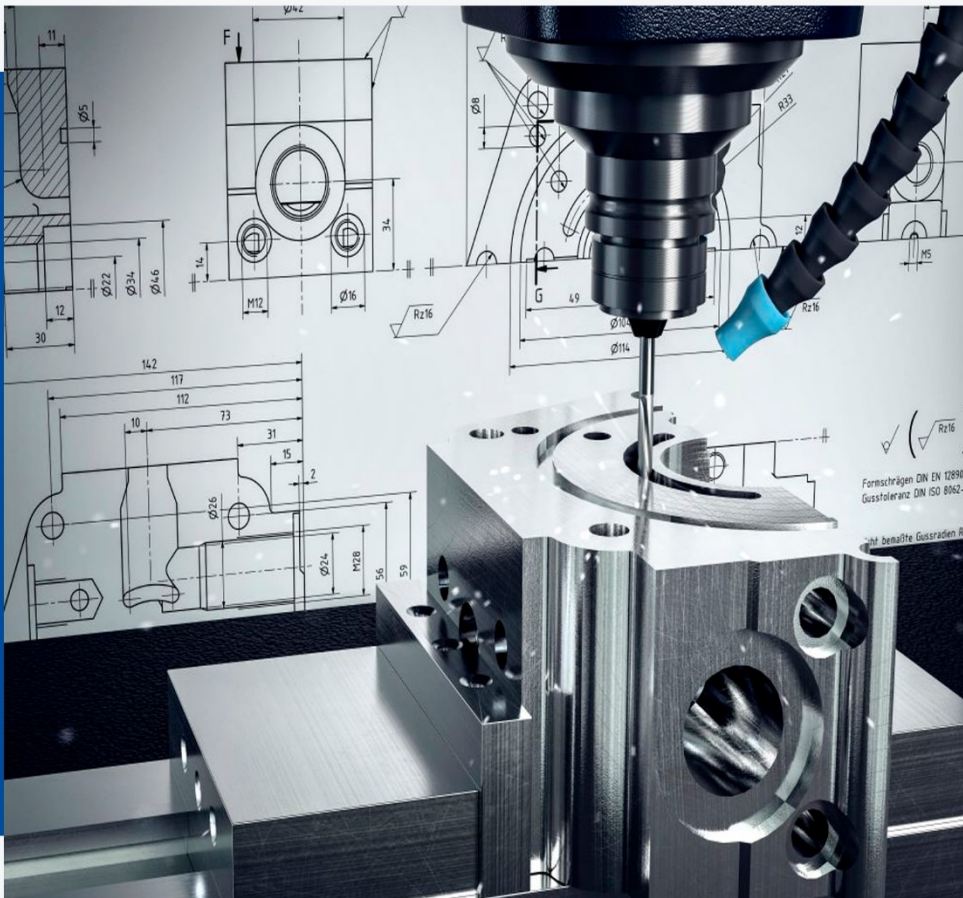


Fabrication Mécanique

Polycopié de cours

Filière : Génie Mécanique
Deuxième Année Licence



Avant-propos

Ce support de cours pour le module « Fabrication Mécanique » est destiné aux étudiants de Génie Mécanique en deuxième année licence. Ce cours est dispensé durant le deuxième semestre de ce programme académique.

Descriptif du cours

Ce cours de fabrication mécanique couvre les principes fondamentaux et avancés de la mise en forme et de l'usinage des matériaux. Il est structuré pour offrir une compréhension exhaustive des procédés de fabrication par enlèvement de matière et des technologies des machines-outils. Ce cours est organisé pour fournir aux étudiants une solide base théorique, en mettant l'accent sur les matériaux utilisés, les outils de coupe, les mécanismes de formation de copeaux, et les caractéristiques des machines-outils. Le cours intègre également des méthodes de choix des paramètres de coupe et aborde les problématiques liées à l'échauffement et l'usure des outils.

Compétences visées

- Maîtriser des techniques d'usinage et ainsi que l'utilisation des machines-outils.
- Analyser une pièce mécanique et proposer la méthode de fabrication la plus appropriée en tenant compte des contraintes techniques, économiques ;
- Définir les moyens et les conditions nécessaires à la production, en optimisant l'utilisation des ressources et en garantissant la qualité des produits ;
- Contribuer à l'amélioration continue de la productivité en proposant des solutions innovantes.
- Anticiper les besoins du marché et les évolutions technologiques pour adapter la ligne de production.

Savoir-faire

- Identifier les propriétés des matériaux et sélectionner ceux appropriés pour différentes applications de fabrication.
- Déterminer les géométries optimales des outils de coupe pour améliorer l'efficacité de l'usinage.
- Installer et ajuster les outils de coupe sur les machines-outils en respectant les spécifications techniques.
- Communiquer efficacement avec les équipes de production et les clients pour garantir la satisfaction de tous.

Connaissances préalables recommandées

Il est recommandé aux apprenants d'avoir des connaissances sur :

- Les technologies de bases,
- Les sciences des matériaux,
- Les machines-outils et leur fonctionnement.

Contenu de l'enseignement

Cours : 1h30 par semaine

Méthode d'évaluation : 100 % examen

Table de matière :

Avant-propos	2
Table de matière :.....	3
Introduction	4
1. GENERALITES SUR LA FABRICATION MECANIQUE.....	5
1.1. C'est quoi la fabrication mécanique ?.....	5
1.2. Les matériaux	5
1.3. Classification des procédés de mise en forme.....	6
2. PROCEDES DE FABRICATION PAR ENLEVEMENT DE MATIERE.....	8
2.1. Introduction	8
2.2. Les outils de coupe par enlèvement de matière.....	10
2.3. Géométrie des outils de coupe	16
2.4. Mécanisme de formation de copeau.....	19
2.5. Efforts de coupe	23
2.6. Echauffement (Température de coupe)	26
2.7. Endommagement des outils de coupe	26
2.8. Méthodologie de choix des paramètres de coupe.....	28
3. TECHNOLOGIES DES MACHINES-OUTILS	31
3.1. Mouvements de coupe.....	31
3.2. Caractérisation d'une machine-outil (Principaux organes).....	53
3.3. Chaines cinématiques.....	59
3.4. Mécanismes de transmission de mouvements.....	61
3.5. Mécanismes de transformation du mouvement.....	63
Références bibliographiques	65

Introduction

La fabrication mécanique est un domaine étendu impliquant l'utilisation de machines-outils pour découper, façonner et assembler des matériaux afin de créer des produits finis. Cruciale pour l'industrie manufacturière, elle permet de concevoir et de produire des pièces standardisées ou sur mesure suivant des spécifications précises. Les techniques employées incluent le formage, la découpe et le soudage, et trouvent des applications dans divers secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale, le médical et l'ingénierie.

Ce domaine exige une solide compréhension des processus, des matériaux et des machines-outils pour garantir des produits de qualité à des coûts compétitifs. La fabrication mécanique, une science complexe, requiert une formation et une pratique rigoureuses pour permettre aux ingénieurs et concepteurs de créer des objets précis et fonctionnels. L'adoption de technologies numériques modernes et de procédés sophistiqués assure la production de produits répondant aux attentes des clients.

Ce cours s'articule autour de cinq parties essentielles :

- Généralités sur la fabrication mécanique
- Procèdes de fabrication par enlèvement de matière
- Technologies des machines-outils

1. GENERALITES SUR LA FABRICATION MECANIQUE

1.1. C'est quoi la fabrication mécanique ?

La fabrication mécanique est un processus industriel essentiel qui englobe un large éventail de techniques et de méthodes visant à créer des pièces ou des produits à l'aide de machines et d'outils mécaniques. Ce domaine de l'ingénierie joue un rôle crucial dans la production de composants utilisés dans divers secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'énergie, l'électronique et bien d'autres.

1.1.1. Les fondements de la fabrication mécanique

La fabrication mécanique repose sur la transformation de matières premières en produits finis par le biais de processus mécaniques. Ces processus comprennent souvent l'usinage, le formage, la soudure, l'assemblage et d'autres méthodes spécialisées. L'objectif ultime est de produire des pièces qui répondent aux spécifications techniques requises en termes de dimensions, de tolérances et de propriétés matérielles.

1.2. Les matériaux

Qu'est-ce qu'un matériau ?

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'Homme utilise et/ou conçoit pour fabriquer des objets, construire des bâtiments, des machines etc.

1.2.1. Les différentes classes de matériaux

Les matériaux sont différenciés selon leur provenance (issus d'êtres vivants par exemple) et leurs propriétés, qu'elles soient mécaniques (flexibilité ou rigidité...), chimiques (perméabilité ou imperméabilité à l'eau...) ou encore physiques (conductivité de l'électricité ou de la chaleur...).

Ils sont généralement classés en différentes grandes familles :

- **Les matériaux métalliques** qui regroupent les métaux : fer, cuivre, bronze et les alliages métalliques : acier inoxydable
- **Les matériaux organiques** qui sont issus d'êtres vivants, plantes ou animaux (bois, coton, papier...)
- **Les matériaux minéraux ou inorganiques** : roche, céramique, verre.
- **Les matériaux plastiques**, qui en général proviennent de combustibles dits fossiles se trouvant dans le sol, comme le pétrole par exemple.
- **Les matériaux composites** qui combinent plusieurs matériaux de famille différente pour obtenir de multiples propriétés (exemple : fibre de carbone).

1.3. Classification des procédés de mise en forme

Les procédés de fabrication mécanique peuvent être classés en différentes catégories en fonction de la manière dont les pièces sont produites :

- **Par enlèvement de matière**

On part d'un bloc, et on crée les formes de la pièce en enlevant la matière à l'aide d'un outil Exemple : usinage



- **Par ajout de matière**

On part d'un plateau vide, et on ajoute de la matière pour créer la pièce. Exemple : dépôt de fil abs



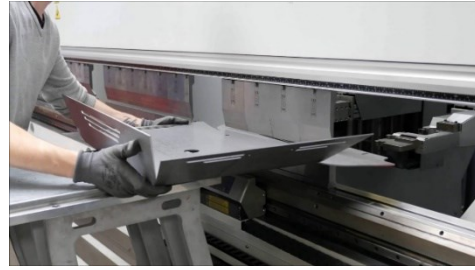
- **Par transformation (moulage)**

On coule la matière à l'état liquide ou pâteux dans un moule, et on obtient la pièce après solidification. Exemple : Injection plastique



- **Par déformation plastique**

On part d'un matériau en feuille que l'on déforme à l'aide d'un outillage spécifique. Exemple : tôle.



Les procédés d'assemblage, tels que la soudure et le rivetage, sont utilisés pour lier les différentes pièces ensemble pour former un produit fini.

2. PROCÉDES DE FABRICATION PAR ENLEVEMENT DE MATIERE

2.1. Introduction

On peut classer les procédés de fabrication par enlèvement de matière, selon les **phénomènes physiques** correspondants, en trois catégories principales :

- **Procédés de coupe**

L'enlèvement de matière se fait par *action mécanique* d'un *outil coupant* ; la force appliquée induit la formation, à l'échelle macroscopique, de **un ou plusieurs copeaux**. Il existe un grand nombre de procédés, dont les principaux sont :

- les procédés à **forte vitesse** et grand débit de matière (fraisage, tournage, perçage) ;
- les procédés de **vitesse plus faible** (sciage, rabotage, taraudage...).

- **Procédés par abrasion**

L'enlèvement de matière est dû à l'*action mécanique* d'un grand nombre de *grains d'abrasifs* de petite taille et de haute dureté. Ces grains agissent selon deux modalités différentes ; ils sont :

- soit liés à un **support solide** : rectification, meulage ;
- soit transportés par un **milieu fluide** : le principe c'est de projeter les grains sur la pièce et laisse l'énergie cinétique agir, pour retirer la matière. (sablage).

- **Procédés physico-chimiques**

Ils sont tous qualifiés de non traditionnels. L'enlèvement de matière est réalisé (à l'exception de l'impact d'un jet d'eau) par des *actions non mécaniques* :

- action thermo-électrique d'un arc électrique (électro-érosion), d'un plasma ou d'un faisceau de lumière cohérente (laser) ou d'électrons ;
- action thermo-chimique de la flamme d'un chalumeau (oxycoupage) ;
- réaction chimique avec un liquide (usinage chimique).

Dans ce cours, nous nous concentrerons exclusivement sur les procédés de coupe et d'abrasion.

2.1.1. Les procédés d'usinage

L'évolution des machines-outils et des outils de coupe a considérablement amélioré leur rendement, leur sécurité, leur rigidité, leur dynamique (vitesse et accélération), leur puissance, ainsi que leur productivité. Dans un premier temps, il est crucial de définir les bases essentielles de l'usinage, notamment les différents modes d'obtention des pièces mécaniques, comme le tournage, le fraisage, le perçage et la rectification. Les trois premiers utilisent des outils de coupe avec une ou plusieurs arêtes tranchantes, tandis que le quatrième, la rectification, fait appel à un outil abrasif, la meule.

- **Tournage :**

Le tournage est le procédé d'usinage qui permet l'obtention de pièces de révolutions (de forme cylindrique ou/et conique) à l'aide d'outils tranchants sur des machines appelées « tours ».

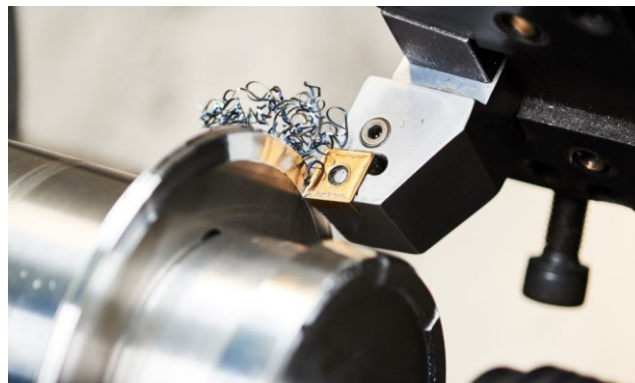


Fig. 2-1 Opérations en tournage.

- **Fraisage :**

Le fraisage est un procédé d'usinage où la génération de surfaces plane résulte de la combinaison du mouvement de rotation de l'outil de coupe (la fraise) et du mouvement d'avance donné à la pièce à usiner.



Fig. 2-2 Opération fraisage.

- **Perçage**

Le perçage est un usinage consistant à faire un trou dans une pièce. Ce trou peut traverser la pièce de part en part ou bien ne pas déboucher.



Fig. 2-3 Opération de perçage.

- **Rectification :**

La rectification est une opération de finition de surface plane ou cylindrique afin d'améliorer l'état de surface de la pièce semi-finie. L'outil mis en action est appelé meule et la matière est extraite par abrasion.



Fig. 2-4 Opération de rectification plane.

2.2. Les outils de coupe par enlèvement de matière

Les outils de coupe monobloc et les outils à plaquette sont deux types d'outils largement utilisés dans l'industrie de l'usinage.

- **Outils de coupe monobloc**

Les outils de coupe monobloc, comme leur nom l'indique, sont fabriqués à partir d'un seul morceau de matériau. Lorsqu'un outil de cette nature est usé, il peut être affuté.



Fig. 2-5 Outils de coupe monobloc.

▪ **Outils à plaquette**

Les outils à plaquette sont constitués d'un corps porte-outil sur lequel sont fixées des plaquettes amovibles. Ces plaquettes, généralement fabriquées en carbure métallique ou en céramique, sont interchangeables et peuvent être remplacées lorsque toutes les arêtes sont usées.



Fig. 2-6 Outils à plaquette.

Dans l'usinage traditionnel, les outils de coupe en contact avec la pièce permettent d'enlever le copeau afin de réaliser des surfaces simples (planes, de révolution, ...). Selon leur mode d'action, les outils peuvent être classés en :

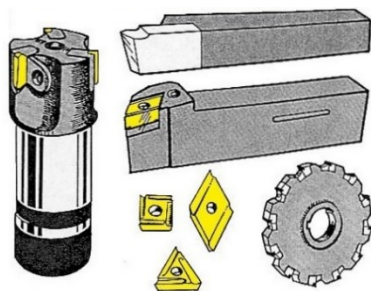


Fig. 2-7 Outils coupants (outils de tour, fraises, forets, etc...)

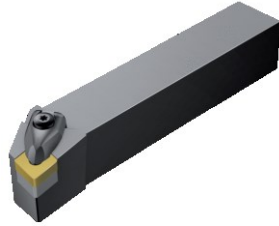


Fig. 2-8 Outils abrasifs (meules, etc...)

La forme de la surface réalisée par un outil de coupe est en fonction du profil de sa partie active et de son mouvement. La géométrie de l'outil a donc une influence directe sur les formes usinables de la pièce.

Les outils utilisés en usinage traditionnel peuvent être :

- à tranchant unique (outils de tournage et de rabotage)



- à tranchant multiple (fraises, forets, alésoirs)



2.2.1. Matériaux de coupe

L'usinage des métaux et des polymères nécessite l'utilisation de matériaux de coupe possédant d'excellentes propriétés. Ces matériaux doivent avoir une dureté élevée à haute température en raison des frottements constants entre l'outil et la pièce, ainsi qu'entre l'outil et le copeau. Ils doivent également résister à l'usure et posséder une stabilité chimique.

Les premiers outils étaient en acier rapide, avec le corps et la partie active de l'outil formant une seule barre. Lorsqu'ils s'usaient, ils étaient simplement affûtés. Avec l'avènement de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux, les outils en acier rapide ne répondaient plus aux exigences technologiques modernes. C'est l'apparition des outils en carbure métallique, en céramique, en CBN et en diamant qui a permis l'exploitation industrielle avancée de ces techniques. Les principales matières utilisées pour les outils de coupe modernes sont illustrées dans la Fig. 2-9 Comparaison de matériaux de coupe. Fig. 2-9.

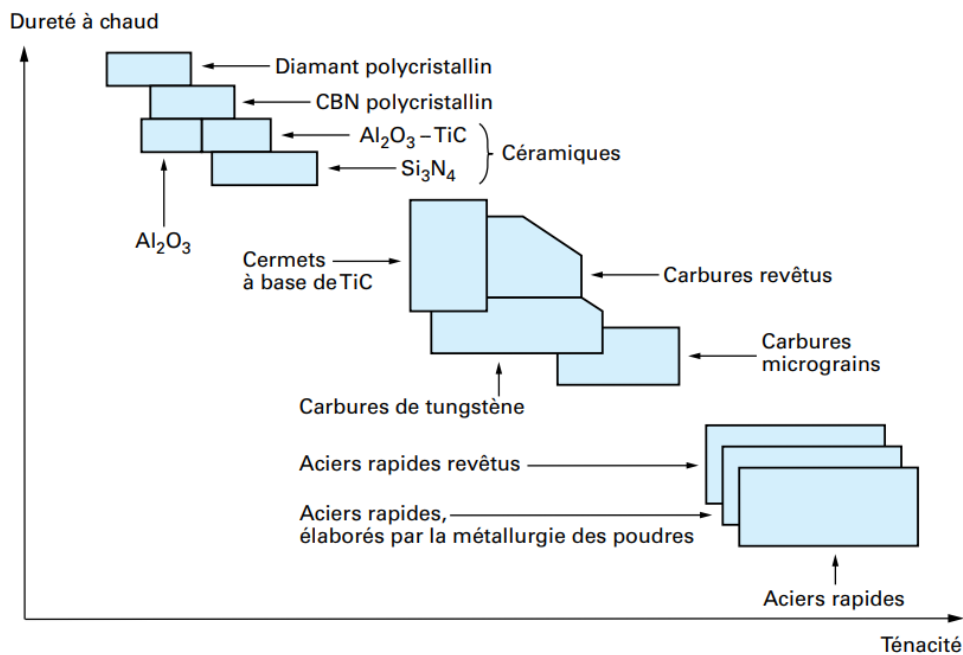


Fig. 2-9 Comparaison de matériaux de coupe.

Rappel :

- **La ténacité**

La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure.

- **La dureté**

Résistance d'un matériau à la pénétration.

2.2.2. Aciers Rapides

Les aciers rapides sont élaborés à partir d'un alliage fer-carbone contenant au moins 0,7 % de carbone, et subissent un traitement thermique. Le tungstène est l'élément principal ajouté, représentant jusqu'à 20 % de la composition, avec d'autres éléments d'addition tels que le cobalt, le manganèse, le chrome, le vanadium et le molybdène.



Fig. 2-10 Outils en aciers rapides.

Après la trempe, la dureté de ces aciers varie entre 60 et 70 HRC et se maintient jusqu'à une température de 550 °C. Les vitesses de coupe des outils en acier rapide sont environ trois fois supérieures à celles des outils en acier au carbone. Cependant, ils ne permettent pas des vitesses de coupe extrêmement élevées, car un échauffement excessif peut annuler la trempe de l'outil, entraînant une dégradation rapide de l'arête de coupe. Ces aciers sont principalement utilisés pour fabriquer des outils monoblocs tels que les outils de tournage, les forets, les fraises et les alésoirs.

Les désignations des aciers à coupe rapide sont les suivantes :

- Acier Rapide Ordinaire (A.R.O)
- Acier Rapide Supérieur (A.R.S ou HSS en anglais : High Speed Steel)
- Acier Rapide Extra Supérieur (A.R.E.S)

La composition chimique des aciers à coupe rapide est illustrée dans le tableau ci-dessous :

ACIER	% C	% W	% Cr	% V	% Mo	% Co
A.R.O	0,7	1,5	4	1,5	0,75	/
A.R.S	0,8	6,5	4	2	6,5	/
A.R.E.S	0,8	20	5	2	2	10

Table 2-1 Composition chimique des aciers à coupe rapide.

2.2.3. Carbures Métalliques

Les carbures métalliques sont des composés chimiques du carbone associé à un second élément chimique, comme le tungstène, le titane, le tantale ou le niobium. Ils sont largement utilisés dans l'industrie des outils de coupe aujourd'hui, disponibles dans une variété de formes adaptées à différents matériaux et types d'usinage. Ces outils se présentent sous forme de plaquettes que l'on fixe facilement sur un porte-outil.

Le cobalt ou le nickel, utilisé comme liant dans la composition du carbure, est aggloméré sous forme de plaquette par un procédé de frittage, où la poudre est chauffée sans être fondue. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent, assurant la cohésion de la pièce.

L'ajout de carbure de titane ou de niobium améliore les propriétés à haute température, permettant des vitesses de coupe allant jusqu'à 100 m/min et offrant une durée de vie supérieure à celle des outils en acier rapide. Les outils en carbure ont une dureté de 80 à 90 HRC, permettant des vitesses de coupe quatre fois plus élevées que celles des aciers rapides.

Les outils à base de carbure métallique peuvent être classés en trois catégories :

- Carbure de tungstène (mono-carbure)
- Carbure de titane-tungstène (carbure double)
- Carbure de titane-tantale-tungstène (carbure triple)

Les mono-carbures sont efficaces pour l'usinage de la fonte et des alliages non ferreux, tandis que les carbures doubles et triples sont principalement utilisés pour l'usinage des aciers.

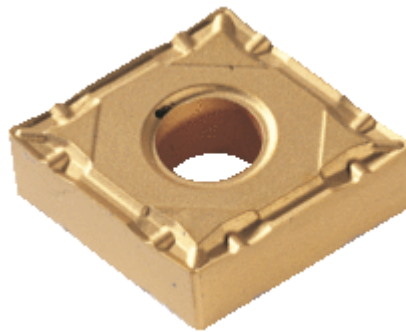


Fig. 2-11 Plaquette en carbures métallique.

2.2.4. Céramiques

Les céramiques sont des composés d'oxyde d'alumine très durs, de nitrure de silicium, agglomérés dans des oxydes de chrome Cr_2O_3 servant de liant, frittés à une température de 1800 °C. Elles se caractérisent par une résistance à la compression allant jusqu'à 5000 N/mm², une grande dureté variant entre 89 et 95 HRC, une stabilité thermique élevée atteignant 1200 °C, et une résistance à l'usure remarquable.

Les outils céramiques sont hautement réfractaires, avec un point de fusion supérieur à 1500 °C. Ils sont particulièrement adaptés à l'usinage à grande vitesse et à l'usinage des alliages ferreux très durs. Les plaquettes de céramiques présentent plusieurs arêtes de coupe pour un usage successif. Les céramiques offrent une solution efficace pour les opérations d'usinage nécessitant une résistance élevée à la chaleur et à l'usure, ainsi qu'une grande précision.



Fig. 2-12 Plaquette en céramique.

2.2.5. Cermets

Le terme "cermet" est dérivé de la céramique (cer) et du métal (met). Les cermets sont des matériaux fabriqués par métallurgie des poudres, composés de particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal, généralement du nickel.

Ils se caractérisent par une dureté allant de 1500 à 2000 HV et conservent leurs propriétés à haute température lors de l'usinage à grande vitesse ou à des températures extrêmes pouvant atteindre 1000 °C. Les cermets peuvent être utilisés sans lubrification et sont adaptés aux opérations de finition et à l'usinage de précision nécessitant des vitesses de coupe élevées et des avances faibles.



Fig. 2-13 Plaquette en cermets.

2.2.6. Diamants

Le diamant, un minéral rare d'origine naturelle composé de carbone, est la substance naturelle la plus dure connue, avec une valeur de dureté atteignant 7000 HV.

Il présente un faible coefficient de frottement et une faible aptitude à l'adhésion aux métaux, ainsi qu'une résistance importante à la chaleur et à l'usure.

Le diamant est largement utilisé dans la fabrication de meules et de grains de réaffûtage pour les travaux de finition. Cependant, il est très fragile et son coût est élevé. Il résiste à des températures élevées allant jusqu'à 1500 °C et nécessite l'utilisation de machines-outils rapides pour son usinage.



Fig. 2-14 Outil en diamants.

2.3. Géométrie des outils de coupe

Un outil de coupe se compose d'un corps principal comportant une ou plusieurs parties actives. Dans le cas des outils à tranchants multiples, tels que les fraises et les forets, chaque dent agit comme un outil individuel, prenant comme modèle de référence l'outil prismatique de tournage. L'étude de la partie active de tous les outils de coupe est donc basée sur celle de l'outil prismatique de tournage. La partie active dans une opération d'usinage est généralement la plaquette de coupe. Les outils de coupe se distinguent par leurs matériaux et par différents paramètres géométriques. La géométrie des outils est conçue pour favoriser la formation des copeaux, assurer la robustesse de l'arête de coupe et fragmenter les copeaux en éléments de longueur acceptable.

2.3.1. Éléments d'un outil de coupe

En règle générale, un outil de coupe est défini par sa géométrie de tranchant et son orientation spatiale, spécifiées par des angles de coupe standardisés. Les composants typiques d'un outil de coupe incluent :



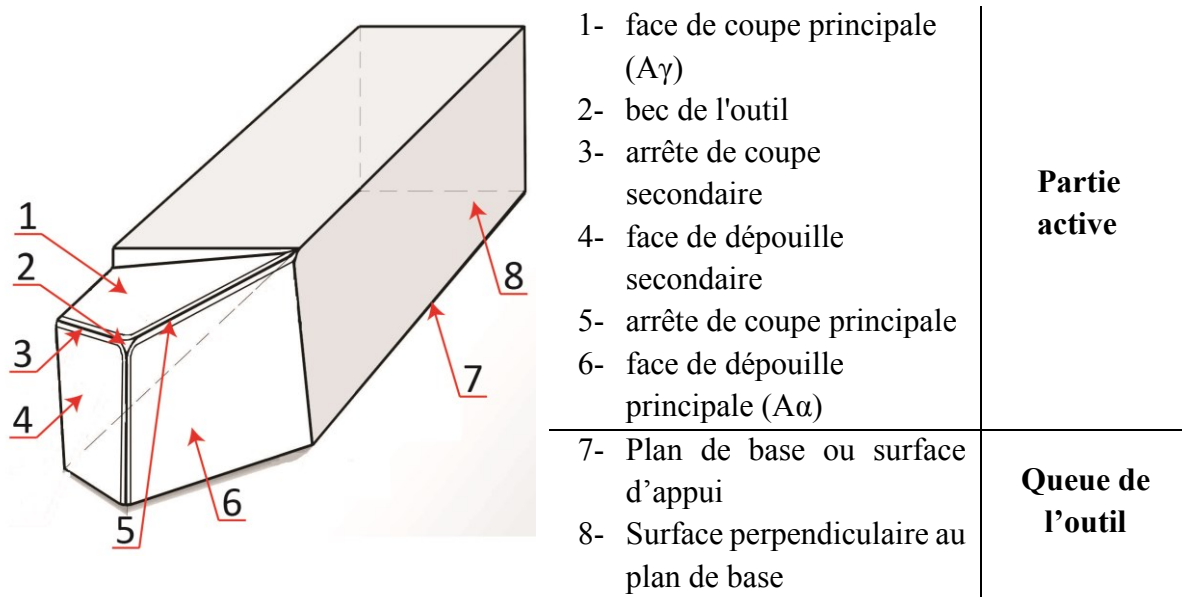


Fig. 2-15 Eléments d'un outil de coupe.

- **Queue** : la partie de l'outil utilisée pour le fixer et le positionner sur la machine.
- **Corps d'outil** : la partie supportant les éléments coupants ou les plaquettes, parfois équipée d'arêtes coupantes directement intégrées.
- **Partie active** : cette section est directement impliquée dans l'opération de coupe, comprenant la face de coupe, les faces en dépouille et les arêtes tranchantes.
- **Face de coupe ($A\gamma$)** : la surface où le copeau glisse pendant la coupe.
- **Faces de dépouille principale ($A\alpha$) et secondaire** : Les surfaces devant lesquelles passe la surface qui vient d'être usinée.
- **L'arrête de coupe principale** : située à l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face de dépouille principale $A\alpha$, est conçue pour enlever la matière lors de l'usinage.
- **L'arrête de coupe secondaire** : quant à elle, est formée à l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face de dépouille secondaire.
- **Le bec de l'outil** : représenté par la pointe $r\epsilon$, est la jonction des arêtes principales et secondaires.

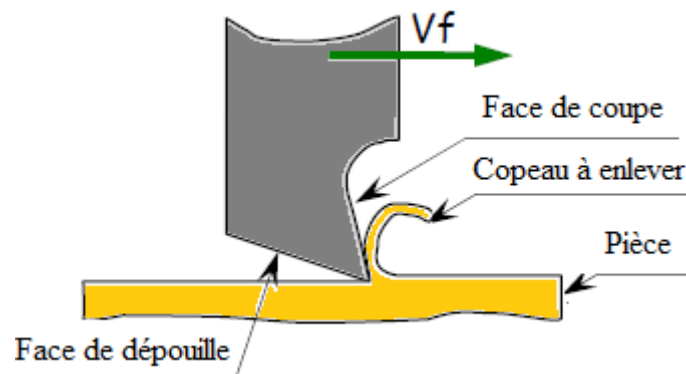


Fig. 2-16 Face de coupe principale et faces de dépouille.

2.3.1.1. Les principaux plans des outils de coupe

Les angles de la partie active sont définis par trois plans Pr , Pf et Ps , eux même repérés en fonction des vecteurs, vitesse de coupe \vec{V} et d'avance \vec{V}_f .

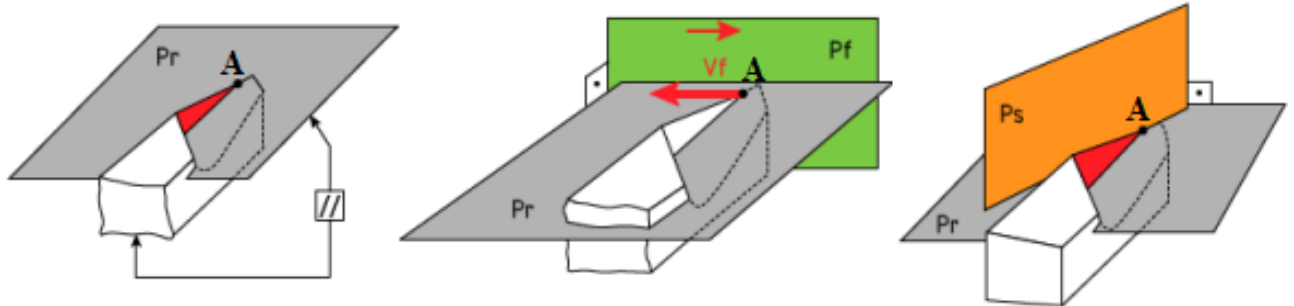


Fig. 2-17 Plan de référence Pr , plan de travail conventionnel Pf , plan de l'arête de l'outil Ps .

- Le **plan de référence** Pr est le plan passant par le point (A) considéré de l'arête et parallèle au plan de base. Il sert de face d'appui au corps de l'outil.
- Le **plan de travail conventionnel** Pf est le plan perpendiculaire au plan de référence Pr de l'outil, au point considéré de l'arête (A), et parallèle à la direction supposée d'avance de l'outil.
- Le **plan d'arête de l'outil** Ps est le plan tangent à l'arête (au point considéré A) et perpendiculaire au plan de référence de l'outil.

2.3.1.2. Les principaux angles et leur influence sur la coupe

- L'angle K_r entre Pf et Ps mesuré dans Pr , dépend du travail d'usinage (forme de la surface à générer, ébauche ou finition), angle à gauche ou à droite.
- L'angle de coupe γ , dépend du matériau usiné.
- L'angle de dépouille α (6° pour l'acier rapide, 4° à 8° pour les carbures métalliques).
- L'angle de taillant β (dépend de la résistance à la coupe du métal à usiner).

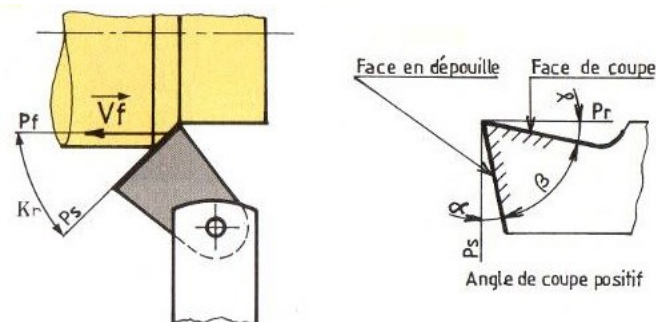


Fig. 2-18 Angles de coupe.

Remarque :

La relation suivante est toujours valable :

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

Les angles α , β sont toujours positifs; l'angle γ est positif lorsque la face de coupe se retrouve du même côté du plan de référence Pr que la face de dépouille.

2.4. Mécanisme de formation de copeau

Lors d'un usinage par enlèvement de matière l'arrête de l'outil pénètre dans la pièce et enlève le copeau, qui est le résultat de plusieurs actions mécaniques complexes :

- la compression de la matière sur la face d'attaque,
- le cisaillement dynamique du copeau suivant le plan de cisaillement,
- l'écoulement du copeau.

L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, ses mouvements étant assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil. Le frottement du copeau sur la face de coupe et celui de la pièce sur la face de dépouille provoquent une élévation importante de la température qui peut entraîner une fusion locale du copeau.

Remarque : Ce phénomène peut conduire à l'adhérence du copeau sur la face de coupe (copeau adhérent).

Les principaux facteurs influençant la formation du copeau et l'état des surfaces usinées sont :

- la vitesse de coupe (Vc) : si ce paramètre augmente la rugosité de la surface diminue
- la profondeur de passe (ap)
- la vitesse d'avance (Vf)
- la géométrie de l'outil et son rayon de bec
- la durée de vie de l'outil
- les matériaux de l'outil et de la pièce
- la lubrification

L'obtention d'un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil,...) nécessite un bon choix et réglage des paramètres de la coupe. Plusieurs critères permettant de définir ces paramètres sont à considérer dans ce contexte. Le schéma illustré ci-après représente un copeau en cours de formation. On observe que :

- l'épaisseur du copeau (e) est supérieure à la profondeur de passe,
- les fibres du copeau sont orientées suivant une même direction,
- la face du copeau en contact avec la surface de coupe est lisse alors que l'autre est rugueuse.

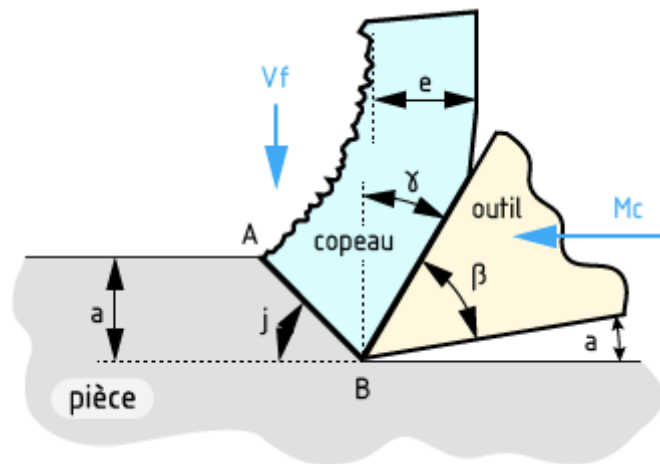


Fig. 2-19 La formation du copeau.

2.4.1. La notion de copeau minimum

Lorsque la pénétration et/ou l'avance sont trop faibles, l'outil ne coupe plus. Le métal est donc comprimé superficiellement et la pression de contact outil-pièce provoque l'usure prématurée de l'outil ainsi que l'obtention d'un mauvais état de surface (phénomène d'écrouissage). Il est donc impératif de choisir des valeurs minimales pour ces données (généralement ces valeurs sont données par le fabricant d'outils).

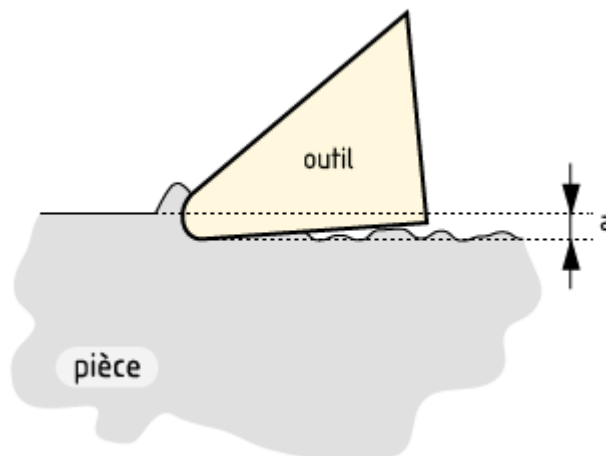


Fig. 2-20 Compression du métal.

2.4.2. Zones d'élaboration du copeau

Les différents essais de coupe ont permis de déterminer le mode de formation du copeau. On distingue 4 zones différentes participantes à la formation du copeau.

- **Zone 1** : zone de séparation du métal où l'arête de coupe (O) exerce un effort de compression en un point où le métal est séparé en deux parties : une partie constituant le copeau, l'autre partie constituant la surface usinée. La température de cette zone avoisine les 600°.

- **Zone 2** : zone de glissement plastique dite de formation du copeau limité par deux lignes : la ligne MN est le front où la limite élastique est atteinte, la ligne EH représente la fin de déformation plastique au cours de l'écoulement de la matière.
- **Zone 3** : zone de glissement à l'interface copeau face d'attaque de l'outil ; ce frottement de glissement est intense et génère une chaleur élevée (750°).
- **Zone 4** : zone de frottement de glissement à l'interface surface usinée par rapport à la face de dépouille. Ce frottement est beaucoup moins énergétique que pour la zone 3.

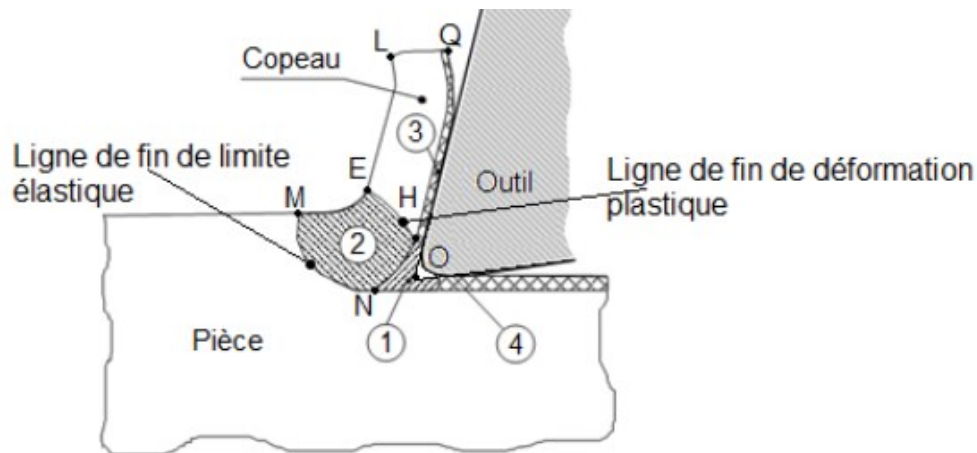


Fig. 2-21 Observation des zones en coupe.

2.4.3. Formes du copeau en usinage

La complexité du mécanisme de formation de copeau, ne nous permet pas de maîtriser complètement les résultats de la coupe en matière de forme et de nature du copeau obtenus. Les copeaux peuvent être classifiés en deux types distincts : continu, discontinu. Il existe aussi d'autres copeaux intermédiaires entre un copeau continu et un copeau discontinu et d'autres géométries.

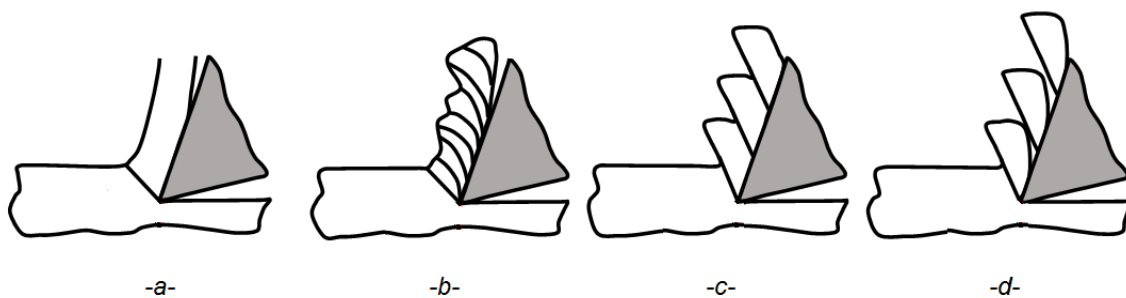


Fig. 2-22 Formes de copeau en coupe orthogonale : a) copeau continu, b) copeau ondulé, c) copeau segmenté, d) copeau fragmenté.

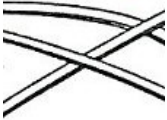
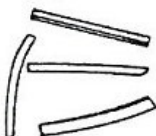
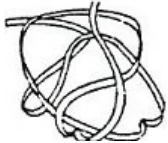





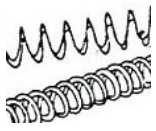







Les professionnels en coupe des métaux conseillent à un usinage produisant un copeau court qui se fragmente facilement, qui est très avantageux par son :

- Evacuation facile du copeau

- Pièce non rayée
- Meilleur état de surface
- Refroidissement de l'outil plus efficace
- Sécurité

et il faut éviter :

- Un copeau long et filant qui entraîne une réduction de durée de vie de l'outil, provoqué par un échauffement excessif, un écaillage, une arête rapportée, une rupture de l'arête.
- Un copeau très fragmenté favorise l'apparition de vibrations de la pièce avec état de surface rugueux.

Types de copeaux	Formes		
1 : Copeau ruban	11 : Long 	12 : Court 	13 : Enchevêtré 
2 : Copeau tubulaire	21 : Long 	22 : Court 	23 : Enchevêtré 
3 : Copeau spirale	31 : Plat 	32 : Conique 	
4 : Copeau hélicoïdal en rondelle	41 : Long 	42 : Court 	43 : Enchevêtré 
5 : Copeau hélicoïdal conique	51 : Long 	52 : Court 	53 : Enchevêtré 
6 : Copeau élémentaire	61 : Enchevêtré 	62 : Détaché 	



7 : Copeau aiguille			
8 : Copeau en arc			

Table 2-2 Classification des copeaux selon la norme NFE 66505.

2.5. Efforts de coupe

L'évaluation des efforts de coupe permet :

- de dimensionner les outils et les porte-pièce,
- de déterminer les appuis du montage, en opposition à ces efforts,
- d'évaluer la puissance de coupe afin de choisir la machine-outil

2.5.1. Les efforts de coupe en tournage

L'effort de coupe F_t exercé par la pièce sur l'outil admet trois composantes :

- F_c : effort tangentiel de coupe dû au mouvement de coupe.
- F_t : effort tangentiel d'avancement dû au mouvement d'avance.
- F_a : effort radial dû à la profondeur de passe.

La composante la plus importante est F_c . Cet effort s'exprime par la relation :

$$F_c = K_c \times a \times f$$

- F_c : effort tangentiel [daN]
- K_c : pression spécifique de coupe [daN/mm²].
- a : valeur de la profondeur de passe [mm].
- f : valeur de l'avance [mm/tr].

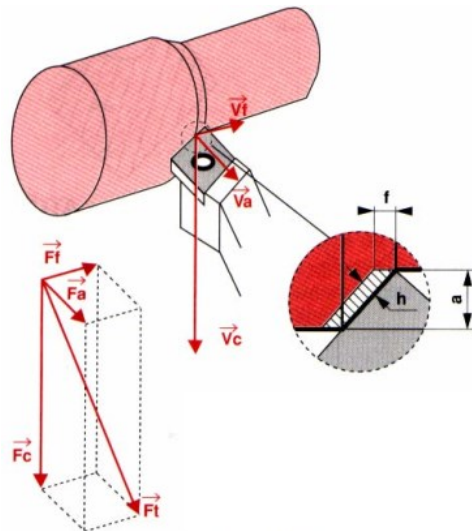


Fig. 2-23 Efforts de coupe en tournage.

2.5.2. Les efforts de coupe en fraisage

La situation des efforts est similaire à celle rencontrée lors du tournage. L'effort tangentiel de coupe s'exprime de la même manière. Cependant, la valeur du coefficient K_c dépend également de l'épaisseur du copeau. Étant donné que ce paramètre varie, la détermination de ce coefficient nécessite de calculer une épaisseur moyenne de copeau, h_m . Cette estimation suit les cinq étapes décrites ci-dessous.

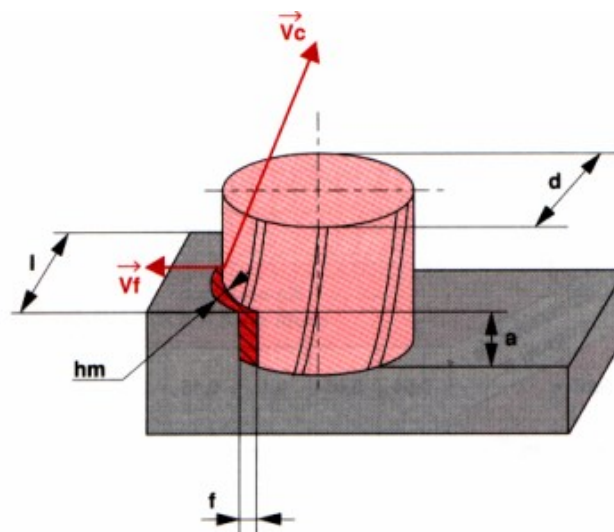


Fig. 2-24 Efforts de coupe en fraisage.

- **Étape 1** : Déterminer K_c par rapport à la matière à usiner, un abaque sous forme de tableau est utilisé pour déterminer les valeurs de K_c .
- **Étape 2** : Corriger la valeur calculée de K_c en fonction de l'angle de coupe γ . On applique une correction de 1,5% par degré de changement d'angle. Un angle de coupe plus grand (positif) donnera donc un K_c réduit et inversement.

- **Étape 3** : Déterminer la valeur de l'épaisseur moyenne de copeau, en fonction de l'avance par dent.
- **Étape 4** : Rechercher la valeur de correction fh en fonction de hm
- **Étape 5** : Calculer la valeur du coefficient spécifique de coupe pour l'opération considérée en appliquant la formule : $Kc = Kc_{provisoire} \times f \times h$

2.5.3. Les efforts de coupe : Perçage

La figure ci-dessous donne une représentation schématique de la situation des efforts s'exerçant sur chacune des arêtes. On observe que la résultante des efforts de coupe s'exerçant sur une arête de coupe admet trois composantes :

- \vec{f}_c : l'effort tangentiel de coupe,
- \vec{f}_p : l'effort de pénétration,
- \vec{f}_a : l'effort d'avance.

Pour le calcul de l'effort d'avance on utilise la relation :

$$Fa \approx k \times f \times d$$

avec

k un coefficient déterminé expérimentalement (voir le tableau suivant), f l'avance et d le diamètre du foret et le coefficient K est appelé coefficient spécifique de coupe en N/mm^2 .

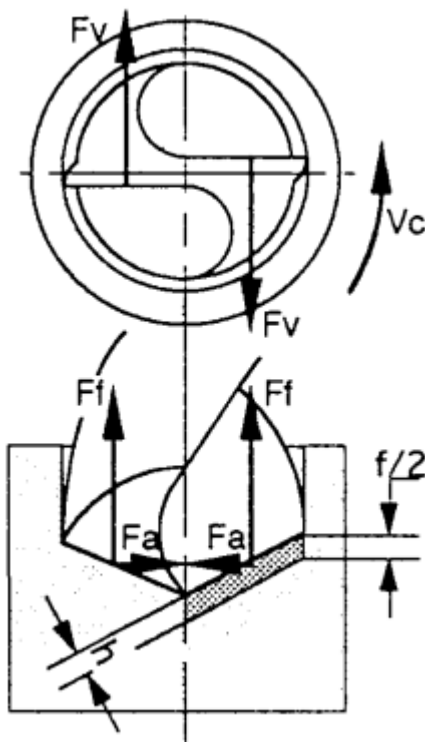


Fig. 2-25 Efforts de coupe en fraisage.

Matière	K	k
Aciers $R \leq 600$ MPa	11	1 000
Aciers $R > 600$ Mpa	11,5	1 200
Aciers inoxydables	15	1 300
Aciers au nickel-chrome	14	900
Aciers au chrome-molybdène	13	1 600
Fontes grises	8	700
Fontes GS	7,5	1 100
Laitons	3,5	800*
Alliages d'aluminium	5	850
Valeurs données à titre de première estimation		

Fig. 2-26 Coefficient K et k en perçage.

2.6. Echauffement (Température de coupe)

La formation du copeau génère une chaleur importante en raison du frottement entre le copeau et la face de coupe, ainsi que du frottement entre la pièce et la face de dépouille de l'outil. La température de coupe correspond à la valeur moyenne du champ thermique dans une zone fortement sollicitée, comme l'interface outil/copeau. La Fig. 2-27 illustre la répartition de la température sur la partie active de l'outil lors de l'usinage à sec d'un acier avec une vitesse de coupe de 60 m/min. Le gradient de température dans l'outil peut atteindre 700°C/mm. La dureté des matériaux de coupe diminue à des températures spécifiques : 500°C à 600°C pour les aciers rapides, 800°C à 900°C pour les carbures, et 1400°C pour les céramiques. Il est crucial de réduire la température de la partie active de l'outil pour éviter une perte de dureté.

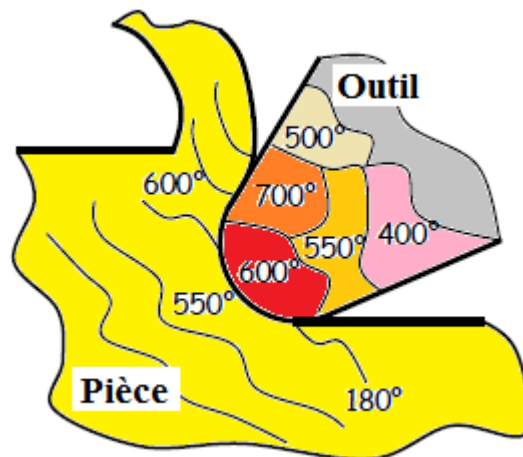


Fig. 2-27 Répartition de la température sur la partie active de l'outil.

L'élévation de la température de coupe a des effets néfastes tant sur l'outil de coupe que sur la pièce usinée.

Pour l'outil de coupe :

- Usure accélérée de l'outil, réduisant sa durée de vie.
- Déformation plastique des arêtes de coupe si le matériau de l'outil manque de dureté.
- Endommagement des arêtes de coupe en raison des chocs thermiques.

Pour la pièce usinée :

- Perte de précision dimensionnelle due à la plasticité du métal.
- Expansion et contraction pendant et après l'usinage.
- Endommagement de la surface par oxydation, corrosion rapide, et inflammation.

2.7. Endommagement des outils de coupe

Les frottements entre l'outil et la pièce, le contact avec les copeaux, les variations de température provoquent une usure de l'outil. La qualité des surfaces obtenues dépend

directement de cette usure. L'observation de l'usure sur la face en dépouille et sur la face de coupe permet de déterminer l'état limite de l'usure, donc de décider du changement d'outil.

Il existe deux types d'usure de l'outil :

- **Usure en cratère** produit par le frottement intense du copeau sur la face de coupe, ce qui entraîne une fragilité de l'arête. Lorsque l'usure a progressé jusqu'à l'arête secondaire, l'état de surface devient médiocre.
- **Usure en dépouille** produit par le frottement de la surface usinée sur la surface de dépouille de l'outil, ce qui influence directement la cote fabriquée, et l'état de surface.

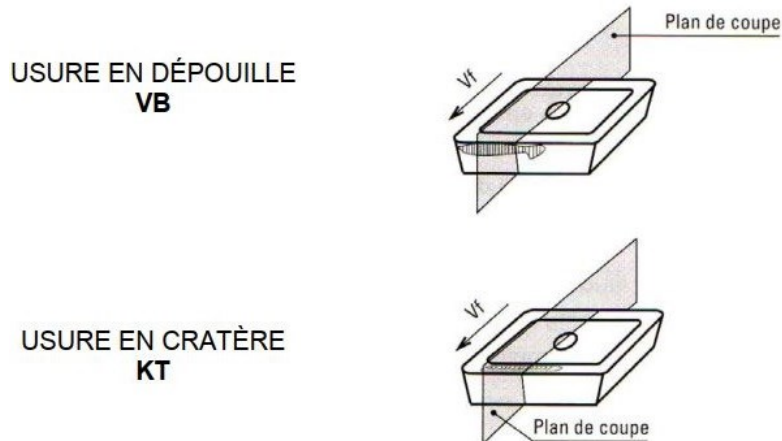
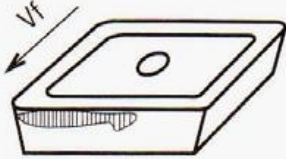
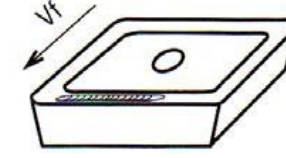
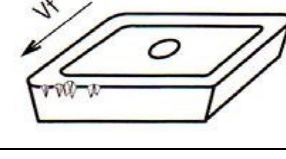



Fig. 2-28 Types d'usure de l'outil.

Défaut	Illustration	Causes	Remèdes
Usure en dépouille		- Vitesse de coupe trop élevée Résistance à l'usure insuffisante - Outil au-dessus du centre. Arrosage insuffisant.	- Réduire la vitesse de coupe - Choisir une nuance plus résistante. - Mettre l'outil au centre. - Utiliser l'arrosage.
Usure en cratère		- Conditions de coupe inadaptées. - Usure par diffusion due à une température trop importante sur la face de coupe.	- Réduire la vitesse de Coupe ou l'avance - Choisir une nuance plus résistante. - Choisir γ positif de l'outil.
Écaillage de l'arête		- Nuance trop fragile Mauvaise stabilité outil pièce Outil en dessous du centre. - Conditions de coupe mal choisies.	- Prendre une nuance tenace. - Améliorer la stabilité. - Mettre l'outil au centre. - Réduire l'avance au début de la coupe.
Arête rapportée Copeau adhérent		- V_c trop faible - Géométrie de l'outil inadaptée à la matière usinée. - Avance inadaptée.	- Augmenter V_c . - Utiliser un brise-copeau. - Augmenter l'avance.


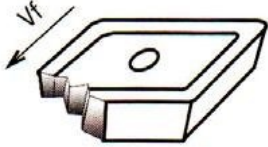
<p>Brûlage de l'arête</p>	 <p>Acier rapide</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Conditions de coupe inadaptées. - Géométrie de l'outil inadaptée à la matière coupée - - Arrosage insuffisant. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuer la vitesse de coupe, - Rayon de bec trop petit. - Vérifier l'arrosage.
<p>Bris de l'outil</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Conditions de coupe inadaptées. - Chocs, mauvais bridage. Défaut dans la pièce. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier toutes les conditions d'usinage. - Prendre une nuance tenace.

Table 2-3 Principaux usure observées dans un outil de coupe.

2.7.1. Evacuation des copeaux

Lors de l'usinage des matériaux ductiles, le copeau a tendance à être long. Si ces copeaux ne sont pas évacués, l'outil risque de se détériorer rapidement. Les fabricants conçoivent des brise-copeaux frittés dans les plaquettes.



Fig. 2-29 Type de plaquette.

2.8. Méthodologie de choix des paramètres de coupe

2.8.1. Les critères de choix

Plusieurs critères permettent de définir les paramètres de la coupe :

- le type de machine (tour, fraiseuse, perceuse) et sa puissance,
- la matière usinée (acier, aluminium, etc.),
- la matière de l'outil (ARS, carbure métallique,...),

le type d'opération (chariotage, dressage, ébauche, finition, surfaçage, perçage, etc...).

L'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela il faut déterminer certains paramètres spécifiques, notamment :

- La vitesse de coupe V_c ,
- La vitesse d'avance V_f ,
- La profondeur de passe ap .

2.8.2. Les paramètres de coupe

2.8.3. La vitesse de coupe

La **vitesse de coupe** V_c [m/min] représente l'espace parcouru (en mètres) par l'extrémité d'une dent de l'outil en une minute. Ce paramètre a une influence directe sur la durée de vie des outils, il varie :

- avec le type de matière à usiner et le matériau de l'outil,
- selon la nature de l'opération (ébauche ou finition),
- fonction des conditions de lubrification (travail à sec ou lubrifié).

Les valeurs usuelles des vitesses de coupe en fonction de la matière à usiner et de la matière de l'outil, sont données dans des abaques.

2.8.4. La fréquence de rotation (N)

La vitesse de coupe étant donnée, il convient de déterminer maintenant le paramètre fréquence de rotation N qui sera utilisée pour le mouvement de coupe. La **fréquence de rotation** N [tour/min] se calcule par la formule suivante :

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D}$$

où D [mm] représente le diamètre de la pièce à usiner (en tournage) ou le diamètre de la fraise/du foret (en fraisage/perçage). A l'aide des tableaux indiquant les fréquences de rotation disponibles sur les machines-outils, on choisit les valeurs les plus proches de celles calculées.

2.8.5. L'avance f ou f_z

L'avance f ou f_z [mm/tour] s'exprime par le déplacement de la pièce (en fraisage) ou de l'outil (en tournage) pour :

- une dent ; c'est l'avance par dent (f_z) utilisée en fraisage,
- un tour ; c'est l'avance par tour (f) utilisée en tournage.

L'avance détermine principalement la rugosité de la surface. Elle est prise plus grande en ébauche qu'en finition, les valeurs des avances, fonctions des états de surfaces désirées, sont également données par des abaques.

2.8.6. La vitesse d'avance

La **vitesse d'avance [mm/min]** c'est la vitesse de translation de la pièce/outil qui sera affichée sur la machine. Ce paramètre se calcule par la formule suivante :

$$Vf = fz \times Z \times N$$

avec Z qui représente le nombre de dents de la fraise et N la fréquence de rotation calculée à l'aide de la vitesse de coupe Vc . Ce paramètre s'utilise seulement en fraisage car en tournage les déplacements sont affichés directement par le paramètre f (mm/tour).

2.8.7. La profondeur de passe

Le paramètre **profondeur de passe (ap)** dépend de la surépaisseur de matière à usiner ainsi que de la nature de l'opération (ébauche ou finition). Elle tend à diminuer lorsque les exigences dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface deviennent plus rigoureuses. La valeur de la profondeur de passe ne doit cependant être inférieure au copeau minimum. Sa valeur maximale est limitée par la rigidité de l'outil et par la puissance de la machine.

3. TECHNOLOGIES DES MACHINES-OUTILS

3.1. Mouvements de coupe

Dans l'usinage par outil coupant celui-ci est animé d'un mouvement adapté à la forme recherchée. La génération concerne l'ensemble des données géométriques permettant d'obtenir une surface usinée. Tout usinage est caractérisé par :

- un mouvement relatif entre la pièce et l'outil, résultant de la composition de deux mouvements principaux, communiqués à la pièce ou à l'outil. Il s'agit d'un mouvement de coupe rapide (noté Mc) et d'un mouvement d'avance lent (noté Mf). Ces mouvements qui peuvent être des translations, des rotations indépendantes ou conjuguées (mouvement hélicoïdal par exemple) ;
- la forme de la partie active de l'outil (point, ligne droite ou courbe) ;
- les conditions de coupe permettant d'optimiser la productivité de l'ensemble machine/outil/pièce.

La génération des surfaces peut être faite selon deux modalités distinctes (parfois de façon mixte) :

- travail de forme
- travail d'enveloppe

3.1.1. Le travail de forme

Dans le premier cas, c'est la **forme de l'arête tranchante** de l'outil qui détermine la surface. Cette technique a pour avantage de pouvoir obtenir des géométries complexes. Cependant, elle nécessite toutefois des efforts de coupe importants et reproduit également les défauts de l'arête de l'outil.

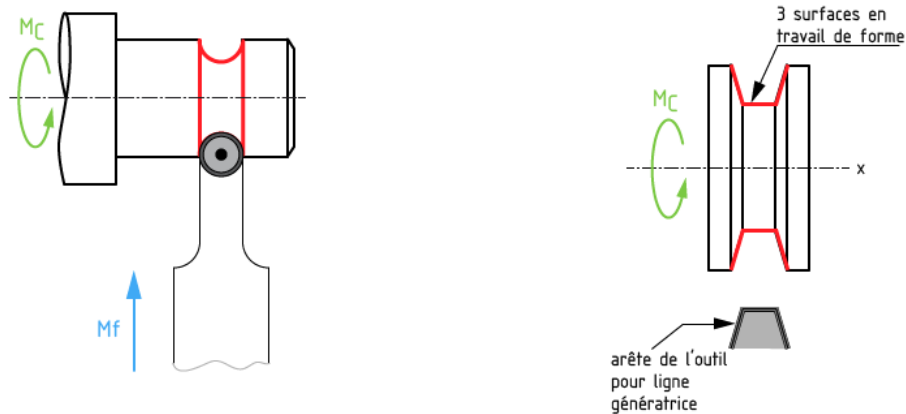


Fig. 3-1 Le travail de forme usinage d'une gorge.

3.1.2. Le travail d'enveloppe

Avec le travail d'enveloppe, ce n'est pas la forme des outils qui définit la surface, mais la **conjonction des mouvements de coupe et d'avance**. La qualité de la surface ainsi usinée dépend donc de la précision de la machine.

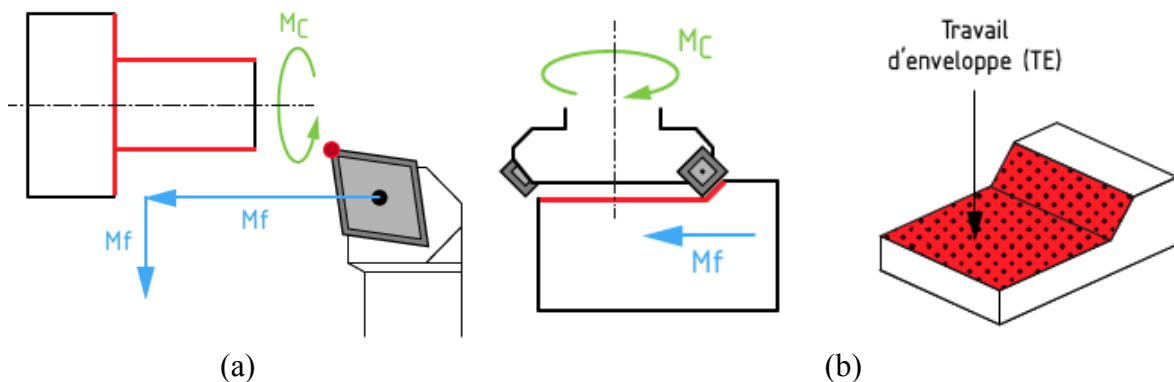


Fig. 3-2 Le travail d'enveloppe (a) chariotage d'un cylindre (b) fraisage d'une surface plane.

L'usinage par enlèvement de copeaux se fait par opérations ou groupes d'opérations. Les principales techniques d'usinage traditionnel sont respectivement :

- le tournage,
- le fraisage,
- le perçage-alésage,
- le filetage-taroudage,
- la rectification,
- Raboteuse et étau limeur,
- Mortaiseuse,
- Tailleuse d'engrenage.

3.1.3. Le tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière qui met en jeu un outil à arête unique, ce dernier est animé d'un mouvement de translation rectiligne appelé mouvement d'avance (**MA**), permettant de définir le profil de la pièce. La pièce est animée d'un

mouvement de rotation dit mouvement de coupe (*MC*), qui est le mouvement principal de ce procédé (Fig. 3-3).

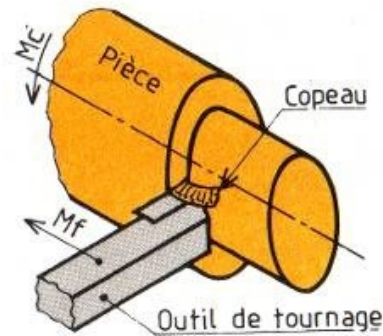


Fig. 3-3 Mouvements de coupe et d'avance en tournage.

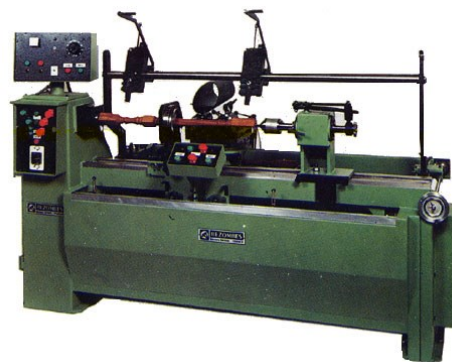
Le tournage concerne l'ensemble des opérations réalisées sur des tours. On réalise par ce type d'usinage toutes les surfaces de révolution, y compris les plans.. On distingue deux classes distinctes d'opérations, les opérations de tournage extérieur et les opérations de tournage intérieur.

3.1.3.1. Les Machines de tournage

Les machines-outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont :



Tour parallèle : le tour parallèle a un axe horizontal.



Tour à copier : Machine-outil pour reproduire de petites surfaces.



Tour frontal : le tour frontal est une machine-outil pour l'usinage de pièces dont le diamètre est très important par rapport à leur longueur.



Tour vertical : le tour vertical est fait pour remédier aux inconvénients des pièces lourdes et très encombrantes ne pouvant être usinées sur un tour frontal.

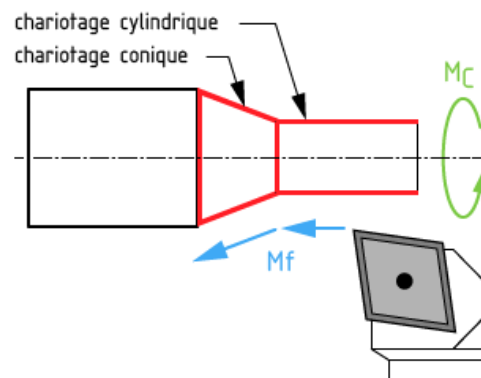
3.1.3.2. Principales opérations de tournage

Le tournage est un procédé d'usinage fondé sur l'utilisation d'un tour. Les usinages sont réalisés à partir de la combinaison de 2 mouvements :

- un mouvement de rotation de la pièce appelé mouvement de coupe (M_c). Il s'exprime en (tr/min) : c'est la fréquence de rotation (N).
- un déplacement rectiligne de l'outil appelé mouvement d'avance (M_f). Il s'exprime en (mm/min) : c'est la vitesse d'avance.

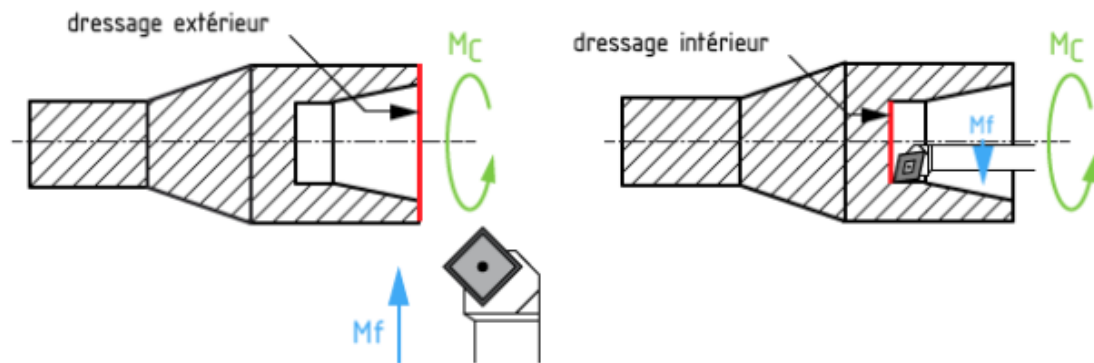
(1) Le chariotage

Le **chariotage** est l'opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.



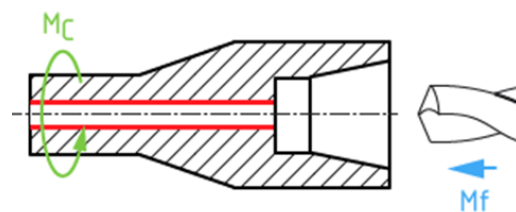
(2) Le dressage

Le **dressage** est l'opération qui consiste à usiner une surface plane (extérieure ou intérieure) perpendiculaire à l'axe de la broche.



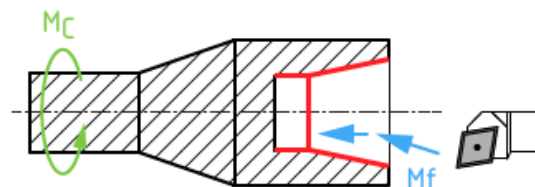
(3) Le perçage

Le **perçage** est l'opération qui consiste à usiner un trou dans la pièce (débouchant ou borgne) à l'aide d'un forêt. Souvent, l'axe du trou est confondu avec celui de la pièce.



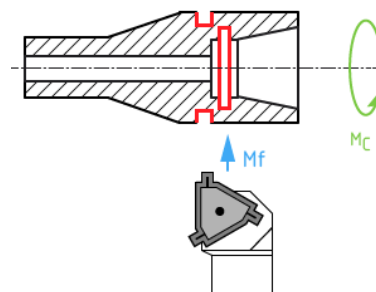
(4) L'alésage

L'**alésage** est l'opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique de qualité à l'intérieur d'une pièce.



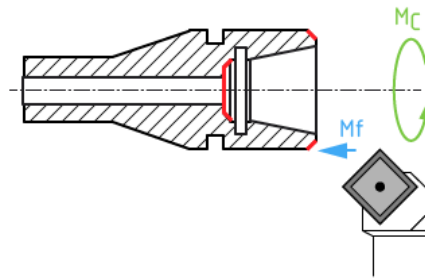
(5) Le rainurage

Le **rainurage** est l'opération qui consiste à usiner une rainure (association de 3 plans) intérieure ou extérieure. Celle-ci peut servir par exemple pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique.



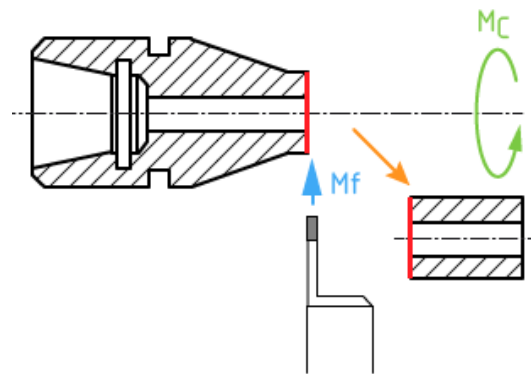
(6) Le chanfreinage

Le **chanfreinage** est l'opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension, de façon à supprimer un angle vif.



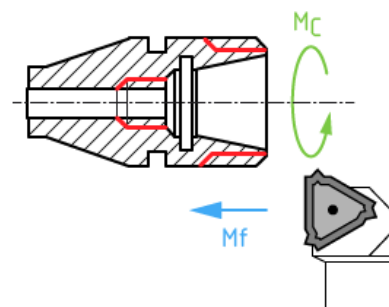
(7) Le tronçonnage

Le **tronçonnage** est l'opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin de détacher un tronçon.



(8) Le filetage

Le **filetage** est l'usinage consistant à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.



(9) L'épaulement

L'**épaulement** est l'association d'un chariotage et d'un dressage.

(10) Le profilage

Le **profilage** est la réalisation de surfaces quelconques par l'association de surfaces cylindriques, planes, coniques, sphériques, etc...

3.1.3.3. Les outils de tournage

Le nom des outils utilisés pour les différentes opérations sont liés à leur fonctions (ex : outil à charioter). Notons, toutefois, que certains outils conviennent pour plusieurs fonctions différentes. Enfin, les outils peuvent être à gauche ou à droite. En fonction de la profondeur de passe on distingue :

- **l'ébauche** : permet d'enlever un maximum de matière en un minimum de temps. Un outil d'ébauche doit supporter des efforts de coupe importants.

- **la finition** : est le dernier usinage d'une surface, elle permet d'obtenir une très bonne qualité (rugosité) sur les surfaces usinées.

Il est important de noter que :

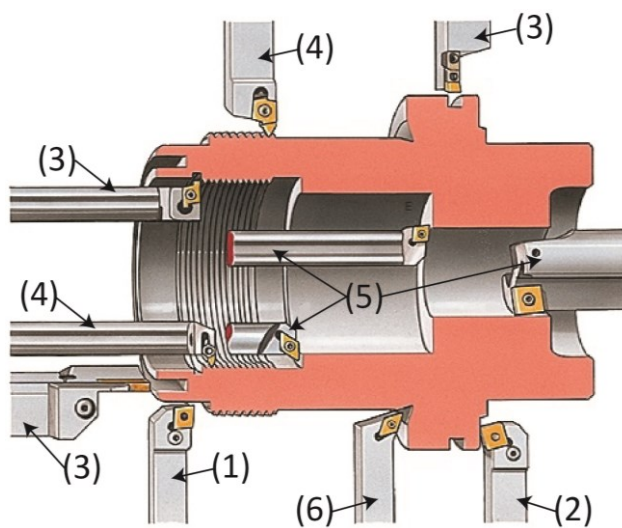
L'arrête de coupe

- Renseigne sur le sens d'utilisation de l'outil
- Renseigne sur la profondeur de passe maximum possible
- Profondeur de passe \leq Longueur d'arrête
- Profondeur de passe maxi = Longueur d'arrête

Le rayon de bec

- Renseigne sur la qualité de l'état de surface que l'on va obtenir (rugosité)
- Renseigne sur la profondeur de passe minimum possible
- Profondeur de passe \geq Rayon de bec
- Profondeur de passe mini = Rayon de bec

Pour la réalisation des diverses opérations de tournage, on dispose des outils suivants :



- 1- outils à charioter
- 2- outils à dresser
- 3- outils à rainurer
- 4- outils à fileter
- 5- outils à aléser-dresser
- 6- Usinage de forme...

Fig. 3-4 Outils de tournage

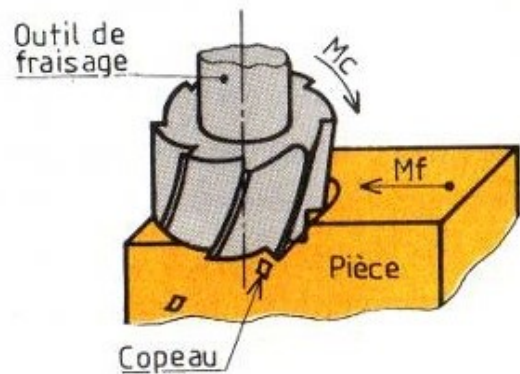
La partie active qui peut être taillée directement dans le corps (Fig. 3-5a) ou bien ramenée sous forme de plaquettes (Fig. 3-5b).



Fig. 3-5 Outils de coupe (a) en acier rapide supérieur (ARS), (b) a plaquette en carbure.

3.1.4. Le fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisé au moyen d'un outil qui porte plusieurs arêtes de coupe, ce dernier est animé d'un mouvement de rotation. Le mouvement de rotation de la fraise entraîné par la broche de la machine est dit mouvement de coupe Mc . La pièce qui est fixée sur la table de la machine à un mouvement de translation rectiligne dit mouvement d'avance Ma .



3.1.4.1. Classification des fraiseuses

(1) Fraiseuse universelle

La machine de base est une fraiseuse à axe horizontal dont la table est orientable ; les mouvements d'avance sont donnés à la table ; l'arbre porte-fraise est animé du mouvement de rotation uniquement. Elle permet en principe l'exécution de toutes les opérations courantes : son universalité est due surtout à la possibilité de la convertir en fraiseuse horizontale ou verticale et de pouvoir assurer l'entraînement des appareils diviseurs.



(2) Fraiseuse verticale

Ce qui différencie le plus cette dernière de la précédente, c'est que elle n'est pas conçue pour recevoir des organes de conversion ; la tête ne peut être démontée mais elle est orientable dans un plan. Elle est surtout employée pour exécuter des surfacages, rainures et épaulements avec des capacités de coupe bien supérieures, comparé à une machine tête universelle.



(3) Fraiseuse horizontale

Trois mouvements d'avance de la table porte-pièce ; la table n'est pas orientable. La machine est rarement commercialisée sous cette forme. Les constructeurs prévoient dans la plupart des cas la possibilité d'y adapter des accessoires - tête universelle - tête verticale. Elle est souvent cataloguée comme fraiseuse universelle.



3.1.4.2. Mode de fraisage

Les principales méthodes de fraisage pratiquées sont :

- le fraisage de profil ;
- le fraisage en bout ;
- le fraisage combiné (en bout et de profil).

(1) Le fraisage de profil

Pour ce type d'usinage la surface à réaliser est parallèle à l'axe de la fraise. On peut travailler respectivement avec :

- **Le fraisage en opposition**

Il y a travail en opposition lorsque la projection de l'effort de l'outil sur la pièce ($R_{o/p}$) est en sens contraire à la direction du mouvement d'avance. Le mouvement de coupe donné à l'outil est donc l'inverse du mouvement d'avance donné à la pièce. L'attaque d'une dent se fait avec une épaisseur de copeau nulle (voir figure ci-après) et sur une matière écrouie « *L'écrouissage d'un métal est le durcissement d'un métal ductile sous l'effet de sa déformation plastique* » par le passage de la dent précédente. Chaque dent glisse sur la pièce et ne peut tailler le métal que

lorsque celui-ci atteint l'épaisseur du copeau minimum. Le résultat est un rendement peu élevé, l'usure prématurée de l'outil et l'écaillage de la pièce. Le fraisage en opposition est donc une opération qui est à éviter pour les matériaux très écaillables.

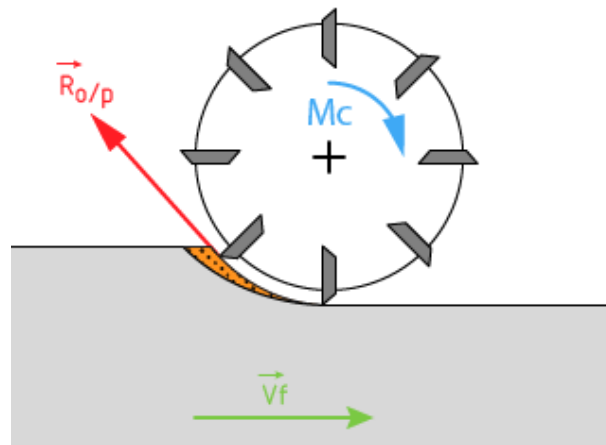


Fig. 3-6 Fraisage en roulant : travail en opposition.

- **Le fraisage en avalant ou en concordance**

Il y a travail en concordance lorsque la projection de l'effort de l'outil sur la pièce sur la direction du mouvement d'avance est dans le même sens que ce dernier. Le mouvement de coupe et le mouvement d'avance ont donc le même sens. La dent attaque une épaisseur de copeau maxi et sur une surface non-écrouie. Chaque dent de la fraise coupe un copeau maximum en début de l'attaque. Lorsque la dent quitte la pièce, le copeau, devenu inférieur au copeau minimum, est détaché presque sans pression. Les efforts de coupe plaquent la pièce sur le montage. Le résultat de ce type d'usinage est un état de surface amélioré par rapport au fraisage en opposition, mais il est nécessaire d'employer des machines avec un dispositif de transmission de mouvement sans jeu.

C'est une opération à conseiller pour les matériaux très écaillables, pour les pièces minces et difficiles à brider. Le fraisage en avalant est à éviter sur les machines-outils sans rattrapage de jeu.

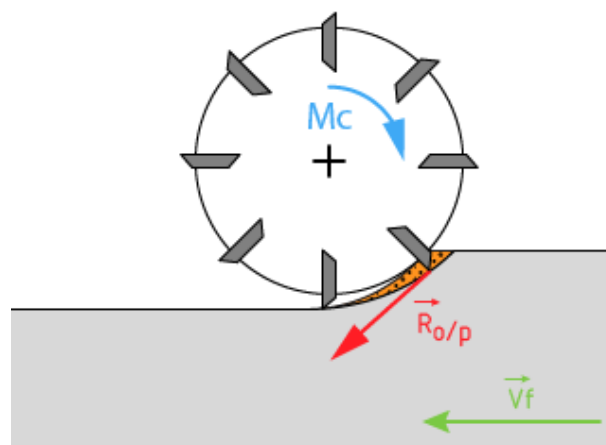


Fig. 3-7 Fraisage en roulant : en avalant ou en concordance.

3.1.4.3. Le fraisage en bout (fraisage de face)

Pour ce type d'usinage la surface à réaliser est perpendiculaire à l'axe de la fraise.

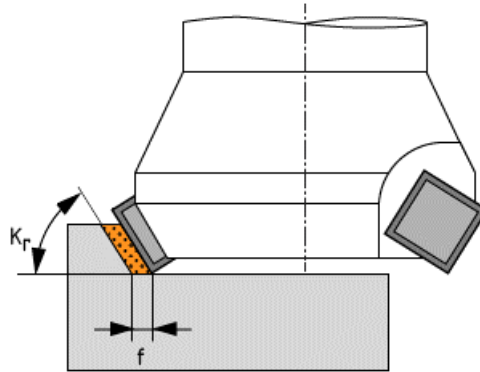
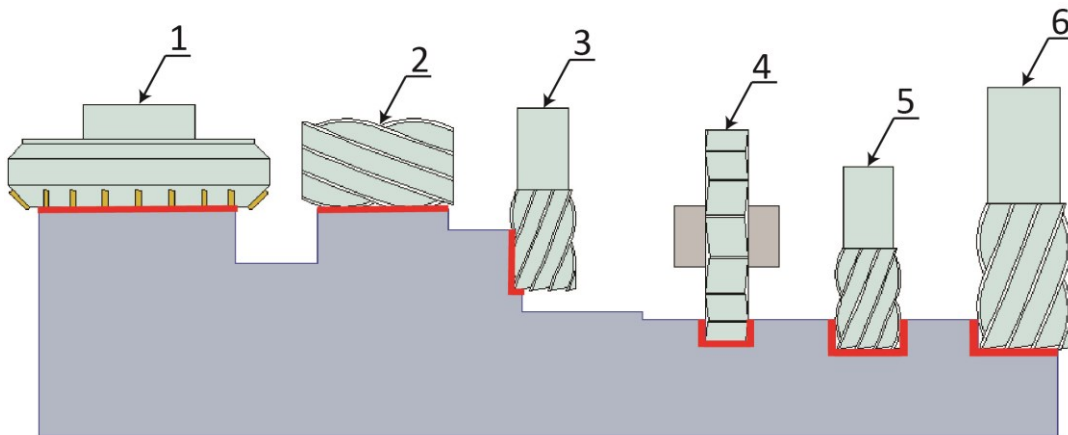


Fig. 3-8 Le fraisage en bout.

La surface obtenue est généralement d'une précision géométrique meilleure que celle obtenue en fraisage de profil.

3.1.4.4. Principales opérations du fraisage

Les principales opérations du fraisage sont :



1- Surfaçage en bout : fraise à surfaçer 2- Surfaçage horizontal : fraise rouleau 3- Fraisage combiné prédominance en roulant : fraise en bout 4- Rainurage en roulant : fraise trois tailles 5- Rainurage en bout : fraise en bout 6- Fraisage combiné prédominance en bout : fraise en bout

Fig. 3-9 Principales opérations du fraisage.

3.1.4.5. Les outils de fraisage

Une fraise a la forme d'un solide de révolution portant plusieurs outils élémentaires (dents) répartis sur la périphérie. En fraisage l'outil de coupe procède des arêtes multiples. La fraise peut être un outil monobloc en acier rapide supérieur (Fig. 3-10a). Lorsqu'un

outil de cette nature est usé, il peut être affuté. Les parties actives de la fraise peuvent aussi être en carbure métallique (Fig. 3-10b). On parle alors de plaquettes qui sont positionnées et fixées sur le corps porte plaquettes. Une plaquette comporte en général plusieurs arêtes de coupe. Lorsque toutes les arêtes sont usées, la plaquette est jetée. La fixation de la fraise est assurée par une vis de blocage.

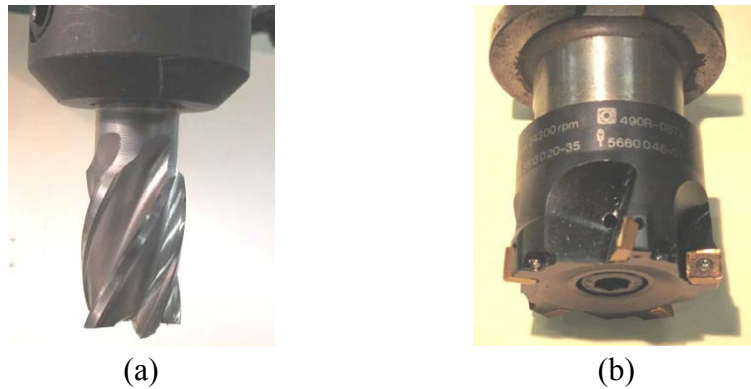
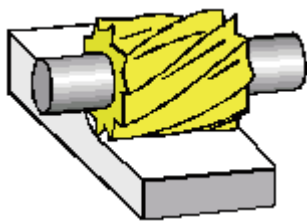


Fig. 3-10 Types de fraises (a) fraise en acier rapide (b) fraise avec plaquettes en carbure métalliques.

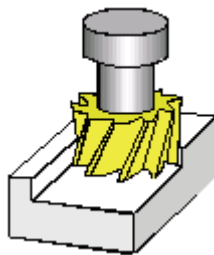
(1) Les fraises

Il existe plusieurs types de fraises pour effectuer les différentes opérations du fraisage :

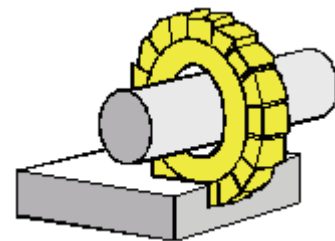
- La fraise 1 taille ne coupe que sur sa périphérie, c'est une fraise scie.
- La fraise 2 tailles coupe sur sa périphérie : en roulant mais également en bout.
- La fraise 3 tailles coupe sur sa périphérie, en bout mais également en tirant.



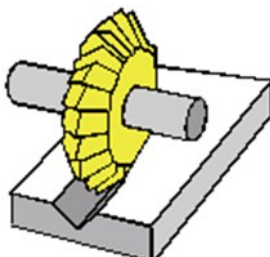
Fraise rouleau 1 taille
Surfaces planes



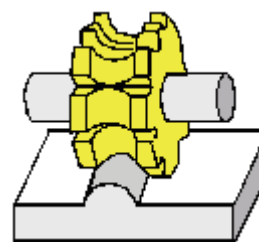
Fraise cylindrique à 2 tailles
Surface plane et angles



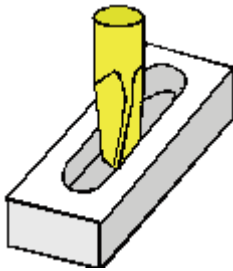
Fraise 3 tailles
Dentures alternées
Gorges, rainure



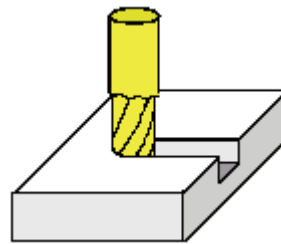
Fraise biconique
Guides en prisme



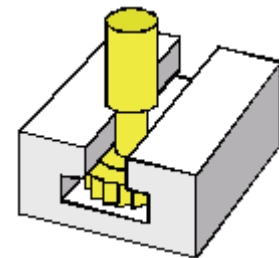
Fraise de profil
circulaire concave

Fraise à queue

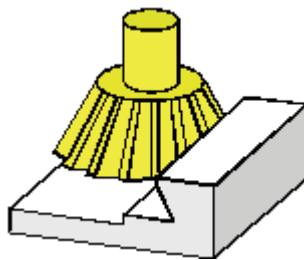
Fraise à gorges
Rainures et poches



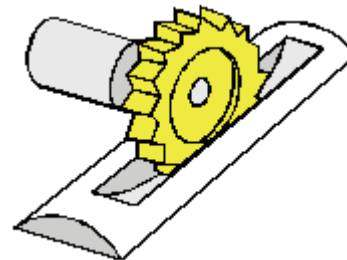
Fraise à rainurer
Rainures profondes et contours



Fraise en T
Rainures en T



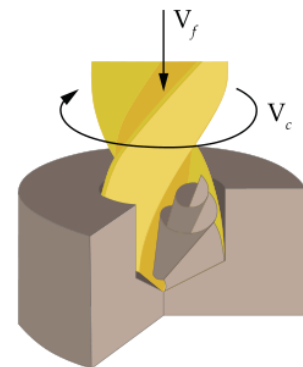
Fraise conique 2 tailles
Guides en angle



Fraise 1 taille
Rainures de clavette

3.1.5. Le perçage

Le terme perçage s'applique à l'ensemble des opérations permettant la réalisation de trous cylindriques débouchant ou borgnes. On peut réaliser aussi des trous coniques, mais cette opération est moins courante. Ce procédé utilise une combinaison un mouvement rotatif et un mouvement d'avance linéaire.



3.1.5.1. Types de perceuses

La perceuse est la machine qui a été conçue pour réaliser un perçage, mais le tour ou encore la fraiseuse, peuvent réaliser cette opération d'usinage. On peut classer les perceuses selon plusieurs types :

- La perceuses à colonne permet des perçages verticaux précis et importants. La petite table coulisse et pivote le long de la colonne supportant le moteur. Un mandrin ordinaire ou des forets à queue conique peut coulisser verticalement lorsque l'opérateur manœuvre un volant.

- La perceuse sensitive y ajoute la capacité à élever et à descendre le bras qui contient le moteur et le mandrin.
- La perceuses radiale est une machine à percer de grande dimension dans laquelle la position de la tête de perçage peut être réglée radialement le long d'un bras horizontal rigide, articulé sur une colonne.

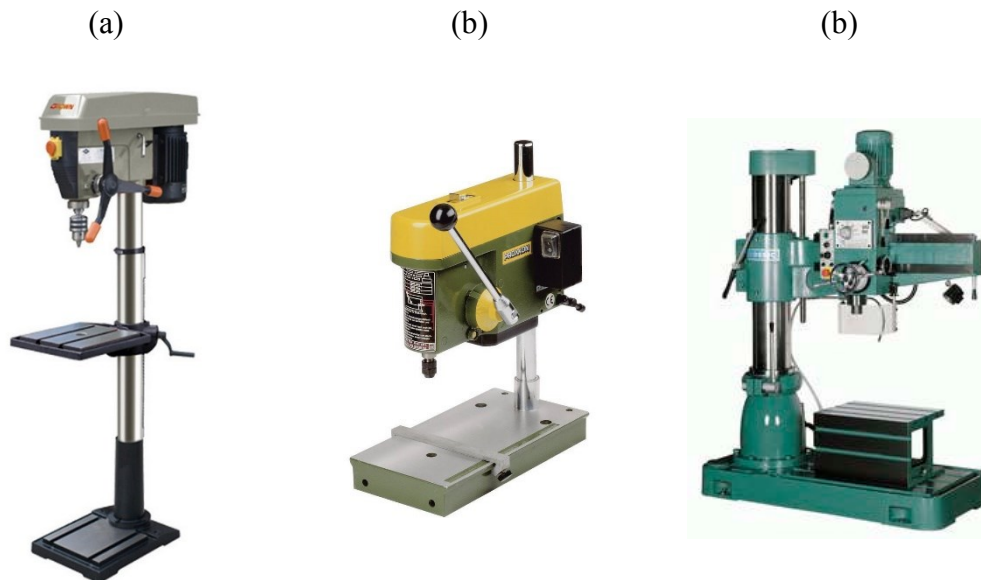


Fig. 3-11 Types de perceuses (a) à colonne (b) sensitive d'établi (c) radiale.

3.1.5.2. Outils de coupe

(1) Foret hélicoïdal

Le foret hélicoïdal est un outil de coupe à lèvres en bout, et qui sert à pratiquer des trous dans la plupart des matières. Il est constitué de trois parties : le corps, la pointe, et la queue (Fig. 3-12).

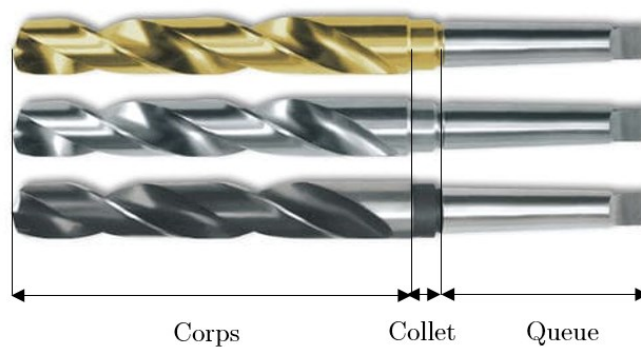


Fig. 3-12 Foret hélicoïdal.

Le foret hélicoïdal (illustré sur la figure suivante) comprend généralement :

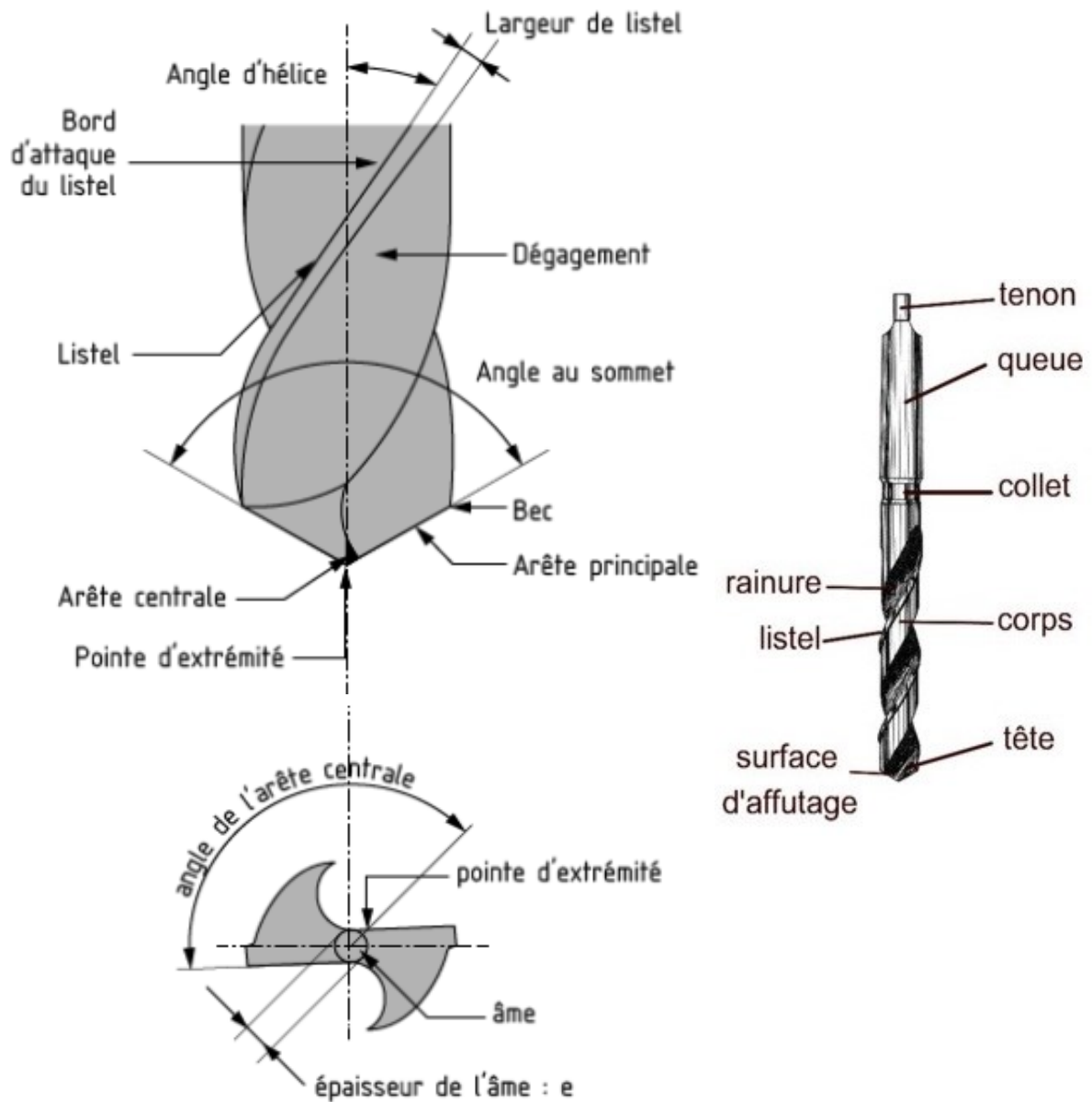


Fig. 3-13 Le foret hélicoïdal.

(2) Foret à plaquette

Les forets à plaquettes servent au perçage de trous de grand diamètre (Fig. 3-14). Ils peuvent être utilisés à une vitesse bien plus importante que les forets monoblocs hélicoïdaux et sur une plus grande variété de matières.



Fig. 3-14 Foret à plaquette.

3.1.5.3. Outils de perçage

<p>Foret à center Situer l'axe d'une pièce en tournage</p> 	<p>Foret à pointer Positionner un perçage</p> 	<p>Foret Perçer des trous</p> 	<p>Alésoir Finition d'un trou de bonne qualité</p> 	<p>Fraise à lamer Aplanir une surface afin d'y asseoir la tête de la vis</p> 
---	--	--	---	---

3.1.5.4. Opérations de perçage

Trou débouchant



Trou borgne



Chanfreinage



Lamage



Fraisurage



Centrage



3.1.6. La réalisation des formes filetées et taraudées

Le filetage on désigne des opérations permettant de générer des profils hélicoïdaux à l'aide d'un outil de tournage. On distingue des filetages intérieurs et extérieurs.

Le terme de taraudage est habituellement réservé aux filetages intérieurs obtenus à l'aide d'un outil monobloc à arêtes de coupe multiples, appelé taraud.

3.1.6.1. Les procédés de filetage

(1) Le filetage à l'outil

Le tour parallèle permet l'exécution des divers filetages. L'outil à fileter a un profil conforme à la section du filet et sa partie active engendre un filetage de section déterminée suivant un plan axial. L'arête de l'outil épouse le contour totalement ou par fractions successives.

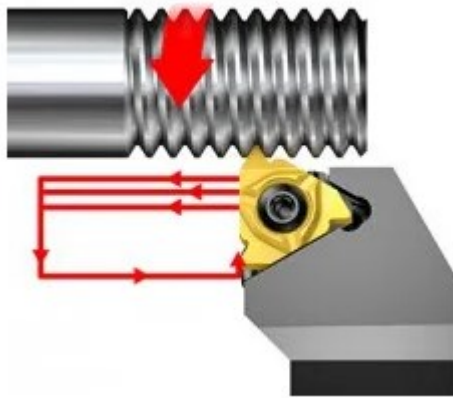


Fig. 3-15 Filetage à l'outil sur tour.

(2) Le filetage à la filière

La filière est un outil qui réalise un filetage externe sur une tige (en métal, en plastique, en bois, etc.) : c'est-à-dire qu'elle forme un ou plusieurs filets hélicoïdaux sur la surface externe de la tige qui devient par conséquent une tige filetée. Elle s'utilise avec un porte-filière.



Fig. 3-16 Filetage par filière.

(3) Le filetage à la fraise

Ce type d'usinage permet de répartir l'usure de l'outil sur plusieurs arêtes tranchantes. Les outils sont des fraises à profil constant.

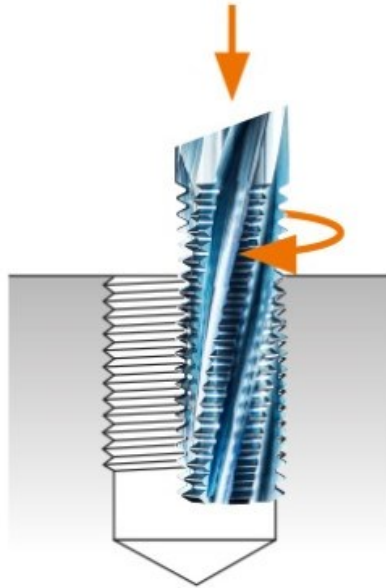


Fig. 3-17 Le filetage à la fraise.

(4) Le taraudage

Le taraudage est une action d'usinage par enlèvement de matière qui consiste à réaliser des filets dans un trou préalablement calibré. Les outils utilisés sont appelés tarauds. Ils sont en général en jeu de trois comme l'illustre l'image ci-dessous :



Ebaucheur



Demi-finisser



Finisseur

Fig. 3-18 Outil de taraudage.

L'ébaucheur enlève peu de matière, le demi-finiisseur un peu plus et le finisseur assure une finition correcte. On peut remarquer que la différence est dans la forme du départ de l'outil.

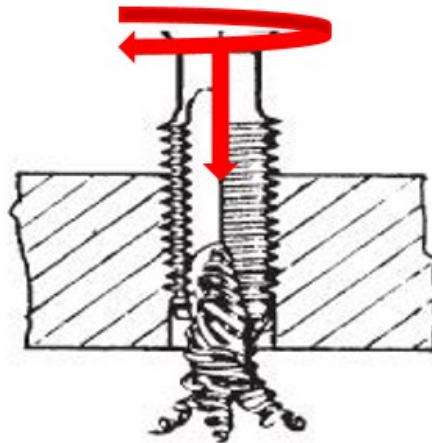


Fig. 3-19 Le filetage avec des tarauds.

Pour l'usinage il nous faudra un outil appelé tourne à gauche pour utiliser les tarauds :



Fig. 3-20 Un tourne à gauche.

3.1.7. Rectification

La rectification d'une pièce mécanique est une opération destinée à améliorer son état de surface. Cette opération se fait généralement à grande vitesse sur une machine appelée rectifieuse, où le copeau est de très petite section, il n'est pas tranché, mais gratté. Les deux techniques principales sont la rectification plane et la rectification cylindrique.

3.1.7.1. Rectification plane

Elle consiste en un meulage horizontal de la pièce de façon à éliminer à plusieurs reprises des couches de matériau allant de 10 à 40 micromètres (0,01 à 0,04 mm). Ici, la pièce effectue un mouvement de va-et-vient longitudinal.

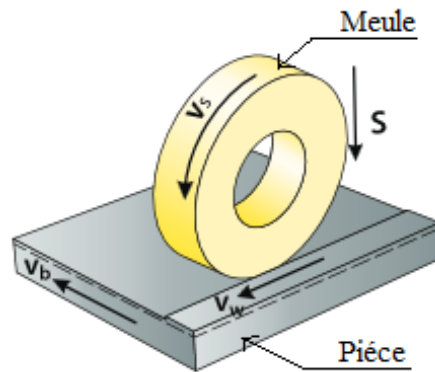


Fig. 3-21 La rectification plane.

3.1.7.2. Rectification cylindrique

La rectification cylindrique peut se faire de l'extérieur ou de l'intérieur d'un cylindre (Fig. 3-22a et b). Ici, la pièce est déplacée le long de la meule par l'avance longitudinale du banc. Sur les pièces qui sont cylindriques de bout en bout, il est conseillé de déplacer la meule à chaque passe jusqu'à ce qu'elle dépasse complètement la pièce pour éviter que le diamètre en bout soit plus grand.

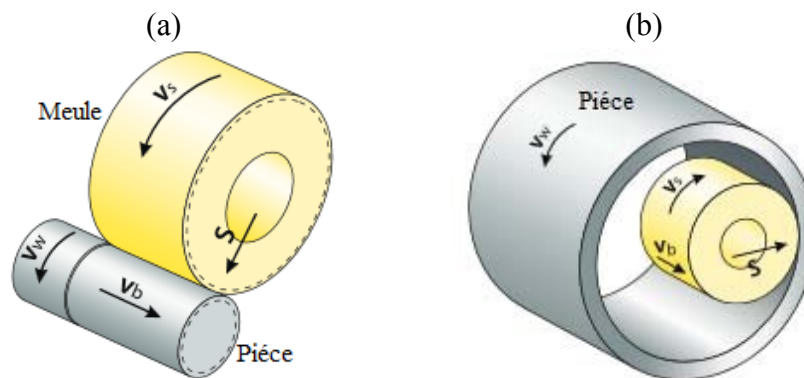


Fig. 3-22 Rectification cylindrique (a) extérieure (b) intérieure.

3.1.8. Raboteuses et étau limeur

La raboteuse métal est une machine conçue pour l'usinage de pièces lourdes et des grandes dimensions, essentiellement basé sur la génération de surfaces planes. Les pièces de faibles encombrements sont usinées sur des machines dites étaux limeurs.



Fig. 3-23 Raboteuses.



Fig. 3-24 Etau limeur.

3.1.8.1. Mouvement de coupe

Le mouvement de coupe est donné à la table qui porte la pièce. Cette dernière est animée d'un mouvement rectiligne (longitudinal) alternatif. La course aller est la course active ; le retour est la course à vide.

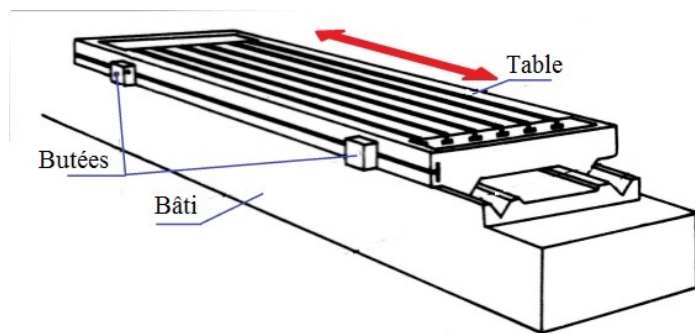
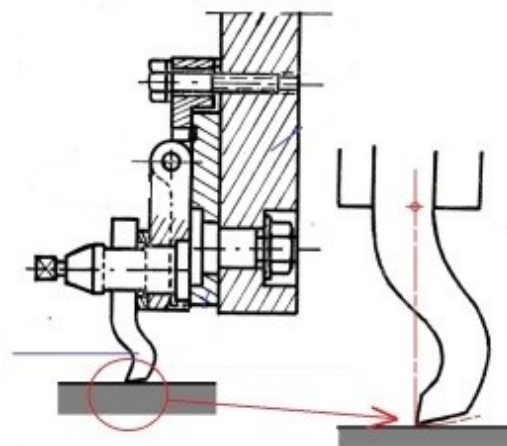


Table de raboteuse

3.1.8.2. Mouvement d'avance

Les mouvements d'avance des chariots porte-outil sont automatiques à commandes vis-écrou mues par des moteurs électriques et boîte de vitesses. Des sorties pour les commandes manuelles sont prévues pour positionner les outils par rapport à la pièce.



Support et position de l'outil.

Remarque

L'étau limeur est une machine à raboter mais travaillant à l'inverse d'une raboteuse, dans le sens que la pièce reste immobile pendant la passe alors que l'outil effectue le mouvement de coupe rectiligne.

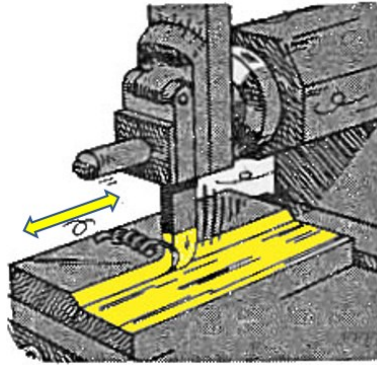


Fig. 3-25 Etau limeur.

3.1.9. Mortaiseuse

Le mortaisage est un processus d'usinage qui consiste à réaliser des cavités rectangulaires ou des encoches sur une pièce métallique.



Fig. 3-26 Une mortaiseuse.

3.1.9.1. Mouvement de coupe

L'outil de coupe descend verticalement pour entamer la matière. Le mouvement peut être contrôlé manuellement ou automatiquement, selon le type de machine. Une fois la coupe initiée, l'outil de coupe avance progressivement pour creuser la cavité selon la profondeur et la forme requises.

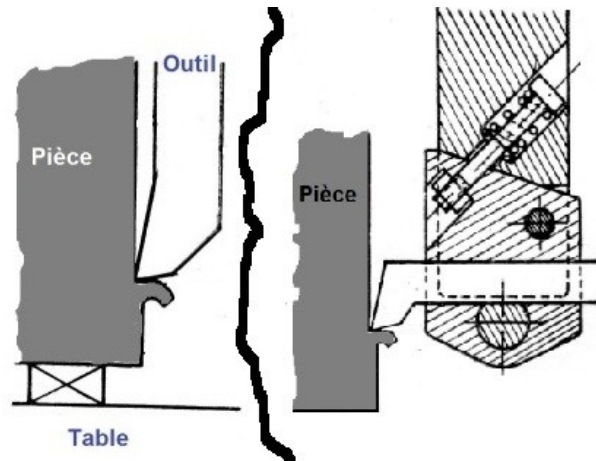


Fig. 3-27 Outils de mortaisage métal.

3.2. Caractérisation d'une machine-outil (Principaux organes)

3.2.1. Définition d'une machine-outil

Une machine-outil est un équipement mécanique conçu pour façonner la matière en utilisant un outillage animé de mouvements et d'efforts appropriés. Elle fonctionne soit par déformation de la matière (machines à dresser les tôles, cisailles, emboutisseuses, poinçonneuses, plieuses), soit par enlèvement de matière. On distingue alors :

- Les machines à mouvement circulaire continu, soit de la pièce (tour), soit de l'outil (fraiseuse, perceuse...).
- Les machines à mouvement rectiligne alternatif, soit de la pièce (raboteuse), soit de l'outil (étau-limeur, mortaiseuse, brocheuse).
- Les machines à outil abrasif.

3.2.2. Composition d'une machine-outil

La composition simplifiée d'une machine-outil comprend :

- Un moteur (M) : Généralement électrique, il sert de source d'énergie.
- Mécanismes intermédiaires (MI) ou transmission : Ensemble des organes qui transmettent l'énergie (ou le mouvement) du moteur vers les organes de réception.
- Organe de travail (OT) ou machine réceptrice : Par exemple, la broche de la machine-outil.
- Système de commande : Coordonne les paramètres entre le moteur et l'organe de travail en fonction des conditions d'exploitation de la machine.
- Socle ou bâti : Support sur lequel tous ces organes sont montés.

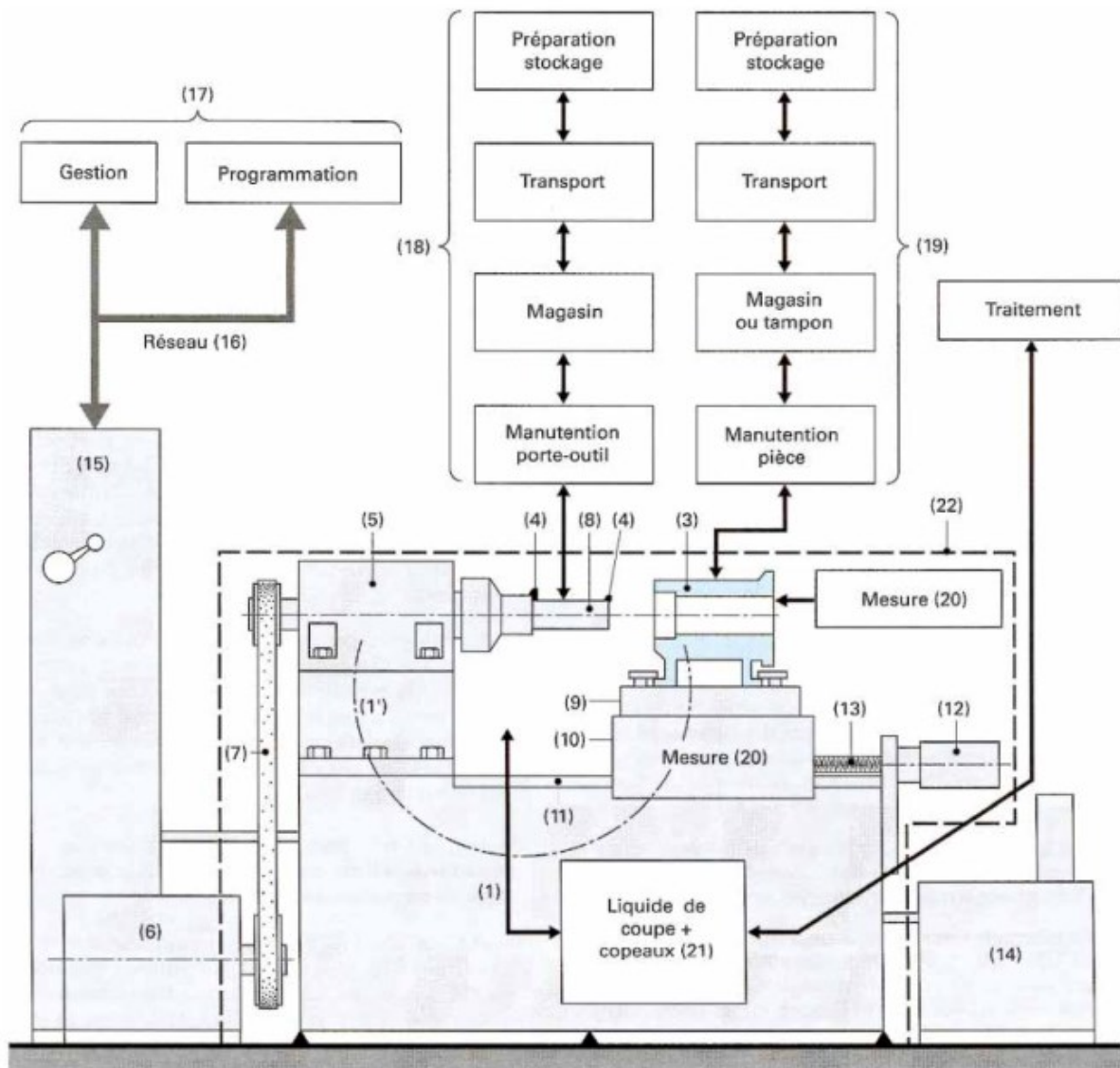


Fig. 3-28 Système de fabrication et machine type.

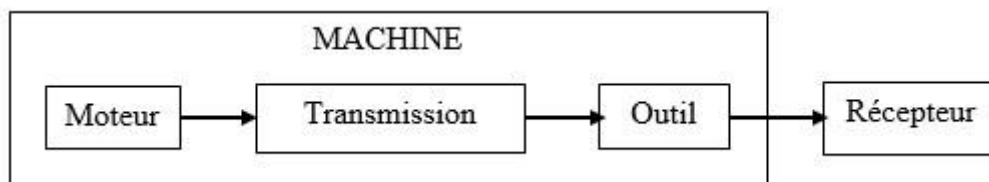


Fig. 3-29 Structure de base d'une machine-outil.

1. Le bâti

Le bâti est la structure de la machine-outil, assurant la fixation et la position relative des éléments fonctionnels, ainsi que l'ancrage au sol pour l'opérateur. Il sert de réservoir pour le liquide de coupe et de réceptacle pour les copeaux, tout en protégeant l'environnement des projections. Il peut être constitué d'une ou plusieurs pièces, avec des liaisons fixes pour maintenir un comportement uniforme.

2. Sol ou fondation

Le sol supporte la machine et le personnel, assure la rigidité du bâti pour les grandes machines, et isole la machine des vibrations de l'environnement.

3. Pièce à usiner

La pièce à usiner fait partie intégrante de la machine du fait que la rigidité relative outil/surface à usiner est un des facteurs les plus importants pour un usinage de précision. Elle peut subir des déformations sous la force de coupe, à son interface avec le montage, et entre ses parties. Ces défis sont adressés par des études approfondies de rigidité et de montages spécifiques.

4. Outil et porte-outil

Les outils, éléments tranchants destinés à l'usinage par enlèvement de matière, sont montés sur des porte-outils, qui peuvent être fixes ou rotatifs. Le porte-outil, solidaire de la broche ou d'un chariot, assure le maintien précis de l'outil, facilitant son remplacement automatique sans perturber le pré réglage. Il peut également permettre le réglage automatique de la position de l'arête de coupe et laisser passer le fluide de coupe.

5. La broche

La broche, un arbre tournant monté sur des paliers, confère la vitesse de coupe nécessaire à l'usinage en recevant le porte-outil ou la pièce. Cruciale pour un usinage de qualité, sa rigidité et ses paliers sans jeu sont essentiels pour éviter les défauts de forme, de dimensions et de positionnement dus aux forces de coupe

6. Commande de puissance

La commande de puissance fournit l'énergie nécessaire à la coupe via un moteur électrique, contrôlant les mouvements des organes de la machine dotés de rotation ou de translation.

7. Montage porte-pièce

Le montage porte-pièce sert à brider la pièce en éliminant ses six degrés de liberté, permettant un usinage stable malgré les forces de coupe. C'est un défi majeur de conception sur une machine-outil.

8. Chariot et Glissières

Le chariot permet le déplacement unidirectionnel de l'outil, de la pièce ou du montage porte-pièce/porte-outil. Les glissières éliminent cinq degrés de liberté du chariot, permettant un mouvement linéaire. Elles doivent assurer un déplacement sans jeu ni frottement excessif pour garantir un positionnement précis et une absorption optimale des vibrations.

9. Commande d'avance

La commande d'avance comprend généralement un moteur électrique et un mécanisme actionnant le chariot, souvent une vis. Elle retire le dernier degré de liberté du chariot laissé par les glissières, assurant ainsi son immobilisation parfaite lors de l'arrêt.

10. Mesure

Les mesures dimensionnelles sur machine se divisent en deux principaux types :

- La mesure de la position des chariots, cruciale pour garantir un usinage précis des surfaces de la pièce. Elle est généralement réalisée à l'aide de règles linéaires, optiques ou magnétiques, envoyant des signaux à la commande pour indiquer la position du chariot.
- Les mesures nécessaires à la vérification des usinages effectués, telles que les mesures diamétrales ou de longueur des pièces, contrôlées par la commande de la machine, qui corrige les écarts. La mesure des pièces est effectuée hors machine pour ne pas perturber le processus de fabrication.

11. Traitement des copeaux et du liquide de coupe

Les copeaux, sous-produits de l'usinage, nécessitent une intervention humaine pour leur traitement. Leur présence pose des problèmes sérieux, d'où l'importance de les gérer soigneusement. Il est crucial d'éviter tout contact entre les copeaux et les autres organes de la machine, en particulier la pièce à usiner, pour éviter tout problème de tolérance après refroidissement.

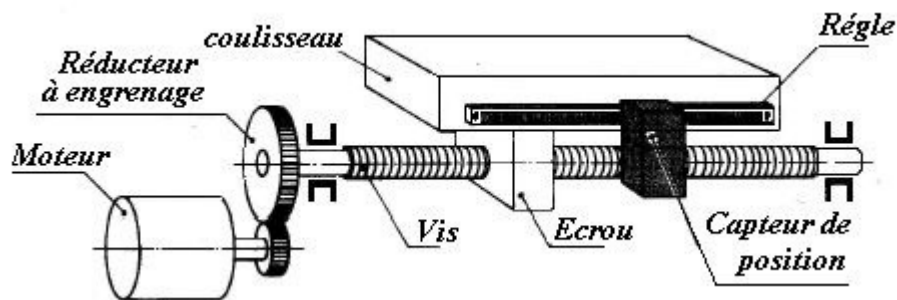


Fig. 3-30 Mécanisme d'avance.

3.2.3. Principaux organes dans diverses machines-outils

3.2.3.1. Principaux organes d'un tour

Pour comprendre et exécuter les différentes opérations qui s'effectuent au tour parallèle, il est nécessaire de connaître les organes principaux qui le constituent.

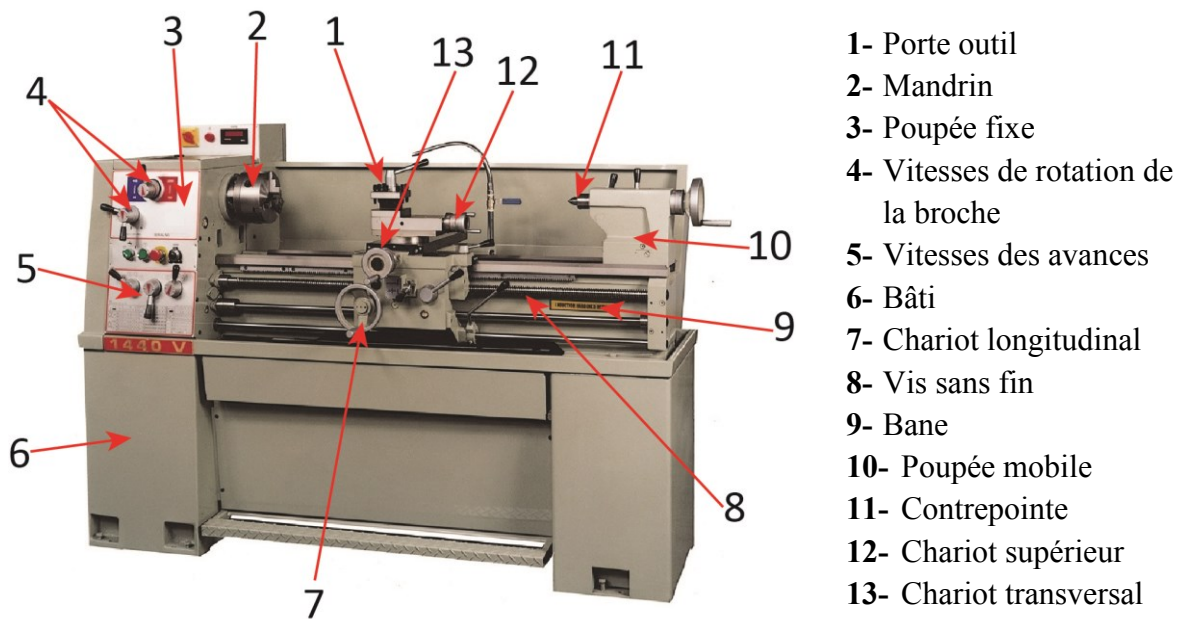


Fig. 3-31 3.3.1.1. Principaux organes d'un tour conventionnel parallèle.

3.2.3.2. Principaux organes d'une fraiseuse

Les organes principaux qui constituent une fraiseuse verticale :

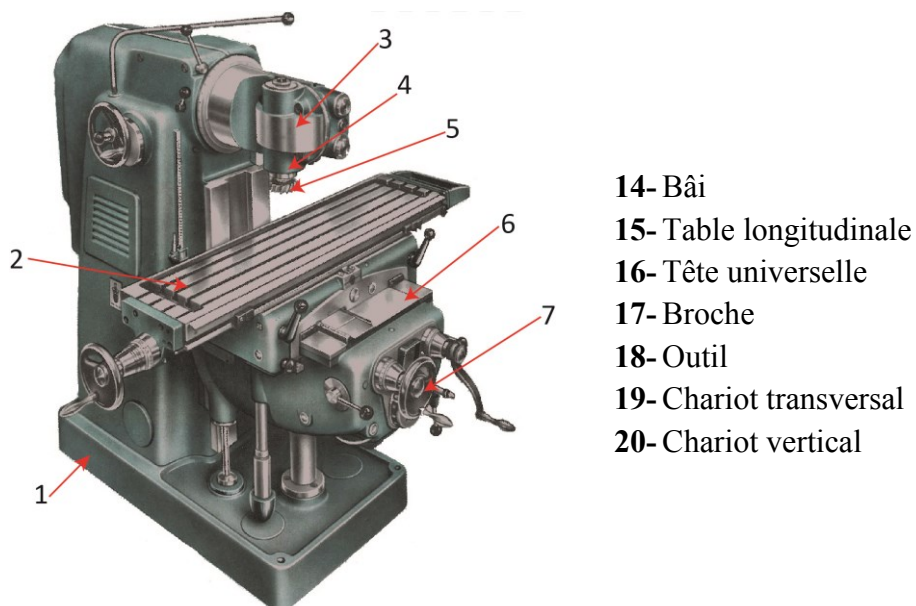


Fig. 3-32 Principaux organes d'une fraiseuse.

3.2.3.3. Principaux organes d'une perceuse

Les organes principaux qui constituent une perceuse à colonne :

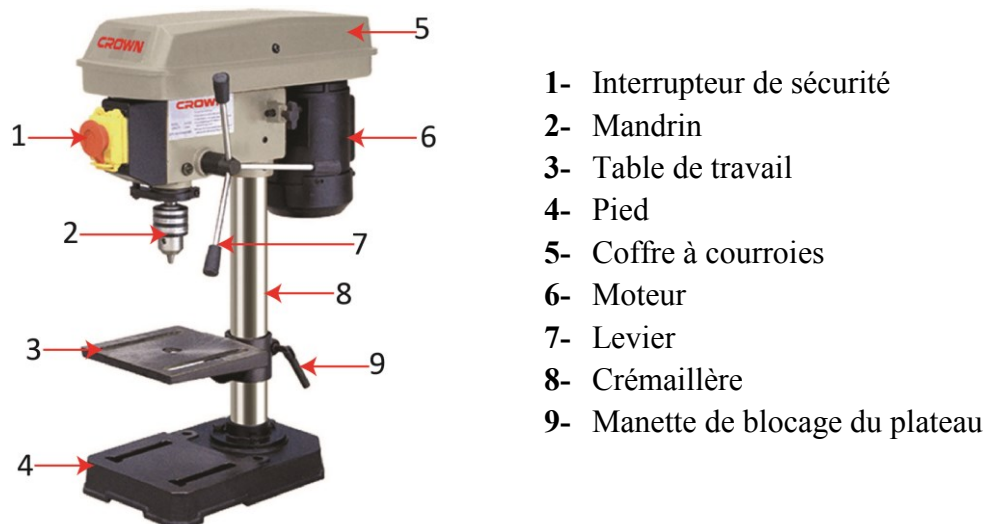


Fig. 3-33 Principaux organes d'une perceuse à colonne.

3.2.3.4. Principaux organes d'une raboteuse

- Bâti : Base solide de la machine qui supporte toutes les autres composantes pour assurer la stabilité et le soutien pendant l'usinage.
- Colonne : Structures verticales rigides montées de chaque côté du banc, contenant les poulies et les engrenages pour la transmission de puissance.
- Table : Surface sur laquelle la pièce à usiner est placée et qui se déplace le long des voies du Bâti.
- Rail transversal : Supporte les porte-outils pour les outils de coupe, relié aux colonnes pour assurer la stabilité pendant la coupe.
- Tête d'outil : Maintient et fixe les outils de coupe en place, jouant un rôle essentiel dans l'usinage précis de la pièce.

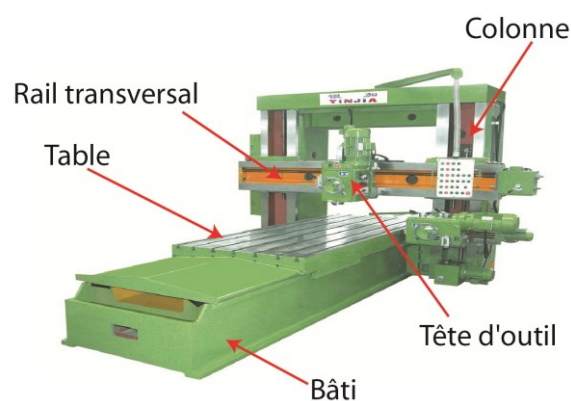


Fig. 3-34 Principaux organes d'une raboteuse.

3.2.4. Principaux organes d'une mortaiseuse

Les organes principaux qui constituent une mortaiseuse sont :

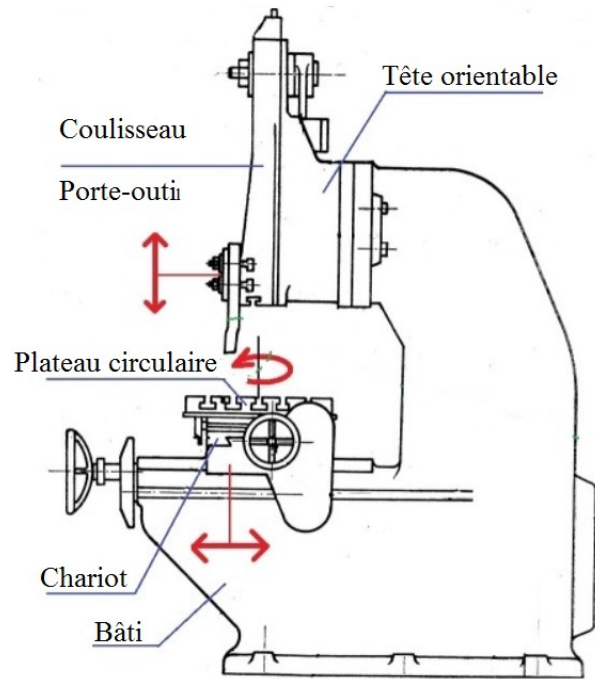


Fig. 3-35 Principaux organes d'une mortaiseuse.


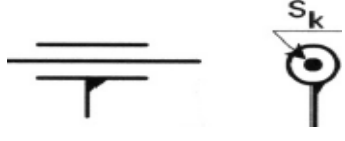


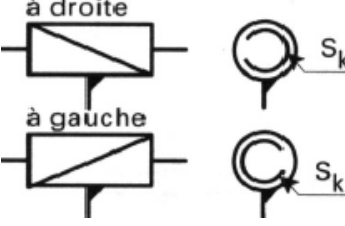
3.3. Chaines cinématiques

Une chaîne cinématique consiste en un ensemble de corps rigides articulés entre eux, les articulations peuvent être de nature extrêmement variées suivant le type de mouvement relatif qu'elles autorisent et peuvent impliquer plusieurs degrés de liberté.

3.3.1. Schéma cinématique

Les éléments mobiles sont représentés par de simples traits, le bâti ne figure qu'aux endroits où il est en contact avec pièces mobiles.

Liaisons	Exemples	Mouvement relatifs		Symboles	Degrés de liberté
		R	T		
Pivot (R)		0	0		1
		0	0		
		R_z	0		
Prismatique (P)		0	T_x		1
		0	0		
		0	0		

Pivot Glissant ou Cylindrique (C)		0	0		2
		0	0		
		Rz	Tz		
Rotule ou sphérique (G)		Rx	0		3
		Ry	0		
		Rz	0		
SCREW (S)		0	0		1
		0	0		
		Rz	Tz		

- L'articulation de rotation (R) possède un degré de liberté permettant la rotation autour de son l'axe.
- L'articulation prismatique (P) possède un degré de liberté de translation le long de son l'axe.
- L'articulation cylindrique (C) possède deux degrés de liberté qui permettent la rotation et translation suivant l'axe.
- L'articulation "SCREW" (S) possède un degré de liberté correspondant au mouvement d'une vis.

3.3.2. Schéma de structure cinématique

Il comprend tous les éléments des couples cinématiques avec leurs liaisons. Ce schéma est utilisé pour étudier la structure des mécanismes et pour en faire la synthèse.

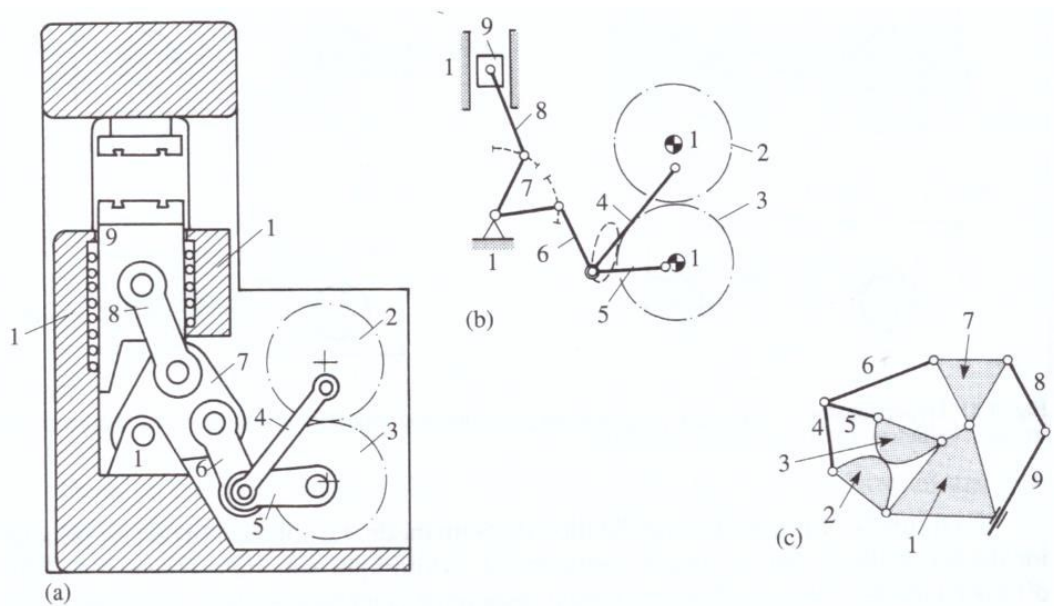


Fig. 3-36 Représentation d'un mécanisme. (a) schéma de construction ; (b) schéma cinématique ; (c) schéma de structure cinématique.

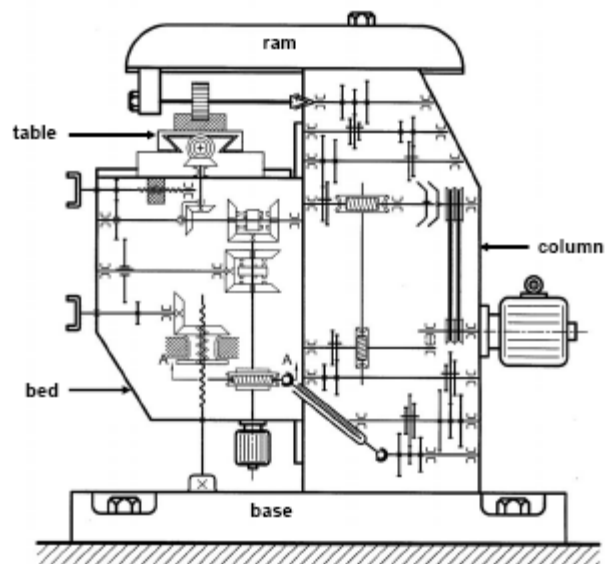


Fig. 3-37 Schéma cinématique d'une fraiseuse.

3.4. Mécanismes de transmission de mouvements

On parle de mécanisme de transmission du mouvement, lorsque le mécanisme sert à transmettre le mouvement du point d'entrée au point de sortie sans modifier la nature (rotation ou translation) du mouvement. Les mécanismes de transmission peuvent changer la vitesse ou le sens de mouvement mais ne le modifient pas. Par exemple, sur un vélo, le mouvement de rotation des pédales est transmis à la chaîne qui entraîne la roue arrière.

Lorsqu'un mécanisme transforme la nature du mouvement entre le point d'entrée et le point de sortie, on parle de mécanisme de transformation du mouvement. Par exemple, une bielle manivelle transforme un mouvement de translation en un mouvement de rotation.

- **Engrenages** : il s'agit d'un dispositif composé de deux ou plusieurs roues dentées tournant autour d'axes fixes. Ils servent à transmettre le mouvement d'un axe à l'autre au moyen des dents venant au contact l'une après l'autre. Dans l'engrenage, la roue motrice transmet le mouvement et la roue menée le subit.



Fig. 3-38 Engrenages.

- **Courroies et poulies** : la courroie est une bande de matière souple permettant la transmission d'un mouvement de rotation d'un arbre vers un autre relativement éloigné. Elle est utilisée avec des poulies.

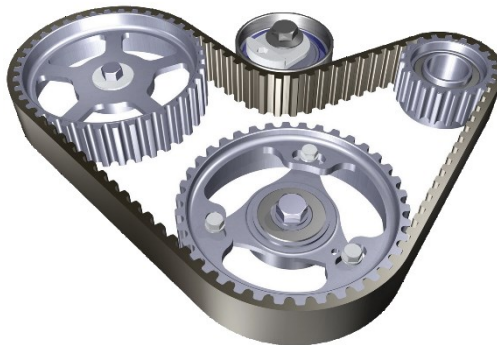


Fig. 3-39 Courroies et poulies.

- **Chaîne et roues dentées** : une chaîne est un élément flexible permettant la transmission du mouvement entre deux axes parallèles éloignés l'un de l'autre. Elle est composée d'un ensemble de maillons articulés reliés entre eux. L'entraînement de la chaîne est assuré par l'engrènement des maillons avec les roues dentées.

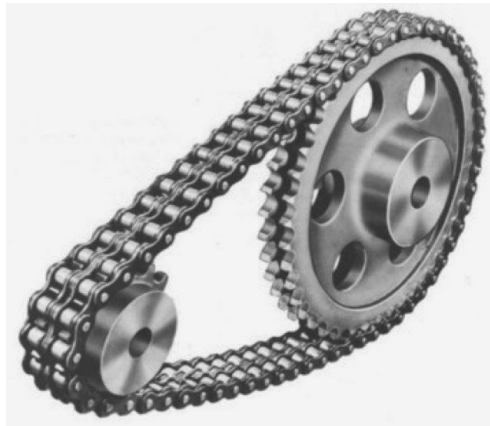


Fig. 3-40 Chaîne et roues dentées

3.5. Mécanismes de transformation du mouvement

- **Vis** : est une machine simple servant à transformer un mouvement de rotation en un mouvement de translation dirigé selon l'axe de rotation, ou vice-versa.



Fig. 3-41 Vis sans fin.

- **Bielle-manivelle** : est un système qui permet la transformation d'un mouvement circulaire continu en un mouvement rectiligne alternatif de va-et-vient, ou réciproquement. La bielle est une pièce reliant deux articulations d'axes mobiles dans le but de transmettre une force, alliée au vilebrequin (manivelle), elle donne le système qui nous intéresse.

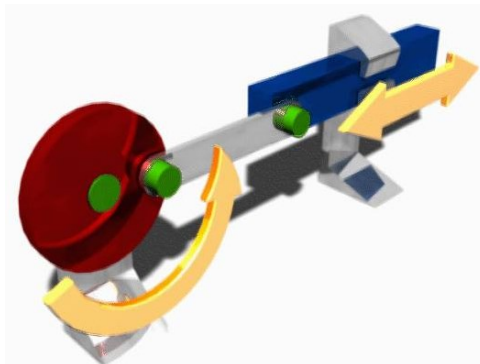


Fig. 3-42 Bielle-manivelle.

- **Crémaillère** : est une barre dentée dont les dents sont disposées de manière linéaire le long de sa surface. Elle est utilisée dans les systèmes de transformation de mouvement pour convertir un mouvement rotatif en un mouvement linéaire, ou vice versa.



Fig. 3-43 Crémaillère.

Références bibliographiques

1. H.N. Gupta Visiting, Manufacturing precesse. Department of Mechanical Engineering, I.E.T., Lucknow, U.P. Technical University, B.Sc., G.I. Mech.E (London), FIE.
2. El hachemi BAHLOUL. Techniques de Fabrication Conventionnelles et Avancées. Département De Génie Mécanique, Faculté de Technologie, Université Batna 2, 2018.
3. Choix de matériaux Première STI2D - Tronc commun. Lycée du Pays de Soule, 2011.
4. Singh, Rajender. Introduction to basic manufacturing processes and workshop technology. New Age International, 2006.
5. Cordebois Jean-Pierre. Fabrication par usinage. " L'Usine nouvelle, 2008.
6. Chris Lefteri. Procédés de fabrication & design produit - 2e édition, Dunod, 2020.
7. Brigitte Remacle. Usinage tournage fraisage, formation ifpm, 2018.
8. Ion-Cosmin Gruescu, Frédéric Defourne, Philippe Quaegebeur. Préparation de Production en Productique Mécanique - Étude de Fabrication et Analyse d'Usinage. Ecole Centrale de Lille, 2015.
9. Éric Felder. Procédés d'usinage. Techniques de l'Ingénieur.
10. Microtech L. Aragon. Procédés d'obtention des pièces brutes- Chapitre Etude des Procédés.
11. Mourad Jerbi. Procédés de mise en forme. Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, Dpartement de Génie Mécanique, 2018.
12. J. Letard. Conception et élaboration des ensembles mécaniques – obtention pièces brutes. Sciences de l'ingénieur - PTSI – lycée Joliot curie SV6.
13. Debih Ali. Cours de Fabrication Mécanique, Technologie, Université de M'sila, 2019.
14. Chenegrin Kévin. Identification et Modélisation des Phénomènes Thermomécaniques mis en jeu lors du Perçage à sec de L'Inconel 718. Diss. Université de Lyon, 2021.
15. François Bagur. Matériaux pour outils de coupe. Techniques de l'Ingénieur.
16. François C. Pruvot. Machine-outil. Techniques de l'Ingénieur.
17. Cours de Fabrication mécanique. Département de Génie Mécanique, Faculté de Technologie, Université de Mohamed Boudiaf, 2022.
18. Bennegadi Mohammed El Larbi. Coupe des Métaux en Fabrication Mécanique et Productique. Faculté de Génie Mécanique, Département de Génie Mécanique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed, 2018.
19. Lairedj Abdelaziz. Fabrication Mécanique. Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, Université de Tahri Mohamed- Béchar, 2023.