



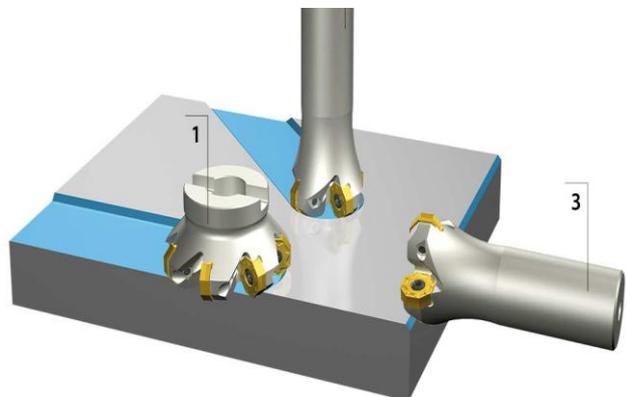
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

Université Abderrahmane Mira de Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil

## Polycopié du Cours de la Matière :

### Technologie de Base

Au profil des étudiants de la 2<sup>ème</sup> Année Licence du socle tronc commun



Elaboré par;  
Dr. SELLAMI Asma

2020/2021

# Table des Matières

---

## *Table des matières*

### Préface

#### **Chapitre I : Généralités sur les Matériaux**

I .1- Les Métaux et les alliages et leurs désignations.....	<b>03</b>
I .2- Les polymères (les matières plastiques) .....	<b>17</b>
I .3- Les matériaux composites .....	<b>23</b>
I .4- Autres matériaux.....	<b>27</b>

#### **Chapitre II : Procédés d'obtention des pièces sans enlèvement de matière**

II.1- Moulage, forgeage, estompage, laminage, tréfilage, extrusion,...etc.	<b>31</b>
II.2- Découpage, pliage et emboutissage, etc.....	<b>40</b>
II.3- Frittage et métallurgie des poudres, etc.....	<b>43</b>
II.4- Profilés et tuyaux en acier et en aluminium.....	<b>45</b>

#### **Chapitre III : Procédés d'obtention des pièces par enlèvement de matière**

III.1- Tournage .....	<b>55</b>
III.2- Fraisage .....	<b>57</b>
III.3 – Perçage .....	<b>59</b>
III.4- Ajustage, etc.....	<b>63</b>

# Table des Matières

---

## Chapitre IV : Techniques d'Assemblage

IV.1- Boulonnage .....	68
IV.2- Rivetage.....	72
IV.3 – Soudage, etc. ....	73
IV.3.1- Soudage hétérogène .....	73
IV.3.2- Soudage autogène .....	75
IV.4 – Frettage .....	78
IV.5 – L'emboitage élastique .....	78
IV.6 – Sertissage .....	79
IV.7 – Collage .....	79

## Références Bibliographiques

# PREFACE

---

## PREFACE

Le présent document consiste à donner un aperçu général sur les différents modes de fabrication des pièces. Il s'agit d'un support du cours de la matière "Technologie de base" destiné aux étudiants de la 2<sup>ème</sup> année en génie civil.

Le cours est structuré selon le programme des enseignements du socle tronc commun, 3<sup>ème</sup> semestre ST.

Le support de cours est composé de quatre chapitres principaux ;

Au **Premier Chapitre**, l'étudiant(e) aura tout d'abord des généralités sur les grandes familles des matériaux et en particulier les matériaux métalliques, ensuite au **Deuxième Chapitre**, nous allons présenter les différents procédés d'obtention des pièces sans enlèvement de la matière tel que ; ( la technique de moulage, forgeage, laminage.....etc.), et pour le **Troisième Chapitre** nous allons citer les différentes techniques de fabrication des pièces par enlèvement de la matière telle que (le tournage, fraisage, perçage.....etc.) , et enfin au **Quatrième chapitre**, nous allons exposer les différentes méthodes d'assemblage telle que ( Assemblage permanent, Assemblage démontable , Assemblage direct et indirect...etc.), et vers la fin nous allons terminer par conclusion générale.

Afin de rédiger ce polycopié, j'ai essayé de respecter le programme national exigé par le ministère d'enseignement supérieur et de la recherche scientifique et de suivre les références bibliographiques citées dans le canevas.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur les Matériaux**

**Chapitre I : Généralités sur les matériaux**

I .1.Définition du matériau .....	<b>02</b>
I .2.Différentes familles.....	<b>02</b>
I .3. Principales caractéristiques des différentes familles des matériaux...	<b>03</b>
I .4. Généralités sur les Métaux et les Alliages et leurs désignations.....	<b>03</b>
I .4.1. Définition du Métal.....	<b>03</b>
I .4.2. Définition d'Alliage .....	<b>04</b>
I .4.3. Caractéristiques du Métal.....	<b>05</b>
I .4.4. Structure des métaux et des alliages .....	<b>05</b>
I .4.5. Les métaux ferreux et leurs alliages.....	<b>06</b>
I .4.6. Alliages Non ferreux.....	<b>14</b>
I .5. Les polymères .....	<b>18</b>
I .6. Les matériaux composites .....	<b>23</b>
I .7. Autres matériaux .....	<b>27</b>
I .7.1. Les céramiques .....	<b>27</b>
I .7.2.Les propriétés des céramiques .....	<b>27</b>
I .7.3. Les différents types des céramiques .....	<b>28</b>

### I.1.Définition du matériau :

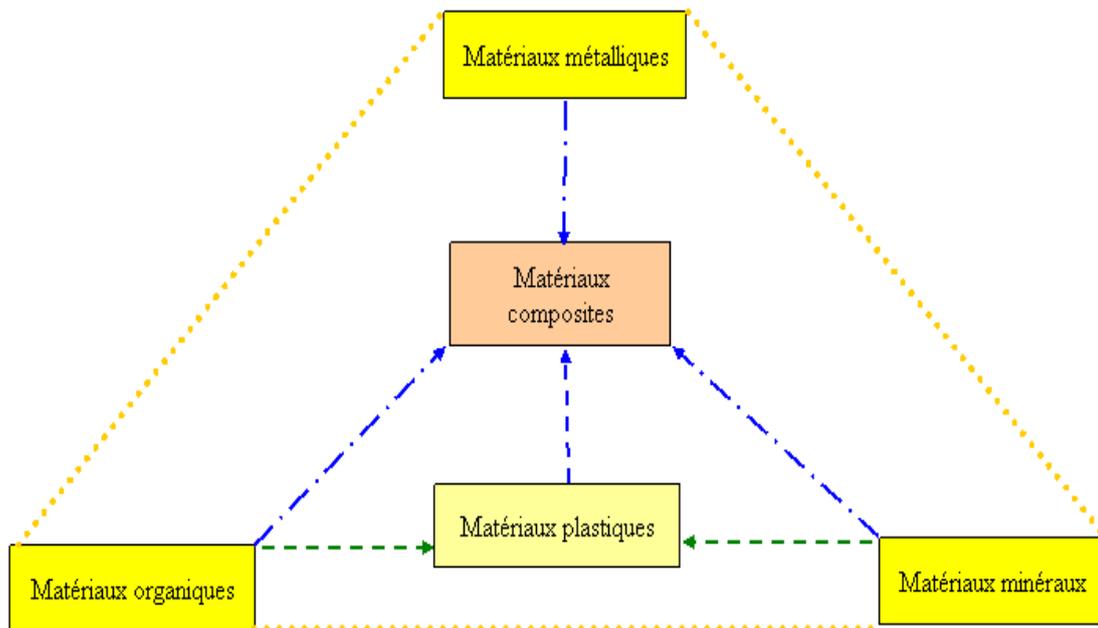
Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'Homme utilise et/ou conçoit pour fabriquer des objets, construire des bâtiments ou des machines.

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

### I.2.Différentes familles

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 des matériaux, nous distinguons :

- **Matériaux métalliques** : Ce sont les métaux purs et leurs mélanges, ou alliages, comportant essentiellement des liaisons métalliques.
- **Matériaux organiques** : Ce sont les matériaux d'origine biologique, les polymères et élastomères de synthèse, comportant des liaisons covalentes et des liaisons faibles.
- **Matériaux minéraux** : Ce sont les roches, oxydes, verres minéraux, céramiques comportant des liaisons ioniques et/ou des liaisons covalentes.
- **Matériaux composites** : Ils associent de manière structurée à fine échelle des matériaux différents, appartenant éventuellement à des classes différentes parmi les trois précédentes.



### I.3. Principales caractéristiques des différentes familles des matériaux

Les matériaux sont caractérisés par différentes propriétés telles que ;

- La résistance mécanique
- La rigidité
- La dureté
- Résistance aux torsions
- La conductivité électrique et thermique
- Résistance chimique
- La facilité de mise en forme
- L'élasticité.....etc.

### I.4. Généralités sur les Métaux et les Alliages et leurs désignations

#### I.4.1. Définition du Métal :

**Métal** : est un matériau, généralement solide, qui a la particularité d'être un bon conducteur de chaleur et d'électricité.

**Métal pur** : est un métal exempt de toute impureté c'est-à-dire contenant une pureté de 100% d'une seule espèce. Cela n'existe pas mais il peut atteindre une pureté de 99,9% pour le nickel, 99,99% pour le cuivre et 99,99% pour l'aluminium.

Les métaux représentent **2/3** des éléments du tableau périodique et environ **24%** de la masse totale de la planète.

On peut compter seulement (06) six métaux utilisés de manière très fréquente :

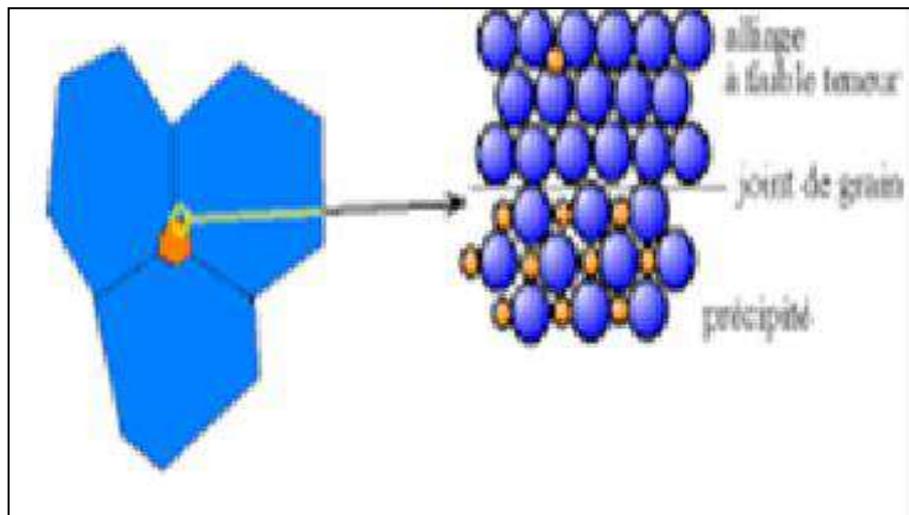
- Le fer, de symbole atomique Fe.
- Le cuivre, de symbole atomique Cu.
- Le zinc, de symbole atomique Zn.
- L'aluminium, de symbole atomique Al.
  - L'or, de symbole atomique Au.
  - L'argent, de symbole atomique Ag.



*Figure I.1 : Exemple d'un Métal (Or)*

#### I .4.2. Définition d'alliage

Un alliage est la combinaison d'un élément métallique avec un/ou plusieurs métaux par fusion, un métal pur a des caractéristiques mécaniques qui sont la plupart du temps relativement faibles.



*Figure I.2 : Exemple d'un Alliage*

### I.4.3. Caractéristiques du Métal

La densité est l'une parmi les caractéristiques les plus importantes pour les métaux, et cette caractéristique nous permet de distinguer les métaux et de les choisir pour remplir une fonction. Le tableau suivant présente la densité des métaux les plus utilisés :

Tableau I.1 : Densité des métaux les plus utilisés

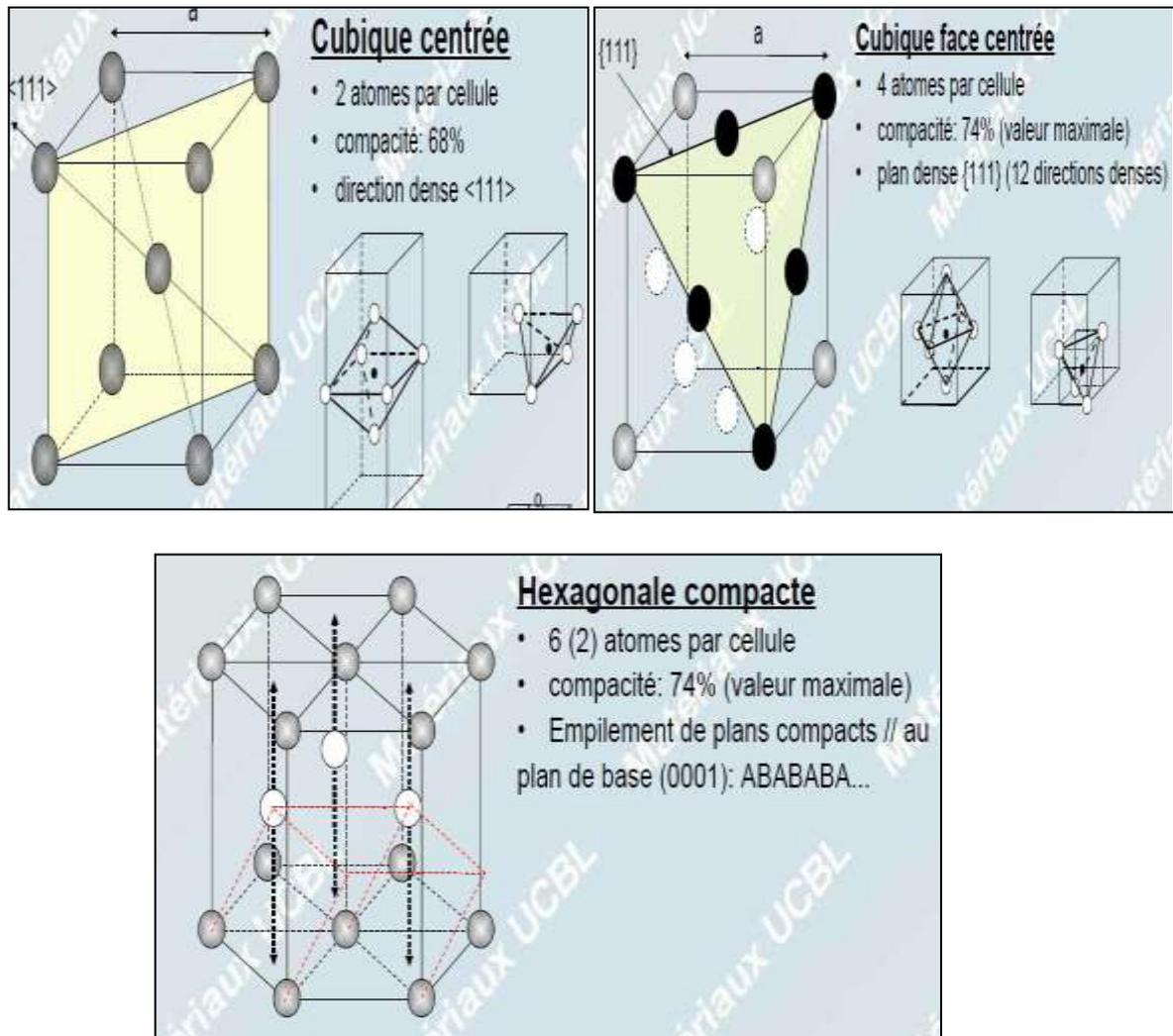
Métal	Densité
Aluminium	2.7
Zinc	7.2
Fer	7.8
Cuivre	8.9
Argent	10.5
Or	19.3

### I.4.4. Structure des métaux et alliages

L'observation des métaux et des alliages montre que ceux-ci ont une organisation interne appelée (**structure**).

La plupart des métaux comme la plupart des solides ont des structures cristallines cubiques **CC** (Exp; **V, Cr, Nb, Mo, W, Tib, Zrb**) ou cubique à faces centrées **CFC** (Exp; **Cu, Ag, Au, Al, Pb, Co, Ni, Rh, Pd, Ir, Pt, Fe-g**) ou hexagonales compacte **HC** (Exp; **Mg, Co, Cd, Zn, Tia, Zra, Be**).

Les Alliages des métaux utilisés sont obtenus par cristallisation de deux ou de plus de deux métaux, parfois avec des inclusions d'éléments non métalliques.



*Figure I.3 : Différentes structures des métaux [8]*

## I.4.5. Les métaux Ferreux et leurs Alliages

### I.4.5.1. Alliage Fer-carbone :

Le Métal de base est le **fer**, c'est le métal de base le moins cher. Il dispose de trois variétés allotropiques;

- Le fer  $\alpha$  (ferrite) présent jusque **906°C.**, de structure cubique centrée (**C.C.**).
- Le fer  $\gamma$  (austénite) stable entre **906** et **1400°C.**, de structure cubique à faces centrées (**C.F.C.**).
- Le fer  $\delta$  est stable entre **1400** et **1528°C.**, de structure cubique centrée (**C.C.**).

**Le Carbone** : Il fond à **3500°C.**, il dispose de trois variétés allotropiques (le graphite, le diamant, et le noir de fumée). Il est le composant essentiel (après le fer) des aciers et des fontes.

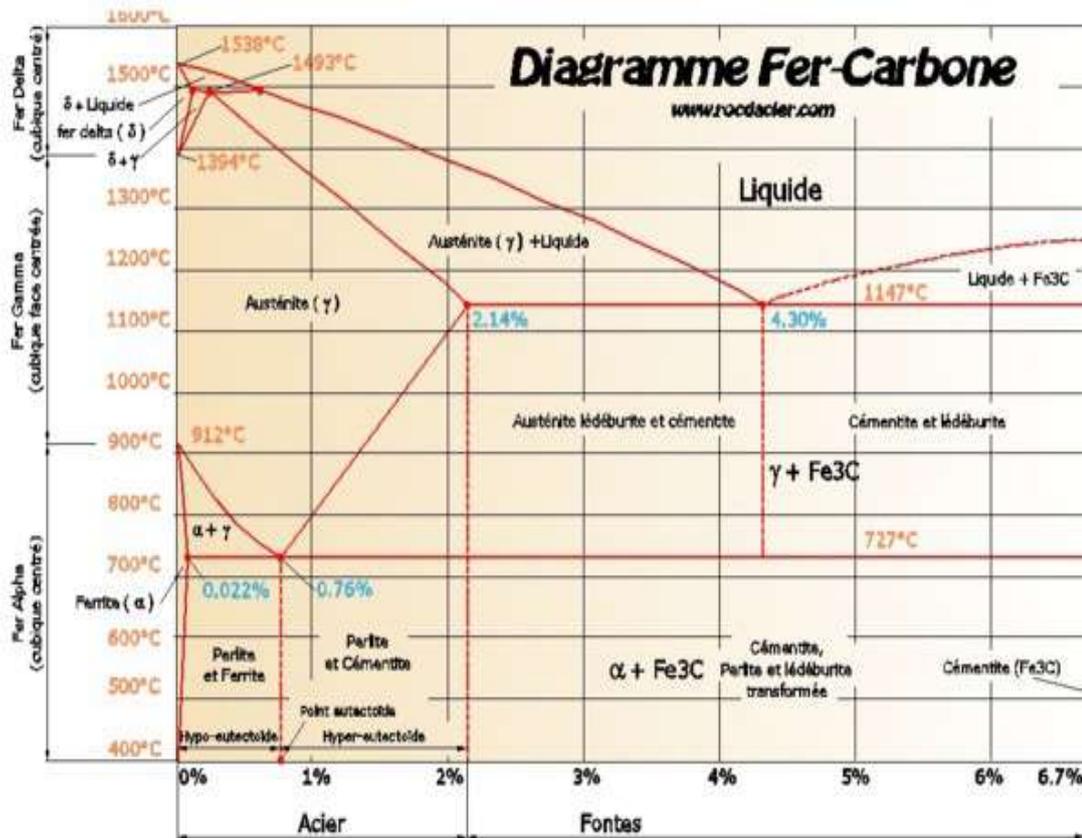


Figure I.4 : Diagramme (Fer-Carbone) [11]

#### I.4.5.2. Les éléments additions :

L'objectif des éléments additions est de modifier les caractéristiques d'un alliage **Fer-Carbone**.

Ces modifications dépendent des éléments ajoutés et de leurs pourcentages.

**Exemple** : Nickel, manganèse, molybdène, cobalt, chrome, silicium, phosphore, tungstène, titane, vanadium...

- L'aluminium augmente légèrement la trempe.
- Le chrome augmente la résistance à la corrosion et à l'oxydation.
- Le plomb améliore l'usinabilité
- Le soufre est considéré comme impureté

### I.4.5.3. Alliage à base du Fer :

Les alliages à base de Fer (**aciers 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
- Les Fontes

#### I.4.5.3.1 Les Aciers et leurs désignations

**L'acier** : est un alliage de **Fer** et de **Carbone** renfermant au maximum **2 %** de ce dernier élément. 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 refroidit à une vitesse assez grande.

Parmi les 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 deux types :

- Aciers alliés
- Aciers non alliés

##### I.4.5.3.1.1 Aciers alliés

Il existe deux grandes familles :

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

Tableau I.2: Facteurs de multiplication des différents éléments d'adition

Eléments	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	1000

*Exemple :*

**13MnS 4-1 : Acier faiblement allié**

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

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

$$\% S = 1/100 = 0,01\%$$

**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 la 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**

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

$$\% Cr = 18\%$$

$$\% Ni = 10\%$$

$$\% Ti < 1 \%$$

### I.4.5.3.1.2 Aciers Non alliés

Ce genre d'acier est divisé en trois types ;

- **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 la 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%**

### I.4.5.3.2 Les fontes et leurs désignations

La fonte s'obtient dans les hauts fourneaux à partir de minerai du 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** sont 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 qu'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 **Rm** : 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).

- **Fonte grise à graphite lamellaire**: La fonte à graphite lamellaire **FGL**. C'est la plus courante des fontes grises. Le graphite s'y trouve sous forme de lamelles.

**Désignation ; FGL** valeur de la résistance minimale à la rupture par extension

**Exemple :**

**EN-GJL 250 : Fonte à graphite lamellaire**

**Rm = 250 MPa**

**EN-GJL 350 : Fonte à graphite lamellaire**

**Rm = 350 MPa**

**Les principales qualités des fontes GL sont :**

- ✓ Facilité d'usinage
- ✓ Très bonne résistance à la corrosion et à la déformation à chaud
- ✓ Très bonne absorption des vibrations
- ✓ Stabilité dimensionnelle (réalisation de machine outil silencieuse et stable géométriquement)
- ✓ Excellente coulabilité
- ✓ Prix du métal peu élevé

**Les principaux défauts :**

- ✓ Relativement fragile comparé aux aciers et aux fontes GS
- ✓ Les principales utilisations :
  - ✓ Toutes pièces mécaniques (différentes grades de résistance) ;
  - ✓ Bâtis de machines outils, bonne résistance aux vibrations ;
  - ✓ Tuyaux et canalisation (il est possible de couler des tubes de grande taille via le coulage par centrifugation).

- **Fonte grise à graphite sphéroïdale FGS** ; Fonte dans laquelle le graphite se trouve sous forme de nodules (sphéroïdes). Cette microstructure particulière est obtenue par l'ajout de magnésium dans la fonte peu de temps avant le moulage (si la fonte est maintenue en fusion, elle perd les spécificités des fontes GS au bout d'une dizaine de minutes). Le magnésium s'évapore mais provoque une cristallisation rapide du graphite sous forme de nodules. Cette microstructure lui donne des caractéristiques mécaniques proches de l'acier.

Désignation : **FGS** valeur de la résistance minimale à la rupture par extension, avec un allongement en % après la rupture.

**Exemples :**

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

Norme Européenne    moulé    fonte    sphéroïdal

**Rm = 350 MPa    A % = 22%**

**EN-GJS 400-18 : fonte à graphite sphéroïdal**

**Rm = 400 MPa**

**A % = 18%**

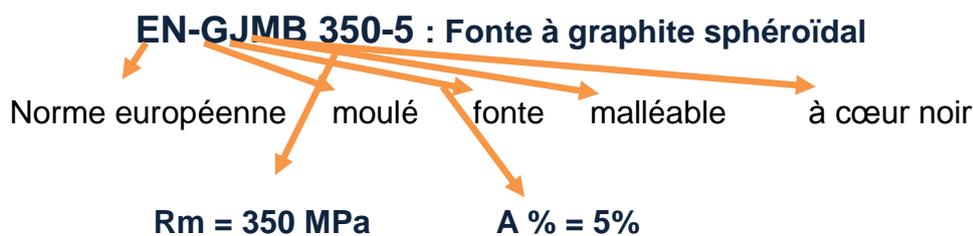
**Fonte blanche** ; il existe deux types de fonte blanche (fontes malléables MB et fontes malléables MN et MP)

- **Les fontes malléables MB** : Solution de perlite et de cémentite. Le carbone s'y trouve sous forme de carbure de fer ( $Fe_3C$ ). Possédant une bonne coulabilité, et un aspect blanc brillant, la fonte blanche est principalement utilisée pour les pièces d'aspect, les pièces d'usure (telles que les pointes de socs) et la fonderie d'art. La présence de carbure la rend très résistante à l'usure et à l'abrasion, mais la rend aussi très difficilement usinable.
- **Les fontes malléables MN et MP** : leurs propriétés sont proches de celles de MB et de l'acier. Elles peuvent être moulées en faibles épaisseurs et sont facilement usinables (carters, boîtiers...).

Désignation : similaire aux fontes **FGS**.

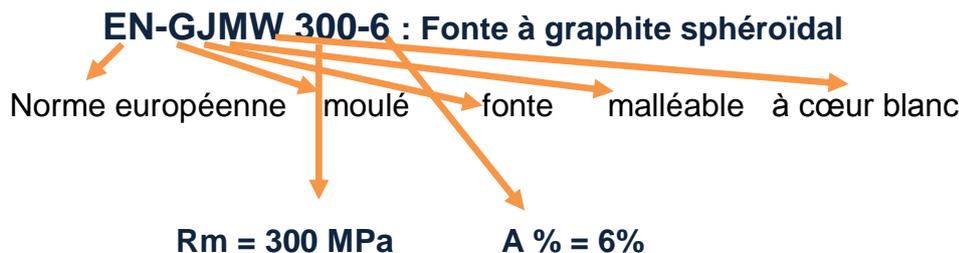
**-Fontes malléables à « cœur noir »** : Connues depuis une centaine d'années, ces fontes malléables « à cœur noir » à cause du graphite.

**Exemples :**



**-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

**Exemples :**



### I .4.5. 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.

#### I .4.5.1. Alliages d'Aluminium

Fabriqués industriellement depuis 1886 à partir de bauxite et de cryolithe, ces métaux sont les plus utilisés justes après les fontes et les aciers.

Ils sont souvent nommés « alliages légers » du fait de leur masse volumique nettement inférieure à celles d'autres métaux utilisés dans l'industrie. Les alliages d'aluminium présentent beaucoup d'avantages :

✓ **Principales 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 (5fois 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/m<sup>3</sup>**,

Désignation des alliages d'aluminium ; On distingue deux grandes classes d'alliages d'aluminium:

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

**Désignation** : comporte les éléments suivants :

- Le préfixe **EN** suivi d'un espace
- La lettre **A** qui représente l'aluminium
- La lettre **W** qui représente les produits corroyés
- Un tiret -
- Quatre symboles représentant la composition chimique

**Exemples;**

**EN AW-Al Cu 4 Mg Si** (Alliage d'aluminium contenant 4% du cuivre, un peu du magnésium et un peu du silicium)

- **Les alliages de moulage** : obtenus par fonderie seulement.

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 ;**

**Alliage d'aluminium moulé contenant 10% du silicium et du magnésium**

**AlSi10Mg**

### **I .4.5.2. Alliages du Cuivre**

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

**Les grandes familles de ces alliages sont :**

- ✓ les laitons : cuivre-zinc (exemple : **CW 612 N**, appellation chimique : CuZn39Pb2)
- ✓ les bronzes : cuivre-étain (exemple : **CW 460 K**, appellation chimique : CuSn8PbP)
- ✓ les cupro-aluminiums : cuivre-aluminium ;
- ✓ les cupronickels : cuivre-nickel ;
- ✓ les maillechorts : cuivre-nickel-zinc ;
- ✓ les cupro-siliciums : cuivre-silicium ;
- ✓ les cupro-plombs : cuivre-plomb ;
- ✓ les billons : cuivre-argent ;
- ✓ les zamaks : zinc-aluminium-magnésium-cuivre (où le cuivre est minoritaire).

**Les principaux avantages du cuivre sont :**

- Une très bonne conductibilité électrique et thermique
- Une résistance convenable à l'usure
- Température de fusion : **1 080 °C**, -Masse volumique : **8.9 g/cm<sup>3</sup>**.
- 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 du cuivre pour du matériel électrique (conducteur, transformateur, moteurs électriques...),

Le reste de la production est principalement utilisé pour les tuyaux à l'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...

**Désignation** : comporte les éléments suivants :

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 :** 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.

### **I .4.5.3. Alliages du Zinc.**

Les principaux avantages des alliages de zinc sont leur faible température de fusion (~ **420 °C**) et leur excellente coulabilité. Ils sont donc principalement destinés à la fonderie, ce qui permet d'obtenir des pièces de forme très complexe et d'épaisseur très mince (~ **0,4 mm**). Leur faible coût de revient permet de concurrencer les alliages d'aluminium ou de cuivre et même souvent les matières plastiques. On utilise largement les alliages de zinc dans l'automobile (carburateur, pompe à essences...), dans l'électroménager, en quincaillerie et en mécanique de précision (appareils photographiques, horlogerie...)

Les principaux alliages de zinc sont les zamaks qui contiennent **4 % d'aluminium, 0,04 % de magnésium** et **1 % de cuivre** ou pas du tout.

*Exemple de désignation ;*

**Zamak 3: Z - A4G**

**Zamak 5: Z - A4 U1 G.**

#### **I .4.5.4. Alliages du Nickel**

Le nickel pur a des caractéristiques mécaniques moyennes et résiste bien en milieu réducteur. L'addition d'autres éléments permet d'obtenir des alliages plus résistants mécaniquement et d'étendre leur domaine de résistance à la corrosion. Le chrome augmente sa tenue à la corrosion aux agents oxydants.

Le molybdène ajouté seul ou conjointement au chrome augmente la tenue à la corrosion dans de nombreux milieux (**sulfurique, chlorhydrique et marin**).

#### **I .4.5.5. Alliages du Titane**

Les caractéristiques tout à fait particulières du titane et de ses alliages en font un métal de choix pour de nombreuses utilisations, notamment dans les domaines aéronautiques et aérospatial et dans l'industrie chimique, se situe entre celle de l'aluminium et du fer ; toutefois, le rapport résistance mécanique sur masse volumique des alliages du titane est nettement supérieur à celui des autres métaux. Sa masse volumique est égale à **4540 kg/m<sup>3</sup>**, et sa Température de fusion = **1670 °C**

La résistance à la corrosion du titane et de ses alliages est excellente (le titane est passivable grâce à la formation d'un film protecteur de TiO<sub>2</sub>) ; elle est supérieure à celle des aciers inoxydables. Les alliages du titane peuvent manifester une bonne tenue mécanique à chaud (vers **700°C**) et une bonne résistance à l'oxydation ; cependant, à des températures plus élevées, ils risquent de se charger en impuretés (**oxygène, hydrogène**), ce qui altère leurs propriétés mécaniques.

#### **I .4.5.6. Alliages du Magnésium**

Le magnésium est principalement utilisé dans les alliages aluminium-magnésium. On l'utilise aussi pour faciliter l'élimination du soufre dans la métallurgie du fer et des aciers.

Il permet la fabrication de la fonte à graphite sphéroïdal, dans laquelle le graphite se trouve sous forme des nodules (sphéroïdes).

## I.5. Les polymères ; Les 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 tels 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 sont des substances organiques macromoléculaires, sont obtenus par l'assemblage des monomères de base. Cette opération s'appelle la polymérisation.

On distingue deux principaux types de polymérisation :

### ➤ 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 la naissance d'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.

Parmi les polymères on trouve les Matières plastique ;

## I .5.1.Matière Plastique

### I .5.1. Généralités sur les plastiques

A nos jours les pièces en matières plastiques peuplent notre vie quotidienne dans tous les domaines d'utilisation. La matière plastique remplace les autres matériaux à savoir, le métal, le carton, le bois, les verres, la céramique et autres matériaux. Qu'il s'agisse des châssis des fenêtres dans le bâtiment, des éléments de carrosserie et autres composants dans les domaines de l'automobile, de l'aéronautique et navale aussi les meubles, les appareils électroménagers, le matériel électrique, le matériel médical et les moyens de transport.

Partout l'utilisation des matériaux plastiques apportent des solutions de fabrications simples, de réalisations fiables et esthétiques suite à la diversité des procédés de mise en forme comme l'injection, l'extrusion et le thermoformage avec un prix de revient compétitifs, autant d'atouts qui concurrencent les autres matériaux tels que les métaux et le bois.

Produites essentiellement à partir du pétrole, les matières plastiques sont l'un des symboles du XXe siècle, Ces quelques dates montrent l'évolution rapide de cette industrie. Les exigences actuelles et les standards internationaux (aéronautique, espace) accélèrent le processus et l'intégration de la matière plastique.

**Tableau I.3:** Chronologie de découverte des matières plastique [9]

Famille	Désignation	Inventeur	Année	Première firme Productrice	Pays d'origine
NITRATE DE CELLULOSE	Celluloïd	Frères HYATT	1870	ALBANY DENTAL PLATE	U.S.A.
GALALITHE			1889		ALLEMAGNE
ACETATE DE CELLULOSE			1905	BAYER	ALLEMAGNE
PHENOPLASTE	Bakélite	BACKELAND	1909	GENERAL BACKELITE	U.S.A.
CELLULOSE régénérée	Cellulose	BRANDEN-BERGER	1915	La CELLOPHANE	FRANCE
ALKYDE			1926	GENERAL ELECTRIC	U.S.A.
POLYMETHACRYLATE de METHYLE	Plexiglas	WULFF	1927	ROHM et HASS	ALLEMAGNE
AMINOPLASTE	Pollopas	POLLAK	1928		U.S.A.
POLYSTYRENE		STAUDINGER	1930	I.G. FARBEN	ALLEMAGNE
POLYVINYLE		OSTROMY-SLENSKY	1931	I.G.FARBEN	ALLEMAGNE
POLYETHYLENE	Basse densité Haute densité		1937	I.C.I	GRANDE BRETAGNE
POLYVINYLIDENE	Saran		1940	DOW	U.S.A.

### I .5.2. Définition et Origine de la matière plastique

Le terme « plastique » décrit une grande variété de composés organiques obtenus par synthèse chimique. Produites essentiellement à partir du pétrole, les matières plastiques sont l'un des symboles du XXe siècle, La bakélite (1909) est le plus ancien plastique entièrement synthétique.

Il existe également des plastiques naturels : poix, latex, bitume, brai, résines, laques, ambre, écaille, corne, et des plastiques d'origine animale généralement extraite du lait et utilisé dans la fabrication des produits médicaux.

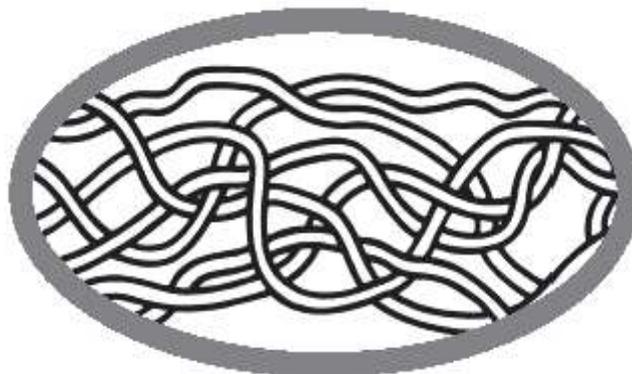
La matière plastique est composée principalement de polymères, qui a la propriété de se mettre en forme facilement par moulage, extrusion, coulage après un chauffage modéré (100-300 °C).

La matière plastique obéit aux lois de la chimie organique, les matières plastiques sont toutes à base des dérivés du carbone, elles sont classées dans les composés organiques. On considère généralement 3 types de familles dans les plastiques:

- ✓ Les thermoplastiques
- ✓ Les thermodurcissables
- ✓ Les élastomères

#### I .5.1.1. Les thermoplastiques ;

Ces composés sont constitués d'enchaînement "unidimensionnels", résultant de molécules simples. Par chauffage ou refroidissement successifs, on peut modifier l'état physique et la viscosité de ces matières d'une façon réversible.



**Figure I.5 :** Structure des matières thermoplastiques [9]

C'est de loin la famille la plus utilisée : ils représentent près de 90 % des applications des matières plastiques. Ils sont moins fragiles, plus faciles à fabriquer (machine à injecter et cadences élevées) et permettent des formes plus complexes que les thermodurcissables. Ils existent sous forme rigide ou souple, compacte ou en faible épaisseur, sous forme de feuille très mince (film...), de revêtement, expansé ou allégé...

✓ **Propriétés principales.**

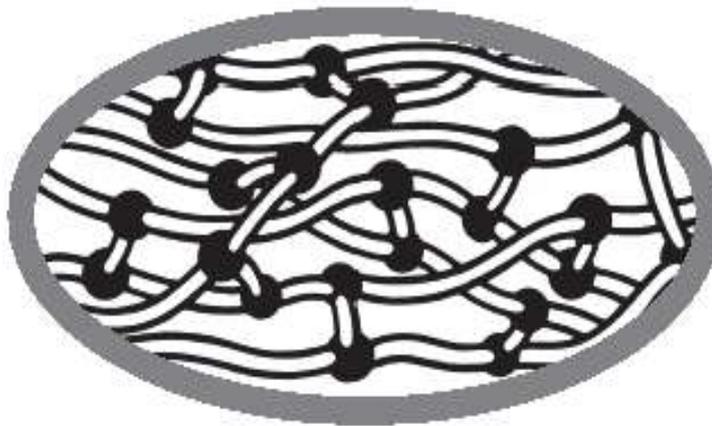
-Ils ramollissent et se déforment sous l'action de la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et remodelés un grand nombre de fois tout en conservant leurs propriétés ; ils sont comparables à la cire ou à la paraffine.

-Insensibles à l'humidité, aux parasites, aux moisissures (sauf polyamides) ils peuvent être fabriqués dans une gamme de couleurs très étendue.

✓ **Inconvénients** : fluage élevé ; coefficient de dilatation linéaire élevé, entraînant un retrait important au moment du moulage ; combustible ; sensible aux ultraviolets.

### I.5.1.2. Les thermodurcissables

Ces composés sont constitués par des macromolécules s'étendant dans les trois directions de l'espace, d'autant plus rigides que le réseau tridimensionnel est dense. L'objet final est dans un état irréversible (infusible, insoluble).



*Figure I.6 : Structure des matières thermodurcissables [9]*

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créée il n'est plus possible de les remodeler par chauffage. Au moment de la mise en œuvre, ils ramollissent dans un premier temps, puis durcissent d'une manière irréversible sous l'action prolongée de la chaleur.

✓ **Propriétés principales.**

-Ils présentent une bonne tenue aux températures élevées ( $> 200^{\circ}\text{C}$ ), aux attaques chimiques,

-Une meilleure résistance au fluage que les thermoplastiques (conservent une meilleure stabilité dimensionnelle dans le temps), une bonne rigidité pour un prix de matière première peu élevé et faible retrait au moulage.

- ✓ **Inconvénients** : mise en œuvre moins pratique et plus lente que les thermoplastiques ; pas du moulage par injection et cadences de fabrication assez faibles.

**I .5.1.3. Les élastomères ou caoutchoucs**

Ils sont obtenus par synthèse chimique, comme les plastiques, et possèdent des propriétés comparables à celle du caoutchouc naturel. Le néoprène (1930) fut le premier caoutchouc de synthèse.

Les élastomères sont des matériaux aux propriétés bien particulières. Ce sont des polymères de haute masse moléculaire et aux 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.

✓ **Propriétés principales.**

- La propriété la plus remarquable est l'élasticité ou la capacité à s'allonger sans se rompre (A% très élevé, jusqu'à 1000 %). À l'opposé le module d'élasticité longitudinal **E** reste très petit (< 10 N/mm<sup>2</sup> : près de 200 000 pour les aciers) traduisant une faible rigidité.



Figure I.7 : Exemples d'utilisation des plastiques [9]

## I.6. Les matériaux composites

### I.6.1. Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de nature différente. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels;

Les renforts se présentent sous forme des fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres et leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure.

### I.6.2. Composition

Un composite est un ensemble de deux matériaux différents (**Matrice** et **Renfort**) ;

#### I.6.2.1. Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de **2200°C** peuvent être atteintes.

La classification des types des matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure I.8.

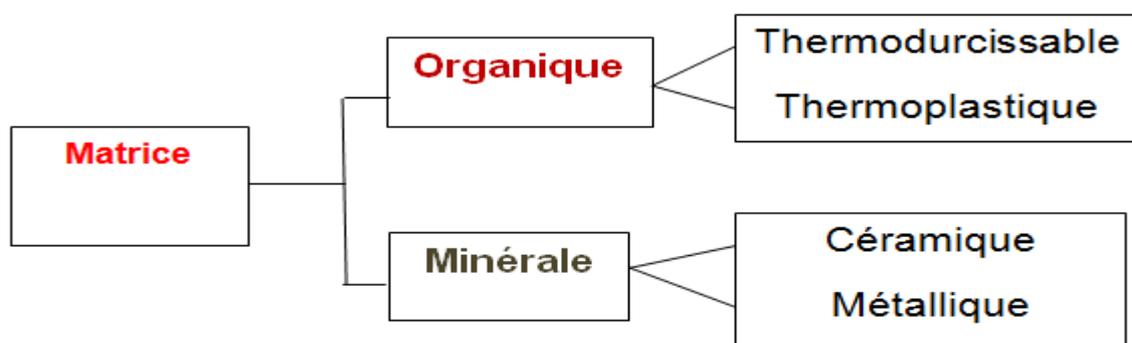


Figure I.8 : Types des Matrices

- **Résines thermodurcissables** ; Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyester insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrés sont 914, 5208, 70, LY556.
- Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau I.4.

**Tableau I.4:** Caractéristiques des résines Thermodurcissables [7]

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon_t^R(\%)$	$\sigma_t^R$ (MPa)	$\sigma_c^R$ (MPa)	E (GPa)
polyesters	60 à 100	1 140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
phénoliques	120	1 200	2,5	40	250	3 à 5
epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

- **Résines thermoplastiques** ; Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrés sont PEEK, K3B.

De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau I.5.

**Tableau I.5:** Caractéristiques des résines Thermoplastiques [7]

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon_t^R(\%)$	$\sigma_t^R$ (MPa)	$\sigma_c^R$ (MPa)	E (GPa)
polyamide	65 à 100	1 140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypropylène	900	1 200		20 à 35		1,1 à 1,4

- **Additifs.** ; Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques (charges renforçantes, ex : charges sphériques creuses 5 à 150µm). Des charges non renforçantes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites.

### I.6.2.2. Renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure I.9.

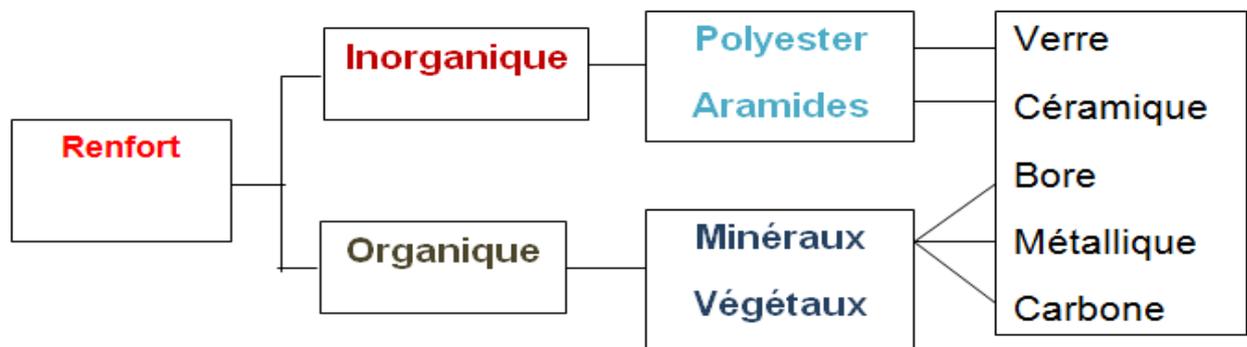


Figure I.9 : Types des Renforts

### Quelques Exemples du renfort

- **Fibres de verre** ; Les fibres de verre ont un excellent rapport performance prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.
- **Fibres de carbone** ; Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres précurseur utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.
- **Fibres métalliques** : ce type des fibres, qui regroupent les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherche très important

dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion inter-faciale entre fibre et matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre, ce qui les conduit aux nombreuses variétés des fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et leurs modes d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0.1 et 0.7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm.

- **Fibres végétales** ; Les fibres végétales sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et l'argile étaient mélangés pour construire des murs. Ces fibres ont donc attiré une attention de plus en plus grande en raison de leur faible coût, leur densité peu élevée, leur biodégradabilité, leur disponibilité, et leur facilité de mise en œuvre. Ces avantages présentent l'intérêt pour leurs applications dans divers domaines tel que le bâtiment qui exigent des matériaux légers à haute performance, des possibilités de recyclage, le minimum d'impact sur l'environnement, et une réduction du coût de la matière. Parmi les fibres végétales les plus utilisés sont (les fibres du ; lin, jute, sisal, coton, diss, paille ...)

### I.6.3. Classification des composites

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

#### I.6.3.1. Les composites « grandes diffusions »

Les plus courants qui sont, pour un coût modéré, apportent des propriétés mécaniques intéressantes mais restent - sauf d'un cas **d'espèce-inférieures** à celles des métaux. Il s'agit pour l'essentiel de l'association renfort fibre de verre-résine polyester.

#### I.6.3.2. Les composites « hautes performances »

Qui apportent des caractéristiques mécaniques spécifiques supérieures à celles des métaux et utilisent généralement des renforts fibres du carbone ou d'aramide avec des résines époxydes. Les coûts de ces matériaux sont élevés.

### I.6.4. 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 mousses polymères, céramiques ou métalliques, qui sont également des matériaux composites.

### **I .6.5.Avantages;**

- La légèreté - Grande résistance à la fatigue
- Liberté de formes
- Maintenance réduite
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion
- Insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- Une bonne isolation électrique.
- Leur faible taux d'utilisation vient de leur coût.

## **I .7. Autres matériaux**

### **I .7.1. Les 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 ».

### **I .7.2. 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 zircon (ZrO<sub>2</sub>) et de titanate d'aluminium (Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>). 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 zircon et de nitrure de silicium (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)). Par souci d'allègement 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.

### I.7.3. Les différents types des céramiques

#### I.7.3.1. 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 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), pour les seconds le nitrure du 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.

#### I.7.3.2. 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 du calcium**) qui permettent la repousse des tissus.

#### I.7.3.3. 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 la fission nucléaire. Les céramiques servent globalement à la protection thermique et neutronique.

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

## **CHAPITRE II**

Procédés d'obtention  
des pièces sans  
enlèvement de  
matière

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

II.1 Introduction .....	31
II.2.1 Moulage .....	31
II.2.1.1. Techniques de moulage.....	32
II.2.2 Forgeage .....	36
II.2.3 Laminage.....	37
II.2.4 Tréfilage.....	38
II.2.5 Extrusion .....	39
II.3.1 Découpage.....	40
II.3.1.1 Découpage jet d'eau .....	40
II.3.1.2 Découpage Laser .....	41
II.3.2 Pliage.....	42
II.3.3 Emboutissage .....	43
II.3.4 Frittage et métallurgie des poudres .....	43
II.4. Profilés et tuyaux en acier, et en aluminium.....	45

### II.1 Introduction

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

#### II.2.1 Moulage

Le moulage consiste à verser dans une empreinte un métal liquide qui s'écoule par gravité ou sous pression et qui prend en se solidifiant la forme de l'empreinte.

Le démoulage est rendu possible par la différence de matière entre le moule et le métal coulé. Le moule subit toujours à un **Poteyage** avant l'introduction du métal en fusion (c'est un enduit sous forme d'un liquide protecteur qui facilitera son démoulage).

#### **Le Poteyage :**

Est un enduit dont on recouvre les surfaces des moules destinées à être en contact avec le métal liquide. En effet malgré le préchauffage des coquilles, leur température avant le remplissage est nettement inférieure à celle du métal en fusion.

Lorsque ce dernier pénètre dans l'empreinte, la température de celle-ci s'élève brusquement. Durant la solidification de la pièce et son éjection, la température de la surface baisse.

Les variations thermiques sont ainsi considérables en surface, alors que les couches sous-jacentes ont des variations bien plus amorties. Les couches superficielles bridées par les couches internes, supporte une succession des contraintes de la compression et de la traction pouvant être importantes.

**Son Rôle** est de ; protéger la coquille, ajuster le refroidissement, améliorer l'état de surface et un agent de démoulage.

### ➤ Remarques sur le moulage :

- La température de fusion du métal coulé doit être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule.
- Un moule métallique prend le nom de « coquille ».
- Le moulage permet d'obtenir économiquement des pièces compliquées.
- La fonte se moule mieux que l'acier. La fonte en fusion est plus fluide que l'acier en fusion.

### ➤ Les Etapes du moulage :

- Première étape ; il faut fondre le métal
- Deuxième étape ; verser dans le moule
- Dernière étape ; laisser le refroidir

### II.2.1.1. Techniques du Moulage

On distingue deux techniques principales du moulage ; Moulage en sable ou Métallique

#### a) Moulage en Sable

Pour ce genre du moulage, on utilise le sable, et le démoulage s'effectue par une destruction du moule. On doit donc fabriquer autant des moules que des pièces à fabriquer. Il existe plusieurs techniques d'obtention du moule en sable (sable humide ; durcissement thermique, chimique ou physique).

Le moule en sable est obtenu à partir d'un modèle permanent (généralement en bois, en résine ou en métal) ou unique (en Cire ou en Polystyrène) dans le cas du moulage à modèle perdu.

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

Cette technique convient bien pour des petites séries.

### Exemple d'obtention d'une pièce par moulage en sable, à joint horizontal

- Le châssis inférieur (2) est rempli de sable, puis compressé par la plaque modèle face externe (1) ;
- Le châssis supérieur (4), posé sur la plaque modèle face interne (5), est rempli de sable pressé par la plaque (3) ;
- La plaque (3) est retirée, un noyau (6') est déposé dans la partie inférieure du moule (6), puis le châssis (4) est positionné sur le châssis (2), centré par les goujons. Le moule ainsi formé peut recevoir le métal en fusion.
- Après décochage, la pièce (8) est débarrassée des masselottes (7) et peut rejoindre le parachèvement.

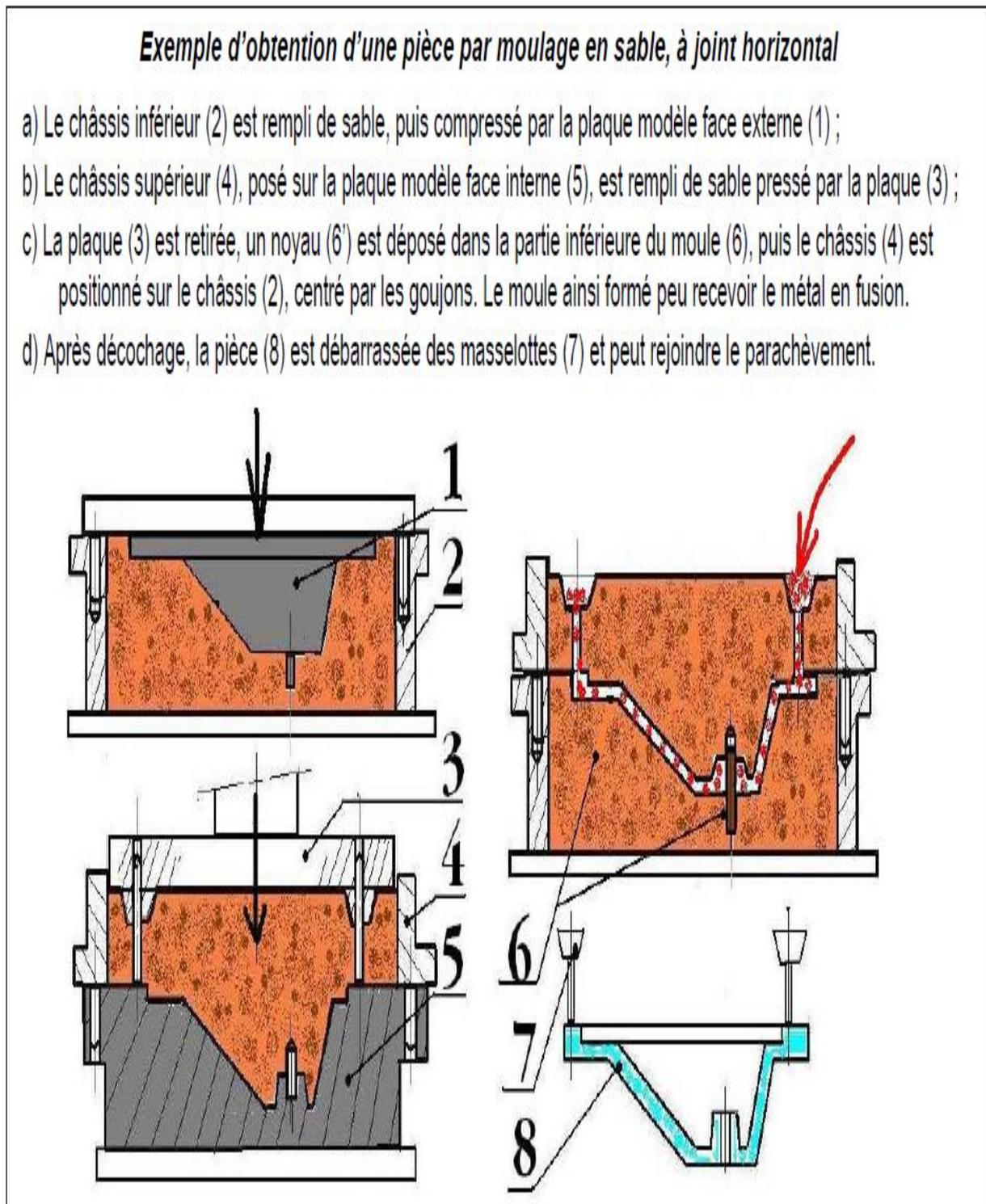


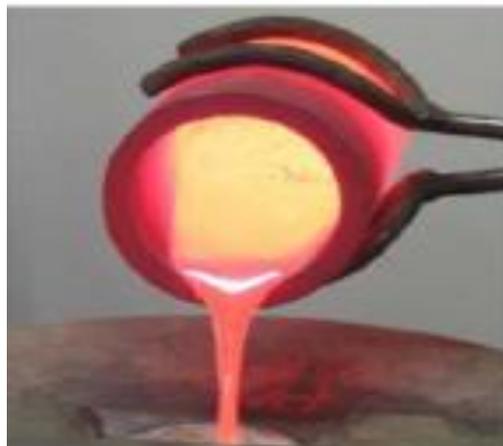
Figure II.1 : Exemple d'obtention d'une pièce par moulage en sable [6]

### b) Moulage Métallique

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

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 ( $R_a \gg 1,6 \text{ mm}$ ) et la précision obtenus sont moyens. Cette technique, dont l'outillage est moins coûteux que les suivantes, est adaptée pour les petites séries.



*Figure II.2 : Exemple d'un moulage par gravité [6]*

- ❖ **Moulage à basse Pression** ; La pression est faible (environ **0,2 à 2 bars**), le matériau liquide est introduit par le bas. Le procédé est semi-automatique, et souvent considéré comme une amélioration du moulage par gravité. Le coût de l'outillage est plus élevé, les cadences sont plus importantes, et l'état de la surface et la précision sont meilleurs. Cette technique est adaptée pour les petites ou grandes séries.

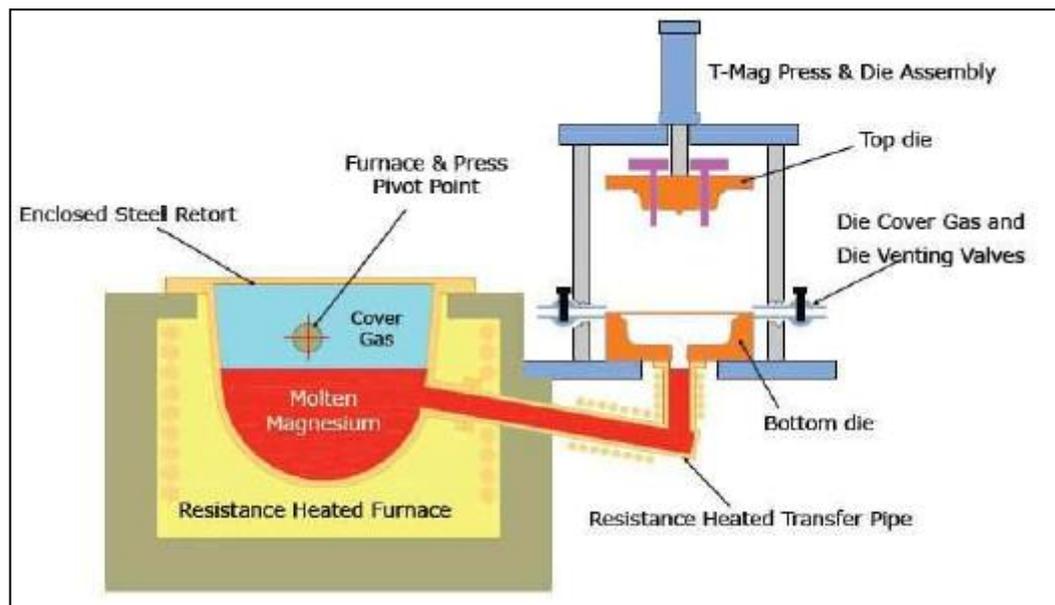


Figure II.3 : Exemple d'un moulage à basse pression [6]

- ❖ **Moulage sous pression ou 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 par heure). Le coût de l'outillage est très élevé. L'état de la surface et la précision des pièces obtenues sont bons.

Cette technique est adaptée pour les très grandes séries.

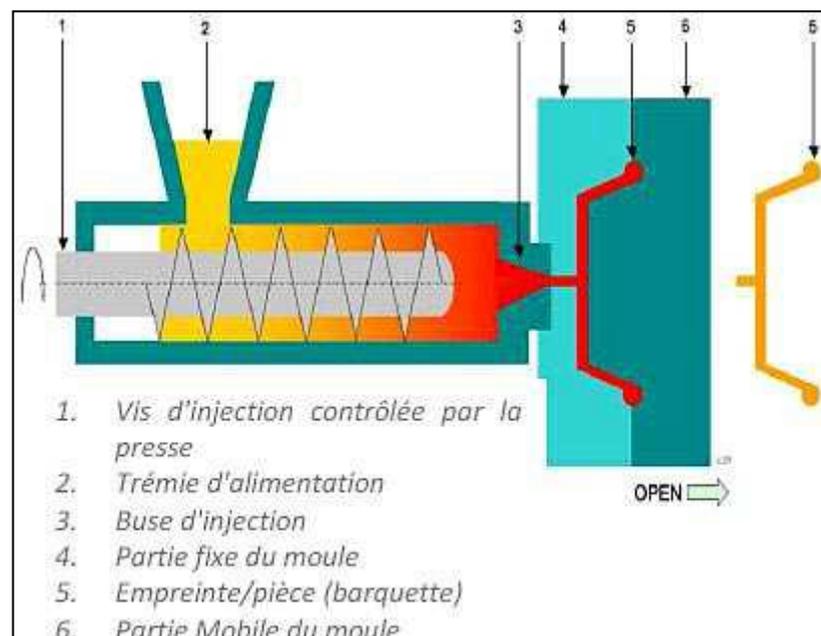


Figure II.4 : Exemple d'un moulage sous pression ou par injection [6]

### II.2.2 Forgeage

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.

Il existe deux méthodes différentes du Forgeage ;

- **Forgeage manuel** : C'est le forgeage traditionnel à l'enclume et l'outillage de frapper à main.



*Figure II.5 : Forgeage libre au marteau manuel [6]*

- **Le matriçage et l'estampage** ; Le matriçage et l'estampage sont deux termes synonymes. C'est un procédé de fabrication mécanique exécuté par les presses sur lesquelles sont fixées des « matrices ». Il permet de produire des grandes séries de pièces.

La forge par matriçage consiste à former par déformation plastique après chauffage des pièces brutes réalisées en alliages tels que les alliages d'acier d'aluminium, du cuivre, du titane, du nickel, etc.

On utilise deux matrices, une supérieure mobile, et une inférieure fixe.

Les matrices portent en creux la forme de la pièce.

La pièce « lopin » est comprimée entre deux matrices. La mise en forme se fait par chocs entre les deux matrices (figure II.5).

L'excédent du métal file en bavure dans le logement prévu à cet effet. La bavure est ensuite découpée en suivant le contour de la pièce.

Les pièces matriçées présentent des caractéristiques mécaniques remarquables : par suite des déformations plastiques importantes et rapides qu'il met en jeu, le matriçage affine la structure et permet l'orientation des fibres; ceci confère aux pièces

matricées des caractéristiques générales élevées en particulier (une grande résistance à la fatigue).

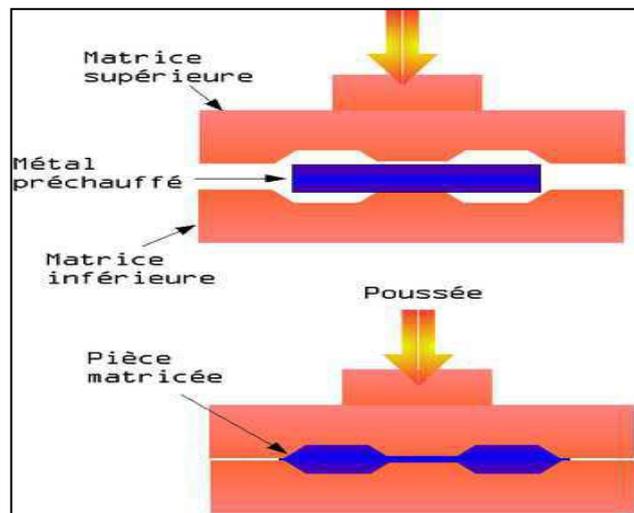


Figure II.6 : Estampage ou matricage [6]

### II.2.3 Laminage

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme du métal ou tout autre matériau sous forme pâteuse comme le papier. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres contrarotatifs appelés laminoir. Le laminage peut s'effectuer à froid ou à chaud.

Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau (généralement du métal). Il permet également la production de barres profilées (produits longs).



Laminage à froid de tôle fine  
(document SANDVIK)

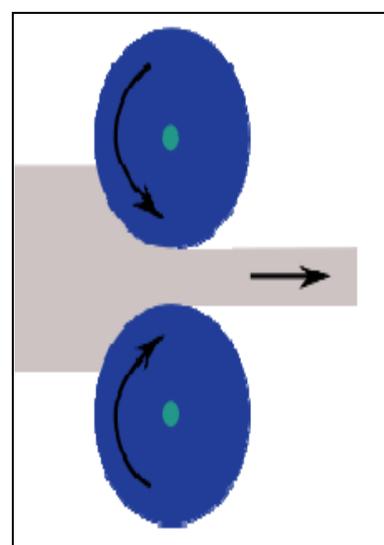


Figure II.7 : schéma de fonctionnement du laminage [6]

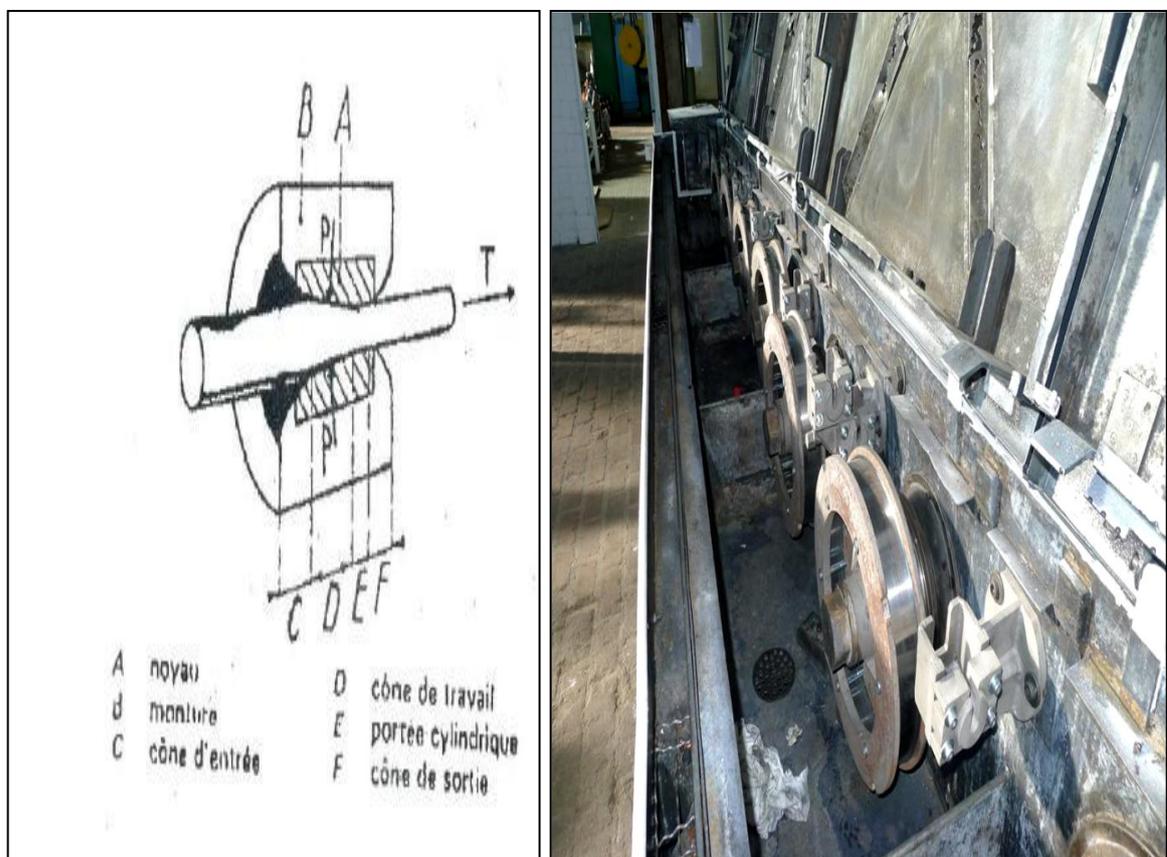
### II.2.4 Tréfilage

Le fil machine obtenu par les opérations de laminage est un produit intermédiaire, surtout dans la fabrication des câbles électriques, dont le fil doit avoir un diamètre plus petit. L'opération qui permet la réduction du diamètre du fil est dite **tréfilage**, la machine de tréfilage est appelée **tréfileuse**.

Le principe de tréfilage est d'utiliser la plasticité du métal pour réduire le diamètre du fil, par passage à travers un orifice calibré, appelé **filière** sous l'effet combiné d'application d'un effort de traction **T** et d'un effort radial de compression **P**.

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage. La forme qu'il convient de lui donner a fait l'objet de nombreux travaux théorique et expérimentaux.

Elle est constituée d'un noyau dur **A**, généralement en carbure en tungstène ou en diamant, fretté dans une monture **B** en acier.



*Figure II.8 : Profile d'une filière et Tréfileuse*

### II.2.5 Extrusion

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...).

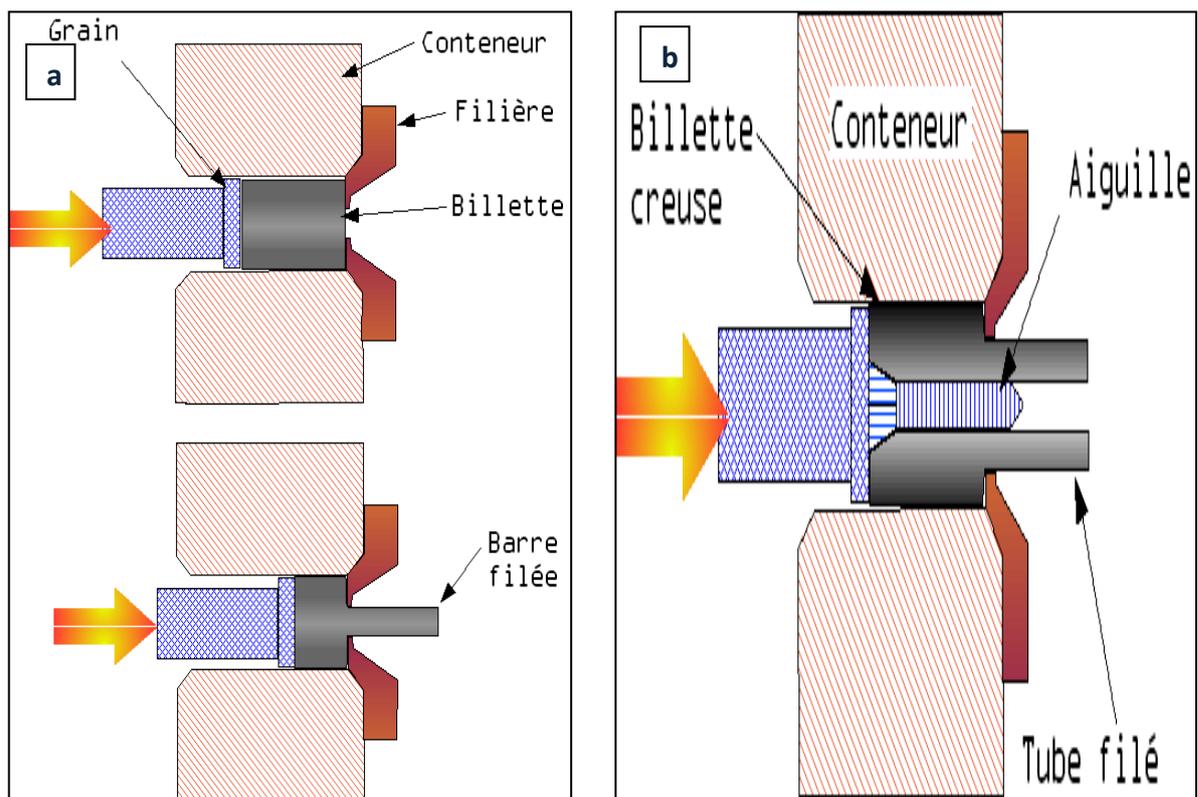


Figure II.9 : a) Extrusion de formes pleines, b) Extrusion de formes creuses par aiguilles [6]

- **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 ».

### II.3.1 Découpage

Le découpage est un procédé de fabrication des pièces, qui consiste à diviser un sous-produit en plusieurs parties. On distingue plusieurs techniques du découpage, on peut citer ;

**II.3.1.1 Découpage classique** ; mécanique, par un outil tranchant de profil fermé déplacé par une presse.

**II.3.1.2 Oxycoupage** ; jet d'oxygène pur sur un métal préalablement et localement chauffé à sa température de combustion.

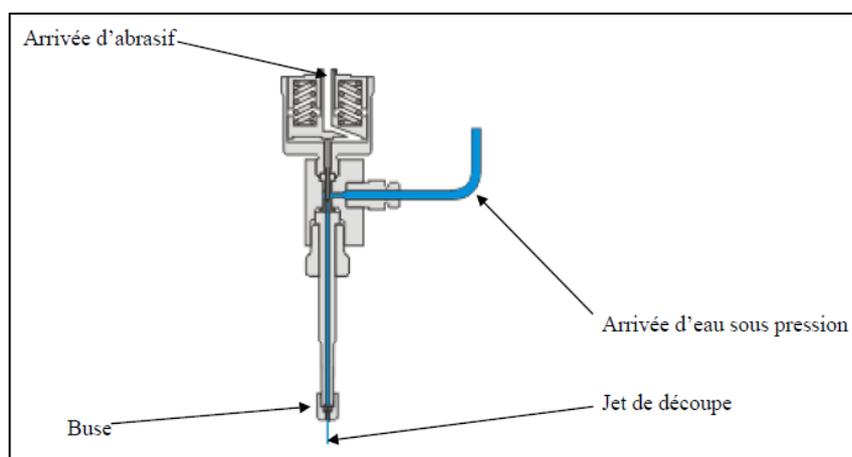
**II.3.1.3 Découpage par jet d'eau** ; Le principe de cette technique qui puise son origine dans les années 1960, initié par un certain Docteur Norman Franz, consiste à projeter un filet d'eau à une vitesse très élevée, comprise entre **600 et 900 mètre par seconde** à travers une buse de faible diamètre, entre **0,05 et 0,5 mm**.

Le diamètre du jet d'eau qui sera mis en contact avec le matériau à découper correspond au diamètre de la buse. Pour pouvoir découper le matériau, la pression du jet d'eau doit pouvoir atteindre jusqu'à **4000 bars**. Le matériau est découpé par arrachement de matière.

Pour des matériaux plus difficiles ou plus durs, on ajoute au jet d'eau un abrasif.

➤ **Utilisation de cette technique ;**

- Découpe des métaux- Découpe des minéraux, verres, céramiques
- Découpe des produits alimentaires- Découpe des plastiques, caoutchoucs, composites
- Découpe des textiles, papiers, cartons, cuirs- Décalaminage, nettoyage de turbines
- Décapages de coques de navires- Décontamination nucléaire
- Démolition, piquage et perçage en bâtiment



*Figure II.10 : Schéma de fonctionnement de la découpe jet d'eau*

### II.3.1.4 Découpage Laser

Le laser tout comme l'oxycoupage est un procédé thermique de découpe. La source laser émet un faisceau lumineux qui est focalisé (concentré) dans un système optique (focale) selon le principe adopté dans un appareil photo. La puissance ainsi obtenue peut atteindre jusqu'à **10 000 kilowatts par centimètre carré**.

La forte puissance thermique conduit à une fusion rapide puis à l'évaporation partielle ou totale du matériau. Un flux de gaz enveloppe le faisceau lumineux, expulse le matériau en fusion de la fente de coupe (saignée). La découpe au laser peut se diviser en deux sous procédés :

- **La découpe par sublimation** ; le matériau s'évapore sous l'effet de la chaleur. Ce procédé s'emploie aussi bien pour les métaux que d'autres matériaux tels que le bois, la céramique ou les matières plastiques.
- **La découpe par fusion** ; le matériau entre en fusion sous l'effet de la chaleur et il est expulsé à l'aide d'un jet de gaz. Ce procédé s'emploie pour les aciers inox ou les métaux non ferreux. Ce procédé permet des vitesses des coupes plus élevées qu'avec une découpe par sublimation.

La découpe laser présente de nombreux avantages, la vitesse de découpe élevée, la forte puissance limite à une zone affectée thermiquement, une faible déformation, une précision importante de l'ordre du 1/10 ème de mm.

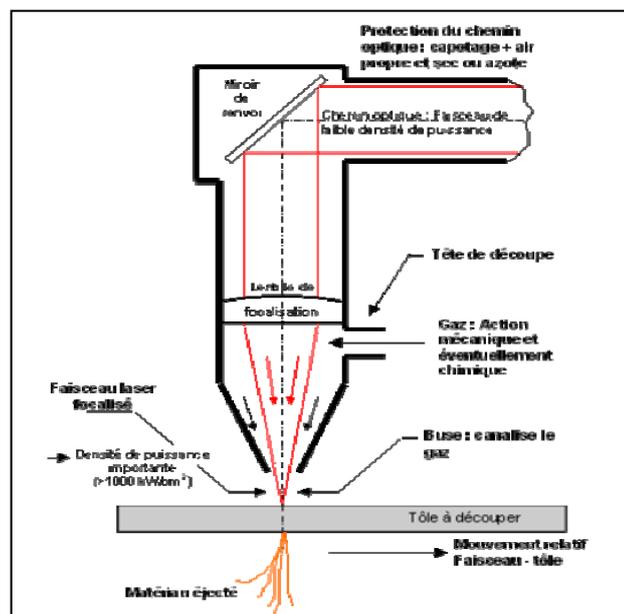
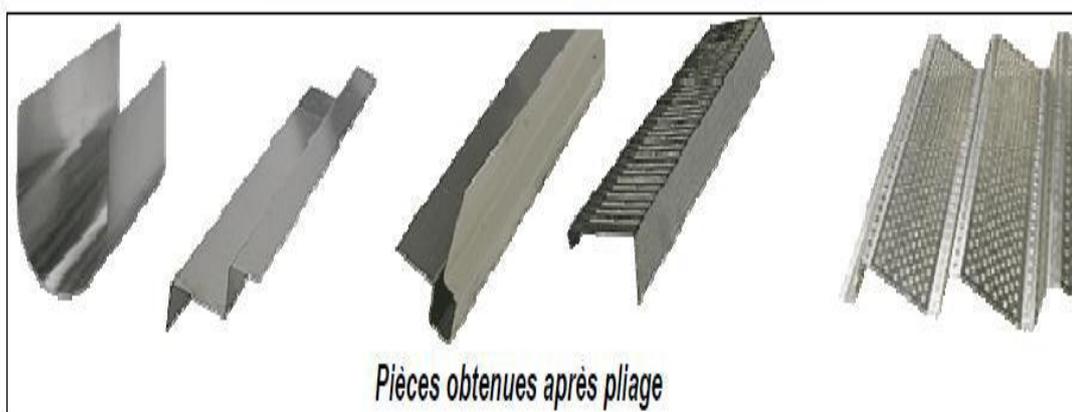
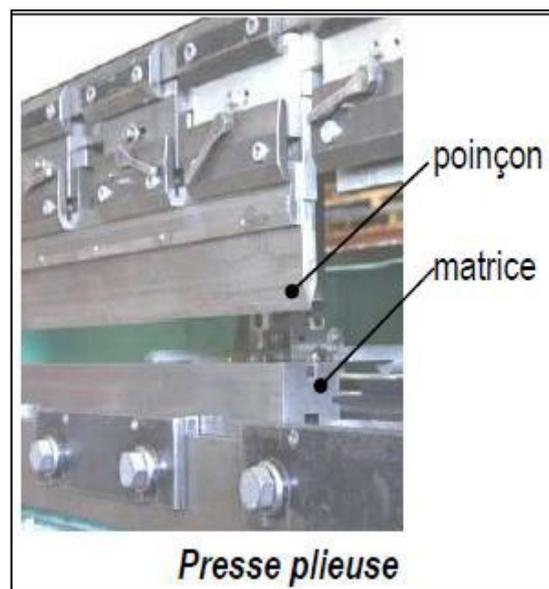


Figure II.11 : Schéma de fonctionnement découpe laser

### II.3.2 Pliage

Le pliage est un procédé de mise en forme sans enlèvement de matière, permettant de fléchir des tôles par un poinçon dans une matrice. C'est un cintrage de très faible rayon obtenu par un effort de flexion localisé.

- **Avantages** : - Outillage simple : presses hydrauliques avec différents poinçons et matrices.
- **Inconvénients** : - Ressaut élastique résiduel difficile à prévoir ; - Longueur de pliage limitée.

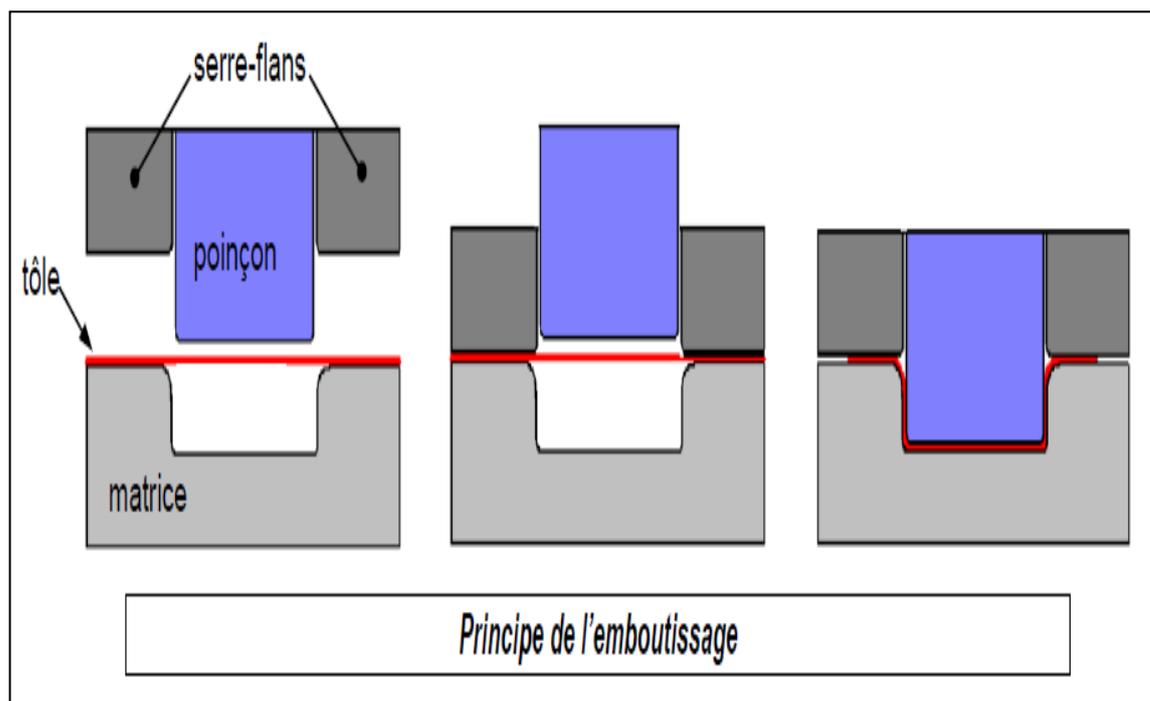


**Figure II.12** : Pièces obtenues après pliage [6]

### II.3.3 Emboutissage

L'emboutissage est la déformation à froid d'une tôle plane en une forme creuse non développable. 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.



*Figure II.13 : Principe de l'emboutissage et fabrication des canettes [6]*

### II.3.4 Frittage et métallurgie des poudres

Le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la cohésion de la pièce. Le cas le plus connu est celui de la cuisson des poteries.

Il permet d'obtenir des matériaux durs mais fragiles, à porosité contrôlée, inertes chimiquement (faible réactivité chimique et bonne tenue aux corrosions) et thermiquement.

En métallurgie des poudres, le frittage est un procédé qui permet de réaliser des pièces mécaniques ou d'autres objets à partir de poudres plus ou moins fines. Dans un premier temps, ces poudres sont agglomérées par divers procédés pour constituer une préforme, laquelle est ensuite chauffée pour acquérir une certaine cohésion.

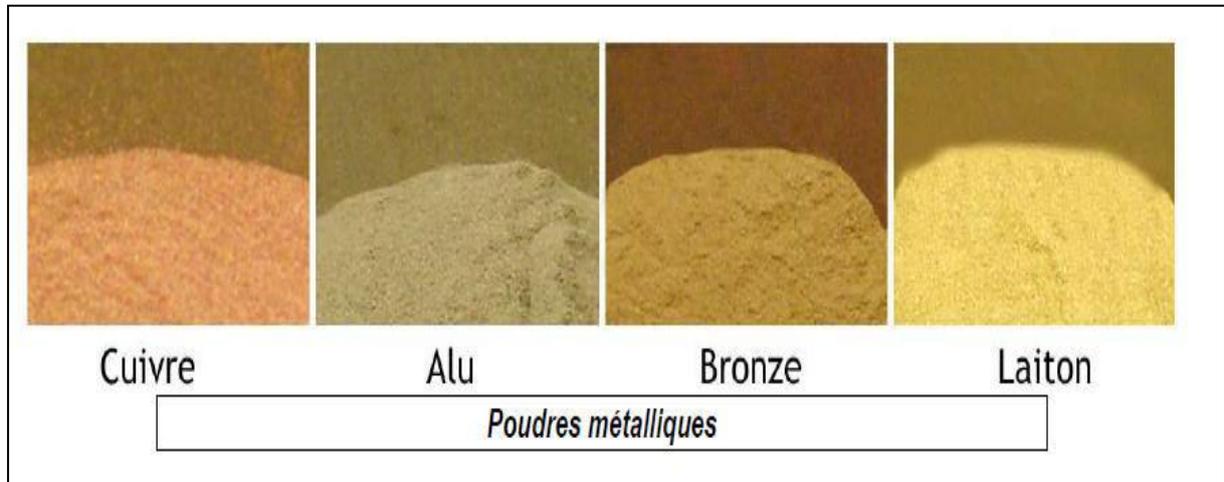


Figure II.14: Des métaux sous formes des poudres [6]

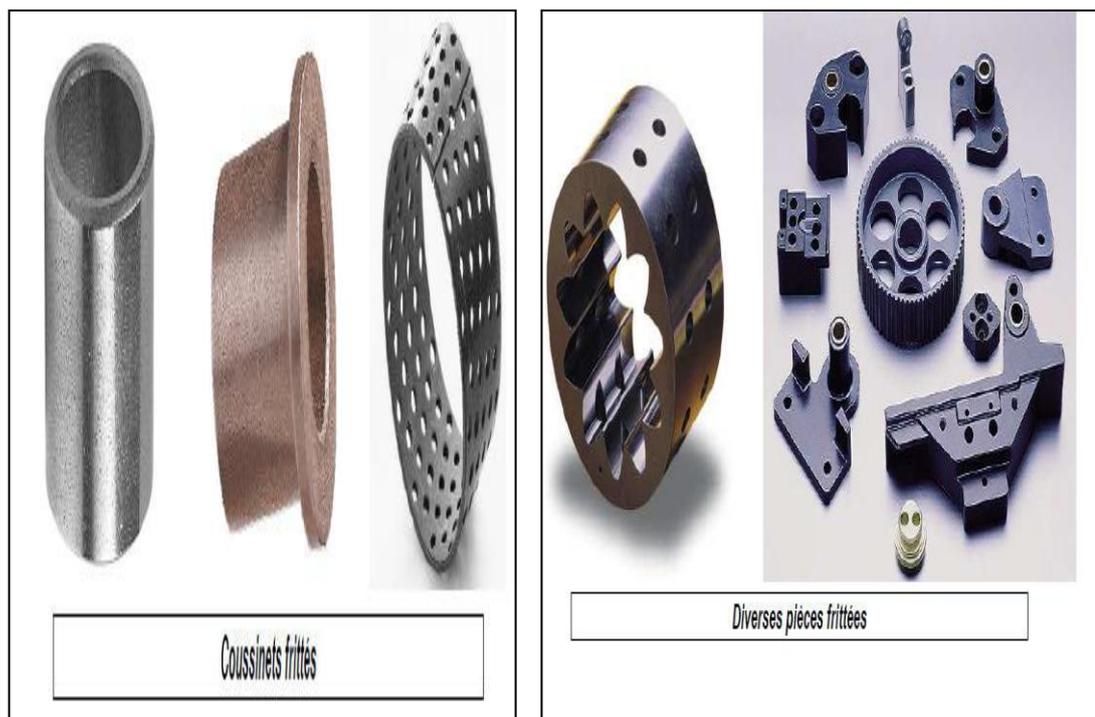


Figure II.15: Diverses pièces obtenues après frittage [6]

- **Avantages** : - Faible prix de revient pour des 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 des 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.

### II.4. Profilés et tuyaux en acier, et en aluminium

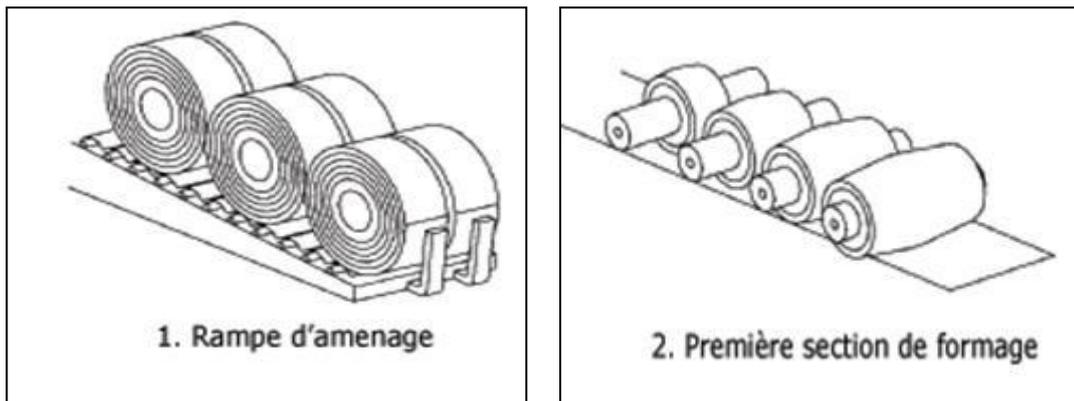
Les tuyaux d'acier sont fabriqués à partir d'un ruban métallique roulé et soudé. Le joint est fait en aboutant les bords du ruban et sera soudé par fusion. On peut aussi obtenir un joint plus fort en faisant chevaucher les bords (par recouvrement) et en le soudant ainsi par fusion.

Ces deux procédés de soudure produisent un tuyau solide et très étanche. On présente, aux figures suivantes, un procédé de fabrication standard des tuyaux soudés électriquement par résistance.

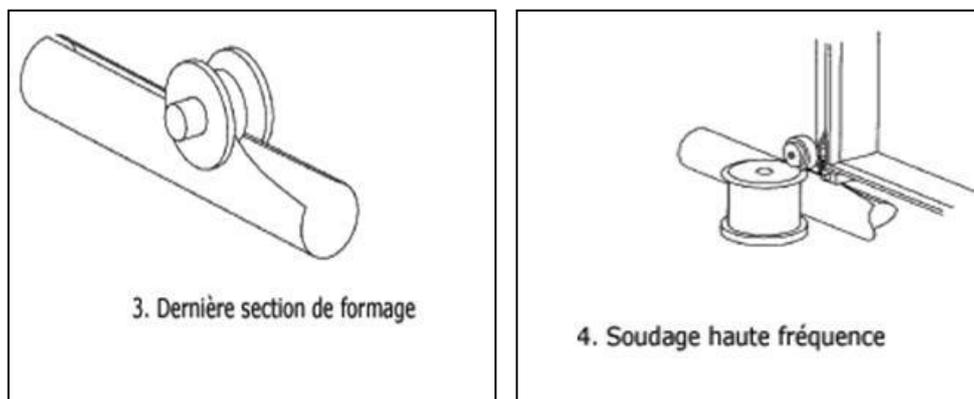
Procédé de fabrication standard des tuyaux d'acier soudés électriquement par résistance :

#### Mode de fabrication ;

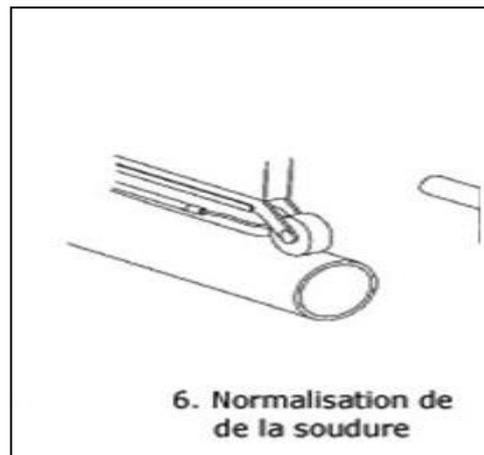
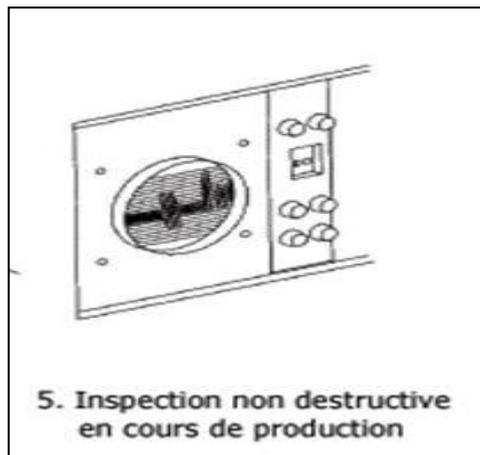
- ✓ **L'étape 1** ; est constituée de la rampe d'aménage sur laquelle les rouleaux de feuillard sont déposés. Chaque rouleau est ensuite placé dans l'axe du laminoir et introduit dans la dérouleuse. L'extrémité du feuillard parvient aux rouleaux d'entraînement puis au dressoir. Une cisaille électrique coupe l'extrémité de chaque feuillard afin qu'il soit possible de les souder l'un à l'autre et de former une bande continue.
- ✓ **La deuxième étape** débute avec la première section de formage, où des galets ébaucheurs commencent la transformation du feuillard d'acier en un tuyau de section circulaire. La section de transition reçoit le feuillard de la première section de formage et continue le processus de la mise en forme.



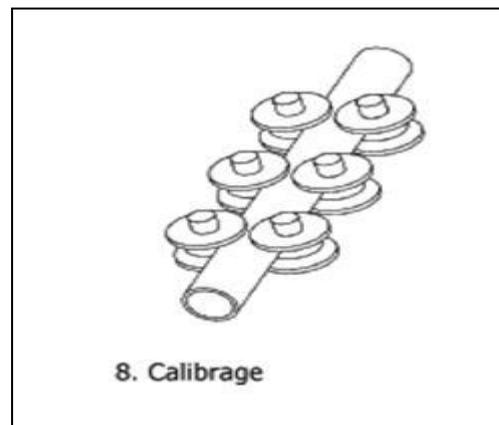
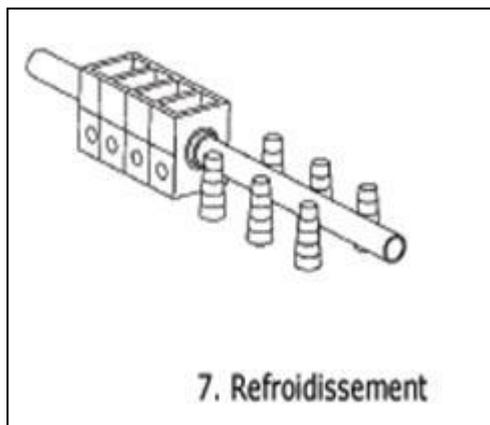
- ✓ **La troisième étape** est la dernière section du formage : la mise en forme du feuillard est complétée et les bords sont profilés afin d'être assemblés par soudage.
- ✓ **La quatrième étape** consiste à souder par hautes fréquences (HF). La soudeuse HF porte les bords du feuillard au point de fusion du métal, soit environ 1 400°C. Des galets pressent ensuite les bords l'un contre l'autre pour former une soudure par fusion.



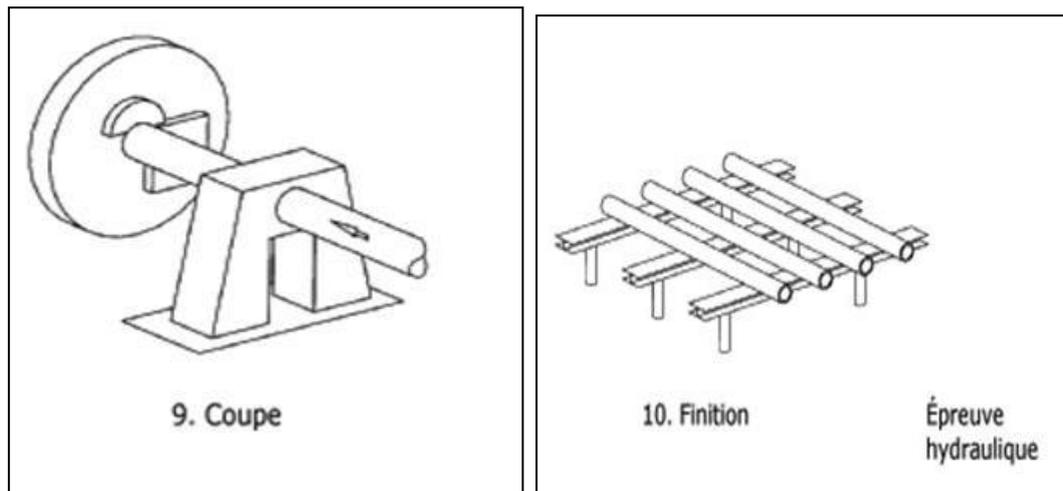
- ✓ **La cinquième étape** réside en l'inspection non destructive au cours de la production. Une fois que la soudure est faite, elle est vérifiée par une unité d'inspection non destructive indépendante.
- ✓ **La sixième étape** comporte la normalisation de la soudure. A ce stade, la soudure est soumise à un traitement thermique en vue d'éliminer les contraintes de soudage et de rétablir une structure granulaire uniforme dans le métal.



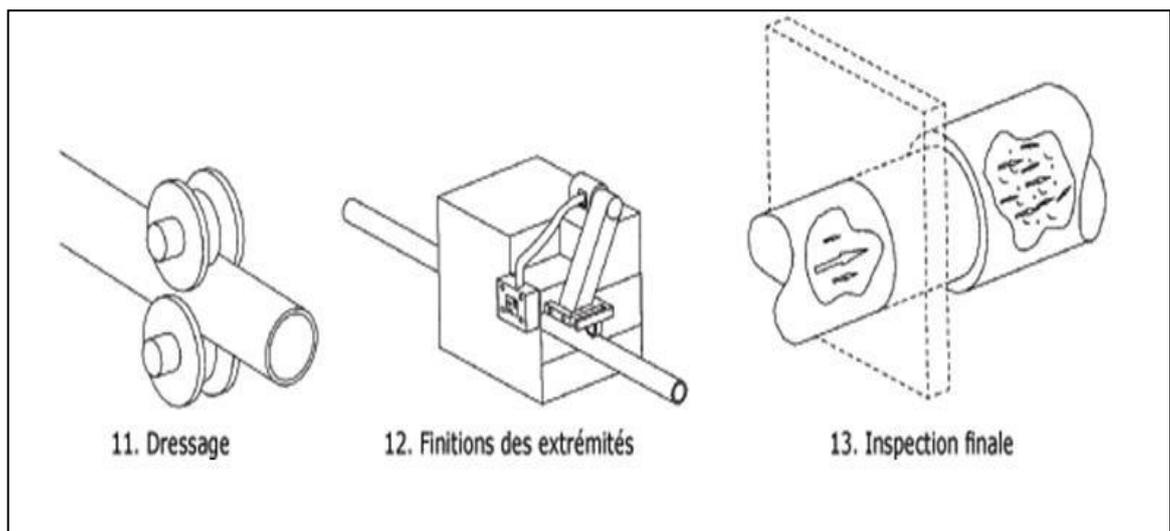
- ✓ **La septième étape** comprend le refroidissement. La soudure est d'abord refroidie à l'air, jusqu'à une température donnée, et ensuite refroidie à l'eau pour atteindre une plus basse température avant que le tuyau passe au calibrage.
- ✓ **La huitième étape** est le calibrage, c'est-à-dire que le tuyau passe au laminoir calibreur. Ce dernier donne au tuyau le diamètre extérieur voulu et le redresse.



- ✓ **La neuvième étape** consiste en la coupe du tuyau. Un appareil spécial coupe des longueurs précises du tuyau alors qu'il défile hors du laminoir en un mouvement ininterrompu.
- ✓ **La dixième étape** est constituée de la finition avec une épreuve hydraulique. Tous les tuyaux, conformes à la norme NF A49-140 sont soumis à une épreuve hydraulique dans le but de vérifier leur résistance et leur étanchéité.



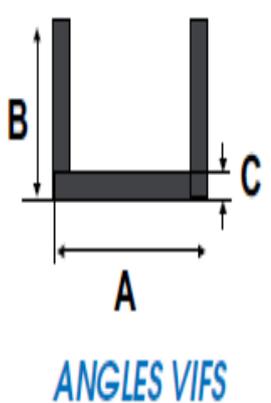
- ✓ **La onzième étape** est le dressage. Ici, toute incurvation du tuyau est éliminée lorsque celui-ci passe dans une série de galets-guides.
- ✓ **La douzième étape** comprend la finition des extrémités : un outillage au carbure donne la forme désirée à l'extrémité des tuyaux,
- ✓ **La treizième et dernière étape** est faite de l'inspection finale. Avant l'expédition, on effectue une dernière inspection visuelle en guise de mesure et de contrôle de la qualité.



➤ Quelques exemples sur les Profilés, les Tubes et les Barres [16]

✓ Profilé sous forme U ;

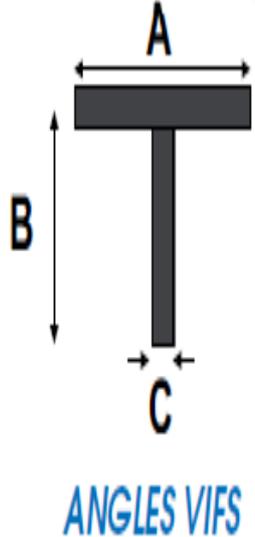
Profilés U		
A x B x C	~ kg/ml	6060 T6
10 x 10 x 2	0,14	●
15 x 15 x 2	0,22	●
20 x 20 x 2	0,30	●
25 x 25 x 2	0,38	●
25 x 25 x 2,5	0,47	●
30 x 20 x 2	0,36	●
30 x 30 x 2	0,46	●
30 x 30 x 3	0,68	●
40 x 20 x 2	0,41	●
40 x 40 x 2	0,62	●
40 x 40 x 4	1,21	●
50 x 25 x 2,5	0,64	●
50 x 30 x 3	0,84	●
50 x 30 x 4	1,10	●
60 x 40 x 4	1,43	●
80 x 40 x 4	1,64	●
80 x 40 x 5	2,02	●
80 x 50 x 5	2,29	●
100 x 50 x 5	2,56	●
125 x 63 x 6	3,87	●
140 x 70 x 8	5,70	●
160 x 80 x 10	8,10	●



ANGLES VIFS

- ✓ Profilé sous forme T ;

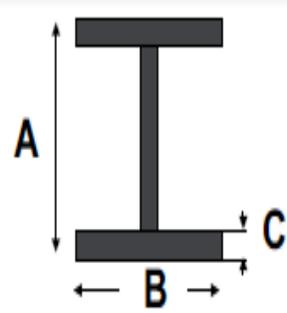
Profilés T		
A x B x C	~ kg/ml	6060 T6
25 x 25 x 2	0,26	●
30 x 30 x 2	0,31	●
30 x 30 x 3	0,46	●
40 x 40 x 3	0,62	●
40 x 40 x 4	0,82	●
50 x 50 x 5	1,28	●
60 x 60 x 6	1,85	●
80 x 80 x 8	3,28	●



ANGLES VIFS

- ✓ Profilé sous forme H ;

Profilés H		
A x B x C	~ kg/ml	7020 T6
140 x 90 x 8	6,96	●



ANGLES VIFS

✓ Tubes Rectangulaires

<b><i>Tubes Rectangulaires</i></b>		
<b><i>ANGLES VIFS</i></b>		
<b>A x B x ép.</b>	<b>~ kg/ml</b>	<b>6060 T6</b>
25 x 15 x 2	0,39	●
30 x 15 x 1,5	0,34	●
30 x 20 x 2	0,50	●
40 x 20 x 2	0,60	●○
40 x 20 x 3	0,88	●
40 x 20 x 4	1,12	●
50 x 20 x 2	0,71	●
50 x 25 x 2	0,77	●
50 x 30 x 2	0,82	●○
50 x 30 x 3	1,20	●
50 x 30 x 3 RE 6	1,20	●
60 x 30 x 2	0,93	●
60 x 30 x 3	1,36	●
60 x 40 x 2	1,04	●○
60 x 40 x 3	1,52	●
60 x 40 x 4	1,98	●
80 x 20 x 2	1,04	●
80 x 40 x 2	1,25	●○
80 x 40 x 3	1,85	●
80 x 40 x 4	2,41	●
80 x 40 x 4 RE 5	2,41	●
80 x 50 x 5	3,24	●
100 x 20 x 2	1,26	●
100 x 30 x 2	1,36	●
100 x 40 x 2	1,47	●
100 x 40 x 3	2,17	●
100 x 50 x 2	1,58	●○
100 x 50 x 2,5	1,96	●
100 x 50 x 3	2,33	●

✓ Tubes Carrés

<b>Tubes Carrés</b>		
<b>ANGLES VIFS</b>		
A x B x ép.	~ kg/ml	6060 T6
20 x 20 x 1,5	0,30	●
20 x 20 x 2	0,39	●
25 x 25 x 2	0,50	●
25 x 25 x 3	0,71	●
30 x 30 x 1,5	0,46	●
30 x 30 x 2	0,60	●○
30 x 30 x 3	0,88	●
35 x 35 x 2	0,71	●○
35 x 35 x 3	1,03	●
40 x 40 x 2	0,82	●○
40 x 40 x 3 RE 3	1,19	●
40 x 40 x 3	1,20	●
40 x 40 x 4	1,55	●
45 x 45 x 2	0,93	●
50 x 50 x 2	1,04	●○
50 x 50 x 2,5	1,28	●
50 x 50 x 3	1,52	●
50 x 50 x 4	1,99	●
60 x 60 x 2	1,25	●
60 x 60 x 3	1,85	●
60 x 60 x 4	2,42	●
70 x 70 x 4	2,85	●
80 x 80 x 2	1,69	●○
80 x 80 x 4	3,28	●
80 x 80 x 5	4,05	●
100 x 100 x 2	2,12	●
100 x 100 x 4	4,14	●
150 x 150 x 5	7,83	●

# **CHAPITRE III**

Procédés d'obtention  
des pièces par  
enlèvement de  
matière

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

III.1-Introduction .....	<b>55</b>
III.2- Tournage .....	<b>55</b>
III.2.1. Définition et Principe du tournage .....	<b>55</b>
III.2.2. Les opérations du tournage .....	<b>56</b>
III.3- Fraisage .....	<b>57</b>
III.3.1. Définition et Principe du fraisage .....	<b>57</b>
III.3.2. Les opérations du fraisage.....	<b>58</b>
III.4- Perçage .....	<b>59</b>
III.5- Sciage .....	<b>60</b>
III.6- Limage .....	<b>62</b>
III.7- Ajustage ...etc. ....	<b>63</b>
III.8- Conclusion .....	<b>64</b>

### III.1- Introduction

L'usinage par enlèvement de la matière consiste à obtenir la forme finale par diminution progressive des dimensions de la pièce fabriquée par enlèvement du métal à froid et sans déformation en utilisant un outil, et la matière enlevée est appelé **outil de coupe**.

L'opérateur utilise des machines dites « **machines-outils** » pour réaliser l'usinage d'une pièce.

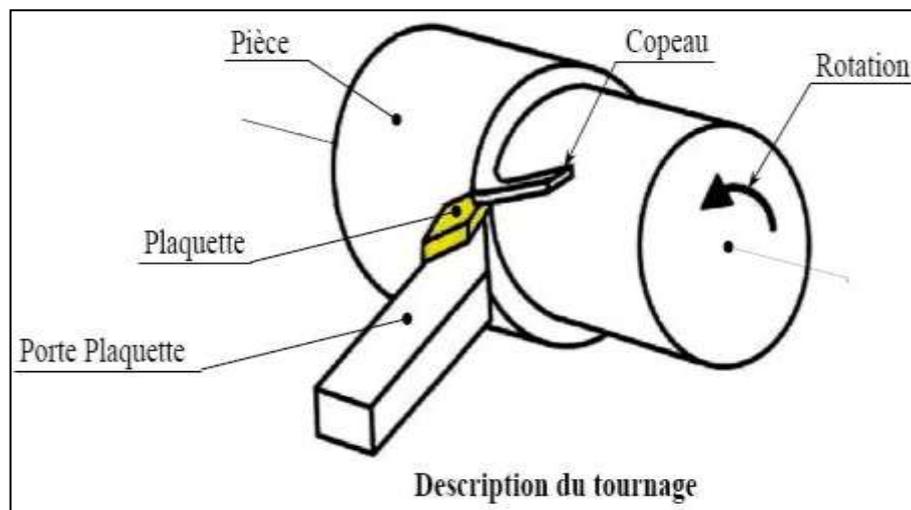
### III.2- Tournage

#### III.2.1. Définition et Principe du Tournage

Le tournage est un procédé d'usinage (Fabrication mécanique par enlèvement de la matière) permettant l'obtention de surfaces de révolution intérieures et extérieures, de surfaces planes ainsi que d'autres surfaces telles que celles obtenues par : Filetage , Gravure, ... etc. La matière enlevée est évacuée sous forme du copeau.

Les machines utilisées pour des opérations du tournage sont appelées tours. Les types des tours employés dans l'industrie sont très nombreux. Ils se distinguent les uns des autres, par :

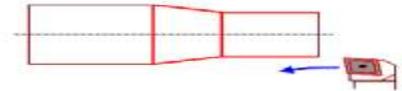
- Leurs formes,
- Leurs dimensions,
- Leurs précisions d'usinage,
- Leurs puissances, ....



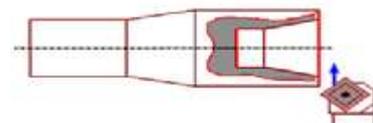
**Figure III.1** : Description du tournage

### III.2.2. Les opérations du Tournage [11]

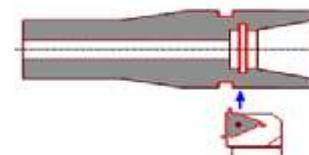
**III.2.2.1 Chariotage :** Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.



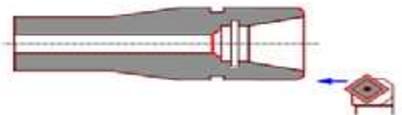
**III.2.2.2 Dressage:** Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure.



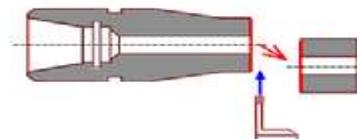
**III.2.2.3 Rainurage :** Opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un cerclips ou d'un joint torique par exemple.



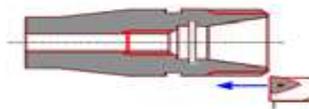
**III.2.2.4 Chanfreinage:** Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle.



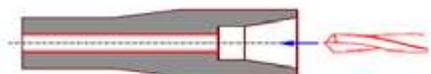
**III.2.2.5 Tronçonnage:** Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.



**III.2.2.6 Filetage:** Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.



**III.2.2.7 Perçage :** Opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'un foret.



**III.2.2.8 Alésage :** Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure.



### III.3 Fraisage

#### III.3.1. Définition et principe du Fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de la matière. Il est caractérisé par le recours à une machine - outil appelée **Fraiseuse**.

En fraisage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de l'outil (la fraise) **(M.R)**, tandis que le mouvement d'avance **(M.A)** est obtenu par le déplacement de la pièce maintenue dans un étau, et la profondeur de passe est réglée par le déplacement de la pièce **(M.P)**.

Le fraisage **classique** permet principalement d'obtenir des formes prismatiques, mais le fraisage à une **commande numérique (CN)** permet d'obtenir des formes pouvant être très complexes.

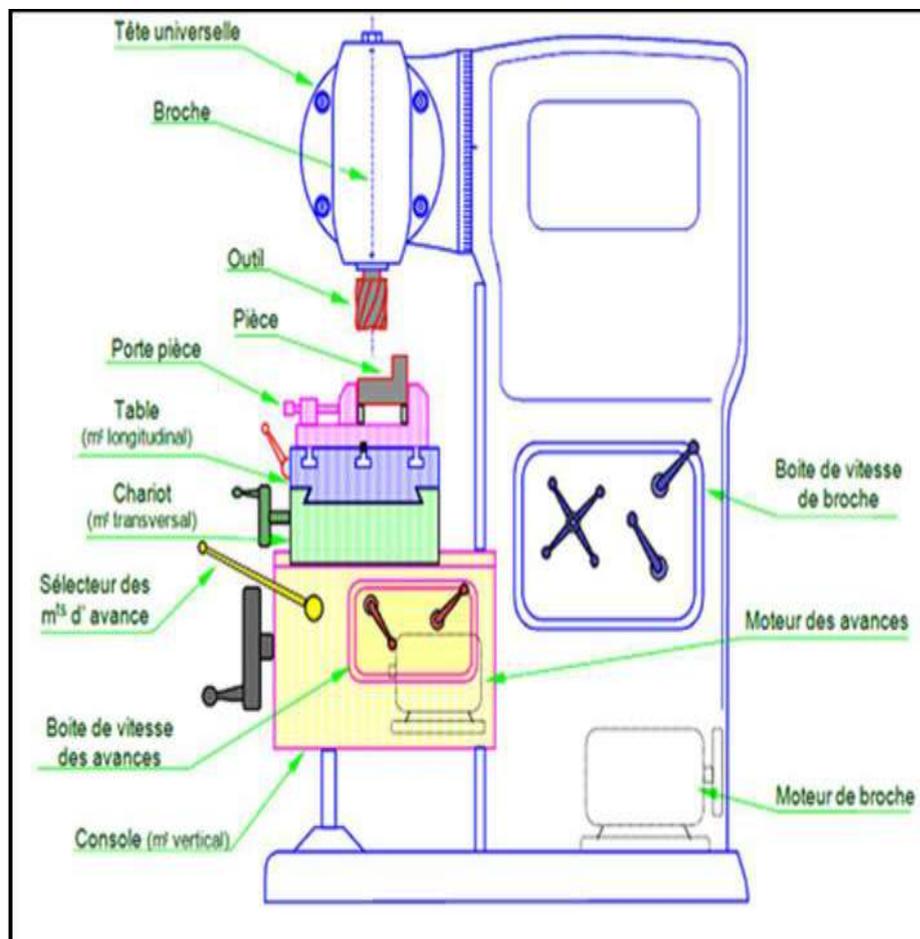


Figure III.2 : Fraiseuse [11]

## III.3.2. Les opérations du Fraisage

La technique du fraisage passe par différentes opérations, on peut citer ;

- Surfaçage – Rainurage – Alésage – Sciage - Taillage des roues dentées

La figure suivante résume les différentes opérations du Fraisage ;

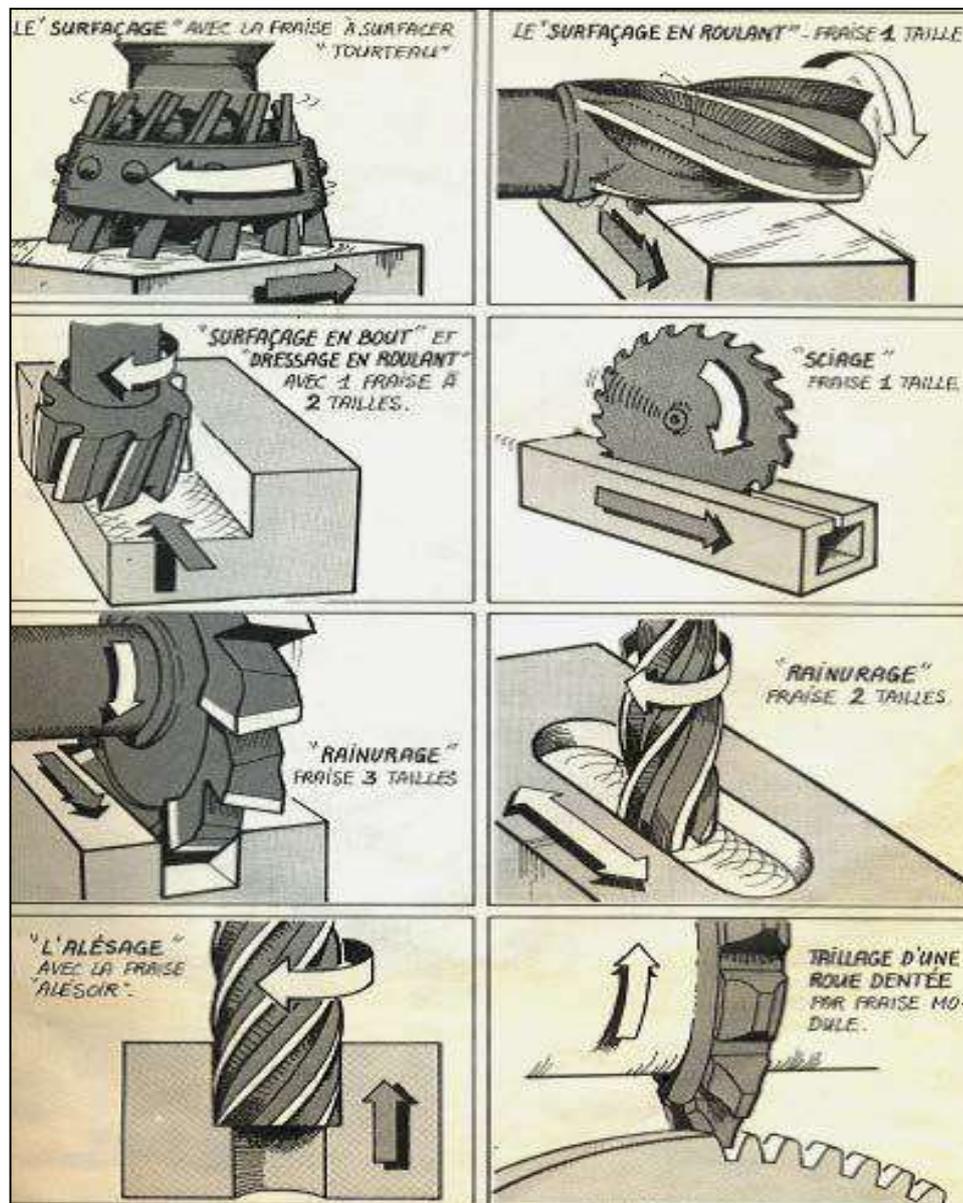


Figure III.3 : Les étapes du fraisage [11]

### III.4- Perçage

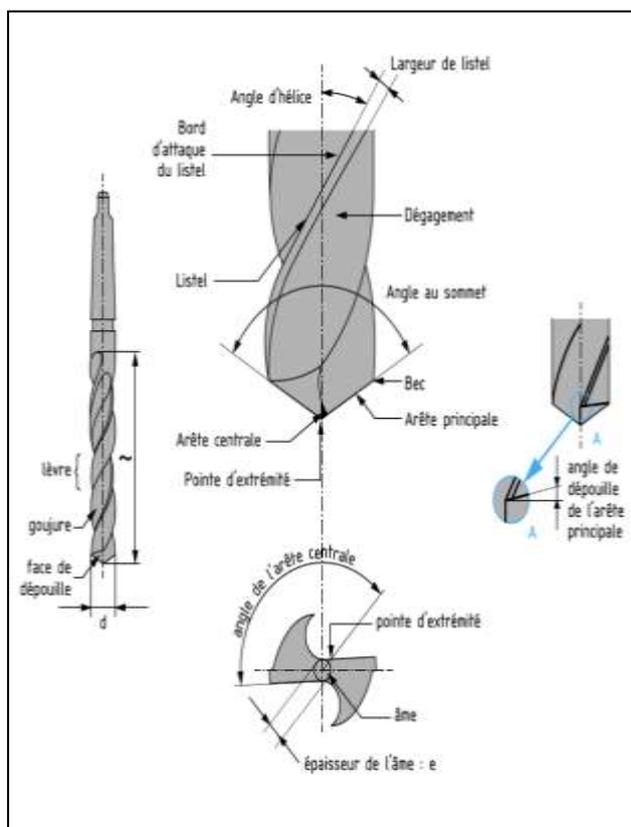
Le terme perçage signifie « obtention d'un trou (borgne ou débouchant) par **Usinage** ». Ce trou peut être effectué par un foret sur une perceuse, une mèche sur un vilebrequin (perceuse manuelle), découpe, électroérosion, etc.

En plus du perçage des trous courts et du forage des trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que:

- Brochage,
- Alésage,
- Réalésage

Et certaines formes de finition comme :

- Calibrage et Galetage



*Figure III.4 : Exemple d'un Foret et d'une Perceuse [6]*

### III.5- Sciage

C'est une technique qui permet de réaliser le débit des profilés (tubes ronds, carrés, plats, etc...), sous l'action d'une lame, entraînant la séparation de la pièce en deux parties.

Les scies modernes automatiques permettent plusieurs options dont les plus courantes sont le **réglage de la vitesse de la lame**, la **lubrification**, le **réglage d'un angle de coupe**. En effet, la vitesse de déroulement de la lame (sur les scies à ruban) sera plus faible si vous sciez de l'acier inoxydable, ou dur, que si vous débitez un acier de construction **S235**.

La lubrification est fortement conseillée pour éviter l'échauffement et l'usure prématurée des dents. Certaines scies possèdent une descente automatique dont la vitesse peut être réglée. [17]

On distingue différents modèles de scies ;

#### III.5.1 Scie à métaux

C'est un outil qui permet de scier manuellement les pièces.

Une monture composée d'un manche et d'une lame et d'un système qui permet la tension de la lame.



*Figure III.5 : Scie à métaux*

#### III.5.2 Scie à ruban

C'est une machine automatique ou semi-automatique. L'opérateur descend la lame manuellement dans le cas d'une scie semi-automatique. La sécurité sur une scie sera apportée essentiellement au niveau des mains qui sont les plus sollicitées pendant les

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

---

opérations du sciage, et les chutes de profilés doivent aussi être prises en compte lors de la manutention. [17]



*Figure III.6 : Scie à ruban*

### III.5.2 Scie alternatives

C'est aussi une scie automatique ou semi-automatique, dont la lame exercera un mouvement alternatif, par opposition aux scies à rubans qui fournissent un déroulement continu.



*Figure III.7 : Scie alternatives [17]*

### III.6-Limage

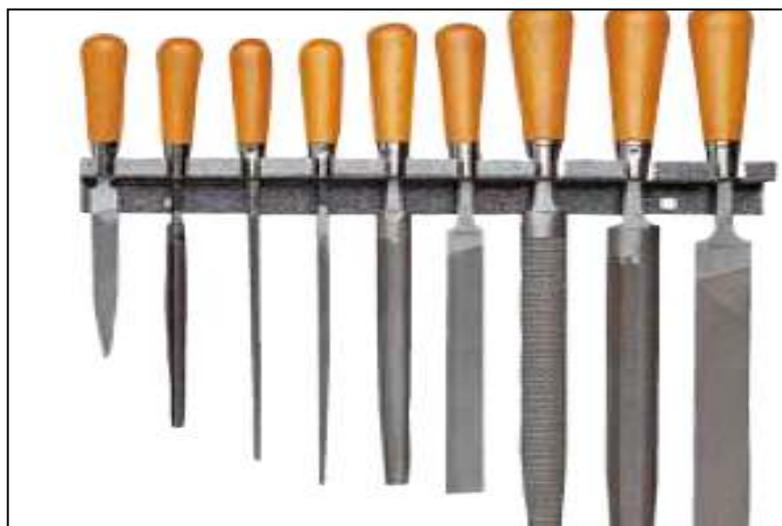
Le limage a pour objectif d'assurer la finition d'une pièce. C'est un usinage réalisé manuellement avec un outil à tranchants multiples qu'on appelle **la Lime**.



*Figure III.8: Limage*

Une lime se caractérise par sa forme, sa taille et son angle de taille, il existe plusieurs types des limes ;

- |                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1 – Lime plate bâtarde.      | 6- Lime demi ronde, demi-douce   |
| 2 – Lime plate, demi-douce   | 7- Lime carrée, demi-douce       |
| 3 – Lime demi-ronde bâtarde. | 8- Lime triangulaire, demi-douce |
| 4 – Lime ronde bâtarde.      | 9- Râpe demi ronde, demi-douce   |
| 5 – Lime ronde, demi-douce . |                                  |



*Figure III.9: Différents types de limes*



- **Le Gratteur**, qui utilise un grattoir et dont le métier consiste à parfaire les plans d'appui (précision 5  $\mu\text{m}$ ). Cet ajusteur utilise le **bleu de Prusse** comme révélateur en remplacement de **la sanguine**.
- **Le Tireur de long** ; dont le rôle consiste à finir les chants de la pièce (parties étroites) en tirer de long ;
- **Le Croiseur** ; dont le rôle consiste à finir les surfaces de la pièce en traits croisés.

### III.7.2 Ajustage de parachèvement

L'ajustage de parachèvement consiste à retoucher les pièces dans le but de parfaire l'aspect visuel ou l'état de surface.

Les ajusteurs paracheveurs sont moins nombreux, on trouve :

- **Le Ciseleur**
- **L'araseur**

### III.8 Conclusion

Afin de fabriquer n'importe quelle forme des pièces, nous avons besoin des procédés et des techniques, que ce soit par enlèvement de la matière utilisé ou sans enlèvement, et parmi ces techniques on peut citer ; Tournage, Fraisage, Perçage, Sciage, Limage...etc.

# **CHAPITRE IV**

## **Techniques d'Assemblage**

**Chapitre IV : Techniques d'Assemblage**

IV. 1-Introduction .....	<b>67</b>
IV .2- Types d'assemblage .....	<b>67</b>
IV .2.1- Assemblage Permanent.....	<b>67</b>
IV .2.2- Assemblage Démontable.....	<b>67</b>
IV .2.3- Assemblage Direct.....	<b>68</b>
IV .2.4- Assemblage Indirect.....	<b>68</b>
IV. 3- Techniques d'assemblage .....	<b>68</b>
IV .3.1- Boulonnage .....	<b>68</b>
IV. 3.2- Rivetage .....	<b>72</b>
IV. 3.3- Soudage .....	<b>73</b>
IV. 3.3.1- Soudage hétérogène .....	<b>73</b>
IV. 3.3.2- Soudage autogène.....	<b>75</b>
IV. 3.4- Frettage .....	<b>78</b>
IV .3.5- L'emboîtement élastique .....	<b>78</b>
IV .3.6- Sertissage.....	<b>79</b>
IV .3.7- Collage .....	<b>79</b>
IV .4- Conclusion .....	<b>80</b>

## **IV.1 Introduction**

Pour réaliser ou fabriquer un produit, il nécessite un assemblage mécanique qui fait la liaison entre de différentes pièces ou éléments. Ces éléments peuvent être de matériaux et de formes différentes.

Dans le domaine industriel, il existe plusieurs techniques d'assemblage qui permettent de fixer les éléments d'un produit les uns aux autres.

## **IV .2 Types d'assemblage**

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

### **IV.2.1 Assemblage indémontable(Permanent)**

Assemblage indémontable si les deux pièces de liaison ne peuvent plus être séparées sans que l'une d'elles au moins, soit détruite ou détériorée. De cela , une liaison indémontable est toujours complète

Lorsque est facilement manœuvrée et peut être complète ou incomplète, parmi ces techniques on peut citer ;

- ✓ Soudure
- ✓ Rivetage
- ✓ Emmanchement à force
- ✓ Frettage
- ✓ Sertissage...

### **IV.2.2 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.

- ✓ Filetage (Vis-écrou)
- ✓ Boulonnage
- ✓ Goujons
- ✓ Clavette parallèle ou clavette disque
- ✓ Arc-boutement, Serre-joints
- ✓ Coincement de formes coniques
- ✓ Certaines colles et adhésives

### **IV.2.3 Assemblage Direct**

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

- Soudage,
- Frettage,
- Clinchage,
- Sertissage,
- Emboîtement élastique,

### **IV.2.4 Assemblage Indirect**

Ce type d'assemblage nécessite d'utiliser une ou plusieurs pièces intermédiaires pour assurer la liaison, on peut citer ;

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

## **IV.3 Techniques d'Assemblage**

### **IV.3.1 Boulonnage**

Le boulonnage est une méthode d'assemblage mécanique démontable. Les boulons servent à créer une liaison de continuité entre les 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.

Une vis de fixation est composée d'une tige et d'une tête, Il existe plusieurs profils de tête de vis dont deux connus ;

- **Tête de vis à profil fente** ; dont le vissage est obtenu grâce à un tournevis plat.



*Figure IV.1 : Tête de vis à profil fente*

- **Tête de vis constituée de deux fentes perpendiculaires** ; appelé aussi profil « **Phillips** », dont le vissage est obtenu grâce à un tournevis cruciforme.



*Figure IV.2 : Tête de vis avec deux fentes*

- **Les boulons** ; un boulon est composé d'une vis et d'un écrou ; lors d'emploi, on peut utiliser tout types de vis avec un écrou H. Les pièces assemblées sont simplement percées de trous lisses.

On obtient ainsi un assemblage économique de plusieurs pièces par pression. Dans le cas de serrage fort, la tête de la vis doit être immobilisée. L'immobilisation s'effectue parfois à l'aide d'un ergot rapporté ou venu directement par la forme de la tête.

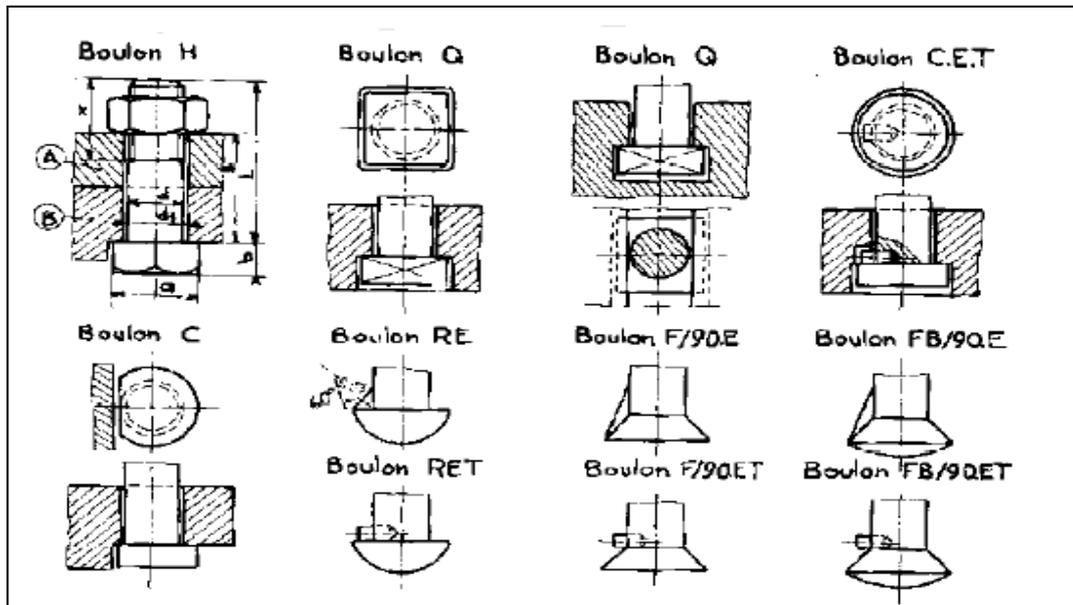


Figure IV.3 : Exemples des boulons [14]

- **Ecrou** ; un écrou est une pièce taraudée menée d'un dispositif de manœuvre pour permettre le serrage et le desserrage. Cet organe est complètement indispensable à une vis pour réaliser un assemblage par boulon. Selon le type du dispositif de manœuvre, on trouve les écrous manœuvres à la clé ou à la main. En effet, un écrou doit satisfaire deux fonction ;
  - \*Avoir une surface d'appui normale à l'axe du trou taraudé.
  - \*Avoir une forme qui permet sa manœuvre.

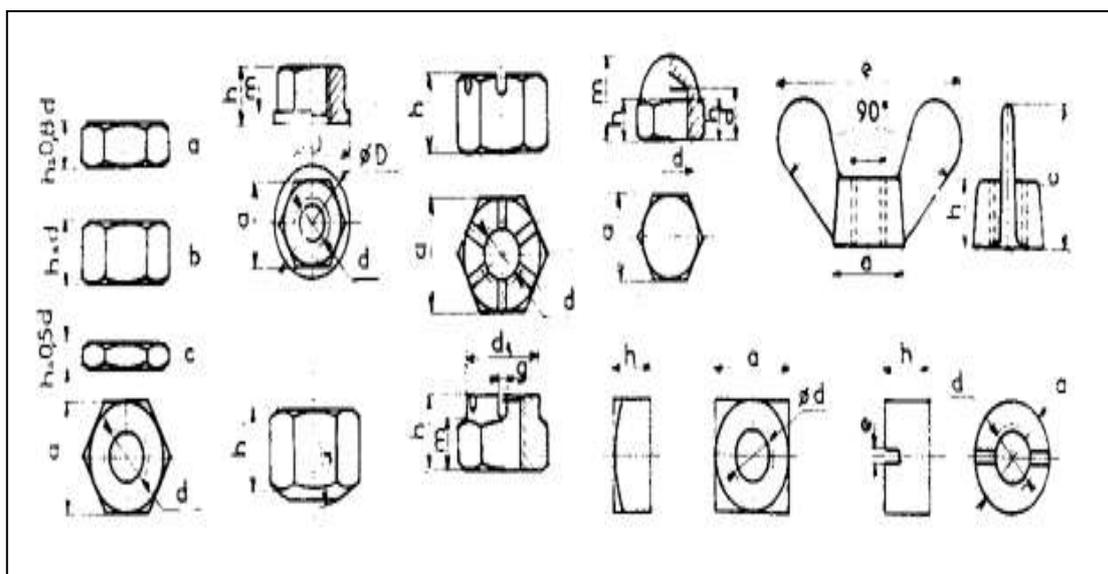
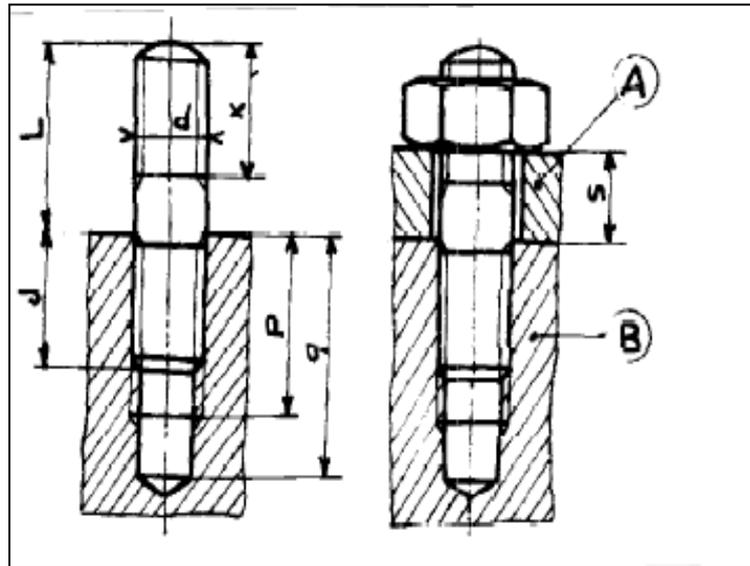


Figure IV.4 : Exemples des Ecrous avec leurs caractéristiques (h, e, a, D...) [14]

- **Goujons**; un goujon est une tige filetée sur deux extrémités. Les deux filetages doivent être séparés par une partie lisse. Afin d'assembler deux pièces à l'aide de cet organe, on doit implanter l'une des extrémités dans la première pièce et passer le reste librement dans la deuxième. Le blocage est effectué à l'aide d'un écrou.



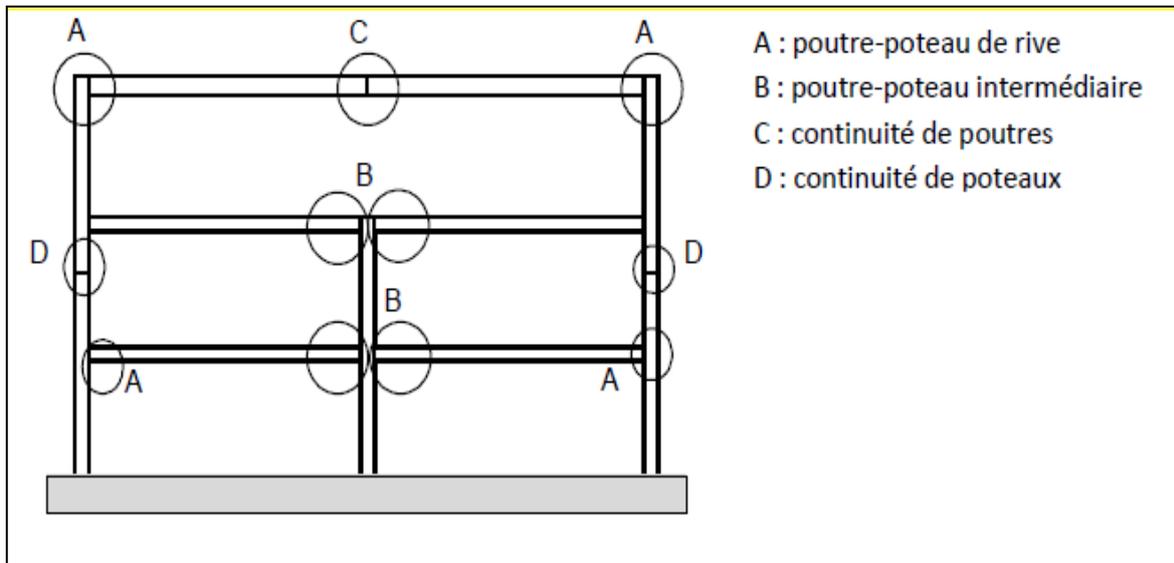
*Figure IV.5 : Exemple des goujons*

Parmi les assemblages boulonnés qui on les trouve dans le domaine génie civil sont ;

- Assemblage **Poutre-Poteau**
- Assemblage **Poutre-Poutre**
- Assemblage **de Raboutage (de continuité)**
- Assemblage **de Pied de poteau**

La figure **IV.6** donne une illustration de ces types d'assemblage dans une structure en acier. Les poutres et les poteaux dans une structure en acier sont des sections en I ou H, obtenus par laminage ou reconstitués par soudage.

Ces poutres et poteaux sont sollicités soit en flexion simple, soit en traction ou compression, soit en flexion composée. Ainsi, chaque type de ces assemblages doit être dimensionné pour transmettre les moments et ou les efforts tranchants et ou les efforts normaux.



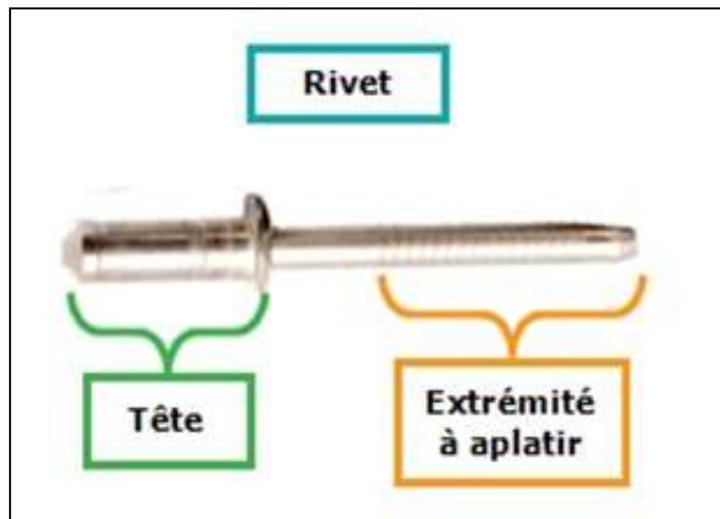
**Figure IV.6 :** Assemblages boulonnés par platine d'extrémité dans une structure en acier [15]

### IV.3.2 Rivetage

Le rivetage est un procédé d'assemblage permanent des pièces qui se réalise grâce à un rivet.

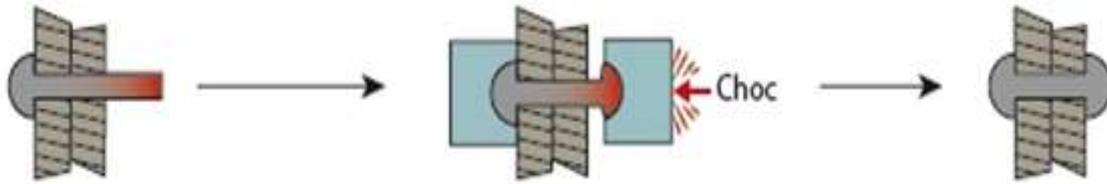
**Le rivet** est une tige métallique munie d'une tête à son extrémité.

L'assemblage des pièces se fait par écrasement de l'autre extrémité de la tige jusqu'à obtenir une extrémité aplatie afin de solidariser les pièces que l'on veut assembler.



**Figure IV.7:** Rivetage se réalise grâce à une pince à riveter

## ✓ Principe du Rivetage



On place à travers le trou reliant les deux plaques

On aplatit l'autre extrémité de la tige jusqu'à écrasement complet

Le rivetage est réalisé, les pièces sont assemblées

### IV.3.3 Soudage

D'une manière, on parle souvent de la soudure, mais comment doit-on définir ce terme ;

**La soudure** signifie de manière générale l'action d'assembler des pièces mécaniques et métalliques sous l'action d'une énergie calorifique générée par divers procédés mis en œuvre (flamme, arc électrique, explosifs, laser ou autre).

Parmi les procédés les plus courants, on rencontre ;

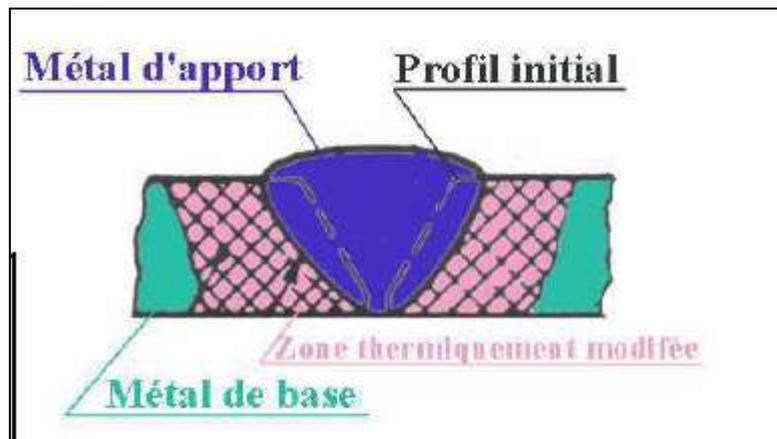
- Le soudage hétérogène.
- Le soudage autogène

#### IV.3.3.1 Soudage hétérogène (Brasage)

Ce type d'assemblage il s'appelle aussi le **Soudage à la flamme**. 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** ».

Le chauffage à une température suffisante pour fondre le métal d'apport provoque « l'accrochage » de celui-ci avec le métal de base grâce au phénomène de diffusion.



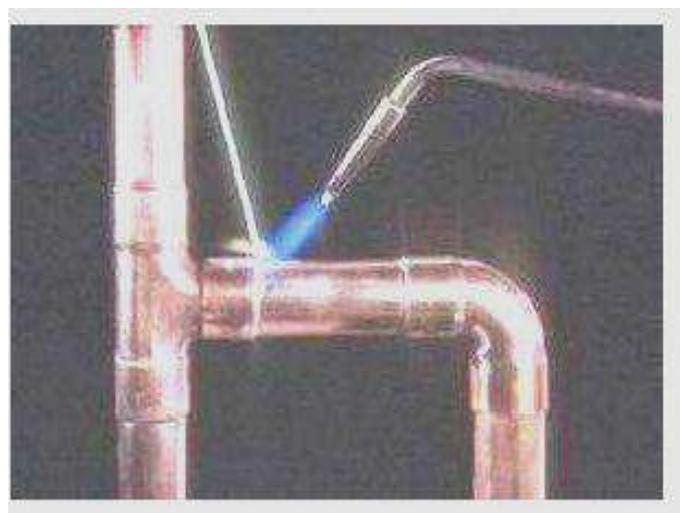
**Figure IV.8 : Brasage**

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.

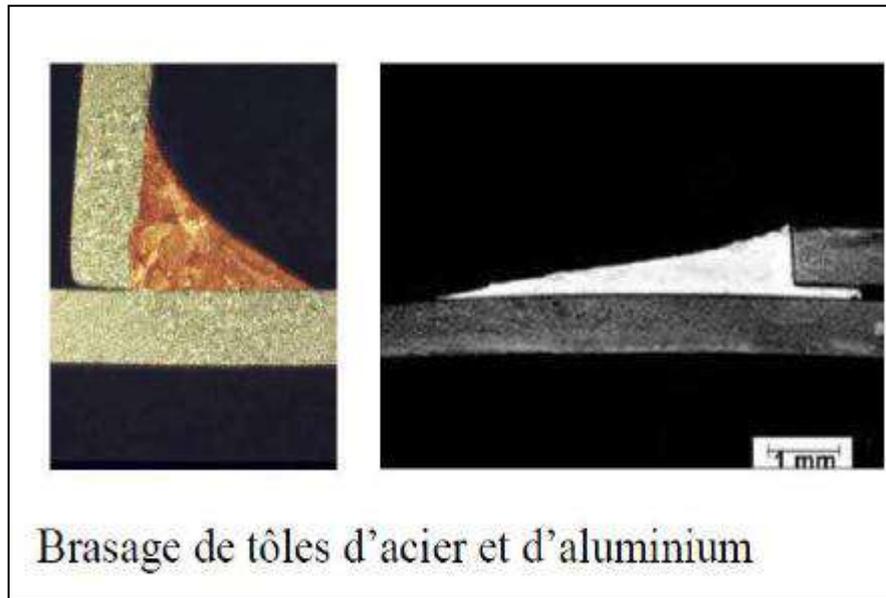
Parfois la flamme d'un chalumeau est nécessaire pour assurer la fusion du métal d'apport. Cette technique s'appelle **Soudo-Brasage**.



**Figure IV.9 : soudage au chalumeau (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.



*Figure IV.10: Brasage de tôles d'acier et d'aluminium*

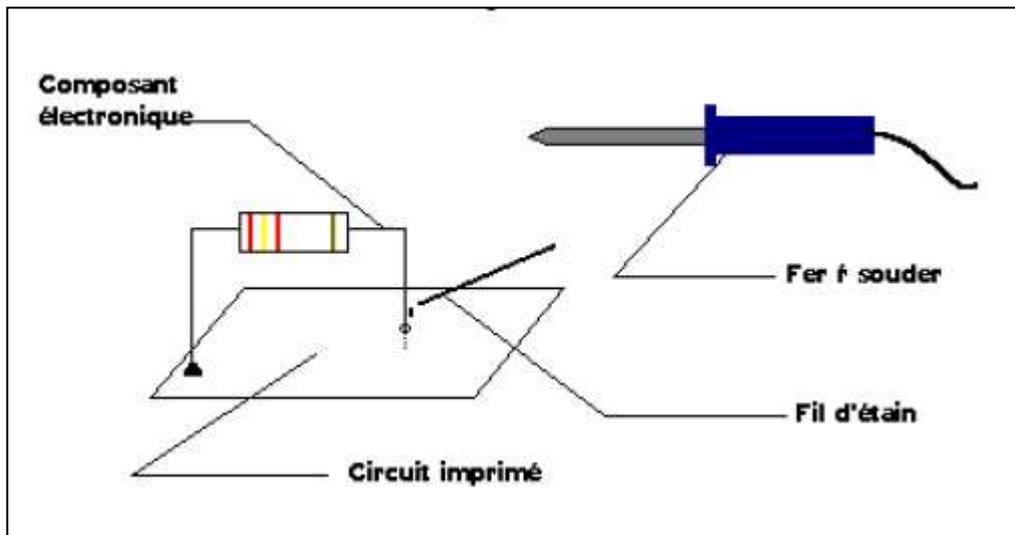
### IV.3.3.2 Soudage autogène

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

- **Soudage au Fer** ; ce procédé de soudage est employé majoritairement dans l'industrie électronique pour les petites soudures. On utilise un fer qui fait office de résistance ce qui produit la chaleur nécessaire à la fusion du métal d'apport souvent l'étain.



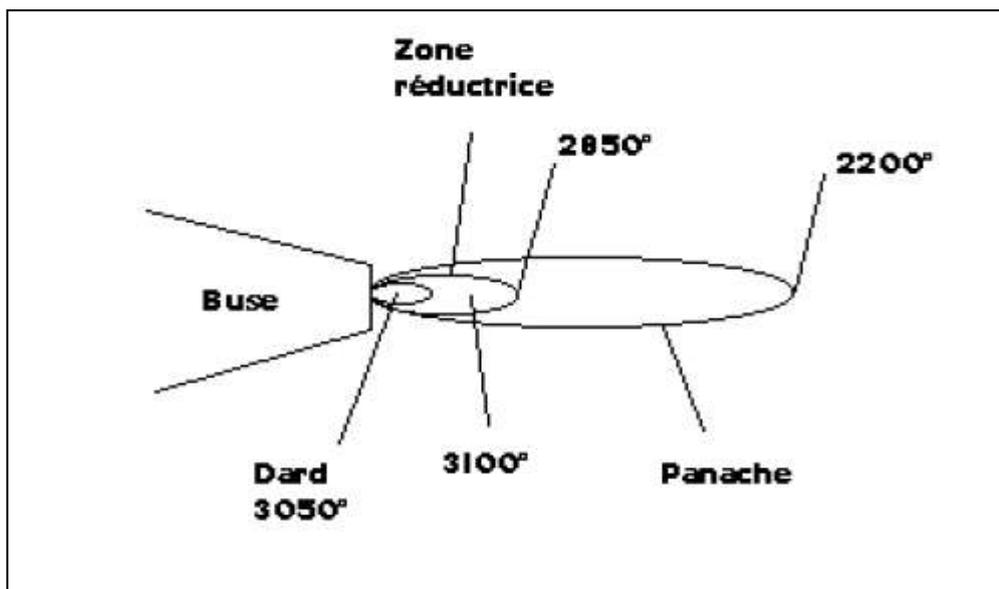
*Figure IV.11 : Soudage au Fer*

- **Soudage au gaz** : c'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur de soudure est produite par combustion de gaz. La composition oxygène-acétylène est aujourd'hui presque exclusivement employée. L'emploi de flux décapants permet de combattre l'oxydation en cours de soudage.

**Ce procédé se subdivise comme suit ;**

\*Sans flamme auxiliaire

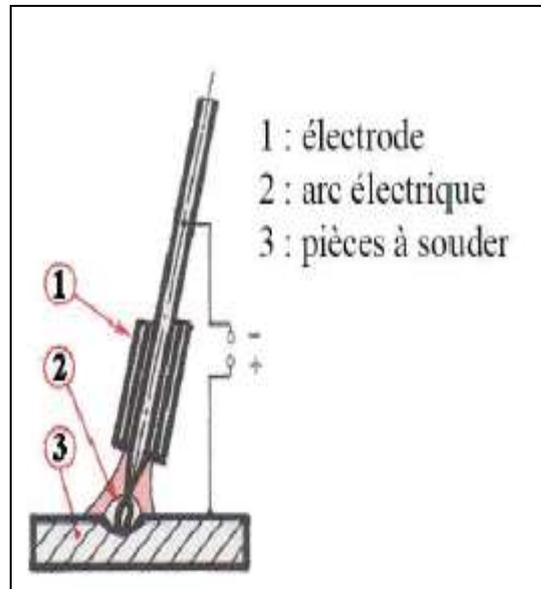
\*Avec flamme auxiliaire réductrice



*Figure IV.12 : Soudage Oxyacétylénique*

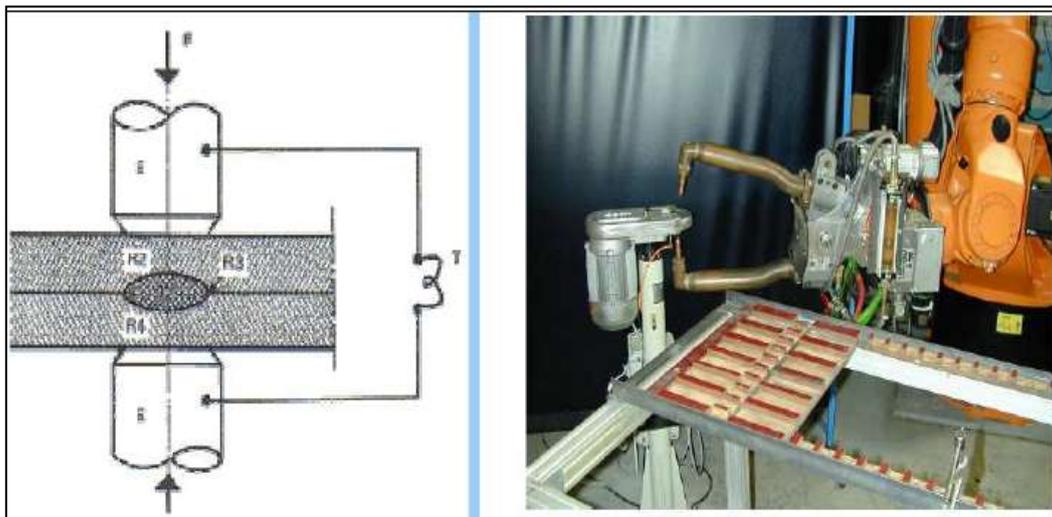
- **Soudage à l'arc électrique** ; en soudage à l'arc électrique, l'énergie calorifique est produite par un arc jaillissant entre une électrode et les pièces à assembler.

Le métal d'apport est constitué de l'électrode elle-même ou par une baguette indépendante (dans ce cas, l'électrode est en matériau réfractaire).



*Figure IV.13 : Soudage à l'arc électrique*

- **Soudage par résistance électrique (par point)**; Dans ce procédé sans apport de métal, les pièces sont maintenues en contact sous un effort d'accostage entre deux électrodes en cuivre ou alliages de cuivre.



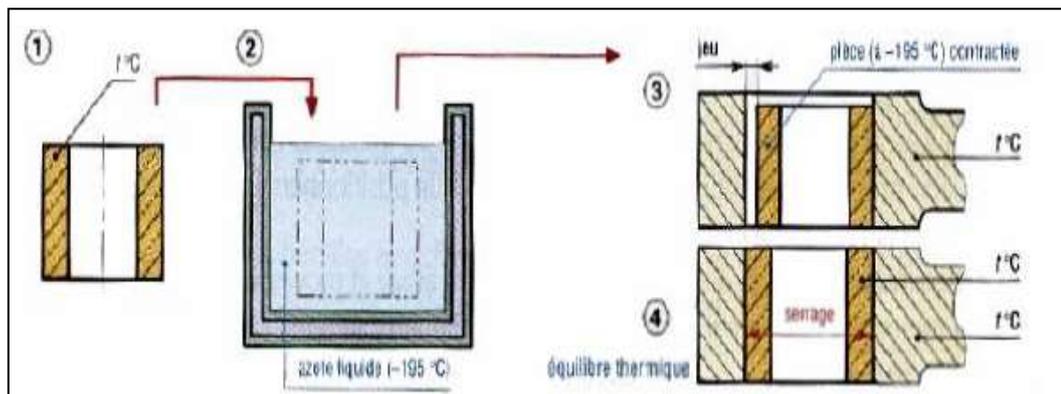
*Figure IV.14 : Soudage de deux tôles de 10 mm en acier et de 6 mm en alliages d'aluminium*

### IV. 3.4 Frettage

Cette technique consiste à modifier les dimensions des pièces avant leur assemblage, par variation de leur température.

Il existe trois possibilités du frettage ;

- ✓ Frettage par contraction du contenu.
- ✓ Frettage par dilatation du contenant.
- ✓ Frettage par combinaison des deux cas précédents.

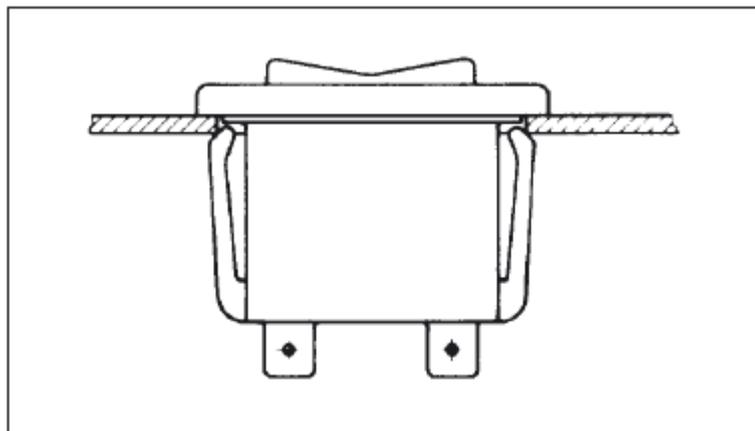


*Figure IV.15 : Exemple du frettage*

### IV .3.5 L'emboîtement élastique

L'emboîtement élastique est un moyen simple, économique et rapide d'assemblage des pièces plastiques. Dans son principe, une contre-dépouille moulée sur l'une des pièces s'accouple avec une lèvre ménagée sur l'autre pièce.

Cette méthode d'assemblage est parfaitement adaptée aux matières plastiques du fait de leur souplesse, de leur allongement élevé et de leur aptitude à être moulées en forme complexes



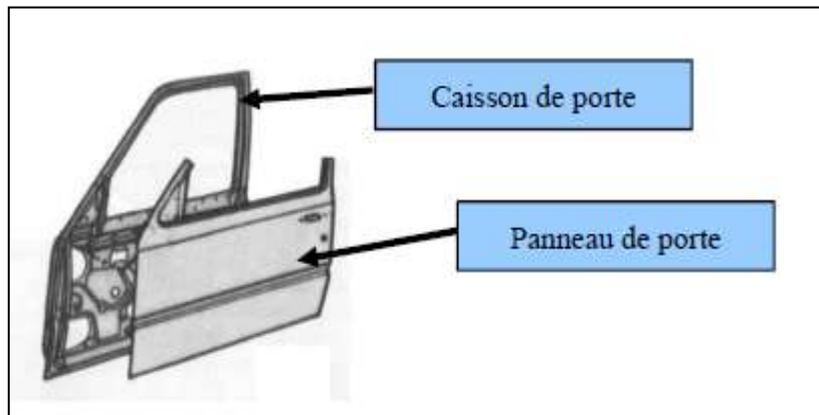
*Figure IV.16 : Modèle d'emboîtement élastique convenablement dimensionné*

### IV .3.6 Sertissage

C'est une technique pouvant être utilisée pour assembler des tôles minces.

Les bords des tôles sont rabattus et compressés.

Un exemple connu sur le sertissage est l'assemblage du panneau de porte sur le caisson de porte



*Figure IV.17 : Sertissage*

### IV .3.7 Collage

Le collage est une technique d'assemblage qui consiste à assembler les différents éléments d'une pièce au moyen d'une colle.

Cette technique présente nombreux avantages et inconvénients ;

✓ **Avantages**

- Permet d'assembler les éléments d'une pièce de matériaux et de dimensions différents.
- Technique simple et propre car elle évite tout autre procédé avec des fixations nécessitant de l'enlèvement de matière (vis, clous...), ce qui rend la structure légère.

✓ **Inconvénients**

- Faible efficacité dans le temps et en conditions difficiles (chaleur, humidité)
- L'assemblage est irréversible, il est difficile de démonter les éléments sans les abîmer- la surface de collage doit être nettoyée au préalable pour assurer une meilleure adhérence – la plupart des colles résistent très peu à la chaleur – il faut un temps de prise assez long pour assurer un assemblage efficace.



*Figure IV.18 : Collage avec une colle*

#### **IV .4 Conclusion**

Dans ce chapitre j'ai essayé de présenter les plusieurs techniques d'assemblage permanent ou démontable telle que ; le Soudage, Boulonnage, Rivetage, Frettage.....etc. et ces techniques permettent d'assembler des pièces ou des objets d'une façon directe ou indirecte on utilisant un intermédiaire.

## Références Bibliographiques

---

### Références Bibliographiques

1. « **Manuel de technologie mécanique** », Guillaume Sabatier, et al, Ed.Dunod.  
**Livre, 1<sup>ère</sup> édition** publiée en 15 Mai 2006 Paris ; ISBN: 9782100499922
2. **Memotech** ; « **Productique matériaux et usinage** » Barlier.C, Ed. Casteilla,  
**Livre, 1<sup>ère</sup> édition** publiée en **1992**, Paris ; EAN13: 9782713512209; ISBN:  
978-2-7135-1220-9;
3. « **Sciences Industrielles** », Millet. N, Ed. Casteilla ; **Livre, 1<sup>ère</sup> édition**  
publiée en **01 Août 2017** Paris ; ISBN: 9782713525193 sur amazon.fr et  
ISBN 10 : 2713525195 - ISBN 13 : 9782713525193 sur AbeBooks.fr
4. **Memotech** ; « **Technologies industrielles** », Baur. D, Ed. Casteilla  
**Livre** publié en **01 juillet 1998** Paris ; ISBN: 9782713519253 sur amazon.fr
5. « **Métrologie dimensionnelle** », Chevalier .A, Ed. Delagrave ;  
**Livre, 1<sup>ère</sup> édition** en **1968, publié en 1976**
6. « **Fabrication mécanique, les différents procédés d'obtention des pièces** », P. Chauvin, **Cours** publié en **09 Mai 2015**.
7. « **Généralités sur les matériaux composites** », Laurent Gornet ; Cel-  
00470296, version 1, Ecole de Nantes, publié en **2011**.
8. « **Métaux et Alliages** », Olivier Dezellus, Laboratoire Multimatériaux et  
Interfaces, Université de Lyon publié en **2008**
9. « **Matières plastiques** », Hammami .T et Louati. H, **Cours** chapitre 1, Licence  
en **GM**, publié en **08 Mai 2016**
10. « **Généralités sur les matériaux composites** » ; Djebloun Youcef, thèse de  
doctorat chapitre 1.
11. « **Technologie de base** », Dr. Adnane Labeled, université Mohamed Khider –  
Biskra, **Support du cours, 2016**
12. « **Étude des produits et des outillages** », **Cours** sur les matériaux STS IPM  
**05/2008**.
13. « **Le moulage en coquille : procédé de réalisation de pièces métalliques** », Bruce ANGLADE - Hélène HORSIN MOLINARO Pierre  
MELLA – Yann QUINSAT école normale supérieure Saclay paris,  
**13/09/2016**

## Références Bibliographiques

---

14. « **Construction mécanique 1** », Ameer Toufik, département de génie mécanique, faculté des sciences appliquées, université Kasdi Merbah Ourgla  
**Cours, 2017**
15. « **Calcul des assemblages en acier poutre-poteau boulonnés par platine d'extrémité** », Abidelah Anis, département de génie civil, établissement de rattachement (USTOMB), **polycopié, 2015**
16. [www.almet-metal.com](http://www.almet-metal.com), site web d'un catalogue des profilés en aluminium
17. [www.Rocd@cier.com](http://www.Rocd@cier.com), cours sur le sciage et le soudage