

Partie V: Propriétés mécaniques des matériaux

Chapitre 14

Propriétés mécaniques

Pour beaucoup de matériaux, les propriétés mécaniques déterminent leurs applications potentielles.

Ce chapitre fournit une base de compréhension pour les propriétés mécaniques.

Définitions

Pour une traction (élongation d'une éprouvette)

La **contrainte** σ (N m^{-2}) est la charge F (force) sur la section initiale de l'éprouvette A :

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

La **déformation** ε est l'allongement ΔL sur la longueur initiale de l'éprouvette L_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Le **module de Young** (module d'élasticité) est une mesure de la dureté d'un matériau:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E$$

(La loi de Hooke)

Le **coefficient de Poisson**, ν , défini comme le ratio de la déformation dans un sens transversal (2) sur la déformation dans le sens d'élongation (1), mesure la variation du volume suite à la déformation:

$$\Delta V/V = \varepsilon_1(1-2\nu)$$

$$\nu = - \frac{\Delta l_2/l_2}{\Delta l_1/l_1}$$

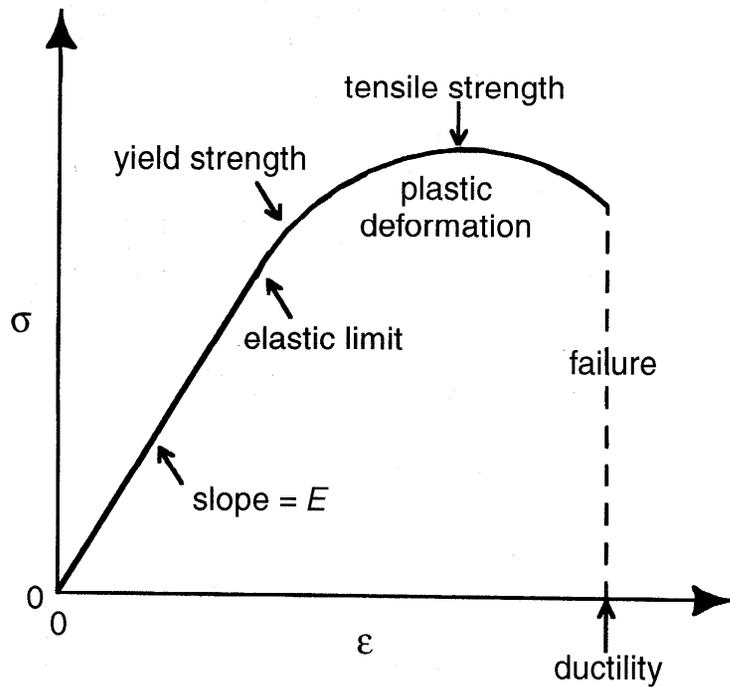


Figure 14.1. The stress (σ)–strain (ϵ) relationship for increasing strain for a ductile material. At low stress, the material is elastic and obeys Hooke’s law with a proportionality of E , Young’s modulus. The yield strength is defined as the stress at which the strain is 0.2% greater than predicted by Hooke’s law. Plastic deformation, in which the sample remains deformed even after the stress is removed, occurs beyond the yield strength. The tensile strength is the maximum value of the stress. Ductility is defined as percent elongation at failure = $100\% \times \epsilon_{\text{failure}}$.

La limite d'élasticité conventionnelle à 0.2% (yield strength) est la contrainte correspondant à une déformation plastique de 0.2%.

La résistance à la traction (tensile strength) est la contrainte maximale atteinte.

L'allongement à la rupture (ductility) est la déformation maximale atteinte.

La déformation élastique est réversible alors que la déformation plastique est irréversible.

La ténacité (résistance) est l'énergie requise pour la rupture (aire sous la courbe)

TABLE 14.1.
Typical Values of Tensile Strength and Young's Modulus (E)
for Various Materials at Room Temperature

Material	Tensile strength/MPa	E /MPa
Diamond	1.05×10^6	1.2×10^6
Kevlar	4000	1.8×10^5
High-strength carbon fiber	4500	2×10^5
High-modulus carbon fiber	2500	2×10^5
High-tensile steel	2000	2×10^5
Superalloy	1300	2×10^5
Titanium	1200	1.2×10^5
Spider webs (drag line)	1000	1×10^4
Aluminium	570	7×10^4
Bone	200	2×10^4
Nylon	100	3×10^3
Rubber	100	≈ 7
Lexan	86	2.4×10^3
Wood	80	3×10^4

TABLE 14.2.
Poisson's Ratio for Various Materials
at Room Temperature

Material	ν
Fe	0.17
TiC	0.19
borosilicate glass	0.2
Al_2O_3	0.26
W	0.28
carbon steel	0.3
Al	0.33
Cu	0.36
Pb	0.4
Nylon 66	0.41

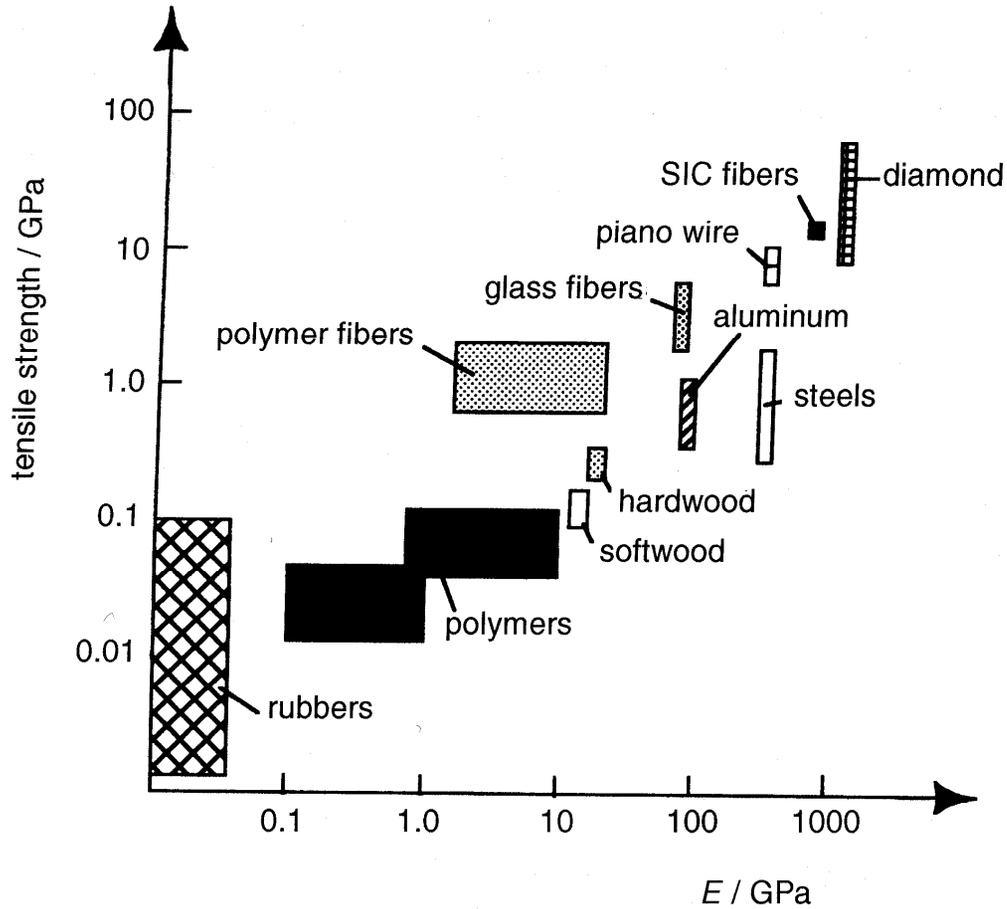


Figure 14.2. Tensile strength and Young's modulus ranges for a number of types of materials.

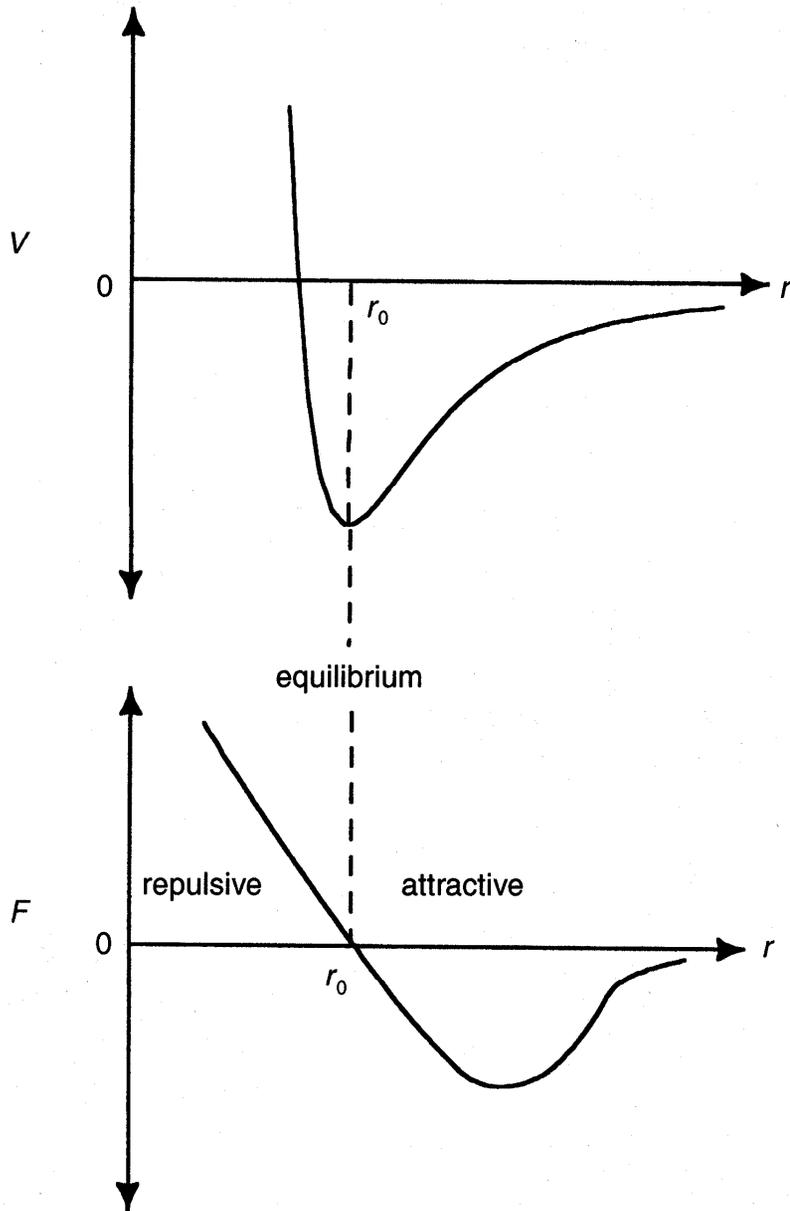


Figure 14.3. An intermolecular potential, $V(r)$, as a function of interatomic distance, r , leads to a force–separation relationship, $F(r)$, which can be used to deduce the elastic portion of the stress–strain relationship for a material (i.e., below its elastic limit). The intermolecular separation marked r_0 corresponds to the equilibrium position ($F = 0$).

La limite élastique peut être interprétée en termes de l'énergie potentielle inter-atomique.

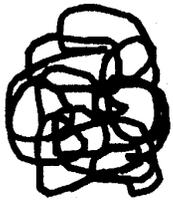
$$F = - \frac{dV}{dr}$$

$$E = \frac{1}{r_0} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \right)_{r=r_0}$$

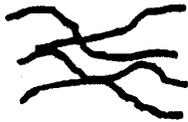
Le module de Young dépend de la courbure du minimum potentiel.

Élasticité et des propriétés liées

Beaucoup de matériaux ayant un faible module de Young sont élastiques. Les polymères (élastomères) sont un cas représentatif.



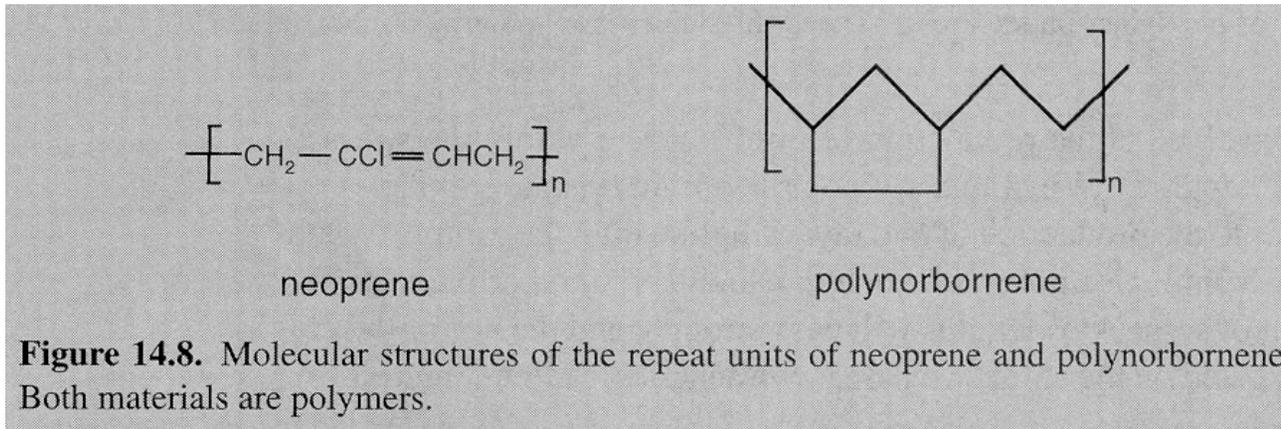
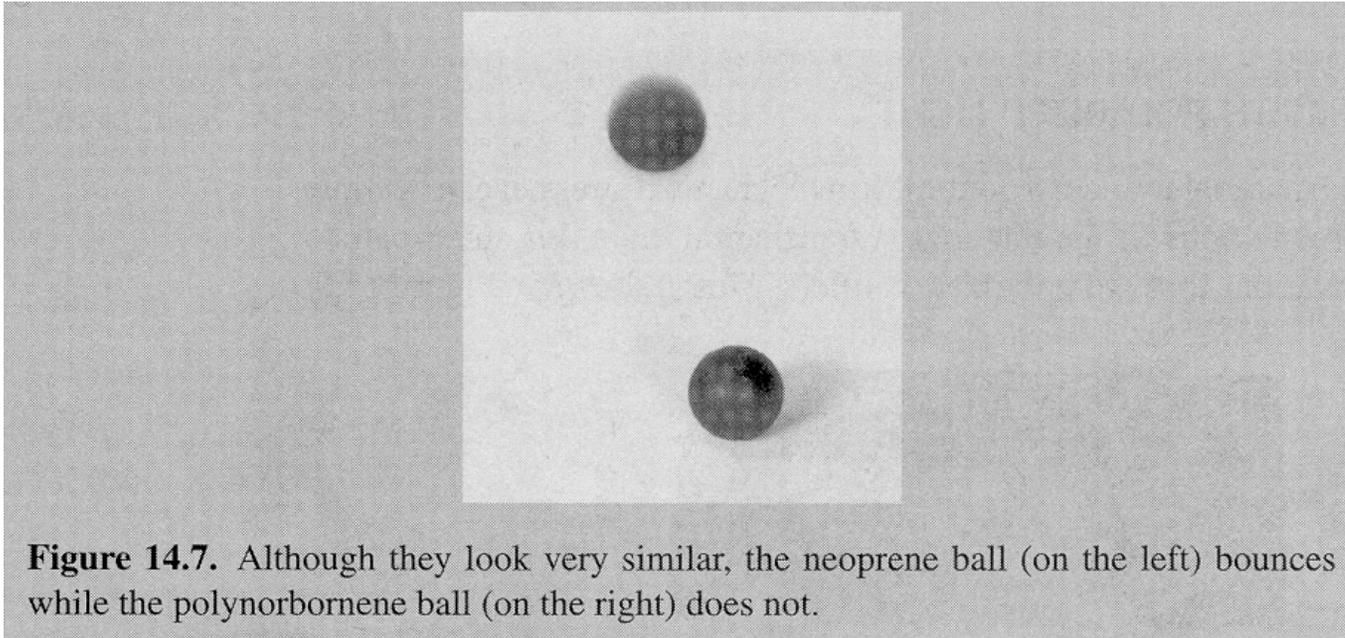
coiled



stretched

Figure 14.4. Uncoiling of an elastic polymer takes relatively little energy because the interatomic distances are not affected much.

Une diminution de l'entropie est à l'origine de la grande élasticité des polymères.



Le néoprène est un élastomère et le polynorbornène ne l'est pas (plus rigide et contient du liquide).

1) Le module de Young E est lié à la vitesse du son v par:

$$v = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

Un matériau de haut module et de faible densité peut produire une grande vitesse du son.

2) Dans le cas d'une compression élastique:

$$P = Kc$$

$$K = -V(dP/dV)$$

P est la pression hydrostatique; K est le module isotherme et c est la compression (changement en dimension/dimension originale) .

Au-delà de la limite élastique

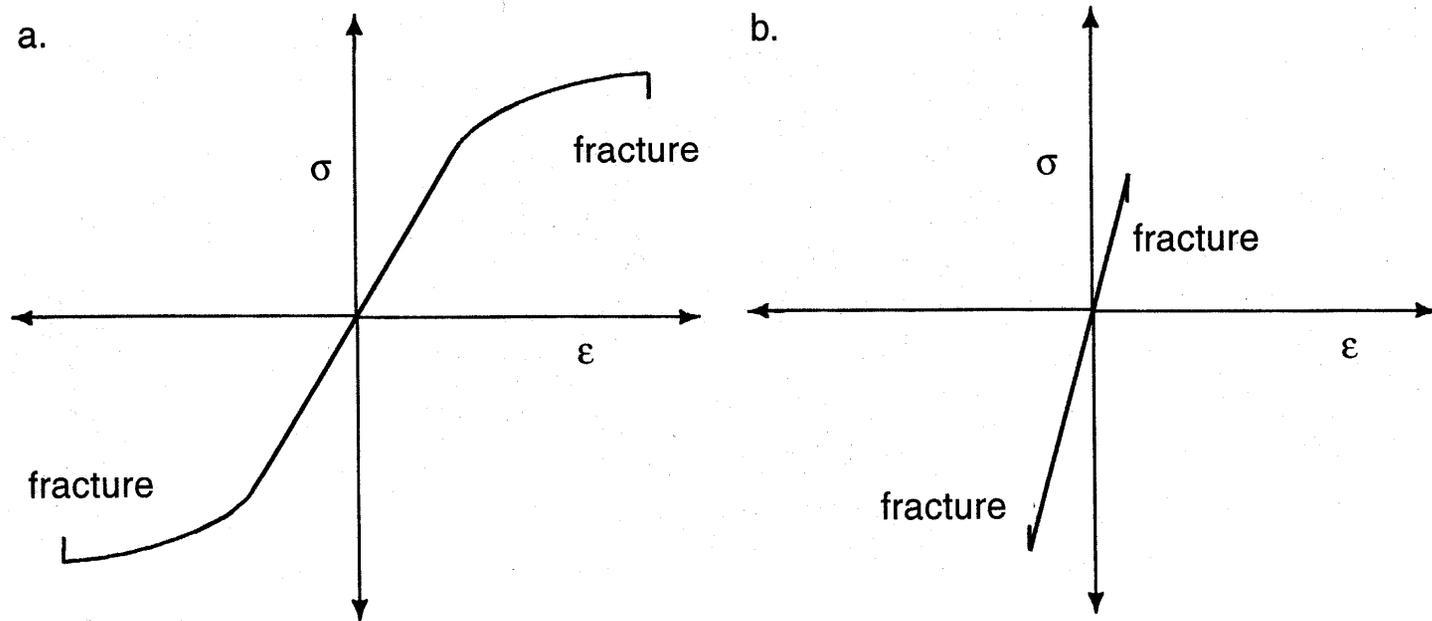


Figure 14.9. Stress–strain relations, including compression ($\epsilon < 0$) and tension ($\epsilon > 0$), for (a) a ductile material and (b) a brittle material. The brittle material shown is stronger in compression than in tension.

Dépassant la limite élastique, un matériau cassant casse et un matériau ductile subit une déformation plastique (ex. un polymère cristallin en-dessous et au-dessus de sa température de transition vitreuse T_g).

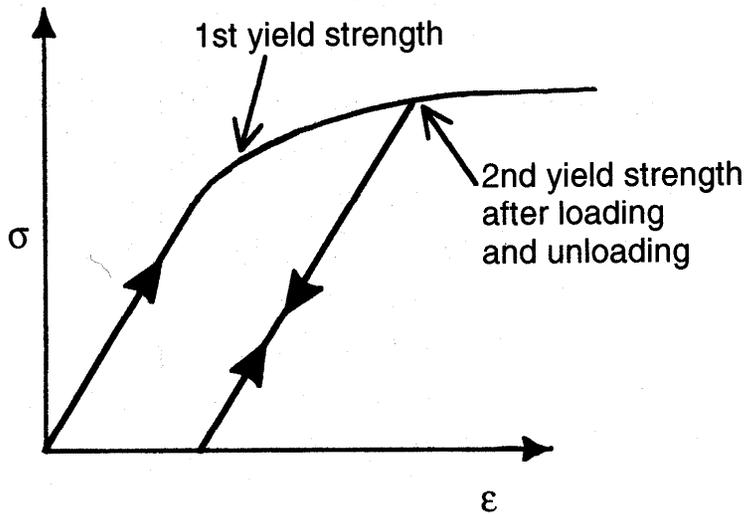


Figure 14.10. The application of stress beyond the elastic limit of a ductile material can lead to permanent deformation, as shown by the hysteresis on removal of a high stress. The increase in yield strength after loading and unloading is due to work hardening.

L'augmentation de la résistance à la traction est due au durcissement du matériau.

L'induction d'une déformation plastique (permanente) conduit à l'apparition d'une boucle d'hystérésis dont la région est proportionnelle à l'énergie absorbée par le matériau.

Au-delà de la limite élastique, la vitesse à laquelle la charge est appliquée (temps d'observation) devient importante – viscoélastique.

Défauts et dislocations

Certaines propriétés mécaniques sont directement liées aux défauts présents dans le matériau (type et position).

Défauts sans dimension:
défauts ponctuels

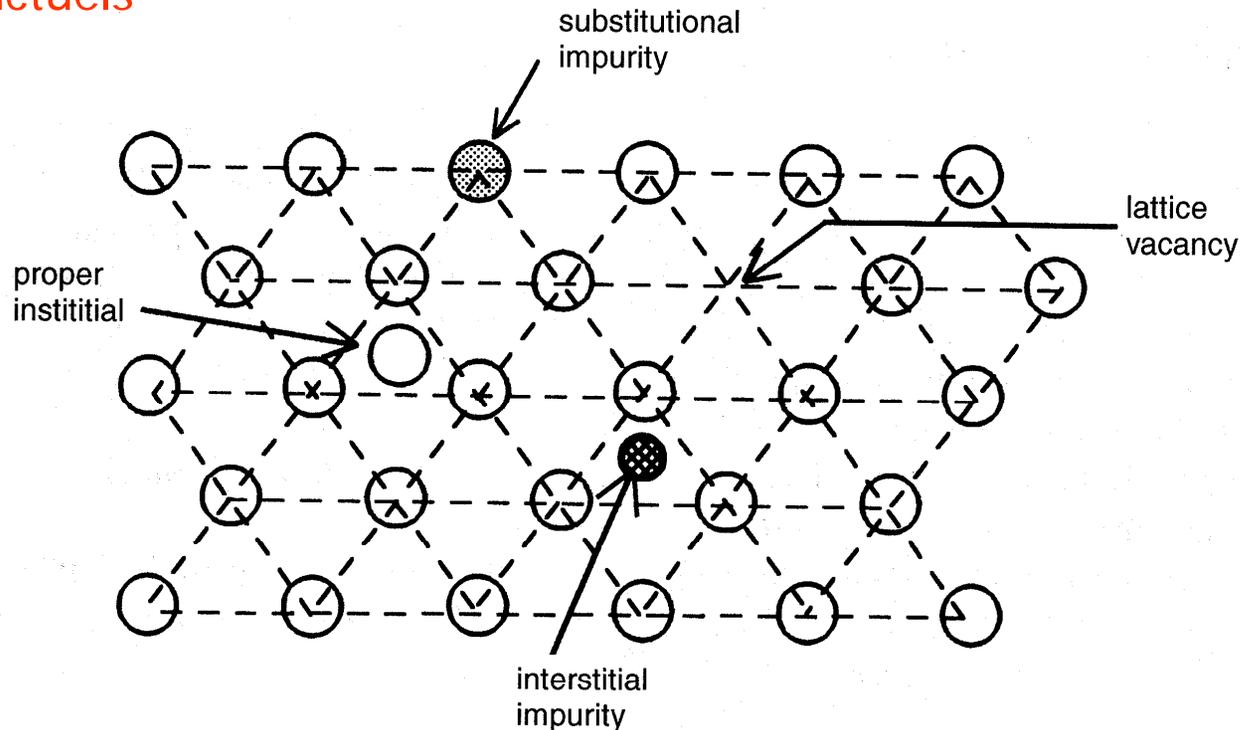


Figure 14.12. Point defects in an otherwise periodic monatomic crystal. A **lattice vacancy** is the absence of an atom at a lattice site; a **substitutional impurity** indicates the presence of an impurity atom at a lattice site; an **interstitial impurity** indicates the presence of an impurity atom at a location other than a lattice site; a bulk atom at a position other than at a lattice site is called a **proper interstitial**.

Défauts à une dimension: défauts linéaires

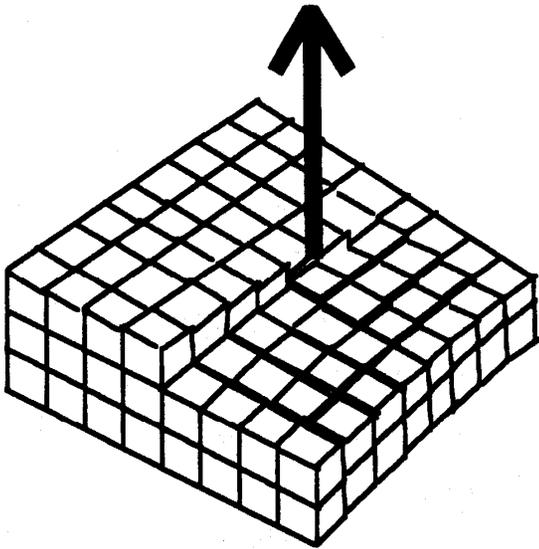


Figure 14.13. A **screw dislocation** in a crystal. This defect arises when atoms spiral around an axis, shown here with an arrow. Note that at the front of the crystal there is a step, but there is no step at the back edge.

Dislocation-vis

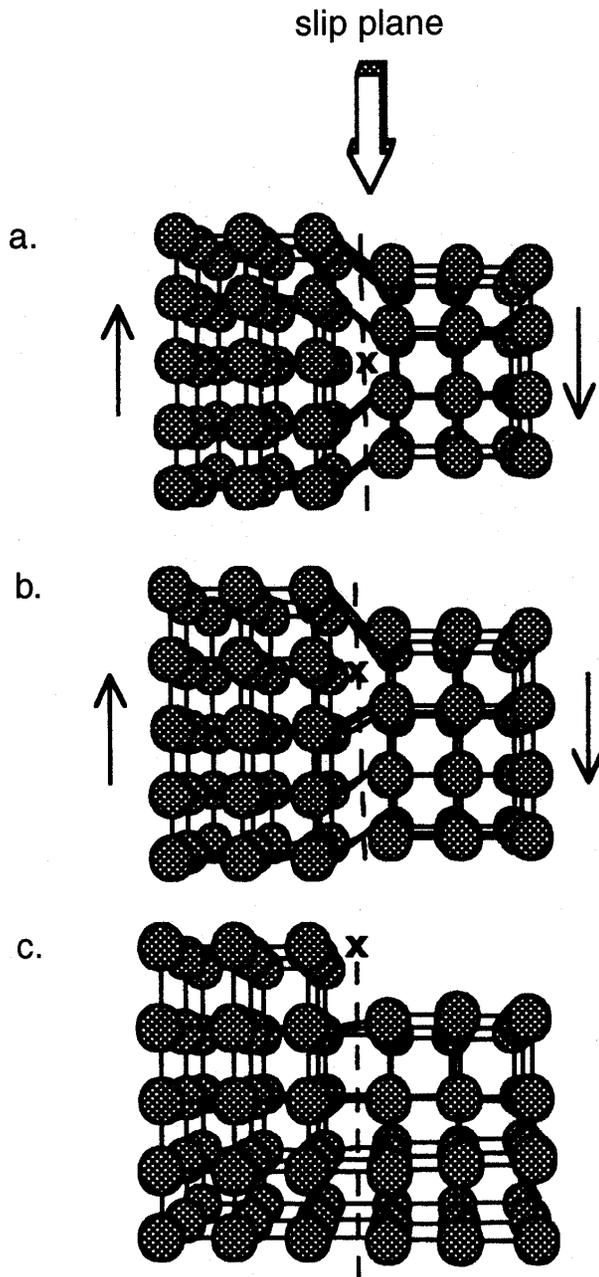


Figure 14.14. The motion of an **edge dislocation** (a layer of extra atoms within the crystal structure), indicated by x, from (a) start to (b) intermediate time to (c) finish. In the process of moving, bonds are broken and re-formed along the **slip plane** (the plane along which the slippage takes place, shown here as a dashed line). Arrows indicate that one side of the crystal is moving with respect to the other. This process is the basic way in which ductile materials rearrange bonds between atoms.

Sous l'effet d'une charge mécanique, beaucoup de métaux se déforment à <1% de la résistance (strength) théorique en raison de la glissade facile des dislocations-coin.

Dislocation-coin

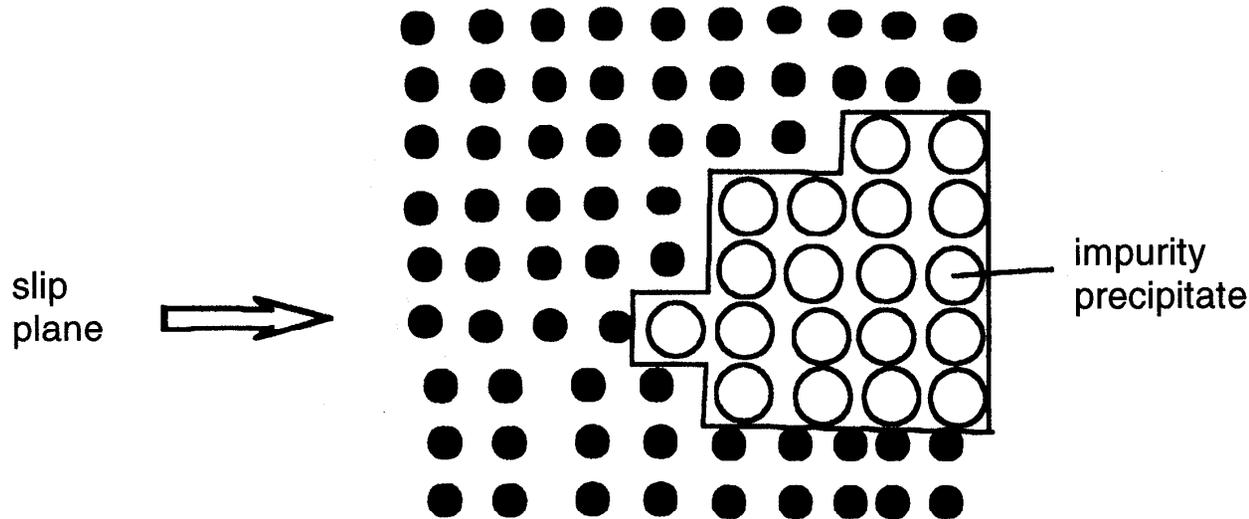


Figure 14.15. A dislocation associated with a slip plane can proceed no further when it encounters a grain boundary at an impurity precipitate, just as a wrinkle in a rug cannot move further along the rug when it encounters a piece of heavy furniture. The presence of the precipitate hardens the material. **Annealing** the material, i.e. heating it to a high enough temperature to mobilize impurity precipitates allowing them to become larger but fewer in number, will allow dislocations to move more easily and therefore annealing decreases the hardness of the material.

La présence des impuretés crée les *jointes de grains* (interface entre régions homogènes) qui peuvent arrêter la glissade des dislocations. Ceci a pour effet d'augmenter la dureté du matériau. La dureté peut être modifiée par un traitement thermique ou mécanique.

Propagation de fissure

Sous contrainte, une fissure dans un matériau peut se propager en dégageant de l'énergie (énergie de déformation, libération de contrainte) et dépensant de l'énergie (énergie de surface et énergie pour la réorganisation dans la région de fissure).

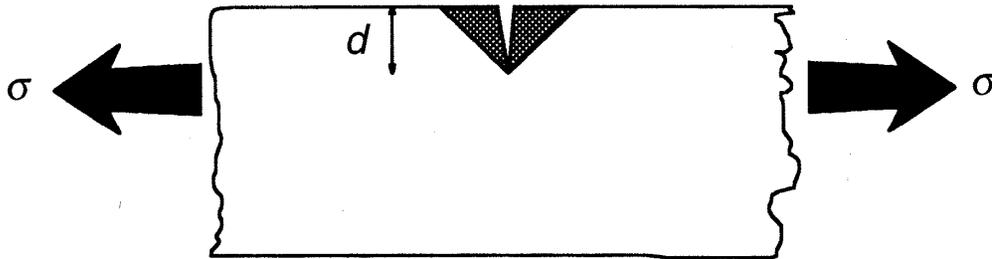


Figure 14.17. Schematic view of a crack of depth d in a material. Stress, σ , is released primarily in the shaded areas, which have a total area of $\approx d^2$.

$$\Delta U_{\text{stress}} = -ad^2$$

La constante $a \sim \sigma^2/E$; favorable à la propagation

$$\Delta U_{\text{surf}} = 2Wd$$

W est le travail de fracture; défavorable à la propagation

$W \sim 10^4\text{-}10^6 G_s$ (énergie de surface) pour les métaux ductiles

$W \sim 10 G_s$ pour les verres cassants

La longueur de Griffith:

$$L_G = 2WE/(\pi\sigma^2)$$

Quand la longueur de fissure est plus petite que L_G , la dépense en énergie de surface et de réarrangement interne dépasse le gain en énergie par la libération de contrainte, la fissure est stable. Par contre, la fissure se propage si sa longueur dépasse L_G .

La valeur de L_G varie considérablement d'un matériau à l'autre.

L'état de surface de la fissure influence la vitesse à laquelle elle se développe.

Les fibres cristallines fines (diamètre ~ microns) sont moins probables d'avoir des microfissures en surface et contiennent moins de dislocations; par conséquent, elles sont plus fortes mécaniquement.

Adhésion

L'adhésion des deux matériaux a lieu lorsque leurs atomes ou molécules sont en contact de manière tellement intime que les interactions intermoléculaires faibles (van der Waals) sont capables de renforcer le contact de façon collective.

Une adhésive doit d'abord mouiller le substrat, s'étendre sur la surface (tension de surface de l'adhésive est importante), puis écouler dans les microfissures et finalement se durcir (par évaporation du solvant ou polymérisation).

L'autre critère d'une bonne adhésive est la grande force d'interaction à la fois entre l'adhésive et le substrat (force adhésive), et à l'intérieur de l'adhésive (force cohésive); cette dernière est liée à la résistance du matériau utilisé.

Propriétés électromécaniques: L'effet piézoélectrique

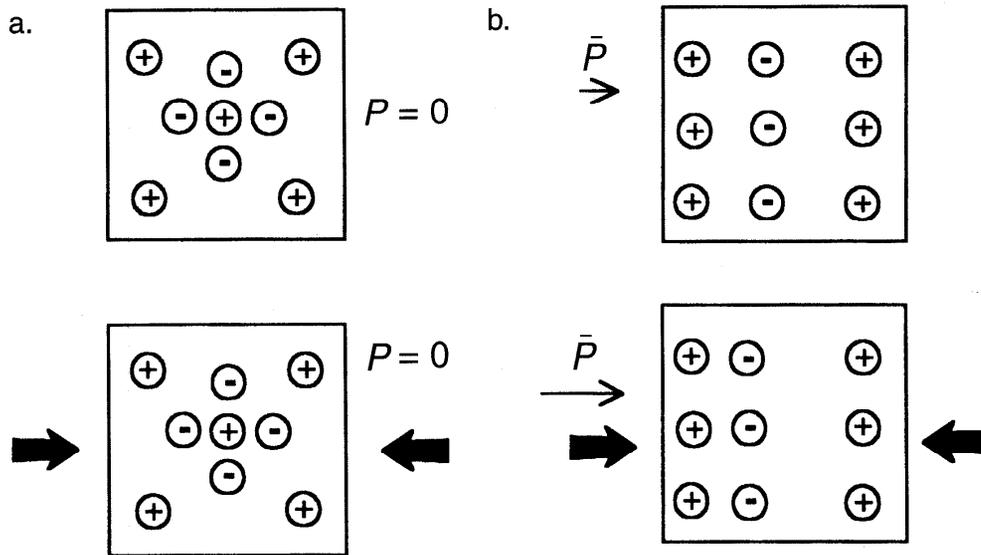


Figure 14.19. A schematic representation of (a) a centrosymmetric ionic crystal with and without an applied stress, showing no change in electric polarization, P , i.e., no piezoelectric effect and (b) a noncentrosymmetric ionic crystal with and without an applied stress, showing a change in electric polarization, P , on application of stress, i.e., the piezoelectric effect.

Un cristal ionique non-centrosymétrique (e.x. quartz) est piézoélectrique, c-a-d, une contrainte appliquée peut changer sa polarisation électrique (effet direct).

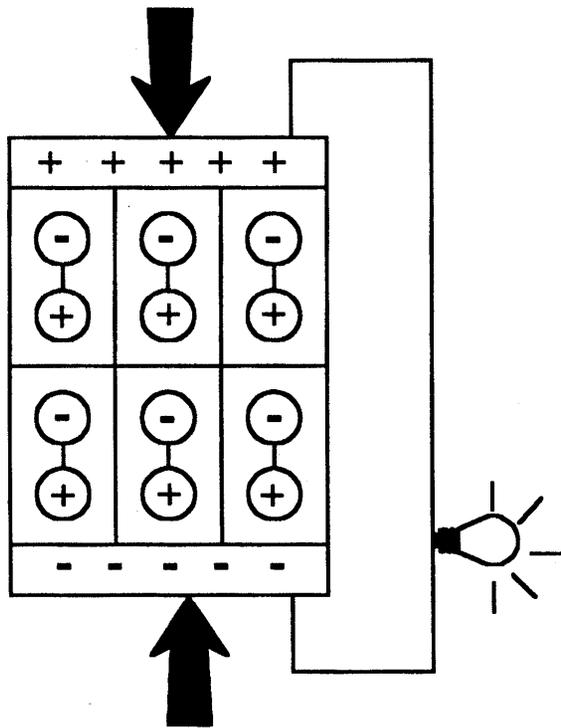


Figure 14.20. Schematic representation of a piezoelectric crystal in use in an LA Gear™ running shoe. Stress induces an electric field, which causes an electrical potential and a momentary burst of current and illumination of the light in the circuit.

Faisant partie d'un circuit électrique, l'effet piézoélectrique peut produire un potentiel électrique (un éclatement momentané).

Lorsqu'un champ électrique est appliqué à travers un cristal ionique, une déformation peut être induite (**effet inverse**), laquelle peut être utilisée pour un mouvement contrôlé par un champ électrique.

Sous l'effet d'un champ alternatif, la déformation (épaisseur d'un cristal) peut osciller avec la même fréquence (e.x. créer une vibration à la fréquence propre du quartz – référence de pulsation)