

!!!!!! ATTENTION !!!!!

Interdiction Formelle de reproduire

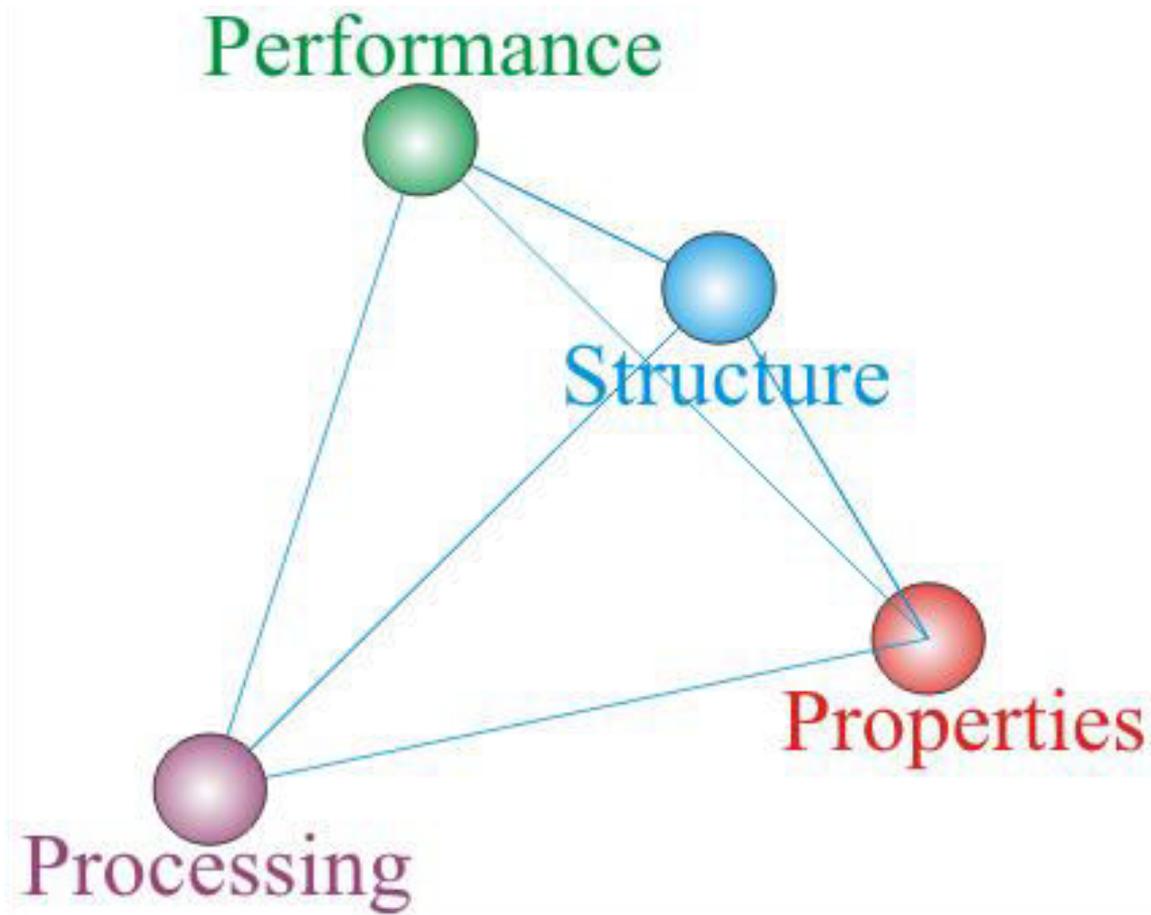
(Désolé , je n'ai pas eu le temps de mettre la bibliographie utilisée!!)

- Ce document est un support du cours que je donne et non pas un cours en lui-même.

Les classes de propriétés des matériaux.

Propriétés économiques et environnementales	Coût et disponibilité Recyclabilité Durabilité Empreinte carbone
Propriétés physiques générales	Masse volumique
Propriétés mécaniques	Module d'élasticité Limite d'élasticité, résistance à la traction Dureté Ténacité Résistance à la fatigue Résistance au fluage Pouvoir amortissant
Propriétés thermiques	Conductivité thermique Capacité calorifique spécifique Coefficient de dilatation thermique
Propriétés électriques et magnétiques	Résistivité Constante diélectrique Perméabilité magnétique
Interaction avec l'environnement	Oxydation Corrosion Usure
Aptitude à la mise en œuvre	Facilité de mise en forme Assemblage Finition
Propriétés esthétiques	Couleur Texture Toucher

The Materials Tetrahedron



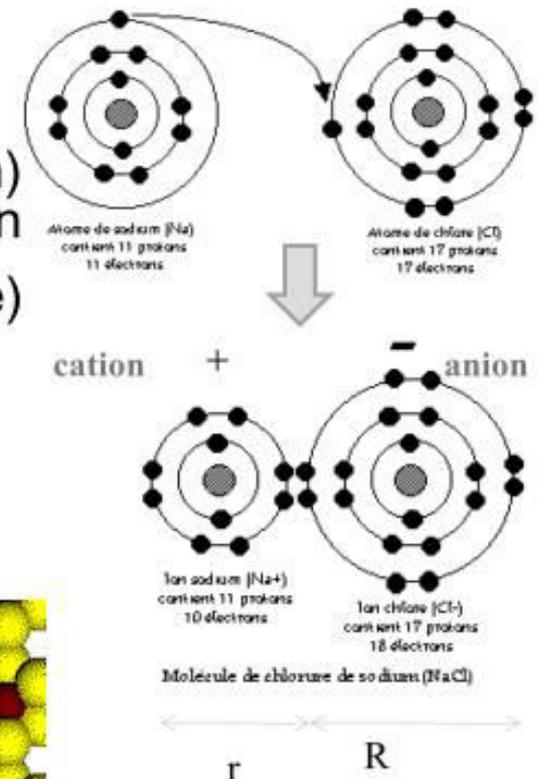
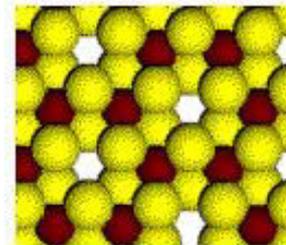
Types de Liaison

La liaison ionique

Transfert d'électron d'un atome (métallique) à un autre (non métallique)

- ❑ Perte de neutralité : ion positif (cation) et ion négatif (anions) : forte attraction
- ❑ Liaison forte (couche externe saturée) et non directionnelle
- ❑ Forme des réseaux cristallins compacts
- ❑ Aspect géométrique : R/r

- Exemple : NaCl ($\text{Na}^+ \text{Cl}^-$)



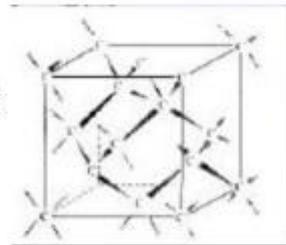
La liaison covalente

Mise en commun d'électrons de 2 atomes

- Liaison forte (couche externe saturée) et fortement directionnelle
- Forte énergie de liaison
 - ✓ Température de fusion élevée (Diamant : $T_F > 3550^\circ\text{C}$; Silicium : $T_F = 1410^\circ\text{C}$)
- Liaison de type A-A (H-H ou Cl-Cl) ou A-B (H-C)
- Matériaux

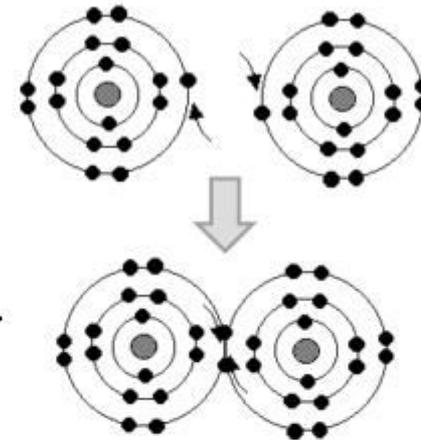
Céramiques

Ex: Diamant

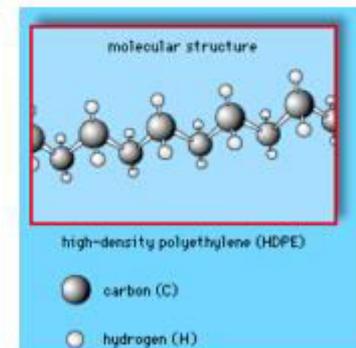


Polymères

Ex: polyéthylène
(C_2H_4)_n



Ex : Cl-Cl

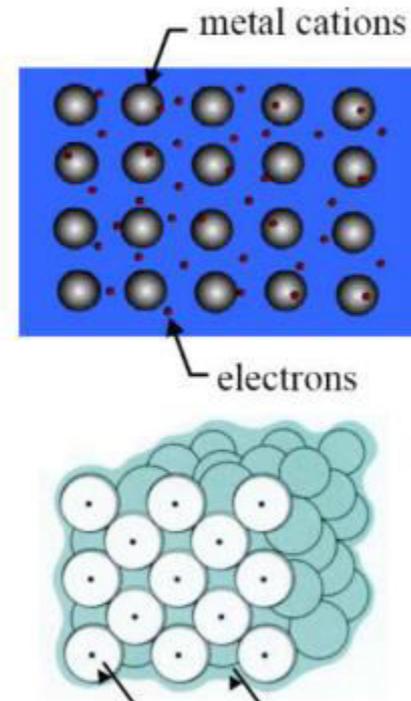


1-24

La liaison métallique

Les électrons sont partagés entre ions positifs du réseau :

- Nuage d'électrons mobiles qui n'est plus localisés entre les atomes (liaison covalente) ou sur un ion (liaison ionique) => Liaison non directionnelle
- Cations et électrons peuvent se déplacer aisément sans briser la structure cristalline
 - ✓ bonne conduction
 - ✓ ductilité
- Énergie de liaison variable
 - Mercure : $T_f = -39^\circ\text{C}$
 - Tungstène : $T_f = 3410^\circ\text{C}$



1-25

La « liaison » de Van der Waals

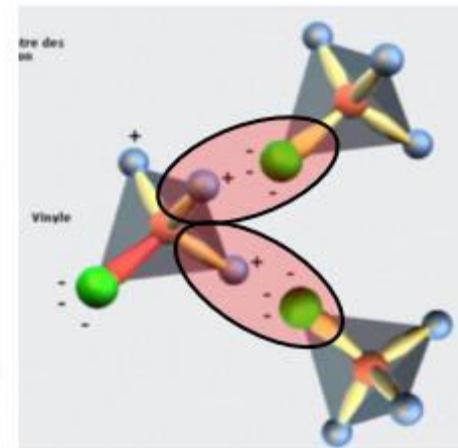
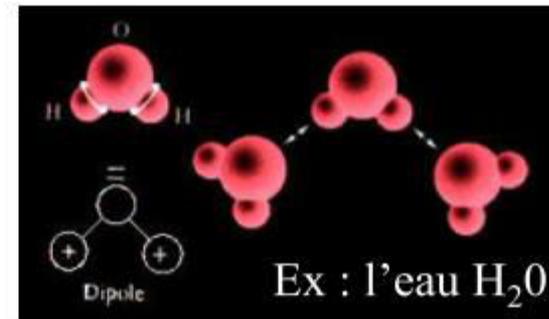
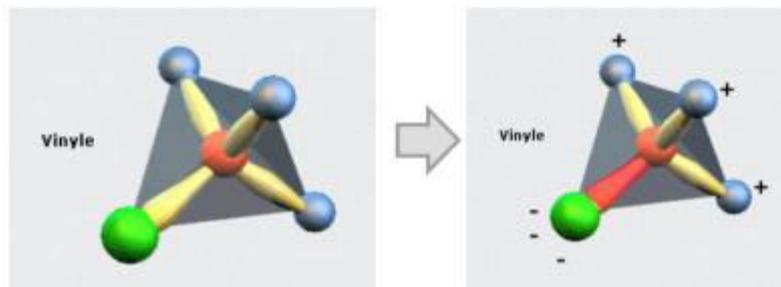
Liaison due à l'attraction entre les **molécules polarisées** de façon permanente ou induite

□ Liaison de **faible intensité**

✓ T_F bas

□ Exemple : chlorure de vinyle (CH_2Cl)

Cl (vert) très électronégatif : attire les électrons
=> création d'un dipôle permanent.



1. La liaison ionique/hétéropolaire s'établit en ions de charges opposées à travers un transfert électronique. L'atome le plus électronégatif attire un électron de l'autre atome et les ions interagissent via les forces de Coulomb. Ce type de liaison est non saturable (nombre de liaison par atome non limité) et non dirigée (s'exerce dans toute les directions). Exemple NaCl....

2. La liaison covalente/homopolaire s'établit entre atomes d'électronégativité similaires. Dans ce type de liaison, les atomes mettent en commun une paire d'électrons. Dans ce cas, la densité électronique est non-nulle entre les atomes. C'est une liaison qui est saturable et dirigée. Exemple diamant, ...

3. La liaison métallique est due à la délocalisation des électrons de conduction et s'établit entre atomes de faible électronégativité possédant peu d'électron dans leurs couches externes. C'est une liaison non saturée (due au faible nombre d'électrons) et non dirigée. C'est une liaison plus faible que les précédentes.

4. La liaison Van der Waals est due à l'interaction entre dipôle électriques permanents ou induits. C'est une liaison non saturable et non dirigée. Le potentiel d'interaction est en $1/r^6$. Ce type de liaison existe dans les gaz rares, l'oxygène (O_2) et le CH_4 .

5. La liaison hydrogène est aussi une liaison faible et directionnelle. Elle s'établit entre des atomes à forte affinité électronique tels que le F, O et N et un hydrogène d'une molécule voisine. L'hydrogène est ainsi partagé entre deux molécules. Elle est présente dans l'eau solide/liquide par exemple.

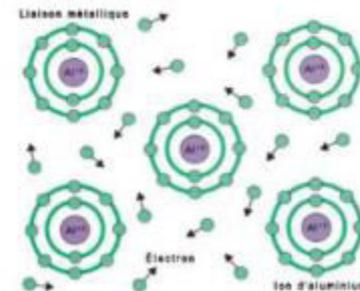
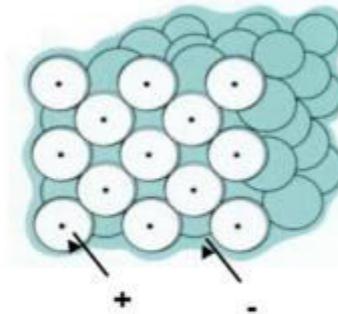
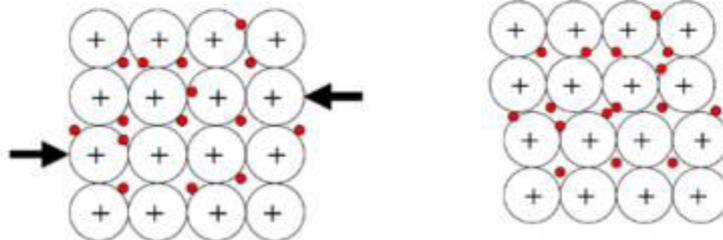
Types de Liaisons		Énergie de liaison (eV/atomes)
Covalent	N ₂ (liaison triple)	9,8
	C=C	6,5
	C-C	3,6
	O-O	1,5
Métallique	Cu	0,6
	Al	0,5
Hydrogène	Liaison hydrogène O-H..O dans la glace	0,26

Matériaux	Point de fusion θ_f (°C)	Module d'Young E (GPa)	Coeff. de dilatation α ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
<i>Liaisons ioniques ou covalentes</i>			
TiC	3180	315	7.4
SiC	>2800	480	4.7
MgO	2850	210	13.5
ZrO ₂	2750	205	10.0
C (fibres)	>2500	400	-
Al ₂ O ₃	2050	380	8.8
SiO ₂ (verre)	>1600	72	0.5
<i>Liaisons métalliques</i>			
Mo	2610	324	4.9
B	2030	400	8.3
Ti	1660	116	8.4
Fe	1535	210	11.8
Ni	1453	210	13.3
Cu	1083	110	16.5
Al	660	70	23.6
Mg	649	44	25.2
Zn	420	84	39.7
Pb	327	14	29.3
Sn	232	43	23.0
<i>Liaisons faibles (Van der Waals, hydrogène)</i>			
Polyéthylène b. d.	115	0.2	210
Polychlorure de Vinyle	130	2.4	54
Epoxy	-	2.4	72
Polyester	-	5.0	75
Aramide (fibres)	-	130	-
Os cortical	-	18	-
Bois (pin)	-	10	-

Les Métaux

Les métaux sont un **assemblage d'ions positifs** dans un « **gaz d'électrons** »:

- ✓ Structure cristalline
- ✓ **Bonnes conductivités électrique et thermique**
- ✓ **Éclat métallique** (interactions entre électrons et photons)
- ✓ **Bonne ductilité** à cause de leur capacité de briser et de reformer des liaisons entre atomes sans briser la structure cristalline

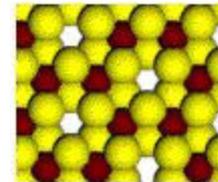
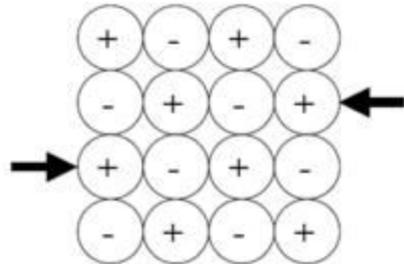


1-27

Les céramiques

Les céramiques présentent des **liaisons fortes ioniques ou covalentes**

- ✓ **Bons isolateurs de chaleur (réfractaire) et d'électricité** à cause du manque de mobilité d'électrons (pas d'e⁻ libres)
- ✓ **Fragiles** à cause de leur incapacité de casser et de reformer des liaisons sans briser la structure cristalline
- ✓ **Rigides et dures**, température de fusion élevée à cause de la force des liaisons ioniques et covalentes
- ✓ Souvent des oxydes, nitrures... Al₂O₃, MgO, TiN, TiC (Diamant, graphite et verre) (inertes chimiquement)



1-28

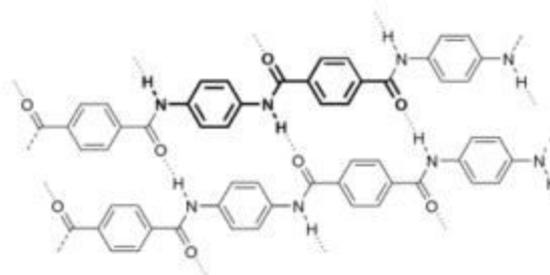
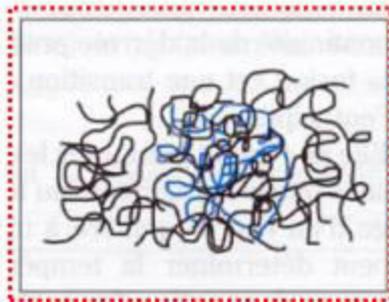
Les polymères

Les polymères présentent 2 types de liaisons :

- Liaisons covalentes fortes qui forment les chaînes
- Liaisons secondaires (Van der Waals ou hydrogène) qui relient les chaînes entre elles

Propriétés :

- ✓ Conductivité thermique faible
- ✓ Coefficient de dilatation important (10-100X supérieur aux métaux)
- ✓ Faible limite d'élasticité et rigidité car propriétés contrôlées par les liaisons secondaires



Les alliages

- Alliage : une combinaison entre un métal de base (matrice) et des éléments métallique ou non métallique formant un composé
- Les **alliages** les plus utilisés dans les industries de transport et d'énergie:
 - Aluminium
 - Titane
 - Les alliages ferreux (aciers au C et aciers inox)
 - Les superalliages (base Fe-Ni, base Cobalt, base Ni)
 - Mg

Les alliages d'aluminium

Alloy series	Composition	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	ϵ_F (%)	Notes
1000	"pure" Al.	30 - 100	100 - 135	up to 50	Foil, decoration, electrical conductors
2000	~4.5%Cu (+Mn,Si,Mg) age-hardened	up to 480	up to 520	5 - 20	General purpose forgings and extrusions, esp. airframes.
3000	~1%Mn, Mg. cold-worked	up to 215	up to 290	5	Ductile sheet for cladding trucks, trailers. Food containers. Drink cans.
4000	12%Si, (+ Mg,Ni,Cu) forgeable, age-hardened	~295	~325	0.5	IC engine pistons. (aka LM13, A332)
5000	~5%Mg (+Cr, Mn). cold-worked	up to 350	up to 415	15	Good formability & weldability. Excellent corrosion resistance. Structural applications, esp. marine.
6000	up to 1%Mg-Si. age-hardened	~275	~310	12	Hot extrusions. Window frames, etc.
7000	up to 8%Zn (+Mg,Cu,Cr). age-hardened	500	575	11	Highest strength alloys. Aircraft structures.
8000	"Other", e.g. up to 2.5%Li				Novel and specialist alloys
Cast	near Al-13%Si eutectic + 0.01%Na	up to 200	up to 300	2 - 5	Automotive castings. Can age-harden if Cu and Mg added.

Les alliages de Ti HRM

Table 4.1 Properties of Selected Titanium Alloys

<i>Alloy</i>	<i>Nominal Composition</i>	<i>Condition</i>	<i>UTS (ksi)</i>	<i>YS (ksi)</i>	<i>E (Msi)</i>	<i>Elong. (%)</i>	<i>Reduction in Area (%)</i>
Commercially Pure							
Grade 1	0.03N, 0.20Fe, 0.18O	Annealed	35	25	14.9	30	55
Grade 4	0.05N, 0.50Fe, 0.40O	Annealed	80	70	14.9	20	40
Alpha and Near-Alpha							
Ti-5-2.5	Ti-5Al-2.5Sn	Annealed	115	110	16.0	16	40
Half 6-4	Ti-3Al-2.5V	Annealed	90	75	15.5	20	–
Ti-6242S	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.25Si	Annealed	130	120	16.5	15	35
Ti-8-1-1	Ti-8Al-1Mo-1V	Annealed	130	120	18.0	15	28
Alpha-Beta							
Ti-6-4	Ti-6Al-4V	Annealed	130	120	16.5	14	30
		STA	170	160	16.5	10	25
Ti-6-4 ELI	Ti-6Al-4V	Annealed	120	110	16.5	15	35
Ti-6-6-2	Ti-6Al-6Sn-2V	Annealed	150	145	16.0	14	30
		STA	185	170	16.0	10	20
Ti-6246	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	STA	189	170	16.5	10	23
Ti-6-22-22S	Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si	Annealed	150	140	17.7	–	–
		STA	185	165	17.7	11	33
Beta							
Ti-10-2-3	Ti-10V-2Fe-3Al	STA	170	160	16.2	10	19
Ti-15-3	Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	Annealed	114	112	–	22	–
		STA	159	143	–	12	–

Tableau 1.1 Les classes de propriétés des matériaux.

Propriétés économiques et environnementales	Coût et disponibilité Recyclabilité Durabilité Empreinte carbone
Propriétés physiques générales	Masse volumique
Propriétés mécaniques	Module d'élasticité Limite d'élasticité, résistance à la traction Dureté Ténacité Résistance à la fatigue Résistance au fluage Pouvoir amortissant
Propriétés thermiques	Conductivité thermique Capacité calorifique spécifique Coefficient de dilatation thermique
Propriétés électriques et magnétiques	Résistivité Constante diélectrique Perméabilité magnétique
Interaction avec l'environnement	Oxydation Corrosion Usure
Aptitude à la mise en œuvre	Facilité de mise en forme Assemblage Finition
Propriétés esthétiques	Couleur Texture Toucher

Les propriétés Mécaniques

Propriétés mécaniques basées sur la déformation élastique:

Diagramme / courbe : contrainte-déformation

Module d'élasticité

Le coefficient de Poisson

La flexibilité

Résistance

Propriétés de résistance:

Limite proportionnelle

Limite élastique ou d'élasticité

Résistance à la traction diamétrale

Résistance à la flexion

Résistance à la fatigue

La résistance aux chocs

Résistance à la rupture

Autres propriétés mécaniques:

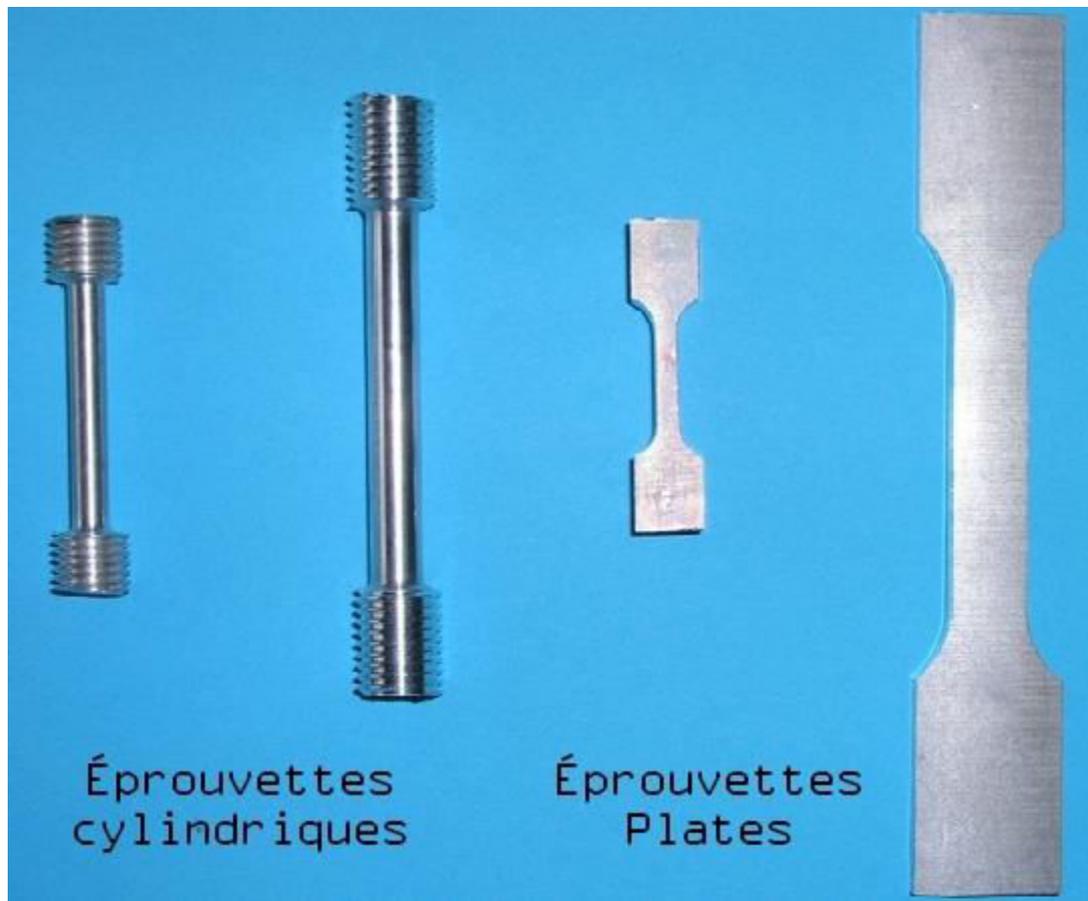
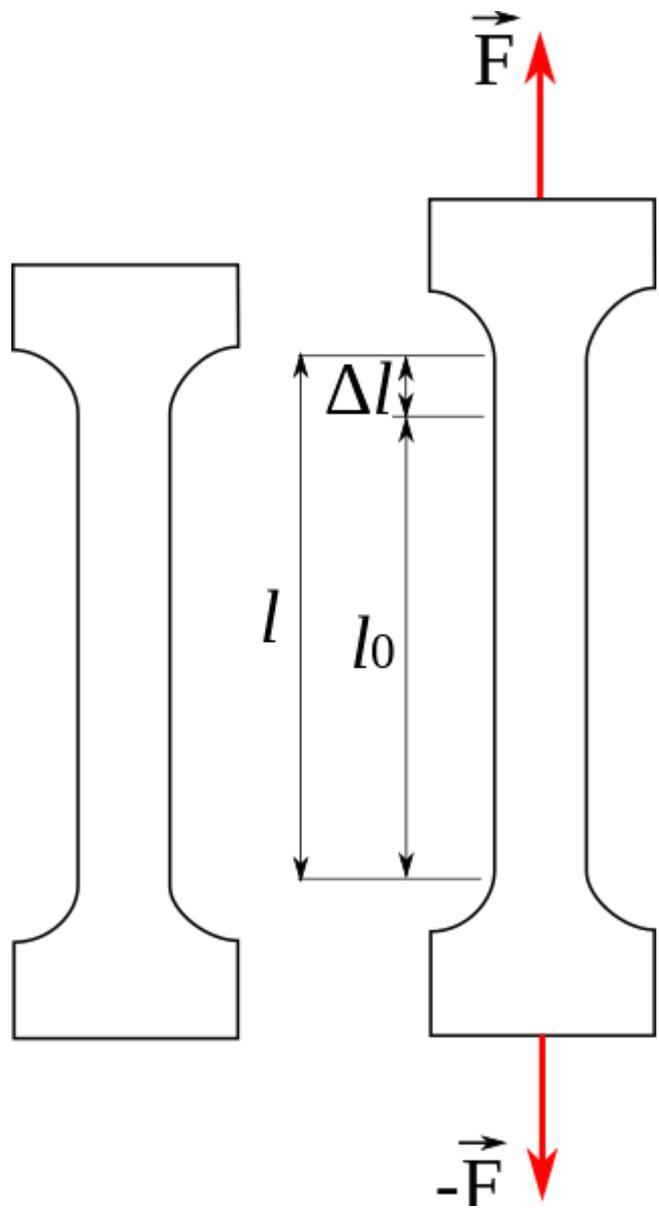
Dureté

Fragilité

Ductilité et malléabilité

Les propriétés Mécaniques

Dur	Hard
Mou	Soft
Rigide	Stiff
Flexible	Compliant
Résistant	Strong
Fragile	Brittle
Ductile	Ductile
Flexure	Bending
Cisaillement	Shear
Flambage	Buckling
Ténacité	Toughness
Résilience	Resilience
Fluage	Creep



Types d'Essai Mécaniques

A. Essai de Traction

B. Essai de Compression

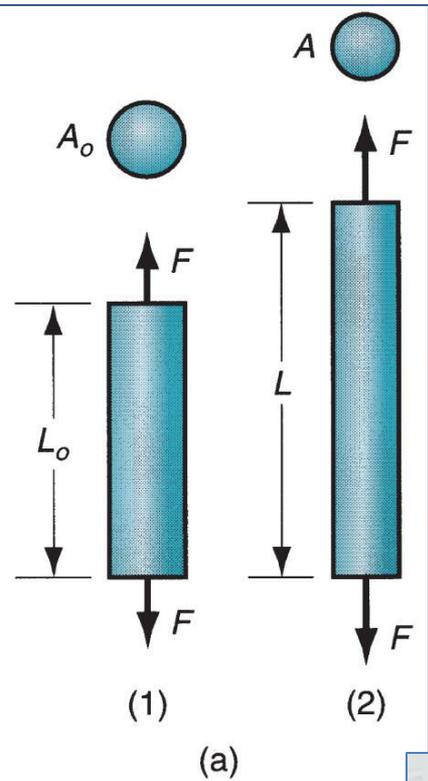
C. Essai de Flexion

D. Test en Cisaillement

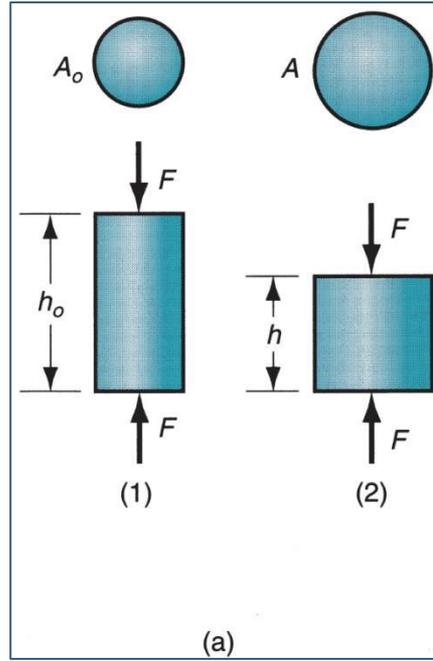
E. Test en Torsion

F. Test de Dureté

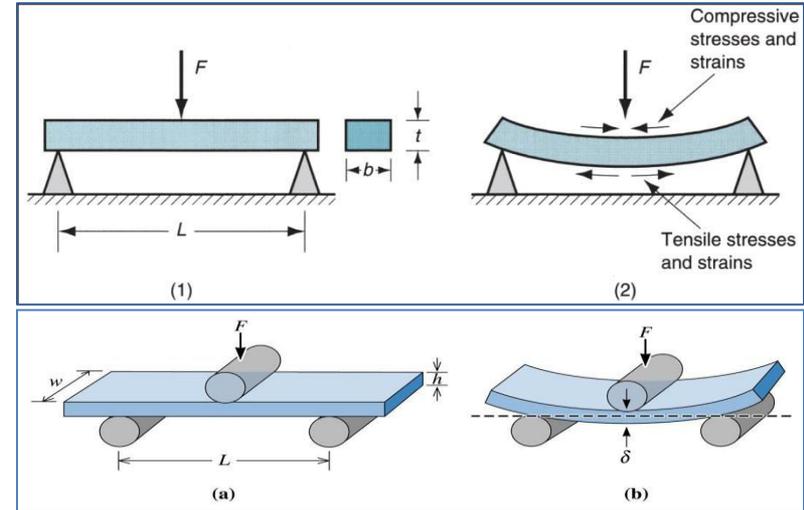
Test de Tension



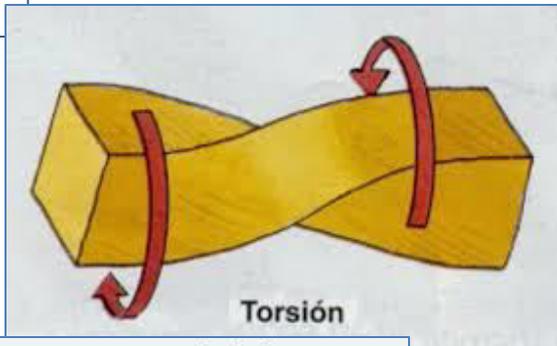
Test de Compression



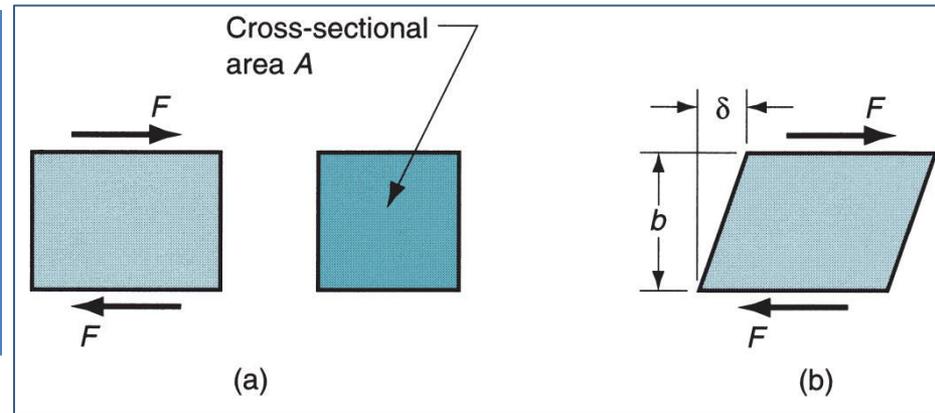
Test de Flexion



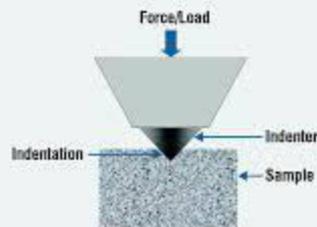
Test de Torsion



Test de Cisaillement

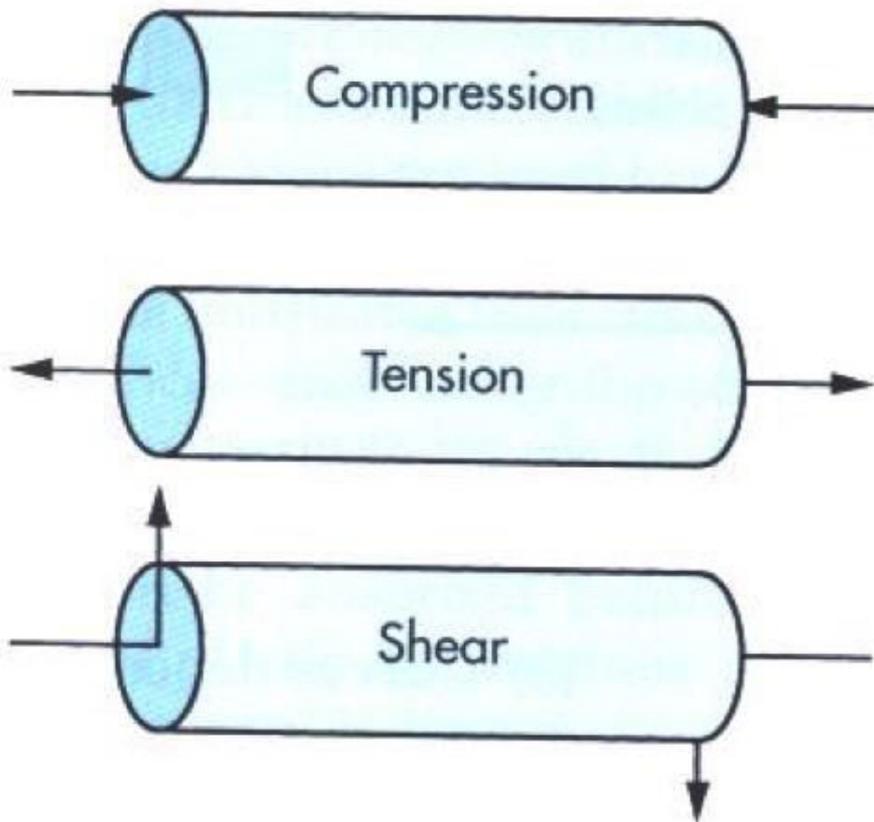


Test de Dureté

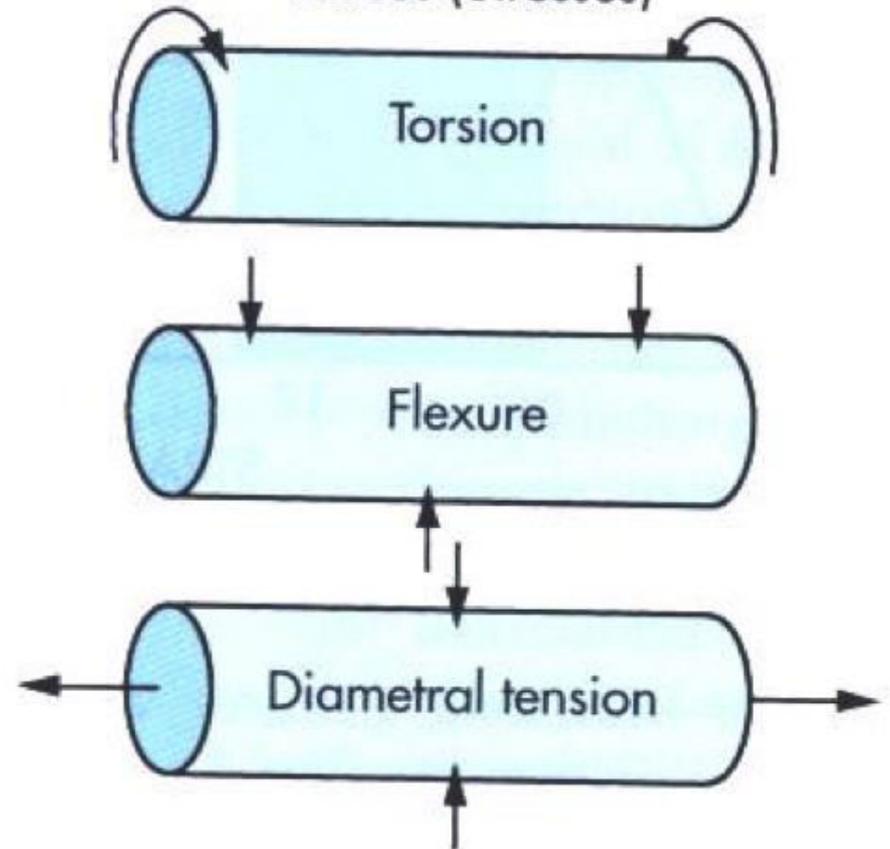


Types of stresses

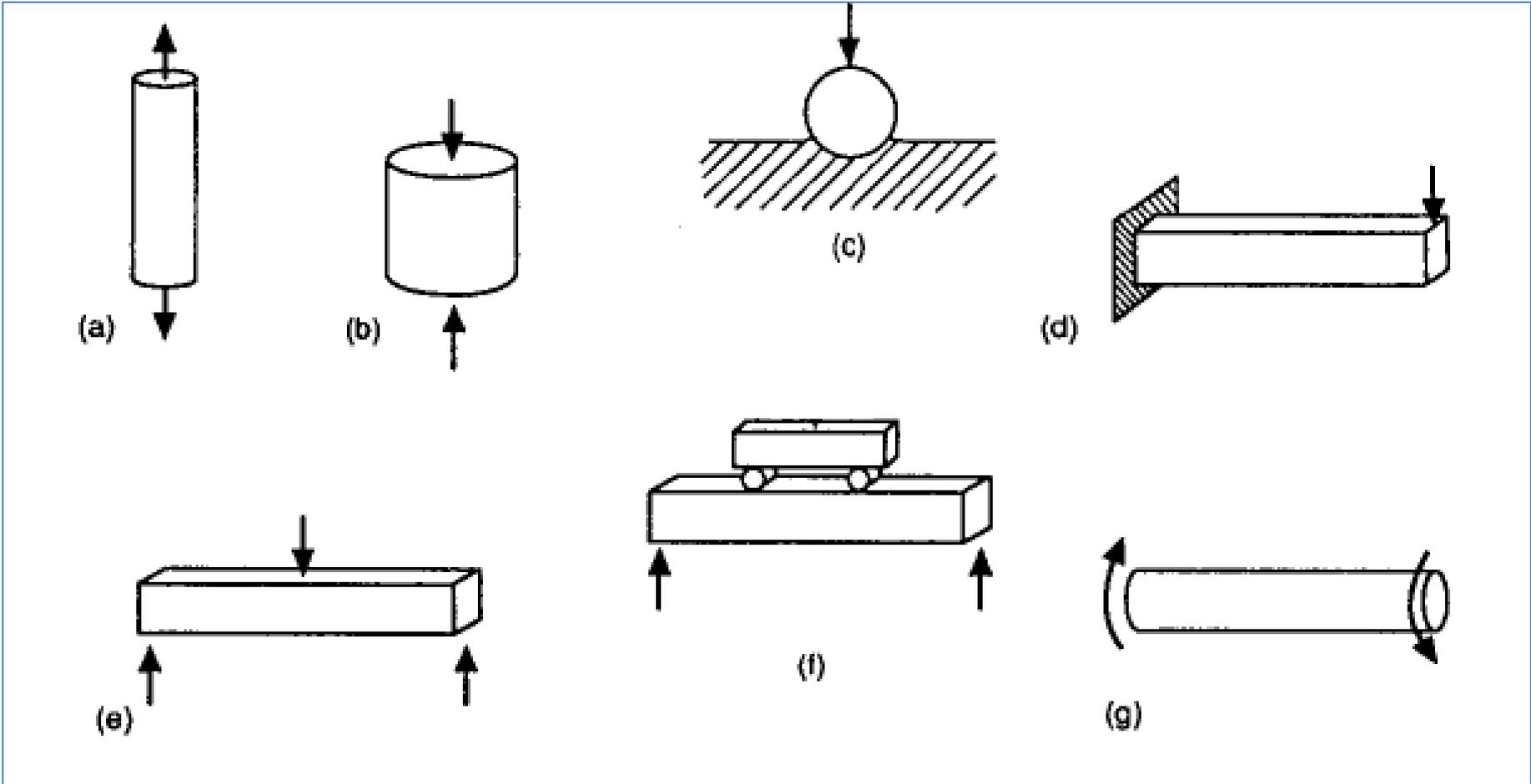
Simple Resolution of Forces (Stresses)



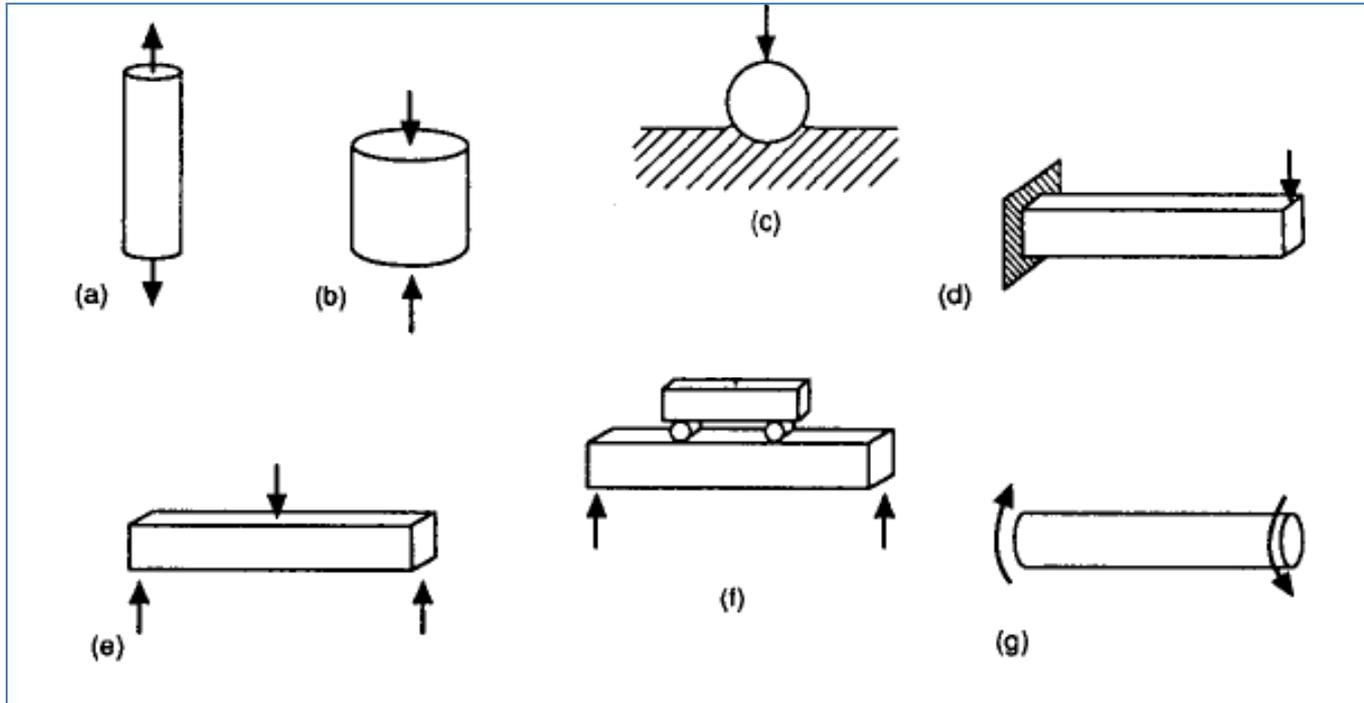
Complex Resolution of Forces (Stresses)



Géométrie et scénarios de chargement couramment utilisés dans les essais mécaniques de matériaux



Essais mécaniques de matériaux



a) tension,

b) compression,

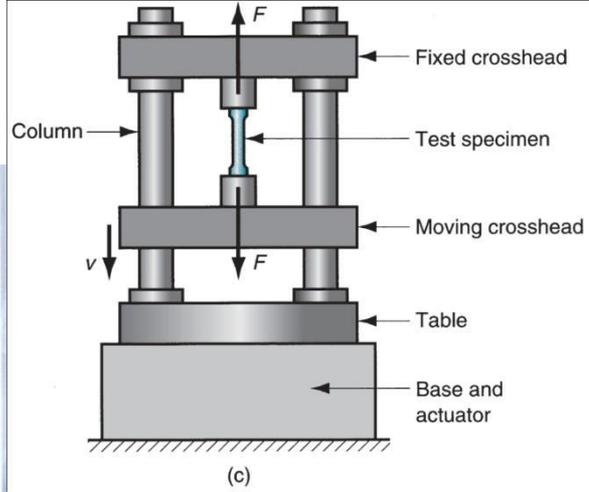
c) dureté par pénétration,

d) flexion en porte-à-faux,

e) flexion à trois points,

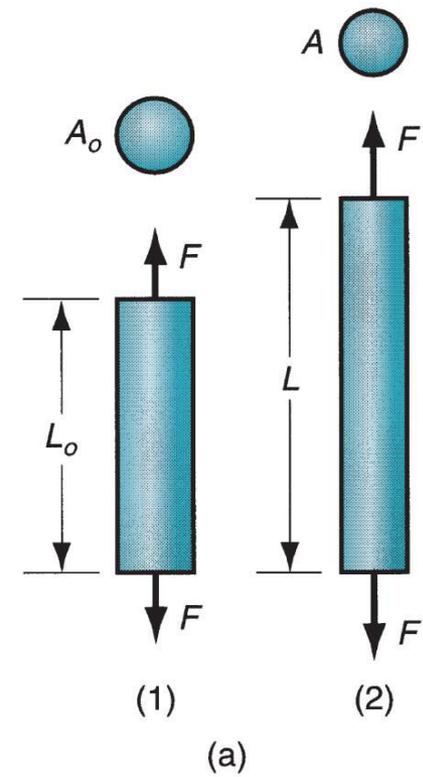
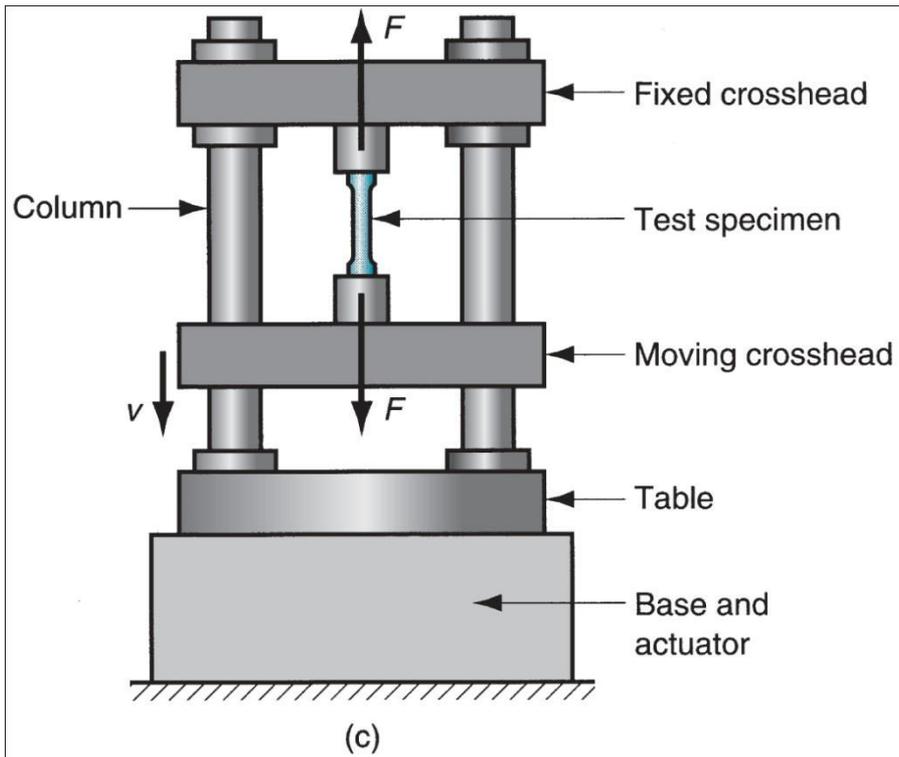
f) flexion à quatre points et

g) torsion





A. Essai de Traction



COMPORTEMENT MECANIQUE

ESSAIS MECANIQUE

A. Essai de traction

→ le plus simple et le plus courant

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 et l'allongement, que l'on peut convertir en contrainte déformation.

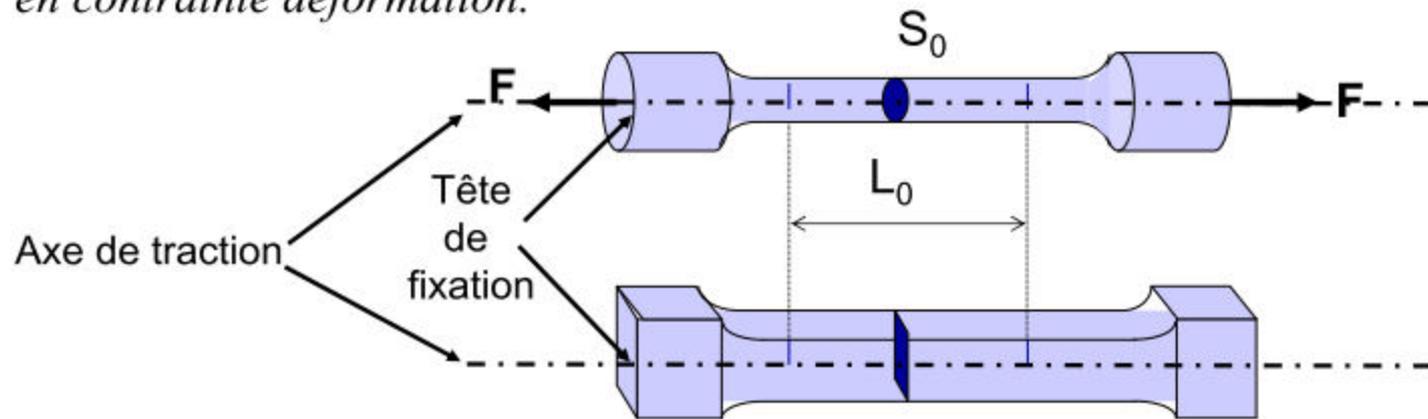
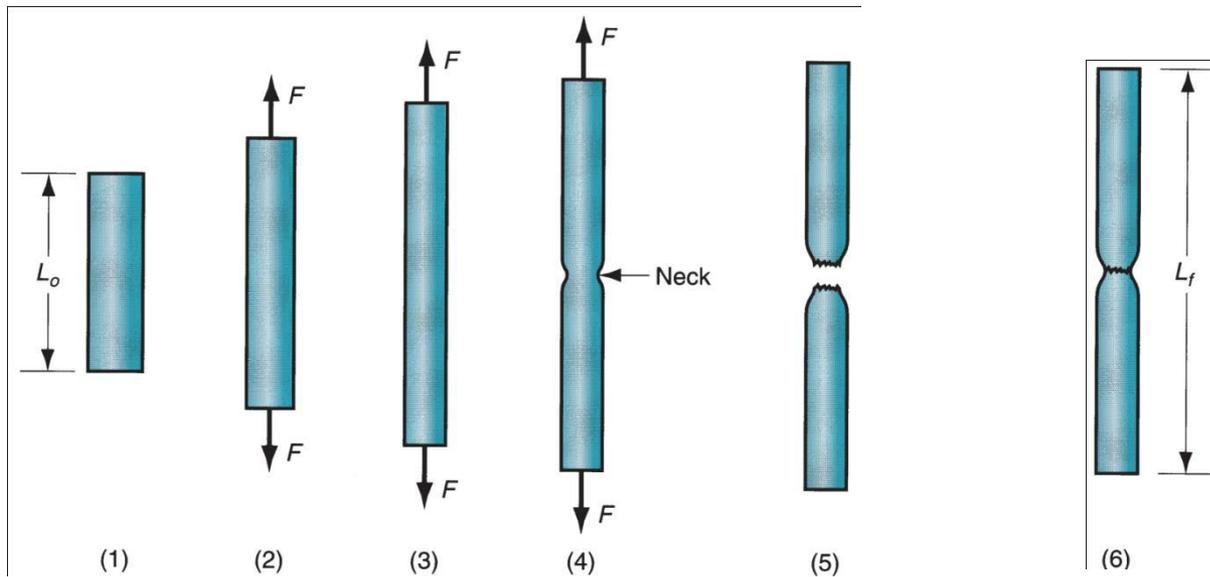
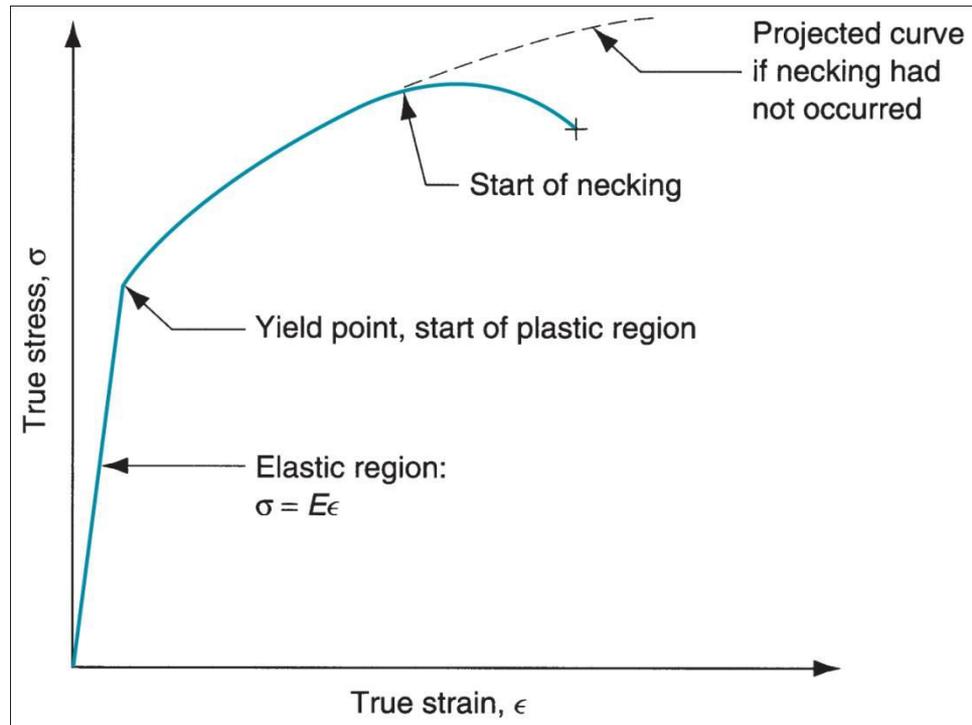


Figure 7 : éprouvettes de traction



- *tensile strength TS* (ultimate tensile strength)

Ductility measure = elongation EL

EL = elongation; L_f = specimen length at fracture; and L_o = original specimen length

L_f is measured as the distance between gage marks after two pieces of specimen are put back together

$$\sigma_e = \frac{F}{A_o}$$

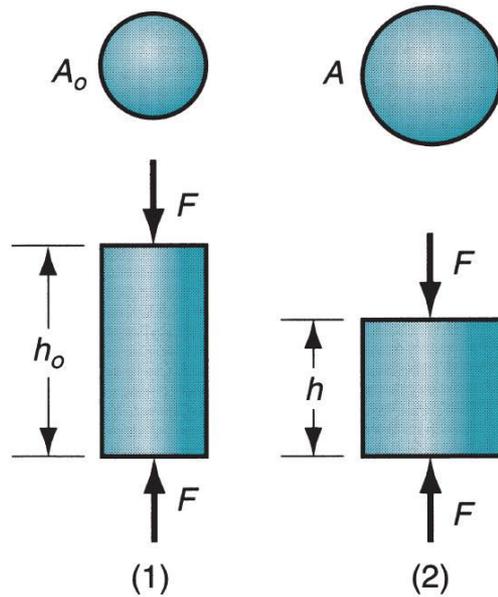
$$e = \frac{L - L_o}{L_o}$$

$$\sigma_e = E e$$

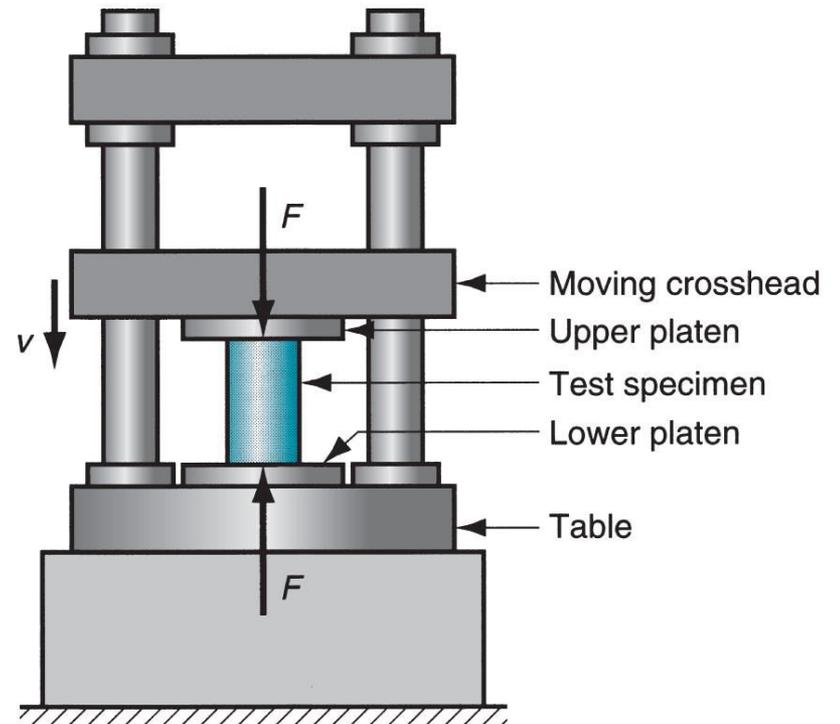
$$TS = \frac{F_{\max}}{A_o}$$

$$EL = \frac{L_f - L_o}{L_o}$$

B. Essai de Compression



(a)



(b)

B. Essai de compression

Utilisé pour déterminer les contraintes de rupture des matériaux fragiles (béton, céramique..)

Éprouvette cylindrique soumise à deux forces axiales opposées

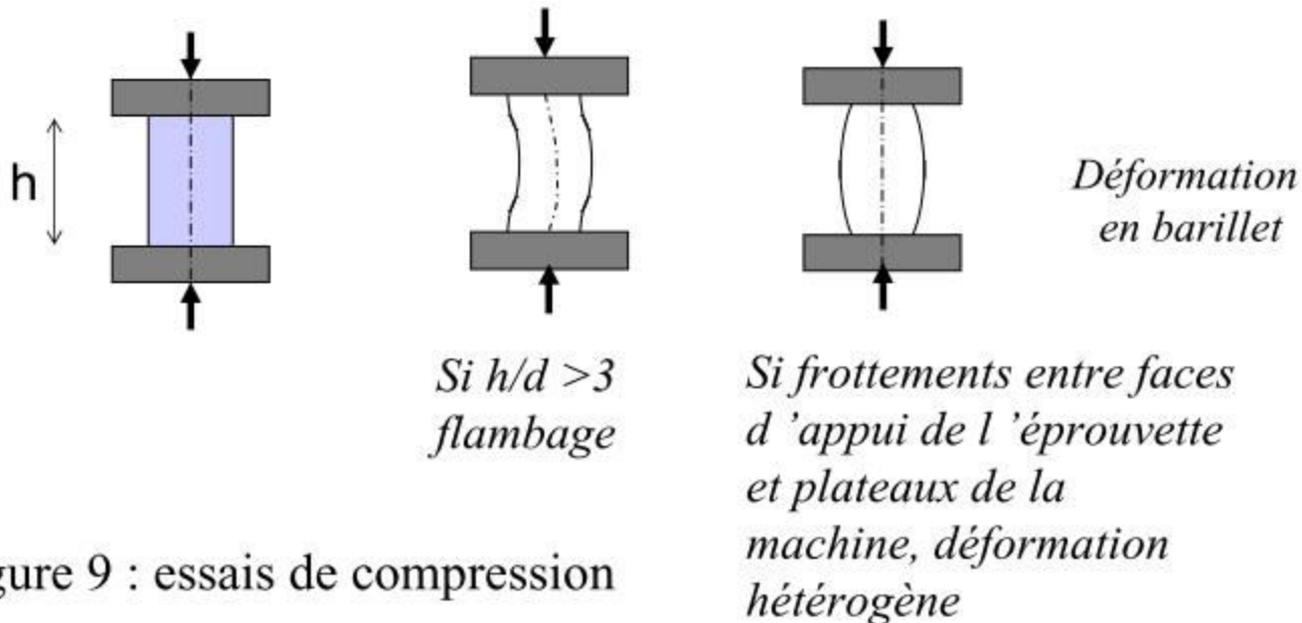


Figure 9 : essais de compression

C. Essai de Flexion

Il présente la même utilité que les essais de compression, il est peu utilisé pour les matériaux ductiles

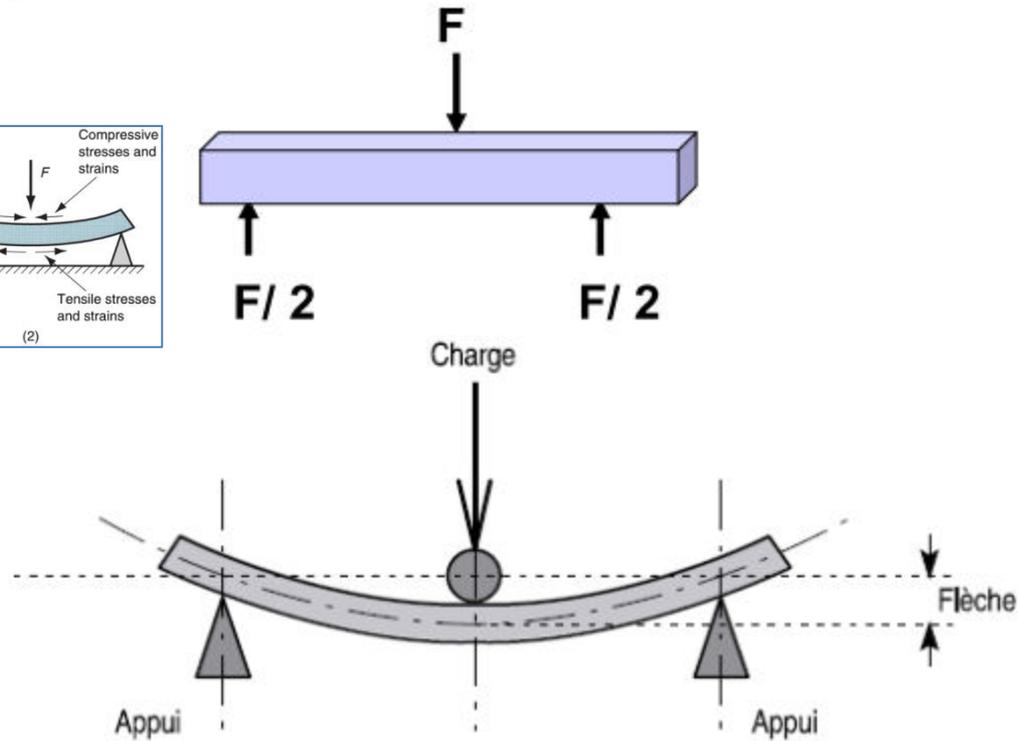
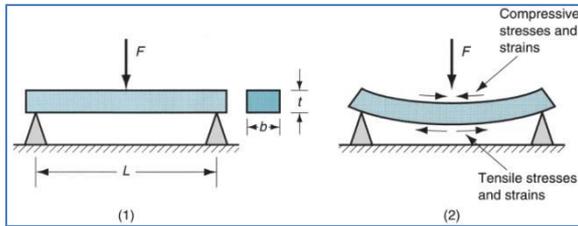


Figure 10 : essai de flexion

D. Test en Cisaillement

Shear stress

$$\tau = \frac{F}{A}$$

F = applied force;

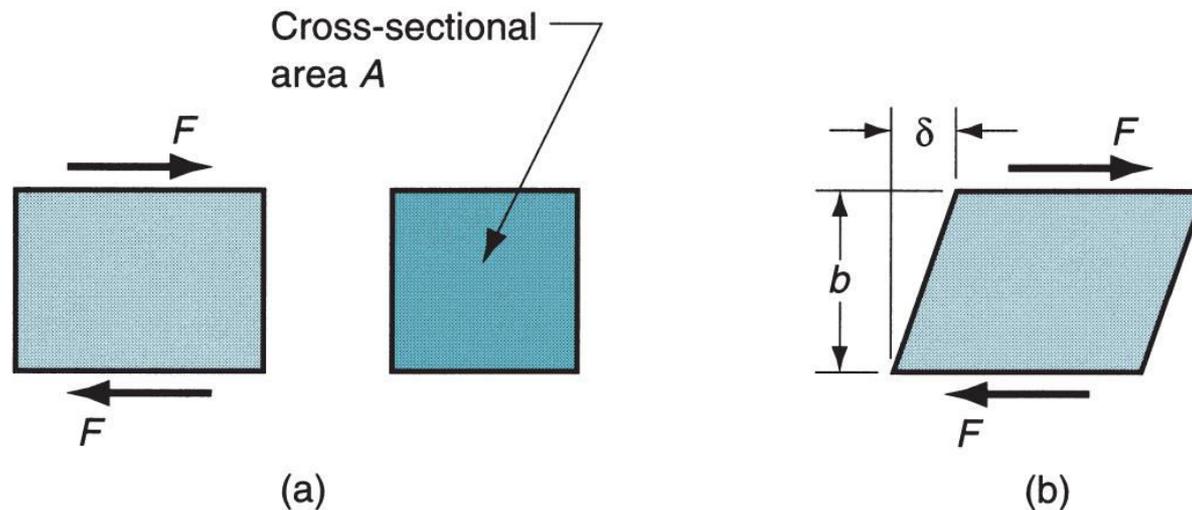
A = area over which deflection occurs.

Shear strain

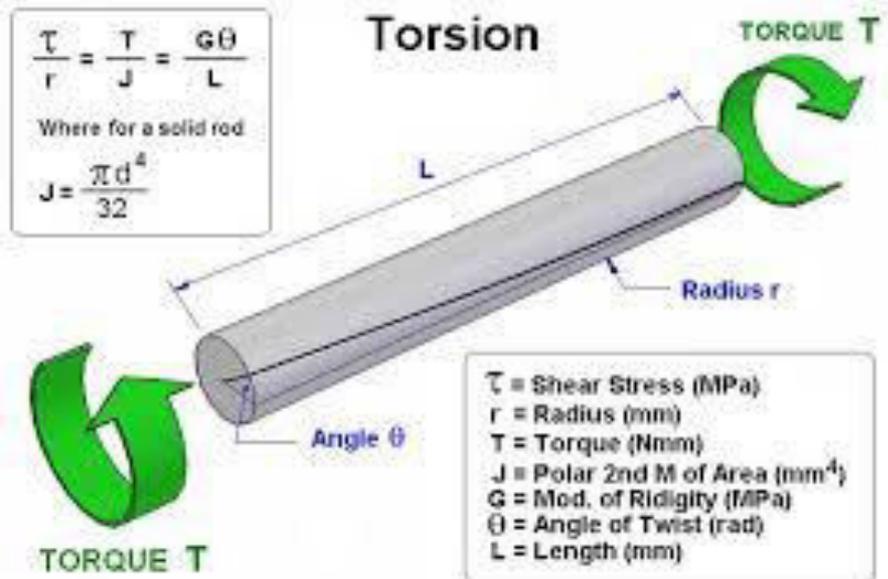
$$\gamma = \frac{\delta}{b}$$

δ = deflection element;

b = distance over which deflection occurs



E. Test en Torsion



F. Test de Dureté

La dureté quantifie la **résistance d'un matériau à la pénétration** sous une certaine charge F (*valeur sans dimension*)

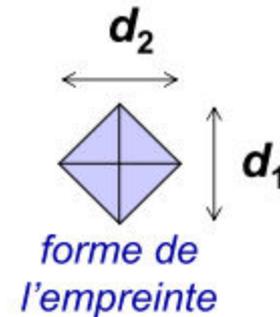
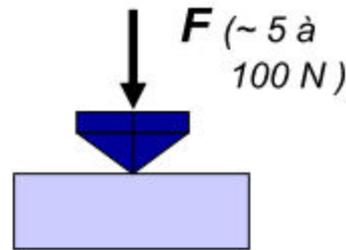
Elle est fonction de :

- déformations élastiques et plastiques
- forces de frottements sur la surface du matériau
- géométrie du pénétrateur
- force appliquée

- **essai Vickers**

diamant de forme
pyramidale
à base carrée

*(angle entre les faces
opposées : 136°)*



On mesure la moyenne d
des deux diagonales de l'empreinte

On en déduit la dureté Vickers :

$$Hv = 1,854 F / d^2$$

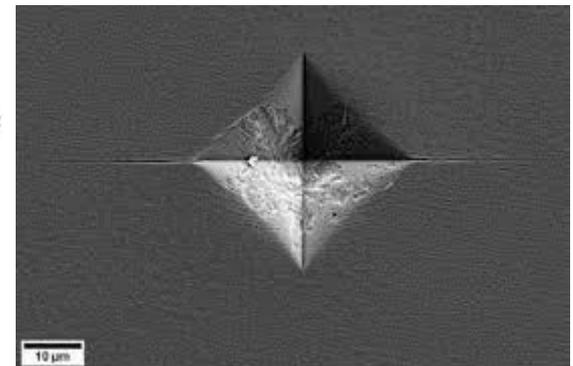


Photo d'une
Empreinte Vickers

Les propriétés Mécaniques

Elles concernent la déformation d'un matériau soumis à une force

Les principales sont :

- La résistance : caractérise la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre
- La dureté : 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

Les facteurs qui influencent la capacité d'une structure

La Résistance

Supporter et transmettre les charges

La Rigidite

Eviter les déformations excessives

La Stabilité

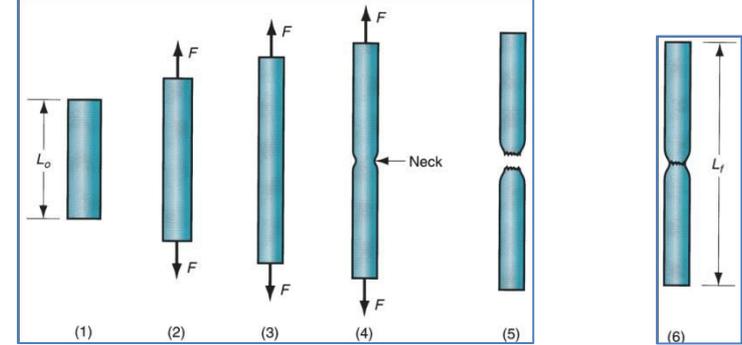
Conserver l'intégrité géométrique

L' Endurance (Fatigue)

Supporter de multiples cycles de chargement

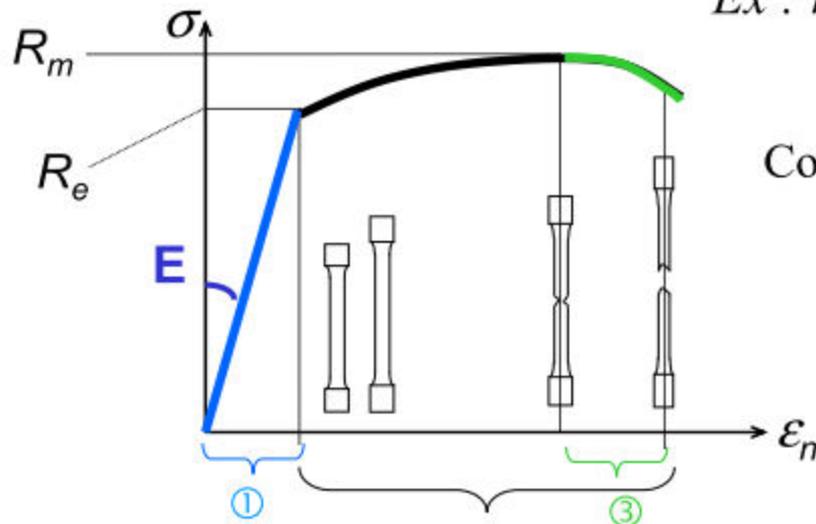
La Ductilité (Résilience)

Déformation au-delà de la limite élastique sans rupture fragile



COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION

Ex : matériau ductile (Figure 11)



Contrainte nominale : $\sigma_n = F / S_0$

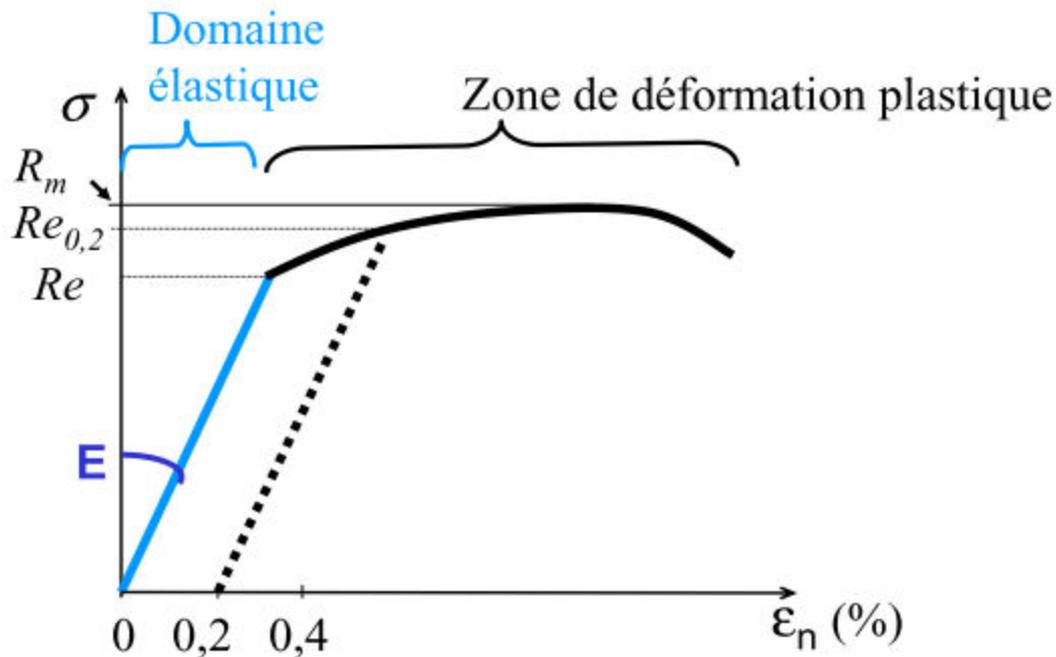
Déformation nominale :

$$\varepsilon_n = \Delta L / L_0$$

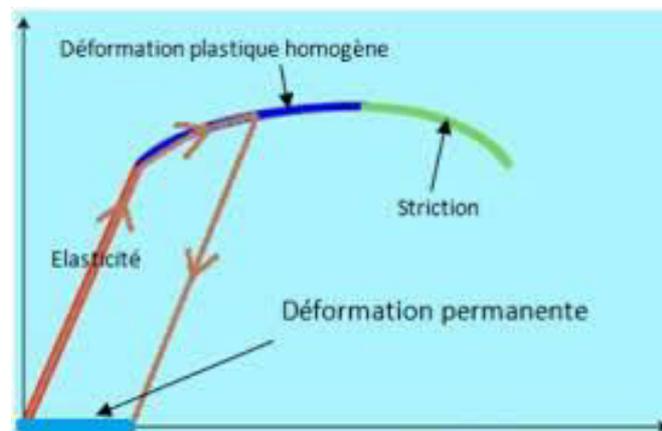
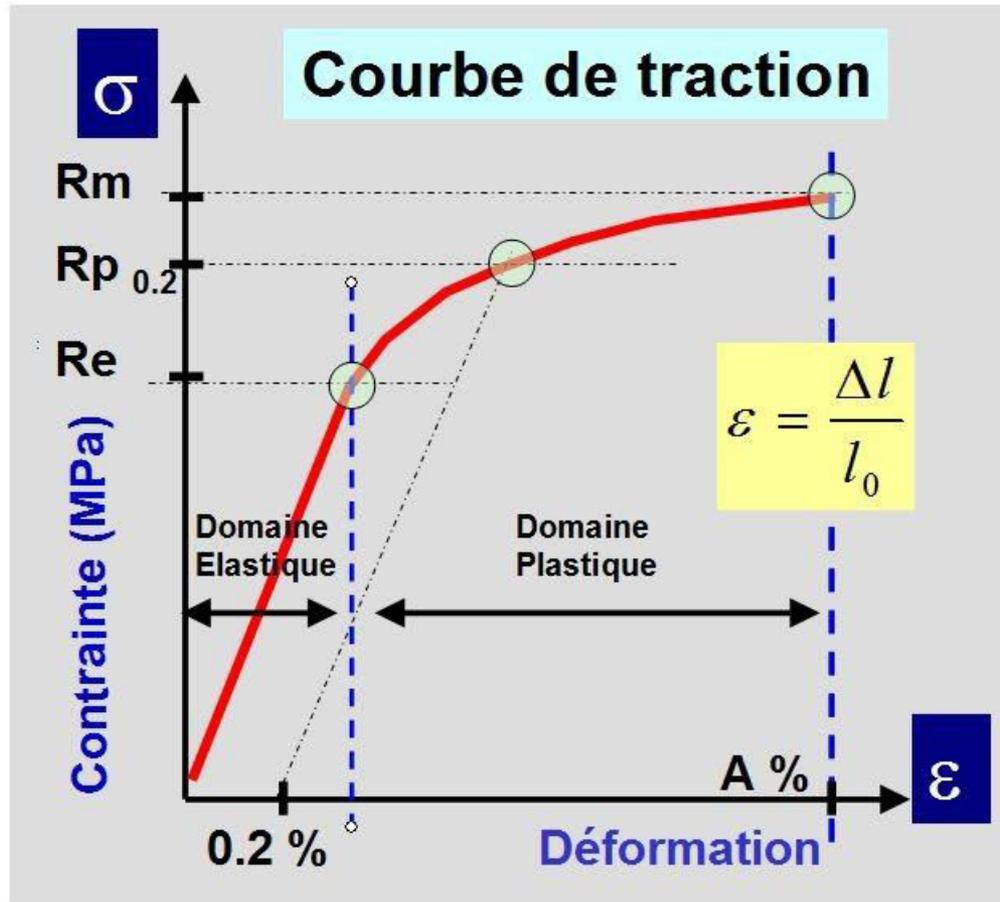
②

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

Domaine élastique → contrainte est proportionnelle à la déformation (loi de Hooke) → constante de proportionnalité E (module d'Young)



courbe contrainte-déformation d'un matériau ductile,
 $E, Re, Re_{0,2}, R_m$



➤ **Module d'Young E**

$$\sigma_n = E \varepsilon_n$$

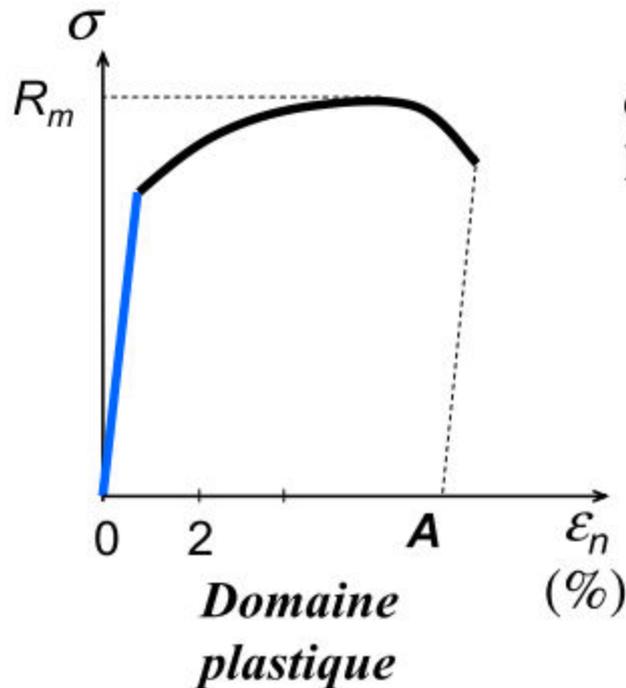
E caractéristique intrinsèque du matériau

➤ **Limite d'élasticité Re** = limite entre zones élastique et plastique

→ limite d'élasticité conventionnelle $Re_{0,2}$
(contrainte correspondant à 0,2 % de déformation)

➤ **Résistance à la traction R_m** contrainte maximale atteinte
durant l'essai de traction

Exploitation de la courbe σ - ϵ



➤ Résistance à la traction R_m

contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction

➤ Allongement A

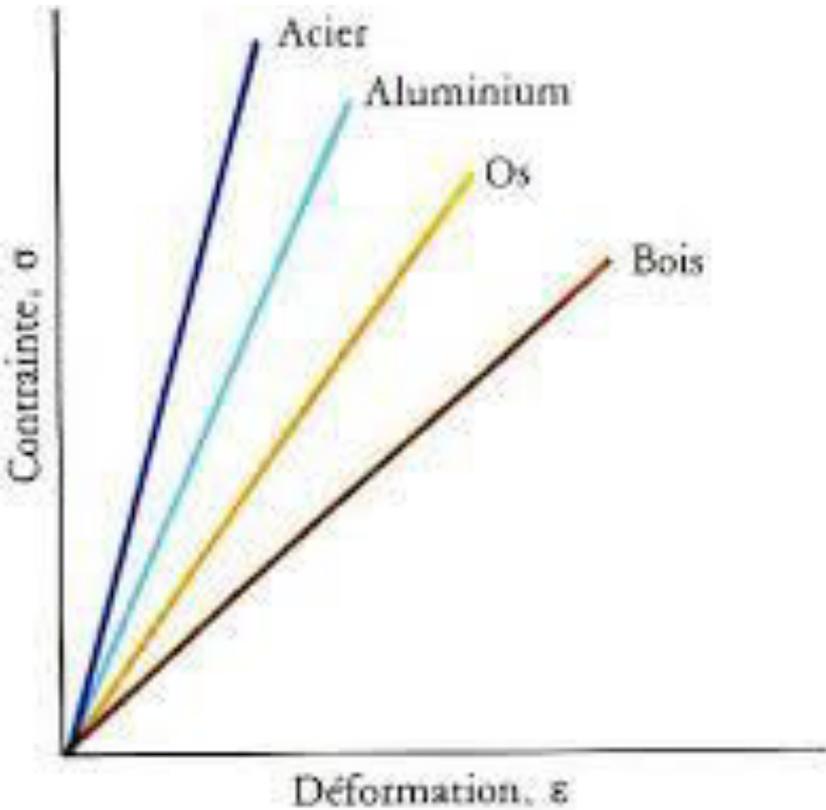
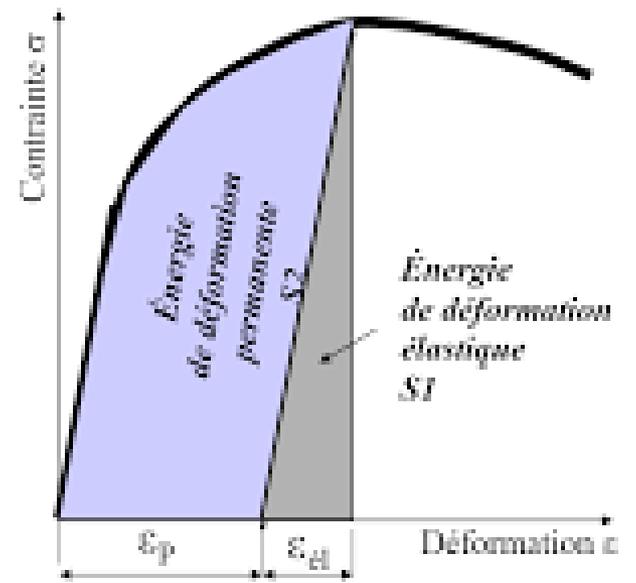
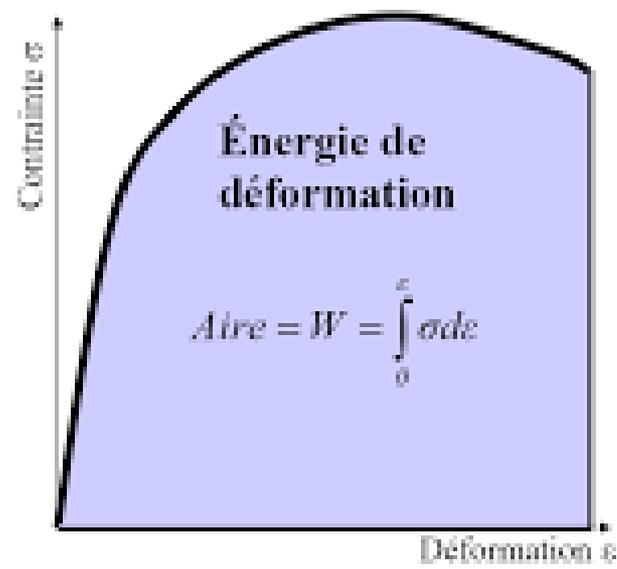
allongement à la rupture

$$A = (L_f - L_0) / L_0 = \Delta L / L_0$$

➤ Striction z

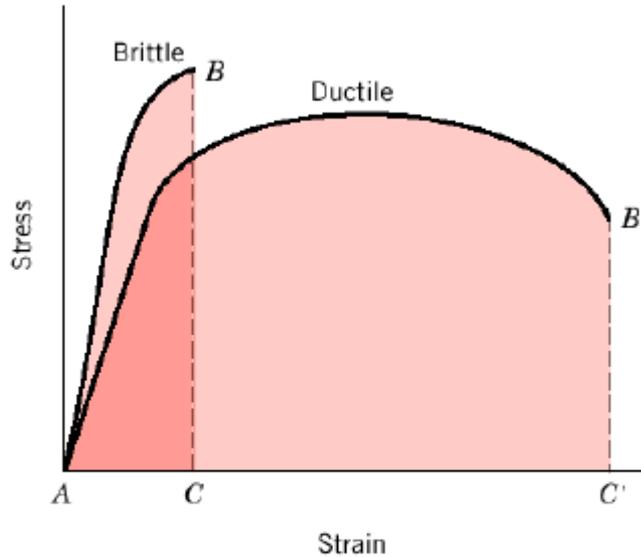
variation de section à l'endroit où la rupture s'est produite

$$z = (S_0 - S_f) / S_0$$



Ténacité

(Toughness)

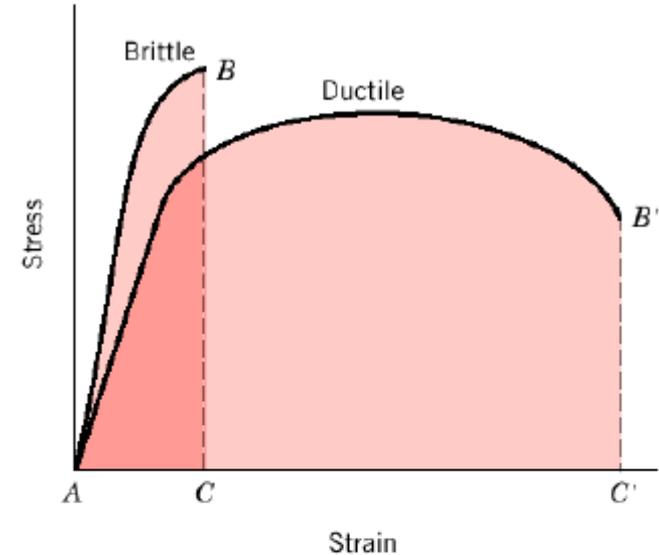


Toughness = the ability to absorb energy up to fracture = the total area under the strain-stress curve up to fracture

Units: the energy per unit volume, e.g. J/m³

Ductilité

(Tensile properties: Ductility)



Ductility is a measure of the deformation at fracture

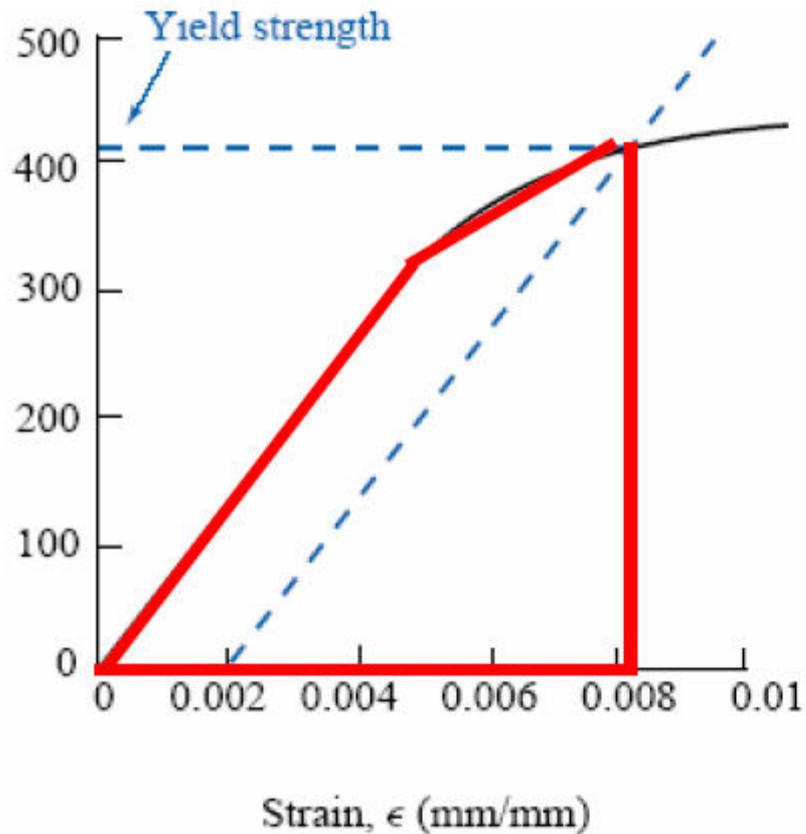
Defined by
percent elongation \longrightarrow $\%EL = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$

or
percent reduction in area \longrightarrow $\%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$

Résilience

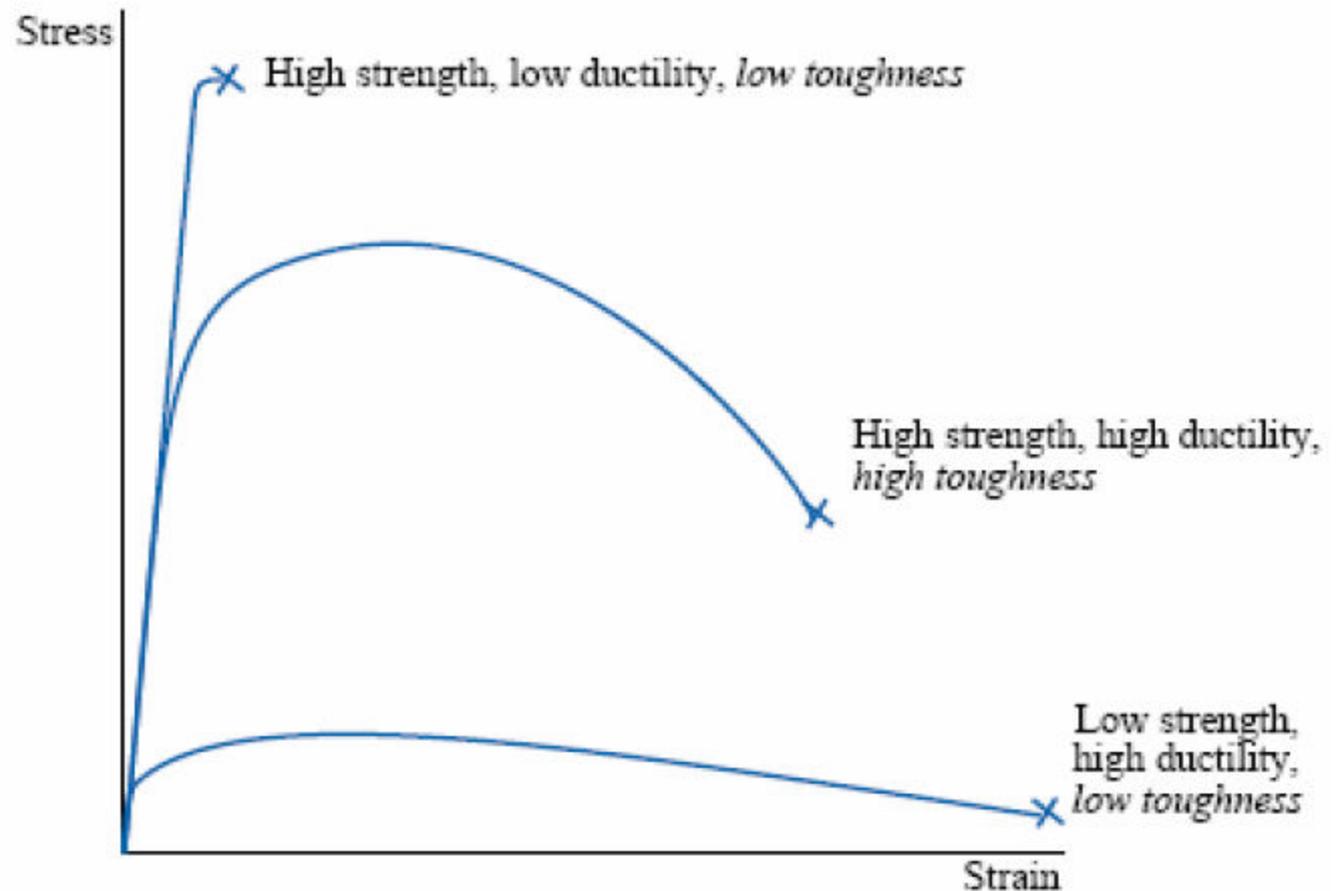
- Resilience

The maximum amount of energy per unit volume which can be stored elastically. This energy is released upon unloading. This value can be calculated as the area under the elastic part of the stress-strain curve.



Ductilité

- Ductility



Propriétés mécaniques des matériaux

Rigidité : *déformation réversible faible par rapport au chargement appliqué
(≠ souplesse)*

Résistance aux efforts

Rupture : *aptitude à ne pas se rompre sous l'effet d'un chargement*

Plastification : *aptitude à ne pas se déformer de manière irréversible sous
l'effet d'un chargement*

Ductilité : *capacité à se déformer avant de rompre*

Résilience : *capacité à emmagasiner de l'énergie au cours d'une déformation
élastique*

Ténacité : capacité à absorber de l'énergie au cours d'une évolution

irréversible (plastification, rupture)

Résistance à la fatigue : capacité à supporter des sollicitations

mécaniques cycliques plus ou moins régulières, alternées, répétées...

Résistance aux chocs : capacité à absorber de l'énergie lors d'une rupture

par choc

Dureté : résistance à l'enfoncement d'un pénétrateur

(liée à la résistance à la plastification)

Résistance au fluage : aptitude à durer sous l'effet d'une charge imposée

à température élevée

Résistance à la propagation de fissures : *sensibilité à l'effet d'entaille.*

Amortissement : *incapacité à restituer au cours de la relaxation des sollicitations qui lui sont appliquées toute l'énergie emmagasinée lors de la mise en charge .*

Résistance à l'usure : *résistance à l'enlèvement de matière par frottement (couple de matériaux).*

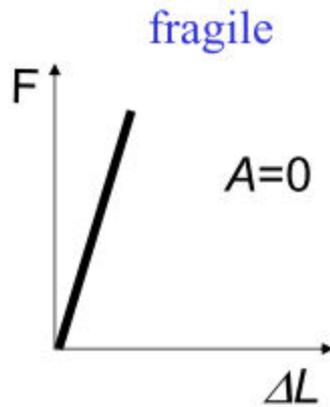
Corrosion sous contrainte : *couplage de deux sollicitations (chimique et mécanique).*

En résumé donc,

- ❑ Grande variété de propriétés → nombreux essais possibles.
- ❑ Difficulté de mettre en pratique les conditions théoriques.
- ❑ Nécessité des normes d'essais.
- ❑ Importance des paramètres extérieurs.

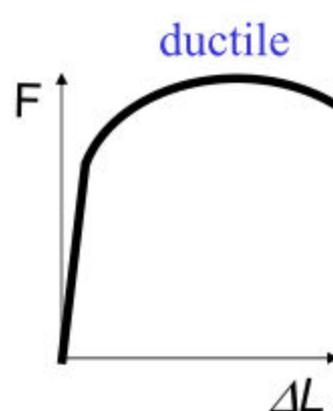
Classification des Matériaux

03 comportements possible



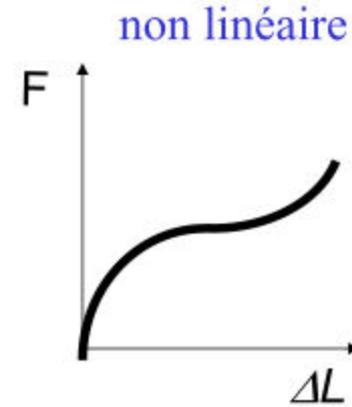
Pas de domaine
plastique

- verre
- céramique
- béton
- polymères
thermodurcissables



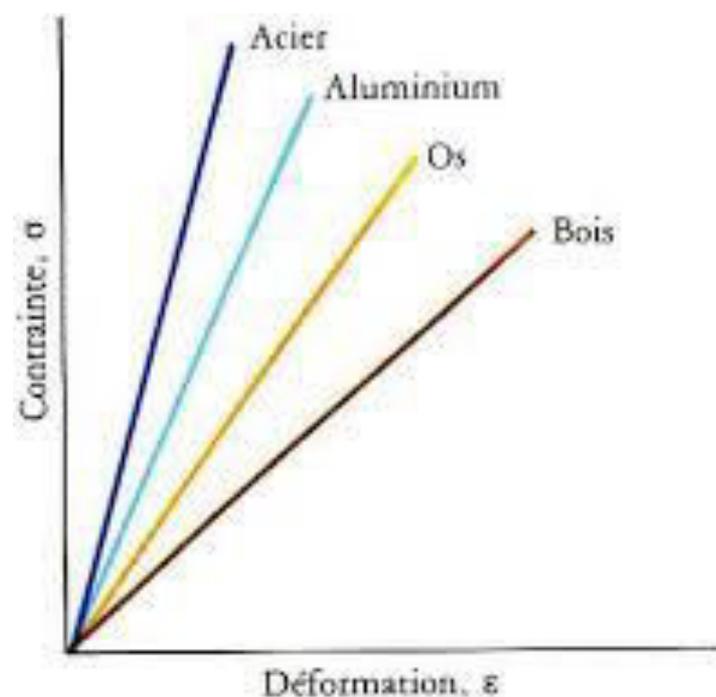
Déformation plastique
permanente

- métaux
- alliages
- polymères
thermoplastiques



Déformation élastique
non proportionnelle à
la charge

- caoutchouc
- élastomères..



La valeur du module de Young E est égale à la pente de la courbe contrainte-déformation dans sa partie linéaire. Ce module prend une valeur caractéristique pour chaque matériau.

Définitions

DANS LE DOMAINE ELASTIQUE

Pour une traction

$$\sigma = E \varepsilon$$

E : module d 'Young

ε : déformation longitudinale

Pour un cisaillement

$$\tau = G \gamma$$

G : module de cisaillement ou de Coulomb

γ : déformation en cisaillement

Pour une compression
hydrostatique

$$P = -K \Delta$$

K : module de compressibilité

Δ : réduction de volume causée
par la pression P

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{et} \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

avec $-1 < \nu < 0,5$

ν est le coefficient de Poisson

Remarque : pour les métaux

$\nu \sim 1/3$ donc $K = E$ et $G \sim 3/8 E$

Valeurs du module d'Young

E dépend de la nature des liaisons → grandeur intrinsèque

Covalente	(C-C)	10^3 GPa
Métallique pure	(Cu-Cu)	30-150 GPa
Ionique pure	(NaCl)	30-70 GPa
Hydrogène	H ₂ O-H ₂ O	8 GPa
Van der Waals	polymères	< 2 GPa

+ les forces de liaisons augmentent, + la valeur de E est élevée

Quelques valeurs du module d 'Young E (GPa)

Diamant	1000	Fibre de carbone	300
Carbure de silicium (SiC)	450	Silicium	107
Tungstène	400	Acier	210
Cuivre	125	Laiton, bronze	110
Titane	115	Magnésium	45
Aluminium	70	Verre à vitre	70
Alumine (Al ₂ O ₃)	400	Magnésie (MgO)	250
Silice vitreuse (SiO ₃)	95	Béton	50
Bois aggloméré	7	Polyamide 6-6	2
Polyéthylène md	0,7	Polypropylène	1,5
Polystyrène	2	Caoutchoucs	~ 0,001

Cas particulier des polymères : déploiement des chaînes enchevêtrées avant que les liaisons interatomiques du squelette ne soient effectivement soumises à la contrainte.

Élasticité et plasticité

- Valeurs de module d'Young pour des **métaux purs**

Matériaux	E (MPa)
Aluminium (Al)	69 000
Argent (Ag)	83 000
Baryum (Ba)	13 000
Béryllium (Be)	240 000
Bismuth (Bi)	32 000
Cadmium (Cd)	50 000
Césium (Cs)	1 700
Chrome (Cr)	289 000
Cobalt (Co)	209 000
Cuivre (Cu)	124 000
Étain (Sn)	41 500
Fer (Fe)	196 000
Germanium (Ge)	89 600

Matériaux	E (MPa)
Indium (In)	110 000
Iridium (Ir)	528 000
Lithium (Li)	4 900
Magnésium (Mg)	45 000
Manganèse (Mn)	198 000
Molybdène (Mo)	329 000
Nickel (Ni)	214 000
Niobium (Nb)	105 000
Or (Au)	78 000
Palladium (Pd)	121 000
Platine (Pt)	168 000
Plomb (Pb)	18 000
Plutonium (Pu)	96 000

Matériaux	E (MPa)
Rhodium (Rh)	275 000
Rubidium (Rb)	2 400
Ruthénium (Ru)	447 000
Scandium (Sc)	74 000
Sélénium (Se)	10 000
Sodium (Na)	10 000
Tantale (Ta)	186 000
Titane (Ti)	114 000
Tungstène (W)	406 000
Uranium (U)	208 000
Vanadium (V)	128 000
Zinc (Zn)	78 000
Zirconium (Zr)	68 000

- Valeurs de module d'Young pour des
Verres, céramiques, oxydes, carbures métalliques, minéraux

Matériaux	E (MPa)
Béton	27 000
Brique	14 000
Calcaire (CaCO ₃)	20 à 70 000
Carbure de chrome (Cr ₃ C ₂)	373 130
Carbure de silicium (SiC)	450 000
Carbure de Titane (TiC)	440 000
Carbure de tungstène (WC)	650 000
Diamant (C)	1 000 000
Graphite	30 000
Granite	60 000
Marbre	26 000

Matériaux	E (MPa)
Mullite (Al ₆ Si ₂ O ₁₃)	145 000
Alumine (Al ₂ O ₃)	390 000
Oxyde de béryllium (BeO)	30 000
Oxyde de magnésium (MgO)	250 000
Oxyde de zirconium (ZrO)	200 000
Saphir	420 000
Silice (oxyde de silicium SiO ₂)	107 000
Titanate d'aluminium (Ti ₃ Al)	140 000
Titanate de baryum (BaTiO ₃)	67 000
Verre	69 000

- Valeurs de module d'Young pour des **Bois**

Matériaux	E (MPa)
Acajou (Afrique)	12 000
Bambou	20 000
Bois de rose (Brésil)	16 000
Bois de rose (Inde)	12 000
Chêne	12 000
Épicéa	13 000
Érable	10 000
Frêne	10 000
Papier	3 000 - 4 000
Séquoia	9 500

Module d'Young mesuré dans le sens des fibres

- Valeurs de module d'Young pour des **Polymères, fibres**

Matériaux	E (MPa)
caoutchoucs	700 à 4 000
Fibre de carbone	190 000
Kevlar	34 500
Nanotubes (Carbone)	1 100 000
Nylon	2 000 à 5 000
Plexiglas (Polyméthacrylate de méthyle)	2 380
Polyamide	3 000 à 5 000
Polycarbonate	2 300
Polyéthylène	200 à 700
Polystyrène	3 000 à 3 400
Résines époxy	3 500

- Valeurs de module d'Young pour des **biomatériaux**

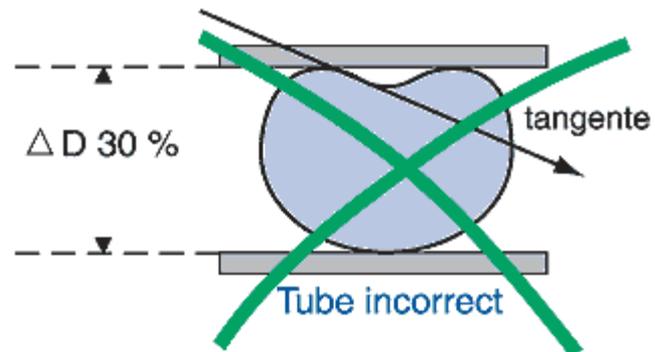
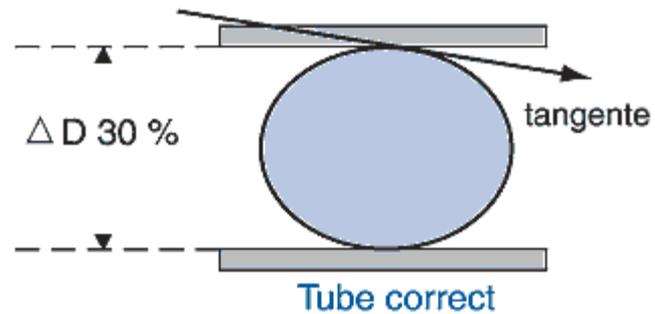
Matériaux	E (MPa)
Cartilage	24
Cheveux	10 000
Collagène	6
Fémur	17 200
Humérus	17 200
Piquant d'oursin	15 000 à 65 000
Radius	18 600
Soie d'araignée	60 000
Tibia	18 100
Vertèbre cervicale	230
Vertèbre lombaire	160

MATERIAL	Type	Cost (\$/kg)	Density (ρ , Mg/m ³)	Young's Modulus (E, GPa)	Shear Modulus (G, GPa)	Poisson's Ratio (ν)	Yield Stress (σ_Y , MPa)	UTS (σ_f , MPa)	Breaking strain (ϵ_f , %)	Fracture Toughness (K_{IC} , MN m ^{3/2})	Thermal Expansion (α , 10 ⁻⁶ /°C)
Alumina (Al ₂ O ₃)	ceramic	1.90	3.9	390	125	0.26	4800	35	0.0	4.4	8.1
Aluminum alloy (7075-T6)	metal	1.80	2.7	70	28	0.34	500	570	12	28	33
Beryllium alloy	metal	315.00	2.9	245	110	0.12	360	500	6.0	5.0	14
Bone (compact)	natural	1.90	2.0	14	3.5	0.43	100	100	9.0	5.0	20
Brass (70Cu30Zn, annealed)	metal	2.20	8.4	130	39	0.33	75	325	70.0	80	20
Cermets (Co/WC)	composite	78.60	11.5	470	200	0.30	650	1200	2.5	13	5.8
CFRP Laminate (graphite)	composite	110.00	1.5	1.5	53	0.28	200	550	2.0	38	12
Concrete	ceramic	0.05	2.5	48	20	0.20	25	3.0	0.0	0.75	11
Copper alloys	metal	2.25	8.3	135	50	0.35	510	720	0.3	94	18
Cork	natural	9.95	0.18	0.032	0.005	0.25	1.4	1.5	80	0.074	180
Epoxy thermoset	polymer	5.50	1.2	3.5	1.4	0.25	45	45	4.0	0.50	60
GFRP Laminate (glass)	composite	3.90	1.8	26	10	0.28	125	530	2.0	40	19
Glass (soda)	ceramic	1.35	2.5	65	26	0.23	3500	35	0.0	0.71	8.8
Granite	ceramic	3.15	2.6	66	26	0.25	2500	60	0.1	1.5	6.5
Ice (H ₂ O)	ceramic	0.23	0.92	9.1	3.6	0.28	85	6.5	0.0	0.11	55
Lead alloys	metal	1.20	11.1	16	5.5	0.45	33	42	60	40	29
Nickel alloys	metal	6.10	8.5	180	70	0.31	900	1200	30	93	13
Polyamide (nylon)	polymer	4.30	1.1	3.0	0.76	0.42	40	55	5.0	3.0	103
Polybutadiene elastomer	polymer	1.20	0.91	0.0016	0.0005	0.50	2.1	2.1	500	0.087	140
Polycarbonate	polymer	4.90	1.2	2.7	0.97	0.42	70	77	60	2.6	70
Polyester thermoset	polymer	3.00	1.3	3.5	1.4	0.25	50	0.7	2.0	0.70	150
Polyethylene (HDPE)	polymer	1.00	0.95	0.7	0.31	0.42	25	33	90	3.5	225
Polypropylene	polymer	1.10	0.89	0.9	0.42	0.42	35	45	90	3.0	85
Polyurethane elastomer	polymer	4.00	1.2	0.025	0.0086	0.50	30	30	500	0.30	125
Polyvinyl chloride (rigid PVC)	polymer	1.50	1.4	1.5	0.6	0.42	53	60	50	0.54	75
Silicon	ceramic	2.35	2.3	110	44	0.24	3200	35	0.0	1.5	6
Silicon Carbide (SiC)	ceramic	36.00	2.8	450	190	0.15	9800	35	0.0	4.2	4.2
Spruce (parallel to grain)	natural	1.00	0.60	9	0.8	0.30	48	50	10	2.5	4
Steel, high strength 4340	metal	0.25	7.8	210	76	0.29	1240	1550	2.5	100	14
Steel, mild 1020	metal	0.50	7.8	210	76	0.29	200	380	25	140	14
Steel, stainless austenitic 304	metal	2.70	7.8	210	76	0.28	240	590	60	50	17
Titanium alloy (6Al4V)	metal	16.25	4.5	100	39	0.36	910	950	15	85	9.4
Tungsten Carbide (WC)	ceramic	50.00	15.5	550	270	0.21	6800	35	0.0	8.2	6.8

Propriété	Définition
Dureté	Capacité de résister à la déformation de la pénétration d'un corps dur.



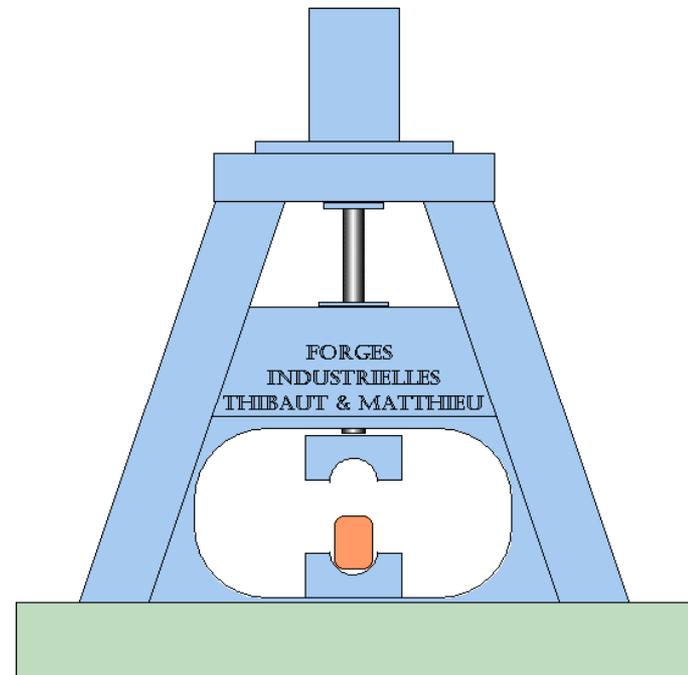
Propriété	Définition
Rigidité	Capacité de résister à la traction (tension) ou la pression.



Propriété	Définition
Résilience	Capacité à résister aux chocs.



Propriété	Définition
Malléabilité	Capacité à se laisser réduire en feuilles sans se déchirer, sous l'effet d'une force de compression.



Propriété	Définition
Fragilité	Fait de se casser sans se déformer sous l'effet d'une force.



Propriété	Définition
Ductilité	Capacité de pouvoir être étiré en fil sans se rompre sous l'effet d'une force de traction.



Propriété	Définition
Élasticité	Capacité d'un objet de reprendre sa forme initiale quand cesse la force qui agit sur lui.



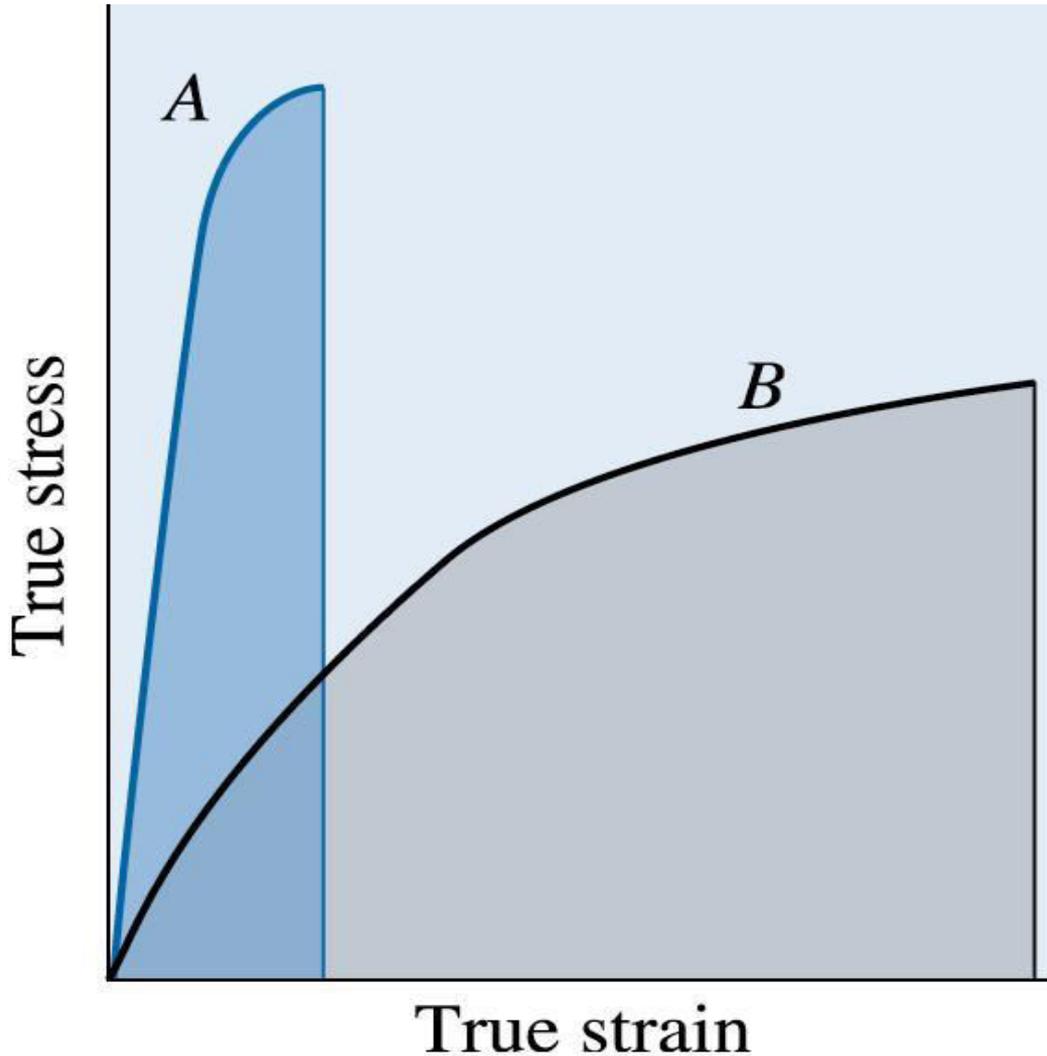
MATERIAL	Type	Cost (\$/kg)	Density (ρ , Mg/m ³)	Young's Modulus (E, GPa)	Shear Modulus (G, GPa)	Poisson's Ratio (ν)	Yield Stress (σ_Y , MPa)	UTS (σ_f , MPa)	Breaking strain (ϵ_f , %)	Fracture Toughness (K_{IC} , MN m ^{3/2})	Thermal Expansion (α , 10 ⁻⁶ /°C)
Alumina (Al ₂ O ₃)	ceramic	1.90	3.9	390	125	0.26	4800	35	0.0	4.4	8.1
Aluminum alloy (7075-T6)	metal	1.80	2.7	70	28	0.34	500	570	12	28	33
Beryllium alloy	metal	315.00	2.9	245	110	0.12	360	500	6.0	5.0	14
Bone (compact)	natural	1.90	2.0	14	3.5	0.43	100	100	9.0	5.0	20
Brass (70Cu30Zn, annealed)	metal	2.20	8.4	130	39	0.33	75	325	70.0	80	20
Cermets (Co/WC)	composite	78.60	11.5	470	200	0.30	650	1200	2.5	13	5.8
CFRP Laminate (graphite)	composite	110.00	1.5	1.5	53	0.28	200	550	2.0	38	12
Concrete	ceramic	0.05	2.5	48	20	0.20	25	3.0	0.0	0.75	11
Copper alloys	metal	2.25	8.3	135	50	0.35	510	720	0.3	94	18
Cork	natural	9.95	0.18	0.032	0.005	0.25	1.4	1.5	80	0.074	180
Epoxy thermoset	polymer	5.50	1.2	3.5	1.4	0.25	45	45	4.0	0.50	60
GFRP Laminate (glass)	composite	3.90	1.8	26	10	0.28	125	530	2.0	40	19
Glass (soda)	ceramic	1.35	2.5	65	26	0.23	3500	35	0.0	0.71	8.8
Granite	ceramic	3.15	2.6	66	26	0.25	2500	60	0.1	1.5	6.5
Ice (H ₂ O)	ceramic	0.23	0.92	9.1	3.6	0.28	85	6.5	0.0	0.11	55
Lead alloys	metal	1.20	11.1	16	5.5	0.45	33	42	60	40	29
Nickel alloys	metal	6.10	8.5	180	70	0.31	900	1200	30	93	13
Polyamide (nylon)	polymer	4.30	1.1	3.0	0.76	0.42	40	55	5.0	3.0	103
Polybutadiene elastomer	polymer	1.20	0.91	0.0016	0.0005	0.50	2.1	2.1	500	0.087	140
Polycarbonate	polymer	4.90	1.2	2.7	0.97	0.42	70	77	60	2.6	70
Polyester thermoset	polymer	3.00	1.3	3.5	1.4	0.25	50	0.7	2.0	0.70	150
Polyethylene (HDPE)	polymer	1.00	0.95	0.7	0.31	0.42	25	33	90	3.5	225
Polypropylene	polymer	1.10	0.89	0.9	0.42	0.42	35	45	90	3.0	85
Polyurethane elastomer	polymer	4.00	1.2	0.025	0.0086	0.50	30	30	500	0.30	125
Polyvinyl chloride (rigid PVC)	polymer	1.50	1.4	1.5	0.6	0.42	53	60	50	0.54	75
Silicon	ceramic	2.35	2.3	110	44	0.24	3200	35	0.0	1.5	6
Silicon Carbide (SiC)	ceramic	36.00	2.8	450	190	0.15	9800	35	0.0	4.2	4.2
Spruce (parallel to grain)	natural	1.00	0.60	9	0.8	0.30	48	50	10	2.5	4
Steel, high strength 4340	metal	0.25	7.8	210	76	0.29	1240	1550	2.5	100	14
Steel, mild 1020	metal	0.50	7.8	210	76	0.29	200	380	25	140	14
Steel, stainless austenitic 304	metal	2.70	7.8	210	76	0.28	240	590	60	50	17
Titanium alloy (6Al4V)	metal	16.25	4.5	100	39	0.36	910	950	15	85	9.4
Tungsten Carbide (WC)	ceramic	50.00	15.5	550	270	0.21	6800	35	0.0	8.2	6.8

RAPPEL: Les propriétés mécaniques des matériaux

Propriété	Définition	
Dureté	Capacité de résister à la déformation de la pénétration d'un corps dur.	
Rigidité	Capacité de résister à la traction (tension) ou la pression.	
Résilience	Capacité à résister aux chocs.	
Malléabilité	Capacité à se laisser réduire en feuilles sans se déchirer, sous l'effet d'une force de compression.	
Fragilité	Fait de se casser sans se déformer sous l'effet d'une force.	
Ductilité	Capacité de pouvoir être étiré en fil sans se rompre sous l'effet d'une force de traction.	
Élasticité	Capacité d'un objet de reprendre sa forme initiale quand cesse la force qui agit sur lui.	

Questions?

Lequel des 2 matériaux A ou B a le plus de



Rigidité

Ductilité

Ténacité

Malléabilité

Fragilité

Élasticité

Résilience

Dureté

FIN

- **Résistance à la rupture**

Charge maximale applicable à une section d'éprouvette sollicitée en traction pure sans rupture (unité : Pa)

$$\sigma_R = \frac{F_{\max}}{S_0}$$

- **Limite d'élasticité**

Charge maximale applicable à une section d'éprouvette sollicitée en traction pure sans entraîner de déformation plastique (unité : Pa)

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0}$$

- **Allongement et striction**

- Allongement relatif de l'éprouvette de longueur initiale l_0 après rupture

$$A\% = \frac{\Delta l}{l_0}$$

- Striction : variation relative de la section après rupture

$$\Sigma\% = \frac{\Delta S}{S_0}$$

- **Ténacité**

- Résistance à la rupture d'un matériau en présence d'une fissure (ou résistance à la propagation de fissure)

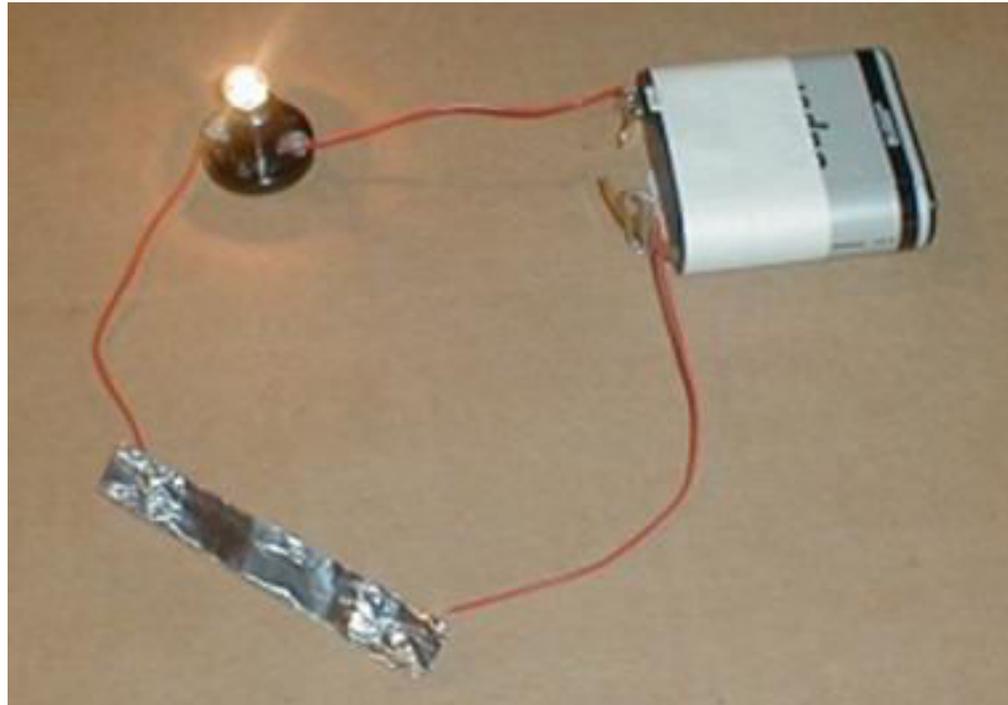
- K_{1C} facteur d'intensité de contrainte critique (unité : $\text{MPa} \cdot \text{m}$)

Rupture en cisaillement-flexion



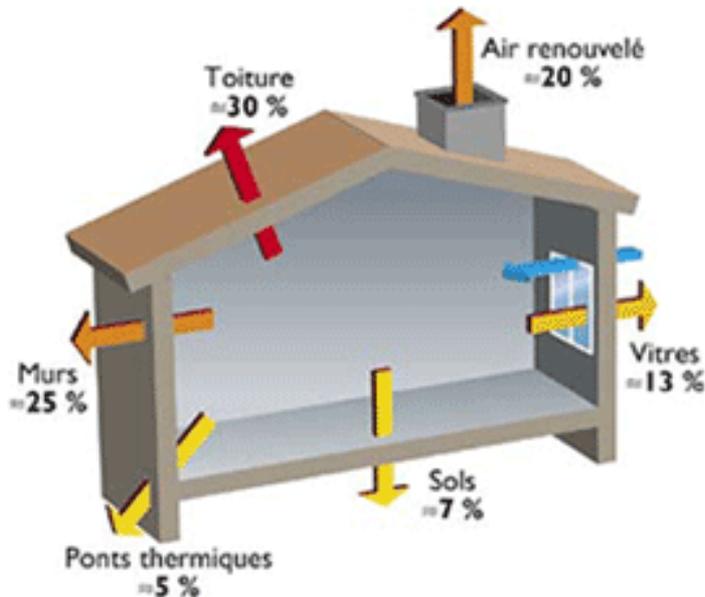
Les propriétés mécaniques des matériaux

Propriété	Définition
Conductibilité électrique	Capacité de laisser passer le courant électrique.



Les propriétés mécaniques des matériaux

Propriété	Définition
Conductibilité thermique	Capacité de laisser passer ou transmettre la chaleur.

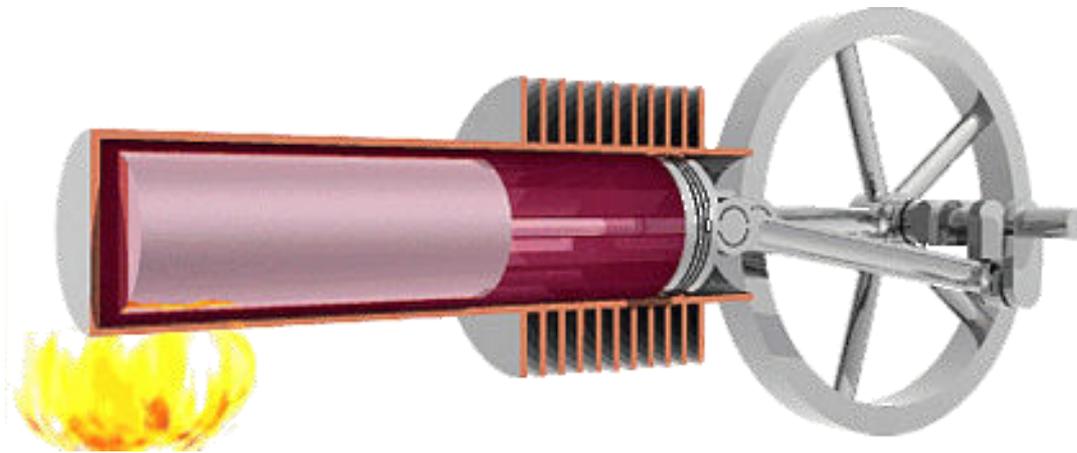


Pertes de chaleur d'une maison individuelle non isolée



Les propriétés mécaniques des matériaux

Propriété	Définition
Coefficient de dilatation thermique	Propriété caractérisant l'augmentation relative du volume d'un corps selon l'augmentation de la température.



Les propriétés mécaniques des matériaux

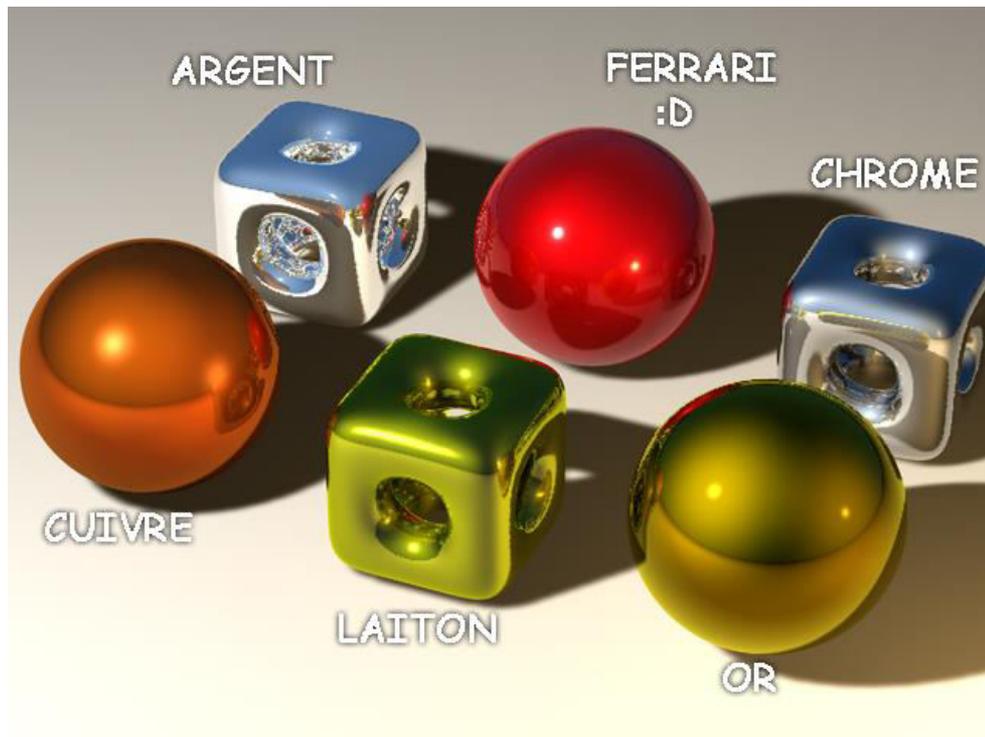
Propriété	Définition
Résistance à la corrosion	Capacité de résister à l'action de fumées, de sels et de produits chimiques qui provoquent de la (rouille).



Les types de matériaux

Les principales familles de matériaux

Familles	Particularités	Exemples
Métaux	Un métal ou un alliage	Fer, aluminium, bronze...



Les types de matériaux

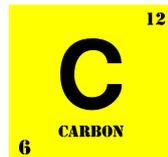
Les métaux et leurs alliages

Un **alliage** est un mélange homogène de plusieurs métaux.

Il permet d'obtenir des propriétés mécaniques plus intéressantes que si un métal était utilisé seul.

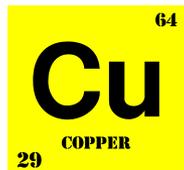


+

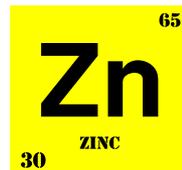


=

acier

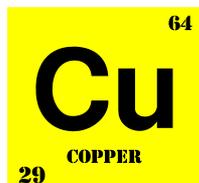


+



=

laiton



+



=

bronze



Les types de matériaux

Les principales familles de matériaux

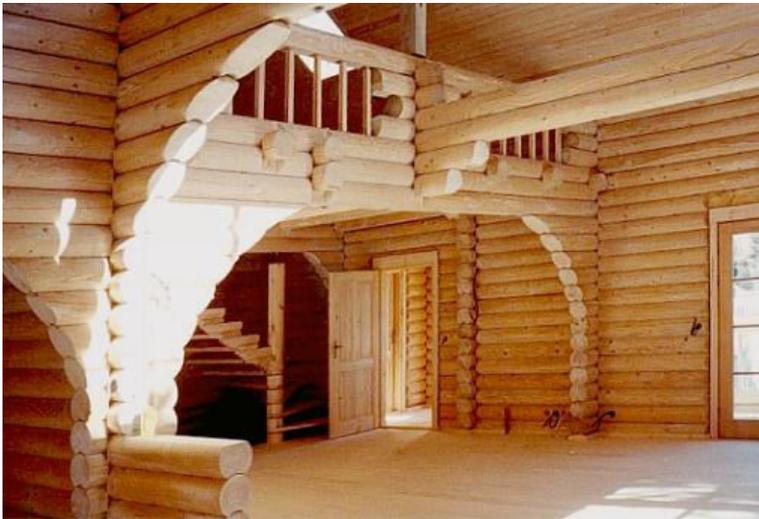
Familles	Particularités	Exemples
Matières plastiques	Matériaux organiques de synthèse	P.V.C., A.B.S., nylon...



Les types de matériaux

Les principales familles de matériaux

Familles	Particularités	Exemples
Matériaux organiques	Se trouvent dans la nature, animale ou végétale.	Bois, papier, cuir, laine, coton...



Les types de matériaux

Le bois et les bois modifiés

Le **bois** est un matériau ligneux (fibreux) dont on a enlevé l'écorce.

On peut classer les types de bois en deux catégories: bois durs (feuillus) et bois mous (résineux).

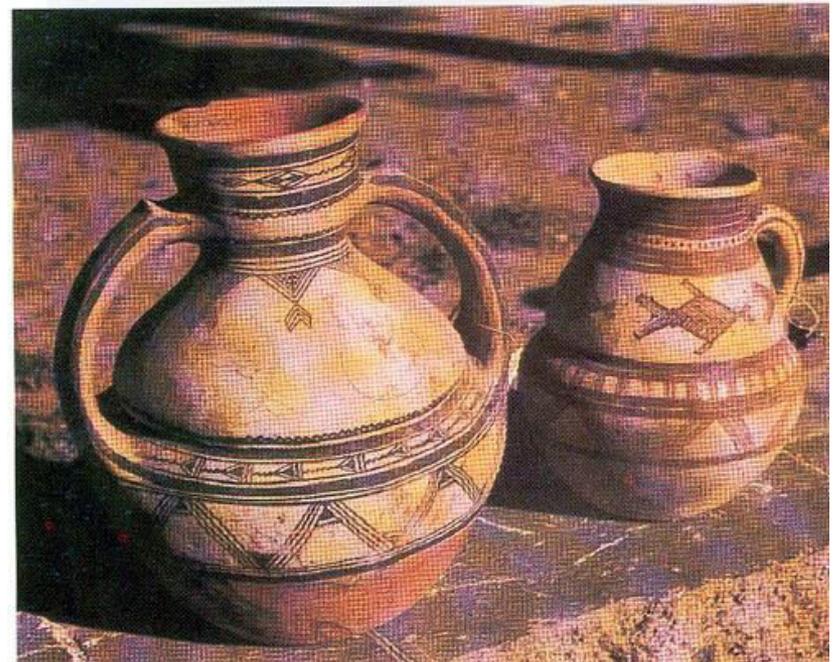
On appelle **bois modifiés** les bois auxquels on a ajouté d'autres substances pour obtenir un matériau aux propriétés différentes de celles du bois naturel.



Les types de matériaux

Les principales familles de matériaux

Familles	Particularités	Exemples
Céramiques	Corps inorganiques cristallisés.	Porcelaine, verre, brique...



Les types de matériaux

Les principales familles de matériaux

Familles	Particularités	Exemples
Composites	Mélanges d'au moins deux matériaux.	Fibre de carbone, ...



1.2 Caractéristiques mécaniques des matériaux

- Modules d'élasticité

ε γ

E
G

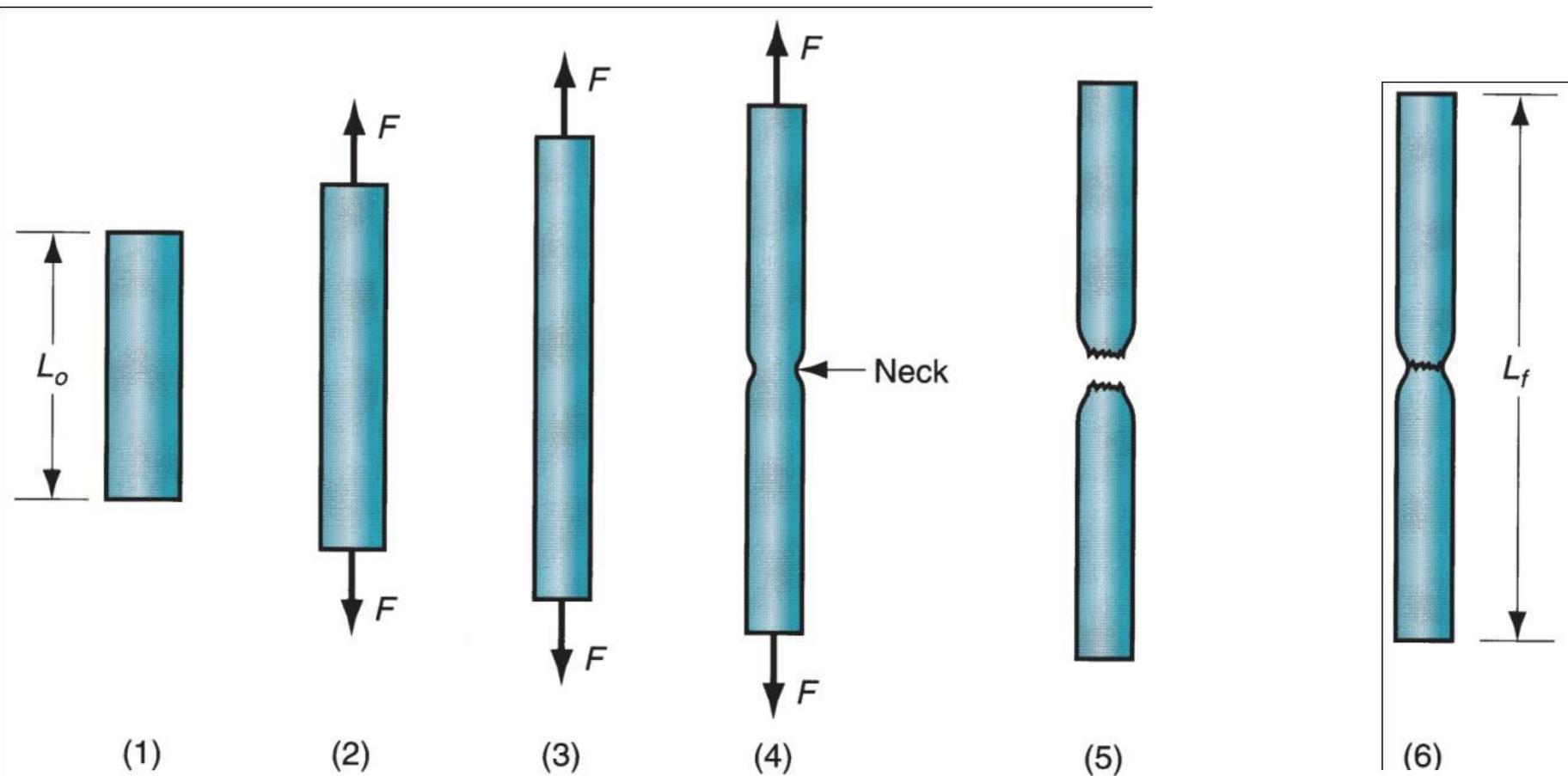
τ
 σ

Module de Young E

Pente de la courbe contrainte - déformation dans le domaine élastique en traction pure ou en flexion (unité : Pa)

Module de Coulomb G

Pente de la courbe cisaillement - glissement dans le domaine élastique en torsion pure (unité : Pa)



(1) sans charge;

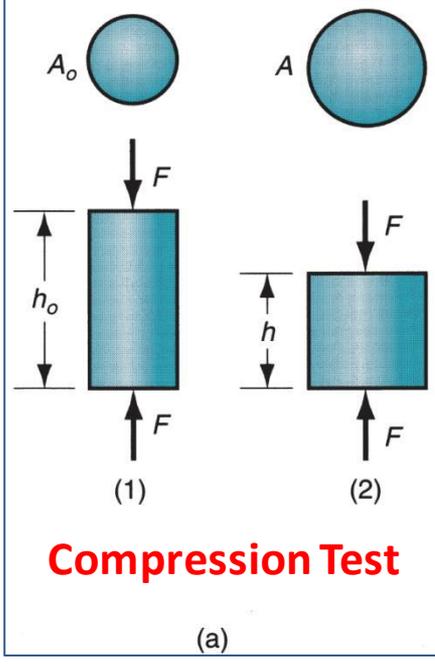
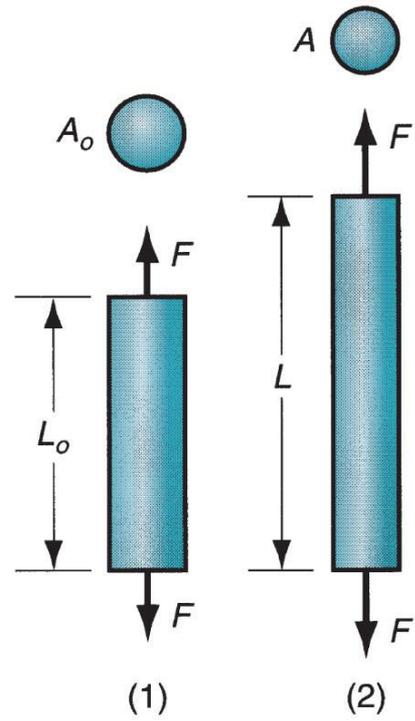
(2) allongement uniforme et réduction de surface;

(3) charge maximale;

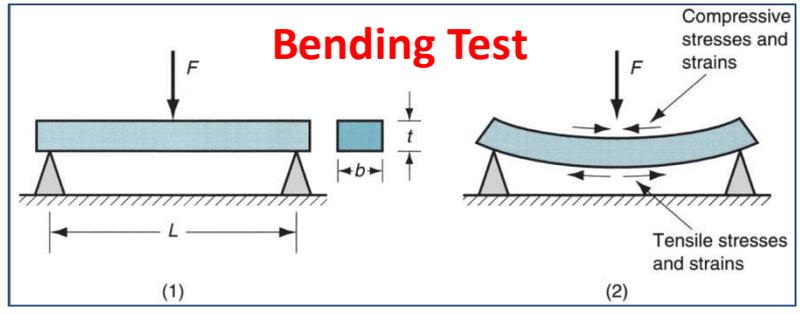
(4) rétrécissement;

(5) fracture;

(6) remonter les morceaux pour mesurer la longueur finale

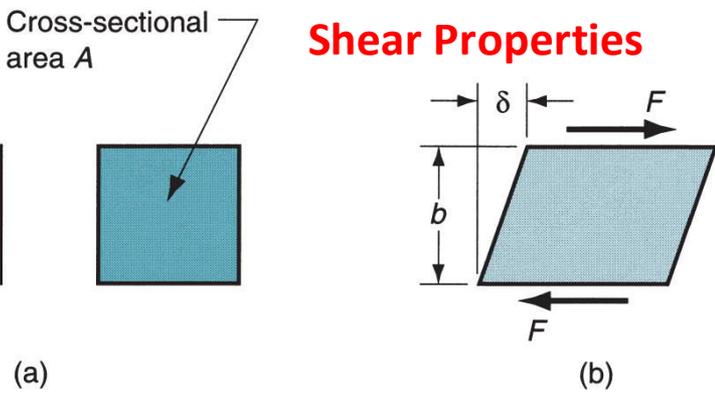
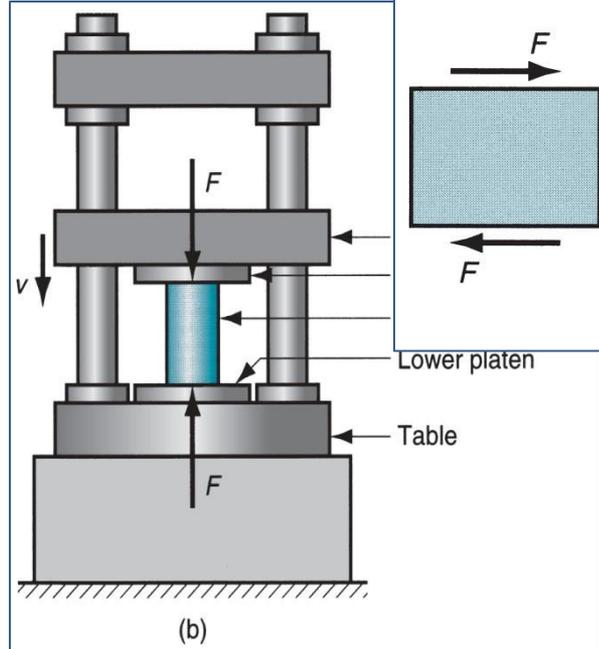
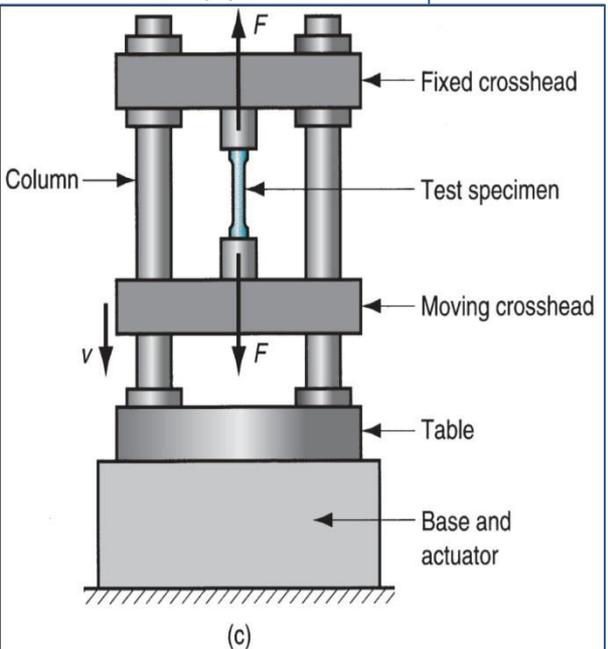


Compression Test



Bending Test

Tensile Test



Shear Properties

TABLE 6-3 ■ Elastic properties and melting temperature (T_m) of selected materials

Material	T_m (°C)	E (psi)	Poisson's ratio (μ)
Pb	327	2.0×10^6	0.45
Mg	650	6.5×10^6	0.29
Al	660	10.0×10^6	0.33
Cu	1085	18.1×10^6	0.36
Fe	1538	30.0×10^6	0.27
W	3410	59.2×10^6	0.28
Al ₂ O ₃	2020	55.0×10^6	0.26
Si ₃ N ₄		44.0×10^6	0.24

Mechanical Properties of DM

- **Mechanical Properties:**
 1. Stress
 2. Strain

- **Mechanical Properties based on elastic deformation:**
 1. Stress- Strain diagram/ curve
 2. Modulus of elasticity
 3. Poisson's ratio
 4. Flexibility
 5. Resilience

- **Strength Properties:**

1. Proportional limit
2. Elastic limit
3. Yield strength
4. Diametral tensile strength
5. Flexural strength
6. Fatigue strength
7. Impact strength

Propriétés de résistance:

Limite proportionnelle

Limite élastique

Limite d'élasticité

Résistance à la traction diamétrale

Résistance à la flexion

Résistance à la fatigue

La résistance aux chocs

- **Other Mechanical properties:**

1. Toughness
2. Fracture toughness
3. Brittleness
4. Ductility and Malleability
5. Hardness

Autres propriétés mécaniques:

Dureté

Résistance à la rupture

Fragilité

Ductilité et malléabilité

Dureté

Propriétés mécaniques:

contrainte

déformation

Propriétés mécaniques basées sur la déformation élastique:

Diagramme / courbe : contrainte-déformation

Module d'élasticité

Le coefficient de Poisson

La flexibilité

Résistance

● **Mechanical Properties:**

1. Stress

2. Strain

● **Mechanical Properties based on deformation:**

1. Stress- Strain diagram/ curve

2. Modulus of elasticity

3. Poisson's ratio

4. Flexibility

5. Resilience

Quel est l'allongement d'un fil de 1 m de long et de section $S = 1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$ accroché au plafond, au bout duquel on fait pendre une masse de 1 kg ?

- Contrainte : $\sigma = mg/S = (1 \times 9,8)/10^{-6} \simeq 10^7 \text{ Pa}$.

- Allongement : $\Delta l = \varepsilon \times l_0 = \sigma l_0/E$.

- Fil de nylon : $\Delta l = 1 \text{ cm}$

- Fil de caoutchouc : $\Delta l = 5 \text{ m}$! On est sorti du domaine linéaire \rightarrow Hooke n'est pas valable.

- Fil d'acier : $\Delta l = 50 \mu\text{m}$.

- Tout comme E et ν , K est caractéristique du matériau.
- K est fonction de E et de ν .
- 2 grandeurs parmi K, E et ν suffisent pour caractériser l'élasticité du matériau.

$\nu =$ Coefficient de poisson

$$\frac{\Delta h}{h} = -\nu \frac{\Delta l}{l}$$

$$-1 \leq \nu \leq 1/2$$

K : module de compression uniforme (*bulk modulus*)

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$



Les facteurs qui influencent la capacité d'une structure

Résistance

Supporter et transmettre les charges

Rigidité

Eviter les déformations excessives

Stabilité

Conserver l'intégrité géométrique

Endurance (Fatigue)

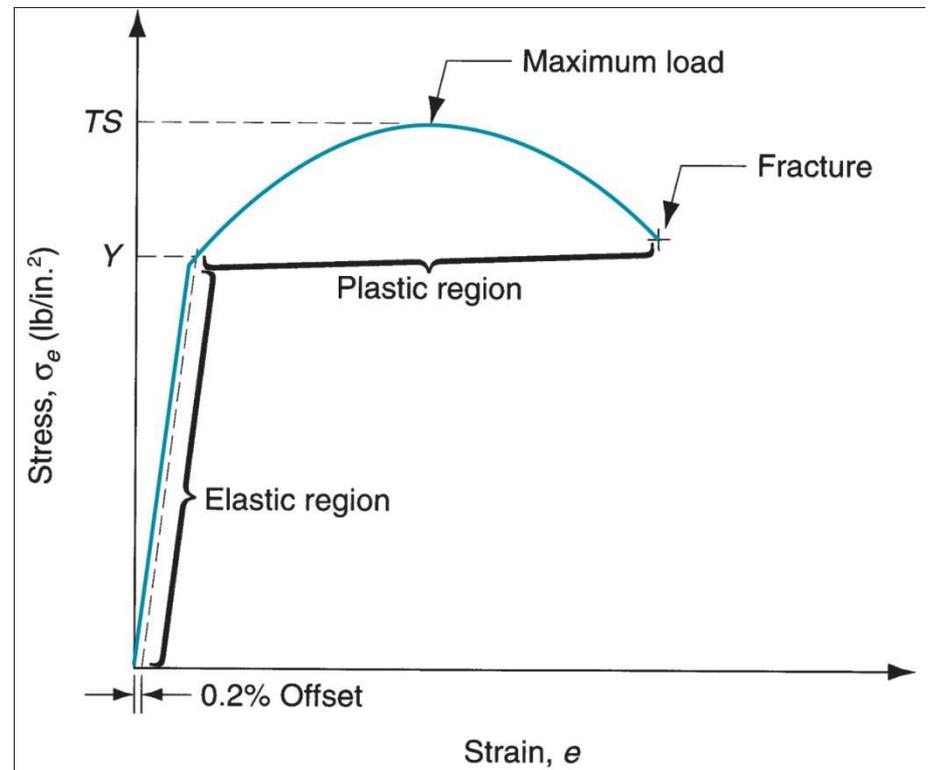
Supporter de multiples cycles de chargement

Ductilité (Résilience)

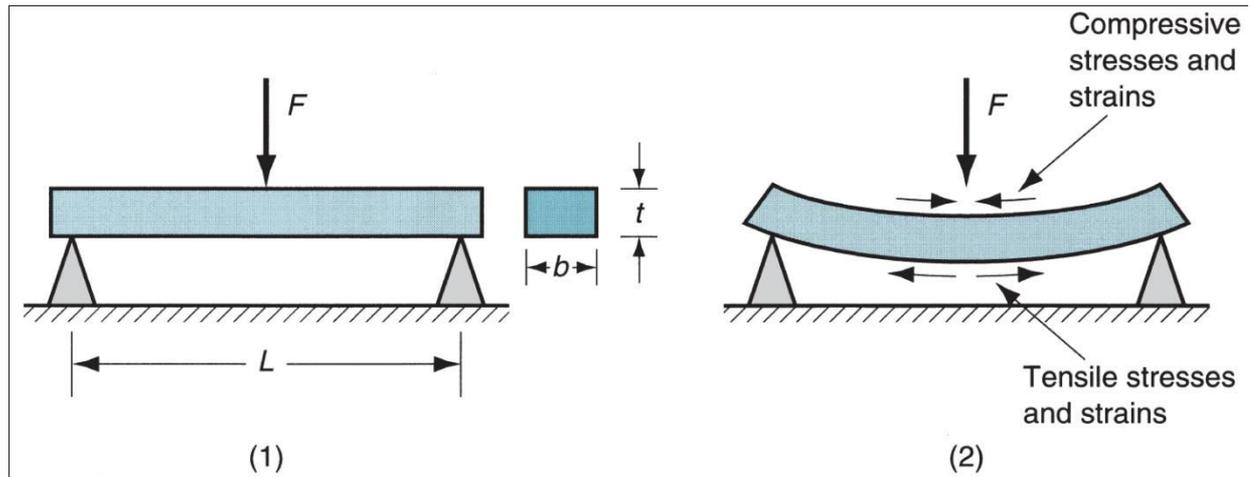
Déformation au-delà de la limite élastique sans rupture fragile

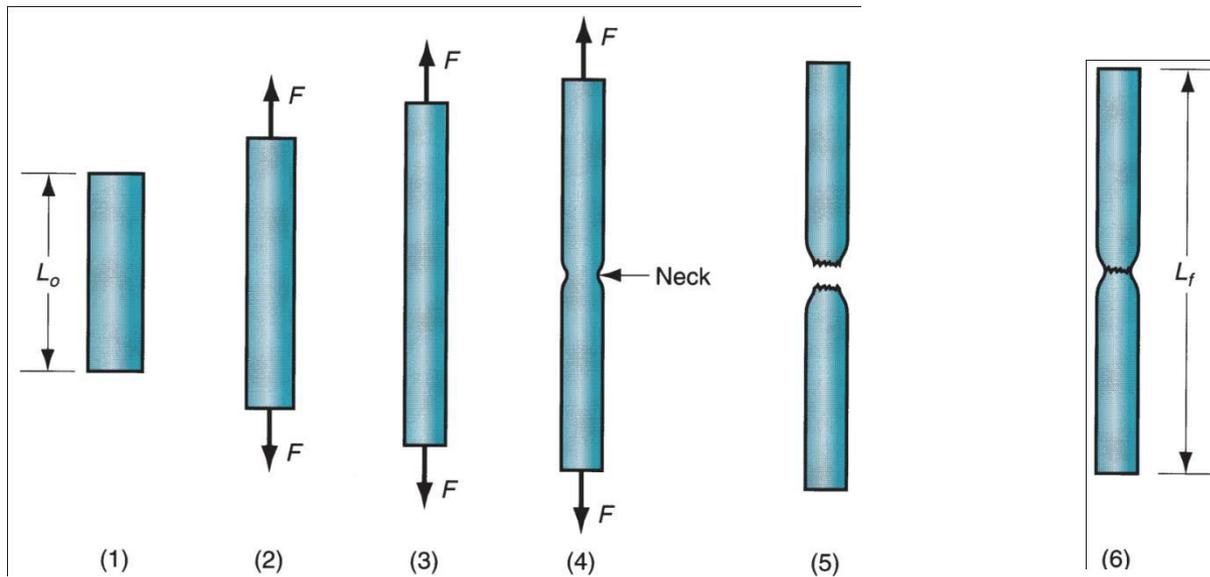
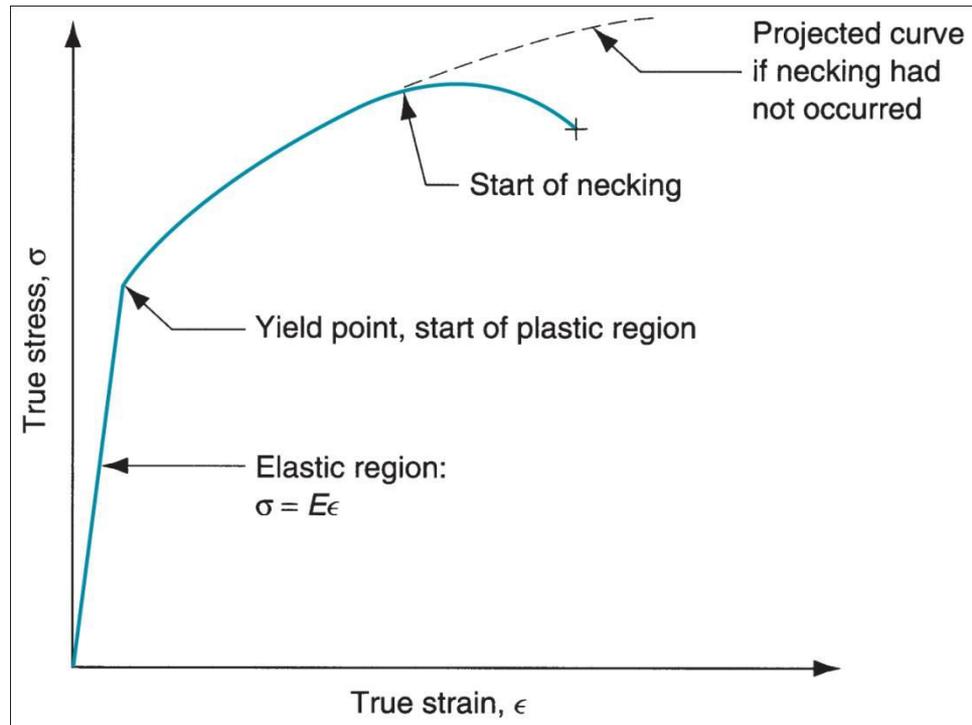
Courbe: Contrainte - Déformation

- Deux régions:
 1. Élastique
 2. Plastique



C. Essai de Flexion



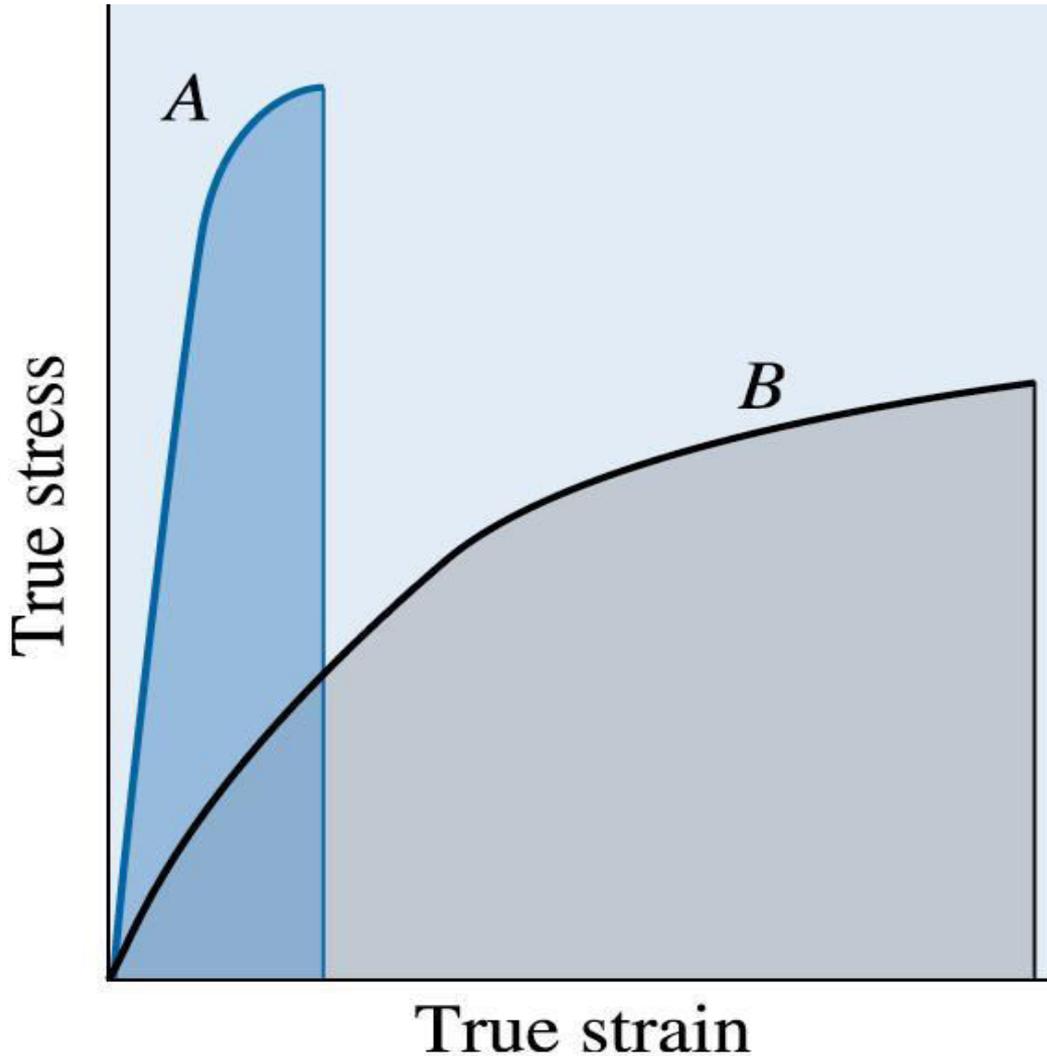


Les propriétés Mécaniques

Dur	Hard
Mou	Soft
Rigide	Stiff
Flexible	Compliant
Résistant	Strong
Faible	Weak
Fragile	Brittle
Ductile	Ductile
Flexure	Bending
Cisaillement	Shear
Flambage	Buckling
Ténacité	Toughness
Résilience	Resilience

Questions?

Lequel des 2 matériaux A ou B a le plus de



Rigidité

Ductilité

Ténacité

Malléabilité

Fragilité

Élasticité

Résilience

Dureté

AUTRES CARACTERISTIQUES

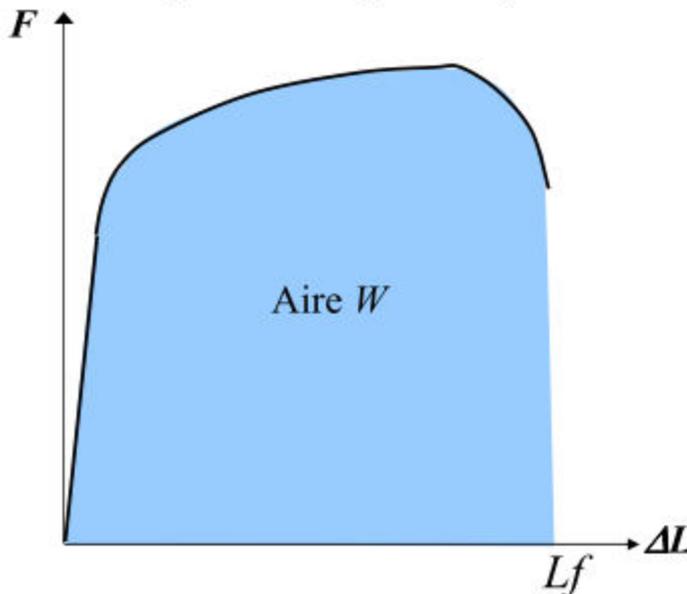
- **Ductilité**

Propriété grâce à laquelle un matériau peut se déformer de façon permanente avant de se rompre (*aptitude des matériaux à la déformation plastique*). C'est un atout important pour la mise en forme des matériaux.

• Ténacité

La ténacité : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture. Elle caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de fissures

L'aire sous la courbe de traction $F(\Delta L)$ représente l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette

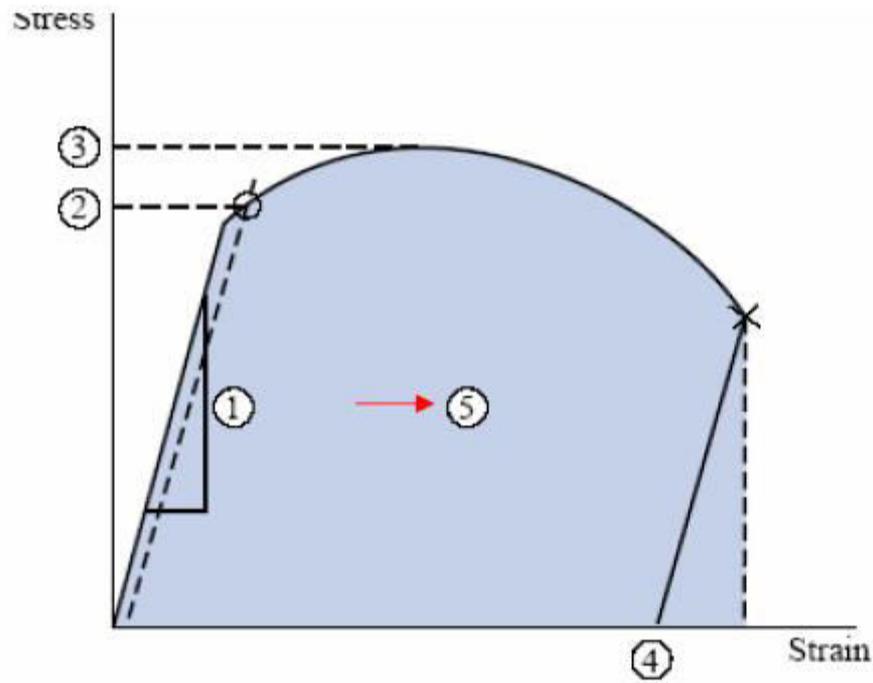


$$W = \int_0^{L_f} F(\Delta L).dL$$

Ténacité

- **Toughness**

Toughness is the ability of a material to absorb energy without rupturing. It is usually measured by the energy absorbed in a notch impact test, but the area under the tensile stress-strain curve is also a measure.



II. Propriétés Mécaniques

Qualités mécaniques attendues

Rigidité : *déformation réversible faible par rapport au chargement appliqué (\neq souplesse)*

Résistance aux efforts :

(a) rupture : *aptitude à ne pas se rompre sous l'effet d'un chargement*

(b) plastification : *aptitude à ne pas se déformer de manière irréversible sous l'effet d'un chargement*

Ductilité : *capacité à se déformer avant de rompre*

Résilience : *capacité à emmagasiner de l'énergie au cours d'une déformation élastique*

Ténacité : *capacité à absorber de l'énergie au cours d'une évolution irréversible (plastification, rupture)*

Résistance à la fatigue : *capacité à supporter des sollicitations mécaniques cycliques plus ou moins régulières, alternées, répétées...*

Résistance aux chocs : *capacité à absorber de l'énergie lors d'une rupture par choc*

Dureté : *résistance à l'enfoncement d'un pénétrateur (liée à la résistance à la plastification)*

Résistance au fluage : *aptitude à durer sous l'effet d'une charge imposée à température élevée*

Résistance à la propagation de fissures :

sensibilité à l'effet d'entaille

Amortissement :

*incapacité à restituer au cours de la relaxation des sollicitations qui lui sont appliquées
toute l'énergie emmagasinée lors de la mise en charge*

Résistance à l'usure :

résistance à l'enlèvement de matière par frottement (couple de matériaux)

Corrosion sous contrainte :

couplage de deux sollicitations (chimique et mécanique)