

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf- Mila



Institut des sciences et de la technologie

Département des Sciences et Technologie

Polycopié de Cours

Fabrication Mécanique

Présenté par :

Dr. AZIZI Mohamed Walid

Ce cours est destiné aux étudiants 2^{èmes} ANNEE Génie Mécanique

Année Universitaire 2018/2019

TABLE DES MATIÈRES

Avant-Propos

CHAPITRE I : Introduction

I.1 Introduction.....	2
I.2 Cahier des charges pour le choix d'un couple matériau-procédé.....	2
I.3 Interactions Procédés – Matériaux.....	3
I.3.1 Étapes à suivre pour le choix des matériaux.....	3
I.3.1.1 Vision génie des matériaux.....	5
I.3.1.2 Vision design industriel.....	5
I.4 Classification des procédés d'obtention des pièces.....	5

CHAPITRE II : Procédés de fabrication par enlèvement de matière

II.1 Introduction.....	8
II.2 Principe de Génération de surface.....	8
II.2.1 Modes de génération.....	8
II.2.1.1 Les lignes formatrices.....	8
II.2.1.2 Représentation de la génératrice.....	9
II.2.1.3 Représentation de la directrice.....	10
II.2.2 Opérations d'usinage.....	11
II.3 Eléments de régime de coupe.....	11
II.3.1 Vitesse de coupe.....	12
II.3.2 Avance par tour.....	12
II.3.3 Profondeur de passe.....	12
II.4 Machines-outils.....	12
II.4.1 Les machines-outils de tournage.....	12
II.4.1.1 Les tours parallèles à charioter et à fileter.....	13
II.4.1.2 Les tours à copier.....	14
II.4.1.3 Les tours semi-automatiques.....	14
II.4.1.4 Les tours automatiques.....	14
II.4.1.5 Les tours automatiques multibroches.....	14
II.4.1.6 Les tours à commande numérique.....	14
II.4.1.1.1 Les principales opérations de tournage.....	14
II.4.2 Les machines-outils de Fraisage.....	15
II.4.2.1 Fraiseuse horizontale.....	16
II.4.2.2 Fraiseuse raboteuse.....	16
II.4.2.1.1 Les principes opérations de fraisage.....	17
II.4.2.1.2 Les modes de travail d'une fraise.....	18
II.4.3 Perçage.....	18
II.4.3.1 La perceuse.....	19
II.4.4 Rectifieuse.....	19
II.4.4.1 Rectifieuse plane.....	19
II.4.4.2 Rectifieuse cylindrique.....	20
II.4.4.3 Rectifieuse sans centres.....	20
II.4.5 Brochage.....	21
II.4.5.1 Brochage intérieur.....	21
II.4.5.2 Brochage extérieur.....	21
II.4.6 Étau limeur.....	22
II.4.6.1 Mouvement de coupe.....	22

II.4.6.2 Utilisation.....	23
II.4.7 Mortaiseuses.....	23
II.4.8 Tailleuse d'engrenages.....	23
II.4.8.1 Définition des engrenages.....	24
II.4.8.2 Taillage à l'outil crémaillère.....	24
II.5 Matériaux et géométrie des outils.....	25
II.6 Géométrie des outils.....	28
II.6.1 Plans de l'outil.....	29
II.6.1.1 Plans de l'outil en main.....	29
II.6.1.2 Plans de l'outil en travail.....	30
II.6.2 Angles de l'outil.....	30
II.6.2.1 Angles de l'arête.....	30
II.6.2.2 Angles des faces.....	30

CHAPITRE III : Procédés de fabrication sans enlèvement de matière

III.1 Introduction.....	32
III.2 Procédés par Déformation.....	32
III.2.1 Principe.....	32
III.2.2 Rappels sur la plasticité des matériaux.....	32
III.3 Différents modes.....	33
III.3.1 Laminage.....	33
III.3.1.1 Laminage à chaud.....	34
III.3.1.2 Laminage à froid.....	34
III.3.2 Forgeage.....	35
III.3.2.1 Avantages.....	35
III.3.2.2 Inconvénients.....	35
III. 3.3 Estampage et Matriçage.....	35
III.3.3.1 Avantages du Estampage et matriçage.....	36
III.3.3.1.1 Influence du procédé sur le matériau.....	36
III.3.3.1.2 Influence du procédé sur la qualité des surfaces.....	37
III.3.3.2 Inconvénients.....	37
III. 3.4 Tréfilage.....	37
III. 3.5 Filage (ou extrusion).....	37
III. 3.5.1 Avantages.....	37
III.3.5.2 Inconvénients.....	38
III. 3.6 Pliage.....	38
III.3.6.1 Avantage.....	38
III.3.6.2 Inconvénients.....	38
III. 3.7 Emboutissage.....	38
III.4 Procédés par fusion.....	40
III.4.1 Généralités.....	40
III.4.3 Différents modes de moulage.....	40
III.4.2 Principe Moulage (ou Fonderie).....	41
III.4.3.1 Moulage en sable.....	41
III.4.3.2 Moulage métallique (ou moulage permanent).....	41
III.4.4 Avantages moulage.....	42
III.4.5 Inconvénients moulage.....	42

CHAPITRE IV : Procédés non conventionnels

IV.1 Généralités.....	43
IV.2 Différentes techniques d'usinage.....	43
IV.2.1 Usinage par électroérosion.....	43

IV.2.1.1 Usinage.....	43
IV.2.1.2 Applications.....	44
IV.2.1.3 Matériaux.....	44
IV.2.2 Usinage électrochimique.....	44
IV.2.2.1 Usinage.....	44
IV.2.2.2 Applications.....	45
IV.2.2.3 Matériaux.....	45
IV.2.2.4 Avantages.....	45
IV.2.2.5 Inconvénients.....	45
IV.2.3 Usinage par ultrasons.....	46
IV.2.3.1 Principe de fonctionnement.....	46
IV.2.3.2 Paramètres et influence.....	47
IV.2.3.3 Avantages.....	48
IV.2.4 Usinage par bombardement.....	49
IV.2.4.1 Principe du canon à électrons.....	49
IV.2.4.2 Paramètres de soudage.....	49
IV.2.4.3 Avantage soudage par faisceau d'électrons.....	50
IV.2.4.4 Inconvénients.....	50
IV.2.5 Usinage laser.....	50
IV.2.5.1 Principe de la découpe laser.....	50
IV.2.5.2 Fonctionnement d'une machine laser.....	51
IV.2.5.3 Utilisation d'une machine de découpe laser.....	52
IV.2.5.4 Applications d'une machine laser.....	52
IV.2.5.5 Avantages de la découpe par laser.....	52

CHAPITRE V : Nouvelles technologies de mise en forme

V.1 Introduction.....	53
V.2 Fabrication sur des machines-outils à commande numérique.....	53
V.2.1 Caractéristique des machines-outils à commande numérique (MOCN).....	53
V.2.1.1 Automaticité.....	53
V.2.1.2 Flexibilité.....	54
V.2.1.3 Sécurité.....	55
V.2.1.4 Nécessités économiques et techniques.....	55
V.2.2 Domaine d'utilisation des MOCN.....	55
V.2.3 Avantage et inconvénients liés aux MOCN.....	55
V.2.3.1 Avantages.....	55
V.2.3.2 Inconvénients.....	56
V.3 Usinage à Grande Vitesse (UGV).....	56
V.3.1 Principe Usinage à Grande Vitesse (UGV).....	57
V.3.2 Avantage de l'usinage à Grande Vitesse (UGV).....	57
V.3.3 Inconvénients de l'usinage à Grande Vitesse (UGV).....	57
V.4 Usinage par jet d'eau.....	58
V.4.1 Les constituants de la machine jet d'eau.....	58
V.4.2 La découpe au jet d'eau.....	59
V.4.2.1 Jet d'eau pure.....	59
V.4.2.2 Jet d'eau abrasif.....	60
V.4.3 Technologie.....	60
V.4.4 Avantages.....	61
V.4.5 Inconvénients.....	61

Références Bibliographiques.....	62
----------------------------------	----

Avant-Propos

Ce polycopié a été destiné aux étudiants inscrits en deuxième année génie mécanique, sciences et technologie, quatrième semestre de l'année universitaire. Le contenu de ce polycopié, correspond au programme officiel de la matière " Fabrication Mécanique" enseigné en deuxième année, socle commun, de domaine sciences et technologies. Il a été rédigé dans le but de permettre d'avoir un outil de travail et de référence recouvrant les connaissances qui leur sont demandés.

Ainsi, ce polycopié s'articule autour de cinq (05) chapitres :

- Introduction
- Procédés de fabrication par enlèvement de matière
- Procédés de fabrication sans enlèvement de matière
- Procédés non conventionnels
- Nouvelles technologies de mise en forme

Le contenu de ce polycopié permet à l'étudiant d'acquérir les connaissances relatives aux différents principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques par enlèvement de matière, les techniques de mise en forme par déformation plastique et les nouvelles technologies de mise en forme.

Bien que l'élaboration de ce polycopié ait été faite avec le plus grand soin, le contrôle effectué de ce document n'est pas absolu, et il serait étonnant qu'il ne subsiste pas d'erreurs.

I.1 Introduction

Beaucoup de problèmes liés à la fabrication, à l'assemblage ou à la tenue en service des machines et des structures proviennent d'une mauvaise utilisation des matériaux. Le choix d'un procédé d'obtention dépend de nombreux facteurs, dont le matériau, les formes de la pièce, les états de surface, la précision, ...etc.

La fabrication mécanique est une science qui s'occupe de mettre au point un ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication. Ces procédés de fabrication font partie de la construction mécanique.

Les techniques d'assemblage (soudage par exemple) interviennent une fois que les différentes pièces ont été fabriquées.

Ce chapitre présente une courte description des interactions entre les procédés d'obtention des pièces et les matériaux.

I.2 Cahier des charges pour le choix d'un couple matériau-procédé

On admet généralement qu'elle comporte 4 phases successives (Figure 1), avec de fréquents retours en arrière. Ce modèle n'est toutefois qu'un modèle type, presque idéal. Dans la réalité, il est courant de s'en écarter.

- La première phase consiste à définir et clarifier le problème, identifier les objectifs, Elle donne lieu à l'établissement d'une première version du cahier des charges.
- La deuxième phase a pour objectif de trouver des solutions, puis d'en démontrer la faisabilité en évaluant l'ensemble des implications pour la suite du projet (temps de développement, coût, moyens à mobiliser, ...). A ce stade, le produit n'est qu'un **concept**.

Après avoir pris la **décision de développer le produit**, celui-ci prend corps dans la phase suivante :

- La troisième phase permet d'aborder le positionnement des sous-ensembles, les dimensionnements, de matérialiser la conception dans l'espace.
- La quatrième phase aborde la conception dans le détail par la définition géométrique de tous les éléments, les calculs de vérification, ...etc.

A chaque étape, un **choix de matériau** peut avoir lieu. Comme ce choix risque d'influer sur l'ensemble des autres caractéristiques du produit, il est logique de l'effectuer au plus tôt, dès la recherche de solutions, voire parfois avant.

Bien entendu, à ce stade, il ne s'agit pas nécessairement de déterminer le matériau qui sera retenu, mais plutôt la famille auquel il devra appartenir. Ce choix sera affiné en cours de processus.

Le besoin exprimé pour un couple matériau-procédé du cahier des charges techniques du matériau et de celui du procédé associé :

- Nombre de pièces à fabriquer, série, cadence,
- Temps de fabrication, délais, cycle de production,
- Investissements nécessaires : machines, outillages, mise au point,
- Complexité de la géométrie : surfaces intérieures et extérieures, épaisseurs, formes,
- Qualités géométriques : tolérances dimensionnelles, états de surface.

Plus le besoin et l'exigence se développent pour un couple matériau-procédé donné, plus la connaissance progresse pour la maîtrise de ce couple, plus sa mise en œuvre deviendra économique.

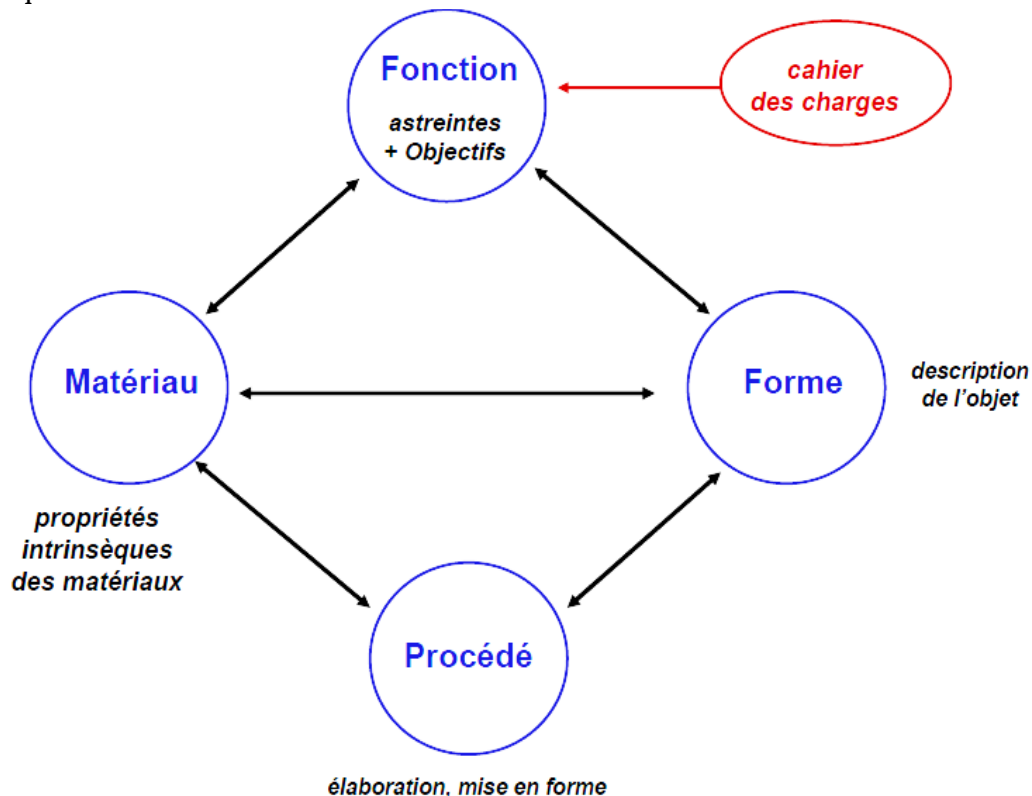


Figure I.1. Exigences du Cahier des Charges.

I.3 Interactions Procédés – Matériaux

Il existe un lien fort entre matériau et procédé de mise en forme, d'où la notion de couple matériau-procédé. Tout matériau ne peut pas être mis en forme à partir de tout procédé ; tout procédé nécessite des caractéristiques spécifiques pour le matériau. Plus le matériau s'éloigne des caractéristiques requises par le procédé, plus la mise en forme est difficile à maîtriser et à industrialiser, donc coûteuse à mettre en œuvre.

Le choix des matériaux est une tâche fondamentale et très complexe. En effet, dans un nombre important de cas, il ne concerne pas seulement un aspect purement technique répondant à des exigences fonctionnelles, mais aussi à des attentes relevant des préférences des utilisateurs dans le cadre d'un marché spécifique. Ainsi, le choix des matériaux doit être analysé sous l'angle de l'ingénierie de matériaux mais aussi sur celle du design industriel, et tenir compte de toutes les informations qui lui seront associées.

Il est impératif d'effectuer le choix du couple matériau- procédé à partir des critères du cahier des charges et dans un contexte de développement durable.

- le produit demande certaines performances de la part du matériau
- le procédé impose des contraintes de fabrication ou de construction.

I.3.1 Étapes à suivre pour le choix des matériaux

Les étapes à suivre pour le choix des matériaux sont :

- Étudier l'information autour du nouveau produit
- Définir les caractéristiques/exigences de conception du produit
- Faire le choix des matériaux viables
- Évaluer les procédés possibles
- Prioriser et tirer des conclusions

Dans la plupart des cas, le processus de conception innovante commence par l'identification et la formulation du concept, à partir d'une idée, d'un besoin particulier ou d'un changement dans le contexte d'utilisation. Ensuite, nous cherchons à visualiser le produit, c'est-à-dire à préciser ses caractéristiques à travers l'utilisation de représentations graphiques, de la construction de modèles ou grâce à l'utilisation d'outils issus de la conception assistée par ordinateur. Ceci nous permet alors de préciser la configuration, la taille, la fonctionnalité ou la personnalité du produit. Enfin, la matérialisation à travers un prototype vous confronte aux choix de matériaux et des procédés qui vous permettront de valider ou d'affiner le concept initial.

Un produit est défini par l'interaction de six domaines d'information inter-corrélés (Figure 2), qui doivent être pris en compte tout au long du processus de conception :

- Les produits : c'est l'objet d'étude, l'information le décrivant contient des données factuelles comme les attributs du produit par exemple : le nom, le fabricant, le prix et les performances.
- Les matériaux : la nature de la matière constituant le produit et ses performances.
- Les procédés : la description des étapes de transformation nécessaires de cette matière.
- L'esthétique : les aspects visuels, tactiles, acoustiques ou olfactifs.
- La perception : les attributs sur lesquels le produit va être jugés (culture, goût ou mode).
- L'intention : ce que le produit doit être dans l'esprit du concepteur (quelles sont ses priorités).

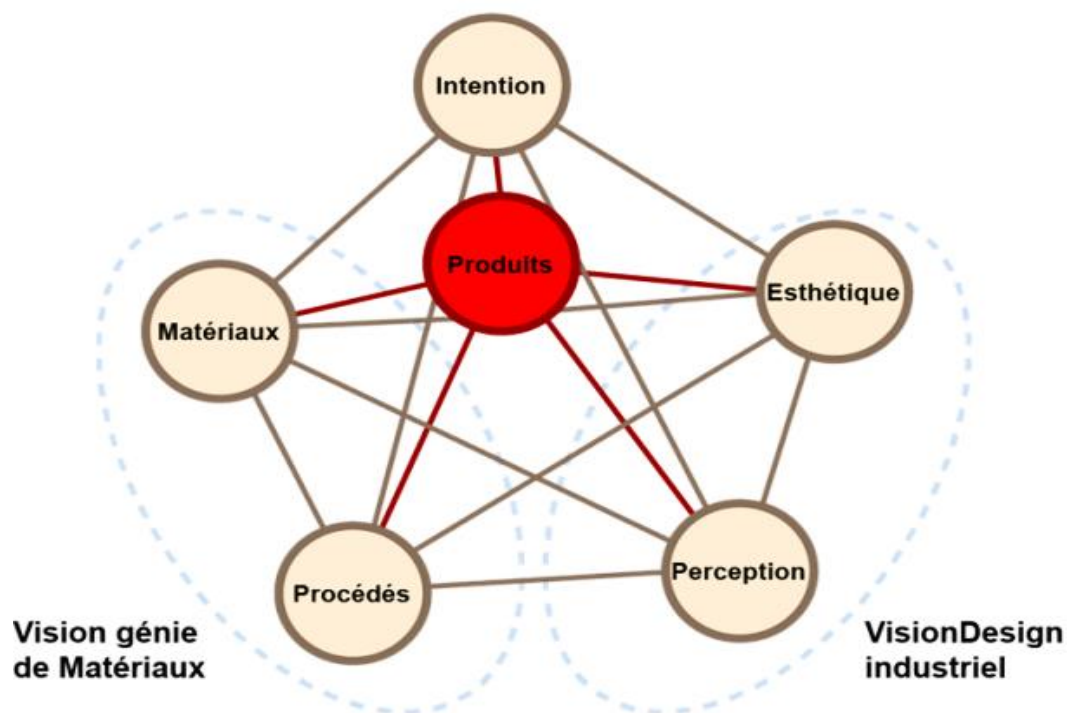


Figure I.2. Choix des matériaux d'un produit

I.3.1.1 Vision génie des matériaux

Ces dernières décennies, des avancées significatives ont été faites pour améliorer le choix technique des matériaux évoluant dans des contextes spécifiques. Ainsi ont été créées des méthodes systématiques, des bases de données et de connaissances ainsi que des logiciels d'analyse permettant d'explorer l'univers des matériaux et de corréler les attributs de performance (physique, mécanique, thermique, électrique) avec l'univers des procédés (coût, impact environnemental, intensité de main-d'œuvre entre autres). C'est une approche déductive (Figure 3).

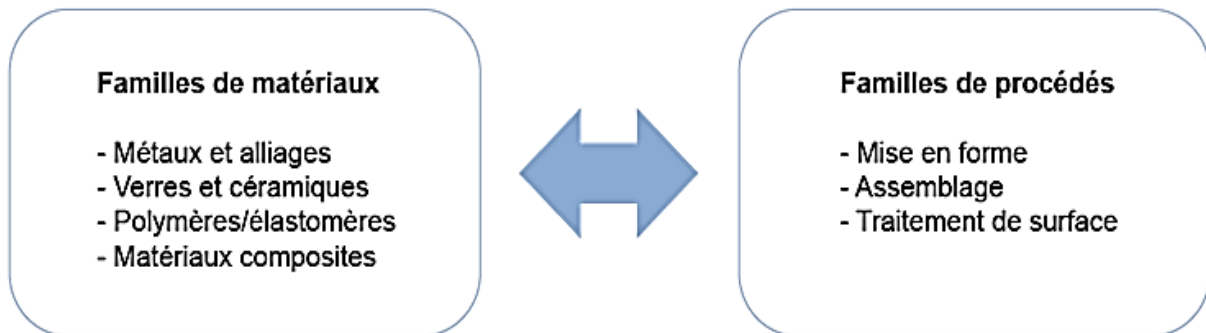


Figure I.3. Familles des matériaux et familles de procédés.

I.3.1.2 Vision design industriel

D'un autre côté, des analyses plus empiriques et subjectives ont lieu dans le processus de design mais elles ont aussi un impact indéniable sur la manière dont les choix des matériaux sont faits. Les aspects esthétiques doivent aussi être pris en compte et influencent directement le choix des matériaux.

Par la suite, l'ensemble des informations évoquées dans la Figure 2 et le processus schématisé dans la Figure 4 vont permettre d'identifier les matériaux les plus adaptés et viables pour votre nouveau produit.

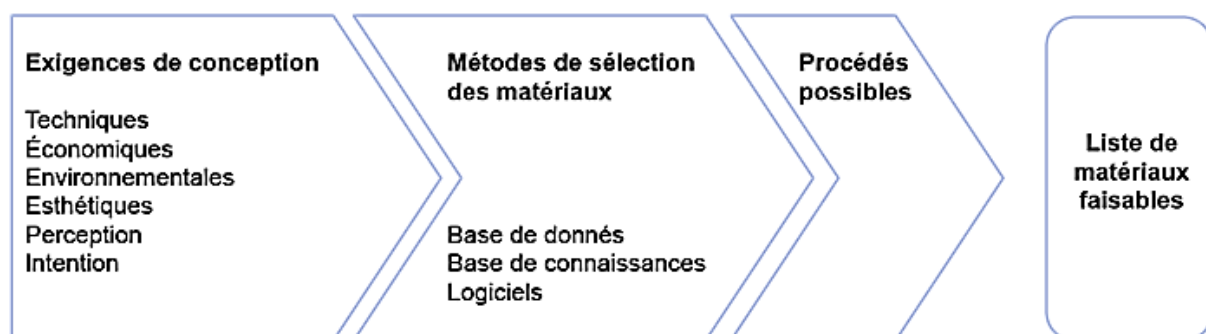


Figure I.4. Identification des matériaux

I.4 Classification des procédés d'obtention des pièces

La mise en forme des métaux est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérance donnée. Les principaux procédés de mise en forme des métaux sont apparus progressivement, donnant naissance par la suite à diverses variantes, parfois très

nombreuses. Les formes modernes des divers procédés sont le plus souvent apparues récemment pour assurer la production en grande série de pièces à faible coût.

Il existe de nombreuses techniques visant l'obtention d'une pièce par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication (obtention de la pièce brute, puis obtention de la pièce finale).

La Figure I.5 récapitule les principales classes de procédés utilisés. Elle montre qu'il existe trois voies principales de fabrication de pièces métalliques selon l'état de départ du matériau métallique :

- Le moulage à partir de l'état liquide.
- Le façonnage à partir d'une ou plusieurs pièces à l'état solide. Cette voie peut, elle-même, se scinder en formage, ou mise en forme sans enlèvement de matière par déformation plastique, usinage, ou mise en forme avec enlèvement de matière, et l'assemblage, où l'on solidarise deux ou plusieurs pièces selon les procédés.

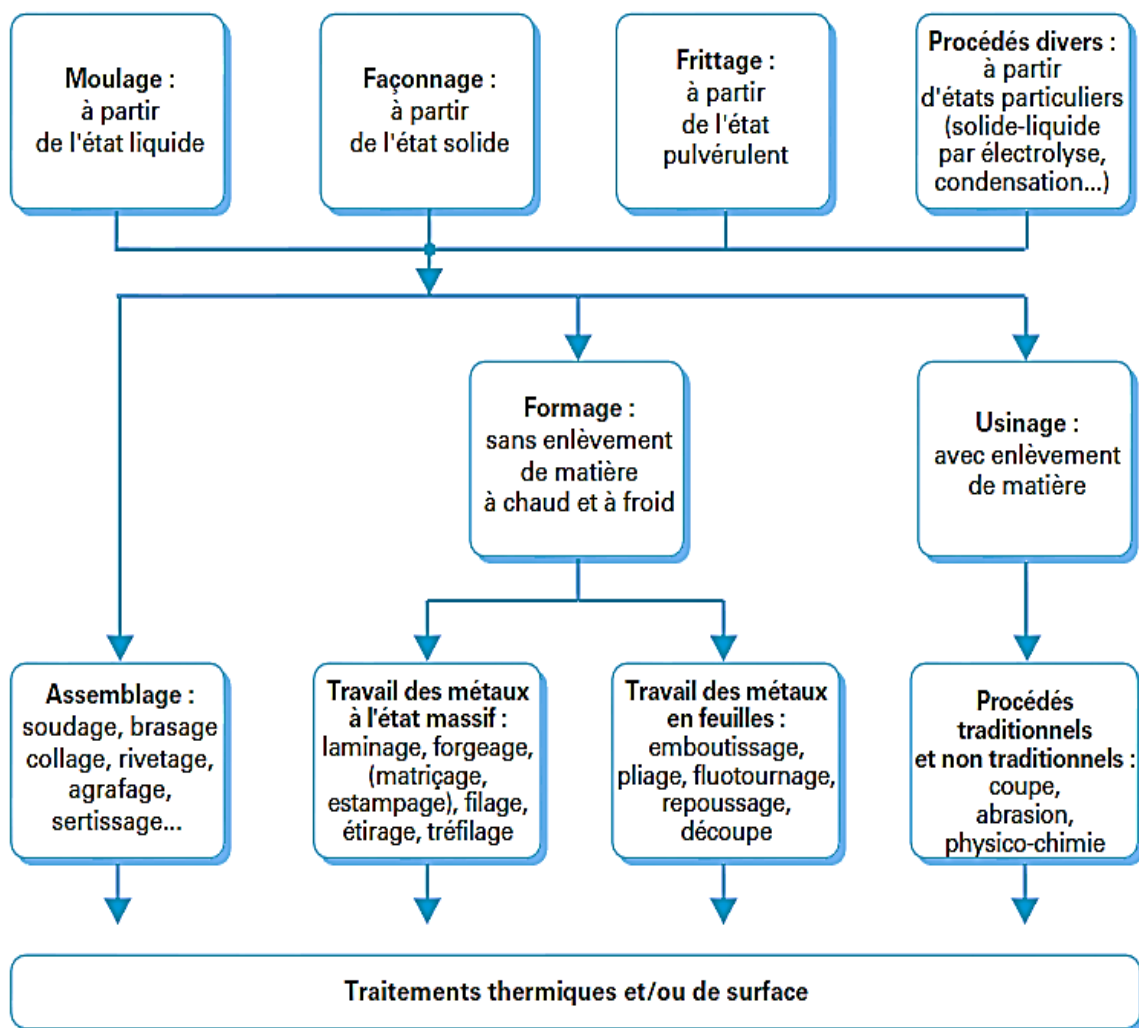


Figure I.5. Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques.

- Le frittage à partir de poudres par disparition des vides intergranulaires à haute température et éventuellement sous pression hydrostatique (compaction isostatique) ou un état de contrainte plus général par forgeage, filage...etc.

En raison, entre autres causes, de la classification socio-économique des secteurs industriels correspondants, on distingue dans le formage :

- Le travail des métaux à l'état massif, pratiqué essentiellement dans les industries métallurgiques : laminage, forgeage, filage, étirage, tréfilage.
- Le travail des métaux en feuilles, pratiqué comme l'usinage dans les industries mécaniques et dont le principal procédé est l'emboutissage des tôles.

Bien que le volume de pièces concernées soit nettement plus modeste, il ne faut pas oublier diverses autres voies permettant de modifier la forme d'un solide et très utiles dans diverses situations, notamment pour la réalisation ou la réparation d'outillages de mise en forme :

- Addition d'un matériau métallique solide à une pièce en le transformant temporairement en ions par électrolyse (électroformage), en liquide (rechargement par les techniques de soudage) ou en gaz (pulvérisation et condensation).
- Passage temporaire d'un alliage métallique par l'état semi-solide entre liquidus et solidus et injection dans un moule.

II.1 Introduction

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière, destinée à conférer une forme, des dimensions et un état de surface adaptés à l'utilisation finale d'une pièce, à l'aide d'une machine-outil, tout en respectant les tolérances préconisées. Les paramètres influençant la coupe sont relativement nombreux. Ils peuvent se regrouper en trois grandes familles suivant ce sur quoi ils agissent :

- Les paramètres liés au procédé : vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe, type d'opération...etc.
- Les paramètres liés à l'outil : géométrie, forme, angles de coupe, nuance du substrat, revêtement, fixation de l'outil...etc.
- Les paramètres liés à la pièce usinée qui se composent en deux sous -parties :
 - paramètres géométriques : forme, élancement, diamètre du lopin,...etc.
 - paramètres liés au matériau (dureté, composition chimique, état microstructural..) regroupés sous la dénomination d'usinabilité.

Le couple outil-pièce a pour objectif de générer des surfaces par enlèvement de matière (production de copeaux).

II.2 Principe de Génération de surface

Il existe deux manières de générer la surface recherchée : par travail de forme ou par travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme c'est la forme de l'arête tranchante de l'outil qui conditionne la surface obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la conjonction des mouvements de coupe et d'avance qui définit la surface finale.

Dans le cas d'une génération simple, ce couple reçoit deux mouvements générateurs :

- Le mouvement de coupe (M_c) animé d'une vitesse de coupe V_c .
- Le mouvement d'avance (M_f) animé d'une vitesse d'avance V_f .

Mouvement de l'outil	Mouvement de la pièce	Exemples
Translation	Translation	Rabotage, brochage,...etc.
Translation	Rotation	Tournage
Rotation	Translation	Fraisage 3 axes, perçage,...etc.

Tableau II.1 Exemples sur les mouvements de coupe

II.2.1 Modes de génération

II.2.1.1 Les lignes formatrices

Une surface usinée est obtenue par la combinaison de deux éléments essentiels. Il s'agit des « lignes formatrices ». Elles sont au nombre de deux :

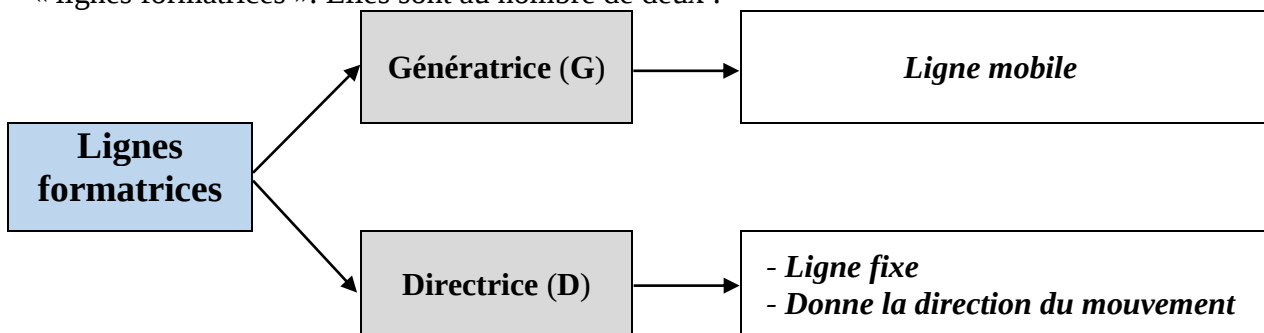


Figure II.1 Principe de génération des surfaces.

II.2.1.2 Représentation de la génératrice

L'usinage consiste à enlever la matière de façon à donner à la pièce brute la forme voulue en produisant des surfaces planes, cylindriques, coniques et/ou spéciales. La génération de ces surfaces peut être obtenue par un travail d'enveloppe ou par un travail de forme.

Au cours de ce travail, nommé encore travail par génération, la génératrice correspond à l'ensemble des positions successives du point générateur de l'outil et ce dernier est nommé outil d'enveloppe.

Ce type travail est obtenu par la conjonction des mouvements de coupe et d'avance du point générateur de l'outil, ce qui correspond à une génération ponctuelle. Le profil de la surface est donné par l'enveloppe des positions successives de l'outil. A titre d'exemple sur les Figures (II.2) et (II.3) suivante sont illustrées les schémas de principe des usinages permettant l'exécution du travail d'enveloppe par chariotage d'un cylindre respectivement le fraisage d'une surface plane.

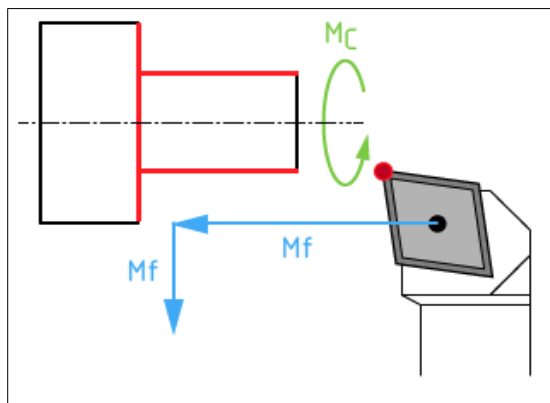


Figure II.2 Travail d'enveloppe : chariotage d'un cylindre

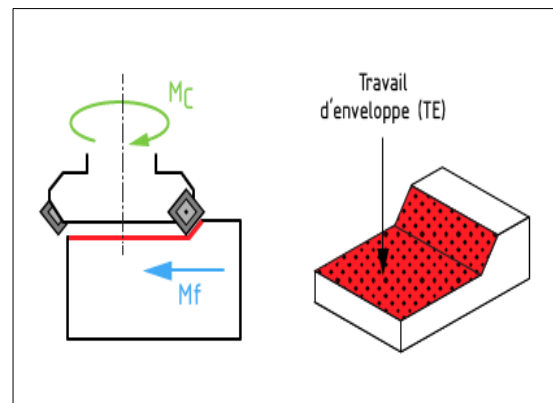


Figure II.3 Travail d'enveloppe : fraisage d'une surface plane

Pour ce type de travail, l'outil épouse sa forme à la pièce. Il est nommé outil de forme : c'est la géométrie de son arête tranchante qui détermine le profil de la surface obtenue. Sur les **figures** ci-dessous sont illustrées quelques opérations d'usinage (usinage des gorges et fraisage de profil) permettant d'effectuer un travail de forme.

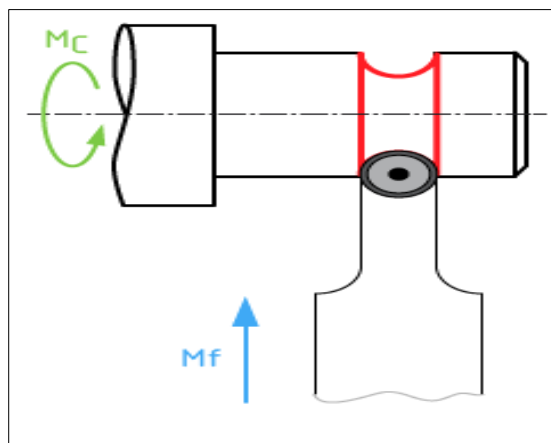


Figure II.4 Travail de forme : usinage d'une gorge

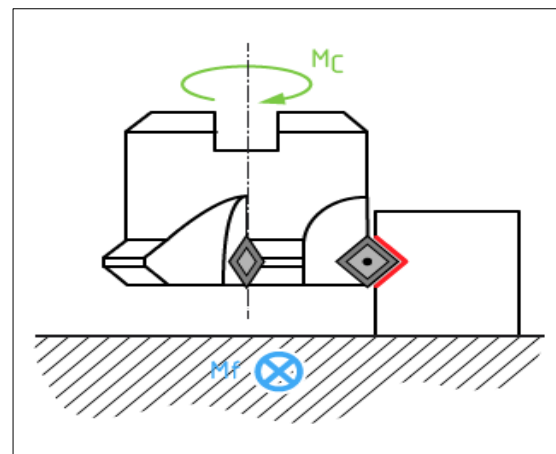
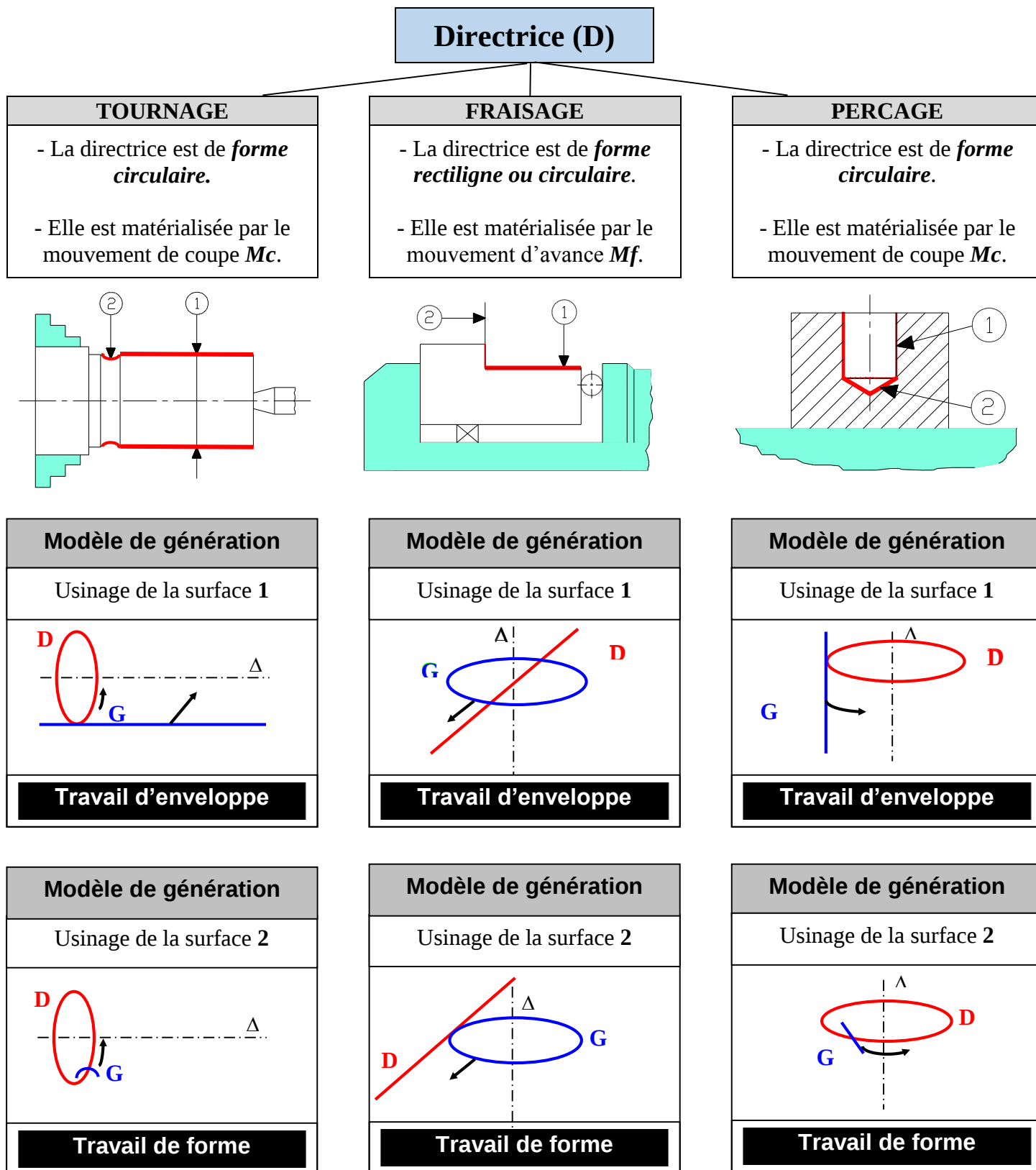


Figure II.5 Travail de forme : fraisage de profil

II.2.1.3 Représentation de la directrice



Δ : représente l'axe de rotation de la broche de la machine-outil.

Figure II.6 Génération des surfaces des différents procédés d'usinage

II.2.2 Opérations d'usinage

En fonction de la forme à donner à la surface et du type de la machine-outil, on distingue les opérations de coupe suivantes : le tournage, le perçage, la rectification, le fraisage, le rabotage, ...etc.

- **Opération de tournage**

Pendant le tournage, la pièce tourne autour de son axe, tandis que l'outil s'engage dans sa surface à une profondeur déterminée. L'outil est animé d'un mouvement d'avance continu parallèle ou perpendiculaire à l'axe de la pièce. Le tournage s'effectue sur machine dite tour.

- **Opération perçage**

Pendant le perçage, la pièce est fixe tandis que l'outil est animé de deux mouvements continus simultanés, le mouvement de coupe et le mouvement d'avance suivant l'axe de l'outil. Le perçage s'effectue sur des machines à percer appelées perceuses.

- **Opération rectification**

Au cours de la rectification, l'outil de coupe appelé meule est animé d'un mouvement de rotation, la pièce se déplace en translation (rectification plane) ou tourne autour de son axe tout en se déplaçant en translation le long de son axe (rectification cylindrique). La rectification se fait sur des rectifieuses planes et cylindriques.

- **Opération fraisage**

Au fraisage le métal est travaillé avec un outil spécial appelé fraise. La coupe s'effectue en faisant tourner la fraise et en amenant par un mouvement rectiligne la pièce. L'usinage des pièces au fraisage se fait sur des machines-outils appelées fraiseuses.

- **Opération rabotage**

Lors du rabotage, le mouvement rectiligne intéresse soit la pièce, soit l'outil. Sur une raboteuse, on met en mouvement la pièce tout en déplaçant latéralement l'outil d'une certaine quantité. Sur un étau limeur, c'est l'outil qui effectue un mouvement rectiligne en revenant à l'origine à la suite de chaque course de travail, tandis que la pièce se déplace latéralement d'une quantité égale à l'avance désirée. Le rabotage s'effectue sur des machines-outils appelées raboteuses ou étau-limeur.

- **Opération mortaisage**

Le mortaisage est une opération analogue au rabotage, seulement le mouvement de l'outil se fait verticalement, et ce mode d'usinage s'intéresse généralement au travail des surfaces intérieures.

II.3 Eléments de régime de coupe

La détermination des paramètres de coupe à une grande importance dans la production industrielle, car à titre d'exemple des régimes réduits augmentent considérablement le temps d'exécution de la pièce à usiner, et élèvent le prix de revient, aussi bien des régimes élevés ne sont pas avantageux non plus, parce que l'outil s'use rapidement, ce qui nous oblige à le changer très souvent, donc on aura toujours le même résultat que précédemment (augmentation du prix de revient de la pièce). Pour cela, les paramètres adoptés doivent être optimums pour assurer un prix de revient minimum de la pièce avec une plus grande productivité. Les conditions de coupe mises en jeu pendant le tournage, hormis les caractéristiques de l'outil, sont :

II.3.1 Vitesse de coupe

Le choix de la vitesse de coupe (V_c) dépend de la nature de l'opération effectuée et du couple outil-matière (caractéristiques physiques et mécaniques du matériau usiné et du matériau usinant). En pratique, la vitesse de coupe est réglée par la vitesse de rotation de la pièce. Cette vitesse dépend de la vitesse de coupe et du diamètre de la pièce à usiner. La relation reliant la vitesse de coupe et la vitesse de rotation est donnée par l'équation (II.1).

$$N [\text{tour.mn}^{-1}] = \frac{1000 \times V_c [\text{m.mn}^{-1}]}{\pi \times D [\text{mm}]} \quad (\text{I.1})$$

II.3.2 Avance par tour

L'avance correspond au déplacement de l'outil en fonction de la rotation de la pièce pendant la formation de copeau. L'avance est notée f et est exprimée en mm.tour^{-1} (Figure. II.7). Comme pour la vitesse de coupe, en pratique, l'avance s'exprime en vitesse d'avance V_f . Cette dernière représente la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport au bâti de la machine selon les axes longitudinal et transversal et en fonction du nombre de tours effectués par la pièce. Elle est donnée par l'Equation (II.2).

$$V_f = N \cdot f \quad (\text{II.2})$$

EXEMPLE D'APPLICATION 01 : (Cas de tournage)

On désire réaliser l'opération de chariotage de finition sur un **Tour parallèle** d'une pièce cylindrique de diamètre **6 cm** dont l'avance par tour est de **0.08 mm/tr**.

On donne : La vitesse de coupe à adopter pour cet usinage égal à **900 m/s**.

- 1- Déterminer la **fréquence de rotation (N)** à régler sur la machine.
- 2- Calculer la **Vitesse d'avance (Vf)**.

SOLUTION :

1- Détermination la fréquence de rotation (N) :

$$N [\text{tour.mn}^{-1}] = \frac{1000 \times V_c [\text{m.mn}^{-1}]}{\pi \times D [\text{mm}]} , \text{ Donc : } N = \frac{1000 \times 900}{3.14 \times 60 \times 60} = \boxed{79,61 \text{ tr/min}}$$

2- Détermination la Vitesse d'avance (Vf) :

$$\text{On a : } V_f = N \cdot f , \text{ Donc : } V_f = 79.61 \times 0.08 = \boxed{6,36 \text{ mm/min}}$$

En **fraisage**, l'avance est notée f_z et exprimée en mm/tr/dent . La formule permettant de connaître la vitesse d'avance est :

$$V_f = N \cdot f_z \cdot Z \quad (\text{II.3})$$

Avec : V_f en mm/min , f_z avance par dent en mm/tr/dent et Z nombre de dents.

EXEMPLE D'APPLICATION 02 : (Cas de fraisage)

On désire réaliser le surfacage d'une pièce en acier XC25, sur une fraiseuse vertical par une fraise de diamètre **3 cm** à **4 dents** ($Z=4$) avec une avance par dent égale à **0.05 mm/tr/dent**.

On donne : La vitesse d'avance égale à **20 mm/min**.

- 1- Déterminer la **fréquence de rotation (N)** à régler sur la machine.
- 2- Calculer la **Vitesse de coupe (Vc)** à adopter pour cet usinage.

SOLUTION :

1- Détermination la fréquence de rotation (N) :

$$\text{On a : } V_f = N \cdot f_z \cdot Z , \text{ Donc : } N = \frac{V_f}{f_z \cdot Z} = \frac{20}{0.05 \cdot 4} = \boxed{100 \text{ tr/min}}$$

2- Détermination la Vitesse de coupe (Vc) :

$$N [\text{tour.mn}^{-1}] = \frac{1000 \times V_c [\text{m.mn}^{-1}]}{\pi \times D [\text{mm}]}, \text{ Donc : } V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000}$$

$$V_c = \frac{3.14 \times 30 \times 100}{1000} = \boxed{9,42 \text{ m/min}}$$

II.3.3 Profondeur de passe

La profondeur de coupe est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de passe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance.



Figure II.7 Représentation des paramètres de coupe en tournage.

II.4 Machines-outils

II.4.1 Les machines-outils de tournage

Les tours sont des machines-outils employées pour l'usinage des pièces de révolution. La pièce est serrée dans un porte pièce (mandrin) ou entre les pointes, et reçoit un mouvement de rotation autour de son axe. C'est le mouvement principal ; l'outil est serré dans le porte outil et reçoit les mouvements rectilignes longitudinal ou transversal. Malgré la diversité des conceptions et des dimensions, tous les tours présentent beaucoup d'ensembles et d'éléments similaires (Figure II.8). Les machines-outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont :

II.4.1.1 Les tours parallèles à chariotier et à fileter

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe.

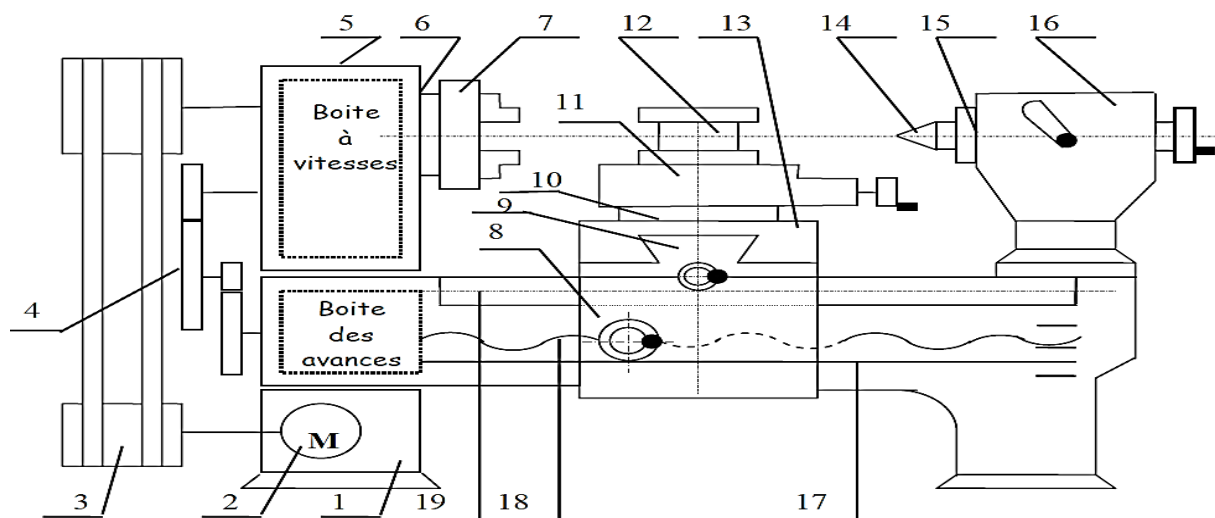


Figure II.8 Terminologie des organes principaux du tour.

Organe	Désignation	Organe	Désignation
1	Bâti	11	Chariot supérieur
2	Moteur	12	Porte-outil (tourelle)
3	Transmission par courroie	13	Chariot inférieur
4	Inverseur tête de cheval	14	Contre pointe
5	Poupée fixe	15	Fourreau
6	Broche	16	Poupée mobile
7	Mandrin	17	Barre de commande (de chariotage)
8	Tablier	18	Vis de commande (vis mère)
9	Trâinard	19	Crémaillère
10	Chariot intermédiaire		

Tableau II.2 Désignation des organes principaux du tour**II.4.1.2 Les tours à copier**

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque.

II.4.1.3 Les tours semi-automatiques

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonal munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique, La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série.

II.4.1.4 Les tours automatiques

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce, Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries.

II.4.1.5 Les tours automatiques multibroches

Ce type de tour comporte par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée, Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine. Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches.

II.4.1.6 Les tours à commande numérique

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces. La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives.

II.4.1.1.1 Les principales opérations de tournage

En tournage les outils ne comportent qu'une seule arête tranchante dont l'engagement dans la matière provoque la coupe de celle-ci. Le déplacement de l'outil se fait en une ou deux directions principales de travail, selon l'angle de direction de l'arrête de coupe κ_r . Si cet angle est droit, un seul déplacement sera possible, quand il a des valeurs inférieures à cette valeur on peut l'utiliser pour travailler dans les deux sens, longitudinal et transversal, des déplacements permis sur la machine. Le mouvement de coupe M_c est réalisé par la pièce qui est serrée dans un porte-pièce appelé mandrin. Il est possible de réaliser des opérations de tournage extérieur et intérieur. Sur la figure suivante sont reproduites les diverses opérations d'usinage pouvant être mises en place sur les machines-outils de type tours.

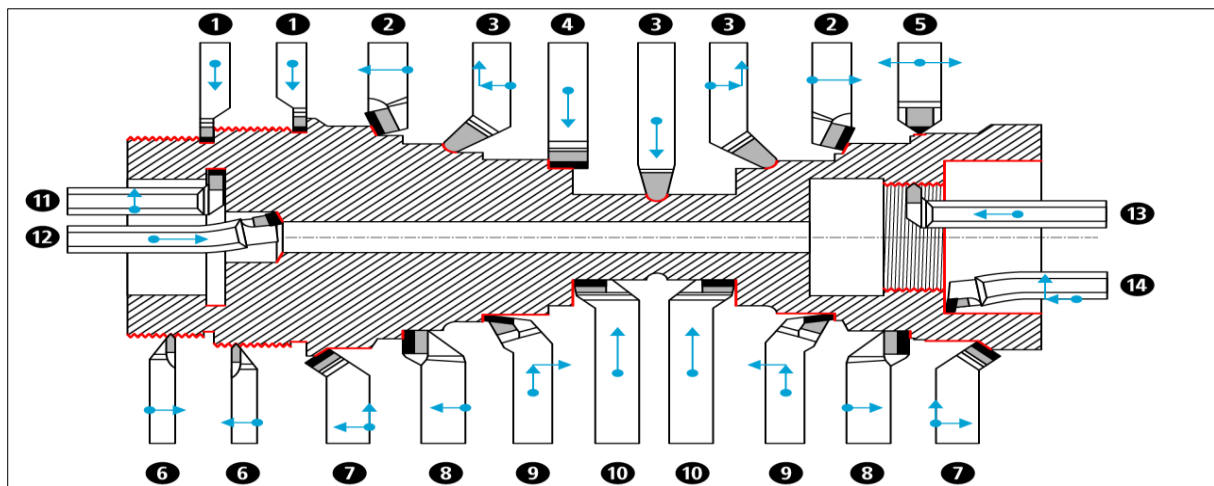


Figure II.9 Différents outils et opération de tournage.

Outil	Désignation outil	Opération de tournage
1	Outil à saigner	Tronçonnage
2	Outil à charioter	chariotage
3	Outil à retoucher	Chanfreinage
4	Outil pelle	rainurage
5	Outil à retoucher	Gorge
6	Outil à fileter (extérieur)	Filetage extérieur
7	Outil à charioter coudé	chariotage et chanfreinage
8	Outil couteau	Chariotage et dressage
9	Outil à dresser d'angle	Dressage d'angle
10	Outil à dresser les faces	dressage
11	Outil à chambrer	Gorgage intérieur
12	Outil à aléser	Alésage
13	Outil à fileter (intérieur)	Filetage intérieur
14	Outil à aléser et dresser	Alésage et dressage

Tableau II.3 Désignation des outils et opération de tournage.

II.4.2 Les machines-outils de Fraisage

Une fraiseuse est une machine-outil utilisée pour usiner tous types de pièces mécaniques, à l'unité ou en série, par enlèvement de matière à partir de blocs ou parfois d'ébauches estampées ou moulées, à l'aide d'un outil coupant nommé **fraise**. En dehors de cet outil qui lui a donné son nom, une fraiseuse peut également être équipée de foret, de taraud ou d'alésoir.

La fraise munie de dents est mise en rotation et taille la matière grâce à sa rotation et au mouvement relatif de la fraise par rapport à la pièce. La forme de la fraise est variable ; elle peut être cylindrique, torique, conique ou quelquefois de forme encore plus complexe. La fraise et la pièce sont montées sur des glissières et peuvent se déplacer relativement suivant des coordonnées X Y ou Z (on parle alors de fraiseuse trois axes). Par convention, l'axe Z est l'axe de rotation de la broche, les axes X et Y sont contenus dans un plan perpendiculaire à Z. Il existe des fraiseuses à quatre axes ou cinq axes.

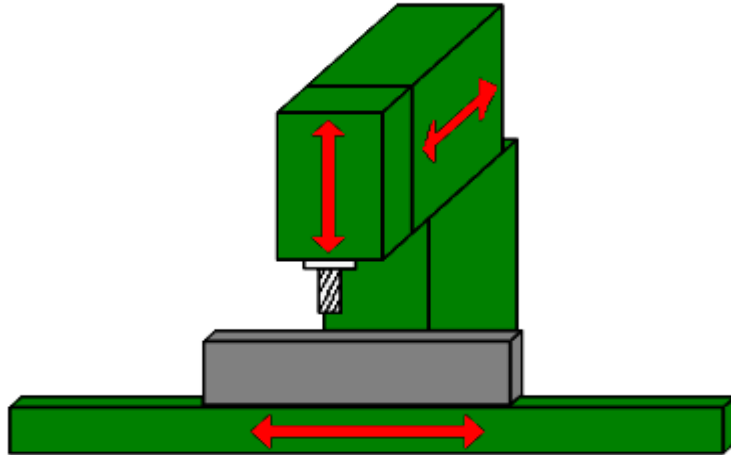


Figure II.10 Principe du fraisage.

Les machines à fraiser les plus répandues en construction mécanique et dans l'usinage des métaux sont de trois types : la fraiseuse horizontale, la fraiseuse verticale et la fraiseuse universelle.

II.4.2.1 Fraiseuse horizontale

Il y a des fraiseuses horizontales (Figure II.11) dont la table est mobile en translation selon les trois directions (mouvement latéral, transversal et vertical), peut aussi pivoter d'un certain angle, ce pivotement les classe dans la catégorie des fraiseuses universelles. Dans ce cas, l'angle de rotation de la table est lu directement sur une échelle spéciale. Il y a des fraiseuses universelles qui offrent une possibilité d'inclinaison de la broche par rapport à la pièce pour donner plus de souplesse dans la réalisation des pièces par l'opérateur.

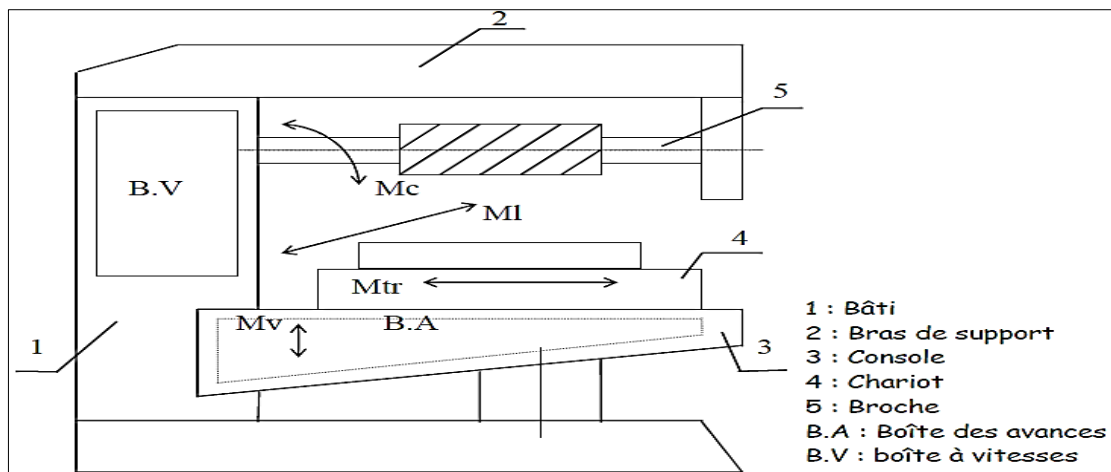


Figure II.11 Schéma d'une fraiseuse horizontale

II.4.2.2 Fraiseuse raboteuse

Ce sont des machines sur lesquelles on usine des pièces encombrantes (Figure II.12). Le nombre d'outils qui peuvent travailler en même temps peut être de 4 outils.

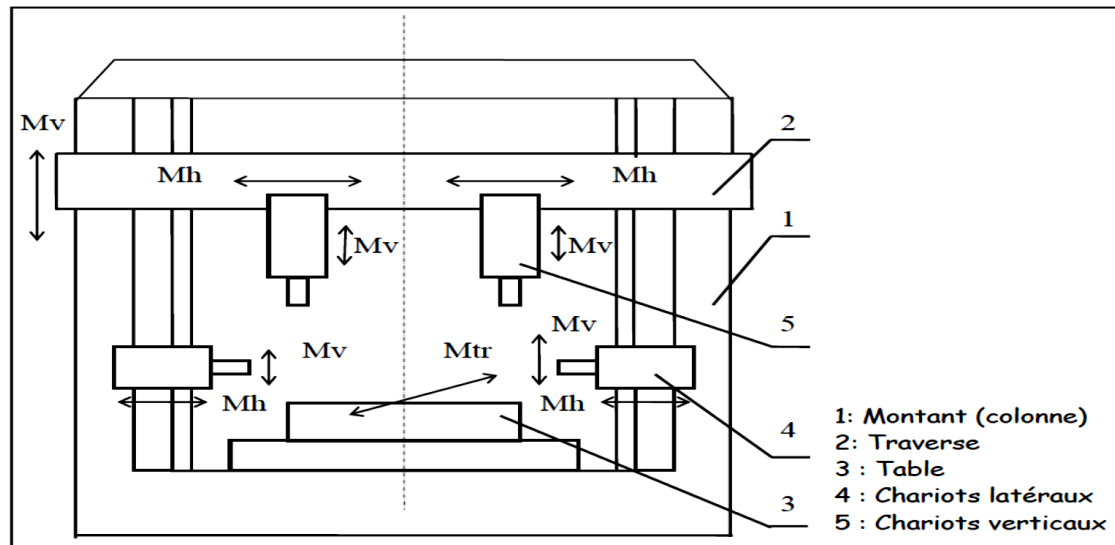


Figure II.12 Schéma d'une fraiseuse genre raboteuse

II.4.2.1.1 Les principales opérations de fraisage

En fraisage les outils comportent plusieurs arêtes tranchantes. Par rapport au tournage le déplacement selon les axes principaux de la machine (trois directions de travail) n'est plus réalisé par l'outil mais par la pièce qui est fixée dans un porte-pièce appelé étau. Le mouvement de coupe M_c est réalisé par l'outil. Sur la figure suivante sont reproduites les diverses opérations d'usinage pouvant être mises en place sur les machines-outils de type fraiseuses.

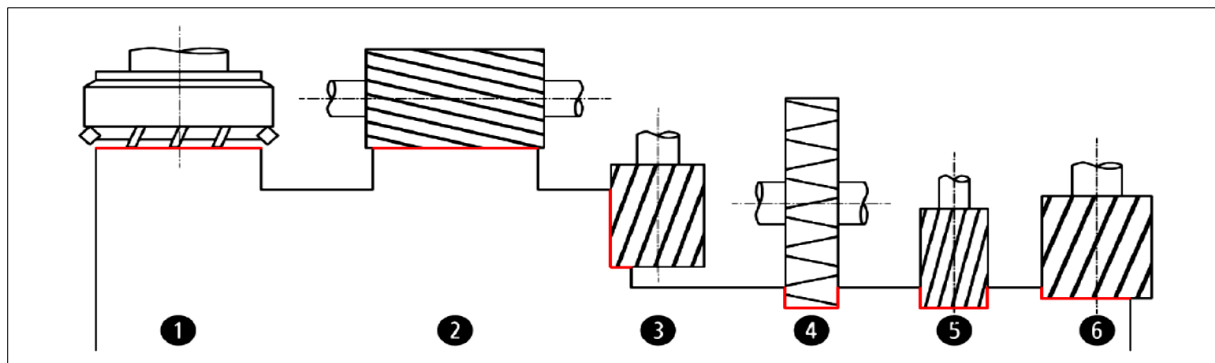


Figure II.13 Différents outils et opération de fraisage.

N°. Outil	Désignation outil	Opération de fraisage
1	Fraise cloche	Surfaçage en bout
2	Fraise de profil	Surfaçage de profil
3	Fraise combiné	Surfaçage – dressage profil
4	Fraise 3 tailles	Rainurage de forme
5	Fraise 2 tailles	Surfaçage en bout et en roulant
6	Fraise 2 tailles	Surfaçage – dressage face

Tableau II.4 Désignation des outils et opération de fraisage

II.4.2.1.2 Les modes de travail d'une fraise

- **Fraisage en opposition**

- L'attaque d'une dent se fait sur une épaisseur de copeau nulle, donc pas de choc.
- En début de coupe il peut y avoir un refus de coupe (copeau minimum), donc un mauvais état de surface.

Le mouvement d'avance Mf de la pièce et le mouvement de coupe Mc de la fraise sont, dans la zone de fraisage, de sens contraire.

Ce procédé est à utiliser uniquement sur les fraiseuses conventionnelles.

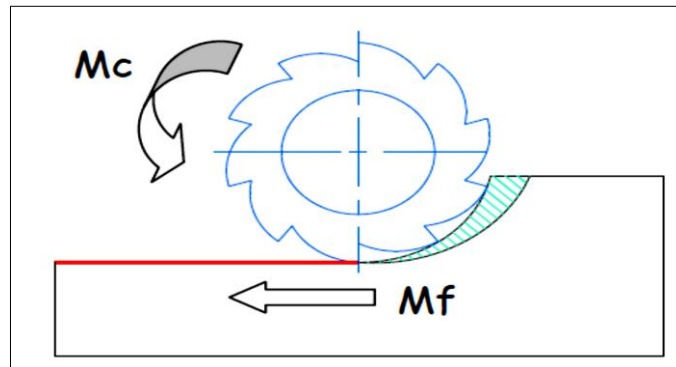


Figure II.14 Fraisage en opposition

- **Fraisage en concordance ou en avalant**

- L'attaque se fait sur un copeau épais, donc un bon état de surface.
- Les dents attaquent directement sur une grande largeur de copeau ce qui occasionne des chocs répétés, donc une usure de l'outil.

Le mouvement d'avance Mf de la pièce et le mouvement de coupe Mc de la fraise sont, dans la zone de fraisage, de même sens.

Ce procédé est à utiliser uniquement sur les machines-outils à commande numérique (équipée d'un système de rattrapage des jeux).

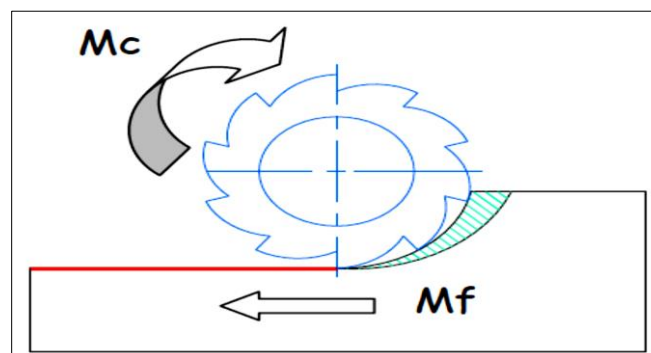


Figure II.15 Fraisage en avalant.

II.4.3 Perçage

Le terme de perçage recouvre toutes les méthodes ayant pour objet d'exécuter des trous cylindriques dans une pièce avec des outils de coupe par enlèvement de copeaux. En plus du perçage de trous courts et du forage de trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que brochage, alésage, réalésage et certaines formes de finition comme le calibrage et le galetage. Tous ces procédés ont en commun d'utiliser en combinaison un mouvement rotatif et un mouvement d'avance linéaire.

II.4.3.1 La perceuse

La perceuse (Figure II.16) 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 :

- Les perceuses sensibles.
- Les perceuses à colonne.
- Les perceuses radiales.
- Les machines portatives à air comprimé ou électrique.

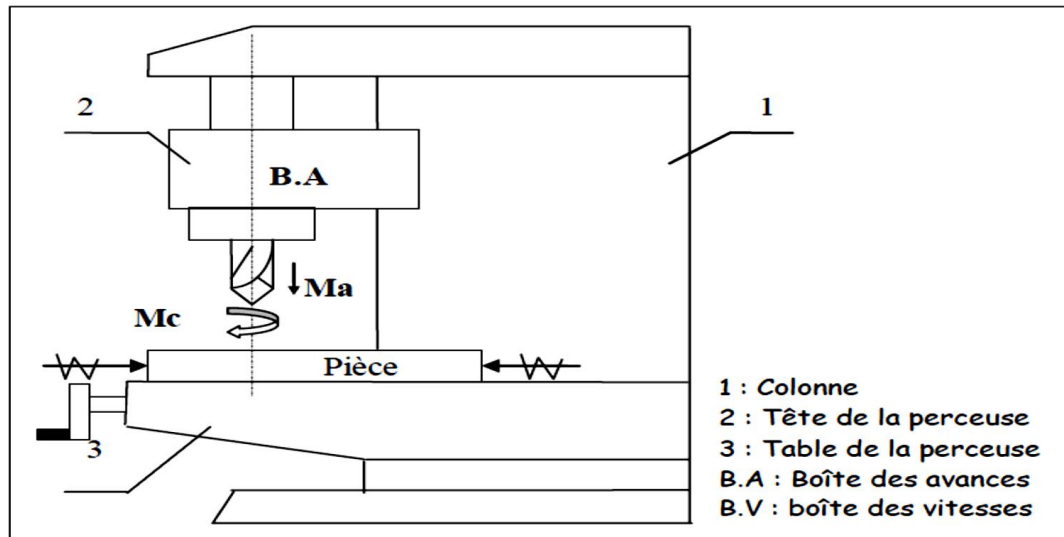


Figure II.16 Schéma d'une perceuse.

EXEMPLE D'APPLICATION : (Cas de perçage)

Quelle sera la vitesse de rotation d'un foret Ø 10 mm si en perçant un trou sur une pièce en acier E24 ? Sachant que la vitesse de coupe égale à 28 m/min et l'avance par tour 0.2 mm/tr.

- Calculer la vitesse d'avance de ce foret.

SOLUTION :

1- Détermination la vitesse de rotation (N) :

$$N [\text{tour.mn}^{-1}] = \frac{1000 \times V_c [\text{m.mn}^{-1}]}{\pi \times D [\text{mm}]}, \text{ Donc : } N = \frac{1000 \times 28}{3.14 \times 10} = \boxed{892 \text{ tr/min}}$$

2- Détermination la Vitesse d'avance (Vf) :

$$\text{On a : } Vf = N \cdot f, \text{ Donc : } Vf = 892 \times 0.2 = \boxed{178 \text{ mm/min}}$$

II.4.4 Rectifieuse

En production industrielle, la rectifieuse est une machine-outil qui permet de faire de la rectification. Cette machine-outil utilise une meule afin de produire une surface parfaite de rugosité faible après usinage par une fraiseuse ou par un tour.

Dans un atelier de rectification, on trouve plusieurs types de rectifieuses, parmi elles :

- les rectifieuses planes,
- les rectifieuses cylindriques,
- les rectifieuses sans centres,
- les machines de superfinition,
- les affûteuses.

II.4.4.1 Rectifieuse plane

Elle est constituée d'un bâti de fonte, d'une poupée porte-meule et d'une table horizontale mobile sur les glissières du bâti. L'avance de la table est à commande hydraulique. La pièce est immobilisée sur la table au cours du travail grâce à l'attraction exercée par une plaque électromagnétique (Figure II.17). Un moteur électrique entraîne en rotation la broche et la meule au moyen d'une transmission par courroie. L'avance est assurée par le déplacement transversal de la poupée porte-meule commandé par une vis.

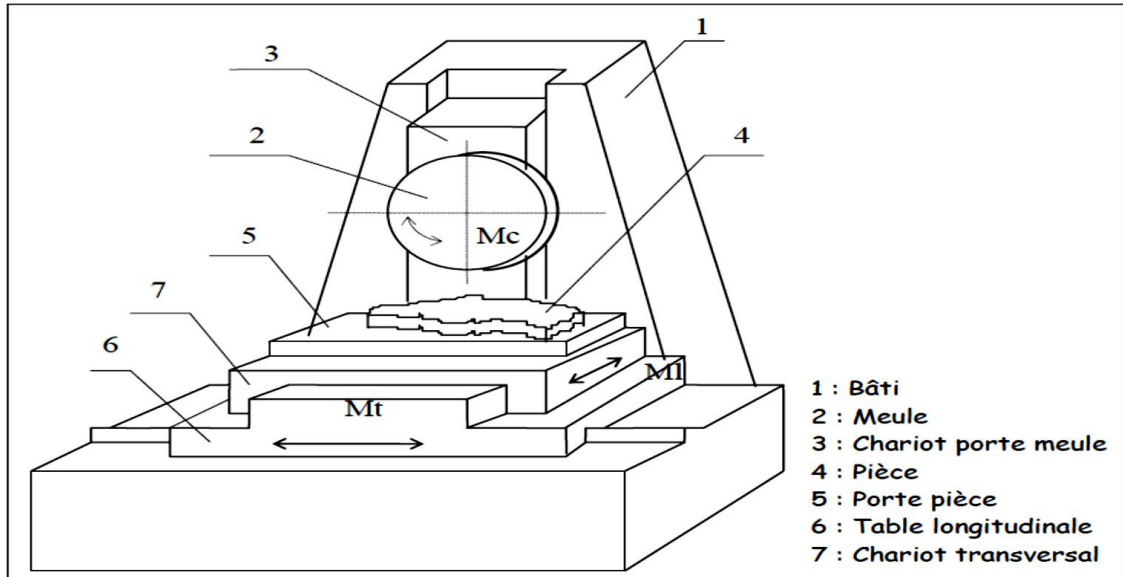


Figure II.17 Schéma d'une rectifieuse plane.

II.4.4.2 Rectifieuse cylindrique

La construction de la rectifieuse cylindrique est plus complexe (Figure II.18). En plus d'une poupée porte-meule montée sur les glissières du bâti, et d'une table à commande hydraulique mobile en direction longitudinale, cette machine comprend une poupée fixe et une poupée mobile fixée sur la table. La pièce montée entre les centres de ces poupées est entraînée en rotation à une vitesse atteignant 3000 Tr/min. La poupée porte-meule est déplacée en sens transversal au moyen d'un mécanisme d'avance transversale.

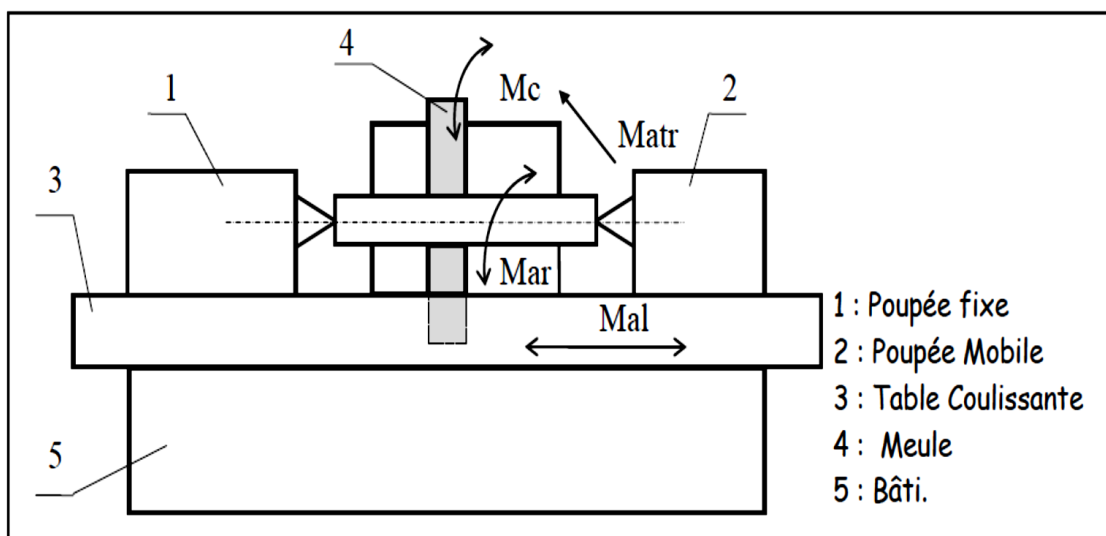


Figure II.18 Schéma d'une rectifieuse cylindrique.

II.4.4.3 Rectifieuse sans centres

C'est une variante de la rectifieuse cylindrique. Elle porte deux meules animées de rotation dans un même sens, mais une meule constitue l'outil de travail, tandis que l'autre assure l'entraînement (Figure II.19).

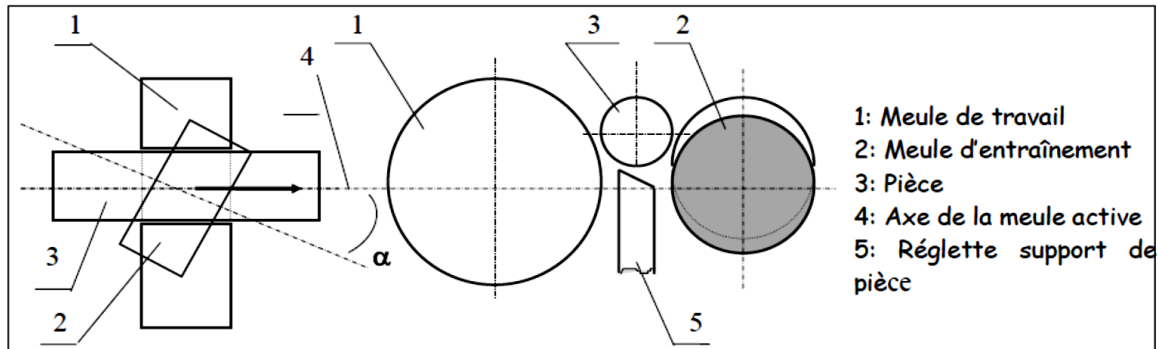


Figure II.19 Schéma d'une rectifieuse sans centres.

II.4.5 Brochage

Le brochage est un procédé d'usinage qui consiste à enlever la matière par coupe à l'aide d'un outil à dents multiples étagées qui se déplace parallèlement à la surface à usiner (Figure II.19). L'outil utilisé est appelé broche et la machine est appelée brocheuse. L'opération de brochage est effectuée généralement en une seule passe rectiligne dans laquelle sont incluses les opérations d'ébauche et de finition. Le temps de coupe est relativement court.

Les broches, outils de forme, sont constituées d'une série de dents travaillant successivement. Chaque dent à son arête de coupe décalée de la précédente d'une distance de l'épaisseur du copeau (la progression).

L'ensemble des dents génère le profil fini à partir du profil brut, par le passage de la broche, au travers de la pièce (broche d'intérieur) ou devant la pièce (broche d'extérieur) suivant le mouvement de coupe rectiligne.

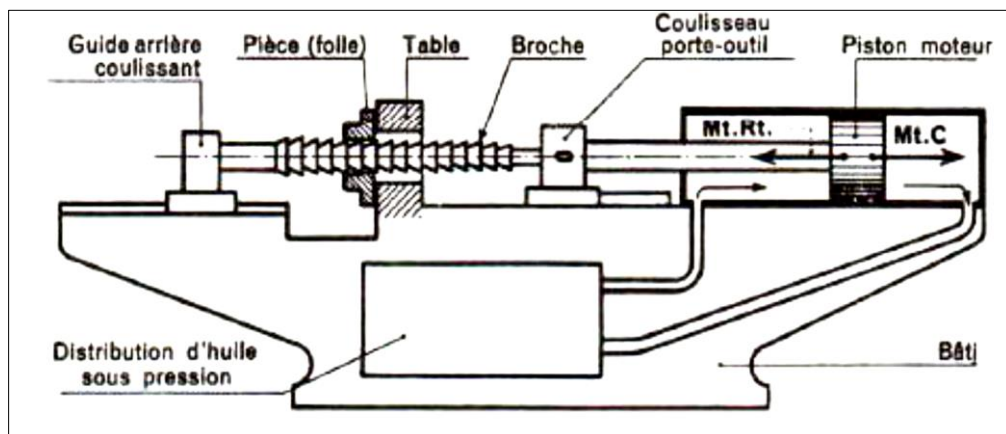


Figure II.20 Machine à brocher horizontale.

II.4.5.1 Brochage intérieur

Le brochage s'effectue par le passage de broche dans le trou d'ébauche. La broche de type axile est attelée à la brocheuse par la tête de traction. L'effort de coupe plaque et maintient la pièce sur son appui perpendiculaire au mouvement de coupe. La fixation de la pièce n'est généralement pas nécessaire.

II.4.5.2 Brochage extérieur

La broche, de type prismatique, est fixée au coulisseau de la machine. Le brochage s'effectue généralement à partir de l'ébauche du profil brut (moulage, etc.). Il est simultané pour un groupe de formes associées sur une pièce ou une grappe de petites pièces.

II.4.6 Étau limeur

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. L'architecture d'un étau limeur est constituée de :

- le bâti en fonte contenant les organes mécaniques :
 - moteur électrique, hydraulique ou pneumatique
 - boîte de vitesse,
 - système bielle-manivelle,
 - mécanisme d'avance de la table porte-pièce.
- le coulisseau qui se déplace horizontalement sur le dessus du bâti et qui porte le chariot porte-outil,
- la table porte pièce qui coulisse sur une glissière horizontale, qui elle-même coulisse sur une autre glissière verticale. Cette table, selon les modèles, peut pivoter selon un axe parallèle à la trajectoire du coulisseau et être soutenue en bout par bretelle.
- un socle fixé au sol et supportant l'ensemble.

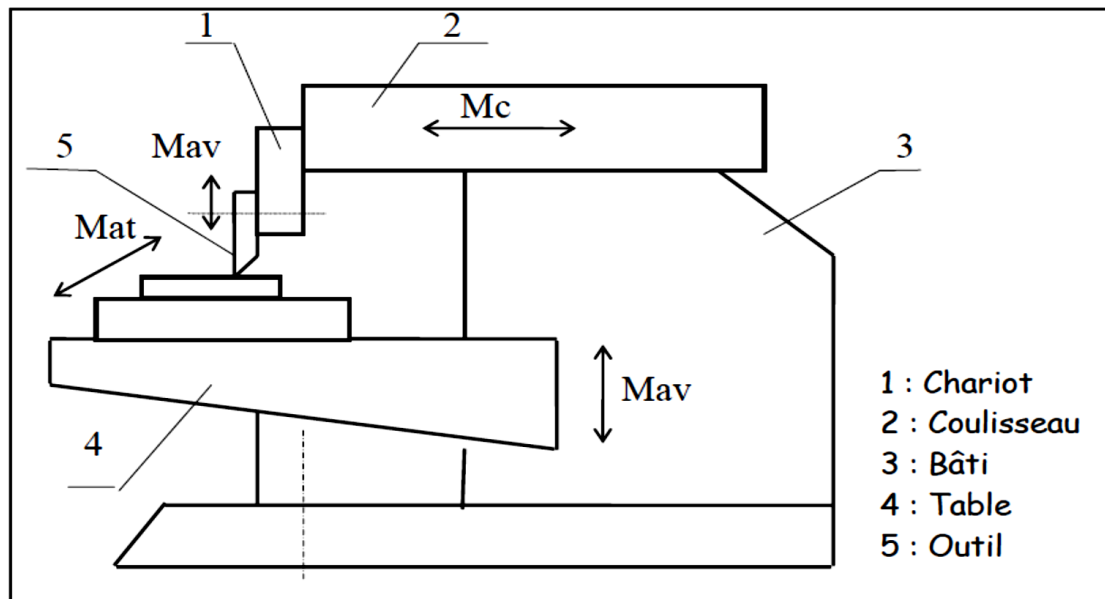


Figure II.20 Étau limeur.

II.4.6.1 Mouvement de coupe

- Le coulisseau est entraîné en translation dans un mouvement alternatif par une bielle commandée par un plateau manivelle portant une couronne dentée entraînée par la boîte de vitesses.
- Le plateau manivelle comporte un tourillon à patin qui décrit un cercle de rayon variant selon le réglage qui détermine la course de l'outil (longueur d'usinage). Cette course peut

être positionnée par rapport à la pièce par l'intermédiaire d'un dispositif de blocage au-dessus du coulisseau.

- Les deux mouvements alternatifs du coulisseau ont des vitesses linéaires variables dues au système bielle-manivelle et à vitesse de rotation constante :
 - Mouvement de coupe (aller) : l'arc de cercle décrit par le tourillon est maximal
 - Mouvement retour : l'arc de cercle est mini donc, à vitesse de rotation constante, le mouvement du coulisseau est plus rapide.

II.4.6.2 Utilisation

- L'étau limeur est utilisé pour des pièces demandant un usinage simple : surfacage, décroutage et même rainurage mais aussi pour des travaux plus complexes ayant des formes courbes (certains étaux limeurs sont munis de copieur). Par l'emploi d'outils simples identiques à ceux utilisés sur les tours à métaux, c'est une machine-outil qui a un coût d'utilisation faible.
- Comme pour la table des raboteuses, l'étau limeur a vu évoluer le mouvement du coulisseau et de la table par des commandes hydrauliques.
- Le principe même du fonctionnement d'un étau limeur ne permet pas des cadences de production très importante par rapport à une fraiseuse.

II.4.7 Mortaiseuses

Une machine à mortaiser présente un coulisseau vertical et une table circulaire (Figure II.21); on imprime à la table un mouvement d'avance longitudinal, transversal ou de rotation. Elles sont de même configuration que les étaux limeurs et principalement utilisées pour la réalisation de petites cannelures pour la synchronisation des dentures de boîtes à vitesses.

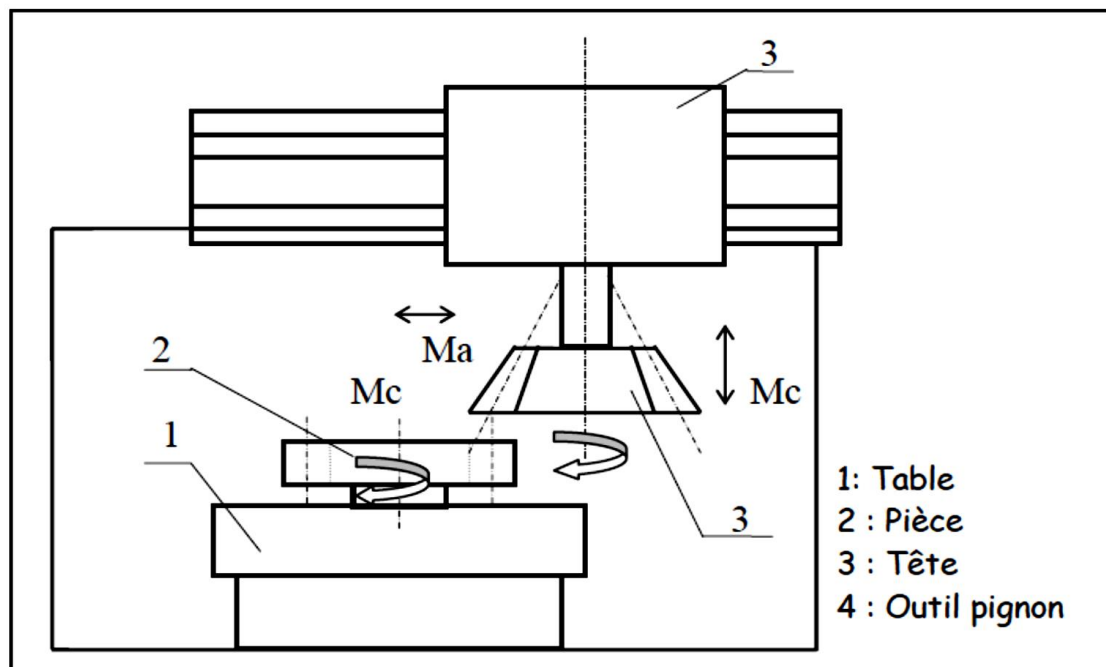


Figure II.21 Schéma d'une machine à mortaiser.

II.4.8 Tailleuse d'engrenages

Comme le montre le schéma de la Figure II.22, les machines de taillage se caractérisent par 6 axes :

- 3 axes de translation de la fraise-mère par rapport à la pièce,
- 3 axes de rotation (2 axes permettant de réaliser l'engrènement du système roue et vis-sans-fin et 1 axe de mise en position permettant d'orienter l'axe de l'arbre porte-fraise par rapport à l'hélice de la denture à tailler).

II.4.8.1 Définition des engrenages

Un engrenage est un ensemble de roues munies de dents permettant de transmettre un mouvement de rotation d'une pièce vers une ou plusieurs autres pièces. La plupart des engrenages possèdent des dents à profil en développante de cercle. Il s'agit du profil de la surface en contact entre deux roues dentées. En pratique, les principales formes des dentures d'engrenages sont droites, hélicoïdales ou en chevron.

Les techniques de mise en forme par enlèvement de matière des profils spécifiques des dentures des engrenages sont multiples. Il est possible de distinguer Trois grandes familles d'opérations d'usinage pour la génération des roues dentées :

- Taillage à l'outil crémaillère,
- Taillage à l'outil pignon,
- Taillage à la fraise-mère.

Ces trois techniques de génération de dentures ne sont donc pas en mesure de réaliser des dentures finies. Chacune de ces techniques est décrite brièvement dans les paragraphes suivants.

II.4.8.2 Taillage à l'outil crémaillère

Cette technique, dite de génération, utilise des peignes en acier rapide munis d'un mouvement alterné permettant de couper la matière. Cette technique très lente nécessite des machines spécifiques et mises en œuvre par des opérateurs hautement qualifiés. Elle est donc réservée à des applications de très petites séries à haute valeur ajoutée (roues de très gros diamètres). Elle présente cependant un avantage intéressant, car les outils étant de géométries très simples, ils sont facilement et rapidement réalisables et réaffûtables. Cela permet la fabrication de dentures prototypes de géométries quelconques (non normalisées) pour des applications à hautes valeurs ajoutées nécessitant une réactivité importante (Formule 1, aéronautique, prototypes pour nouvelles boîtes de vitesses, etc.).

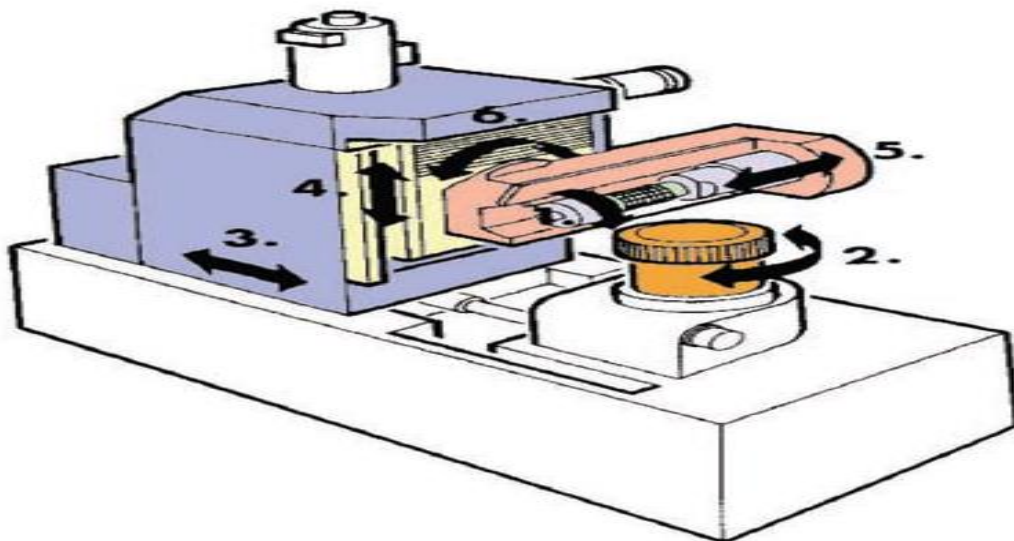


Figure II.22 Machine taillage à l'outil crémaillère.

La machine support de l'étude permet de tailler des roues dentées par le procédé de génération (mouvements conjugués d'engrènement de l'outil et de la roue à tailler). Trois principes sont couramment utilisés : le taillage par outil crémaillère, par fraise mère et par outil pignon. La Figure II.22 met en évidence les différentes mobilités nécessaires aux réglages et à l'usinage. La génération s'effectue à partir d'un outil appelé fraise mère, qui est un pignon cylindrique à denture hélicoïdale dont les flancs de dents sont des hélicoïdes développables. Cet outil possède des arêtes coupantes disposées suivant une hélice d'angle primitif β_0 (proche de 90°) qui lui donnent plutôt l'aspect d'une vis, d'où le vocabulaire « nombre de filets Z » pour désigner le nombre de dents de l'outil. Généralement, $ZF = 1$, plus rarement $ZF = 2, 3$, ou 4 .

Dans ce mode de taillage, l'ensemble outil fraise mère et roue à tailler constitue un engrenage gauche. Le seul impératif géométrique à respecter est que la tangente à l'hélice primitive de la fraise mère reste constamment confondue avec la tangente à l'hélice primitive de la roue. Le taillage débute en plaçant l'outil au-dessus de la roue, puis on anime la fraise mère du mouvement de coupe et d'un mouvement d'avance de vitesse faible parallèlement à l'axe de la roue. L'obtention du mouvement de génération nécessite de lier la rotation de la roue à tailler NR et la rotation de l'outil fraise mère NF.

II.5 Matériaux et géométrie des outils

• Matériaux des outils de coupe

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

– Acier rapide

Ce sont des aciers fortement alliés contenant 0.7 à 1.6 % de carbone et tungstène ou molybdène qui caractérisent des familles différentes. D'autres éléments additifs viennent renforcer les propriétés de ces matériaux (Chrome (Cr), Vanadium ou cobalt (Co) par exemple). Avec ces matériaux on obtient des duretés de l'ordre de 700 à 1000 HV. Ils sont beaucoup utilisés pour le perçage (80 % du marché), mais de moins en moins pour la production industrielle de pièces en tournage.

– Les carbures cémentés

Sont des substrats obtenus par frittage de poudres métalliques sans fer. Ces matériaux sont souvent formés de carbure de tungstène (WC), de titane (TiN) ou de silicium (Si) pour les plus utilisés. Afin de lier les grains de carbure entre eux, nous utilisons des éléments métalliques comme le cobalt, qui allie sa ductilité à la dureté des carbures. Nous obtenons avec ces matériaux des outils présentant des duretés variables comprises entre 1250 et 1800 HV. Il existe un grand nombre de possibilité d'usinage avec ces matériaux. Ce sont les plaquettes proposées par les principaux fabricants d'outil dans le cas de l'usinage d'alliage d'aluminium.

– Les cermets

Sont des carbures, des nitrures, des carbonitrures ou des borures liés par un métal ou un alliage ferreux. Les liants sont donc de plusieurs types (cobalt, nickel, nickel - fer, nickel - chrome, etc...). La dénomination « cermet » est peu utilisée dans l'industrie car souvent ils sont assimilés à des carbures cémentés. Nous obtenons avec ces matériaux des outils pouvant avoir des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Leur dureté à chaud permet de faire des opérations d'usinage dans des conditions extrêmes (jusqu'à 1000°C), les cermets ont des applications très

diverses (Tournage, Fraisage, etc.) et ont une très bonne résistance mécanique, une faible conductivité thermique et une bonne résistance à la diffusion et à l'usure. Ils sont donc souvent utilisés en tournage de semi-finition ou de finition des aciers.

Leur grande dureté n'est toutefois pas utile dans le cadre de l'usinage des alliages d'aluminium.

– Les Céramiques

Il existe deux grandes familles de céramiques : les céramiques à base d'alumine et celles à bases de nitrure de silicium (figure I-19). Les céramiques se déclinent essentiellement sous quatre formes :

a) Les céramiques pures ou céramiques blanches contenant un pourcentage élevé d'alumine Al_2O_3 et une quantité faible de ZrO_2 pour augmenter la ténacité. Elles présentent une haute stabilité chimique comparée aux carbures et nitrures. En revanche, leur ténacité est moindre. Leur faible résistance aux chocs thermique et mécanique les ont confiné aux opérations d'usinage sans chocs des aciers et fontes grises à haute vitesse de coupe sans lubrification. A faibles vitesses de coupe, elles peuvent usiner des aciers de construction, des aciers rapides ou des aciers cimentés ou nitrurés ;

b) Les céramiques mixtes ou céramiques noires contenant un pourcentage élevé d'alumine et au moins 30% de carbure et/ou de nitrure de titane. Ces derniers favorisent la résistance aux chocs thermiques en accroissant la conductibilité du matériau de coupe. Les gradients et donc les contraintes thermiques diminuent au sein de l'outil favorisant ainsi l'emploi de lubrifiants et ainsi de plus hautes vitesses de coupe. La dureté à chaud des céramiques mixtes est supérieure à celle des céramiques pures (à 1000°C , 800 HV10 pour une céramique mixte composée de 60% de Al_2O_3 , 30% de TiC et 10 % de ZrO_2 contre 650 HV10 pour céramique pure composée de 90% de Al_2O_3 et 10 % de ZrO_2). Le domaine d'emploi de ces céramiques est l'usinage des fontes dures, des alliages réfractaires à base nickel ou cobalt et des aciers rapides ;

c) Les céramiques renforcées ou whiskers se composent d'une matrice d'alumine et de 25% de carbure de silicium (SiC) sous la forme de bâtonnets ou trichites de $2\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre et de $20\text{ }\mu\text{m}$ de long. Le carbure de silicium augmente la ténacité (dans un rapport de 2 à 3 par référence à la céramique pure), la dureté à l'ambiante (2000 HV) et la résistance aux chocs thermiques. L'accroissement de la ténacité est notamment dû à la nécessité de déchausser les fibres afin de rompre le matériau. L'adhésion fibre / matrice est ainsi le paramètre critique. Le domaine d'emploi de ces céramiques couvre le tournage à vitesse élevée des superalliages à base nickel ou cobalt (ex : Inconel 718 à 500 m/min) ainsi que l'usinage des aciers et fontes traitées. La meilleure ténacité autorise la coupe intermittente ;

d) Les céramiques à base de nitrure de silicium Si_3N_4 elles se composent de nitrure de silicium et d'additifs destinés à améliorer le frittage (ex : Al_2O_3 , Y_2O_3 , MgO , BeO) et de TiC destiné à accroître la dureté et donc la résistance à l'usure. Sa conductivité thermique élevée lui confère une meilleure résistance aux chocs. Sa dureté à chaud est supérieure à celle des carbures et autres céramiques à base d'oxydes (900 HV à 1000°C). Sa résistance à l'usure et sa stabilité chimique sont légèrement moindres que celle des céramiques à base d'oxydes. Elle convient à l'usinage des superalliages à base nickel et des fontes malléables.

– Nitrures de Bore Cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique est le matériau le plus dur après le diamant. Le Pc-BN (le nitrure de bore polycristalin) est 50 fois plus résistant à l'abrasion que le carbure de tungstène et 5 fois plus que l'oxyde d'alumine et le nitrure de silicium. Il conserve sa résistance et n'a pas tendance à réagir avec le fer ou l'air aux hautes températures de coupe qui sont caractéristiques de l'usinage des aciers durs. Sa température d'utilisation en atmosphère oxydante atteinte 1400°C. En atmosphère inerte ou réductrice, il résiste à des températures allant jusqu'à 2000°C.

– Le diamant

Le diamant naturel monocristallin est le matériau le plus dur connu à l'heure actuelle (figure I-20). Cependant, le diamant s'oxyde dans l'air et réagit chimiquement avec des métaux ferreux. Pour cette raison, il est utilisé pour l'usinage des métaux non ferreux comme les alliages d'aluminium, les composites à matrice de métal, les alliages de cuivre, les métaux précieux (or, platine), les plastiques abrasifs, les verres, les composites à fibre de carbone, les céramiques vertes, les carbures de tungstène, le bois et les pierres naturelles. En usinage, les diamants sont utilisés sous trois formes : le diamant naturel monocristallin, le diamant synthétique polycristallin et comme un revêtement des carbures.

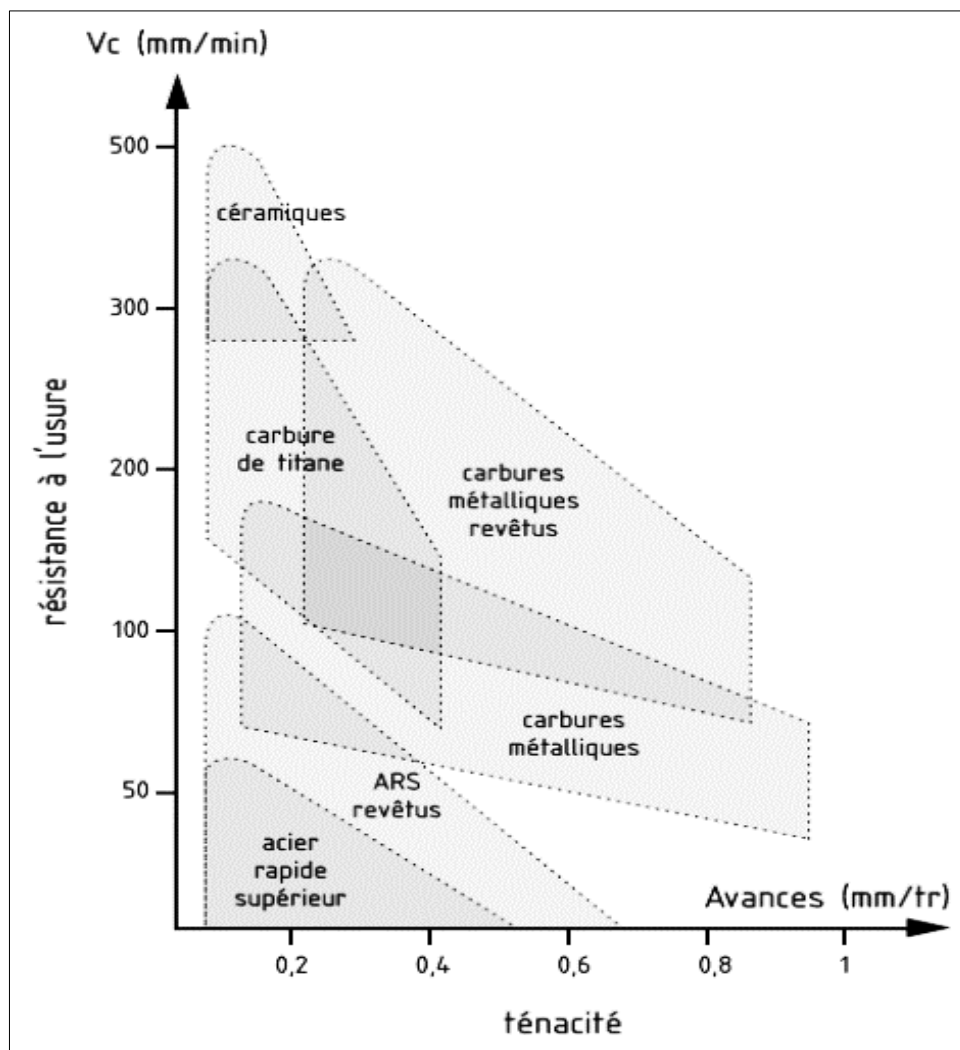


Figure II.23 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant

II.6 Géométrie des outils

Dans la théorie sur la formation du copeau et dans le cadre de la coupe orthogonale, il faut noter l'importance des angles de la face d'attaque γ et de la face de dépouille α . Ces angles sont définis dans un plan perpendiculaire à l'arête de coupe, ce plan permettant la mise en place d'un système d'axes lié à la direction de la vitesse de coupe :

- α est l'angle de dépouille ;
- γ est l'angle de coupe ;
- β est l'angle de taillant ;
- relation permanente $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$.

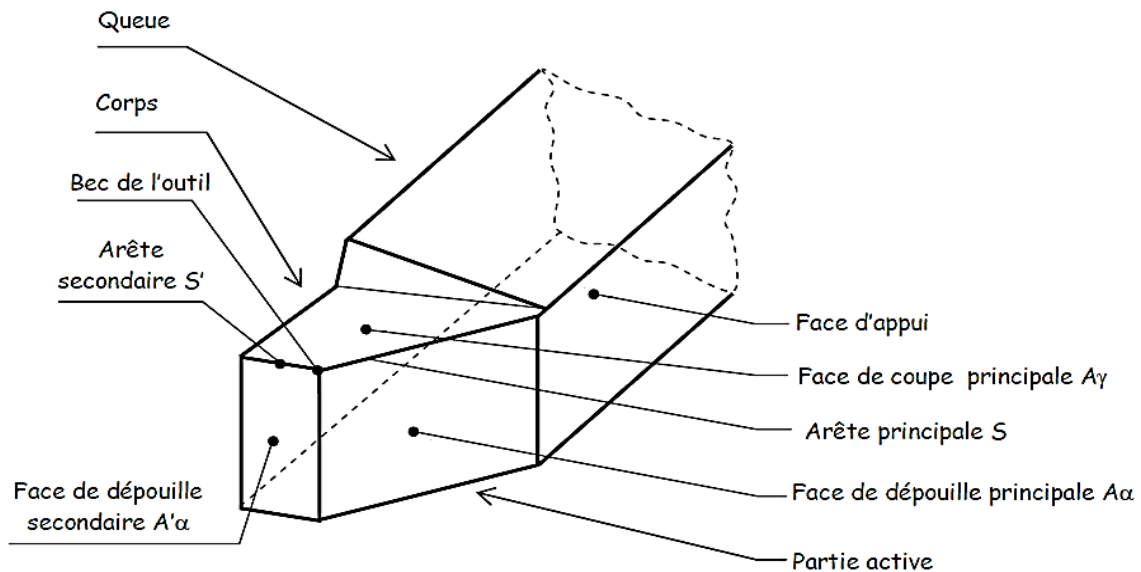


Figure II.24 Eléments d'un outil de coupe

Dans la pratique la coupe orthogonale n'est qu'un cas particulier. Le plus souvent, l'arête de coupe n'est pas perpendiculaire à la direction de la vitesse de coupe et une deuxième arête appelée arête secondaire est nécessaire pour détacher le copeau de la surface engendrée. L'arête secondaire est l'intersection de la face de coupe et de la face de dépouille secondaire.

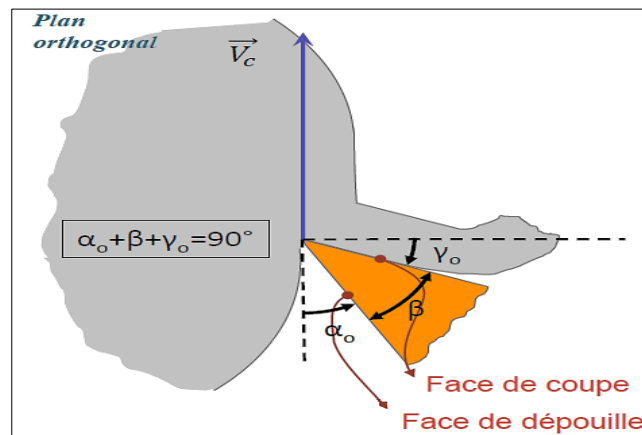


Figure II.25 Géométrie de l'outil en chariotage.

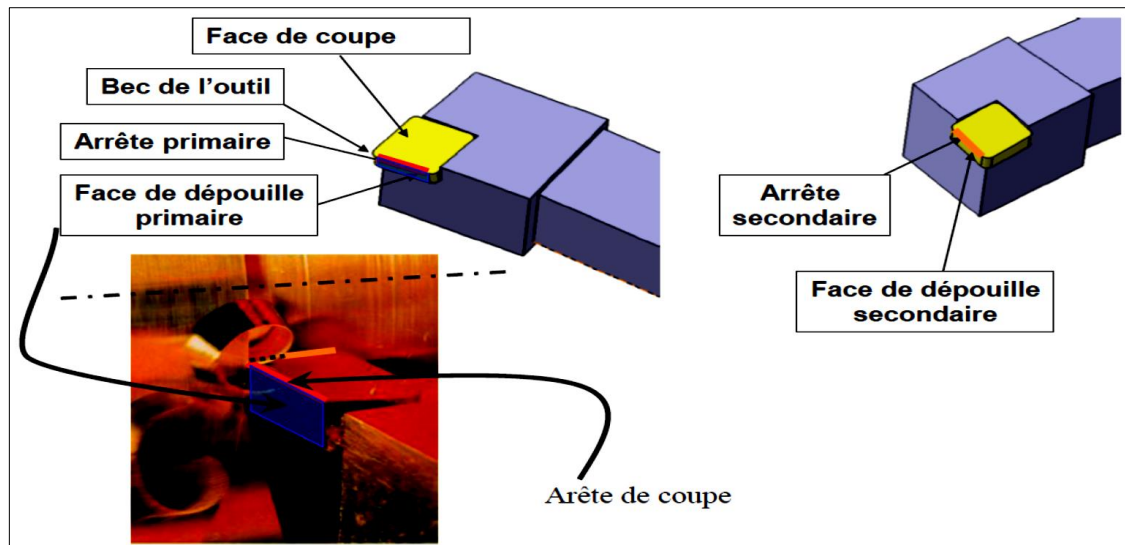


Figure II.26 Arêtes et surfaces de la partie active.

II.6.1 Plans de l'outil

II.6.1.1 Plans de l'outil en main

- Plan de référence de l'outil, $\mathbf{Pr}$: plan passant par le point considéré de l'arête et contenant l'axe de l'outil (pour un outil tournant) ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil (pour un outil classique);
- Plan d'arête de l'outil, $\mathbf{Ps}$: plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence de l'outil $\mathbf{Pr}$;
- Plan de travail conventionnel, $\mathbf{Pf}$: plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil $\mathbf{Pr}$, au point considéré de l'arête, et parallèle à la direction supposée d'avance de l'outil ;
- Plan vers l'arrière de l'outil, $\mathbf{Po}$: plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil $\mathbf{Pr}$ et au plan de travail conventionnel $\mathbf{Pf}$, au point considéré de l'arête.

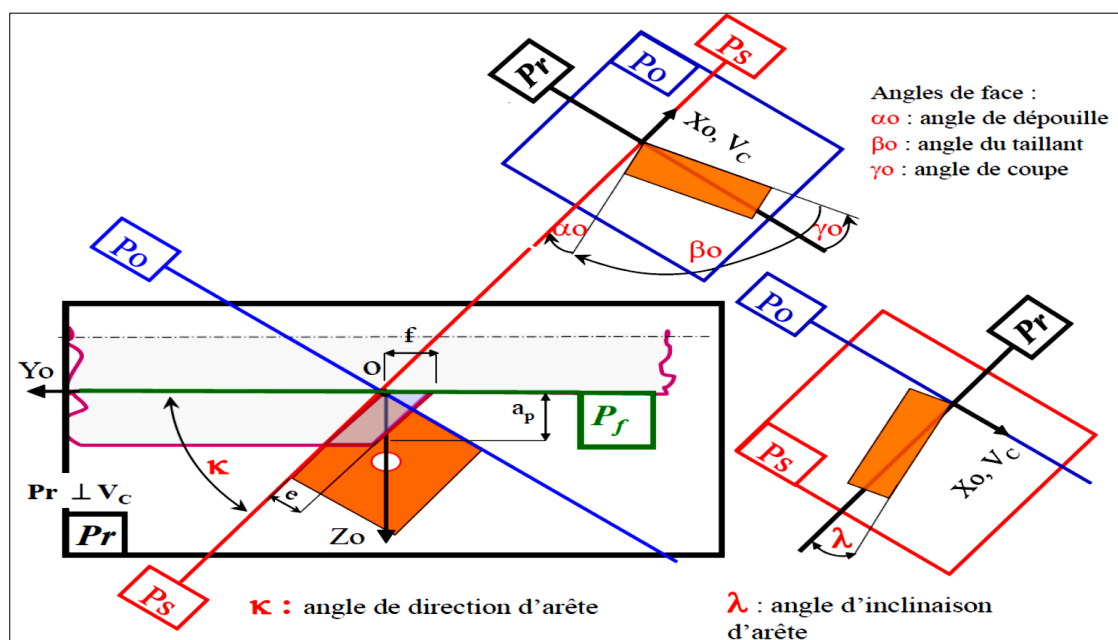


Figure II.27 Méthode de détermination des angles de coupe.

II.6.1.2 Plans de l'outil en travail

- Plan de référence en travail, **Pre** : plan perpendiculaire au point considère de l'arête, à la direction de la vitesse résultante de coupe, c'est-à-dire à la direction instantanée du mouvement résultant du mouvement de coupe et du mouvement d'avance simultanés en ce point ;
- Plan d'arête en travail, **Pse** : plan tangent à l'arête, au point considère, et perpendiculaire au plan de référence en travail **Pre**. Ce plan contient la direction de la vitesse résultante de coupe;
- Plan de travail, **Pfe** : plan contenant la direction de la vitesse de coupe et la direction de la vitesse d'avance au point considère de l'arête. Ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail **Pre** ;
- Plan vers l'arrière en travail, **Ppe** : plan perpendiculaire au plan de référence en travail **Pre** et au plan de travail **Pfe**, au point considère de l'arête.

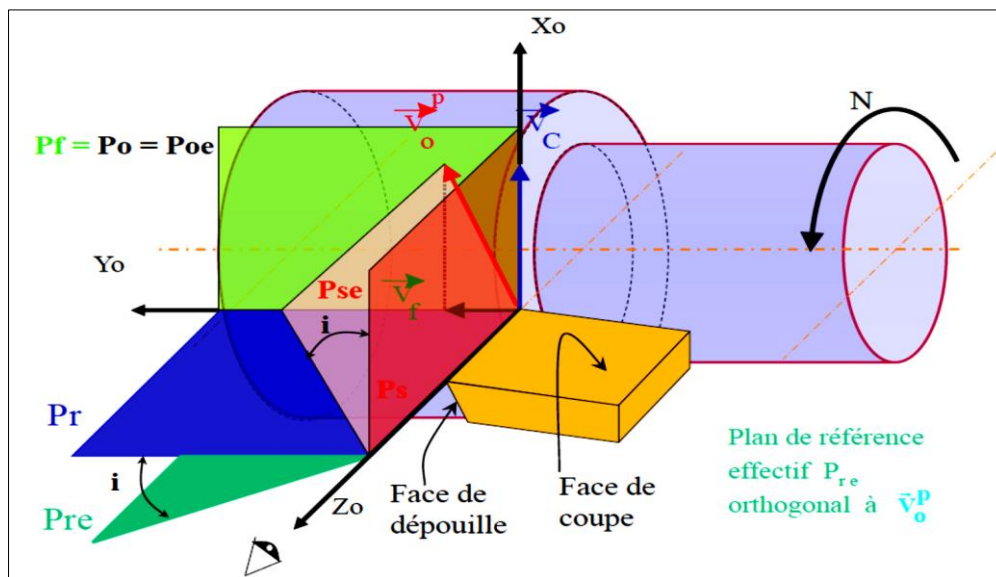


Figure II.28 Angles Caractéristique de l'outil.

Les plans de l'outil sont définis par rapport aux plans de référence. Pour l'outil en main, le plan de référence est défini à partir du corps de l'outil. Pour l'outil en travail, le plan de référence est défini par rapport à la cinématique de la coupe.

II.6.2 Angles de l'outil

II.6.2.1 Angles de l'arête (deux angles sont nécessaires) :

- Angle de direction d'arête de l'outil κ ou angle de direction d'arête en travail κ_{re} : angle aigu mesure dans le plan de référence **Pr** (**Pre**) entre le plan d'arête **Ps** (**Pse**) et le plan de travail **Pf** (**Pfe**) ;
- Angle d'inclinaison d'arête de l'outil λ ou angle d'inclinaison d'arête en travail λ_{se} : angle aigu mesure dans le plan d'arête **Ps** (**Pse**) entre l'arête et le plan de référence **Pr** (**Pre**).

II.6.2.2 Angles des faces

- Angle de dépouille α : angle aigu entre la face de dépouille $A\alpha$ et le plan d'arête **Ps** (**Pse**) ;
- Angle de taillant β : angle aigu entre la face de coupe $A\gamma$ et la face de dépouille $A\alpha$;

- Angle de coupe γ : angle aigu entre la face de coupe A γ et le plan de référence **Pr (Pre)** ($\alpha + \beta + \gamma = 90$).

Ces angles sont définis selon le besoin dans un des plans de section suivants :

- **Po (Poe)** : plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail), plan perpendiculaire au plan de référence Pr (**Pre**) et au plan d'arête **Ps (Pse)**, au point considéré de l'arête ;
- **Pn (Pne)** : plan normal à l'arête, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré (**Pn = ne**);
- **Pf** : plan de travail conventionnel (plan de travail **Pfe**) ;
- **Pp** : plan vers l'arrière de l'outil (plan vers l'arrière en travail **Ppe**).

III.1 Introduction

Les procédés de fabrication par déformation regroupent toutes les techniques de mise en forme des matériaux à l'état solide par déformation plastique. On distingue plusieurs techniques que l'on peut classer dans deux catégories différentes.

La première regroupe celles s'effectuant sur le matériau à chaud, c'est-à-dire à une température supérieure à la température ambiante et inférieure à la celle de fusion de ce dernier. Elles s'appliquent principalement à la mise en forme de pièces massives.

La deuxième catégorie quant à elle rassemble toutes les autres techniques opérant à température ambiante, on dit que le travail s'effectue à froid. On retrouve deux types de pièces, les pièces minces et les pièces massives.

Dans le cadre de la mise en forme à chaud, le chauffage du matériau a pour but d'abaisser la limite élastique, de le rendre plus malléable et donc de diminuer les efforts nécessaires à la déformation. De plus les amplitudes de déformation pourront être plus importantes sans risquer la rupture.

III.2 Procédés par Déformation

III.2.1 Principe

La déformation plastique est la déformation irréversible d'une pièce ; elle se produit par un réarrangement de la position des atomes.

Lorsque que l'on sollicite une pièce, un objet (on le tire, on le comprime, on le tort...), celui-ci commence par se déformer de manière réversible (déformation élastique), c'est-à-dire que ses dimensions changent, mais il reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation s'arrête. Certains matériaux, dits " fragiles ", cassent dans ce mode de déformation si la sollicitation est trop forte.

Pour les matériaux dits " ductiles ", lorsque l'on augmente la sollicitation, on déforme de manière définitive la pièce ; lorsque l'on arrête la sollicitation, la pièce reste déformée. Ceci se produit par un glissement des plans atomiques les uns sur les autres, à la manière des cartes à jouer d'un paquet. Ce glissement de plans atomiques se fait grâce au déplacement de défauts linéaires appelés " dislocations ".

III.2.2 Rappels sur la plasticité des matériaux

L'effet des forces sur différents matériaux est expliqué par Robert HOOKE (1635-1703), de façon empirique à l'échelle macroscopique : un matériau à l'état solide ne résiste à une force appliquée qu'en se déformant sous l'action de cette force. Les matériaux sont élastiques. Il établit une règle, la loi de HOOKE, selon laquelle l'allongement est toujours proportionnel à la force appliquée. Cette loi n'est rigoureusement vraie que pour les céramiques, le verre, la plupart des minéraux et les métaux les plus durs.

Mais, dans quelle mesure le comportement d'une structure dépend de son matériau constitutif plutôt que de ses dimensions et de sa forme. Nous avons besoin de standards objectifs de comparaison qui soient indépendant de la taille et de la forme du matériau.

La considération des conditions qui règnent en chaque point d'un matériau soumis à des forces mécaniques conduit aux notions de contrainte et de déformation. La définition claire et utilisable de ces deux notions est due à Augustin CAUCHY (1789-1857). Quand on soumet un corps à l'action de forces extérieures, des contraintes s'établissent par réaction, à l'intérieur de ce corps.

À ces contraintes sont associées des déformations. Pour s'affranchir de la dépendance des dimensions du matériau, les paramètres **contraintes** et **déformation** sont utilisés.

- **La contrainte** détermine avec quelle intensité les atomes du matériau sont écartés les uns des autres ou comprimés les uns sur les autres. Cette contrainte est, pour une traction simple, la force qui agit sur une unité de surface du matériau. $\sigma = F/S$

Les trois principales contraintes sont la traction, la compression et le cisaillement qui sont définies plus loin.

- **La déformation** indique dans quelles proportions les liaisons inter atomiques (à l'échelle microscopique) et la structure elle-même (l'objet, à l'échelle macroscopique) ont été déformées. La déformation, pour une traction simple, est le rapport de l'allongement à la longueur initiale. $\varepsilon = (L-L_0)/L_0$

La figure 1 illustre l'allure que peuvent avoir les courbes de traction de différents matériaux.

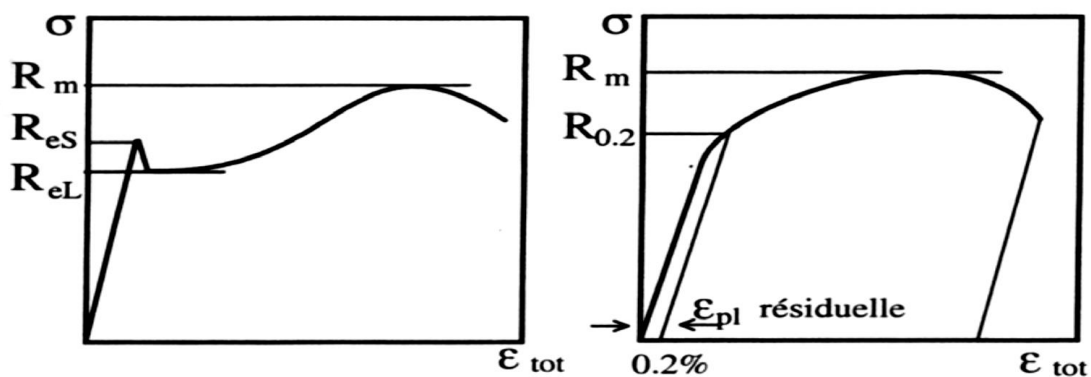


Figure III.1 Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction.

III.3 Différents modes

III.3.1 Laminage

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme du métal ou tout autre matériau sous forme pâteuse comme le papier ou les pâtes alimentaires.

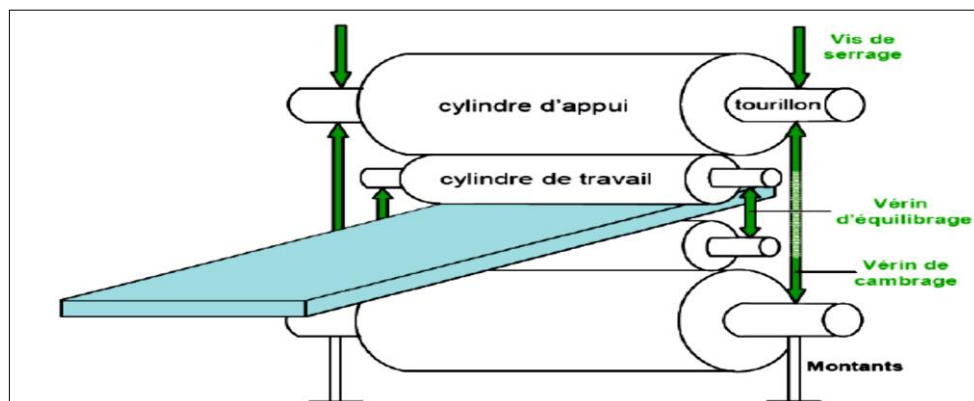


Figure III.2 Schéma du la cage quarto de laminage.

Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelés *laminoir*. Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau (généralement du métal). Il permet également la production de barres profilées (produits longs).

III.3.1.1 Laminage à chaud

Le laminage à chaud s'impose pour deux raisons capitales : la première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température. La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid. En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du produit. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface.

Les cages des laminoirs sont généralement « quarto » (Figure III.3), composées de deux cylindres de travail, assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand.

III.3.1.2 Laminage à froid

Le laminage à froid est généralement réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage (Figure III.3). Deux bobineuses sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre-réactions de la bande. Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

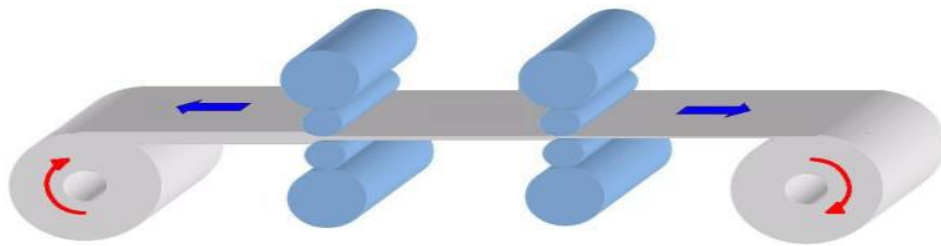


Figure III.3 Train de laminage.

EXEMPLE D'APPLICATION : (Cas laminage)

Justifier que lors de laminage il faut que l'angle d'entraînement α soit inférieur à l'angle de frottement γ .

SOLUTION :

Lors de laminage l'épaisseur initiale de la barre H diminue jusqu'à h . La différence s'appelle « réduction absolue »

$$H - h = D(1 - \cos \alpha)$$

Pour avoir l'entraînement il faut que $P < Q$

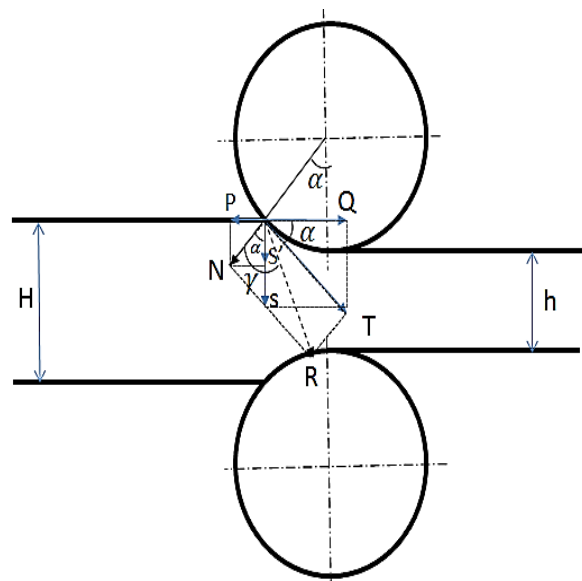
$$\text{Où : } P = N * \sin \alpha \quad \text{et} \quad Q = T * \cos \alpha$$

$$N * \sin \alpha < T * \cos \alpha \quad \Rightarrow \quad \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} < \frac{T}{N}$$

Avec $f_r = \frac{T}{N} = \tan \gamma$ (coefficient de frottement)

$$\text{Selon le schéma } \frac{T}{N} = \tan \gamma$$

$$\text{Donc : } \tan \alpha < \tan \gamma \quad \Rightarrow \quad \alpha < \gamma$$



III.3.2 Forgeage

Le forgeage consiste en déformer un lopin par chocs successifs grâce à un marteau pilon. Parmi les procédés de forge existants, on peut distinguer :

- la forge libre ;
- la forge par estampage (forgeage de métaux ferreux) ;
- la forge par matriçage (forgeage de métaux non ferreux).

La déformation du lopin peut se faire à chaud ou à froid. En forge par estampage, il est nécessaire de concevoir une série de matrices qui vont permettre de réaliser le brut désiré.

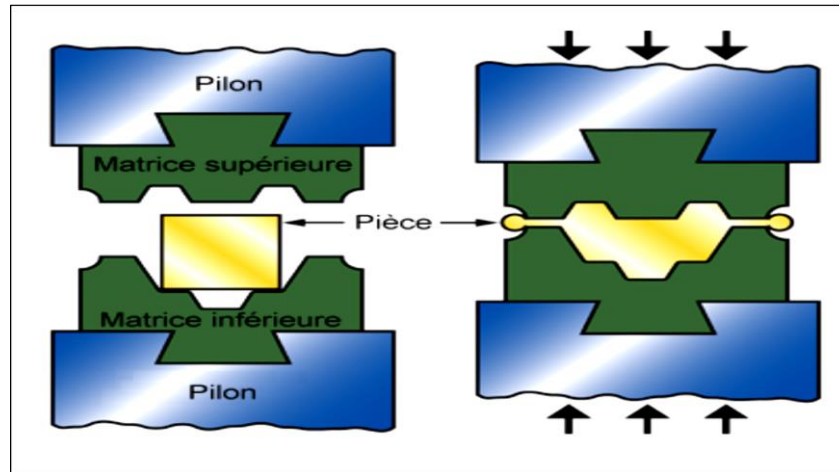


Figure III.4 Principe de forgeage.

La **forge libre** est la plus ancienne des techniques de forgeage :

- Elle permet d'obtenir à chaud des ébauches ou des pièces mécaniques brutes dont la forme est atteinte au terme d'un nombre plus ou moins grand de transformations successives.
- Ne nécessitant pas d'outillages spécifiques, cette technique est appliquée lorsqu'il s'agit de produire, dans des délais parfois courts, des pièces à l'unité ou en très petites séries.
- Ces ébauches peuvent avoir des dimensions importantes et atteindre une masse de plusieurs tonnes.

III.3.2.1 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.

III.3.2.2 Inconvénients

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

III. 3.3 Estampage et Matriçage

Estampage et Matriçage sont en réalité un seul et même procédé mais on parle usuellement d'estampage pour la mise en forme des métaux ferreux tandis que le matriçage concerne les matériaux non ferreux. Le procédé de matriçage consiste à mettre en forme un lopin porté à la température adéquate dans les gravures d'un jeu de matrices reproduisant en creux les formes

de la pièce à réaliser. Le principe consiste à rapprocher les deux matrices ce qui force le métal à épouser les formes des gravures. Généralement, afin de remplir complètement les cavités, le métal a la possibilité de déborder des gravures ce qui génère une bavure (Figure III.5) et une opération d'ébavurage.

Le matriçage fait partie des procédés de forgeage au même titre que la forge libre, l'extrusion et l'estampage.

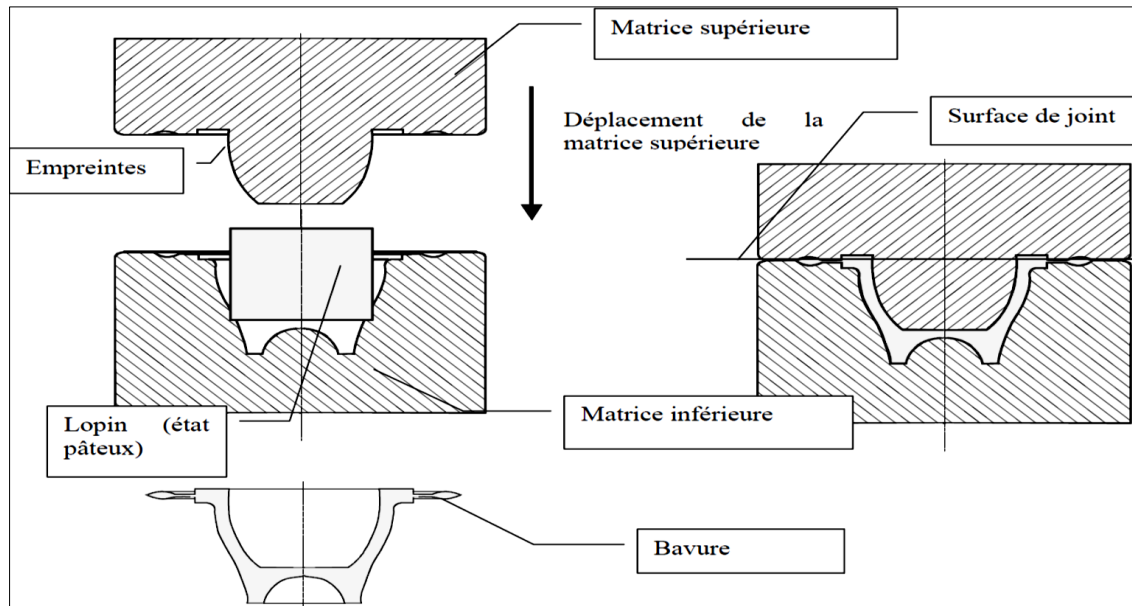


Figure III.5 Principe d'Estampage et Matriçage.

III.3.3.1 Avantages du Estampage et matriçage

III.3.3.1.1 Influence du procédé sur le matériau

Sous l'effet du choc ou de la pression, le métal est écrasé et s'écoule entre les outils, dans une direction perpendiculaire à celle de l'effort exercé. Il y a homogénéisation et orientation de la structure dans cette direction privilégiée. C'est l'origine du fibrage (Figure III.5) révélé par macrographie, et de l'augmentation des caractéristiques dans le sens ainsi défini.

Aux températures du travail de forge, le métal recristallise en grains, dont l'orientation et la grosseur sont liées à l'importance de la déformation et à la température, le métal a été corroyé. Une étude de chaque alliage permet de déterminer les caractéristiques obtenues en fonction du taux de corroyage.

Les valeurs des caractéristiques mécaniques des alliages corroyés sont toujours, et de loin, supérieures à celles des alliages non corroyés, notamment en ce qui concerne l'allongement ; au niveau des valeurs des caractéristiques mécaniques, on peut globalement dire que les alliages d'aluminium corroyés ont des caractéristiques équivalentes à celles de la fonte ou de l'acier à l'état recuit, voire supérieures. Ce point permet d'envisager la substitution de pièces en acier par des pièces en aluminium corroyé, moyennant une conception éventuellement différente.

En outre, le corroyage poussé du métal confère à sa structure une homogénéité inégalable par tout autre procédé. Cette homogénéité garantit l'utilisateur contre tout risque de porosité découverte en cours d'usinage de finition et l'assure d'une étanchéité parfaite. C'est la raison pour laquelle la Chaudronnerie et l'Industrie Nucléaire font largement appel aux pièces forgées par matriçage : brides, corps de vannes, etc. Les pièces forgées par matriçage sont exemptes de

défauts internes (criques, retassures, etc.). Les défauts sont obligatoirement débouchant et visibles.

III.3.3.1.2 Influence du procédé sur la qualité des surfaces

L'utilisation de matrices soigneusement polies permet d'obtenir de larges surfaces non usinées. C'est ainsi que dans l'Industrie des turbines, les aubes sont utilisées brutes de matriçage avec un état de surface inférieur à 0,8 microns.

En outre, en réalisant après forgeage par matriçage une anodisation de décoration, on pourra modifier la teinte naturelle de l'aluminium tout en augmentant sa résistance à la corrosion. L'aluminium peut aussi être peint, verni, etc.

III.3.3.2 Inconvénients

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

III. 3.4 Tréfilage

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

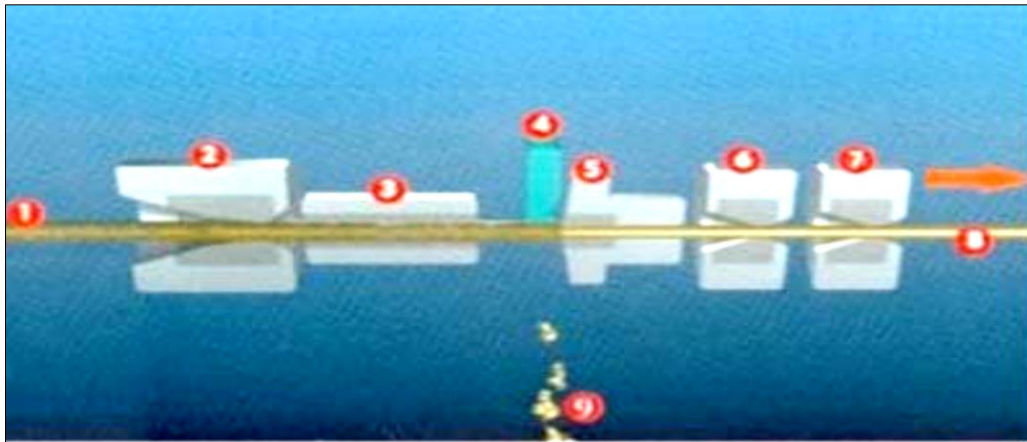


Figure III.6 Opération de tréfilage

III. 3.5 Filage (ou extrusion)

Le **filage** est une méthode de mise en forme des métaux par forgeage. Elle consiste à pousser un matériau ductile (éventuellement rendu ductile par chauffage) à travers un trou, ou **filière**. Cette méthode permet d'obtenir des produits longs qui peuvent être de formes simples (barre, tube) ou plus compliquées (profilé pour l'aéronautique ou le bâtiment). La poussée permettant la déformation est généralement fournie par des presses hydrauliques.

III. 3.5.1 Avantages

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

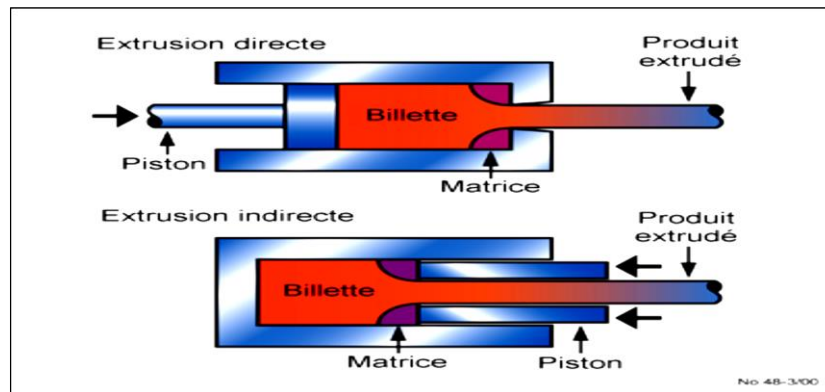


Figure III.7 Principe et formes du Filage (ou extrusion).

III.3.5.2 Inconvénients

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

III. 3.6 Pliage

Sur une portion de tôle appelée flan on exerce à l'aide d'un outil de forme variée un effort sur une pièce reposant sur quelques appuis. Cet effort déforme le flan dans le domaine plastique. Ci-dessous sont données quelques configurations de pliage. Le domaine d'application est vaste et trouve toute son application dans des secteurs comme l'électroménager.

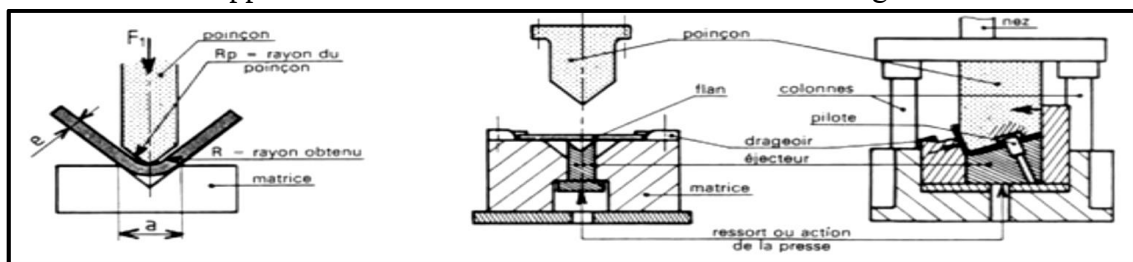


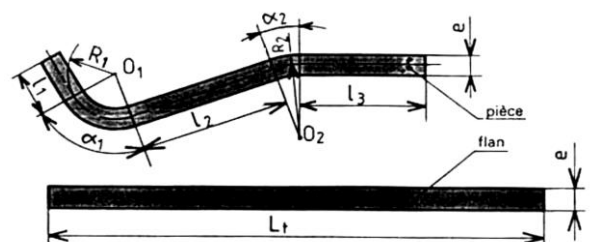
Figure III.8 Schéma de pliage.

EXEMPLE D'APPLICATION : (Cas de pliage)

Calcul la longueur développée de la tôle si R_1 et R_2 sont les rayons de la fibre neutre

SOLUTION :

$$L_1 = l_1 + \frac{2\pi R_1 a}{360} + l_2 + \frac{2\pi R_2 a}{360} + l_3 \quad (a \text{ en } ^\circ)$$



III.3.6.1 Avantage

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

III.3.6.2 Inconvénients

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

III. 3.7 Emboutissage

L'emboutissage permet d'obtenir des pièces de formes déterminées, sans recourir à la fusion. L'opération peut se faire à froid ou à chaud, manuellement ou par l'intermédiaire de machines

(presse à emboutir). La pièce est formée à l'aide d'estampes (poinçon et matrices) adéquates, entre lesquelles est comprimée une feuille de métal.

L'emboutissage se pratique à l'aide de presses à emboutir de forte puissance munies d'outillages spéciaux qui comportent, dans le principe, trois pièces : une matrice, en creux, épouse la forme extérieure de la pièce un poinçon, en relief, épouse sa forme intérieure en réservant l'épaisseur de la tôle un serre-flan entoure le poinçon, s'applique contre le pourtour de la matrice et sert à coincer la tôle pendant l'application du poinçon (Figure III.9).

L'entrée de la matrice doit être très arrondie et polie pour éviter toute déchirure du métal et pour optimiser le comportement des zones de rétreint - aucun angle ne doit être vif et un parfait état de surface est primordial : la mise au point de tels outils est une opération très spécialisée et très coûteuse notamment sur les pièces d'aspect (exemple : plusieurs mois pour l'extérieur d'une portière, capot etc...). L'opération d'emboutissage typique (double-effet) :

Phase 1 : poinçon et serre-flan sont relevés. La tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice.

Phase 2 : le serre-flan est descendu et vient appliquer une pression bien déterminée, afin de maintenir la tôle tout en lui permettant de fluer.

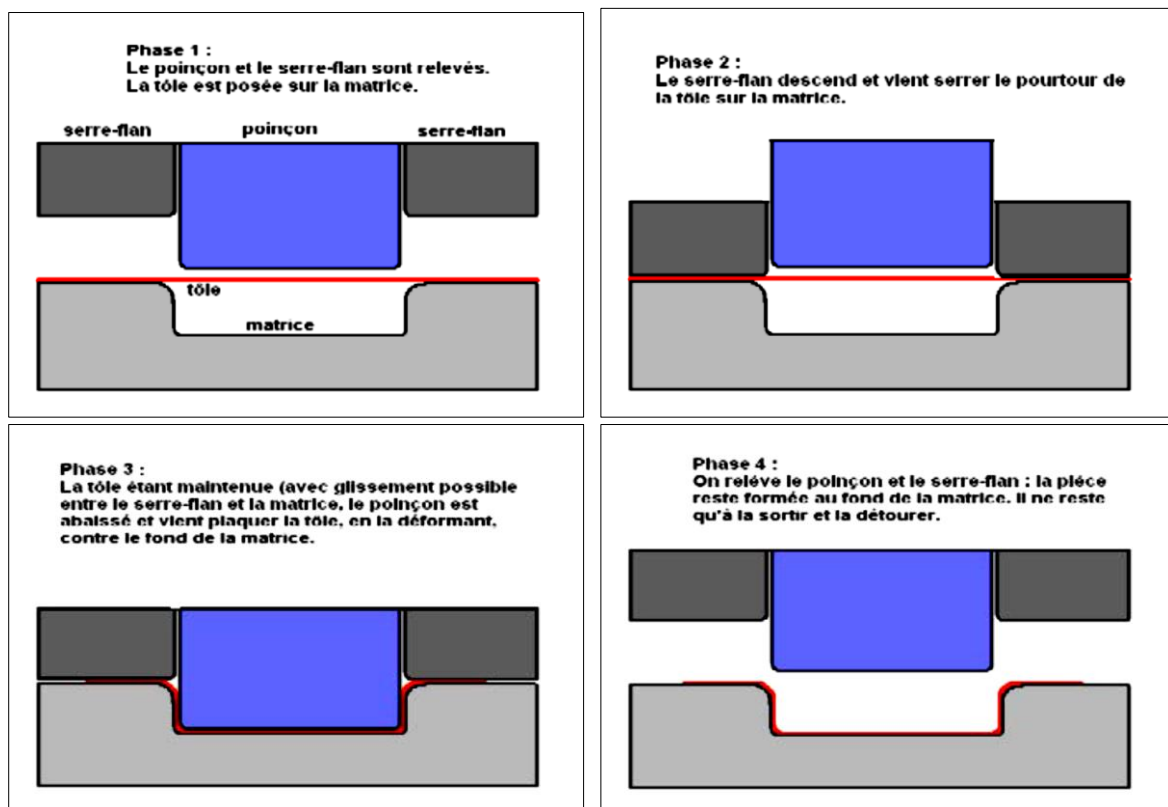


Figure III.9 Phases de l'opération d'emboutissage.

Phase 3 : le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique en l'appliquant contre le fond de la matrice.

Phase 4 : le poinçon et le serre-flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).

Phase 5 : on procède au « détourage » de la pièce, c'est-à-dire à l'élimination des parties devenues inutiles (essentiellement les parties saisies par le serre-flan).

EXEMPLE D'APPLICATION : (Cas d'emboutissage)

Déterminer le diamètre de l'ébauche de l'embouti ? (tôle de forme circulaire utilisée pour la réalisation de la pièce par emboutissage)

SOLUTION :

$$S = S_1 + S_2$$

S_1 surface de la base

S_2 surface latérale du cylindre

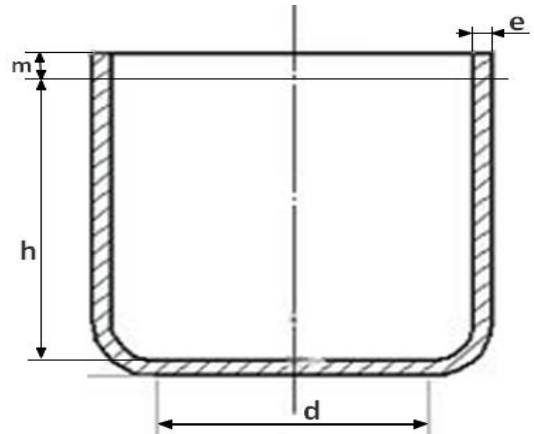
$$S_1 = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$S_2 = \pi * (d + 2e) * (h + e + m)$$

Surface du flan circulaire :

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 = S_1 + S_2$$

$$D = \sqrt{\frac{d^2}{4} + (d + 2e) * (h + e + m)}$$



III.4 Procédés par fusion

III.4.1 Généralités

Les organes et pièces constituant les machines et appareils proviennent de sources diverses de fabrication tels que forgeage, usinage, estampage, fonderie etc. La technique de fonderie est la plus souvent utilisée car elle est non seulement économique mais :

- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).
- La série des pièces est identique.
- Obtention de pièces massives telles que bâtis, volants etc.

III.4.2 Principe Moulage (ou Fonderie)

La fonderie est l'un des procédés de formage des métaux qui consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieure et extérieure) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition.

Les techniques employées dépendent de l'alliage fondu, des dimensions, des caractéristiques et des quantités de pièces à produire. C'est le plus souvent une industrie de sous-traitance très dépendante des secteurs acquéreurs : automobile, sidérurgie, matériel de manutention, équipement industriel, matériel électrique, aéronautique, armement, etc.

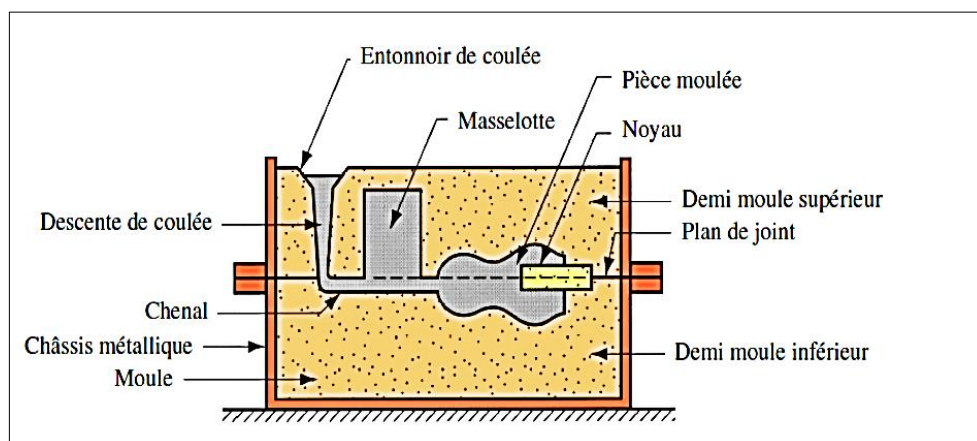


Figure III.10 Schéma de fonctionnement

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue pratiquement les fonderies suivantes :

a) Selon la nature des métaux et alliages

- Fonderie de fonte.
- Fonderie d'acier.
- Fonderie d'aluminium et ses alliages.
- Fonderie de cuivre, bronzes, laitons etc...

b) Selon l'utilisation

- Fonderie d'art.
- Fonderie d'ornement (bijoux).
- Fonderie de mécanique industrielle.

c) Selon le procédé de moulage

- Moulage en sable (manuel ou mécanique).
- Moulage en carapaces.
- Moulage à la cire perdue.
- Moulage en coquilles (moule permanent).

III.4.3 Différents modes de moulage

Dans ces procédés le moule peut-être permanent ou non permanent (destructible) :

- **Le moule non permanent (en sable)** : est utilisé qu'une seule fois, pour extraire la pièce, il faut le détruire, l'empreinte est obtenue par moulage du matériau constitutif autour d'un modèle réalisé en bois ou en métal.

- **Le moule permanent (ou métallique)** : peut servir un grand nombre de fois, il est réalisé en plusieurs parties pour faciliter l'extraction de la pièce. Il est utilisé surtout lorsque la quantité de pièces à couler est importante.

Le choix des procédés de moulage dépend du métal à couler. En général la température de fusion du métal coulé doit- être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule.

III.4.3.1 Moulage en sable

Le démoulage s'effectue par destruction du moule. On doit donc fabriquer autant de moules que de pièces à fabriquer. Il existe plusieurs techniques d'obtention du moule en sable (sable humide ; durcissement thermique, chimique ou physique). Le moule en sable est obtenu à partir d'un modèle permanent (généralement en bois, en résine ou en métal) ou unique (en cire ou en polystyrène) dans le cas du moulage à modèle perdu.

L'intérêt de cette technique est que le sable est réfractaire (il résiste à la chaleur), et que le moule ne coûte pas cher à fabriquer. Par contre, l'état de surface ($R_a \approx 3,2 \mu m$) et la précision obtenus sont assez mauvais.

On distingue deux types de moulage en sable

- **Moulage manuel** : toutes les opérations sont faites à la main,
- **Moulage mécanique** : En série, le moulage est fixé sur la table de la machine.

III.4.3.2 Moulage métallique (ou moulage permanent)

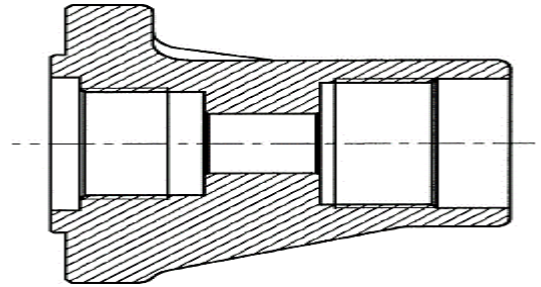
Le moule métallique est réutilisable plusieurs fois. Le démoulage est rendu possible par la différence de matière entre le moule et le métal coulé. Le moule subit toujours un poteyage

avant introduction du métal en fusion (il est enduit d'un liquide protecteur qui facilitera son démoulage). Les avantages par rapport au moulage en sable sont :

- moulage économique,
- précis : IT entre 0.05 et 0.2 mm pour les alliages de cuivre et d'aluminium,
- possibilité d'obtention de trous taraudés.

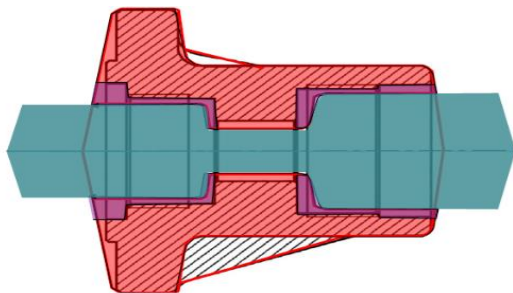
EXEMPLE D'APPLICATION : (Cas de moulage)

- Tracer la forme du noyau de cette pièce moulée
- Représenter le modèle de cette pièce et le noyau dans le système de remplissage

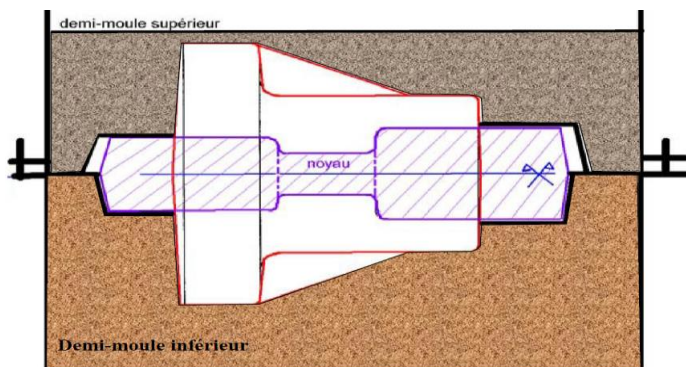


SOLUTION :

- Représentation le noyau de la pièce



- Représentation l'ensemble dans le système de remplissage



III.4.4 Avantages moulage

- Peu de gaspillage de matière première ;
- Permet d'obtenir des formes pouvant être très complexes.

III.4.5 Inconvénients moulage

- Nécessite un outillage important et coûteux (surtout pour les moules métalliques) ;
- La pièce à obtenir doit posséder des épaisseurs approximativement constantes ou variant faiblement, ne pas posséder d'arêtes vives (congés et arrondis vivement conseillés), et avoir des surfaces de dépouilles ;
- L'état de surface (rugosité) obtenu est moyen ;
- La précision obtenue est moyenne (retraits de matière et déformation en refroidissant) ;
- Ces deux derniers inconvénients obligent souvent à ajouter des usinages au niveau des surfaces fonctionnelles de la pièce.

IV.1 Généralités

Procédés non Conventionnels est de plus en plus importante pour ceux qui se confrontent avec la mise en forme et la réalisation de pièces mécaniques. Il faut utiliser ces techniques dans certains domaines industriels où de nouveaux matériaux sont apparus et que les performances des méthodes les plus courantes ne sont plus suffisantes.

Ces procédés ont été introduits dans des domaines variés tels que le soudage, la découpe, la réalisation de formes complexes, le marquage et le traitement de surface. Ces procédés ont changé la façon de produire dans certains domaines industriels, comme l'industrie aéronautique, la production des voitures, l'agroalimentaire, l'industrie textile, etc.

IV.2 Différentes techniques d'usinage

IV.2.1 Usinage par électroérosion

C'est un procédé d'usinage où l'enlèvement de matière est obtenu par décharges électriques entre une électrode constituée par la pièce et une électrode constituée par l'outil. L'arc électrique produit entre les 2 électrodes arrache de petites particules de métal qui sont évacuées par le liquide (diélectrique) qui circule (Figure IV.1).

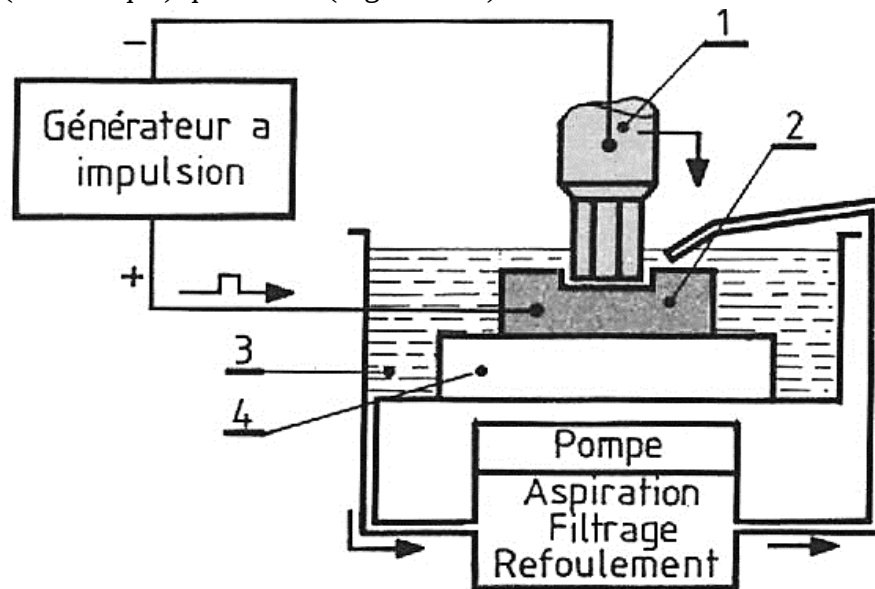


Figure IV.1 Principe d'usinage par électroérosion.

IV.2.1.1 Usinage

L'électrode a pratiquement la forme de l'empreinte à obtenir. On réalise la forme en déplaçant cette électrode au fur et à mesure de l'usinage. Le déplacement du porte-outil est asservi pour maintenir constant l'espace pièce-outil. Il n'y a jamais contact pièce-outil.

Ce type d'usinage se caractérise par :

- usinage sans déformation pour l'usinage de faible diamètre puisqu'il n'y a pas de contact pièce-outil ;
- usinage de métaux durs, traités ou réfractaires ;
- précision de l'ordre de 0.01 mm jusqu'à 2 μ m en finition. ;
- reproduction automatique de forme ;
- obtention de surfaces complexes ;

- l'état de surface comporte de petits caractères (arc électronique) ou de picot (circulation de diélectrique) ;
- l'électrode s'use (usure difficile à contrôler) ;
- l'usinage est limité aux matériaux conducteurs et aux formes démoulables ;
- débit maximal de copeaux : ébauche ($5\text{cm}^3/\text{min}$) et finition ($0.05\text{cm}^3/\text{min}$).

IV.2.1.2 Applications

- Usinage de matrices de forge et moule de fonderie.
- Découpage au fil (contour de pièces, analogie avec scie à ruban).
- Moyens pratiquement réservés à l'obtention d'outillage.

IV.2.1.3 Matériaux

- Electrodes = graphite, cuivre, cupro-tungstène, laiton...
- Diélectriques = hydrocarbures, huiles aux silicones.

IV.2.2 Usinage électrochimique

On fait passer un courant électrique continu entre 2 électrodes (1 pièce anode et 1 outil cathode) baignant dans un électrolyte (Figure IV.2). On réalise ainsi une action électrolytique accélérée et contrôlée. Le métal enlevé à l'anode est évacué par l'électrolyte qui circule sous pression, évitant ainsi le dépôt sur l'outil cathode comme en galvanoplastie.

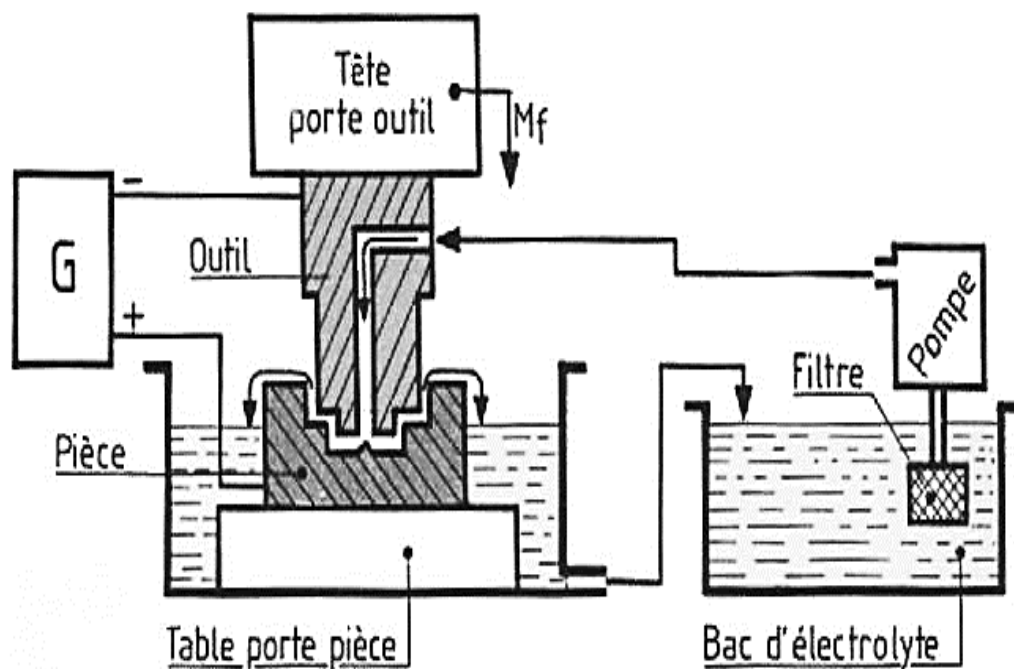


Figure IV.2 Principe d'usinage électrochimique.

IV.2.2.1 Usinage

L'électrode a pratiquement la forme de l'empreinte à réaliser. En usinage, l'attaque chimique est continue, on utilise des électrodes protégées (isolées par un vernis ou un plastique sur leur corps). Il n'y a jamais contact entre la pièce et l'outil.

Remarques

- Usinage sans échauffement du métal.
- Obtention de surfaces complexes.
- Usinage de matériaux durs, traités ou réfractaires et conducteurs.
- Usure nulle de l'outil.
- Bon état de surface sans trace d'outil.
- Débit important de métal usiné (5 à 10 fois celui de l'électroérosion).
- Le déplacement de l'électrode-outil n'est pas asservi.
- La précision d'usinage reste faible.
- Forme de l'électrode difficile à déterminer pour certains usinages.

IV.2.2.2 Applications

- Rectification plane ou cylindrique.
- Ebauche de matrices ou moules, ébavurage, affûtage.
- Possibilités : précision 0,01 mm en rectification et 0,1 mm en défonçage.

IV.2.2.3 Matériaux

- Electrolytes = chlorure de sodium, nitrate de sodium.
- Electrodes = graphite, cuivre, cupro-tungstène ;

IV.2.2.4 Avantages

- l'usinage de tout matériau conducteur (aciers ordinaires et inoxydables, alliages réfractaires à base de nickel ou cobalt, alliages à base de titane, matériaux frittés, etc.), quel que soit leur état de traitement métallurgique ;
- un usinage surfacique avec une vitesse de pénétration importante tout en permettant l'obtention d'un état de surface de finition sans perturbations métallurgiques ;
- l'absence d'opération d'ébauche ;
- la reproduction de formes complexes ;
- le perçage avec des rapports profondeur/diamètre très importants (< 200) ;
- l'usinage de parois minces par usinage simultané des deux côtés de la pièce, par exemple pour les aubes de turbomachines ;
- l'absence d'usure de l'outil ;
- un contrôle aisé des paramètres de l'usinage permettant une grande reproductibilité.

IV.2.2.5 Inconvénients

- aux problèmes de corrosion ;
- aux difficultés inhérentes à l'électrolyte ;
- à l'existence de pressions hydrauliques élevées (inférieures à 25 bars) ;
- aux études et à la mise au point de l'outil.

IV.2.3 Usinage par ultrasons

L'usinage par ultrasons est une technique d'abrasion utilisant des grains abrasifs. C'est un micro-usinage de matériaux durs et fragiles, qui vise notamment : les pierres précieuses pour horlogerie et semi-précieuses (le rubis, le saphir, l'onyx), les verres, les verres spéciaux, le pyrex, le quartz, le silicium, la fibre de carbone, le cristal, toutes sortes d'alumines, etc. Elle présente aussi un intérêt pour finir les surfaces, par polissage ultrasonore.

IV.2.3.1 Principe de fonctionnement

Il s'appuie sur trois phénomènes physiques pour enlever la matière : le cisaillement, l'érosion, l'abrasion. Ainsi cette méthode consiste à projeter des particules abrasives très dures sur la pièce à usiner, à l'aide d'une sonotrode (l'outil), vibrant à fréquence ultrasonore (20 KHz ou plus). La matière est enlevée par le cisaillement, l'érosion et l'abrasion provoqués par les grains abrasifs (Figure IV.3). Cette action se traduit par un enlèvement de matière sur la pièce, une usure de sonotrode et une usure des grains. Deux mécanismes principaux sont reconnus pour l'enlèvement de la matière :

- une action mécanique due à la projection et au martèlement des grains abrasifs contre la surface de la pièce; cela rend le procédé efficace lors de l'usinage des matériaux fragiles: verres, graphites, ferrites, céramiques, quartz, semi-conducteur... ;
- une érosion de cavitation due aux variations de pression au sein du liquide, engendrées par les vibrations de la sonotrode; ceci a un effet positif pour les matériaux fragiles et/ou poreux: graphites, céramiques poreuses...

Bien que le procédé soit apte à usiner tous les matériaux (conducteurs ou non, métalliques, céramiques ou composites...), il est plus efficace pour les matériaux fragiles et/ou poreux. L'usinage des matériaux ductiles, peut être réalisé d'une manière plus rentable par d'autres techniques, comme la coupe, l'électroérosion ou l'électrochimie. Dans le cas de l'électroérosion, les ultrasons peuvent être utilisés pour améliorer l'évacuation des particules érodées et des gaz produits et renouveler l'espace inter électrode entre 2 décharges.

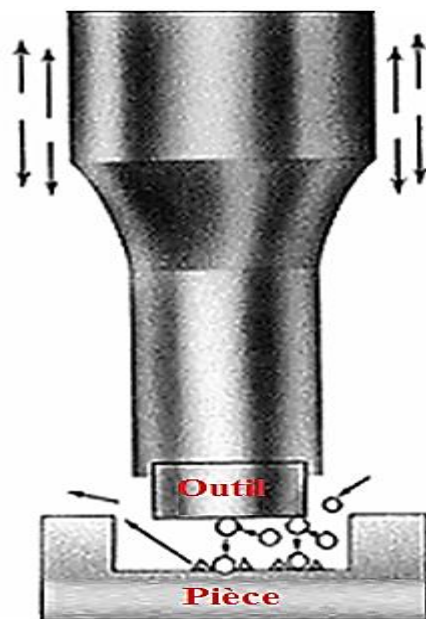
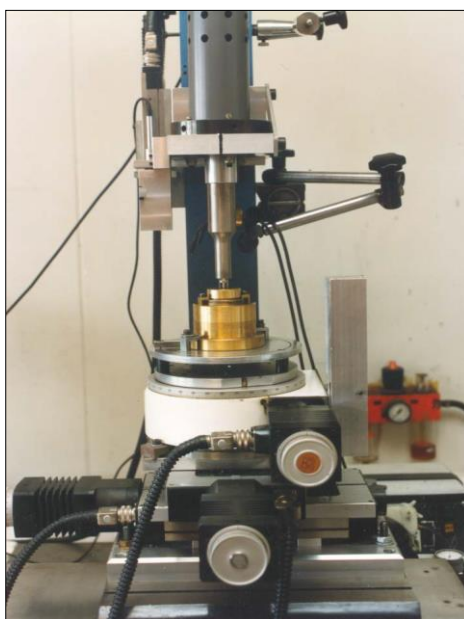


Figure IV.3 Machine d'usinage par ultrasons.

Concernant la vitesse d'usinage, il n'est pas possible de la prévoir avec suffisamment de précision, car elle est liée à trop grand nombre de facteurs: fréquence et amplitude des vibrations, pression statique moyenne, dimension moyenne et acuité des grains, caractéristiques mécaniques et physiques du matériau de la pièce...

Les machines sont conçues pour que l'avance de la sonotrode outil ait lieu au fur et à mesure que la matière est enlevée. (Figure IV.4) Les premières machines utilisaient des systèmes à contrepoids, la charge statique étant réglée manuellement. Les machines actuelles utilisent un asservissement avec effort, avec mesure de la force statique à l'aide de capteurs, ce qui permet de régler celle-ci avec une plus grande précision et de la moduler en fonction de la position en cours d'usinage: elle peut être faible à l'attaque, pour permettre aux grains de commencer à creuser l'empreinte, puis augmentée à sa valeur optimale choisie pour poursuivre l'usinage, diminuée à la fin de l'opération, par exemple dans le cas d'un perçage, afin d'éviter ou de minimiser le phénomène d'écaillage à la sortie.

Le procédé peut être caractérisé par trois critères principaux : débit de matière, usure de la sonotrode et état de surface.

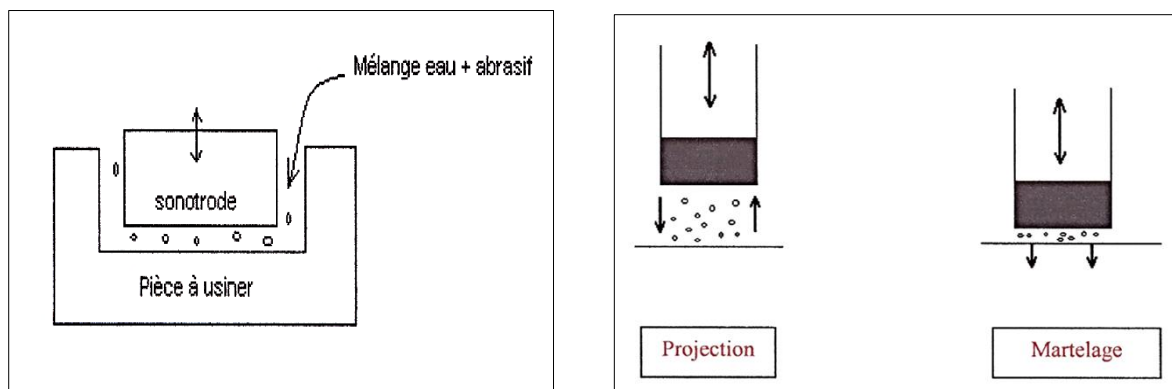


Figure IV.4 Principe l'usinage par ultrasons.

IV.2.3.2 Paramètres et influence

Les paramètres essentiels sont :

* **Concentration** : Le pourcentage de grains abrasifs présents dans la zone de travail a une incidence sur la vitesse d'usinage (ou vitesse de pénétration) : si la concentration en grains est insuffisante, le débit est faible ; si la vitesse est trop élevée, les grains sont moins actifs. En général, la concentration volumique est fixée entre 20 et 30%.

* **Fréquence** : La fréquence des vibrations, tout comme leurs amplitudes et la charge statique, ont une grande influence sur les résultats d'usinage. De nombreuses études ont cherché à déterminer l'influence de ces paramètres. L'étude concernant les paramètres ultrasonores est compliquée du fait de la présence des autres paramètres. De plus, il est difficile de reproduire des conditions expérimentales pour lesquelles seules l'amplitude et la fréquence des vibrations sont observables. On note néanmoins des tendances pour ces paramètres.

* **Amplitude** : L'amplitude des vibrations est un paramètre fondamental pour le rendement du procédé. Elle doit être adaptée au type de travail envisagé, en particulier à la dimension moyenne des grains abrasifs :

- une amplitude trop faible ne fournit pas aux grains une énergie cinétique suffisante pour qu'ils martèlent la surface de la pièce efficacement.
- une amplitude trop grande conduit à une distance sonotrode-pièce plus élevée, et des grains perdent beaucoup de leur efficacité par les chocs multiples.

* **Charge statique** : Ce paramètre est extrêmement sensible : il doit être adapté pour que l'approche relative des deux éléments (sonotrode et pièce) ait lieu au fur et à mesure que la matière est arrachée. Une trop grande charge statique ne fournit pas un espace sonotrode-pièce serré, et les grains ne sont pas efficaces. Par contre, une charge statique trop élevée a tendance à serrer la distance sonotrode-pièce et à chasser les grains, ce qui est traduit par un usinage plus lent.

* **Nature des grains** : Les véritables outils de coupe sont les particules abrasives. La nature et les dimensions des grains doivent être adaptées au matériau à usiner et au type d'usinage envisagé.

Plus le matériau à usiner est compact et dur, plus les grains doivent être durs :

- le carbure de bore permet d'usiner presque tous les matériaux, y compris les céramiques dures (carbures, nitrures) ;
- le carbure de silicium voit, quant à lui, ses applications limitées aux matériaux n'ayant pas une dureté trop élevée (graphite, verre, silice, alumine).

Pour les matériaux d'exceptionnelle dureté, on utilise le diamant, seul abrasif envisageable pour l'usinage du diamant).

* **Effets de la dimension des grains** : La dimension des particules agit sur la vitesse d'avance et sur la qualité de la surface. En général, l'augmentation de la taille de grains conduit à un débit de matière accru, à une surcoupe plus grande et à un état de surface moins fin.

On utilise des grains plus gros pour l'ébauche et des grains plus fins pour la finition :

- ébauche : 50 à 120 μm
- finition : 20 à 40 μm
- super finition : moins de 12 μm

IV.2.3.3 Avantages

Les avantages sont :

- La maîtrise de la forme, par des déplacements précis gérés par commande numérique, la maîtrise de l'usure de la sonotrode, par l'utilisation de matériaux extrêmement résistants à l'usure, ce qui est économiquement envisageable vu les petites dimensions des embouts et la maîtrise des efforts appliqués, principalement par la réduction de la surface de la sonotrode en regard de la pièce.
- Cette technique peut être intéressante pour la réalisation de pièces très fragiles, et l'obtention d'une excellente précision, qui peut atteindre quelques micromètres.
- Elle apporte l'inconvénient majeur de la localisation de l'usinage sur une très petite surface, ce qui conduit à des temps de fabrication allongés.
- Cette technique a connu plusieurs applications. Elle est utilisée pour la réalisation de capteurs capacitifs embarqués sur satellites pour la mesure de variations d'accélération très faibles.

- Les effets des paramètres sont du même ordre que ceux rencontrés en abrasion ultrasonore. Il est possible d'atteindre des débits de matière satisfaisants et une excellente qualité, que ce soit pour la précision ($5\text{ }\mu\text{m}$) ou l'état de surface.
- Les performances dépendent essentiellement du matériau à usiner, du matériau de la sonotrode et du matériau des grains abrasifs, mais aussi d'autres paramètres.

IV.2.4 Usinage par bombardement

Dans l'usinage par bombardement électronique, on provoque l'évaporation sous vide de la matière en excès en soumettant localement la pièce à l'impact d'un faisceau d'électrons à grande vitesse. Le procédé de soudage par faisceau d'électrons est incontournable pour les soudures de haute performance et de fortes épaisseurs. Il garantit la préservation des propriétés mécaniques entre les différentes parties soudées et trouve donc une excellente application dans les pièces de très haute sécurité, à très forte valeur ajoutée, comme celles de l'industrie aéronautique. La souplesse du procédé permet de souder des pièces d'épaisseur $0,1\text{ mm}$ à plus de 200 mm avec la même machine.

IV.2.4.1 Principe du canon à électrons

L'équipement générateur de faisceau est très proche, dans le principe, d'un tube cathodique pour téléviseur (Figure IV.5). L'émetteur est un système cathode-anode porté à un très haut potentiel dans un vide poussé (10^{-6} mbar).

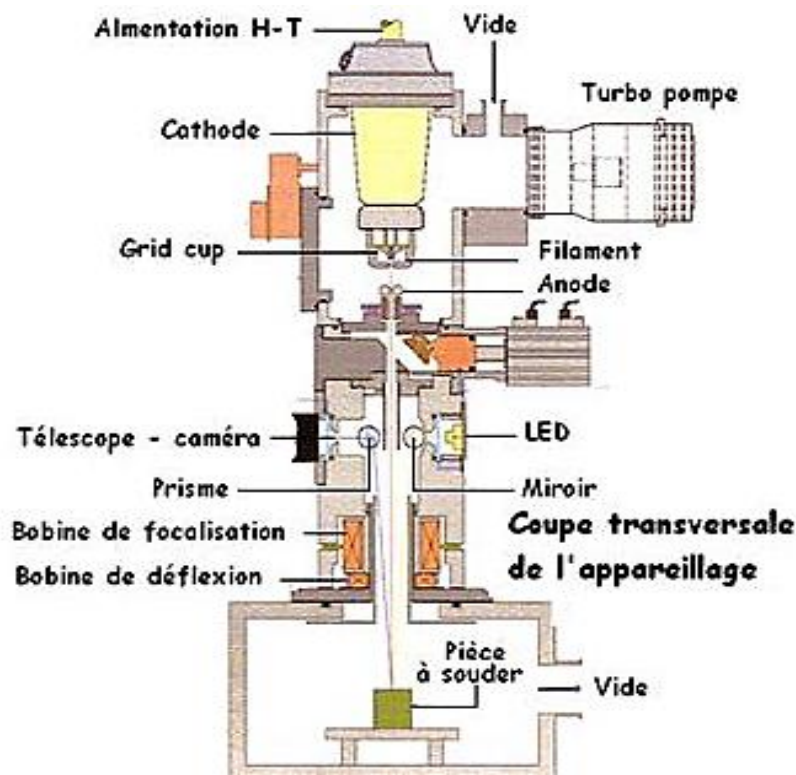


Figure IV.5 Canon à électrons

IV.2.4.2 Paramètres de soudage

Les plus importants sont :

* **La puissance** : La tension (énergie cinétique, vitesse des électrons) et l'intensité de soudage

(quantités d'électrons) quand le courant de soudage augmente, la quantité d'électrons par secondes augmentent, la pénétration augmente ainsi que lorsque la différence de potentiel augmente (valeurs de 30 à 150 kV pour un courant de soudage de 1 mA à 1A).

***La vitesse de soudage :** (vitesse relative du faisceau par rapport à la pièce m/min). Lorsque cette vitesse augmente, la pénétration diminue.

*** Focalisation du faisceau :** Lorsque le foyer du faisceau est au-dessus du bain, la pénétration est peu profonde. Lorsque le foyer du faisceau est en dessous du bain, on a un bain en forme de V.

***Déflexion et vibrations :** Forme, amplitude, fréquence et direction.

IV.2.4.3 Avantage soudage par faisceau d'électrons

Le soudage par faisceau d'électrons présente différents avantages :

- des soudures très résistantes réalisées en une seule passe, avec le minimum de chaleur dégagée par unité de longueur, donc avec le minimum de perturbation physique de la pièce (modification et déformation),
- la possibilité de souder des métaux différents, même avec des températures de fusion éloignées, comme l'acier et le cuivre,
- une profondeur de soudure allant jusqu'à 20 cm dans certains alliages. Cela autorise ainsi une préconception des pièces, la simplification des usinages et la réduction des quantités de matière utilisées,
- un soudage sous vide qui évite toute oxydation du métal,
- une fiabilité et une reproductibilité, avec une qualité de soudure constante sur des pièces à l'unité ou en série,
- une vitesse de soudage élevée, qui offre par là même un gain de temps appréciable lors de la production de pièces de série,
- la capacité à obtenir sans reprise une pièce de précision par soudage de deux composants,
- la possibilité d'assembler des multi-matériaux en continu.

IV.2.4.4 Inconvénients

- Coût élevé de l'équipement selon la puissance variable jusqu'à 150000 EUR.
- L'investissement dans cette technique doit être justifié par le soudage de grandes séries ou le soudage de produits à haute valeur ajoutée.
- Dispositif à vide nécessaire et temps pour le faire
- Extrême précision de la préparation des bords à assembler
- Dimensions importantes de l'enceinte sous vide
- Sensible au magnétisme
- Matériaux magnétiques en permanence non soudables
- Le rapport h/L et le fait de ne pas avoir de métal d'apport augmentent le risque de fissuration
- Distance limitée dans le non vide.

IV.2.5 Usinage laser

IV.2.5.1 Principe de la découpe laser

Les électrons d'une décharge électrique communiquent par chocs leur énergie aux atomes d'un gaz d'où émission de photons (excitation). Il s'agit en fait de deux phases :

- La première phase est **l'absorption** : Sous l'effet d'une excitation extérieure, une particule peut passer du niveau d'énergie E_1 , stable, à un niveau d'énergie supérieur E_2 , instable.
- La seconde phase est **l'émission spontanée** : Un photon agissant sur une particule à un état d'énergie supérieure E_2 , instable, provoque le retour de cette particule à son état stable E_1 , ce qui entraîne l'émission d'un deuxième photon ayant les mêmes caractéristiques optiques que le photon incident. A partir d'une première émission d'un photon, celui-ci peut produire sur les atomes voisins une réaction en chaîne d'émission de photons cohérents (Figure IV.6).

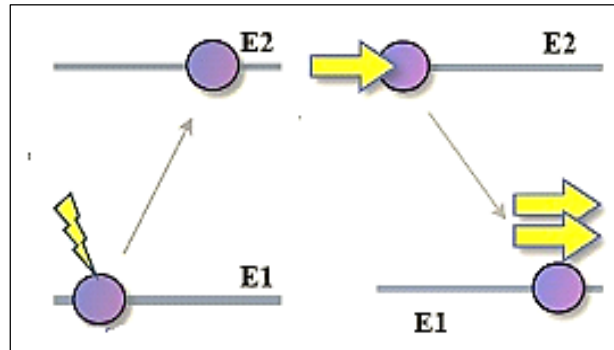


Figure IV.6 Principe de la découpe laser.

L'amplification est obtenue en réinjectant une partie de la lumière émise. En passant maintes fois dans le milieu actif, la lumière s'amplifie par émission stimulée. L'amplificateur est constitué d'un miroir réfléchissant 100% l'énergie et d'un deuxième laissant passer une partie de l'énergie : **le rayon laser**.

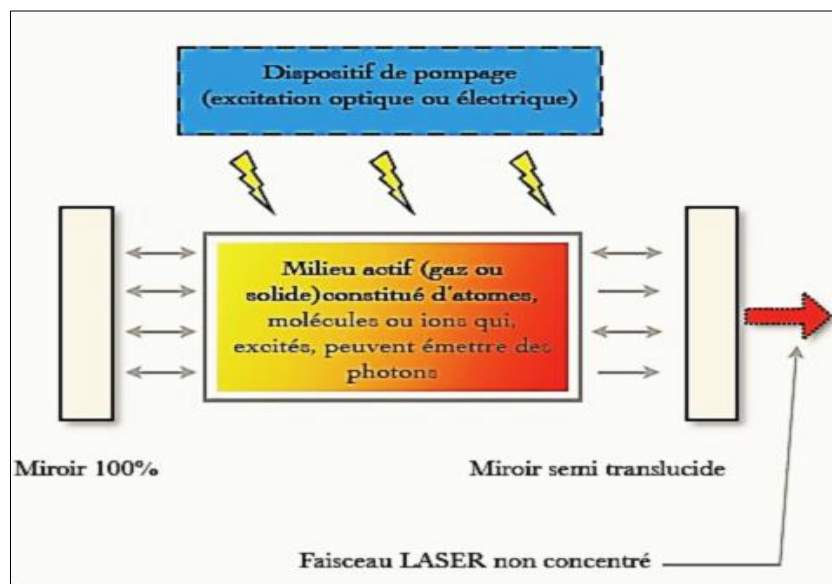


Figure IV.7 Dispositif de pompage.

IV.2.5.2 Fonctionnement d'une machine laser

L'énergie lumineuse est transformée en énergie calorifique, par l'absorption des photons, par les matériaux interposés sur le trajet du faisceau lumineux. L'effet thermique qui en résulte dépend de la concentration du faisceau et des propriétés physiques des matériaux (diffusion thermique, chaleur spécifique et coefficient de transmission, pouvoir réflecteur).

Concernant le **Laser à CO₂**, (émission infra-rouge 10,6 microns), densité du faisceau égale à 5000 kW / cm² (700 fois la concentration de l'énergie solaire).

IV.2.5.3 Utilisation d'une machine de découpe laser

Une source **Laser** peut fonctionner en **soudage, en coupage, en marquage** en changeant seulement le débit et quelquefois le gaz auxiliaire.

IV.2.5.4 Applications d'une machine laser

Le soudage laser, la découpe laser, la gravure laser et le marquage laser trouve des applications dans différents domaines. Les matières travaillées sont d'une manière générale, les matériaux métalliques, les plastiques, le bois, le carton, le textile,...etc.

IV.2.5.5 Avantages de la découpe par laser

Le soudage par laser et la découpe LASER présente quelques avantages qui sont :

- Faibles zones affectées thermiquement (faibles déformations),
- Grandes vitesse de travail,
- Soudures fines et localisées.

V.1 Introduction

La machine-outil et son évolution actuelle, la machine-outil à commande numérique représentent encore le moyen de production le plus important des pièces mécaniques. De par l'avancée des techniques, la machine-outil a subi des modifications, et le couple outil machine-outil s'est adapté aux exigences de productivité modernes. Une Machine-Outil à Commande Numérique (MOCN) est une machine d'usinage à Cycle automatique programmable.

V.2 Fabrication sur des machines-outils à commande numérique

Une machine-outil à commande numérique (MOCN), du point de vue fonctionnel, est la même qu'une machine-outil conventionnelle. La différence entre une MOCN et une machine-outil conventionnelle se situe au niveau du contrôle des fonctions de la machine et des déplacements du support d'outil par rapport à celui de la pièce. Avec les MOCN, les fonctions telles que la rotation de la broche, les déplacements d'outil ou de la pièce ne sont plus attribuées à l'opérateur mais au contrôleur de la machine (Figure V.1). Ce contrôleur peut être aussi utilisé pour commander l'arrosage, le changement d'outil, la vitesse de coupe et d'avance.

Pour réaliser une pièce sur une MOCN les données doivent être introduites dans le contrôleur de la machine. Ces données sont converties en commandes des organes de la machine (moteur de la broche, pompe d'arrosage,...). L'ensemble des données relatives à la réalisation d'une pièce constituent le programme CN.

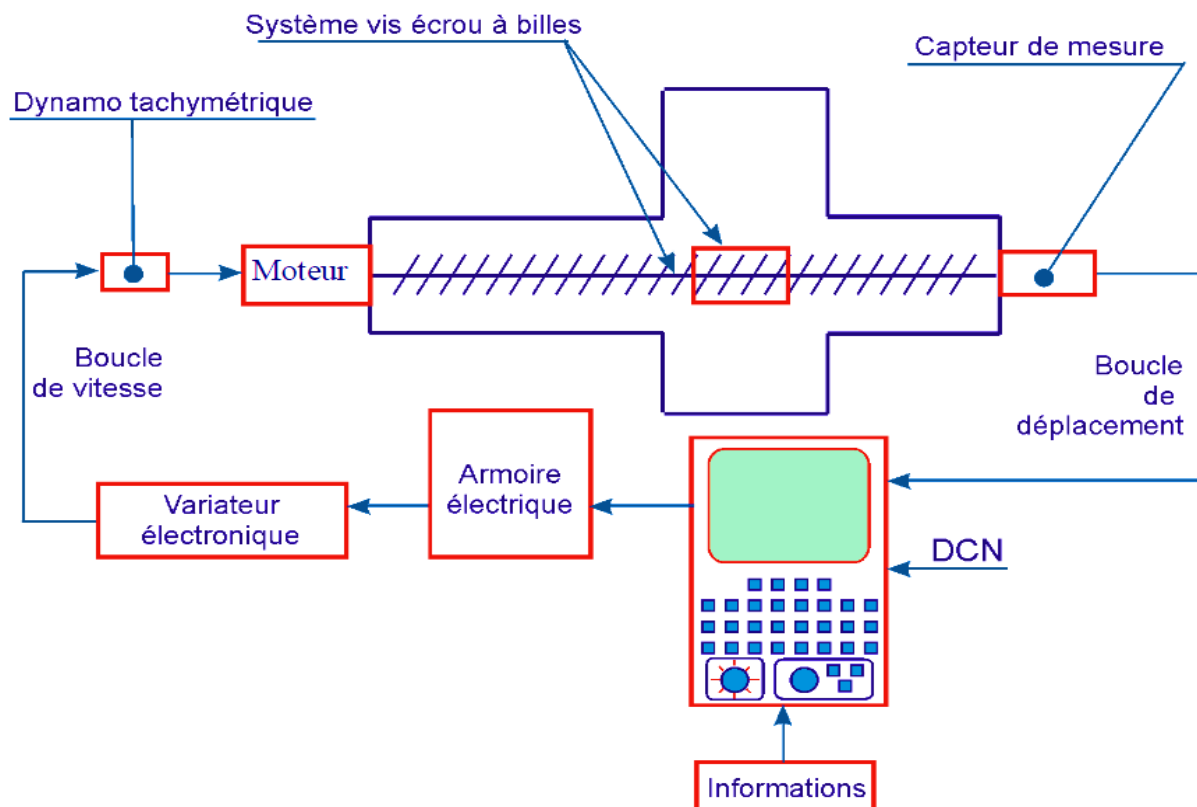


Figure V.1 Architecture d'une machine à commande numérique.

V.2.1 Caractéristique des machines-outils à commande numérique (MOCN)

V.2.1.1 Automaticité

Le premier avantage d'une CN est d'offrir aux machines qui en sont équipées un **très haut niveau d'automatisme**. Sur de telles machines, l'intervention de l'opérateur nécessaire pour

assurer la production de pièces peut être considérablement réduite voire supprimée. De nombreuses MOCN peuvent ainsi fonctionner sans aucune assistance pendant toute la durée de leur cycle d'usinage, laissant l'opérateur libre d'accomplir d'autres tâches en dehors du poste de travail. Cette caractéristique présente un certain nombre d'avantages importants, tels que :

- une diminution notable de la fatigue de l'opérateur
- moins d'erreurs d'origine humaine
- un temps d'usinage constant et prévisible pour chaque pièce d'une même série.

V.2.1.2 Flexibilité

Puisqu'elles sont pilotées à partir d'un programme, les MOCN peuvent usiner des pièces différentes aussi facilement que l'on charge un nouveau programme. Une fois vérifié puis exécuté pour la première série, ce programme peut être facilement rappelé lorsque la même série se représente. Une MOCN se caractérise en outre par des **temps de réglage très courts** qui répondent parfaitement aux impératifs de la production en flux tendus.

La **grande souplesse d'utilisation** de la CN entraîne une quantité non négligeable d'autres avantages :

- changement aisé du programme d'usinage des pièces ;
- réduction des en-cours de fabrication ;
- réduction des outillages et suppression des gabarits ;
- diminution du nombre des outils spéciaux et des outils de forme ;
- réduction des temps de préparation et de réglage du poste de travail (la plupart des réglages, en particulier des outils, étant effectués hors machine) ;
- prise en compte rapide des modifications d'usinage (il est plus facile de modifier une ligne de programme qu'un outillage spécial ou un gabarit) ;
- définition plus rapide et plus fiable des conditions optimales d'usinage ;
- réduction du nombre de prises de pièces du fait de l'universalité de la machine ;
- diminution du temps d'attente entre les diverses machines d'usinage d'un atelier ;
- gain sur les surfaces au sol occupées dans l'atelier ;
- possibilité de réaliser des pièces complexes en gérant des déplacements simultanés sur plusieurs axes ;
- contrôle automatique des outils et des dimensions de pièces avec prise en compte par la CN des corrections à effectuer.
- prise en compte rapide des modifications d'usinage (il est plus facile de modifier une ligne de programme qu'un outillage spécial ou un gabarit) ;
- définition plus rapide et plus fiable des conditions optimales d'usinage ;
- réduction du nombre de prises de pièces du fait de l'universalité de la machine ;
- diminution du temps d'attente entre les diverses machines d'usinage d'un atelier ;
- gain sur les surfaces au sol occupées dans l'atelier ;
- possibilité de réaliser des pièces complexes en gérant des déplacements simultanés sur plusieurs axes ;
- contrôle automatique des outils et des dimensions de pièces avec prise en compte par la CN des corrections à effectuer.

V.2.1.3 Sécurité

La CN a beaucoup contribué à améliorer la sécurité des machines :

- En premier lieu, parce qu'elle connaît très précisément l'enveloppe de travail dans laquelle doivent évoluer les outils (possibilité de mémorisation des courses maximales des organes mobiles) ;
- Ensuite, parce qu'elle permet une simulation graphique hors usinage des programmes nouvellement créés pour vérification et détection des risques éventuels de collision ;
- Enfin, parce qu'en exerçant une surveillance permanente de l'usinage en cours, elle peut décider d'en interrompre le déroulement et d'alerter l'opérateur en cas d'incident.
- Les constructeurs prévoient des dispositifs de protection très élaborés (contre les projections de copeaux ou de liquide d'arrosage, notamment) qui ne s'imposent pas nécessairement sur une MO conventionnelle.

V.2.1.4 Nécessités économiques et techniques

Symbole de précision, de répétabilité, de fiabilité et de flexibilité, qualités primordiales dans une économie de marché où les produits se caractérisent en termes de prix, de qualité et de délai de mise à disposition, la CN se montre économiquement intéressante pour produire à l'unité ou en série toutes les sortes de pièces, même les plus simples . Une fois vérifié et validé, un programme assure la réalisation de 2, 10 ou 1 000 pièces identiques avec la même régularité de précision et la même qualité d'usinage, sans que l'habileté de l'opérateur n'intervienne. Il convient, en outre, de souligner que la CN ouvre de nouvelles perspectives en permettant la définition de pièces complexes qu'il est pratiquement impossible de concevoir et de fabriquer sur des MO conventionnelles.

V.2.2 Domaine d'utilisation des MOCN

Les MOCN sont employées dans de nombreux secteurs industriels (Métallurgie, Bois, Textile). Elle est aussi associée à de nouvelles technologies de façonnage (Laser, Électro-érosion, Jet d'eau).

Les principaux procédés de fabrication sont concernés :

- Perçage, taraudage
- Tournage, alésage
- Fraisage
- Rectification
- Oxycoupage, soudure en continu, par points
- Poinçonnage, cisailage

V.2.3 Avantage et inconvénients liés aux machines-outils à commande numérique (MOCN)

V.2.3.1 Avantages

Ces avantages sont dus aux apports techniques de la commande numérique, et sont d'autant plus perceptibles que la programmation assistée a réduit les contraintes de temps et de coût de programmation. Elle permet :

* Permet la réalisation d'usinages impossibles sur les machines conventionnelles :

- Surfaces complexes ;
- Très grand nombre d'opérations ;
- * Favorise les très petites séries et les pièces unitaires ; Prototypes :
 - Pièces en cours de conception ou modifiées fréquemment ;
 - Production à la demande ou juste à temps (réduction de la taille des lots) ;
- * Précision :
 - Machines de meilleure qualité en général ;
 - Moins de montage, démontage de la pièce ;
- * Fidélité de reproduction :
 - Répétabilité (pas d'opérateur humain dans la chaîne de pilotage).

V.2.3.2 Inconvénients

- * Pour bénéficier de la majorité des avantages précédents, il faut que tout le parc machine de l'entreprise soit des MOCN ;
 - Investissement initial plus important.
 - Rentabilité pas immédiate.
- * Amortissement impose souvent un travail en 2 ou 3 équipes ;
- * Programmation et électronique demandant de la qualification ;
- * Fausse fragilité de l'électronique ;
- * Équipement annexe : ordinateur, logiciel, banc de réglage des outils, changeur d'outils ;
- * Changement dans les méthodes de préparation et de fabrication ;
- * Réticence du personnel au changement.

V.3 Usinage à Grande Vitesse (UGV)

L'usinage à grande vitesse est une technique de coupe 4 à 10 fois plus rapide que l'usinage conventionnel. Gain en productivité, découpe précise, possibilité d'usiner des matériaux fins... L'usinage à grande vitesse est particulièrement employé dans l'aéronautique.

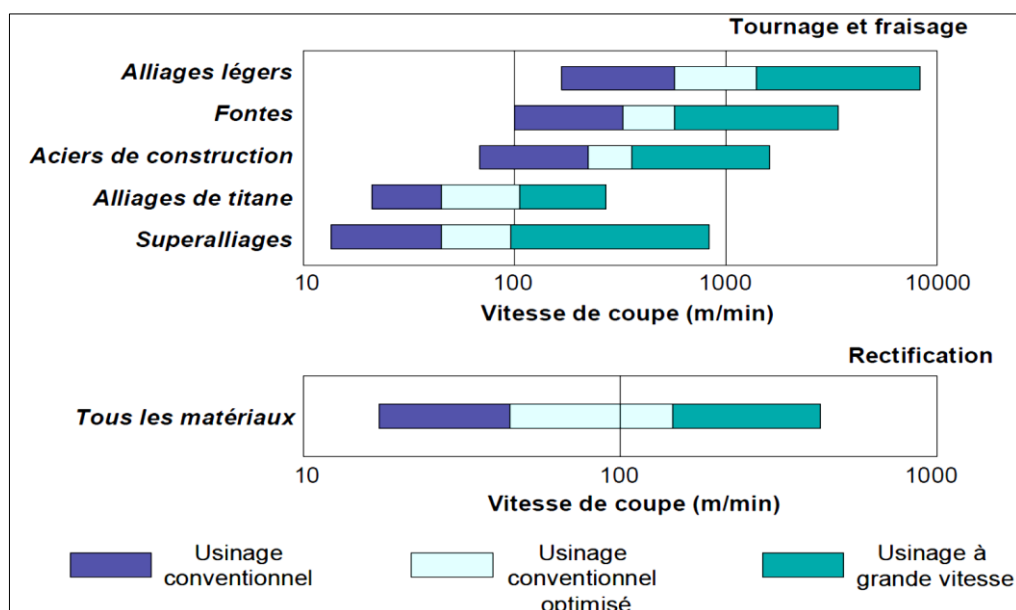


Figure V.2 Domaine de vitesses de coupe en usinage à grande vitesse.

Il permet un usinage dans la masse, ou encore la fabrication de moules pour la fonderie ou la forge. La particularité de l'usinage à grande vitesse réside dans la rapidité de coupe. Les plages de coupes varient selon le matériau employé, mais **la technique est plus efficace que l'usinage conventionnel**. L'usinage à grande vitesse représente donc un gain de temps. La Figure V.2 présente l'ordre de grandeur des vitesses de coupe en usinage traditionnel, usinage traditionnel optimisé et usinage à grande vitesse pour différents matériaux, en fraisage, tournage et rectification.

V.3.1 Principe Usinage à Grande Vitesse (UGV)

Grâce aux vitesses de coupe élevées, les phénomènes de coupe intervenant entre la pièce, l'outil et le copeau sont différents de ceux observés en usinage conventionnel. La chaleur dégagée lors du cisaillement du copeau n'a pas le temps de se propager dans la pièce et l'outil. Par conséquent, la majeure partie de cette chaleur est évacuée par le copeau (environ 80 % en UGV contre 40 % en usinage conventionnel). On remarque aussi que plus la vitesse de coupe augmente, plus l'énergie spécifique de coupe diminue (puissance électrique consommée par la machine divisée par le débit copeaux).

V.3.2 Avantage de l'usinage à Grande Vitesse (UGV)

Malgré la complexité du procédé et les contraintes liées à sa mise en place, l'usinage à grande vitesse assure des gains importants en performances techniques et économiques. Globalement, l'UGV apporte :

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

V.3.3 Inconvénients de l'usinage à Grande Vitesse (UGV)

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

- les opérateurs et programmeurs des machines doivent suivre des formations particulières qui diffèrent considérablement de celles nécessaires pour l'usinage conventionnel,
- une erreur humaine peut avoir des conséquences très significatives sur la machine, du fait des importantes vitesses et des accélérations mises en jeu lors du déplacement des différents composants,

- des précautions maximales au niveau de la sécurité doivent être adoptées : les machines doivent être dotées de carters résistant à des sollicitations du type impact. De même, les outils et pièces tournantes doivent faire l'objet de contrôles fréquents afin de détecter de possibles défaillances par fatigue.

Actuellement, la recherche et le développement dans l'usinage à grande vitesse sont axés sur deux grands thèmes : l'usinage assisté (usinage assisté par laser, usinage assisté par jet d'eau à haute pression) et l'usinage écologique.

L'usinage assisté permet d'améliorer les performances des opérations d'usinage mais par différentes méthodes :

- l'assistance laser, en chauffant la matière avant l'action de l'outil, contribue à diminuer les propriétés mécaniques du matériau à usiner. Cependant elle nécessite des outils de coupe résistants à de hautes températures.
- l'assistance par jet d'eau à haute pression facilite l'usinage en réduisant le frottement entre le copeau et l'outil de coupe. Cela entraîne une diminution de la température à l'interface copeau-outil et permet une augmentation de la durée de vie des outils.

Le développement d'initiatives gouvernementales concernant la prévention de la pollution et l'intérêt accru des consommateurs pour des produits élaborés dans le respect de l'environnement ont mis en place une pression croissante sur l'industrie afin de minimiser le flux de ses rejets. La lubrification représente en effet *une source énorme de dépenses* pour l'industrie de l'usinage. En plus des coûts des lubrifiants, s'ajoutent les coûts de traitement des fluides usagés. De plus, dans des conditions de vitesses et températures élevées, le fluide de coupe est évaporé, atomisé sous forme d'un brouillard qui représente un risque majeur pour la santé des opérateurs.

L'usinage écologique est souhaitable et sera considéré dans un avenir proche comme une nécessité. L'usinage écologique pourra déboucher sur l'usinage à sec (sans aucun fluide de coupe) dont les avantages sont :

- la non pollution de l'atmosphère ou de l'eau, ce qui réduit les risques sanitaires en particulier ceux conduisant à des maladies respiratoires ou de la peau.
- la suppression des résidus de fluides de coupe sur les pièces usinées, permettant d'éliminer les opérations de nettoyage et de lessivage de ces pièces, et les coûts et énergies consommés associés à ces opérations.
- la suppression des résidus de lubrifiant sur les copeaux, réduisant ainsi les coûts de traitement de ces copeaux et les énergies consommées associées.

V.4 Usinage par jet d'eau

Le jet d'eau est considéré comme un procédé de découpe très efficace. Il implique l'utilisation de l'eau sous haute pression en tant que moyen de coupe qui transmet des quantités négligeables de chaleur à la pièce usinée. Les pièces créées par ce procédé ne contiennent aucun changement dans la structure cristalline généralement causé par la chaleur ou les efforts de coupe.

V.4.1 Les constituants de la machine jet d'eau

La machine JEA est une machine de production classique constituée de plusieurs éléments :

- Un châssis dynamique autorisant une vitesse d'avance maximale de 23000mm/min et une accélération maximale de 0,5m.s⁻².
- Une pompe axiale de 30kW permettant d'utiliser une plage de pression allant de 400bar à 3850bar avec un débit maximum de 3,7 L/min.
- Une tête de découpe permettant la focalisation du jet et le mélange de l'abrasif dans l'eau. Le fonctionnement détaillé de cet organe machine est présenté dans le paragraphe suivant.
- Un pupitre de contrôle qui permet de commander la tête de coupe en utilisant le logiciel de FAO.

V.4.2 La découpe au jet d'eau

V.4.2.1 Jet d'eau pure

Le jet d'eau pure (JEP) est utilisé pour découper des matériaux tendres. La découpe est rapide et efficace et utilise une force de coupe extrêmement faible.

Il est principalement utilisé pour couper les matières souples comme les tissus, le PVC, les matières plastiques, les tissus céramiques, les fibres de verre, le caoutchouc, le pain et le cuir. C'est un outil propre qui trouve aussi des applications dans l'agroalimentaire grâce à l'effet décontaminant de la haute pression et au renouvellement constant de l'eau ainsi que dans le domaine médical. En effet, la découpe au jet d'eau pure permet une dissection précise d'organes humains et des tissus mous sans endommager les tissus solides tels que les nerfs ou les veines. De plus, la précision de la découpe au jet d'eau pure permet de réparer les microfissures osseuses et d'assurer un traitement orthopédique en réalisant des perçages précis au niveau des os articulaires qui recevront des vis. Une des premières applications du point de vue environnemental, a été le démantèlement des produits en fin de vie comme, par exemple, les pneus de véhicules automobiles en caoutchouc.

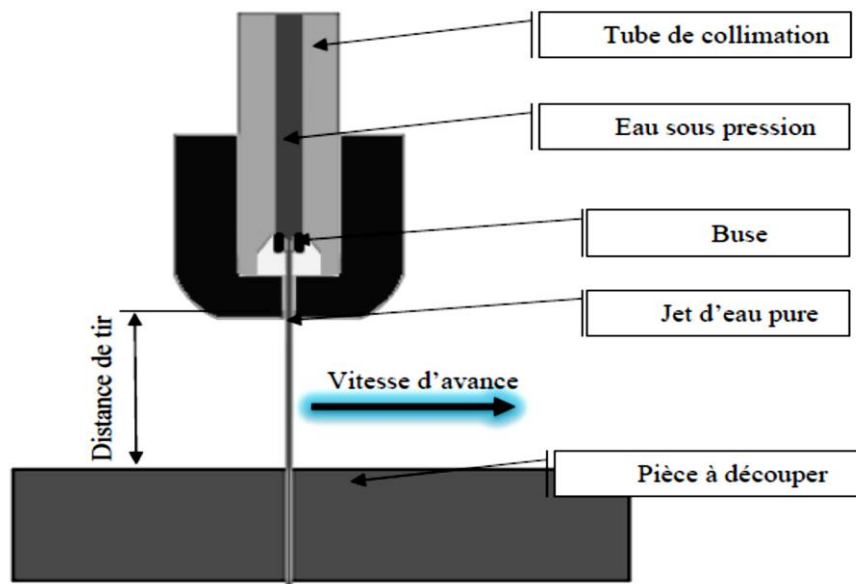


Figure V.3 Tête de coupe en jet d'eau pure.

La tête de coupe (Figure V.3) est la partie principale de la technologie JEP. Elle permet la transformation de la pression (énergie potentielle) en vitesse (énergie cinétique). Les pièces constituant la tête de coupe sont :

- Un tube de collimation à travers lequel l'eau passe sous haute pression,
- Une buse en saphir, rubis ou diamant ayant un petit orifice qui permet d'accélérer les particules d'eau qui la traversent,

V.4.2.2 Jet d'eau abrasif

La technologie de découpe par jet d'eau abrasif (JEA) est une amélioration de la technologie par jet d'eau pure destinée à la découpe de matériaux durs. Le jet d'eau abrasif (JEA) se définit comme étant un procédé de découpe mettant en œuvre le phénomène d'érosion. Pour cela un abrasif est mélangé à l'eau dans la tête de découpe (Figure). Lors de ce mélange, l'air qui est présent dans la conduite d'amenée d'abrasif est également incorporé au jet. Celui-ci contient alors un mélange d'eau, d'abrasif et d'air et devient donc triphasique. L'efficacité de la découpe en JEA réside dans l'énergie transmise aux particules abrasives et au temps d'exposition du jet sur la matière donc à la vitesse d'avance. Lorsque cette dernière est trop importante, l'énergie du jet peut localement ne pas être assez importante pour traverser la pièce et la découpe ne débouche pas. En diminuant la vitesse, le jet disposera de l'énergie nécessaire pour traverser la matière. A la vitesse limite de débouchage, la dépouille est très importante (de l'ordre du rayon de jet). Au fur et à mesure que la vitesse est réduite, l'angle de dépouille diminue, puis s'annule et devient même négatif pour de très faibles vitesses.

V.4.3 Technologie

Le jet d'eau abrasif étant obtenu en ajoutant de l'abrasif avec de l'eau sous pression, la tête de découpe est conçue de manière à permettre l'arrivée de l'abrasif et à le mélanger efficacement dans une chambre de mélange (Figure V.4).

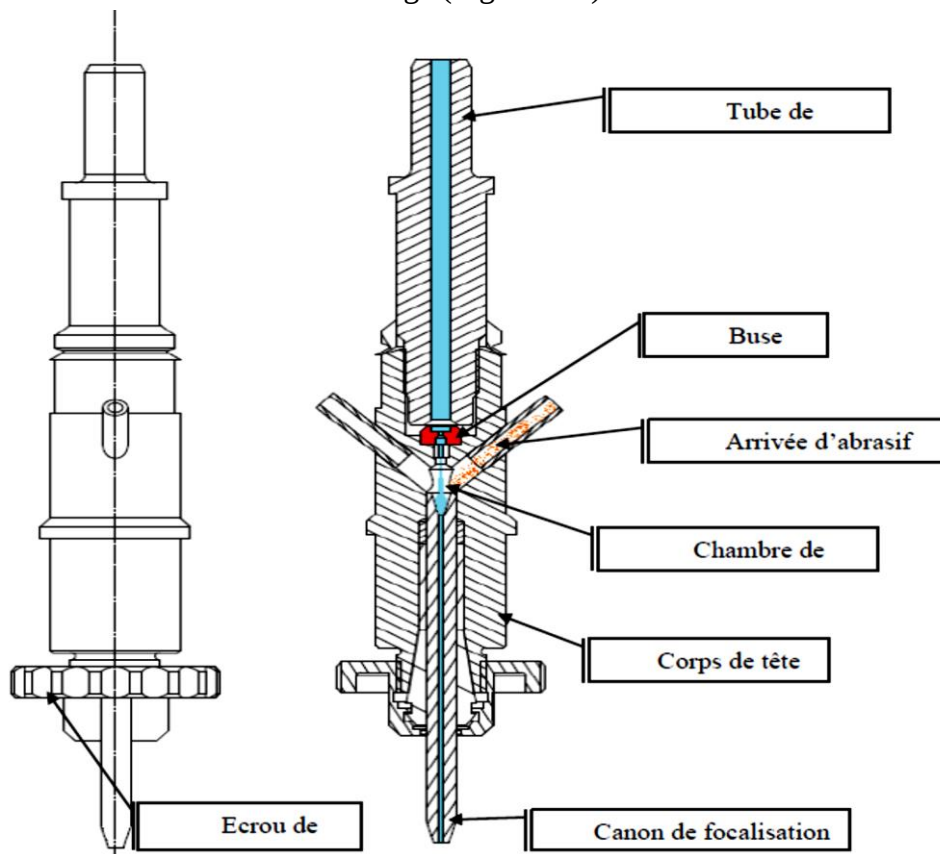


Figure V.4 Schéma de la tête de découpe en jet d'eau abrasif.

Cette arrivée d'abrasif est produite d'une part par gravité car le distributeur d'abrasif est situé au-dessus de la tête de découpe et d'autre part par effet venturi grâce au passage du jet d'eau dans la tête de découpe. Afin d'éviter un colmatage de la tête par l'abrasif, un clapet mécanique piloté ferme le distributeur d'abrasif avant l'arrêt du jet d'eau. Ainsi à la fermeture de l'abrasif, la conduite d'arrivée se vide et le jet se purge rapidement jusqu'à ne plus contenir que de l'eau.

Le jet d'eau peut alors être coupé. La façon dont l'abrasif se mélange au jet est un élément important et il sera détaillé dans le chapitre suivant.

Après le mélange de l'abrasif avec l'eau au sein de la chambre de mélange, l'eau transmet aux particules abrasives la vitesse acquise grâce au faible diamètre de la buse qui transforme l'énergie de pression en énergie cinétique. Accélérées dans le courant du jet d'eau, les particules abrasives sont ensuite guidées dans le jet pour entrer dans le canon de focalisation qui permet de concentrer le jet.

V.4.4 Avantages

- propre.
- immatériel (ne chauffe pas).
- inusable et facilement réglable.
- précis (quelques 1/100èmes de mm).

V.4.5 Inconvénients

- limitation quant à la forme et à la profondeur de pénétration.
- durée de vie des buses (200 heures sous 4000 bars).
- coût de l'installation : 100 000 à 140 000 €, et encore autant pour la filtration et l'adoucissement de l'eau.

Références Bibliographiques

- [1] Polycopiés Cours «Technologie de Fabrication Mécanique», O. AKOURRI, Faculté des Sciences et Techniques Tanger, Université Abdelmalek Essaadi, Année 2008-2009.
- [2] Polycopiés Cours « Fabrication mécanique », Philippe DEPEYRE, Faculté des Sciences et Technologies, Université de la Réunion, Année 2004-2005.
- [3] Choix de Matériaux en Conception Mécanique ; MICHEL F. Ahby ; DUNOD, 1999.
- [4] Technique de l'ingénieur 2000 B.BM.BT. Janvier 2000 Printed in France by Imprimerie.
- [5] Polycopiés Cours « Procédé de fabrication», Belloufi Abderrahim, Faculté des Sciences et Technologies, Université Kasdi Merbah Ouargla, Année 2010.
- [6] Y. Schoefs, S. Fournier, J. C. Leon « Productique mécanique » Edition Delagrave, 1994, France.
- [7] Ch. Decreuse, D. Feschotte, « Ingénierie simultanée », Techniques de l'Ingénieur, Articles : AG3 et A 5 310.
- [8] D. Gelin, M. Vincent, « Eléments de fabrication », Les Editions Foucher, 1995.
- [9] R. Butin, M. Pinot, « Fabrications mécaniques », Tome II, Les Editions Foucher, 1981.
- [10] C. Barlier, L. Girardin, « MémoTech : Productique, Matériaux et usinage », 3ème Edition Paris, CASTELLA 1992.
- [11] C. Marty, J.M Linares, « conception et industrialisation T1 » Hermès Science, Paris France, 1999.
- [12] Sites internet <http://moodle2.insa-lyon.fr/mod/folder/view.php?id=22094&lang=pt>