

# Fabrication

# Mécanique

---

## Objectifs du cours :

Posséder une culture technologie de base des différentes techniques de transformation et de contrôle des produits.

Etre en mesure de choisir le moyen de transformation en fonction de la morphologie du produit final à obtenir et des exigences géométriques et dimensionnelles.

Etre en mesure de vérifier la conformité géométrique et dimensionnelle d'un produit fini.

---

## Sommaire

---

1. Le moulage.....	3
1.1. Moulage au sable.....	3
1.2. Moulage en carapace.....	4
1.3. Moulage à modèles perdus.....	5
1.4. Moulage en moule métallique ou en coquille.....	7
1.5. Moulage avec inserts.....	10
1.6. Défauts de moulage.....	11
2. Mise en forme par déformation plastique des pièces massives.....	12
2.1. Formage à froid et formage à chaud.....	12
2.2. Forgeage libre ou forgeage en matrice ouverte.....	12
2.3. Forgeage en matrice fermée : estampage et matriçage.....	13
2.4. Laminage conventionnel.....	14
2.5. Laminage circulaire.....	15
2.6. Filage.....	16
2.7. Etirage.....	16
2.8. Corroyage.....	17
3. Mise en forme par déformation plastique des produits plats.....	18
3.1. La découpe - Cisailage.....	18
3.2. La découpe - Poinçonnage et découpage.....	19
3.3. La découpe - Sciage et tronçonnage.....	19
3.4. L'oxycoupage.....	20
3.5. Découpe au jet d'eau.....	21
3.6. Découpe laser.....	22
3.7. Choix du procédé de découpe.....	23
3.8. Pliage.....	24
3.9. Profilage à froid sur machines à galets.....	24
3.10. Cintrage.....	25
3.11. Emboutissage.....	26
3.12. Repoussage et fluotournage.....	26
4. Le soudage.....	28
4.1. Soudage aluminothermique.....	28
4.2. Soudage oxyacétylénique.....	29
4.3. Soudage avec électrode enrobée.....	30

4.4. Soudage semi automatique sous protection gazeuse.....	32
4.5. Soudage sous gaz inerte avec électrode en Tungstène (T.I.G.).....	32
4.6. Soudage électrique par résistance.....	33
4.7. Soudage par friction.....	34
5. L'usinage - Mise en forme par enlèvement de matière -.....	36
5.1. Définition :.....	36
5.2. Matériaux pour outils de coupe.....	36
5.3. Fluide de coupe.....	37
5.4. Le tournage.....	37
5.5. Le fraisage.....	42
5.6. Le brochage.....	46
5.7. Le perçage.....	47
5.8. La rectification.....	49
5.9. Le rodage.....	52
5.10. Usinage par électroérosion.....	53
6. Gamme de fabrication.....	54
6.1. Mise en position des pièces en cour de fabrication.....	54
6.2. Contrat de phase.....	58
Bibliographie.....	61

## 1. Le moulage

Le moulage est un procédé de fabrication qui permet de réaliser des pièces par coulée du métal en fusion dans un moule. On s'adresse à lui pour :

la fabrication de pièces de formes compliquées qu'il serait difficile ou impossible de réaliser par tout autre procédé, ou pour la production à des prix de revient plus intéressants de pièces plus simples ; profiter des propriétés physiques ou d'utilisation (dilatation, corrosion, frottement, usure, basses et hautes températures) et des propriétés mécaniques des divers métaux et alliages coulés ; couler des alliages difficilement usinables.

La plupart des pièces de fonderie sont des ébauches qui sont ensuite partiellement usinées comme, par exemple, les carters de moteur automobile (produits en alliage d'aluminium pour alléger le moteur).

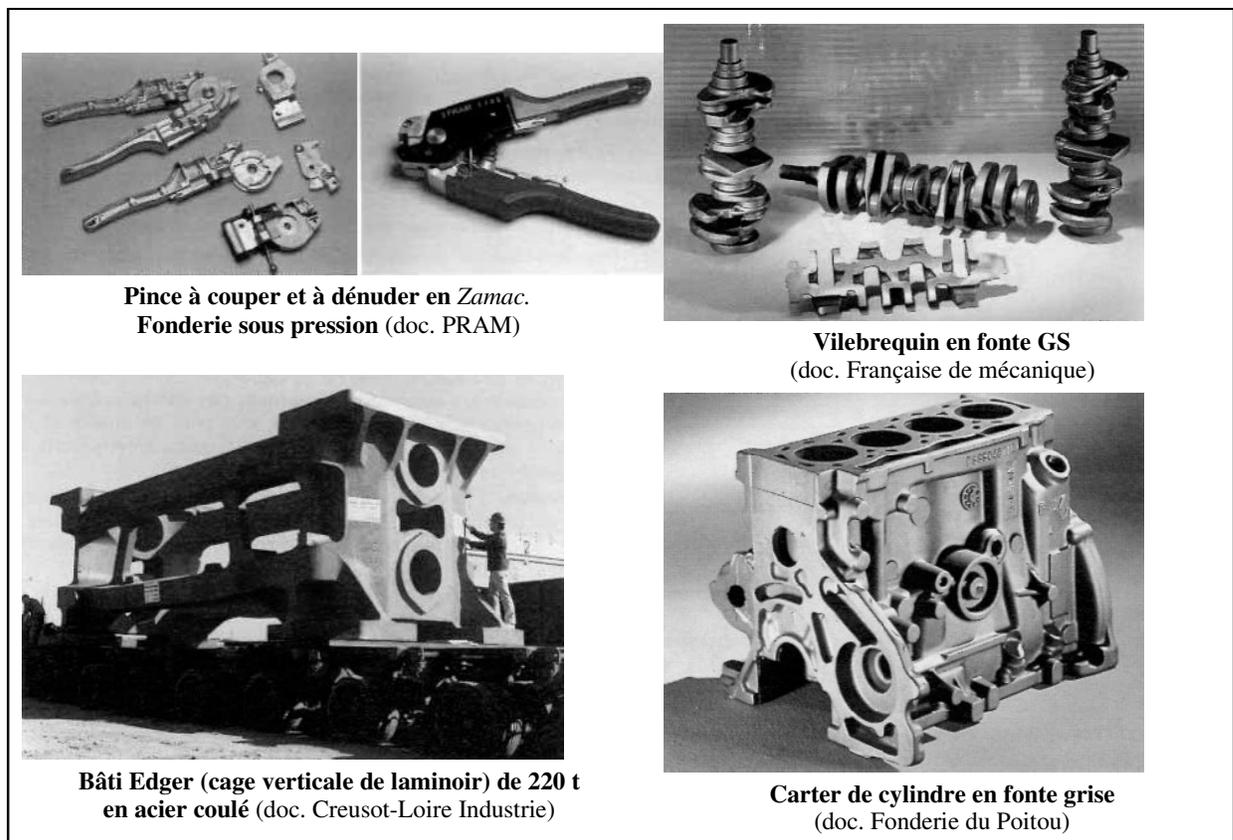


Figure 1 : Exemples de pièces produites par l'industrie de la fonderie.

### 1.1. Moulage au sable

C'est le procédé de moulage le plus universel et le plus couramment employé, et qui reste toujours très compétitifs avec d'autres procédés plus modernes. Il permet de couler aussi bien de grosses pièces unitaires, que de petites et moyennes pièces en série, sur chantiers de moulage mécanisés, quel que soit l'alliage. Cette technique utilise des moules en sable lié avec de l'argile et de l'eau. Le moulage peut se faire avec ou sans modèle. Il peut être en bois, en plâtre ou métallique. Pour que le modèle puisse être démoulé sans abîmer

l'empreinte, on est amené à donner de la «dépouille» aux plans orientés dans le sens du démoulage, c'est-à-dire à les rendre légèrement obliques ; lorsque des faces sont en «contre-dépouille», le modèle est réalisé en plusieurs parties démontables. Dans les cas de moulage sans modèle les empreintes et les noyaux sont obtenus par taillage du sable de moulage.

Les principaux avantages de cette méthode résident dans la rapidité de moulage et le taux de récupération très élevé du sable. Il est utilisé pour le moulage des pièces en fonte, acier et métaux non ferreux.

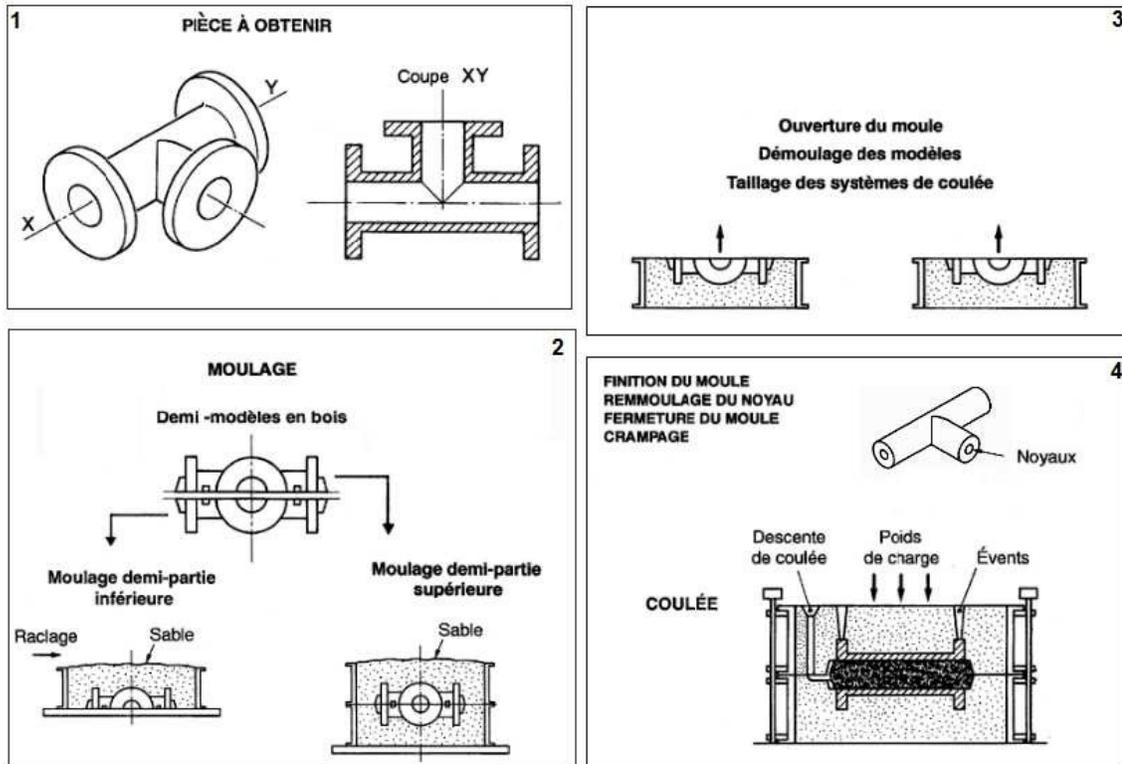
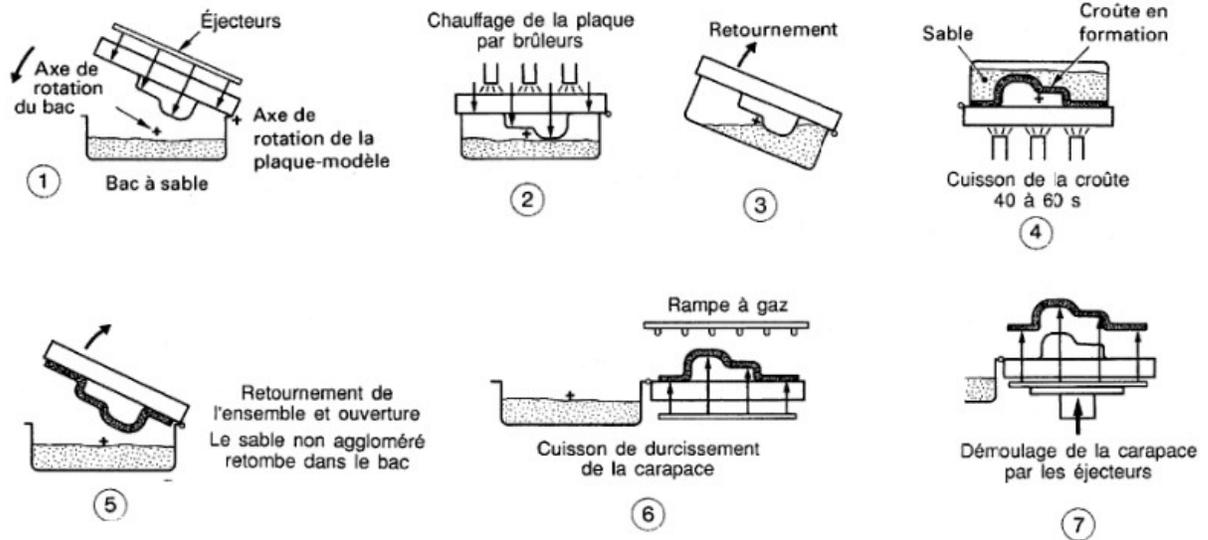


Figure 2 : Fabrication d'un élément de tuyauterie par moulage main

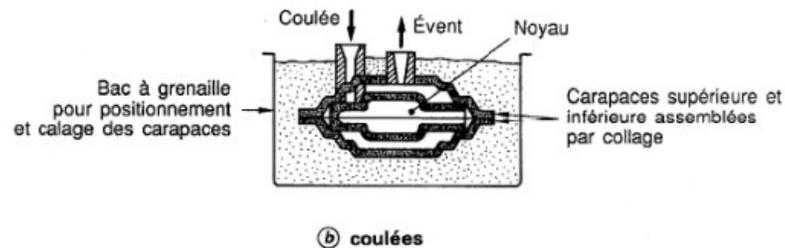
## 1.2. Moulage en carapace

Ce procédé utilise des sables mélangés avec des résines thermodurcissables polymérisant au contact d'une plaque modèle maintenue en température pour que le sable fasse prise sur une certaine épaisseur (figure 3). Le sable en excès est rejeté, et on sépare du modèle la carapace solide (de 4 à 8 mm d'épaisseur).

Les pièces peuvent être dessinées avec des faibles dépouilles (par exemple cylindres avec ailettes en fonte pour moteurs à refroidissement à air) qu'il serait impossible de fabriquer par d'autres procédés de moulage en sable. Avec ce procédé, et notamment avec la fonte, on obtient des pièces compactes, sans crique, d'un bel état de surface, avec des contours nets et des arêtes vives. On peut utiliser tous les alliages, surtout ceux difficilement coulables en moules métalliques, en raison de leur température de coulée (alliages ferreux, cuivreux...).



a) fabrication des carapaces - Cycle des opérations



b) coulées

Figure 3 : Moulage en carapace

### 1.3. Moulage à modèles perdus

Ce sont les procédés de moulage qui utilisent des modèles en matière fusible (polystyrène, cire, etc.) restant dans le moule au moment de sa confection et qui sont éliminés par la suite, soit pendant la coulée (cas du polystyrène), soit avant la coulée, par chauffage du moule (cas de la cire ou du mercure congelé).

Le maintien des modèles dans le moule permet de simplifier les opérations de moulage, de supprimer les noyaux et de faire venir plus facilement des formes complexes, en admettant des contre dépouilles, l'opération de démoulage étant supprimée.

#### a. Moulage avec modèles en polystyrène expansé (modèle gazéifiable)

Le principe de ce procédé consiste à fabriquer un modèle en polystyrène expansé, noyé ensuite dans le sable de moulage. À la coulée, le métal liquide vaporise le modèle et remplit peu à peu l'empreinte, d'où le nom de procédé avec modèle gazéifiable. Utilisé au départ pour la fabrication des grosses pièces unitaires (outils d'emboutissage par exemple), il s'est ensuite développé plus progressivement dans le domaine des pièces de grandes séries, tant en aluminium qu'en fonte et en acier, pour lesquelles de très nombreuses installations sont maintenant en production industrielle.

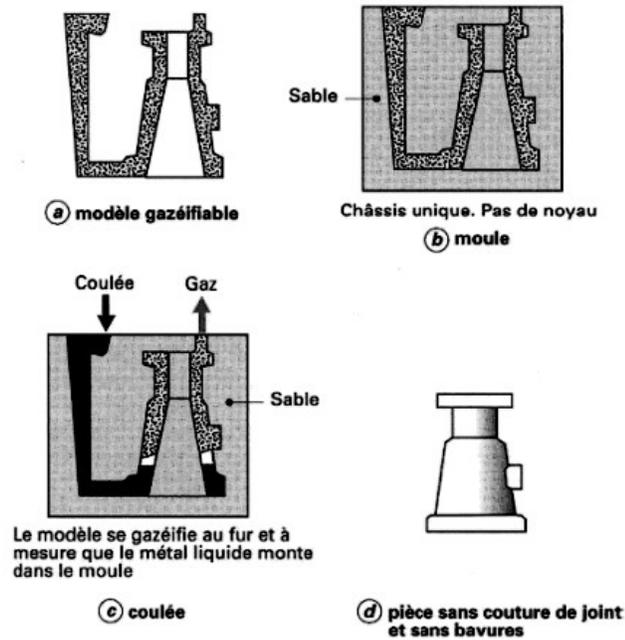


Figure 4 : Moulage avec modèle gazéifiable

### b. Moulage à la cire perdue

On confectionne un modèle en cire pour le recouvrir ensuite d'un enduit en céramique. En cuisant la céramique pour la faire durcir, on récupère la cire fondue. Il ne reste plus qu'à couler le métal dans le moule en céramique. La précision obtenue par cette technique est excellente.

De nos jours, on l'emploie dans des secteurs spécialisés (prothèses dentaires, bijouterie, fonderie d'art) et surtout dans des applications industrielles pour la fabrication des ailettes de turboréacteurs et pour la production massive de pièces en tout genre : machines à coudre, machines textiles, armement, aviation, automobiles, etc.

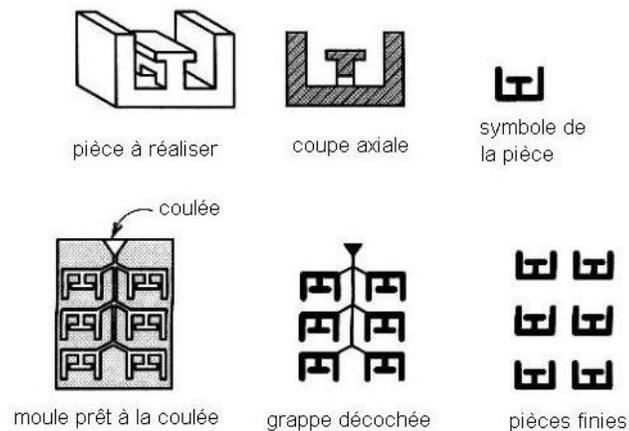


Figure 5 : moulage à la cire perdue

Il permet la coulée de tous les alliages non ferreux (aluminium, magnésium, cuivre, titane, zinc...) et ferreux (aciers d'outillage, aciers inoxydables, aciers spéciaux, superalliages à base de nickel ou de cobalt fortement alliés) ;

## 1.4. Moulage en moule métallique ou en coquille

Grâce à l'emploi des moules métalliques, le moulage en coquille présente les caractéristiques suivantes pour les moules :

- rigidité de l'empreinte ;
- grande précision dimensionnelle ;
- excellent état de surface des éléments moulants ;
- conductivité thermique élevée des empreintes qui donnent aux pièces moulées des caractéristiques mécaniques plus élevées de l'alliage coulé, conséquence d'une vitesse de refroidissement et de solidification plus élevée, donnant un grain plus fin et une matière plus compacte ; mais des contraintes résiduelles à l'état brut peuvent nécessiter un traitement thermique de détente des pièces ;
- possibilité de faire venir des trous de fixation et de permettre une réduction appréciable des surépaisseurs d'usinage.

Toutefois, signalons que les outillages sont chers, d'où la nécessité de n'appliquer ce procédé que pour des pièces produites en grandes ou moyennes séries.

Les différents procédés de moulage en coquille sont classés et différenciés suivant le mode de mise en œuvre du métal liquide.

### a. Moulage en coquille par gravité

C'est le procédé de moulage en coquille le plus simple. On coule directement le métal liquide à l'aide d'une louche ou d'une petite poche de coulée dans l'empreinte d'un moule métallique qui peut comporter ou non des noyaux métalliques ou en sable suivant les pièces à fabriquer et leur complexité.

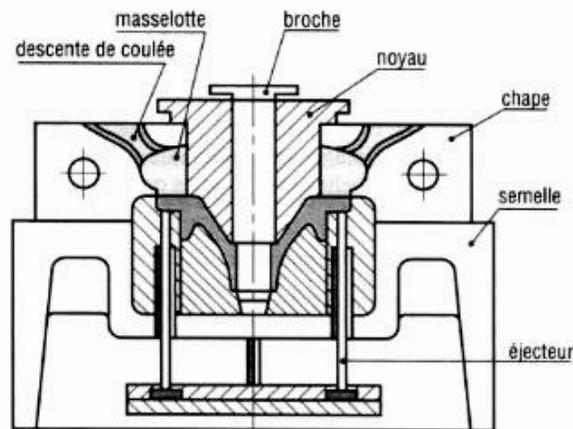


Figure 6 : Moulage en coquille

### b. Moulage en coquille basse pression

Le métal est injecté dans l'empreinte grâce à la pression d'un gaz sur le bain liquide et introduit dans le moule par l'intermédiaire d'une buse d'injection. Le moule est placé directement sur le four de coulée. L'alliage liquide contenu dans un creuset étanche en graphite est refoulé dans le moule par une pression d'air

comprimé ou d'azote appliquée sur la surface du métal. Le métal monte dans le tube d'injection réfractaire et pénètre dans le moule par un trou de coulée situé à la partie inférieure du moule. La pression est maintenue pendant tout le temps de la solidification de la pièce puis, au moment où l'on relâche la pression, tout le métal resté liquide dans le tube d'injection redescend dans le four. Les pressions utilisées ne dépassent pas 0,1 MPa (40 à 60 kPa pour des pièces en aluminium par exemple).

Le domaine d'emploi de la coulée basse pression s'est largement développé au cours des vingt dernières années, notamment dans l'automobile (production de culasses en aluminium...).

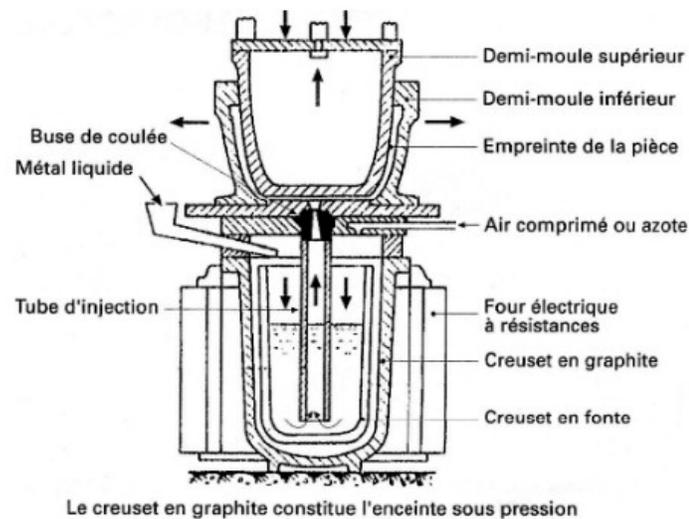


Figure 7 : Moulage en coquille basse pression

### c. Moulage sous pression

Le métal est injecté sous forte pression dans le moule par l'intermédiaire d'un piston agissant sur le métal liquide versé dans un conteneur.

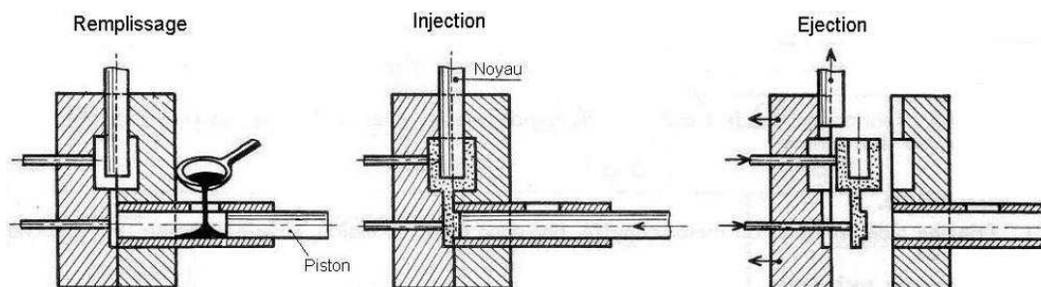


Figure 8 : Moulage en coquille sous pression

Les avantages sont nombreux ; citons parmi les plus significatifs :

- bel aspect des pièces ;
- très grande précision, réduisant les masses et limitant l'usinage ;
- possibilité d'inserts ;
- meilleure étanchéité des pièces (carburateurs en Zamak par exemple) ;
- faibles dépouilles permettant d'économiser la matière, etc.

#### d. Moulage sous très haute pression ou forgeage liquide

Le métal semi-solide (40% liquide et 60 % solide) est injecté dans une matrice métallique pour ensuite être pressé pour lui donner sa forme finale. Il s'applique aux alliages légers et se distingue des autres procédés en moules métalliques par :

- un remplissage très calme de l'empreinte ;

- une solidification sous une pression très élevée (100 MPa et jusqu'à 150 MPa), ce qui confère aux pièces fabriquées de très bonnes caractéristiques mécaniques grâce à une structure très fine et à l'absence de porosités.

Les principales pièces concernées dans l'automobile sont, par exemple, les pièces de moteurs (bielles, pistons), de boîtes de vitesses (boîtiers de différentiels), des pièces de suspension (bras, porte-fusée...) et des pièces de freinage (étriers, maîtres-cylindres...).

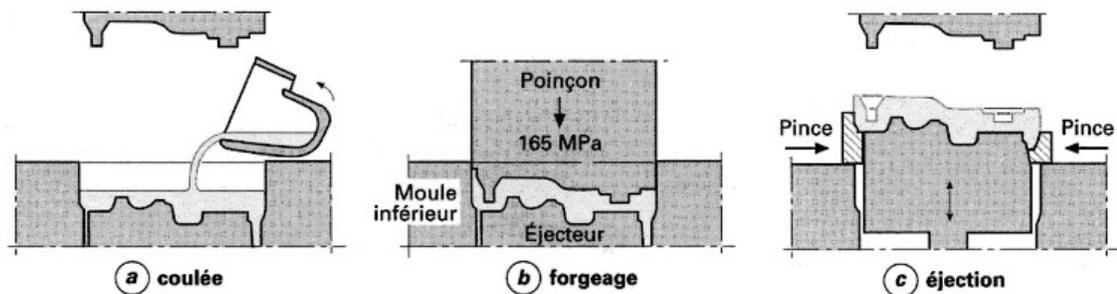


Figure 9 : Schéma du procédé de forgeage liquide

#### e. Moulage en coquille centrifugée

Il est utilisé principalement pour la fabrication de pièces cylindriques creuses (tuyaux par exemple) obtenues par coulée du métal liquide dans des coquilles métalliques entraînées en rotation. La centrifugation présente les avantages suivants :

- accroissement de la propreté inclusionnaire du métal par l'épuration physique sous l'effet de la force centrifuge pendant la solidification ;

- métal plus compact, diminution de certains défauts (soufflures, inclusions) ;

- structure plus fine et meilleures propriétés mécaniques de l'alliage ;

- obtention d'une bonne précision dans les formes, réduction de l'ébarbage et de l'usinage des pièces ;

- très grande productivité des installations que l'on peut assez facilement automatiser (tuyaux, chemises de moteurs, etc.) ;

- possibilité de faire des pièces bimétalliques, comme des tuyaux, des cylindres de laminoirs, etc.

Mais les outillages sont coûteux et il est souhaitable de prévoir les amortissements avec des grandes séries, sauf pour les moules en sable ou en graphite.

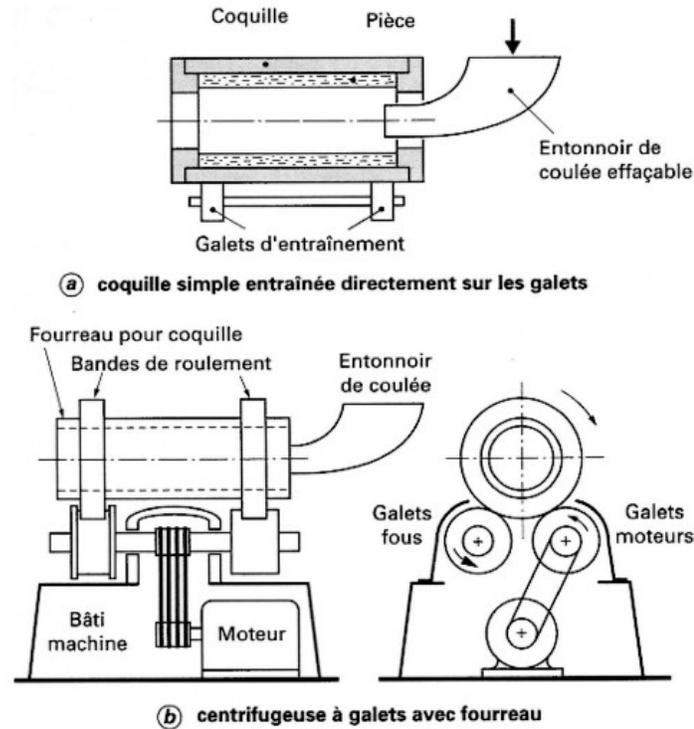


Figure 10 : Moulage par centrifugation

### 1.5. Moulage avec inserts

Le moulage avec insertion est un procédé qui consiste à mettre dans un même moule deux métaux en contact, l'un à l'état solide (l'insert) et l'autre à l'état liquide, pour réaliser entre eux une liaison par accrochage ou par soudure qui en fasse, après solidification, une pièce monobloc.

La mise en place d'inserts permet d'améliorer localement les caractéristiques d'une pièce moulée, par exemple dans les domaines suivants :

- la soudabilité ;
- les résistances mécaniques (module d'élasticité, résistance à la fatigue, résistance à l'usure) ;
- la résistance thermique ;
- la conductivité ;
- la création de circuit de refroidissement par incorporation de tubes ;
- l'allégement des pièces par mise en place d'inserts de faibles épaisseurs pour des parties minces ne pouvant être obtenues brutes de fonderie.

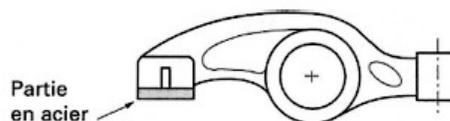


Figure 11 : Insert pour culbuteur en aluminium

La figure 11 montre un insert pour culbuteurs en aluminium. Lorsque ceux-ci sont fabriqués en aluminium coulé sous pression, on munit leur surface d'appui sur la queue de soupape d'un insert métallique mis en place dans le moule avant injection du métal liquide.

La technique d'insertion peut apporter des diminutions du coût par suppression de certaines opérations d'usinage sur la pièce de fonderie (insertion de vis, goujons, bagues filetés ou non, écrous, tubes, etc.).

## 1.6. Défauts de moulage

Les pièces obtenues par moulage peuvent présenter de nombreux défauts, parmi lesquels nous indiquerons :

**Criques :** Ce sont des ruptures ou déchirures du métal qui se produisent pendant le refroidissement de la pièce dans le moule. Elles sont généralement dues à un retrait gêné par le sable lors de refroidissement. Il faut donc :

- éviter les parties massives à refroidissement lent (points chauds), et par conséquent rechercher une épaisseur aussi constante que possible ;
- éviter les formes gênant le retrait, ou leur donner de l'élasticité ;
- augmenter la résistance de la pièce par des nervures.

**Soufflures ou piqûres :** Ce sont des cavités ou des trous résultants de la présence de bulles de gaz dans l'alliage pendant sa solidification dont l'origine peut être : alliage gazé pendant l'élaboration et les manutentions, dégagement de vapeur d'eau du sable, entraînement d'air à la coulée ou mauvais tirage d'air dans le moule, réactions moule-métal.

**Retassures :** Ce sont des défauts qui se manifestent par des creux à la surface de la pièce ou par des cavités à l'intérieur de celle-ci. On les trouve dans les régions de la pièce restées liquides les dernières. Il faut donc les alimenter par du métal liquide provenant de masselottes (fig. 12d).

**Abreuvage et métallisation :** C'est la pénétration de l'alliage dans le sable. Le degré maximum d'abreuvage est la métallisation c'est à dire la pénétration totale de l'alliage dans le moule.

Causes : sables à trop forte granulométrie et pas assez réfractaire, serrage insuffisant du sable, système de coulée créant un point chaud, température de coulée élevée, alliage trop fluide (ex. présence de phosphore dans le bronze).

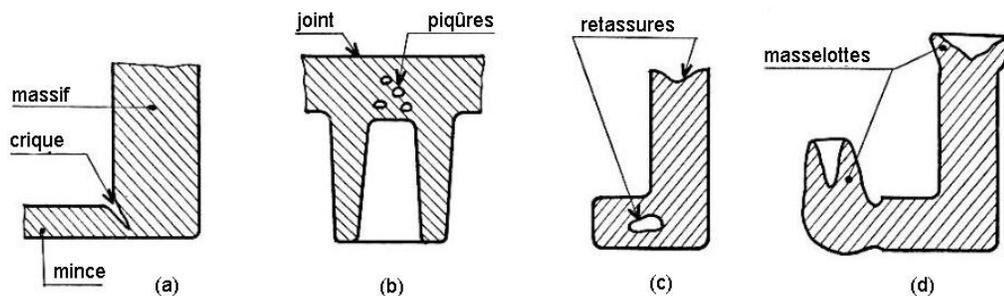


Figure 12 : Défaut de la fonderie

## 2. Mise en forme par déformation plastique des pièces massives

La mise en forme par déformation plastique à chaud ou à froid est un procédé industriel d'obtention de pièces mécaniques qui est utilisé aussi bien en petites qu'en moyennes ou en très grandes séries de pièces, dont la masse peut varier de quelques grammes à plusieurs tonnes. Les pièces obtenues sont simples ou complexes ; on peut citer les bielles et vilebrequins des moteurs thermiques, les roues des véhicules sur rails, les axes de roue des véhicules automobiles, les engrenages cylindriques ou coniques des transmissions et des boîtes et vitesse, les vis, écrous et rivets, les arbres de turbines à vapeur et d'alternateurs les trains, d'atterrissage des avions les arbres et volants des moteurs d'aviation, les arbres du turbines, les pales des réacteurs d'avions et des turbines à gaz, les outils manuels (clefs, tournevis, etc.), les ressorts à lames, les crochets de levage, les lames de couteaux et de ciseaux, les billes, cylindres, tonneaux et chemins de roulement des roulements à billes et à rouleaux, les engrenages coniques, etc. Ces pièces ont en commun le fibrage des grains qui leur confère d'excellentes propriétés de tenue mécanique. Un autre avantage du procédé est la rapidité d'exécution des pièces (vilebrequin de 20kg à 100 pièces/heure sur presse automatique).

### 2.1. Formage à froid et formage à chaud

Le formage à chaud est effectué à une température supérieure à la moitié de la température absolue ( $T/2$ °K) de fusion de l'alliage. C'est le domaine thermique activé dans lequel on constate notamment une forte décroissance de la résistance à la déformation.

Le formage à froid est effectué à une température inférieure à la moitié de la température absolue de fusion de l'alliage.

**Tableau 1 : Avantages et inconvénients des procédés de formage en fonction de la température de formage**

	Avantages	Inconvénients
<b>Formage à froid</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon état de surface</li> <li>- Propriétés mécaniques élevées</li> <li>- Cadences élevées</li> <li>- Peu de reprises de finition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efforts de formage élevés</li> <li>- Risques de fissuration en surface ou à cœur</li> <li>- Usure mécanique des outillages</li> </ul>
<b>Formage à chaud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faibles efforts de formage</li> <li>- Ductilité élevée y compris pour les matériaux non ductiles</li> <li>- Possibilités de pièces de grandes dimensions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présence de calamine en surface</li> <li>- Propriétés mécaniques moyennes après formage (limite d'élasticité basse mais bonne ductilité)</li> </ul>

### 2.2. Forgeage libre ou forgeage en matrice ouverte

Le forgeage libre ou forgeage en matrice ouverte s'apparente au martelage des forgerons. Ce procédé, effectué à haute température, est notamment utilisé pour forger des arbres de machines de grandes dimensions à partir d'un lingot coulé (arbre de turbine à vapeur de 300 tonnes, arbre d'alternateur, arbres pour la marine, vilebrequin de gros moteur diesel marin, etc.). C'est d'ailleurs le seul moyen possible pour ce type de pièce à l'heure actuelle. C'est une technique économique (outillage peu coûteux) mais qui requiert une bonne habileté de la part des opérateurs.

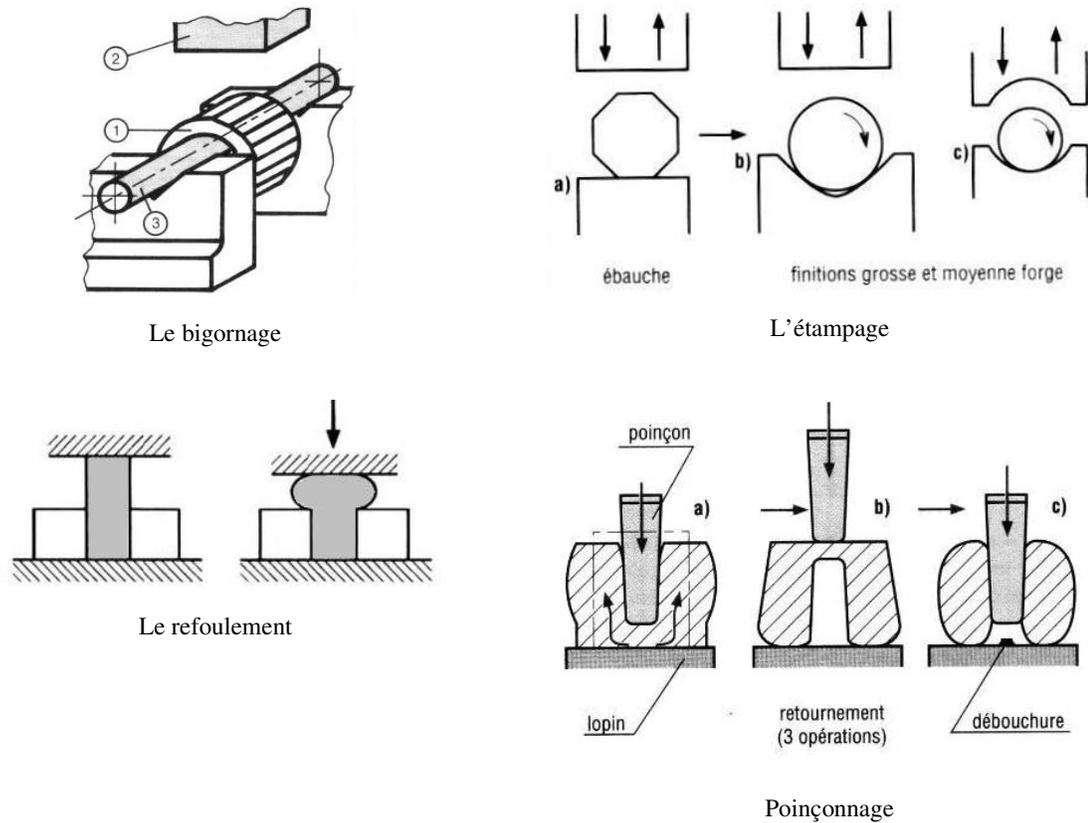


Figure 13 : Opérations de forgeage libre

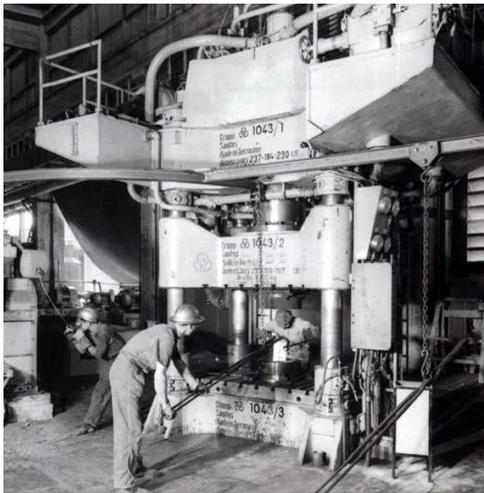


Figure 14 : Presse hydraulique destinée au forgeage

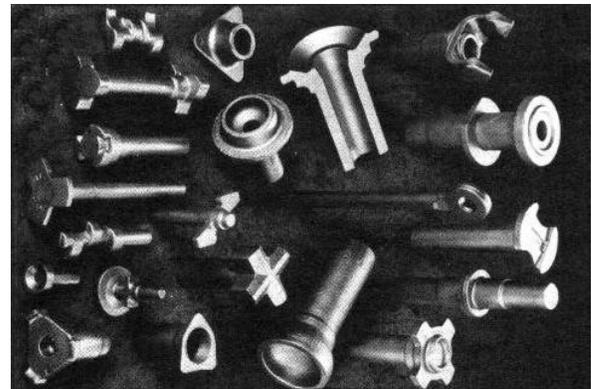


Figure 15 : Exemples de pièces obtenues par forgeage libre

### 2.3. Forgeage en matrice fermée : estampage et matriçage

Les opérations de forgeage en matrice fermée consistent à chauffer à haute température un morceau de demi-produit d'une géométrie bien déterminée, appelé lopin, puis de le placer entre des outillages appelés matrices, dans lesquels est usinée en creux une gravure qui représente exactement la forme du produit brut à obtenir. Le produit brut de formage est souvent proche des cotes de la pièce finie. Après formage, seules des

opérations de finissage sont nécessaires, telles que : perçage, alésage, traitement de surface, usinage à des cotes précises.

Une machine d'estampage agit par choc ou par pression. Elle exerce une force telle que le lopin est contraint d'épouser les formes de la gravure. Les termes estampage et matriçage sont synonymes. La désignation estampage est généralement appliquée au forgeage mécanique aciers, alors que la désignation matriçage s'applique au forgeage mécanique des métaux non ferreux.

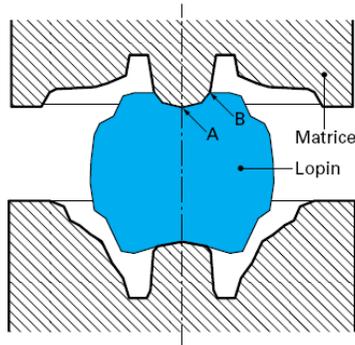


Figure 16 : Principe de l'estampage

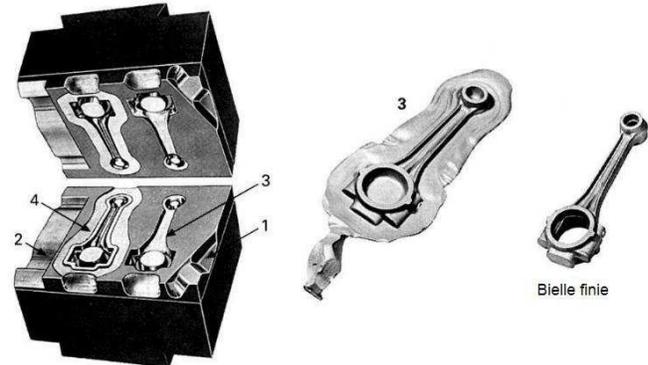


Figure 17 : Estampage d'une bielle

## 2.4. Laminage conventionnel

Le laminage est un procédé de mise en forme par déformation plastique dans lequel les outils au contact du produit en cours de formation sont des solides de révolution animés d'un mouvement de rotation autour d'axes fixes entre lesquels le produit est entraîné par frottement. L'entraînement du produit s'accompagne d'une déformation imposée par l'espace laissé libre entre les cylindres. Le produit sort des cylindres perpendiculairement au plan contenant leurs axes sous la forme d'une barre de section constante. Les parties de chaque cylindre en contact avec le produit laminé constituent une sorte de filière. Ils sont appelées cannelures.

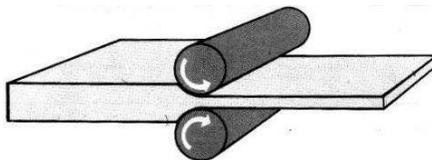


Figure 18 : Principe du laminage

Le mot laminage évoque plus spécialement les produits plats ; le procédé permet cependant d'obtenir d'autres géométries comme : tôles, feuillard, fils, ronds, ronds à béton, barres, rails, poutrelles (IPN, IPE, H, H, etc.), profilés divers, tubes sans soudures, etc.

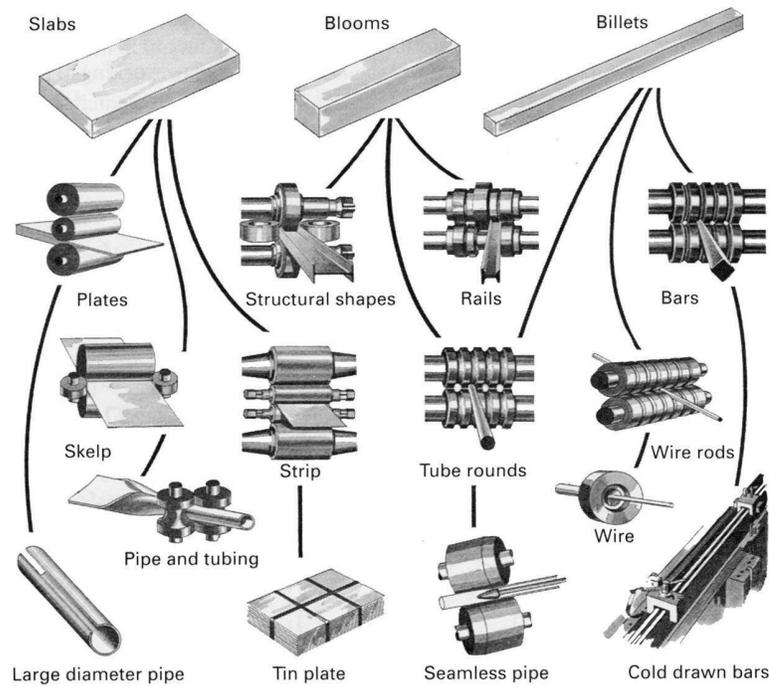
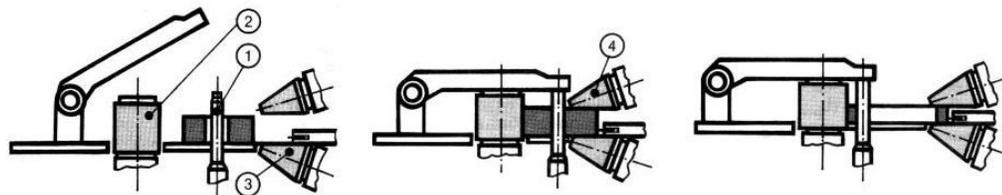


Figure 19 : Laminage des produits plats et des poutrelles

### 2.5. Laminage circulaire

Ce procédé permet la transformation d'une ébauche annulaire de faible diamètre (obtenue à la presse) en une forme annulaire de grand diamètre dont la section axiale peut présenter un profil complexe.



a) Laminage avec un mandrin. L'ébauche est laminée entre le cylindre (2) et le mandrin (1). Deux galets tronconiques (3) et (4) maintiennent une hauteur constante. ● b) Laminage avec quatre mandrins. Au poste (1), introduction

Figure 20 : Principe du laminage circulaire

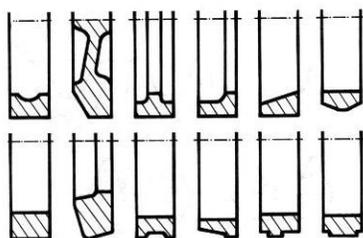


Figure 21 : Laminage circulaire des produits de forme annulaire présentant un profil complexe

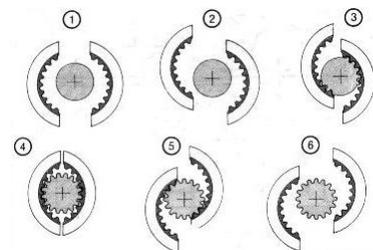


Figure 22 : Laminage de denture. Les outils ont la forme de segments à denture intérieure

## 2.6. 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.).

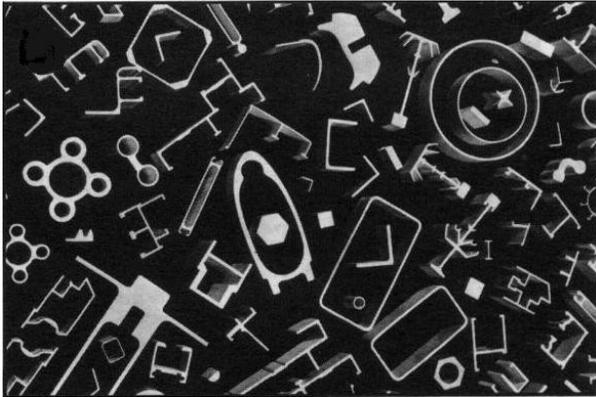


Figure 23 : Exemple des pièces réalisées par filage

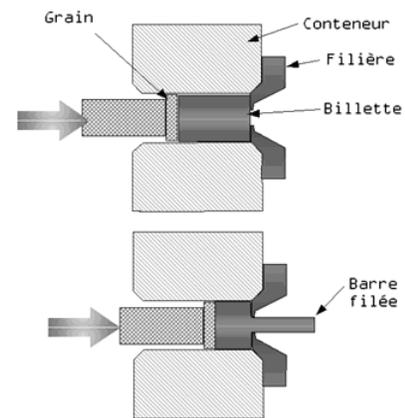


Figure 24 : Principe du filage

## 2.7. Etirage

Le procédé d'étirage est une déformation à froid par passage d'une ébauche au travers d'une filière de section plus petite et appropriée au profil et à la dimension à obtenir. La filière est constituée d'un noyau dur en acier à très haute résistance à l'usure ou en carbure de tungstène fritté, emmanché dans une monture en acier. Elle doit être polie à la pâte de diamant afin de diminuer le frottement et d'éviter la formation de rayures par collage de métal sur la filière. Pour les carrés, les hexagones et les plats, il existe des filières dites réglables constituées de quatre plots indépendants, en carbure, disposés en équerre et coulissant les uns par rapport aux autres dans une monture en acier.

Le procédé s'applique aux produits pleins et aux produits creux n'offrant pas la précision dimensionnelle suffisante ou l'aspect approprié à leur usage ; il s'applique particulièrement aux barres fils et tubes (ronds, hexagones, carrés, produits plats). On peut citer les exemples d'application suivants : ressorts, tubes pour injection de carburant, tubes pour échangeurs de chaleur, fils en cuivre pour câbles électriques, guides, supports, glissières, axes, etc.

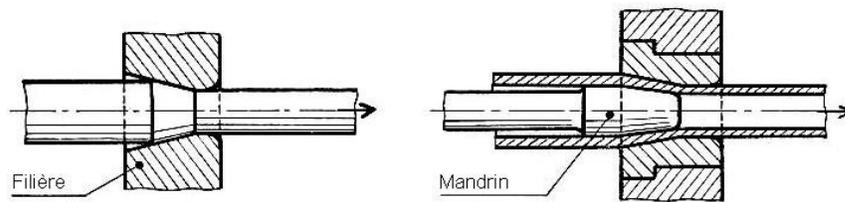


Figure 25 : Principe de l'étrirage

## 2.8. Corroyage

Les produits obtenus par formage sont dits produits corroyés par opposition aux produits coulés. Compte tenu des différences entre ces deux processus, les propriétés mécaniques des pièces sont différentes. Il est donc toujours nécessaire de faire la distinction lorsqu'on s'intéresse aux propriétés des matériaux. Ils se distinguent notamment par le fibrage que possèdent les produits corroyés suite aux déformations plastiques qu'ils ont subis (figure 26). L'expérience montre que des éprouvettes prélevées au même endroit sur des pièces de même forme et fabriquées à partir du même semi-fini mais par des méthodes différentes donnent des résultats très différents (fig. 27) ; les meilleurs résultats étant obtenus dans le sens du fibrage. Le fibrage améliore, donc, les caractéristiques mécaniques des produits finis :

- meilleure résistance mécanique dans le sens des fibres qui sont souvent bien orientées par rapport aux tensions de service (notamment les contraintes de flexion);
- peu d'amorce de fissures superficielles.

Il leur confère cependant des propriétés anisotropes dont il faut tenir compte dans les semi-finis et notamment les tôles laminées appelées à être mise en forme par des procédés d'usinage ou de soudage.

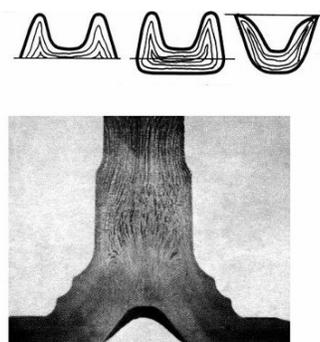


Figure 26 : Fibrage sur une pièce obtenue par forgeage

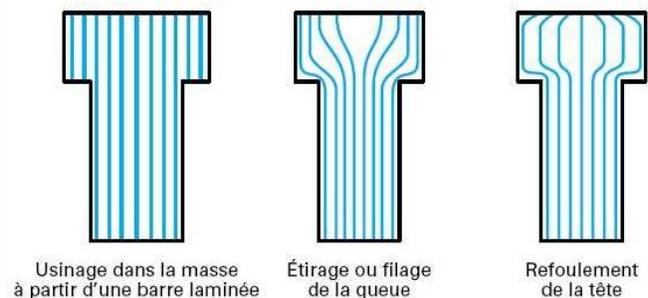


Figure 27 : Sens de corroyage sur 3 boulons obtenus par 3 méthodes différentes

### 3. Mise en forme par déformation plastique des produits plats

La mise en forme par déformation plastique des produits plats (tôles) consiste, à partir d'une surface plane, à réaliser une surface non plane et parfois non développable. Les principaux procédés sont la découpe, le pliage, l'emboutissage et les techniques qui en sont dérivées.

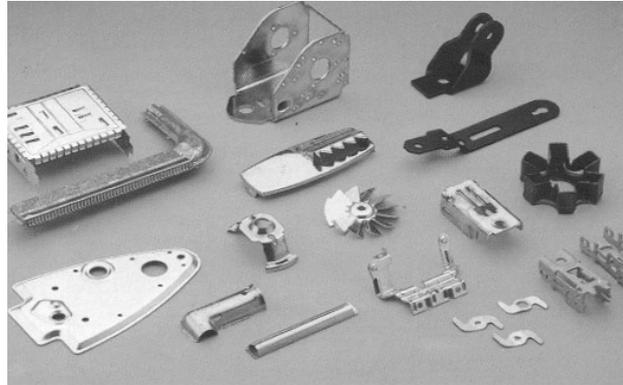


Figure 28: Exemples de pièces obtenues à partir des produits plats

#### 3.1. La découpe - Cisailage

Le cisailage est un procédé qui consiste à découper, par cisaillement mécanique, une plaque de dimensions appropriées dans une plaque de plus grandes dimensions. Cette plaque appelée flan est presque toujours destinée à être ultérieurement travaillée par poinçonnage, pliage, emboutissage, usinages, etc. Ce mode de coupe est utilisé pour des épaisseurs comprises entre quelques dixièmes de millimètres et environ 30 millimètres. Il existe de nombreux types de machines travaillant par cisailage, soit avec des lames droites (fig. 29) soit des molettes (fig. 30) soit encore d'autres outils permettant d'effectuer différents types d'opérations.

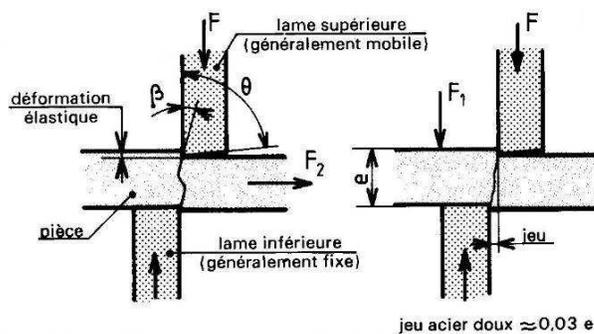


Figure 29 : Principe de cisailage

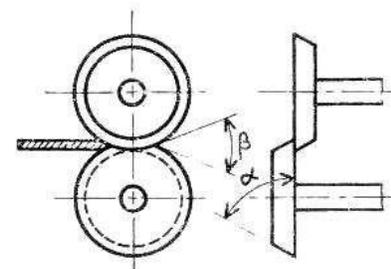


Figure 30 : Cisaille à molettes

L'opération de cisailage provoque l'érouissage du métal en bordure des coupes qui peut avoir pour conséquence un mauvais comportement des pièces en service notamment dans le cas de sollicitations de fatigue. Certains codes de construction interdisent l'application du cisailage des tôles d'acier d'épaisseur supérieure à 12 ou 15 mm.

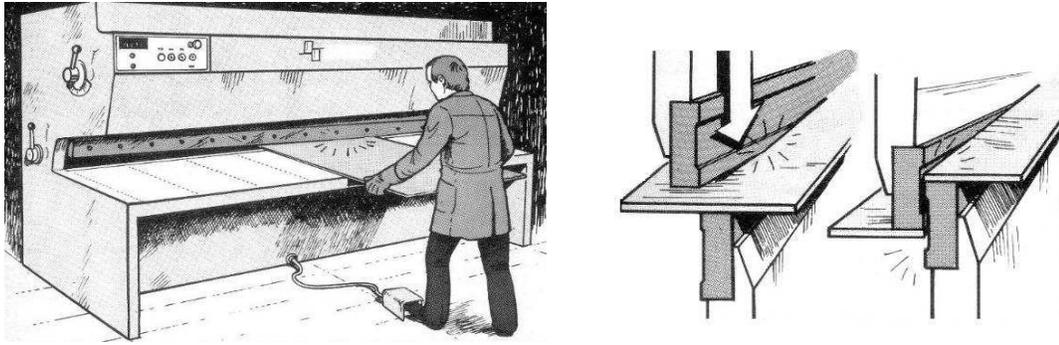


Figure 31 : Cisaille à guillotine

### 3.2. La découpe - Poinçonnage et découpage

Le poinçonnage et le découpage sont des opérations de cisailage consistant à détacher un contour donné d'un produit plat. L'opération se fait sur une presse par l'intermédiaire d'un outillage constitué d'un poinçon et d'une matrice.

En poinçonnage, on conserve la partie extérieure, le trou s'appelle un ajoure et le déchet s'appelle la débouchure. En découpage, on conserve la partie intérieure qui est appelée flan.

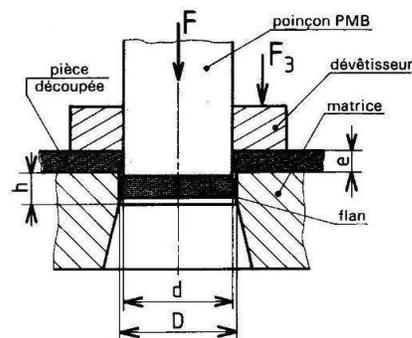


Figure 32: Principe du poinçonnage

### 3.3. La découpe - Sciage et tronçonnage

Pour le découpage des laminés, profilés et tubes, il fait appel aux techniques du sciage et du tronçonnage.

Les scies alternatives à lames (fig. 33), qui présentent des temps opératoires généralement longs mais n'exigent pas de surveillance humaine, sont affectées de préférence au coupage des profilés de grandes dimensions. Les tronçonneuses (figure 34) sont équipées de disques dentés, des disques en acier traité sans dents (action par frottement) ou des disques abrasifs. Elles demandent une forte puissance. Elles donnent des faces de coupe relativement lisses et des dimensions d'une assez bonne précision grâce la rigidité de la machine et de l'outil.

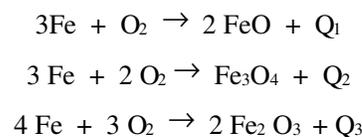


Figure 33 : Les scies alternatives à lames

Figure 34 : Tronçonneuse à disque

### 3.4. L'oxycoupage

L'oxycoupage est un procédé de coupage thermique des métaux par combustion localisée. Il consiste à sectionner un métal par l'action d'un jet d'oxygène cylindrique agissant sur une zone localisée de ce métal porté à la température d'amorçage de la combustion vive. Cette température, ainsi que la température de fusion de l'oxyde formé, doivent être inférieures à la température de fusion de ce métal. Pratiquement seuls le titane et le fer remplissent ces conditions. Ce procédé convient particulièrement à la coupe des aciers. Les réactions de base sont dans ce cas :



L'amorce de ces réactions de combustion n'étant possible qu'à partir d'une température de l'ordre de 1350°C, elle implique la présence d'une flamme généralement annulaire au jet d'oxygène. Cette flamme permet d'atteindre sur la surface à découper la température à partir de laquelle le processus peut s'amorcer, sans pour cela aller jusqu'à sa fusion.

Les chalumeaux d'oxycoupage comportent au minimum un circuit spécial d'amené de l'oxygène et un circuit pour la flamme de chauffe. La flamme de chauffe nécessaire à amorcer et à maintenir le mécanisme de l'oxycoupage est obtenue par la combustion d'acétylène, de propane, d'hydrogène, de méthane ou de mélanges de synthèse. Le gaz comburant est toujours l'oxygène.

L'exécution d'une coupe implique la buse soit maintenue à tout instant à une distance convenable de la pièce à couper et qu'elle se déplace à vitesse constante suivant le tracé prévu. Le guidage manuel ne permet pas d'assurer parfaitement toutes ces fonctions ; on a donc des dispositifs manuels assistés (règles, gabarits), des chariots mécanisés ou des dispositifs automatiques à commande numérique.

Le procédé d'oxycoupage à l'acétylène permet de découper des tôles d'acier d'une épaisseur de quelques mm

à environ 350mm. L'oxycoupage à l'hydrogène est plus difficile à régler ; sa stabilité permet son emploi à forte pression pour découper des épaisseurs de 600 mm et de l'utiliser sous l'eau (jusqu'à plus de 15 mètres de profondeur) à l'aide de torches spéciales qui créent un matelas d'air entre la flamme et l'eau.

La largeur de la saignée de coupe est de l'ordre de 1,5 à 10 mm. Les vitesses de coupe sont d'environ 1m/min pour une épaisseur de 3mm et de 20cm/min pour des tôles fortes de 250 à 300mm. Les bords adjacents à la zone coupée sont soumis à un cycle d'échauffement et de refroidissement rapide, d'où un risque de durcissement par trempe qui est combattu par un préchauffage fonction du carbone équivalent. Une face de coupe correcte doit représenter des angles vifs, des stries peu profondes légèrement incurvées (retard du front de saignée) et une section plane.

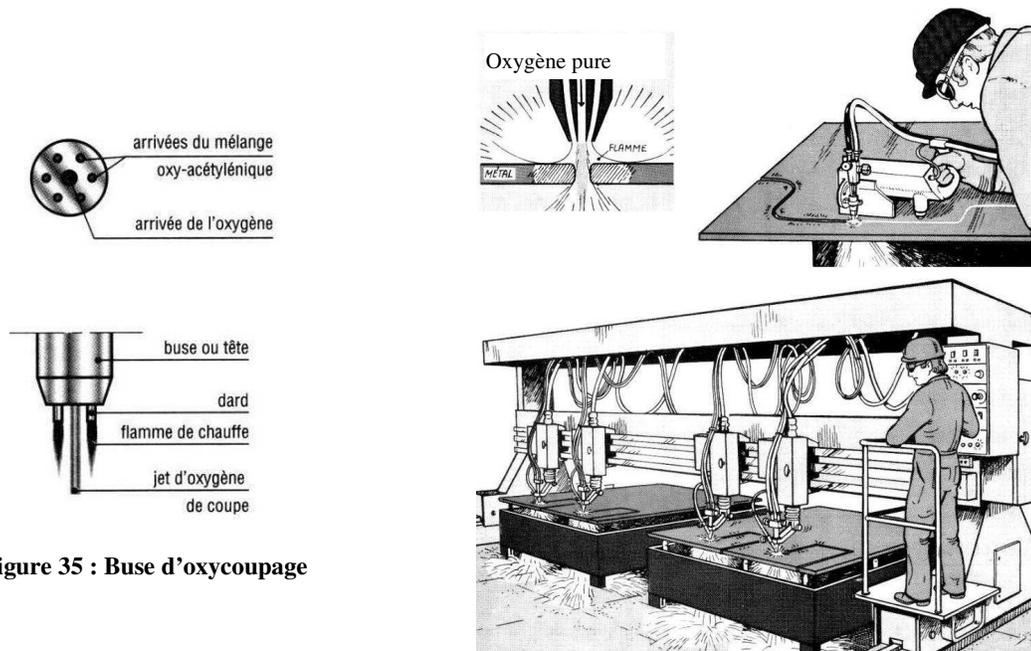


Figure 35 : Buse d'oxycoupage

Figure 36 : Poste d'oxycoupage

### 3.5. Découpe au jet d'eau

Le découpage au jet d'eau utilise un jet d'eau concentré, mince et extrêmement puissant. L'eau est comprimée à très haute pression (2000 à 5000 bars) à l'aide d'une pompe et propulsée à très grande vitesse (2 à 3 fois la vitesse du son soit près de 1000 m/s) à travers une buse en saphir percée d'un trou calibré le diamètre du jet varie de 0,08 à 0,5 mm permettant d'obtenir un trait de coupe de très faible largeur. La grande vitesse d'un jet aussi fin qu'un cheveu lui confère un pouvoir d'érosion très important.

Les découpes peuvent se faire :

- à l'eau pure ou additionnée de polymères plastiques pour la découpe de matériaux non métalliques : cuir, textiles, mousses, matières plastiques à couches simples ou multicouches ;
- à l'eau chargée d'abrasifs sous forme d'alumine ou de carbure de silicium (olivine, corindon, grenat, etc.) pour la découpe de l'aluminium, nickel, titane, aciers inoxydables, marbre et verre.

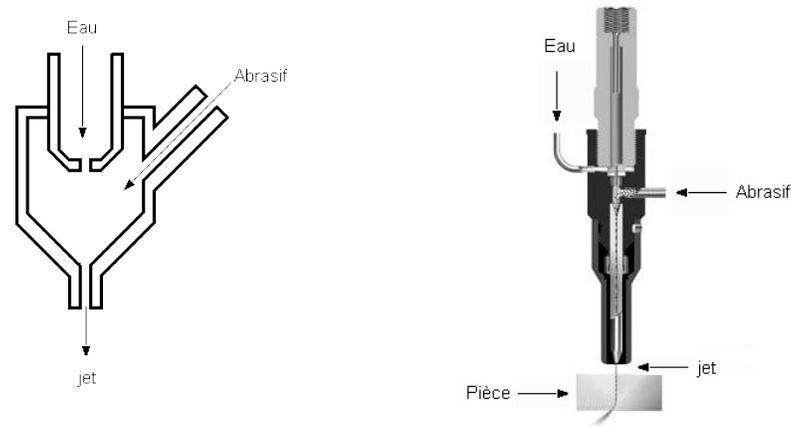


Figure 37 : Tête d'une machine de découpe à jet d'eau

### 3.6. Découpe laser

Un système de découpe laser utilise un faisceau laser (laser est un acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) focalisé dans une tête de coupage. Le faisceau lumineux est absorbé par le métal et transformé en chaleur. La température atteinte provoque la fusion, voire la vaporisation du métal fondu. L'aire de la surface illuminée étant très faible, la zone fondue est de très faible diamètre.

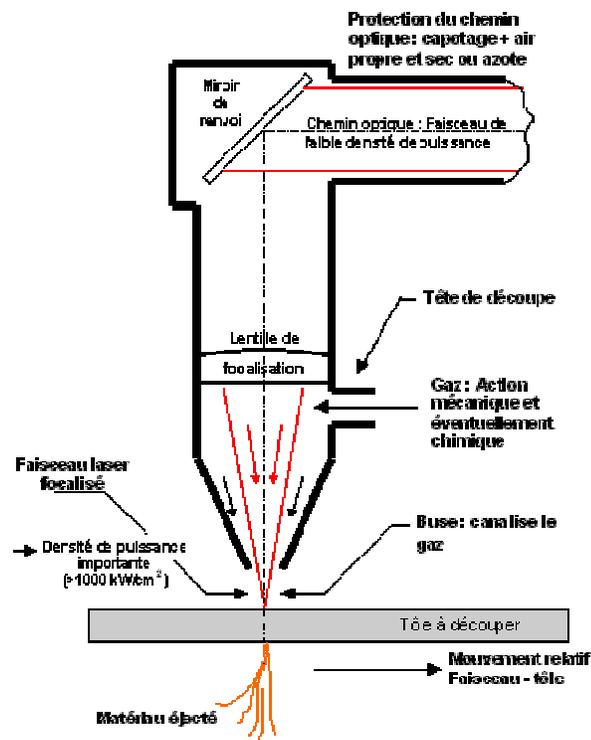


Figure 38 : Tête de découpage au laser

Pour effectuer le découpage, on superpose au faisceau laser un jet de gaz (argon, azote, CO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>) qui a deux fonctions :

- protection du dispositif de focalisation contre les remontées de vapeurs métalliques ;
- effet dynamique du gaz qui chasse le liquide de la saignée.

Dans le cas des métaux ferreux, l'utilisation d'oxygène ajoute la réaction exothermique d'oxydation du fer (voir oxycoupage) et augmente ainsi les capacités de coupe (vitesse ou épaisseur). Cette possibilité est particulièrement avantageuse pour les lasers de faible puissance (inférieure à 500 W).

Contrairement à l'oxycoupage et au coupage plasma, les têtes de coupages sont toujours portées par une machine, afin que soit respectée avec précision la position de la torche focale par rapport à la surface à couper ainsi que la vitesse de déplacement. Ce dispositif est facilement contrôlable notamment par commande numérique ; cela contribue également au succès du procédé.

La découpe laser peut être utilisée pour les métaux, les plastiques, les cuirs, les cartons, les tissus, etc. Les épaisseurs sont de l'ordre de 0,5 à 10mm sur métaux (selon la puissance du laser) et plus importantes sur les matériaux non métalliques. Les bords de la coupe sont quasiment parallèles. La largeur de la saignée se situe entre 0.2 et 1mm.

### 3.7. Choix du procédé de découpe

Tableau 2 : Eléments de comparaison pour le choix d'un procédé		
Procédé	Avantages	Inconvénients
<b>Découpe mécanique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cadences élevées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coûts des outillages</li> <li>- Mauvais état mécanique du trou, bavures</li> <li>- Outils de forme simple</li> </ul>
<b>Oxycoupage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande vitesse</li> <li>- Coût peu élevé des équipements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Précision faible</li> <li>- Zone affectée par la chaleur</li> <li>- Coût de mise en œuvre élevé</li> </ul>
<b>Découpe laser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne précision</li> <li>- Formes complexes réalisables</li> <li>- Grande vitesse de coupe</li> <li>- Grande variété de matériaux y compris non métalliques</li> <li>- Faible largeur de saignée (ex. 0,3mm pour une tôle d'acier de 2mm d'épaisseur)</li> <li>- Fabrication unitaire ou en petite série</li> <li>- Absence de déformation thermique ou mécanique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investissement important</li> <li>- La source laser exige un environnement propre</li> <li>- Limitations en épaisseur</li> <li>- Difficulté de découper des matériaux à fort coefficient de réflectivité (cuivre, et.)</li> <li>- Production de gaz et produits toxiques</li> <li>- Difficulté pour couper des corps creux et des matériaux multicouches</li> </ul>
<b>Découpe au jet d'eau</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de zone affectée par la chaleur</li> <li>- Coupe tous matériaux y compris verre, caoutchouc, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible vitesse</li> <li>- Nécessite de très hautes pressions</li> <li>- Bruit (80 à 130 dB)</li> <li>- Dépouille importante</li> <li>- Moins bonne précision</li> <li>- Problème de recyclage des boues et d'évacuation des eaux usées</li> </ul>

### 3.8. Pliage

Le pliage est un procédé de fabrication très largement employé qui permet l'obtention, par formage à froid, de pièces développables à plis rectilignes. Il intéresse aussi bien les pièces de grandes dimensions (longerons de camion, mobilier métallique, fût tronç-pyramidal de lampadaire public, etc.) que les petites pièces (tringle de rideaux, pattes de fixation, etc.). Dans ce chapitre, il sera essentiellement question du pliage de tôles.

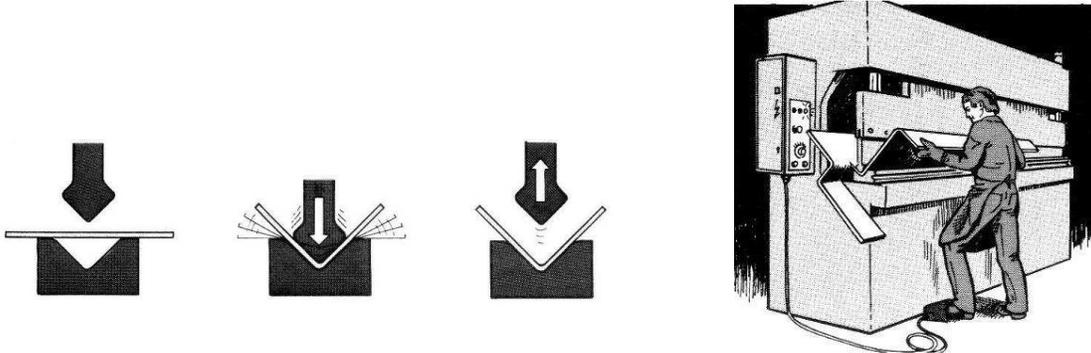


Figure 39 : Pliage

Dans ce procédé, la tôle est soumise à une flexion localisée qui provoque l'allongement des fibres extérieures, la compression des fibres intérieures et un déplacement de l'axe neutre vers l'intérieur du pli.

Lorsque le pliage est effectué dans un V, on distingue deux techniques :

pliage en l'air est effectué dans un V, a un angle inférieur à celui du pli à réaliser ; suivant la position du poinçon en fin de course, différents angles intermédiaires peuvent être obtenus avec le même outillage, l'angle terminal étant celui du V augmenté du retour élastique ;

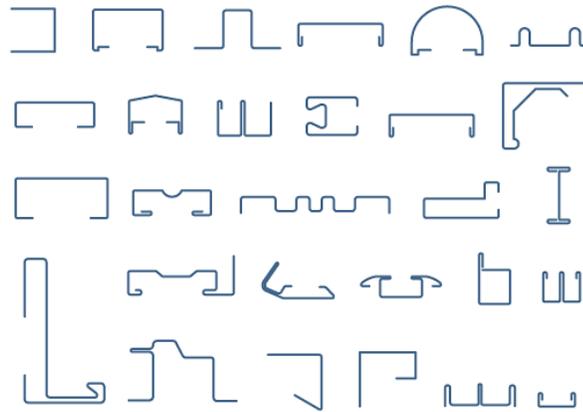
pliage avec frappe (ou pliage à fond de matrice) : la matrice en V a un angle sensiblement égale à celui du pli à réaliser ; en fin de pliage le poinçon continue sa course à fond de V et provoque un forgeage local de la pièce qui supprime quasiment le retour élastique.

Le pliage est généralement exécuté à froid. Pour éviter la rupture ou la formation de fissures au moment du pliage, il faut respecter le rayon minimum de pliage défini par la norme pour le matériau considéré. Le pliage à chaud est pratiqué lorsque la puissance de la presse est insuffisante ou lorsque la capacité de déformation à froid du métal n'est pas suffisante pour obtenir le rayon de pliage désiré.

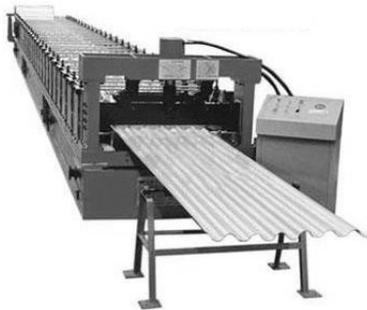
### 3.9. Profilage à froid sur machines à galets

Le profilage à froid sur machines à galets consiste à déformer progressivement, sans réduction d'épaisseur, une bande plane (feuillard) entre des galets de formes complémentaires à axes généralement horizontaux. Le profil de forme présente une section droite identique sur toute sa longueur qui n'est limitée que par les nécessités de manutention et de transport.

Les couples de galets de formes complémentaires sont montés dans des cages, le nombre de cages (4 à 30) dépend de la complexité du profil. Une bobine de feuillard alimente la machine, la longueur du profil n'est donc limitée que par les possibilités de manutention ou par la dimension de la bobine d'approvisionnement.



**Figure 40 : Sections droites des produits en tôle obtenus par profilage à froid**



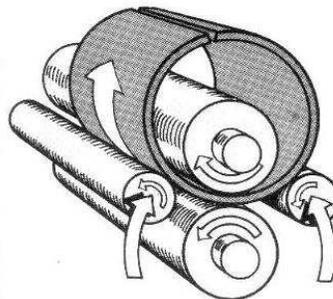
**Figure 41: Machine de profilage à froid**



**Figure 42 : Galets**

### 3.10. Cintrage

Le cintrage est une opération qui consiste à réaliser, à partir d'une tôle plane et sur une machine à rouler, des pièces à surface développable, appelées viroles, de forme cylindrique ou conique. Le cintrage des tôles est parfois appelé roulage car il est effectué sur une machine appelée rouleuse. Les épaisseurs travaillées varient de 1,5 à 250 mm, quelquefois 300 mm. L'épaisseur minimale est limitée seulement par l'équipement de manutention. On ne trouve pas de machines travaillant dans toute l'étendue de ce domaine, mais la plupart des machines peuvent former un domaine d'épaisseur relativement important : par exemple de 1,5 à 10 mm ou de 12 mm à 15 mm.



**Figure 43 : Machine du cintrage à quatre rouleaux**

A chaque fois que c'est possible, il est préférable de former à froid. En formage à chaud, la précision dimensionnelle est plus difficile à maîtriser et le coût est notablement accru par les opérations de chauffage du flan, manutention du flan et à température élevée, décalaminage de la surface, calibrage de la pièce après formage, etc. Le cintrage à chaud est réalisé lorsque la puissance de la rouleuse est insuffisante ou lorsque la capacité de déformation à froid du métal n'est pas assez grande pour réaliser la pièce au diamètre désiré sans risquer une rupture.

### 3.11. Emboutissage

Le procédé d'emboutissage permet l'obtention d'un corps creux à partir d'une plaque. Il est appliqué surtout aux pièces de grande série (carrosserie automobile, fonds bombés d'appareils sous pression, canettes de boissons, etc.). Il couvre tout un ensemble de procédés de formage, par déformation plastique, à chaud ou à froid, des métaux. L'opération est effectuée par déformations successives à l'aide d'une presse mécanique ou hydraulique. L'emboutissage à la presse utilise un outillage composé d'un poinçon, d'une matrice et d'un serre-flan. Initialement, la pièce est découpée en un flan qui est comprimé entre la matrice et le serre-flan sous une certaine force (ou pression) appelée force de serre-flan. Cette force sert à gérer l'écoulement du métal. Le poinçon descend au contact du flan, puis le déforme jusqu'à ce qu'il entre en contact avec la matrice. Lors de la remontée du poinçon, la pièce conserve sa forme, au retour élastique près, puis elle est détournée (enlèvement de la matière excédentaire), ou bien subit une autre étape d'emboutissage.

Suivant les caractéristiques mécaniques du matériau, l'épaisseur des tôles à travailler et la capacité des presses, on utilise l'emboutissage à froid ou à chaud.

L'emboutissage à froid s'effectue sur des presses hydrauliques ou mécaniques le plus souvent sur des tôles d'épaisseur inférieure à 4mm. L'emboutissage à chaud est réalisé exclusivement sur des presses hydrauliques. Il est réservé aux matériaux peu ductiles à la température ambiante et aux tôles de forte épaisseur dont le formage nécessite d'importants efforts.

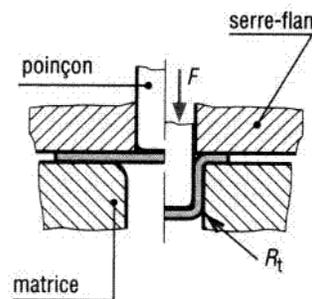


Figure 44 : Le principe le plus utilisé, le serre-flan s'oppose à la formation des plis

### 3.12. Repoussage et fluotournage

Ces procédés s'appliquent aux pièces de révolution de petite série. Un flan est maintenu serré entre un mandrin et une contre-pointe. L'ensemble est mis en rotation. Le flan est repoussé sur le mandrin à l'aide d'une molette ou galet de formage.

Dans le procédé de repoussage, l'épaisseur initiale du flan est approximativement conservée sur la pièce (fig. 45). Dans le procédé de fluotournage, on allonge un flan axisymétrique en réduisant son épaisseur ; le métal s'écoule en tournant d'où le nom du procédé (fig. 46). L'opération peut être manuelle ou entièrement automatisée.

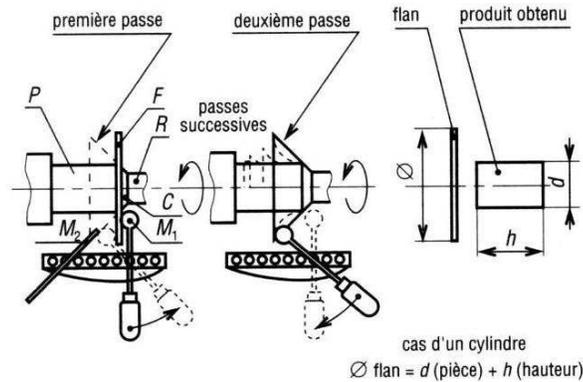


Figure 45 : Repoussage

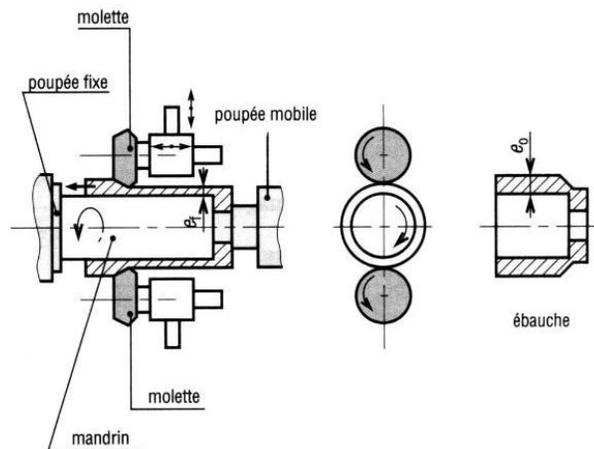


Figure 46 : Fluotournage

Le repoussage et le fluotournage sont utilisés :

- en chaudronnerie pour former des calottes sphériques et des fonds bombés de formes elliptique ou hémisphérique.
- en aéronautique spatial pour former des convergents et les divergents, des réservoirs, de viroles ;
- en automobile : jantes ;
- en ferroviaire, cylindres de frein.

Les machines s'apparentent à des tours classiques de moyenne et grande capacité. Elles possèdent un banc supportant les chariots porte-molettes, une broche supportant le mandrin et lui donnant le mouvement de rotation et une contre-pointe faisant office de serre-flan.

Pour certains matériaux durs et fragiles, l'opération peut être effectuée à chaud

## 4. Le soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage par fusion des parties des deux pièces en contact. Cette mise en fusion est faite par chauffage, par pression, ou par une combinaison des deux. Le soudage par chauffage est la méthode la plus employée aujourd'hui.

Le soudage assure la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques.

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

**Le soudage** : opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de natures très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé.

**Le brasage** : opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération.

**Le soudobrasage** : technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

On peut classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la figure 47.

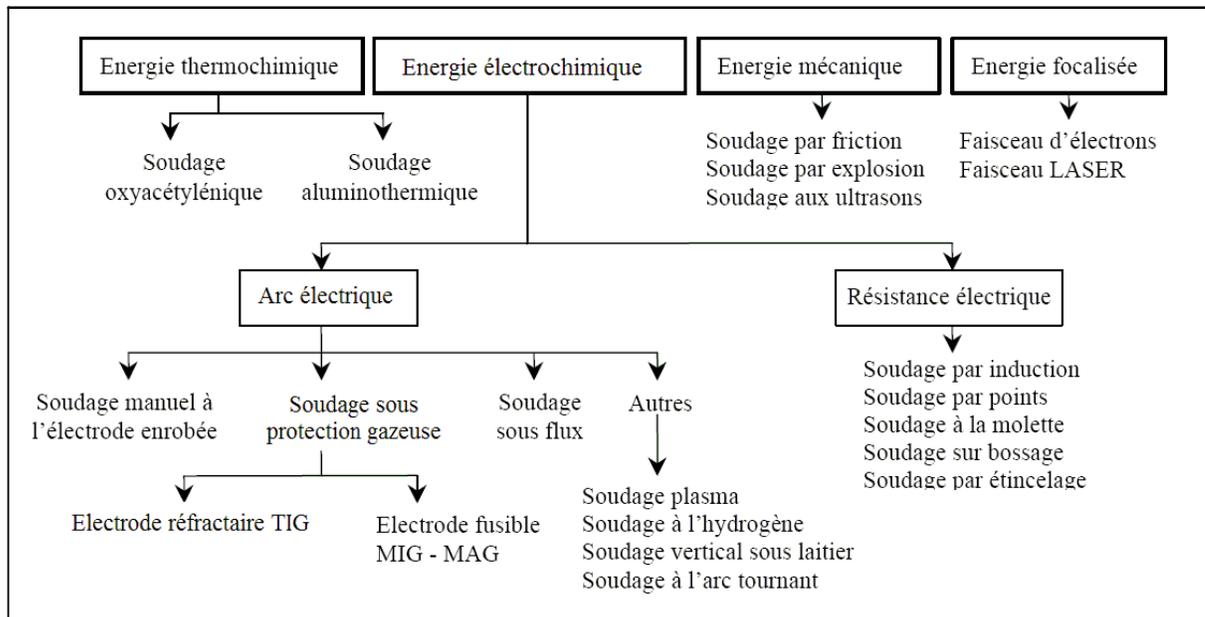
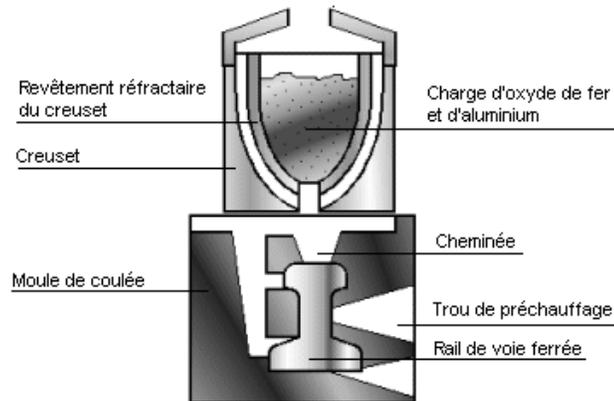
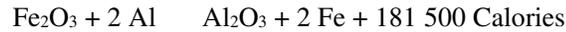


Figure 47 : Classification des procédés de soudage

### 4.1. Soudage aluminothermique

Le soudage aluminothermique est un procédé de soudage par réaction chimique exothermique (2100 à 2400°C) dans un creuset et par coulée de métal en fusion. La chaleur nécessaire à la fusion des bouts de

pièces à souder est obtenue par la réduction de l'oxyde de fer par l'aluminium suivant la réaction chimique suivante :



**Figure 48 : Soudage aluminothermique des rails**

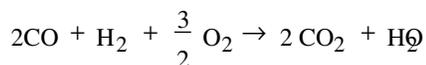
La réaction chimique se produit lorsque le mélange est porté à une température de 1300°C. La fusion est réalisée dans un creuset à partir d'une charge d'oxydes métalliques et ferriques et d'une fine poudre d'aluminium. L'acier liquide fait fondre les bouts des pièces à souder et après refroidissement forme une soudure homogène. Il est nécessaire de préchauffer les bouts des pièces à souder pour éviter un refroidissement trop rapide du métal fondu lors de la sortie du creuset. La durée de la réaction dure entre 30 et 90 secondes.

Le procédé peut présenter un intérêt pour le soudage sur place de grosses pièces de fonderie en acier. On l'utilise essentiellement pour la soudure des rails de chemin de fer, ou pour le raboutage de câbles en cuivre.

#### 4.2. Soudage oxyacétylénique

Le soudage oxyacétylénique est un procédé à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible d'acétylène  $\text{C}_2\text{H}_2$  avec un gaz comburant d'oxygène  $\text{O}_2$ . La température de la flamme peut atteindre les 3200°C lorsque le mélange  $\text{C}_2\text{H}_2$  et  $\text{O}_2$  est correctement équilibré dans le chalumeau. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de  $\varnothing 0,8$  mm à  $\varnothing 4,0$  mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure.

Les réactions chimiques correspondantes sont :



Le monoxyde de carbone et l'hydrogène sont des gaz réducteurs qui protègent le métal en fusion.

Le procédé nécessite d'opérer en une seule passe d'où des épaisseurs de soudage maximales relativement

faibles (<8mm pour les métaux lourds). Ce procédé reste intéressant pour le soudage de tôles fines.

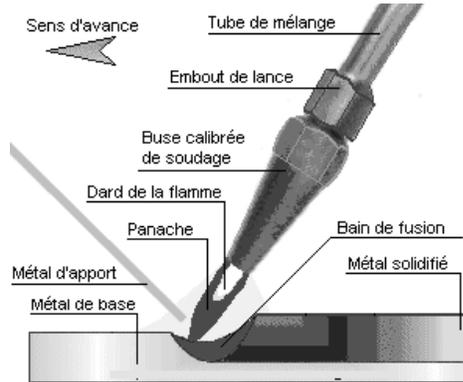


Figure 49 : Soudage oxyacétylénique

### 4.3. Soudage avec électrode enrobée

Un courant électrique fait jaillir sous une tension donnée un arc électrique entre l'âme de l'électrode enrobée et le métal des bords à assembler. La chaleur dégagée par l'arc électrique fait fondre simultanément le métal de base des bords à assembler, l'âme et l'enrobage de l'électrode.

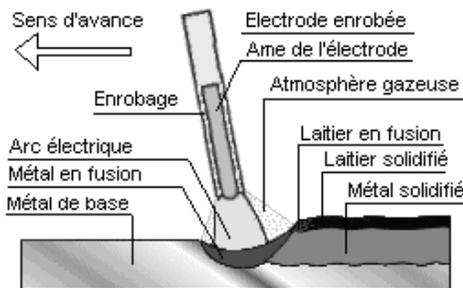


Figure 50 : Soudage avec électrode enrobée



Figure 51 : Electrode enrobée

Les électrodes enrobées sont constituées par un fil rond métallique appelé 'âme enrobé' d'un revêtement concentrique appelé 'enrobage' (fig. 51). Le rôle de l'âme est, d'une part, de conduire le courant de soudage jusqu'à l'arc, d'autre part, de constituer après fusion une partie du métal d'apport formant la soudure ; une autre partie provenant éventuellement de l'enrobage. L'enrobage est un mélange complexe (rutile, carbonate de chaux, oxydes de fer et manganèse, cellulose, etc.) dont les composants sont choisis en fonction des métaux à souder, des conditions opératoires et des caractéristiques des assemblages à réaliser.

Ce procédé présente l'avantage de pouvoir être utilisable aussi facilement en atelier que sur chantier, et ce dans toutes les positions. Tous les métaux sont soudables avec ce procédé en prenant les précautions nécessaires ainsi que l'électrode adaptée. On peut quand même remarquer que ce procédé est relativement

peu employé pour le soudage de l'aluminium du fait de l'emploi très délicat des électrodes enrobées adaptées à ce métal.

#### 4.4. Soudage semi automatique sous protection gazeuse

Un courant électrique fait jaillir sous une tension donnée un arc électrique entre le fil-électrode et le métal des bords à assembler. La protection de l'arc et du bain de fusion est assurée par un gaz inerte ou non (Argon pur, Argon + Hélium, Argon + CO<sub>2</sub> (< 3%), Argon + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>) qui donnent leur nom aux procédés :

- M.I.G. (Metal Inert Gas) : utilisé pour le soudage de nombreux alliages ferreux et non ferreux.
- M.A.G. (Metal Active Gas) : utilisé uniquement pour le soudage des aciers non ou faiblement alliés.

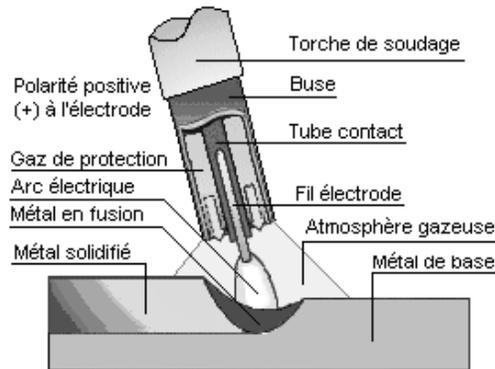


Figure 52 : Soudage semi automatique sous protection gazeuse

Le métal d'apport est du fil nus, dont la composition est voisine de celle du métal de base. Pour le soudage de l'aluminium, on utilise des alliages d'aluminium à pureté au moins égale à celle du métal de base. Le diamètre du fil va de 0,5 à 1,6 mm pour le soudage des aciers et de 2 à 2,4 mm pour le soudage des aluminiums. Le fil doit être déroulé à vitesse constante, paramètre le plus important lié à l'intensité du courant. On peut également utiliser des fils fourrés, l'action du CO<sub>2</sub> offre l'avantage d'un flux solide tout en réduisant les inconvénients liés à la protection gazeuse.

#### 4.5. Soudage sous gaz inerte avec électrode en Tungstène (T.I.G.)

La chaleur est produite par un arc électrique jaillissant entre électrode en tungstène, qui ne fond pas aux températures de soudage (3500°C), et les pièces à souder. L'arc et le bain de fusion sont protégés par une atmosphère inerte (argon ou argon + hélium). Le métal d'apport est indépendant de la torche de soudage, c'est soit une baguette tenue par l'opérateur ou un fil à avance automatique.

Le métal d'apport est d'une grande pureté et de composition chimique proche de celle du métal de base des pièces. Les générateurs de courants sont les mêmes que ceux utilisés pour le soudage avec électrodes enrobées. On utilise le courant alternatif pour le soudage des alliages d'aluminium, et du courant continu pour le soudage des aciers inox avec le pôle négatif sur l'électrode.

En raison de la limitation des énergies mises en jeu, il s'applique tout particulièrement aux faibles épaisseurs ( $e \leq 5\text{mm}$ ) il est utilisé pour le soudage multipasses sur pièces épaisses ou pour passe de fond.

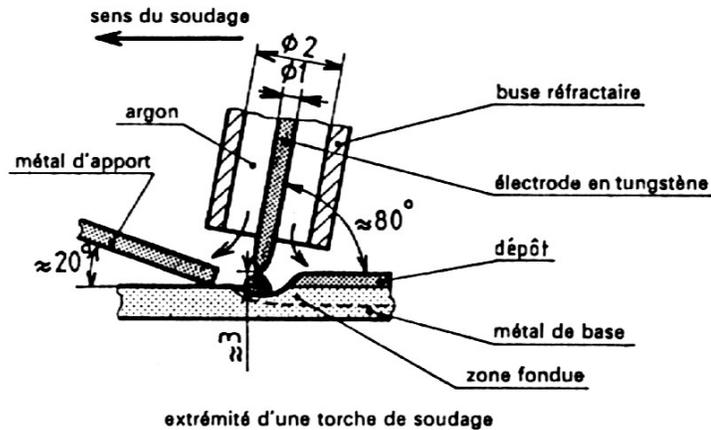


Figure 53 : Soudage TIG

#### 4.6. Soudage électrique par résistance

Les pièces à souder sont serrées entre électrodes. Le courant électrique de forte intensité passe à travers les tôles à souder ce qui fait fondre la zone de contact par un dégagement de chaleur  $Q$  :

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [\text{J}] \quad \text{où} \quad R = R_{e1} + R_{e2} + R_{m1} + R_{m2} + R_{c1} + R_{c2} + R_c$$

avec

- $R_e$  : Résistance ohmique des électrodes
- $R_m$  : Résistance ohmique des pièces
- $R_{ci}$  : Résistance de contact pièce électrode
- $R_c$  : Résistance de contact pièces

$$\text{avec } R \approx R_c \quad \text{et} \quad R_c \approx R_{c1} + R_{c2}$$

La résistance dépend de la résistivité et de la géométrie du conducteur. Plus la pression augmente, plus la résistance de contact diminue. Avec l'élévation de la température, et sous l'effet de la pression, la surface de contact augmente, ce qui entraîne une diminution de la résistance électrique de contact. C'est entre les deux pièces à souder que la résistance de contact est maximale d'où la chaleur de fusion.

Parmi tous les procédés de soudage par résistance, on relève les procédés de soudage par points (fig. 54) et à la molette (fig. 55).

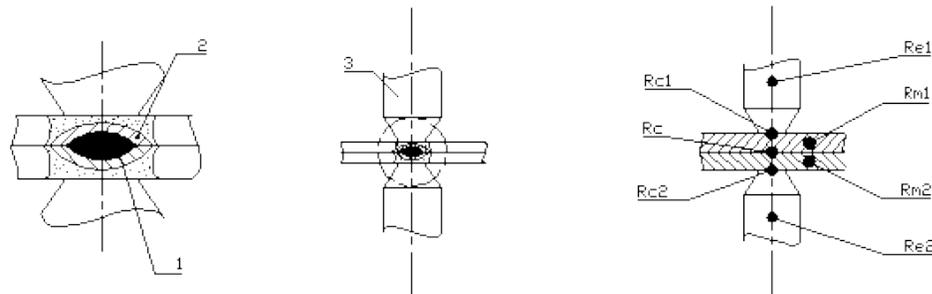


Figure 54 : Soudage par points

(1. Zone fondue, 2. Zone affectée thermiquement, 3. Electrode)

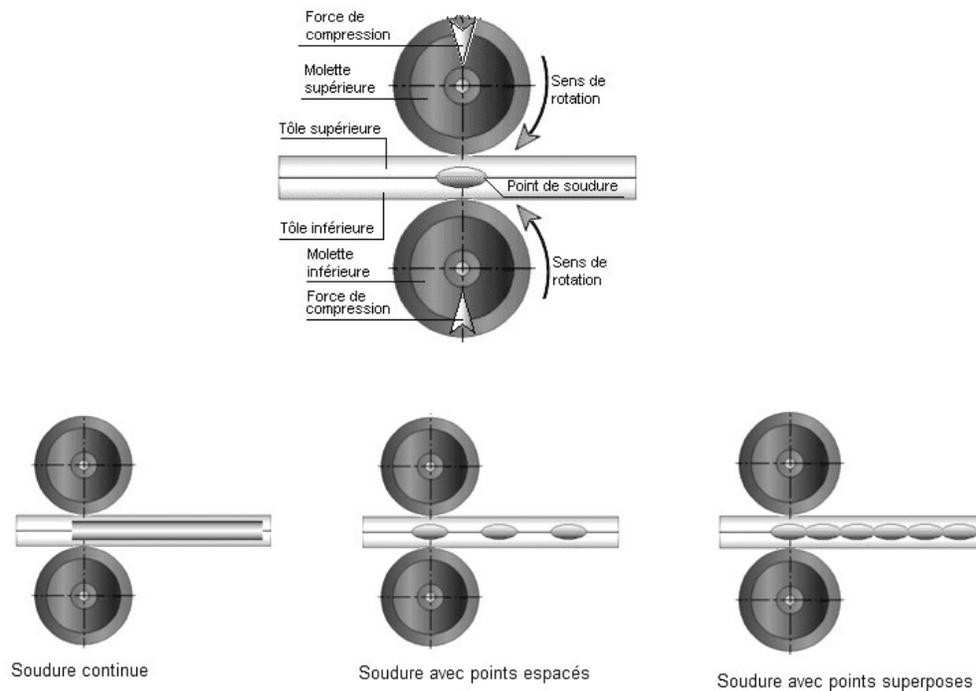


Figure 55 : Soudage à la molette

#### 4.7. Soudage par friction

Le soudage par friction est un procédé de soudage mécanique où la chaleur nécessaire pour le soudage est fournie en frottant ou en mettant en rotation l'une contre l'autre les pièces à assembler sous une pression axiale.

Le principe du soudage par friction est présenté dans sa forme la plus simple à la figure 56. Supposons que deux axes ou tubes doivent être soudés bout à bout, on immobilise alors une partie tandis que l'autre est mise en rotation à une vitesse constante. Quand les deux parties serrées l'une contre l'autre entrent en contact, les forces de friction provoquent un couple de résistance. L'énergie mécanique créée est transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température en un temps relativement court jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). Ensuite, la partie en rotation est détachée du moteur, freinée jusqu'à l'arrêt. Une force de forgeage axiale est alors exercée afin de réaliser une soudure entre les deux parties. Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de matière plastique est poussée vers l'extérieur, sous

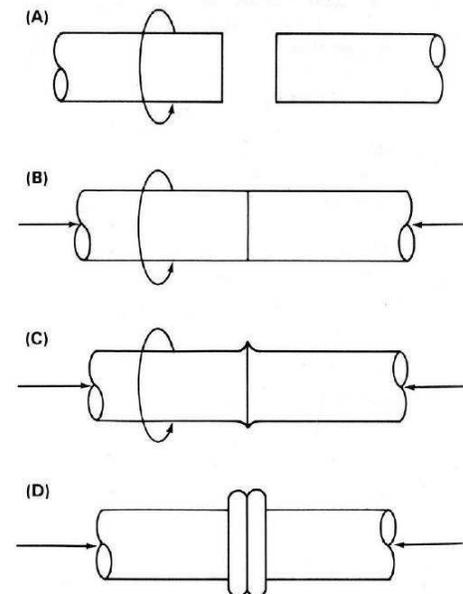


Figure 56 : Principe du soudage par friction

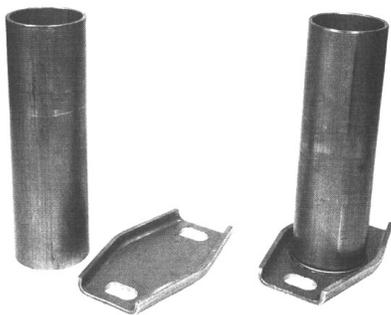
l'influence de la force de pression axiale, de telle sorte que le bourrelet de soudage caractéristique du soudage par friction est formé.

Les avantages du soudage par friction sont :

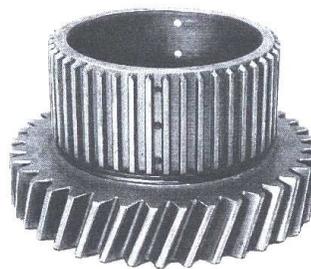
- Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique comme le matériau n'est pas porté à fusion.
- Le procédé de soudage est beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
- Peu de déformations après soudage en raison des temps de soudage courts et des faibles températures maximales.
- Economique : le soudage par friction permet de réaliser d'intéressantes économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau).
- Des matériaux dissemblables peuvent être assemblés, comme l'aluminium ou le cuivre à de l'acier.
- Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.
- Soucieux de l'environnement : pas de gaz de protection, pas de fumées de soudage ou rayonnement.

Le procédé de soudage par friction peut être utilisé pour de nombreuses applications. Il est utilisé, par exemple, pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des soupapes, des tiges de piston, des pompes à eau, roues dentées, etc.

De plus, le soudage par friction permet d'assembler des matériaux ne pouvant être assemblés avec des procédés conventionnels, comme l'aluminium à l'acier ou le titane au cuivre. Cette possibilité permet de faire des économies par une conception judicieuse de telles pièces : des pièces en un matériau très onéreux peuvent être remplacés par des pièces soudées où les matériaux onéreux ne sont utilisés que localement où c'est nécessaire. Exemple : conception d'une soupape d'un moteur à combustion (figure 59). Les bases en matériau réfractaire sont soudées à la tige de soupape fabriquée en un matériau résistant à l'usure.



**Figure 57 : Partie d'un amortisseur: tube soudé à une pièce compressée**



**Figure 58 : Soudage des roues dentées d'une boîte de vitesse**



**Figure 59 : Soudage de la tige de soupape à la base**

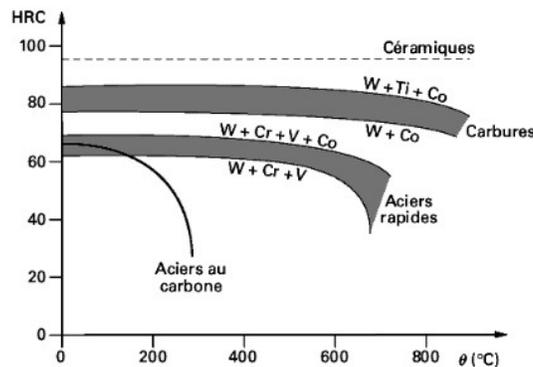
## 5. L'usinage - Mise en forme par enlèvement de matière -

### 5.1. Définition :

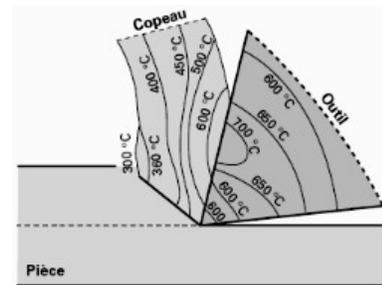
On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans une fourchette de tolérance donnée.

### 5.2. Matériaux pour outils de coupe

Les contraintes auxquelles sont soumis les outils de coupe ont une double origine : contraintes mécaniques (effort de coupe) et contraintes thermiques (dilatation, évolution des caractéristiques intrinsèques, chocs ou fatigue thermique). La figure 60 montre l'influence de la température sur la dureté de l'outil. On emploie donc, pour l'arête de coupe des outils des machines-outils, les matériaux principaux suivants classés par ordre de dureté croissante : aciers rapides, carbures, céramiques et diamants.



(a) diagramme de Saint-Clair : Influence de la température sur la dureté des matériaux



(b) Exemple de répartition des températures en cours d'usinage dans un acier

**Figure 60 : Influence de la température**

**a. Les aciers rapides :** Ce sont des aciers à fort pourcentage de carbone (0.9 à 1.5) qui contiennent des métaux comme : le tungstène, le chrome, le vanadium, etc., dont le but est d'améliorer la dureté et la résistance à l'usure.

**b. Les carbures métalliques :** Ils possèdent une haute résistance à l'usure et conservent leur dureté jusqu'à 900°C environ. Ils possèdent une grande dureté qui permet l'usinage d'acier dont la dureté dépasse 45 HRC. Ils permettent de travailler avec des vitesses de coupe quatre à six fois supérieures à celles des aciers rapides. Ils se présentent sous forme de plaquettes brasées ou fixées mécaniquement sur un corps d'outil en acier.

**c. Les céramiques de coupe :** Les céramiques se présentent sous forme de plaquettes frittées. Ils sont à base d'alumine pure ou mélangée avec d'autres oxydes (zircone  $ZrO_2$ ), des carbures ( $SiC$ ,  $TiC$ ) ou des nitrures ( $Si_3N_4$ ). En pratique, les céramiques sont prévues pour supporter des vitesses de coupe élevées à des températures importantes. Elles résistent bien à l'usure mais mal aux chocs. Elles sont souvent utilisées sur des machines puissantes pour l'usinage des métaux ferreux. Elles ne conviennent pas pour les alliages légers et pour les alliages de titane (problèmes chimiques).

**d. Le diamant industriel :** C'est le plus dur des matériaux connus. Il se présente sous forme de grain brasé à l'extrémité d'un corps en acier. Il peut usiner tous les métaux quelle que soit leur dureté. Son prix de revient est élevé. On les utilise particulièrement pour les métaux tendres : aluminium, cuivre, magnésium, etc.

### 5.3. Fluide de coupe

On désigne par fluide de coupe un liquide (ou un gaz) qui est appliqué par arrosage sur la partie active d'un outil dans un rôle :

- réfrigérant : refroidissement de l'outil et de la pièce ;
- lubrifiant : diminution des coefficients de frottement outil-copeau et outil-pièce.

L'utilisation d'un fluide de coupe a pour conséquence :

- d'augmenter la durée de vie de l'outil ;
- de contribuer à obtenir un bon état de surface ;
- de refroidir la pièce.

On distingue deux grandes familles de fluides de coupe :

- les huiles de coupe entières (c'est à dire sans eau) ; il s'agit d'huiles minérales dans la plupart des cas et plus rarement d'huiles synthétiques ;
- les fluides aqueux (fluides de coupe à base d'eau).

### 5.4. Le tournage

#### a. Définition

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation appelé mouvement de coupe  $M_c$ , qui est le mouvement principal du procédé (fig. 61). L'outil est animé d'un mouvement de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance  $M_f$ , permettant de définir le profil de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution : cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes (fig. 62).

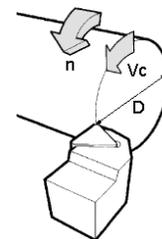
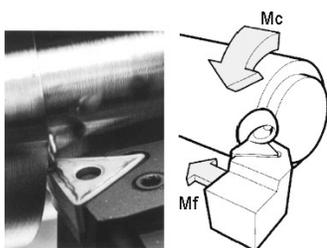


Figure 61 : Procédé de tournage

Figure 62 : Pièces réalisées en tournage

Figure 63 : Vitesse de coupe

#### b. Paramètres de coupe en tournage

Vitesse de coupe ( $V_c$  en m/mn) : Elle est choisie en fonction, notamment des matériaux de la pièce et de l'outil, de la lubrification et des valeurs des autres paramètres de coupe (avance, profondeur de passe...). Les fabricants d'outils fournissent des valeurs de vitesse de coupe pour ces différents paramètres.

Vitesse de rotation ( $n$  en tr/mn) :

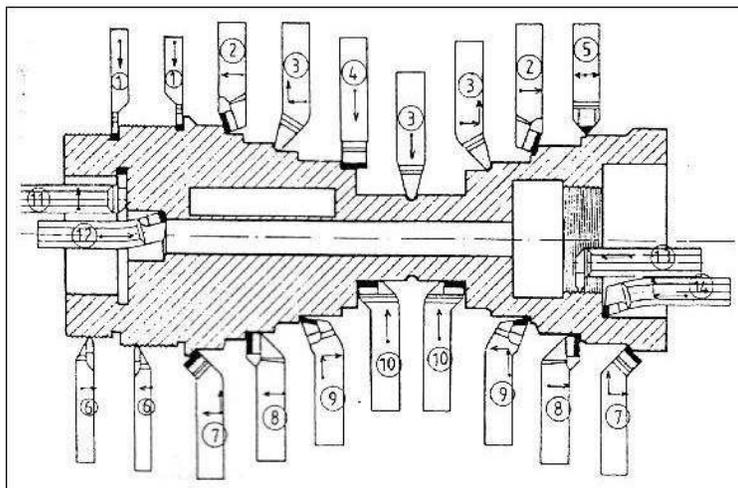
$$n_{(tr/min)} = \frac{1000 V_C(m/min)}{\pi D_{(mm)}} \quad \text{où } D \text{ est le diamètre de la pièce.}$$

Vitesse d'avance (f en mm/tr) : L'avance par tour est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent.

Profondeur de passe (a en mm) : En chariotage, la profondeur de passe est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée. Elle est mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance.

#### d. Les outils de tournage

Les outils de tournage actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe. La figure 46 montre les différentes formes de plaquettes. Une plaquette plus grande et plus épaisse coûte plus cher, mais offre en contrepartie une meilleure sécurité d'arête, ce qui est particulièrement important en ébauche lourde ou usinage intermittent.



- 1°) Outil à saigner
- 2°) Outil à charioter droit
- 3°) Outil à retoucher
- 4°) Outil pelle
- 5°) Outil à retoucher
- 6°) Outil à fileter
- 7°) Outil coudé à charioter
- 8°) Outil couteau
- 9°) Outil à dresser d'angle
- 10°) Outil à dresser les faces
- 11°) Outil à chambrer
- 12°) Outil à aléser
- 13°) Outil à fileter intérieurement
- 14°) Outil à aléser-dresser

Figure 64 : Outils de tournage



Figure 65 : Formes variées de plaquettes

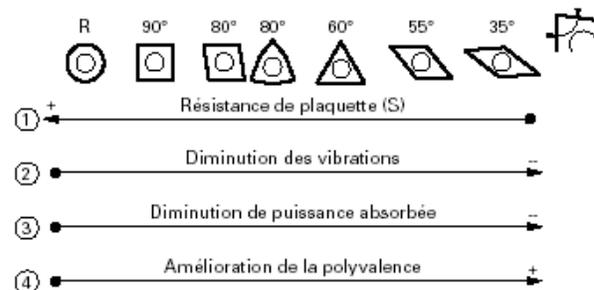


Figure 66 : Choix d'un angle de pointe en fonction de l'usinage

#### c. Les tours

Ils existent de nombreuses formes de tours :

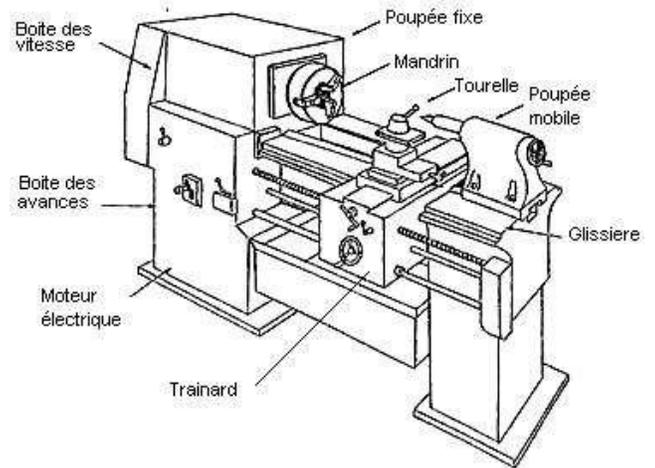
les tours parallèles à charioter et à fileter utilisés pour la fabrication de pièces en unité ou en petite et moyenne série;

les tours parallèles à banc rompu. Le banc rompu augmente la capacité des tours (pièces de grand diamètre sur faible longueur) ;

les tours semi-automatiques ou automatiques à tourelle-revolver, qui se différencient par le groupe port-outil capable de supporter, en même temps plusieurs outils différents suivant les opérations successives demandées pour l'usinage ; ils sont bien adaptés aux fabrications de petites, moyennes ou grandes séries ;

les tours parallèles à commande numérique ; c'est-à-dire un tour parallèle complété d'une automatisation numérique de tous les mouvements. Ce tour est bien adapté à la réalisation de travaux de moyenne ou grande complexité pour des séries faibles ou moyennes ;

etc.



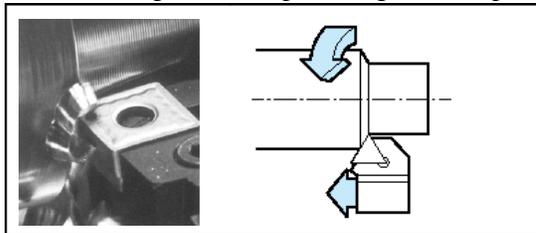
**Figure 67 : Tour parallèle**

## e. Les opérations de tournage

### Chariotage - Dressage

En chariotage, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce (fig. 68).

En dressage, le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe (fig. 69).



**Figure 68 : Opération de chariotage**



**Figure 69 : Opération de dressage**

### Centrage

Un centrage permet la mise en position et le maintien de la pièce, en montages mixte ou entre-pointes. Un centre assure aussi l'assise du foret en début de perçage dans certains cas.

Cette opération est faite à l'aide d'un foret à centrer. Le montage du foret se fait sur mandrin de perçage monté dans le fourreau de la poupée mobile (fig. 70).

### Perçage

C'est un procédé d'usinage économique et rapide qui permet l'ébauche des alésages, l'exécution des diamètres de perçage avant taraudage. L'outil de perçage est appelé foret, il est généralement hélicoïdal et l'angle d'inclinaison d'hélice et l'angle de pointe sont choisis en fonction du matériau usiné, Il peut être à

queue cylindrique ou à queue conique. Les forets à queue cylindrique se monte à l'aide d'un mandrin et ceux à queue conique se montent directement ou à l'aide de douilles intermédiaires.

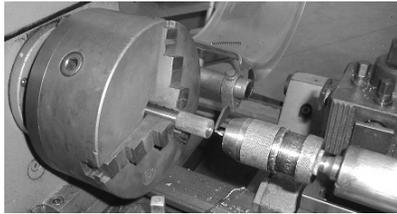
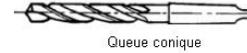
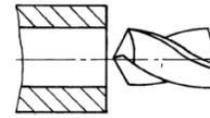


Figure 70 : Opération de centrage



Figure 71 : Foret à centrer



Queue conique



Queue cylindrique

Figure 72 : perçage

### L'alésage

L'alésage ou tournage intérieur est exécuté avec un outil coudé à tranchant unique (outil à aléser) ou un outil à tranchant multiple (alésoir).

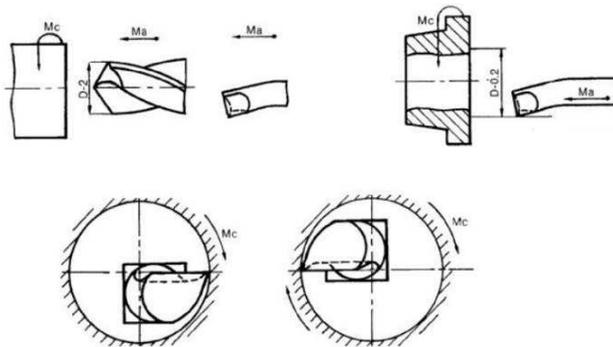


Figure 73 : Alésage à l'outil à tranchant unique

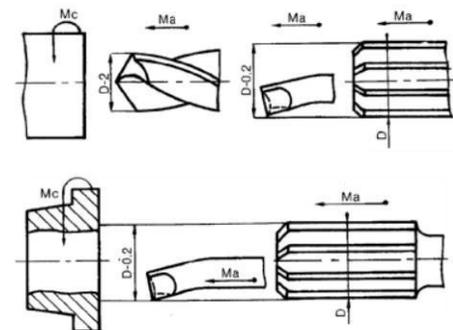


Figure 74 : Alésoir machine

### Le tronçonnage

Le tronçonnage consiste à sectionner une barre ou à détacher la pièce du reste de la barre. Le saignage consiste à usiner des gorges ou saignées sur la surface de la pièce.

### Le filetage

C'est une opération d'usinage qui consiste à creuser une ou plusieurs rainures hélicoïdales profilées sur une surface cylindrique extérieure ou intérieure. L'hélice est obtenue par la combinaison de deux mouvements : un mouvement de rotation  $M_c$  de la pièce est un mouvement de translation  $M_a$  de l'outil.

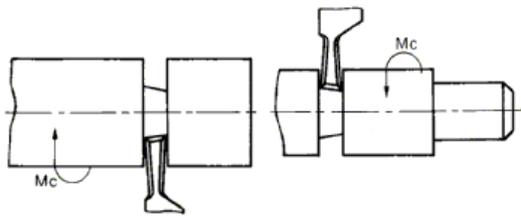


Figure 75 : Tronçonnage

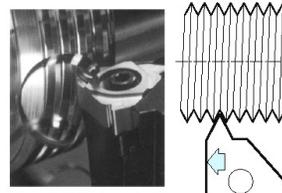


Figure 76 : filetage

## 5.5. Le fraisage

### a. Définition :

Le fraisage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (Mc) et l'avance rectiligne d'une pièce (Ma) (fig. 77). Aujourd'hui, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des rainures, contournage, etc. (figure 78).

L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux.

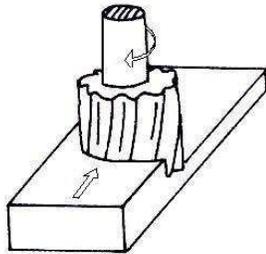


Figure 77 : Procédé de fraisage

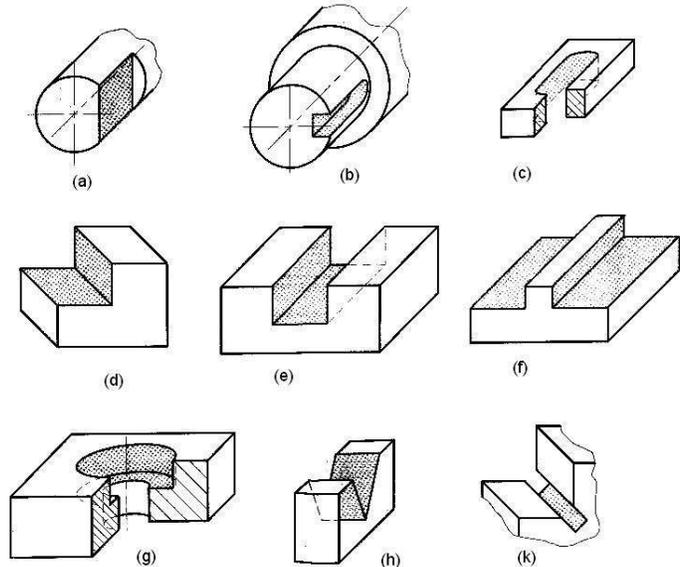


Figure 78 : Surfaces obtenues par fraisage

### b. Les fraises

Les fraises sont fabriquées :

- monoblocs en acier rapide (ARS) ; l'acier rapide étant coûteux, les fraises de grandes dimensions sont constituées d'un corps en acier de construction mécanique et de dents rapportées en acier rapide ;
- à dents ou à lames amovibles en ARS ou en carbure.



Figure 79 : Fraises en acier rapide



Figure 80 : Fraises en carbure

### c. Les paramètres de coupe en fraisage

La vitesse de coupe ( $V_c$  en m/min) : Elle indique la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné.

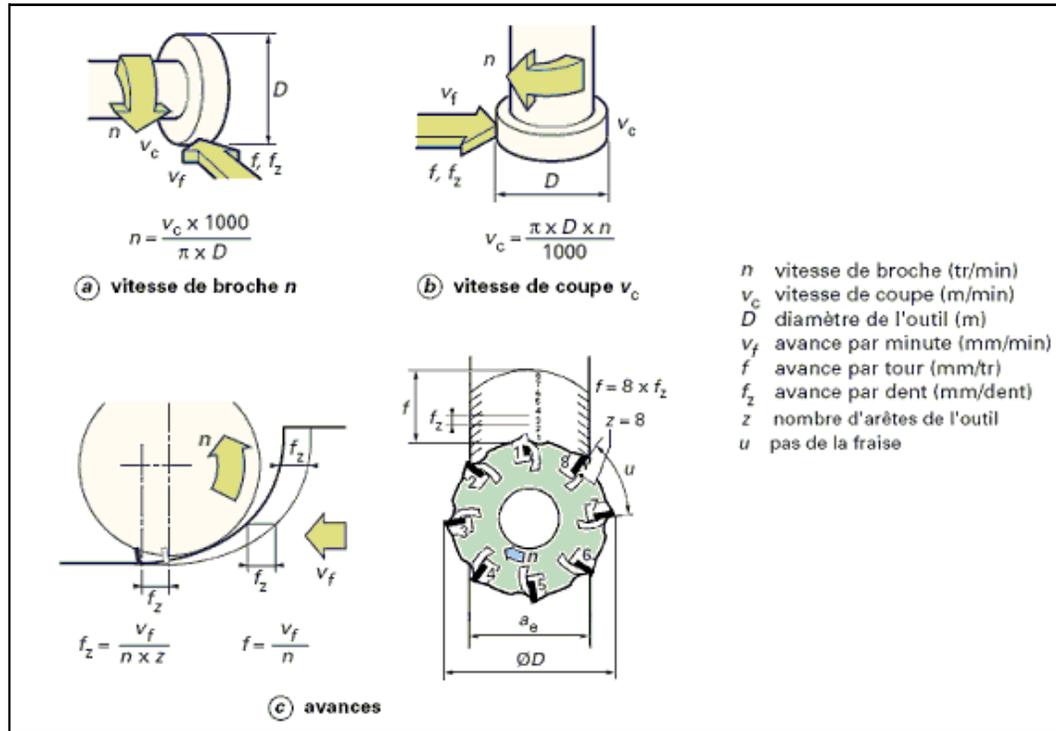


Figure 81 : Conditions de coupe

La vitesse de broche ( $n$  en tr/min) : Elle indique le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil effectue par minute. La vitesse de broche  $n$ , le diamètre de l'outil  $D$  et la vitesse de coupe  $V_c$  sont liés par les formules suivantes :

$$n_{(tr/min)} = \frac{1000 V_{C(m/min)}}{\pi D_{(mm)}}$$

L'avance par minute ou vitesse d'avance ( $V_f$  en mm/min) : C'est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. On parle également ici d'avance de table.

L'avance par tour ( $f$  en mm/tr) : Elle indique de combien l'outil avance au cours d'une rotation.

L'avance par dent ( $f_z$  en mm/dent) : L'avance par dent représente la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce.

La profondeur de coupe : C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce.

### d. Les fraiseuses :

Une fraiseuse est une machine-outil à enlèvement de copeaux à commande manuelle ou à commande numérique (CN) munie d'une broche tournante pouvant recevoir une fraise, outil à arêtes multiples, ainsi que d'autres outils tels que forets, barres d'alésage, tarauds permettant ainsi l'exécution d'usinages très variés.

Un centre d'usinage est également une machine à broche tournante, capable d'usinages similaires, mais dont le fonctionnement est automatisé grâce à une commande numérique (CN) et à un changeur automatique d'outils.

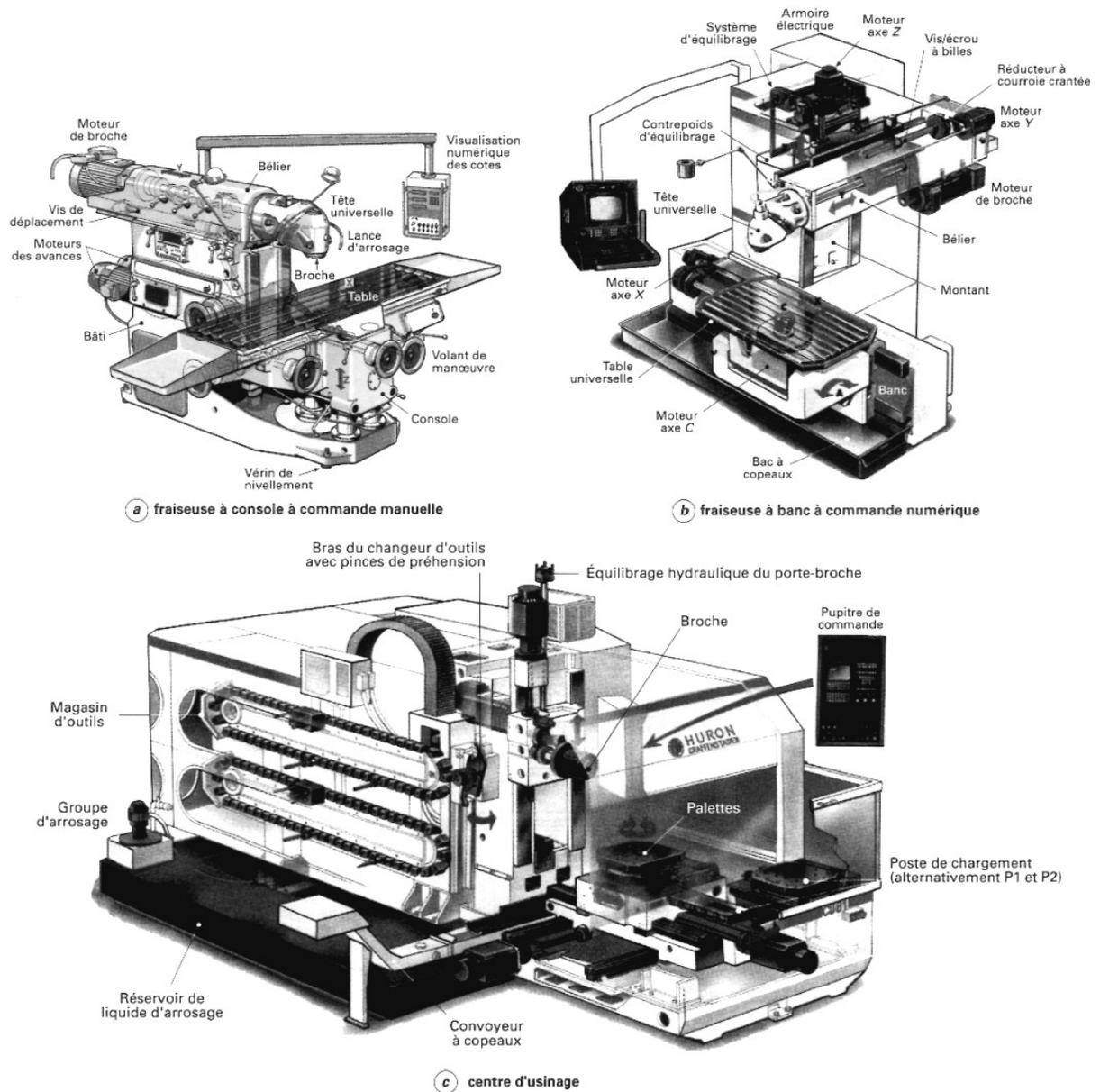


Figure 82 : Fraiseuses et centres d'usinage : exemples (doc. Huron Graffenstaden)

### e. Génération des surfaces planes

#### Fraisage en roulant (fig. 83)

Dans le fraisage en roulant, l'axe de la fraise est parallèle à la surface à usiner. La forme du copeau enlevé par une dent est semblable à une virgule. L'épaisseur du copeau n'est pas constante. On obtient théoriquement une surface ondulée où la profondeur de l'ondulation dépend du diamètre de la fraise et de l'avance par dent. Ce fraisage n'est pas recommandé pour l'obtention d'une surface de finition soignée, mais il se peut qu'il soit imposé par d'autres considérations technologiques.

#### Fraisage en bout (fig. 84)

Le fraisage en bout est parfois appelé fraisage de face. Dans ce procédé, l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface fraisée. L'aspect de la surface usinée est caractérisé par une série de lignes sécantes (cycloïdes) correspondant aux traces laissées par les dents de la fraise sur la pièce.

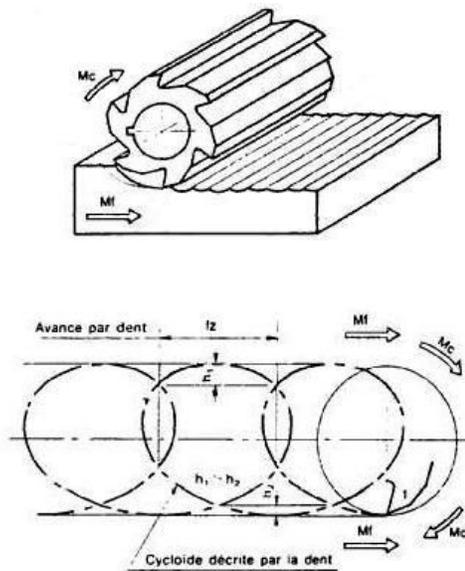


Figure 83 : Fraisage en roulant

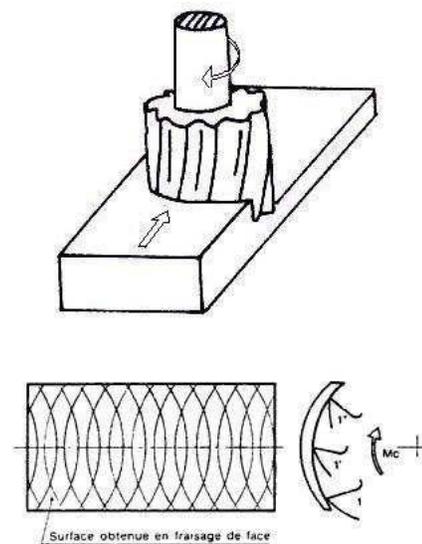


Figure 84 : Fraisage en bout

### f. Usinages associés

En fraisage, on réalise souvent plusieurs surfaces simultanément et l'on associe les fraisages en bout et en roulant :

Fraisage des épaulements droits à l'aide d'une fraise 2 tailles (figure 85a)

Fraisage d'une rainure : Le rainurage peut se faire à l'aide d'une fraise à 2 lèvres (figure 85b) ou à l'aide d'une fraise 3 tailles (figure 85c).

Fraisage d'une queue d'aronde (figure 85d)

Fraisage d'une T (figure 85e)

Fraisage d'un angle (figure 85f)

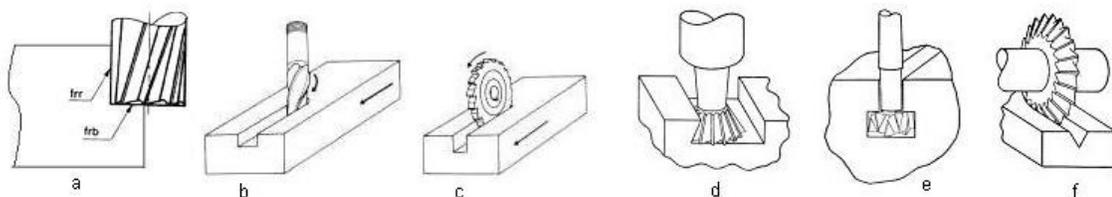


Figure 85 : usinage des surfaces associées

### g. L'alésage :

Lorsque le trou a été percé avec assez de précision, on peut calibrer au diamètre voulu avec un alésoir, ce qui est une opération rapide mais qui nécessite l'outil exactement approprié au diamètre ; cette méthode n'est en général employée que jusqu'à 20, voire 30 mm de diamètre. Sinon on utilise un grain d'alésage (fig. 86) réglable assurant une très bonne précision du trou en position mais qui nécessite plusieurs passages, donc plusieurs porte-outils : 1 ou 2 à partir d'un trou percé, 2 ou 3 pour un trou brut de fonderie. Il existe des têtes à aléser (fig. 87) portant un seul outil réglable en diamètre soit manuellement, soit par la CN ; dans ce dernier cas, on peut réaliser des opérations de surfacage et d'alésage à différents diamètres ayant éventuellement un profil non rectiligne.

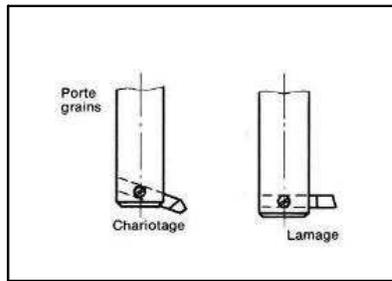


Figure 86 : grain d'alésage

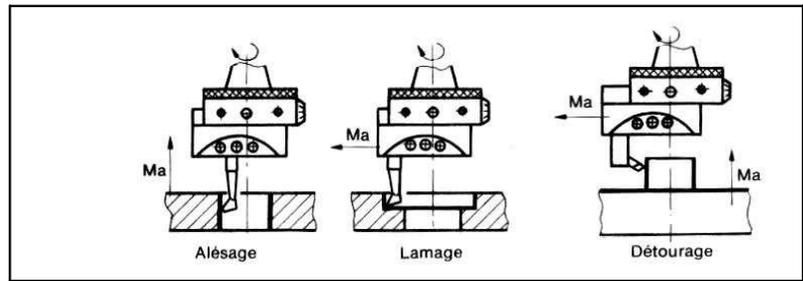


Figure 87 : Tête à aléser

## 5.6. Le brochage

### a. Principe

Le brochage est un procédé qui usine, en un temps très court, des surfaces intérieures ou extérieures par un mouvement de coupe rectiligne à l'aide d'un outil à dents multiples appelé broche (fig. 88). Les surfaces intérieures peuvent être à directrices rectilignes ou hélicoïdales. Le procédé ne s'applique qu'aux surfaces débouchantes. Le coût des broches étant très élevé, ce procédé ne s'applique économiquement qu'aux moyennes et grandes séries. Pour les profils courants (rainures de clavetage), le brochage de petites séries peut être rentable. Le procédé permet de réaliser facilement des profils considérés comme inusinables par les procédés classiques.

Les broches sont montées sur des machines à brocher ou brocheuse. Elles sont poussées ou tirées. Les broches longues travaillent en traction. Les broches extérieures sont souvent portées sur un ensemble porte-broche coulisseau. Le passage d'une seule broche est généralement suffisant pour usiner la surface ou le profil souhaité.

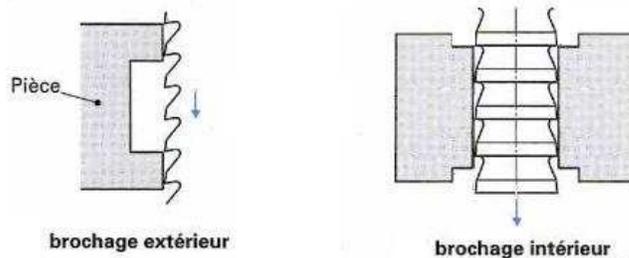


Figure 88 : procédé de brochage

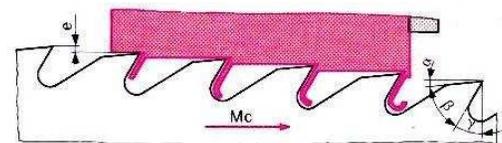


Figure 89 : Dents de l'outil broche

### b. Outil broche

Chaque dent, décalée de la précédente d'une quantité égale à l'épaisseur du copeau, participe à l'usinage (fig. 89). L'ensemble des dents forme la denture qui est partagée en denture d'ébauche, denture de demi-finition et denture de finition. Les dents de la denture d'ébauche assurent la forme du profil broché ; les dents de la denture de semi-finition amènent le profil près de la cote désirée ; les dents de la denture de finition assurent le calibrage. En général, les trois ou quatre dernières dents (denture de finition) sont rigoureusement aux mêmes cotes afin de constituer des dents de réserve et pouvoir ainsi usiner un plus grand nombre de pièces après affûtages.

### c. Les opérations de brochage

On distingue deux opérations de brochages : le brochage intérieur (fig. 93) et le brochage extérieur (fig. 92). Le cas le plus fréquent est le brochage de surfaces intérieures à directrices rectilignes (alésage, rainure de clavetage, moyen cannelé, emmanchement carré, hexagonal, etc.). La section maximale de la broche

correspond à celle de l'ajoure à réaliser.

Le brochage hélicoïdal nécessite un mouvement de rotation. Il est le plus souvent appliqué à la pièce usinée (douilles à cannelures hélicoïdales, canons de fusil, etc.).

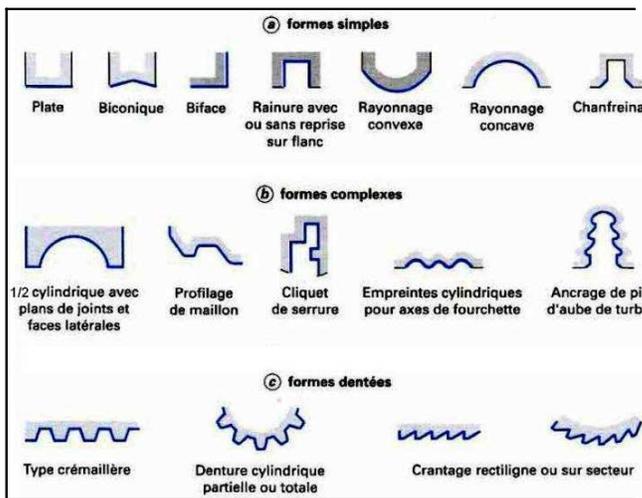


Figure 90 : formes obtenues par le brochage extérieures

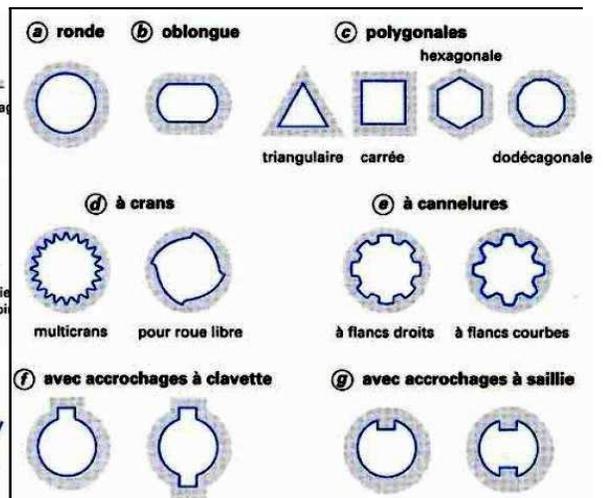


Figure 91 : formes obtenues par le brochage intérieures

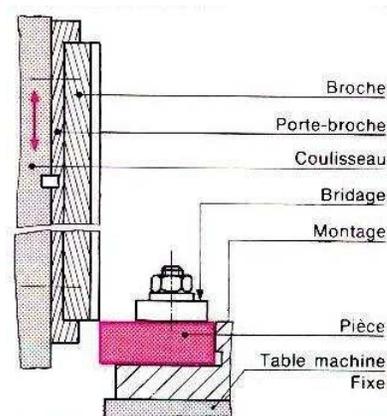


Figure 92 : Brochage extérieur

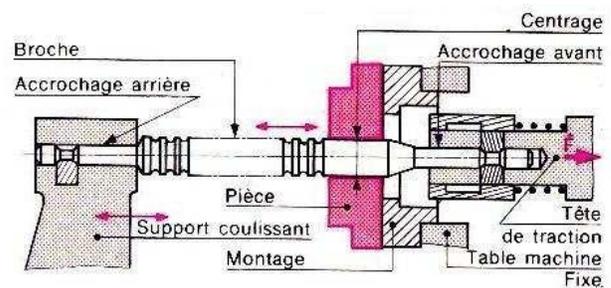


Figure 93 : Brochage intérieur

## 5.7. Le perçage

Le perçage est une opération d'usinage importante. Elle permet de réaliser des trous cylindriques débouchants ou borgnes. La réalisation de trous coniques est moins courante. Ces trous servent soit pour la fixation par vis (trou fileté), écrous, rivets, soit pour l'accès.

En perçage, l'outil assure simultanément le mouvement de coupe (rotation sur lui-même) et le mouvement d'avance (mouvement axial le long de son axe de rotation).

Les outils de perçage sont des forets, des trépan ou des embouts. Les forets sont des outils monoblocs en acier rapide avec, parfois, une plaquette brasée en carbure. Les trépan et les embouts sont des outils à éléments rapportés (grains, embouts spéciaux). Le sens de rotation est généralement à droite.

Le foret hélicoïdal comprend :

un corps de diamètre  $d$  (h8), comprenant deux listels de guidage et deux goujures hélicoïdales décroissantes ;

une pointe d'angle au sommet variable suivant les matières usinées (ex.  $118^\circ$  pour les aciers) ;

une queue cylindrique ou conique morse.

Les dimensions sont normalisées. Le pas de l'hélice est normal, long (pour les copeaux fragmentés) ou court (copeaux continus). Les angles de pointe et d'hélice dépendent du matériau usiné.

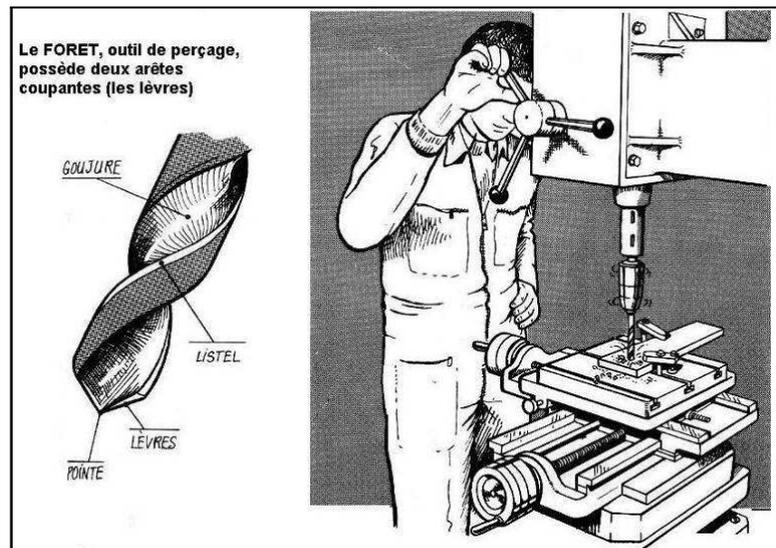


Figure 94 : Perçage

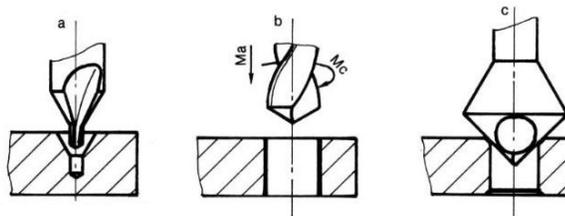


Figure 95 : Perçage d'un trou débouchant

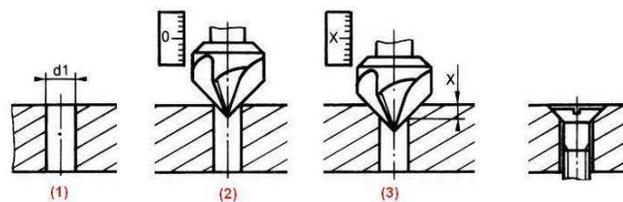


Figure 96 : Fraisage avec fraise conique sans pilote

## 5.8. La rectification

### a. Définition

La rectification est un usinage sur machines-outils qui consiste à enlever la matière avec un outil abrasif appelé meule coupant à très grande vitesse (de 20 à 60 m/s). La rectification s'effectue normalement sur des pièces qui doivent avoir un haut degré de finition de surface ( $0,025 \mu\text{m} < Ra < 2\mu\text{m}$ ) et dont les dimensions et la forme exigent une grande précision ( $< 0,01 \text{ mm}$ ).

En général, cette opération est réalisée sur des pièces préalablement usinées (tournées ou fraisées) et parfois traitées (trempées, etc.). Elle s'applique aux arbres, pivots, cales étalons, outils, roulements à billes, roulements à rouleaux, soupapes, arbres à cames, axes de pistons, engrenages, etc.

Les opérations les plus courantes de rectification sont :

- la rectification cylindrique extérieure (cylindriques extérieurs, cône extérieurs, surfaces de révolution profilées, épaulement) ;
- la rectification cylindrique intérieure (alésage cylindrique, alésage conique) ;
- la rectification cylindrique sans centre;
- la rectification plane ;
- l'affûtage des outils de coupe ;
- la rectification de forme : filetage, engrenage, etc.

### b. les meules

Une meule est un solide de révolution constitué d'un grand nombre de grains abrasifs agglomérés par un liant (fig. 97). La forme des meules est adaptée à chaque opération particulière d'usinage. Les meules se définissent par :

- leurs formes générales : plates, cylindriques, biconiques, boisseau droit et conique, assiette, etc. ;
- leurs formes de profil d'extrémité : droit, biseauté, arrondi, etc. ;
- leurs dimensions : le diamètre extérieur, la largeur, le diamètre de l'alésage, épaisseur, etc. ;
- les abrasifs et liant constituant la meule.

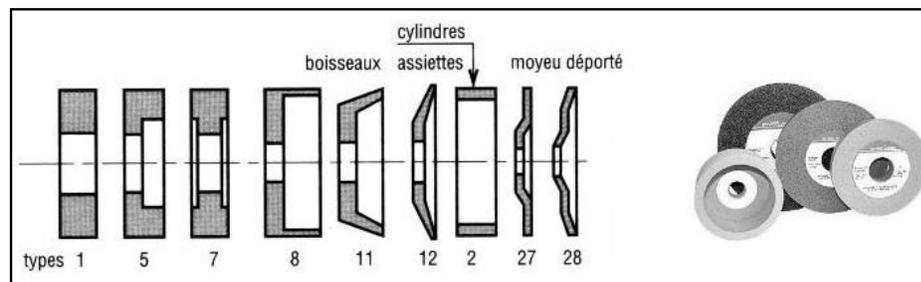


Figure 97 : Forme des meules

### c. Rectification cylindrique extérieure

La rectification cylindrique extérieure est une opération utilisée pour des fabrications unitaires, de petites ou moyennes séries ; elle s'effectue sur une rectifieuse de révolution extérieure. Cette opération a un certain nombre de similitudes avec l'opération de tournage.

Les mouvements fondamentaux sont :

- le mouvement de coupe est produit par la meule et la pièce qui tournent dans le même sens sur leurs axes de telle sorte que les vitesses périphériques s'additionnent ;

le mouvement d'avance est, en général, donné à la pièce à rectifier ; il est parallèle au mouvement de rotation;

le mouvement de pénétration est donné à la meule.

La pièce est en général montée entre pointes fixes pour éviter d'éventuelles erreurs dans leurs rotations. La pièce est entraînée par un système de toc et entraîne-toc en minimisant l'effort transversal (entraînement sur un grand diamètre).

Les rectifieuses de surfaces de révolution extérieures permettent également de rectifier des surfaces cylindriques coniques, les faces perpendiculaires à l'axe de rotation, etc.

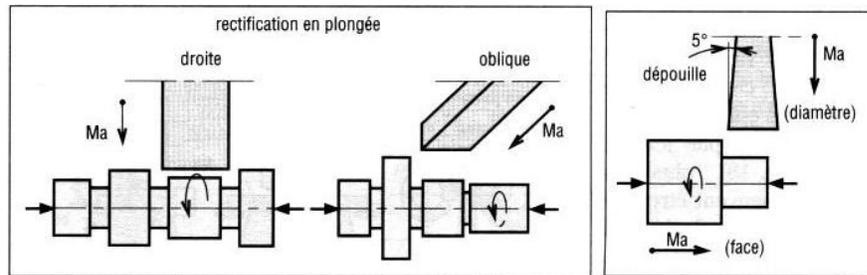


Figure 98 : Rectification cylindrique extérieure

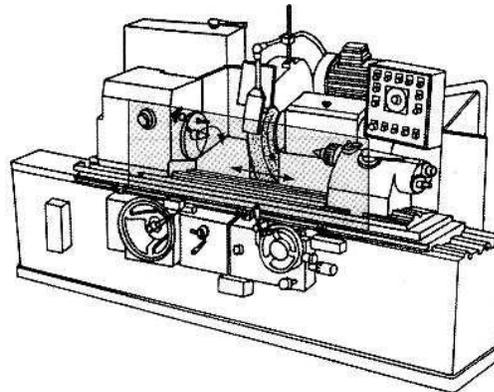


Figure 99 : Rectification cylindrique

#### d. Rectification cylindrique intérieure

La rectification cylindrique intérieure est une opération utilisée pour des fabrications unitaire, de petites ou moyennes séries ; elle s'effectue sur une rectifieuse de révolution intérieure. Ces machines ont la même architecture que les rectifieuses de révolution extérieures à la différence du chariot porte-meule qui est situé face à la broche porte-pièce sur la table porte-pièce. Les meules employées sont en général plus petites et sont fixées avec un porte-à-faux plus grand, puisqu'elles sont destinées à travailler à l'intérieur des pièces creuses. La pièce est montée sur un mandrin universel. Le diamètre de la meule vaut environ 70% du diamètre de l'alésage.

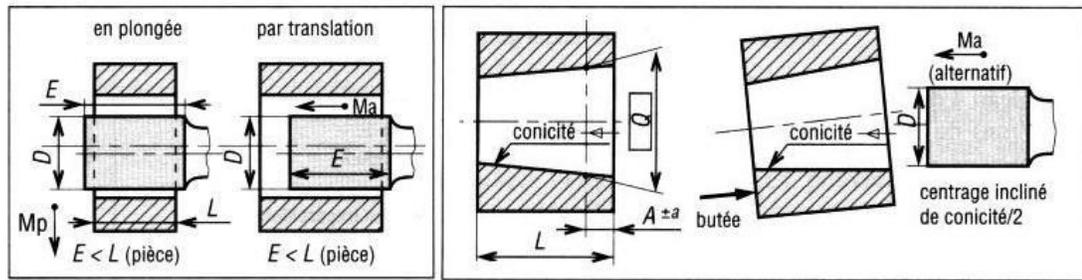


Figure 100 : Rectification cylindrique intérieure

### e. Rectification plane

La rectification plane permet d'obtenir des surfaces planes de grande qualité géométrique (planéité, état de surface).

En rectification plane :

le mouvement de coupe est produit par la rotation de la meule autour de son axe ;

le mouvement d'avance se compose de deux mouvements :

- un mouvement rectiligne longitudinal, en général, donné à la pièce à rectifier ;
- un mouvement rectiligne transversal intermittent donné à la meule ou à la pièce à rectifier ; il survient à chaque fin de course du mouvement longitudinal ;

le mouvement de pénétration est, en général, donné à la meule. Il est rectiligne et intermittent et détermine la profondeur de passe.

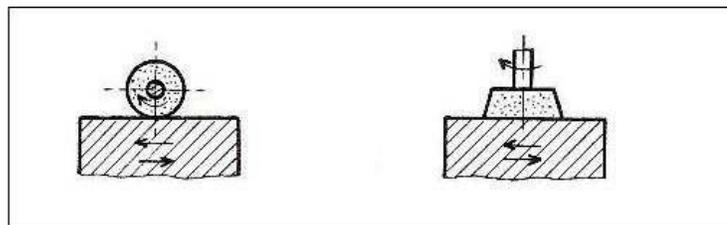


Figure 101 : Rectification plane

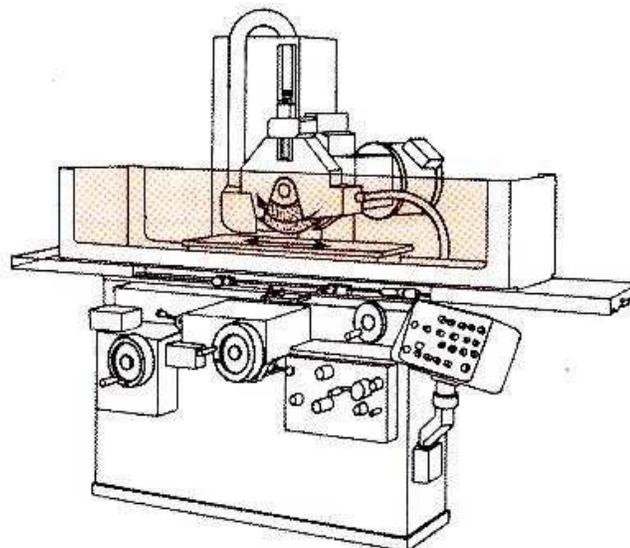


Figure 102 : Rectification plane

## 5.9. Le rodage

Le rodage améliore l'état de surface des pièces rectifiées. Il s'applique surtout aux alésages. L'outil de rodage, appelé rodoir, est animé d'un mouvement de rotation beaucoup plus lente qu'en rectification et d'un mouvement rectiligne alternatif parallèle à la surface à roder. La pression de rodage est de 1 à 5 bars.

Ce procédé s'applique aux pistons, chemises, maîtres-cylindres, cylindre de vérins, etc. Parfois le rodoir est remplacé par la pièce avec laquelle la pièce à roder va entrer en service. On rode les deux pièces ensemble (Roues d'engrenage).

Il s'opère avec une lubrification abondante d'huile minérale et de pétrole mélangés ou employés seuls. Le rodage mutuel de surfaces (soupapes et sièges, robinet à boisseau) s'opère en intercalant une pâte abrasive entre les deux surfaces.

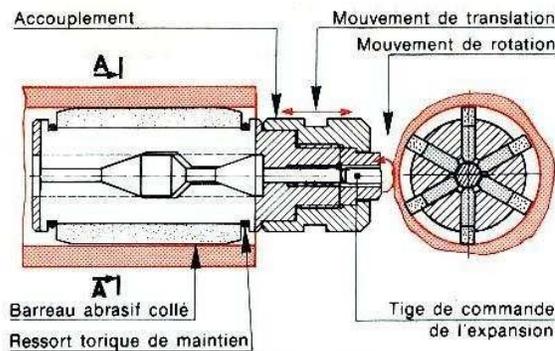


Figure 103 : Rodage d'alésage

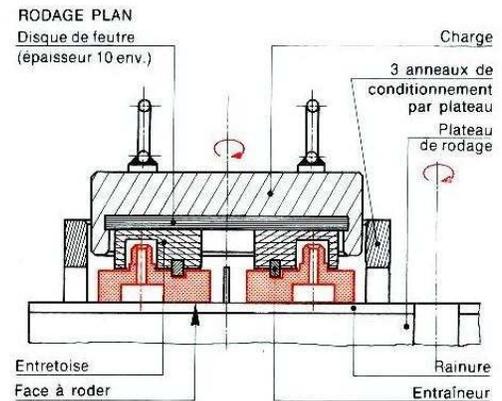


Figure 104 : Rodage plan

Tableau 3 : Possibilités de rodage

État de surface	$0.025 < Ra < 0.8$
Précision	0.001 à 0.005
Circularité	0.001 à 0.01
Planéité	0.0005 à 0.04

Tableau 4 : Principaux abrasifs

Carbure de silicium	Pratiquement universel
Corindon	Aciers, aciers chromés durs
Diamant	Aciers inoxydables, aciers à outils, carbures, céramiques

Tableau 5 : choix de la taille d'abrasifs

Ebauche	$Ra \leq 0.8$	60-80-120-180
Finition	$Ra < 0.4$	220-320-400
Superfinition	$Ra < 0.1$	500-600-1200

Tableau 6 : Conditions de coupe

Matériaux	Vitesse de rotation m/mn	Vitesse de translation m/mn
Aciers	35	15
Aciers à outils	45	8
Fontes grises	45	18
Carbures	40	12

## 5.10. Usinage par électroérosion

L'usinage par électroérosion est une technique procédant par enlèvement de la matière grâce à une succession de décharges électriques, avec outil de forme ou outil d'enveloppe. La pièce est reliée à l'anode et l'outil à la cathode (fig. 105). Le générateur à impulsion fournit des décharges électriques de température 3000 à 5000°C qui provoquent l'érosion de l'empreinte à réaliser sur la pièce. La durée et la tension des décharges sont fonction du matériau de la pièce et de la précision demandée.

Ce procédé permet l'usinage de matériaux trempés et durs impossibles à usiner avec les procédés par enlèvement de copeaux : matrices d'outillages de presse, moules métalliques, profilages d'outils de forme en carbure, etc.

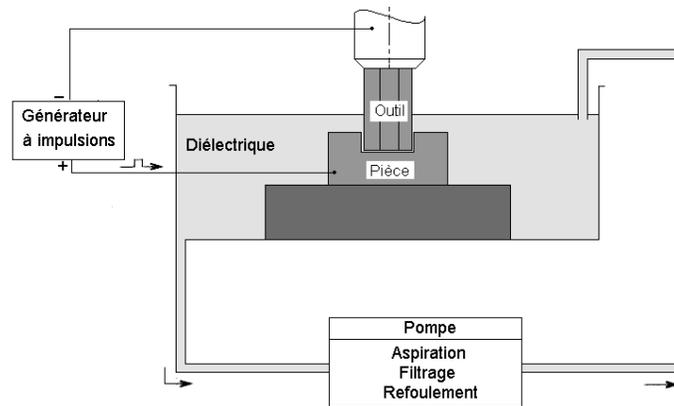


Figure 105 : Principe de l'électroérosion

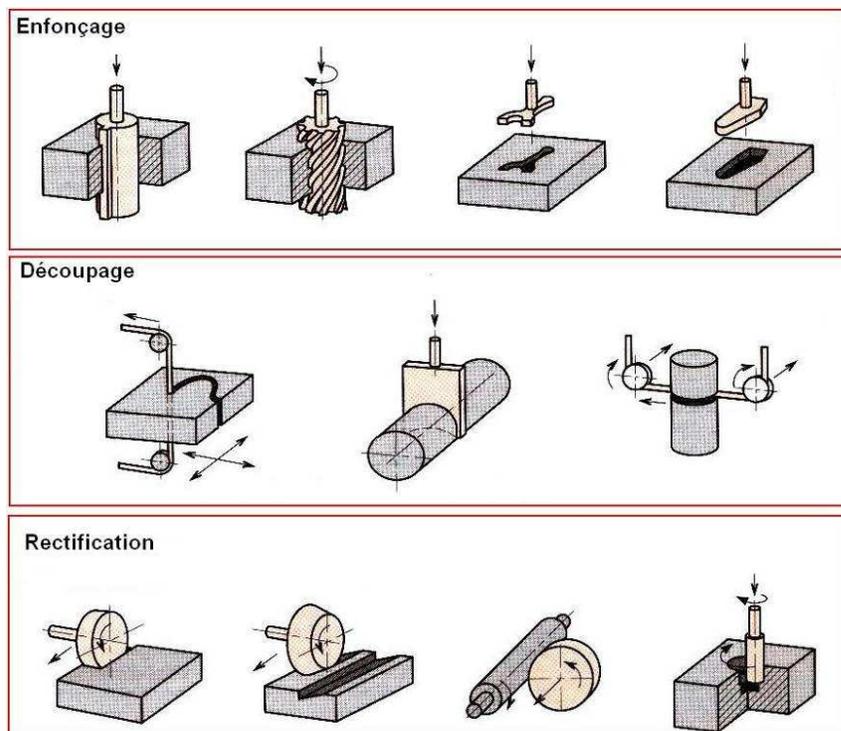


Figure 106 : Usinage par électroérosion

## 6. Gamme de fabrication

Une gamme de fabrication est un document ou ensemble de documents qui détaille les différentes phases de la production, le matériel et les machines à affecter, et les objectifs de production (coûts, volumes, qualité, délais...). Il s'agit de noter étape par étape l'évolution de la fabrication d'une pièce.

### 6.1. Mise en position des pièces en cour de fabrication

#### a. Notion de degré de liberté (ddl)

Tout mouvement instantané d'un solide libre de l'espace peut s'exprimer par la somme vectorielle d'une rotation  $R$  et d'une translation  $T$  dont les composantes dans un repère fixe  $Oxyz$  sont  $R_x, R_y, R_z$  et  $T_x, T_y, T_z$ .

La connaissance de ces six paramètres est nécessaire pour décrire le mouvement du solide : il possède alors six degrés de liberté (figure 107).

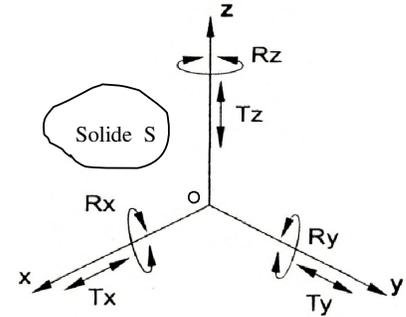


Figure 107 : Solide dans l'espace

#### b. Elimination des degrés de liberté

Éliminer un degré de liberté du solide revient à éliminer une possibilité de mouvement par l'intermédiaire d'un contact ponctuel et sans frottement avec un solide fixe du repère  $Oxyz$ .

Le contact peut être aussi caractérisé par la normale aux deux solides au point de contact considéré. Le nombre et la disposition des normales dépendent de la forme de la surface géométrique du solide sur laquelle s'effectuent les contacts.

#### c. Symbolisation de l'élimination des degrés de liberté

##### Symbole de base :

Le contact normal est représenté par un symbole de base (fig. 108-a) placé sur la surface référentielle choisie ou sur une ligne d'attache du côté libre de matière (fig. 108-b). Si nécessaire le symbole peut être projeté sous forme d'une surface quadrillée délimitée par un cercle.

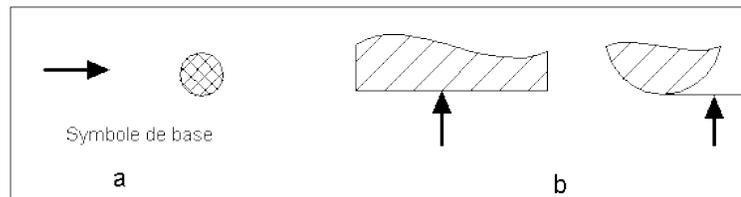


Figure 108 : Symbole de base

##### Symboles technologiques (fig. 109) :

Les symboles de base peuvent être complétés par certains éléments précisant :

- la fonction de l'élément technologique,
- la nature du contact avec la surface,
- la nature de la surface de contact de la pièce (brute ou usinée),
- le type de technologie de l'élément.

Type de technologie	
Appui fixe	
Centrage fixe	
Système à serrage	
Système à serrage concentrique	
Système à réglage irréversible	
Système de soutien irréversible	
Centrage réversible	

Nature de la surface de la pièce	
Surface usinée (1 trait)	
Surface brute (2 traits)	

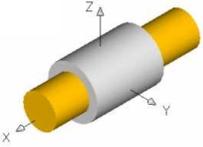
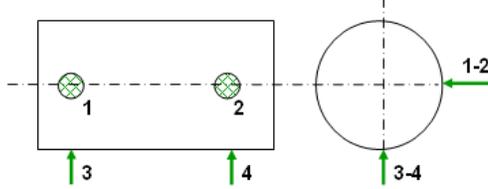
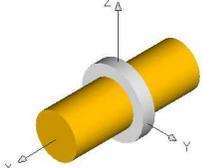
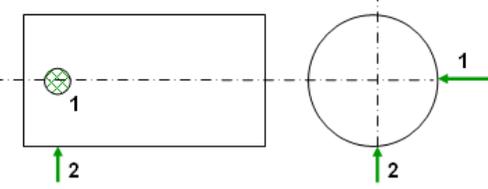
  

Nature du contact avec la pièce				
Contact ponctuel	Touche plate	Contact strié	Pointe fixe	Pointe tournante
Touche déagée	Cuvette	Vé	Palonnier	Orienteur

Figure 109 : Symboles technologiques

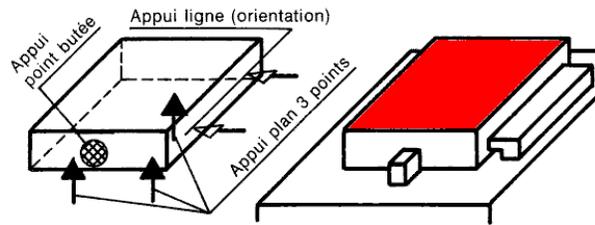
d. Mise en position des pièces

Type d'appui	ddl éliminés	Schématisation
<p><b>Appui simple</b></p>	Tz	
<p><b>Appui linéaire</b></p>	Ty, Rz	
<p><b>Appui plan</b></p>	Tz, Rx, Ry	

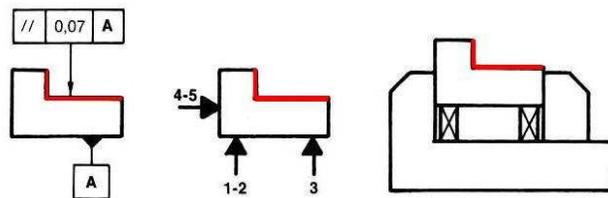
<p><b>Centrage long</b> La surface du contact est un cylindre long</p> 		
<p><b>Centrage court :</b> La surface du contact est un cylindre très court</p> 		

**e. Exemples d'application :**

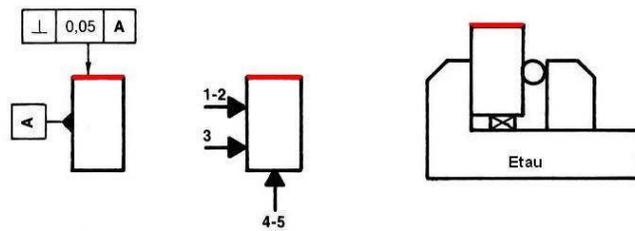
Pièces prismatiques :



**Figure 110 : Pièce fixée directement sur table de fraiseuse**



**Figure 111 : Spécification géométrique de parallélisme**



**Figure 112 : Spécification géométrique de perpendicularité**

Pièces de révolution :

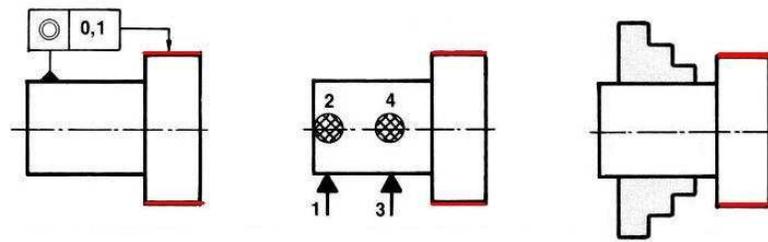


Figure 113 : Montage en l'air - mors montés à l'endroit

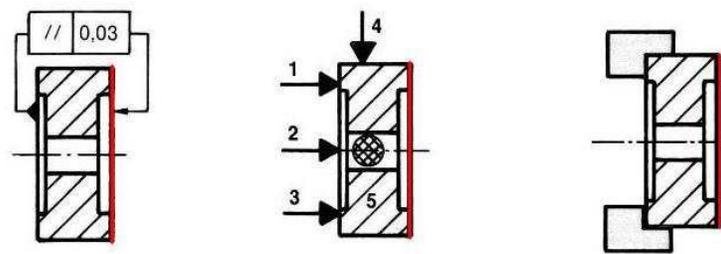


Figure 114 : Montage en l'air – mors montés à l'envers

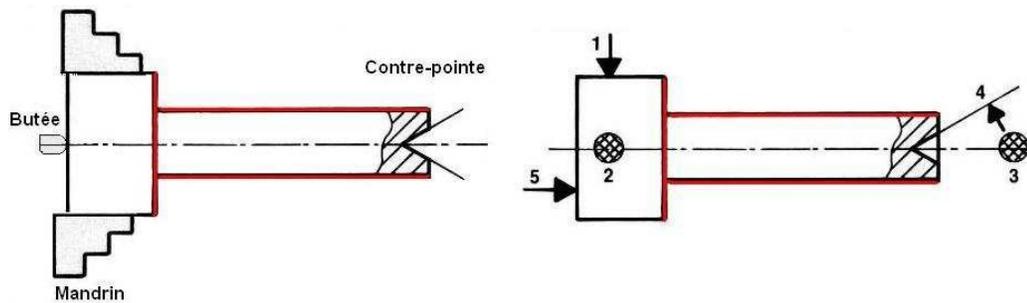


Figure 115 : Montage mixte

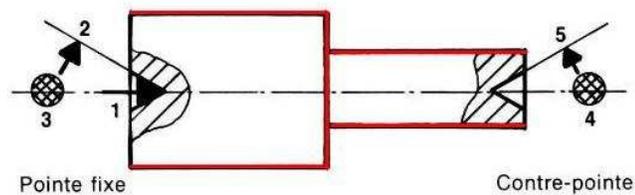


Figure 116 : Montage entre pointes

## 6.2. Contrat de phase

### a. Définition du contrat de phase

Le contrat de phase est le document de référence de l'opérateur. Il décrit l'ensemble des opérations, éventuellement groupées en sous-phases, réalisées sur un même poste de travail.

Réalisé à partir de l'avant-projet de fabrication, il permet à l'opérateur de :

- Déterminer la cotation de fabrication,
- De mettre en place les montages d'usinage,
- De réaliser les réglages de la machine,
- De préparer le poste de contrôle.

### b. Eléments du contrat de phase

- Le numéro de la phase
- La désignation de la phase
- Les références de la pièce : ensemble, pièce, matière
- Le croquis de la pièce à usiner,
- Symbolisation technologique de la mise en position,
- Cotation de fabrication
- Repérage des surfaces
- Le référentiel de mise en position
- Les opérations d'usinage
- Les conditions de coupe
- Les différents temps (temps de coupe)

## c. Exemple du contrat de phase - Tournage

CONTRAT DE PHASE		Phase N° 10			
Désignation : Tournage	Ensemble :	Pièce :			
Machine : Tour parallèle	Matière : C40	Qté : 100			
Opérations	Outillages	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	a mm
1 Mise en position : Centrage long : 1-2-3-4 Appui simple : 5	Mandrin à trois mors à serrage concentrique. Butée.				
2 Chariotage de F2 Cf1 = $\varnothing 30 \pm 0.1$ Cf4 = $60 \pm 0.2$	Outil carbure à plaquette triangulaire Pied à coulisse Jauge de profondeur	100	1061	0.12	1
3 Dressage de F1 Cf2 = $40 \pm 0.2$	Outil carbure à plaquette carrée Jauge de profondeur	100	2122	0.12	1
4 Chanfreinage Cf3 = $1 \text{ à } 45^\circ$	Outil carbure à plaquette carrée	100	1061		

## d. Exemple du contrat de phase - Fraisage

CONTRAT DE PHASE		Phase N° 10					
Désignation : Fraisage	Ensemble : Etau de table	Pièce : Mors mobile					
Machine : Fraiseuse universelle	Matière : S275	Qté : 1					
	Opérations	Outillages	Vc m/min	n tr/min	f mm/dt/tr	Vf mm/min	a mm
1	Mise en position : Appui : 1-2-3 Appui linéaire : 4-5 Appui simple : 6	Etau + Butée					
2	Surfaçage en finition de F3 Cf3=60±0.1	Fraise 2 tailles $\varnothing 30$ Z8 Pied à coulisse	20	200	0.05	80	1

## Bibliographie

- [1] M. Bonte, R. Cognet, R. Bourgois, « Memotech - Productique - Matériaux et usinage ». Editions Casteilla.
- [2] Les techniques de l'ingénieur.
- [3] « Précis de construction mécanique ». Editions AFNOR - Nathan.  
Tome 2 : Projets - méthodes, production et normalisation.
- [4] « Précis de fonderie. Méthodologie, production et normalisation ». Editions AFNOR - Nathan.
- [5] P. Plassard, G. Defour, G. Poble, « Technologie des métiers – Ajustage ». Edition Hachette Technique.
- [6] L.Rimbaud, G. Layes, J. Moulin, « Technologie des métiers – Fraisage ». Edition Hachette Technique.
- [7] D. Landre, Y. Anfreville, « Découverte des procédés de fabrication mécanique ». Edition Foucher.
- [8] A. Chevelier, J. Bohan, « Guide du technicien en fabrications mécaniques » Edition Hachette Technique.
- [9] E. Filippi, « Cour de technologie des fabrications mécaniques ». Faculté Polytechnique de Mons - Belgique

---

Pour toutes remarques, critiques et suggestions sur ce cours,  
Veuillez m'envoyer un courriel à l'adresse :  
**elmaskaoui@gmail.ma**