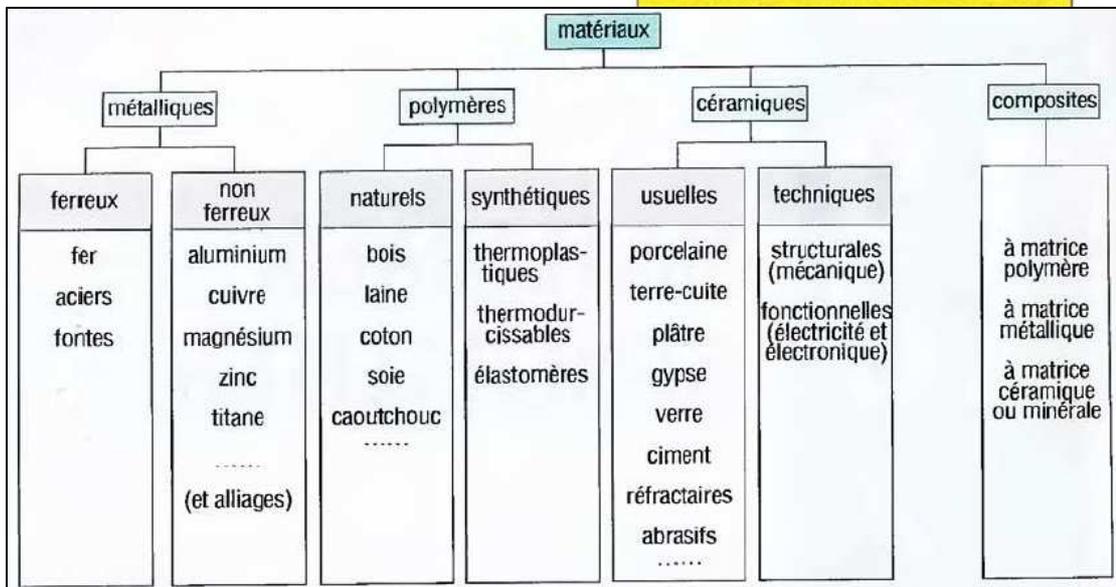
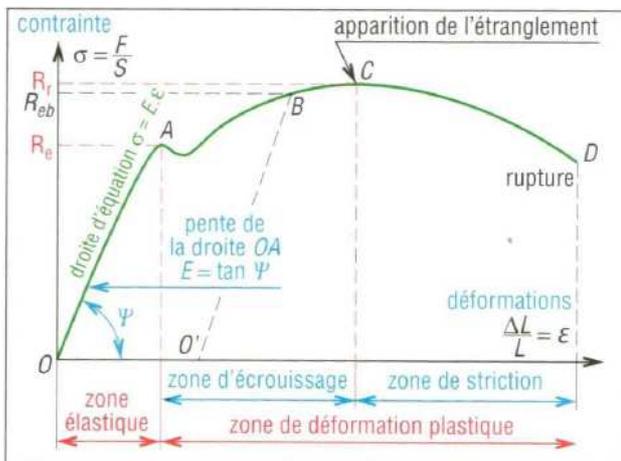
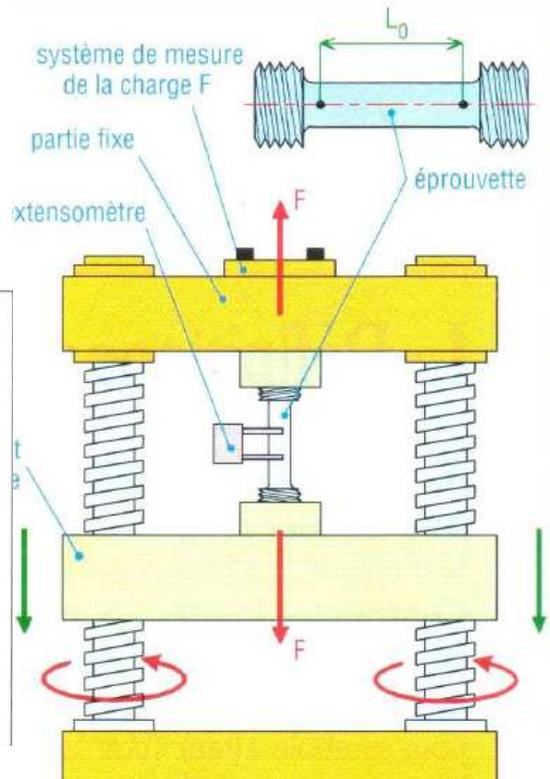
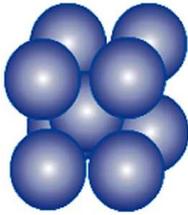


# MATERIAUX :

## PROPRIETES, TRAITEMENTS, FAMILLES

### (COURS)



# MATERIAUX :

## PROPRIETES, TRAITEMENTS, FAMILLES

Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel.

Sélectionner un matériau n'est généralement pas une opération simple compte tenu de la grande variété proposée. Le choix dépend autant du prix que des qualités propres du **matériau** (caractéristiques telles que sa résistance, son coefficient de frottement, de dilatation, sa densité, etc...) et du **procédé de fabrication** retenu pour la réalisation, qui lui-même dépend du **produit** à obtenir : unitaire ou en série, formes...

### Table des matières

<b>1 Propriétés des matériaux</b>	<b>1</b>
1.1 Propriétés de mise en forme .....	1
1.2 Propriétés tribologiques .....	1
1.3 Propriétés (et essais) mécaniques .....	2
1.3.1 Essai de traction .....	2
1.3.2 Essai de résilience .....	5
1.3.3 Essai de dureté .....	6
1.3.4 Essai de fluage .....	6
1.3.5 Essai de fatigue ou d'endurance .....	7
1.4 Autres caractéristiques des matériaux .....	8
<b>2 Traitement des matériaux</b>	<b>9</b>
2.1 Alliages fer-carbone : aciers et fontes .....	9
2.2 Traitement thermique dans la masse .....	9
2.3 Traitements de surface .....	11
2.3.1 Traitements thermiques de surface .....	11
2.3.2 Traitements électrolytiques .....	13
<b>3 Familles des matériaux et désignation</b>	<b>14</b>
3.1 Métaux .....	15
3.1.1 Aciers non alliés (« aciers au carbone ») .....	15
3.1.2 Aciers faiblement alliés, pour haute résistance .....	15
3.1.3 Aciers fortement alliés .....	15
3.1.4 Fontes .....	16
3.1.5 Aluminium et alliages .....	16
3.1.6 Cuivre et alliages .....	16
3.1.7 Magnésium et alliages .....	17
3.1.8 Zinc et alliages .....	17
3.1.9 Titane et alliages .....	17
3.2 Matières plastiques et élastomères .....	17
3.3 Céramiques .....	19
3.4 Matériaux composites .....	20
3.5 Les nouveaux matériaux .....	20
<b>4 Choisir un matériau</b>	<b>21</b>

# 1) PROPRIETES DES MATERIAUX

## 1.1) Propriétés de mise en forme

### 1.1.1) Moulabilité ou coulabilité

La coulabilité (ou moulabilité) est l'aptitude d'un matériau fondu à bien remplir le moule et à reproduire fidèlement son empreinte.

Si la coulabilité est trop faible il peut y avoir des trous dans le remplissage (surtout dans les sections de faible diamètre).

### 1.1.2) Soudabilité

La soudabilité d'un métal est son aptitude à être soudé avec lui-même ou avec un autre alliage métallique.

### 1.1.3) Ductilité (pour forgeage/estampage/matriçage, pliage, cintrage)

La ductilité est l'aptitude d'un matériau, sous la contrainte, à acquérir de grandes déformations permanentes (plastiques) avant de se rompre.

La ductilité en traction est donnée par l'allongement pour cent :  $A\%$  (cf. essai de traction, 2<sup>e</sup> année).

Les procédés d'obtention des formes comme le forgeage (ou estampage ou matriçage), le pliage, le cintrage et l'emboutissage nécessitent que le matériau ait une bonne ductilité.

### 1.1.4) Usinabilité

L'usinabilité est l'aptitude d'un matériau à être façonné à l'outil coupant, donc à se laisser transformer en copeaux.

## 1.2) Propriétés tribologiques

La tribologie est la science qui s'intéresse aux surfaces en contact, animées d'un mouvement relatif (notion de déplacement et de vitesse entre deux corps), et qui donc génère de l'usure.

Les grandeurs caractéristiques en tribologie sont :

- le coefficient de frottement de glissement : rapport de la force tangentielle qui s'oppose au mouvement relatif, à la force normale qui appuie les corps l'un sur l'autre. (cf. cours sur les actions mécaniques – frottement) ;
- la rugosité : influe sur le coefficient d'adhérence, de frottement, la stabilité du régime de lubrification, la résistance à la fatigue. La phase de rodage correspond à une diminution de la rugosité des surfaces (disparition des aspérités les plus importantes et les plus irrégulières par frottement avec une autre surface).
- le produit  $p.V$  (cf. cours sur la technologie des liaisons : liaison pivot par coussinet).

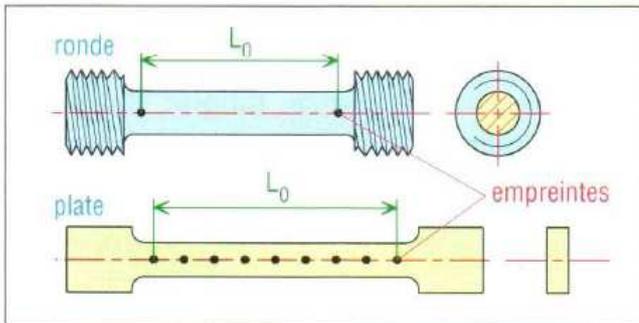
### 1.3) Propriétés (et essais) mécaniques

La plupart des notions abordées dans ce chapitre seront revues et largement complétées en 2<sup>e</sup> année, lors du cours sur la résistance des matériaux.

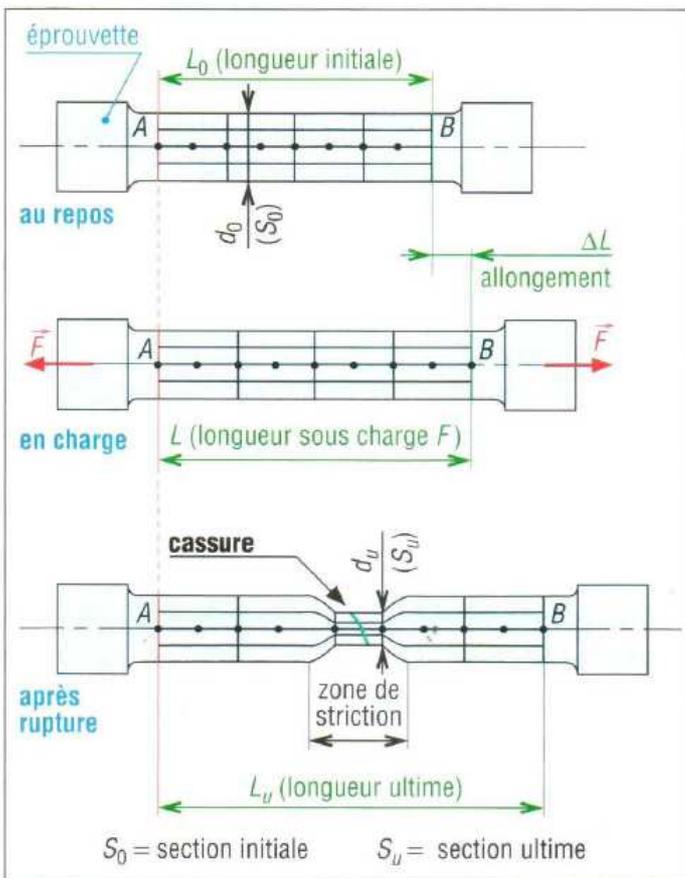
#### 1.3.1) Essai de traction

##### a) Mise en place de l'essai

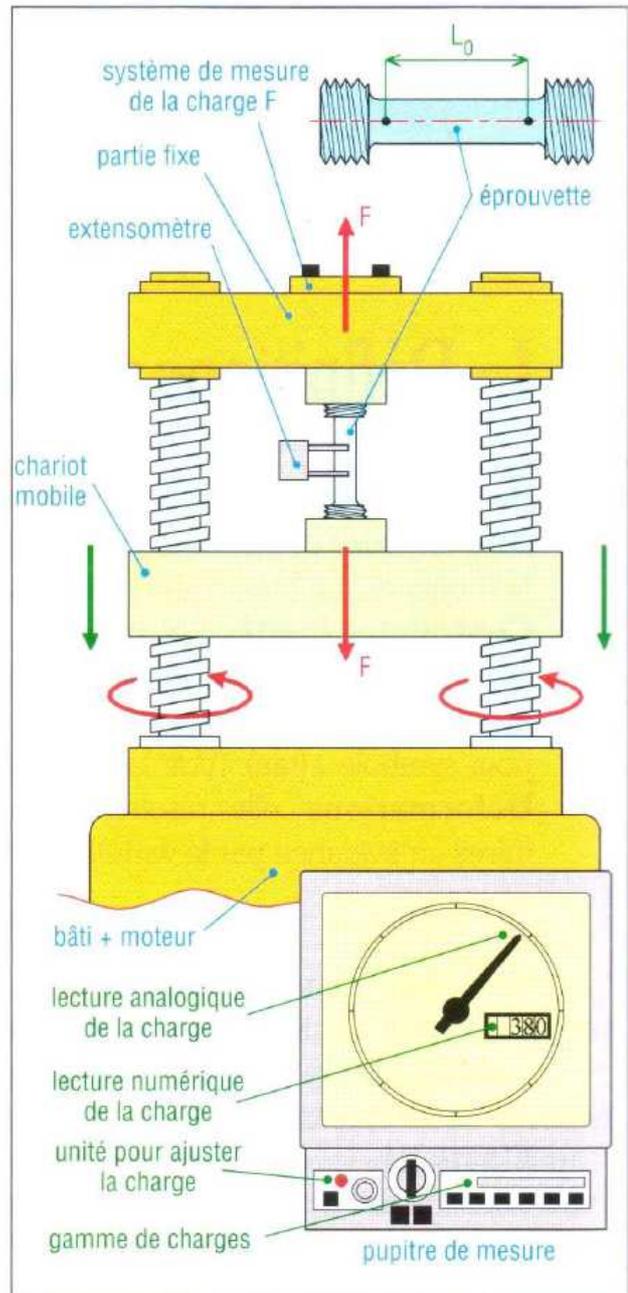
Essai mécanique le plus classique, l'essai de traction consiste à exercer sur une éprouvette normalisée cylindrique ou plate, deux forces égales et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.



1. Exemples d'éprouvettes de traction usuelles.



2. Éprouvette en cours d'essai.

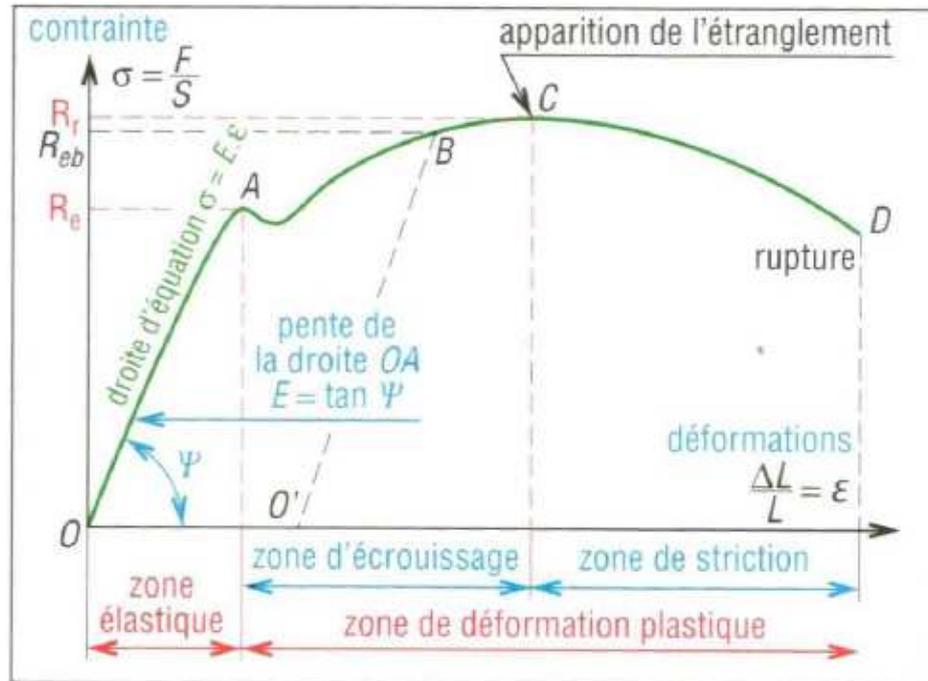


3. Principe des machines d'essai de traction.

### b) Courbe contrainte-déformation (ou effort-allongement)

La courbe obtenue lors d'un essai de traction représente la contrainte par rapport à la déformation.

**Contraintes :** Elles caractérisent par des indications chiffrées les efforts de cohésion qui existent entre les grains de matière. On trouve des contraintes normales (ou de tension) ayant pour symbole  $\sigma$  (sigma) et des contraintes tangentielles (ou de cisaillement) ayant pour symbole  $\tau$  (tau). Les contraintes ont la même unité qu'une pression, on les exprime couramment en N/mm<sup>2</sup> ou MPa.



**Données du graphe, en abscisse et en ordonnée :**

$\varepsilon$  : Déformation normale (sans unité) :  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$

$\sigma$  : Contrainte normale, en MPa :  $\sigma = \frac{F}{S}$  ;

$\Delta L$  : Allongement, en mm :  $\Delta L = L - L_0$  ;

F : Force de traction, en N ;

L : Longueur de l'éprouvette, en mm ;

S : Surface de la section de l'éprouvette, en mm<sup>2</sup> ;

$L_0$  : Longueur initiale de l'éprouvette, en mm ;

$S_0$  : Surface initiale de la section de l'éprouvette, en mm<sup>2</sup> ;

Dans le cas de faibles déformations, on approxime S à  $S_0$  et L à  $L_0$ .

**Explications de la courbe obtenue :**

**Zone élastique :** zone dans laquelle la déformation du matériau est totalement réversible. C'est-à-dire que l'éprouvette reviendra à sa longueur initiale si on relâche la force exercée. L'élasticité des matériaux est souvent linéaire (cas des métaux), c'est-à-dire que dans cette zone (segment OA sur la courbe) la force est proportionnelle à la déformation, comme un ressort parfait :  $F = k \cdot \Delta L$  (k : rigidité), ou encore :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ (loi de Hooke)}$$

E est le **module d'élasticité longitudinal** (ou **module d'Young**) du matériau, en MPa.

Plus le module d'élasticité est grand, plus le matériau est **rigide**.

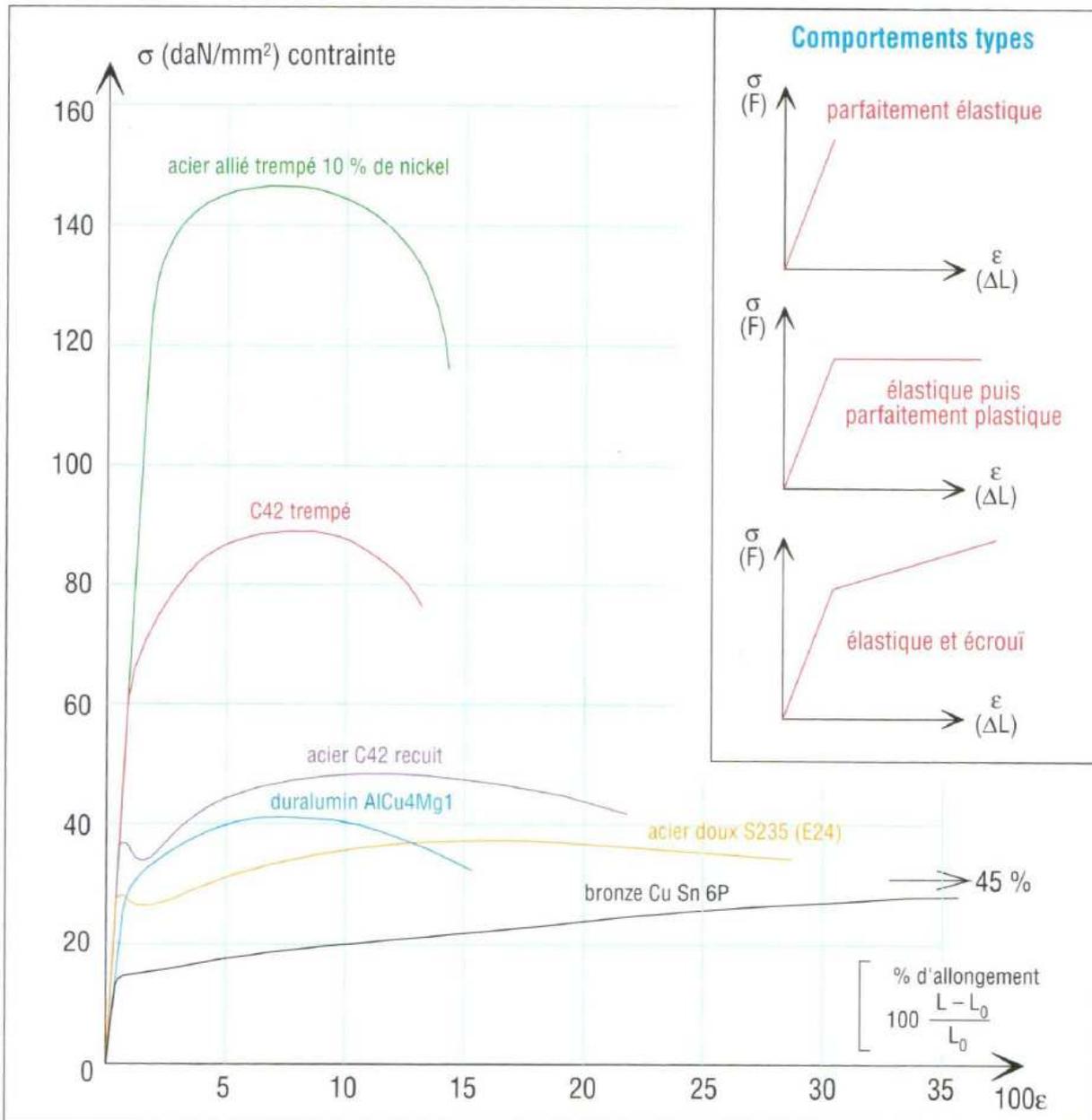
La zone d'élasticité reste valable jusqu'à une certaine contrainte  $R_e$  : **limite d'élasticité** du matériau (en MPa). Dans la pratique cette limite élastique est difficile à définir, et on utilise la limite pratique d'élasticité  $R_{p0,2}$  qui est la contrainte pour laquelle la déformation résiduelle plastique vaut 0,2%.

Cette zone élastique n'est pas toujours linéaire (cas du caoutchouc), mais on la linéarise toujours autour d'un point de fonctionnement.

**Zone de déformation plastique :** zone dans laquelle une partie de la déformation du matériau est irréversible. C'est-à-dire que si on relâche la force exercée, l'éprouvette ne reviendra pas à sa longueur initiale : il restera une déformation résiduelle plastique : c'est l'**écrouissage**.

Un exemple de relâchement de l'effort en zone plastique écrouissable est illustré sur la courbe BO' : la courbe contrainte/déformation suit une pente identique à la zone élastique lors du relâchement. La nouvelle pièce est dite écrouie : sa longueur initiale a augmenté (elle vaut  $L_0 + OO'$ ), sa limite élastique a augmenté (elle vaut  $R_{eb}$ ), mais pas sa résistance à la rupture ( $R_r$ ).

La **résistance à la rupture en traction**  $R_r$  (en MPa) est la contrainte maximale admissible par le matériau avant rupture. Pour cette contrainte, un étranglement apparaît et la section S de l'éprouvette diminue très fortement. Cet étranglement est irréversible. Si l'on continue d'étirer l'éprouvette, la force nécessaire sera plus faible, et la rupture se produira au bout d'un allongement total



6. Courbes de traction de quelques matériaux et modèles de comportement.

### c) Caractéristiques déduites de l'essai de traction

#### ◆ **Module d'élasticité longitudinal ou module d'Young : E (en MPa)**

Le module d'Young donne la **rigidité** d'un matériau, ou sa **souplesse** (inverse de la rigidité).

Quelques ordres de grandeurs :

$$E_{\text{acier}} \approx 210\,000 \text{ MPa} ; E_{\text{fonte}} \approx 180\,000 \text{ MPa} ; E_{\text{bronze}} \approx 130\,000 \text{ MPa} ; E_{\text{alu}} \approx 74\,000 \text{ MPa}$$

#### ◆ **Limite élastique $R_e$ ou $\sigma_e$ (en MPa)**

#### ◆ **Résistance à la rupture en traction $R_r$ ou $R_m$ (en MPa)**

#### ◆ **Allongement pourcent A% (en %) : $A\% = 100 \cdot (L_u - L_0) / L_0 = 100 \cdot \epsilon_u$**

$L_u$  est la longueur ultime de l'éprouvette et  $\epsilon_u$  sa déformation ultime (au moment de la striction)

L'allongement pourcent caractérise la **ductilité** d'un matériau (capacité à se déformer plastiquement).

L'inverse de la ductilité est la **fragilité** (statique).

### 1.3.2) Essai de résilience

La **résilience**, de symbole général **K**, caractérise la capacité d'un matériau à **absorber les chocs** sans se rompre. Ce risque est amplifié aux basses températures.

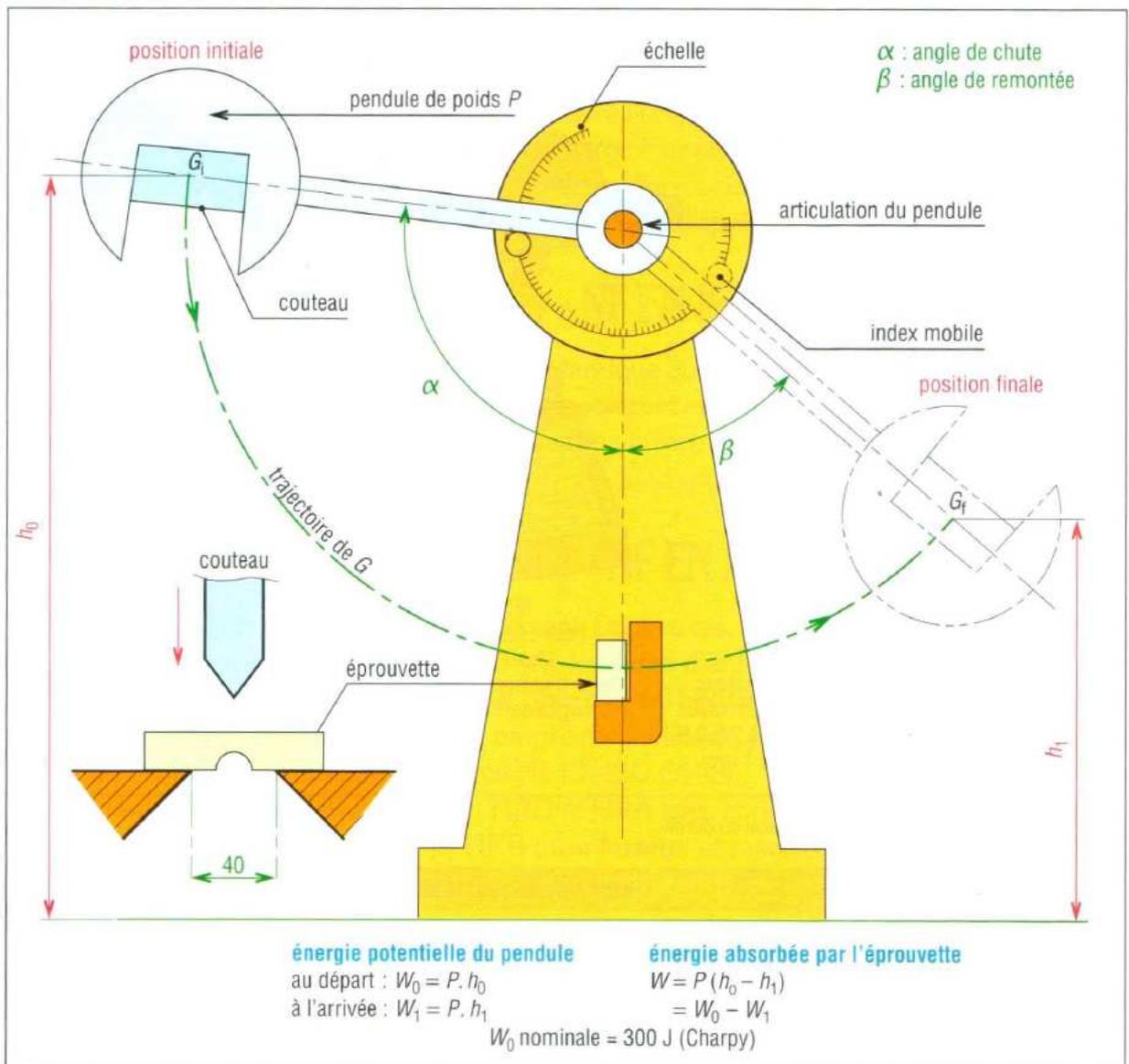
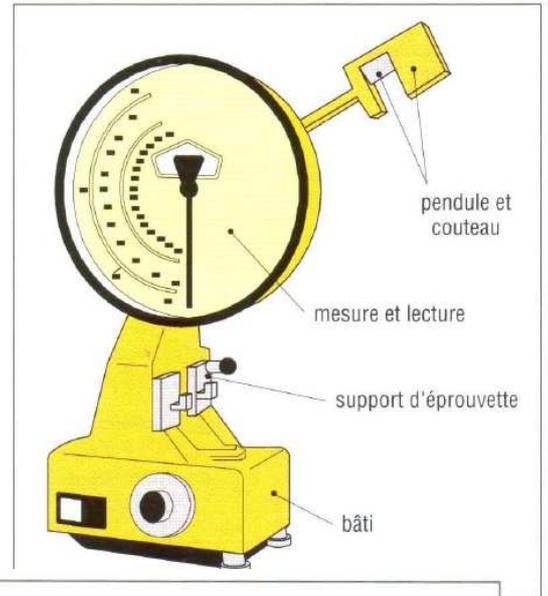
Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastree). L'essai mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester.

L'énergie absorbée par l'éprouvette ( $W$ ) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le départ ( $W_0 = m.g.h_0$ ) et l'arrivée ( $W_1 = m.g.h_1$ ) :

$$W = m.g.(h_0 - h_1)$$

La résilience est égale au rapport de  $W$  sur l'aire de la section au droit de l'entaille, et s'exprime en  $J/cm^2$ .

Ex :  $KVU_{\text{acier dur}} \approx 30 J/cm^2$  ;  $KVU_{\text{acier doux}} \approx 65 J/cm^2$



10. Principe d'essai de résilience. Vitesse d'impact :  $V = \sqrt{2gL(1 - \cos\alpha)}$

### 1.3.3) Essai de dureté

La **dureté**, de symbole général **H**, caractérise la **résistance** qu'un matériau oppose à la **pénétration d'un corps dur**. Elle caractérisera donc la capacité de résistance d'un matériau au marquage (empreintes, rainures...), et à l'usure.

La dureté dépend des caractéristiques du matériau mais aussi de la nature et la forme du pénétrateur et du mode de pénétration.

Principaux essais de dureté											
essai	symboles	principe et conduite de l'essai									
Brinell HB	HBW	<p>bille <math>\varnothing d</math> en carbure</p> <p>surface</p> <p><math>\varnothing a</math></p>	$HBW = \frac{0,102 \times F}{S}$ avec $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ <p>(F en N, a et d en mm)  <math>0,981 \leq F \leq 2\,942</math> daN</p>								
Vickers HV	HV 100 HV 50 HV 30 HV 20 HV 10 HV 5 ... HV 0,01	<p>pyramide à base carrée</p> <p>136°</p> <table border="1"> <tr> <td>HV</td> <td>HV 100</td> <td>HV 50</td> <td>etc.</td> </tr> <tr> <td>F (N)</td> <td>980,7</td> <td>490,3</td> <td>...</td> </tr> </table> <p>pour HV 100, F = 100 kg</p>	HV	HV 100	HV 50	etc.	F (N)	980,7	490,3	...	$HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$ avec $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ <p>(F en N, <math>d_1</math> et <math>d_2</math> en mm)            Variante : essai Knoop  <math>d_1 = 7,1</math> <math>d_2</math> HK = <math>14,2 F/d_1^2</math>            angle 172,5°</p>
HV	HV 100	HV 50	etc.								
F (N)	980,7	490,3	...								
Rockwell HR	HRA HRC HRD HRB HRE HRF HRG HRH HRK etc	<p>cône ou bille</p> <p>120°</p> <p>précharge (marquage) <math>F_0</math> (100 N)</p> <p>0,2 mm (ou 0,1)</p> <p>mise en charge <math>F + F_0</math></p> <p>relâchement <math>F_0</math></p> <p><math>h</math> = enfoncement rémanent</p> <p>dureté HR = <math>100 - \frac{h}{0,002}</math></p> <p>échelle de dureté (C, B, A...)</p> <p>billes : <math>d = 1,5875</math> ou <math>3,175</math> mm</p>									

### 1.3.4) Essai de fluage

La **déformation continue** des objets, avec le temps, sous l'action d'**efforts appliqués constants** est appelée fluage. Le phénomène de fluage est observé dans les systèmes travaillant pendant de longues durées (10, 20 ans...) ou dans des machines travaillant sous températures élevées (chaudières, turbines, moteurs d'avion...).

L'essai de fluage est un essai de traction, à chaud ou non, de longue durée. La rupture se produit sous des contraintes constantes bien inférieures aux limites usuelles du matériau.

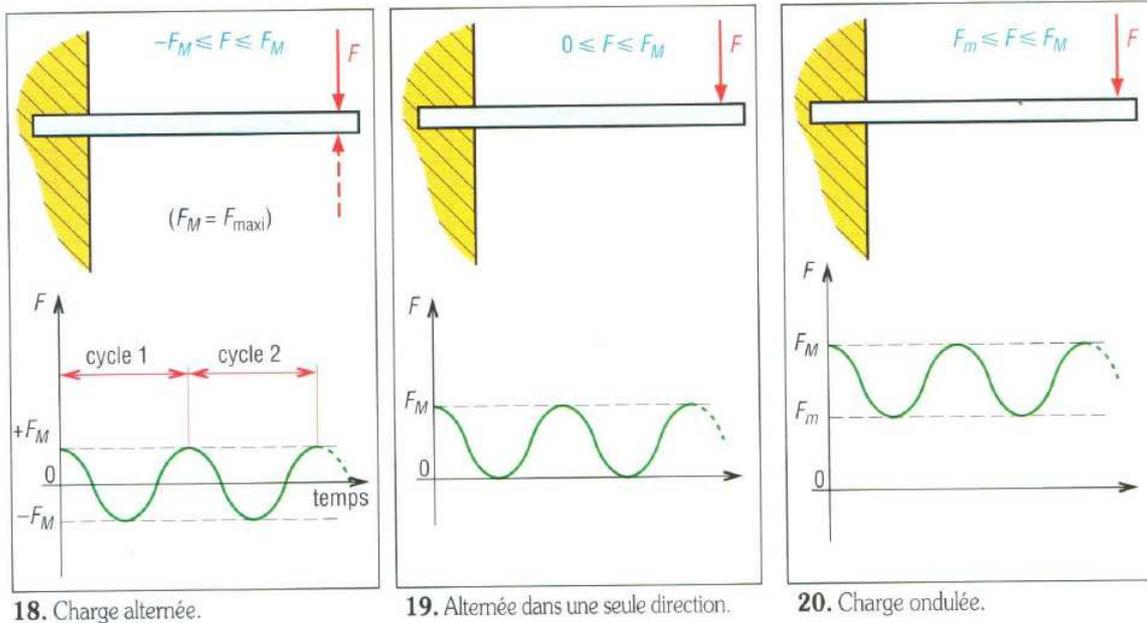
Certains matériaux (matières plastiques...) présentent du fluage à température ambiante. Pour les métaux le fluage est surtout sensible à des températures comprises entre 35 et 70% de leur température de fusion.

### 1.3.5) Essai de fatigue ou d'endurance

#### a) Phénomène de fatigue

La fatigue (ou l'endurance) est le fait que la **rupture** d'un matériau peut se produire, après un certain nombre de cycles ou allers-retours, sous des **efforts variables bien inférieurs aux limites statiques** du matériau déterminés lors de l'essai de traction ( $R_f$  et  $R_e$ ).

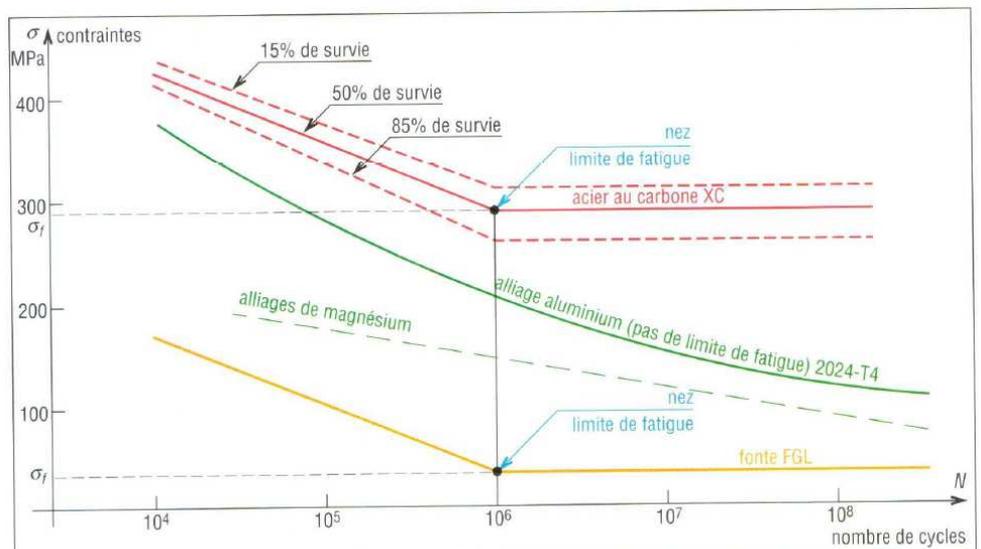
Le phénomène de fatigue est de première importance dans de nombreuses applications mécaniques (structures d'avion, roulements, engrenages, arbres de transmission...).



#### b) Essai de fatigue

C'est un essai statistique dans la mesure où des éprouvettes identiques, sous les mêmes conditions d'essai, donnent des résultats différents. Il y a une répartition statistique des résultats autour d'une valeur moyenne ou médiane.

Cette valeur moyenne, une fois déterminée, est choisie comme représentative de la capacité du matériau.



Il y a trois types d'essais de fatigue : traction compression, torsion alternée et flexion alternée.

#### c) Essai de ténacité

La ténacité est la capacité d'un matériau à **résister à la propagation d'une fissure** ; cela s'oppose à la **fragilité** en fatigue. L'essai mécanique de ténacité consiste à solliciter une éprouvette pré-entaillée sur laquelle on amorce une fissure, par fatigue.

## 1.4) Autres caractéristiques des matériaux

### a) Densité (ou masse volumique)

La densité ou densité relative d'un corps est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un corps pris comme référence.

Le corps de référence est l'eau pure à 4 °C pour les liquides et les solides (1 kg/L).

Quelques densités de métaux : aluminium : 2,7 ; acier : 7,8 ; cuivre : 9 ; plomb : 11,3.

### b) Température de fusion

Quelques exemples de températures de fusion sont donnés dans le chapitre « fluage », page 12.

Les alliages d'aluminium (660 °C) ayant des températures plus basses que les aciers (1 400°C), les aciers seront référés pour des utilisations en très haute température.

### c) Conductivité électrique

La conductivité électrique est l'aptitude d'un matériau ou d'une solution à laisser les charges électriques se déplacer librement, donc à **permettre le passage d'un courant électrique**.

Cette propriété peut être utilisée pour mettre à la masse les carters des systèmes électromécaniques, ou pour mettre en évidence le contact ou non entre deux pièces.

Exemple : cuivre : très bonne ; alu : bonne ; étain : médiocre ; fer et zinc : assez mauvaise.

### d) (Ferro)magnétisme

Certains matériaux sont ferromagnétiques – ils réagissent alors à un champ magnétique de façon importante. Certains capteurs (comme les capteurs inductifs) utilisent cette propriété pour détecter la proximité d'un solide, sans contact avec celui-ci.

Les matériaux ferromagnétiques sont le fer, le cobalt, le nickel et un grand nombre de leurs alliages, en particulier les aciers, et certain de leurs composés (alliages), mais seulement certains aciers inoxydables.

### e) Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du **transfert thermique par conduction** - les autres modes de transferts thermiques étant la convection (liée au mouvement d'un fluide) et le rayonnement (transfert thermique à distance, lié à la température d'un corps et à son état de surface).

Notée  $\lambda$  (ou  $k$  en anglais), la conductivité thermique représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre. Elle s'exprime donc en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Quelques exemples, en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  (à 20°C) :

Laine de verre : 0,04	Fonte : 100
Caoutchouc : 0,4	Carbone : 129
Acier inoxydable : 26	Aluminium : 237
Acier doux : 46	Cuivre : 390

Les matériaux fortement conducteurs comme les alliages d'aluminium sont souvent utilisés dans les systèmes de refroidissement, afin de dissiper rapidement la chaleur.

### f) Coefficient de dilatation thermique

La dilatation thermique est l'expansion, à pression constante, du volume d'un corps occasionnée par son réchauffement.

Le coefficient de dilatation thermique linéaire, souvent noté  $\alpha$ , s'exprime en  $K^{-1}$ . Plus il est important, plus le matériau se dilatera pour une variation de température donnée.

Exemples de coefficient de dilatation thermique (à 25°C) :

fonte : $10,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	bronze : $17,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
acier : $12 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	aluminium : $23 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

Pour réaliser des assemblages, il est important de choisir des matériaux avec des coefficients de dilatation thermique proches, pour ne pas engendrer des contraintes importantes.

## 2) TRAITEMENT DES MATERIAUX

### 2.1) Alliages fer-carbone : aciers et fontes

Les aciers et les fontes sont des alliages de fer avec du carbone, avec éventuellement des éléments d'addition (aciers alliés). Ils sont peu coûteux et facilement recyclables.

Le **fer** existe sous plusieurs formes en fonction de la température.

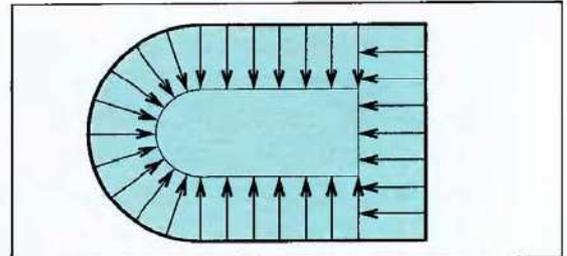
Le **carbone** (pur) fond à 3 500 °C et cristallise sous trois formes possibles : le graphite, le diamant et le noir de fumée.

Alliés avec le fer, les atomes de carbone remplissent plus ou moins les interstices, ou les vides, laissés entre les atomes de fer de chaque maille. Les caractéristiques de la structure de base sont modifiées, le fer devient acier ou fonte avec de meilleures propriétés que le fer pur. L'**acier** contient entre 0,008% et 1,7% de carbone par rapport au fer, tandis que la **fonte** possède entre 1,7% et 6,67% de carbone.

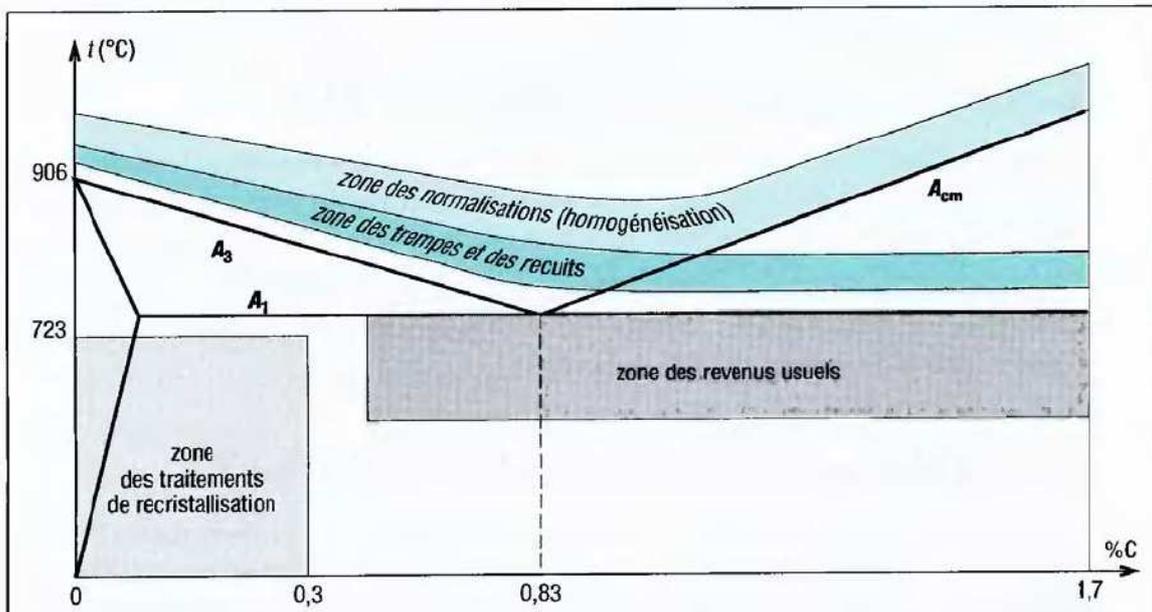
Pour créer de l'acier ou de la fonte, il faut porter à température de fusion du fer (1500°C) du fer et du carbone. Lorsque les refroidissements sont suffisamment lents, on obtient différents aciers ou fontes, selon le pourcentage de carbone présent, mais lorsque le refroidissement est rapide, certaines structures liquides n'ont pas le temps de se restructurer et sont figées : on obtient ainsi d'autres types d'acier (acier trempé).

### 2.2) Traitements thermiques dans la masse

La structure et les propriétés mécaniques ( $R_r$ ,  $R_e$ ,  $H$ ,  $A\%$ ,  $K...$ ) des aciers peuvent être modifiées par un chauffage suivi d'un refroidissement à durée contrôlée. Ce sont les traitements thermiques dans la masse : trempes, revenus et recuits.



3. Dans le cas des traitements thermiques dans la masse (trempé, revenu, recuit...), le traitement évolue de la surface jusqu'au cœur de la pièce.



4. Traitements thermiques des aciers et diagramme fer carbone.

### 2.2.1) Trempe, ou durcissement par trempe

Lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide les atomes de carbone n'ont plus le temps de diffuser et les transformations lentes des cristaux n'ont plus le temps de se réaliser.

La solution de fer obtenue, sursaturée en carbone est très dure :  $HB = 750$ , et très fragile. C'est le constituant de base des aciers trempés.

**Procédé :** on chauffe la pièce jusqu'à température d'austénisation suivi d'un maintien en température afin d'homogénéiser la structure, puis on refroidit rapidement (dans de l'eau, de l'huile...).

**Propriétés :** elle augmente la résistance mécanique et élastique ( $R_r$ ,  $R_e$ ) et la dureté ( $H$ ), mais diminue la résilience (résistance au choc  $K$ ) et la ductilité (allongement  $A\%$ ). Elle amène aussi l'apparition de tensions internes génératrices de criques et de déformations.

La **trempeabilité** est mesurée par l'essai Jominy (normalisé).

L'intérieur de la pièce, refroidi en dernier, plus lentement, est le plus difficile à tremper. Un acier a une bonne trempeabilité s'il permet la trempe, même à cœur, des pièces massives.

### 2.2.2) Revenu

Après trempe, l'acier, très dur et très fragile, est pratiquement inutilisable en l'état. Afin de corriger l'effet de fragilisation, tout en conservant un bon ensemble de caractéristiques ( $R_r$ ,  $R_e$ ,  $H$ ), on pratique un revenu.

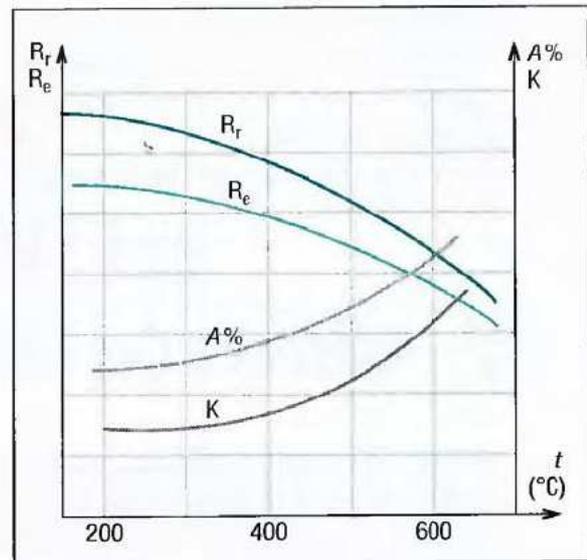
**Procédé :** il s'applique aux pièces trempées et consiste en un chauffage, à température inférieure à  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , suivi d'un maintien à température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent et contrôlé. Le traitement permet d'amener les caractéristiques au niveau souhaité.

**Propriétés :** augmentation de la résilience  $K$  et de la ductilité  $A\%$  ; atténuation des contraintes internes.

Inconvénients : diminution de la dureté  $H$ , et des résistances mécanique et élastique  $R_r$  et  $R_e$ .

Les résultats dépendent essentiellement de la température de réchauffage.

Les températures de revenu les plus usuelles sont comprises entre  $500$  et  $650\text{ }^\circ\text{C}$ .



11. Évolution typique des caractéristiques mécaniques en fonction de la température de revenu.

### 2.2.3) Recuit

Son effet est inverse de celui de la trempe. Le métal est amené au maximum de ses caractéristiques de ductilité :  $A\%$  et  $K$  maximales ;  $R_r$  et  $H$  minimales. La structure obtenue présente une meilleure usinabilité.

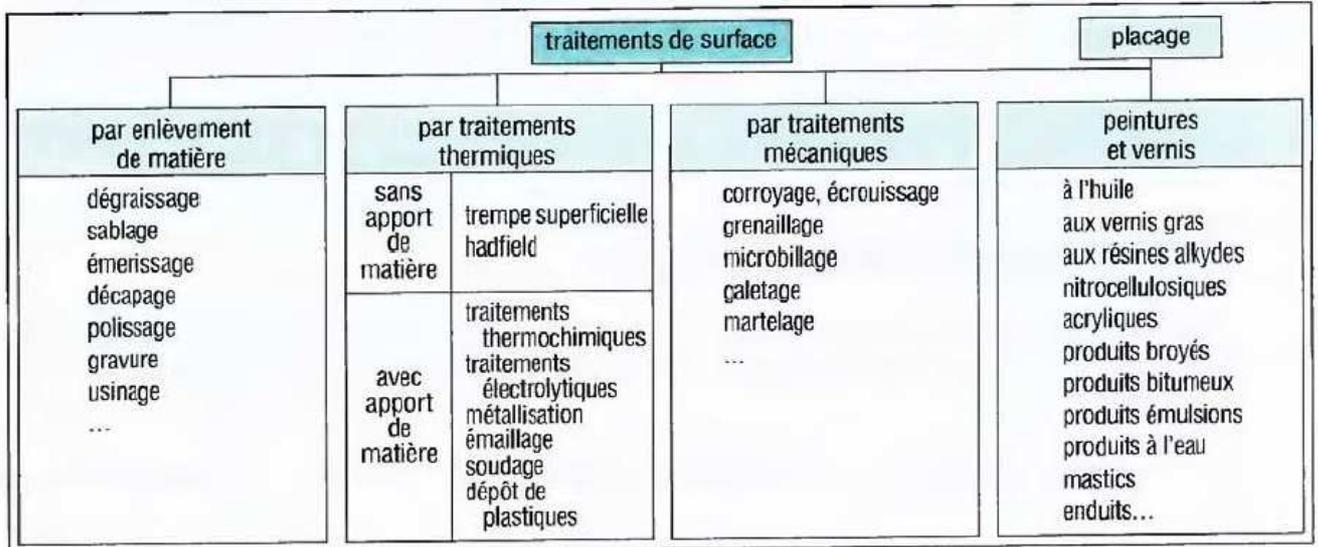
**Procédé :** le procédé consiste en un chauffage au-dessus de la température d'austénisation suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent.

**Différents recuits :**

- recuit d'homogénéisation : il détruit l'hétérogénéité chimique des aciers bruts de coulée ;
- recuit de régénération : il affine et uniformise le grain du métal ;
- recuit de détente : il fait disparaître les contraintes internes après moulage ou soudage ;
- recuit de cristallisation : pour les aciers forgés ou écrouis ;
- recuit complet : il facilite l'usinage et la déformation à froid en faisant disparaître les constituants les plus durs.

## 2.3) Traitements de surface

Les traitements de surface sont utilisés pour modifier les caractéristiques de la surface d'une pièce dans le but de lui donner des qualités nouvelles : améliorer les propriétés mécaniques (dureté, frottement, résistance à l'usure, au grippage, à la fatigue...), la résistance à la corrosion, l'esthétique et certains comportements (conductivité électrique, réflexion de la lumière, conduction ou isolation thermique...).



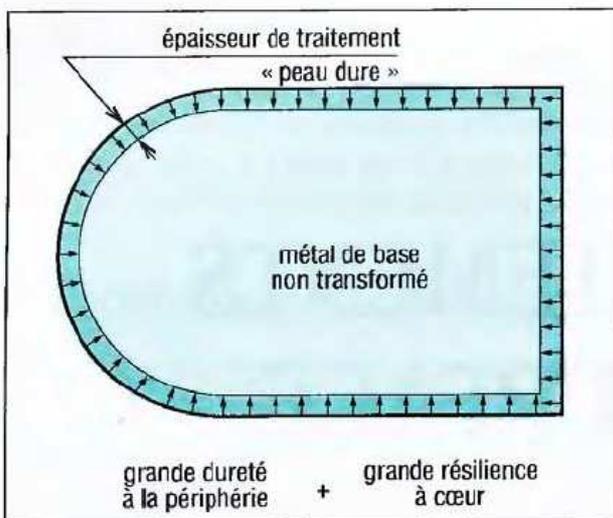
1. Traitements de surface.

### 2.3.1) Traitements thermiques de surface

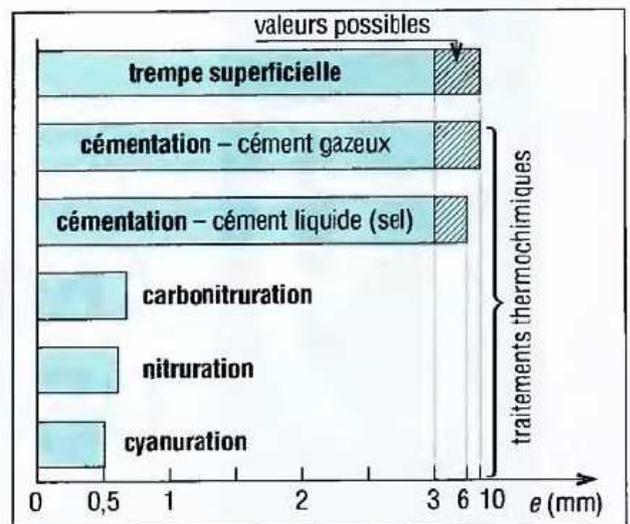
Les traitements thermiques de surface se développent de la surface vers l'intérieur de la pièce sur une couche de faible épaisseur.

Le plus souvent ces traitements sont des durcissements superficiels permettant de conserver à cœur les propriétés du métal de base, avec une ductilité et une résilience plus élevées : « peau dure et cœur tendre ».

Ils évitent l'emploi d'aciers fortement alliés en rendant possible l'utilisation d'aciers moins coûteux.



2. Principe des traitements de surface.

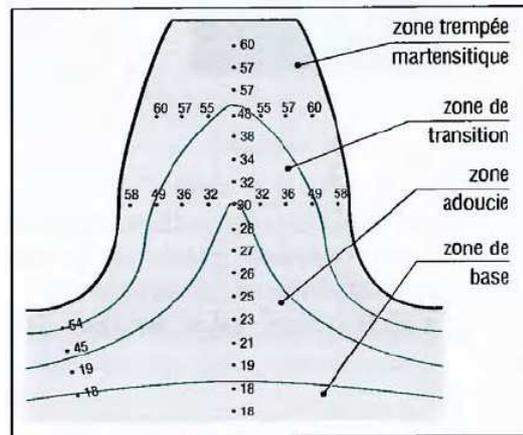


3. Épaisseurs traitées possibles suivant le procédé.

### a) Trempe superficielle

C'est une trempe réalisée uniquement en surface. Le chauffage est effectué par induction (traitements locaux, formes irrégulières, dents...) ou au chalumeau (grandes pièces) et le refroidissement par aspersion ou immersion.

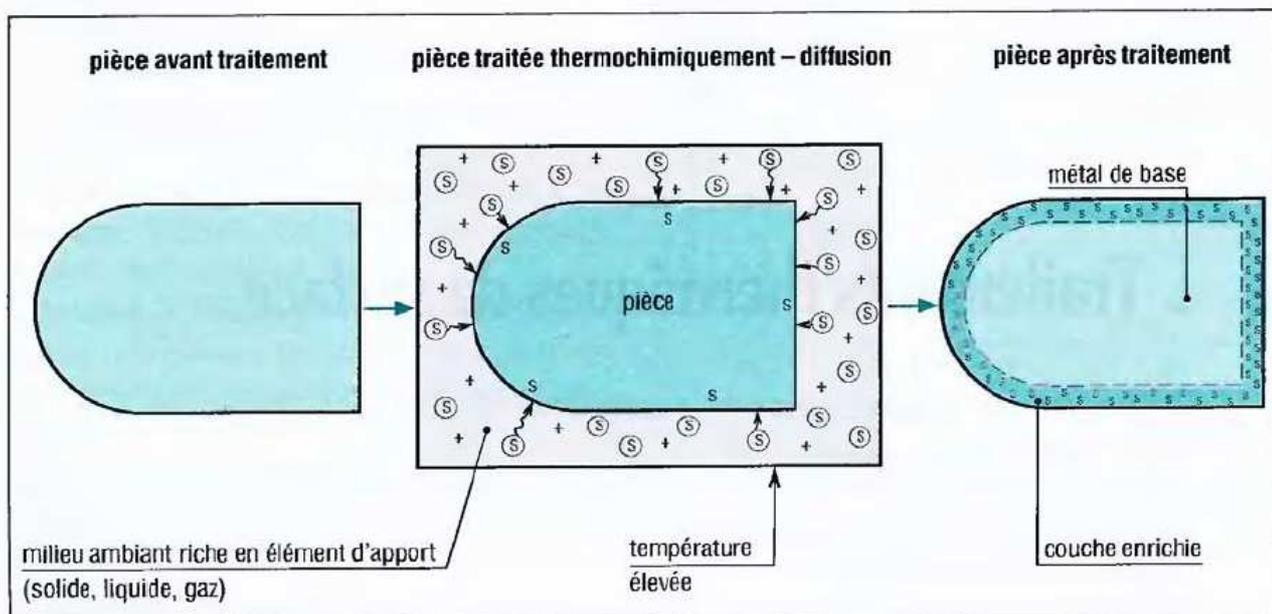
Le procédé est bien adapté à la fabrication en série : portées de vilebrequin, arbres à cames, dents d'engrenages...



4. Évolution de la dureté (HR<sub>c</sub>) d'une dent d'engrenage trempée superficiellement par induction.

### b) Traitements thermochimiques

Les traitements thermochimiques sont obtenus avec apport en surface par diffusion chimique, sous l'action de la chaleur, d'un ou plusieurs éléments d'addition comme le carbone, l'azote, le soufre...



5. Principe des traitements thermochimiques.

#### ◆ Cémentation :

Traitement le plus classique, il consiste en un apport de carbone dans la surface de la pièce, suivi d'un durcissement par trempe. Pendant le traitement, la pièce est maintenue en contact avec un corps (solide, liquide ou gazeux) riche en carbone.

L'enrichissement de la surface en carbone rend possible la trempe des aciers utilisés, non trempables au départ. Duretés atteintes : 850 HV.

Inconvénients : les pièces traitées ont tendance à se déformer et à gauchir.

Procédés dérivés : sérardisation (apport de zinc protégeant contre la corrosion), calorisation (apport d'aluminium, utilisé en décoration)...

#### ◆ Nitruration :

Elle donne une plus grande dureté que la cémentation et amène moins de risques de déformations et de gauchissement des pièces traitées.

Elle est obtenue par diffusion d'azote en surface (pièce en contact avec de l'ammoniaque craquée  $\text{NH}_3$  vers 560 °C), suivi d'un refroidissement lent. Le durcissement n'est pas obtenu par trempe superficielle mais par formation de nitrures (fer, chrome et aluminium). Duretés atteintes : 1 200 HV.

Inconvénients : coût élevé de l'équipement et mise en œuvre plus délicate que les autres procédés.

#### ◆ Carbonitruration :

Le traitement est un mélange de cémentation et de nitruration. Il y a apport, en surface, de carbone et d'azote par chauffage entre 600 et 900 °C, suivi ou non d'une trempe. Duretés atteintes : 950 HV.

### 2.3.2) Traitements électrolytiques

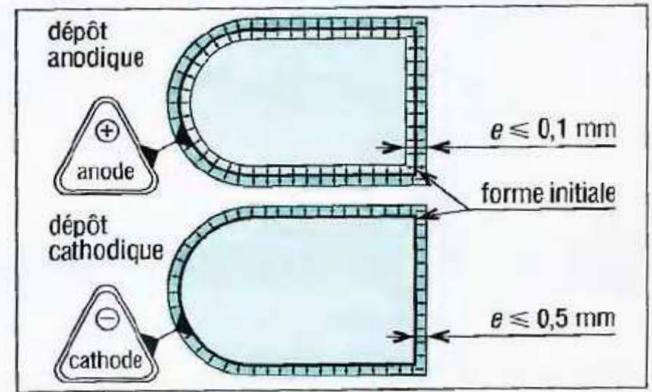
Deux cas sont possibles : le dépôt ou l'attaque anodique et le dépôt cathodique :

◆ **Dépôt anodique (électrolyse anodique) :**

La pièce est liée à l'anode et la formation du composé en surface se développe à la fois vers l'intérieur et vers l'extérieur de la surface traitée (épaisseur 0,01 à 0,1 mm environ).

◆ **Dépôt cathodique (électrolyse cathodique) :**

La pièce est liée à la cathode et le dépôt de matière (métal d'apport) se développe uniquement de la surface vers l'extérieur (épaisseur 0,5 mm environ).



7. Principe de déposition des traitements électrolytiques.

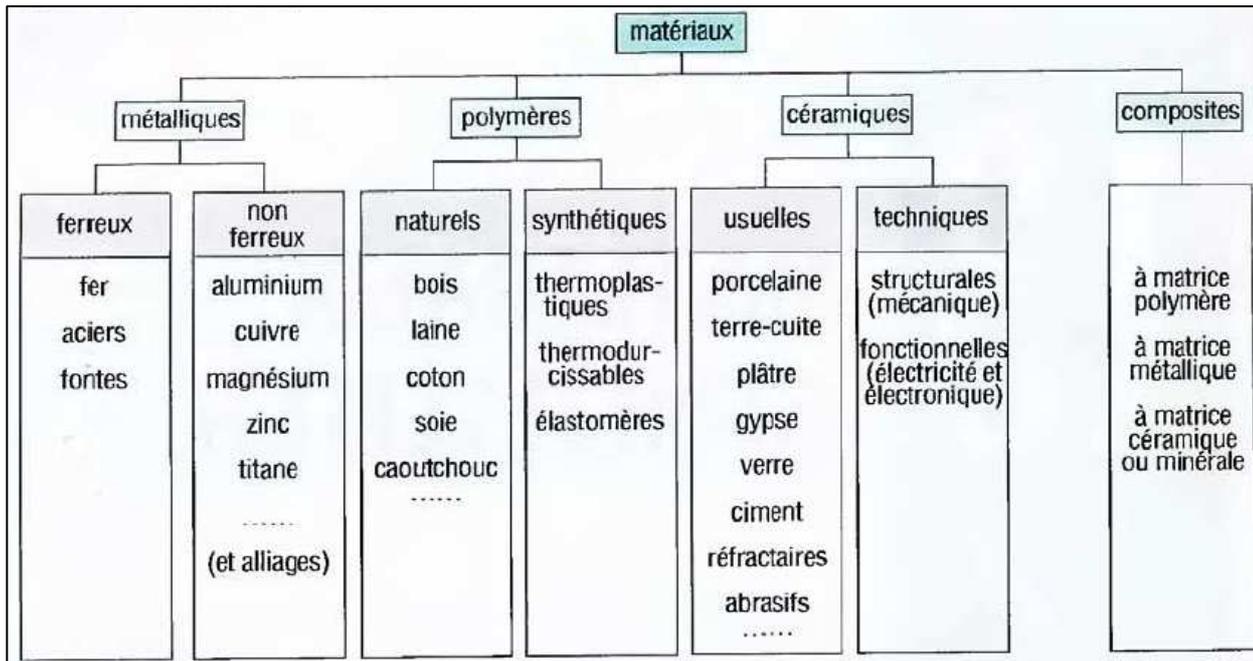
Le tableau ci-contre montre quelques exemples d'utilisation de traitements de surface par traitements thermiques, thermochimiques ou électrolytiques.

Autre cas que ceux du tableau, protégeant contre la corrosion et pour décoration : chromage (non dur), nickelage, zingage, étamage, cuivrage (sert de « sous couche »), cadmiage (dépôt de cadmium sur les métaux ferreux et cuivreux, pour visserie et boulonnerie), dorure (or)...

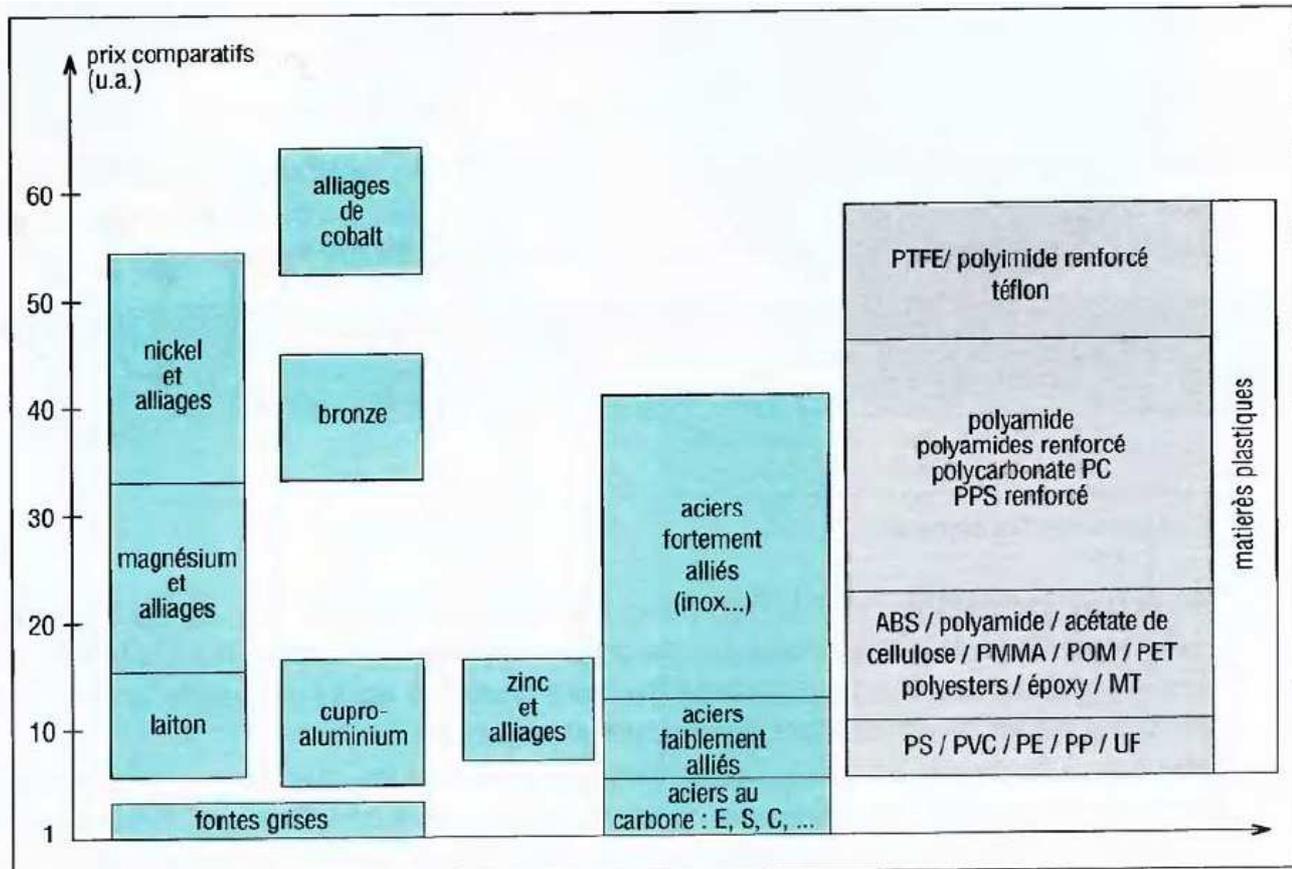
Traitements de surface par traitements thermiques													
traitement	élément d'apport	matériaux traités	épaisseur traitée (mm)	température (°C)	propriétés principales : amélioration de						(*) exemples d'emploi		
					densité en surface	résistance à l'usure - abrasion	résistance au grippage	résistance à la corrosion	résistance à la fatigue	pression de contact admissible		diminution du frottement	
transformation de structure	trempe superficielle	aucun	ferreux	$A_3 + \theta$ $50 < \theta < 200$	+	+			+	+	① ② ③		
	hadfield-HEF	aucun	aciers au manganèse	190	+	+				+	② ③ ④		
traitements thermochimiques	cémentation	carbone	aciers de cémentation	0,5 à 1	925 à 950	+	+			+	+	① ② ③ ④	
	nitruration	azote	aciers de nutrition + fontes	0,1 à 0,5	550	+	+		+	+		① ② ③ ④ ⑥	
	carbonitruration	carbone + azote	aciers cém. et nitrur.	0,05 à 0,5	600 à 900	+			+	+		① ② ⑥	
	sulfonitruration	soufre + azote	tous les ferreux	0,02 à 0,03	570		+	+	+			① ② ④ ⑥	
	phosphatation	phosphates	ferreux aluminium		40 à 90		+	+			+	④ ⑧	
	boruration	borures	ferreux	0,05 à 0,35			+	+				⑥ ⑦	
	chromisation dure	chromes (carbures)	aciers	0,01 à 1			+	+				⑥ ⑦	
traitements électrolytiques	anodiques	anodisation dure	alumine $Al_2O_3$	aluminium	0,05 à 0,06		+	+			+	② ③ ⑥	
		sulfurization (basse température)	FeS	ferreux	0,007 à 0,008	190		+	+			+	① ② ③
	cathodiques	chromage dur	chrome	aciers, alu. cuivreux, zinc	0,05 à 0,5			+	+	+		+	⑨ ② ④ ⑩
		forez	[Cu + Sn]	ferreux	0,03 à 0,15	570				+		+	① ② ④ ⑥
		stanal	Sn	ferreux	0,01 à 0,03	570		+	+	+			② ④
		delsun	étain (Sn)	cuivreux	0,015	420		+	+			+	④ ⑧

- (\*) ① : engrenages  
 ② : axes, arbres, broches  
 ③ : cames  
 ④ : bagues, paliers, galets  
 ⑤ : visserie  
 ⑥ : glissières  
 ⑦ : outils coupants  
 ⑧ : bâtis, carters, matrices  
 ⑨ : pièces de frottements  
 ⑩ : restauration de surfaces

### 3) FAMILLES DE MATERIAUX



Principales familles de matériaux



1. Prix comparatifs indicatifs (au kg) des principaux matériaux industriels (u.a. = unité arbitraire).

## 3.1) Métaux

Les métaux possèdent une structure cristalline qui influence sur leur comportement.

**Alliage** : métal obtenu par ajout d'atome d'autres métaux sur un métal de base.

Les métaux comprennent deux grandes familles : les **métaux ferreux** (aciers, fontes et leurs alliages) et les **métaux non-ferreux**.

### 3.1.1) Aciers non alliés (« aciers au carbone »)

Acier avec très peu d'éléments d'alliage (< 0,6% sauf 1,65% pour le manganèse Mn).

#### a) Aciers non alliés d'usage général (E ou S ...)

Caractérisés par une faible teneur en carbone, ce sont les plus utilisés. La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux dimensions normalisées.

#### Désignation normalisée :

Lettre (S, E ...) suivie de la limite élastique à la traction  $R_e$  en MPa (valeur minimale).

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre G.

Exemples : S 185 ; E 295 ; GE 335 ; GS 235 ; ...

**Propriétés** : tenaces, ductiles, moulables, soudables.

**Applications** (constructions soudées, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage...) : carrosseries, profilés pour le bâtiment, construction navale, plate-forme pétrolière, trains, chaudronnerie, ameublement, électroménager, biens de consommation...

#### b) Aciers spéciaux, non alliés (C)

Destinés aux traitements thermiques (trempe, cémentation) des pièces petites ou moyennes, ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition et une plus grande pureté.

### 3.1.2) Aciers faiblement alliés, pour haute résistance

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse. Ils sont choisis chaque fois qu'une haute résistance est exigée. Ils peuvent être utilisés en l'état ou avec traitement.

### 3.1.3) Aciers fortement alliés (X)

Ils sont destinés à des usages particuliers (inoxydable...). Pour ces aciers au moins un élément d'addition dépasse la teneur de 5 % en masse.

#### Aciers inoxydables :

Famille très importante, caractérisée par une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud, au fluage. Leur teneur en chrome est supérieure à 10,5 % et leur teneur en carbone inférieure à 1,2 %. Les aciers inoxydables sont subdivisés suivant leur teneur en nickel.

Propriétés : Ductiles, résilients, soudables et usinables sous conditions.  $R_e < 700$  MPa ;  $R_m < 1\ 000$  MPa.

#### Autres familles d'aciers fortement alliés :

- aciers à outil : aciers rapides - désignations « HS » ;
- aciers réfractaires ; pour hautes températures ;
- aciers pour roulements ; etc...

### 3.1.4) Fontes

Rappel : une fonte est un alliage dont le métal le plus important en masse est le fer, et dont le pourcentage massique de carbone varie entre 1,7 % et 6,67 %.

Leur grande coulabilité permet d'obtenir des pièces de fonderie aux formes complexes (température de fusion inférieure à l'acier). Les fontes ont en général de grandes capacités d'amortissement des vibrations. A cause du pourcentage élevé de carbone qu'elles contiennent (généralement entre 2 et 4 %), elles sont en général assez fragiles, peu ductiles (donc inadaptées aux déformations à froid : forgeage, laminage...) et difficilement soudables.

Applications (fonte à graphite lamellaire) : bâtis de machine, supports, carters, blocs-moteur...

Applications (fonte à graphite sphéroïdale) : vilebrequins, arbres de transmission, tuyauteries...

#### Désignation normalisée :

Préfixe EN, suivi de « GJ » (pour « fonte ») puis d'une ou deux lettres désignant la famille de fonte (L, S, MW, MB, V, N ou Y), suivis de la résistance à la rupture par traction minimale (en MPa) et de l'allongement A%. Exemple : EN-GJS-400-18.

### 3.1.5) Aluminium et alliages

Fabriqués industriellement depuis 1886, à partir des bauxites et de la cryolithe, ces métaux sont les plus utilisés, juste après les métaux ferreux (aciers et fontes).

#### Désignation normalisée :

Préfixe « EN A\_- », suivi d'un nombre (de plusieurs chiffres normalisés), éventuellement suivis par le symbole chimique de l'alliage placé entre crochets.

#### Principalement caractéristiques :

- Bas point de fusion (658 °C) ; ductilité élevée (A%  $\approx$  40 %) ; léger (densité 2,7) ; bonne conductivité électrique ; bonne conductibilité thermique (5 fois celle des aciers) ; coefficient de dilatation thermique 1,5 fois celui des aciers ; propriétés réfléchissantes.
- Bon rapport résistance/poids, ce qui explique les nombreuses applications dans le domaine des transports, comme l'aéronautique.
- Résistance à la corrosion élevée. Le métal se couvre, au contact de l'air, d'une couche d'oxyde protectrice (l'alumine), les éléments d'addition diminuent plus ou moins cette résistance.
- Résistance mécanique : elle peut être modifiée par écrouissage ou par recuit (adoucissement).
- Inconvénients : faibles résistances à l'usure et à la fatigue.

#### Mise en œuvre :

Elle est assez facile par un grand nombre de procédés : laminage, moulage, forgeage, formage, étirage, extrusion, métallurgie des poudres...

La soudabilité dépend de la trempe et du revenu pratiqués sur l'alliage.

### 3.1.6) Cuivre et alliages

Il existe plus de 200 alliages de cuivre. Les principales familles sont : les **laitons** (Cu + Zn), les **bronzes** (Cu + Sn), les cupronickels (Cu + Ni), les cupro-aluminiums (Cu + Al) et les maillechorts (Cu + Ni + Zn).

#### Principales caractéristiques du cuivre :

Plus lourd que l'acier (densité 8,9) ; fond à 1 083 °C ; grande résistance à la corrosion ; plasticité ou ductilité élevée (A% jusqu'à 50 %) ; grande conductivité électrique qui le rend indispensable dans les industries électriques et électroniques ; grande conductibilité thermique ; couleur rouge plus ou moins foncée, tendant vers le jaune avec addition de zinc ; qualités frottantes pour le bronze (coefficient de frottement avec l'acier relativement faible).

### 3.1.7) Magnésium et alliages

Principales caractéristiques des alliages de magnésium :

Léger (densité 1,8) ; rapport résistance/poids élevé et grande capacité d'amortissement (réduit les bruits et les vibrations).

Les alliages résistent à la corrosion atmosphérique, peu aux acides, bien aux bases, alcalins et solvants et ne résistent pas en eau de mer. Ils sont facilement usinables, moulables, forgeables, soudables et rivetables.

### 3.1.8) Zinc et alliages

**Principales caractéristiques :** assez lourd (densité 7,1) ; basse température de fusion (420 °C) et bonne résistance à la corrosion.

La mise en œuvre des alliages est facile en fonderie (basse température de fusion et retrait très faible). Il est possible de réaliser des pièces robustes à parois minces très complexes avec des tolérances serrées (0,01 à 0,1 mm), sans reprise d'usinage et sous des cadences très élevées (moulage en coquille sous pression des zamaks). Nombreux traitements de surface possibles.

### 3.1.9) Titane et alliages

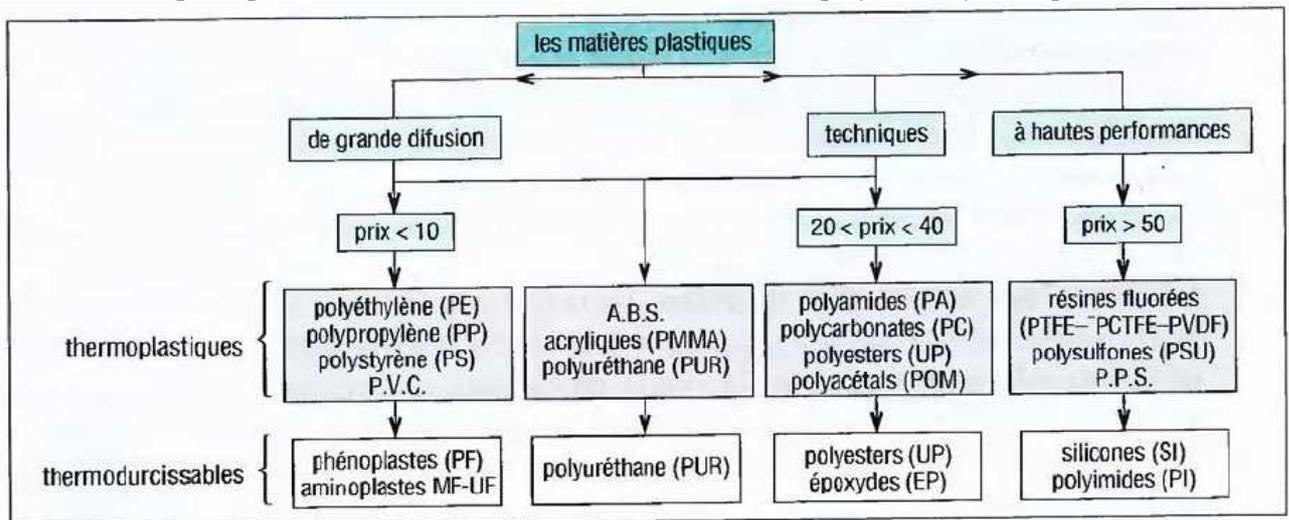
Les alliages de titane sont légers, réfractaires (ils résistent à la chaleur), résistant à la corrosion, à l'usure, à la fatigue et au feu. De plus ils ont une bonne résistance mécanique.

Sa biocompatibilité fait qu'il est utilisé dans le corps humain, en biomécanique.

Il est aussi utilisé en aérospatiale et dans des articles de sport (léger et résistant).

## 3.2) Matières plastiques et élastomères

Les matières plastiques et les élastomères constituent la famille des polymères synthétiques.



1. Principales matières plastiques.

#### a) Propriétés générales

Faible densité (de 0,9 à 2,2), bonnes qualités d'isolation électrique et thermique, bonne résistance à un grand nombre de produits chimiques, pas d'oxydation, rapport volume/prix relativement faible.

Inconvénients : parfois inflammables ; sensibles aux rayons ultra violets ; non facilement recyclables.

La résistance en compression est souvent plus élevée que la résistance en traction (tout comme le béton). Sous charge, les plastiques se déforment instantanément dans un premier temps, comme un ressort (ou comme un métal), puis, contrairement au ressort (ou au métal), continuent à se déformer progressivement au cours du temps (« déformation retardée »). C'est le **fluage**.

**b) Thermoplastiques**

C'est de loin la famille la plus utilisée. Ils sont moins fragiles, plus faciles à fabriquer (machine à injecter et cadences élevées) et permettent des formes plus complexes que les thermodurcissables.

Ils existent sous forme rigide ou souple, compact ou en faible épaisseur, sous forme de feuille très mince (film...), de revêtement, expansé ou allégé...

**Propriétés principales :**

Ils ramollissent et se déforment sous l'action de la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et remodelés un grand nombre de fois tout en conservant leurs propriétés.

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

Inconvénients : fluage élevé ; coefficient de dilatation linéaire élevé, entraînant un retrait important au moment du moulage ; combustible (sauf thermoplastiques haute performance, comme les PTFE) ; sensible aux UV ; électrostatique.

**c) Thermodurcissables**

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créés il n'est plus possible de les remodeler par chauffage.

Au moment de la mise en œuvre, ils ramollissent dans un premier temps, puis durcissent de manière irréversible sous l'action prolongée de la chaleur (comparable à la cuisson du blanc d'œuf).

Propriétés mécaniques : Ils présentent une bonne tenue aux températures élevées ( $> 200\text{ °C}$ ), aux attaques chimiques, une meilleure résistance au fluage que les thermoplastiques, une bonne rigidité pour un prix de matière première peu élevé et faible retrait au moulage.

Inconvénients : mise en œuvre moins pratique et plus lente que les thermoplastiques ; non recyclables.

**d) Élastomères ou caoutchoucs**

Ils sont obtenus par synthèse chimique, comme les plastiques, et possèdent des propriétés comparables à celles du caoutchouc naturel.

La propriété la plus remarquable est l'élasticité ou la capacité à s'allonger sans se rompre ( $A\%$  très élevé, jusqu'à  $1\ 000\ \%$ ). Le module d'élasticité longitudinal  $E$  est très faible ( $< 10\ \text{MPa}$ ).

Applications : pneumatiques, courroies, tapis, tuyaux, amortisseurs, joints d'étanchéité, revêtements divers, pièces mécaniques, chaussures...

### 3.3) Céramiques

Ni métalliques, ni polymères, ce sont les matières premières les plus abondantes de la croûte terrestre. Elles sont très dures, très rigides, résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion. Leur principal inconvénient est la fragilité.

Fabrication : elle comprend en général une mise en forme (pressage, moulage, extrusion...) suivie par un traitement thermique (cuisson ou frittage).

#### a) Céramiques traditionnelles

Elles regroupent les ciments, les plâtres, les produits à base d'argile (terres cuites, faïence, porcelaine, grès cérame...) et les produits à base de silice (verre, cristal...).

Céramiques traditionnelles					
nuances		matières premières		exemples d'emploi	
produits poreux	terre-cuite	marnes, argiles		tuiles, briques, horticulture, art	
	faïence	argile, silice, quartz		vaisselle, carrelage (mur), art	
	produits grésés	argile, kaolin, feldspath		carrelage (sol)	
	réfractaires	argile réfractaire, silice, chamotte, alumine, magnésie, carbone-graphite...		ciment, béton brique pour four produits frittés	
produits vitrifiés	grès cérame	argile, chamotte, silice		éviers, lavabos, baignoires	
	vitréous	argile, kaolin, feldspath, silice			
	porcelaine	kaolin, argile, feldspath, quartz		vaisselle, art, génie électrique	
verres		silice alumine oxydes chaux magnésie	sodico-calcique	vitres, flacons, ampoules	
			crystal (oxyde de plomb)	vaisselle, art, optique	
			borosilicate	résistant aux chocs thermiques	
			aluminosilicate	résistance à la chaleur	
			spéciaux	optique, laser, fibre optique	
abrasifs		oxydes, carbures, diamant		meules, papiers abrasifs	

#### b) Céramiques techniques

Plus récentes, elles sont soit fonctionnelles, à « usage électrique », soit structurales, à usage mécanique ou thermomécanique.

Utilisations : fibres optiques (silicium), mémoires magnétiques (ferrites), outils de coupe (carbures), abrasifs, isolants, écrans thermiques, joints d'étanchéité, laser, prothèses osseuses...

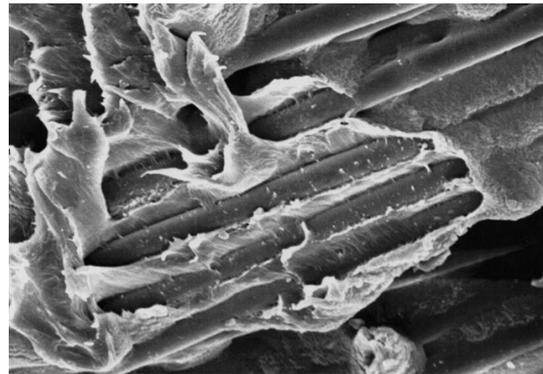
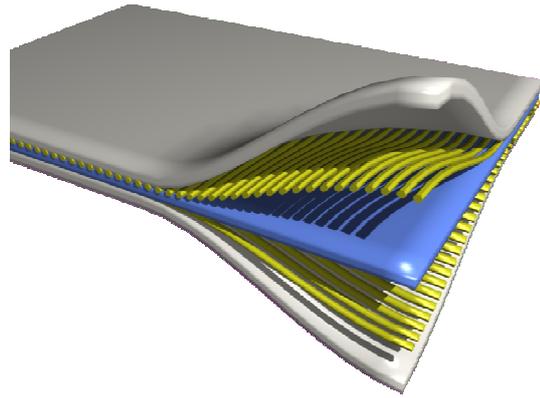
### 3.4) Matériaux composites

Ils sont composés d'un matériau de base (matrice ou liant : polymère, céramique ou métal) renforcés par des fibres, ou agrégats, d'un autre matériau afin de combiner au mieux les avantages des deux. Les deux corps, de structure différente, ne se mélangent pas (structure hétérogène) au contraire d'un alliage (structure homogène).

Exemples : béton armé (béton + armature acier) ; pneumatiques (élastomère + toile + fils d'acier) ; fibres de verre ou de carbone (cf. ci-dessous).

**Composites à matrices polymères :** en renfort, la fibre de verre, la plus économique, est la plus utilisée. La fibre de carbone, plus coûteuse, est utilisée dans des applications plus pointues : équipement sportif de haut niveau, aéronautique... Les fibres organiques comme les aramides (kevlar) sont un compromis entre les deux.

Le principal avantage d'un matériau composite à matrice polymère est sa très forte résistance mécanique et son poids faible.



### 3.5) Les nouveaux matériaux

Depuis la préhistoire, toutes les époques ont connu le développement de nouveaux matériaux, et avec eux, le développement de nouvelles technologies.

De nos jours, l'utilisation des matériaux **composites techniques**, des **céramiques techniques** et des **métaux de pointe** se développe à grande vitesse. Des nouveaux matériaux (alliages, composites...), de plus en plus performants, sont « découverts » chaque jour dans les laboratoires, et les plus performants sont exploités industriellement.

Des nouveaux matériaux, encore en phase de recherche (laboratoires), vont peut-être voir leur utilisation industrielle exploser très prochainement (ou pas). Parmi ces matériaux, citons :

- les **nanomatériaux** (modifiés à l'échelle moléculaire, et qui ont des propriétés pouvant être totalement nouvelles) : matériaux « absorbants » de pollution, etc. ;
- les **matériaux intelligents** (matériaux dont les propriétés s'adaptent à leur environnement) :
  - alliages à mémoire de forme (déformés à froid, ils retrouvent leur forme de départ au-delà d'une certaine température par suite d'un changement de phase) ;
  - matériaux piézo-électriques (produisent une tension électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte, et vice-versa) ;
  - matériaux magnétostrictifs ou électrostrictifs (se déforment sous l'action d'un champ magnétique ou électrique) ;
  - cristaux liquides ; etc...
- un **élastomère auto cicatrisant** (à température ambiante, et après avoir été coupée, cette matière élastique non collante est en effet capable de se ressouder toute seule) découvert en 2008 ;
- les **matériaux à base de matières premières secondaires** (« recyclées ») ; etc...

De plus, les nouvelles normes environnementales (**développement durable**), qui elles aussi progressent très vite, imposent de remplacer d'anciens matériaux par des matériaux réutilisables, recyclables ou biodégradables, et produits de façon écologique et éthique (cf. chapitre sur l'éco-conception et l'Analyse du Cycle de Vie, en Analyse Fonctionnelle), tout en étant aussi performants que les anciens matériaux (voire plus performants).

## 4) CHOISIR UN MATERIAU

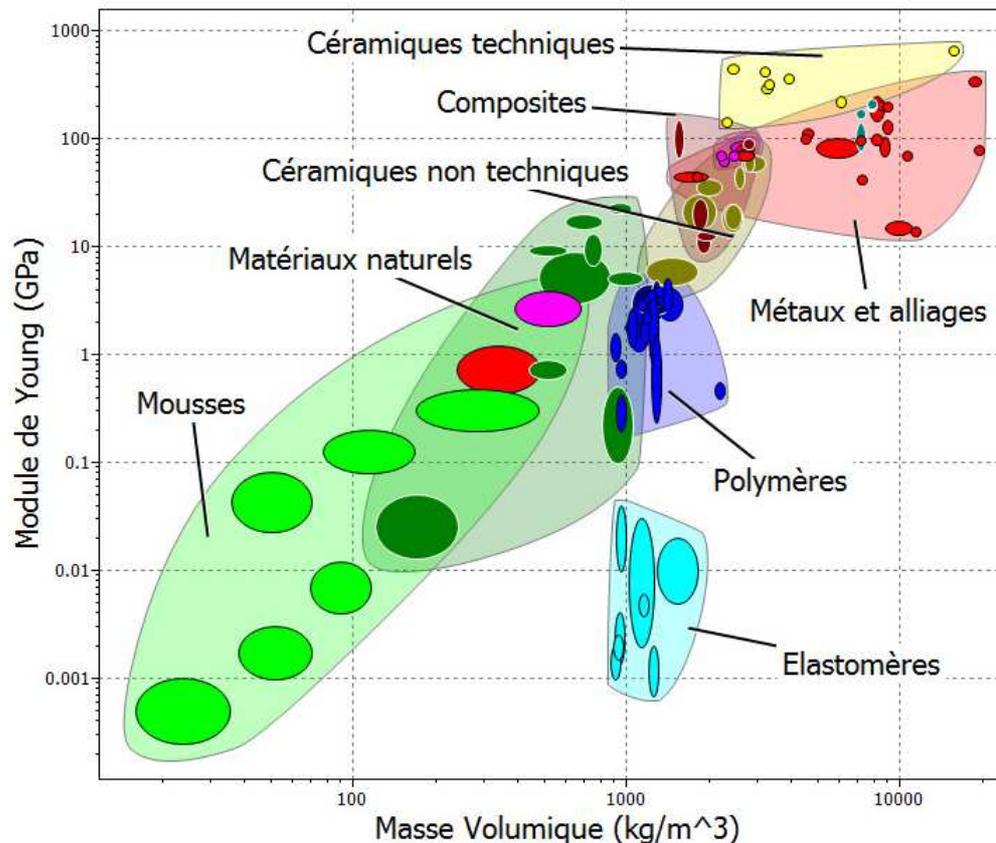
En phase de (re)conception d'un mécanisme, les ingénieurs du bureau d'études sont amenés à choisir un tryptique **produit/procédé/matériau** pour chacune des pièces qu'ils souhaitent concevoir.

En fonction de la forme globale de la pièce à obtenir, des caractéristiques qu'elle devra avoir (résistance élastique, à la rupture, à l'usure, à la corrosion, dilatation, température d'utilisation, frottements, etc...) on choisit ensemble :

- le procédé d'obtention ;
- le matériau ;
- les formes précises de la pièce (produit).

Ces trois choix sont interdépendants : on ne peut choisir l'un sans les deux autres.

Afin de choisir le matériau le plus adapté à un usage, on se base souvent sur un comparatif de leurs **indices de performance** personnalisables (dépendant de plusieurs critères combinés pouvant inclure le prix, la résistance élastique, la masse volumique, etc). Il existe des logiciels permettant de comparer facilement des familles de matériaux d'après des indices de performances, en traçant un **diagramme d'Ashby**, que vous traiterez en 2<sup>e</sup> année (cf. exemple ci-contre).



Voici ci-dessous une courte liste des principales familles de matériaux utilisés, que vous pouvez proposer si on vous demande de choisir un matériau. Dans ce cas, les formes de la pièce et le procédé d'obtention sont en général déjà choisis. Cette liste reste évidemment très simpliste, et dans la réalité, le processus de choix est extrêmement complexe, compte tenu de la très grande variété des matériaux existants.

Pièce usinée, avec de faibles contraintes mécaniques	<b>acier de construction</b>
Pièce usinée, avec des contraintes mécaniques moyennes, pouvant être trempée ou non.	<b>acier non allié</b>
Pièce usinée devant résister à des contraintes mécaniques moyennes et à la corrosion.	<b>acier inoxydable</b>
Pièce avec une dureté superficielle importante, afin de bien résister aux chocs et à l'usure (pouvant être moulée ou forgée et/ou usinées). Exemple : engrenages, arbres et axes...	<b>acier de cémentation (faiblement allié)</b> Cémentation + trempé + revenu
Pièce résistante, pour trempé superficielle (pouvant être moulée ou forgée et/ou usinées). Un peu moins résistante que les précédentes, mais un peu moins chère. Exemple : engrenages, arbres et axes, vis.	<b>acier pour trempé (faiblement allié)</b> Trempé + revenu
Pièce de frottement (de préférence sur de l'acier trempé)	<b>bronze</b>
Pièce moulée (puis usinée), résistante – type carter (amortissement des chocs et vibrations), dont le poids n'est pas un critère important	<b>fonte à graphite lamellaire (fonte grise)</b>
Pièce moulée (puis usinée), résistante, dont le poids doit être faible.	<b>Alliage d'aluminium</b>