

# Nanomécanique

Alfonso San Miguel

Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et Nanostructures  
Univ. Lyon-1 et CNRS

Bat. Léon Brillouin, 4ème étage

**Objet de la mécanique des matériaux** : réponse d'un solide à un effort mécanique

**Objet de la Nanomécanique** : réponse des nano-objets ou des solides basés ou composés des nanosystèmes à un effort mécanique.

# Nanomécanique : mythes? réalité?



[Phys. Rev. Lett. 83, 5290](#)

(issue of 20 December 1999)

[Title and Authors](#)

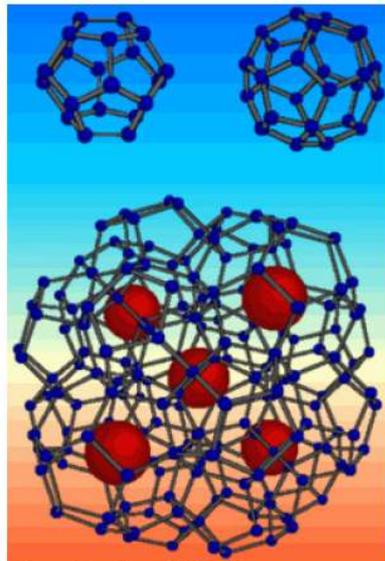
16 December 1999

## Hard as a Diamond?

Diamonds are almost as popular in industry as they are with brides-to-be. The hardest material on Earth is great for drills and other machine tools, but it's expensive to manufacture or mine. Evidence in the 20 December *PRL* suggests that a form of carbon made from fused spheres of 20 and 28 carbon atoms--relatives of the famous "buckyballs"--could be almost as hard. Since this form of carbon has not yet been synthesized, the team put the equivalent form of silicon under extreme pressure and found it almost as tough as the "diamond" form of silicon, which is structurally identical to real diamond. The experiments also imply that this obscure form of silicon is surprisingly stable under pressure.

One form of silicon clathrate is made from combinations of fullerene-type spherical cages of 20 and 28 silicon atoms each. Although the structure is complex and difficult to visualize, from the point-of-view of each silicon atom, it's very close to the silicon (or carbon) diamond structure: Each atom bonds with four neighbors arranged at roughly equal positions on an imaginary sphere around it. "We have a material that is locally similar to the diamond structure," says Alfonso San Miguel of the University of Lyon in France, "but the architecture is very different."

San Miguel and his colleagues were interested in silicon clathrate as a model of carbon clathrate, but they also wanted to explore the properties of this very low density form of silicon to learn more about this important element. San Miguel says the material may also be useful as a new semiconductor for electronic devices because of its favorable electronic properties.



Alfonso San Miguel/Univ. of Lyon

**Cages everywhere.** One form of carbon clathrate is made from "cages" of 20 and 28 atoms (above) and is shown here with sodium atoms placed at the centers of some of the cages. Carbon clathrate may be as hard as diamond.

**news**

Browse the archive

2005

August

 Show summaries

Go

**quick search**

Search the news archive.

[<< previous article](#)[News for August 2005](#)[next article >>](#)

### Diamonds are not forever

26 August 2005

Physicists in Germany have created a material that is harder than diamond. Natalia Dubrovinskaia and colleagues at the University of Bayreuth made the new material by subjecting carbon-60 molecules to immense pressures. The new form of carbon, which is known as aggregated diamond nanorods, is expected to have many industrial applications (*App. Phys. Lett.* 87 083106).

...read the wave™



Nano Research...Nano-Forschung  
Nano Onderzoek  
[www.nano-Tsunami.com](http://www.nano-Tsunami.com)

### The ESRF tests the hardest and least compressive material in the world

The tests at the ESRF have demonstrated the unique properties of a new material, the Aggregated Diamond Nanorods (ADNR). Synthesized recently by a team from the University of Bayreuth, this material has been identified as the hardest and least compressible material in the world. It could potentially replace diamonds in industry.

# Programme du cours

- Rappels sur les caractéristiques mécaniques des matériaux.
- Propriétés mécaniques des Nanomatériaux individuels.
- Propriétés mécaniques des Nanomatériaux assemblés et nanocomposites et leurs applications.
- Production de nanomatériaux par des procédés mécaniques.

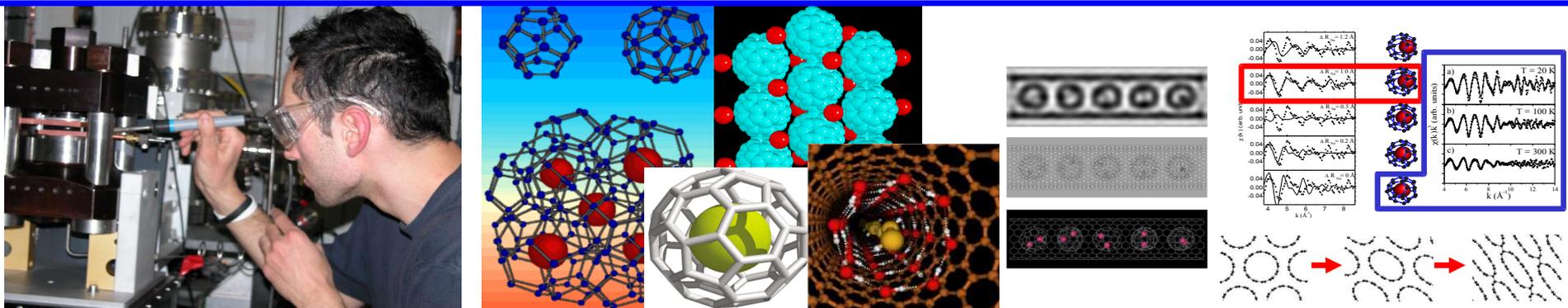
## BIBLIOGRAPHIE

J. M. Dorlot, J.-P. Baïlon et J. Masounave, *Des Matériaux*,  
Ed. Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.

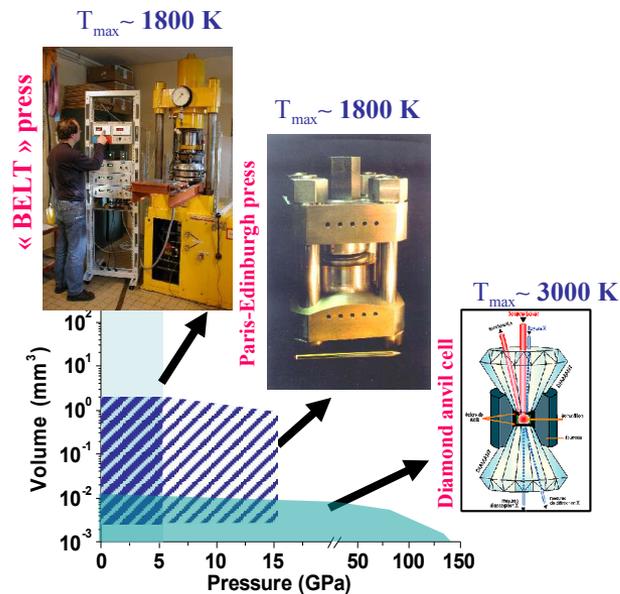
« Understanding Carbon Nanotubes » A. Loiseau, P. Launois, P. Petit, S. Roche,  
J.-P. Savetat (Eds.), Springer 2006.

# Nano-materials under extreme conditions

- **High Pressure** studies of physical properties of intercalated nanomaterials (nanotubes, peapods, fullerites, clathrates) :
  - Phase diagrams, mechanical properties, superconductivity, transport properties.
- **High Pressure – High Temperature** synthesis of new compounds
  - Silicon clathrates, new carbon based materials by transformation @ HP of precursors (doped nanotubes, intercalated graphite compounds, intercalated  $C_{60}$  fullerenes)



# High Pressure apparatus



## Nano-materials under extreme conditions

### Laboratory experiments + Large facilities exp.



X-ray: Lure, **ESRF**, SLS...  
Soleil, Diamond

Neutrons: ILL, ISIS

- Raman spectroscopy / HP
- Transport properties / HP
- X-ray diffraction / HP
- X-ray absorption / HP
- Neutron scattering

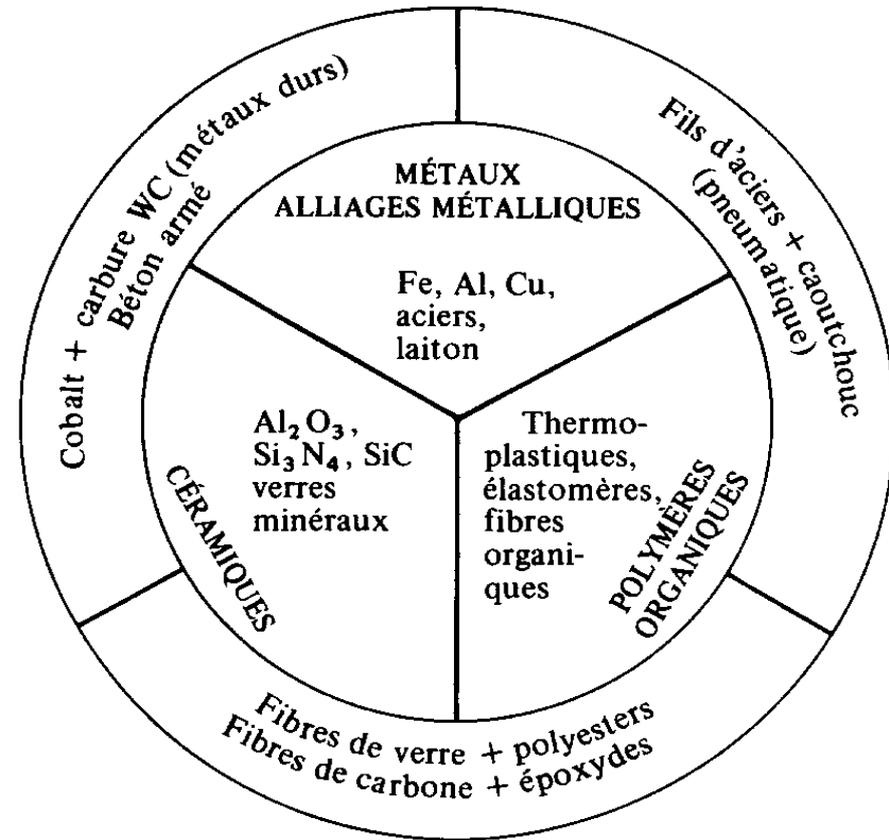
# Classification traditionnelle des matériaux

\* 3 groupes principaux

- les métaux
- les céramiques
- les polymères

\* et un 4e

- les matériaux composites



# Les nano-objets et nanomatériaux

- Nano-objet individuel :
  - Nanoparticule (aggregat, nanocristal)
  - Fullerenes
  - Nanotubes, nanofils
- Nanomatériaux assemblés :
  - Fullerites, clathrates
  - Fagots et fibres de nanotubes
  - Aggrégats des nanoparticules
- Nanocomposites :
  - Céramiques
  - Métalliques
  - Polymères

# Nanomécanique : applications

- Matériaux de renfort :
  - Emballages
  - Structures (automobile, aéronautique, bâtiment, sport)
- Lubrification
- Electromécanique :
  - Capteurs (acoustiques, mécaniques)

# I. Mécanique des Matériaux

# Principales propriétés mécaniques des matériaux

## ✓ **Module de Young**

- GPa
- Traduit la raideur d'un matériau

## ✓ **Limite élastique**

- Mpa
- Contrainte maximale avant déformation plastique

## ✓ **Ténacité (Fracture toughness)**

- Mpa m<sup>1/2</sup>
- Resistance à la propagation de fissurations

# Reponse à des sollicitations mécaniques

\* *Contrainte*  $\sigma = \frac{F}{S_0}$

unités S.I. (Pascal)  $\text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

et multiples: **MPa**  $10^6 \text{ Pa}$   
**GPa**  $10^9 \text{ Pa}$

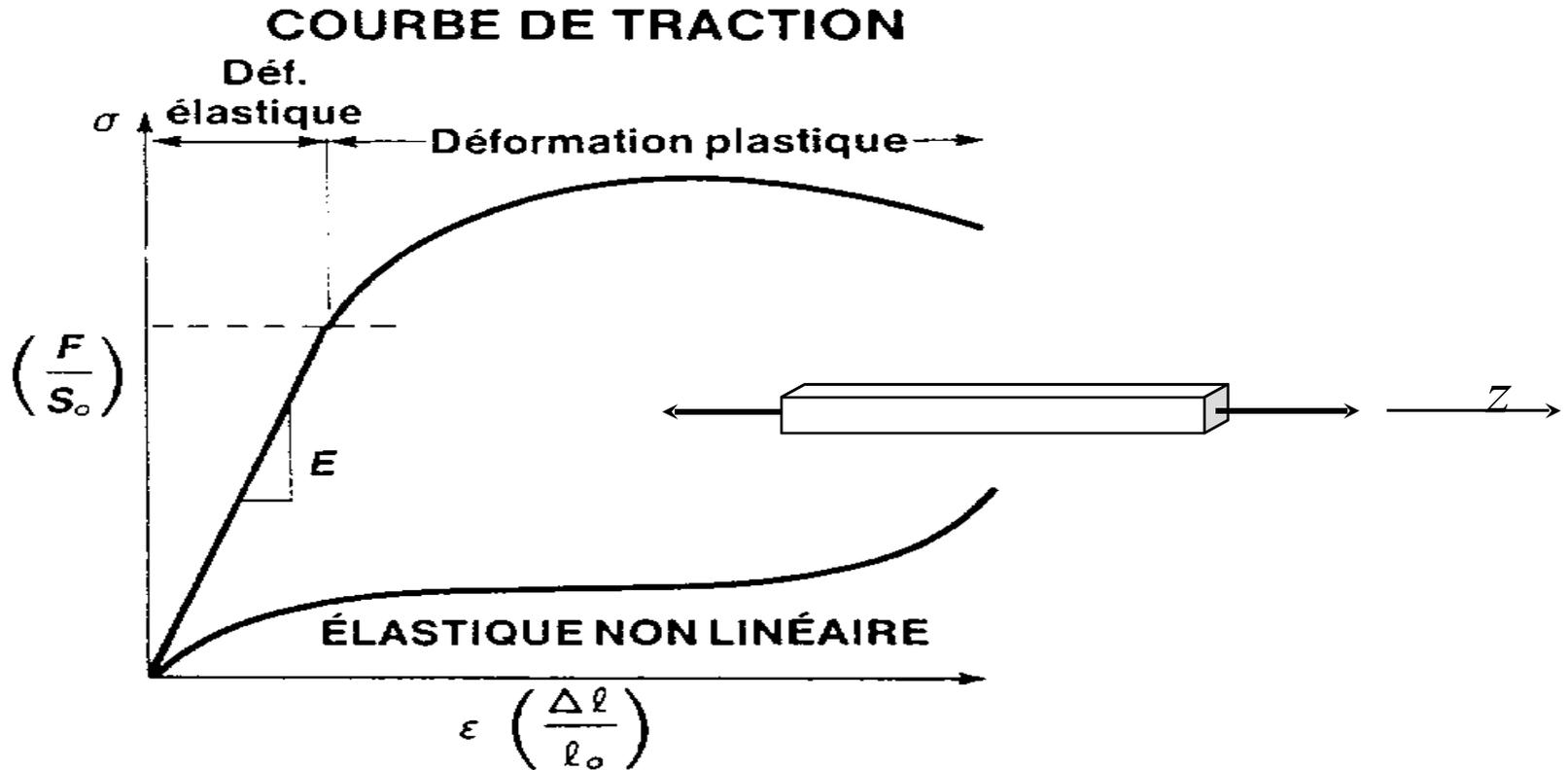
\* *Déformation*

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

**Grandeur sans dimension**

$$\varepsilon = 0,1 \equiv 10 \%$$

# Relation contrainte-déformation (*stress-strain*)

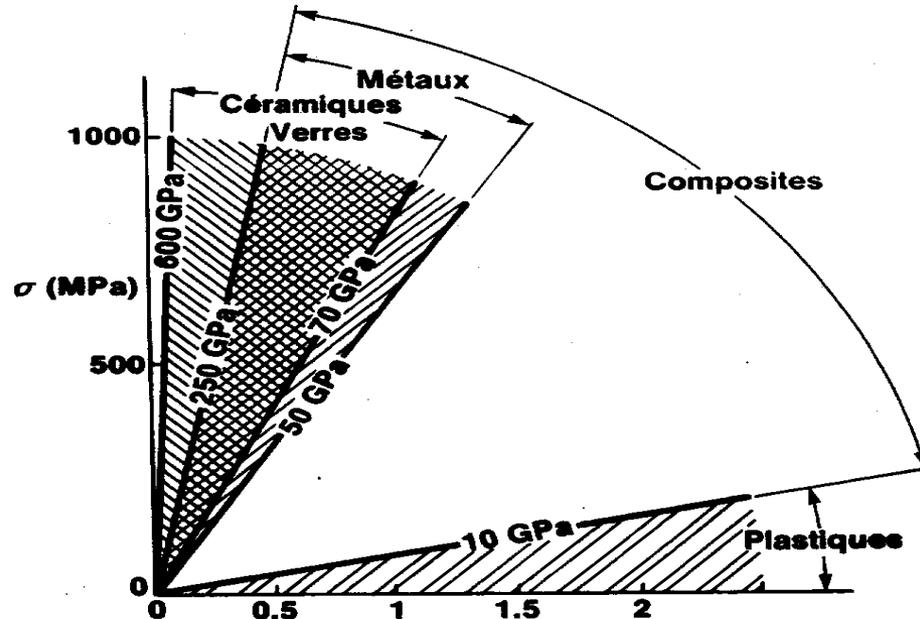


Dans le domaine élastique linéaire, le module de Young ( $E$ ) est donné par la *loi de Hooke*:  $\sigma = E\epsilon$

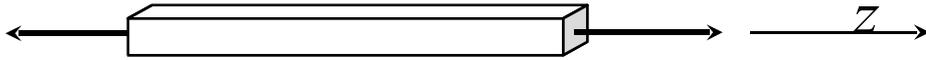
# Module de Young

Le module de Young est aussi connu sous le nom de **module élastique** ou encore sous le terme de **rigidité**. Il représente l'aptitude d'un matériau à se **déformer de façon élastique** sous l'action d'une contrainte. Sa valeur est proportionnelle à l'intensité des liaisons atomiques.

C-SWNT:  
 $E \sim 1 \text{ TPa}$



# Coefficient de Poisson



$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad \frac{\delta V}{V_0} \approx \epsilon_x (1 - 2\nu) \quad \nu_{max} = 0.5 \quad (\delta V) = 0$$

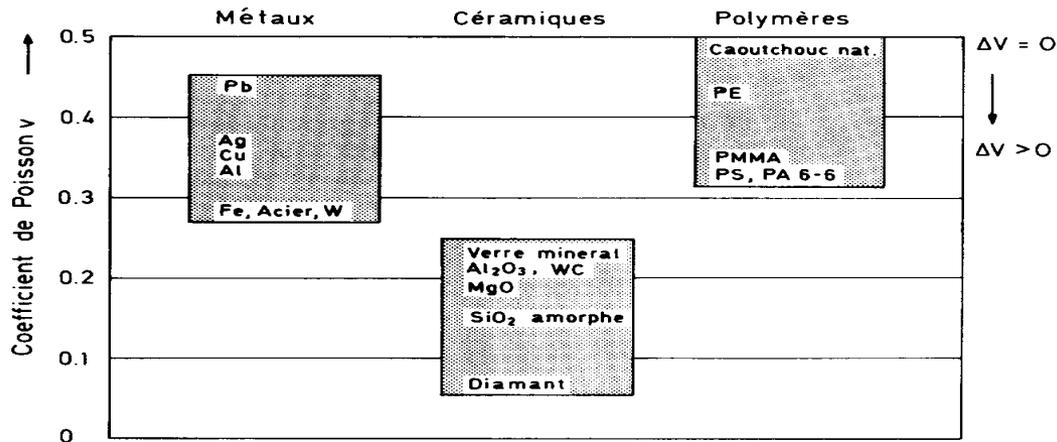
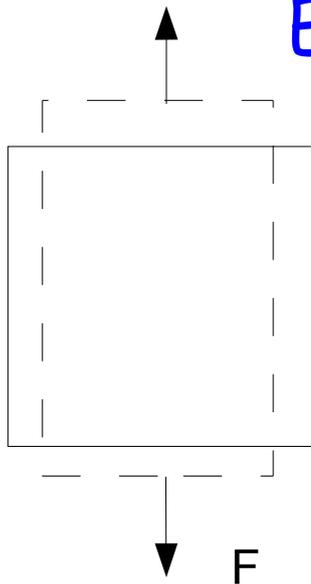


FIG. 6.3 Valeurs indicatives des coefficients de Poisson  $\nu$  de divers types de matériaux pour la déformation élastique à température ambiante.

# Elasticité dans les solides

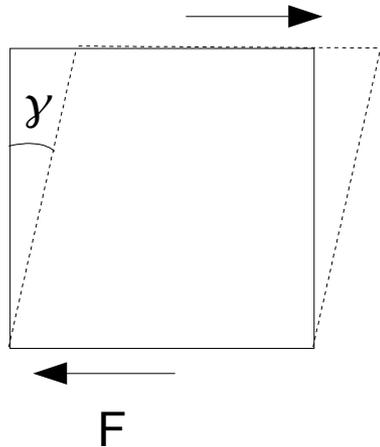


Traction

$$E, \nu$$

Module de Young

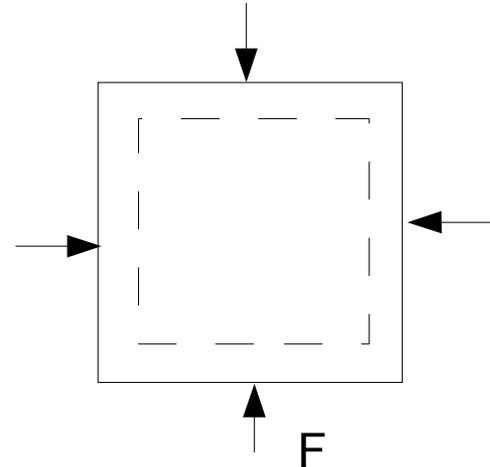
Coefficient de Poisson



Cisaillement

$$G$$

Module de cisaillement



Compression hydrostatique

$$B = \frac{1}{\kappa}$$

Module d'incompressibilité

*Contrainte de cisaillement :*

$$\sigma_s = \frac{F}{S_0}$$

$$p = -B \left( \frac{\delta V}{V_0} \right)$$

$$\text{Angle de cisaillement } \gamma = \frac{\delta y}{z_0}$$

$$\sigma_s = G \tan \gamma \approx G \gamma$$

- Cas d'un solide homogène isotropique. On peut démontrer que :

$$E = \frac{9 B G}{G + 3 B} = 3 B (1 - 2 \nu) = 2 G (1 + \nu)$$

Donc dans le cas d'un solide homogène et isotropique, l'élasticité est caractérisé par seulement 2 grandeurs

- Cas général :  $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$

Tenseurs de contrainte, élasticité et déformation respectivement.

C est symétrique et donc il peut avoir un maximum de 21 constantes élastiques indépendants, dont le nombre selon la symétrie cristalline peut être encore réduit. E, G et K peuvent être exprimées en fonction de ces constantes.

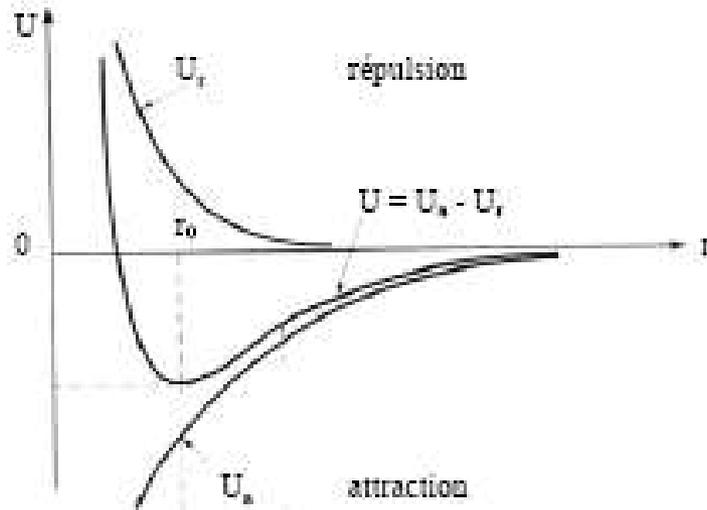
$(\sigma_{ij})_{i,j=1,3}$  Tenseur de contraintes

$(\epsilon_{ij})_{i,j=1,3}$  Tenseur de déformations

$$C_{ijkl} = C_{klij} = C_{jilk}$$

(Voir aussi: <http://assocampus.ifrance.com/pages/tenscor6.htm>)

# Origine microscopique de l'élasticité

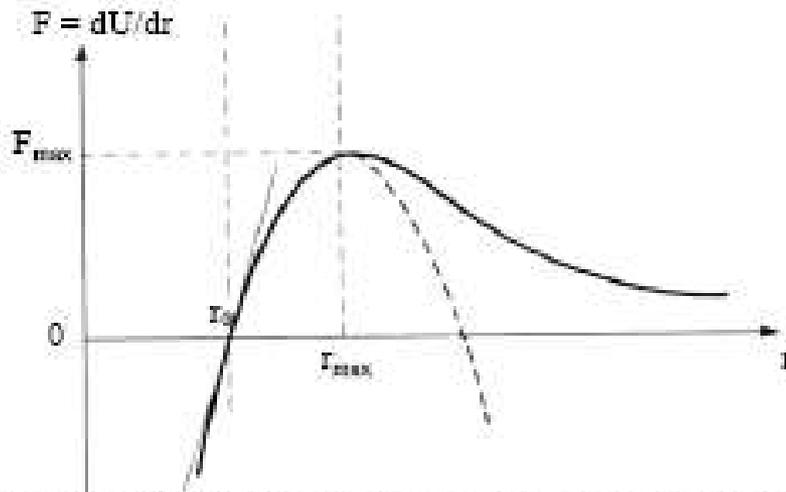


Donc près de  $x_0$  nous avons une force linéale en  $x$  :

$$F = S(x - x_0) \text{ avec } S = \left( \frac{d^2 U}{d x^2} \right)_{x=x_0}$$

Donc, pour une densité de liaison par unité d'aire de  $N \approx \frac{1}{x_0^2}$ , nous avons une contrainte  $\sigma_x = NS(x - x_0)$

$$\rightarrow \sigma_x = \left( \frac{S}{x_0} \right) \epsilon_x \rightarrow E = \frac{S}{x_0}$$



Pour la plupart des solides :  $x_0 \approx 0.25 \text{ nm}$

$\rightarrow E$  depend essentiellement des forces d'interaction atomiques

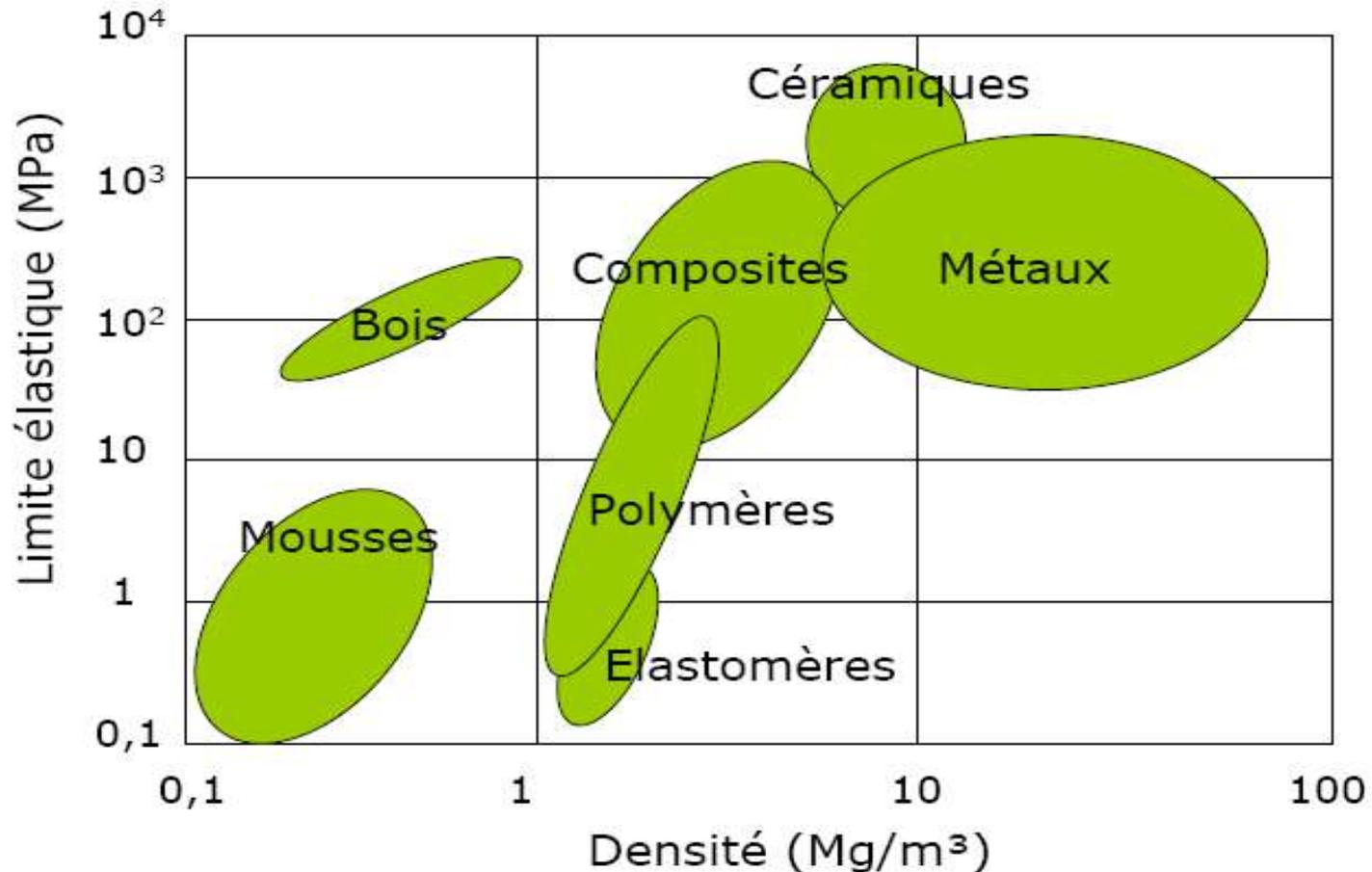
Liaisons covalentes:  $S = 20 - 200 \text{ N/m}$

Liaisons métalliques/ioniques:  $S = 15 - 100 \text{ N/m}$

Liaisons de type van der Waals  $S = 0.5 - 1 \text{ N/m}$

Variations de l'énergie interne  $U$  et de la force mutuelle  $F$  d'un système de deux atomes en fonction de la distance entre ces atomes

Thermodynamiquement, à toute température  $T$  positive, une structure cristalline doit avoir des défauts qui engendrent de l'entropie  $S$  et diminuent ainsi son énergie libre  $F=U-TS$  ou son enthalpie libre  $G=F+pV$ .

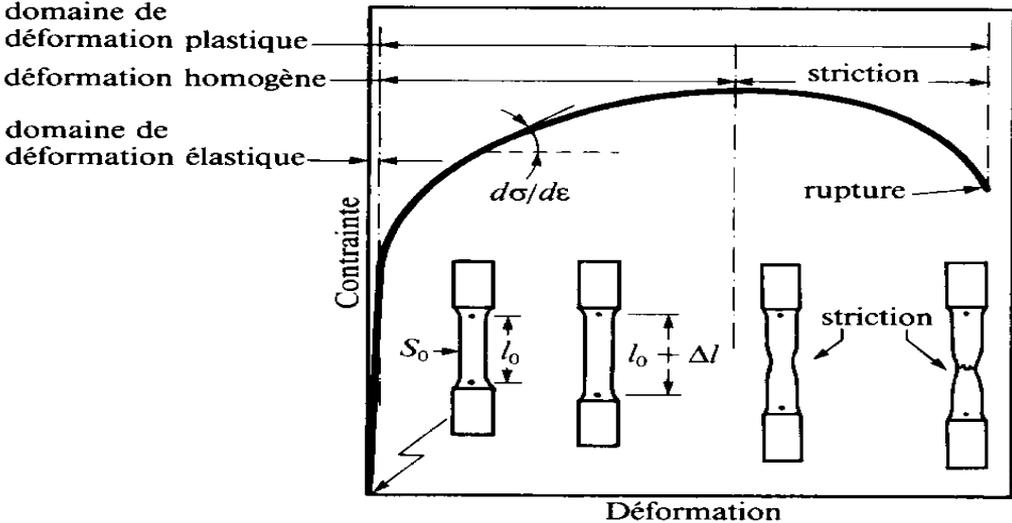
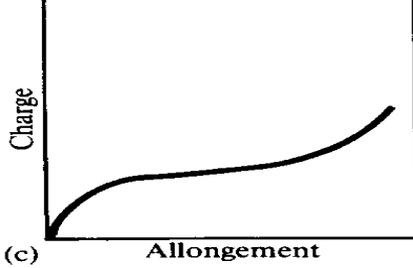
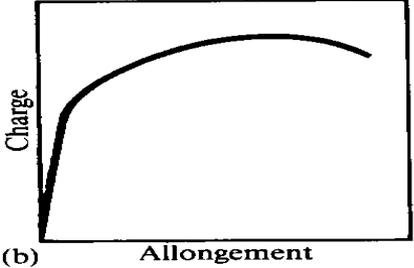
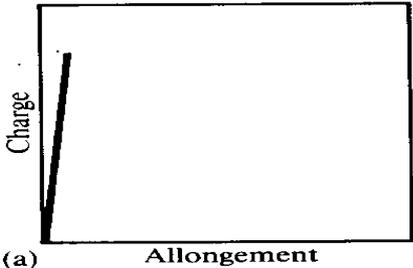


# Rupture/Plasticité : au delà de la limite élastique

*fragile*

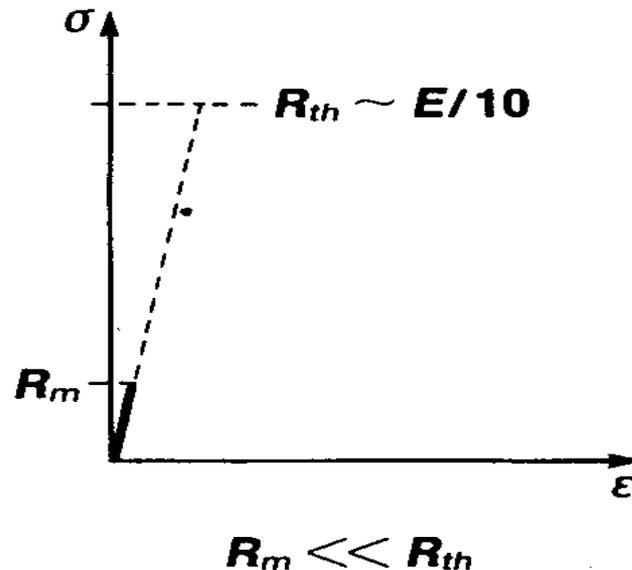
*ductile*

*élastique non-linéaire*



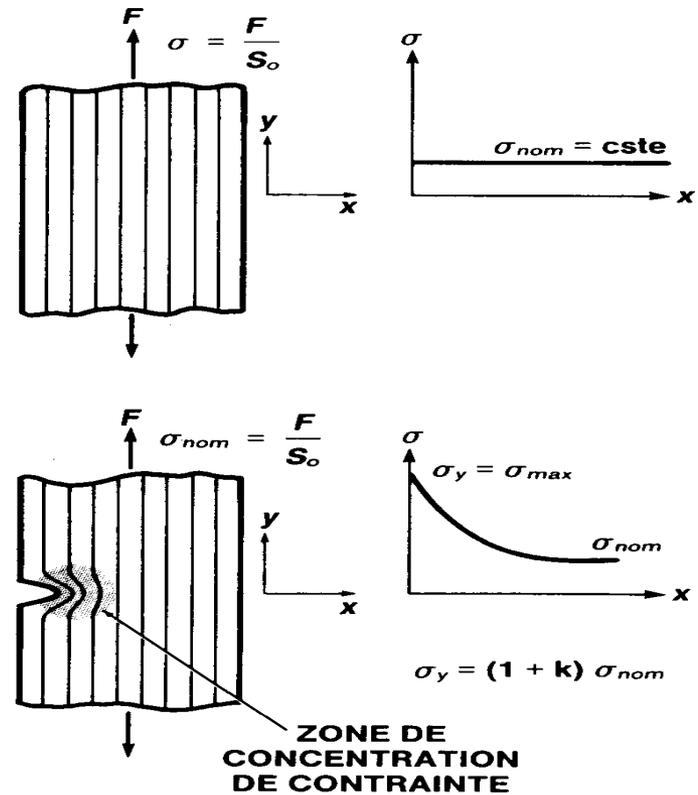
# Comportement des matériaux fragiles : rupture

- La résistance théorique à la traction des matériaux ( $R_{th} \approx E/10$ ) est de 10 à 1000 fois supérieure à la résistance expérimentale.
- Cette divergence s'explique par la présence de **défauts**.

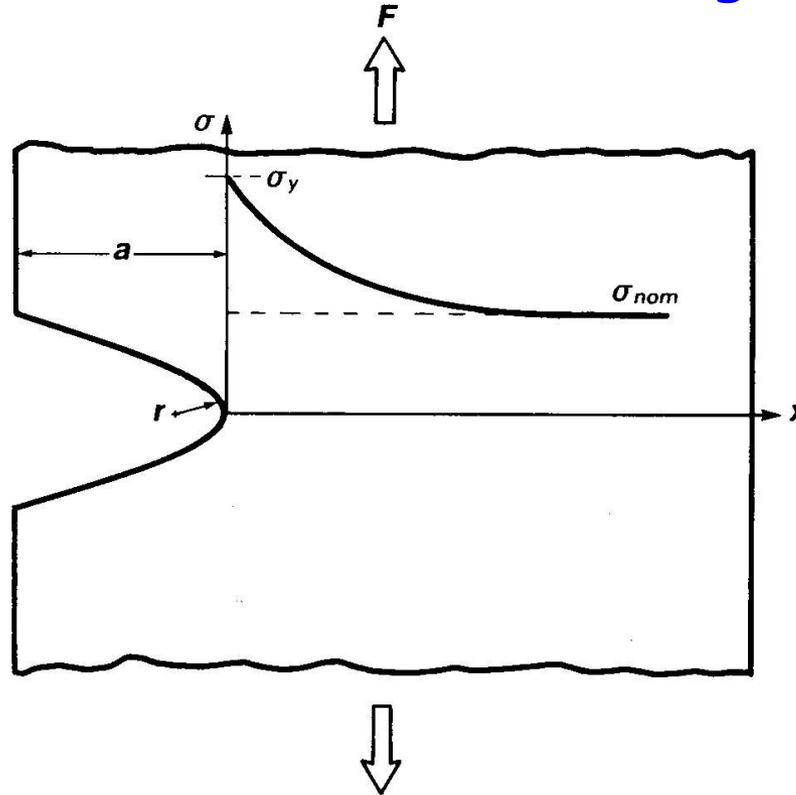


# Comportement des matériaux fragiles : rupture

- **Tous** les matériaux contiennent des défauts qui donnent lieu à une zone de **concentration** de contrainte.
- La contrainte **locale** est plus élevée que la contrainte extérieure appliquée et approche la contrainte théorique de rupture.



# Comportement des matériaux fragiles : rupture

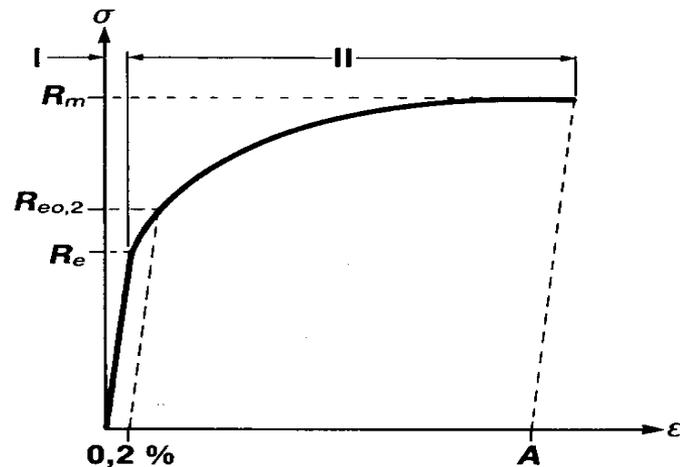


$$\sigma_y = (1 + k) \sigma_{nom}$$
$$\sigma_y = \sigma_{nom} \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{r}} \right)$$

Si, à la racine du défaut, la contrainte théorique est atteinte, une réaction en chaîne se produit entraînant une ouverture de fissure jusqu'à la rupture de l'échantillon.

# Comportement des matériaux ductiles

- Certains matériaux, tels que les métaux, les alliages et certains polymères, présentent une zone de transition **élastique-plastique**.
- Cette zone est délimitée par la **limite élastique** du matériau.



**I - Domaine de déformation élastique**  
**II - Domaine de déformation plastique**

# Matériaux ductiles cristallins

## *Cas des matériaux à structure cristalline*

Lorsqu'on déforme plastiquement un **polycristal**, on constate la formation de bandes à la surface des grains qui témoignent de la nature **irréversible** des déformations encourues.



*Groupe de lignes de glissement = bandes*

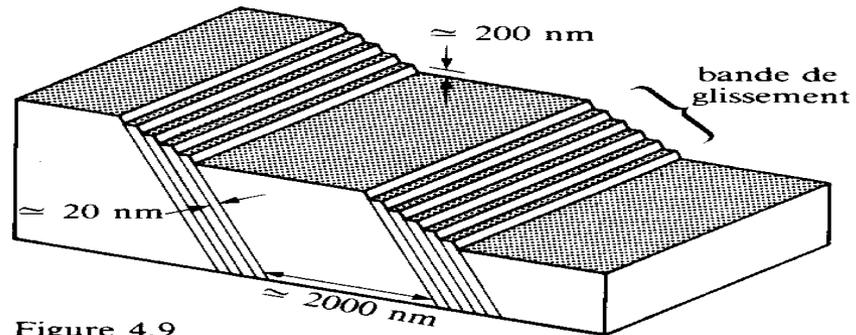
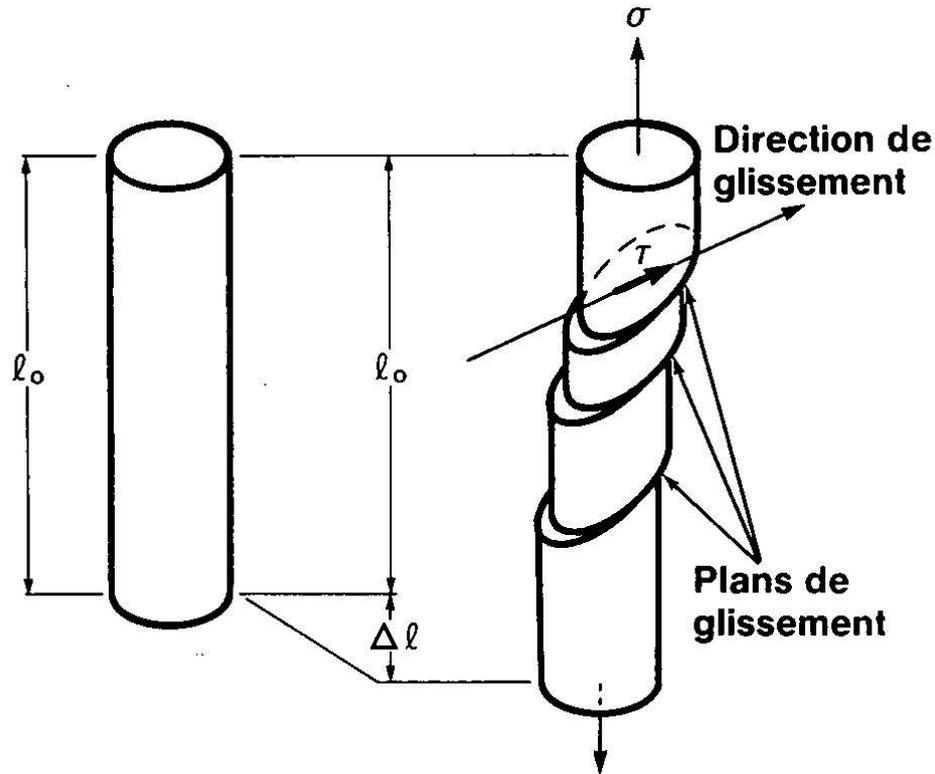


Figure 4.9

# MONOCRISTAL



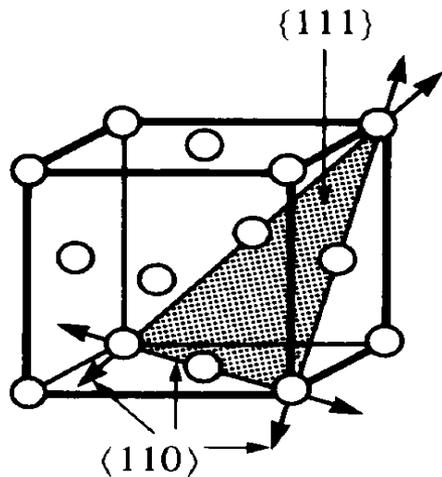
## GLISSEMENT CRISTALLOGRAPHIQUE

Cisaillement sur des plans de glissement et selon des directions de glissement

PLAN DE GLISSEMENT  
DIRECTION DE GLISSEMENT

{ SYSTÈME  
DE  
GLISSEMENT

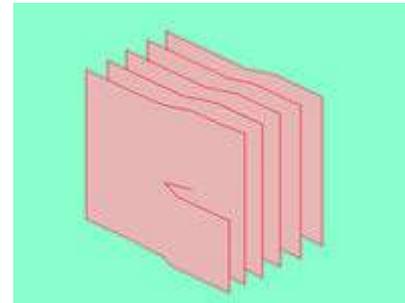
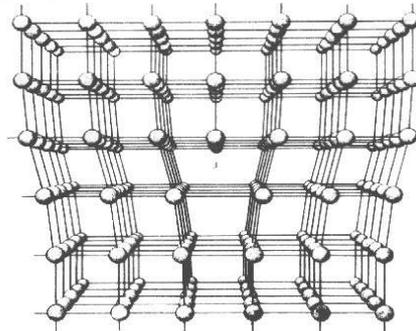
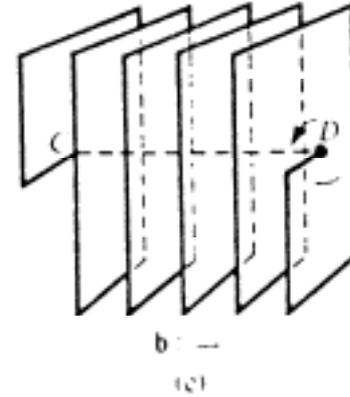
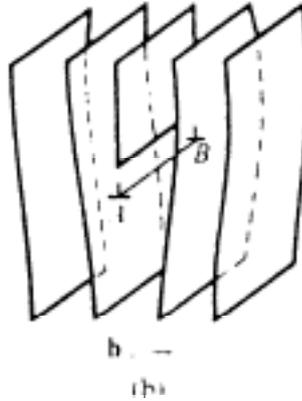
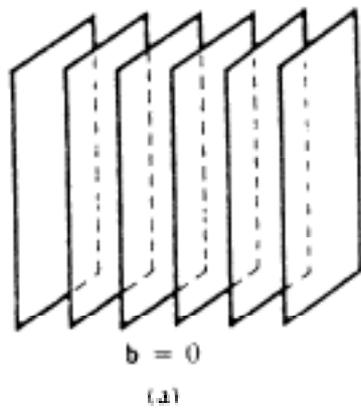
- Les déformations plastiques sont donc causées par des glissements **irréversibles**.
- Les matériaux cristallins étant **anisotropes**, les glissements se produisent selon certains plans et directions cristallographiques.
- Les plans et directions de glissement sont ceux ayant la plus **forte densité atomique**. (car cela implique une distortion structurale minimum)



Structure cristalline	Plans de glissement	Directions de glissement	Exemples de métaux
cfc	$\{111\}$	$\langle 110 \rangle$	Al, Fe $\gamma$ , Cu, Ni, Au, Ag
cc	$\{110\}$ , $\{112\}$ , $\{123\}$	$\langle 111 \rangle$	Fe $\alpha$ , Nb, Mo
hc	$\{0001\}$ , $\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	Mg, Ti, Zn, Zr $\alpha$ , Be

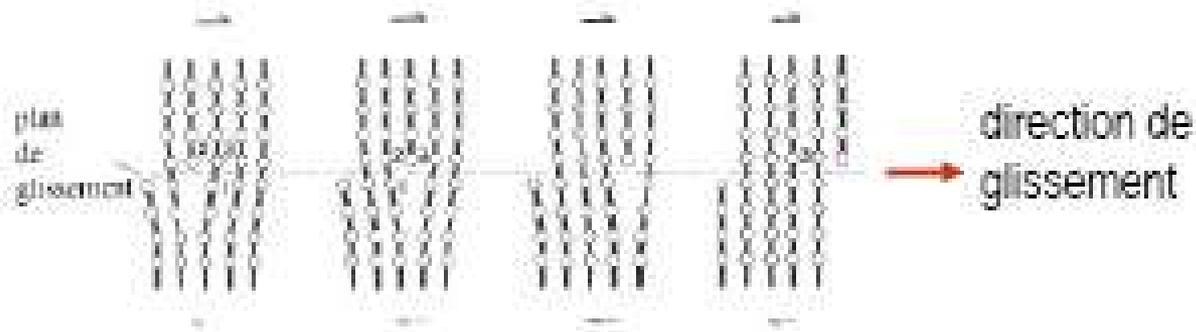
Tableau 13.8 : Systèmes de glissement pour quelques métaux

# Glissement : Dislocations



Dispositions des plans du réseau cristallin: a) dans un cristal parfait; b) autour d'une dislocation-coin; c) autour d'une dislocation-vis.

# Glissement : Dislocations



Il est facile de voir que la barrière énergétique opposée au déplacement est plus faible que dans le cas d'un déplacement rigide puisqu'on ne "casse" que 2 ou 3 liaisons à la fois et pas une rangée entière.

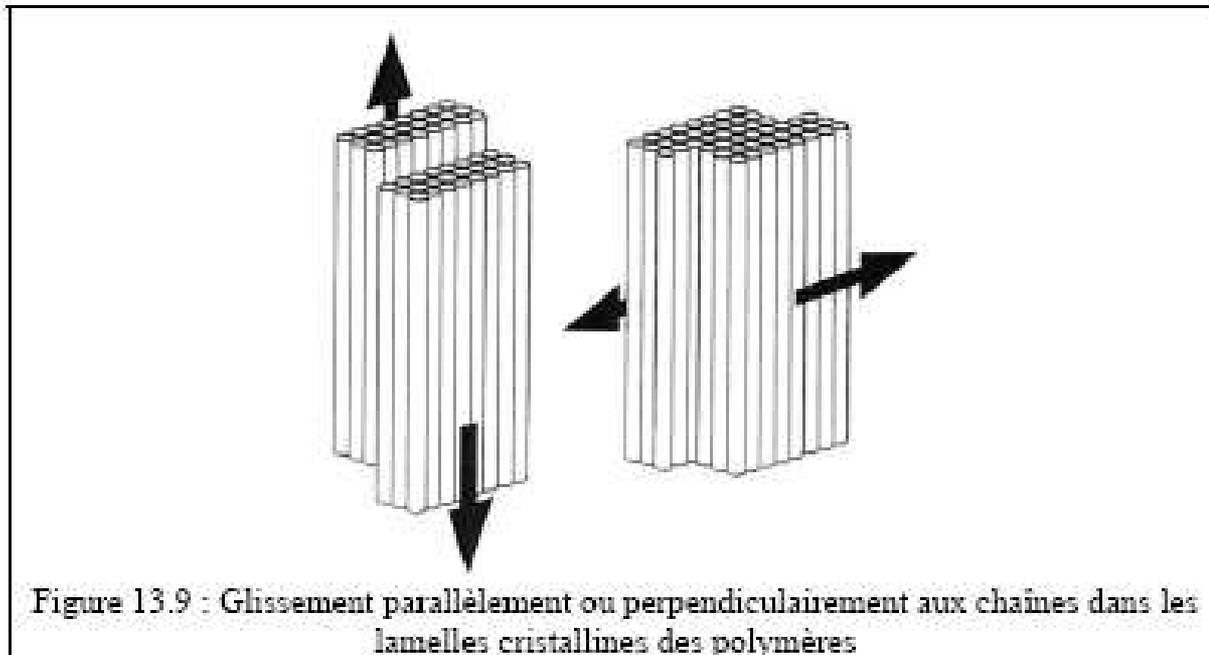


Figure 13.9 : Glissement parallèlement ou perpendiculairement aux chaînes dans les lamelles cristallines des polymères

## Human made dislocation (Vercors)

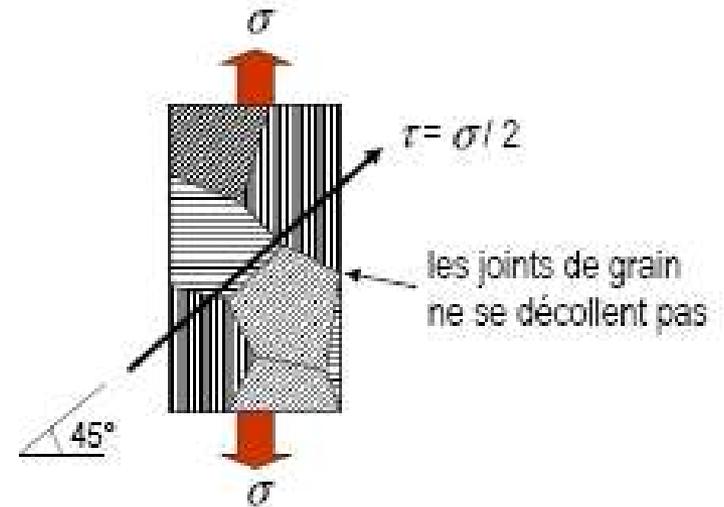
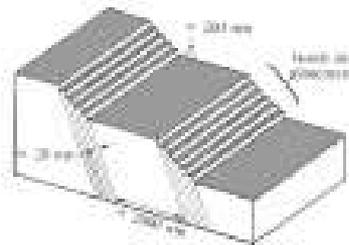


# Plasticité

## Cas d'un polycristal

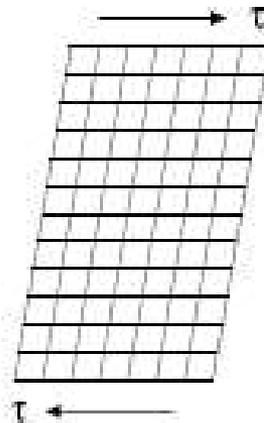
Une déformation coordonnée des grains est nécessaire :  
il faut donc appliquer une contrainte supérieure  
pour déformer plastiquement un polycristal :

$$R_e \approx 3 \tau_e$$

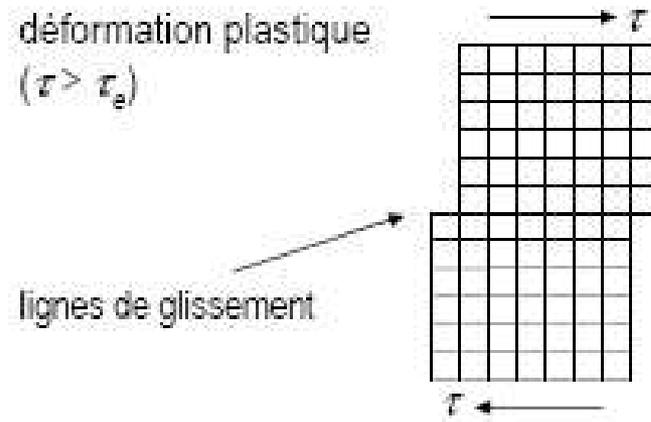


## Déformation résultante

déformation élastique  
( $\tau < \tau_e$ )

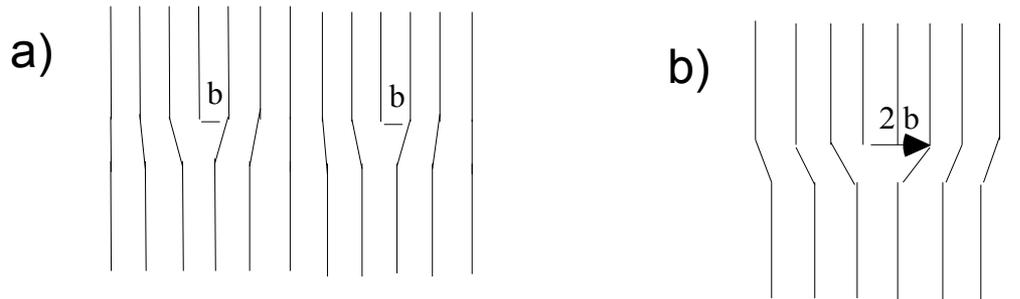


déformation plastique  
( $\tau > \tau_e$ )



# Entrave au mouvement des dislocations dans les polycristaux

Lors de la déformation de matériaux polycristallins, les dislocations viennent buter sur les joints de grains. Les dislocations ne vont en général pas traverser le joint de grains et vont s'empiler au joint. Or ce sont des dislocations de même signes qui se repoussent. Il va falloir effectuer une contrainte supplémentaire pour forcer les dislocation de passer d'un grain à un autre. Il y a donc **durcissement** du matériau.



Repulsion des dislocation de même signe : l'énergie élastique en a) est inférieure à l'énergie en b)

# Durcissement

● mouvement des dislocations → déformation plastique

● entrave au mouvement des dislocations → durcissement

atomes étrangers  
(insertion, substitution)

autres dislocations

précipités

joints de grain

# Durcissement par solution solide

● Principe : ajout d'un élément d'alliage (atome étranger) qui va gêner la progression des dislocations ( → alliage)

● Exemple :

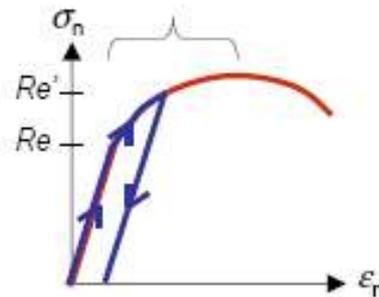
Sn dans Cu = bronze

Zn dans Cu = laiton

Cu = solvant } mélange aléatoire des deux =  
Zn, Sn = soluté } solution solide

# Ecrouissage

● Ecrouissage :



taux d'écrouissage :

$$E_e = (S_0 - S_d) / S_0$$

section déformée      section initiale

● Principe : déformation plastique → création de nouvelles dislocations

→ encombrement entre dislocations

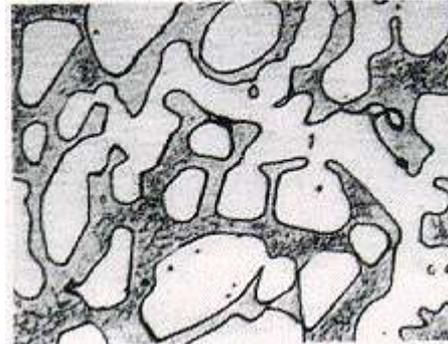
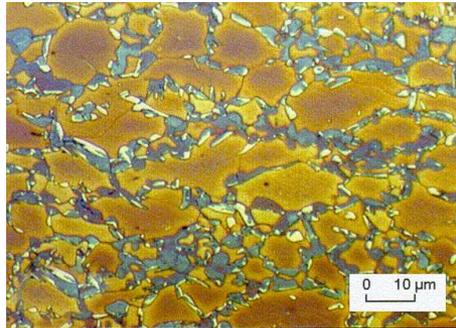
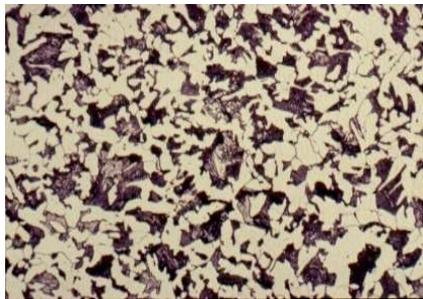
→ mouvement des dislocations plus difficile → durcissement

# Durcissement structural ou durcissement par précipitation

● Principe : présence de précipités (cristallites d'une autre phase) entravant le mouvement des dislocations

● Exemple :

aciers rapides : précipités de carbures (de tungstène, de vanadium, ...) dans la matrice de fer



Images de la microstructure de différents aciers

# Durcissement par affinage de grains

● Principe : affinage des grains

→ augmentation de la surface de joints de grains

→ entrave plus grande au mouvement des dislocations

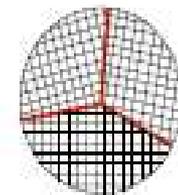
→ cette entrave augmente avec la désorientation cristalllographique

● Nouvelle limite élastique en cisaillement :  $\tau_e = \tau_C + \tau_G$

avec  $\tau_G = k / d_G^{1/2}$  (équation de Hall-Petch)

constante

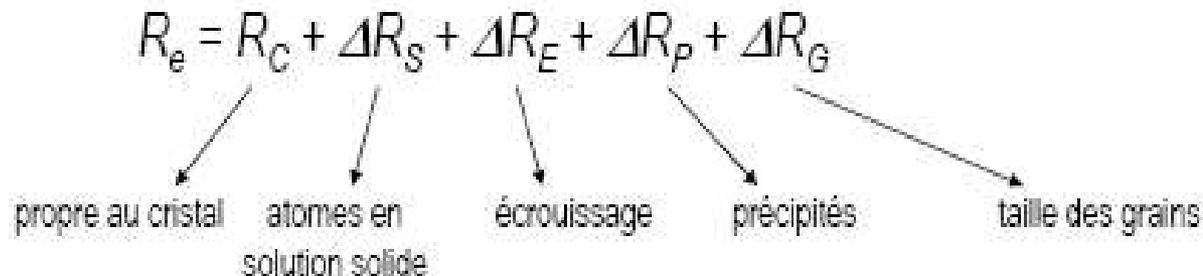
dimension moyenne des grains



défaut  
d'orientation

# Durcissement

- Limite élastique d'un alliage industriel :

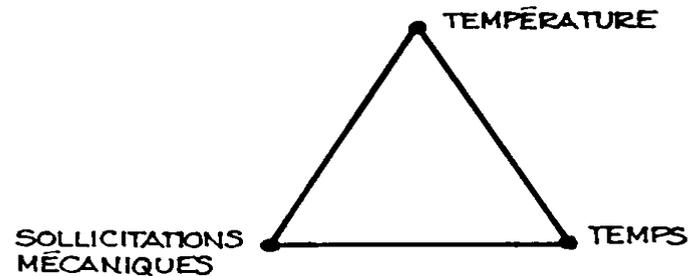
$$R_e = R_C + \Delta R_S + \Delta R_E + \Delta R_P + \Delta R_G$$


propre au cristal    atomes en solution solide    écrouissage    précipités    taille des grains

- Exemple : le fer

matériau	état	$R_e$ (MPa)
Fe pur	monocristallin	10
Fe-C (sol. sol.)	polycristallin	150
Fe-C (sol. sol.)	polycristallin, grains fins	350
Fe pur	polycristallin, écroui	700
Fe-C	polycristallin, perlite lamellaire	1200
Fe-C	polycristallin, perlite ultrafine, écroui	4200
Fe pur	monocristal, trichite (Micro- aiguilles)	>10000

Jusqu'à présent notre étude du comportement mécanique s'est limitée à des cas simplistes. Il y a cependant d'autres facteurs dont il faut tenir compte:



- **VISCOÉLASTICITÉ** } (TEMPS)  
- **VISCOPLASTICITÉ** }
- **FLUAGE** (TEMPS, TEMPÉRATURE)
- **TRANSITION DUCTILE - FRAGILE**  
(TEMPÉRATURE,  $d\varepsilon/dt$ )
- **FATIGUE** ( $\sigma = \sigma_a \cos \omega t$ )

# Viscoélasticité et viscoplasticité

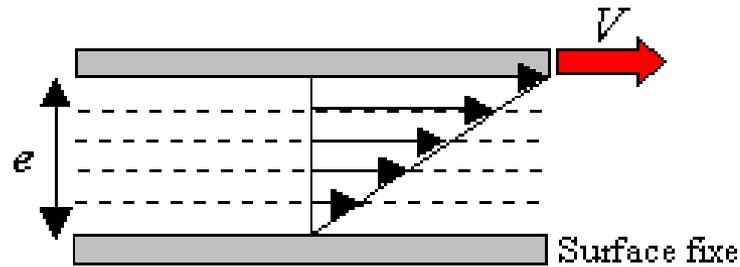
**Viscoélasticité** : Modification de l'élasticité due à l'influence de la vitesse de déformation ou la vitesse de mise en charge

**Viscoplasticité** : Idem pour le domaine plastique.



# Viscosité dans les fluides

Ecoulement = cisaillement



Taux de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{e}$$

Contrainte :

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

Viscosité :  $\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}}$

## Viscosité dans les fluides

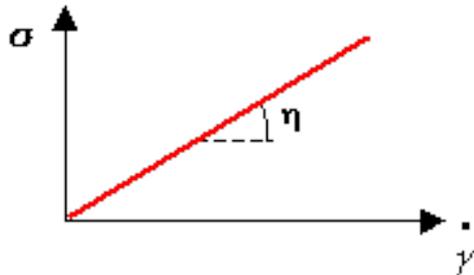
# Fluides newtoniens

A  $T^\circ$  constante, contrainte proportionnelle au cisaillement :

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta = cste$$

Exemples :

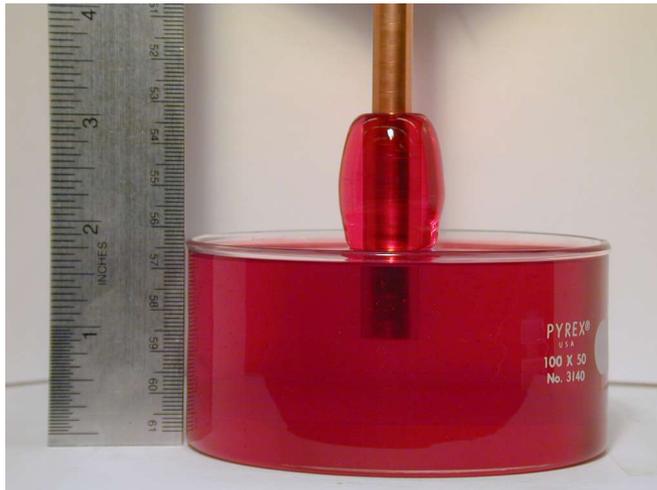
- Eau :  $\eta = 10^{-3} \text{ Pa s}$
- Miel :  $\eta = 1 \text{ Pa s}$
- ...



## Viscosité dans les fluides

# Fluides non-newtoniens

- Contrainte non proportionnelle au cisaillement
  - Fluides rhéofluidifiants (pseudo-plastiques)
  - Fluides à seuil (plastiques, fluides de Bingham)
  - Fluides rhéoépaississants
  - Fluides thixotropes



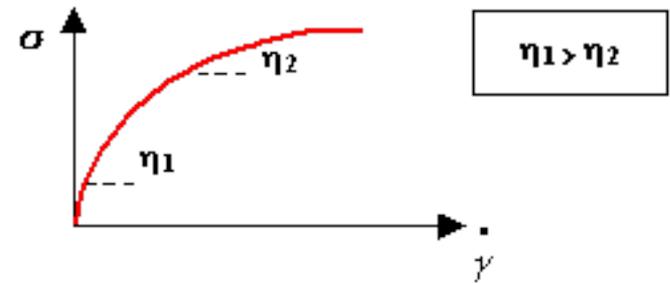
## Viscosité dans les fluides

# Fluides rhéofluidifiants

Viscosité ↓ quand cisaillement ↑

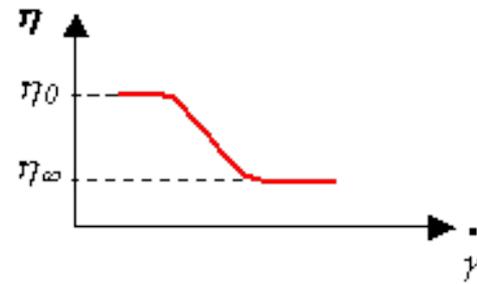
Modélisés par une loi de puissance :

$$\eta(\dot{\gamma}) = K\dot{\gamma}^{n-1}$$



Exemples :

- Peinture
- Shampoing
- ...



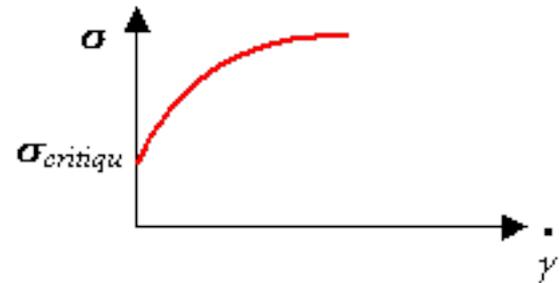
# Fluides à seuil

Le fluide ne s'écoule que si la contrainte appliquée est supérieure à une valeur seuil. S'il est fluidifiant :

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau_{crit}}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1}$$

Exemples :

- Dentifrice
- ...



## Viscosité dans les fluides

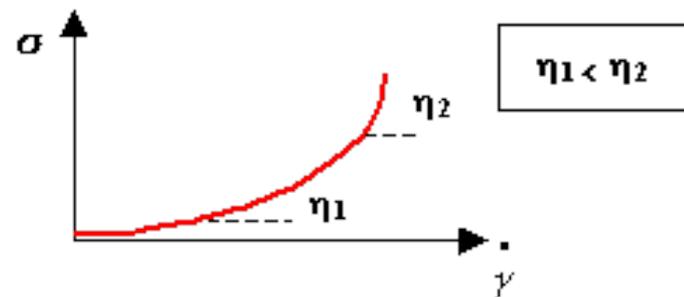
# Fluides rhéoépaississants

Viscosité  $\uparrow$  qd cisaillement  $\uparrow$

Beaucoup + rares

Exemples :

- Sable mouillé
- Suspension d'amidon



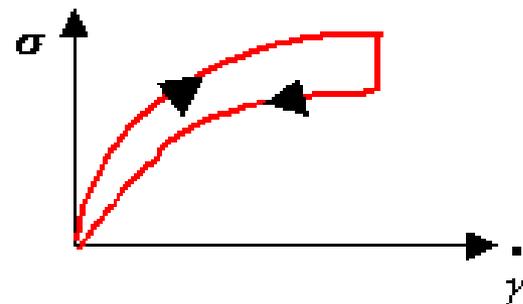
# Fluides thixotropes

Fluides rhéofluidifiants

Viscosité  $\downarrow$  sous contrainte avec le temps à cause d'une déstructuration du matériau

Exemples :

- Peinture
- Yaourt



# Viscoélasticité

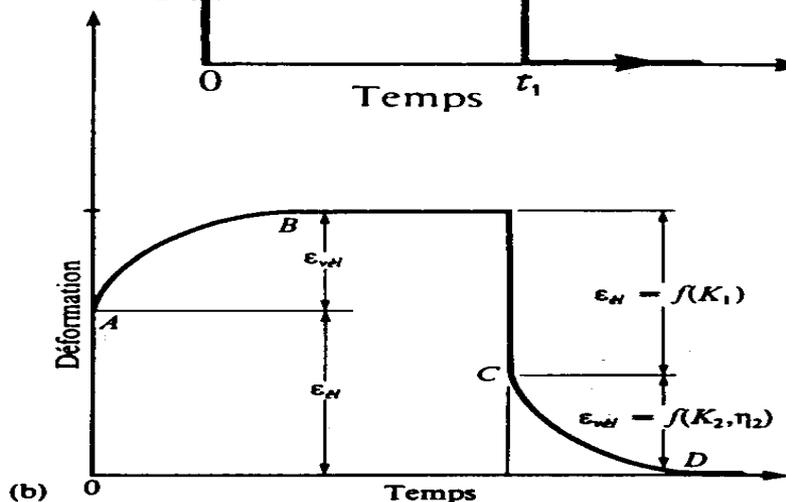
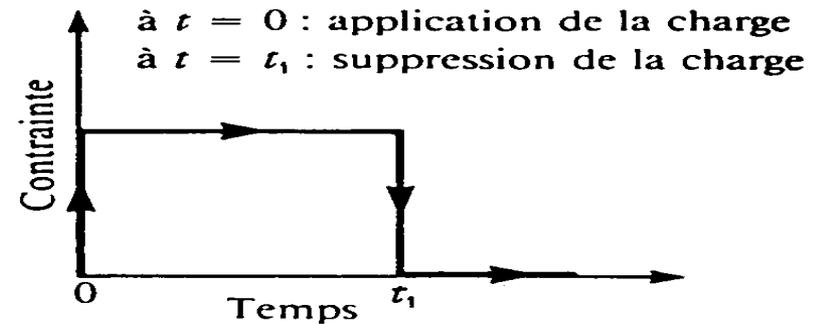
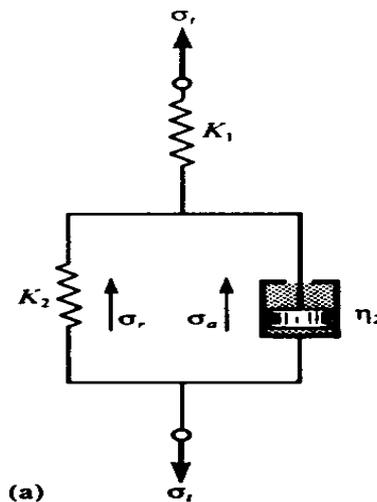
Un matériau est dit avoir un **comportement viscoélastique** lorsqu'il démontre une déformation différée dans le domaine élastique suite à l'application d'une contrainte ponctuelle.

Pour la partie viscoélastique AB (CD) le ressort  $K_2$  ne peut pas se déformer instantanément car il est couplé à l'amortisseur  $\eta_2$

$$\sigma_t = K_2 \epsilon_{vél} + \eta_2 \frac{d \epsilon_{vél}}{d t}$$

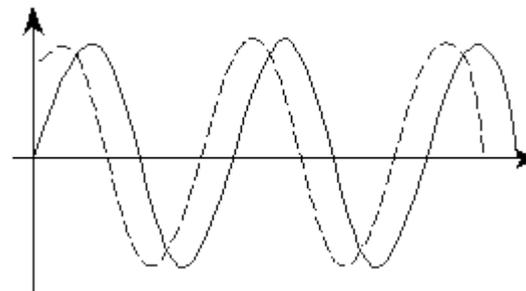
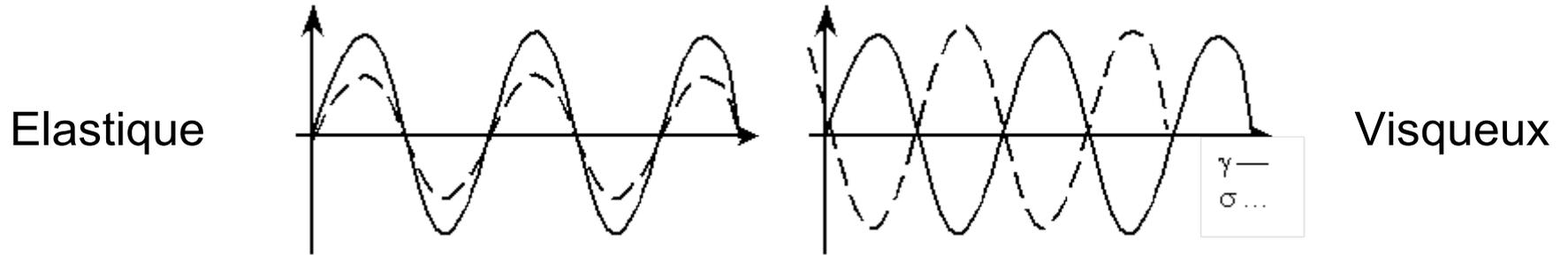
$$\epsilon_{vél} = \frac{\sigma_t}{K_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{K_2 t}{\eta_2}\right) \right]$$

$\epsilon_{vél}$  : déformation visqueuse



# Viscoélasticité

Si on applique une déformation sinusoïdale :  $\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$



Visco-élastique

Réponse =  $\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta)$

$$\tau = \tau_0 (\sin(\omega t) \cos \delta + \cos(\omega t) \sin \delta) = G'(\omega) \sin(\omega t) + G''(\omega) \cos(\omega t)$$

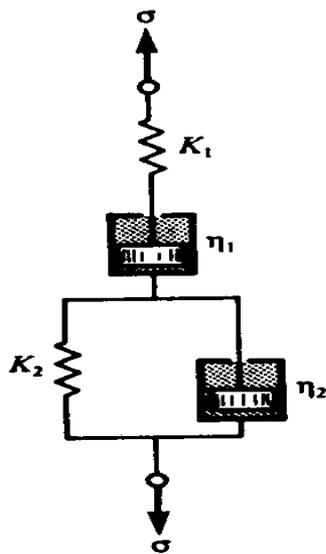
$$G^* = G' + i G''$$

$G'$ : module de conservation

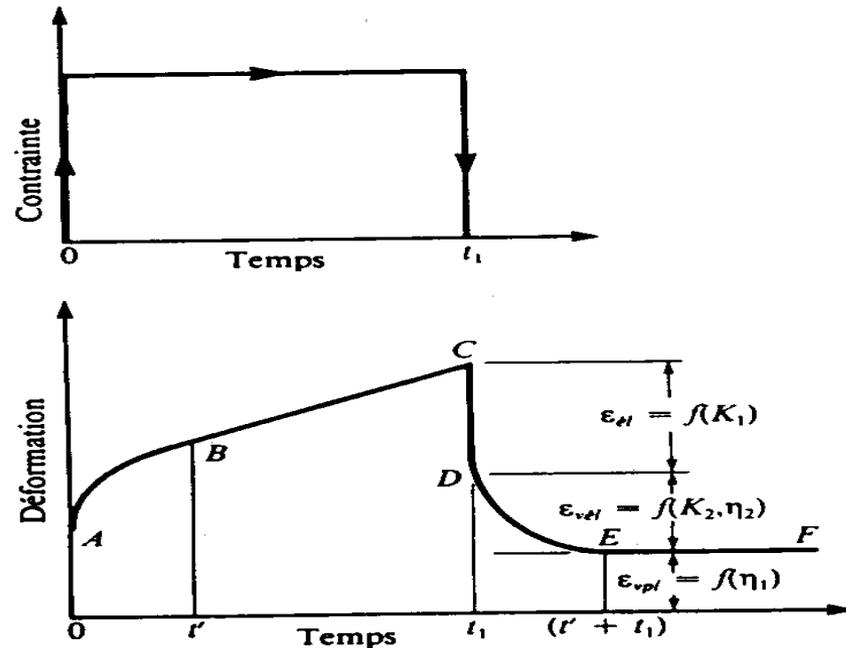
$G''$ : module de perte

# Viscoplasticité

Si la charge appliquée est supérieure à la limite élastique du matériau, il y a alors **viscoplasticité**. Cette dernière se manifeste dans les matières plastiques et en cas de fluage.



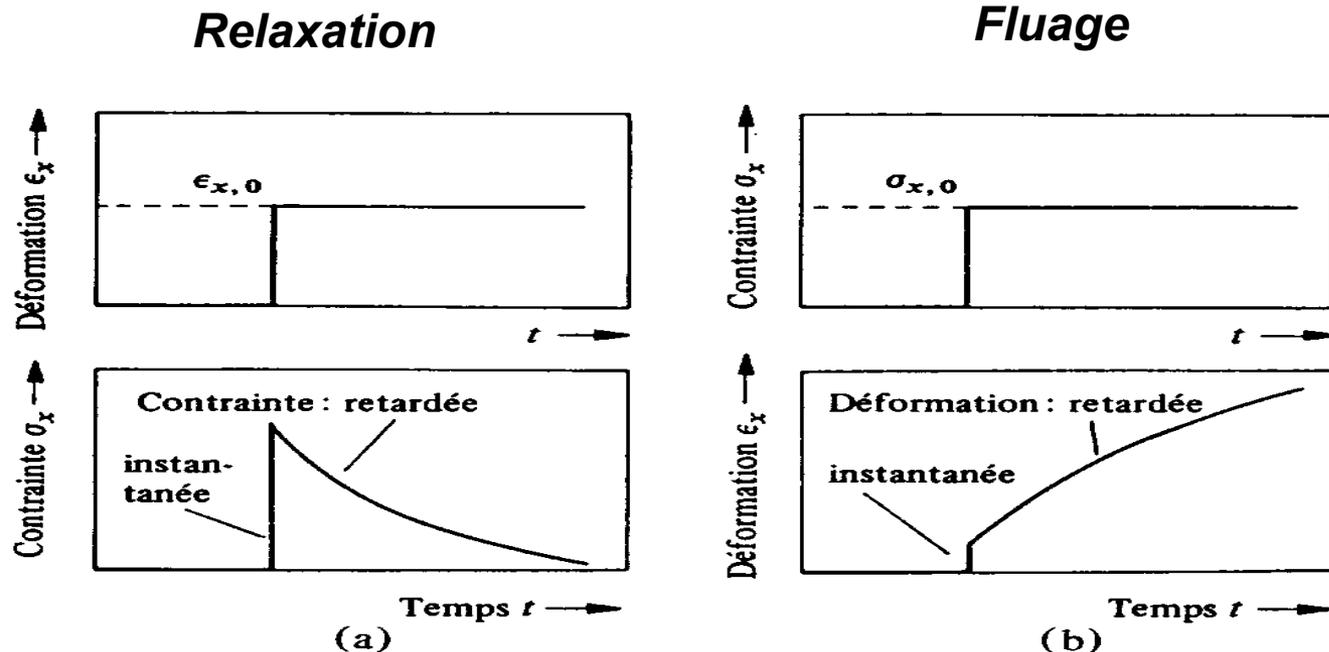
(a)



(b)

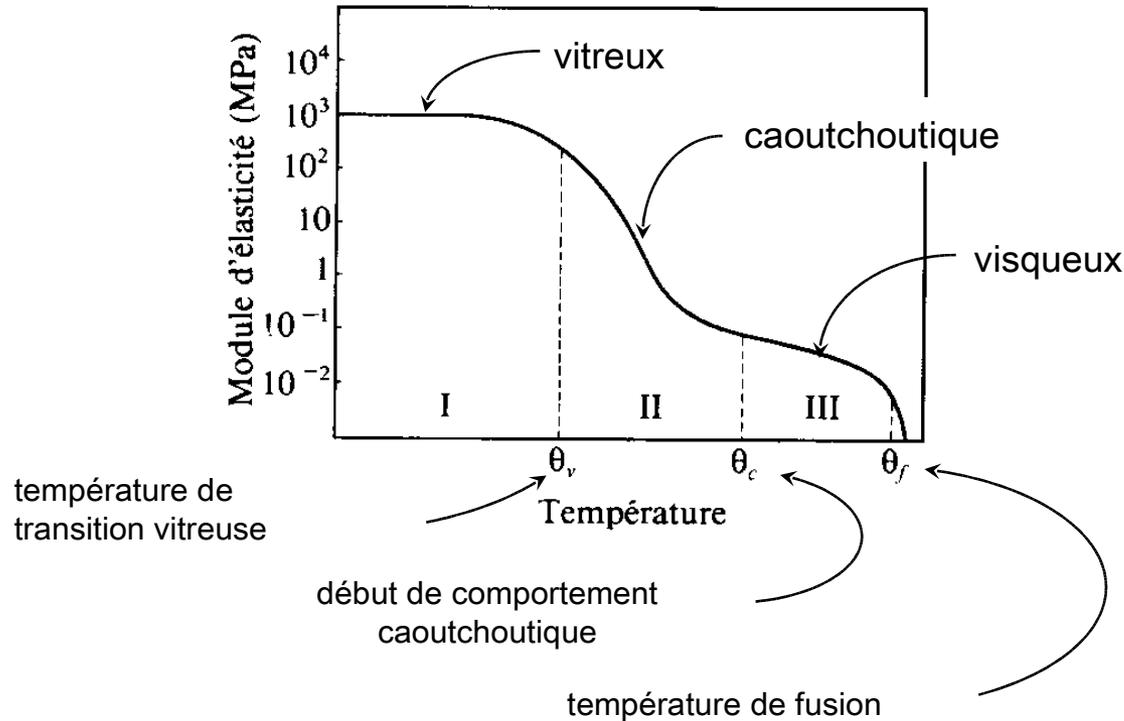
# Fluage et relaxation

La perte de charge sous déformation constante est connue sous le terme de **relaxation**. À l'inverse, le gain de déformation sous charge constante est connue sous le terme de **fluage**.



Tout comme le fluage, la relaxation est une conséquence de la viscoélasticité et de la viscoplasticité des matériaux.

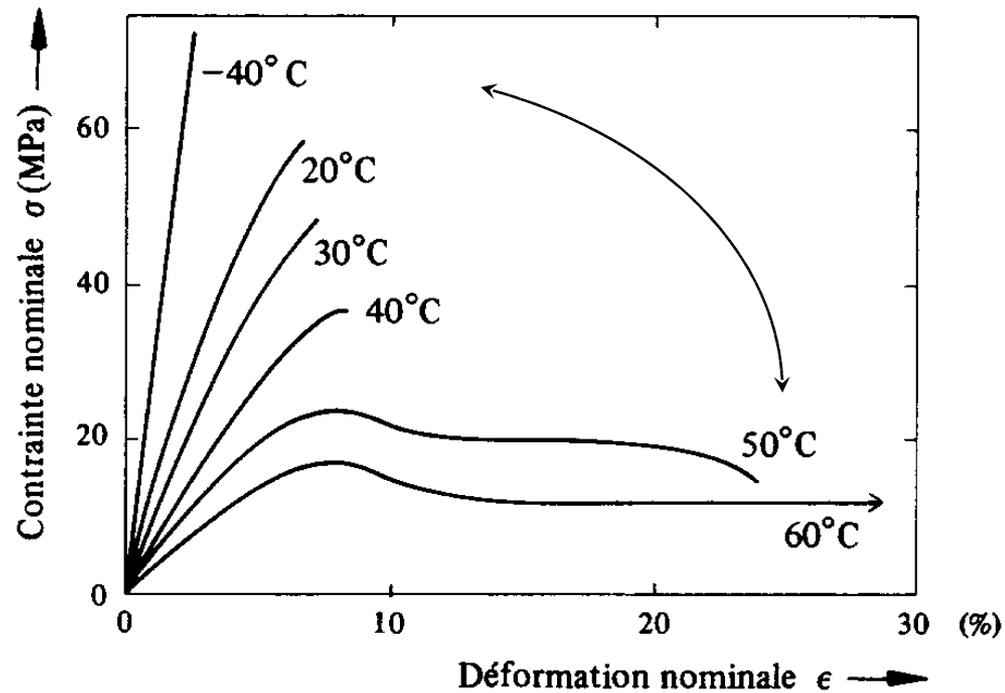
# Rigidité des polymères : rôle de la température



- zone 1 : - état vitreux  
- polymère dans un état dur et fragile
- zone 2 : - augmentation de la souplesse  
- comportement caoutchoutique
- zone 3 : - effondrement de la rigidité  
- comportement de liquide visqueux

# Transition ductile/fragile

- \* *domaine de température d'utilisation restreint*
- \* *variations importantes des comportements mécaniques avec la température*



# Dureté

La première notion de dureté (1822) provient du minéralogiste allemand Friedrich Mohs qui recherchait un paramètre pour définir les minéraux.

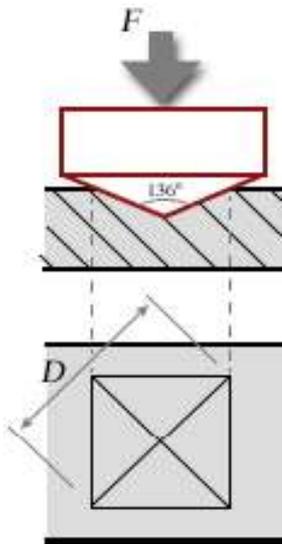
Il propose une échelle de 10 classes de dureté relative basée sur la résistance à la rayure par rapport à des matériaux donnés, le talc et le diamant étant les extrêmes.

Dureté	Minéral		Exemples
1	Talc	Très fragile	
2	Gypse	se raye à l'ongle	~2.2 ongle
3	Calcite	Fragile	~3.2 cuivre
4	Fluorite	se raye par le cuivre	
5	Apatite	Moyennement dur	~5.1 lame de couteau ~5.5 verre
6	Orthoclase	se raye par le verre ou l'acier	~6.5 aiguille d'acier
7	Quartz	Dur	
8	Topaze		
9	Corindon	Très dur	
10	Diamant		

# Dureté

L'essai de dureté (résistance à la pénétration d'un matériau) permet de caractériser des fines variations de microstructure.

La dureté donne une mesure indirecte de la résistance à la traction



Méthode d'essai	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers		Diagonale de l'empreinte (d)	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C		Profondeur de l'empreinte (Z)	HRC = f(Z) 0-100
Rockwell B	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	HRB = f(Z)

