



Support de Cours

Matière : Technologie de Base

Pour les étudiants de 2^{ème} année EFST

Spécialités :

Métallurgie

Mécanique

Génie Civil et Hydraulique

Travaux Publiques

Réalisé par :

M.Bouras

Année universitaire 2023/2024

Technologie de base	Université MBY Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie	
--------------------------------	---	---

Programme pédagogique décrits dans ce cours

Chapitre 1 : Matériaux

- Métaux et alliages et leurs désignations
- Matières organiques (plastiques ou polymères);
- matériaux minéraux (céramiques et verres)
- Matériaux composites;
- Autres matériaux : Naturels et Nanomatériaux

Chapitre 2 : Procédés d'obtention des pièces sans enlèvement de matière

(Fabrication par formage : Fusion, déformation plastique, Mélangeage)

- Moulage, forgeage, estampage, laminage, tréfilage, extrusion.... Etc
- Découpage, pliage et emboutissage, etc...
- Frittage et métallurgie des poudres;
- Profilés et Tuyaux (en acier, en aluminium);

Chapitre 3 : Procédés d'obtention des pièces par enlèvement de matière

(Fabrication par Usinage)

- Tournage;
- Fraisage;
- Perçage;
- Rabotage, rectification, et Ajustage.

Chapitre 4 : Techniques d'assemblage

- Degrés d'assemblage
- Types d'assemblages
- Exemples d'assemblage :

Soudage Boulonnage; Rivetage.

Introduction

L'homme a depuis toujours cherché à transformer la matière qui l'entoure pour acquérir différents objets (produits) utiles de la vie quotidienne. Mais, il est toujours nécessaire, dans toute conception de produit industriel, de choisir le matériau dans lequel l'objet sera réalisé et le procédé utilisé pour sa réalisation. Ce choix est à la fois crucial et difficile. Crucial car de lui dépend la performance de la conception et sa viabilité économique, difficile en raison à la fois de la diversité des matériaux et des procédés possibles, et de la variété des requêtes exigées par la conception.

On estime à 60 000 le nombre de matériaux disponibles et à environ 6 000 le nombre de procédés possibles. Il est impensable que le concepteur soit familier avec plus qu'une petite fraction de cette immense diversité, et la difficulté du choix des matériaux tient en partie à cet hyperchoix des matériaux. Mais, par ailleurs, la variété des requêtes et leurs caractères souvent contradictoires viennent ajouter, à la complexité liée à la multitude des possibilités, celle liée à la difficulté d'énoncer de façon objective les performances recherchées et, plus encore peut-être, celle liée à la difficulté de gérer un choix multicritère.

Étudier la relation produits-matériaux-procédés en classe de licence est une chose difficile. En effet, cette approche nécessite une grande culture technologique, de l'expérience et du recul sur les problématiques mises en jeu.

De plus, l'évolution de la science des matériaux, des technologies afférentes à la mise en forme des produits, l'avènement des nanotechnologies et plus encore le besoin impérieux de penser éco-conception rendent cette étude encore plus complexe.

C'est pourquoi ce cours " technologie de base" ne prétend pas aborder le sujet ni de manière exhaustive ni de manière détaillée ; son objectif principale est simplement de constituer une base solide sur laquelle il sera possible de construire une culture technologique forte pour la fabrication et l'utilisation des objets.

Le premier chapitre à pour objet de présenter des notions élémentaires quant aux matériaux. Dans le deuxième chapitre, des procédés d'obtention des pièces sans enlèvement de matière (mise en forme par formage) sont abordés.

Par la suite, dans le troisième chapitre, et afin de d'acquérir des connaissances très importantes en construction mécanique, les procédés d'obtention des pièces par usinage (avec enlèvement de la matière et formation des coupons) sont décrits mais d'une manière brève.

Le dernier chapitre sera réservé aux techniques d'assemblage ; qui interviennent une fois que les différents pièces mécaniques sont fabriquées pour former des objets.

Chapitre 1: Matériaux

1.1 Définition d'un matériau : Selon le dictionnaire "Larousse", la définition d'un matériau est: Substance quelconque utilisée à la construction des objets, machines, bâtiments, etc.

Alors, le terme "matériau" désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet au sens large. Ce dernier est souvent une pièce d'un sous-ensemble. C'est donc la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction prémeditée.

Mais, Il ne faut pas confondre le matériel (matériels) qui est un objet façonné ou fabriqué par l'homme et les matériaux (matériaux) qui servent à fabriquer cet objet.

1.2 Les grandes familles de matériaux

La classification de matériaux en solides, liquides, semi-solides, etc., est primitive et parfois non valable. En effet, en rhéologie, il est possible d'observer un comportement de type liquide dans un matériau solide et un comportement de type solide dans un matériau liquide (viscoélasticité, seuil d'écoulement).

Par contre, de nombreuses propriétés physico-chimiques et propriétés d'usage des matériaux sont étroitement liées à la nature des liaisons chimiques entre les atomes qui les constituent. C'est sur cette base qu'est établie la distinction entre les principales classes de matériaux. Nous distinguons :

Les matériaux métalliques, faisant intervenir une *liaison métallique* : matériaux durs, rigides et déformables plastiquement. Ce sont des métaux ou des alliages métalliques : *fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc.* Les métaux et leurs alliages sont ordinairement bons conducteurs de la chaleur, de l'électricité, opaques à la lumière visible qu'ils réfléchissent ;

Les matériaux organiques ou polymères - *liaison covalente et liaison secondaire* : matériaux constitués de molécules formant de longues chaînes de carbone, matériaux faciles à mettre en forme, ils supportent rarement des températures supérieures à 200 °C. Ce sont des matériaux d'origine animale, végétale ou synthétique : *bois, coton, laine, papier, carton, matière plastique, caoutchouc, cuir, etc.* Ce sont presque toujours des isolants thermique et électrique ;

Les matériaux minéraux ou céramiques - *liaison ionique et liaison covalente* : matériaux inorganiques caractérisés par leur résistance mécanique et thermique (réfractaires). Ce sont des roches, des céramiques ou des verres : porcelaine, pierre naturelle, plâtre, etc. ;

Les matériaux composites. Ce sont des assemblages d'au moins deux des trois types de matériaux déjà cités, non miscibles : plastiques renforcés de fibre de verre, fibre de carbone ou de Kevlar, contreplaqué, béton, béton armé, etc.

1.2.1 Métaux et alliages

Les matériaux métalliques, comme leur nom l'indique, comportent des liaisons essentiellement métalliques, c'est-à-dire en partie assurées par des électrons délocalisés. Ces derniers sont responsables des bonnes propriétés de conductivité thermique et électrique des métaux. Les

métaux sont généralement paramagnétiques voire ferromagnétiques. Leur température de fusion et de vaporisation sont en général élevées. Les métaux sont pour la plupart ductiles et relativement tenaces et l'association de leur ténacité et de leur ductilité est un atout majeur pour leur mise en forme. Par contre, après mise en forme, on peut facilement donner aux alliages métalliques une bonne résistance mécanique par des traitements thermiques appropriés grâce à la précipitation de phases durcissantes (durcissement structural). Du fait de leur plasticité, leur tenue à la fatigue peut poser des problèmes et ils sont de plus souvent sensibles à la corrosion. Enfin, les métaux sont en général des matériaux lourds et denses ce qui est parfois un handicap.

1.2.1.1 Alliages à base de fer

Les alliages à base de fer (acières et fontes) jouent et continuent de jouer un rôle capital sur le plan technologique. Ils constituent en masse près de 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques. Plusieurs facteurs expliquent cette importance : les alliages ferreux sont bon marché et on peut les acquérir sous des formes très variées grâce à la diversité des traitements thermiques et des éléments d'addition. Ils ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique. Nous pouvons distinguer : **Les aciers** et **Les fontes**

1.2.1.1.1 Les aciers et leurs désignations

L'acier est un alliage de fer et de carbone renfermant au maximum 2 % de ce dernier élément. La fonte contient, quant à elle, de 2 à 6 % de carbone. Contrairement à cette dernière, l'acier est un métal ductile (qui peut être déformé de façon permanente sans se rompre) : il peut subir des changements de forme par compression ou extension à chaud ou à froid. Il est susceptible d'acquérir une grande dureté lorsqu'il est chauffé à une température suffisamment élevée et refroidi à une vitesse assez grande.

Un des défauts majeurs des aciers ordinaires sont l'oxydation et la corrosion par des attaques peuvent se produire par l'action de gaz ou de liquides plus réactifs. Nous distinguons :

Aciers non alliés

- **Aciers non alliés d'usage général** : ils sont désignés par la lettre *S* suivie d'un nombre à 3 chiffres indiquant la valeur minimale de *Re* (limite élastique) en MPa; Cette désignation est précédée de la lettre *G* pour les produits moulés.

Exemples :

S185 : acier non allié de construction d'usage général

Re = 185 MPa

GS280 : acier non allié de construction d'usage général Moulé

Re = 280 MPa

- **Aciers non alliés de construction mécanique** : ils sont désignés par la lettre *E* suivie d'un nombre à 3 chiffres indiquant la valeur minimale de *Re* (limite élastique) en MPa; Cette désignation est précédée de la lettre *G* pour les produits moulés.

Exemples :

E320 : acier non allié de construction mécanique

Re = 320 MPa

GE300 : acier non allié de construction mécanique Moulé

Re = 300 MPa

- **Aciers non alliés apte au traitement thermique** : ils sont désignés par la lettre *C* suivie d'un nombre égal à 100 fois le pourcentage de teneur en carbone.

Exemples :

C42 : acier non allié apte au traitement thermique

$\% C = 42/100 = 0,42\%$

C35 : acier non allié apte au traitement thermique

$\% C = 35/100 = 0,35\%$

Aciers alliés

- **Aciers faiblement alliés** : La teneur de chaque élément d'alliage est inférieure à 5 %. ils sont désigné par un Nombre égal à 100 fois le pourcentage de teneur en carbone; suivi des symboles chimiques des éléments d'alliage dans l'ordre desteneurs décroissantes; suivis de nombres séparés par un trait d'union, égaux aux pourcentages de teneur des principaux éléments d'alliage dans l'ordre décroissant, multipliées par un facteur spécifique précisé au tableau suivant pour chaque famille d'éléments chimiques:

Éléments	Facteur multiplicatif
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
N, P, S	100
B	1 000

Exemple :

13MnS 4-1 : acier faiblement allié

$$\% C = 13/100 = 0,13\%$$

$$\% Mn = 4/4 = 1\%$$

$$\% S = 1/1000 = 0,001\%$$

42CrMo4 : acier faiblement allié

$$\% C = 42/100 = 0,42\%$$

$$\% Cr = 4/4 = 1\%$$

$$\% Mo < 1 / \%$$

- **Aciers fortement alliés** : La teneur d'au moins un des éléments d'alliage est supérieure ou égale à 5 %, ils sont désignés par la lettre X; suivie d'un nombre égal à 100 fois le pourcentage de teneur en carbone; suivi des symboles chimiques des éléments d'alliage dans l'ordre des teneurs décroissantes; suivis de nombres séparés par un tiret, égaux aux pourcentages de teneur des principaux éléments d'alliage dans l'ordre décroissant (sans facteur multiplicatif).

Exemple :

X6CrMo17-1: acier fortement allié

$$\% C = 6/100 = 0,06\%$$

$$\% Cr = 17\%$$

$$\% Mo = 1\%$$

X6CrNiTi18-10 : acier fortement allié

$$\% C = 6/100 = 0,06\%$$

$$\% Cr = 18\%$$

$$\% Ni = 10\%$$

$$\% Ti < 1 / \%$$

1.2.1.1.2 Les fontes

La fonte s'obtient dans les hauts fourneaux à partir de minerai de fer et du coke(carbone). Elles sont des alliages fer-carbone de très forte teneur en carbone (> 2 %), ce qui les rend fragiles et interdit toute déformation plastique. On les utilise donc principalement en fonderie. On distingue les fontes blanches, grises, malléables et à graphite sphéroïdale en fonction de leur teneur en silicium. Les fontes blanches sont dures et fragiles mais résistent bien à l'usure. Les fontes grises, moins dures et moins fragiles, amortissent les vibrations et sont souvent utilisées pour les bâtis. Les fontes malléables sont utilisées pour la petite quincaillerie, les raccords de plomberie ... La fonte à graphite sphéroïdale possède des propriétés mécaniques (résistance, ténacité) comparables à celles des aciers et résistent mieux à l'usure que ceux-ci. C'est pour cette raison que l'on utilise les fontes à graphite sphéroïdale pour la fabrication des carters de pompes, des vannes, des vilebrequins, des engrenages

...

Désignation des fontes

Elles sont désignées par deux groupes de lettres majuscules EN-GJ suivis éventuellement de 2 autres lettres majuscules facultatives, suivies d'un tiret et d'un groupe de chiffres. Indiquant la valeur minimale de R_m et éventuellement de la valeur minimale de l'allongement à rupture A %

Les lettres EN précisant qu'il s'agit d'une nuance normalisée (norme européenne)

Les lettres G (produit moulé) et J (fonte)

➤ **Fontes grises à graphite lamellaire**

Exemple : EN-GJL 250 : fonte à graphite lamellaire $R_m = 250$ MPa

EN-GJL 350 : fonte à graphite lamellaire $R_m = 350$ MPa

Fontes grises à graphite sphéroïdal

Exemple : EN-GJS 350-22 : fonte à graphite sphéroïdal

$R_m = 350$ Mpa A % = 22%

Exemple : EN-GJS 400-18 : fonte à graphite sphéroïdal $R_m = 400$ Mp A % = 18%

Fontes malléables

Comme dans le cas des fontes GS, les propriétés s'approchent alors de celles de l'acier constituant la matrice, c'est-à-dire que la rupture est précédée par une déformation plastique importante. On parle ici de « malléabilité », ce qui est impropre mais consacré par l'usage.

Fontes malléables à « cœur noir »

Connues depuis une centaine d'années, ces fontes malléables « à cœur noir » – à cause du graphite

Exemple : EN-GJMB 350-5 : fonte à graphite sphéroïdal $R_m = 350$ MPa A % = 5%

Fontes malléables « à cœur blanc »

Un autre procédé classique pour produire des pièces déformables plastiquement à partir d'une fonte blanche consiste à la recuire en atmosphère décarburante

Exemple : EN-GJMW 300-6 : fonte à graphite sphéroïdal $R_m = 300$ MPa A % = 6%

1.2.1.2 Alliages non ferreux

Bien que ne représentant que 10 % des matériaux métalliques utilisés industriellement, les alliages non ferreux n'en restent pas moins utilisés pour certaines de leurs propriétés spécifiques : masse volumique faible, propriétés électriques, résistance à la corrosion et à l'oxydation, facilité de mise en œuvre. Ces avantages l'emportent dans certaines applications, malgré le coût de revient plus élevé de ces alliages. Nous nous limiterons aux alliages de l'aluminium, du cuivre et du zinc.

1.2.1.2.1 **Aluminium et ses alliages**

Fabriqués industriellement depuis 1886 à partir de bauxite et de cryolithe, ces métaux sont les plus utilisés justes après les fontes et les aciers. Les alliages d'aluminium présentent beaucoup d'avantages :

- Bas point de fusion (658°C),
- Ductilité élevée (A% = 40 %),
- Prix élevés (5 fois plus que l'acier),
- Se moule Facilement (sauf certains alliages),
- Peut se tremper (uniquement les alliages aluminium cuivre),
- Bonne conductivité électrique,
- Bonne conductivité thermique (5 fois celle des aciers),
- Coefficient dilatation 1,5 fois plus que les aciers,
- Résistance à la corrosion élevée (bateaux en alu),
- Bon rapport résistance poids (utilisation dans l'aéronautique),
- Faible dureté (mauvaise résistance à l'usure et à la fatigue),
- Masse volumique : ~2700 kg/m³,

Désignation des alliages d'aluminium

On distingue deux catégories d'alliages d'aluminium qui ont chacun une désignation différente : Les alliages

moulés et les alliages corroyés (forgés)

- les **alliages de moulage** : , obtenus directement par fonderie.
- les **alliages corroyés** : produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage,

➤ **Aluminium et alliages d'aluminium moulés**

La Désignation utilise un code numérique. Il peut être suivi éventuellement, si cela est justifié, par une désignation chimique des éléments et de nombre indiquant la pureté de l'aluminium ou la teneur nominale des éléments considérés.

Exemples de désignations usuelles :

[AlSi10Mg]

Alliage d'aluminium moulé contenant 10% de silicium et de magnésium

Aluminium et alliages d'aluminium corroyés

La désignation normale utilise un code numérique. Il peut éventuellement être suivi, si cela est justifié, par une désignation utilisant les symboles chimiques des éléments et de nombres indiquant la pureté de l'aluminium ou la teneur nominale des éléments considérés.

Exemple de désignations usuelles : EN AW-2017 ou EN AW-2017 [Al Cu 4 Mg Si] Alliage d'aluminium contenant 4% de cuivre, un peu de magnésium, un peu de silicium

Exemple de désignation exceptionnelle EN AW-Al Cu 4 Mg Si

1.2.1.2.2 Désignations et caractéristiques du cuivre et de ses alliages

Le cuivre est un métal de couleur rouge orangé possédant une haute conductibilité thermique et électrique ainsi qu'une bonne tenue aux corrosions courantes. Ce sont ses propriétés qui en font un métal employé pur ou faiblement allié dans la construction électrique, le transport d'électricité et le bâtiment.

En revanche, en mécanique, le cuivre pur n'est pas ou peu employé. Ce sont des alliages de cuivre qui sont utilisés tels que par exemple:

- **Les laitons**, alliages de cuivre et de zinc, qui se forment et s'usinent aisément. Ces alliages de couleur jaune sont parfois improprement appelés cuivre jaune.
- **Les bronzes**, alliage de cuivre et d'étain qui présentent de bonne qualité de fonderie ainsi que d'intéressantes qualités mécaniques et de frottement.
- **Les cupronickels** qui résistent bien à l'oxydation et à certains agents corrosifs.
- Enfin citons pour mémoire le maillechort (alliage de cuivre, nickel et zinc) dont l'aspect ressemble à celui de l'argent.

Les Cuivres affinés

Les cuivres affinés sont désignés par le symbole chimique du cuivre Cu suivi d'un tiret et d'un groupe de caractères alphabétiques en majuscule qui définissent le type de cuivre.

Exemple : Cu-ETP

Ce cuivre (Cu) contient de l'oxygène affiné électrolytiquement (ETP).

Les alliages de cuivres

Les alliages de cuivre sont désignés par le symbole chimique du cuivre Cu suivi des symboles chimiques des éléments d'addition suivis de leur teneur (exprimé en pourcentage). Les éléments d'addition sont classés dans l'ordre décroissant des teneurs.

Exemple : Cu Sn9 P

Cet alliage de cuivre (Cu) contient 9% d'étain (Sn9) et des traces de phosphore (P).

Remarque 1 : Si un élément n'est pas suivi d'une valeur indiquant sa teneur, c'est que l'alliage ne contient que quelques traces (moins de 1 %) de cet élément.

Cuivre et ses alliages

noms	désignation	R (MPa)	remarques
Laitons	Cu Zn20 Cu Zn23 Al4	200-260 500	bonnes qualités de frottement - mise en œuvre aisée excellentes caractéristiques mécaniques - fonderie

Cupro-aluminums	Cu Al11 Ni5 Fe5 Cu Al9	740-800 500	excellente résistance à la corrosion - inoxydable à haute 9° utilisé en construction navale
Cupro-nickels	Cu Ni10 Fe1 Mn	300-350	utilisé en construction navale
Bronzes	CuSn 5 Cu Sn7 Pb6 Zn4	340-390 220	très bonne tenue aux frottements aptitude à l'étanchéité - excellentes propriétés de fonderie

Quelques alliages de cuivre

Les principales qualités du cuivre sont : une très bonne conductibilité électrique et thermique, une résistance convenable à l'usure. Ils sont cependant sensibles à la corrosion et sont chers. Ses domaines d'application exploitent directement ces propriétés puisqu'on utilise presque la moitié de la production mondiale de cuivre pour du matériel électrique (conducteur, transformateur, moteurs électriques...). Le reste de la production est principalement utilisé pour les tuyaux à eau, la plomberie, les pompes et les vannes... Associé à l'étain ou à l'aluminium, il possède de bonnes propriétés de surface (résistance à l'usure et au frottement), on l'utilise comme palier de guidage, comme pignon...

Température de fusion : 1 080 °C, Masse volumique : 8 900 kg.m⁻³.

Désignation : code numérique (exemple : CW453K) ou symboles chimiques (Cu Sn 8)

1.2.2 Polymères : matières plastiques

Les polymères sont constitués d'un grand nombre d'unités fondamentales, appelées monomères. Ce sont des molécules organiques dont le noyau est essentiellement constitué d'un atome de carbone (ou de silicium dans le cas des polymères siliconés). On distingue les polymères issus d'éléments naturels tel que le latex, le bois,

le coton... et les polymères obtenus par synthèse à partir d'éléments tels que le charbon, les hydrocarbures, l'eau, le sable...

Les polymères, substances organiques macromoléculaires, sont obtenus par l'assemblage des monomères de base. Cette opération s'appelle la polymérisation.

On en distingue deux principaux types :

Polymérisation par addition :

Les monomères présentent une double liaison carbone-carbone (C = C), celle-ci peut s'ouvrir pour devenir (- C - C -), et à laquelle d'autres monomères peuvent se lier. Il est possible d'ajouter des molécules de même nature, dans ce cas on obtient un homopolymère, le polyéthylène par exemple, ou de nature différente pour donner un copolymère, le polystyrène-butadiène-acrylonitrile par exemple. On obtient ainsi par ce procédé, une macromolécule linéaire qui croît par addition des monomères. C'est une réaction en chaîne dont la cinématique peut être très rapide et qu'on peut contrôler par des additifs (retardateurs).

Polymérisation par condensation :

Alors que dans la polymérisation par addition, tous les atomes des monomères se retrouvaient dans le polymère, la polymérisation par condensation entraîne des réactions chimiques qui produisent la formation de sous-produits. Les réactions de polycondensation sont des réactions par étapes. Les deux monomères en présence donnent naissance à une molécule intermédiaire, laquelle constitue l'élément fondamental qui se répète dans la macromolécule.

Selon le mode de polymérisation, la structure des polymères peut prendre plusieurs formes. La polymérisation par addition entraîne la formation de macromolécules linéaires qui peuvent se ramifier, alors que la polymérisation par condensation peut engendrer en général un réseau tridimensionnel. Le comportement des matières plastiques dépend en grande partie du type de structure obtenue et de son degré de réticulation (transformation d'un polymère linéaire en polymère tridimensionnel par création de

liaisons transversales). En général, on classe les matières plastiques en trois groupes, les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

Différents types de matières plastiques |

• **Matières thermoplastiques**

Dans les polymères linéaires, ou ramifiés, obtenus par addition, les macromolécules ne sont liées entre elles que par des liaisons de faible intensité (liaisons de Van der Waals). Le comportement global du matériau dépend alors de la mobilité des chaînes les unes par rapport aux autres et de la rotation autour des liaisons C - C. L'élévation de température facilite le déplacement des chaînes les unes par rapport aux autres, le comportement d'abord vitreux, devient caoutchoutique entre la température de transition vitreuse (T_g ou T_v) et la température de fusion T_f . La réversibilité de comportement permet la mise en forme de ces matières à l'état fondu ou caoutchoutique.

• **Matières thermodurcissables**

Les matières plastiques obtenues par condensation de monomères sont constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Ce sont des matériaux amorphes" et infusibles, il ne peut y avoir aucun déplacement de chaînes les unes par rapport aux autres. Lorsque la température augmente, le matériau ne devient pas visqueux, mais il conserve sa rigidité jusqu'au moment où il se dégrade. On appelle ces plastiques thermodurcissables car, en général, une élévation de température favorise la réaction de polymérisation et le degré de réticulation, donc la rigidité.

• **Élastomères**

Les élastomères sont des matériaux aux propriétés bien particulières. Ce sont des polymères de haute masse moléculaire et à chaînes linéaires. Le déplacement de leurs chaînes les unes par rapport aux autres n'étant limité que par une légère réticulation, on peut obtenir de grandes déformations élastiques totalement réversibles. Lorsque la contrainte est nulle, ces matériaux sont amorphes, leurs chaînes tendant toutefois à s'aligner au cours de la déformation, il se produit une augmentation de la rigidité. Pour obtenir un tel comportement, il faut utiliser ces matériaux à une température supérieure à leur température

de transition vitreuse. Les propriétés des élastomères dépendent de leur degré de réticulation ; c'est ainsi que les propriétés du caoutchouc varient en fonction de la quantité de soufre utilisée lors de la vulcanisation¹², en vue de lier les chaînes les unes aux autres.

Malgré un ralentissement dû aux effets des chocs pétroliers et à la récession économique qui s'en est suivie, la production mondiale de matières plastiques n'a cessé de croître. Ce domaine demeure porteur.

Principaux thermoplastiques et leurs emplois

La rapidité de mise en œuvre des thermoplastiques (injection et extrusion notamment), et la possibilité de réutiliser les déchets ont favorisé leur emploi dans tous les cas où on les utilise à des températures inférieures à 100 °C. Ils ont donc souvent, dans ces domaines, remplacé les thermodurcissables, dont la

familles	désignations	utilisations
les vinyliques	PVC rigide PVC souple	tubes, profilés, bouteilles revêtements de sol, joints, isolants
les polyoléfines	PEbd PEhd PP	gaines, films, sacs pièces moulées, films fils, films, pièces moulées
les styréniques	PS PSC choc PSE expansé SAN ABS	emballages thermoformés ou injectés, ameublement, TV, HIFI, électroménager isolation thermique pièces moulées pièces moulées
les acryliques	PMMA PAN	plaques transparentes, feux de position corps creux pour cosmétiques

transformation est plus longue. On distingue principalement deux types de thermoplastiques :

familles	désignations	utilisations
les vinyliques	PVC rigide PVC souple	tubes, profilés, bouteilles revêtements de sol, joints, isolants
les polyoléfines	PEbd PEhd PP	gaines, films, sacs pièces moulées, films fils, films, pièces moulées
les styréniques	PS PSC choc PSE expansé SAN ABS	emballages thermoformés ou injectés, ameublement, TV, HIFI, électroménager isolation thermique pièces moulées pièces moulées
les acryliques	PMMA PAN	plaques transparentes, feux de position corps creux pour cosmétiques

• Plastiques thermostables

PAI	polyamide-imide	PAA	polyaryl-amide
PEI	polyéther-imide	PSU	polysulfone
PEK	polyéther-cétone	PPS	polyphénylène-sulfone
PEEK	poléther-éther-cétone	PES	polyéther-sulfone

Ils résultent pour la plupart de combinaisons entre les groupes arylates, éthers, imides et sulfones.

Thermoplastique désignation et utilisation

Bien que les polymères thermodurcissables soient moins employés que les thermoplastiques, ils demeurent intéressants pour des températures d'utilisation comprises entre 100 et 200 °C. Ils subissent pendant leur transformation, une opération chimique de polymérisation de fixation (chaleur, pression, température). Leur durcissement est irréversible, les déchets ne sont donc pas réutilisables. On distingue :

• Phénoplastes (PF, UF) et les aminoplastes (MF, MP)

Ces résines ont en commun les propriétés suivantes : faible prix, rigidité, tenue thermique, stabilité dimensionnelle dans le temps, qualités diélectriques, mais sont faibles en contraintes dynamiques.

On les utilise le plus souvent chargées de poudre minérale sous forme :

- de pièces moulées : isolants électriques, poignées de casseroles, vaisselle...
- de stratifiés : laminés décoratifs, circuits imprimés...
- de colles

• Polyesters insaturés (UP)

Ils sont obtenus par polycondensation d'acides et d'alcool.

- les UP non renforcés sont utilisés comme laques, vernis, liants et adhésifs,
- les UP renforcés (90 % de l'emploi de ces matériaux) sont employés dans la fabrication des piscines, cuves, coques de bateaux, carrosseries...

• Polyépoxydes (EP)

Ils sont obtenus par polycondensation d'épichlorhydrine et de biphenol. On les trouve sous forme liquide, pâteuse ou solide. Ils sont utilisés en :

- résines : articles de sport, coques, pièces pour l'aéronautique...
- adhésifs : collage de béton, de métaux, de plastiques...
- poudres à mouler : isolation électrique...
- peintures et vernis,
- composites hautes performances.

• **Silicones (Si)**

Ce sont des composés organosiliciques. On les trouve sous forme de pâtes, graisses, fluides, résines ou d'élastomères. On les utilise dans les circuits imprimés, les joints d'étanchéité, les tétines de biberons, les agents de démolage...

• **Polyimides (PI)**

Ils sont obtenus par polycondensation de diamines aromatiques ou par polymérisation d'imides éthyléniques. Ils possèdent une très bonne tenue à la température (jusqu'à 250 °C). Ils sont utilisés sous forme de :

- films : isolants électriques, supports de jauge de déformations...
- poudres à mouler : cônes de réacteur, engrenages, allume-cigares...

• **Polyuréthanes (PUR)**

Ils sont préparés directement par l'utilisateur à partir de pré-polymères. On procède par polyaddition de di-isocyanates et de polyols. Suivant la nature des isocyanates employés, on trouve toute une gamme de produits (résines, vernis, adhésifs, élastomères, mousse). La principale utilisation du polyuréthane est sous forme de mousse :

- Les mousse rigides : isolation thermique,
- Les mousse semi-rigides : accoudoir, appui-tête, chaussures,
- Les mousse souples : sièges, matelas, joints...

1.2.3 Céramiques

Les céramiques englobent tous les matériaux à liaisons iono-covalentes, ce qui regroupe : les roches, les bétons, les verres, les carbures, les nitrures... Le mot « céramique » longtemps associé à la poterie, aux porcelaines caractérise aujourd'hui une famille plus vaste de matériaux et les utilisations modernes ne sont plus limitées aux domaines traditionnels puisqu'on les emploie en électrotechnique et en construction mécanique. Nous nous limiterons cependant dans ce cours aux céramiques dites « techniques ».

Les propriétés des céramiques techniques

Les céramiques sont caractérisées par des liaisons fortes, ce qui se traduit dans la pratique par une très bonne tenue en température et une excellente rigidité élastique. La faible tendance à la plasticité qui en résulte rend ces matériaux fragiles, peu tenaces, peu ductiles, mais en revanche, résistants à l'usure. Ces matériaux ont de hauts points de fusion et une bonne résistance à la corrosion. Les céramiques techniques de qualité ont tendance à être chères.

On utilise pour ces applications des inserts en zircone (ZrO_2) et de titanate d'aluminium (Al_2TiO_5). La résistance à l'usure par frottement est une des propriétés remarquables des céramiques. Ainsi les culbuteurs, les guides et les sièges de soupapes sont en céramique (association de zircone et de nitrure de silicium (Si_3N_4)). Par souci d'allégement des masses en mouvement, on peut utiliser du nitrure de silicium pour les axes des pistons, les soupapes... Reste le problème de la tenue aux chocs, dans les pays où les habitudes de conduite sont assez nerveuses.

Plus généralement en construction mécanique, on rencontre les céramiques dans les applications à très hautes vitesses de rotation (broches de machines-outils, moteurs à turbines...). Des billes, voire des cages de roulements en céramique permettent d'augmenter les vitesses maximales d'utilisation.

• **Céramiques pour les outils de coupe**

Dans le cas des outils de coupe, on utilise principalement les propriétés de dureté et de tenue à haute température. Ainsi l'usinage des fontes, des aciers et des superalliages à base de nickel et de cobalt peuvent être exécutés avec des plaquettes en céramique. Pour les premiers, on utilisera l'alumine (Al_2O_3), pour les seconds le nitride de silicium. Le taux d'enlèvement est nettement amélioré (2 à 5 fois par rapport aux plaquettes carbures) même si le volume enlevé reste du même ordre. Le tournage continu est résolu par l'utilisation des céramiques mais le fraisage pose le problème des chocs.

• **Céramiques en biomécanique**

La chirurgie et l'art dentaire font de plus en plus appel aux nouveaux matériaux pour une bonne biocompatibilité, une bonne tenue à la fatigue et une résistance élevée à la corrosion. Les céramiques utilisées comme remplacement des tissus durs (os, dents) peuvent être classés en trois groupes selon leur réaction avec le milieu physiologique :

- les céramiques inertes ou biodégradables (alumine),
- les céramiques bioactives (bio verres...) qui permettent une liaison entre le tissu et l'implant,
- les céramiques bio résorbables (phosphate de calcium) qui permettent la repousse des tissus.

• **Céramiques dans le nucléaire**

Dans le nucléaire, les céramiques sont utilisées comme combustible : céramiques à base d'uranium, produits remplaçant l'uranium métallique pour les réacteurs à haute puissance. On les utilise aussi comme barre de contrôle. Matériau très absorbant neutronique, il sert à contrôler la réaction de fission nucléaire. Les céramiques servent globalement à la protection thermique et neutronique.

1.2. 4 - Matériaux composites

La recherche permanente des performances techniques jointe au besoin d'optimisation et d'allégement de certaines structures, a motivé l'utilisation puis le développement de matériaux spécifiques dont la composition et les caractéristiques ont été adaptées à la solution technologique des problèmes à résoudre. Les matériaux composites ont été développés dans cet état d'esprit.

L'idée de base est d'associer dans une même masse des matériaux différents par leurs natures chimiques et géométriques afin d'augmenter les performances globales du point de vue mécanique, physique et/ou chimique ainsi que de faciliter la mise en œuvre.

Des charges à renforts fibreux ont ainsi été introduites et mélangées à des matrices métalliques, céramiques ou plastiques. Mais l'association matrice-élément renforçant ne peut être quelconque et dépend :

- de la compatibilité chimique des matériaux en contact ;
- du procédé de mise en œuvre choisi en relation avec la géométrie de la pièce et les séries envisagées ;
- de la résistance mécanique, chimique,... attendue ;
- des coûts de fabrication, produits de base, transformation et finition éventuellement complétés du coût des contrôles.

Les structures obtenues sont généralement de type à deux dimensions principales, localement plates et lamellaires, quasi-isotropes ou anisotropes. Les pièces peuvent présenter diverses surépaisseurs, points d'assemblages,... et peuvent être colorées dans la masse, revêtues ou peintes. **Leur conception géométrique et leur dimensionnement doivent obéir à certaines règles**, souvent résultat de l'expérience propre de chaque atelier et/ou bureau d'études, complétées de méthodes de dimensionnement plus élaborées.

Il est possible de distinguer deux grandes classes de matériaux composites :

- **Les composites « grandes diffusions »**, les plus courants qui, pour un coût modéré, apportent des propriétés mécaniques intéressantes mais restent - sauf cas d'espèce-inférieures à celles des métaux. Il s'agit pour l'essentiel de l'association renfort fibre de verre-résine polyester.
- **Les composites « hautes performances »**, qui apportent des caractéristiques mécaniques spécifiques supérieures à celles des métaux et utilisent généralement des renforts fibres de carbone ou d'aramide (kevlar) avec des résines époxydes. Les coûts de ces matériaux sont élevés.

Les propriétés des matériaux composites

Les matériaux composites sont des matériaux qui associent deux ou plusieurs matières différentes, appartenant parfois à 2 classes distinctes, pour obtenir une combinaison de propriétés qui tire avantage de chacun. Les plus fréquemment utilisés sont les composites à matrice polymère et à renfort fibreux qui présentent des propriétés spécifiques exceptionnelles, directionnelles ou non suivant le tissage. Les composites céramique/céramique qui sont moins fragiles que les céramiques massives sont très intéressantes pour leur tenue en température, les composites à matrice métallique et renfort céramique ont pour vocation de tirer parti à la fois de la ductilité des métaux et de la raideur du renfort céramique. Enfin il convient de citer pour mémoire les matériaux tels que le bois, les ciments et bétons, les mousse polymères, céramiques ou métalliques, qui sont également des matériaux composites.

On notera la faible part pondérale des composites hautes performances qui représentent 2 % de l'ensemble des composites.

• Fibres utilisées

Les fibres sont les éléments du matériau composite qui apportent les propriétés mécaniques intéressantes. Elles se présentent sous forme de filaments de plus ou moins grande longueur dont les qualités recherchées sont les suivantes :

- bonnes caractéristiques mécaniques ;
- légèreté ;
- résistance thermique ;
- compatibilité avec les résines ;
- adaptabilité aux procédés de mise en œuvre ;
- faible prix.

Elles constituent une fraction volumique comprise entre 30 et 70 % (rapport du volume de fibres au volume total du composite).

Deux grandes catégories peuvent être distinguées :

- les fibres à hautes performances : fibres de verre, de carbone, d'aramide, ou de bore qui ont une fonction mécanique prépondérante mais il existe également quelques fibres synthétiques qui ont d'excellentes propriétés thermiques.

- les fibres à utilisation particulière utilisées initialement comme renfort mécanique (avant le développement des fibres à hautes performances) et qui sont maintenant employées pour des applications très spéciales telles que revêtement thermique, isolant électrique, élément décoratif. Ce sont des fibres d'origine naturelle (bois, coton, papier...) synthétique (polyamide, polyester...) ou métallique.

Les présentations sont très variées, outre les différentes longueurs possibles, existent :

- des ensembles linéaires (fil, mèche) ;
- des ensembles surfaciques (tissu, mat) ;
- des ensembles multidimensionnels (tresse, tissu complexe) de différentes armatures, tissage à trois dimensions,...

Les matrices utilisées

Il est possible de faire ressortir trois critères globaux de sélection d'une matrice :

L'accessibilité concerne les aspects :

- Prix matières ;
- Polyvalence aux méthodes de transformation (polymérisation à froid, à chaud, nombre de procédés de transformation possible) ;
- cadence de production dans la méthode de production la plus rentable ;
- Investissements.

- Propriétés :

- Physiques Mécaniques ; Électriques ; Thermomécaniques ;
- Tolérances, cotes à la transformation.

Résistance ou durabilité :

- au vieillissement extérieur (intempéries) ; à la fatigue (résistances dynamiques) ;

- au feu avec ses différents aspects (résistance à la combustion, à la propagation, fumées, gaz toxiques) ;
 - au frottement ; à l'usure.

1.2.5.1 Matériaux naturels Dans divers secteurs de l'industrie, on peut aussi utiliser les matériaux naturels, qui, de part leurs propriétés spécifiques, conviennent à de nombreuses applications. On peut distinguer quelques grandes familles, de par leur origine :

1. Origine végétale : bois (habitat, construction navale..), chanvre (isolation)...
2. Origine animale : laine de mouton, soie, ...
3. Origine minérale : roches, graviers, argile...

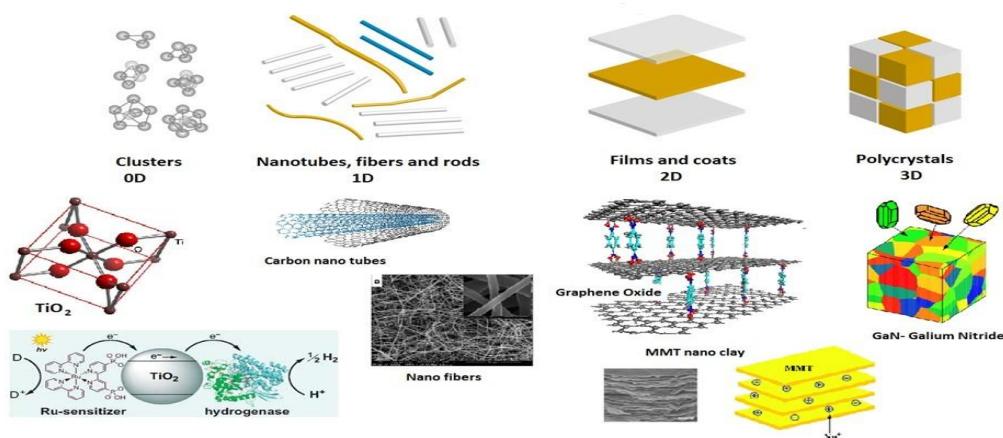


Habitation construite avec des matériaux naturels

1.2.5.2 Nanomatériaux

Un nanomatériaux est un matériau (sous forme de poudre, aérosol ou quasi-gaz, suspension liquide, gel) possédant des propriétés particulières à cause de sa taille et structure nanométrique. Les nanomatériaux sont - au sens commun du terme - habituellement issus de la nanotechnologie, à la différence des nanoparticules qui peuvent être d'origine naturelle ou résulter de processus tels que le soudage, le fumage, le polissage, etc.

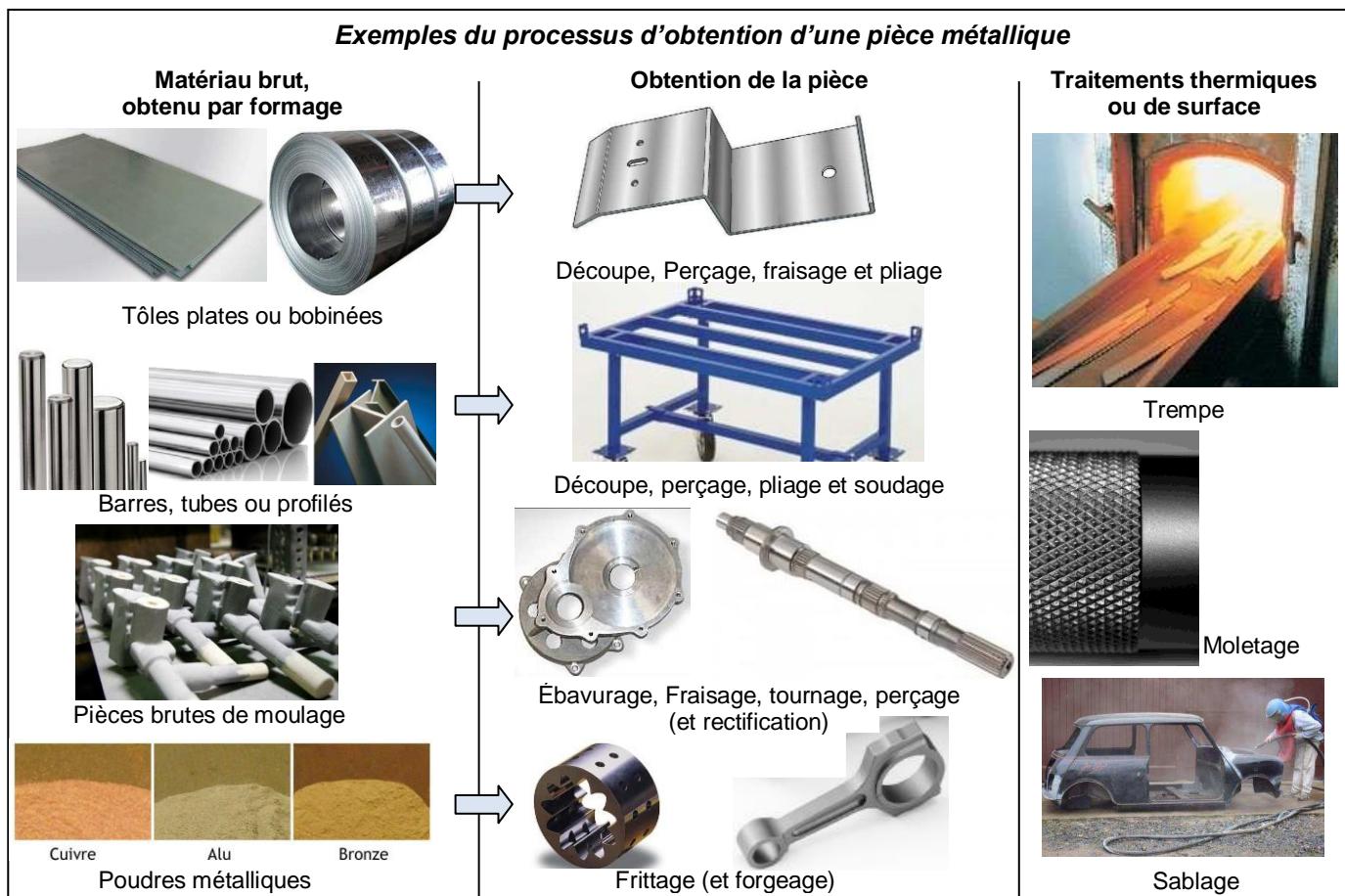
L'utilisation de ces matériaux est en plein essor, et les progrès scientifiques et technologiques dans ce domaine sont rapides. Néanmoins, de par leur taille (entre 1 et 100nm), la manipulation des nanomatériaux comporte des risques sanitaires et industriels qu'il est pour l'heure difficile d'évaluer.



LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'OBTENTION DES PIÈCES

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

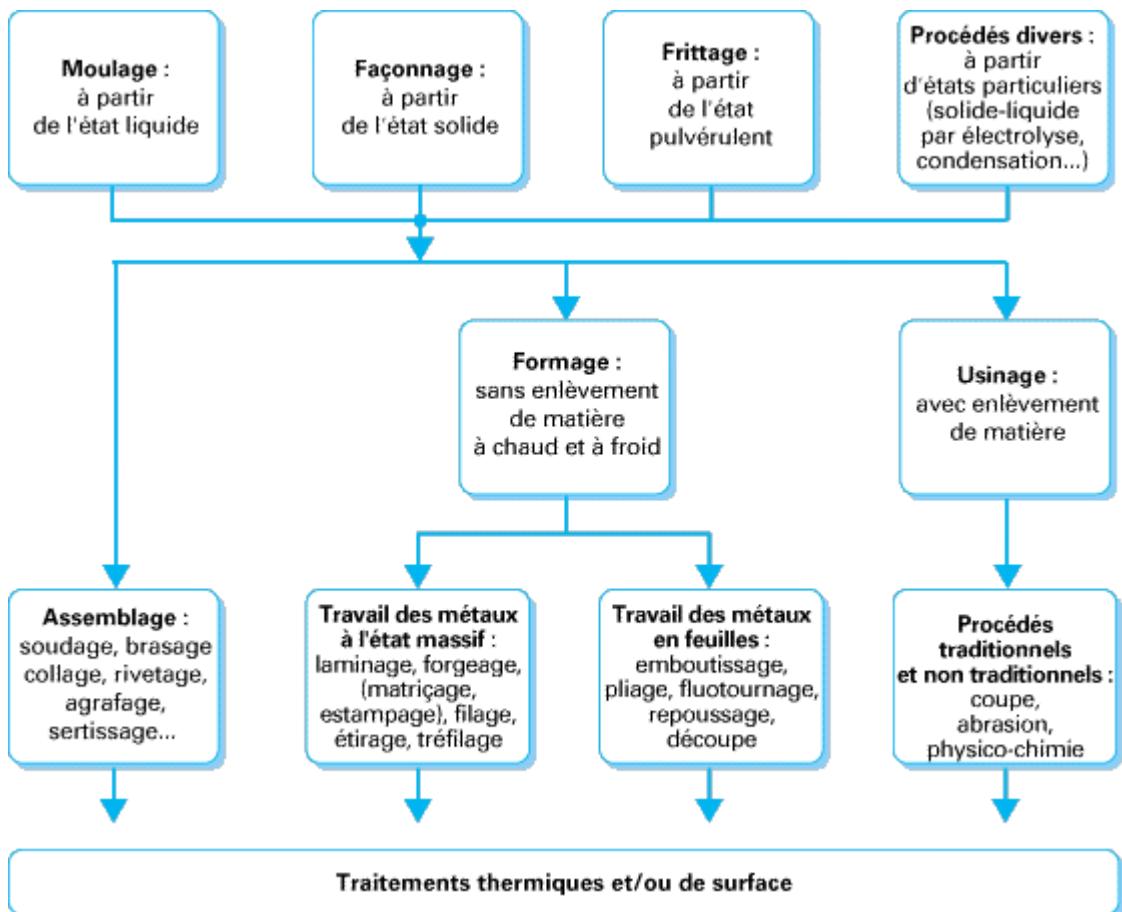
De plus, les pièces obtenues peuvent subir des traitements thermiques ou des traitements de surface afin de modifier leurs propriétés.



Les procédés de mise en forme des matériaux métalliques

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une **forme** déterminée au **matériau** tout en lui imposant une certaine **géométrie**, afin d'obtenir un objet ayant les **propriétés** souhaitées. Les techniques de mise en forme diffèrent selon les matériaux. Pour les métaux les principaux procédés sont :

- **Forgeage** : consiste à déformer, par choc ou par pressage entre deux outils, une masse métallique rendue malléable par chauffage.
- **Fonderie** : cette technique consiste à fondre et à couler le métal dans un moule.
- **Frittage** : permet de consolider la poudre sous l'action de la chaleur et la rend ainsi compacte.
- **Emboutissage** : permet d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle mince, un objet dont la forme est non développable.



Les procédés de mise en forme des matériaux polymères et des composites

Les procédés de mise en forme des polymères thermoplastiques et des composites correspondants sont directement dépendants des matériaux et des procédés de transformation existants dans l'industrie selon la production en petite, moyenne et grande série.

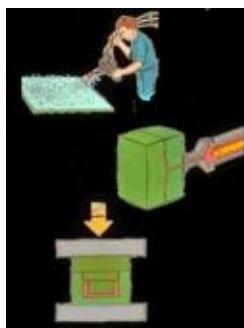
Les différents procédés de mise en forme des composites à matrice thermodurcissable :

- **Moulage par injection base pression de résine liquide (RTM)**, La résine thermodurcissable est injectée sous basse pression (1 à 10 bars) entre le moule et le contre-moule. En fonction des cadences de production la polymérisation se fait à température ambiante ou par chauffage.

- **Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues (S-RIM)**, Moulage du renfort sous forme de mats ou de tissus préalablement dans le moule chauffé (100 - 150 °C). Le système de résine à deux composants très réactifs est injecté sous pression (20 - 30 bars). Après durcissement (1 à 3 min), la pièce peut être démoulée.

- **Moulage au contact**, réalisé manuellement, l'imprégnation de la résine se fait à l'aide d'un rouleau adapté sur le drapage d'un renfort fibreux déposé sur un moule,. La polymérisation est effectuée à froid.

- **Moulage par injection – réaction (R-RIM)** : Les produits réactifs mélange d'un polyol et de fibres de verre (fibres coupées ou broyées) d'une part et d'un isocyanate d'autre part incorporés dans un mélangeur et injectés (250 bars) aussitôt dans le moule de cuisson, chauffé à température de 65°C.



- Compression
- Compression / transfert
- Injection
- Moulage au contact
- Projection simultanée
- Injection basse pression
- Enroulement filamentaire
- Coulée de mousse
- Injection de mousse

Matières thermodurcissables

- Injection
- Extrusion
- Soufflage
- Calandrage
- Thermoformage
- Rotomoulage
- Compression
- Expansion
- Coulée
- Chaudronnerie plastique



Matières thermoplastiques

Conclusion : Le choix d'un procédé de mise en forme est fonction du matériau retenu et des caractéristiques du produit. (forme, dimensions, cadence, matériau,)

Chapitre 2 : Procédés d'obtention des pièces sans enlèvement de matière

2.1 OBTENTION PAR FUSION (FONDERIE, OU MOULAGE)

Consiste à rendre liquide un matériau afin qu'il prenne la forme d'un moule.

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

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

Il existe principalement deux techniques de moulage : en sable ou métallique.

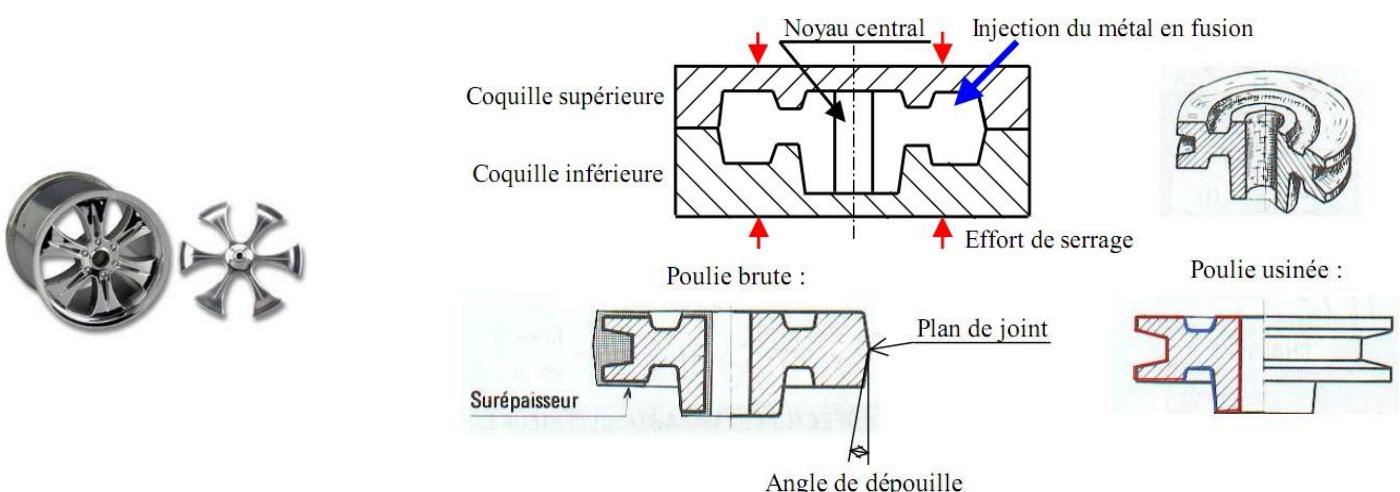
Moulage en sable

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

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

Cette technique convient bien pour des petites séries.

Exemple : fabrication d'une poulie



Moulage métallique (ou moulage permanent)

Le moule métallique est réutilisable plusieurs fois. Le démoulage est rendu possible par la différence de matière entre le moule et le métal coulé. Le moule subit toujours un potage avant introduction du métal en fusion (il est enduit d'un liquide protecteur qui facilitera son démoulage).

Le moulage métallique est classé en trois catégories selon la pression d'introduction du matériau liquide dans le moule :

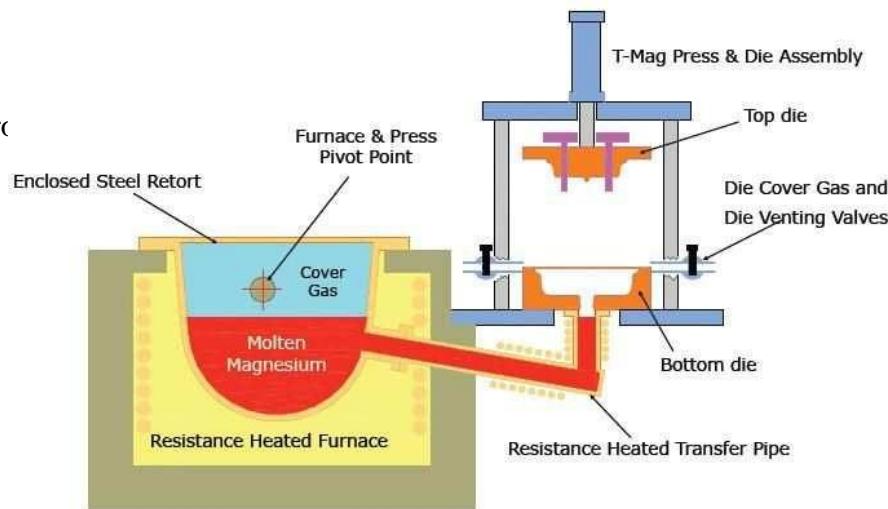
Moulage par gravité

La pression est nulle, le matériau liquide est introduit par le haut et remplit le moule par gravité.

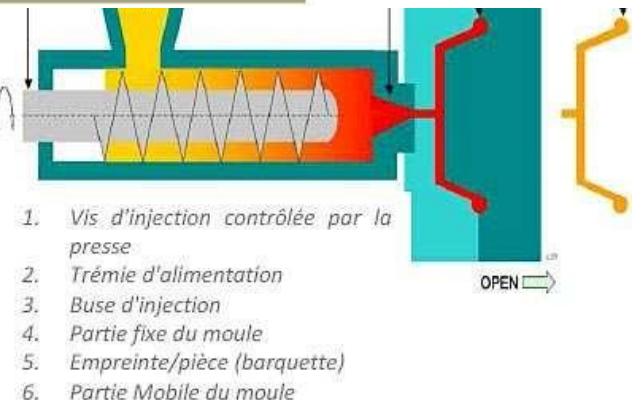
L'état de surface ($Ra \approx 1,6 \mu\text{m}$) et la précision obtenus sont moyens. Cette technique, dont l'outillage est moins coûteux que les suivantes, est adaptée pour les petites séries.



♦ **Moulage à basse pression** La pression est faible (0,2 à 2 bars), le matériau liquide est introduit par le haut et remplit le moule par gravité. Cette technique est adaptée pour les petites ou grandes séries.



♦ **Moulage sous pression (ou moulage par injection)** La pression d'injection du matériau liquide est importante (entre 50 et 200 bars). Ce procédé est souvent automatisé et permet de grandes cadences de production (jusqu'à 500 pièces / heure). Le coût de l'outillage est très élevé. L'état de surface et la précision des pièces obtenues sont bons. Cette technique est adaptée pour les très grandes séries.



Moulage par centrifugation

Le moule est entraîné en rotation rapide. Le matériau liquide versé à l'intérieur se colle à la paroi par la force centrifuge et se solidifie.

Moulage par insert (ou surmoulage)

Cette technique consiste à mouler un matériau (souvent en plastique) par-dessus une pièce, appelée insert (souvent en métal), insérée dans le moule. Il faut pour cela que le matériau à surmouler possède une température de fusion plus faible que le matériau de l'insert.

2.2 OBTENTION PAR DÉFORMATION

Consiste à déformer plastiquement le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée.
Une déformation plastique est une déformation permanente du matériau.

Extrusion (ou filage)

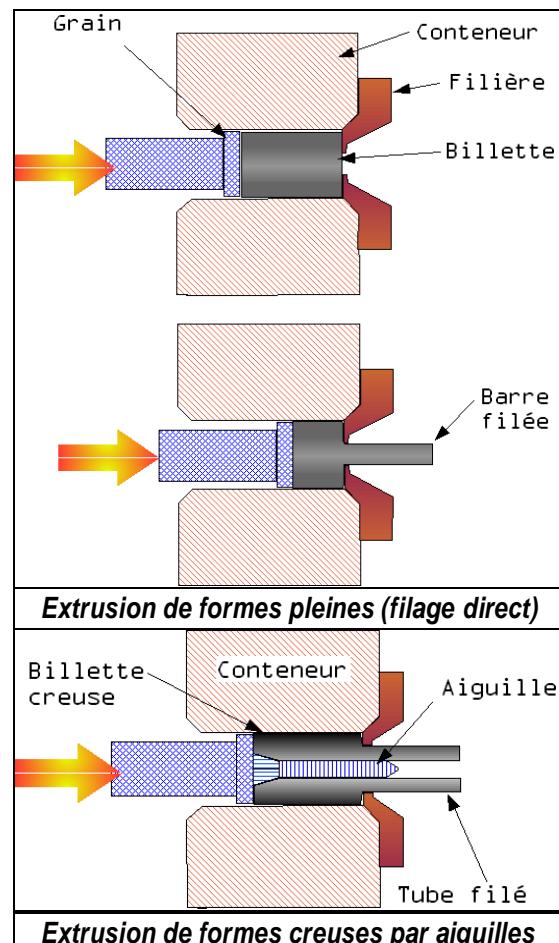
Principe de l'extrusion (appelée aussi filage pour les métaux) :
Un matériau chauffé et compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir.

Cette technique permet d'obtenir en continu un produit pouvant être très long (barre, tube, profilé, tôle...).

Avantages : - Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;

- Bons états de surface ;
- Sections des profilés pouvant être creux et très complexes.

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



Laminage

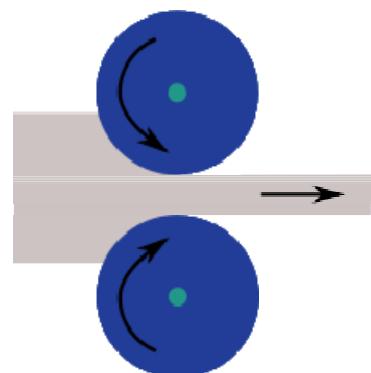
Principe :

Le matériau est déformé par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelés laminoirs.

Le laminage peut s'effectuer à froid ou à chaud.

Les laminoirs sont souvent utilisés les uns à la suite des autres afin de réduire progressivement l'épaisseur des profilés.

La plupart des tôles plates brutes sont obtenues par laminage.



Forgeage libre

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un matériau, à froid ou à chaud, afin de le contraindre à épouser la forme voulue.

Principe du forgeage libre :

Sous l'action d'une forte pression ou d'une succession de chocs, un bloc de métal chauffé (800 à 1200 °C) se déforme plastiquement vers les surfaces restées libres. Aucune matrice ne délimite la déformation du matériau, et la forme obtenue dépend fortement du savoir-faire de l'opérateur.

L'opération peut s'effectuer avec un outillage manuel ou à l'aide d'un marteau-pilon ou d'une presse hydraulique.

La forgeage libre permet d'obtenir des ébauches ou des pièces brutes, et n'est pas adapté au travail en série.

Avantages : - Pas d'outillage spécialisé selon la pièce à obtenir ;

- Les pièces forgées ont une résistance mécanique supérieure aux mêmes pièces usinées, du fait du fibrage de la pièce consécutif au forgeage.

Inconvénients : - Nécessite beaucoup d'énergie (métal chauffé) ;

- La précision est médiocre.



Forgeage libre au marteau manuel



Forgeage libre au marteau-pilon

Estampage et matriçage

L'estampage est le forgeage mécanique des aciers, tandis que le matriçage est le forgeage mécanique des métaux non ferreux.

Principe :

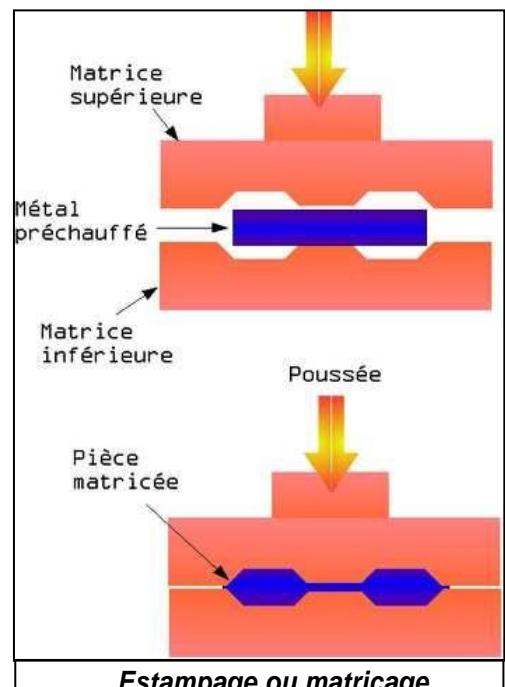
Un lopin de métal chauffé et calibré (avec des dimensions précises) se déforme pour remplir les deux demi-empreintes de deux matrices appliquées l'une contre l'autre sous l'action d'une forte pression ou d'une série de chocs.

L'estampage et le matriçage sont adaptés à une production en série.

Avantages : - Les mêmes que pour le forgeage libre, avec plus de rapidité et une meilleure précision.

Inconvénients : - Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;

- Prix de revient élevé des matrices rapidement « usées ».



Estampage ou matriçage

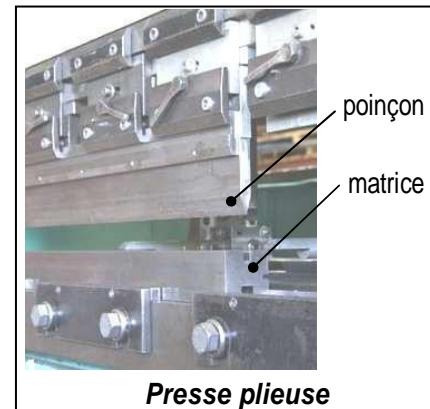
Pliage

Le pliage est une déformation permanente effectuée à froid sur une tôle plane.

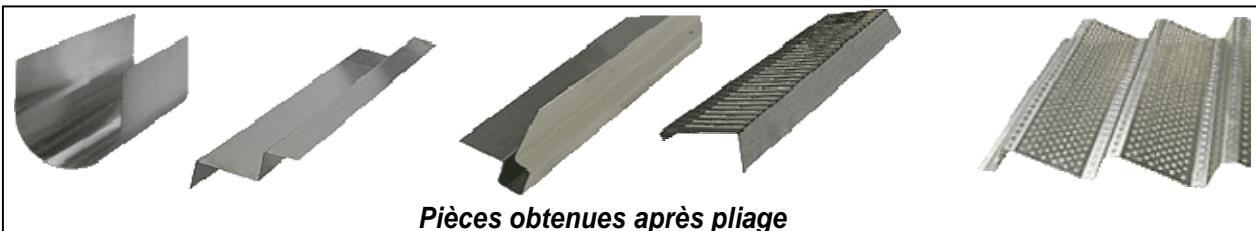
La surface obtenue présente des plis rectilignes et est développable (c'est-à-dire applicable sur un plan par dépliage).

Avantages : - Outilage simple : presses hydrauliques avec différents poinçons et matrices.

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



Presse plieuse



Pièces obtenues après pliage

Cintrage

Le cintrage est la déformation à froid d'un tube ou d'une barre, suivant un rayon et un angle donnés (opération effectuée avec une cintreuse).

On peut obtenir un cintrage approximatif en effectuant plusieurs petits pliages rapprochés les uns des autres.



Cintreuses (manuelle et industrielle)

Profilage à froid

Principe :

Une tôle plane (feuillard), introduite entre les galets tournants d'une machine à profiler, subit des déformations progressives qui l'amènent à la forme finale désirée, sans que soit modifiée son épaisseur initiale.

Ce procédé est adapté aux grandes séries.



Avantages : - Longueur de profilé non limitée ;

- Procédé rapide et productif (possibilité de découpe en vol).

Emboutissage

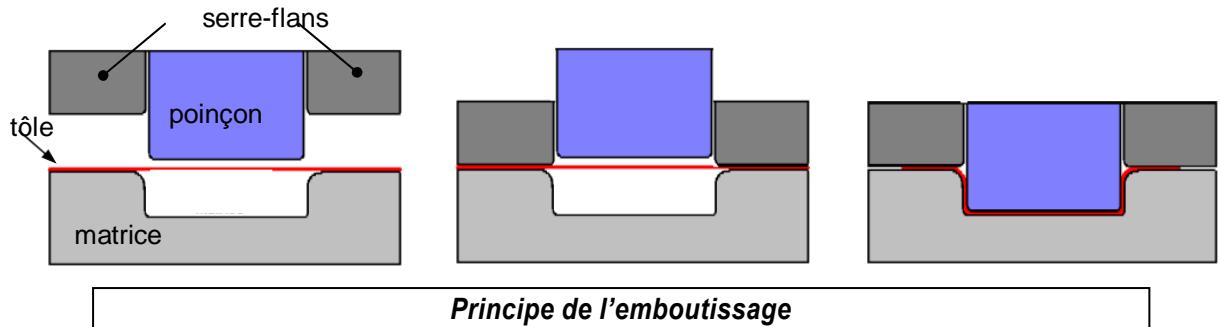
Principe :

L'emboutissage est la déformation à froid d'une



tôle plane en une forme creuse non développable (cf. pliage). La tôle est déformée entre un poinçon mobile et une matrice fixe, le serre-flan évitant la formation des plis. L'opération ne doit pas entraîner de variation sensible de l'épaisseur de la tôle.

L'outillage est spécifique à la forme de la pièce à obtenir, et le seuil de rentabilité exige donc une production en série.



II) 2.3 FRITTAGE

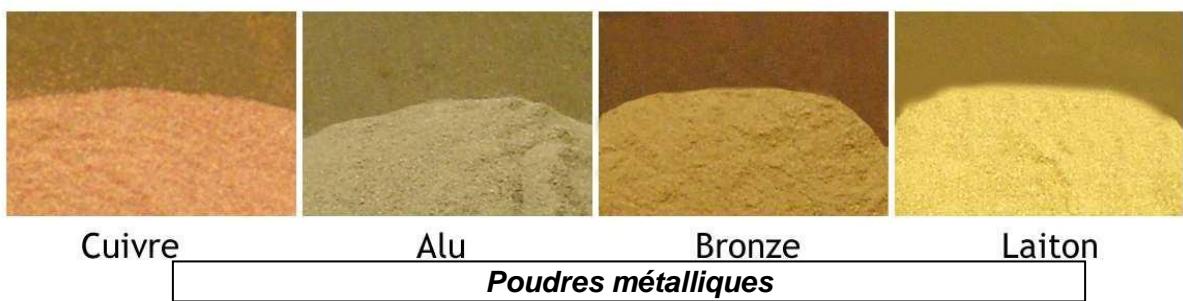
Principe :

Une **poudre** (ou un mélange de poudre), généralement métallique, est **comprimée** dans un moule, puis **chauffée** dans un four à vide (ou à atmosphère contrôlé) à une température inférieure à la température de fusion du principal constituant.

- Avantages : - Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, précises et saines, qui peuvent être utilisées à l'état brut ;
- La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants ;
 - Autorise l'obtention de nouveaux alliages (encore appelés dans ce cas « pseudo-alliages »).

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

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





Coussinets frittés



Diverses pièces frittées

Chapitre 3 : Procédés d'obtention des pièces par enlèvement de matière

Consiste à obtenir la forme finale par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux).

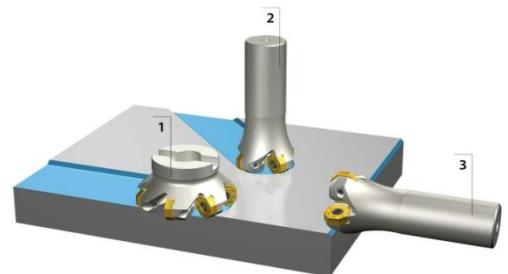
Tournage (sur un tour classique ou à commande numérique CN)

En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant. Le tournage permet principalement d'obtenir des formes de révolution autour de l'axe de rotation de la pièce.



Fraisage (sur une fraiseuse classique ou à commande numérique CN)

En fraisage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de l'outil (la fraise), tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de la pièce maintenue dans un étau. Le fraisage classique permet principalement d'obtenir des formes prismatiques, mais le fraisage par CN permet d'obtenir des formes pouvant être très complexes.



Perçage (sur une perceuse)

Le terme perçage signifie « obtention d'un trou (borgne ou débouchant) par usinage ». Ce trou peut être effectué par un foret sur une perceuse, une mèche sur un vilebrequin (perceuse manuelle), découpe, électroérosion, etc.

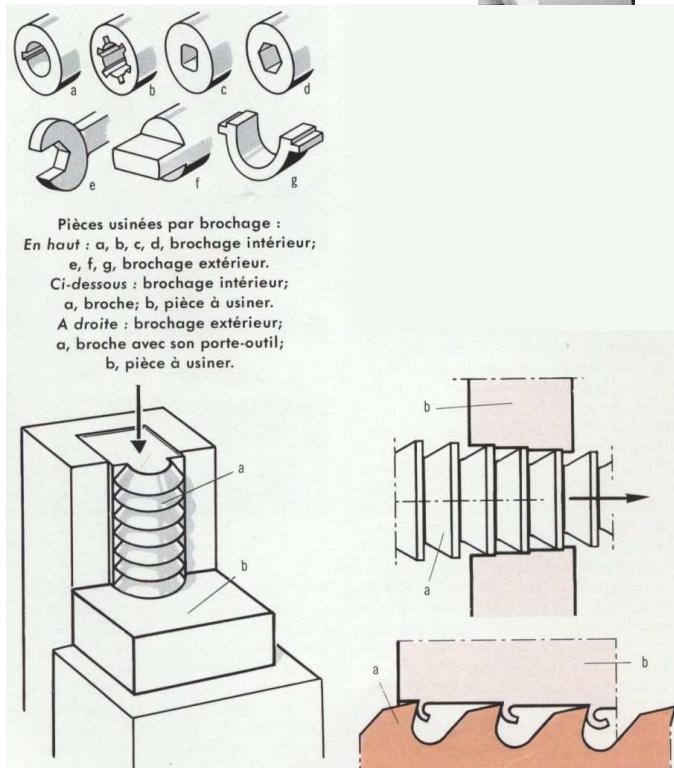


Brochage (sur une brocheuse)

Le brochage est un procédé d'usinage à l'aide d'un outil de forme à tranchants multiples appelé « broche ».

L'outil broche possède des dents qui augmentent de hauteur progressivement, de sorte que chacune entaille plus profondément la pièce que celle qui la précède.

Le brochage intérieur (formes *a*, *b*, *c*, *d* ci-contre) nécessite que la broche puisse traverser la pièce. Il est donc nécessaire de réaliser au préalable un trou débouchant.



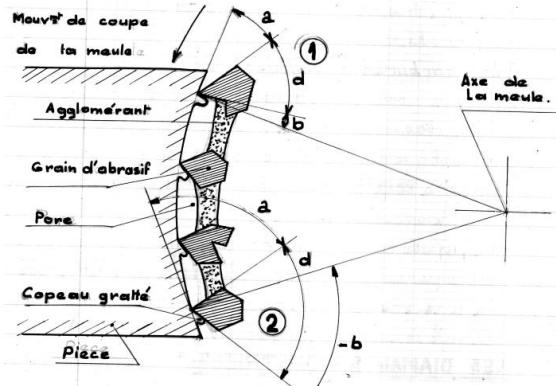
Rectification, rodage, superfinition (sur une meule ou sur des bandes abrasives)

Ces trois techniques sont des techniques de finition des pièces, par **abrasion** (ou meulage), jusqu'à l'obtention de surfaces en « poli- miroir ».

Une meule (ainsi qu'une bande abrasive) est constituée de particules coupantes agglomérées par un liant : chaque particule enlève un petit copeau quand l'une de ses arêtes se présente sur la pièce, généralement à grande vitesse ; le copeau est de très petite section, il n'est pas tranché mais gratté.

L'amélioration de l'état de surface est obtenue en utilisant des abrasifs de plus en plus fins.

L'état de surface obtenu est excellent (rugosité de l'ordre de $R_a = 0,1 \mu\text{m}$) et la précision des cotes aussi (de l'ordre de $1 \mu\text{m}$).



Électroérosion

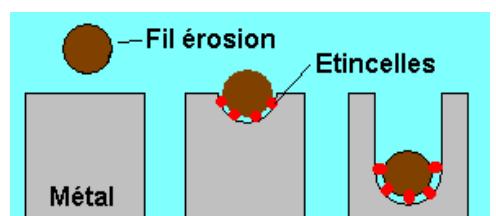
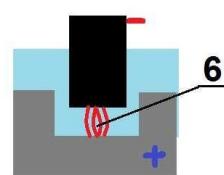
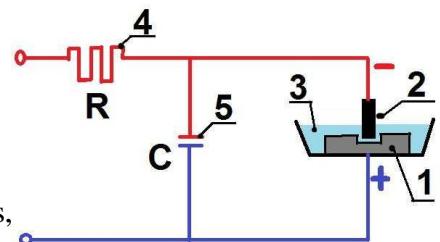
Principe :

L'enlèvement de matière est obtenu par des décharges électriques entre une électrode pièce et une électrode-outil.

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

Inconvénients : - Ce procédé ne s'applique qu'aux matières conductrices de l'électricité ;

- Coût du matériel (spécifique à chaque forme de pièce à obtenir) et usure de l'outil électrode.

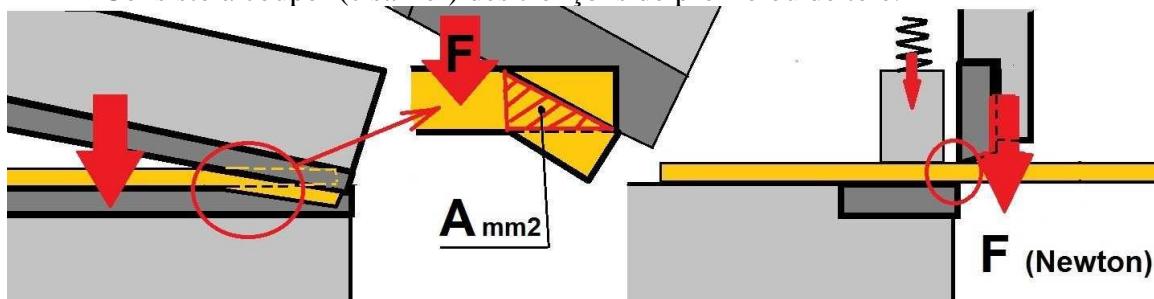


Découpage, poinçonnage, cisaillage

Le découpage est le cisaillage d'une tôle sur un contour fermé.

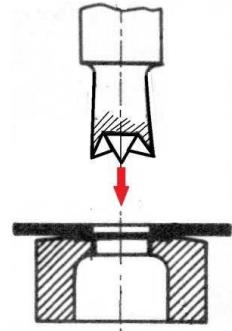
♦ Cisaillage

Consiste à couper (cisailler) des tronçons de profilé ou de tôle.



♦ Poinçonnage

Le découpage est effectué par un poinçon ayant la forme de l'ajour (trou) à découper.



On recense plusieurs techniques de découpages :

- ♦ **Découpage classique** (mécanique, par un outil tranchant de profil fermé déplacé par une presse) ;
- ♦ **Oxycoupage** (jet d'oxygène pur sur un métal préalablement localement chauffé à sa température de combustion) ;
- ♦ **Découpage laser** ;
- ♦ **Découpage par jet d'eau** (le jet d'eau doit posséder une finesse, une vitesse et une pression telles qu'il soit capable de couper la plupart des métaux sans les mouiller) ;
- ♦ **Découpage plasma** (apparenté au soudage TIG, mais avec des mélanges gazeux différents – un arc électrique génère un jet de plasma qui provoque une fusion locale sur toute l'épaisseur du matériau à découper).

Chapitre 4 : Techniques d'assemblage

Un assemblage mécanique est la liaison de différentes pièces d'un ensemble ou produit. C'est aussi un ensemble de procédés et solutions techniques permettant d'obtenir ces liaisons.

1 Degré d'assemblage

On distingue avant tout un assemblage par ses degrés de liaison, c'est-à-dire les mouvements relatifs indépendants interdits ou autorisés entre les pièces assemblées.

2 Types d'assemblages

On distingue ensuite différents types d'assemblage, un assemblage peut être permanent ou démontable, direct ou indirect.

Assemblage permanent

Assemblage non démontable : pour supprimer cette liaison, il est nécessaire de déformer ou de détruire au moins une des pièces formant l'assemblage.

- Soudure
- Clinchage (emboutissage)
- Emmanchement à force
- Certains frettages, certaines colles et adhésifs
- Sertissage...

Assemblage démontable

La liaison est conçue de manière à être démontée sans détérioration importante des pièces qui peuvent être généralement réutilisées pour recréer un assemblage. L'élément assurant la liaison peut ne pas être réutilisable.

- Vissage (Vis-écrou)
- Boulonnage
- Goujons
- Clavette (transversale/Longitudinale/ tangentielle)
- Arc-boutement, Serre-joints
- Goupille
- Coincement de formes coniques
- Certains frettages
- Certains colles et adhesives

Boulonnage	Goujons	Vissage Vis-écrou	Clavette (transversale/ Longitudinale/ tangentielle)	Arc-boutement Serre-joints	Certains frettages	Goupille	Coincement de forme s coniques	Certain s colles et adhésif s
Obtenues par organe fileté	Par adhérence ou coincement							

Assemblage direct

L'assemblage ne nécessite aucune pièce intermédiaire, la forme des pièces en contact suffit pour la réalisation de celui-ci, parmi ces techniques on trouve :

Le soudage, le Frettage, le Clinchage, Le Sertissage, l'Emboîtage élastique, ..

Assemblage indirect

Une ou plusieurs pièces intermédiaires sont utilisées.

- Visserie : vis, écrou, boulon, goujon, filetage, taraudage
- Rivet
- Clavette
- Collage
- Goupille
- Embrèvement (avec tenon, mortaise et cheville)
- Bague de tolérance
- Anneau élastique
- Clou
- Agrafage

On peut aussi distinguer le type d'assemblage par domaine d'activité :

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Menuiserie (bois, aluminium,...) - Systèmes de fixation, Transmission (mécanique).. | <ul style="list-style-type: none"> - Plomberie: Robinetterie, Emboîture... - Charpenterie |
|--|---|

3 Exemples d'assemblages

Soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage qui assure la liaison permanente de divers éléments métalliques.

Il désigne deux techniques :

- Le soudage hétérogène.
- Le soudage autogène

Le soudage hétérogène (le Brasage)

Il consiste à introduire entre les éléments à assembler, un métal liquide (qui, après refroidissement, adhère fortement aux deux éléments).

Le soudeur dégraisse et décape les pièces à assembler. Le métal de ces pièces s'appelle « métal de base ».

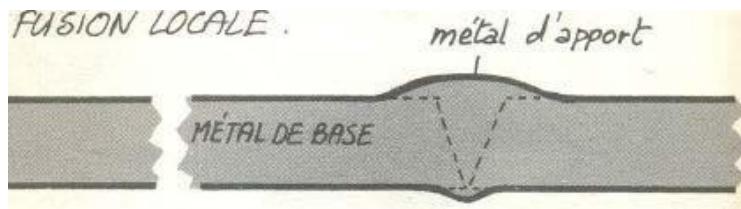


Fig.29. Le Brasage

La pièce à souder est mise dans sa position définitive. L'endroit de la soudure est chauffé au chalumeau. De nombreuses sources de chaleur peuvent être utilisées : fers et lampes à souder, chalumeaux, fours, résistances électriques, inductions, bains chauffants, etc.

Au contact des éléments chauffés, le métal d'apport fond et pénètre par capillarité entre les surfaces à assembler, puis diffuse dans le métal de base.

Parfois la flamme d'un chalumeau est nécessaire pour assurer la fusion du métal d'apport. Cette technique s'appelle **Soudo-Brasage**.

Les alliages d'apport les plus couramment employés sont à base : d'étain, plomb, cadmium, cuivre, argent. Leurs points de fusion doivent être inférieurs à celui du métal de base. Ces différents alliages sont disponibles sous formes de fils, baguettes-bandes et poudres.

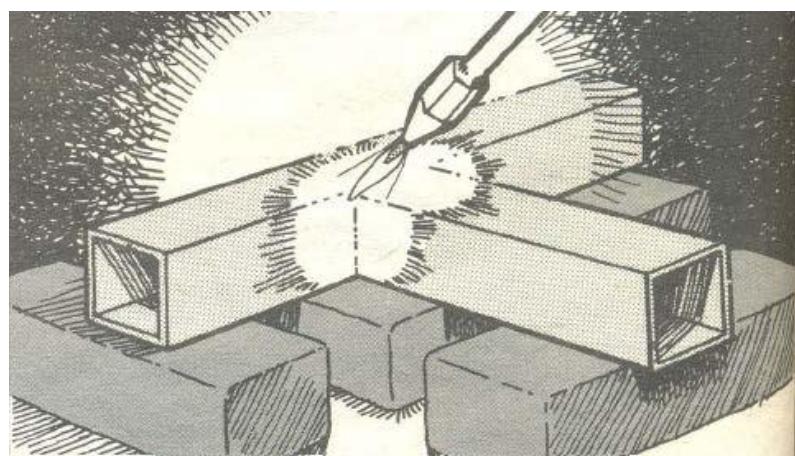


Fig.30. Soudage au chalumeau

Le soudage autogène

Le soudage autogène consiste à lier deux éléments d'un même métal par fusion locale. Les nombreux procédés de soudage autogène (appelé couramment « soudage ») sont classés en fonction de l'énergie mise en œuvre pour assurer la fusion locale des éléments à assembler.

Les sources d'énergies utilisées sont :

- Energie thermochimique : alluminothermie, combustion gazeuse
- Energie électrique : arc électrique, résistance électrique
- Energie mécanique : friction, pression, ultrasons
- Energie focalisée : bombardement électrique, laser.

Exemples

L'Aluminothermie

La réaction chimique de l'aluminium en poudre et de l'oxyde de fer crée la chaleur nécessaire à la fusion locale des pièces à souder.

Ce procédé est très utilisé pour souder les rails de chemin de fer.

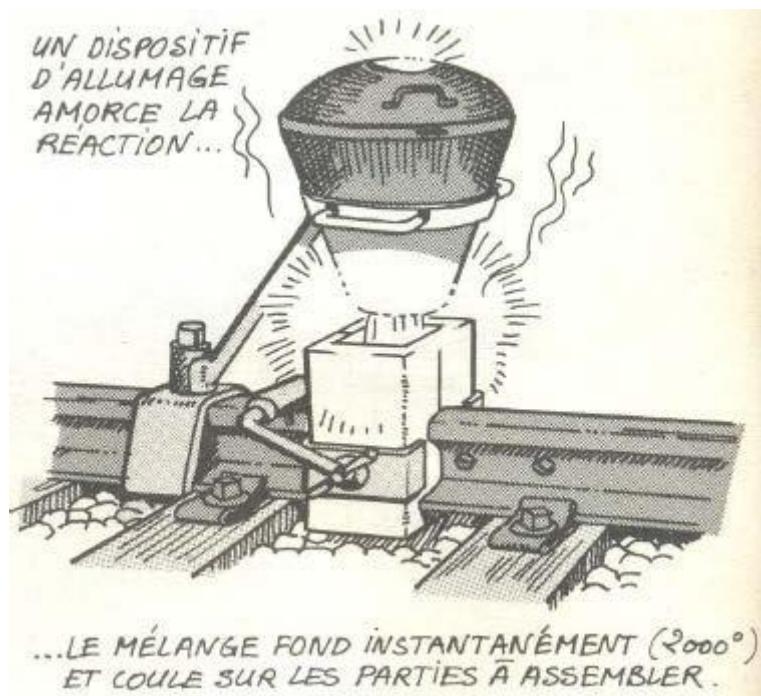


Fig.31. L'aluminothermie

Soudage Oxyacétylénique (combustion gazeuse) :

Une flamme obtenue à partir d'un gaz combustible (en général l'acétylène qui brûle par mélange d'oxygène), fournit la source de chaleur.

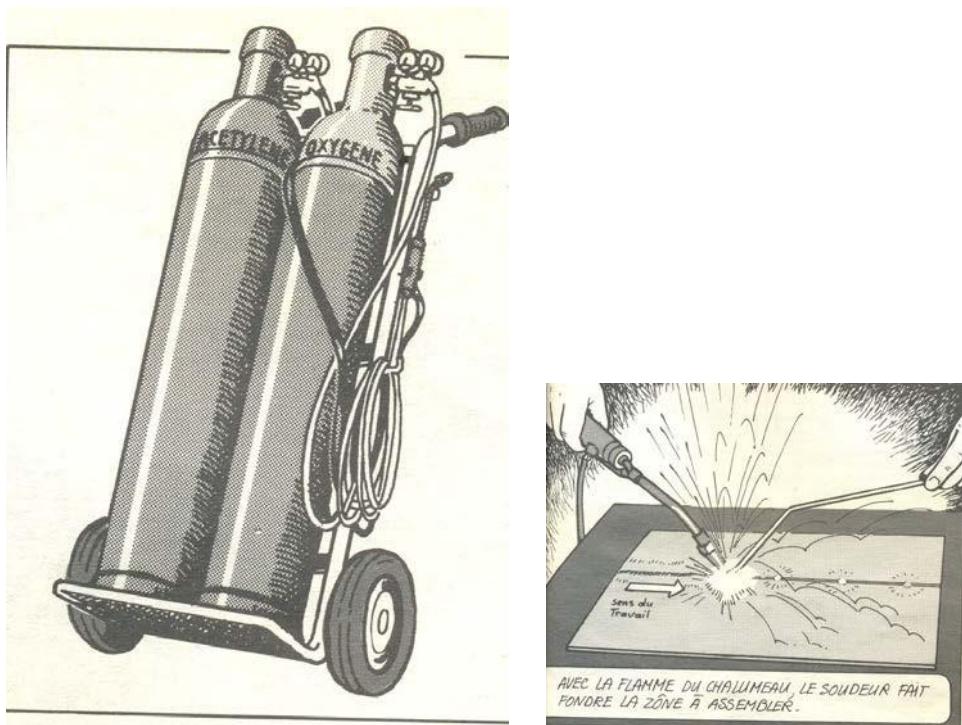


Fig.32. Soudage oxyacétylénique

Le soudage à l'arc électrique :

Un générateur d'électricité force les électrons libres à se déplacer dans le même sens à travers un conduit : c'est le courant électrique.

Pour que les électrons circulent, le circuit doit être fermé, si le circuit est ouvert, le courant ne passe pas car l'air n'est pas un conducteur.

L'arc électrique persiste tant que les électrodes restent à bonne distance l'une de l'autre.

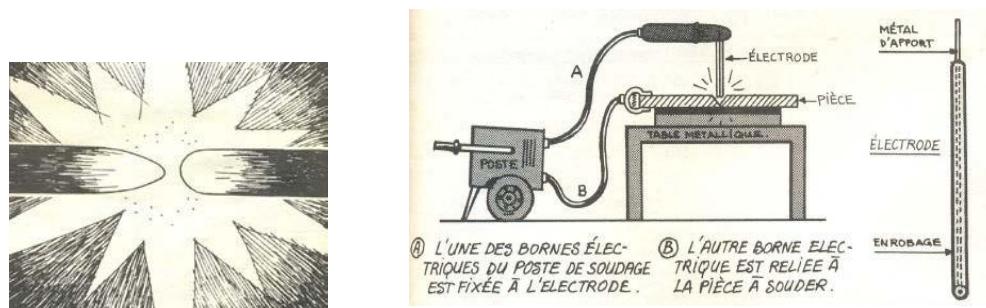


Fig.33. Schéma de fonctionnement (Soudage à l'arc électrique)

Rivetage

Les rivets sont des organes d'assemblage, utilisés pour lier plusieurs pièces. Ce sont des tiges d'acier, d'aluminium, de laiton, de cuivre, etc., dont l'une des extrémités a été préparée en forme de tête (tête normalisée), la seconde tête, dite rivure, étant forgée après pose.

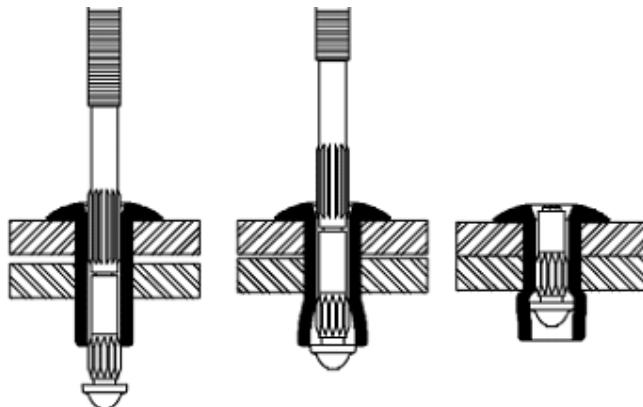


Fig.34. Le Rivetage

Emmanchement à force

L'emmanchement en force à la presse est une opération conditionnée par le frottement. La liaison par assemblage cylindrique forcé est très simple à concevoir : un alésage cylindrique reçoit une tige de même forme. Une liaison par adhérence doit se superposer à la liaison par obstacle ainsi réalisée pour faire disparaître les deux libertés qui subsistent.

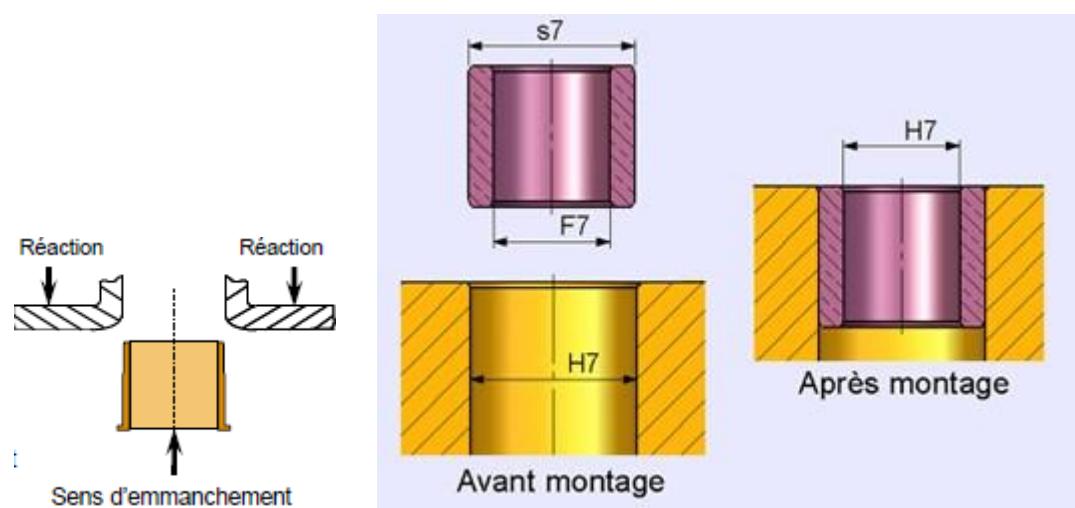


Fig.35. Schéma de principe « Emmanchement à force ».

Arc-boutement

Le phénomène d'**arc-boutement** se produit dans un système mécanique lorsque la configuration de celui-ci est telle que l'adhérence empêche tout mouvement et maintient donc l'équilibre, quelle que soit l'intensité des actions mécaniques extérieures.



Fig.36. Serre-joint (arc-boutement)

Assemblage conique

Un coincement de forme conique est obtenu lorsque la pièce possède un alésage conique et l'extrémité de l'arbre est façonnée en cône de même conicité.

Si on enfonce l'arbre dans la pièce par pression ou par choc, il y a coincement des deux éléments de l'assemblage.

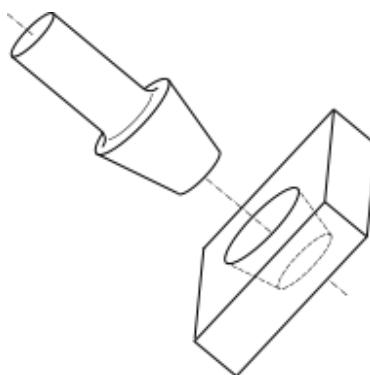


Fig.37. Assemblage conique

Vissage et Boulonnage

Boulonnage

Le boulonnage est une méthode d'assemblage mécanique démontable. Les boulons servent à créer une liaison de continuité entre éléments ou à assurer la transmission intégrale des efforts d'une partie à l'autre d'une construction.

En boulonnerie le terme vis correspond à un filetage complet alors que le terme correct est corps de boulon lorsque la partie filetée est partielle.

Une vis de fixation, appelée communément vis, est un organe mécanique, comportant une tige filetée et une tête; il est destiné à réaliser la fixation d'une ou de plusieurs pièces par pression. La fixation par vis crée une liaison plane sur plan démontable, par placage précontraint des deux pièces à assembler. Tant que les efforts de traction appliqués sur la liaison n'excèdent pas l'effort exercé au repos par les vis, l'assemblage bénéficie de la raideur des pièces assemblées.

Visse-écrou

Le système vis-écrou, est un mécanisme d'entraînement en translation. Il se compose de :

Une tige filetée entraînée en rotation autour d'un axe fixe par rapport à la pièce (la vis), une pièce comportant un filetage intérieur, la noix (ou écrou), guidée en translation par rapport au bâti.

Lorsque la vis tourne, la noix est entraînée en translation. C'est donc un mécanisme de transformation de mouvement utilisant le principe de la vis et de l'écrou, c'est-à-dire la liaison hélicoïdale. En général il permet la transformation d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation.

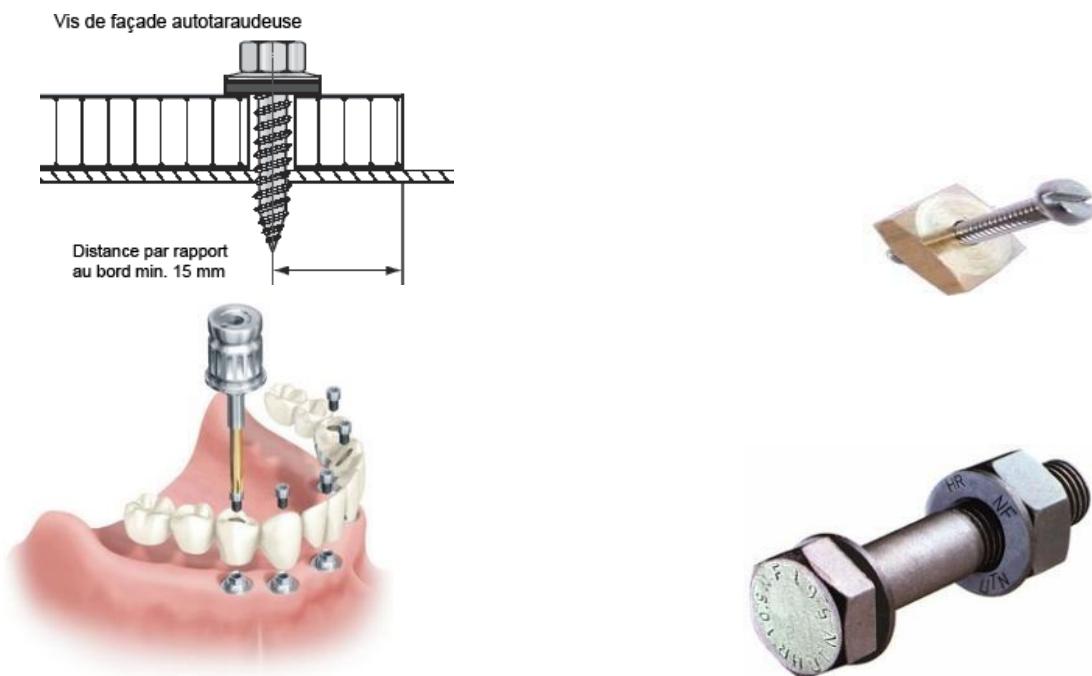


Fig.38. Vis et boulons

Ecrou

Un **écrou** est un composant élémentaire d'un système vis/écrou destiné à l'assemblage de pièces ou à la transformation de mouvement.

Trois éléments fonctionnels sont à examiner dans l'étude d'un écrou :

- Sa surface d'appui
- Son système de manœuvre
- Son trou taraudé

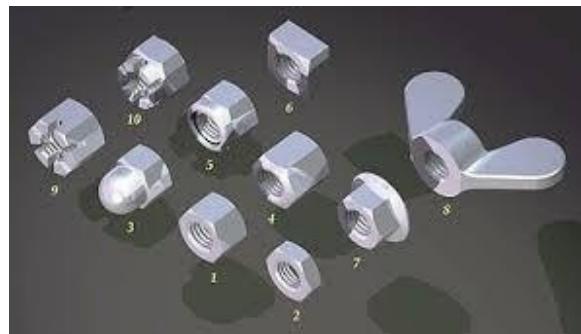


Fig.39. Ecrous

Goujons

Dans certains cas, il est difficile d'employer un boulon à cause de la longueur qu'on serait obligé de donner à sa tige et du logement qu'il faudrait prévoir pour sa tête.

La difficulté est résolue en faisant jouer à l'une des deux pièces le rôle d'une tête, c'est-à-dire en rapportant sur cette pièce la tige du boulon « goujon ».

Un goujon est un organe mécanique en forme de tige, en partie fileté, permettant de réaliser une liaison « complète, rigide, démontable » entre une pièce équipée du goujon et une ou plusieurs autres traversées par le goujon et verrouillée par un écrou.



Fig.40. Goujons

Le clavetage

Une clavette est une pièce qui a pour fonction de lier en rotation deux pièces. Les clavetages forcés peuvent être considérés comme des liaisons par obstacle. Mais la stabilité de l'organe d'assemblage formant obstacle (clavette) est obtenue par coincement, donc par adhérence.

Le clavetage est dit transversal ou longitudinal, suivant la position de la clavette.

La liaison « complète » obtenue n'est pas apte à transmettre des efforts importants dans toutes les directions.

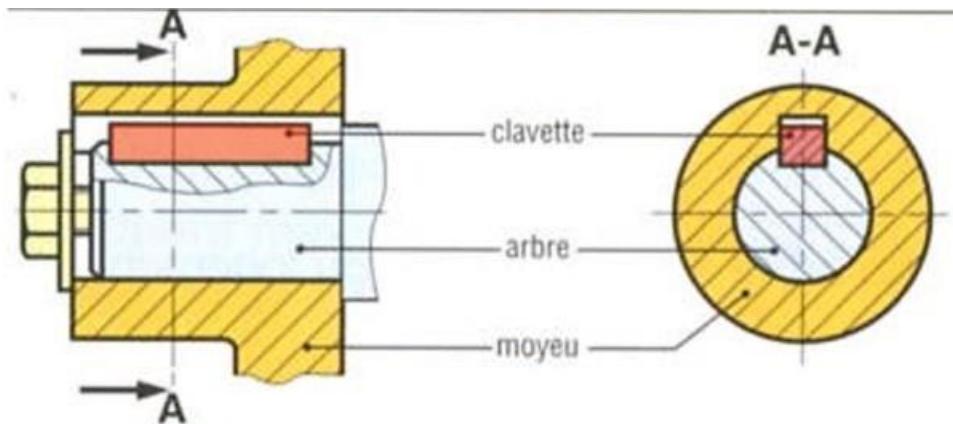


Fig.41. Clavetage

Le Clinchage

C'est une technique d'assemblage mécanique de tôles métalliques (3) et (4). Le principe de base est de connecter deux tôles métalliques par emboutissage entre un poinçon (1), guidé par une presse (2), et une matrice (5), et éjectées par un doigt (6). Les tôles subissent localement une déformation plastique à froid, formant un point de connexion. Le formage à froid est utilisé comme technique d'assemblage. Voir un exemple.

Le clinchage présente d'importants avantages :

- Il ne nécessite pas d'apport de matière comme avec la soudure ou le brasage;
- Il permet d'assembler des tôles d'épaisseurs différentes;
- Il permet l'utilisation de tôles de matières différentes (ex. alu et acier);
- Il permet l'utilisation de tôle déjà peinte ou traitée anti-corrosion.
- Par contre c'est un assemblage non étanche

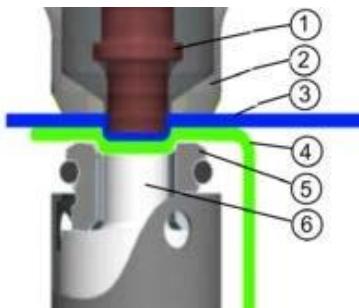


Fig.42. Le Clinchage

Le frettage

C'est l'assemblage de deux pièces grâce à un ajustement serré.

La pièce extérieure est appelée « frette », la pièce intérieure est dite « frettée ».

L'assemblage est réalisé avec des tolérances d'usinage qui interdisent son montage à la main ou même à la presse. La solution la plus simple, quand elle est possible sans détérioration du matériau, est de chauffer la frette pour la dilater avant de l'enfiler sur l'élément qu'il faut frettter. On peut à l'inverse refroidir l'élément intérieur à l'azote liquide ou à la glace carbonique pour le contracter et l'engager dans la frette, mais ces solutions sont plus onéreuses. Dans certains cas, par exemple pour des outils de frittage ou de forgeage, on est obligé de pratiquer en même temps la dilatation de la frette et la contraction de l'élément fretté.

Le frettage se pratique le plus souvent sur des pièces de révolution pour lesquelles il est plus facile de maîtriser les tolérances d'usinage et les contraintes engendrées dans les matériaux.

Utilisation : La plupart du temps on pratique le frettage pour assurer la cohésion d'un ensemble d'éléments ou pour éviter l'éclatement d'un élément sous pression.

Les cercles qui ceinturent les tonneaux pour assurer l'étanchéité des douelles, les bandages des anciennes roues de chars en bois, sont des frettes.

Les anneaux que l'on voit autour des parties basses des conduites forcées, ou ceux qui ceinturent les outillages de frittage, de filage par chocs, etc., sont également des frettes.

L'emboîtement élastique

C'est un mode d'assemblage (une emboîture) où les éléments sont déformés lors de l'introduction. Après la construction, il n'y a plus de contraintes et les éléments ne peuvent être plus séparés. La vue en coupe ci-contre en expose graphiquement le principe : la pièce bleue (pièce mâle) ne peut manifestement plus bouger sans déformer la pièce verte (pièce femelle).

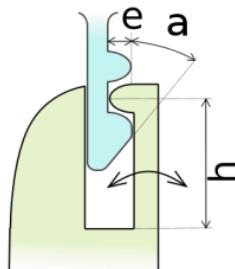


Fig.43. Emboîtement élastique

Un embrèvement

C'est une technique d'assemblage pour deux pièces (de bois ou de tôle). L'une des pièces possède la languette ou le tenon destiné à s'emmancher dans la rainure ou la mortaise de l'autre pièce. En menuiserie et charpente, normalement, la largeur de l'embrèvement est égale à environ un tiers de la largeur totale de la pièce.

En tôlerie, c'est une forme emboutie dans une tôle et destinée à servir de logement pour une pièce ne devant pas être en saillie.

Le sertissage

C'est une technique pouvant être utilisée pour l'assemblage de tôles (minces). Les bords des tôles sont rabattus et compressés.

Un exemple connu du sertissage est l'assemblage entre le fond et le corps d'une boîte de conserve.

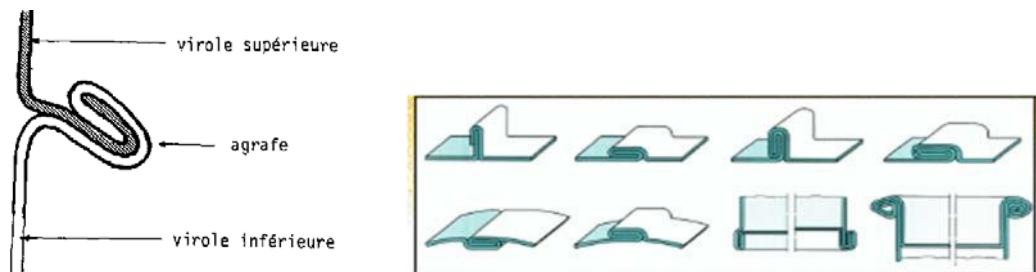


Fig.44. Le sertissage