

I.2.1.7 Electroérosion

- 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 a la forme complémentaire de la forme à réaliser.
- Les particules du métal brûlé sont entraînées par le liquide diélectrique.

I.2.1.7.1 Usinage en plongée (Enfonçage)

L'électroérosion utilise l'énergie électrique pour retirer du métal à la surface d'une pièce, sans qu'il y ait de contact direct entre l'outil et la pièce. Un courant électrique à haute fréquence est envoyé entre l'électrode de l'outil et la pièce, générant des étincelles qui traversent l'espace entre les deux et provoquent la vaporisation localisée de petites zones du matériau (**Fig. I.27**).

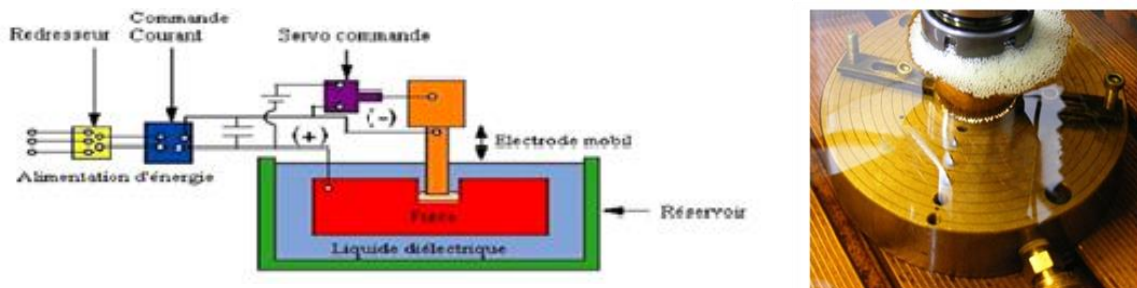


Fig. I.27 Principe de fonctionnement électroérosion (Enfonçage).

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.28**). Cette technique est très utilisée pour l'obtention de micro pièces de haute précision ainsi que pour l'élaboration des micro-outils que nous retrouvons sur les machines de fraisage ou de perçage.

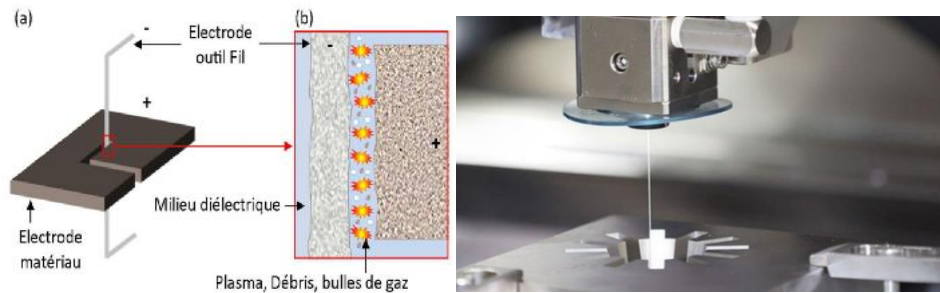


Fig. I.28 : Principe de fonctionnement électroérosion (Robot- fil).

- **Avantage**

- Usinage possible de matériaux trempés et durs, impossibles à usiner avec les procédés par enlèvement de copeaux ;
- Usinage de formes tridimensionnelles « démoulables » (l'outil pénètre dans la pièce et y laisse sa forme complémentaire) et hélicoïdales (en donnant à l'outil un mouvement de rotation conjuguée avec son mouvement de translation) ;
- Bons états de surface ($R_a \gg 2 \text{ mm}$) et précision ($\gg 20\text{mm}$).

- **Inconvénients**

- Ce procédé ne s'applique qu'aux matières conductrices de l'électricité ;
- Coût du matériel (spécifique à chaque forme de pièce à obtenir) et usure de l'outil électrode.

I.2.2 Obtention par déformation

I.2.2.1 Forgeage

Le forgeage regroupe les techniques utilisées pour façonner une pièce mécanique en exerçant une force intense sur un matériau, soit à froid, soit après l'avoir chauffé, afin de lui donner la forme souhaitée. Sous l'effet d'une pression élevée ou d'une série de chocs, un bloc métallique chauffé entre 800 et 1200 °C se déforme plastiquement vers les zones non contraintes. Comme aucune matrice n'encadre cette déformation, la forme finale dépend principalement de l'habileté de l'opérateur (voir **Fig. I.29**). Cette opération peut être réalisée à l'aide d'outils manuels, d'un marteau-pilon ou d'une presse hydraulique. La forge libre est utilisée pour produire des ébauches ou des pièces brutes, mais elle n'est pas adaptée à une production en série.



Fig. I.29 Schéma d'élaboration par forgeage (pièces forgées).

- **Avantages**

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

- **Inconvénients**

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

I.2.2.2 Laminage

Le matériau est progressivement écrasé en passant entre deux cylindres tournant en sens inverse, appelés laminoirs. Cette opération, réalisée à froid ou à chaud, permet de réduire l'épaisseur du matériau. Plusieurs laminoirs sont généralement enchaînés pour affiner progressivement les profilés. Le laminage est ainsi le procédé principal pour produire la majorité des tôles plates brutes. (**Fig. I.30**).

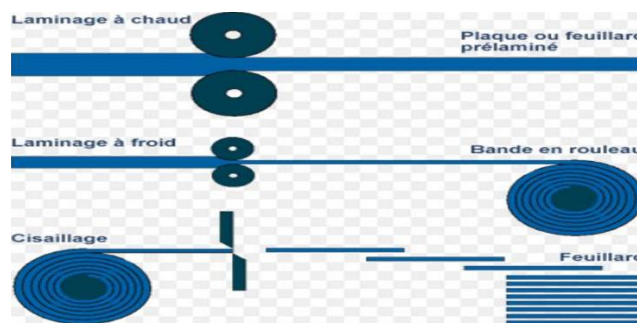


Fig. I.30 Schéma d'élaboration de laminage.

I.2.2.3 Estampage

On commence par faire l'ébauche de la pièce désirée, en plaçant le lopin dans la matrice d'ébauche. Une fois celle-ci prête, on la met dans la matrice ayant la forme de la pièce voulue. Puis, on vient découper les cordons de bavures (voir schéma ci-dessous).

Le matriçage, réservé aux métaux non ferreux, est une variante de l'estampage (on dit aussi « estampage de précision »).

Dans ce cas, la presse hydraulique lente se substitue au marteau-pilon et la pièce est insérée par force dans un outillage (matrice) démontable. L'intérêt technique de ces procédés est la compression des molécules de matière selon la forme de la pièce d'où des résistances extrêmes aux efforts mécaniques.

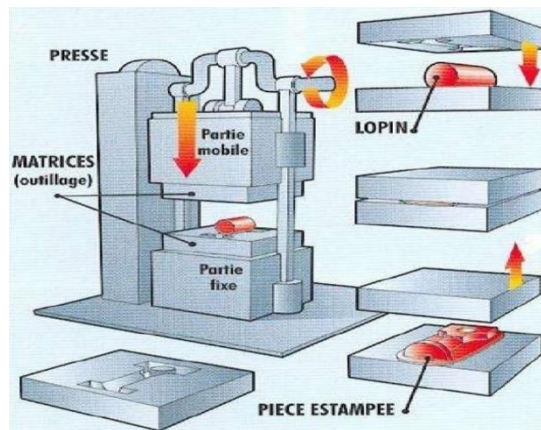


Fig. I.31 Schéma d'élaboration par estampage.

I.2.2.3 Emboutissage

L'emboutissage est un procédé de fabrication destiné à transformer une fine feuille de tôle plane en un objet ayant une forme non développable. Avant cette opération, la tôle brute, appelée « Becker », n'a encore subi aucune déformation. La température utilisée pour l'emboutissage se situe généralement entre un tiers et la moitié du point de fusion du matériau. Très répandue dans des secteurs comme l'automobile et l'électroménager, cette technique repose sur la déformation plastique du métal, impliquant un allongement ou un resserrement localisé de la tôle pour atteindre la forme souhaitée.

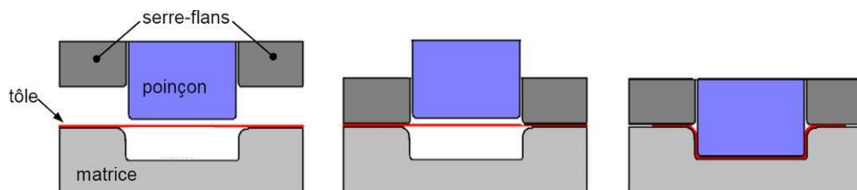


Fig. I.32 Principe d'emboutissage (pièces forgées) .

I.2.2.5 Matricage

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

Le matricage est une opération de forge effectuée à l'aide d'outillages appelés des matrices (demi-matrice supérieure et demi-matrice inférieure). Les matrices portent en creux la forme de la pièce (Fig. I.33).

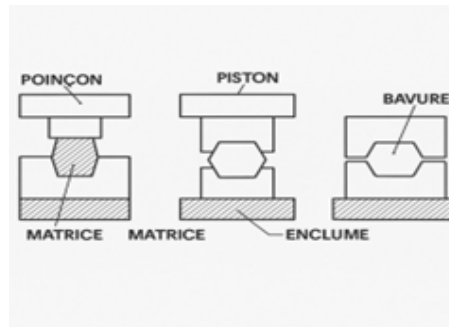


Fig. I.33 Schéma d'élaboration par matricage.

I.2.2.6 Filage

Le filage est une méthode de mise en forme des métaux par compression. Elle consiste à pousser un matériau ductile (éventuellement rendu ductile par chauffage) à travers une filière. Cette méthode permet d'obtenir des produits longs qui peuvent être de formes simples (barres, tubes) ou plus compliquées (profilés pour l'aéronautique ou le bâtiment). La poussée permettant la déformation est généralement fournie par des presses hydrauliques (voir schéma ci-dessous).

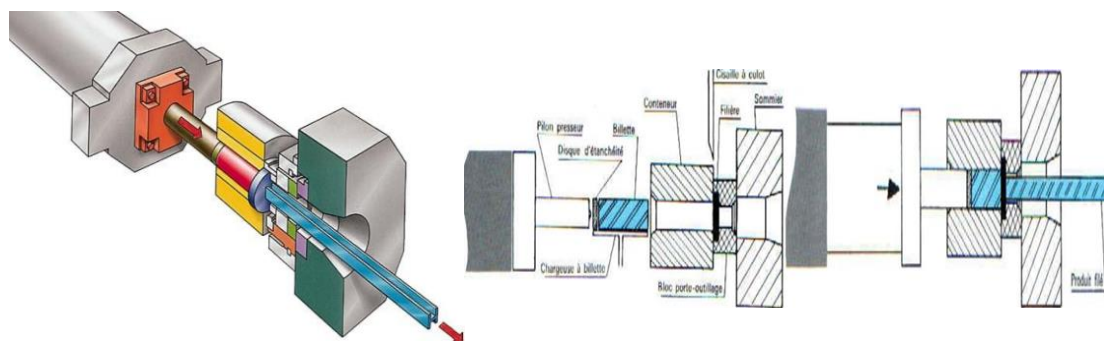


Fig.I.34 Principe de procédé de filage

(a) Filage direct

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

(b) Filage inverse

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

Le gros avantage de la méthode réside dans la suppression des frottements entre la billette et le conteneur. L'effort de filage est minoré ce qui permet l'utilisation de presses de moins forte puissance. L'absence de frottement supprime une partie des échauffements ce qui permet une meilleure maîtrise de la structure métallique et limite le risque de défauts de surface. Dans le cas de l'aluminium, on peut supprimer presque complètement la zone corticale à gros grains. Il est plus facile de maîtriser les tolérances géométriques.

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

(c) Filage inverse en conteneur

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

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

(d) Filage sur aiguille

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

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

I.2.2.7 Tréfilage

Le tréfilage consiste à diminuer la section d'un fil métallique en le tirant mécaniquement à l'aide d'une machine à tréfiler (voir **Fig. I.35**).

Les établissements spécialisés dans ce procédé sont appelés tréfileries. Cette opération provoque un écrouissage important du métal, ce qui nécessite un traitement thermique (recuit) pour restaurer sa plasticité et éviter qu'il ne devienne trop cassant.

Le fil, initialement enroulé en bobine, est tiré par un ou plusieurs cabestans qui exercent une traction par frottement. Avant d'atteindre le cabestan, le fil traverse une filière qui réduit sa section par déformation. La filière est fortement lubrifiée pour préserver la qualité de surface du fil, limiter l'échauffement dû à l'écrouissage et faciliter le refroidissement.

À noter que le tréfilage est aussi employé dans la production industrielle de pâtes alimentaires.

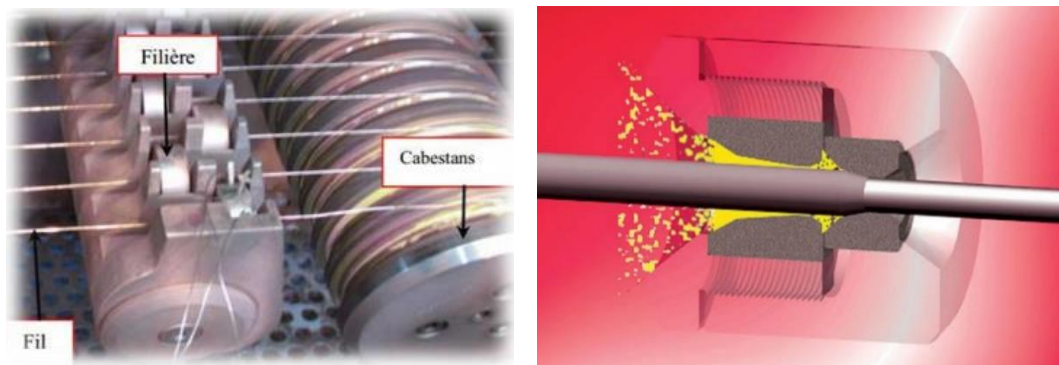


Fig. I.35 Principe de tréfilage et fil dans la filière.

I.2.2.8 Cintrage

Le cintrage est un procédé mécanique qui consiste à déformer un tube ou une barre selon un rayon et un angle défini, à l'aide d'une cintruse. Le terme désigne aussi, de manière générale, la réalisation d'un produit cintré. Plusieurs méthodes de cintrage existent : par enroulement, par poussée, par roulage ou encore par emboutissage (voir Fig.I.36).

Quant au pliage, il s'agit d'une déformation réalisée en appliquant une force le long de la pièce, qui repose sur deux points d'appui. Ce procédé, similaire à la flexion, nécessite de dépasser la limite élastique du matériau pour atteindre l'angle souhaité.

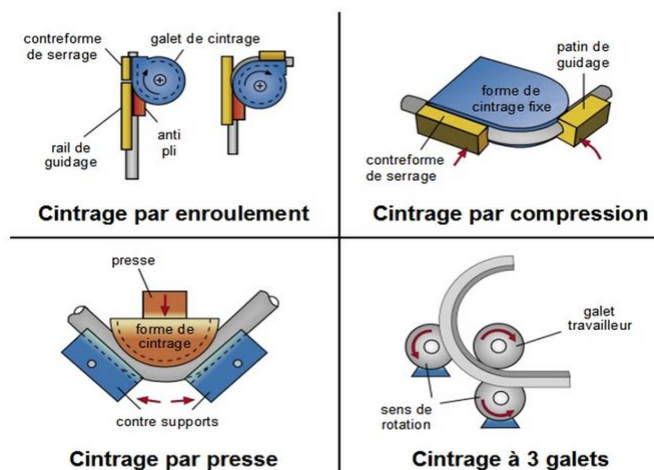


Fig.I.36 Procédés de cintrage.

I.2.2.9 Pliage

Le pliage est un procédé de déformation consistant à appliquer une force le long d'une pièce posée sur deux lignes d'appui. Ce processus, similaire à la flexion, nécessite de dépasser la limite élastique du matériau pour former l'angle désiré (voir Fig. I.37).

- **Avantages**
 - Outillage simple : presses hydrauliques avec différents poinçons et matrices.
- **Inconvénients**
 - Ressaut élastique résiduel difficile à prévoir ;
 - Longueur de pliage limitée.

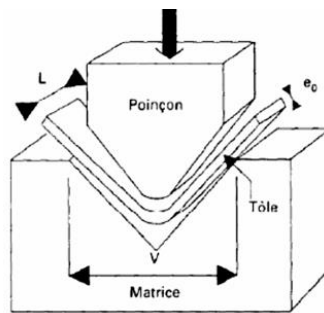


Fig. I.37 Schéma d'élaboration de pliage de tôles.

I.2.2.10 Extrusion

L'extrusion est un procédé de fabrication (thermo)mécanique où un matériau comprimé est forcé de passer à travers une filière dont la section correspond à celle de la pièce souhaitée. Cette technique permet de produire en continu des éléments longs (tubes, tuyaux, profilés, fibres textiles) ainsi que des produits plats (plaques, feuilles, films), avec des cadences de production élevées.

Par rapport à l'estampage ou au matriçage, l'extrusion permet d'obtenir des pièces aux formes plus précises et avec une excellente qualité de surface, réduisant souvent la nécessité d'usinage supplémentaire. Les pièces extrudées ont généralement une masse moyenne d'environ un kilogramme (voir figure ci-dessous).



Fig. I.38 Extrusion des pièces de différentes formes.

- **Avantages**

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

- **Inconvénients**

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

I.2.3 Obtention par fusion (moulage)

Le moulage est un procédé de fabrication consistant à verser un métal en fusion dans une cavité (moule) pour obtenir une pièce ayant une forme déterminée. Il est particulièrement adapté à : (voir **Fig. I.39**).

- La production de formes complexes difficilement réalisables par d'autres procédés d'usinage.
- La fabrication économique de pièces simples en grande série.
- L'exploitation des propriétés spécifiques (mécaniques, thermiques ou chimiques) des alliages métalliques qui sont parfois difficiles à usiner.

Ce procédé permet ainsi de tirer avantage des métaux ou alliages aux caractéristiques particulières (résistance à la corrosion, dilatation, frottement, tenue à haute ou basse température, etc.) et de former directement des pièces finies ou semi-finies.



Fig. I.39 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 répandu et encore aujourd'hui très compétitif face à des méthodes plus modernes. Il permet de réaliser aussi bien de grandes pièces uniques que des petites et moyennes séries sur des installations de moulage mécanisées, et cela pour tout type d'alliage. Cette technique repose sur l'utilisation de moules en sable mélangé à de l'argile et de l'eau. Le moulage peut être effectué avec ou sans modèle, ce dernier pouvant être en bois, en plâtre ou en métal. Afin de faciliter le démoulage sans détériorer l'empreinte, une légère inclinaison appelée « dépouille » est donnée aux surfaces orientées dans le sens du retrait ; pour les surfaces en « contre-dépouille », le modèle est fabriqué en plusieurs parties amovibles. Lorsqu'il n'y a pas de modèle, les empreintes et noyaux sont directement façonnés dans le sable. Parmi les principaux atouts de cette méthode, on trouve sa rapidité d'exécution et le très fort taux de récupération du sable utilisé. Elle est largement employée pour mouler des pièces en fonte, en acier ainsi qu'en métaux non ferreux.

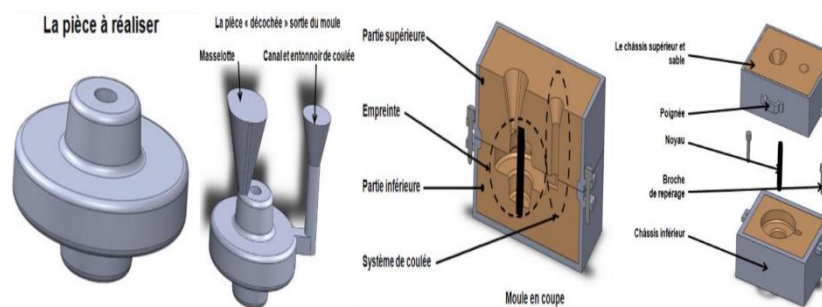


Fig. I.40 Moulage en sable.

I.2.3.2 Moules permanents

Dans le procédé de coulée en moule permanent, un moule réutilisable est employé. Ce procédé présente plusieurs avantages :

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

Le moule, généralement fabriqué en métal comme la fonte grise, est constitué de deux parties ou plus reliées par une charnière pour faciliter l'extraction de la pièce moulée. Le métal en fusion est versé dans le moule simplement par gravité. Ce type de fonderie est principalement utilisé pour couler des alliages d'aluminium, de magnésium et de cuivre, tandis que pour l'acier et le fer, on utilise des moules en graphite.

Les termes « fonderie en moule permanent » et « coulée en coquille » sont souvent employés indifféremment pour désigner ce procédé. Les moules, réalisés en fonte ou en aciers spéciaux résistants à la chaleur (réfractaires), permettent de produire un grand nombre de pièces. On distingue les procédés suivants :

- Le moulage en coquille par gravité ;
- Le moulage sous pression.

I.2.3.2.1 Moulage en coquille par gravité

Il s'agit du procédé de moulage en coquille le plus basique. Le métal en fusion est versé directement à l'aide d'une louche ou d'une petite poche de coulée dans l'empreinte d'un moule métallique, qui peut être équipé ou non de noyaux métalliques ou en sable selon la complexité et la nature des pièces à réaliser (voir **Fig. I.41**).

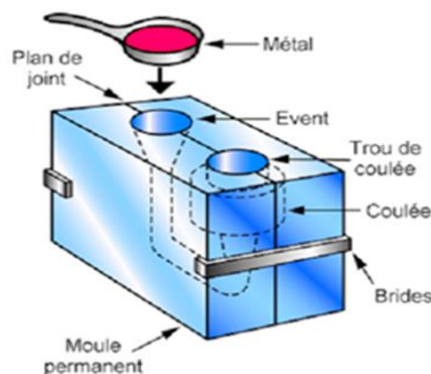


Fig. I.41 Moulage en coquille.

I.2.3.2 Moulage sous pression

Dans ce procédé, le métal liquide est injecté sous haute pression dans le moule à l'aide d'un piston agissant sur le métal contenu dans un réservoir. Cette méthode présente de nombreux avantages, parmi lesquels :

- 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 dépolis permettant d'économiser la matière, etc.

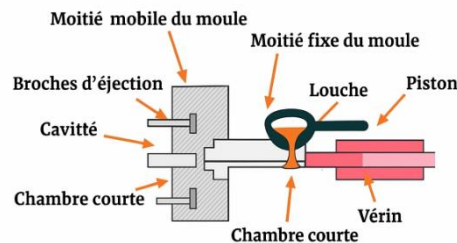


Fig. I.42 Moulage sous pression.

I.2.4 Obtention par assemblage

I.2.4.1 Soudage

Le soudage est une technique d'assemblage qui consiste à fusionner les zones de contact de deux pièces. Cette fusion est obtenue par chauffage, par application de pression, ou par une combinaison des deux procédés. Aujourd'hui, le soudage par chauffage est la méthode la plus couramment utilisée. Contrairement à d'autres méthodes comme le rivetage, le sertissage, le collage ou le boulonnage, qui créent des discontinuités physiques ou chimiques, le soudage permet d'assurer la continuité matérielle entre les pièces assemblées.

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

- **Soudage** : est un procédé qui consiste à faire fondre progressivement les bords des pièces à assembler, lesquelles sont souvent de compositions similaires. L'utilisation d'un métal d'apport peut également être envisagée.
- **Le brasage** : est un procédé d'assemblage de deux pièces métalliques, qu'elles soient de même nature ou de nature différente, par l'infiltration capillaire d'un métal d'apport dans

un joint de recouvrement. Le métal d'apport utilisé possède un point de fusion inférieur à celui des métaux de base, lesquels ne subissent pas de fusion pendant l'opération.

- **Le soudobrasage** : est une méthode similaire au soudage par la réalisation progressive du joint, tout en reprenant du brasage l'utilisation d'un métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à celui des deux métaux de base.

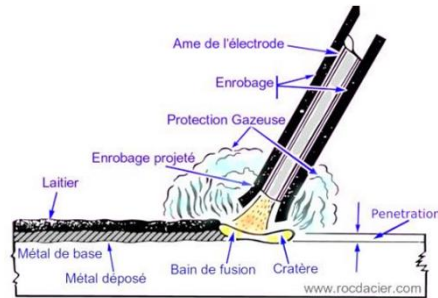


Fig. I.43 Schéma d'assemblage par soudage .

I.2.4.2 Collage

Le collage peut être défini comme un procédé destiné à assembler durablement et solidement deux substrats. La liaison formée entre ces éléments est de nature chimique plutôt que mécanique. La colle est appliquée sur l'un ou les deux substrats, mais pour garantir de bonnes performances, il est essentiel que la colle soit compatible avec les matériaux supports. L'adhésion sur un solide repose ainsi sur deux notions principales (voir **Fig I.44**).

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

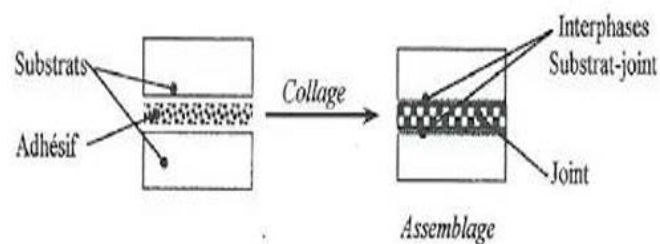


Fig. I.44 Schéma d'assemblage par collage .

I.2.4.3 Rivetage

Le rivetage est un procédé d'assemblage de pièces utilisant des rivets. Cet assemblage est considéré comme définitif, car il ne peut être démonté sans endommager la fixation (voir le schéma ci-dessous). Toutefois, il existe aujourd'hui un type de rivet capable de créer, lors de son installation, une empreinte hélicoïdale dans son logement, permettant ainsi un démontage et un remontage sans destruction du rivet. Un autre procédé plus sophistiqué est le rivetage par fluage radial, reconnu actuellement comme la méthode la plus fiable pour les assemblages rivetés.

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

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

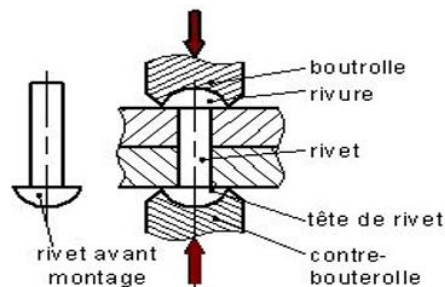


Fig. I.45 Schéma d'assemblage par rivets.

I.2.4.4 Agrafage

L'assemblage par agrafage exerce une légère précontrainte et assure une quasi-étanchéité aux liquides et à l'air. Le pliage s'effectue en trois phases successives : à 30°, 75° puis 90°. Ce procédé préserve l'intégrité de la surface, et la machine ajuste automatiquement son fonctionnement en fonction des différentes épaisseurs de tôle. Il permet de façonner les bords des pièces en tôle. Une tôle dont les bords ont été relevés est ensuite positionnée sur l'agrafe, ce qui permet d'assembler au moins deux éléments entre eux.



Fig. I.46 Schéma d'une agrafeuse manuelle professionnelle.

I.2.5 Obtention par frittage

Une poudre, le plus souvent métallique ou issue d'un mélange, est d'abord comprimée dans un moule, puis portée à haute température dans un four sous vide ou en atmosphère contrôlée, sans atteindre le point de fusion du constituant principal.

La métallurgie des poudres se décompose en deux étapes :

- Etape 1 : La compression ou compaction des poudres, suivie du frittage ou d'une consolidation à haute température.
- Etape 2 : La poudre de base est tout d'abord mélangée à des poudres d'alliages, ainsi qu'à un lubrifiant. La mise en forme à froid est ensuite réalisée à l'aide d'une presse dont la force varie de 100 à 10 000 tonnes selon la pièce à produire. Ce procédé permet d'obtenir directement une pièce façonnée, sans nécessiter d'usinage supplémentaire (pièce finie).

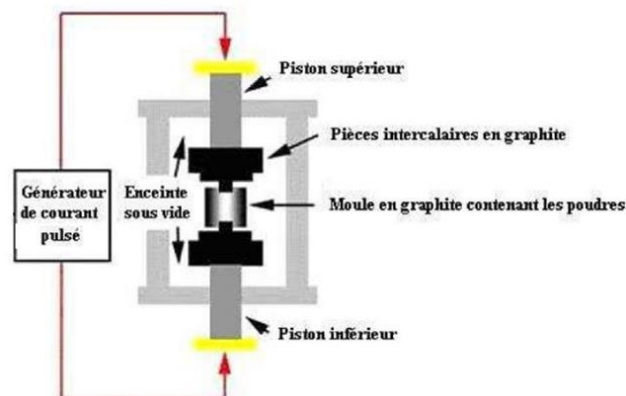


Fig. I.47 Schéma d'élaboration par frittage.

Le frittage ou la consolidation s'effectue dans un four à une température proche de celle du point de fusion du métal. Ce procédé est fréquemment réalisé sous vide ou en atmosphère contrôlée pour éviter l'oxydation causée par l'oxygène de l'air. Une autre technique, le frittage par laser, est particulièrement utilisée dans le prototypage rapide. Dans cette méthode, une fine couche de poudre métallique, mélangée à un liant, est appliquée sur une surface plane (voir schéma ci-dessous).

Les lasers, dont la précision est bien établie, délimitent la forme de la pièce et solidifient la poudre. Une nouvelle couche de poudre est ensuite ajoutée, et ce processus se répète jusqu'à obtenir la pièce finale. Cette méthode permet notamment de créer des cavités avec une grande précision. Une fois le procédé terminé, la pièce est "secouée" pour éliminer les poudres non agglomérées.

Il est également important de prendre en considération la porosité résiduelle, qui varie généralement de 5 à 10 % selon les alliages employés. Cette porosité peut être volontaire, notamment pour la fabrication de filtres, mais elle est minimisée dans certaines productions où un matériau dur est requis (comme le carbure de tungstène).



Fig. I.48 Plaquette de coupe amovible pour outil d'usinage.

- **Avantage :**

- Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, précises et saines, qui peuvent être utilisées à l'état brut ;
- La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants ;
- Autorise l'obtention de nouveaux alliages.

- **Inconvénients :**

- La porosité naturelle peut devenir un inconvénient dans le cas de problèmes d'étanchéité par exemple ;

Le principe de la compression conduit à des pièces non homogènes (porosité plus élevée au milieu), et dont les qualités de résistance mécanique sont faibles pour les métaux frittés.

Chapitre II :

Etude et conception d'une fraise 3 T en HSS denture alternée (croisée) à queue conique.

II.1 Introduction

Le fraisage est un procédé d'usinage combinant la rotation d'un outil coupant (la fraise) et le déplacement de la pièce, permettant ainsi l'enlèvement de matière sous forme de copeaux. Grâce aux machines CNC, les mouvements peuvent s'effectuer dans plusieurs directions, offrant une grande flexibilité. Ce procédé se distingue par sa haute précision, sa bonne qualité de finition et son rendement élevé. Il est couramment utilisé pour usiner des surfaces planes, des gorges et des épaulements, mais s'adapte de plus en plus aux formes complexes grâce aux technologies numériques.

II.2 Principe

Les fraises peuvent posséder des arêtes de coupe situées soit sur leur surface latérale, soit à leur extrémité (en bout), ou encore simultanément sur les deux. Cette configuration leur permet d'usiner différents types de surfaces, notamment :

- Des surfaces planes parallèles à l'axe de la fraise,
- Des surfaces obliques par rapport à l'axe de rotation,
- Des surfaces perpendiculaires à l'axe de la fraise,
- Et des surfaces de formes variées, quelle que soit leur orientation par rapport à l'axe.

Sur toutes les machines de fraisage, ces surfaces sont obtenues grâce à la rotation de la fraise combinée au mouvement d'avance de la pièce. L'ensemble de ces possibilités donne lieu à l'existence de deux grands principes de fraisage.

II.2.1. Fraisage de face ou fraisage en bout

Dans le fraisage de face, l'axe de rotation de l'outil est perpendiculaire à la surface usinée (voir **fig. II.1**).

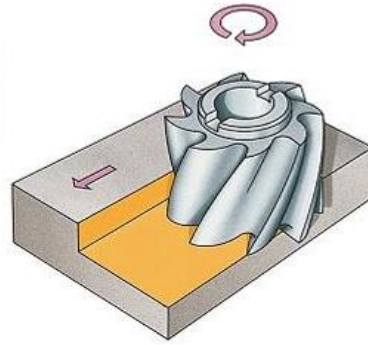


Fig. II.1Principes de fraisage de face (en bout)

Caractéristiques principales :

- Formation de courbes appelées cycloïdes (traces laissées par les dents de la fraise) ;
- Excellente qualité de l'état de surface.

II.2.2. Fraisage de profil ou fraisages en roulant

Ici, l'axe de rotation de l'outil est parallèle à la surface travaillée (voir **fig. II.2**).

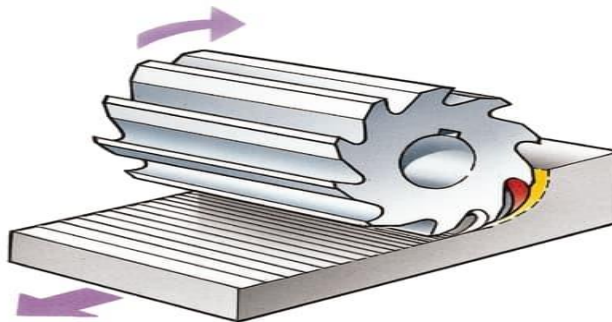


Fig. II.2Principes de fraisage de profil.

Caractéristiques principales :

- Apparition d'ondulations (empreintes laissées par les dents de la fraise) ;
- Chaque dent enlève un copeau d'épaisseur variable (croissante ou décroissante) ;
- L'état de surface est généralement de qualité inférieure par rapport au fraisage de face.

II.3 Modes de coupe

Le fraisage combine la rotation de la fraise et le déplacement de la pièce. Selon la direction relative de ces mouvements, on distingue deux modes de coupe influençant la qualité et la sécurité de l'usinage

II.3.1 Fraisage en opposition

Dans ce mode, l'avance de la pièce est opposée à la rotation de la fraise. Le copeau est engagé par une épaisseur minimale, ce qui provoque un frottement accru, une usure rapide des outils, et un risque de soulèvement de la pièce (voir **Fig. II.3**).

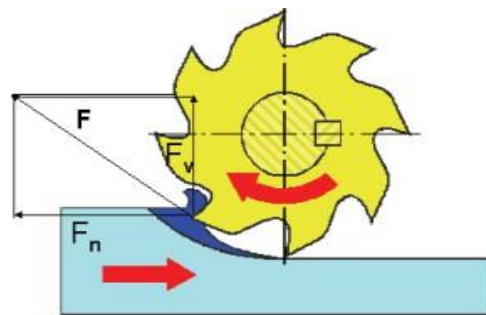


Fig. II.3Fraisage en opposition

II.3.2Fraisage en concordance ou fraisage "en avalant"

Le déplacement de la pièce et la rotation de la fraise sont dans le même sens. Cela favorise une attaque du copeau par son épaisseur maximale, produisant ainsi une meilleure qualité de surface. Ce procédé nécessite cependant une machine stable, équipée de dispositifs de compensation de jeu (voir **fig. II.4**).

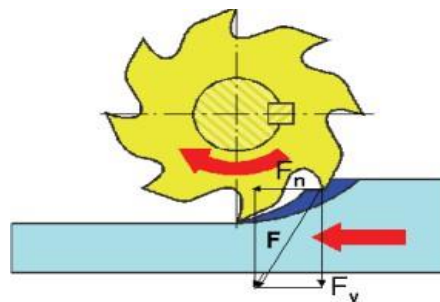


Fig. II.4Fraisage en avalant

II.3.3 Fraisage hémisphérique

Utilisant une fraise à bout sphérique (voir **Fig. II.5**), ce type de fraisage est couramment employé dans l'usinage de surfaces complexes, notamment dans l'industrie automobile,

aéronautique et militaire. Le diamètre effectif dépend du rayon de l'outil et de la profondeur de coupe axiale.



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

II.4 Machines – outils de fraisage

Les fraiseuses ont remplacé les équipements traditionnels pour l'usinage de surfaces planes et permettent également des opérations de contournage (voir **Fig. II.6**). L'outil, monté sur une broche rotative, peut se déplacer selon trois axes



Fig. II.6. Fraiseuse universelle.

II.4.1 Classification des machines de fraisage

Les fraiseuses sont classées selon plusieurs critères :

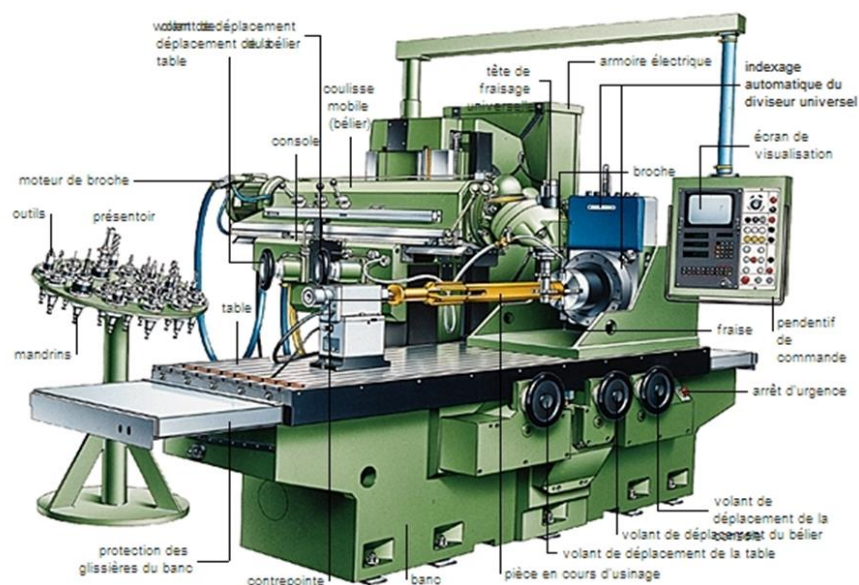
- Position de la broche (horizontale, verticale, orientable),
- Mode de commande (manuelle ou numérique),
- Dimensions (courses sur les axes X, Y, Z),
- Architecture (console, banc, table inclinable, portique fixe ou mobile)

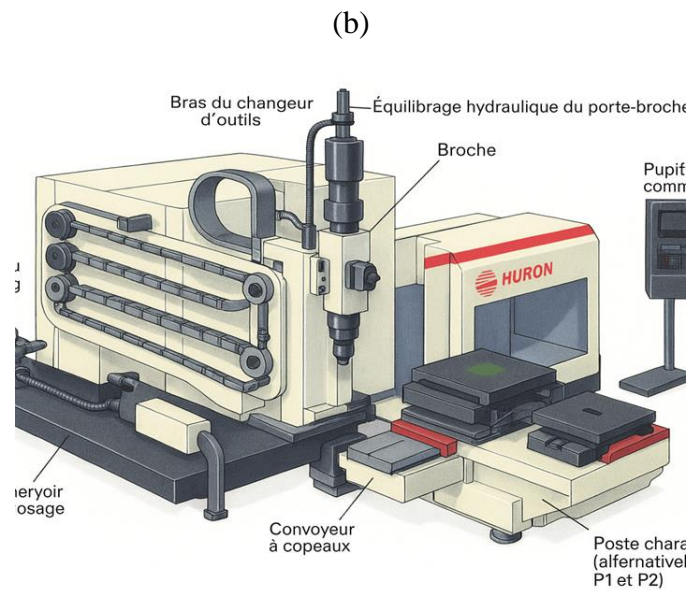
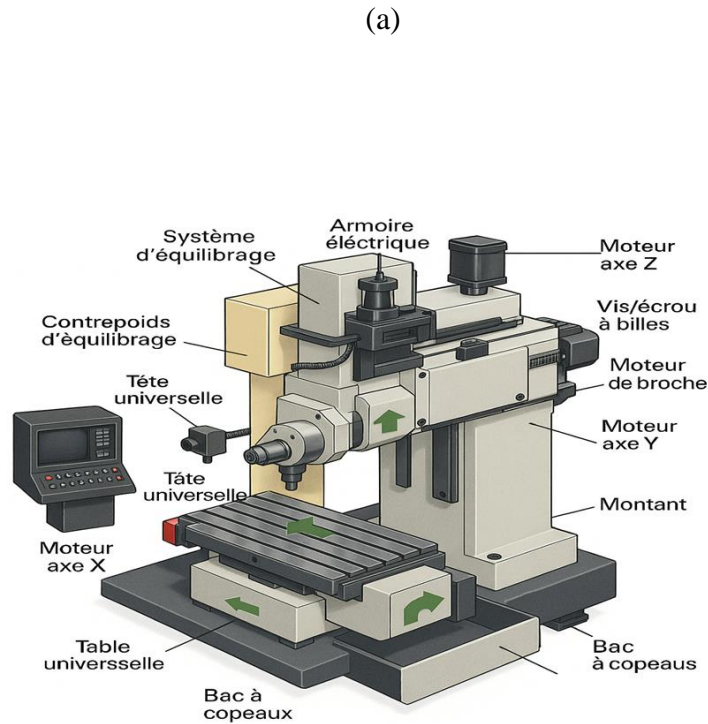
II.4.2 Types de machines

Différents types de fraiseuses sont représentés en **Fig. II.7** :

- Fraiseuse universelle à console,
- Fraiseuse à banc avec commande numérique,
- Centre d'usinage à plateau tournant et palettes interchangeables.

Ces machines comportent une table pour fixer la pièce et une broche pour tenir l'outil, permettant des déplacements coordonnés sur les axes X, Y, et Z.





(c)

Fig. II.7. Types des machines de fraisage ; a) Fraiseuse à console, b) Fraiseuse à banc à commande numérique, c) Centre d'usinage.

II.5 Techniques de fraisage

II.5.1 Surfaçage

Le surfaçage consiste à obtenir une surface plane à l'aide d'une fraise (voir fig. II.8).

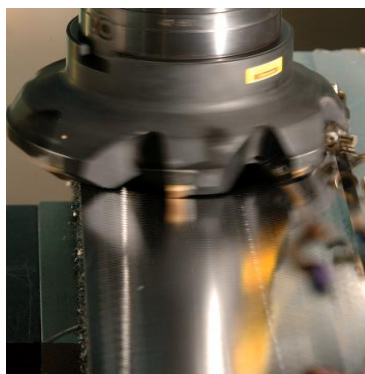


Fig. II.8Opération de surfacage.

II.5.2 Plans épaulés

Le fraisage d'épaulements forme deux surfaces planes perpendiculaires voir **fig. II.9**.



Fig. II.9Fraisage d'épaulements.

II.5.3 Rainure

Le rainurage produit une cavité comprenant trois plans perpendiculaires voir **fig. II.10**.

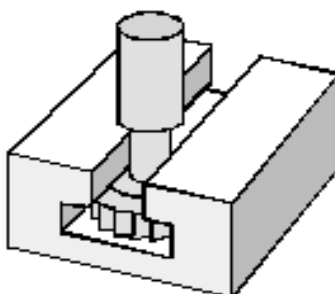


Fig. II.10Fraisage de rainures.

II.5.4 Poche

Le fraisage de poches permet d'usiner des formes creuses limitées par des surfaces verticales et horizontales voir **Fig. II.11**.

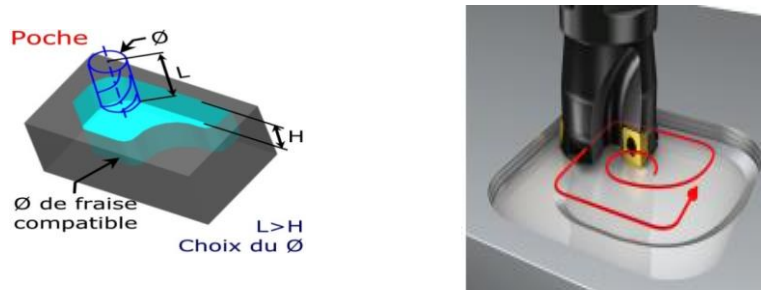


Fig. II.11 Schéma d'élargissement d'une cavité/poche.

II.5.5 Perçage

Le perçage forme des trous soit débouchant, soit borgnes voir **Fig. II.12**

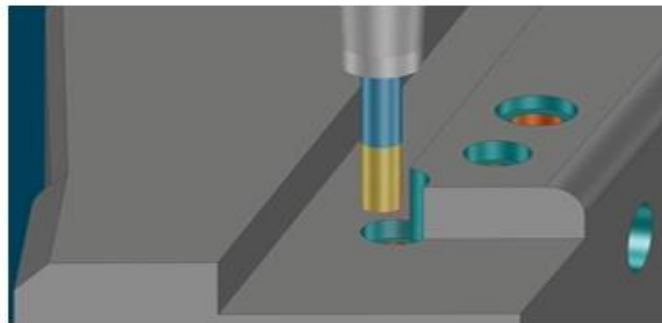


Fig. II.12 Opération de perçage.

II.5.6 Filetage

Le filetage au fraisage constitue une alternative au taraudage pour certaines applications, notamment lorsque la rotation de la pièce est impossible (voir **fig. II.13**)



Fig. II.13 Opération de filetage.

II.6 Paramètres de coupe

Les paramètres de coupe influencent directement la qualité de l'usinage, la durée de vie de l'outil et la rentabilité du processus. Le mouvement de coupe est assuré par la rotation de la fraise tandis que l'avance correspond au déplacement linéaire de l'outil ou de la pièce (voir Fig. II.14).

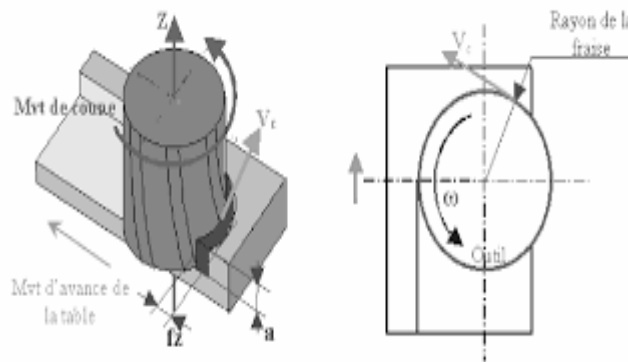


Fig. II.14 Illustration des paramètres de coupe.

La finition de la surface obtenue ainsi que la durée de l'opération d'usinage sont influencées par la sélection des paramètres de coupe. Ces derniers incluent notamment :

- La vitesse de coupe V_c .
- L'avance f_z par tour et par dent.
- La profondeur de passe.

II.6.1 Paramètres géométriques de coupe

a. La vitesse de coupe (V_c)

- **Définition** : La vitesse de coupe, notée V_c et exprimée en mètres par minute (m/min), correspond à la vitesse à laquelle la pièce se déplace par rapport à l'arête de coupe d'un outil (comme une dent). Elle est représentée par un vecteur tangent à la trajectoire de la pièce en rotation.
- **Procédure de réglage** : Fréquence de rotation n (tr/min)

$$n = \left(\frac{1000.V_c}{\pi.D} \right) \quad V_c = \left(\frac{\pi.D.n}{1000} \right) \quad (II.1)$$

n : Fréquence de rotation tr/min.

Vc : Vitesse de coupe m/min.

D : Diamètre de l'outil mm.

b. L'avance (fz)

➤ **Définition :** L'outil de fraisage possède plusieurs arêtes coupantes. On exprime l'avance en termes d'avance par tour et par dent, ce qui correspond à la distance que chaque dent de l'outil parcourt sur la pièce après une rotation complète de celui-ci.

➤ **Procédure de réglage :** la vitesse d'avance Vf

On règle la vitesse d'avance Vf grâce à fz (avance par tour et par dent). La vitesse d'avance correspond à la vitesse de déplacement de la pièce par rapport à l'outil pour le déplacement des axes X, Y et Z.

$$Vf = fz \cdot Z \cdot n \quad (\text{II.2})$$

Vf : Vitesse d'avance mm/min.

Fz : Avance mm/ (tr. Dent).

Z : nombre de dents de la fraise.

n : Fréquence de rotation tr/min.

c. La profondeur de passe (ap)

➤ **Définition :** La profondeur de passe est l'engagement de l'outil dans la pièce. Elle est exprimée en mm.

d. L'avance par dent fz [mm/dent]

➤ **Définition :** C'est la distance que parcourt une seule dent de l'outil lors d'un tour complet de celui-ci. Elle est exprimée en millimètres par dent et utilisée pour déterminer la charge appliquée sur chaque arête de coupe.

II.6.2 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.

II.6.2.1 Choix des outils de fraisages

La figure II.15 présente un diagramme indicatif des domaines d'utilisation des matériaux d'outils en conditions normales (ébauche d'aciers et fontes), mais ne doit pas servir au choix direct des conditions de coupe.

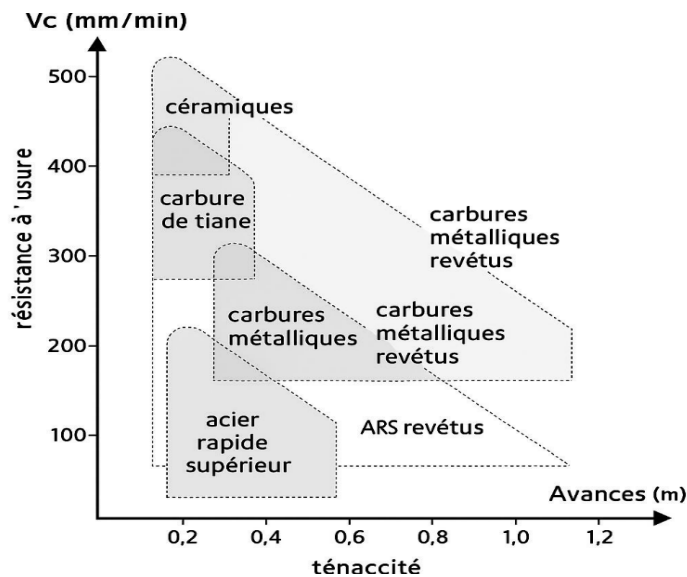


Fig. II.15 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant.

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

II.7.1 Aciers rapides

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

II.7.2 Carbures métalliques

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

II.7.3 Céramiques

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

II.7.4 Nitrure de bore cubique

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

II.7.5 Diamant

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

II.7.6 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, l'interface de la géométrie outil/copeau/pièce lors de la formation d'un copeau. On peut voir trois zones principales soit

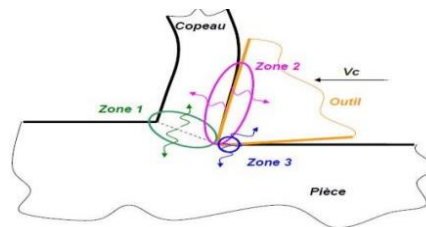
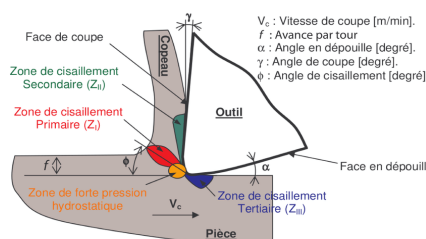


Fig.II.16. Zones de coupe

– Zone de cisaillement (1)

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.

Fig.II.17. Les zone de cisaillement.

– **Zone d'écrouissage du copeau (2)**

Dans cette zone, un frottement intense s'effectue entre le copeau et l'outil. Ce frottement est à l'origine de l'usure de l'outil sur la face de coupe et aussi d'une génération de chaleur.

– **Zone d'écrouissage de la pièce (3)**

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

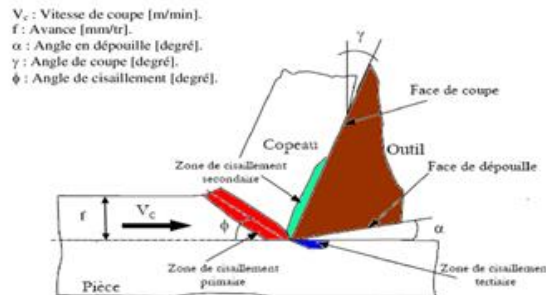


Fig. II.18. Géométrie de la formation d'un copeau

II.8 Paramètres techno-économiques d'usinage

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

II.8.1 Temps d'usinage

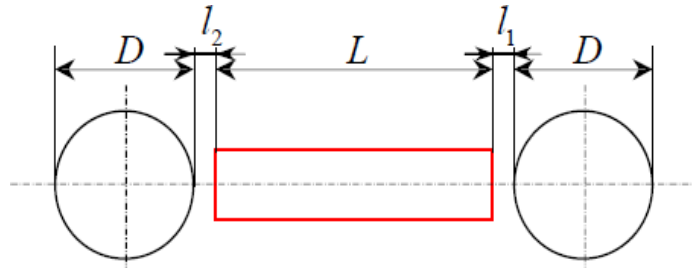
Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. Il s'exprime par la relation :

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

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

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

Cas de fraisage en bout :



$$t_m = \frac{D \cdot (L + l_1 + l_2)}{1000 \cdot f_z \cdot z \cdot v_c} \text{ (II.5)}$$

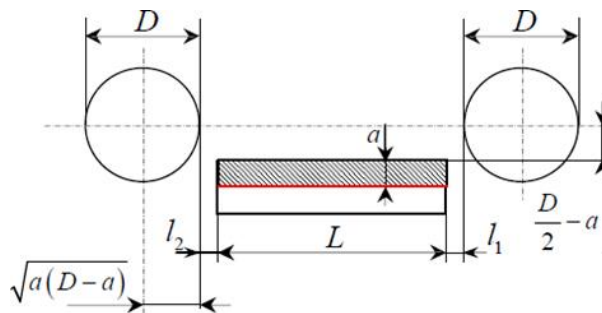
L : Longueur de la fraise,

l_1 : Longueur d'approche,

l_2 : longueur de dégagement.

Fig. II.19 Paramètres de temps technologique (fraisage en bout).

Cas de fraisage en profile :



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

Fig. II.20 Paramètres de temps technologique (fraisage de profile).

II.8.2 Coût d'usinage

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

Coût total = frais fixes + coût machine + coût outil

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

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

Avec :

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

II.9 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.21**) VB en mm

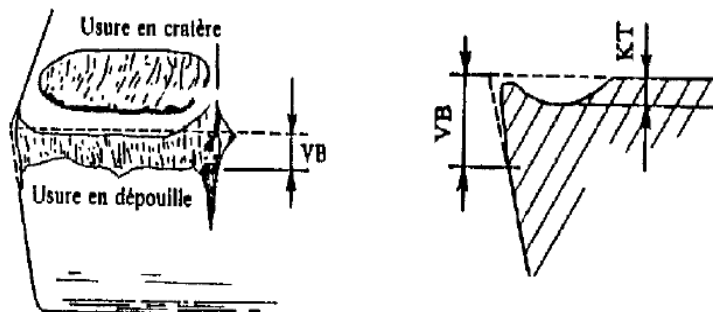


Fig. II.21 Critère d'usure VB.

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.

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

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

Remarque :

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

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

II.9.1 Mécanisme d'usure

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

II.9.1.1 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.22**).

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

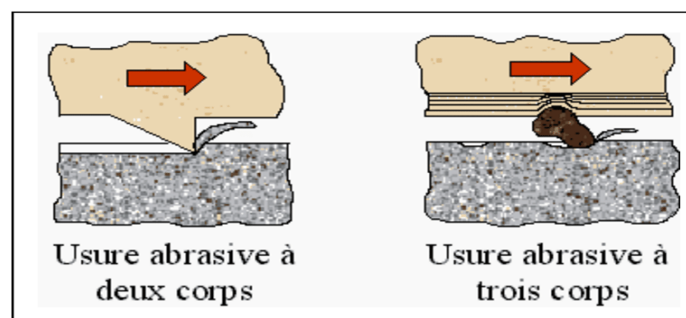


Fig. II.22 Processus d'usure par abrasion.

II.9.1.2 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 micro-rugosités de ces surfaces, par contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des microsoudures (voir **Fig. II.23**).

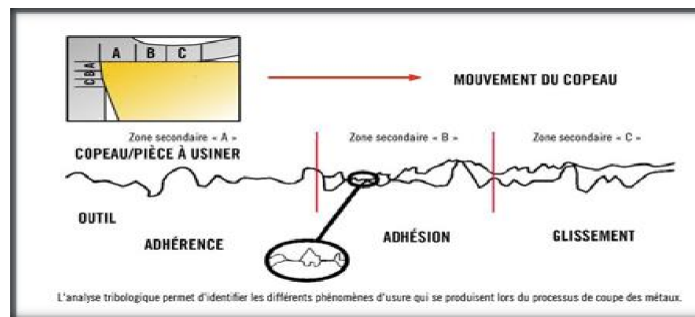


Fig. II.23 Processus d'usure par adhésion.

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.9.1.3 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.

II.9.1.4 Usure par corrosion

Le milieu de l'usinage est constitué :

- ✓ De l'oxygène dans l'air ;

- ✓ Des hautes températures ;
- ✓ De l'eau dans les huiles de coupe solubles.

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoquent localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (**figure II.24**). De plus, le potentiel d'oxydoréduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.

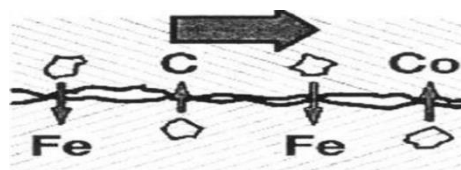


Fig. II. 24. Processus d'usure par oxydation.

II.9.1.5 Usure par diffusion chimique

Ce phénomène apparaît pour des températures élevées où la structure de l'outil change sous l'effet de migrations de ses constituants chimiques vers le copeau. Les hautes températures et les pressions exercées permettent de donner suffisamment d'énergie aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil vers le copeau ou vice versa (**figure 25**).

La diffusion chimique des éléments de la pièce vers l'outil à haute température conduit à former la couche adhérente BUL. Cette couche adhérente forme une barrière thermique entre la pièce et l'outil



FigII.25 Différents types d'usure de l'outillage

II.10. 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.

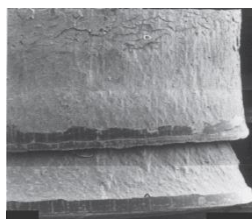


Fig.II.26 L'usure des outils

II.9.2.1 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). Elle influe sur l'état de surface de la pièce usinée et sur la précision dimensionnelle de l'usinage car elle modifie la position de l'arête de coupe.

C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible VB.

Les valeurs indiquées se rapportent généralement à une tenue d'outil

(Durée de vie $T=15$ min). VB critique = 0,6 mm en ébauche et 0,3 mm en finition

Cela est dû à une vitesse de coupe excessive ou à une mauvaise position angulaire de l'outil

(Face de coupe / pièce)



Fig.II.27 Usure en dépouille (abrasion)

Cause :

- ✓ Vitesse de coupe trop élevée.
- ✓ Nuance trop tenace.
- ✓ Résistance à l'usure insuffisante.
- ✓ Arrosage insuffisant.

Solution :

- ✓ Réduire la vitesse de coupe.
- ✓ Choisir une nuance mieux adaptée en fonction des besoins en ténacité ou en résistance à l'usure.
- ✓ Utiliser l'arrosage.

II.9.2.2 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. Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires.

Ce genre d'usure due à des phénomènes métallurgiques (calamine des pièces forgées, différence de taille de grain des pièces moulées)

Remarque :

Cette usure en entaille est souvent accompagnée d'une usure en dépouille.

Solution :

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



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

II.9.2.3 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.

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.

Solution :

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



Fig. II.29. Usure en cratère

II.9.2.4 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

Solution :

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

II.9.2.5 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.

Solution :

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



Fig. II.30. Usure thermique (déformation plastique)

II.9.2.6 Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne

Lorsque l'arête de coupe subite 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

Solution :

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



Fig. II.31 Usure en peigne.

II.9.3 Dépendance entre l'usure et le temps

La relation entre la valeur de l'usure et le temps représentée par la courbe (Fig II.32) peut-être divisée en trois périodes :

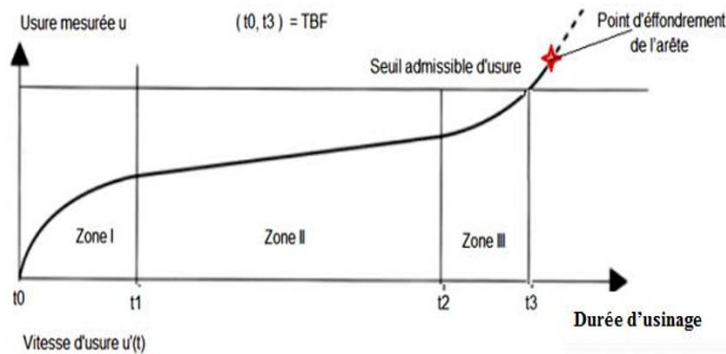


Fig. II.32 Courbe d'usure par rapport le temps.

- ✓ Zone I : Phase d'adaptation et de rodage de l'arête au régime de coupe : usure rapide.
- ✓ Zone II : Phase d'usure quasi-stationnaire à évolution linéaire.
- ✓ Zone III : Phase de l'accroissement rapide de l'usure, l'effondrement de l'arête est à prédire.

II.11 L'affûtage

L'affûtage est une opération d'usinage par abrasion visant à donner la forme et l'état de surface appropriés aux arêtes tranchantes d'un outil de coupe. Cette opération de meulage intervient aussi bien lors de la fabrication que de l'utilisation de l'outil. La manière dont l'outil est affûté a un impact direct sur son rendement, parfois même plus que le matériau dont il est constitué.

Un outil mal ou trop rapidement affûté entraîne toujours une baisse de production. Il est donc essentiel de privilégier la qualité de l'affûtage plutôt que sa rapidité, car une économie initiale peut se traduire par des pertes plus importantes à long terme, notamment à cause de :

- ✓ Des réaffûtages plus fréquents.
- ✓ Un rejet prématuré des outils.
- ✓ Un taux accru de pièces rejetées.

Ce processus peut donc engendrer des coûts plus élevés que ceux économisés sur l'affûtage.

II.11.1 Machines 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.33**).



Fig. II.33 Affûteuse universelle.

Elles comportent comme organes essentiels :






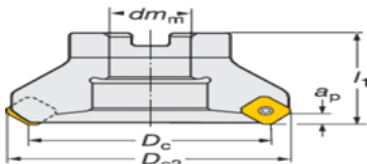

- Une tête porte-meule réglable en hauteur et orientable par pivotement dans le plan horizontal ;
- Une table porte-pièce animée d'un mouvement longitudinal alternatif et d'un mouvement transversal en outre la table peut être orientée à divers angles dans le plan horizontal.





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.12 Outils de fraisage

Le choix des outils dépend généralement du matériau à usiner, des opérations à réaliser, des conditions de coupe souhaitées, ainsi que des limitations de la machine-outil. Il existe

principalement deux types de fraises : les fraises monoblocs et les fraises à plaquettes. Pour les outils monoblocs, trois géométries classiques sont couramment utilisées : les fraises à deux tailles, les fraises rayonnées ou toriques, et les fraises hémisphériques. Pour les opérations d'ébauche, où la durabilité des outils porte-plaquettes est plus importante que la compacité et la précision, ces derniers sont souvent privilégiés.

Modèle	Description	Figure
Fraises cloches à entraînement par tenons	Utilisation : Le profil de la denture réduit la puissance absorbée. Elles ont un grand rendement. On les utilise principalement pour l'usinage des alliages légers.	
Fraises monoblocs	Cette fraise possède une coupe au centre afin de permettre l'opération de fraisage en plongée	
Fraise d'angle	La fraise d'angle sert au fraisage des guidages coniques (dans le cadre de la fabrication de machines) mais aussi au fraisage en bout et au fraisage roulant.	
Fraise concave	La fraise concave est demi-ronde et possède une denture détalonnée. Elle sert à réaliser des rainures convexes.	
Fraise convexe	La fraise convexe est demi-ronde et possède une denture détalonnée. Elle est utilisée pour réaliser des rainures concaves.	
Fraises à surfacer et à surfacer et dresser	Elles sont robustes et permettent un grand rendement.	
Fraise conique	La fraise conique est utilisée pour la création de guides de coupe pour queue d'aronde (que l'on retrouve dans les angles des boîtes ou les côtés d'un tiroir).	

Fraises 2 T à queue cône morse	/	
Fraise à noyer	La fraise à noyer permet de fraiser les chanfreins servant à noyer les têtes de vis dans du bois ou matière assimilée.	
Fraise à plaquettes interchangeable	La fraise à plaquettes est idéale pour les grands diamètres d'outils (de 1 à 160 mm). Elle ne nécessite pas de réaffutage car les plaquettes sont jetables.	
Fraise à rainures en T	Il ne faut pas confondre la fraise à rainurer et la fraise pour rainures en T ! La fraise à rainures en T ressemble à une fraise 3 tailles et sert à usiner les deux parties en retrait d'une rainure en T.	

Tab.II.1. Les modèles de fraise-outils.

II.12.1 Caractéristiques des fraises

II.12.1.1 La taille

Suivant le nombre d'arêtes tranchantes par dent, on distingue les fraises : une taille, deux tailles ou trois tailles (voir **Fig. II.34**).

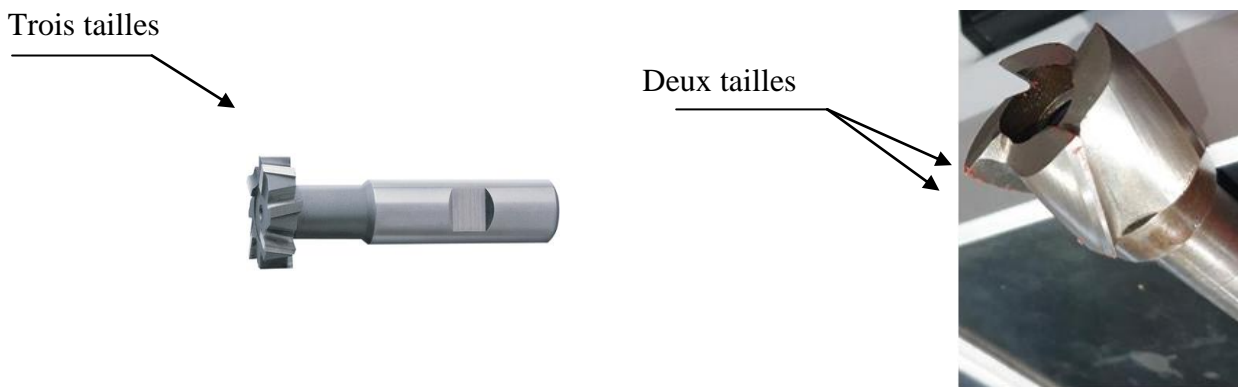


Fig. II.34 Schéma de Fraise trois tailles et deux tailles.

II.12.1.2 La 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.35**).



(a) Fraise biconique a queue cylindrique (b) Fraise conique a queue cylindrique

Fig. II.35 Schéma représenté deux types fraises de forme.

II.12.1.3 La 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.36**) et les dentures à double hélice alternée. Si l'arête tranchante est parallèle à l'axe de la fraise, la denture est droite. Une fraise est également caractérisée par son nombre de dents.

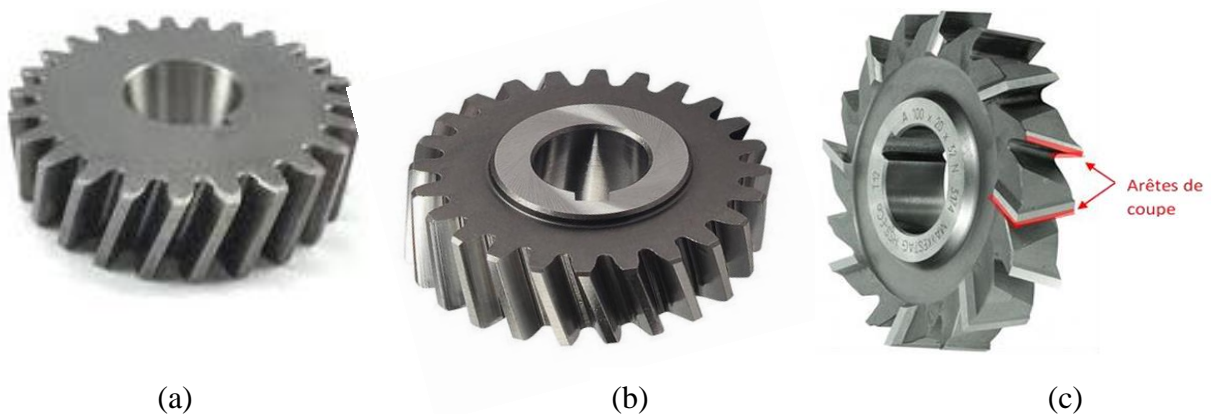


Fig. II.36 Fraises de différents sens denture, a) Dentures hélicoïdales à gauche, b) Dentures hélicoïdales à droite, c) Dentures hélicoïdales à gauche et droite (alternées)

II.12.1.4 Dimensions

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

II.12.2 Mode de fixation

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

II.12.3 Construction

Les fraises peuvent être à denture fraisée (ex. : fraise conique deux tailles $\alpha 60^\circ$), 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 Conclusion

La technique de fraisage occupe une place essentielle dans le domaine de l'usinage moderne grâce à ses évolutions technologiques elle permet aujourd'hui une grande précision une productivité accrue et une adaptabilité a une large gamme de matériaux que ce soit pour des opérations simples ou complexes le fraisage reste une solution incontournable pour la fabrication de pièce mécanique de qualité tout en répondant aux exigences croissantes de performance et de rentabilité.

Chapitre III :

Réalisation et modélisation numérique.

III.1 Introduction

Afin d'améliorer les procédés de fraisage et de conception d'outils de coupe économes en énergie et durables dans leur application, la fraise à trois tailles avec file conique et denture alternée est une bonne réponse au fraisage de matériaux à forte résistance. Il est particulièrement conçu pour optimiser de manière maximale les évacuations de copeaux, minimiser les vibrations et améliorer la finition de surface, en raison de la disposition alternée des dents pour assurer une répartition équilibrée des efforts de coupe.

La mission de réalisation de ce chapitre est la et la simulation numérique de cet outil afin de permettre son intégration dans un cadre de conception et de simulation évolué. La marche à suivre a impliqué de définir d'abord les paramètres géométriques saillants de la fraise (profil de dentation, angulation de coupe, tailles de la pointe conique, etc.), et de les traduire ensuite en un modèle tridimensionnel précis en intégrant un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).

III.2 Description d'une fraise T a dentures alternées à queue conique

III.2.1 Arête, faces de coupe et dépouille

Une fraise de forme, comme une fraise en T à dentures alternées avec queue conique, possède une partie active. C'est cette partie qui travaille directement sur la pièce pour retirer du métal (voir **Fig. III.1**).

Elle est caractérisée par sa forme et son matériau. Sa durée de vie doit être plus grande que celle du métal à travailler.

L'élément clé de cette partie active comprend :

- 1) **Arête de coupe (arête tranchante)** : C'est la ligne formée par l'intersection entre la face de coupe et la face de dépouille. Elle est responsable de la séparation du copeau de la matière.
- 2) **Face de coupe** : C'est la surface sur laquelle vient glisser et s'enrouler le copeau lors de l'usinage. Elle guide et facilite l'évacuation du copeau.
- 3) **Face de dépouille** : C'est la surface située derrière l'arête de coupe (par rapport à l'avance de l'outil). Elle est délimitée par le témoin (petite surface laissée intentionnellement) et la tangente au cercle enveloppe des arêtes. Son rôle est crucial :

l'angle de dépouille doit être suffisant pour empêcher le frottement ("talonnement") dents sur la surface usinée, garantissant ainsi un usinage propre et sans échauffement inutile.

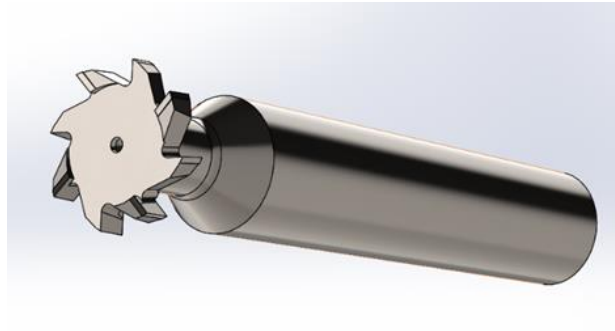


Fig. III.1 Schéma descriptive d'une fraise T a dentures alternées à queue conique

III.3 Etapes de réalisation la fraise T a dentures alternées à queue conique

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

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

III.3.1 Dessin de définition

Ce sont des dessins faits par les gens qui préparent le travail dans les usines. Ils montrent comment fabriquer la pièce et donnent toutes les infos utiles pour le faire. On doit respecter les mesures importantes du dessin principal, mais on ajoute aussi des mesures en plus pour aider les ouvriers à travailler plus facilement. On choisit aussi les bases (comme un axe ou un plan) pour commencer le travail. Un exemple de ces dessins, c'est celui de la fraise T avec des dents alternées et une queue conique est ci-dessous (**Fig.III.2**).

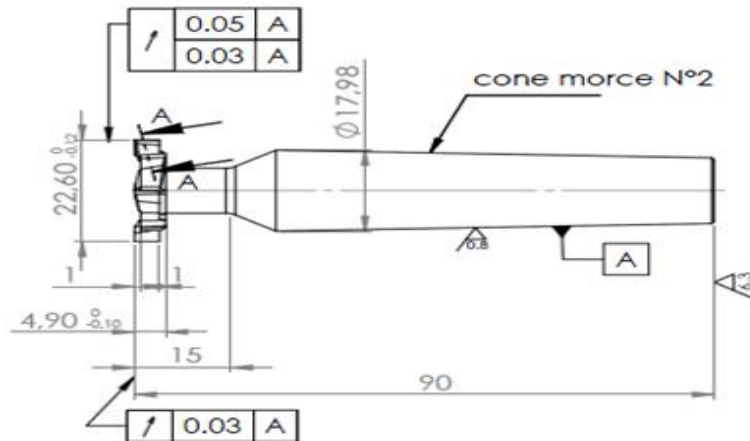


Fig.III.2. Schéma descriptive le Profil de la fraise à queue conique

III.2 Gamme d'usinage

Pour réaliser notre pièce modèle (fraise T a dentures alternées) on a suivi les différentes phases « voire les détails dans l'annexe » :

1^{ème} phase: Demande de la matière «Débitage»

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 Pour notre cas la pièce a réalisé et composé de deux matériaux différents voir (**Fig.III.3**).

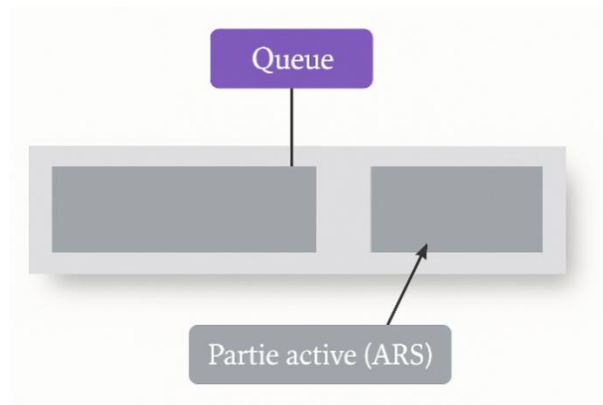


Fig. III.3. Débitage de la matière première (en ARS + 45).

Les dimensions à débité sont :

Matière N1 : partie de fixation « acier doux » Ø25x73 la nuance de matière acier au carbone XC45 équivalence de C45E (1.1191) norme EN 10083-1 (1991)

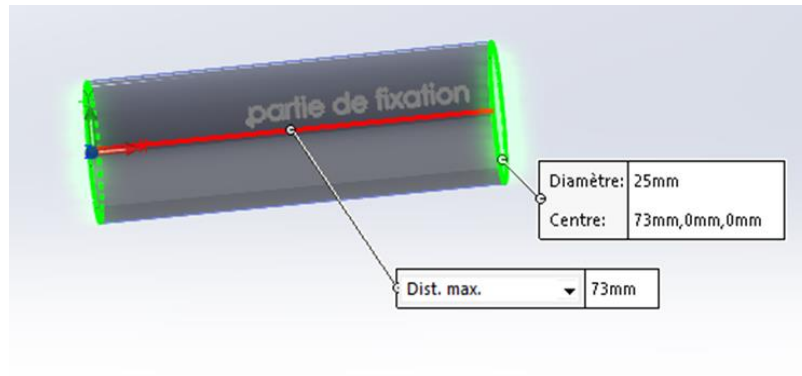


Fig.III.4 Partie de fixation

Matière N2 : partie active « acier rapide » Ø25x35 la nuance de matière Acier rapide (ARS) W18 équivalence de HS18-0-1(1.3355) norme ISO 4957.

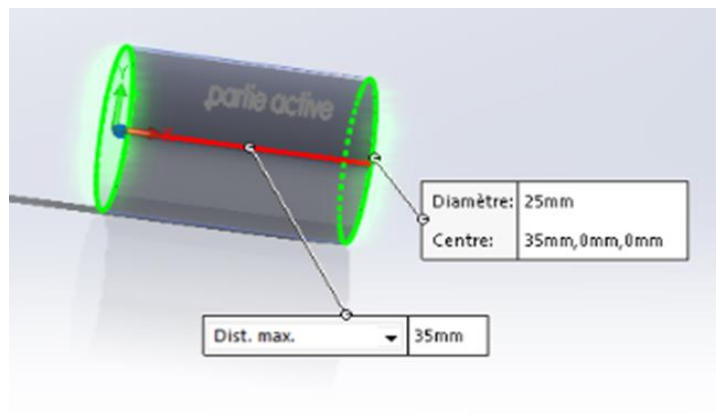


Fig.III.5 Partie active

2^{ème} phase : Cette phase contient deux opérations qui sont les suivantes :

Partie de fixation :

Le dressage 1 :

- Cette opération consiste à réaliser la référence et la mise en longueur avec des passes d'ébauche

Ø25x73 **➔** Ø25x72

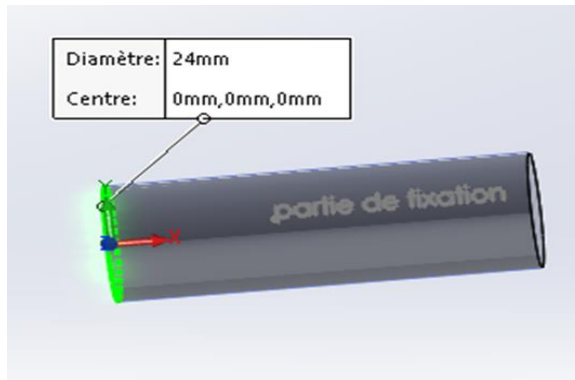


Fig.III.6 Dressage de partie de fixation

Le chariotage 1 :

Cette opération consiste aussi à réaliser une surface cylindrique et donner à la pièce état de surface avec des passes d'ébauche.

$\text{Ø}25 \times 72 \rightarrow \text{Ø}24 \times 72$

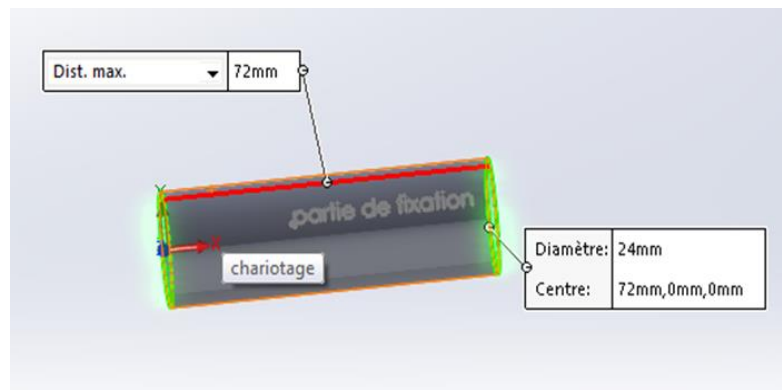


Fig. III.7 Chariotage de partie de fixation

Partie active :

Cette partie contient les deux opérations anciennes.

Le dressage 1 :

$\text{Ø}25 \times 35 \rightarrow \text{Ø}25 \times 32$

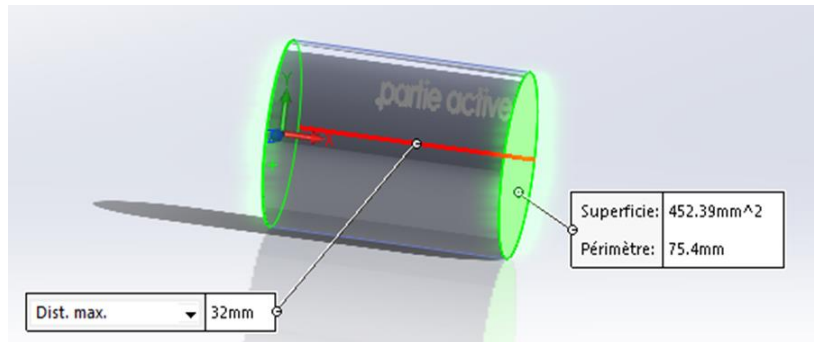


Fig.III.8 Dressage de partie active

Le chariotage 1 :

Ø25x32 → Ø24x32

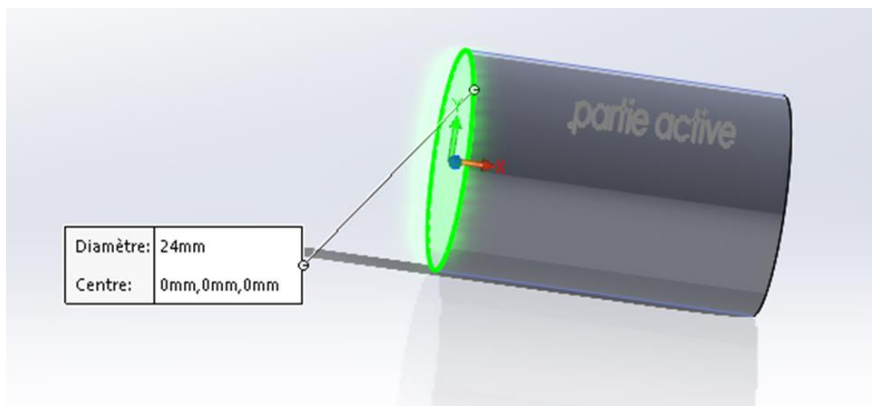


Fig.III.9 Chariotage de partie active

3^{ème} phase : Soudage en bout

Souder les deux matériaux acier rapide et acier au carbone (ARC + 45).

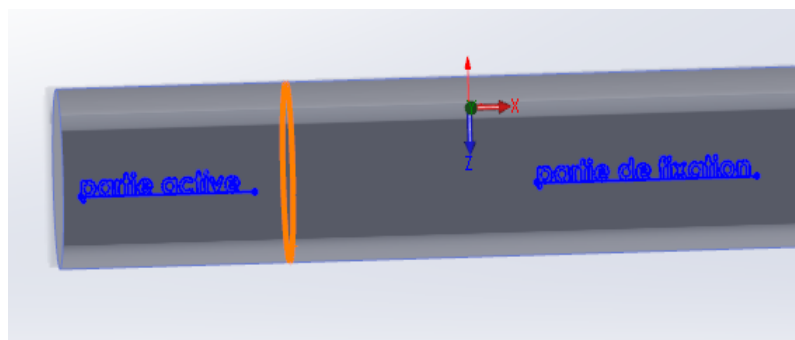


Fig.III.10 Soudage en bout de deux morceaux.

4^{ème} phase :

Dressage et chariotage avec outil de tour en carbure 20x20 :

_ Dressage : $\text{Ø}24 \times 104$ \longrightarrow $\text{Ø}24 \times 90$

_ Centrage : $\text{Ø}2$

_ Chariotage : $\text{Ø}24 \times 90$ \longrightarrow $\text{Ø}23 \times 90$

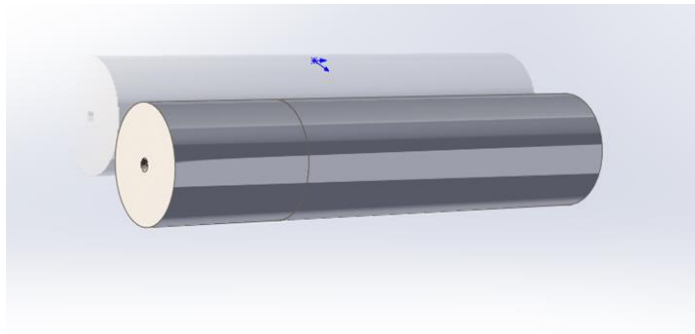


Fig.III.11 Chariotage et dressage et centrage

5^{ème} phase :

Chambrage extérieur avec fraise à queue cylindrique $\text{Ø}16$

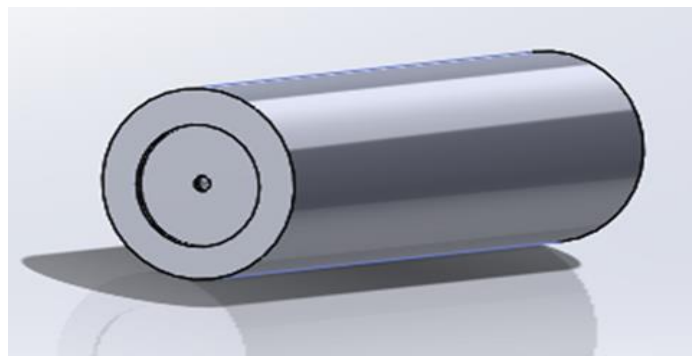


Fig.III.12 Chambrage extérieur

6^{ème} phase :

Elle contient trois opérations qui sont :

- Perçage 1 : foret $\text{Ø}8.5$
- Perçage 2 : foret $\text{Ø}10.5$
- Taraudage à main : taraud M10/1.5 standard selon le dessin de définition

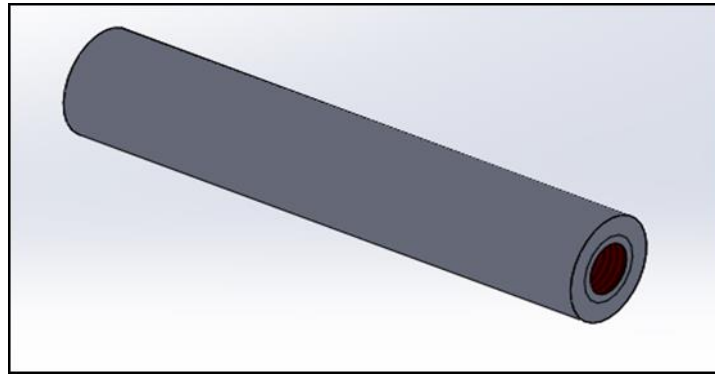


Fig.III.13 Perçage et taraudage

6^{ème} phase :

Dans cette phase, on passe à la réalisation le profil de la fraise en T « la forme extérieure de la pièce » qui très difficile a réalisé sur un tour conventionnelle, pour cela on doit tout d'abord dessiner le profil de la pièce voir (**Fig. III.14** ci-dessus ou bien l'annexe), et déterminer les coordonnées nécessaire en (x, z) « x= le diamètre, z=la longueur » le logiciel de CFAO « SolidWorks » simplifier cette tâche pour la machine à commande numérique CNC (smart –turn 8), dans cette phase on a une seule opérations est comme suite.

Le chariotage :

Cette opération d'usinage consiste à donner à la pièce « fraise en T » la forme voulue avec des passes d'ébauche et semi finition, La réalisation de la pièce « fraise en T » à partir d'un tour à CNC (smart – turn 8)

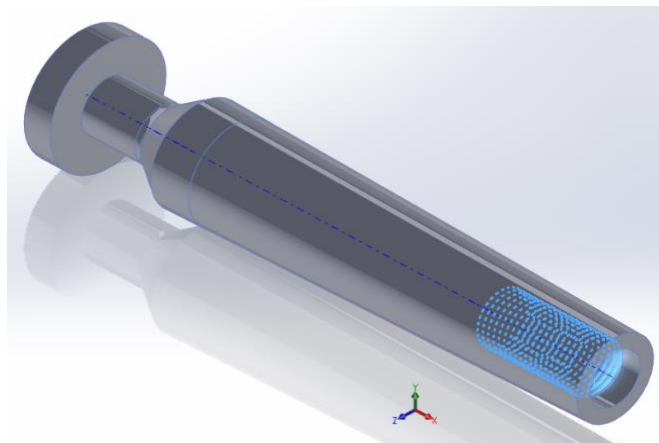


Fig.III.14 Tournage cylindrique et conique en CNC (Smart-turn 8)

7^{ème} phase

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

- Taillage les dents en périphérique
 - Angle de coupe : 12° ;
 - Angle de dépouille : 14° ;
 - Angle taillant : 60° ;
 - Angle d'hélice : 10° ;

- En bout :
 - L'entaille :
 - Outil à mortaiser
 - Fraise conique $\varnothing 90$
 - Angle de coupe : 10°
 - Angle de dépouille : $6^\circ \sim 8^\circ$

8^{ème} phase : Traitement thermique :

Cette phase consiste à élever la dureté de la pièce à usiner « fraise en T »,

Partie active :

Pour cela on a procédé au traitement la pièce avec deux trempe la première 850° (10min) et la deuxième 1280° (1min) dans un bain de sel « BaCl_2 », refroidissement de four de Nitrate à une température de 220° (5min), sortie à l'air 50° , suivi par un revenu de température à 560° (1h) quatre fois. Après le nettoyage de la pièce dans l'eau 80° , il faut faire le Contrôle de dureté de la pièce suivant l'exigence technique de traitement.

La dureté : 63 à 66 HRC

Partie de fixation :

Pour cela on a procédé au traitement la pièce avec un trempe 820° (10min) dans un bain de sel « BaCl_2 », refroidissement dans l'eau, suivi par un revenu de température à 320° (30min~1h) il faut faire le Contrôle de dureté de la pièce suivant l'exigence technique de traitement.

La dureté : 40 à 45HRC

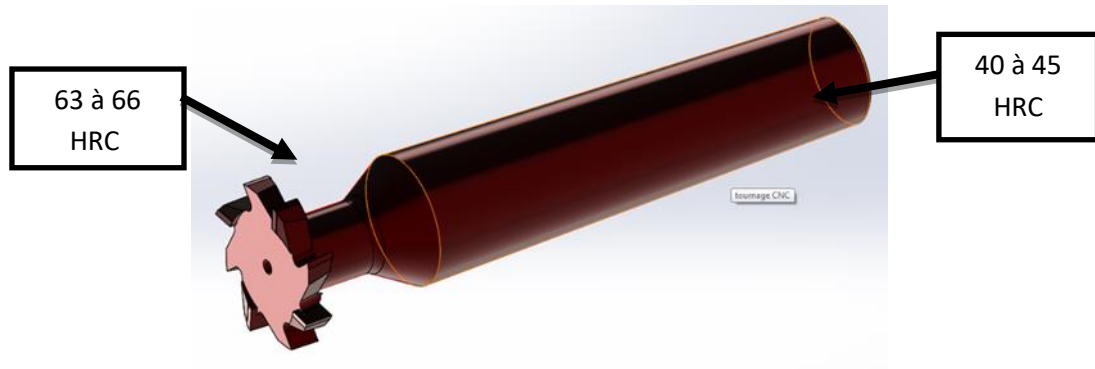


Fig.III.15 Fraise après traitement thermique.

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.

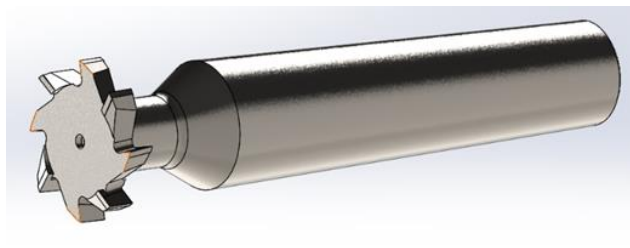


Fig.III.16 Pièce après sablage.

10^{ème} phase :

Affutage N1 :

Affutage des angles de coupe en périphérique et en bout.

11^{ème} phase :

• **La rectification**

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

Rectification cylindrique extérieur

Partie de fixation (cône mors N2) : assuré le diamètre de cône $\varnothing 17.98$ et respecter l'exigence géométrique (battement)

↗	0.03	A
---	------	---

Partie active : assuré le diamètre $\varnothing 22.6_{-0.12}^0$ et respecter l'exigence géométrique

↗	$\frac{0.05}{0.03}$	A
---	---------------------	---

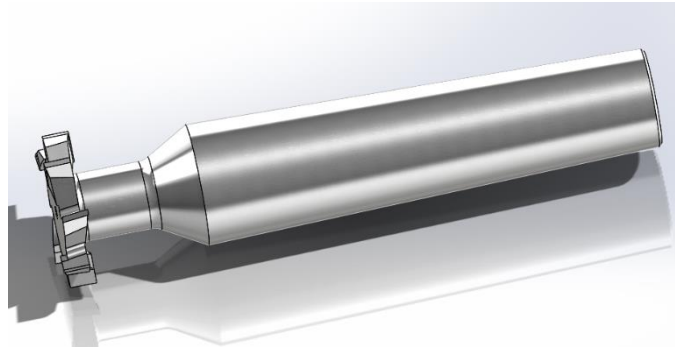


Fig.III.17 Pièce après rectification cylindrique extérieur.

12^{ème} phase :

Affutage N2 :

Affutage des angles de dépouille en périphérique et en bout.

Remarque :

Entre chaque opération la pièce sera contrôlée par le service de contrôle (contrôle semi fini)

13^{ème} phase :

• **Contrôle final**

A la fin elle sera contrôlée pour obtenir le certificat de qualité pour le stocker ou bien l'usage

III.4 Caractéristiques technique de la fraise T a dentures alternées à queue conique

III.4.1 Matière de la fraise

- Partie active : acier rapide **ARC (W18Cr4v)** ; (22mm) ;
- Partie de fixation : acier au carbones **45** (68mm) ;
- Module de Young = 21000 ;
- Coefficient de poisson = 0.3.

III.5 SolidWorks

III.5.1 Introduction

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) en 3D, développé par Dassault Systèmes. Il est largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie mécanique, de la conception industrielle, de la fabrication, et même de l'aéronautique. Grâce à son interface intuitive et ses puissants outils de modélisation, SolidWorks permet de créer des pièces (pièces mécaniques, composants), des assemblages, et des mises en plan techniques avec une grande précision.

III.5.2 SolidWorks Simulation

SolidWorks ne se limite pas à la modélisation 3D. Il propose également un module puissant appelé SolidWorks Simulation, qui permet aux ingénieurs d'analyser et de tester virtuellement leurs conceptions avant la fabrication.

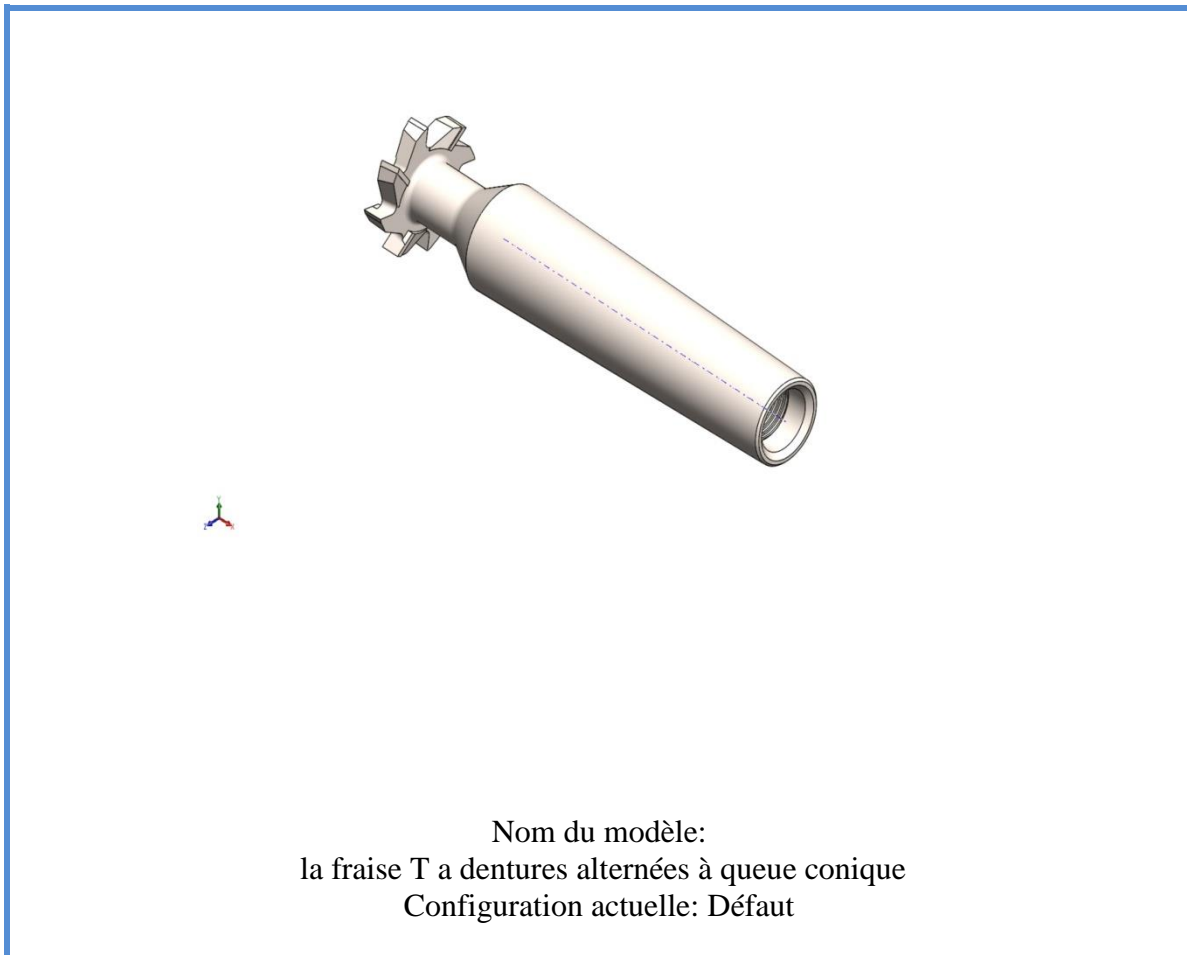
Ce module permet de réaliser plusieurs types de simulations, notamment :


- **Analyse des contraintes (statique linéaire)** : pour vérifier la résistance des pièces sous l'effet des charges.
- **Analyse thermique** : pour étudier la distribution des températures et la conduction thermique.
- **Analyse de flambement** : pour tester la stabilité des structures.
- **Simulation dynamique (mouvement)** : pour observer le comportement des assemblages en mouvement.
- **Analyse vibratoire (fréquences propres)** : pour identifier les modes de vibration d'une pièce.

Ces outils permettent d'optimiser la conception, réduire les coûts de prototypage et améliorer la fiabilité du produit final.


Dans le cadre de notre projet, nous avons utilisé SolidWorks Simulation pour analyser les contraintes subies par une pièce mécanique. Cela nous a permis de détecter les zones critiques et d'apporter des modifications avant le passage à la fabrication.

III.5.3 Simulation de la fraise T a dentures alternées à queue conique (étude statique)




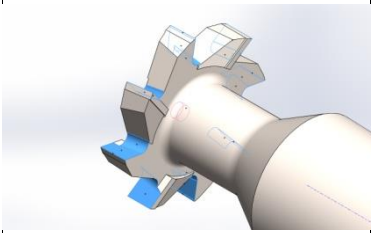
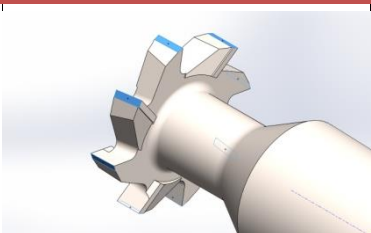
Corps volumiques			
Nom du document et référence	Traité comme	Propriétés volumétriques	Chemin/Date de modification du document
Echelle1 	Corps volumique	Masse:7.34665 kg Volume:0.000954113 m ³ Masse volumique:7 699.99 kg/m ³ Poids:71.9972 N	la fraise T a dentures alternées à queue conique.SLDPRT May 27 10:19:34 2025

• Propriétés du matériau

Reference du modèle	Propriétés	Composants
	<p>Nom : Acierallié</p> <p>Type de modèle : Linéaire élastique isotropique</p> <p>Critère de ruine par défaut : Contrainte de von Mises max.</p> <p>Limite d'élasticité : 6.20422e+08 N/m²</p> <p>Limite de traction : 7.23826e+008 N/m²</p> <p>Module d'élasticité : 2.1e+11 N/m²</p>	<p>Corps volumique1 (Echelle1) (la fraise T a dentures alternées à queue conique CONTRAINTE)</p>

• Actions extérieures

Nom du déplacement imposé	Image du déplacement imposé	Détails du déplacement impose		
Fixe-1		<p>Entités: 6 face(s)</p> <p>Type: Géométrie fixe</p>		
Forces résultants				
Composants	X	Y	Z	Résultante
Force de réaction(N)	-0.197489	-0.364808	-0.407948	0.581815
Moment de réaction(N.m)	0	0	0	0

Nom du chargement	Image du chargement	Détails du chargement
Couple-1		Entités: 20 face(s) Référence: Face< 1 > Type: Moment de torsion Valeur: -1.3 N.m
Force-1		Entités: 8 face(s) Type: Force normale Valeur: -1.2 N

- Informations sur le maillage

Type de maillage	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage raccordé basé sur la courbure
Taille d'élément maximum	1.57551 mm
Taille d'élément minimum	0.0787753 mm
Qualité de maillage	Haute

- Informations sur le maillage – Détails

Nombre total de noeuds	1697509
Nombre total d'éléments	1202364
Durée de création du maillage (hh:mm:ss):	00:01:00
Nom de l'ordinateur:	SMP-DELLI7

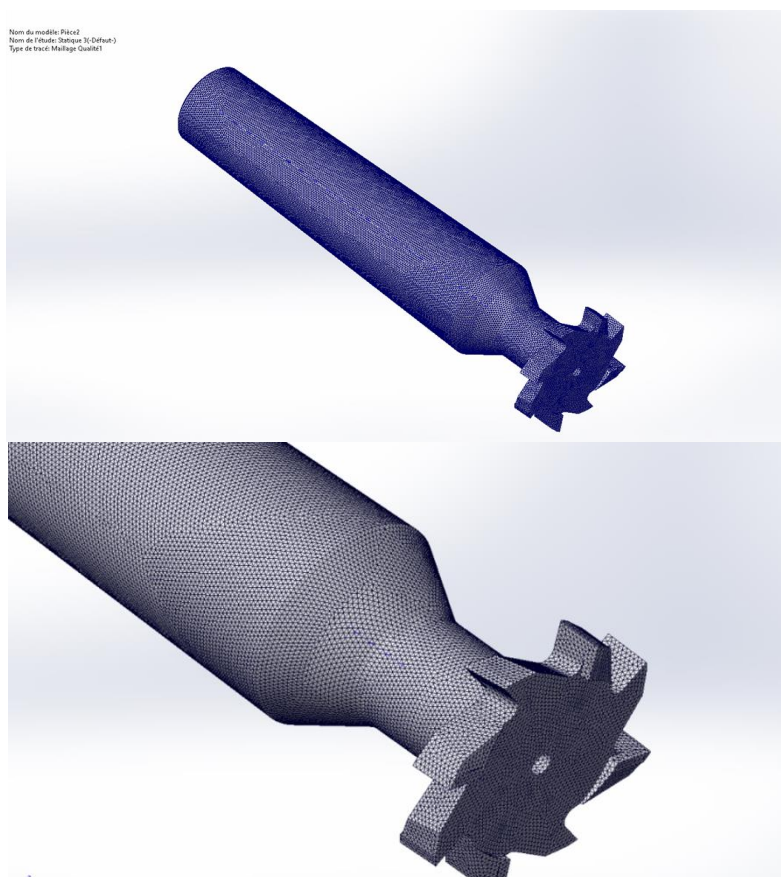
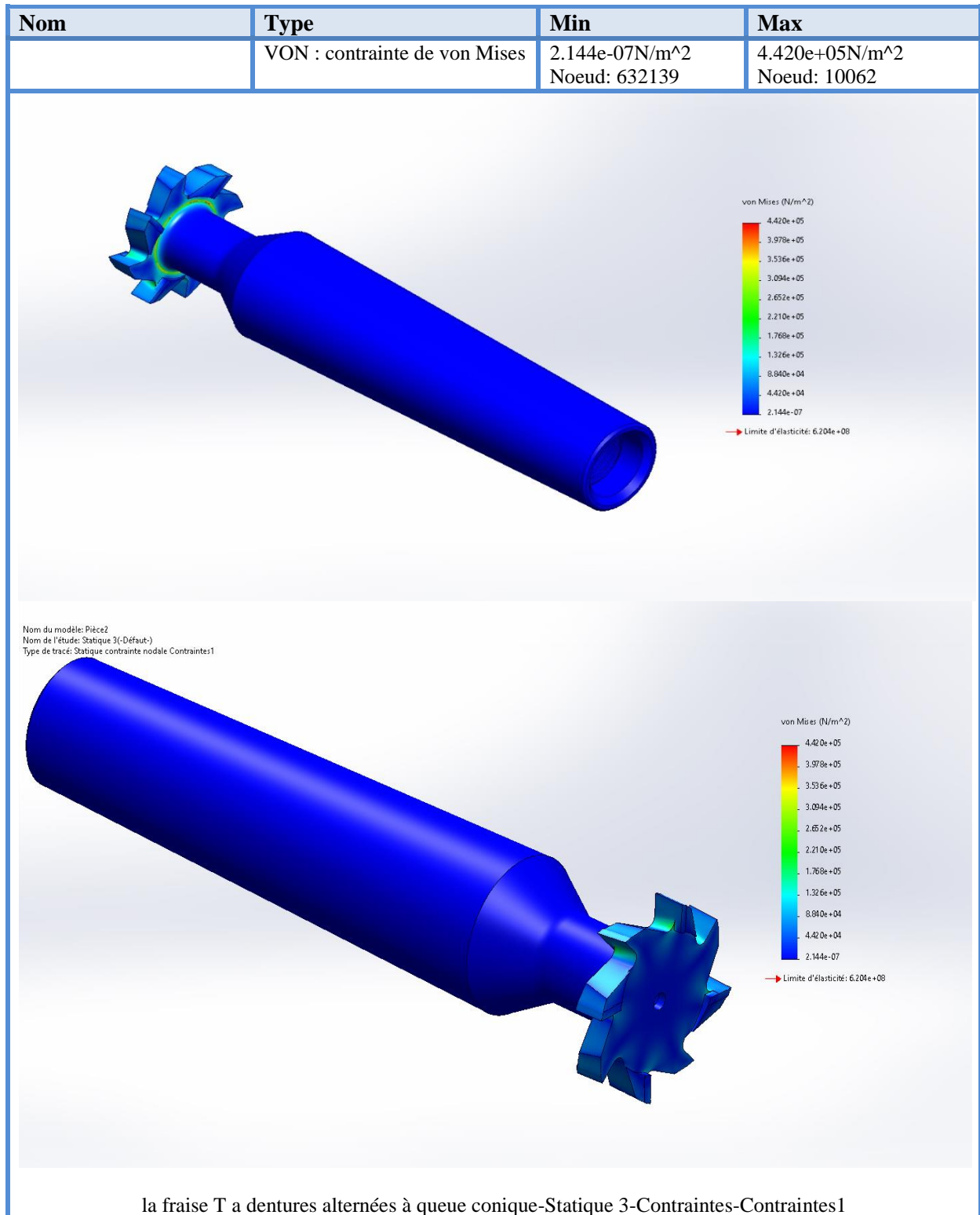
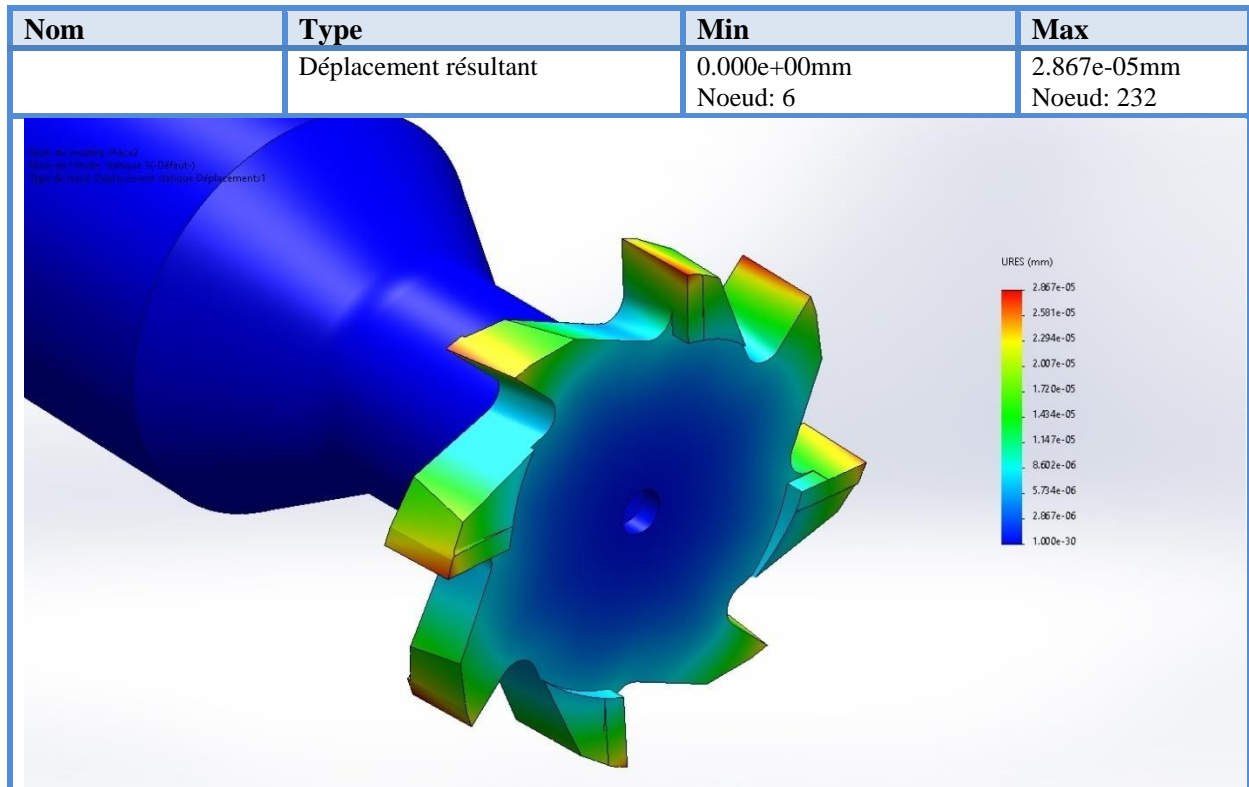
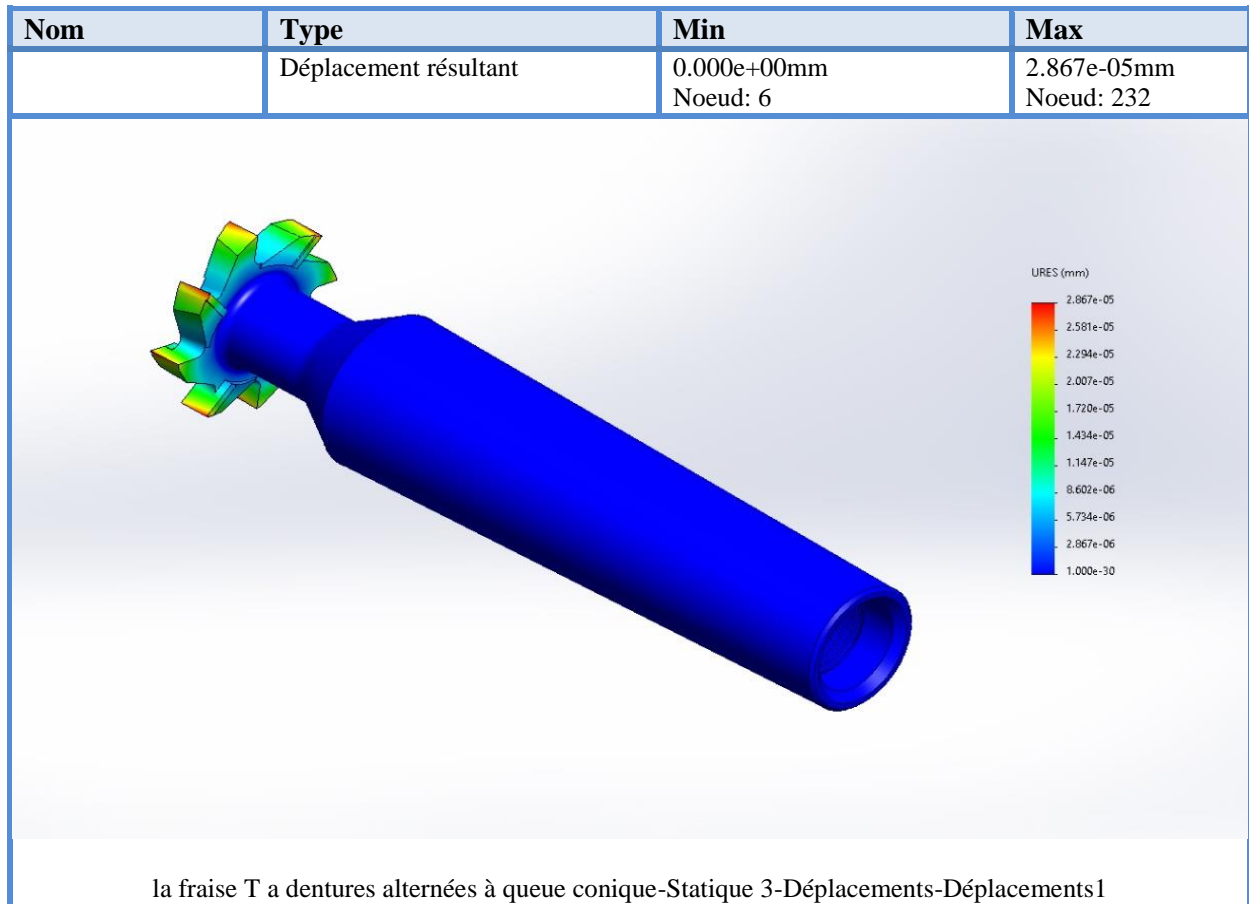


Fig. III.18 Schéma de maillage volumique de la fraise de forme.

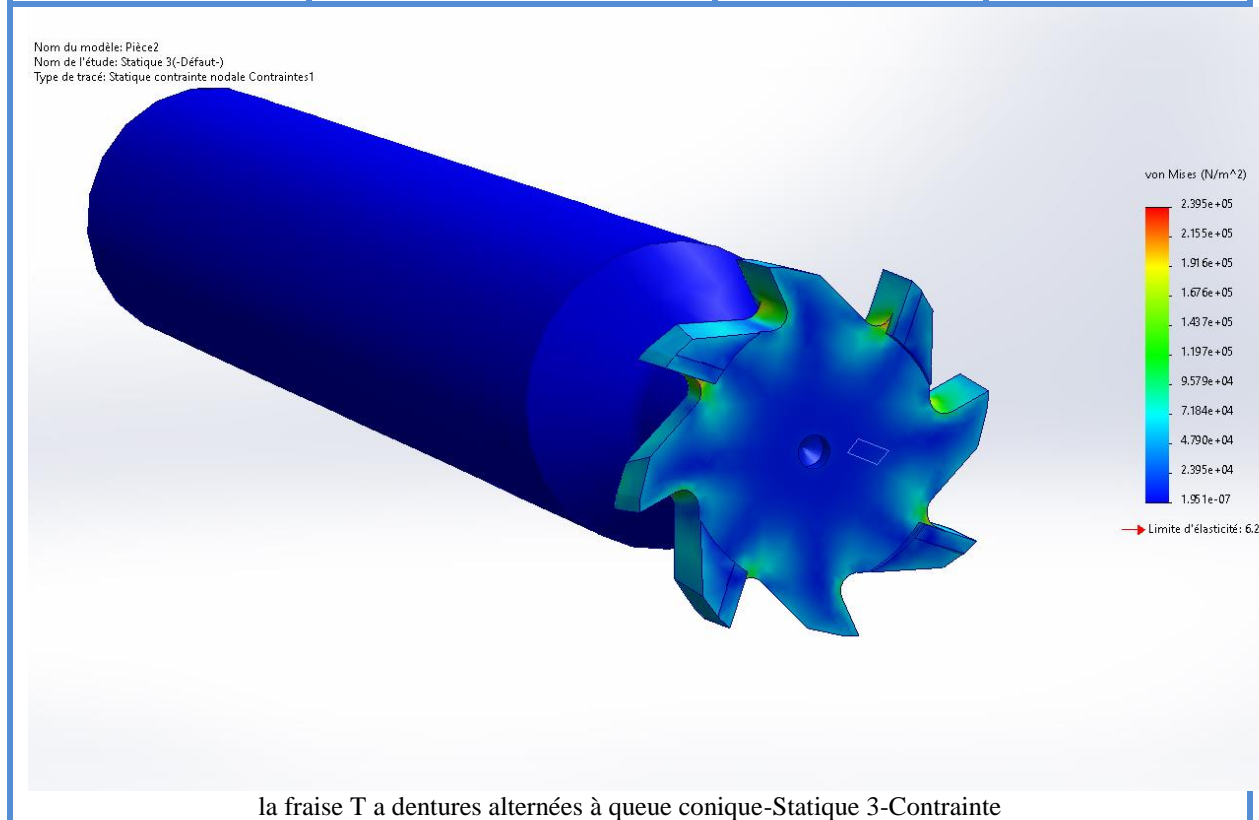
- Résultats de l'étude





Nom	Type	Min	Max
la fraise T a dentures alternées à queue conique-Statique 3-Déplacements-Déplacements1			

Nom	Type	Min	Max
	VON : contrainte de von Mises	1.961e-07	2,395e+05
		Nœud :632139	Nœud: 10062



DISCUSSION

En effet, les contraintes de **Von Mises** sont importantes à prendre en compte pour éviter une usure prématurée des outils de coupe. Les angles vifs peuvent créer des concentrations de contraintes qui favorisent cette usure. Il est donc recommandé d'arrondir les angles et les arêtes tranchantes pour réduire ces concentrations de contraintes et augmenter la durée de vie des outils.

De plus, il est essentiel de choisir un matériau approprié pour les outils de coupe, en fonction des contraintes auxquelles ils seront soumis lors de l'usinage. Un matériau trop mou ou trop fragile ne résistera pas aux efforts de coupe et s'usera rapidement.

Il est également important d'assurer un bon système de refroidissement et de lubrification lors de l'usinage, pour éviter la surchauffe des outils qui pourrait également contribuer à leur usure prématurée. En prenant en compte ces différents facteurs, il est possible d'optimiser la durée de vie des outils de coupe et d'améliorer la qualité des pièces usinées.

Conclusion générale

Au terme de cette mémoire de fin d'études, il convient de souligner l'importance des outils de coupe dans les procédés d'usinage, en particulier les fraises, qui jouent un rôle central dans l'amélioration de la précision, de la qualité de surface et de la productivité en fabrication mécanique.

Le travail réalisé a porté sur l'étude et la conception d'une **fraise trois tailles en acier rapide (HSS)**, dotée d'une **denture croisée à queue conique**. À travers cette étude, les aspects géométriques essentiels tels que la disposition des dents, les profils de coupe, et les conditions d'usinage ont été analysés dans un cadre théorique et appliqué. L'objectif n'était pas de proposer une innovation, mais plutôt de mettre en pratique des connaissances acquises au cours de la formation.

L'utilisation des outils de **Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO)** a permis de développer un modèle numérique cohérent de la fraise, constituant un support pédagogique pertinent et une base exploitable pour une éventuelle réalisation sur machine-outil à commande numérique (MOCN).

Ce travail a ainsi permis de renforcer les compétences en conception mécanique, de mieux comprendre les contraintes liées à la fabrication des outils de coupe, et d'aborder les problématiques d'optimisation géométrique et fonctionnelle.

En perspective, ce sujet ouvre des opportunités pour approfondir la réflexion à travers :

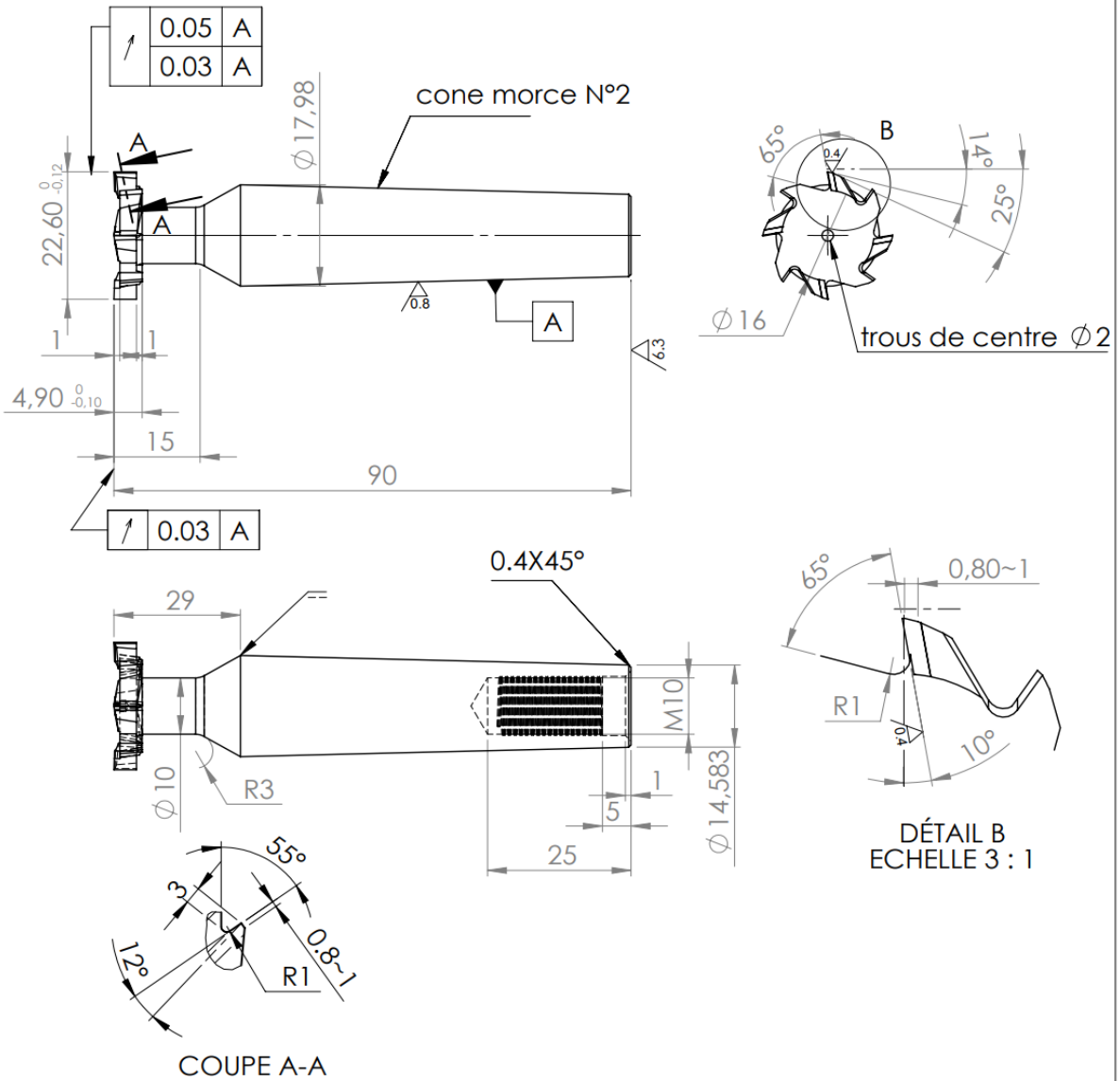
- L'analyse de l'influence des matériaux sur la durabilité de l'outil.
- L'amélioration des profils de coupe pour des matériaux plus difficiles à usiner.
- L'introduction de la simulation thermique et mécanique dans la phase de conception.
- L'intégration de méthodes de fabrication intelligentes pour une production plus performante.

Reference bibliographie

- [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, Tome3» .
- [4] . Gilles Prod'Homme, « Commande Numérique des Machines-Outils», Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, B 7130.
- [5] . Sandvik-Coromant, «Fraisage », Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 7 082, 1997.
- [6] . Jean-Pierre Cordebois, coll, «Fabrication par Usinage», DUNOD, 2003.
- [7] . H.Longeot, L.Jourdan, Construction industrielle.
- [8] . SwissMechanic, 4^eédition-juin 2009 Version pour apprenant, n°d'art.21104f.
- [9] . G.Sabatier, F.Ragusta, H.Antz, Manuel de technologie mécanique.
- [10] . SolidWorks Education, Conception mécanique et technologie.
- [11] . Éric Felder, Procédés d'usinage.
- [12] . A.Chevalier, J.Bohan,A.Molina Guide pratique de l'usinage (tournage, fraisage).
- [13] . P.Boudrie, La coupe des métaux version n°5 octobre 2004.
- [14] . A.Maurel-Pantel, Etude expérimentale et modélisation par EM du procédé de fraisage 2009.
- [15] . A.Passeron, Techniques d'ingénieur, tournage.
- [16] . Y. Altintas, Manufacturing Automation, Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design, Cambridge University Press, 2000.
- [17] . 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.
- [18] . S.Hwan Suh, S.Kyoon Kang, Dae-Hyuk Chung, Theory and design of CNC Systems.
- [19] . Graham T.Smith, CNC machining technology 1design, Development and CIM Stratégies.
- [20] . Y.Altintas (University of British Columbia), Manufacturing Automation Second Edition, Metal cutting mecahnics, Machine tool vibration, and CNC design.
- [21] . Dr. Bennegadi Mohammed El Larbi.Coupe des Métaux en Fabrication Mécanique et Productique. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. Année 2018.
- [22] . <https://www.google.com/urlsa=t&source=web&rct=j&url=http://moodle.univlille1.fr/pluginfile.php/>. Usure des outils. Université de Lille 01. Génie Mécanique et Productique. Année 2017.
- [23] . Bakhti Abdelbassit et Merzoug Aissa , Recherche de l'usure de l'outil de coupe lors du tournage d'éprouvettes pour l'essai de traction. Mémoire master. Université Mohamed Boudiaf – M'Sila.
- [24] . HAMZAOUI Amir et BOUALLEGUE Med Akram (2022) , Conception et réalisation d'une fraise a lamer a pilot interchangeable, incorporée dans la fabrication mécanique, Master 2 cycle (LMD) en Génie Mécanique Pro, Université Abbes Laghroue Khenchela .

Annexes

Sauf indication $\nabla 1.6$
 Z=8
 angle d'hélice W=10



Echelle:		CODE :		Designation: FRAISE A REINURER DENTURE ALTERNÉES	
Dessiner par:		Le:	Emargement:		
Verifié par:		Le:	Emargement:		
Modifié par:		Le:	Modification N°:		
		H.R.C: 63-66 30-45	Mat: Z Xc 45	Feuil :	

Procédé technologique d'usinage				Code du Produit			Code de pièce (ensemble)		Désignation de Pièce (ensemble)			Feuille 1 de 20 feuilles				
Fraise a rainurer a denture alternées																
Sert pour	Temps U (H)	Nb pce	Pour prod unitaire	de rechange et acces	Total	Poids net en Kg	de pièce unitaire	pour produit unitaire	Nb files	Procédé technologique	Fiche opération	Croquis technologique	Fiche Contrôle	Total		
	120min		1	1	1					1	18	/	1	20		
Marque de matière		Etat de fourniture		Ebauche	Dureté		Catégorie		Code		Dimension à débiter		Nb d'une ébauche	poids en Kg	poid de pièce unit en Kg	poids pour produit unit en Kg
Z XC 45		HB			HB	/		/		Ø 25X35 Ø 25X70		1		0.111 0.250		0.114
N° de série	N° opér	N° page	Description d'opération				N° de série	N° opér	N° page	Description d'opération						
1	1	2	Dressage et chariotage (partie active)				12	12	13	Fraisage 3(entaille 1)						
2	2	3	Dressage et chariotage (partie de fixation)				13	13	14	Fraisage 4(entaille 2)						
3	3	4	Soudage en bout				14	14	15	Fraisage 5(entaille 3 en bout)						
4	4	5	Tournage mise en longueur et centrage				15	15	16	Traitement thermique						
5	5	6	Perçage et taraudage				16	16	16	Sablage						
6	6	7	chambrage D10.5				17	17	17	Affutage 1(angle de coupe)						
7	7	8	chambrage D16				18	18	18	Rectification cylindrique						
8	8	9	Tournage CNC				19	19	19	Affutage 2(angle de dépouille)						
9	9	10	chambrage D14				20	19c	20	Contrôle final						
10	10	11	Fraisage 1(ouverture des dents)													
11	11	12	Fraisage 2(ouverture des dents)													
Modification											Dessiné		Approuvé			
Rep Pos N° Doc Signature Date Rep Pos N° Doc Signature Date											Vérifié					
v.P.std																

Fiche d'opération d'usinage				Code Produit		Code piece		Désignation de Pce(ensemble)		N° Phase		Feuille	
Fraise a rainurer a denture alternées								Fraise a rainurer a denture alternées		1		2	
										Equipment Nom: Tour parallèle Type: SI-CA6140 Spécif.: Capacité: 7.5KWH			
Désignation et repère de porte-pièce et estampage Mandrin à trois mors Outil et matière auxiliaires													
										Nbr Pce pour 1 fois		1	
N°	Description d'opération				Outil coupant				Instrument de contrôle				
1	Dressage et chariotage (partie active)				outil de tour				pied a coulisse				
Modification										Dessiné		Approuvé	
Rep Pos N° Doc Signature Date Rep Pos N° Doc Signature Date										Vérifié			
v.P.std													

Fiche d'opération d'usinage		Code Produit	Code piece	Désignation de Pce(ensemble)	N° Phase	Feuille						
				Fraise a rainurer a denture alternées	2	3						
				Equipement Nom: Tour parallèle Type: SI-CA6140 Spécif.: Capacité: 7.5KWH								
				Désignation et repère de porte-pièce et estampage Mandrin à trois mors								
				Outil et matière auxiliaires								
				Nbr Pce pour 1 fois: 1								
				Instrument de contrôle								
N°	Description d'opération	Outil coupant		Instrument de contrôle								
1	Dressage et chariotage (partie de fixation)	outil de tour		pieds a coulisse								
Modification	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Déssiné	Approuvé
	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Vérifié	
	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	v.P.std	

Fiche d'opération d'usinage		Code Produit	Code piece (ensemble)	Désignation de Pce(ensemble)	N° Phase	Feuille						
				Fraise a rainurer a denture alternées	3	4						
				Equipement Nom: Daichen Resistance welder Type: Spécif.: Capacité:								
				Désignation et repère de porte-pièce et estampage								
				Outil et matière auxiliaires								
				Nbr Pce pour 1 fois:								
				Instrument de contrôle								
N°	Description d'opération	Outil coupant		Instrument de contrôle								
1	Soudage en bout											
Modification	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Déssiné	Approuvé
	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Vérifié	
	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	Rep	Pos	N° Doc	Signature	Date	v.P.std	

Fiche d'opération d'usinage										Code Produit	Code pièce (ensemble)	Désignation de Pce(ensemble)	N° Phase	Feuille	
												Frise a rainurer a denture alternées	6	7/20	
										Equipement Nom : Tour parallèle Type : SI-CA6140 Spécif. : Capacité : 7.5KWH		Désignation et repère de porte-pièce et estampage Mandrin à trois mors			
										Outil et matière auxiliaires					
										Nbr Pce pour 1 fois : 1					
										N° Description d'opération 1 chambrage D10.5					
Modification Rep Pos N° Doc Signature Date Rep Pos Date Rep Pos N° Doc Signature Date Rep Pos N° Doc Signature Date										Dessiné Vérifié v.P.std		Approuvé			

Fiche d'opération d'usinage										Code Produit	Code pièce (ensemble)	Désignation de Pce(ensemble)	N° Phase	Feuille	
												Frise a rainurer a denture alternées	7	8/20	
										Equipement Nom : Tour parallèle Type : SI-CA6140 Spécif. : Capacité : 7.5KWH		Désignation et repère de porte-pièce et estampage Mandrin à trois mors			
										Outil et matière auxiliaires					
										Nbr Pce pour 1 fois : 1					
										N° Description d'opération 1 chambrage D16					
Modification Rep Pos N° Doc Signature Date Rep Pos Date Rep Pos N° Doc Signature Date Rep Pos N° Doc Signature Date										Dessiné Vérifié v.P.std		Approuvé			

RESUME - Ce travail porte sur l'étude et la réalisation d'une fraise à trois dents, fabriquée en acier rapide, avec une denture croisée et une queue conique. Il s'inscrit dans un cadre de formation visant à appliquer les connaissances théoriques acquises dans le domaine de la fabrication mécanique, tout en intégrant des outils numériques modernes. La première partie aborde les principales techniques de fabrication telles que l'enlèvement de matière, la déformation, la fusion, l'assemblage et le frittage. La deuxième partie se concentre sur les opérations de fraisage, les types de machines-outils, les paramètres de coupe et les phénomènes d'usure des outils. Sur le plan pratique, un modèle numérique de la fraise a été conçu à l'aide du logiciel SolidWorks, accompagné d'une simulation mécanique pour évaluer son comportement sous contrainte. Cette étude ne vise pas à proposer une innovation, mais plutôt à renforcer les compétences techniques en conception et modélisation d'outils de coupe, en vue d'applications industrielles futures.

ABSTRACT - This work focuses on the study and production of a three-tooth milling cutter made of high-speed steel, featuring a cross tooth pattern and a tapered shank. It falls within a training framework aimed at applying the theoretical knowledge acquired in the field of mechanical manufacturing, while integrating modern digital tools. The first part addresses the main manufacturing techniques such as material removal, deformation, casting, assembly, and sintering. The second part focuses on milling operations, types of machine tools, cutting parameters, and tool wear phenomena. On the practical side, a digital model of the milling cutter was designed using SolidWorks software, along with a mechanical simulation to evaluate its behavior under stress. This study does not aim to introduce an innovation, but rather to strengthen technical skills in the design and modeling of cutting tools for future industrial applications.

ملخص

هذا العمل يتناول دراسة وإنجاز فريزة ثلاثية الأسنان، مصنوعة من فولاذ عالي السرعة، ذات دنترة متقاطعة وذيل مخروطي. يندرج هذا ضمن إطار تكويني يهدف إلى تطبيق المعارف النظرية المكتسبة في مجال التصنيع الميكانيكي، مع إدماج أدوات رقمية حديثة. يتناول الجزء الأول أهم تقنيات التصنيع مثل الإزالة، التشويه، الصهر، التجميع، والتلبيد. أما الجزء الثاني فيركز على دراسة عمليات التفريز، وأنواع آلات التشغيل، ومعايير القطع، وظواهر تآكل الأدوات. وفي الجانب التطبيقي، تم تصميم نموذج رقمي للفريزة باستخدام برنامج صوليدوركس، مع إجراء محاكاة ميكانيكية لتقييم سلوكها تحت الإجهاد. لا تهدف هذه الدراسة إلى تقديم ابتكار، بل إلى تعزيز المهارات التقنية في تصميم ونمذجة أدوات القطع، استعداداً لتطبيقات صناعية مستقبلية.