



Techniques de Fabrication mécanique
Dr: Ali Debih
Faculté de Technologie de M'sila
Département Génie Mécanique
2022 -2023

Département de génie mécanique

GM/n° 106

M'Sila, le 26 Décembre 2018



**Extrait du PV du comité scientifique du département de génie
mécanique
du 26 /12/ 2018**

Le Comité Scientifique du Département de génie mécanique, s'est tenu le mardi vingt six décembre deux mille dix huit à 9 heures 30 minutes.

Les membres du comité scientifique, ont examiné les rapports d'expertise du photocopie de Dr **Ali Debih**. Ils ont validé les décisions des experts.

Nom et prénom	Intitulé du cours	Expertise	
		Expert	Avis de l'expert
Ali Debih	Techniques de fabrication mécanique	Dr Moussa Zaoui	Favorable
		Dr Hocine Makri	Favorable
		Dr Mustafa Moussaoui	Favorable

Président du comité Scientifique de département de génie mécanique

Contenu proposé

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction 2 semaines

Généralités, Interactions Procédés – Matériaux, Classification des procédés d'obtention des pièces.

Chapitre 2: Procédés de fabrication par enlèvement de matière 4 semaines

Introduction, Principe de Génération de surface, Eléments de régime de coupe, Machines-outils, (Tour, Fraiseuse, Perceuse, Raboteuse et étau limeur, Mortaiseuse, Tailleuse d'engrenage, Rectifieuse), Matériaux et géométrie des outils .

Chapitre 3 : Procédés de fabrication sans enlèvement de matière 3 semaines

Introduction, Procédés par Déformation, Principe, Différents modes (Laminage, Forgeage, Estampage et Matriçage, Tréfilage, filage, Pliage, Extrusion, Emboutissage), Procédés par fusion, Généralités, Principe (Moulage et Fonderie), Différents modes de moulage.

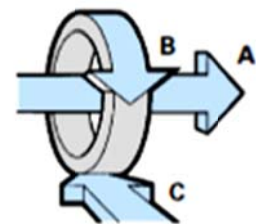
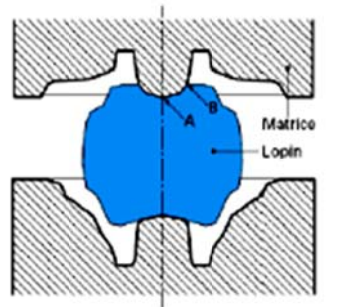
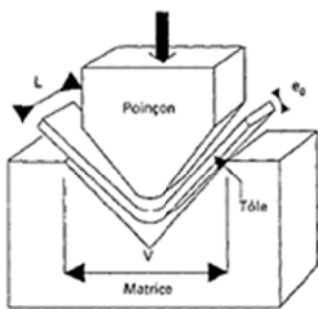
Chapitre 4 : Procédés non conventionnels 3 semaines

Généralités, Différentes techniques d'usinage (Electro érosion, Electrochimique, Ultrason, Bombardement électronique, Laser), Avantages.

Chapitre 5 : Nouvelles technologies de mise en forme 3 semaines

Introduction, Fabrication sur machines-outils à commande numérique, Usinage à Grande Vitesse (UGV), Usinage par jet d'eau.

**Techniques de Fabrication
mécanique S4 TCT**
Dr: Ali Debih
Faculté de Technologie de M'sila
Département Génie Mécanique
2022 -2023



Chapitre -I-

I.1. Introduction

L'expression « procédés de fabrication mécanique » désigne les moyens mécaniques imaginés et mis en œuvre par l'homme pour transformer, par le travail, la matière en produits utiles. On peut facilement concevoir que l'homme exploita d'abord des moyens manuels, d'où le terme « manufacturer » (de *manus*, « main » et *factus*, « faire »), employé aujourd'hui pour désigner le fait de fabriquer des biens avec des moyens mécaniques.

L'évolution dans ce domaine, tout comme dans les autres sphères de l'activité humaine, fut lente et hésitante. Ce n'est qu'au cours du XVIIIe siècle, à l'ère de la révolution industrielle, que la mécanisation, puis l'automatisation des procédés de fabrication, tels que nous les connaissons de nos jours, ont réellement commencé à s'accélérer. Aujourd'hui, l'éventail des procédés de fabrication et des matériaux, qui continue d'ailleurs à s'élargir, est tellement vaste que l'exploitation rationnelle des uns et des autres, de même que celle de la force ouvrière, au sens noble du terme, nécessite une planification rigoureuse si l'on veut en optimiser le rendement. C'est au bureau des méthodes qu'incombe généralement cette responsabilité.

Les machines, avec lesquelles on fabrique les produits, coûtent de plus en plus cher, ainsi que la main-d'œuvre qui les utilise. Les machines se compliquent grandement, elles possèdent plus d'axes, elles ont des commandes numériques et sont souvent équipées d'appareillage automatique coûteux, tels les changeurs d'outils, les évacuateurs de copeaux, etc. Il est donc important d'immobiliser ces systèmes de production et cette main-d'œuvre le moins de temps possible. Pour ce faire, il faut faire subir à une pièce le nombre minimal d'opérations de montage/démontage sur des machines différentes. Le bureau des méthodes va jouer un rôle fondamental à cet égard.

Au bureau des méthodes, le travail s'effectue selon les principes et les règles de l'organisation scientifique du travail (**OST**). Science industrielle de la production optimale, l'OST vise à économiser la santé des travailleurs et à obtenir des productions de la meilleure qualité possible pour le coût le plus économique possible. Cette science s'est constituée à partir :

- ☒ des principes et des méthodes de travail énoncés par les savants des XVIe et XVIIe siècles;
- ☒ des modèles de travail scientifique utilisés par les chercheurs des XVIIIe et XIXe siècles, qui conduisirent à l'énoncé des principes et des règles particulières au domaine industriel;
- ☒ des connaissances industrielles que la mise en pratique méthodique de ces règles et principes par les industriels depuis la fin du XIXe siècle a permis d'accumuler.[1]

I.2. Interactions Procédés – Matériaux

I.2.1. Généralités sur la sélection des matériaux:

Le point de départ de la conception d'un produit industriel est une idée innovante ou un besoin du marché. L'étape ultime correspond à toutes les spécifications qui rendent la réalisation du produit possible (colonne centrale de la **figure. I.1**).

Il est impératif de définir précisément dès le départ le besoin à satisfaire (sous la forme d'un énoncé du type il nous faut réaliser une pièce qui remplit telle fonction). Les traités classiques de conception insistent sur la nécessité d'une spécification de la fonction indépendamment de toute solution remplissant cette fonction, cette précaution ayant pour but d'éviter les limitations qui pourraient résulter d'idées préconçues.

La démarche de conception consiste ensuite à développer des concepts qui peuvent potentiellement remplir la fonction demandée. À cette étape de la conception, toutes les options demeurent ouvertes, et le concepteur se doit d'envisager tous les concepts possibles et toutes leurs combinaisons.

À l'étape suivante, chaque concept est analysé à un niveau d'approximation qui permet de déterminer grossièrement la taille des pièces, les contraintes mécaniques auxquelles elles sont soumises, les températures et environnements dans lesquels elles doivent fonctionner. À cette étape, le concepteur doit sélectionner les classes de matériaux qui peuvent éventuellement être utilisés dans ces conditions.

Le concepteur passe ensuite de ce schéma de faisabilité à une étape de conception détaillée dans laquelle les spécifications de chaque élément sont précisées. Les composants critiques sont alors analysés en détail (du point de vue mécanique et thermique), des méthodes d'optimisation sont utilisées pour maximiser la performance de composants ou de groupes de composants, et enfin un choix définitif de la forme et des matériaux adaptés

est arrêté. L'aspect production et coût est alors analysé et cela conduit à clore la démarche de conception par des spécifications de production.

Cette démarche de conception se décline quelque peu différemment si l'on a affaire non pas à une conception originale qui démarre pour ainsi dire de rien, mais à une conception adaptative, ou à une conception de variation qui, toutes deux, partent d'un produit déjà existant. [2]

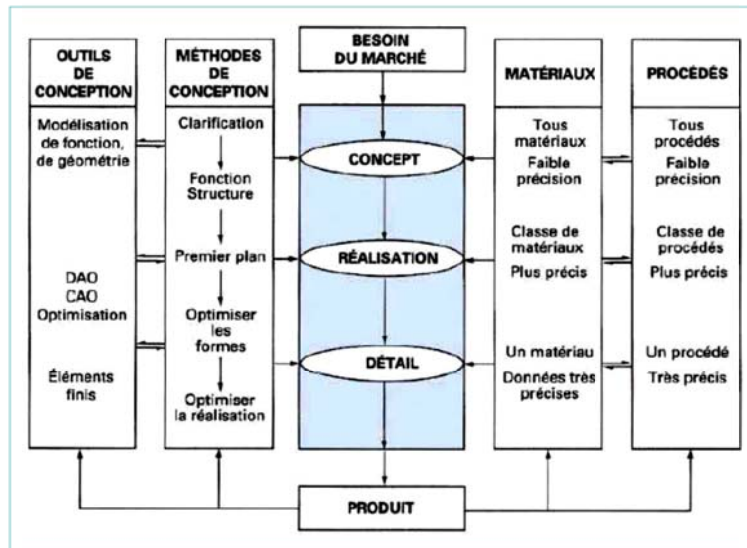


Figure I.1 – Les différentes étapes de la conception [2]

- **La conception originale** implique une idée nouvelle ou un nouveau principe de fonctionnement (comme le stylo à bille ou le disque compact). Dans cette démarche de conception, il est impératif de réfléchir avec le maximum de latitude, d'envisager toutes les solutions possibles et de choisir, par une démarche rationnelle, la meilleure d'entre elles. Cette largeur de vue doit aussi s'appliquer au choix des matériaux. De nouveaux matériaux peuvent rendre possibles des conceptions originales : le silicium de haute pureté a rendu possible le transistor, le verre de haute pureté la fibre optique, les aimants permanents à haute coercivité les appareils auditifs, les alliages à haute tenue en température les turbines de réacteurs. Quelquefois, le nouveau matériau suggère le nouveau produit, d'autres fois le nouveau produit exige le développement de nouveaux matériaux. Par exemple, l'industrie nucléaire a conduit au développement de nouveaux alliages, la technologie des turbines de réacteurs est aujourd'hui motrice dans le développement des céramiques ou des composites à matrice métallique. [2]
- **La conception adaptative** part d'un concept déjà existant et recherche une amélioration incrémentale en raffinant le principe de fonctionnement. Ce type de conception est, lui aussi, rendu possible

par le développement des matériaux : les polymères ont remplacé les métaux dans les objets électroménagers, la fibre de carbone le bois dans les objets pour le sport. La conception adaptative de la boîte pour boisson a conduit à une rude compétition entre l'aluminium et l'acier. Des marchés entiers peuvent être gagnés (ou perdus) selon l'usage que le manufacturier fait des matériaux classiques et des nouveaux matériaux. [2]

- **La conception de variation** concerne un changement de taille ou une amélioration de détail sans que la fonction ou son principe de réalisation soit modifié. Par exemple, la conception de réservoirs de plus grande taille impose le choix de nouveaux matériaux. Les bateaux de petite taille sont réalisés en fibre de verre, alors que les bateaux de taille importante sont en acier ; les chaudières peuvent, suivant leur capacité, être réalisées en cuivre ou en acier ; on utilise pour les avions subsoniques certains alliages qui ne sont pas adaptés aux avions supersoniques. [2]

I.2.2. Interaction matériau-forme-procédé

En principe, on ne peut découpler la sélection du matériau et celle du procédé : le choix du matériau limite les procédés possibles, le choix du procédé modifie les propriétés du matériau. La fonction recherchée impose à la fois le choix du matériau, de la forme de la pièce et du procédé permettant de l'obtenir (**figure I. 2**). Un exemple particulièrement saisissant de cette interaction est la sélection des alliages et des procédés pour les pièces moulées : les choix du procédé, de l'alliage et de la forme de la pièce ne peuvent être séparés. De cette imbrication entre les différents aspects du choix résulte une difficulté certaine : il est impossible de choisir le matériau sans connaître le procédé, ni le procédé sans connaître le matériau ; il s'ensuit que la procédure de sélection se doit d'être itérative et procédera suivant une hiérarchisation des problèmes : on sélectionnera d'abord un ensemble de matériaux auxquels seront associés un ensemble de procédés envisageables, parmi lesquels on choisira ceux qui sont a priori mieux adaptés à la fonction recherchée ; on itérera la procédure en précisant à chaque étape les choix du matériau et du procédé. [2]

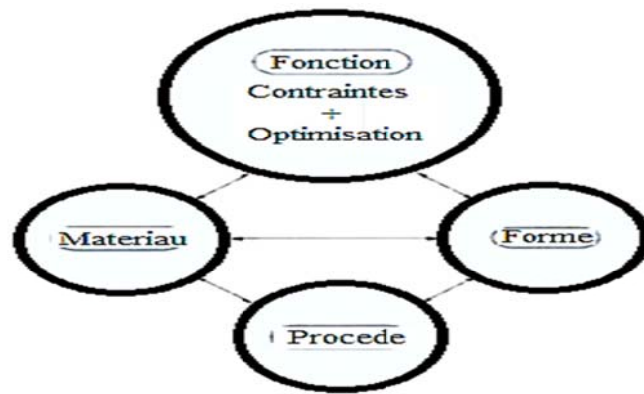


Figure I.2. Interactions forme/matériau/procédé/fonction [2]

I.2.3 Les procédés de mise en forme

Les procédés de mise ayant une incidence directe sur les caractéristiques morphologiques et mécaniques des pièces, il est nécessaire de connaître les principes physiques et technologiques de ceux-ci afin de concevoir efficacement nos produits.

Le choix d'un procédé de mise en forme est fonction du matériau retenu et des caractéristiques produit. En effet, chaque procédé dépend d'une famille de matériaux et impose ses règles de tracé. De la même manière, les caractéristiques pièces peuvent imposer un procédé.

I.3. Typologie des procédés

On peut classer les procédés en trois catégories suivant le degré de finition de la pièce :

- Primaire : Mise en forme à partir d'un semi-produit
- Secondaire : Mise en forme de surface fonctionnelle
- Tertiaire : Augmente la qualité pièce (polissage)

I.4. Classification des procédés de mise en forme

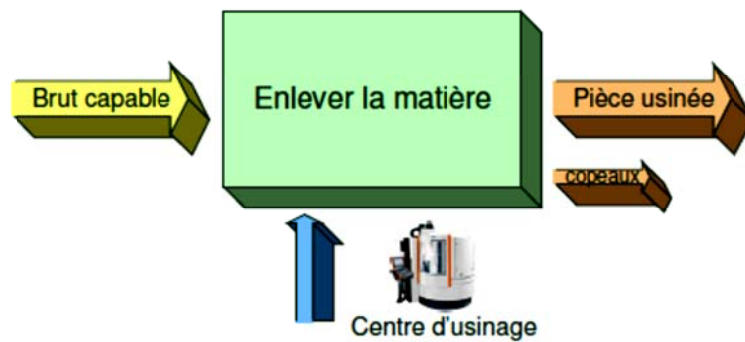
On entend par procédé de mise en forme tout moyen permettant de passer du virtuel au réel.

On peut classer les procédés dans quatre familles suivant la méthode de mise en forme.

I.4. 1. Par enlèvement de matière

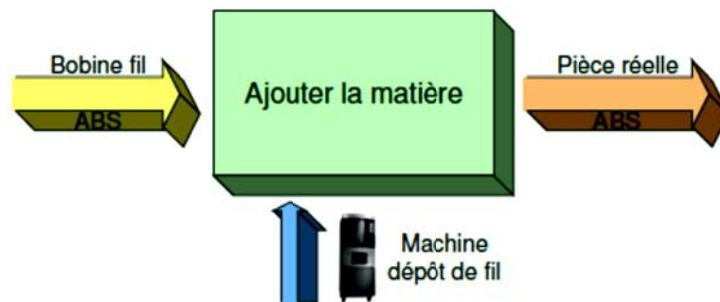
On part d'un bloc, et on crée les formes de la pièce en enlevant la matière à l'aide d'un outil

Exemple : usinage



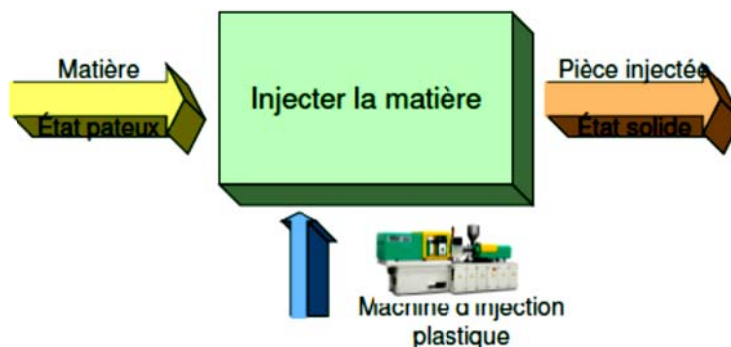
I.4. 2. Par ajout de matière

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



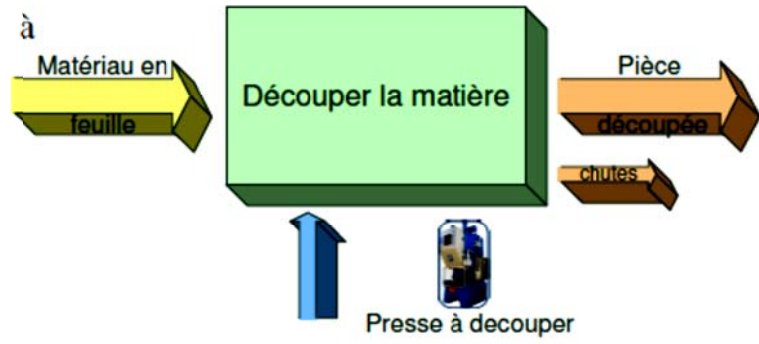
I.4. 3. Par transformation (moulage)

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



I.4. 4. Par déformation

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



II.1. Généralités sur l'usinage

L'usinage par enlèvement de matière est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir de pièces moulées, extrudées ou forgées. Le procédé est par contre, couteux (machines, outillages, operateurs qualifiés) et relativement lent. Enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. **Figure II.1**



Figure II.1 : Principe de l'usinage.

II.2. Les procédés de coupe

L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil coupant ; la force appliquée induit la formation de copeaux. Il s'agit des procédés de loin les plus importants et représentent plus de 70% de la valeur marchande totale des machines-outils d'usinage. [4,5]

Il existe en effet un grand nombre de procédés de coupe :

- **Les procédés à forte vitesse et grand débit :**

- ☒ **Le fraisage** est un procédé de fabrication. Il se caractérise par le recours à une machine-outil : la fraiseuse. L'outil classiquement utilisé est la fraise. En fraisage, l'enlèvement de matière sous forme de copeaux résulte de la combinaison de deux mouvements : rotation de l'outil de coupe d'une part, et avance de la pièce à usiner d'autre part. **Figure II.2.**



Figure II.2. Fraisage

- ☒ **Le tournage** est un procédé d'usinage par enlèvement de matière qui consiste à l'obtention de pièces de forme

cylindrique ou/et conique à l'aide d'outils coupants sur des machines appelées tours. Le tournage rectifie des pièces cylindriques. On appelle tournage dur celui qui se passe dans le cadre de l'usinage grande vitesse sur des tours horizontaux ou verticaux. **Figure II.3.**



Figure II.3. Tournage

☒ **Le perçage** est un usinage consistant à faire un trou dans une pièce. Ce trou peut traverser la pièce de part en part ou bien ne pas déboucher. On parle alors de trou borgne. **Figure II.4.**



Figure II.4. Percage

- **Les procédés de vitesse plus faible : Figure II.5.**

On peut également distinguer : le sciage, le rabotage, le mortaisage (a), le brochage, le taraudage (b), l'alésage (c) et le taillage d'engrenage (d).



Figure II.5. (a) le mortaisage, (b) le brochage, le taraudage, (c) l'alésage, (d) taillage d'engrenage. [4,5]

- **Les procédés par abrasion:**

Il s'agit de la seconde classe de procédés en importance. Les machines-outils correspondent environ 20% de la valeur marchande totale. L'enlèvement de matière est dû à l'action mécanique d'un grand nombre de grains abrasifs de petite taille (support solide, contre pièce et dans un milieu fluide). Dans une meule en travail la partie active est la couronne de grains abrasif qui entre en contact avec la surface à réaliser. **Figure II.6**



Figure II.6. Rectification plane et cylindrique, [4,5]

- **Les procédés physico-chimiques :**

L'enlèvement de matière est réalisé par des actions non mécaniques (action thermoélectrique d'un arc électrique, réaction avec électrolyte, réaction chimique...).



- **Le décolletage**, quant à lui, selon le Centre technique du décolletage (CTDEC) recouvre « une série d'opérations consistant à fabriquer des pièces généralement métalliques, dont l'usinage de base est obtenu sur des machines automatiques ou semi-automatiques, à partir de barres, couronnes ou ébauches ». Les industriels produisent ainsi, en plus ou moins grandes séries, des pièces mécaniques de haute résolution exécutées d'après un plan ou des préséries. Le matériau, acier principalement, sous forme de barres, est serré dans une pince qui l'entraîne en rotation puis passe à travers la broche. [4,5]



II.3. Principe de Génération de surface

La plupart des pièces mécaniques comportent des surfaces géométriques élémentaires:

- Plans
- Cylindriques
- Cônes
- Hélicoïdales

La réalisation de ces surfaces résultera de la combinaison de deux mouvements:

- Le mouvement de coupe **M_c**
- Le mouvement d'avance **M_a**

Pour réaliser un usinage il est nécessaire que l'outil et la pièce soient animés de mouvements adaptés. **Figure II.7(a)**. Ainsi, au contact de la pièce et de l'outil, en fonction des vitesses de déplacement, des trajectoires choisies, se crée un copeau provenant de la pièce usinée.

Cette cellule d'usinage se compose d'une **machine-outil**, d'un ensemble **porte-outil - outil** et d'un ensemble **porte pièce - pièce**. **Figure II.7(b)**.

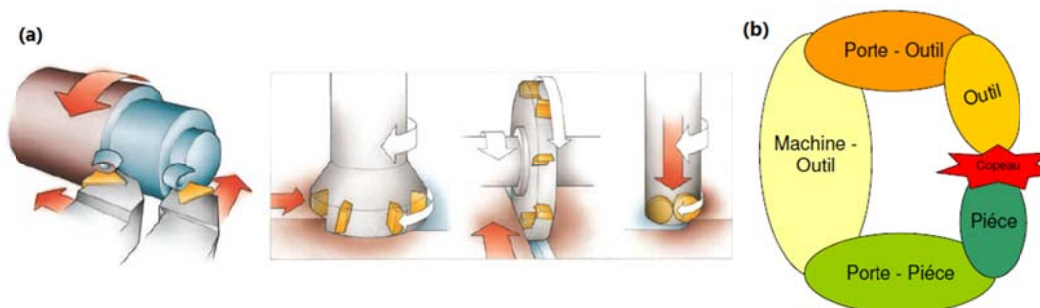


Figure II.7. Génération de surface [4,5]

II.4. Les paramètres de coupe

La formation du copeau résulte d'actions mécaniques complexes. L'arête de coupe (intersection de la face de coupe avec la face de dépouille) pénètre dans la matière et provoque la formation du copeau. Le frottement de celui-ci sur la face de coupe et le frottement de la pièce sur la face de dépouille provoquent une élévation importante de la température, qui peut entraîner une fusion locale du copeau. Ce phénomène peut conduire à l'adhérence du copeau sur la face de coupe (copeau adhérent). **Figure II.8**

Les principaux facteurs influençant la formation du copeau sont :

- la vitesse de coupe V_c [m/min] ;
- la profondeur de passe a [mm] ;
- la vitesse d'avance V_f [mm/tour] ou [mm/dent/tour];
- la géométrie de l'outil;
- les matériaux de l'outil et de la pièce;
- La lubrification.

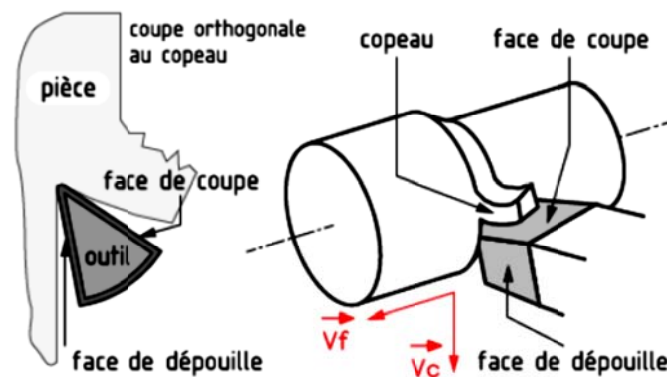


Figure II.8. Orientation -outil et formation du copeau

II.4.1 La notion de copeau

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

II.4.2 Les critères de choix

Plusieurs critères permettent de définir les paramètres de la coupe :

- le type de machine et sa puissance,
- la matière usinée,
- la matière de l'outil,
- le type d'opération.

L'objectif est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela il faut déterminer certains paramètres spécifiques, notamment la vitesse de coupe V_c , la vitesse d'avance V_f et la profondeur de passe a_p .

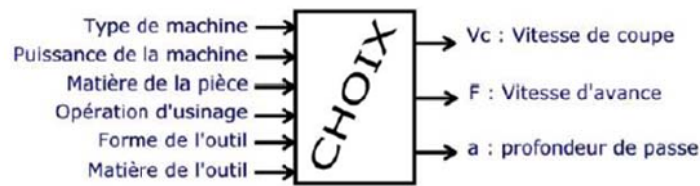


Figure II.9. Les choix des paramètres de coupe [6]

II.4.3 Les paramètres de coupe

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

- avec le type de matière à usiner et le matériau de l'outil,
- selon la nature de l'opération (ébauche ou finition),
- par rapport au type d'usinage effectué (application d'un coefficient réducteur lorsque l'usinage est délicat),
- fonction des conditions de lubrification (travail à sec ou lubrifié).

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

b) La fréquence de rotation N [tour /min] se calcule par la formule suivante :

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

Où D [mm] représente le diamètre de la pièce à usiner (en tournage) ou le diamètre de la fraise/du foret (en fraisage/perçage).

A l'aide des tableaux indiquant les fréquences de rotation disponibles sur les machines- outils; on choisit les valeurs les plus proches de celles calculées.

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

- une dent; c'est l'avance par dent
- un tour; c'est l'avance par tour

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

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

$$V_f = f_z \times Z \times N$$

avec **Z** le nombre de dents de la fraise et **N** est la fréquence de rotation

e) Le paramètre profondeur de passe a_p dépend de la surépaisseur de matière à usiner ainsi que de la nature de l'opération (ébauche ou finition).

f) La section du copeau. La valeur de l'avance par tour **f** multipliée par la profondeur de passe **a_p** déterminent la section du copeau enlevée par chaque dent, valeur qui influe elle demandée à la machine-outil.

II.4.4 L'arrosage et la lubrification dans l'usinage

II.4.4.1. Les fonctions du fluide de coupe

L'utilisation des liquides d'arrosage composées principalement de l'eau, huiles minérales et additifs chimiques, permet d'assurer les fonctions suivantes :

- le refroidissement de l'outil. La durée de vie est inversement proportionnelle à la température de coupe, elle est affectée par toute variation de température.
- la diminution du coefficient de frottement. Plus le frottement est élevé, plus l'angle de cisaillement est petit. Le changement de lubrifiant modifie le rapport de coupe et par conséquent le coefficient de frottement.
- l'amélioration de l'état de surface. La formation de l'arête rapportée est à l'origine d'une rugosité élevée aux vitesses de coupe basses. La lubrification peut atténuer la formation de l'arête rapportée (additifs anti - soudure) et contribue à un meilleur état de surface.
- l'évacuation des copeaux. L'arrosage par jet permet de maintenir un film lubrifiant entre les parties frottantes et facilite l'évacuation des copeaux (en perçage par exemple). L'arrosage abondant permet une meilleure évacuation des copeaux.

II.4.4.2. La pénétration des fluides coupe

Les facteurs qui s'opposent à la formation du film lubrifiant près de l'arête sont :

- la pression de coupe
- l'évaporation due aux températures élevées
- la vitesse de glissement des copeaux par outil Les zones de pénétration vers l'arête sont :
- entre la face en dépouille et la surface usinée
- entre le copeau et l'outil (la face d'attaque) Il est important d'assurer, en usinage par enlèvement de matière, un **arrosage abondant et continu**. Il faut également **commencer l'arrosage avant de démarrer l'usinage**.

II.5. Machines-outils

II.5.1. Généralités

L'usinage s'effectue dans le but de donner aux pièces brutes la forme, les dimensions et la précision nécessaire demandée par le concepteur dans son dessin de définition, par enlèvement de copeau (surépaisseur) sur des machines-outils appropriées [7].

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 étaux-limeurs.
- **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.5.1. 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. Les opérations élémentaires de tournage sont : le chariotage, le dressage, le filetage, le tronçonnage, le perçage. La combinaison des mouvements de la pièce et de l'outil permet de réaliser des surfaces variées : cylindriques, coniques, sphériques, hélicoïdales.... qui peuvent être extérieures ou intérieures. Malgré la diversité des conceptions et des dimensions, tous les tours présentent beaucoup d'ensembles et d'éléments similaires (**figure II.10**).

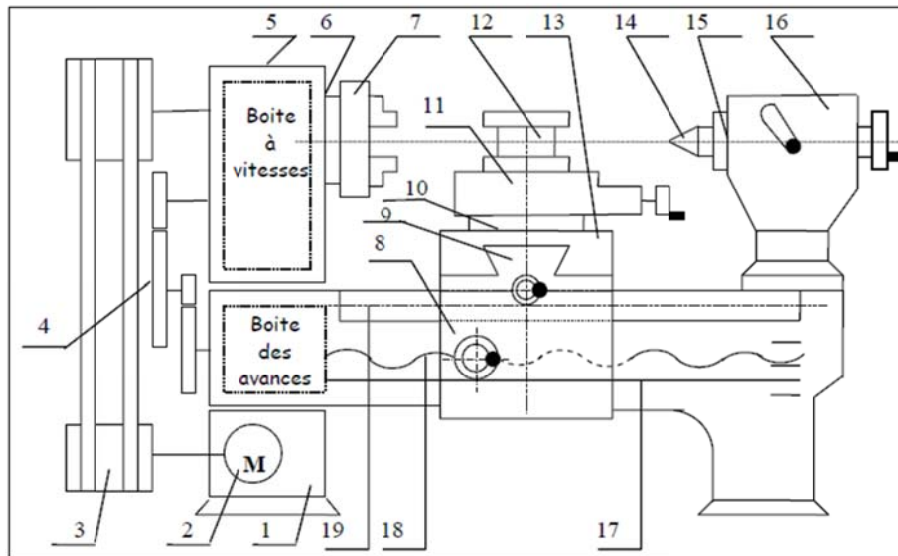


Figure II.10 : Schéma d'un tour.

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

Les types de tour employés dans l'industrie sont :

- ☒ les tours parallèles: ils sont universels
- ☒ les tours revolver: ils n'ont ni contre poupée, ni de vis mère. Ils sont équipés par un chariot revolver muni d'une tourelle revolver à 6 positions à axe de rotation vertical ou horizontal.
- ☒ les tours en l'air : Les tours en l'air ont des (mandrins) de grand diamètre (allant jusqu'à 5000 mm). Ils servent à usiner des pièces de grands diamètres mais de petites longueurs.
- ☒ les tours verticaux : Le tour vertical comprend un ou deux montants verticaux (colonnes), une traverse et un plateau à mors. Sur la traverse se trouvent deux chariots verticaux et sur les montants des chariots latéraux.
- ☒ les tours multibroches: ce sont des tours avec plusieurs mandrins (travail sériel)

Ces tours peuvent être automatiques, semi-automatiques, ou à commande numérique avec ordinateur. Ils se distinguent les uns des autres par leur forme, leurs dimensions, la précision d'usinage, de la puissance, ...etc.

Les principaux usinages réalisables sur tour sont : le dressage, le chariotage, perçage, gorgage, borage, filetage extérieur et intérieur, formes spéciales et moletage.

II.5.5. Fraisage

Les machines à fraiser servent à réaliser des surfaçages ainsi que l'usinage des surfaces de différentes formes ; elles permettent aussi de tailler les dents et l'usinage des surfaces de forme complexe [9]. Les fraiseuses doivent leur appellation à la fraise, outil de coupe à dents multiples utilisée sur ces machines.

Le principe de travail de la fraiseuse est la combinaison d'un mouvement de coupe (rotation de la fraise sur la broche) avec un mouvement auxiliaire (translation de la table portant la pièce par rapport à la fraise) comme le montre la figure II.11 :

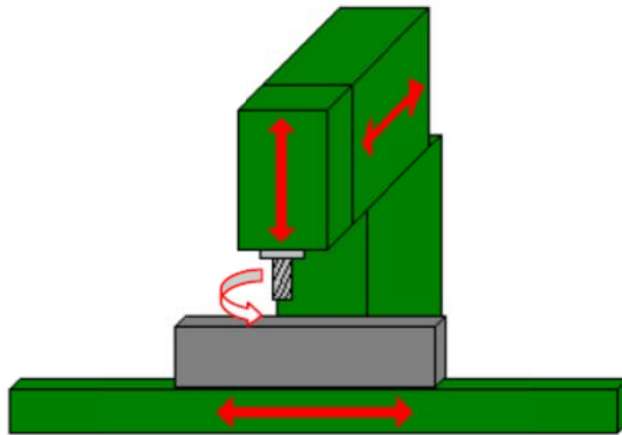


Figure II.11 : Principe du fraisage

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.5.5.1. Trois opérations types de fraisage

Indépendamment du type de fraise choisie, l'opération de fraisage fera fondamentalement intervenir une des trois méthodes suivantes ou une combinaison de celles-ci. Compte tenu du choix de méthodes qui s'offrent en fraisage, il est important, au préalable, d'établir une distinction entre les différentes directions d'avance par rapport à l'axe de rotation de l'outil (figure II.12). (A) correspond, sur cette figure, à la direction axiale, (B) à la direction radiale et (C) à la direction tangentielle. [10].

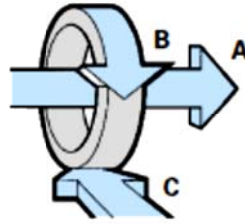


Figure II.12. Directions d'avance en fraisage [10].

Ces opérations types permettent de réaliser, le surfaçage, fraisage trois tailles et le perçage, **figure II.13.**

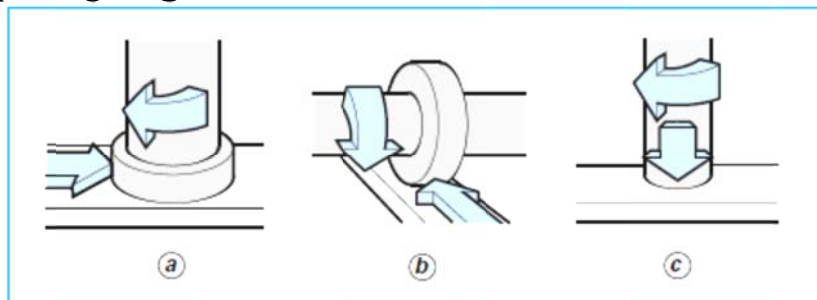


Figure II.13. Surfaçage, fraisage d'épaulements et fraisage axial. [10].

II.5.6. Perçage

II.5.6.1. Définition

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.

II.5.6.2. Perceuses

S'emploient pour réaliser des trous. La pièce est bridée sur la table de la machine et n'effectue aucun mouvement, tandis que l'outil est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), d'avance et de pénétration. Ces machines-outils sont utilisées pour le façonnage des trous cylindriques ou coniques débouchant ou borgnes à l'aide de foret, de foret alésoir et d'alésoir, ainsi que pour le taraudage au moyen d'un taraud monté sur mandrin. **(figure II.14) [11]**

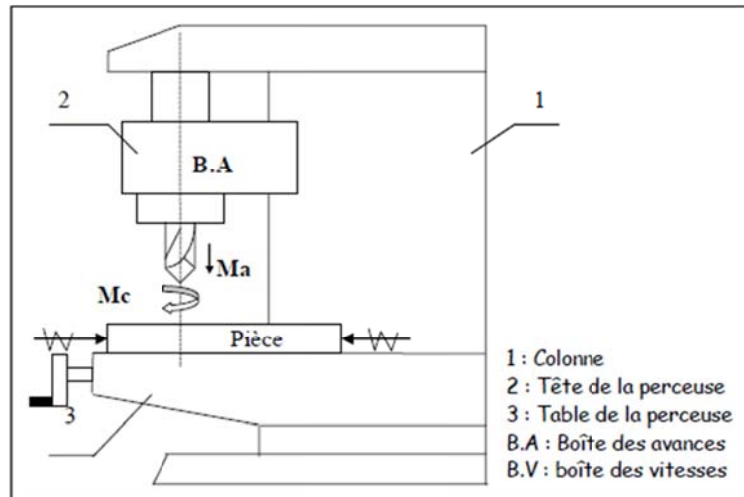


Figure II.14. Schéma d'une perceuse

Les perceuses les plus fréquemment rencontrées dans la pratique sont:
Perceuses sensibles, Perceuses à colonne, Perceuses radiales, Perceuses horizontale, Perceuses multibroches, Perceuses C.N.C.

- La méthode la plus courante pour le perçage de trous courts est le perçage dans le plein (**figure II.15a**), où le trou est percé en une seule opération à un diamètre prédéterminé.
- Le trépanage (**figure II.15b**) est, pour sa part, principalement utilisé pour les trous de grand diamètre, du fait que cette méthode consomme moins de puissance que le perçage dans le plein. Le trépanage s'effectue également en une seule opération mais, au lieu d'enlever la totalité du métal sous forme de copeaux, un noyau cylindrique, ou carotte, est ici laissé au centre du trou. Le trépanage s'utilise uniquement pour les trous débouchants.
- Pour améliorer la qualité de surface ou les tolérances, un réalésage peut intervenir ensuite. Le réalésage, qui est une troisième méthode de perçage, peut naturellement être effectué avec des forets pour trous courts, mais cela ne permet normalement pas de respecter une précision suffisante. Le trou prépercé peut provoquer une flexion du foret du fait de la géométrie asymétrique des outils utilisés (**figure II.16a**). De nombreux forets pour trous courts sont autocentrants, de sorte que les arêtes de coupe peuvent se trouver soumises à des charges inégales lorsque le foret tend à retrouver son centrage. Résultat, le trou s'ovalise (**figure II. 16b**). [12]

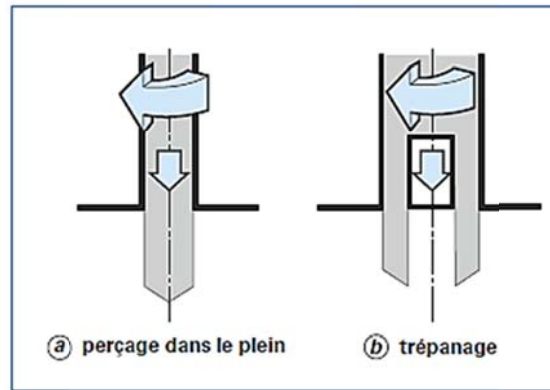


Figure II. 15. Perçage et trépanage

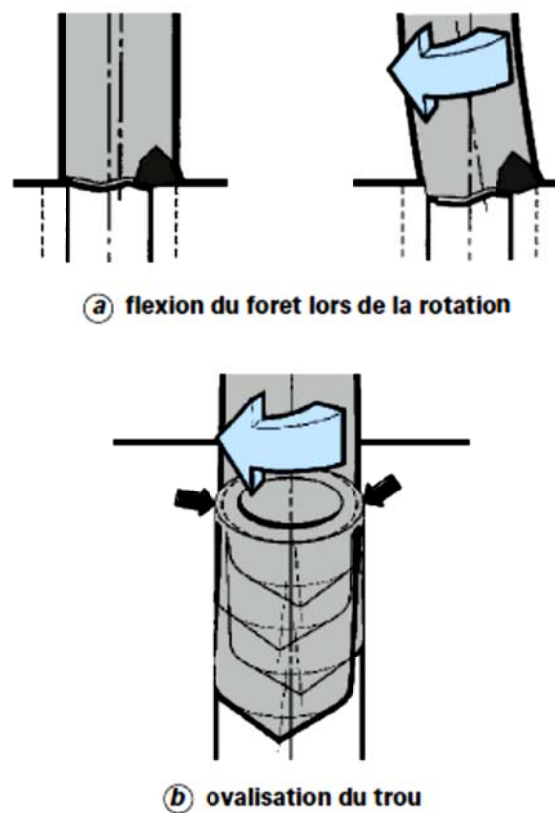


Figure II.16. Réalésage pouvant provoquer la flexion de l'outil

II.5.7. Rabotage

Les machines à raboter servent à usiner des surfaces planes de grandes et moyennes dimensions. Les pièces de faibles encombrements sont usinées sur des machines dites étaux limeurs.

II.5.7. 1. Raboteuses

La caractéristique principale d'une raboteuse est que la pièce est fixée sur la table de la machine-outil et est animée d'un mouvement rectiligne

(longitudinal) alternatif. La course aller est la course active ; le retour est la course à vide (**figure II.17**). L'outil est monté dans le porte-outil du chariot exécutant l'avance transversale.

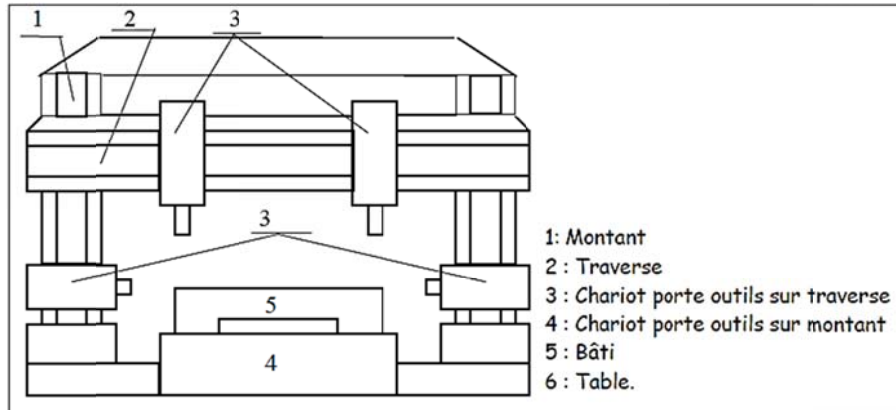


Figure II.17. Schéma d'une raboteuse.

II.5.7. 2. Mortaiseuses

Une machine à mortaiser présente un coulisseau vertical et une table circulaire (**Figure II- 18**); 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 des petits cannelures pour la synchronisation des dentures de boîtes à vitesses.

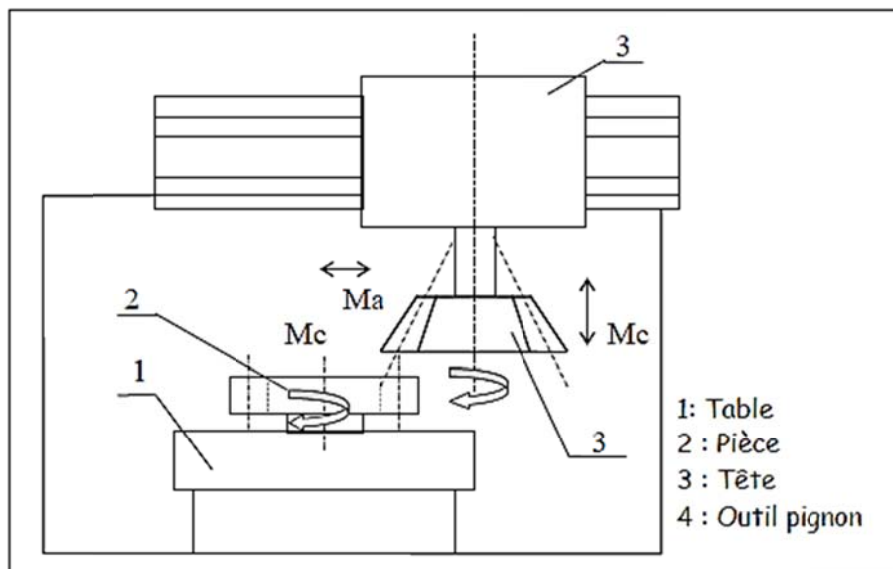


Figure II.18 . Schéma d'une machine à mortaiser

II.5.8. Taillage d'engrenages

Les machines à tailler les engrenages sont destinées à la confection de roues dentées. Il existe plusieurs types de machines à tailler les engrenages (**figure II.19**). Ces machines sont toujours complexes à cause de la combinaison de plusieurs mouvements (très précis) simultanément. Selon le mode de fabrication des roues on utilise soit des outils pignons ou des fraises mères.

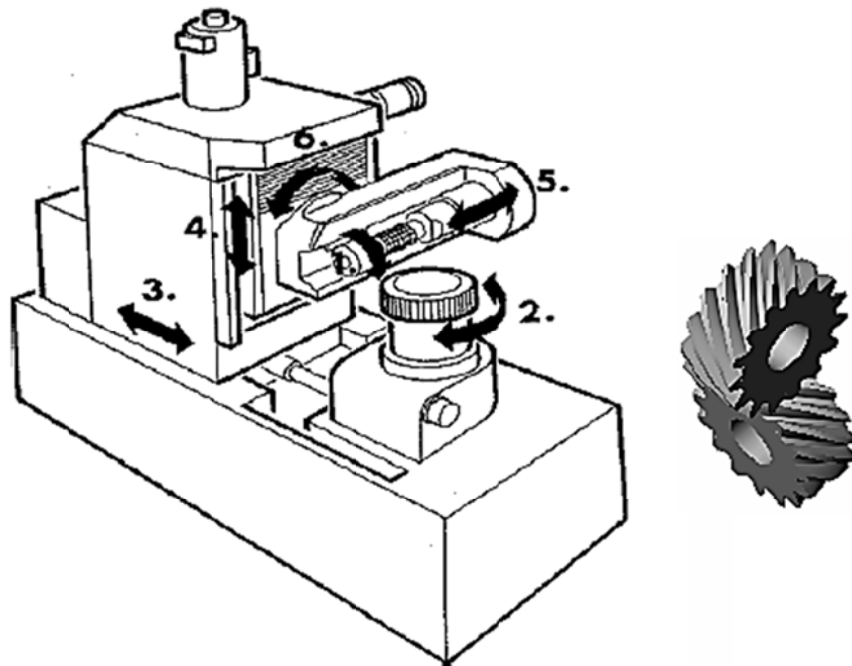


Figure II.19 . Schéma d'une machine à tailler les engrenages [13]

II.5.9. Rectification

La rectification à son origine assurait la correction et la mise à la cote des pièces déformées par les traitements thermiques. Actuellement, les machines à rectifier sont employées pour obtenir des surfaces finies et des précisions élevées. La rectification effectuée sur des surfaces planes, cylindriques et coniques (extérieurs comme intérieures), ainsi que des surfaces de forme complexe tel que : les dents d'engrenages, filetages, etc...

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 super finition,
- les affûteuses.

II.5.9.1. 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.20**). 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. [14].

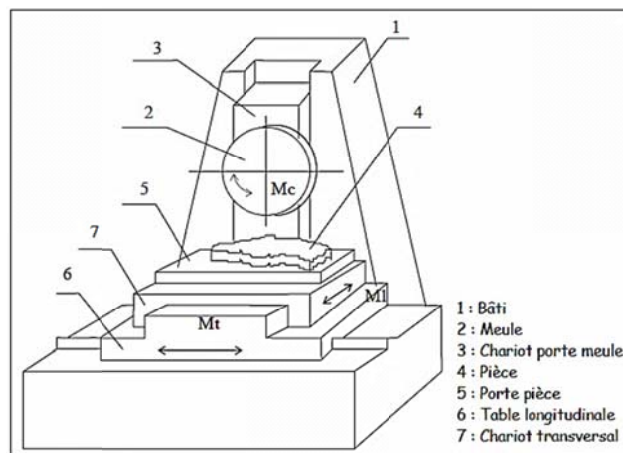


Figure II.20 : Schéma d'une rectifieuse plane

II.5.9.2. Rectifieuse cylindrique

La construction de la rectifieuse cylindrique est plus complexe (**figure II.21**). 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.

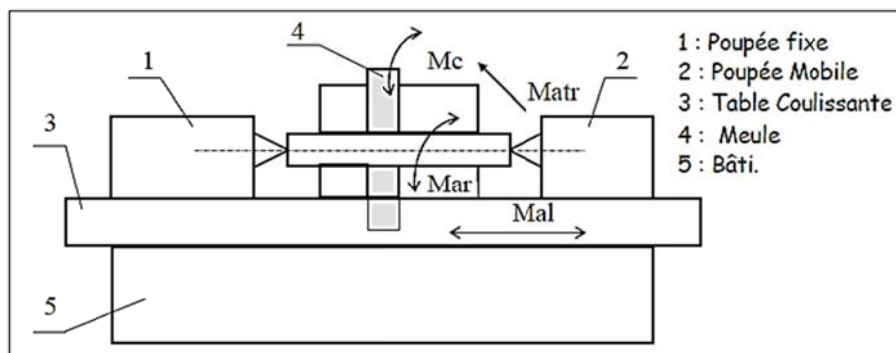


Figure II.21 : Schéma d'une rectifieuse cylindrique

II.5.9.3. 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.22**).

Le principe de fonctionnement est le suivant :

- ☒ La pièce à rectifier se trouve entre deux meules, prenant appui sur une réglette support.
- ☒ La pièce entraînée en rotation se voit imprimer un déplacement axial entre les meules, qui est en l'occurrence le mouvement d'avance.
- ☒ Le mouvement d'avance est communiqué principalement par la meule d'entraînement, tandis que la meule de travail coupe le métal.

Ce mouvement est réalisé en faisant tourner l'axe de la meule d'entraînement dans un plan vertical d'un angle $\alpha = 1,5$ à 6° pour la rectification ébauche, et d'un angle $\alpha = 0,5$ à $1,5^\circ$ pour la finition.

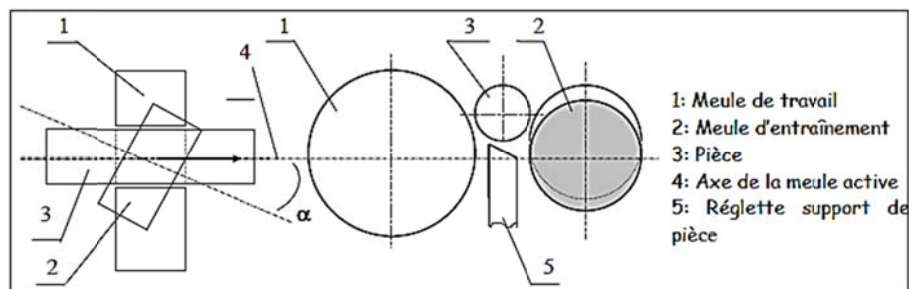


Figure II.22 : Schéma d'une rectifieuse sans centres

II.5.10. Les outils de coupe

II.5.10.1. Les matériaux des outils Figure II.23

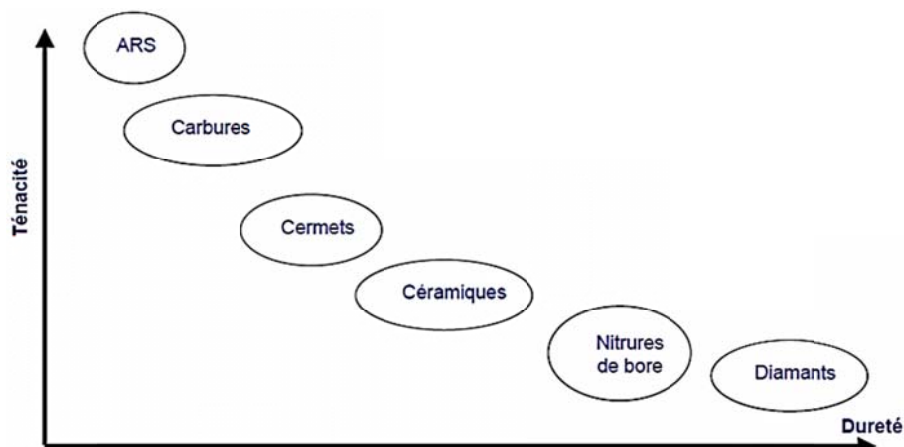


Figure II.23. Classification des matériaux à outils

- **ARS** Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Il est

toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forêts, ou les outils nécessitant un angle de tranchant très faible.

Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement rapide de l'arête de coupe.

Fabrication : par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres

Composition : 0,7 % de Carbone minimum 4 % de Chrome environ Tungstène, Molybdène, Vanadium Cobalt pour les plus durs. Dureté : de 63 à 66 Hrc

- **Carbures** Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide.

Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement

Composition : Noyau en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°)

Ou en carbure de titane (3100°), ou tantale (3780°) ou niobium (3500°) Liant : cobalt : le plus courant ou nickel. Revêtement en oxyde d'aluminium (céramique appelée corindon : Al_2O_3)

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

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

- **Céramiques** Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium.

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

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

- **Nitrure de Bore Cubique (CBN)** Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte

l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures...

Son utilisation requiert

- ☒ Une machine stable
- ☒ Une grande rigidité de la pièce et du porte pièce
- ☒ Un arrosage

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

II.5.10.2. Géométrie de l'outil

La géométrie c'est les dimensions et angles. Les angles d'outils sont définis dans deux références : **Figure II.24.**

Référence outil en main : qui est utile pour la fabrication de l'outil et son affûtage !

Référence outil en travail : qui définit les angles de l'outil en fonction d'un repère lié à l'orientation du vecteur vitesse de coupe et vitesse d'avance

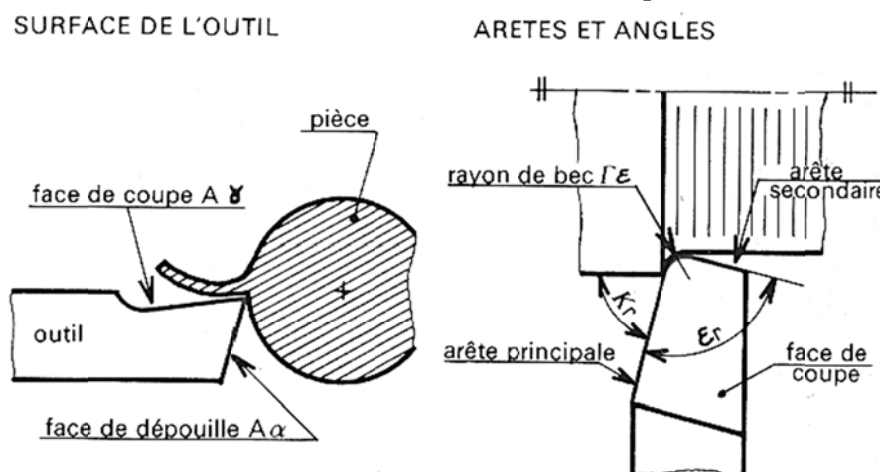


Figure II.24. Surfaces, arrêtes et angles d'outil

- **Plan d'outil en main**

Pr : plan contenant la face d'appui de l'outil.

Ps : plan tangent à l'arête et perpendiculaire à Pr

Po : plan contenant la vitesse de coupe théorique V_c au point de l'arête et perpendiculaire à Pr et perpendiculaire à Ps (attention Po est incliné par rapport à Vf).

Pn : plan perpendiculaire à Po et normal à l'arête.

Pf : plan perpendiculaire à Pr et parallèle à la vitesse d'avance Vf.

Pp : plan perpendiculaire à Pr et à Pf (cela donne une section de l'outil perpendiculaire au corps de l'outil)

Ces plans permettent de définir des systèmes d'angles en gardant toujours les dénominations de base :

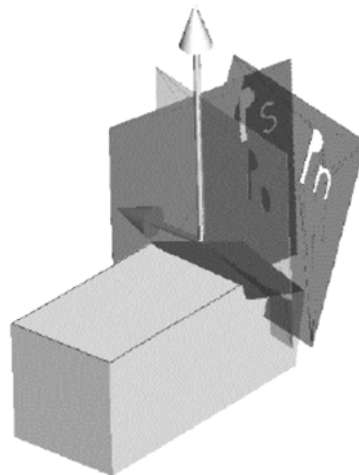
α : angle de dépouille principal

β : angle de taillant

γ : angle de coupe

ψ : angle de direction complémentaire de l'arête

Vus dans le plan Po : ces angles deviennent $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0 \dots$



- **Plan d'outil en travail**

Les angles en travail prennent en compte la vitesse de coupe effective : composition de V_c et V_f .

Les angles et les plans sont ensuite définis de la même façon en ajoutant un indice « e » aux angles.

Pre : plan perpendiculaire à la résultante de la vitesse de coupe .

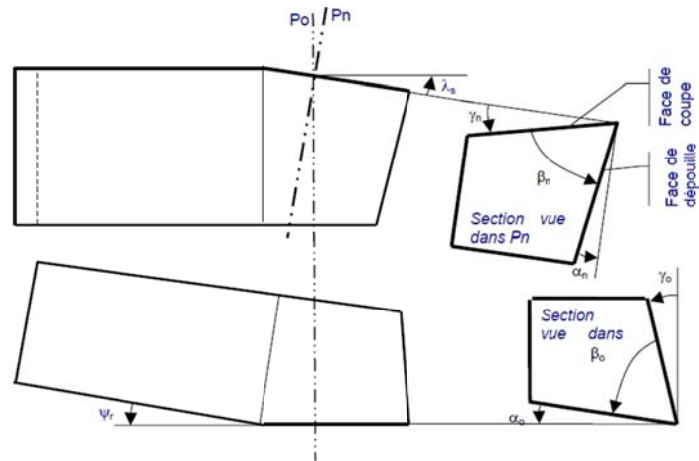
Poe : plan contenant la résultante de la vitesse de coupe au point de l'arête et perpendiculaire à Pre.

Pne : plan perpendiculaire à Poe et normal à l'arête.

Pse : plan tangent à l'arête et perpendiculaire à Pre

Pfe : plan perpendiculaire à Pre et parallèle à la vitesse d'avance Vf.

- Angles d'outil en main



Chapitre III . Procédés de fabrication sans enlèvement de matière

III.1. Introduction

Les lingots métalliques obtenus par coulée du métal liquide peuvent être déformés directement sans enlèvement de matière sous forme de produits dont les cotes sont bien définies. Les opérations de mise en forme se font par déformation plastique.

Les principales opérations sont le forgeage, le laminage, le filage, le tréfilage, l'emboutissage. Elles peuvent être faites à froid ou à chaud, suivant la nature du matériau utilisé. Elles ont pour effet de provoquer dans le métal la formation d'une texture dont les caractéristiques dépendent de la température de l'opération et qui peut s'accompagner de phénomènes de recristallisation quand la déformation a été conduite à une température suffisamment élevée.

III.2. Principe des procédés par déformation

Le principe de ce procédé est de déformer un matériau à l'aide d'un outillage spécifique.

Cette déformation peut se réaliser à chaud ou à froid sur des matériaux plastique ou métallique.

Les matériaux métalliques à mettre en forme peuvent se présenter sous la forme de tôle ou de lopin. Le principe du procédé est d'amener la déformation dans le domaine plastique à l'aide de matrice, de manière à donner à la matière la forme souhaitée.

Les procédés de mise en forme par déformation nécessitent la réalisation d'un outillage onéreux, ce qui les destine à la production en série. **Figure III.1**

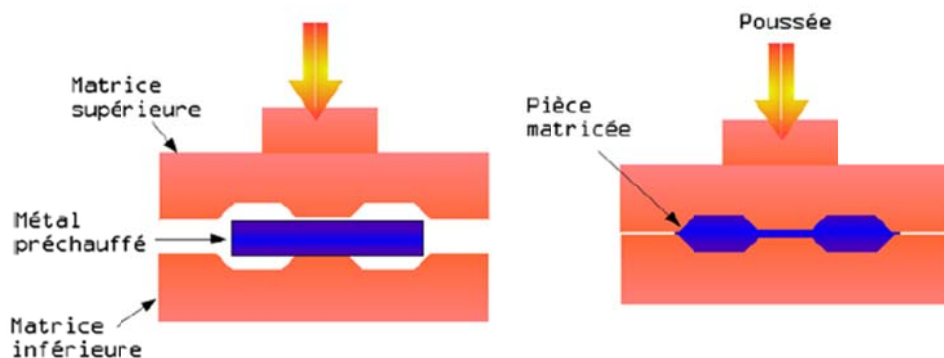


Figure III.1 Principe des procédés par déformation

III.2. 1. Le laminage

C'est l'opération qui consiste à déformer un métal en le faisant passer entre deux cylindres dont l'écartement est inférieur à l'épaisseur initiale. Elle peut être exécutée à froid ou à chaud. Les deux cylindres du laminoir tournent dans des sens opposés. Les frottements qui prennent naissance entre le lingot et les cylindres forcent celui-là à avancer (**figure III.2**). Pour préparer des produits plats, on utilise des cylindres à génératrice rectiligne. Pour obtenir des produits présentant des formes particulières, on emploie des cylindres à cannelures.

La réduction d'épaisseur du lingot s'obtient de façon discontinue par passes successives dans le même laminoir dont l'écartement des cylindres est progressivement diminué, en continu en utilisant des laminoirs placés en série. Le taux de réduction que l'on peut obtenir à chaque passe dépend de la nature du métal et de la température à laquelle l'opération est effectuée.

Le laminage à froid a pour effet d'augmenter la limite élastique, la résistance à la rupture et la dureté, et diminuer l'allongement du métal. Lorsque l'on veut rendre au métal ses caractéristiques mécaniques, on le soumet à un recuit à une température qui dépend de la valeur des caractéristiques désirées. Au cours du laminage, la déformation du métal se fait essentiellement dans le sens du déplacement du lingot dont la longueur augmente à chaque passe. Cependant, il se produit également un léger élargissement du lingot. Cet élargissement dépend d'un certain nombre de facteurs comme l'épaisseur initiale du lingot, de la réduction d'épaisseur provoquée par chaque passe, du diamètre des cylindres, de la température et aussi de la nature du métal. [15]

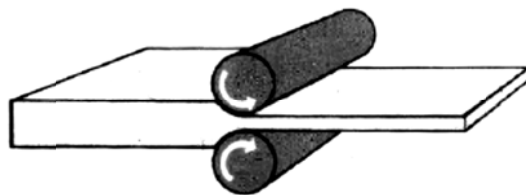


Figure III.2.: Principe du laminage

III.2. 2. Le forgeage

C'est l'opération qui consiste à déformer un lingot en exerçant sur le métal chaud des efforts de pression et de percussion. Le métal est dit corroyer. On utilise à cet effet des outils qui peuvent être le marteau, pour les pièces de petites dimensions, le marteau-pilon de plusieurs dizaines de tonnes, ou la presse de plusieurs milliers de tonnes pour les lingots pesant quelques tonnes ou dizaines de tonnes.

Les pièces mises en forme par forgeage présentent une texture bien définie, donc des caractéristiques mécaniques précises. Le forgeage des lingots provoque une homogénéisation par effet mécanique (écrasement de la structure dendritique) et par effet thermique (diffusion). **Figure III.3.: [15]**

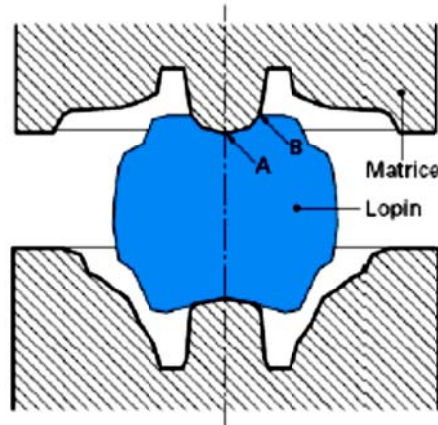


Figure III.3.: Principe du forgeage

III.2. 3. Matricage – Estampage

Le principe est de mettre en œuvre un matériau ferreux (estampage) ou non ferreux (matricage) à l'aide de matrices par choc ou pression. L'objectif de ce procédé n'est pas seulement de mettre en forme le matériau mais il est de renforcer les caractéristiques mécaniques. **Figure III. 4**

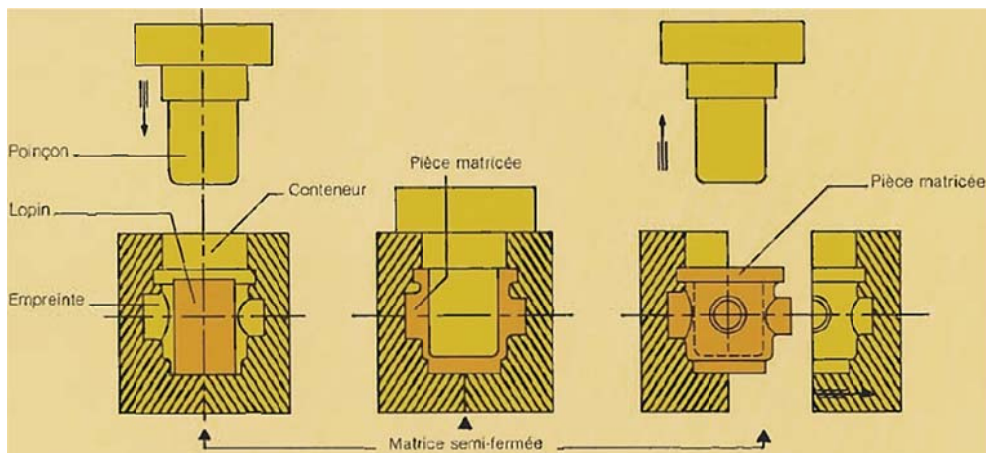
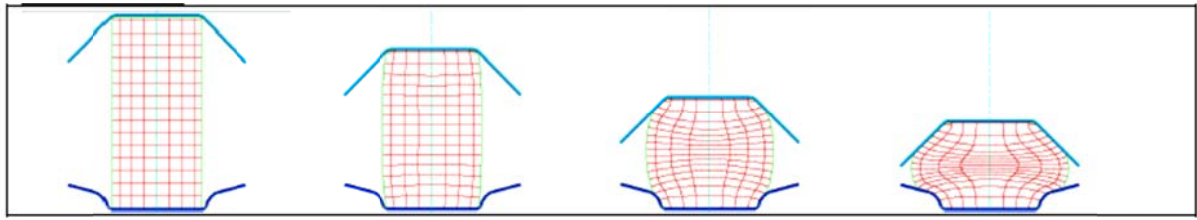
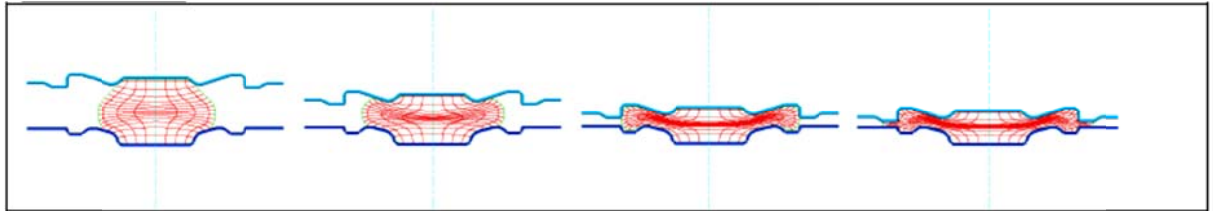


Figure III.4.: Exemple de principe du matricage

La mise en forme se fait par opérations successives sur des outillages d'ébauche, de finition et d'ébavurage.



Outillage 1 : réalisation d'une ébauche



Outillage 2 : réalisation de la finition

III.2.4. Le tréfilage

Le tréfilage permet d'obtenir une pièce cylindrique en forçant son passage dans une filière (**figure III.5**). Le métal s'allonge et sa section se réduit : on dit qu'il file. La filière forme un cône de demi-angle au sommet appelé angle de filière. Du fait de la symétrie axiale du procédé, la déformation est dite axisymétrique.

Le taux de déformation par tréfilage est défini par la relation suivante :

$$\varepsilon \% = (S_i - S_f / S_i) \times 100$$

Où S_i et S_f sont respectivement les valeurs des sections initiales et finales du fil.

Le tréfilage en tant que procédé de mise en forme d'un matériau donné, est caractérisé par différents paramètres : le choix des paramètres de tréfilage garantissant un minimum d'énergie de déformation, c'est-à-dire quel angle de filière, taux de réduction, vitesse de tréfilage et lubrifiant sont choisis pour minimiser l'effort de traction et l'usure de la filière, et également par la structure et les propriétés du matériau qui déterminent sa capacité à subir une déformation élevée en tréfilage.

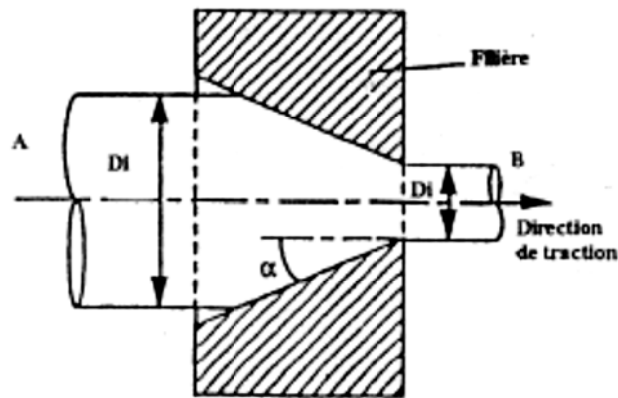


Figure III.5. Principe de tréfilage

III.2.5. Filage

Le filage (extrusion) est un procédé de transformation à chaud ou à froid des métaux et alliages (aluminium, cuivre, acier, plomb). Pour exécuter une opération de filage, on utilise une enceinte de forme cylindrique en acier résistant aux pressions élevées de déformation appelée conteneur. Ce conteneur est fermé à une extrémité par une filière dont l'orifice est usiné selon une section droite similaire à l'extérieur du produit que l'on désire filer. La billette de forme adéquate, éventuellement chauffée à la température optimale de déformation, est introduite dans le conteneur puis poussée par un piston appelé poinçon sur lequel on applique l'effort de presse. Lorsque l'effort sur le piston dépasse une valeur, liée aux caractéristiques du matériau et à sa température, la pression régnant dans le conteneur provoque l'écoulement plastique du métal à travers la filière. On obtient ainsi une barre de grande longueur dont la section transversale correspond à celle de la filière (menuiserie métallique : montants de portes ou de fenêtre en aluminium, refroidisseurs à ailettes, tubes de sections diverses, etc.). **Figure III.6. [15]**

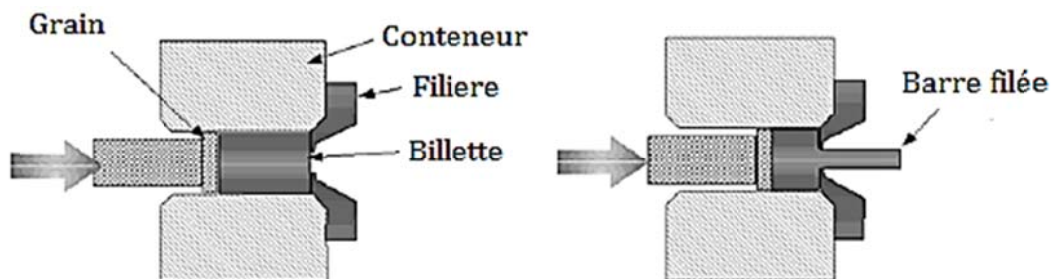


Figure III.6. Principe du filage.

III.2.6. Emboutissage

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique d'une surface de métal entraînée par un poinçon dans une matrice. Cette déformation est difficilement réversible; de ce fait, on considère que la pièce obtenue n'est pas développable. **Figure III.7.**

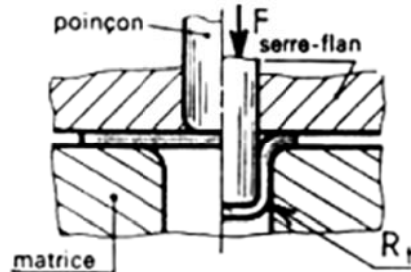


Figure III.7. Principe d'emboutissage

Il existe deux procédés d'emboutissage suivant la forme de pièce à obtenir.

- **Emboutissage en expansion**

Si la pièce a une forme complexe mais de faible profondeur on peut bloquer le flanc entre serre flanc et matrice, si besoin est avec des joncs. La tôle ne se déforme alors que sur le poinçon en s'allongeant dans une ou plusieurs directions et en s'amincissant, nous disons que nous travaillons en expansion.

- **Emboutissage en rétreint**

Si la pièce a une forme cylindrique droite (base circulaire ou quelconque) de forte profondeur on laisse glisser le flanc entre serre flanc et matrice, la déformation sur le poinçon est limitée aux rayons de poinçon, la majeure partie de la déformation se fait par rétrécissement sur la matrice, c'est l'emboutissage en rétreint.

III.2.7. Pliage

Le pliage permet l'obtention de pièces développables dont les plis sont obligatoirement rectilignes (**Figure III.8A**).

Deux techniques sont utilisées :

- **Pliage en l'air (Figure III.8B)**

Poinçon et matrice en V dont l'angle est inférieur à celui du pli à réaliser. Ce dernier est donné par la profondeur de pénétration du poinçon dans la matrice.

- **Pliage en frappe**

Poinçon et matrice en V dont l'angle est sensiblement égal à celui du pli à réaliser. L'épaisseur de la tôle est réduite à l'endroit du pli. Cette

réduction est fonction du rayon R de pliage et de l'épaisseur e du matériau.

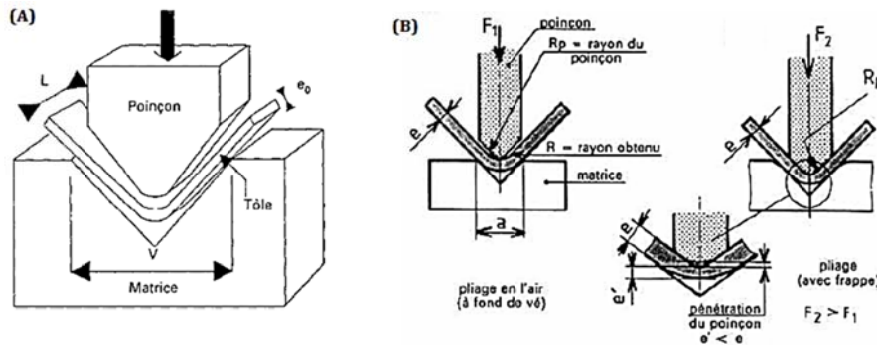


Figure III.8 . (A) Principe de pliage, (B) Pliage en l'air

III.3. Procédés par fusion

III.3.1. Généralités

Sous le terme "**Fonderie**", on englobe généralement l'ensemble des techniques de mise en oeuvre pour obtention d'un objet par coulée d'un métal en fusion dans une empreinte appelée "**moule**" qui peut être en sable ou métallique [16]. **Figure. III.9.**

La réalisation d'une pièce de fonderie nécessite diverses opérations qui doivent se suivre :

- Le modelage : confection des modèles,
- Le moulage : confection des empreintes,
- La fusion : obtention du métal liquide à partir de minerais et de lingots dans des fours,
- La coulée : remplissage des moules à l'aide du métal liquide recueilli dans des poches de coulée,
- Le décochage : extraction de la pièce par destruction du moule par vibrations,
- Le dessablage : nettoyage des pièces par brosse métallique, par jets de sable ou de grenailles, etc...,
- L'ébarbage : enlèvement des parties supplémentaires de métal : bavures, jets de coulée, etc... à l'aide de burin manuel, pneumatique, de meule à découper, etc...

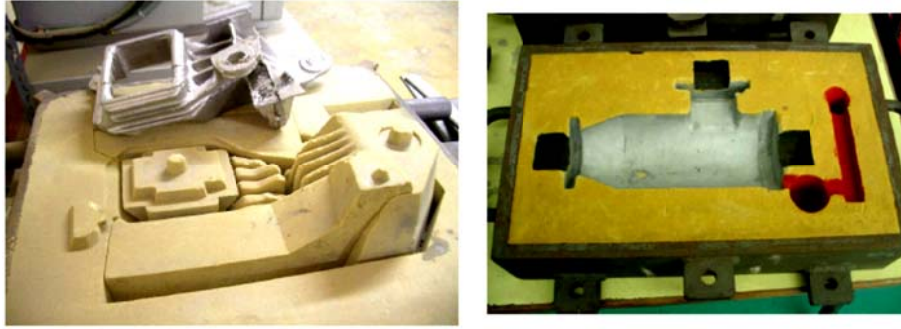


Figure. III.9. Principe de moulage

III.3.2. Propriétés des métaux en de fonderie

Les métaux utilisés en fonderie doivent être fluides à la température de fusion afin de pouvoir remplir convenablement les moules. Pour cela, pendant le processus d'élaboration d'une pièce, il faut prendre en considération deux propriétés essentielles à savoir :

- Coulabilité
- Retrait

III.3.2. 1. Coulabilité

C'est l'aptitude du métal liquide (fondu) de bien remplir le moule et de reproduire fidèlement son empreinte. Si le métal a une bonne coulabilité, le métal forme sans difficulté tous les éléments de la pièce, et le remplissage du moule sera assuré. Dans le cas contraire (mauvaise coulabilité), le remplissage du moule sera défectueux et la pièce est généralement rebutée. Une bonne coulabilité des métaux peut être assurée avec l'élévation de la température.

III.3.2. 2. Retrait

On sait que tous les matériaux métalliques s'allongent sous l'effet de l'élévation de la température, et rétrécissent sous la diminution de cette dernière. A cet effet, et après une série d'essais effectués par des technologues spécialistes en fonderie, ils ont remarqués que les dimensions des pièces moulées sont inférieures à celle du modèle ; et que cette différence dans les dimensions provient principalement du phénomène physique de retrait du métal au refroidissement.

Ajouté à cela, ils ont aussi constatés que le retrait se manifeste dans toutes les directions et varie avec la nature du métal et le volume de la pièce.

III.3.3. Modelage

La confection du modèle qui servira à réaliser le moule, d'où sortira la pièce coulée (fondue) est appelée "**modelage**". Le modèle est fabriqué à partir du dessin de définition de pièce à exécuter avec des dimensions légèrement accrues afin de compenser le phénomène de retrait du métal au refroidissement ; et doit être solide, précis et conservé cette précision d'origine malgré les manipulations répétées.

Les modèles peuvent être monoblocs ou être en deux ou plusieurs parties, dans ce cas chaque partie doit être pourvue d'une cheville et d'un trou, qui se correspondent pour assurer un alignement précis lors de l'assemblage.

On attribue aussi généralement une légère pente appelée "**dépouille**" aux modèles afin de pouvoir les extraire sans abîmer le moule. Cette dépouille a souvent une valeur de 2 % sur la cote considérée.

Lorsque les pièces présentent des évidements, le moulage avec noyau s'impose. Les noyaux sont façonnés dans des boîtes à noyaux cloisonnées. Après façonnage, ils sont cuits dans un four jusqu'à ce qu'ils soient assez résistants pour être manipulés.

III.3.4. Sable de fonderie

Le sable utilisé en fonderie contient suffisamment d'argile pour qu'une légère humidification avant usage lui donne de la cohésion. Pour cela, les qualités exigées d'un sable de fonderie sont les suivantes :

- **Infusibilité**

Le sable de fonderie doit avoir une résistance aux températures élevées. Cette qualité est obtenue grâce à l'utilisation d'une forte proportion de silice de 75 à 90 %.

- **Plasticité**

C'est l'aptitude à épouser les formes du modèle. L'utilisation d'une faible proportion de résine avec le sable lui donne cette condition.

- **Cohésion**

C'est l'aptitude à la conservation des formes, elle s'obtient. Elle s'obtient en incorporant au sable de 5 à 15 % d'argile et environ 8 % d'eau.

- **Perméabilité**

Afin de permettre aux gaz formés durant la coulée d'être évacués sans difficulté, le sable formant le moule doit être perméable pour qu'ils puissent sortir. Cette perméabilité dépend de la grosseur des grains, et de l'intensité avec laquelle le sable a été comprimé (pressé). Pour améliorer la perméabilité, on ajoute de la houille (charbon) en poudre pulvérisée dans le

sable. Les petites particules brûleront lors de la coulée du métal liquide, ce qui laissera des vides (infiniment petits) qui permettront aux gaz de s'évacuer.

III.3.5. Méthodes modernes de fonderie

- Moulage en coquille.
- Moulage par gravité.
- Moulage sous pression.
- Moulage par centrifugation.
- Moulage par enrobage ou à la cire perdue.

Chapitre IV : Procédés non conventionnels

IV.1. Généralités

On parlera d'usinages non conventionnels en référence à des usinages ne faisant pas appel à la « coupe des métaux ». Par contre aux procédés conventionnels qui mettent en jeu, pour l'enlèvement de copeaux, des efforts de coupe importants, deviennent difficiles pour l'usinage des matériaux durs ne permettent pas l'obtention des formes complexes. Les procédés d'usinage non conventionnels ne nécessitent pratiquement aucun effort de coupe, mais leurs débits de matière enlevée est très faible comparativement au dédit de tournage par exemple. Cependant dans certains cas, seuls les usinages modernes peuvent être envisagés (par exemple, usinage des pièces de faibles dimensions, ou pièces très dures). Ces procédés comportent:

- Le procédé d'usinage par électro-érosion repose sur le fait que l'étincelle électrique éclatant entre deux conducteurs séparés par un fluide diélectrique produit une érosion préférentielle de l'anode, du fait d'un échauffement intense entraînant fusion et vaporisation. La cathode confère ainsi peu à peu sa forme à l'anode.
Une variante très utilisée pour découper des pièces en plaques consiste à utiliser comme cathode un fil (découpe par électro-érosion à fil). C'est actuellement le plus important des procédés physicochimiques, car il permet, pour un coût raisonnable, l'usinage de matériaux métalliques très utilisés, mais de très faible usinabilité pour les procédés de coupe comme les matériaux à outils ou la réalisation de formes très complexes (moules de fonderie ou d'injection).
- L'usinage par jet fluide met en jeu des fluides de natures diverses :
 - ❖ flamme d'un chalumeau en oxycoupage ;
 - ❖ gaz ionisé d'un plasma ;
 - ❖ faisceau de lumière cohérente du laser ;
 - ❖ faisceau d'électrons en bombardement électronique (plus rare).

Dans tous les cas, l'impact du jet chauffe fortement la pièce, permettant le perçage ou la découpe de matériaux en feuilles ou plaques plus ou moins épaisses.

L'impact d'un jet d'eau à grande vitesse permet de réaliser des opérations similaires sur des matériaux peu consistants comme les tissus ou le papier, l'addition de particules abrasives permettant l'usinage des matériaux plus durs et/ou fragiles comme les métaux ou les céramiques.

IV.2. Principe d'usinage par électroérosion

L'usinage par électroérosion s'opère dans un liquide diélectrique : on applique entre les électrodes une tension qui est plus grande que la tension de claquage, fixée par le pouvoir isolant du diélectrique et la distance des électrodes (**figure III.10**). On observe trois phases : (**figure III.11**)

- **l'initiation de la décharge**, appelée phase d'ionisation; sous l'action du champ électrique, il se forme, par ionisation du diélectrique, un canal conducteur entre les deux électrodes.

L'ionisation a lieu là où le champ électrique atteint une intensité maximale. Cette phase d'ionisation correspond à la rupture diélectrique et ne dure qu'un temps très bref (10 à 100 ns) par rapport à la décharge. Le canal conducteur est formé d'un plasma, gaz qui subit une ionisation à très haute température (3 000 à 12000 K). Ce plasma est constitué par des atomes métalliques évaporés aux électrodes, des ions M et des électrons. Ces particules sont créées par les chocs violents que subissent les atomes portés à haute température, cette haute température résultant elle-même de l'échauffement du milieu provoqué par les chocs entre particules et atomes ;

- **la fusion et la vaporisation de la matière**: pendant cette phase active, l'intensité du courant croît et la tension diminue.

Pendant quelques microsecondes à quelques millisecondes, les particules attirées par les deux électrodes vont y libérer leur énergie cinétique et y provoquer un échauffement très important. Les particules positives et négatives se dirigent respectivement vers la cathode et l'anode. La décharge est fortement concentrée dans un canal de petite section, et il en résulte des densités de courant très élevées, de l'ordre de 10^6 A/cm². Celles-ci entraînent des effets physico-thermiques importants : l'échauffement local des électrodes, la fusion et la vaporisation des matériaux qui les constituent, la dégradation du diélectrique. Des poches de matière fondue apparaissent aux deux électrodes. Autour du canal de plasma est créée une bulle de gaz et une onde de choc se propage radialement dans le liquide. La bulle de vapeur croît de manière importante ;

- **l'éjection de la matière**: le circuit électrique est coupé, la bulle de vapeur se trouve entourée de liquide et de solides froids. À ce moment, la température dans la bulle de plasma est de 3 000 à 20 000 K. Des échanges thermodynamiques violents ont lieu. La fin de la décharge est traduite par un effet hydrodynamique : la cavité croît jusqu'à ce que sa pression interne soit minimale, puis sous l'effet de la

pression hydrostatique du diélectrique, son volume diminue. Elle se scinde alors en deux parties. Le front de fusion des matériaux des électrodes régresse. Les deux bulles implosent. Une partie du métal encore à l'état liquide est éjectée sous l'impact du liquide diélectrique qui a acquis une grande énergie cinétique durant l'implosion de la cavité.

Le métal fondu éjecté se retrouve au sein du diélectrique sous la forme de petites sphérules [28] et laisse un cratère sur chaque électrode. La partie de métal fondu non arrachée solidifie sur place.

[17]

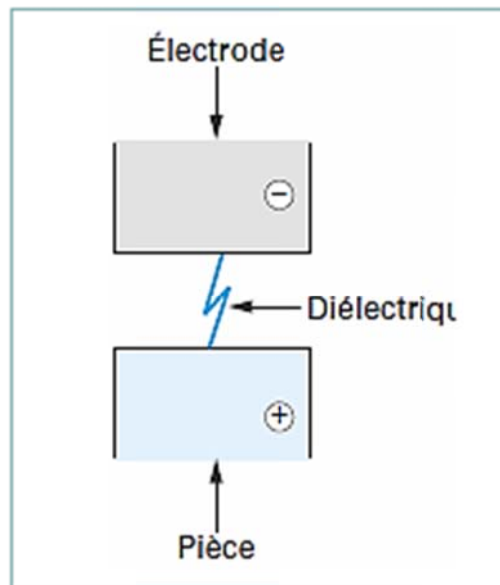


Figure III.10. Principe de l'électroérosion [17].

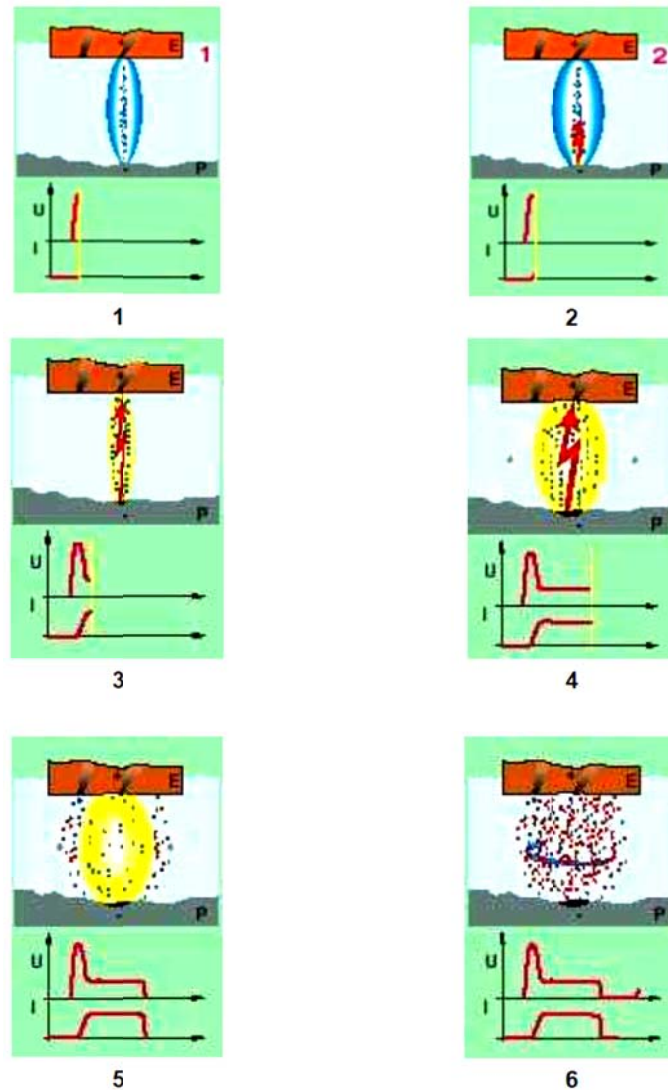


Figure III.11. Schéma du déroulement d'une étincelle.

IV.3. Usinage par ultrasons ou (usinage par abrasion ultrasonore)

L'usinage abrasif ultrasonore consiste à projeter des particules abrasives très dures sur la pièce à usiner, à l'aide d'une sonotrode vibrant à fréquence ultrasonore (20 kHz ou plus). Les particules sont amenées dans la zone de travail par un fluide porteur, de l'eau en général (**figure III.12**). La matière est enlevée par le cisaillement, l'érosion et l'abrasion provoqués par les grains abrasifs. Cette action se traduit par un enlèvement de matière sur la pièce, une usure de la 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, composites, quartz, semi-conducteurs... ;
- une érosion de cavitation due aux variations de pression au sein du liquide, engendrées par les vibrations de la sonotrode ; cela 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. Il n'est pas possible de prévoir avec suffisamment de précision la vitesse d'usinage, liée à un 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. Les premières machines utilisaient des systèmes à contre-poids, la charge statique étant réglée manuellement. Les machines actuelles utilisent un asservissement en 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. [18]

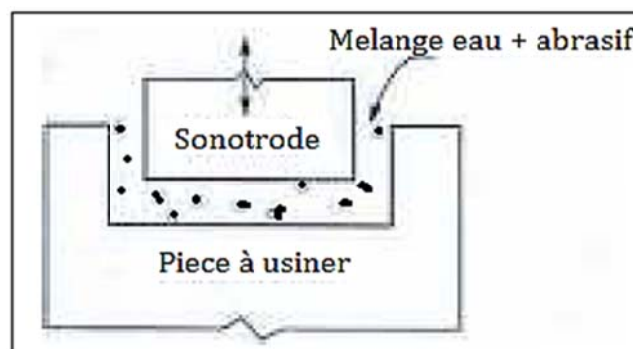


Figure III.12. Principe de l'abrasion ultrasonore, [18].

Le procédé peut être caractérisé par trois critères principaux :

- ☒ débit de matière ;
- ☒ usure relative de la sonotrode ;
- ☒ 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.

■ **Matériaux et usinabilité:** Les matériaux répondent différemment au procédé, et ce en fonction de leurs caractéristiques physiques ou mécaniques telles que dureté, fragilité, porosité. Il est possible de les classer en trois catégories.

La première catégorie : comprend les matériaux qui conviennent particulièrement bien au procédé : ils sont très fragiles ou très poreux, tels que verre, graphite, germanium, silicium... De grands débits de matière peuvent être obtenus (jusqu'à quelques centaines de mm^3/min), avec une très faible usure de la sonotrode (1 % pour le verre, moins de 1 % pour le graphite). L'usinage par ultrasons est très économique pour ces matériaux.

La deuxième catégorie: concerne des matériaux qui sont plus difficiles à usiner, car ils sont moins fragiles et moins poreux (céramiques, carbures, nitrures, pierres précieuses...). Ils conduisent à un débit plus faible (quelques dizaines de mm^3/min) et à une usure de sonotrode plus marquée (de 2 % pour la silice à 10 % pour le rubis). Ces matériaux peuvent être usinés par ultrasons lorsque les autres procédés ne sont pas adaptés.

La troisième catégorie: englobe les matériaux qui ne répondent pas bien au principe. De faibles débits de matière sont obtenus (quelques mm^3/min) et une usure de sonotrode importante est observée : de 30 % pour le Sialon (céramique) à 100 % pour les aciers. Pour ces matériaux, l'usinage par ultrasons est utilisé dans des cas particuliers : perçage fin ou défonçage de forme complexe dans une céramique très dure (nitrure de silicium par exemple), perçage d'acier trempé sans affectation thermique de la matière.

IV.4. Usinage chimique

L'usinage chimique est un procédé qui permet l'usinage de pièces métalliques par voie chimique, c'est-à-dire par attaque chimique ou dissolution chimique à l'aide d'un agent adéquat.

Le plus souvent, il s'agit non d'un usinage de toute la surface de la pièce, mais d'un usinage localisé : on utilise alors une épargne qui protège localement la surface de la pièce partout où il ne doit pas y avoir d'usinage. Le procédé se ramène alors à deux opérations :

- dépôt d'une épargne protectrice selon le dessin désiré ;
- attaque chimique (on dit couramment gravure) des parties non protégées.

La gravure chimique remonte au 1er millénaire, chez les Arabes, qui utilisaient l'action du sel de nitre (nitrate de sodium) sur les métaux. Au XVe siècle, l'utilisation de bitume de Judée, déposé et séché sur une plaque de cuivre ou d'acier, permet à l'artiste de dessiner avec une pointe sèche, dégageant ainsi le métal, que l'on attaque ensuite à l'acide nitrique : c'est la gravure à l'eau forte.

Cette technique fut utilisée pour la réalisation de plaques décoratives et de clichés d'imprimerie, pour la reproduction de dessins.

Les deux principales formes du développement actuel de l'usinage chimique sont :

- la découpe chimique, enlevant localement le métal sur toute l'épaisseur de la pièce ; les applications sont extrêmement nombreuses, tout particulièrement en électronique (**figure III.13A**) et en mécanique ; ce procédé est utilisé pour obtenir des pièces plates de dimensions variées (de 1 mm² à 1 m²) à partir de feuilles ou de plaques d'épaisseur assez faible (10 µm à 3 mm) ;
- le fraisage chimique, créant des creux dans des surfaces ; les applications sont dans l'imprimerie (héliogravure) et surtout dans l'usinage de pièces importantes employées dans la construction aéronautique (**figure III.13B**) : éléments de voilures ou de fuselage (plusieurs mètres carrés), dans un but d'allègement des structures.

L'usinage chimique offre, entre autres, l'avantage de ne pas modifier les propriétés mécaniques et métallurgiques des métaux : une pièce en acier trempé ou recuit reste en son état. [19].

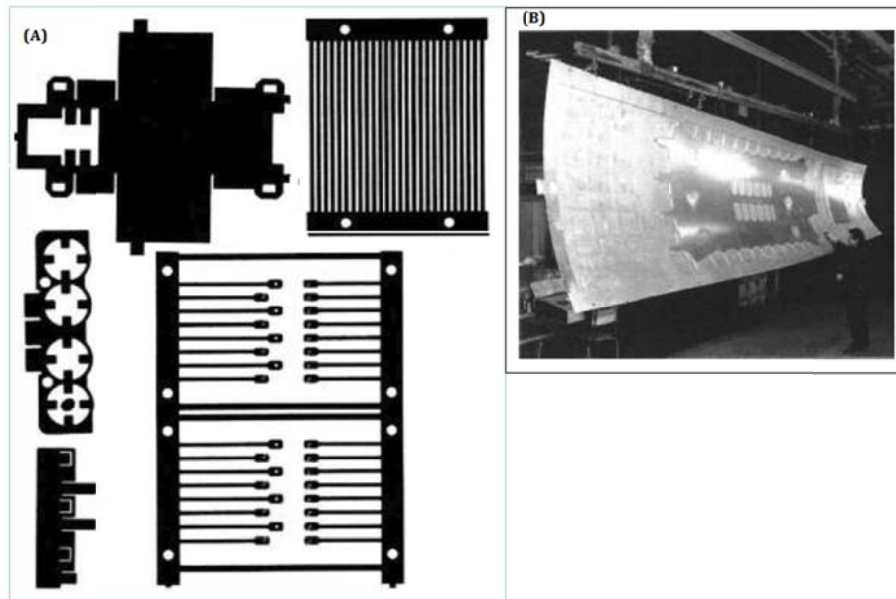


Figure III.13. (A) Pièces électroniques obtenues par découpe chimique, (B) Pièces aéronautiques obtenues par fraisage chimique. [19].

IV.5. Usinage électrochimique

Principe du procédé basé sur les lois générales de l'électrolyse. Dans une cellule électrolytique (**figure III.14**), diverses réactions permettent d'expliquer l'enlèvement de métal à l'anode lorsque l'on crée une différence de potentiel entre deux électrodes. Cet enlèvement se produit atome par atome suivant les lois de Faraday qui stipulent que :

- la quantité de métal enlevée ou déposée est proportionnelle à la quantité de courant ;
- les quantités des différents éléments métalliques enlevées ou déposées, pour une même quantité de courant, sont proportionnelles à leur valence-gramme. [20]

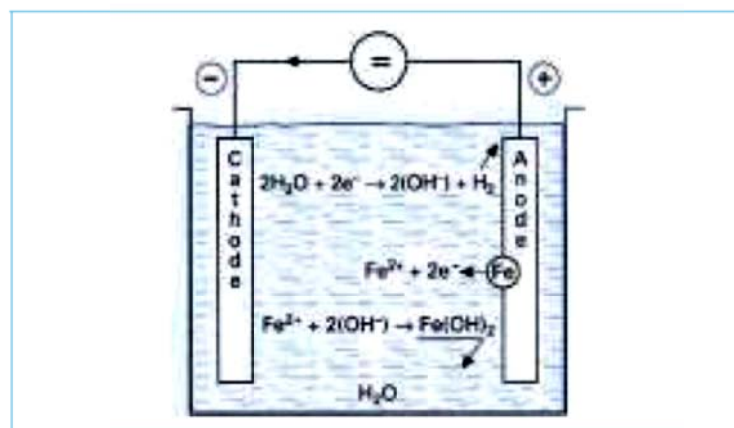


Figure III.14. Schéma d'une cellule électrolytique, [20].

IV.6. Usinage au jet d'eau

L'usinage thermique est basé sur la fusion ponctuelle du matériau à découper (sur toute l'épaisseur) et sur le déplacement du front de fusion selon une trajectoire qui définit la forme de la découpe.

L'usinage au jet d'eau n'est pas basé sur la fusion et ne saurait être qualifié de coupage thermique, comme nous le verrons, mais il est fréquemment associé à ces procédés par le fait qu'il est aussi basé sur le déplacement d'un point d'impact et qu'il est donc mis en oeuvre par des moyens assez similaires et sur un certain nombre d'applications proches.

Les usinages thermique et au jet d'eau se distinguent des procédés dits « mécaniques » par l'absence de contact et de réaction pièce/outil. Les procédés dits « mécaniques » sont généralement basés sur des phénomènes de cisaillement de la matière (poinçonnage à la presse, coupage à la cisaille) ou d'arrachement de matière (trouçonnage à la meule ou à l'outil).

Le principe consiste à mettre en oeuvre un « simple » jet d'eau très fin (quelques dixièmes de millimètre de diamètre), mais animé d'une vitesse très élevée résultant de la très haute pression d'injection, soit 3×10^6 à 5×10^6 hPa (3 000 à 5 000 bar). L'énergie cinétique de ce jet est alors susceptible d'exécuter de fines saignées sur des produits très divers. Cette action cinétique de l'eau pure est souvent renforcée - pour le coupage de métaux ou alliages très durs - par l'addition de produits abrasifs dans l'eau. L'outil de mise en oeuvre est constitué par une buse en matériau très dur (en général, en saphir) alimentée par un générateur d'eau à très haute pression.

La figure III. 15 présente le schéma de principe d'une installation de coupage au jet d'eau.

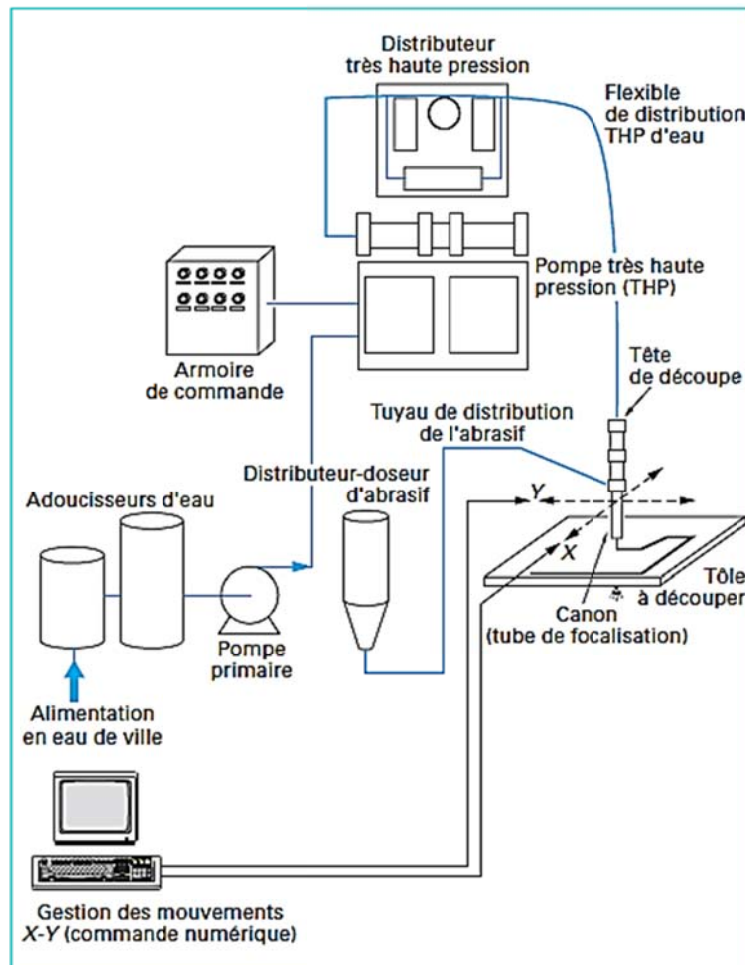


Figure III.15. Schéma de principe d'une installation de coupe au jet d'eau

❖ **Avantages:**

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

❖ **Inconvénients:**

- 1- limitation quant à la forme et à la profondeur de pénétration.
- 2- durée de vie des buses (200 heures sous 4000 bars).
- 3- coût de l'installation: très cher et encore autant pour la filtration et l'adoucissement de l'eau.

IV.7. Usinages LASER (Light Amplificated by Stimulated Emission of Radiation):

IV.7. 1. Principe:

L'usinage laser utilise la lumière focalisée qui fond, brûle ou vaporise la matière. Ce procédé présente de nombreux avantages par rapport à la découpe mécanique : meilleure qualité de coupe, pas d'usure des outils (absence de contact) et zone usinée moins perturbée par la chaleur, ce qui minimise les déformations des pièces.

Les lasers CO₂ et Nd:YAG sont les plus répandus en fonction des matériaux traités. Les applications typiques comprennent l'usinage de matériaux en fines épaisseurs, la coupe de céramiques et de diamants et l'usinage de tubes. **Figure III.16. [21]**

L'usinage laser peut intervenir aussi bien sur de nombreux métaux que sur les substances ou matériaux non métalliques, tels que tissus, plastiques, bois (contre-plaqué), etc. Avec les possibilités suivantes:

- ❖ découpe jusqu'à 10mm d'épaisseur maxi.
- ❖ puissance de 20 à 25kW dans l'industrie (contre quelques mW dans le médical).
- ❖ Possibilité d'usiner dans des zones difficiles d'accès.
- ❖ soudage de matériaux différents.
- ❖ mauvais rendement (20%).
- ❖ nécessite des protections importantes.

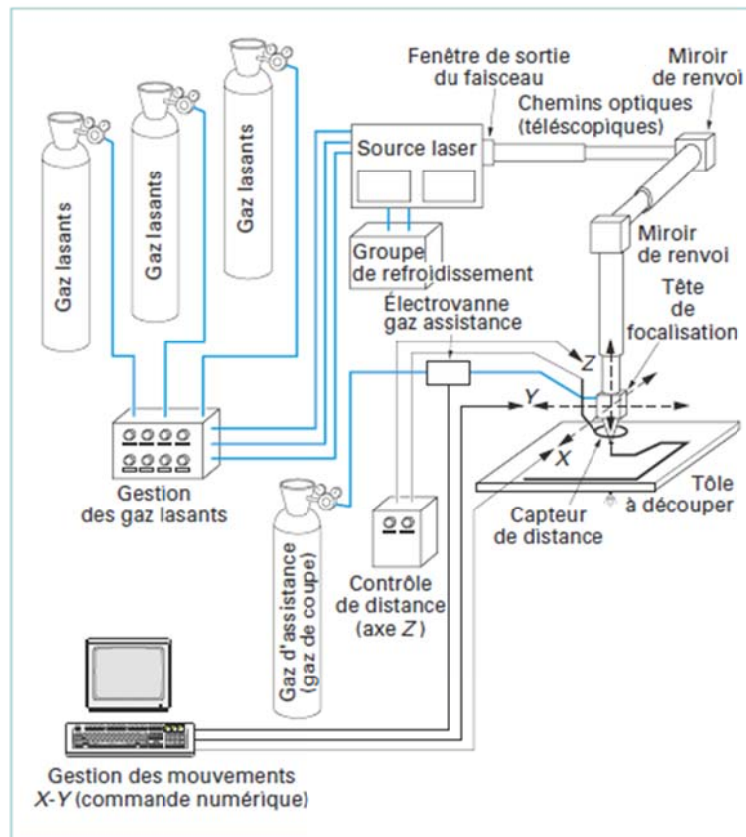


Figure III.16. Schéma de principe d'une installation de coupage laser CO₂ .
[21].

Chapitre V : Nouvelles technologies de mise en forme

V.1. Machines –outils à commande numérique (MOCN)

V.1. 1. Généralités

La CN est une technique utilisant des données composées de codes alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologiques nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un procédé . C'est également une méthode d'automatisation des fonctions des machines ayant pour caractéristique principale une très grande facilité d'adaptation à des travaux différents. À ce titre, la CN constitue l'un des meilleurs exemples de pénétration du traitement de l'information dans les activités de production.

Exploitant au maximum les possibilités de la micro-informatique, *toutes les données sont traitées en temps réel* , c'est-à-dire au moment où elles sont générées, de manière à ce que les résultats du traitement contribuent également à piloter le processus.

Après une première génération de CN à logique câblée sont apparues les **commandes numériques par calculateur (CNC)** , ou par ordinateur, qui intègrent un ou plusieurs ordinateurs spécifiques pour réaliser tout ou partie des fonctions de commande.

V.1. 2. Fonction d'une machine CNC

Le premier rôle d'une machine **CNC (Computerized Numerical Control)**, est de générer des mouvements. Elle recevra des valeurs de positionnement, de vitesse et d'accélération et générera, suite à un traitement, des consignes numériques en sortie.

Elle dispose d'une grande puissance de calcul et d'une plus grande souplesse d'utilisation qu'un automate programmable. Ce dernier est néanmoins un complément de la commande CNC pour ce qui est de la gestion des entrées telles que : interrupteur, bouton d'arrêt d'urgence, butée « hard », etc. et l'activation de sorties binaires telles que : alimentation de groupe hydraulique, colonne lumineuse, etc. .

En résumé, la commande CNC va générer des mouvements selon des consignes numériques et réguler ces derniers par des systèmes en boucle fermée, alors que l'automate va acquérir des signaux binaires et mettre à jour les sorties concernées. À noter que les données reçues en entrées par

l'automate sont également exploitable par la commande numérique et inversement. [22].

V.1.3. Principe de fonctionnement

La machine CNC travaille avec des systèmes de contrôles en boucle fermée. Des ordres vont être générés vers la commande par le biais d'un programme pièce ou par action manuelle de l'opérateur.

La commande va traiter ces informations et générer des consignes afin d'obtenir les déplacements voulus par le biais des moteurs d'axes. Des contrôles de vitesse et de position seront alors effectués de manière continue par la machine.

La position sera réglée par la commande numérique alors que la vitesse sera le plus souvent réglée par le système d'asservissement moteur. On se trouve donc en face d'un système à deux boucles et l'on parle de système asservi.

Le schéma ci-dessous (**figure V.1**), nous montre le flux d'informations avec ses directions, ainsi que les deux boucles de contrôles (position et vitesse).

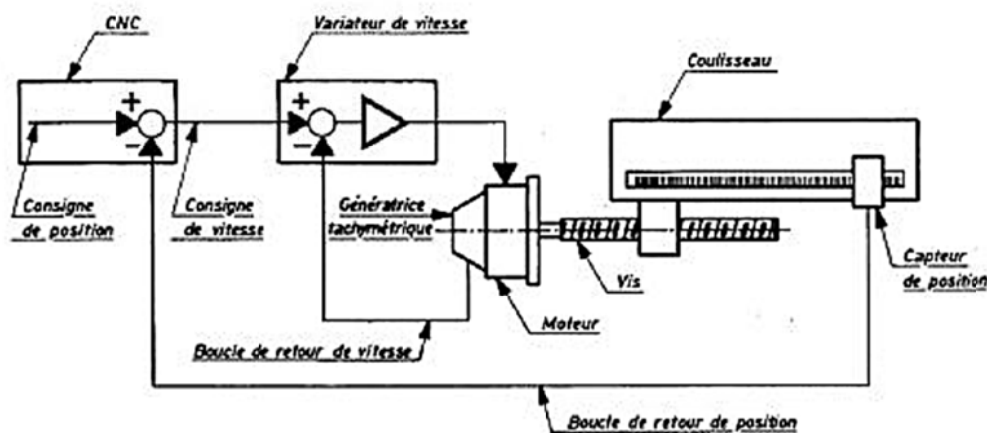


Figure V.1. Traitement d'information sous commande numérique, [22].

V.1.4. Justification de la CN

V.1.4.1. Automaticité

Le premier avantage d'une CN est d'offrir aux machines qui en sont équipées un **très haut niveau d'automaticité**. 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 par ailleurs un certain nombre d'avantages moins palpables mais tout aussi importants, tels qu'une diminution notable de la fatigue de l'opérateur, moins d'erreurs d'origine humaine et un temps d'usinage constant et prévisible pour chaque pièce d'une même série.

Si l'on compare une **MO** conventionnelle et une **MOCN**, on peut considérer que le temps copeau est assez voisin sur les deux types de machines. En revanche, la productivité comparée de diverses catégories de machines de niveaux d'automatisation différents, c'est-à-dire ce même temps copeau ramené au temps effectif de production, est très différente compte tenu de la réduction importante des temps non productifs que l'on enregistre sur les machines à fort taux d'automatisation (**figure V.2**).

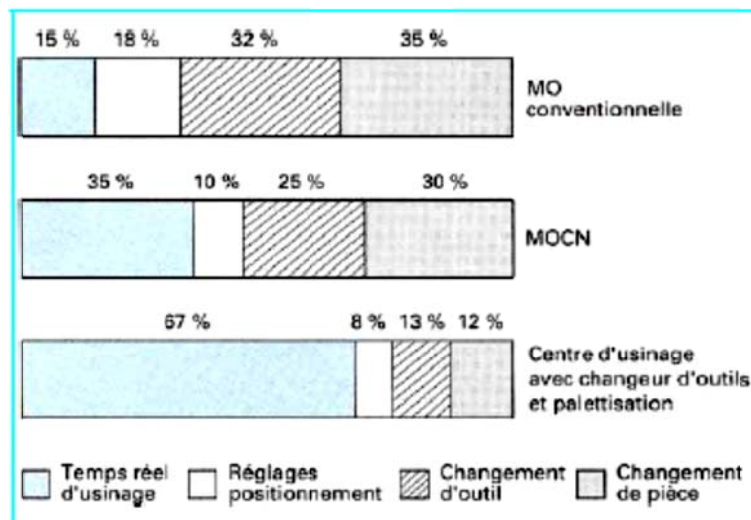


Figure V.2 – Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur degré d'automatisation.

V.1.4.2. 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.

V.1.4.3. 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.

Il est par ailleurs admis que le niveau de performances très élevé atteint par les MOCN conduit les constructeurs à prévoir 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.1.4.3. 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. Usinages à grandes Vitesses (UGV)

V.2.1. Définition

L'Usinage à Grande Vitesse (UGV) concerne les procédés d'usinage pour lesquels les paramètres de coupe sont très supérieurs à ceux utilisés en usinage conventionnel. D'une manière générale, un procédé d'usinage est dit « à grande vitesse », lorsque la vitesse de coupe est deux à trois fois celle de l'usinage conventionnel. Cette technique d'usinage est souvent utilisée dans les secteurs aéronautique et automobile, l'**usinage à grande vitesse**, aussi connu sous son acronyme **UGV**, se caractérise par deux éléments : la **vitesse de coupe** et le **phénomène de coupe**.

V.2.1.1. La vitesse de coupe

Aujourd'hui, quel que soit le matériau travaillé, il est possible d'effectuer une coupe sur une large plage de vitesses. **Trois zones de vitesses de coupe** sont mises en évidence par la théorie mais dépendent ensuite des propriétés de chaque matériau.

Les vitesses de coupe les moins élevées auxquelles il est possible d'usiner correspondent à celles de l'**usinage conventionnel**.

Existe ensuite une seconde zone de vitesses de coupe où usiner une pièce est impossible. Généralement appelée **Vallée de la mort**, cette zone n'offre pas les conditions idéales pour usiner puisque soit l'outil de coupe sera usé rapidement, soit la pièce sera détériorée.

Enfin, la troisième zone de vitesses de coupe est celle correspondant à l'**usinage à grande vitesse**. Cependant, il faut savoir que la plage de vitesse de l'UGV est différente selon le matériau.

Pour illustrer ces trois zones, prenons le cas de l'aluminium. L'usinage conventionnel est possible pour des vitesses de coupe comprises entre 100m/min et 750m/min alors que l'usinage à grande vitesse nécessite une vitesse de coupe incluse entre 1500m/mn et 9000m/mn. Aux autres vitesses de coupe, l'aluminium ne peut être travaillé.

V.2.1.2. Les phénomènes de coupe

Les vitesses de coupe élevées, auxquelles recourt l'usinage à grande vitesse, modifient quelque peu les phénomènes observés en usinage conventionnel.

En effet, si en UGV se forment des **copeaux dentelés** plutôt que continus, la vraie spécificité tient au **phénomène thermique**. En effet, la vitesse de coupe est telle que les échanges thermiques entre copeaux et pièce usinée tendent à disparaître. Ceci signifie que la pièce usinée ne voit pas sa température augmenter puisque la quasi-intégralité de l'énergie de coupe est évacuée dans les copeaux.

En usinage traditionnel, ce phénomène thermique est différent puisque les échanges thermiques se font et l'outil comme la pièce usinée accueille une part de l'énergie calorifique de la coupe.

C'est d'ailleurs parce que la **température de la pièce usinée** n'augmente pas en UGV que **la coupe est de meilleure qualité** surtout pour les matières ductiles pouvant se déformer avec la chaleur.

V.2.1.3. Avantages

- ☒ 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,

V.2.1.4. Inconvénients

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

- ☒ les opérateurs et programmeurs des machines doivent suivre des formations particulières qui diffèrent considérablement de celles nécessaires pour l'usinage conventionnel,
- ☒ une erreur humaine peut avoir des conséquences très significatives sur la machine, du fait des importantes vitesses et des accélérations mises en jeu lors du déplacement des différents composants,
- ☒ des précautions maximales au niveau de la sécurité doivent être adoptées : les machines doivent être dotées de carters résistant à des sollicitations du type impact. De même, les outils et pièces tournantes doivent faire l'objet de contrôles fréquents afin de détecter de possibles défaillances par fatigue.

Références bibliographiques

- [1]: Fabrication avancée et méthodes industrielles, Tome 2, Christian Mascle et Walery Wygowski, Presses internationales Polytechnique, 2013.
- [2]: Choix et usage des matériaux, techniques de l'ingénieur T51020, Yves BRÉCHET, 1997.
- [3]: Norme ISO 3002, Notion de base sur l'usinage.
- [4]: Etude des Procédés, LES PROCEDES DE MISE EN FORME, ST12D, ITEC.
- [5]: Production automatisée, Usinage, Conservatoire national des arts et métiers, B. Vieilles.
- [6]: Alexandre Toumine, « Cours d'usinage », Groupe conception production, INSA de Lyon, France.
- [7] G. Spinnler, « Conception des machines principes et applications Tome 3» Edition : Presses polytechniques et universitaires romandes -1998.
- [8] I. Amara, « Support de Cours : fabrication mécanique et métrologie », Département de Génie Mécanique, Université Mentouri Constantine, 2000-2001.
- [9]: Ch. Decreuse, D. Feschotte, « Ingénierie simultanée », Techniques de l'Ingénieur, Articles : AG3 et A 5 310.
- [10]: Fraisage, Principes, Techniques de l'Ingénieur, BM 7082, 2001.
- [11]: Y. Schoefs, S. Fournier, J. C. Leon « Productique mécanique » Edition Delagrave, 1994, France.
- [12]: Perçage, Techniques de l'ingénieur, BM 7088, 2001
- [13] G. Paquet, Guide de l'usinage, les Guides Industriels Edition DELAGRAVE -2000, France.
- [14] J.C. Tanguy, « Rectification, conditions de base et données pratiques », Centre Technique des Industries Mécaniques, CETIM 2001, France.
- [15] E. Filippi, « Cour de technologie des fabrications mécaniques ». Faculté Polytechnique de Mons Belgique.
- [16]. I. Amara, « Support de Cours : fabrication mécanique et métrologie », Département de Génie Mécanique, Université Mentouri Constantine, 2000-2001.
- [17]: Usinage par électroérosion, Daniel KREMER, Techniques de l'ingénieur, BM 7 251, 2000.

Cours de Fabrication Mécanique, S4 Technologie, Université de M'sila
Dr: Debih Ali

[18]: Usinage par ultrasons, Daniel KREMER, Techniques de l'ingénieur, BM 7 240, 1998.

[19]: Usinage chimique, Henri PELLEREAU, Techniques de l'ingénieur, B 7 260, 1994.

[20]. Usinage électrochimique, Pierre LECHERVY et al, Techniques de l'ingénieur, B 7270, 1996.

[21]: Coupage thermique et coupage au jet d'eau, Gilles CANNET et Michel DELZENNE, Techniques de l'ingénieur, BM 7 280, 1998.

[22]: Commande numérique des machines-outils, Gilles PROD'HOMME, Techniques de l'ingénieur, B 7130.

Resume

La fabrication mécanique est un secteur qui regroupe des travailleurs polyvalents qui s'affairent à la conception, à la fabrication, au réglage, à la réparation ou à l'assemblage d'une multitude de pièces, d'outils, d'accessoires et de produits métalliques. Les moteurs, les engrenages, les pompes et les compresseurs sont des exemples de produits destinés, entre autres, à approvisionner les industries de la construction, des pâtes et papiers, des mines et de l'aéronautique.

Certains travailleurs de la fabrication mécanique, tels les ingénieurs mécaniciens et les technologues en génie mécanique, doivent pour leur part acquérir un bagage de connaissances qui leur permette de faire de la gestion de projets ainsi que de la recherche et du développement dans le but de concevoir et de réaliser des machines et des instruments nouveaux. Toutes ces tâches, pour lesquelles il faut une bonne capacité d'autonomie et un bon esprit d'équipe, exigent aussi de connaître la langue anglaise, car la vive concurrence mondiale pousse parfois les travailleurs à entrer en contact avec des spécialistes d'autres spécialités

Un **procédé de fabrication** est 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 font partie des procédés de fabrication, elles interviennent une fois que les différentes pièces ont été fabriquées. On parle de procédé de fabrication pour tous les objets.

On peut citer :

Obtention par enlèvement de matière

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

- le tournage,
- le fraisage,
- le perçage,
- la perforation,

- la rectification,
- le limage,
- et l'électro-érosion.
- Ainsi que les découpages :
 - l'oxycoupage,
 - le découpage laser,
 - le découpage jet d'eau,
 - et le découpage plasma.

Obtention par déformation

Consiste à déformer plastiquement le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée.

- Estampage
- Matricage
- Tréfilage
- Forgeage
- Hydroformage
- Laminage
- Filage
- Cintrage
- Emboutissage
- Pliage
- Extrusion
- Thermopliage
- Thermoformage
- Repoussage

Obtention par fusion

- Frittage
- Moulage ; voir aussi Fonderie.
- Le Forgeage liquide

Le Soudage consiste à fusionner deux pièces en les rendant localement liquide ; ce procédé peut aussi être considéré comme une technique d'assemblage.

La fabrication additive désigne les processus de mise en forme par fusion, ainsi que les processus chimiques : polymérisation ou réticulation.

Obtention par assemblage

- Soudage
- Collage
- Boulonnage
- Rivetage
- Agrafage
- Frettage
- Tissage et Tressage
- Soudage par friction malaxage

MOTS CLES: MANUFACTURING, USINAGE, ELECTROEROSION, RECTIFICATION, MOULAGE, ELECTROCHIMIE...