

Matériaux

Propriétés mécaniques & essais

N. Mesnier

Lycée Jules Ferry, Versailles

2018–2019

■ Contexte

- les matériaux de structure, essentiellement utilisés pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques ;
- les matériaux fonctionnels, utilisés pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques. . .

■ Objectifs du cours

- connaître les différentes familles de matériaux ;
- connaître les différents essais mécaniques (traction, flexion, torsion, etc.) ;
- connaître des ordres de grandeurs des principales propriétés physiques ;
- connaître les différentes familles de matériaux métalliques (désignations et propriétés mécaniques).

- 1 Introduction
- 2 Propriétés mécaniques et essais
- 3 Propriétés physiques
- 4 Matériaux métalliques

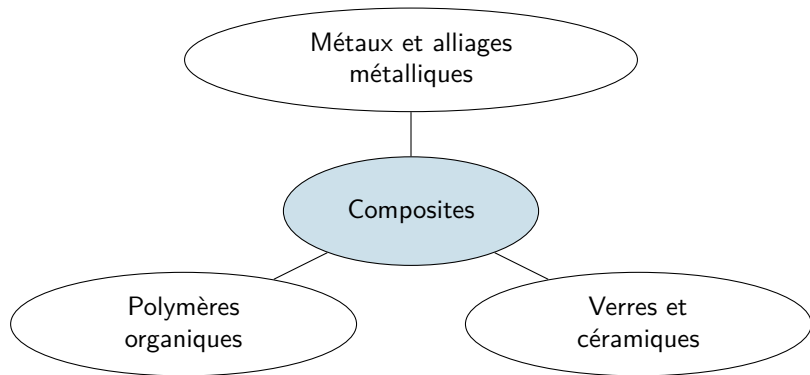
1

2

3

4

Introduction



- Métaux et alliages métalliques (liaisons métalliques)
 - les plus employés pour les applications de structure ;
 - capables de se déformer de manière permanente (ductiles) ce qui permet de réaliser des opérations de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, forge, estampage) ou d'assemblage par déformation plastique (rivetage, clinchage) ;
 - assez denses ;
 - bons conducteurs thermiques et électriques ;
 - 90 % utilisés sont ferreux (aciers et fontes) vs. non ferreux (alliages de cuivre, d'aluminium, de magnésium, de titane, etc.).

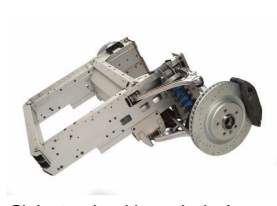
Exemples d'applications : pièces de transmission de puissance, mobilier urbain en acier galvanisé, tôles en acier, filtres, électrodes de batterie, coupe-flammes en mousse métallique, etc.

Classes de matériaux

- Métaux et alliages métalliques (liaisons métalliques)



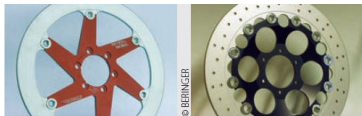
Bloc-moteur de Yamaha FZ6 Fazer en alliage d'aluminium



Châssis ultraléger de la Lotus Evora en alliage d'aluminium



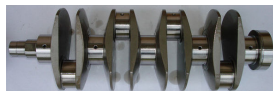
Prothèse de disque lombaire en acier allié



Disques de frein en fonte, jante en alliage d'aluminium



Paliers lisses en bronze



Vilebrequin en acier faiblement allié

- **Verres et céramiques** (liaisons ioniques)
 - matériaux les plus anciens et les plus couramment utilisés en génie civil (pierre, brique, verre) ;
 - résistants à l'abrasion mais pas aux chocs : ils sont fragiles ;
 - on peut souvent les mettre en œuvre à l'état pâteux (exemple du béton) car ils ne deviennent fragiles qu'après la prise ;
 - généralement poreux donc moins denses que les métaux et bons isolants thermique et électrique.

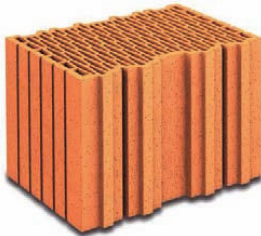
Exemples d'applications : vitres, disques de frein en carbone-céramique, outils de machine-outil en carbure de tungstène, pot catalytique en zircon, etc.

Classes de matériaux

- Verres et céramiques (liaisons ioniques)



Disque de frein en céramique, Audi S8



Brique en céramique



Rotule de prothèse de hanche en céramique

- **Polymères** (liaison covalente, de Van Der Waals ou hydrogène)
 - souvent appelés « plastiques », les polymères organiques sont de larges macromolécules que l'on peut regrouper dans trois catégories :
 - ① les thermoplastiques (recyclables et ductiles, comme les métaux) ;
 - ② les thermodurcissables ;
 - ③ les élastomères.
 - en général mauvais conducteurs thermique et électrique, mais par contre très peu denses et peuvent être mis en forme facilement.

Exemples d'applications : bouteilles d'eau en polytéraphalate d'éthylène (PET), CD en polycarbonate (PC), vêtements en polyéthylène (PE), Rilsan, Gore-tex, bouteilles de lait, canalisations en polyéthylène haute densité (PEHD), pièces mécaniques en polyamide (PA), mousses d'isolation en polyuréthane (PUR), sacs biodégradables en acide polylactique (PLA), etc.

Classes de matériaux

- Polymères (liaison covalente, de Van Der Waals ou hydrogène)



DVD en polycarbonate (PC)



Tubes en polychlorure de vinyle (PVC) extrudé



Pneu avec du caoutchouc



Palier lisse en polyamide (PA)
(famille Nylon, Rilsan, Kevlar)



Roulette de chariot en polyuréthane (PUR)



Triple décimètre en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) « Plexiglas »

Classes de matériaux

- Polymères (liaison covalente, de Van Der Waals ou hydrogène)



Pièces en polytétrafluoroéthylène (PTFE)



Pièces en polystyrène (PS)



Carter en acrylonitrile butadiène styrène (ABS)



Roue dentée en polyoxyméthylène (POM)



Bouteilles en polytéréphthalate d'éthylène (PET)



Bacs en polypropylène (PP)

● Interactions électroniques

- les liaisons ioniques ou covalentes sont très fortes ;
- les liaisons métalliques sont fortes ;
- les liaisons de Van der Waals et hydrogène sont faibles.

Plus une liaison est forte, plus :

- le matériau a tendance à cristalliser ;
- la densité est élevée ;
- la température de fusion est élevée ;
- la rigidité est élevée.

● Matériaux composites

- au moins constitués de deux matériaux distincts séparables mécaniquement ;
- l'un sous forme de fibres et l'autre sous forme de matrice – permettant de lier les fibres – de sorte que le nouveau matériau acquiert des propriétés supérieures à celles des seuls constituants ;
- permettent d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes ;
- les matériaux composites à hautes performances, fréquemment employés pour des applications de structure exigeantes, sont le plus souvent constitués d'une matrice à base de polymères thermodurcissables (epoxy) et de renfort en fibres de verre, de carbone ou d'aramide (le « Kevlar » de Du Pont de Nemours).

Exemples d'applications : coques de bateaux, pales d'hélicoptères, aubes de turbine, casques de moto, skis, surfs, planches à voile, arbres de transmission, etc.

- Critères de choix :
 - formes et dimensions des pièces à obtenir
enveloppes minces, symétries, etc.
 - propriétés mécaniques
résistance en traction, en flexion, aux chocs, dureté, etc.
 - mise en forme
moulage, usinage, soudage, ...
 - propriétés physiques
électriques, thermiques, magnétiques, optiques, densité, etc.
 - propriétés chimiques
résistance à la corrosion, revêtements, aptitude au collage, etc.
 - **économique !**

- Indice de performance

$$I = \prod_i (C_i)^{\alpha_i}$$

- C_i : caractéristique (densité, rigidité, etc.)
- α_i : importance de la caractéristique ($\alpha_i > 0$ si à maximiser) ;

Exemple (Critères mécaniques de choix des matériaux)

| Condition fonctionnelle | Traduction physique | Critère |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------|
| Être léger | Masse volumique ρ faible | ρ^{-1} |
| Être rigide | Module de Young élevé | E |
| Être rigide et léger | – | $E \cdot \rho^{-1}$ |
| Résister aux efforts | Résistance élastique élevée | R_e |
| Résister aux chocs | Ductilité élevée | K |

- Sélection de matériaux dans une base de données
Par exemple avec CES de Ashby (univ. Cambridge, UK).



Propriétés mécaniques et essais

- Objectifs des essais mécaniques

- déterminer les propriétés mécaniques des matériaux ;
- établir une loi de comportement :

$$\sigma = f(\varepsilon)$$

- σ : contrainte (homogène à une pression) ;
- ε : déformation (allongement unitaire adimensionnel).

- En pratique

- on recherche des lois simples ;
- qui ne dépendent pas des propriétés des pièces utilisées pour les essais ;

⇒ Essais normalisés

- Types d'essais

- essais destructifs ;
- essais non destructifs (ou contrôle non destructif – CND)
caractériser l'état des structures sans les dégrader (maintenance)

- Directions de sollicitation

- sollicitation uniaxiale :
 - essai de traction ;
 - essai de compression ;
 - essai de flexion ;
 - essai de torsion ;
- sollicitation multiaxiales (par exemple traction-torsion).

- Normes

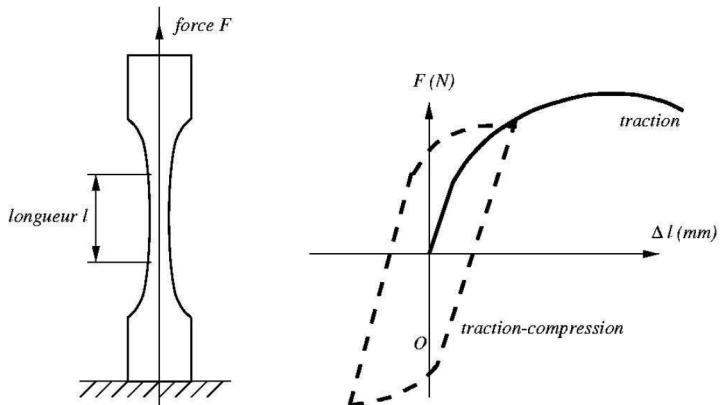
- la forme de la pièce d'essai dont on teste le matériau

éprouvette normalisée

- la façon dont doivent être exercés les actions mécaniques sur l'éprouvette

essai normalisé

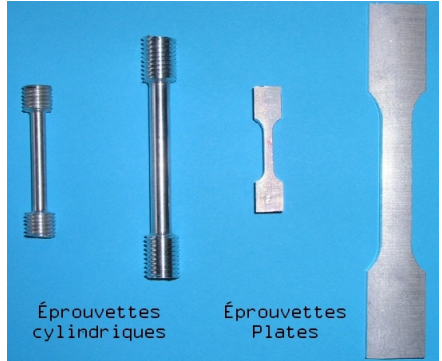
Essai de traction-compression



Essai de traction-compression



Machines de traction



Éprouvettes
cylindriques

Éprouvettes
Plates

▶ Acier XC18

▶ Alu 6061

▶ Acier rapide

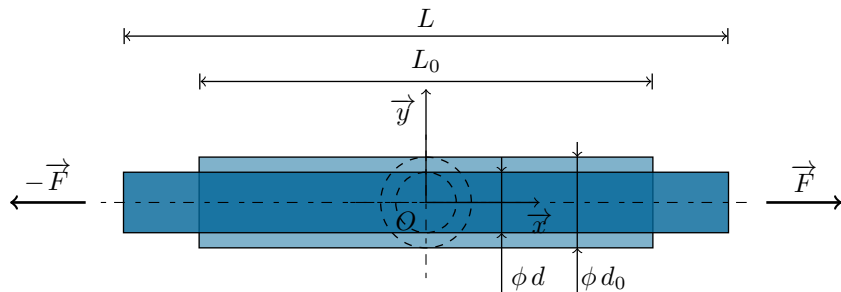
▶ PC

Rupture

▶ alu

▶ acier

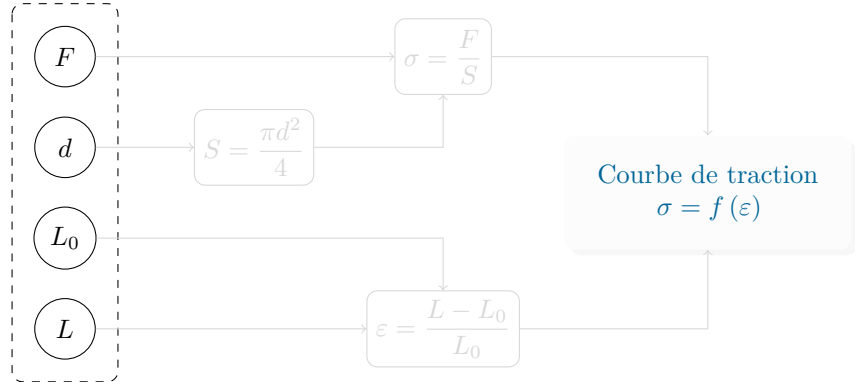
- Courbe rationnelle déformation-contrainte



- Déformation : $\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$
- Contrainte : $\sigma = \frac{F}{S}$ avec $S = \frac{\pi d^2}{4}$.

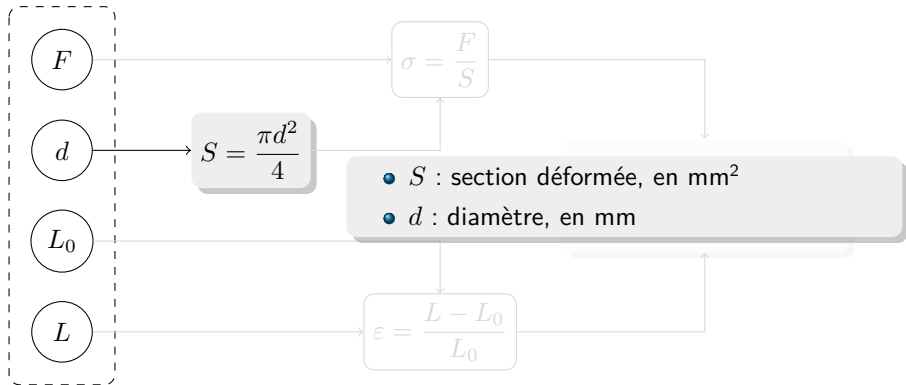
Essai de traction

MESURES



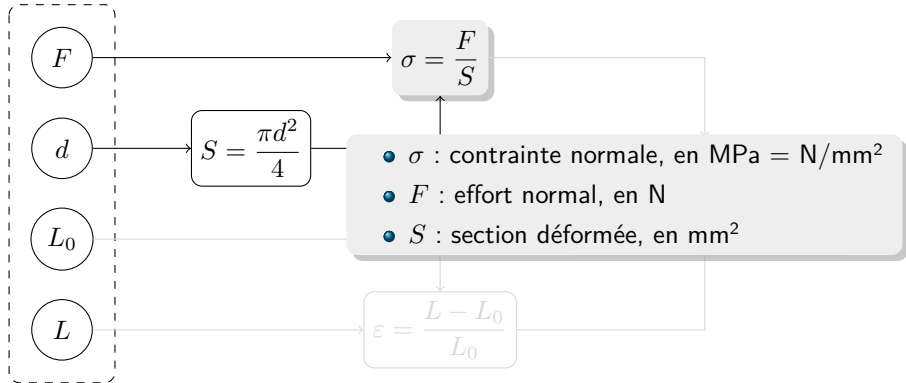
Essai de traction

MESURES

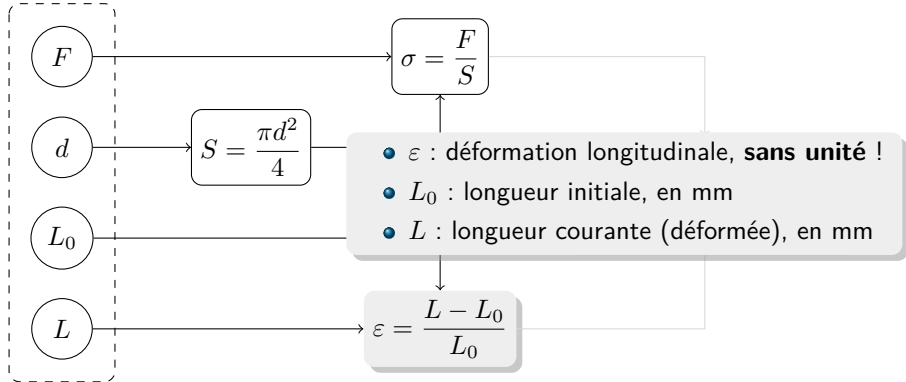


Essai de traction

MESURES

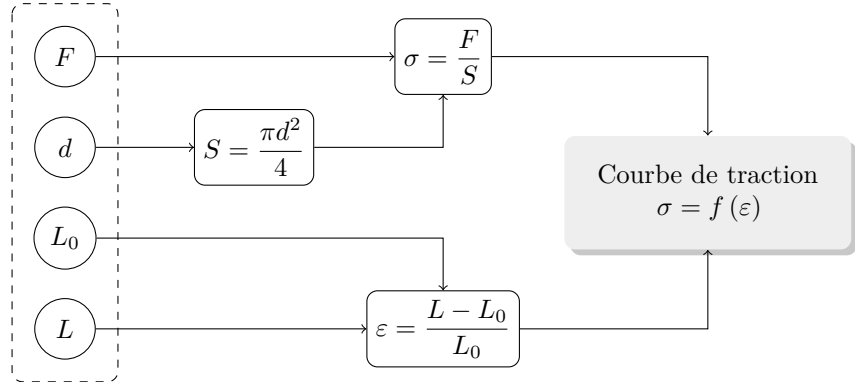


MESURES

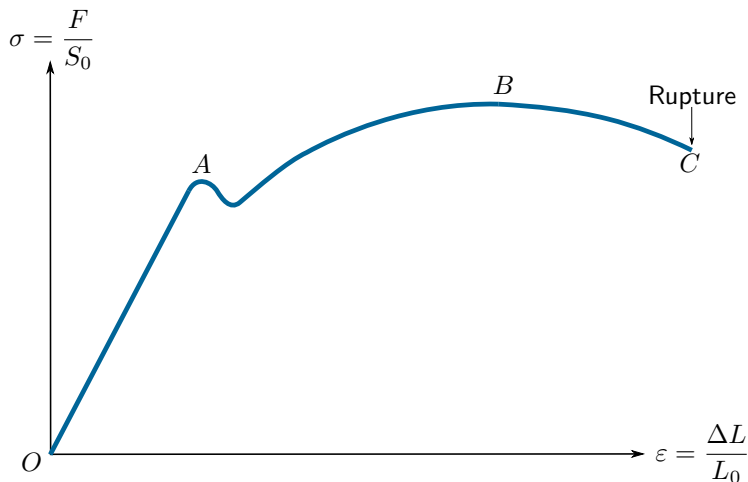


Essai de traction

MESURES

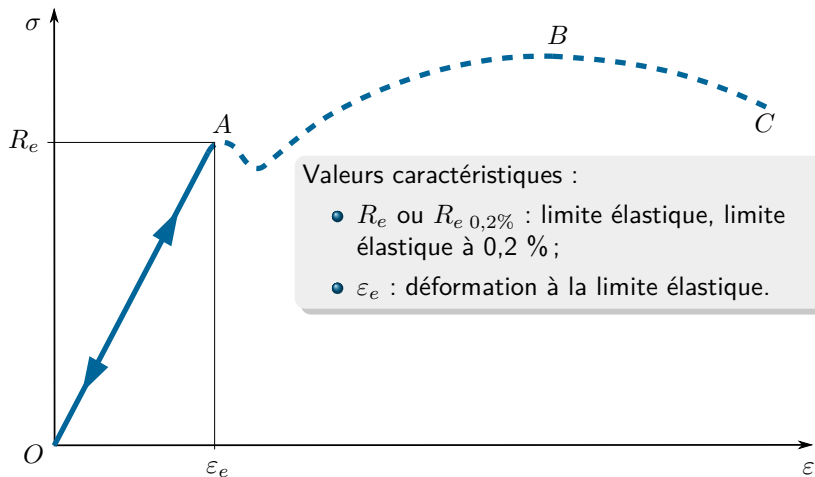


Courbe de traction



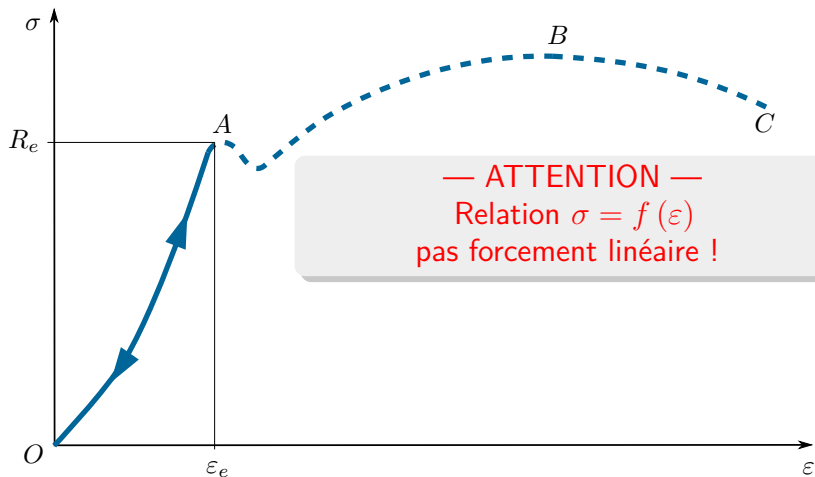
Analyse de la courbe de traction

■ Zone de déformation élastique (réversible)



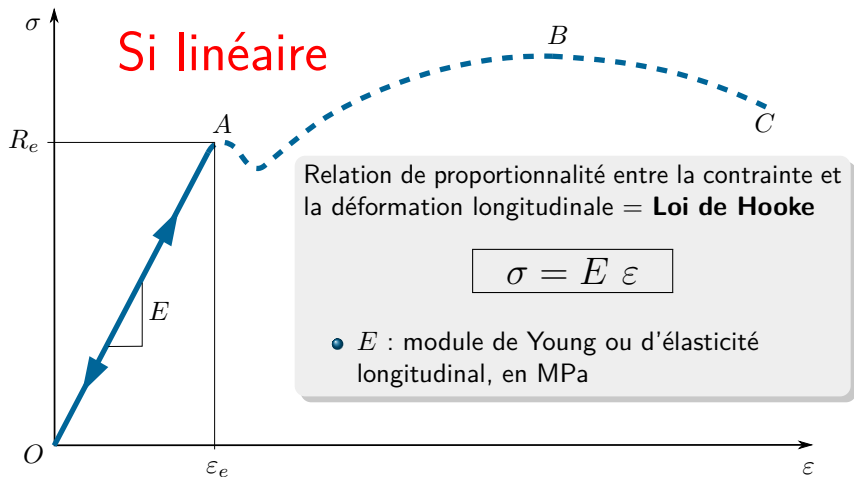
Analyse de la courbe de traction

■ Zone de déformation élastique (réversible)



Analyse de la courbe de traction

■ Zone de déformation élastique (réversible)



Relation de proportionnalité entre la déformation longitudinale et la déformation transverse :

$$\varepsilon_r = \frac{d - d_0}{d_0}$$

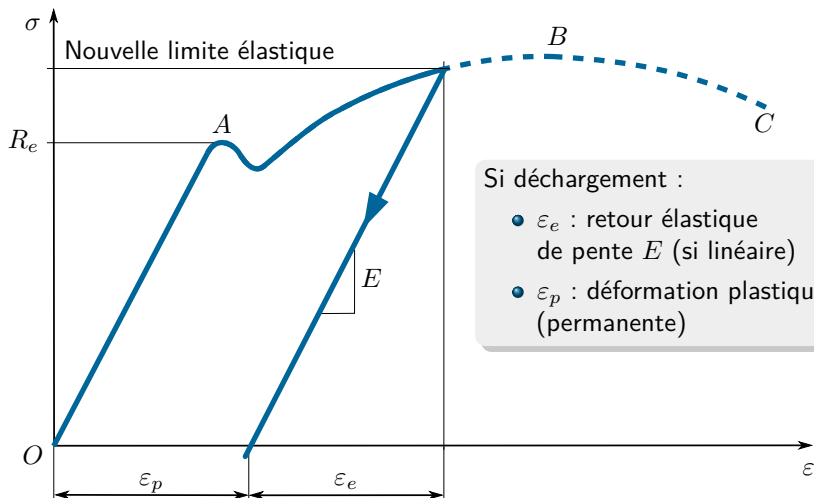
■ Coefficient de Poisson

$$\nu = \frac{-\varepsilon_r}{\varepsilon_l} = -\frac{d - d_0}{d_0} \times \frac{L_0}{L - L_0} \in [-1; 0,5]$$

- $\nu \in [0,2; 0,3]$: métaux ;
- $\nu = 0,5$: matériau incompressible ;
- $\nu < 0$: matériau auxétique (mousses)
augmentation du diamètre de la barre lorsqu'elle est étirée

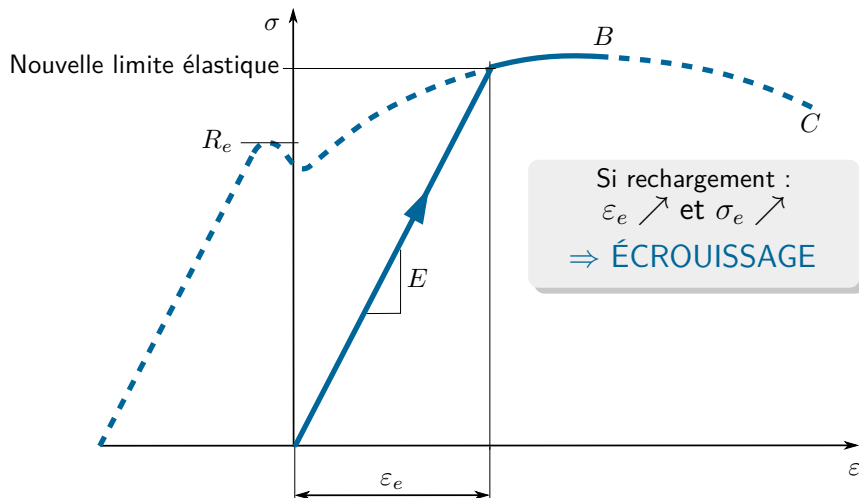
Analyse de la courbe de traction

■ Zone de déformation plastique (irréversible)



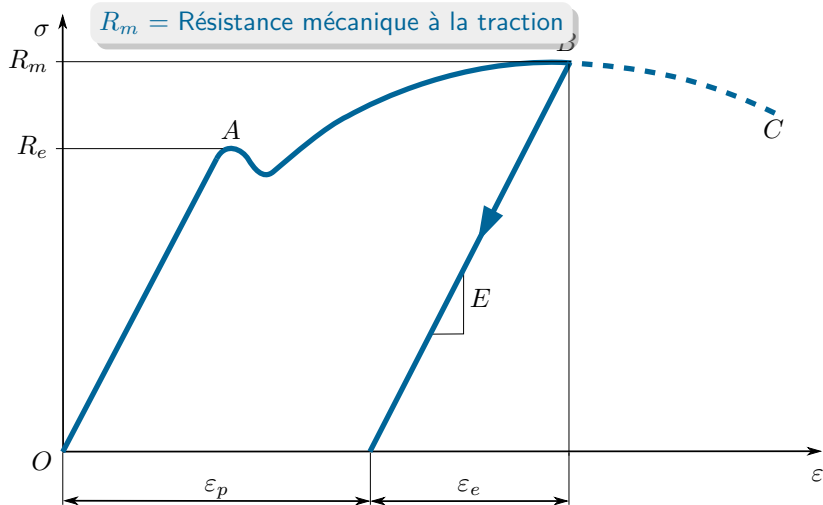
Analyse de la courbe de traction

■ Zone de déformation plastique (irréversible)



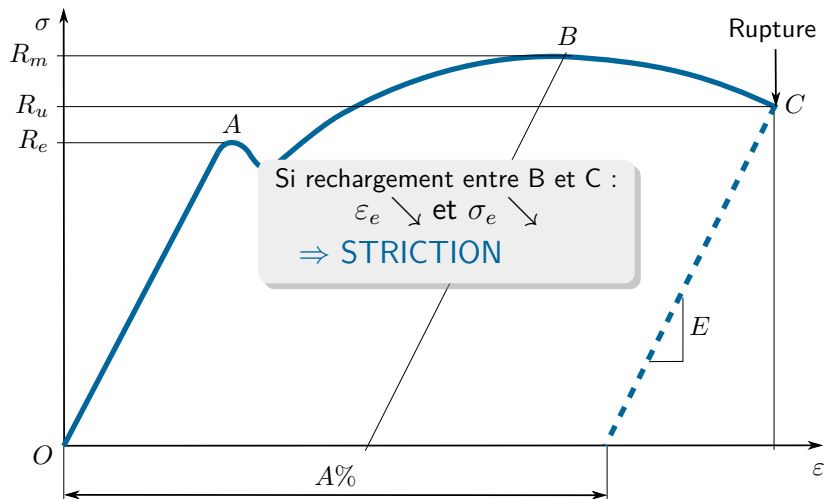
Analyse de la courbe de traction

- Zone de déformation plastique (irréversible)



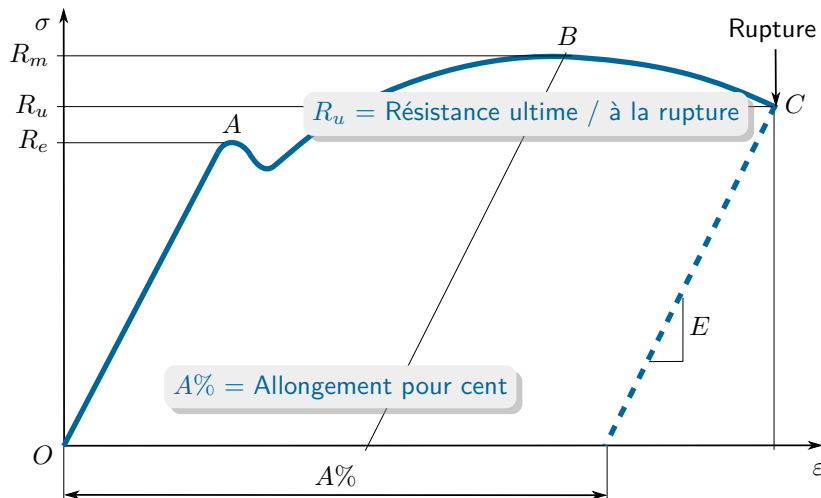
Analyse de la courbe de traction

■ Zone de déformation plastique (irréversible)



Analyse de la courbe de traction

■ Zone de déformation plastique (irréversible)



Ce qu'il faut retenir :

■ Zone de déformation élastique

⇒ Déformation **réversible**

- Limite du domaine par R_e ou $R_{e\ 0,2}$ ($\varepsilon_2 < 0,2\%$)
- Allure de la courbe : linéaire, hystérésis ?
- Si linéaire, loi de Hooke $\sigma = E \varepsilon$

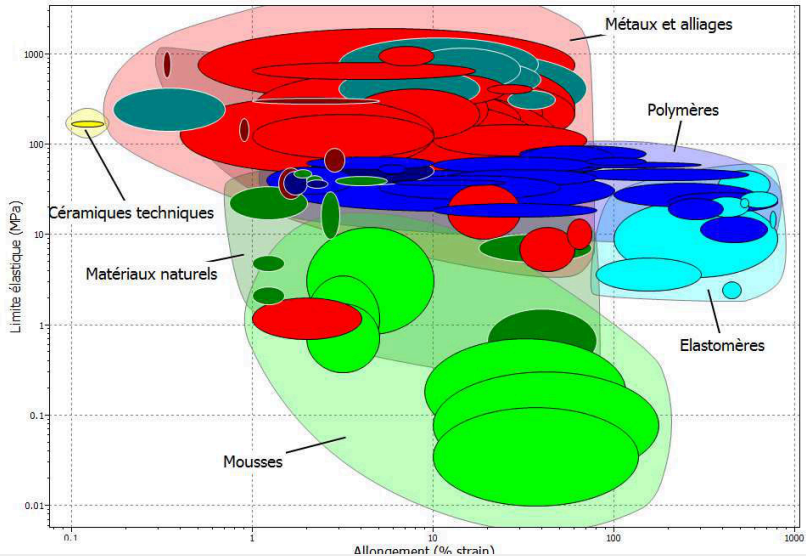
■ Zone de déformation plastique

⇒ Déformation **irréversible**

- 1 Écrouissage ($\varepsilon_e \nearrow$ et $\sigma_e \nearrow$) \longrightarrow Résistance maximale R_m
- 2 Striction ($\varepsilon_e \searrow$ et $\sigma_e \searrow$)
- 3 Rupture : Résistance à la rupture R_u et Allongement maximal $A\%$

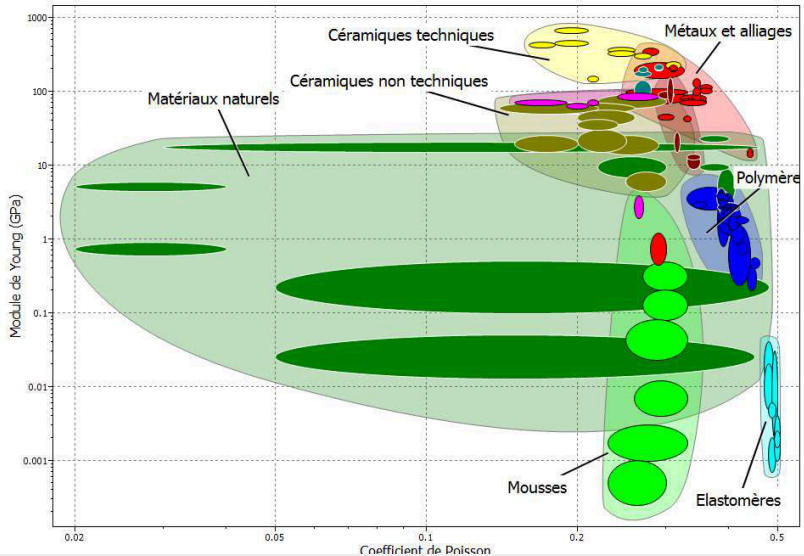
Différentes familles de matériaux

Limites élastiques en fonction des allongements relatifs



Différentes familles de matériaux

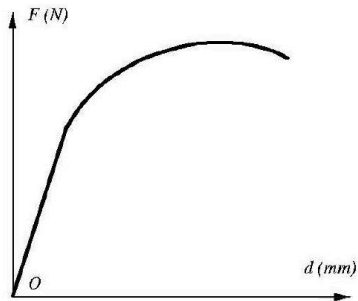
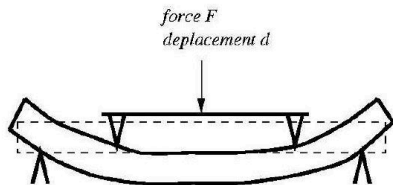
Module de Young en fonction du coefficient de poisson



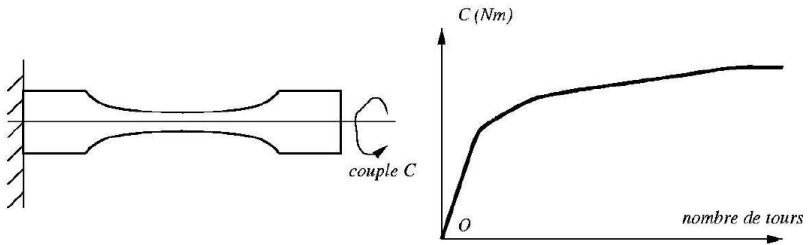
Propriétés mécaniques

| Matériau | R_e (MPa) | R_m (MPa) | E (GPa) | A (%) |
|-----------------------|-------------|-------------|-----------|---------|
| Diamant | 50 000 | – | 1 000 | 0 |
| Alumine | 5 000 | – | 390 | 0 |
| Acier | 200–1200 | 300–1800 | 210 | 10–20 |
| Fontes | 100–450 | 400–900 | 170 | 0,8–15 |
| Cuivre et alliages | 60–500 | 150–650 | 120 | 3–30 |
| Aluminium et alliages | 30–530 | 20-470 | 70 | 0,5–35 |
| Polystyrène | 34-70 | 40-70 | 3 | 5–75 |
| Caoutchouc | – | 30 | 0,01–0,1 | 500 |

Essai de flexion

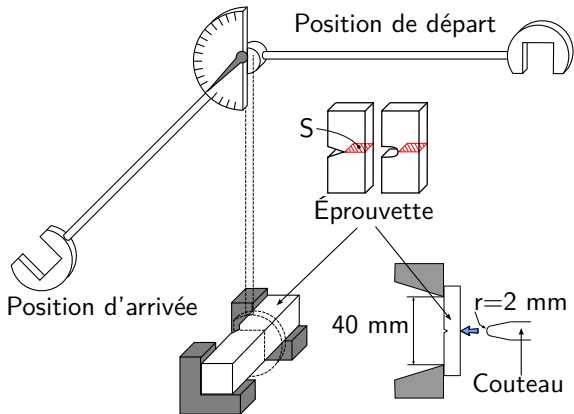


Essai de torsion



Essai de résilience

■ Mouton de Charpy



Mesurer la résistance aux chocs des matériaux = **ténacité**

▶ vidéo

- Éprouvette entaillée

- en « V » de 2 mm (type A norme ASTM);
- en « U » (type C norme ASTM).

- Résilience

- proportionnelle à l'énergie absorbée $Mg(h - h_0)$;
- définie comme

$$K = \frac{Mg(h_0 - h)}{S}$$

avec S l'aire de la section rompue (en m^2);

- s'exprime en J/m^2 ou en daJ/cm^2 ;
- notée K_u si entaille en U ou K_v entaille en V;
- K élevé \iff matériau ductile
acier haute résistance (HR) : $K = 600 \text{ kJ/m}^2$
- K faible \iff matériau fragile
verre : $K = 0,1 \text{ kJ/m}^2$

● Principe

- indentation de la surface d'une pièce ;
- dimensions de la marque proportionnelle à la rigidité.

● Types d'essais

- essai de dureté Brinell (HB – bille) ;
- essai de dureté Vickers (HV – pyramide) ;
- essai de dureté Rockwell (HR – cône HRC ou bille HRB).

| Matériau | HB | HV | HRC |
|----------|--------|-----|-----|
| Diamant | 10 000 | – | – |
| Verre | 450 | 500 | 50 |
| Bronze | 140 | 90 | – |
| Plomb | 5 | 50 | – |

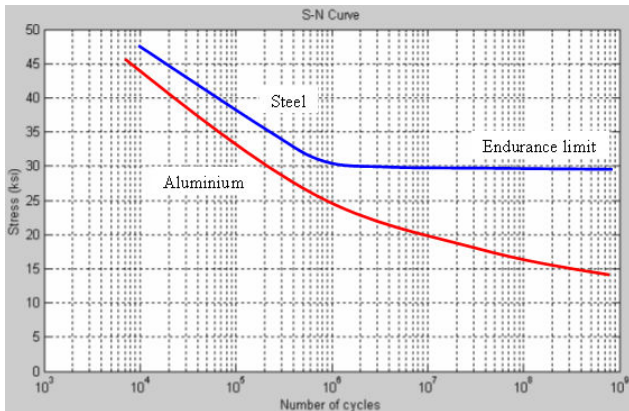
▶ essai Brinell

▶ essai Rockwell

Essai de fatigue

- Principe

- solliciter cycliquement une pièce jusqu'à sa rupture *avec une valeur moyenne nulle* [▶ vidéo](#)
- analyser les résultats avec un diagramme de Wöhler





Propriétés physiques

■ Masse volumique

| Matériau | ρ (kg/dm ³) |
|---|------------------------------|
| Caoutchouc | 0,9 |
| Nylon | 1,1 |
| PRFV | 1,4 – 2,2 |
| Béton | 2,5 |
| Verre | 2,5 |
| Aluminium | 2,7 |
| Alumine (Al ₂ O ₃) | 3,9 |
| Titane | 4,5 |
| Fonte | 5,9 – 7,8 |
| Acier | 7,8 |
| Cuivre | 8,9 |
| Platine | 21,4 |

■ Coefficient de dilatation thermique

Dilatation proportionnelle à la température :

$$\varepsilon = \alpha \Delta T, \quad \varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

| Matériau | α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) |
|------------|---|
| Caoutchouc | 600 |
| PTFE | 100 |
| Aluminium | 24 |
| Cuivre | 17 |
| Acier | 12 |
| Fonte | 10 – 18 |
| Verre | 8,5 |
| Diamant | 1,2 |

■ Température de fusion

| Matériau | T_f (°C) |
|---|------------|
| Carbure de silicium (SiC) | 3100 |
| Alumine (Al ₂ O ₃) | 2300 |
| Acier | 1500 |
| Fonte | 1400 |
| Cuivre | 1300 |
| Verre | 1000 |
| Aluminium | 600 |
| PTFE | 327 |

■ Ordres de grandeurs (à retenir)

| Matériau | ρ (kg·dm ⁻³) | T_f (°C) | α (10 ⁻⁶ /°C) |
|--------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|
| Acier | 7,8 – 7,85 | 1510 | 10 – 14 |
| Alliage d'Al | 2,8 | 650 | 22 |
| Bronze | 8,85 – 9,3 | 900 | 17,4 – 18,8 |
| Fonte | 6,8 – 7,8 | 1100 – 1300 | 5 – 15 |
| Laiton | 8,3 – 8,9 | 920 | 18 – 21 |
| Nylon | 1,14 | 220 | 7 |
| Téflon | 2,2 | 300 | 18 |

Propriétés physiques à 20°C

1

2

3

4

Matériaux métalliques

Définition (Acier)

Un acier est un alliage contenant du fer (Fe) et moins de 1,8 % de carbone (C) \pm autres éléments d'addition.

Définition (Acier non allié)

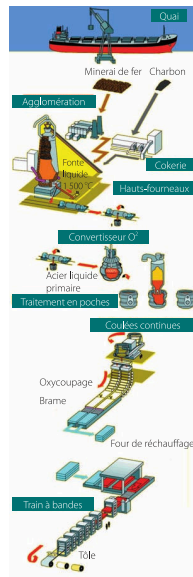
Un acier non allié est un acier contenant moins de 1 % d'éléments d'addition.

Définition (Acier faiblement allié)

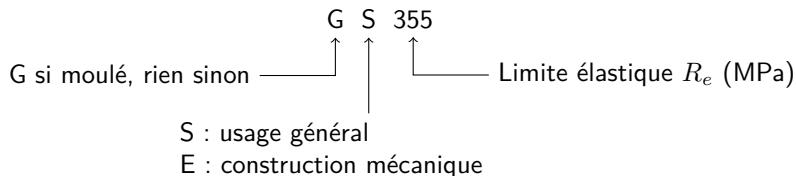
Un acier faiblement allié est un acier contenant entre 1 % et 5 % d'éléments d'addition.

Définition (Acier fortement allié)

Un acier fortement allié est un acier contenant plus de 5 % d'éléments d'addition.



■ Aciers non alliés de construction mécanique



● Caractéristiques

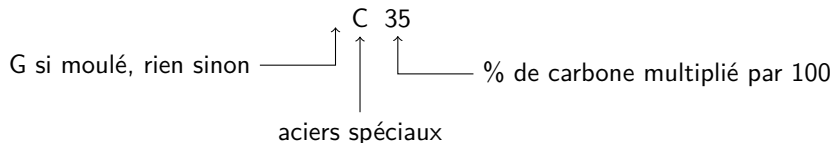
Présentation produits laminés (tôles, barres, profilés, etc.)

Mise en forme formage à froid ou à chaud, d'emboutissage, de pliage, de soudage, etc.

Utilisation structures de machines et mécanismes, les carrosseries et carters rigides, les profilés du bâtiment, la construction navale, etc.

■ Aciers non alliés pour traitements thermiques

Traitement thermique : trempe, revenu, recuit. . .



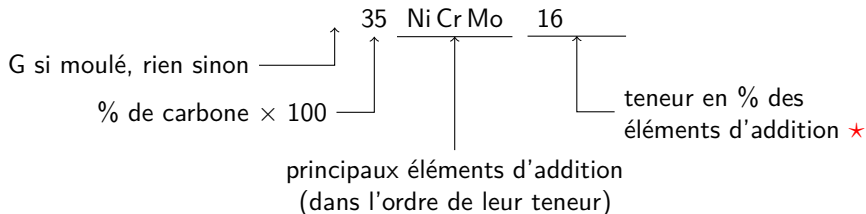
Parmi ces aciers non alliés spéciaux dits « au carbone », on distinguera :

- les aciers doux, contenant moins de 0,3 % de carbone, habituellement cémentés ou traités en surface, parfois trempés ;
- les aciers mi-durs, contenant entre 0,3 et 0,5 % de carbone, utilisés pour les arbres ou les engrenages après trempe suivie d'un revenu ;
- les aciers durs, contenant plus de 0,5 % de carbone, utilisés pour les ressorts, matrices de moule ou de presses ou des pièces forgées après avoir subies un ou plusieurs traitement thermique permettant d'obtenir une grande dureté et une bonne résistance à l'usure.

■ Exemples

| Nuance | R_e (MPa) | R_m (MPa) | A (%) | K (daJ/cm ²) |
|--------|-------------|-------------|---------|----------------------------|
| S 235 | 235 | 340 | 15 – 26 | 6 |
| E 360 | 360 | 670 | 3 – 11 | 5 |
| C 50 | 395 – 600 | 700 – 980 | 12 – 17 | – |

Aciers faiblement alliés



★ indiquée si supérieure à 1 %

Coefficients multiplicateurs de la teneur en % des éléments d'addition

| | |
|---------------|---------------------------------------|
| $\times 4$ | Cr, Co, Mn, Ni, Si, W |
| $\times 10$ | Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr |
| $\times 100$ | Ce, N, P, S |
| $\times 1000$ | B |

Aciers faiblement alliés

Exemple (35 Ni Cr Mo 16)

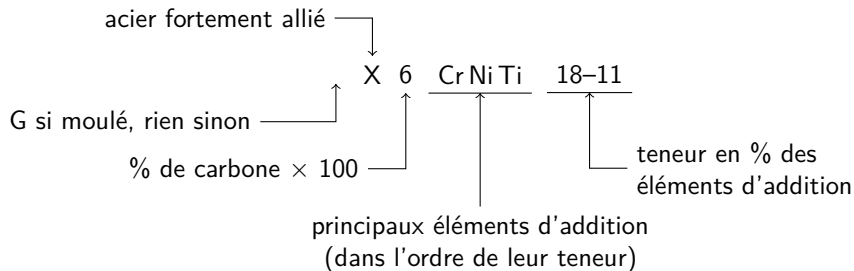
Le 35 Ni Cr Mo 16 contient 0,35 % de carbone, $16/4 = 4$ % de nickel (Ni) et des traces (teneur non indiquée donc inférieure à 1 %) de chrome (Cr) et de molybdène (Mo).

Exemple (100 Cr 6)

Le 100 Cr 6 contient 1 % de carbone, $6/4 = 1,5$ % de chrome (Cr).

| Nuance | R_e (MPa) | R_m (MPa) | A (%) | K (daJ/cm ²) |
|----------------|-------------|-------------|---------|----------------------------|
| 100 Cr 6 | 550-850 | 850-1250 | 10-13 | 4 |
| 42 Cr Mo 4 | 500 – 850 | 700 – 1200 | 11 – 15 | 6 |
| 35 Ni Cr Mo 16 | 800-1250 | 1000-1750 | 9-11 | 5 |

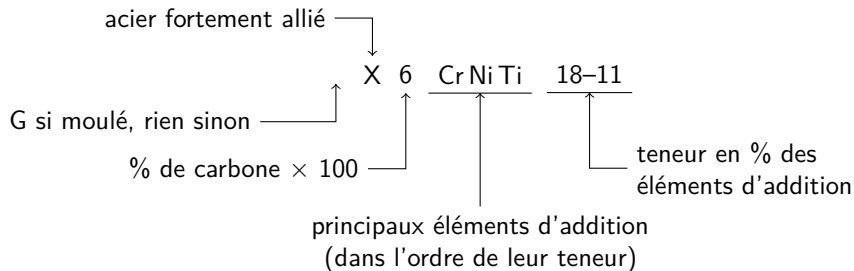
Aciers fortement alliés



Exemple (X 6 Cr Ni Ti 18-11)

Le X 6 Cr Ni Ti 18-11 est un acier fortement allié (préfixe X) qui contient 0,06 % de carbone, 18 % de chrome (Cr), 11 % de nickel (Ni) et des traces (teneur non indiquée donc inférieure à 1 %) de titane (Ti).

Aciers fortement alliés



Remarque (Acier inoxydable)

Lorsqu'un acier fortement allié contient plus de 12 % de chrome (Cr), il est dit inoxydable.

Suite à lire dans le poly de cours...



N. Mesnier, lycée Jules Ferry, Versailles