



**Université de Relizane**  
**Faculté des Sciences et Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**  
**-2021/2022-**



# **Technologie de Base**

## **2<sup>ème</sup> Génie Mécanique**

**Rédigé par**

**Dr. ZOUAMBI Leila**

**Dr. BOURDIM Mokhtar**

Ce polycopié, destiné aux étudiants de la 2<sup>ème</sup> année tronc commun de technologie, a pour objectifs :

- D'apporter des connaissances pluridisciplinaires utilisant les différents types de matériaux ; les métaux et leurs alliages, les céramiques, les polymères et les composites ;
- De permettre à l'étudiant de se familiariser avec les différentes techniques de mise en forme (avec et sans enlèvement de la matière) des matériaux utilisés dans des domaines industriels de pointe (mécanique, aérospatial, aéronaval, sidérurgie, médical...).

L'approche de ce module est basée sur les relations entre la structure, la microstructure, l'élaboration, les propriétés d'usage et les procédés de fabrication de ces matériaux dans le domaine industriel. Il met en relation les types de liaisons et les différents niveaux de structuration de la matière avec les propriétés mécaniques.

# Sommaire

<b>Généralités</b> .....	4
<b>Chapitre I : Matériaux</b> .....	7
I.1. Métaux et Alliages des Métaux.....	Erreur ! Signet non défini.
I.2. Polymères.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3. Céramiques.....	Erreur ! Signet non défini.
I.4. Matériaux composites .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>I.1. Métaux et Alliages des Métaux</b> .....	7
1.1. Structure des Métaux.....	7
1.2. Alliages des Métaux .....	8
<b>1.2.1. Phase</b> .....	8
<b>1.2.2. Types d'alliages</b> .....	8
1.3. Désignation des métaux et alliages.....	9
<b>1.3.1. Désignation des alliages ferreux</b> .....	10
<b>1.3.2. Désignation des métaux non ferreux</b> .....	14
1.4. Caractérisation des propriétés mécaniques des métaux.....	15
<b>I.2. Polymères</b> .....	17
2.4. Définition.....	17
2.5. Classifications des polymères.....	17
<b>2.5.1. Suivant leurs origines</b> .....	17
<b>2.5.2. Suivant leur architecture</b> .....	18
<b>2.5.3. Suivant leurs propriétés</b> .....	19
<b>2.5.4. Suivant le mode de synthèse</b> .....	20
<b>2.5.5. Suivant leurs microstructures (Polymères semi-cristallins ou amorphes)</b> .....	22
2.6. Effet de la température sur le comportement mécanique des polymères .....	23
<i>Les températures clés : <math>T_g</math>, <math>T_f</math> (Fig. I.4)</i> .....	23
a) <i>État vitreux : <math>T &lt; T_g</math></i> .....	23
b) <i>État caoutchoutique : <math>T_g &lt; T &lt; T_f</math></i> .....	23
c) <i>État fluide : <math>T_f &lt; T</math></i> .....	24
<b>I.3. Céramiques</b> .....	26
3.1. Propriétés générales.....	26
<b>3.1.1. Liaisons</b> .....	26
<b>3.1.2. Microstructures et propriétés</b> .....	26
3.2. Types de céramiques .....	27
<b>I.4. Matériaux composites</b> .....	30
4.1. Définition.....	30

<b>4.1.1. Matrice</b> .....	31
<b>4.1.2. Renfort</b> .....	31
4.2. Structures des composites.....	33
<b>4.2.1. Structures en stratifiées</b> .....	33
<b>4.2.2. Structures en sandwich</b> .....	34
4.3. Comportement mécanique des composites .....	34
<b>4.3.1. Rôle des fibres</b> .....	34
<b>4.3.2. Rôle des interfaces</b> .....	35
<b>Chapitre II : Elaboration des matériaux</b> .....	36
<b>(Procédés de mise en forme sans enlèvement de la matière)</b> .....	36
1. Procédés de Mise en Forme des Métaux et Alliages .....	36
2. Procédés de Mise en Forme des Céramiques .....	45
3. Procédés de Mise en Forme des Polymères .....	51
<b>Chapitre III : Usinage</b> .....	53
<b>(Procédés de mise en forme avec enlèvement de la matière)</b> .....	53
III.1. Fraisage .....	54
III.2. Tournage.....	58
III.3. Perçage .....	60
<b>Chapitre IV : Assemblage des matériaux</b> .....	65
1. Les assemblages mécaniques amovibles (Boulonnage) .....	66
2. Les assemblages mécaniques permanents (rivetage).....	67
3. Collage .....	70
4. Assemblage hybrides.....	73
5. Soudage .....	74
Références bibliographiques .....	80

# Généralités

Les objets qui nous entourent sont tous constitués d'une matière choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour conférer à l'objet la forme souhaitée.

Un matériau est la matière choisie en raison de ses propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriés pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée.

Le choix d'un matériau dépend de plusieurs critères :

Caractéristiques *mécaniques* : élasticité, plasticité, résistance à la rupture, résistance à l'usure, ténacité, tenue à la fatigue, au fluage...

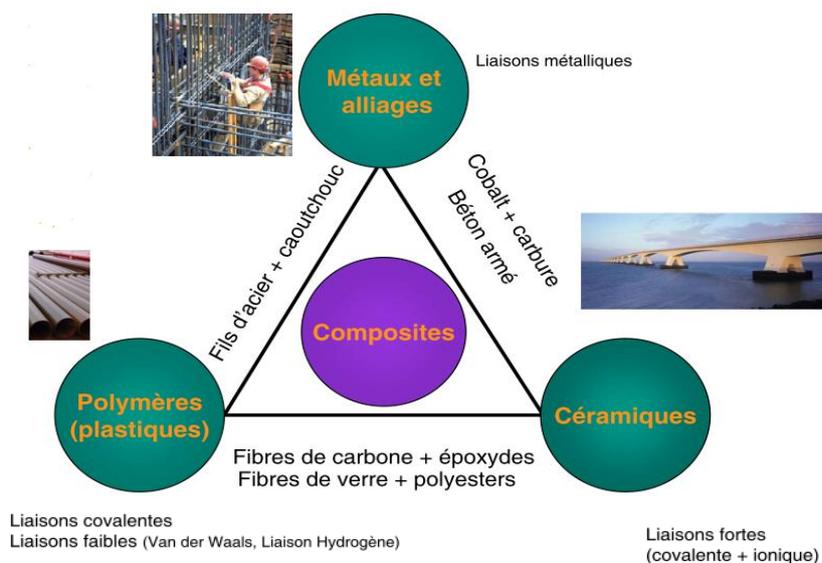
Caractéristiques *physico-chimiques* : comportement à la corrosion, vieillissement...

Caractéristiques de *mise en œuvre* : usinabilité, soudabilité, trempabilité...

Caractéristiques *économiques* : prix, disponibilité, capacité au recyclage, expérience industrielle, durée de vie...

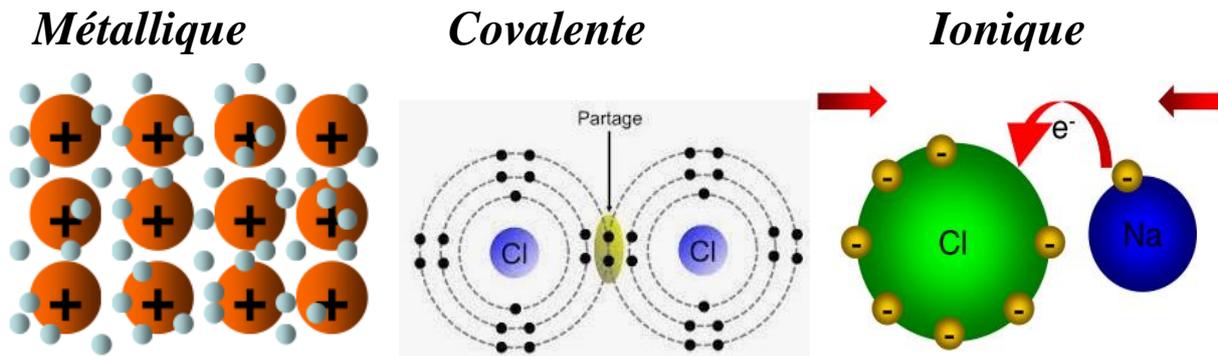
Les matériaux utilisés, dans l'industrie mécanique, ont été décomposés en quatre classes principales, soient les métaux, les polymères, les céramiques et les matériaux composites faisant un mélange de différentes phases des trois premières familles.

Les propriétés d'usage, qu'elles soient mécaniques ou physico-chimiques, sont liées à la nature des liaisons chimiques entre les atomes constituant le matériau.



## Deux types de liaisons chimiques entre les atomes constituant le matériau :

- ✓ liaison primaire ou chimique (forte) : seulement les couches d'électrons externes de l'atome sont impliquées. La condition couche vide/pleine est remplie (covalente, ionique, métallique) ;
- ✓ liaison secondaire ou physique (faible) : plus faible que les liaisons primaires, influence les propriétés physiques du matériau (Van der Waals, hydrogène).



Liaisons chimiques entre les atomes constituant le matériau

Les propriétés chimiques des éléments ne sont fonctions que leurs électrons périphériques (de valence) :

- La liaison ionique : transferts d'électrons ;
- La liaison covalente : partage d'électrons de valence ;
- La liaison métallique : nuage d'électrons qui assurent la liaison entre les ions métalliques.
- Liaisons faibles ou liaisons secondaires : simples attractions électrostatiques entre charges électriques de signes opposés. Elles apparaissent entre les pôles + et - de molécules. Elles agissent à plus longue distance, mais avec une intensité plus faible que les liaisons fortes.

### Exemples.

- Liaisons de Van der Waals entre macromolécules dans un polymère.
- Liaisons-hydrogène entre molécules d'eau H<sub>2</sub>O dans la glace.

La nature des liaisons détermine en grande partie les propriétés des phases condensées (solide ou liquide) : ductilité des métaux, fragilité des céramiques, transparence, conductivité, comportements des polymère, etc..

### Electronégativité :

L'électronégativité d'un atome est une grandeur physique qui caractérise sa capacité à attirer les électrons lors de la formation d'une liaison chimique avec un autre atome. La différence



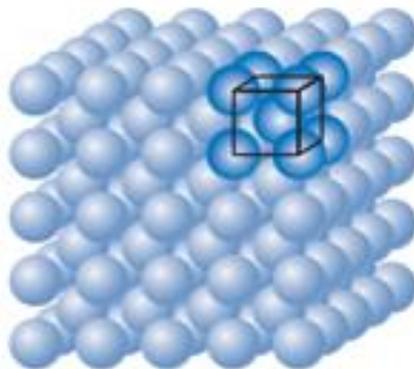
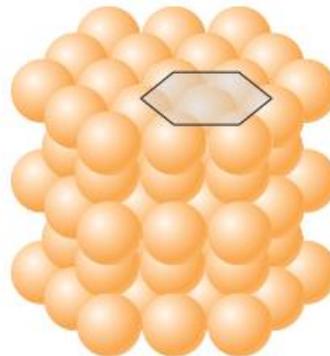
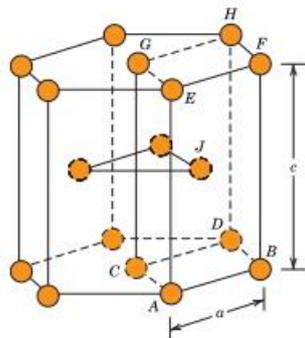
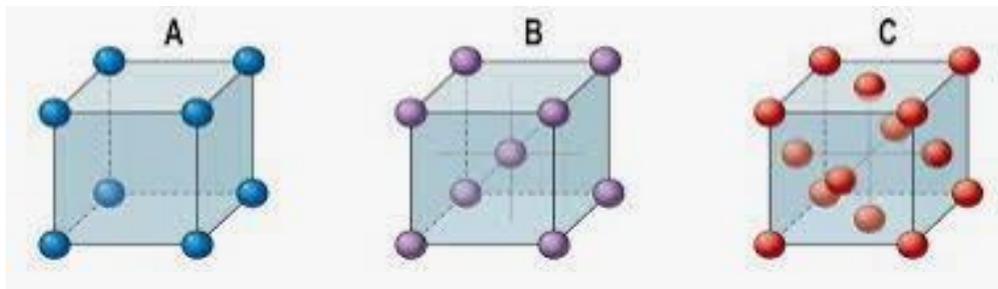
# Chapitre I : Matériaux

## I.1. Métaux et Alliages des Métaux

### 1.1. Structure des Métaux

Les métaux ont une structure cristalline. Les plus fréquentes de ces structures cristallines sont celles cubique centrée (cc), cubiques à faces centrées (cfc) et hexagonale compacte (hc).

Les métaux qu'utilisent les ingénieurs sont rarement des corps purs ou des mélanges parfaitement homogènes ; se sont souvent des corps qui comportent plusieurs phases distinctes aux propriétés différentes. Les propriétés des matériaux dépendent du type des phases en présence et de leur répartition, autrement dit, de la microstructure des matériaux.



Les structures cristallines : (a) Cubique centrée (cc), (b) Cubique à faces centrées (cfc) et (c) Hexagonale compacte (hc).

## 1.2. Alliages des Métaux

Un alliage métallique est constitué d'un métal de base auquel on ajoute des atomes d'un autre métal en vue d'accroître ses caractéristiques mécaniques (résistance en général).

En général, pour que deux éléments A et B puissent être entièrement miscibles à l'état solide, les atomes de A et B doivent être semblables de par leur taille, leur valence, leur électronégativité et leur structure cristalline à l'état solide.

Un écart plus ou moins important par rapport à l'une ou à l'autre des règles énoncées plus haut conduit à une miscibilité partielle.

### 1.2.1. Phase

Une phase est une partie homogène d'un corps. Elle est caractérisée par une structure et par un arrangement identique d'atomes.

### 1.2.2. Types d'alliages

On distingue :

#### *a) Les alliages ferreux*

On appelle alliage ferreux tout alliage constitué essentiellement de Fer (Fe) et de Carbone (C).

On distingue deux domaines d'alliages ferreux. L'acier et la fonte, de par leurs propriétés mécaniques et de la grande disponibilité des minerais et leurs coûts, se sont imposés comme les alliages les plus utilisés, ils ne sont toutefois pas les plus performants selon les applications.

**Aciers :** la teneur en carbone est de 0.02 à 1.5%. Particulièrement recommandés pour la fabrication de pièces destinées à recevoir de fortes sollicitations mécaniques, appréciés pour leur bonne aptitude au soudage.

**Fontes :** la teneur en carbone varie de 2% à 6.67%. Ces alliages ont une excellente aptitude au moulage et possèdent une très bonne usinabilité et une capacité d'amortissement des vibrations. Certaines nuances se caractérisent par des propriétés à la corrosion, à l'oxydation à chaud et une très faible dilatation thermique. Les propriétés mécaniques de certains types de fonte sont voisines des alliages métalliques les plus résistants que sont les aciers.

L'augmentation du pourcentage en carbone dans les aciers, accroît les caractéristiques suivantes :

- Dureté (H) [Brinell (HB), Rockwell (HR), Vickers (HV), Knoop (HK)]
- Résistance à la Rupture ( $R_m$ )
- Limite Élastique ( $R_e$ )
- Résistance Corrosion
- Résistance à l'Usure

*b) Alliages non ferreux* ne contiennent pas de fer mais combinent plutôt d'autres métaux. Bien que ne représentant que 10 % (en masse) 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, la facilité de mise en œuvre. Ces avantages l'emportent dans certaines applications, malgré le coût de revient plus élevé de ces alliages. Nous pouvons citer :

- Les alliages légers qui sont élaborés à partir d'aluminium et les alliages ultra-légers à partir de magnésium.

**Exemple : Al 7075 [Al Zn 5.5 Mg Cu]** alliage d'aluminium, contenant 5.5 % de Zinc, du magnésium (- de 1 %) et du cuivre (- de 1 %). Pièces usinées et forgées de hautes caractéristiques mécaniques ;

- Les alliages cuivreux souvent apprécié pour son aspect doré qu'il partage avec l'or, ses caractéristiques de conductibilité et son excellente sonorité ;
- Les alliages de zinc sont le plus souvent alliés à l'aluminium (de 4 à 30%) et contiennent parfois de faibles additions de magnésium (de 0,012 à 0,06%) et de cuivre (jusqu'à 3%). Le plus couramment utilisé (95% du marché) est appelé zamak (zinc pur à 99,995%). Sa coulabilité et sa bonne pénétration en font un alliage adapté à la coulée sous-pression qui permet d'obtenir des pièces minces et/ou de configuration compliquée. La précision dimensionnelle des pièces coulées en zamak est exceptionnelle et peut s'appliquer à des parois d'une grande finesse ;
- Autres métaux non ferreux existent encore (platine, titane, tungstène, plomb, or, mercure, étain, alliages à base de Co ou de Ni –aussi appelés « superalliages »-, etc)... Nous ne pouvons tous les décrire ici, bien que les propriétés de nombre d'entre eux soient très intéressantes à titre d'exemple : Les superalliages sont utilisés pour mouler les aubes des turbines des avions à réaction civils et militaires ; ils sont extrêmement durs et ne peuvent donc pas être usinés, d'où l'intérêt de fabriquer ces aubes en les moulant, grâce au processus de « fonderie de précision à modèle perdu ». Un autre exemple particulièrement intéressant est celui du Titane, dont les caractéristiques offrent des perspectives d'utilisation croissantes dans certains marchés –tel l'aéronautique et la biomécanique.

### 1.3. Désignation des métaux et alliages

En technique, la désignation fait référence à la notation abrégé qui permet de définir un élément de façon claire et précise.

En métallurgie, la **désignation des métaux et alliages** est la désignation normalisée des matériaux métalliques.

### 1.3.1. Désignation des alliages ferreux

La norme NF A 02-005 a été abrogée et remplacée par la norme NF EN 10027 nov. 1992 Normalisation européenne et française NF EN 10027-1 (Système de désignation des aciers-partie 1- **désignation symbolique**) et NF EN 10027-2 (Système de désignation des aciers-partie 2- **Systèmes numériques**).

#### Désignation symbolique des aciers NF EN 10027-1

La norme a retenu deux groupes d'aciers

- **Groupe 1 : aciers désignés à partir de leur emploi et de leurs caractéristiques mécaniques et physiques**
  - **Aciers de construction**

Le symbole **S** qui correspond à un usage général de base (construction de bâtiment...) suivi de  $R_e$  (limite élastique exprimée en méga-pascal (MPa)).

*Exemple : S235* (est un acier non-allié pour construction de bâtiment de limite élastique 235 MPa)

Le type **E** qui est utilisé dans la construction mécanique suivi de  $R_e$ .

*Exemple : E295* (est un acier non-allié pour construction mécanique de limite élastique 295 MPa)

Les désignations précédées par la lettre G lorsque l'acier est spécifié sous forme d'une pièce moulée : **GS 235, GE 295**

- **Groupe 2 : aciers désignés à partir de leurs compositions chimiques**
  - **Sous-groupe 2.1 :**

- **Aciers non alliés** : Les aciers non alliés, constitués uniquement de fer et de carbone.

**Spéciaux** : pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables, ...

Le symbole **C**+% carbone  $\times 100$ . Exemple : **C 35** (acier avec 0.35% de carbone)

Les désignations sont précédées de la lettre G lorsque l'acier est spécifié sous forme d'une pièce moulée : **GC 35**

- **Sous-groupe 2.2 :**

- **Aciers non alliés avec une teneur en manganèse  $\geq 1\%$**
- **Aciers faiblement alliés** : En dehors de la variation du pourcentage de carbone, on peut modifier les caractéristiques mécaniques et aptitudes technologiques des aciers par addition d'autres métaux. Aucun élément d'addition ne doit dépasser 5 %

en masse, ils sont utilisés pour des applications nécessitant une haute résistance. Les principaux sont, avec leurs principales influences :

MANGANÈSE, augmente : la limite élastique et la trempabilité

NICKEL, la résistance aux chocs et à la corrosion (fort %)

CHROME, la résistance à l'usure et à la corrosion

TUNGSTÈNE, la résistance à l'usure et à la chaleur

MOLYBDÈNE, la résistance à l'usure et à la chaleur

VANADIUM, la résistance à l'usure et aux déformations (Ténacité)

### Désignation

- un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone,
- les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes,
- les teneurs des principaux éléments d'addition multipliés par 4, 10, 100 ou 1000 (voir tableau III.1) ;
- éventuellement, des indications supplémentaires concernant la soudabilité (S), l'aptitude au moulage (M), ou à la déformation à froid (DF).

Élément	Symbole chimique	Symbole métallurgique	Facteur multiplicateur
Aluminium	Al	A	10
Azote	N	N	100
Bore	B	B	1000
Chrome	Cr	C	4
Cobalt	Co	K	4
Cuivre	Cu	U	10
Magnésium	Mg	G	10
Manganèse	Mn	M	4
Molybdène	Mo	D	10
Nickel	Ni	N	4
Phosphore	P	P	100
Plomb	Pb	Pb	10
Silicium	Si	S	4
Soufre	S	F	100
Titane	Ti	T	10
Tungstène	W	W	4
Vanadium	V	V	10

Tableau III.1 : Symboles de désignation des éléments d'ajout des aciers faiblement alliés

**Exemple :**

**35NiCrMo16** : contient 0,35 % de carbone, 4 % de nickel, du chrome et molybdène en plus faible teneur. Cet acier présente une bonne tenue aux chocs ainsi qu'une haute résistance mécanique jusque 600°C.

100Cr6 : 1 % de carbone et 1,5 % de Chrome.

**35 Cr Mo 4S** (acier avec 0.35% de Carbone, 1% de chrome, moins de 1% de Molybdène. Cet acier est soudable).

– **Sous-groupe 2.3 :**

▪ **Aciers fortement alliés**

Parmi ces aciers, nous avons les aciers inoxydables dont le chrome est l'élément d'addition essentiel. On utilise ce type d'acier en visserie, pour les ressorts, pour les arbres de pompes, les soupapes, ...etc.

Un acier est considéré comme fortement allié si au moins un des éléments d'addition a une teneur supérieure à 5%.

La désignation est composée de la façon suivante :

- La lettre X.
- Un *nombre* égal à 100 fois la teneur en carbone.
- Les *symboles chimiques* des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Dans le même ordre, les *teneurs* des principaux éléments.

**Exemples : X6 Cr Ni Mo Ti 17-12**

X = Acier fortement allié

0,06 % de Carbone

17 % de Chrome

12 % de Nickel

Molybdène et Titane (moins de 5%)

**Exemple : X8 Cr Ni 18-9**

**X** : Précise que l'alliage qui va être codé est un acier fortement allié

**8** : Cette valeur représente le pourcentage de carbone multiplié par 100 (ici 0,08%)

**Cr Ni** : Ce sont les symboles chimiques des éléments d'addition placés dans l'ordre décroissant de leur teneur. Ici Cr, le chrome a une teneur  $\square$  à Ni, le nickel.

**18-9** : La valeur indique la teneur % en masse des éléments d'addition depuis le premier symbole chimique. Ici Cr = 18% et Ni = 9%. Les valeurs sont séparées par un tiret.

**FONTES :**

**Désignation symbolique selon la norme européenne NFEN 1560-1**

La norme définit également une désignation numérique.

La désignation symbolique débute par deux lettres EN suivies d'un tiret puis des lettres GJ (EN-GJ). Ces dernières sont suivies d'une lettre dont (Tableau III.2) :

Première lettre structure du graphite	
L	Lamellaire
S	Sphéroïdale
M	Graphite de recuit (malléable)
V	Vermiculaire
Y	Structure spéciale
N	Absence de graphite

Tableau III.2 : Lettres suivant la désignation symbolique de la fonte

**Exemple :**

**EN-GJ L** : une fonte à graphite lamellaire

Un groupe de chiffres et de lettres définissant la classe de fonte suivant une des trois variantes suivantes :

- **Variante1**

Un nombre qui indique la résistance à la traction (N/mm<sup>2</sup>).

- Après un tiret un nombre seul représente l'allongement minimal exigé en %
- Après un tiret un nombre indique la résistance minimale à la traction qui peut être suivi par une lettre qui indique le mode de production de l'échantillon d'essai :

**S** pour échantillon coulé séparément ;

**U** pour échantillon alternant ;

**C** pour échantillon prélevé sur une pièce.

**Exemple :**

**EN-GJL-150S** : fonte à graphite lamellaire, résistance minimale à la traction de 150 N/mm<sup>2</sup> (MPa), mesuré sur échantillon coulé séparément.

- **Variante2**

La lettre H indique que la fonte est classée suivant sa dureté est suivie d'une lettre qui renseigne sur le type d'essai de dureté

- **B** : pour Brinell,
- **V** : pour Vickers,
- **R** : pour Rockwell,

Suivi ensuite d'un nombre qui indique la dureté prescrite.

**Exemple :**

**EN-GJS-HB230** : fonte à graphite sphéroïdal, dureté Brinell, dureté minimale de 230.

- **Variante3**

La lettre X qui indique que la fonte est classée selon sa composition chimique. Cette lettre peut être suivie qui représente alors la teneur en carbone imposée en %, multiplié par 100. Les symboles chimiques des éléments d'alliage rangés dans l'ordre décroissant des teneurs et immédiatement suivis des nombres-séparés par un tiret- représentant les teneurs respectives de ces éléments.

**Exemple :**

**EN-GJN-X 300 Cr Ni Si** : fonte sans graphite, 3 % de carbone, 9% de Chrome, 5% de Nickel et 2% de Silicium.

### 1.3.2. Désignation des métaux non ferreux

- **Métal pur** : Symbole + indice de pureté

**Exemples :**

A7 : aluminium pur 99.7% - A95 : aluminium pur à 99.95%.

- **Alliages** : métal de base + éléments d'addition par ordre de teneur décroissante

**Exemples :**

GA3Z1 : alliage de magnésium + 3% d'Aluminium + 1% de Zinc

UZ33Pb2 : alliage de Cuivre + 33% de Zinc + 2% de Plomb (laiton)

UE12P : alliage de cuivre + 12% d'Étain + traces de phosphore

AS10G : alliage d'Aluminium + 10% de Silicium + traces de magnésium

## 1.4. Caractérisation des propriétés mécaniques des métaux

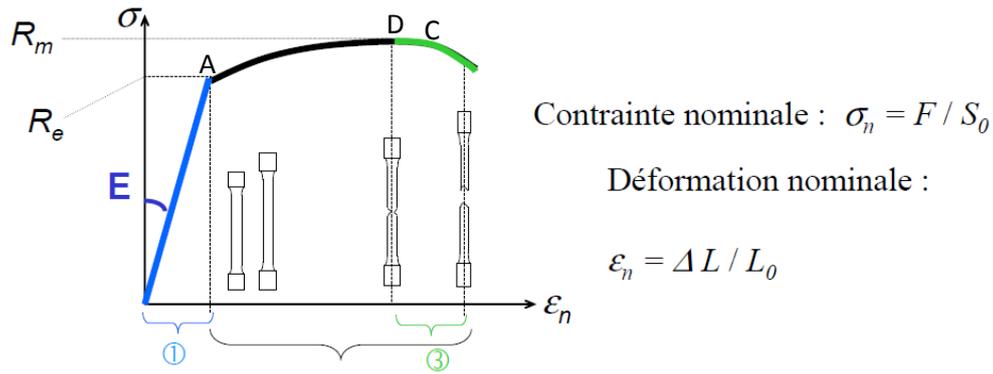
L'ingénieur ne peut calculer une pièce ni déterminer les charges admissibles sans connaître les caractéristiques mécaniques du matériau qu'il compte utiliser. Entre autres, il doit savoir à partir de quelle charge la pièce commence à se déformer de façon irréversible, entraînant ainsi une modification de sa géométrie, et à partir de quelle charge il y a risque de rupture. Le but des essais mécaniques est d'obtenir des valeurs des propriétés qui seront utilisables dans les calculs de résistance des matériaux ou qui permettront d'apprécier le comportement d'un matériau en service.

En règle générale, pour être valable et donner des mesures significatives, les essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contraintes simples et connus, d'interprétation facile et non équivoque. De plus, ils doivent être reproductibles : les résultats obtenus par un laboratoire doivent être utilisables de façon universelle et avoir partout la même signification. C'est pourquoi les organismes nationaux et internationaux normalisent ces essais. Citons, à titre d'exemples, les organismes de normalisation suivants : l'ASTM (American Society for Testing and Materials, USA), l'ACNOR (Association Canadienne de normalisation), l'AFNOR (Association Française de normalisation), l'ISO (*International Standardization Organization*) (*Organisation internationale de normalisation*). La normalisation des essais porte sur la géométrie des éprouvettes et sur leur prélèvement, sur les machines d'essai et leur étalonnage, sur les techniques expérimentales mises en œuvre et sur le dépouillement et la présentation des résultats.

*Les propriétés mécaniques concernent :*

- la déformation d'un matériau soumis à une force ;
- La résistance à la rupture ( $R_m$ ) : caractérise la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre ;
- La dureté (H) : résistance d'un matériau à la pénétration ;
- La ductilité : capacité du matériau à se déformer de manière irréversible avant de rompre ;
- La rigidité : fonction de l'intensité des liaisons entre atomes ou molécules (module d'Young) ;
- La ténacité : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture.

**Essai de traction** le plus simple et le plus fréquemment utilisé. Il consiste à placer une éprouvette du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur le matériau jusqu'à sa rupture. On enregistre la force  $F$  et l'allongement  $\Delta l$ , que l'on peut convertir en contrainte déformation.



- ②
- ① domaine élastique (déformation réversible)
  - ② domaine plastique (déformation irréversible)
  - ③ striction puis rupture (déformation irrémédiable)

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ (MPa) où } 1\text{Pa}=1\text{N/m}^2 \text{ et } 1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$$

### Domaine élastique

C'est une zone linéaire : la charge est proportionnelle à l'allongement de l'éprouvette  $F=f(\Delta l)$ .

Zone AD : **Domaine plastique**

Si on supprime la charge, les déformations sont permanentes.

Zone CD : **Striction**

Forte diminution de la section jusqu'à rupture.

**En A** correspond une action mécanique d'intensité  $F_e$  qui est la charge maximale admise par l'éprouvette dans le domaine élastique.

On note :  $R_e = F_e / S_0$ ,  $R_e$  est la limite élastique admise par le matériau.

**En C** correspond une action mécanique d'intensité  $F_r$  qui est la charge maximale admise par l'éprouvette pendant l'essai.

On note :

$R_m = F_r / S_0$ ,  $R_m$  est la limite à la rupture admise par le matériau.

## I.2. Polymères

### 2.4. Définition

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs, et « meros » partie. Un polymère est une macromolécule, organique ou inorganique, constituée de l'enchaînement répété d'un même motif, le monomère (du grec monos: un seul ou une seule, et meros ; partie), reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Les chaînes de polymères interagissent entre elles avec des forces plus faibles comme les liaisons de van der Waals. Les propriétés des polymères dépendent notamment du type de monomère(s), de la nature de leur assemblage et du degré de polymérisation.

Dans la macromolécule suivante .....**M-M-M-M-M-M-M**..... = **[-M-]<sub>n</sub>** l'unité constitutive est **M**; elle est formée d'un groupe d'atomes qui se répète. A l'échelle moléculaire, quelques centaines de **nm**, la plupart des macromolécules se présentent sous forme de «fils long et souples». Les réactions chimiques permettant de passer d'un monomère **M** à la macromolécule **[-M-]<sub>n</sub>** s'appellent polymérisation.

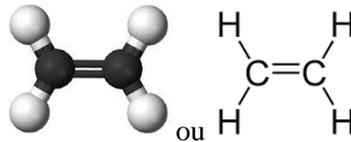
**M**= motif monomère (motif de répétition)

**n**=degré de polymérisation ; nombre de fois que l'on rencontre M dans la macromolécule

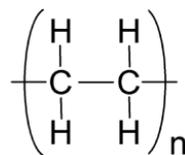
#### Exemple :

##### Le polyéthylène

Molécule d'éthylène :



Polyéthylène :



### 2.5. Classifications des polymères

Les polymères peuvent être classés en différentes familles.

#### 2.5.1. Suivant leurs origines

2.5.1.1. *Polymères naturels* : Cellulose (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>), le cuir, l'os, le caoutchouc naturel...

**2.5.1.2. Polymères artificiels :** pour lesquels on modifie chimiquement les polymères naturels tout en préservant le squelette moléculaire.

**2.5.1.3. Polymères synthétiques :** issue de la chimie macromoléculaire.

## **2.5.2. Suivant leur architecture**

Les procédés modernes utilisés pour la synthèse des polymères permettent de leur conférer des structures variées (Fig. I.1).

### **2.5.2.1. Polymères linéaires**

Les monomères sont joints bout à bout en chaînes simples. Ces longues chaînes flexibles qui font penser à une masse de spaghettis. Dans le cas des polymères linéaires, les liaisons de Van Der Waals entre les chaînes peuvent être prononcées.

Parmi les polymères courants qui adoptent une structure linéaire figurent : le Polychlorure de Vinyle

### **2.5.2.2. Polymères ramifiés**

Les Polymères ramifiés se caractérisent par la présence de chaînes latérales qui sont raccordées aux chaînes principales.

### **2.5.2.3. Polymères à liaisons transversales**

Des liaisons covalentes joignent en divers points les chaînes linéaires adjacentes. Ces liaisons apparaissent au cours de la synthèse du polymère ou à la suite d'une réaction chimique irréversible et résultent souvent de l'ajout d'atomes comme par exemple : le caoutchouc naturel comporte des liaisons transversales d'atomes de S.

### **2.5.2.4. Polymères réticulés**

Les monomères à liaisons covalentes forment des réseaux tridimensionnels et sont plus rigides. Les époxydes appartiennent à ce groupe.

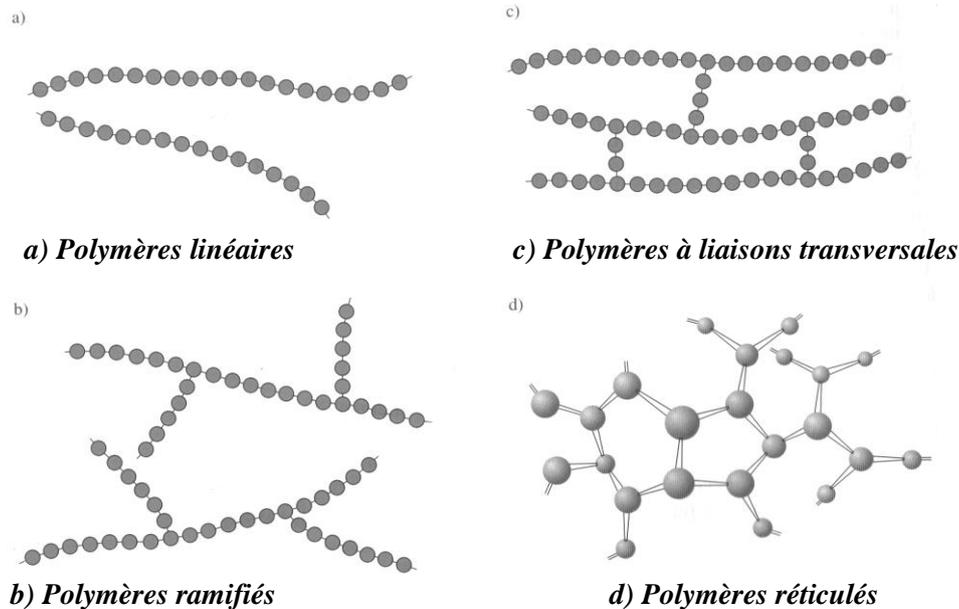


Figure I.1: Classification des polymères suivant leur architecture

### 2.5.3. Suivant leurs propriétés

En général, les polymères formés à partir de chaînes linéaires non réticulées et flexibles sont souples (à certaines températures) tandis que les polymères très réticulés, formant un réseau tridimensionnel sont plus rigides. Les premiers donnent lieu à des polymères thermoplastiques, les seconds à des polymères thermodurcissables. A ces deux familles s'ajoute celle particulière des élastomères.

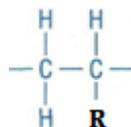
#### a. Thermoplastiques

Très nombreux, ils sont les plus utilisés. Ils sont des polymères linéaires ou ramifiés. Ils ramollissent à la chaleur. Ils peuvent être refondus et remis en œuvre plusieurs fois. Cette matière conserve de façon réversible sa thermoplasticité initiale. Les thermoplastiques sont plus faciles à fabriquer et permettent des formes plus complexes que les thermodurcissables.

#### Exemples :

Polyéthylène (PE), polypropylène (PP), polystyrène (PS), polychlorure de vinyle (PVC) ...

Beaucoup ont pour unité de base :



Répétée plusieurs fois. Le radical **R** peut être tout simplement de l'hydrogène (comme pour le polyéthylène), ou CH<sub>3</sub> (polypropylène) ou Cl (polychlorure de vinyle), ou C<sub>6</sub>H<sub>4</sub> (polystyrène);

**Polychlorure de vinyle** (Sa limite élastique est de 40.7-44.8MPa, sa résistance à la traction est de 40.7-51.7MPa et son allongement à la rupture est entre 40-80%)

**Polypropylène** (Sa limite élastique est de 31-37.2MPa, sa résistance à la traction est de 31-41.4MPa et son allongement à la rupture est entre 40-80%)

### *b. Thermodurcissables*

Ils commencent par se ramollir sous l'action de la chaleur. Les molécules sont réticulées pendant le durcissement pour atteindre un état solide qu'elle conservera sous forme irréversible.

**Exemple :** Epoxyde (sa résistance à la traction est de 27.6-90MPa et son allongement à la rupture est entre 3-6%)

### *c. Elastomères*

Ce sont des matériaux amorphes, mais avec quelques pontages entre les chaînes macromoléculaires linéaires, ces liaisons sont assurées par des atomes C, S ou O. La réaction permettant d'établir ces liaisons covalentes est la vulcanisation. Cette opération confère aux élastomères une structure tridimensionnelle très souple et très déformable, car le taux de réticulation est faible. Ils se distinguent par leur grande capacité de déformation réversible qui peut atteindre 1000%. Les pontages assurent la mémoire de l'état initial.

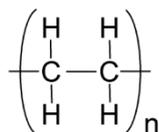
**Exemple :** Silicone (sa résistance à la traction est de 10.3MPa et son allongement à la rupture est entre 100-800%)

### *i. Suivant le mode de synthèse*

**1. Polyaddition :** Les unités (motifs ou monomères) constitutives ne comportent que quelques atomes. Les monomères s'ajoutent par addition lors de la polymérisation engendrant ainsi les polymères thermoplastiques.

**a.1) Homopolymère :** est un polymère issu de la polymérisation d'un seul monomère.

**Exemple:**  $(C_2H_4)_n$

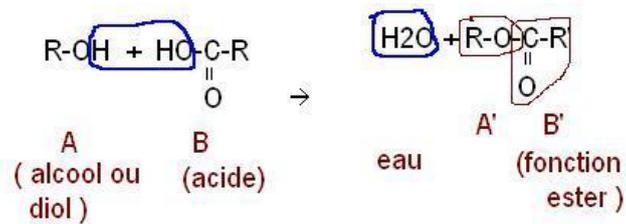


Où  $n$  est l'indice de polymérisation. Il peut prendre une valeur entre  $10^3$  et  $10^6$  et la longueur de chaîne peut atteindre  $10\mu m$ .

**a.2) Copolymère :** est un polymère issu de la polymérisation d'au moins deux types de molécules, chimiquement différentes appelées comonomères. Il est formé d'au moins deux motifs de répétition. On distingue deux types de copolymères :



*Exemple :*



**ii. Suivant leurs microstructures (Polymères semi-cristallins ou amorphes)**

Lorsque le polymère est fondu, sa structure est celle d'un plat de spaghetti.

Au refroidissement, les spaghettis peuvent se figer sans se réarranger : le polymère est alors amorphe. Mais ils peuvent aussi se déplacer et s'aligner partiellement pour former localement de petits cristaux : le polymère est alors semi-cristallin (Fig. I.2).

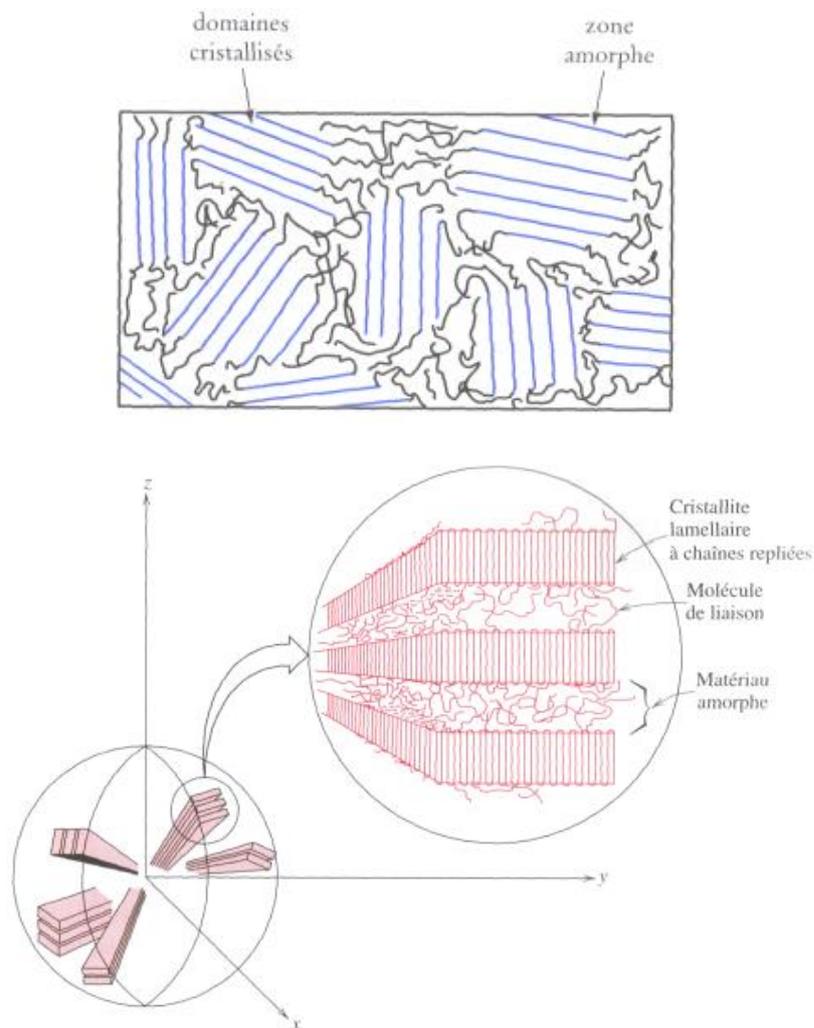


Figure I.2 : Classification des polymères selon leur structure

Le repliement des chaînes conduit à la formation de plaquettes cristallines ( $L = 1\mu\text{m}$ ,  $e = 100-1000\text{\AA}$ ).

Un même polymère peut être amorphe ou semi-cristallin. Tout dépend des conditions d'élaboration. La contrainte peut augmenter la cristallinité entre  $T_g$  et  $T_f$ .

## b. Effet de la température sur le comportement mécanique des polymères

### *Les températures clés : $T_g$ , $T_f$ (Fig. I.4)*

Lorsque la température augmente, l'énergie thermique fournie aux molécules augmente leur mobilité. Le nombre de liaisons de faible intensité, Van der Waals, diminue quand la température augmente ce qui libère les mouvements moléculaires.

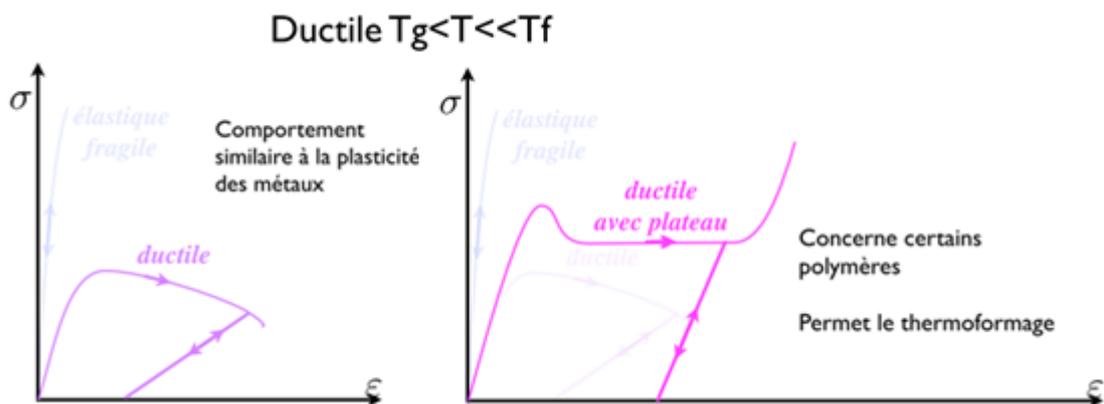
Nous considérerons que la température de transition vitreuse d'un matériau  $T_g$ , est la température en-dessous de laquelle les molécules ont une faible mobilité relative. La température  $T_g$  est habituellement utilisée pour les phases totalement ou partiellement amorphes.

#### *a) État vitreux : $T < T_g$*

Dans une phase cristalline, les molécules sont rangées et alignées. Elles n'ont en revanche aucun ordre dans une phase vitreuse : elles forment des pelotes enchevêtrées. La mobilité des molécules de la phase vitreuse est d'autant plus faible que la température est basse. Ce qui confère à tous les polymères en général une bonne rigidité, une bonne résistance mécanique, et une faible capacité de déformation.

#### *b) État caoutchoutique : $T_g < T < T_f$*

Il est dû à la phase amorphe et existe dans la quasi-totalité des polymères. Au-dessus de  $T_g$ , les liaisons secondaires (Van der Waals) non-covalentes entre les chaînes des polymères deviennent faibles et le polymère devient souple et capable de se déformer élastiquement ou plastiquement sans rupture (Fig. I.3). Ce comportement est l'une des propriétés qui rendent la plupart des plastiques si utiles. Un tel comportement n'existe pas pour les plastiques thermodurcissables réticulés qui, une fois fabriqués, le sont de manière irréversible et se briseront en éclats plutôt que se déformer, sans jamais redevenir plastiques ni fondre en étant chauffés.



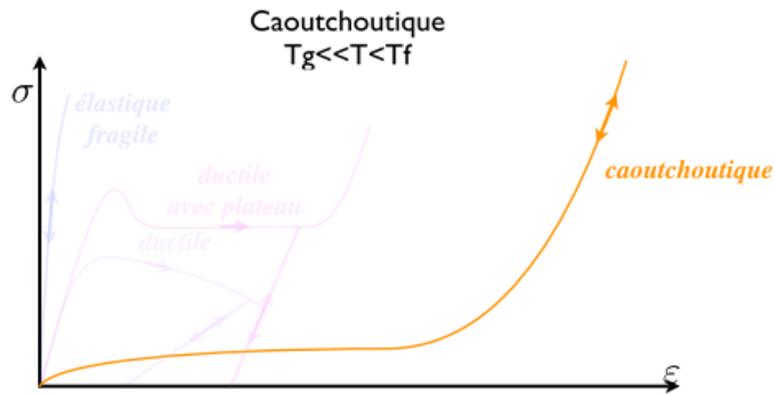


Figure I.3 : Les différents modes de déformation

*c) État fluide :  $T_f < T$*

Les polymères thermoplastiques (non-réticulés) sont complexes car, en plus de posséder une température de fusion,  $T_f$ , au-dessus de laquelle leur structure cristalline disparaît.

Cet état ne concerne que les thermoplastiques. La phase cristalline n'existe plus car  $T > T_f$ , il n'y a plus qu'une phase amorphe. Toutes les molécules (celles provenant de la phase amorphe et celle provenant de la phase cristalline) forment des pelotes. Les nœuds d'enchevêtrement disparaissent par reptation, le matériau s'écoule comme un fluide. Le polymère est malléable : peu de résistance mécanique, peu rigide...

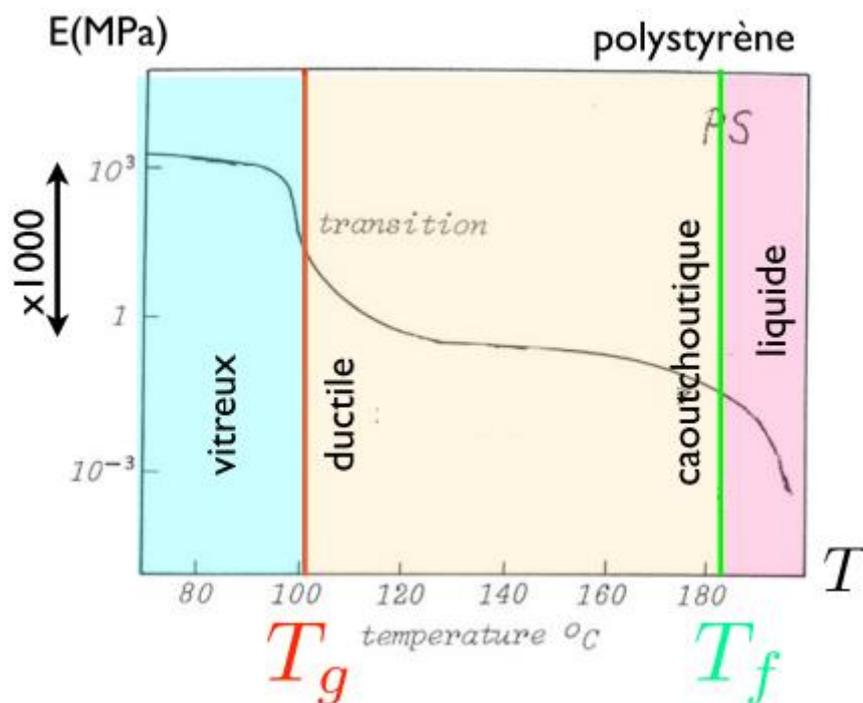


Figure I.4 : Effet de la température sur comportement mécanique de polymère

Suivant l'évolution du comportement mécanique de polymère, il passe de l'état de fluide visqueux à l'état solide, en passant éventuellement par un état pâteux dit caoutchoutique entre  $T_f$  et  $T_g$ .

Cette transition représente un intervalle de quelques dizaines de degrés Celsius souvent situé au voisinage de la température ambiante.

L'architecture des macromolécules joue un rôle dans ces transformations : les polymères à degré de polymérisation (DP) élevé, à chaînes ramifiées ou à radicaux complexes à fort encombrement ont une température  $T_g$  plus élevée que ceux dont les chaînes sont linéaires ou courte.

## I.3. Céramiques

### Généralités

Le mot céramique (du grec *keramikos*, « argile cuite ») implique la cuisson de matières premières argileuses, matières abondantes et bon marché. Les céramiques, sous forme de poterie et de briques, sont les premiers matériaux que l'homme a fabriqués par transformation de matières premières. La cohésion des céramiques est assurée par des liaisons fortes, ioniques ou covalentes.

Aujourd'hui, le terme céramique englobe une gamme de matériaux beaucoup plus vaste. En effet, outre les céramiques traditionnelles fabriquées à partir d'argiles, on retrouve les verres, les céramiques techniques, les carbones et graphites, les ciments et plâtres.

### 3.1. Propriétés générales

Les propriétés générales des céramiques découlent des propriétés de leurs liaisons chimiques, de leur état cristallin ou amorphe et de leur microstructure.

#### 3.1.1. Liaisons

Les céramiques sont constituées de composés d'éléments non métalliques avec d'autres éléments non-métalliques ou métalliques : fréquemment des oxydes, mais aussi des carbures, nitrures, borures ou des composés plus complexes. Ceci explique qu'on y trouve des liaisons allant d'un caractère purement covalent ( $C_{\text{diamant}}$ , Si, Ge, GaAs...) à un caractère purement ionique (NaCl, MgO,  $Al_2O_3$ ...), en passant par un caractère mixte ( $SiO_2$ ...).

L'absence d'électrons libres fait de la plupart des matériaux céramiques de mauvais conducteurs de l'électricité et de la chaleur. Elles sont fréquemment utilisées comme diélectriques et isolants thermiques.

Les liaisons étant particulièrement stables et fortes, les céramiques ont des températures de fusion très élevées, souvent supérieures à celles des métaux. On les utilise largement comme matériaux réfractaires dans les fours. Elles possèdent également une grande inertie chimique (très faible dégradation par corrosion). Pour les mêmes raisons, leur module de Young est en général élevé. De par le caractère localisé des liaisons, les céramiques ont un comportement dur et fragile, sans aucune capacité de déformation plastique, sauf au voisinage immédiat de leur température de fusion. Les céramiques ont une faible résistance à la rupture en traction ; leur comportement est par contre meilleur en compression.

#### 3.1.2. Microstructures et propriétés

Le comportement intrinsèquement fragile des céramiques est amplifié par la présence de microfissures ou des porosités résiduelles dues à leur élaboration. Les céramiques ont une faible **ténacité**.

La fragilité rend le plus souvent impossible la mesure directe des caractéristiques mécaniques en traction ( $R_e \approx R_m, A\%$ ).

Les essais mécaniques le plus souvent pratiqués sont :

– l’essai de compression : la rupture provenant dans ce cas de la propagation stable de multiples fissures, la contrainte limite  $R_{mc}$  qui en découle est très supérieure à la limite de rupture en traction  $R_{mt}$  (quand celle-ci est mesurable) :

$$R_{mc} \approx 15 \cdot R_{mt}$$

– l’essai de flexion 3-points : la contrainte appliquée varie linéairement dans une section de l’échantillon depuis la compression pure jusqu’à la traction pure. La région qui subit la contrainte de traction maximale étant uniquement la zone la plus étirée, la valeur de contrainte limite qui s’en déduit, appelée **module de rupture**  $\sigma_R$ , est nettement supérieure à la limite de rupture en traction  $R_{mt}$  :  
 $\sigma_R \approx 1,7 \cdot R_{mt}$

## 3.2. Types de céramiques

### 3.2.1. Céramiques traditionnelles

D’origine très ancienne, on obtient les céramiques traditionnelles par cuisson, à partir d’argile, de sable et de feldspath. Ce sont des matériaux poreux qui comportent des phases vitreuses et cristallines. Leurs composants sont essentiellement de multiples oxydes et hydroxydes naturels.

### 3.2.2. Céramiques techniques

A côté des céramiques traditionnelles très largement utilisées, on rencontre une grande variété de céramiques techniques indispensables à la réalisation d’un grand nombre d’activités technologiques dans les secteurs les plus divers : mécanique, électrotechnique et électronique, chirurgie, optique, industrie nucléaire, etc. Dans la majorité des cas, ces céramiques sont élaborées avec soin, depuis le choix et le traitement des matières premières (naturelles ou synthétiques) jusqu’aux étapes finales de fabrication, afin qu’on puisse contrôler parfaitement leurs microstructures.

#### - *Abrasives et outils de coupes*

Les céramiques techniques sont utilisées comme des abrasives (polissage...) et outils de coupes (tournage, fraisage...) pour :

- Leur dureté supérieure à celle du matériau à usiner
- Leur rigidité élevée, afin que l’outil ne se déforme pas sous l’effet des contraintes (cisaillement et compression)
- Une résistance mécanique élevée, dans le but de minimiser les risques de rupture.

- Une bonne tenue à chaud ; le frottement entre l'outil et la pièce à usiner provoque en effet d'importantes élévations de température au point de contact, et la chaleur ainsi engendrée se dissipe difficilement dans l'outil, puisque celui-ci est un mauvais conducteur thermique.

- ***Construction mécanique***

Leurs propriétés mécaniques sont fonction de leur porosité, et la présence de phases vitreuses diminue considérablement leur ténacité. Par conséquent, une telle fragilité représente souvent un obstacle majeur à l'emploi des céramiques pour des utilisations mécaniques, notamment quand les produits sont soumis à des contraintes de tension. Cependant, à cause de leurs propriétés particulières, comme la résistance à l'usure, la tenue à haute température et l'inertie chimique, on utilise certaines céramiques en construction mécanique. Dans ce cas, il faut contrôler la composition du matériau et sa microstructure ; on doit avoir une porosité à peu près nulle, une absence totale de défaut et de phases vitreuses.

### **3.2.3. Verres**

Les **verres** sont des solides amorphes. Le composé de base de la plupart des verres est la **silice**  $\text{SiO}_2$ . L'élément structural de base de la silice est un tétraèdre formé de 4 anions  $\text{O}^{2-}$  avec un cation  $\text{Si}^{4+}$  en son centre. Au cours de leur refroidissement, à partir de l'état liquide : Si la vitesse de refroidissement n'est pas suffisamment faible, ces tétraèdres sont liés entre eux de façon aléatoire et l'on obtient un solide vitreux ou amorphe. En diminuant considérablement la vitesse de refroidissement au voisinage de la température de fusion, de façon à favoriser un arrangement régulier des tétraèdres, on peut obtenir une structure cristalline régulière. Dans les diverses formes de la silice cristallisée (quartz, cristobalite...)

### **3.2.4. Vitrocéramiques**

L'introduction dans le verre de certains oxydes métalliques ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ...) favorise l'apparition et la croissance d'une fraction de phase cristalline. Les vitrocéramiques possèdent une ténacité (la propagation des fissures est gênée par les îlots cristallins) nettement supérieure à celle des verres. Il en résulte de meilleures propriétés mécaniques et une bonne résistance aux chocs thermiques. La résistance à la traction peut varier de 150 à 600MPa.

### **3.2.5. Autres céramiques**

- *Graphite et carbones (céramiques noires)*

Outre sa structure cubique diamant, le carbone peut aussi plus couramment cristalliser avec la structure hexagonale du graphite, aux propriétés très anisotropes.

Le graphite est traditionnellement obtenu à partir de particules de coke de pétrole ou de charbon agglomérées par du brai ou du goudron.

Après compactage et pyrolyse des éléments volatils vers 900 °C, un frittage entre 2 600 et 3 000 °C permet d'obtenir un graphite plus ou moins compact à grains de l'ordre du micromètre. On peut également obtenir un matériau graphitique par craquage d'hydrocarbure et dépôt en phase vapeur, ou pyrolyse d'une préforme polymère ; il est alors appelé **carbone vitreux** en raison de ses multiples fautes d'empilement et de sa très faible taille de grains ; il est moins sensible à l'oxydation.

Les applications du graphite sont liées à sa bonne conductivité thermique et électrique, à sa bonne tenue à haute température (en atmosphère réductrice) et à ses bonnes propriétés tribologiques.

- Ciments

Les ciments acquièrent leur résistance mécanique par une réaction chimique avec l'eau, dont les produits leur confèrent leur cohésion en cristallisant. Le ciment Portland est obtenu par calcination à 1500 °C de calcaire et d'argile, qui donne des silicates et aluminosilicates de calcium oxydés. En présence d'eau, les réactions d'hydratation des constituants conduisent à la prise, puis au durcissement du ciment.

Leurs propriétés font utiliser abondamment les ciments comme liants hydrauliques de base en génie civil, surtout actuellement sous forme de **mortier** et de **béton**.

- Plâtre

Il est obtenu par déshydratation à chaud du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Le mélange d'eau à la poudre déshydratée provoque la réaction inverse de cristallisation de gypse, qui conduit à un produit solide.

- Roches

Les roches de l'écorce terrestre, bien que d'origine naturelle, sont des céramiques à grande stabilité chimique abondamment utilisés en génie civil. Leurs constituants (argile, silice, feldspath) sont analogues à ceux des céramiques traditionnelles, en y ajoutant le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) des roches calcaires. L'élaboration de « roches synthétiques » est envisagée pour le stockage de longue durée des déchets nucléaires.

## I.4. Matériaux composites

La technologie moderne a besoin de matériaux qui allient à la fois rigidité, résistance mécanique, ténacité élevée et une grande légèreté. Aucun matériau simple ne permet de combiner ces caractéristiques mécaniques. Pour atteindre cet objectif il faut nécessairement utiliser un matériau composite.

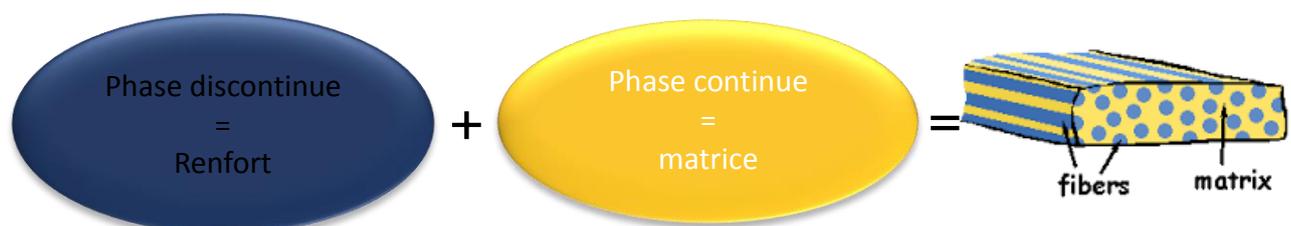


Figure I.5 : Matériaux composites dans différents secteurs industriels

Le but recherché en substituant un matériau composite à un matériau traditionnel est d'obtenir pour une même rigidité de structure, une faible masse volumique (allègement considérable des structures) qui entraîne, dans le cas du transport aérien, une réduction de la consommation de carburant et des émissions de polluants. Le secteur aéronautique n'est d'ailleurs pas le seul à s'intéresser de près à ces matériaux mais aussi l'industrie nautique, ferroviaire, spatiale, le bâtiment, les sports et loisirs (Fig. I.5).

### 4.1. Définition

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice (Fig. I.6). Les renforts se présentent sous forme de fibres (continues ou discontinues) ou particules. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécanique. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure.



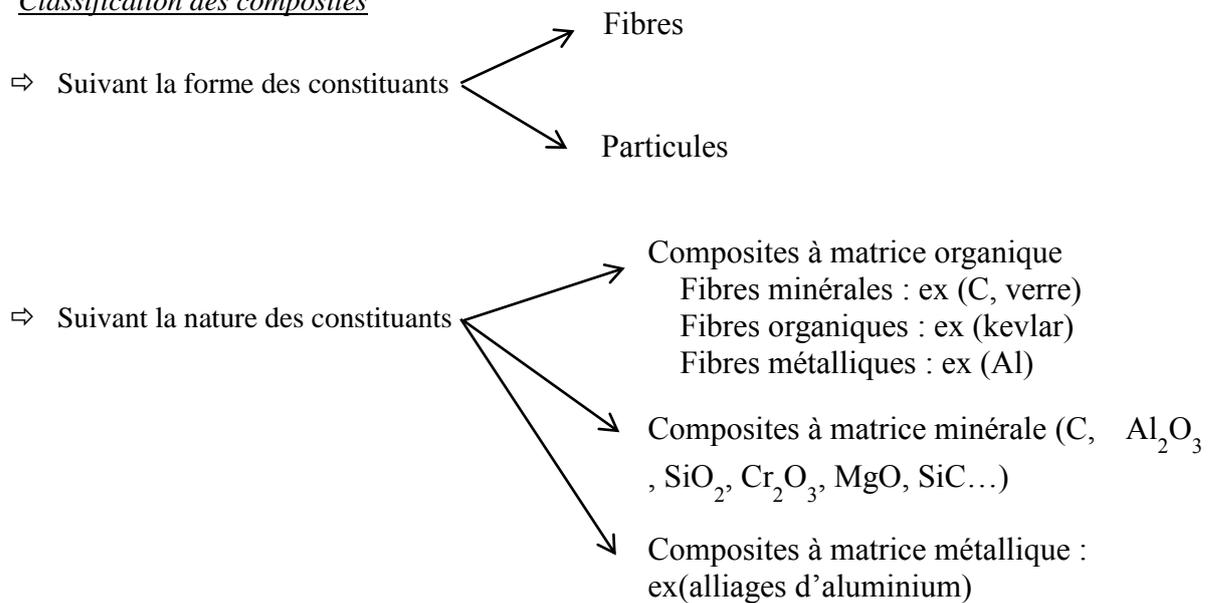
### 4.1.1. Matrice

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est habituellement une résine polymère. Dans les applications aux très hautes températures, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés.

La matrice d'un composite a pour rôles :

- d'enrober les renforts, les protégeant ainsi du milieu extérieur ;
- d'assurer une répartition spatiale homogène des renforts ;
- d'assurer le transfert adéquat de contraintes mécaniques appliquées aux renforts.

#### Classification des composites



### 4.1.2. Renfort

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite. Leurs rôles consistent à :

- supporter les efforts appliqués ;
- conférer au composite sa rigidité et sa résistance à la rupture, éventuellement à haute température.

Les principaux types de renforts se distinguent par leur géométrie (particules, billes, fibres courtes, fibres longues) (Fig. I.7), par leur disposition, notamment pour les fibres (aléatoire, unidirectionnelles, tissages 2D, tissages 3D...) ou par leur nature.



Figure I.6 : exemples des composites

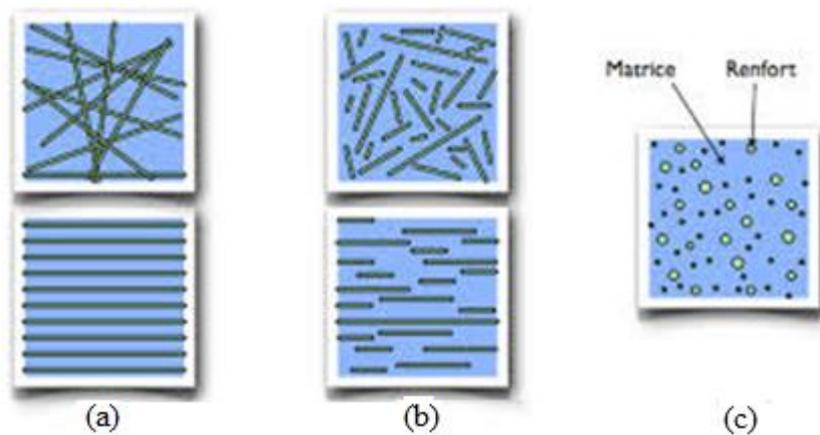


Figure I.7 : Les principaux types de renforts ; (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.

#### **4.1.2.1. Fibres de verre**

Résistance mécanique, caractéristiques électriques, incombustibilité, stabilité dimensionnelle, compatibilité avec les matrices organiques, imputrescibilité, faible conductibilité thermique, bonne résistance aux agents chimiques.

#### **4.1.2.2. Fibres polymères**

Les fibres polyamides (Kevlar), en particulier, présentent d'excellentes caractéristiques de rigidité et de résistance en traction, une bonne tenue à la fatigue et à l'impact, mais un comportement médiocre en compression. Elles sont le plus souvent utilisées en association avec des fibres de verre ou de carbone. Toutes les fibres organiques sont pénalisées par leur sensibilité à l'humidité et à la température.

#### **4.1.2.3. Fibres céramiques**

Les fibres de type céramiques rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions.

#### **4.1.2.4. Fibres de carbone**

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques.

➤ Principaux avantages

Légèreté, caractéristiques mécaniques élevées en traction et compression, tenue en température excellente tenue en fatigue, faible coefficient de dilatation, bonne conductibilité thermique et électrique excellente tenue à l'humidité, non magnétique - perméable aux rayons x.

➤ Principales limitations

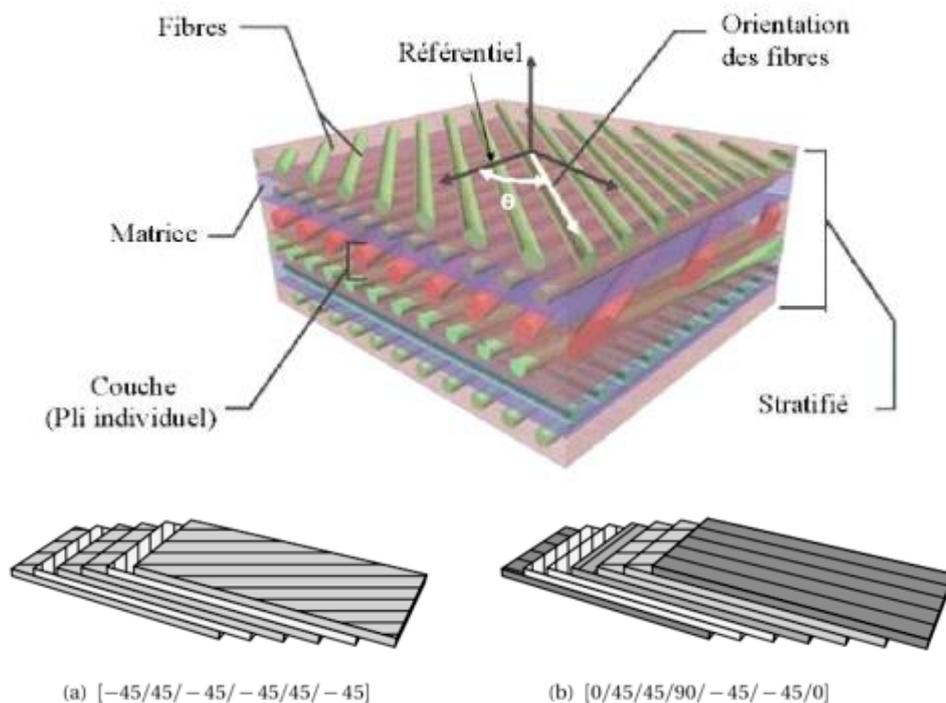
- fragilité au choc ;
- fragilité à la courbure ou au pliage ;
- coût élevé.

## 4.2. Structures des composites

### 4.2.1. Structures en stratifiées

Les structures stratifiées sont constituées de couches successives de matériaux composites. Ces couches sont également nommées plis (Fig. I.8).

Elles sont liées par de la résine. Ces pièces structurales sont réalisées en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. L'interface interlaminaire assure le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre.



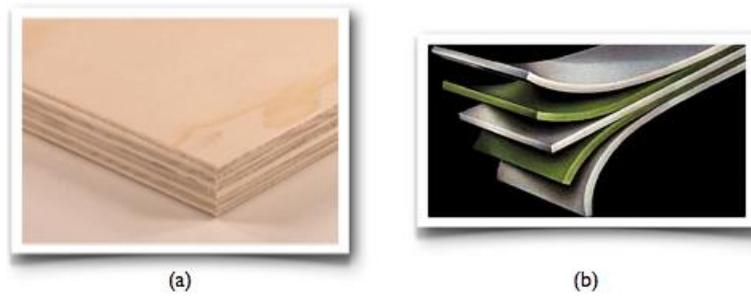


Figure I.8 : Structures en stratifiées

#### 4.2.2. Structures en sandwich

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwich. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites (Fig. I.9). L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion.

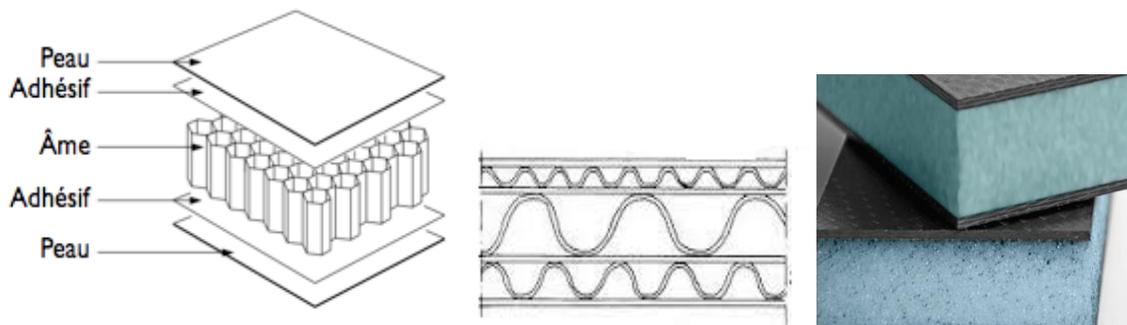


Figure I.9 : Structures en sandwich

### 4.3. Comportement mécanique des composites

#### 4.3.1. Rôle des fibres

L'orientation des fibres longues parallèlement aux contraintes mécaniques, dans les composites fibreux, permet un transfert quasi-total de charges vers les fibres, ce qui rend possible la réalisation des composites légers et résistants.

Dès que la contrainte normale maximale (en traction ou compression) s'écarte de la direction des fibres, l'effet de renforcement chute très vite (Fig. I.10).

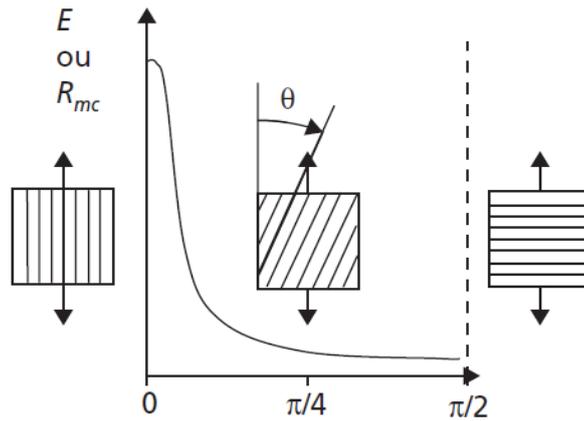


Figure I.10 : Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique des composites

#### 4.3.2. Rôle des interfaces

Les composites étant des matériaux hétérogènes, ils possèdent des *interfaces*, ce terme utilisé dans le domaine des matériaux composites, pour décrire la surface ou la zone qui sépare la fibre et la matrice (discontinuité macroscopique).

C'est dans cette zone que s'effectue précisément le transfert de charge de la matrice vers le renfort (ou vice versa) et elle est également le siège de concentration de contraintes résiduelles lors de la préparation du composite.

*Les interfaces ont la propriété de dévier les fissures* : lorsqu'une fissure se propage dans la matrice et atteint l'interface, elle ne traverse pas les renforts mais elle change de direction et suit l'interface. En d'autres termes, au lieu d'une rupture brutale, on observe plutôt une décohésion, c'est-à-dire un décollement progressif entre les renforts et la matrice (Fig. I.11).

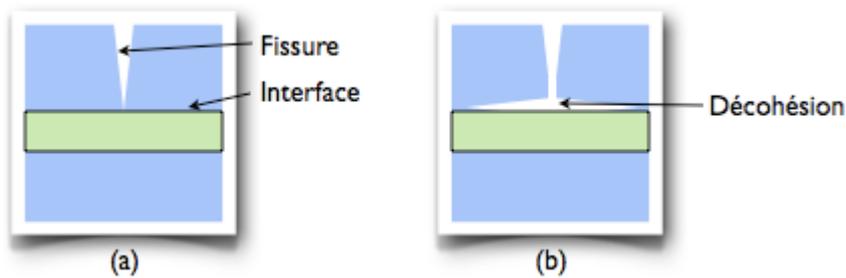


Figure I.11 : Effet de l'interface Fibre/matrice sur la propagation de fissure

# Chapitre II : Elaboration des matériaux

## (Procédés de mise en forme sans enlèvement de la matière)

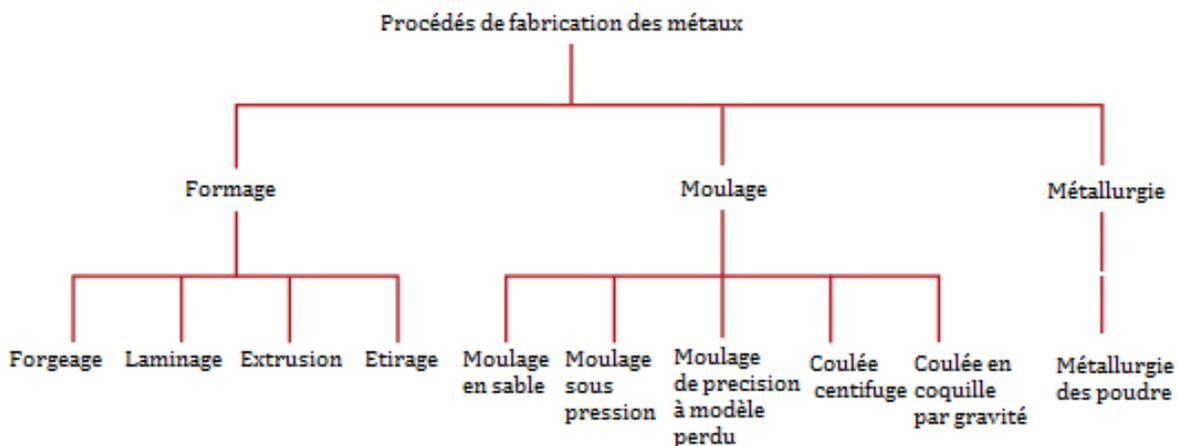
Pour un ingénieur, il est important de comprendre combien la fabrication et les utilisations des matériaux sont liées à leurs propriétés mécaniques et thermiques, telles que la rigidité, la ductilité, la dureté...

Par exemple, on sait que, en général, les techniques classiques de formage des métaux ne conviennent pas à la fabrication de pièces de céramique. Autrement dit, le choix du matériau pour un usage donné est souvent dicté par la facilité avec laquelle il prendra la forme désirée et par son coût.

Les procédés de fabrication comprennent divers méthodes (formage, moulage, métallurgie des poudres et l'usinage).

### Les procédés d'élaboration des métaux

L'exécution d'une pièce métallique comporte généralement au moins deux des procédés cités. Le choix de ces procédés dépend de plusieurs facteurs, les plus importants étant les propriétés du métal, les dimensions et la forme de la pièce finie et, bien sûr, le coût.



### 1. Procédés de Mise en Forme des Métaux et Alliages

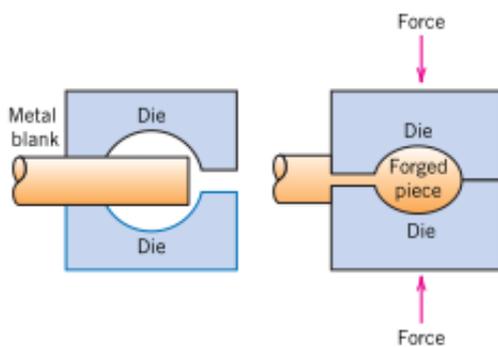
**Le FORMAGE** : consiste à déformer un matériau, à chaud ou à froid, sans rupture pour lui donner une forme désirée.

Les différentes techniques existantes mettent en œuvre un ou plusieurs des phénomènes suivants :

- 1- Ecrasement de la matière
- 2- Etirage de la matière
- 3- Pliage de la matière.

**1 – A. Le forgeage :** est une mise en forme à chaud ou à froid par des efforts de pression.

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



Forgeage par efforts de pression continus

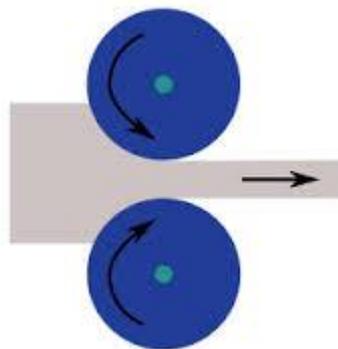


Forgeage par chocs successifs

### 1 –B. Le laminage

Mise en forme à chaud ou à froid.

Passage d'une pièce de métal entre deux cylindres, qui tourne dans des sens opposés. Les rouleaux tournent pour déformer la pièce en l'écrasant dans l'espace entre eux.



Le laminage est un des plus importants procédés de mise en forme des métaux. Pour l'acier par exemple, environ 35 % de la production laminée à chaud est relaminée à froid. Ces proportions peuvent

bien sûr varier d'un métal à l'autre, ainsi que les débouchés : carrosserie automobile, tubes soudés ou emballage alimentaire pour les aciers au carbone (souvent revêtus), électroménager, industrie chimique ou bâtiment pour les aciers inoxydables, emballage alimentaire entre autres pour les alliages d'aluminium ; mais on lamine aussi à froid les cuivreux, le titane (aéronautique) ou le zirconium, les métaux précieux, ou des composites métalliques (placage par colaminage, ou laminage de produits revêtus).

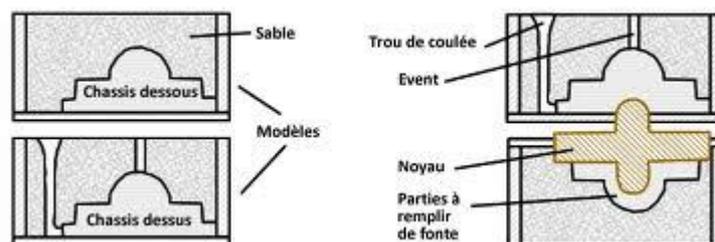
### 1-C. Moulage

## Fusion de l'alliage → Etat liquide

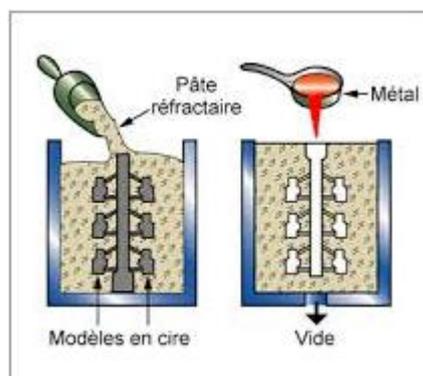
La fonderie a pour but de produire des pièces moulées ayant leur forme définitive et leurs côtés exactes ou presque.

### Principaux procédés de moulage

a) **Moulage en sable** : Le métal se solidifie dans une cavité limitée par du sable comprimé, les parties creuses étant obtenues en disposant des noyaux. Le refroidissement des pièces est très lent. La microstructure consiste en une zone de peau colonnaire et une zone équiaxe très développée.



b) **Moulage à la cire perdue** : une grappe de modèles assemblés, est recouvert de plusieurs couches de réfractaire qui par cuisson forment un moule solide. La cire est évacuée par fusion, laissant un creux qui a exactement la forme de la pièce en cire où le métal fondu est coulé.



### Avantage

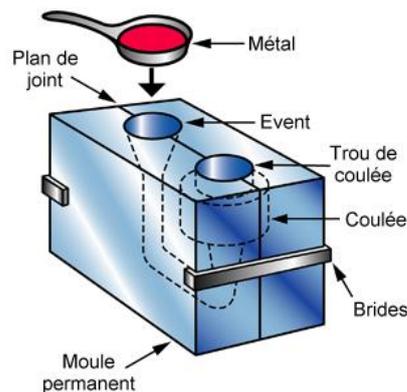
- Formes complexes (ne nécessite pas d'existence de joint de moulage) ;

- Très bonne précision dimensionnelle (0.1mm) ;
- Etat de surface 3.2  $\mu\text{m}$ .

#### Inconvénients

- Petite et moyenne série ;
- Cadence faible ;
- Procédé onéreux.

c) **Coulée en coquille par gravité** : La coquille est un moule métallique ayant la forme exacte de la pièce à obtenir. Le refroidissement est rapide.



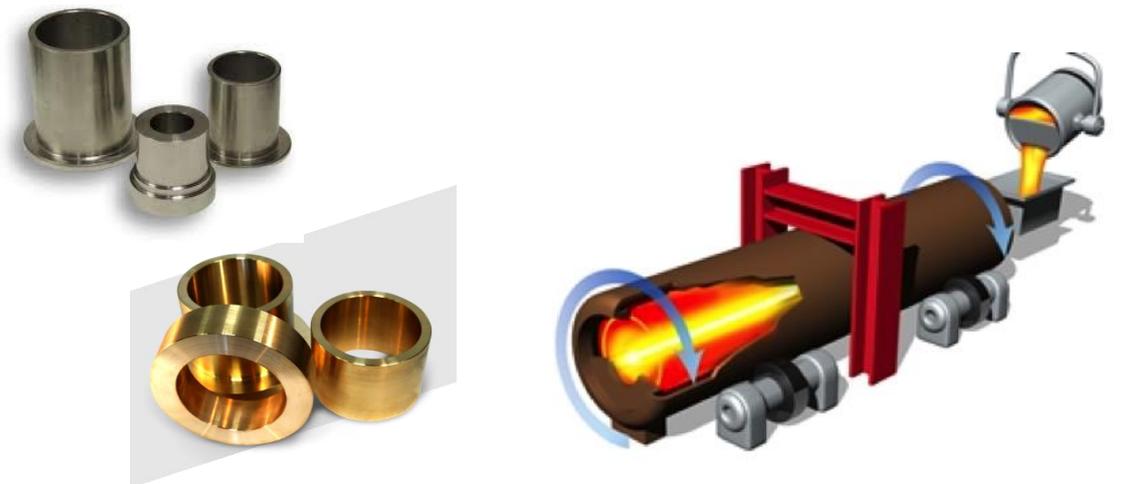
#### Avantages du procédé

- Excellentes propriétés du matériau ;
- Possibilité de représenter des géométries internes complexes (au moyen d'un noyau de sable) ;
- Faibles coûts d'outillage comparé à la coulée sous pression ;
- Degré élevé d'automatisation possible.

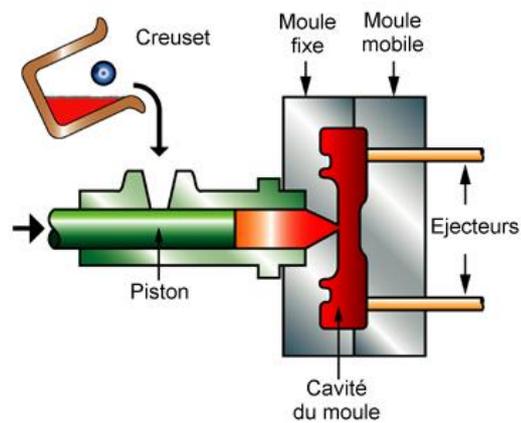
d) **Coulée centrifuge** : Le moulage par coulée centrifuge utilise la force centrifuge pour créer des formes cylindriques. Le procédé utilise un moule permanent auquel on imprime un mouvement rotatif sur son axe à des vitesses élevées (de 300 à 3 000 tours par minute) en même temps que le métal en fusion est versé. Le métal en fusion est projeté par la force centrifuge en direction de la paroi du moule. Le métal se solidifie sur la paroi après refroidissement. Pour la fabrication de tuyaux ou de pièces de formes de révolution complexes ;

#### Avantages

- Résistance à l'usure ;
- Haute uniformité structurelle ;
- Bonnes propriétés mécaniques.



e) **Moulage sous pression** : (jusqu'à 1500 bars) par injection de métal liquide ou pâteux dans un moule métallique froid ou légèrement chauffé. Ce procédé est utilisé pour la fabrication de petites pièces en grande série. Elle est également utilisée pour produire de grosses plaques d'acier ;



### Avantages du procédé

- Précision dimensionnelle ;
- Faible surépaisseur pour l'usinage ;
- Parois minces ;
- Grande solidité ;
- Bonne qualité des surfaces ;
- Grande productivité par automatisation élevée ;
- Densité dans la mesure où la membrane de coulée n'est pas usinée.

### 1-D. Emboutissage

L'emboutissage consiste à transformer une tôle plane en une forme creuse ou concave, comme par exemple un godet par l'expansion de la tôle dans une matrice. Un serre-flan est généralement utilisé pour supporter le flan quand le poinçon pousse le métal dans la matrice. Ce procédé, d'utilisation très générale, permet de fabriquer les pièces de carrosserie automobile, des appareils électroménagers ou des ustensiles de cuisine, des emballages métalliques, des pièces mécaniques...

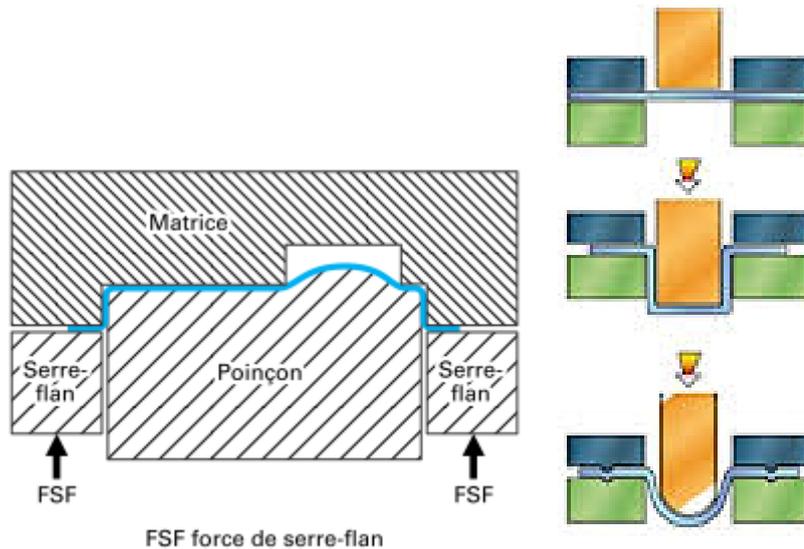


Figure : Outil d'emboutissage

Mise en forme à froid  
Métaux très ductiles  
Aluminium  
Laiton  
Cuivre

Mise en forme à chaud  
Métaux moins ductiles  
Titane : 300 – 500°C



### 1-E. Filage

Le filage (en anglais : extrusion) est un procédé de transformation à chaud des métaux et alliages. Son principe consiste à introduire un bloc de métal, porté à température de forgeabilité optimale, dans une enceinte fermée, et à le faire ressortir par un orifice de section plus petite que l'ouverture par laquelle il est entré, en exerçant sur lui une pression élevée.

L'interposition d'un lubrifiant efficace entre l'ébauche à déformer et les outillages, ainsi qu'une chauffe homogène, suffisent pour éviter la plupart des défauts de filage, en épargnant au métal des contraintes localement supérieures à sa résistance à la rupture.

Pour exécuter l'opération de filage, on utilise une enceinte de forme cylindrique en acier résistant aux contraintes élevées de déformation (pression et température), appelée conteneur. Ce conteneur est fermé à une extrémité par une filière dont l'orifice est usiné selon une section droite similaire à l'extérieur du produit que l'on désire fabriquer. La billette de forme cylindrique, chauffée à la température optimale de déformation, est introduite dans le conteneur puis poussée contre la filière par un piston appelé fouloir ou poinçon sur lequel on applique l'effort de la presse.

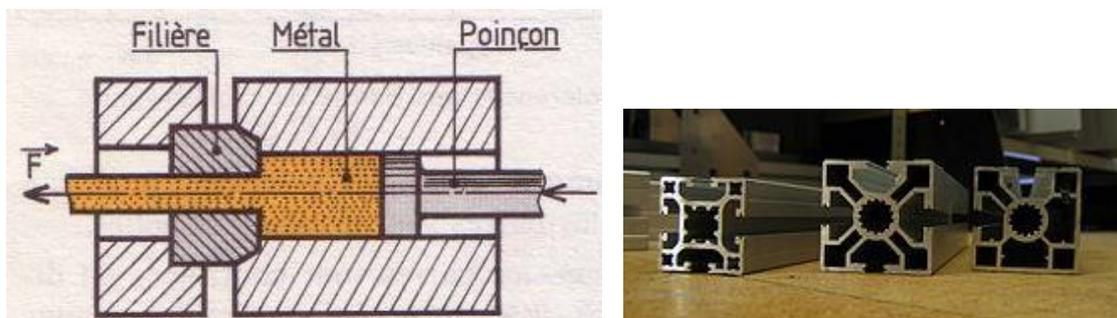


Figure : Schéma de filage d'un tube

## Formes

Lorsque cet effort dépasse une valeur, liée aux caractéristiques du matériau et à sa température, la pression régnant dans le conteneur provoque l'écoulement plastique du métal à travers la filière. On obtient ainsi une barre de grande longueur dont la section transversale correspond à celle de la filière.

Le filage permet aussi d'obtenir des produits creux ou tubulaires. Pour cela l'ébauche est préalablement alésée à un diamètre permettant l'introduction d'un outillage appelée aiguille, généralement rétractable à l'intérieur du poinçon, dont la section droite est celle du profil intérieur désiré. Son extrémité avant vient se placer au-delà du plan de la filière, lors du démarrage de la phase de filage. Le métal s'écoule ensuite dans l'espace libre entre ces deux outillages, lesquels peuvent être non concentriques et de profils différents.

Les tubes sont obtenus à l'aide de filières et d'aiguilles de section circulaire, montées coaxialement dans l'axe de la presse.

## Domaines d'application

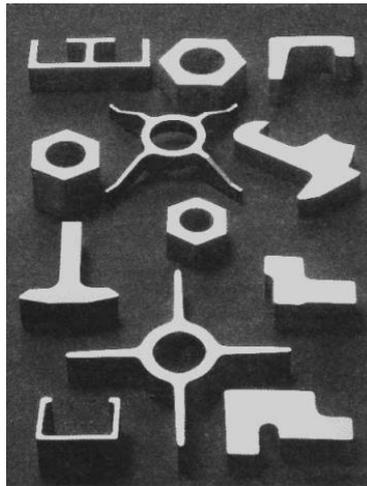
- Tubes en aciers inoxydables et en superalliages (nickel, titane et zirconium).

Les diamètres extérieurs couramment réalisés par filage à chaud s'étendent de 25 à 300mm, les épaisseurs étant au moins égales à 3,5% du diamètre (limite inférieure en épaisseur : 3 mm). Les longueurs filées peuvent atteindre (ou, dans certains cas, dépasser) 30 m.

- **Profils (pleins et creux) en alliages de titane, aciers alliés, inoxydables et superalliages**

Les profils obtenus par filage peuvent être utilisés soit en l'état, soit comme ébauches en vue de réétirage à froid ou d'usinage ultérieur.

La figure présente quelques exemples de profils en acier obtenus par filage.



*Figure : Profils en acier brut de filage*

La précision dimensionnelle et la qualité de surface des produits bruts de filage permettent leur utilisation, en l'état, pour de nombreux usages : matériel ferroviaire, machines agricoles, bateaux...

Grâce au coût relativement peu élevé des outillages, les quantités fabriquées peuvent être très faibles (possibilité de fabrication unitaire).

**Tubes en aciers au carbone ou faiblement alliés**

De nos jours, le procédé de filage n'est plus compétitif, pour la production de tubes en très grandes séries, par rapport à d'autres équipements industriels, à cadence de production élevée, mis en service depuis les années 80. Seules, restent les fabrications spéciales et les ébauches pour l'industrie mécanique, en petites séries.

**1-F. Tréfilage**

Mise en forme à chaud : Le tréfilage est la réduction de la section d'un fil en métal par traction mécanique.

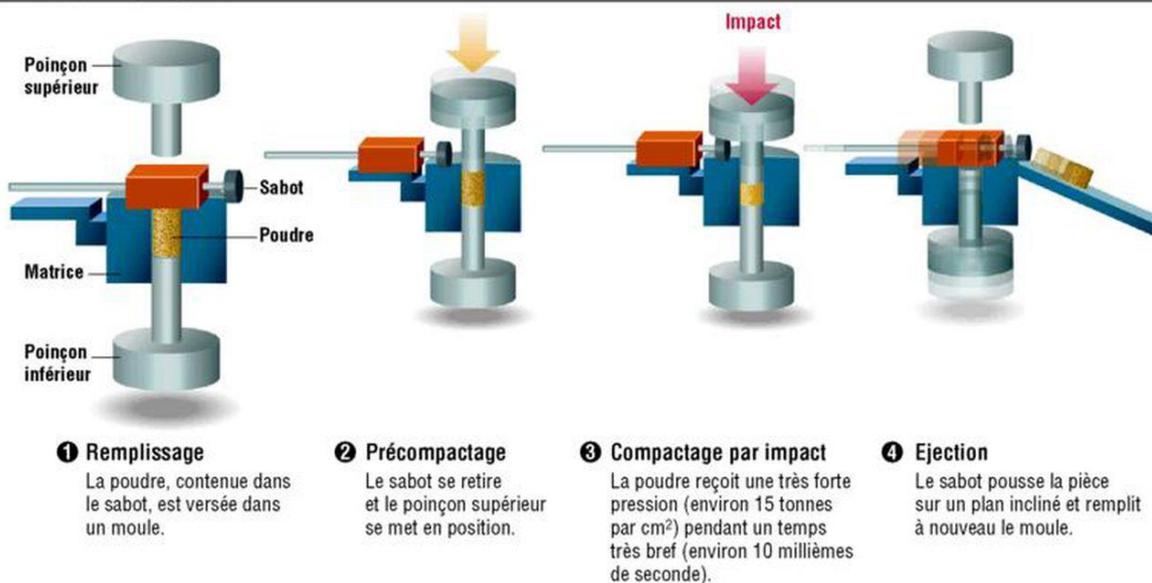


## METALLURGIE

### *Métallurgie des poudres*

Ce procédé consiste en une compaction de métal en poudre suivie d'un traitement thermique visant une densification de la pièce. Ce procédé donne une pièce pratiquement sans pores dont les propriétés sont presque identiques à celles du matériau d'origine. L'acquisition de ces propriétés résulte essentiellement de processus de diffusion se déroulant pendant le traitement thermique. Ce procédé convient particulièrement aux métaux faiblement ductiles, puisque les particules de poudre ne requièrent qu'une faible déformation plastique. Il est aussi utilisé avec les métaux à haute température de fusion, qui sont difficiles à faire fondre et à mouler. Il permet de plus d'obtenir à bas prix des pièces de faible tolérance dimensionnelle (par exemple : les coussinets et les engrenages).

#### **Le compactage à grande vitesse**



Idé / Source : Cetim

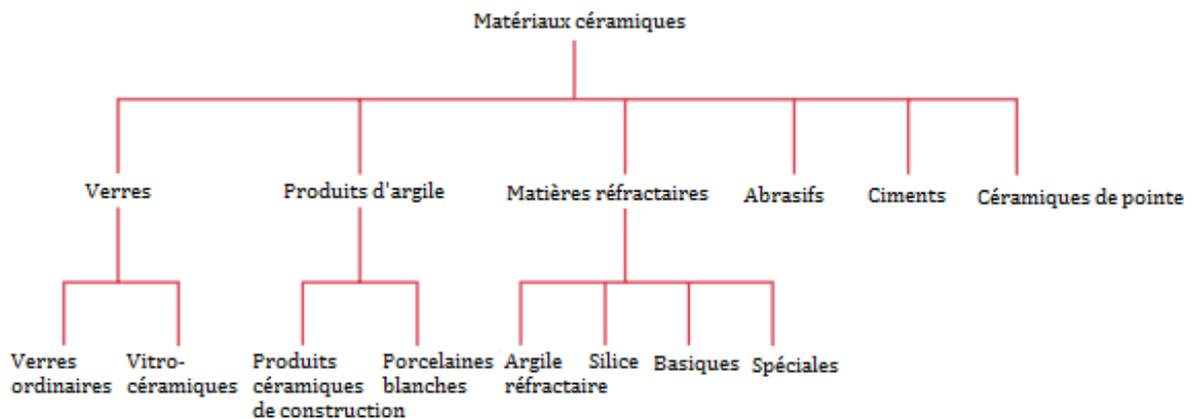
Procédé de compaction de métal en poudre

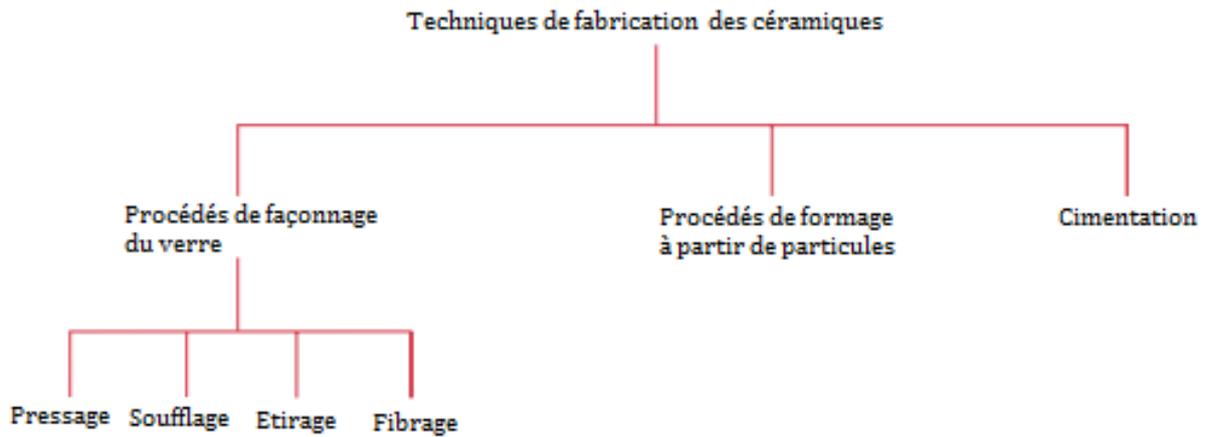


Pièces obtenues par la métallurgie de poudre

## 2. Procédés de Mise en Forme des Céramiques

La méthode de fabrication des produits céramiques revêt une importance fondamentale en ce qui concerne leurs utilisations subséquentes. En effet, un grand nombre des opérations de mise en forme du métal font intervenir la coulée ou des techniques de déformation plastique. Comme le point de fusion des matériaux céramiques est relativement élevé, il n'est généralement pas possible de les produire par coulée. En outre la fragilité de ces matériaux rend le plus souvent impossible toute déformation plastique. Certaines pièces céramiques sont constituées de poudres ou d'agrégats de particules ayant fait l'objet d'un séchage et d'une cuisson. Acquéant leur forme à haute température, les verres sont faits à partir d'une masse fluide qui devient très visqueuse au cours de son refroidissement. Les ciments prennent leur forme dans un moule où est disposée une pâte liquide, laquelle durcit et conserve sa consistance sous l'effet de réaction chimique.





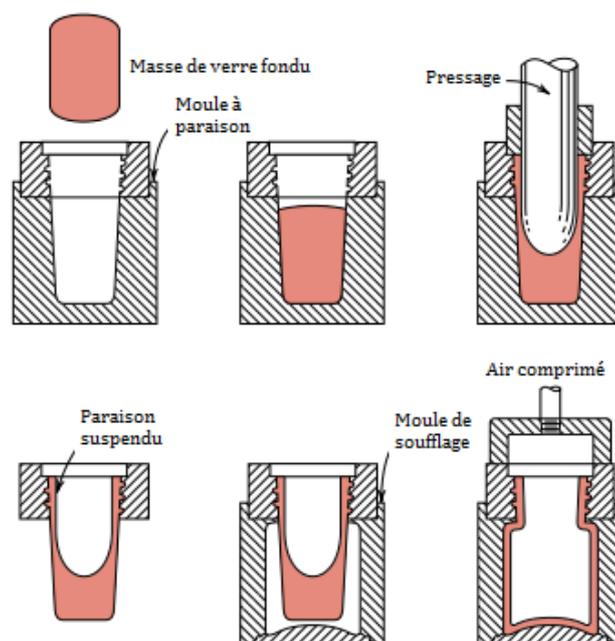
### Verres

Les verres constituent un groupe de céramiques bien connu. Ils se retrouvent fréquemment dans les vitres, les lentilles de lunettes et la fibre de verre. Les deux qualités primordiales de ces matériaux sont leur transparence optique et le fait qu'ils sont relativement faciles à fabriquer. Comme les verres sont formés à haute température, la viscosité et la température constituent des facteurs de première importance. Le point de fusion, les températures de mise en forme et de ramollissement ainsi que les températures du traitement thermique correspondent à des températures associées à des valeurs de viscosité précises.

### *Techniques d'élaboration*

Il existe quatre méthodes de formage : le pressage, le soufflage, l'étirage et le fibrage.

**Le pressage** sert à la fabrication d'objets épais tels que des assiettes et des plats. Il consiste à appliquer une pression sur le verre placé dans un moule en fonte recouvert de graphite et généralement chauffé afin que la surface soit bien unie.



**Le soufflage** est un procédé entièrement automatisé en ce qui concerne la fabrication des bocaux, des bouteilles et d'ampoules électriques.

La figure ci-contre illustre les différentes étapes de ce procédé : à partir de verre brute, une pièce de forme temporaire, appelée paraison, est obtenue par pression mécanique exercée dans un moule. Cette pièce est ensuite insérée dans un moule de finition, ou moule de soufflage, où elle est soumise à un jet d'air comprimé qui l'amène à prendre la forme du moule.

**L'étirage** convient à la fabrication de longues pièces à section constante, telles que les plaques, les tiges, les tubes et les fibres de verre.

La figure ci-dessous présente un des procédés utilisés pour la fabrication de plaques de verre qui peuvent aussi être produites par laminage à chaud.

**Le fibrage** : Pour la fabrication de fibres de verre continues (verre textile), le verre doit être placé en fusion dans une fière en platine chauffée, on lui donne la forme de fibres en l'étirant à travers les nombreux petits orifices de la filière.

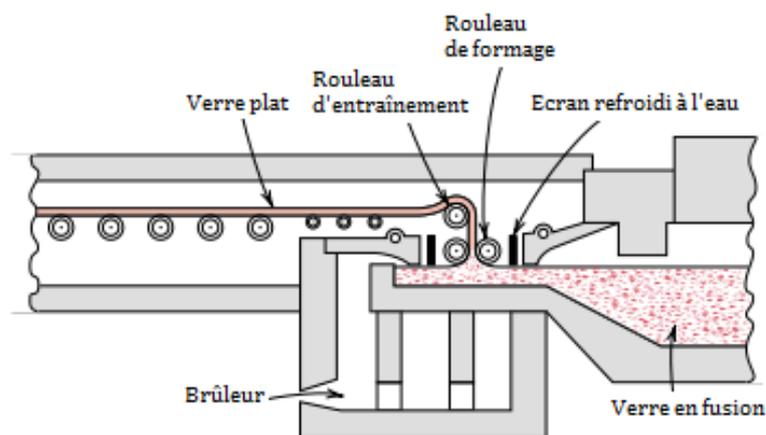


Schéma d'un des procédés utilisés pour l'étirage continu du verre plat

### Vitrocéramiques

La plupart des verres inorganiques peuvent passer d'un état non cristallin à un état cristallin grâce à un traitement thermique approprié à haute température. Ce traitement appelé dévitrification, donne un matériau polycristallin à grains fins portant le nom de vitrocéramique.

Les vitrocéramiques servent à la fabrication des plats allant au four et de vaisselle en raison de leur résistance au choc thermique. Elles sont également utilisées comme isolants et substrats des cartes de circuit imprimé, dans les revêtements muraux, les plaques de cuisson...



### **Produits d'argile**

L'argile constitue certainement l'une des matières premières céramiques les plus répandues. La plupart des produits à base d'argile appartiennent à l'un ou l'autre des grands groupes suivants : les produits céramiques de construction (briques, tuiles et conduites d'égouts) et les porcelaines blanches (poterie, vaisselle, faïence et certains accessoires de plomberie (appareils sanitaires)).

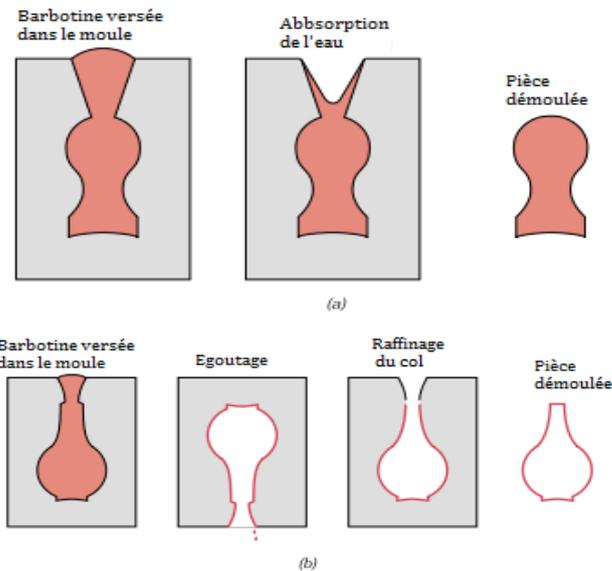
### ***Techniques d'élaboration***

Deux techniques de formage des produits à base d'argile seront décrites : le formage hydroplastique et la coulée en barbotine.

- Le procédé de formage hydroplastique (extrusion) consiste à faire passer une pâte céramique plastique ferme dans une filière de même section que la pièce à fabriquer (briques, tuiles et conduites d'égouts).
- Le formage par la coulée en barbotine : Lorsque la barbotine (argile ou autre matériau non plastique) est versée dans un moule poreux (a), l'eau qu'elle contient est absorbée par le moule (en plâtre). Le processus peut être prolongé jusqu'à ce que cette couche solide remplisse entièrement l'intérieur du moule (coulage plein).

Ou qu'elle ait l'épaisseur voulue, auquel cas, il suffit de renverser le moule pour évacuer le surplus de barbotine (coulage par évacuation) (b).

Après le formage, une pièce à base d'argile doit d'abord sécher, puis cuire à température élevée afin que sa porosité diminue et que sa résistance augmente.



Etapes de la coulée barbotine dans un moule en plâtre : a) coulage plein et b) coulage par évacuation de la barbotine.

### **Produits réfractaires**

Les céramiques réfractaires se distinguent par le fait qu'elles résistent aux températures très élevées sans fondre, ni se décomposer et par leur capacité de demeurer non réactives et inertes dans les milieux rigoureux. Elles sont fréquemment utilisées dans le revêtement des fours servant à l'affinage des métaux.

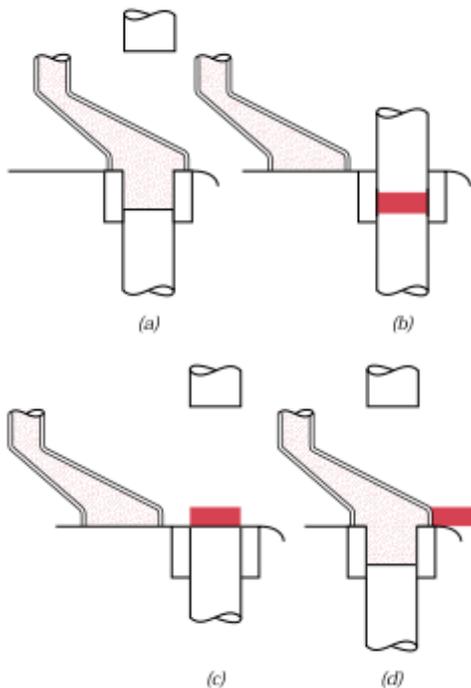
### **Abrasifs**

Les céramiques abrasives servent à meuler, à polir ou à découper les matériaux moins durs qu'elles. Elles sont recherchées surtout pour leur dureté et leur résistance à l'usure. La ténacité, qui évite que les grains abrasifs ne se rompent facilement, et une certaine réfractarité, qui permet de résister aux températures élevées engendrées par les forces de frottement résultant de l'abrasion, constituent d'autres qualités essentielles de ces céramiques.

### **Technique d'élaboration**

Le diamant, le carbure de silicium (SiC), le carbure de tungstène (WC), le corindon ( $Al_2O_3$ ) et le sable de silice ( $SiO_2$ ) constituent les céramiques abrasives les plus courants. Les abrasifs peuvent être utilisés en grains, être lié à une meule ou revêtir divers papiers et tissus.

Certaines pièces sont formées par compaction uniaxiale, hydrostatique (isostatique) ou à chaud sous pression. En outre, la fabrication de couches fines de substrat en céramique s'effectue souvent par coulée en ruban.



Représentation schématique des étapes de la compaction uniaxiale de poudres.

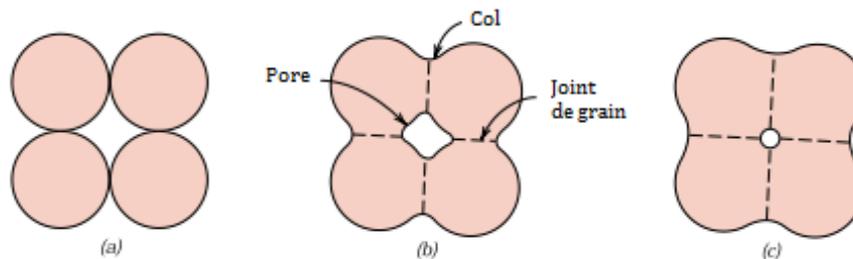
(a) la filière est remplie de poudre ;

(b) La poudre est compactée par application d'une pression sur la partie supérieure de la filière ;

(c) La pièce compactée est éjectée par le poinçon inférieur ;

(d) Le sabot de remplissage repousse la pièce compactée et le remplissage se répète.

### Compaction à chaud



Evolution de la microstructure durant la cuisson d'un agrégat de poudres.(a) Particules de poudre après pressage.(b) La coalescence des particules et la formation de pores au début du frittage.(c)

Au fur et à mesure du frittage, les pores changent de taille et de forme.

### Ciments

Mélangés avec de l'eau, les ciments inorganiques produisent une pâte à laquelle on peut ensuite donner à peu près n'importe quelle forme. La solidification et le durcissement subséquents résultent de réactions chimiques à température ambiante auxquelles participent les particules de ciment. Dans le cas des ciments hydrauliques, dont le ciment Portland est le meilleur exemple, cette réaction chimique est en fait une hydratation.

### Céramiques de pointes

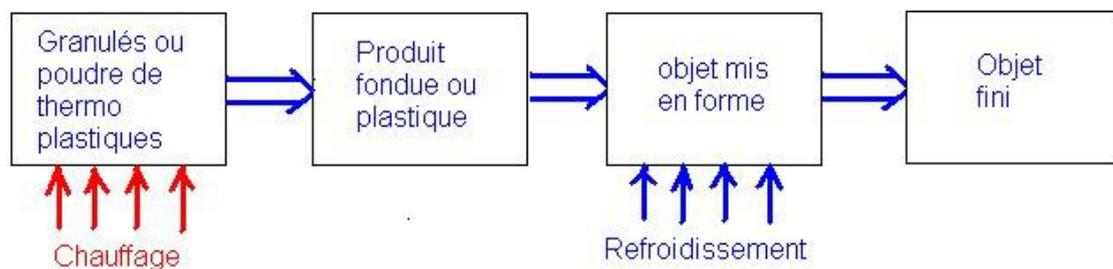
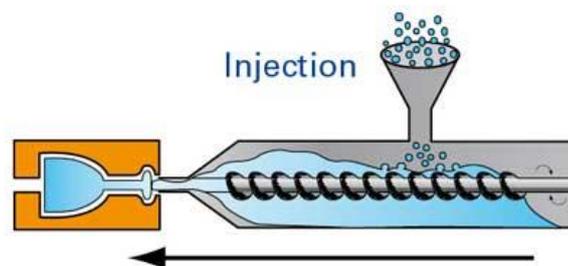
Il est certain qu'un grand nombre des techniques modernes feront encore longtemps appel aux céramiques de pointe en raison de leurs propriétés mécaniques, chimiques, électriques, magnétiques et optiques incomparables, mais aussi des combinaisons de propriétés qu'elles offrent. L'amélioration des

spécifications, du traitement et de la fiabilité des céramiques de pointe ouvrira la voie à la rentabilisation de ces matériaux.

### 3. Procédés de Mise en Forme des Polymères

#### Fabrication de pièces en plastique par injection et moulage

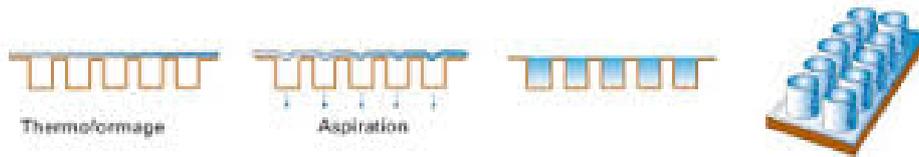
L'injection plastique est un procédé de mise en œuvre des thermoplastiques. Il consiste à ramollir la matière plastique pour l'amener en phase plastique, à l'injecter dans un moule pour le mettre en forme et à la refroidir. L'injection plastique permet de produire un grand nombre de pièces à des coûts très bas et de façon automatisée.



#### Le thermoformage

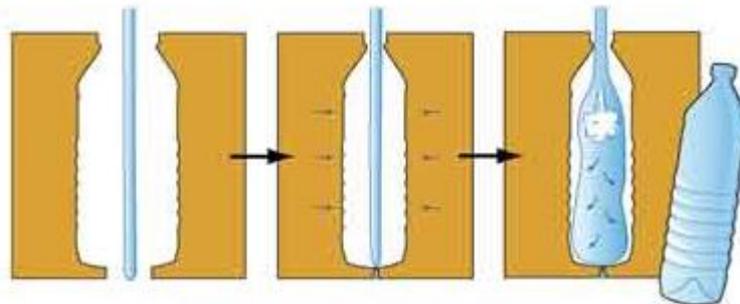
##### - Par aspiration

le plastique arrive sous forme de plaques, on le chauffe pour le ramollir et on le pose sur un moule aux formes simples. Par aspiration, la matière se déforme pour épouser la forme du moule. Cette technique est donc utilisée pour produire des objets creux, comme les pots de yaourt et les boîtes à œufs.



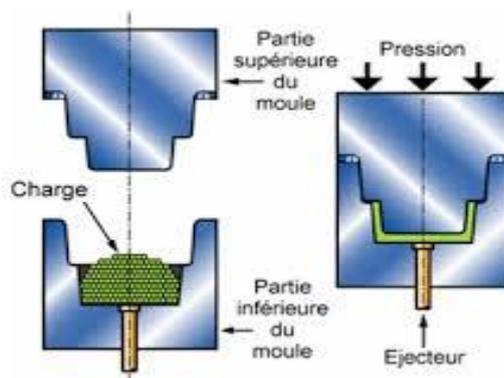
### - Par soufflage

A l'inverse, les bouteilles en plastiques sont fabriquées par gonflage : un tube chauffé est emprisonné dans un moule, puis gonflé à l'air comprimé jusqu'à sa forme finale. Les deux méthodes sont bon marché, et peuvent atteindre une précision assez bonne.



### - Par compression

La technique du moulage par compression s'applique à la fois aux thermoplastiques et aux polymères thermodurcissables. Le polymère est chauffé entre un poinçon et une matrice. La méthode est bien adaptée à la mise en forme des polymères thermodurcissables (les boîtiers de petits appareils, par exemple), et à celle des composites à matrice thermodurcissables (les pare-chocs d'autos, par exemple).



# Chapitre III : Usinage

## (Procédés de mise en forme avec enlèvement de la matière)

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision.

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance).

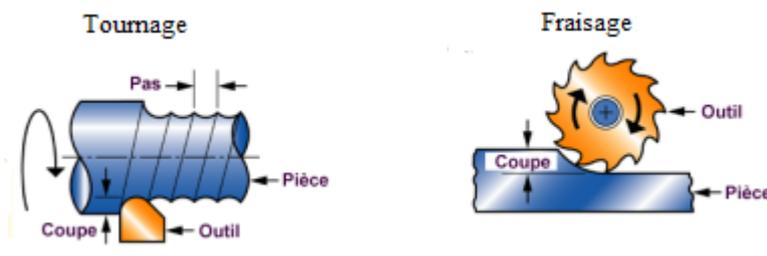
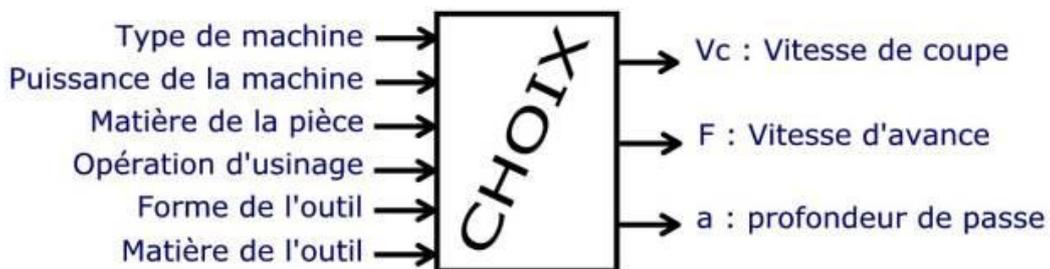


Figure : Conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) plusieurs critères permettent de définir les paramètres de la coupe, comme le montre la figure suivante :



Suivant le type d'opération à réaliser, il faut choisir la méthode d'usinage, et donc choisir la **machine à utiliser. Donc il faut choisir entre tournage, fraisage ou perçage.**

La puissance de la machine influe sur les performances. Dans le cas de l'usinage, il y a deux grands cas de figure :

\* **Usinage en ébauche** : on cherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps. La machine dans ce doit être suffisamment puissante, ainsi que l'attachement pièce/porte-pièce, sinon la machine peut 'caler' ou la pièce peut voler.

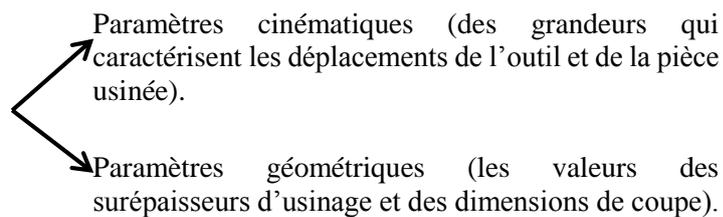
\* **Usinage en finition** : cette fois, c'est la qualité de réalisation qui est importante. La surface doit être lisse, les cotes doivent être correctes ... Comme les efforts en jeu sont plus faibles que pour une ébauche, la puissance de la machine n'est pas un critère primordial.

La matière influe sur des choix relatifs à la puissance machine, **sur l'usure de l'outil** et sa durée du fait que c'est l'outil qui doit usiner la pièce et non l'inverse.

Tous ces critères sont intimement liés et étant donné que l'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela, il faut déterminer certains paramètres spécifiques :

- La vitesse de coupe : **Vc**
- La vitesse d'avance : **Vf**
- La profondeur de passe : **a**

Les paramètres de la coupe

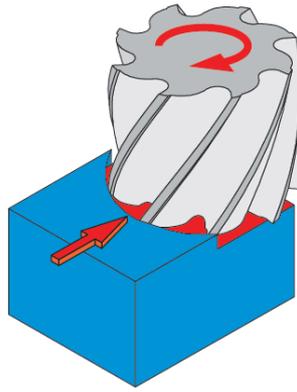


### **III.1. Fraisage**

Le fraisage consiste à créer des pièces à l'aide d'un outil appelé fraise. En général l'outil a un mouvement de rotation (mouvement de coupe  $M_c$ ), la pièce un mouvement de translation (mouvement d'avance  $M_f$ ).

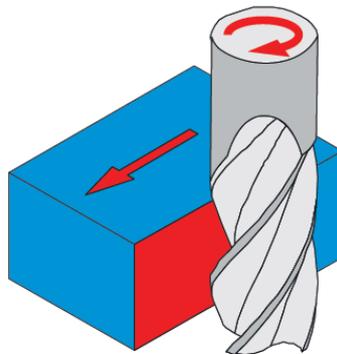
#### ***Le fraisage en bout (surfaçage)***

Lors du fraisage en bout, l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface à usiner. La fraise coupe principalement avec les tranchants d'hélice (principaux), tandis que les tranchants en bout (secondaires) n'enlèvent qu'un copeau fin.



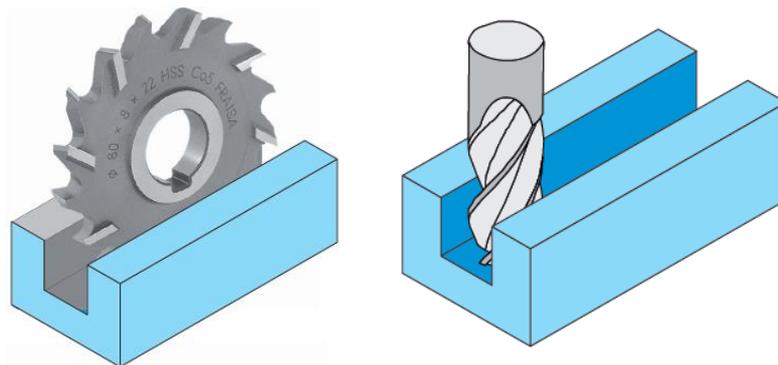
### **Le fraisage en roulant**

On utilise des fraises dont le tranchant principal est constitué par l'hélice de la fraise.

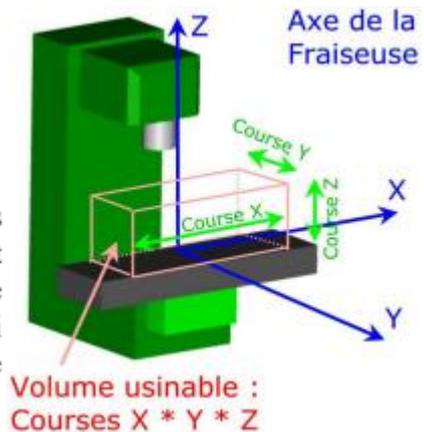


### **Le fraisage de rainures**

Il s'agit alors d'une opération de perçage exécutée par les arêtes de coupe centrales de l'outil.

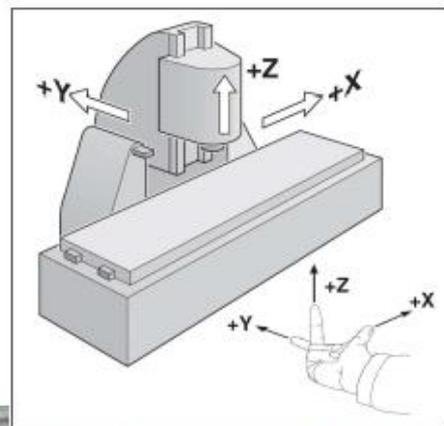


Cette machine sert principalement à usiner des pièces prismatiques. La pièce est fixée dans l'étau. L'outil est mis en rotation par le moteur de broche, il suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière : les copeaux.



En fraisage, l'axe de broche correspond à l'axe de rotation de l'outil : c'est l'axe Z. L'axe X correspond à l'axe perpendiculaire à Z qui permet la plus grande course. L'axe Y correspond à l'axe perpendiculaire à Z et X.

Le sens positif est donné suivant cette règle : la pièce étant la référence, l'outil s'éloignant de la pièce est en mouvement suivant le sens positif des axes. Les axes Z, X et Y définissent une base en 3 dimensions.



### Vitesse de coupe Vc

C'est le déplacement d'un point de l'arête tranchante de l'outil par rapport à la surface de coupe en mètre par minute (m/min).

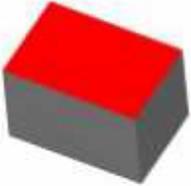
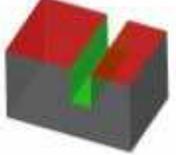
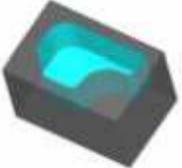
### La vitesse d'avance $V_f$ et avance par tour $f$

La vitesse d'avance  $V_f$ , est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Elle est exprimée soit en [mm/mn] soit en [mm/tour].

### Profondeur de passe « $a$ »

En [mm], correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance.

#### Les formes simples usinables

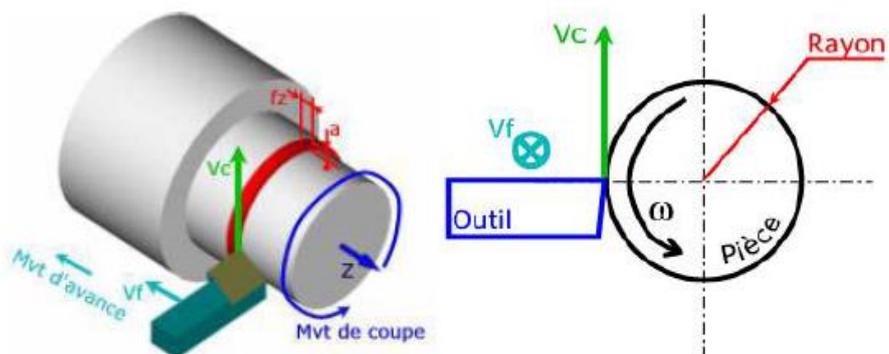
Dessin	Opération
	Surfaçage Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise. (surface rouge)
	Plans épaulés C'est l'association de 2 plans perpendiculaires (surfaces vertes)
	Rainure C'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire au deux autres plans. (surfaces vertes)
	Poche La poche est délimitée par des surfaces verticales quelconques (cylindre et plan). C'est une forme creuse dans la pièce. (surface cyan)

	<p><b>Perçage</b> Ce sont des trous. Ils sont débouchants (surface bleue) ou borgnes (surface jaune).</p>
	<p><b>Taroudage</b> Filetage intérieur; standard jusqu'à un diamètre de 20mm. Pas spéciaux possibles au-delà. Les diamètres standards sont : 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20mm.</p>

### III.2. Tournage

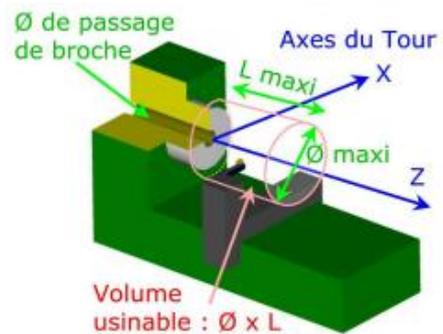
Le tournage est un procédé d'usinage permet d'obtenir des formes de révolution extérieures ou intérieures, à l'aide d'outil généralement à tranchant unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe) alors que l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance.

La combinaison de ces deux mouvements permet d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, cônes ou formes de révolution complexes).



### Machine de tournage

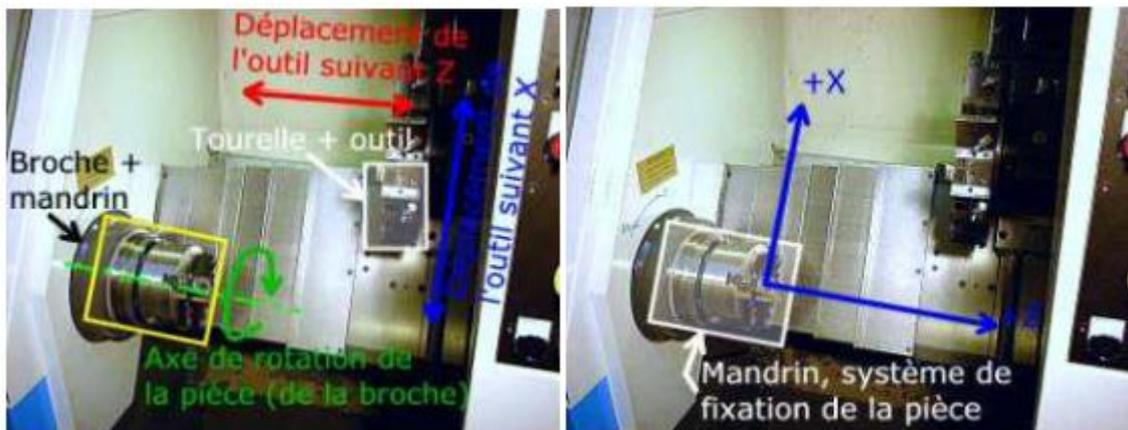
Cette machine sert principalement à usiner des pièces de révolution. La pièce est fixée dans le mandrin. Celui-ci est mis en rotation par le moteur de broche. L'outil suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière : les copeaux. Ces petits éléments de matière sont appelés les copeaux.



En tournage, l'axe de la broche correspond à l'axe de rotation du mandrin et de la pièce : c'est donc l'axe Z. L'axe X correspond à l'axe perpendiculaire à Z.

Le sens positif est donné suivant cette règle : la pièce étant la référence, l'outil s'éloignant de la pièce est en mouvement suivant le sens positif des axes.

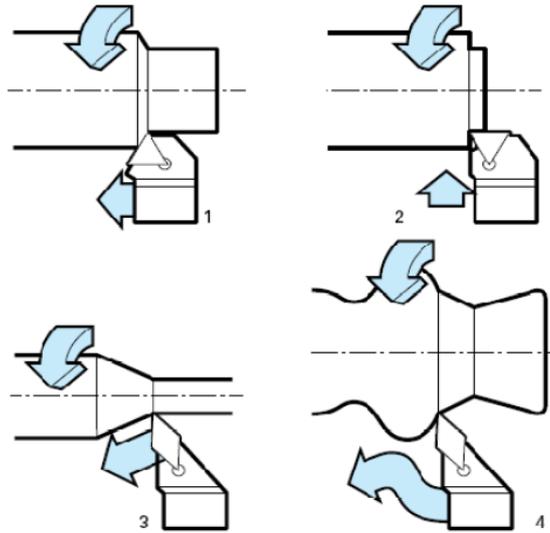
Les axes Z et X définissent un plan. Cela est suffisant pour décrire une trajectoire plane, et donc générer un volume de révolution autour de l'axe de révolution (qui est l'axe de broche).



### Les formes simples usinables

Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, quatre opérations de base:

- **tournage longitudinal, ou chariotage (1):** Le mouvement de l'outil est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.
- **dressage (2):** le mouvement de l'outil est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe, ce qui diminue la longueur de la pièce;
- **tournage de cônes (3):** En combinant les deux types de déplacements précédents, on génère des cônes de révolution;
- **contournage (4):** en donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque.

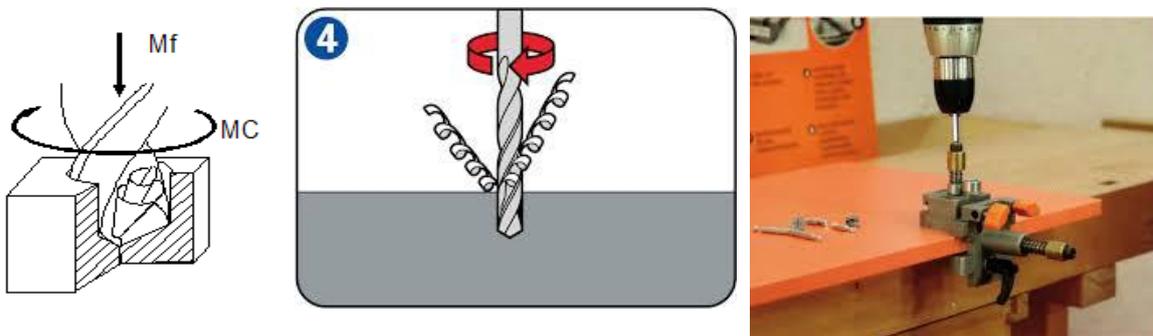


### III.3. Perçage

Le perçage est un procédé d'usinage qui consiste à obtenir un trou circulaire par enlèvement de la matière à l'aide d'un outil de coupe appelé foret.

Il est animé:

- a) D'un mouvement de rotation ( $M_c$ ): L'outil tourne sur lui-même, c'est la vitesse de rotation en tour par minute (Tr /min).
- b) D'un mouvement d'avance ( $M_f$ ): L'outil pénètre dans la matière, c'est l'avance en mètre par minute (m/min).



## Différents types de forêts :

Foret à centrer	Foret à pointer	Foret	Alésoir	Fraise à lamer
				
A utiliser pour situer l'axe d'une pièce en tournage	A utiliser pour positionner un perçage	Pour percer des trous (tolérance H10)	Pour la finition d'un trou de bonne qualité (tolérance H7)	Pour noyer une tête de vis Chc

<p><b>Perçage</b>            Cette opération définit l'obtention d'un trou quelconque dans une pièce. On y associe des outils de perçage : les forets.</p>	
<p><b>Alésage</b>            Cette opération définit l'obtention d'un trou de qualité dans une pièce. On y associe des outils permettant de terminer un perçage : les alésoirs.</p>	

## Les perceuses portatives



Perceuse électrique



Perceuse électromagnétique



Perceuse à batterie

- *Perceuse électrique*

Une **perceuse** ou foreuse est un outil qui sert à percer des trous dans différents matériaux. ... Les **perceuses** manuelle à engrenage datent du XIX<sup>e</sup> siècle, et c'est vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que sont apparues les premières **perceuses électriques**.

- *Perceuse électromagnétique*

C'est une machine-outil composée d'un corps de **perceuse** traditionnelle et d'une embase **magnétique** (un électroaimant) qui permet de fixer cette dernière sur les pièces que l'on doit percer. ... Cette **perceuse** peut travailler avec des forets traditionnels équipée d'un adaptateur et d'un mandrin.

- *Perceuse à batterie*

La **perceuse sans fil** est un outil équipé d'un moteur électrique fonctionnant sur une **batterie**, elle sert à percer des trous dans différente matière. Sa puissance est moindre qu'une perceuse filaire, mais son utilité (en cas d'absence de courant) et sa maniabilité (pas de fil à traîner derrière soi) en font un outil indispensable.

**Les perceuses fixes**



Perceuse à verre



La perceuse sensitive



La perceuse à colonne



**Perceuse radiale**

- ***Perceuse à colonne***

Une perceuse à colonne est une machine-outil d'atelier fixée sur un bâti, un établi ou au sol. Elle permet des perçages précis et importants (diamètres pouvant aller jusqu'à 30 millimètres dans l'acier ordinaire).

- ***Perceuse sensitive***

Plus évoluée que la perceuse sur colonne, la perceuse sensitive y ajoute la capacité à élever et à descendre le bras qui contient le moteur et le mandrin. Machine d'atelier pour industriels ou bricoleurs chevronnés, la perceuse sensitive permet des perçages de précision et/ou des perçages répétitifs, mais toujours avec des réglages fins des différents paramètres et un contrôle permanent de l'opérateur.

On qualifie de perceuse sensitive la perceuse sur colonne à réglages multiples, dont notamment la capacité de descente du bras, et la capacité aussi bien d'alésage que de percer les différents matériaux : bois, verre, acier et matériaux composites.

**À noter** : que ce soit en mécanique, en chaudronnerie ou en électronique, la perceuse sensitive est capable de percer au millimètre près l'endroit choisi pour l'alésage, selon la profondeur désirée et sur n'importe quel type de pièce de la plus petite à la plus encombrante grâce au réglage en hauteur du bras.

- ***Perceuse radiale***

Les perceuses **radiales** présentent une large surface d'usinage grâce au montage de leur tête de découpe sur un chariot coulissant.

Elles assurent l'obtention de trous circulaires et de formes complexes dans des pièces encombrantes. Elles se voient distinguées selon la possibilité ou non de changer rapidement leur mandrin.

A l'inverse du modèle «à colonne», les **perceuses radiales** procurent une grande liberté à l'opérateur : grâce à leurs bras et porte-outil mobiles, celui-ci n'est plus obligé de positionner la pièce pour effectuer ses opérations de découpe. Cet avantage se révèle très utile lors d'interventions sur des éléments de grande taille ou présentant une masse importante, à l'image des tubes ou de structures pleines en métal.

Ces machines sont par conséquent couramment employées dans les secteurs de l'industrie lourde, comme la chaudronnerie et la ferronnerie. Des utilisations plus marginales portent sur les produits dédiés à la serrurerie. Elles s'appuient alors sur la précision et sur les nombreuses possibilités de découpes, notamment en col de cygne, proposées par les perceuses radiales.

# Chapitre IV : Assemblage des matériaux

## Définition

Mis à part les systèmes taillés à partir d'un bloc de matière, la fabrication d'une structure passe généralement par l'assemblage de pièces les unes avec les autres. Ainsi, une structure constituée de pièces différentes, en particulier au niveau de la nature des matériaux utilisés pour les réaliser, est construite par l'assemblage de ces différentes pièces. Il est naturel de penser que plus la structure est complexe, plus le nombre de pièces à assembler et nécessaires à la construction de la structure est élevé.

Assemblage des matériaux est un procédé permettant de lier entre elles plusieurs pièces pour former un ensemble.

## Le choix d'une solution d'assemblage dépend de :

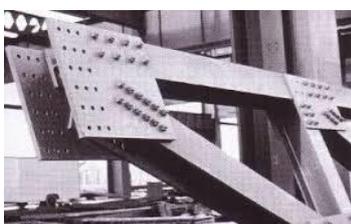
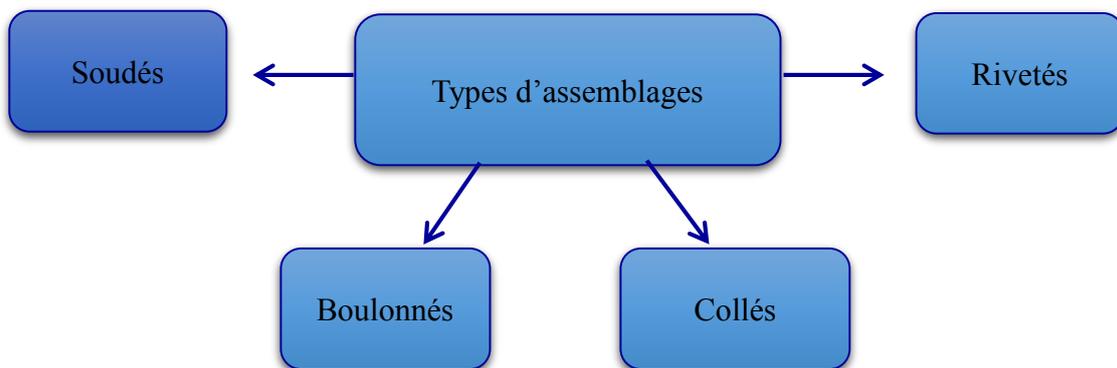
### Coût

- Durée de vie
- Maintenabilité
- Encombrement
- Esthétique

Les procédés d'assemblages se classent en 3 familles : Mécanique – Thermique - Chimique

## Un assemblage mécanique peut être :

- Rigide ou élastique
- Articulé ou fixe
- Démontable ou Permanent.

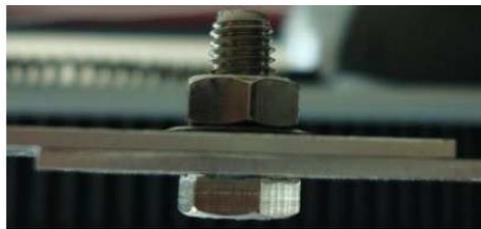


## 1. Les assemblages mécaniques amovibles (Boulonnage)

### a) Objectifs :

Permettre d'obtenir une liaison rigide ou élastique qui sera articulée ou fixe avec possibilité de démontage sans détruire son mode d'assemblage.

Un assemblage fileté permet d'assurer un effort de pression entre pièces en vue de les immobiliser les unes par rapport aux autres, et souvent d'assurer une étanchéité.



### **Boulon = vis + écrou**

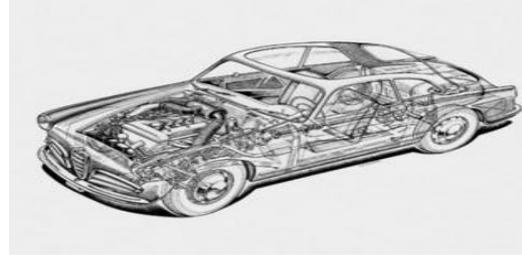
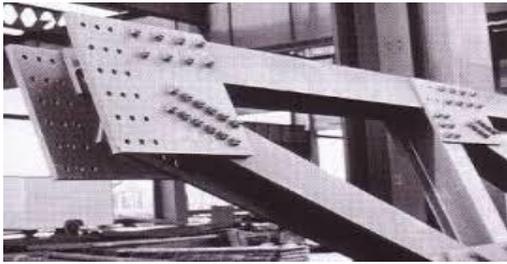
**Vis** : pièce constituée d'une tige filetée sur tout ou partie de sa longueur, avec ou sans tête, mais comportant un dispositif d'entraînement ou d'immobilisation.

**Écrou** : pièce taraudée comportant un dispositif d'entraînement, et destinée à être vissée.

**Boulon** : ensemble constitué d'une vis à tête, et d'un écrou, et destiné à assurer un serrage entre la face d'appui de la tête, et celle de l'écrou.

**Goujon** : tige comportant un filetage à ses 2 extrémités et destinée à assurer un serrage entre la face d'une pièce dans laquelle l'un des extrémités vient s'implanter à demeure par vissage, et la face d'appui d'un écrou vissé à l'autre extrémité.





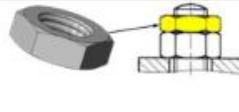
### Les différentes vis

Ce sont des tiges cylindriques métalliques filetées à la tête particulière (empreinte, forme). Elles se combinent avec un écrou ou s'assemblent avec le support (vis parkers).

Vis à tête hexagonale mâle,	Vis à tête hexagonale femelle	Vis à tête empreinte torx femelle	Vis parkers tête chanfreinée	Vis à bois à tête bombée
				
clé tête hexagonale femelle	clé tête hexagonale mâle	clé male torx	Tourne vis cruciforme	Tourne vis plat

### Les différents écrous

L'écrou est une pièce mécanique recevant une tige filetée (vis) pour assurer une liaison entre deux pièces.

Ecrou simple	Ecrou papillon	Ecrou borgne	Ecrou auto-freiné	Ecrou à créneaux	Contre écrou
					

## 2. Les assemblages mécaniques permanents (rivetage)

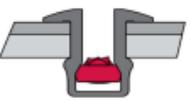
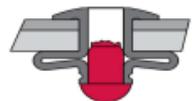
### Définition:

On appelle assemblage permanent tout moyen d'assemblage qui, pour sa désolidarisation, nécessite la destruction de la liaison ou d'une des pièces assemblées.

### Le rivetage:

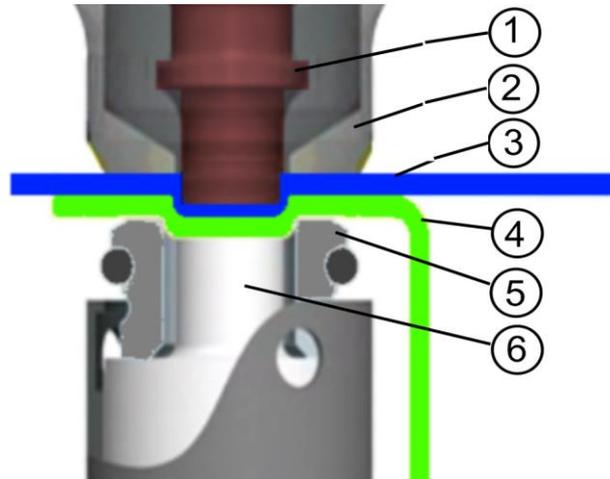
Le rivetage utilisé en carrosserie, permet d'assembler des pièces dont un seul côté est accessible. Ils sont pour cette raison appelés « **rivets aveugles** ».

Plusieurs types de rivets sont utilisés selon la résistance attendue et la nature des pièces à assembler :

Rivet ouvert	Rivet multigrip	Rivet étanche	Rivet pétale	Rivet éclaté
				
Rivet polyvalent	Rivet haute performance	Assure l'étanchéité	Répartit la charge de serrage	Rivet pour matière plastique ou caoutchouc

## CLINCHAGE

Le clinchage ou assemblage-emboutissage est une technique d'assemblage mécanique de tôles métalliques minces



### Principe

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

### Propriétés

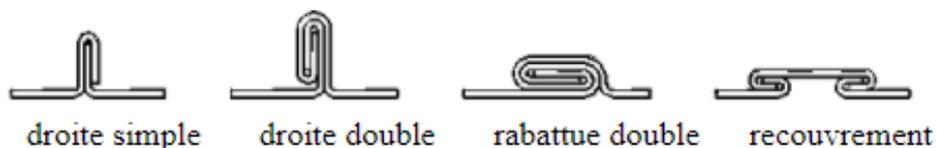
Le clinchage présente d'importants avantages :

- il ne nécessite pas d'apport de matière comme avec le [soudage](#) ou le [brasage](#) ;
- il permet l'assemblage de tôles d'épaisseurs différentes ;
- il permet l'utilisation de tôles de matières différentes (ex. aluminium et acier) ;
- il permet l'utilisation de tôle déjà peinte ou traitée anti-corrosion.

Par contre, cet assemblage n'est ni étanche ni démontable.

## AGRAFAGE

Procédé d'agrafage de tôles fortes constitué de deux ensembles séparés, complémentaires et indissociables l'un à l'autre et assemblés face à face sur un même bâti.



Les techniques et les procédés employés pour ces assemblages dits agrafages, ne sont pas valables pour l'agrafage de tôles FORTES (les tôles de plus d'un millimètre d'épaisseur et allant jusqu'à 3 millimètres. Au-delà, les tôles deviennent épaisses).

Les procédés connus d'agrafage de tôles fines (jusqu'à un millimètre, ne peuvent être employés avec une fiabilité acceptable. Dans la majorité des cas il y a rupture, d'une, voire même des deux languettes découpées qui se détachent au moment où elles sont rabattues.

## FRETTAGE

### Principe:

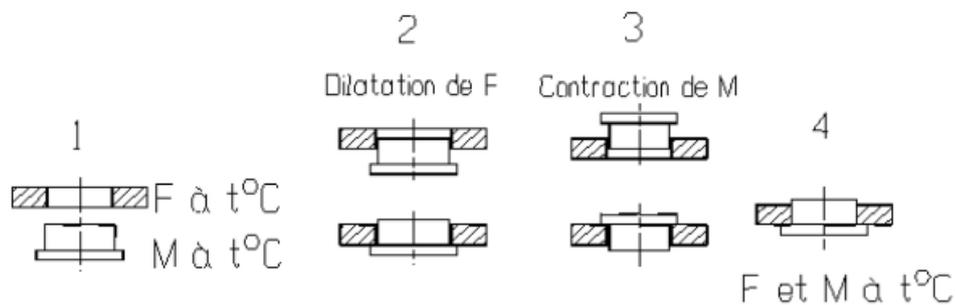
On peut obtenir le serrage d'une pièce qui enveloppe une autre en prévoyant les dimensions internes de la

première, légèrement inférieures aux dimensions externes de la seconde.

### Modalités de réalisation

On peut :

- soit chauffer la pièce externe, dont l'alésage grandira avec l'échauffement, mais se contractera lors du refroidissement, en serrant la pièce,
- soit refroidir la pièce interne (neige carbonique par exemple) dont le diamètre grandira lors du réchauffement, pressant ainsi l'alésage de la pièce externe,
- soit forcer mécaniquement (vérins et portée conique) la pièce intérieure dans la pièce extérieure.



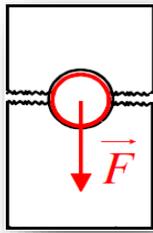
### Avantages

- ✓ Une technique d'assemblage rapide, précise et démontable ;
- ✓ Permet d'assembler tout type de matériaux, même différents ;
- ✓ Autorise un transfert de charge élevé, pour des substrats épais ;
- ✓ Permet d'obtenir un assemblage de bonne conductivité électrique ;
- ✓ Mise en œuvre relativement simple.

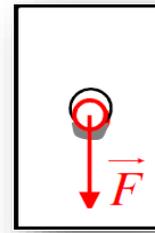
### Inconvénients

- ✓ Le Boulonnage altère les substrats, du fait du perçage ;
- ✓ Forte concentration de contraintes au niveau du trou qui augmente les risques de fissures ;
- ✓ Le repérage de ces fissures n'est possible qu'une fois que leur taille a dépassé la tête de vis ;
- ✓ Ne permet pas d'obtenir des joints étanches d'où la nécessité d'ajouter du mastic par exemple ;
- ✓ Permet d'obtenir des surfaces lisses, seulement dans le cas de l'utilisation de têtes fraisées ;
- ✓ La mise en œuvre du boulonnage sur avion coûte cher du fait de la haute qualité d'ajustement et des traitements de surface à obtenir (contrer les couples galvaniques).

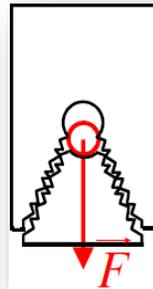
### Les différents types de rupture



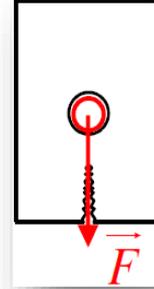
*Rupture par section nette*



*Rupture par matage*



*Rupture en cisaillement*



*Rupture par clivage*

### 3. Collage

Un collage est un assemblage de matériaux au moyen d'une colle.



Le collage des métaux a commencé vers 1942, sous l'effet de deux événements :

- la découverte des adhésifs époxydes, qui ont permis pour la première fois de réaliser des collages très solides sur métaux, grâce à leur adhérence et à leur résistance mécanique très élevées ;
- la Seconde Guerre mondiale, qui a conduit les Américains à produire en grandes séries des avions et des bateaux de guerre, et donc à rechercher des méthodes d'assemblage plus rapides que les assemblages mécaniques classiques (soudure, rivetage, boulonnage).

On s'est donc enhardi progressivement, en remplaçant des assemblages tout mécanique, par des assemblages mixtes (soudé-collé, serti-collé), puis par des assemblages uniquement collés pour des pièces secondaires.

#### Assemblage par collage

##### Principes

Le joint collé constitue essentiellement un procédé d'assemblage permettant :

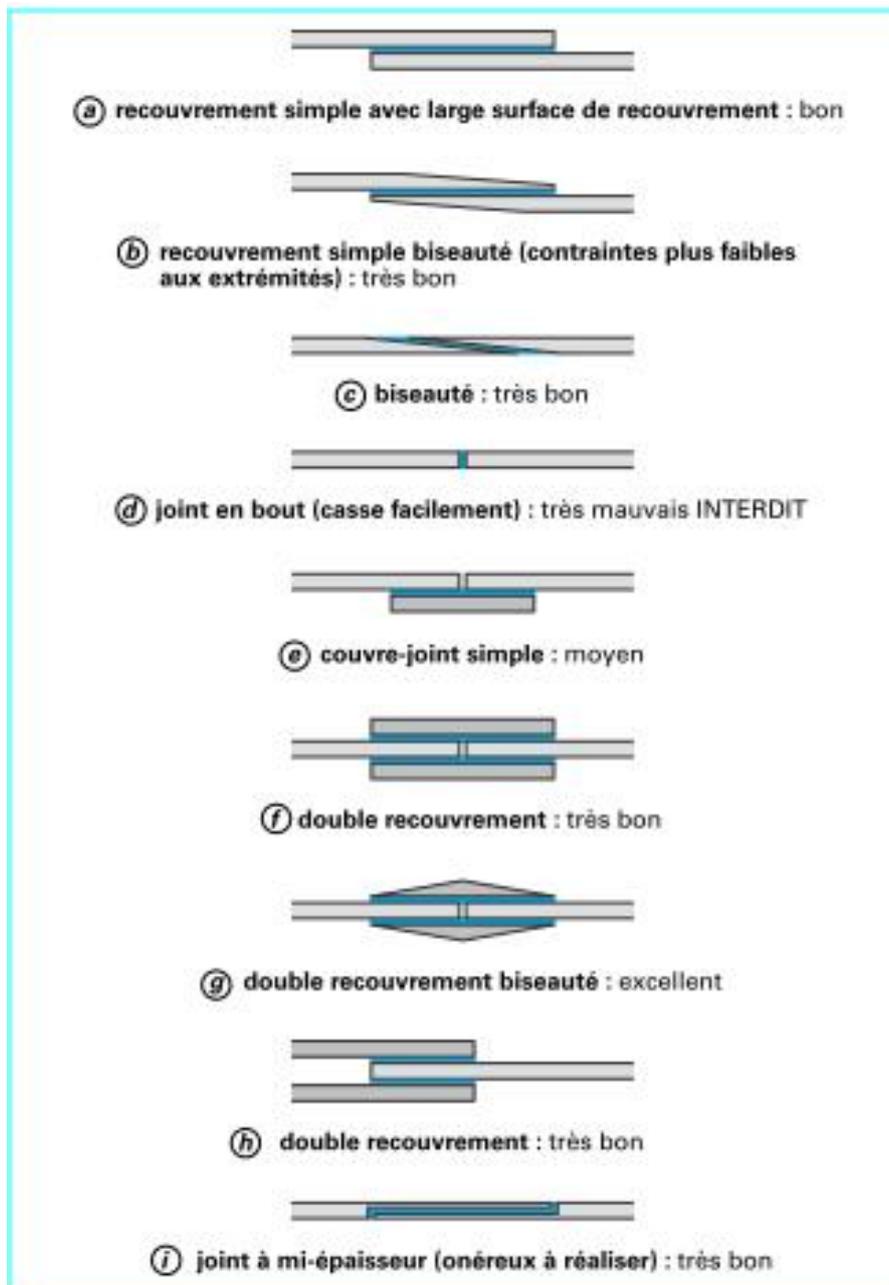
- d'alléger les structures (pas de boulons, etc),
- d'éviter les modifications structurales internes des matériaux à réunir,
- de former un joint continu, résolvant des problèmes d'étanchéité, et parfois de corrosion,

- de répartir uniformément les contraintes

La figure ci-dessous montre un certain nombre de configurations de collages de pièces métalliques et indique les avantages correspondants.

Par exemple, la figure d montre ce qu'il ne faut absolument pas faire car un tel collage en bout ne résiste pas du tout aux sollicitations mécaniques.

Certaines configurations sont particulièrement bien adaptées au collage des métaux, par exemple les pièces de révolution, complexes à réaliser par assemblages mécaniques, car elles nécessitent alors des brides et des épaulements, des frettages..., donnent automatiquement des recouvrements qui travaillent en cisaillement et en couple, qui sont les cas les plus favorables au collage, avec une grande facilité d'assemblages.

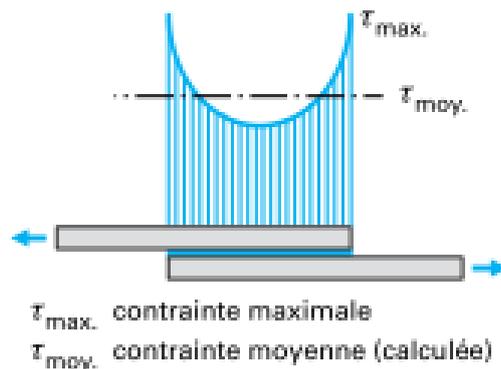


On chercha à remplacer une ligne de soudure ou une ligne de rivets par une ligne de colle, mais les adhésifs époxydes, les plus utilisés pour le collage des métaux, ne résistent pas bien au pelage ni au clivage, et on s'est donc aperçu très vite qu'il fallait concevoir spécialement les pièces collées.

En particulier, il faut que les pièces travaillent en cisaillement, et que les contraintes soient réparties sur une plus grande surface, comme le montre la figure ci-dessous.

On a donc conçu spécifiquement les assemblages pour obtenir des recouvrements de surfaces suffisamment larges afin de répartir les contraintes sur une plus grande surface et de réaliser des assemblages plus solides que les rivets, à l'endroit desquels se concentrent les contraintes.

Les assemblages collés présentent par ailleurs l'avantage d'être plus lisses, plus esthétiques et plus aérodynamiques que les assemblages rivetés ou soudés.



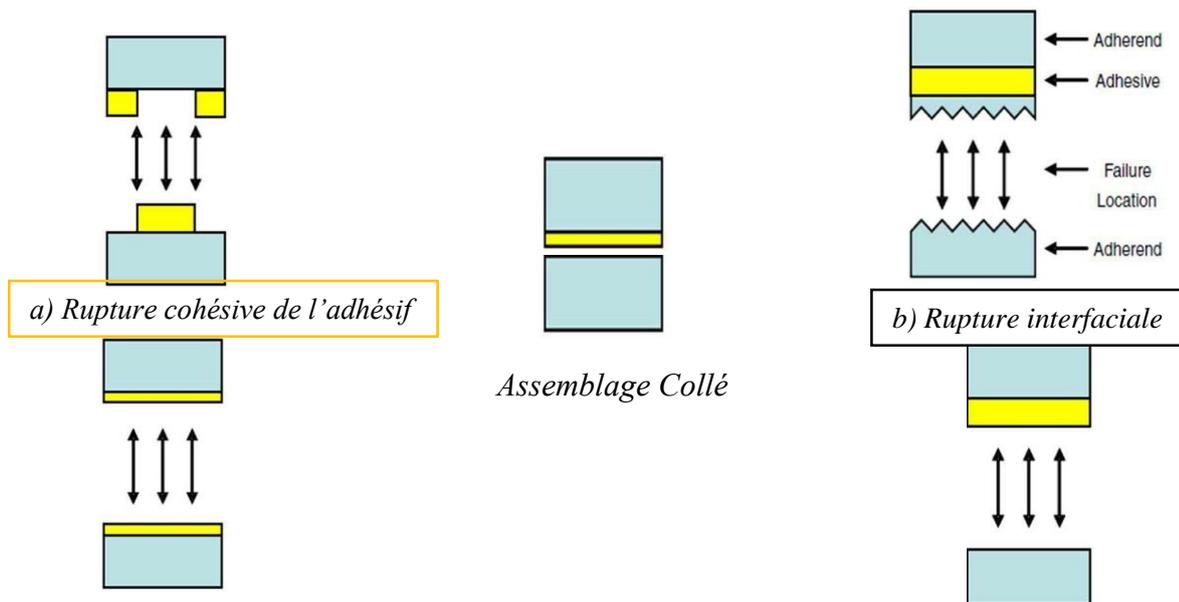
### Avantages

- ✓ Une technique d'assemblage performante utilisée industries : automobile, bâtiment, électroménager, électronique, loisirs, aéronautique, mécanique ...
- ✓ Permet d'obtenir une meilleure répartition des contraintes, due au transfert de charge Continu ;
- ✓ Diminue le risque de corrosion galvanique entre deux métaux différents ;
- ✓ Permet de réduire le poids de la structure assemblée (comparée à une structure boulonnée) ;
- ✓ permet d'obtenir des structures lisses (avantage aérodynamique) ;
- ✓ permet d'assembler entre eux des matériaux différents sans précaution particulière (corrosion).

### Inconvénients

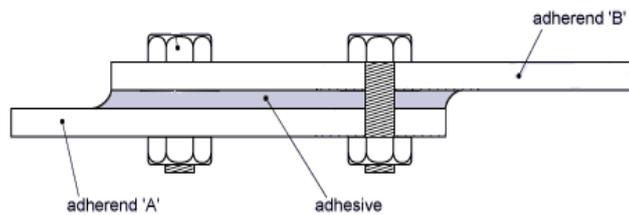
- ✗ Les colles ont une tenue limitée en température (-70°C +150°C) ;
- ✗ Résiste mal au vieillissement humide. L'humidité (dégrade aussi la résine et diminue ses performances mécaniques) ;
- ✗ Le collage exige une préparation des surfaces soignée et précise ;
- ✗ Le temps de prise des colles peut être incompatible avec les cadences industrielles ;
- ✗ Le collage ne permet pas un démontage aisé des structures assemblées ;
- ✗ Epaisseur de colle doit être maîtrisée au niveau de l'assemblage, afin de prédire la tenue de l'assemblage obtenu.

### Mode de défaillance statique des joints collés



#### 4. Assemblage hybrides

Un assemblage est dit hybride quand il associe deux techniques d'assemblage différentes.



La combinaison de ces deux techniques d'assemblage vise à :

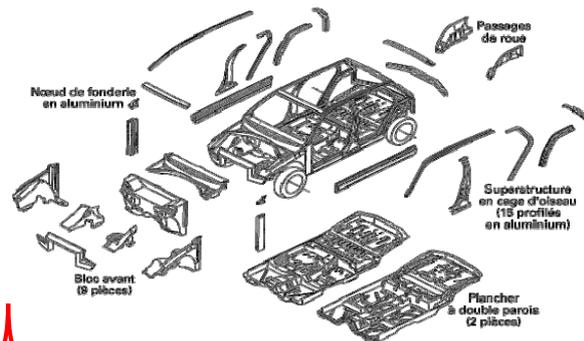
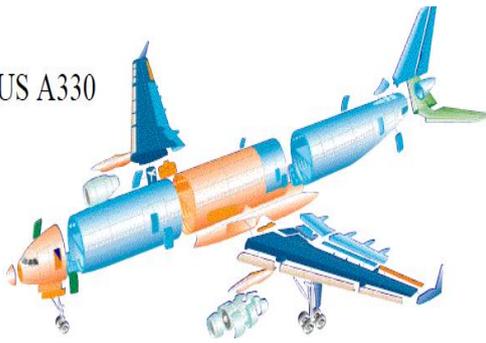
- tirer avantage d'une possible complémentarité ;
- minimiser les aspects négatifs de chacune des deux techniques.

L'association du boulonnage et du collage a pour but de :

- mieux répartir le transfert de charge d'un substrat de l'éclissage à l'autre ;
- déplacer les pics de surcontrainte afin d'utiliser l'effet bénéfique de la jonction collée sur la durée de vie ;

réduire le nombre de fixations : moins cher, moins lourd, moins long à fabriquer.

AIRBUS A330



*Tirer avantage d'une possible complémentarité ;*

*Minimiser les aspects négatifs de chacune des deux techniques*

*Mieux répartir le transfert de charge d'un substrat de l'éclissage à l'autre ;*

*Déplacer les pics de surcontrainte afin d'utiliser l'effet bénéfique de la jonction collée sur la durée de vie ;*

*Réduire le nombre de fixations : moins cher, moins lourd, moins long à fabriquer.*

*Ce type d'assemblage associe un mode de transfert discret (au niveau des fixations) et un mode de transfert continu (au niveau de l'adhésif).*

## 5. Soudage

De nombreuses structures comme les ponts, les réservoirs de stockage, et les bateaux etc. sont assemblées par soudage.

### a) Soudage des plastiques

Une technique d'assemblage permanent qui assure une continuité de même nature par fusion des surfaces à joindre ; rapprochement, contact puis maintien jusqu'à solidification du mélange ainsi formé. Les thermoplastiques sont soudables et les thermodurcissables ne le sont pas.

### b) Soudage des métaux

Une technique d'assemblage permanent qui établit la continuité métallique entre les pièces soudées. La soudure est le résultat de cette opération. La source de chaleur peut être une flamme, un plasma, un arc électrique, un faisceau d'électrons ou un faisceau laser. Dans le soudage autogène, seul le métal de

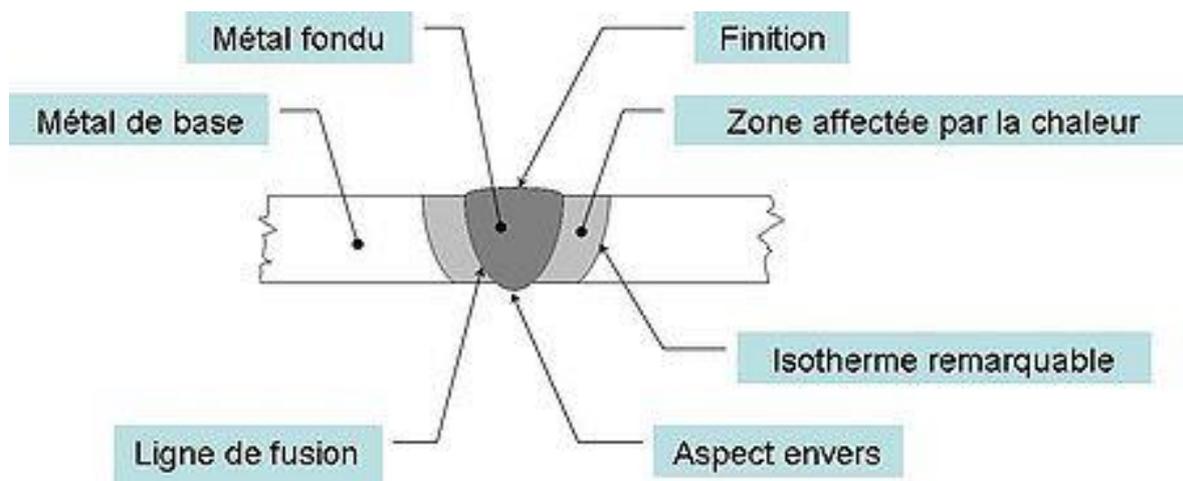
base intervient dans la formation du joint soudé. Un métal d'apport peut être utilisé. Le profil des pièces est modifié par la fusion locale. Celle-ci est suivie d'une solidification et d'une évolution microstructurale dans la zone affectée thermiquement (ZAT) au voisinage du cordon de soudure. Beaucoup de métaux sont soudables citons les aciers, le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages.

On distingue deux types de soudures :

- 1- **Soudage homogène** : Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Dans ce procédé, le métal des pièces à assembler participe à la constitution du joint au même titre que le métal d'apport. Le métal de base se dilue dans le métal d'apport. La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler.
- 2- **Soudage hétérogène** : Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature différente. Dans ce procédé, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion.

### Les zones de soudure :

La soudure ainsi réalisée, se décompose en plusieurs zones :



- 1- **La zone fondue (ZF)** : une zone de dureté élevée.
- 2- **La zone affectée thermiquement (ZAT)** : zone se trouvant en bordure de la zone fondue, ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Des modifications générées importantes menant à sa fragilisation.
- 3- **La zone de liaison** : cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.
- 4- **Le métal de base** : au-delà de la zone affectée thermiquement (ZAT), l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.

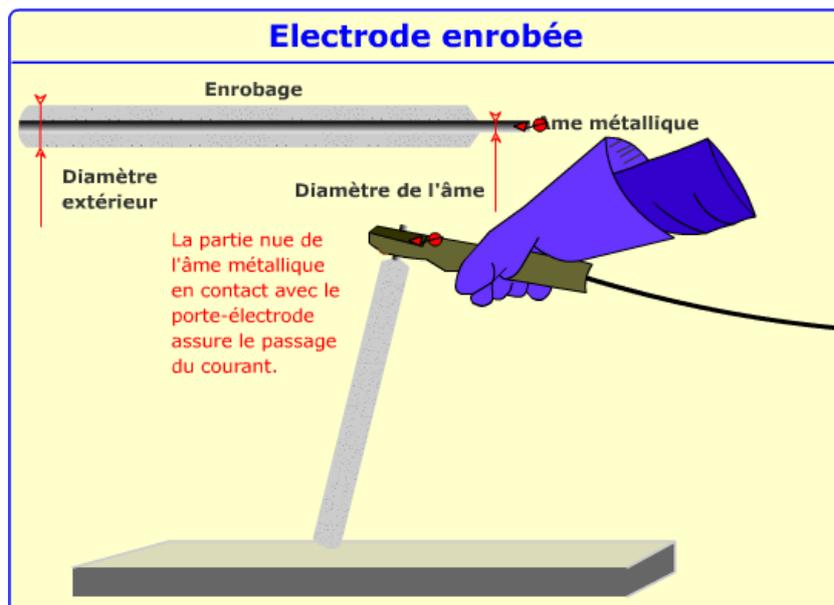
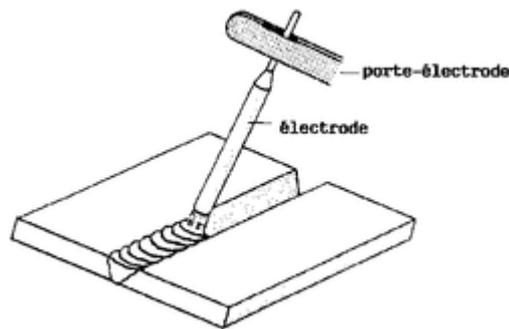
## Procédés de soudage

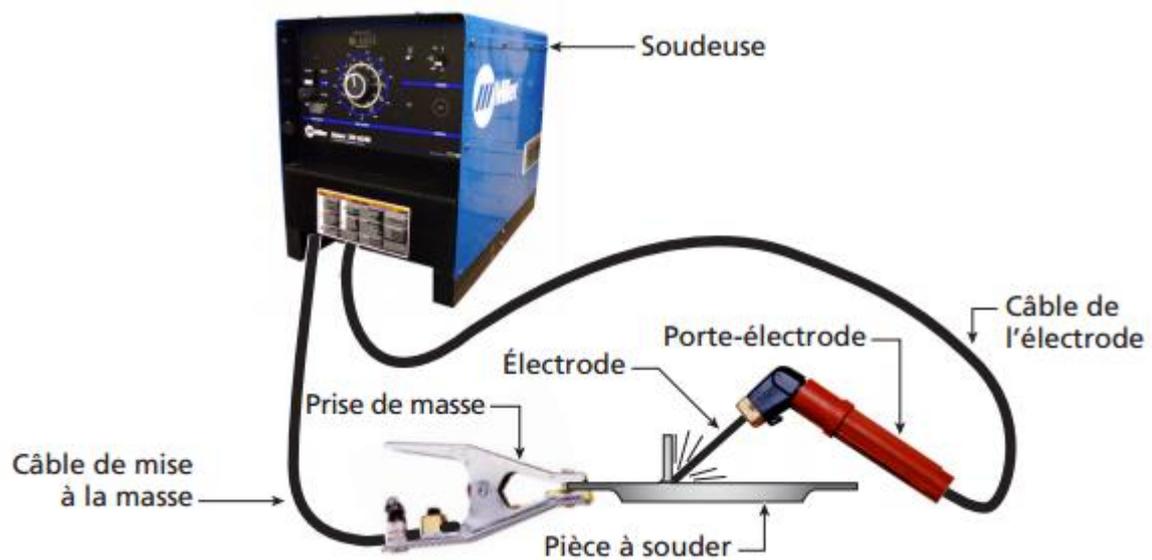
Il existe plusieurs types de soudage caractérisés par le type de source d'énergie pour réchauffement et par l'état du métal à l'endroit du soudage.

### a) Soudage à l'arc

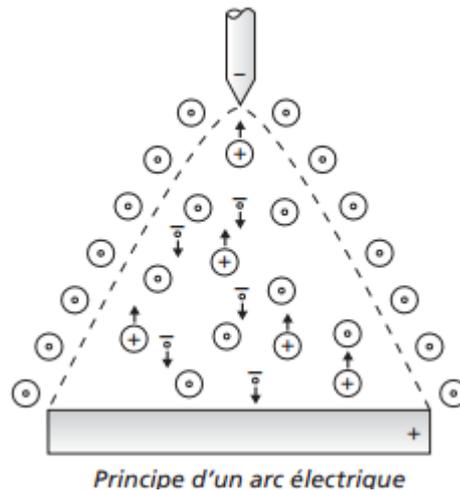
Le plus utilisé des procédés de soudage est le soudage à l'arc : Le terme « soudage à l'arc » définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode). La chaleur de l'arc peut varier entre  $3500^{\circ}$  et  $5550^{\circ}$ . Le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion.

Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Un arc électrique est établi en traversant l'espace libre entre l'électrode de métal d'apport et les pièces à assembler, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage. L'électrode est revêtue d'un flux qui fond et forme une couche protectrice sur le métal en fusion.





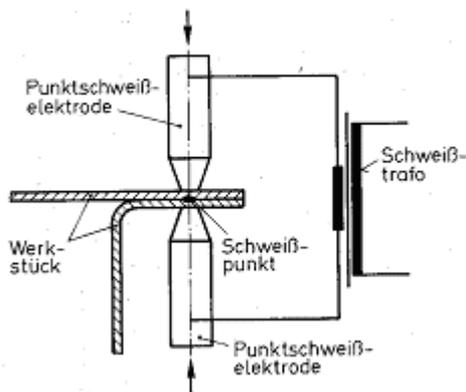
Un arc électrique est donc un gaz ionisé dans lequel circule un courant électrique



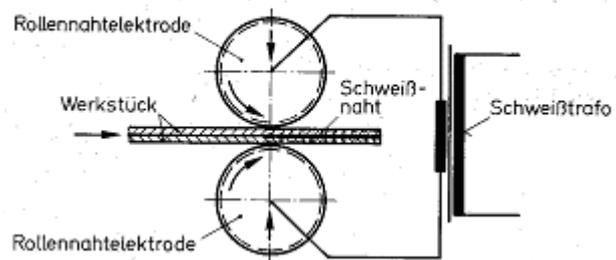
### Soudage par pression

Le soudage par pression est un procédé dans lequel on obtient en général sans métal d'apport, par l'application d'une pression suffisante pour obtenir une liaison atomique de la zone de soudage.

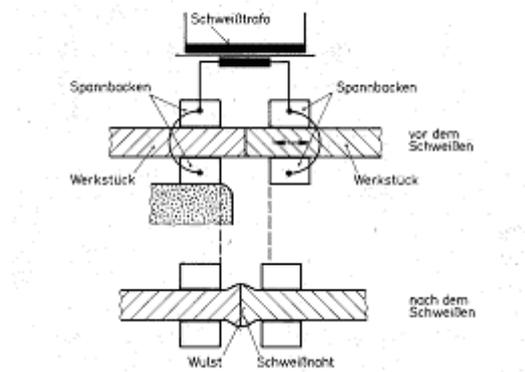
#### **SOUDEGE PAR POINTS**



#### **LE SOUDAGE PAR MOLLETES**

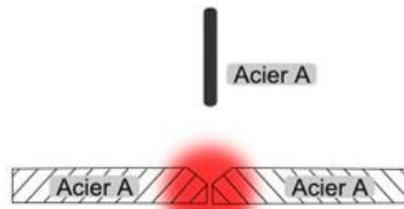


## LE SOUDAGE EMBOUT PAR FORGEAGE

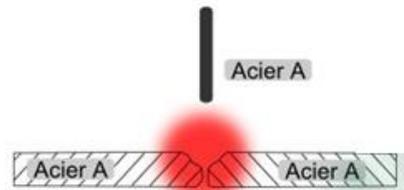


### Soudage par fusion

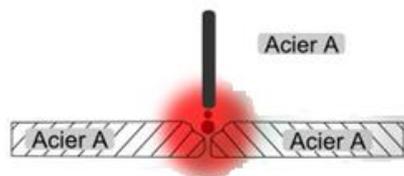
Sous l'action de la chaleur des bords du métal sont fondus et établissent une liaison entre eux ou encore avec un métal d'apport, ainsi formant le bain de fusion, lequel après solidification constitue la soudure.



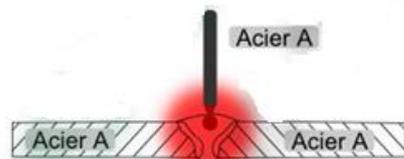
1/ Chauffage des métaux de bases



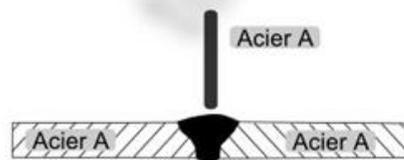
2/ Fusion des bords



3/ Fusion du métal d'apport et maintien en t°C des métaux de bases.



4/ Avance de soudage pour réaliser la longueur du cordon.



5/ Refroidissement et recristallisation des 3 métaux soudés.

## Références bibliographiques

1. Jean-Paul Bailon, Jean-Marie Dorlot ; Des Matériaux ; Presses Internationales Polytechnique; 2000; 3<sup>ème</sup> édition; ISBN 2-553-00770-1
2. Michael F.Ashby, David R. H. Jones; Matériaux : 2. Microstructures, mise en œuvre et conception; Dunod; 2008; 3<sup>ème</sup> édition; ISBN 978-2-10-051768-8
4. Michel Dupeux ; Aide-Mémoire Science des Matériaux ; Dunod ; 2004; ISBN 2-10-005458-9
5. Christian Mascle, Walery Wygowski ; Fabrication avancée et méthodes industrielles  
Tome 1 ; Presses internationales, Polytechnique ; 2012 ; ISBN 978-2-553-01630-1.