

Génie électrique et électronique
Microtechnique

MSE-101(b)

Elasticité linéaire - plasticité

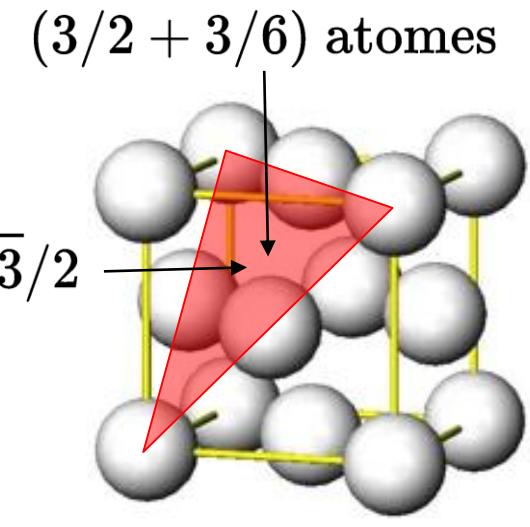
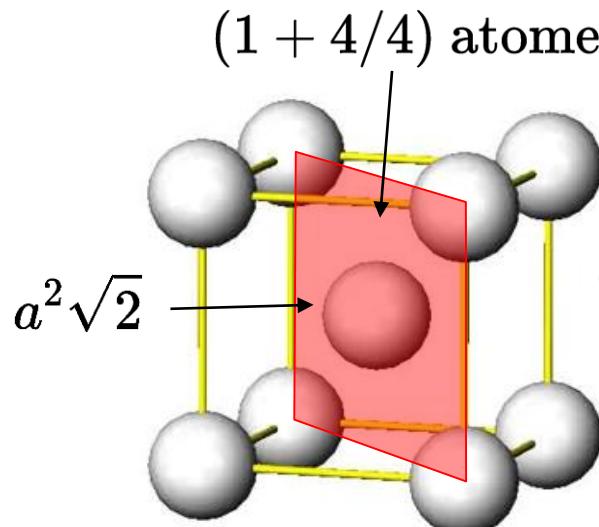
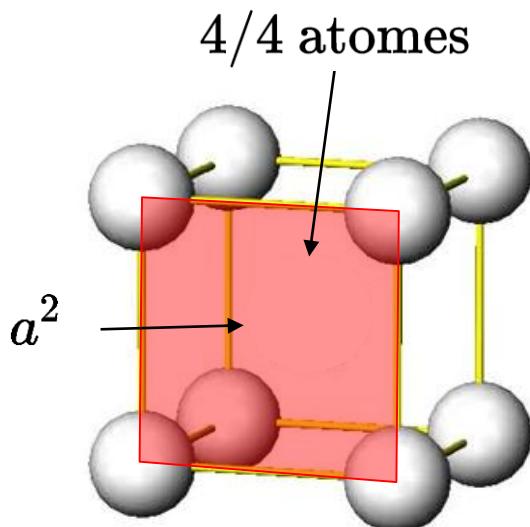
Roland Logé

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne



Rappels

- Les **plans d'empilement compact** des 3 réseaux de Bravais cubiques:
plans dans lesquels la densité d'atomes est la plus grande



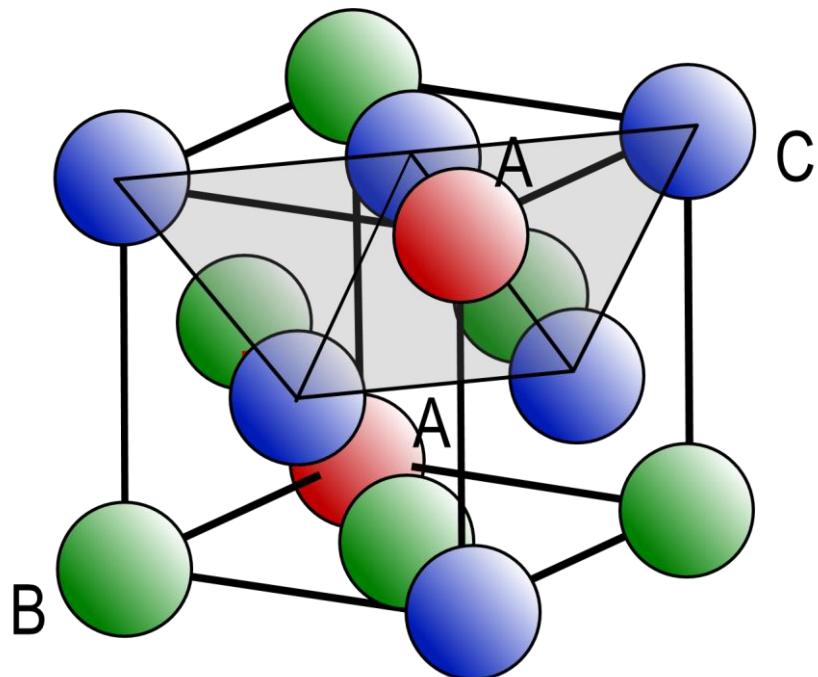
Cubique simple:
Plans denses {100}
avec
 $1 \text{ atome}/a^2$

Cubique centré:
Plans denses {110}
avec
 $2 \text{ atomes}/(\sqrt{2}a^2)$

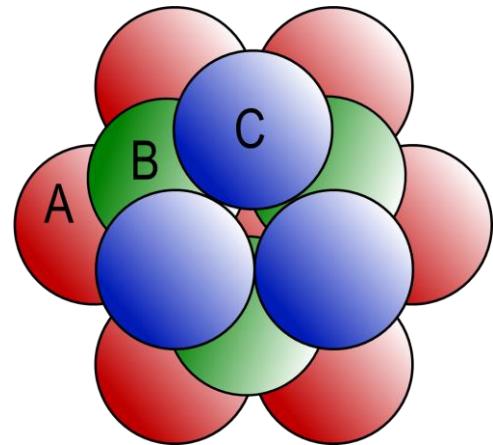
Cubique à faces centrées:
Plans denses {111}
avec
 $4 \text{ atomes}/(\sqrt{3}a^2)$

Rappels

- La structure CFC des métaux se différencie de la structure hexagonale compacte par l'empilement A-B-C-A-B-C... selon des plans {111} pour les premiers, par l'empilement A-B-A-B-A...selon le plan basal (a,b) pour les deuxièmes.

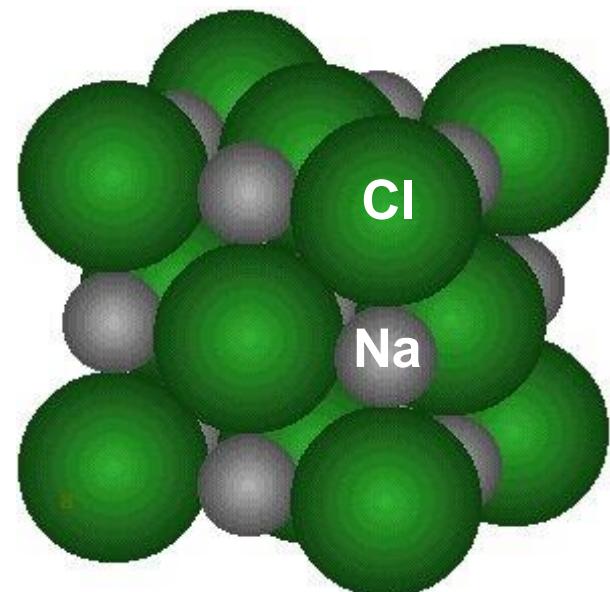


Vue selon l'axe $<111>$ de la structure CFC

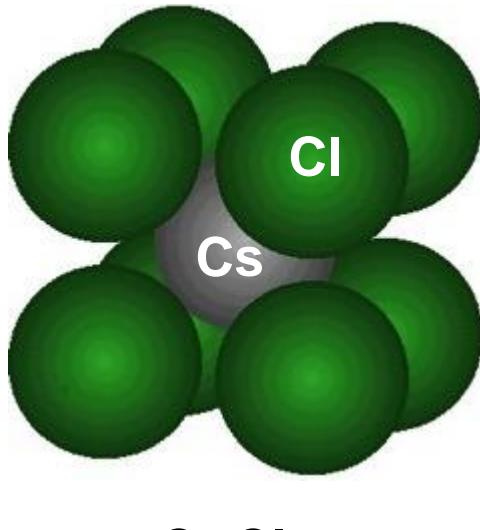


Rappels

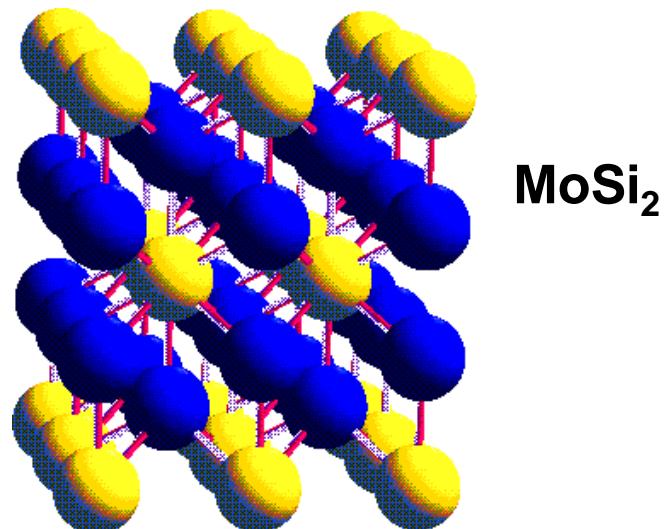
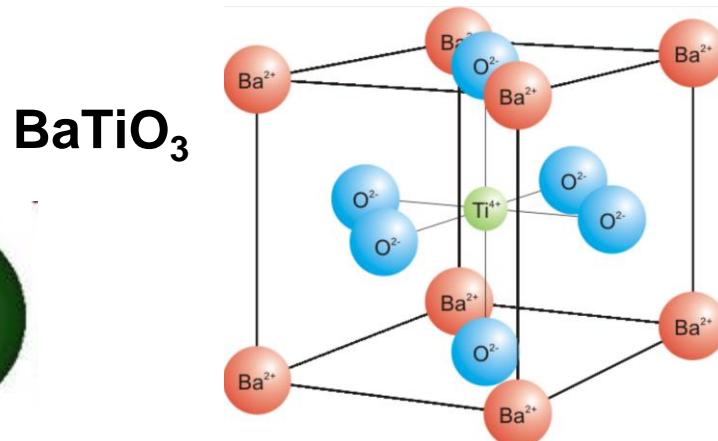
- La structure des céramiques est fonction des rayons ioniques et des valences si elles sont simples, mais sont souvent très complexes.



$$R_{\text{Na}^+} = 1.02 \text{\AA}$$
$$R_{\text{Cl}^-} = 1.81 \text{\AA}$$



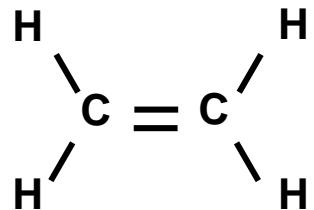
$$R_{\text{Cs}^+} = 1.67 \text{\AA}$$
$$R_{\text{Cl}^-} = 1.81 \text{\AA}$$



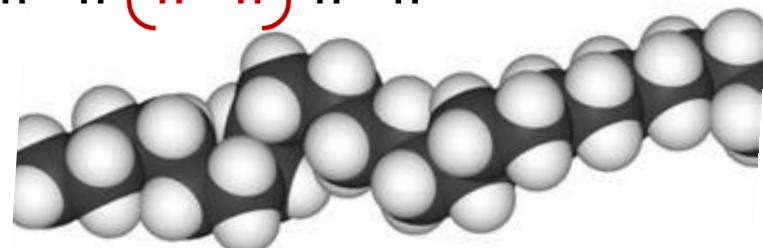
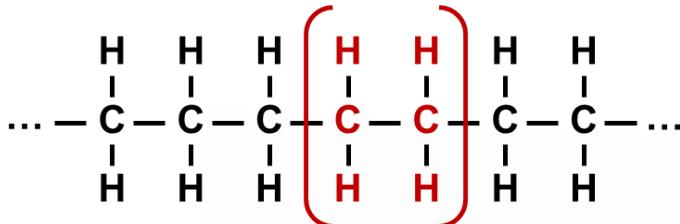
Rappels

- Les polymères, résultant de la polymérisation d'un (ou plusieurs) monomères sont classés en: thermoplastiques, élastomères (quelques ponts) et thermodurcis (grande densité de ponts entre chaînes) en fonction de leur degré de réticulation.

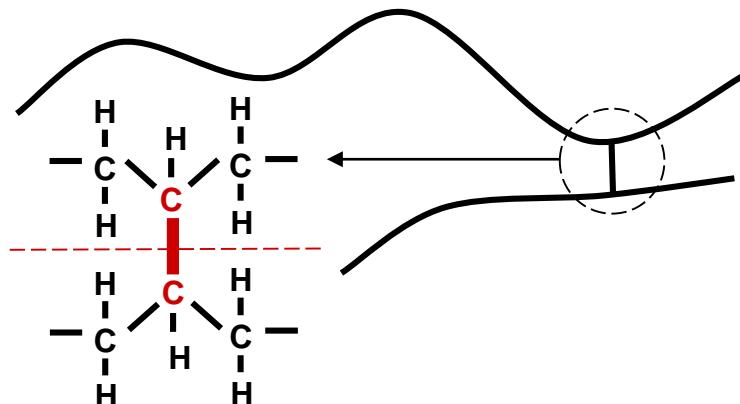
éthylène C_2H_4



Polyéthylène (PE)



réticulation



thermoplastique

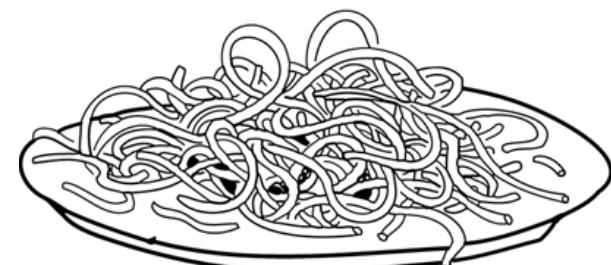
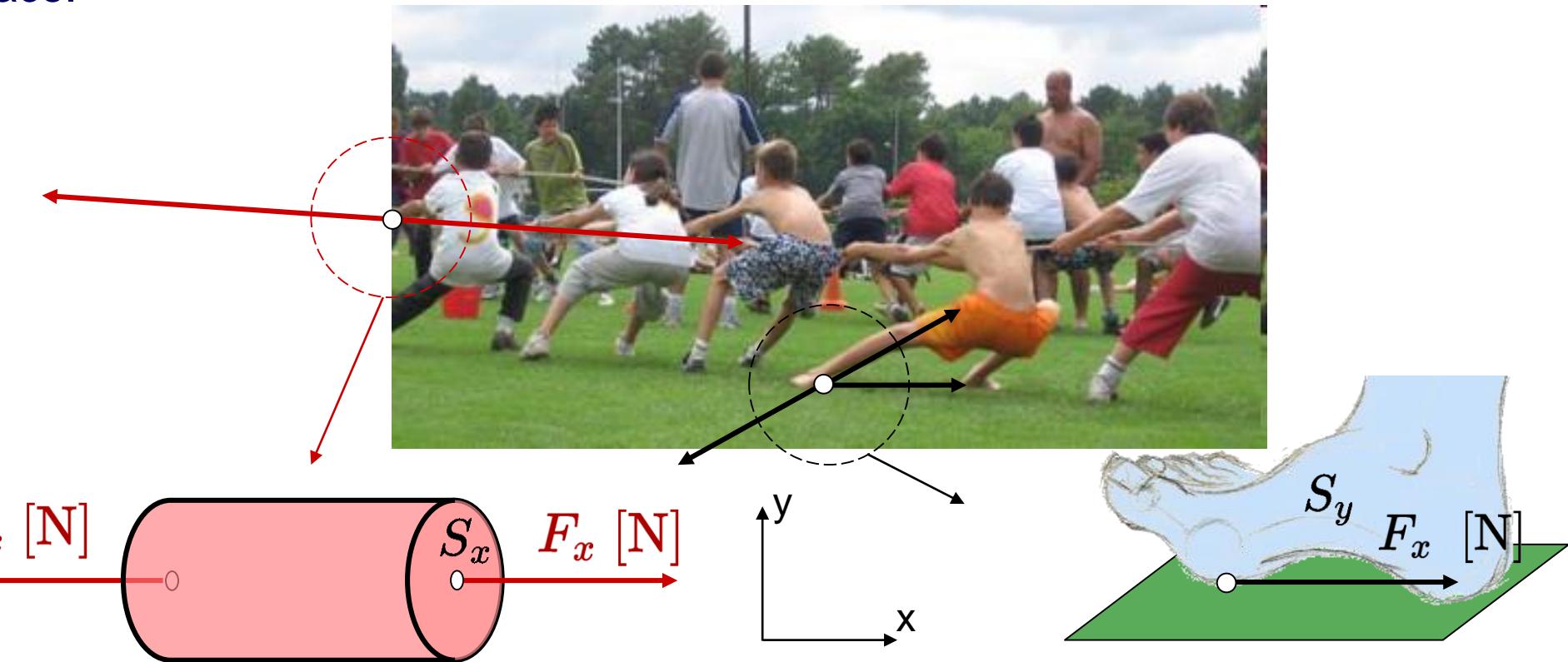


Table des matières

- Contraintes et déformations
- Loi de Hooke
- Traction / compression uniaxiale
- Energie élastique
- Cisaillement simple
- Compression hydrostatique
- Propriétés élastiques des matériaux
- Choix des matériaux

Contraintes et déformations

On définit les contraintes comme des forces exercées par unité de surface.
Les forces se décomposent en composantes parallèle et perpendiculaire à la surface.



$$\text{Contrainte: } \sigma_{xx} = \frac{F_x}{S_x} \quad [\text{Pa} = \text{N/m}^2]$$

Traction ($F \perp$ à la surface)

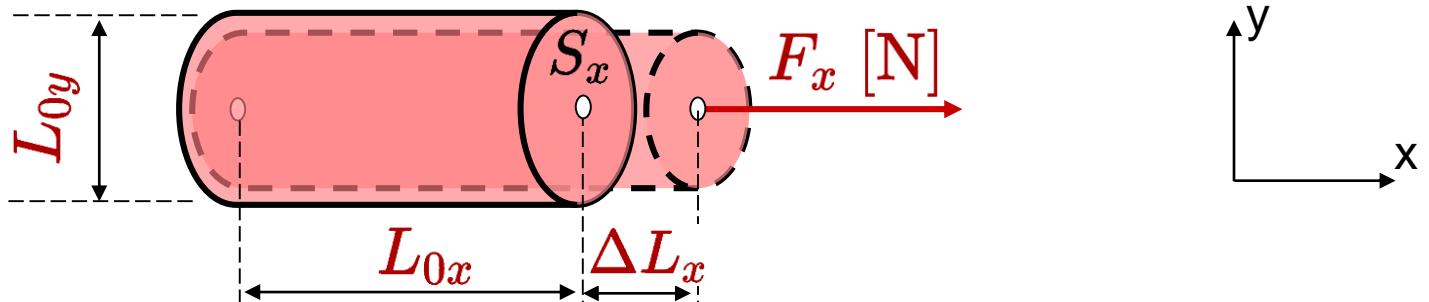
$$\text{Contrainte: } \sigma_{xy} = \frac{F_x}{S_y} \quad [\text{Pa} = \text{N/m}^2]$$

Cisaillement ($F //$ à la surface)

Contraintes et déformations

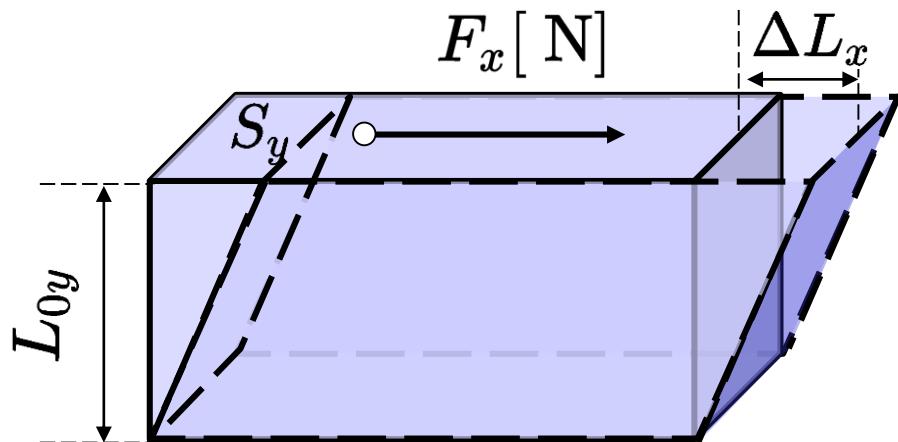
Lorsqu'un corps est soumis à des forces (contraintes) externes, il se déforme.

$$\sigma_{xx} = \frac{F_x}{S_x}$$



Traction: $\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta L_x}{L_{0x}}$ $\varepsilon_{yy} = \frac{\Delta L_y}{L_{0y}}$

Les déformations ε sont sans dimension !



Cisaillement

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \frac{\Delta L_x}{L_{0y}} \quad \sigma_{xy} = \frac{F_x}{S_y}$$

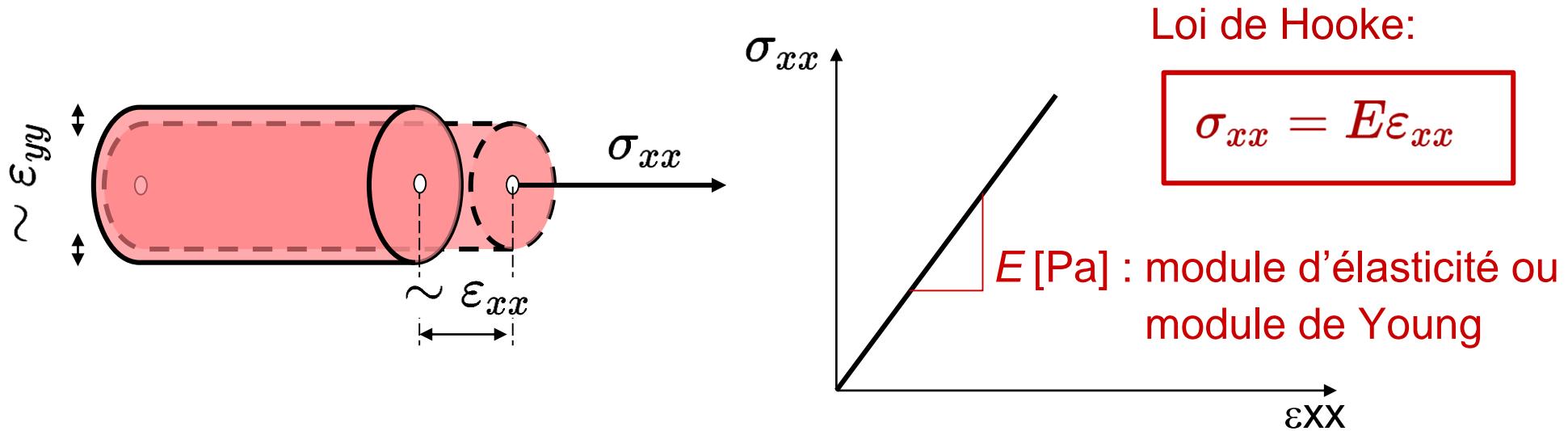
(Facteur $\frac{1}{2}$ par convention)

Loi de Hooke



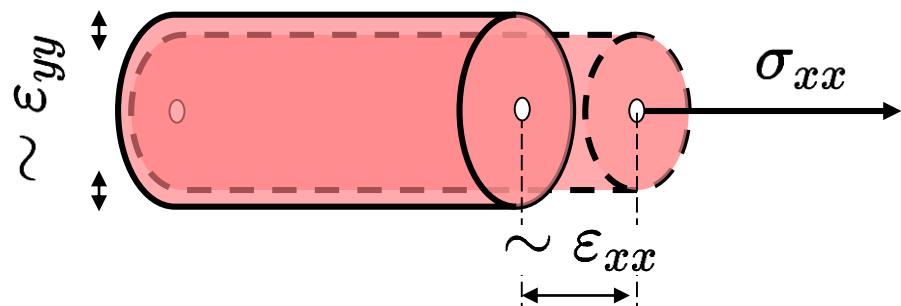
Dans une gamme de déformation dite **élastique**, un corps soumis à une charge normale se déforme mais revient à sa position originale une fois déchargé (**déformation réversible**).

Si la relation entre contrainte et déformation est linéaire, on parle de **déformation élastique linéaire**.



Loi de Hooke

En tirant sur un matériau dans la direction x , on observe également une **diminution de sa section**. La contraction selon des directions transverses y et z est mesurée par le coefficient de Poisson ν



$$\varepsilon_{yy} = -\nu \varepsilon_{xx}$$

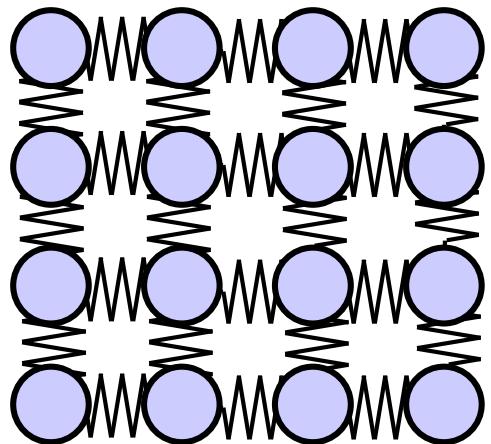
$$\varepsilon_{zz} = -\nu \varepsilon_{xx}$$

(élasticité isotrope)

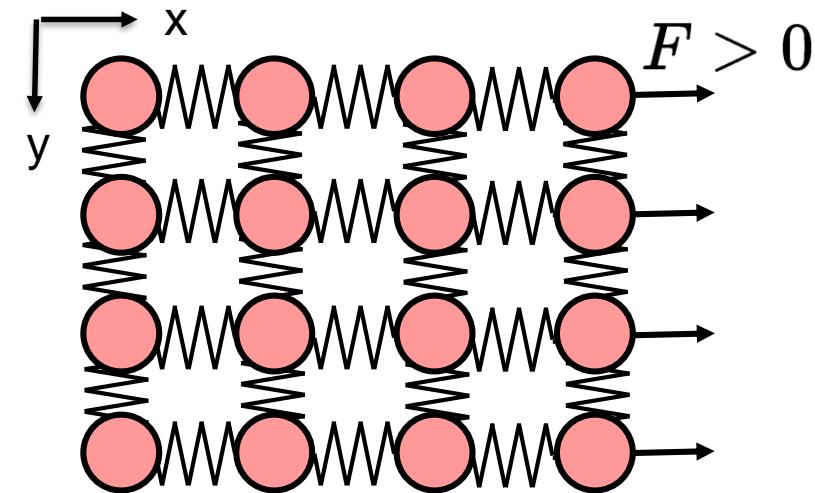
Pour un cristal simple cubique, il est aisément de relier les propriétés élastiques aux liaisons interatomiques, en prenant par exemple un réseau cubique et un potentiel de Lennard-Jones.

PS : une propriété est **isotrope** si elle est la même dans toutes les directions

Loi de Hooke



$$F = 0$$



D'où vient alors le coefficient de Poisson?
→ Contraction suivant y

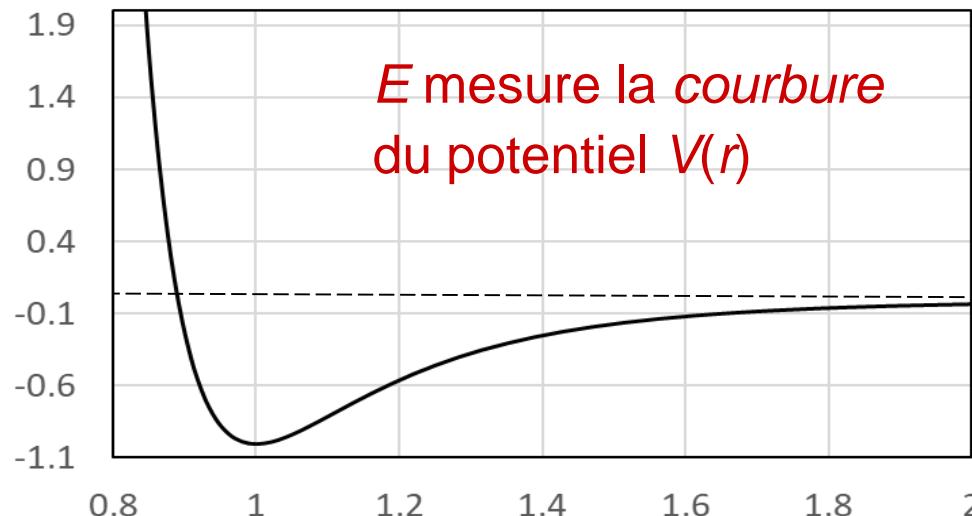
En prenant un potentiel de Lennard-Jones:

$$V = \varepsilon_0 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right] \text{ et } F = -\frac{dV}{dr}$$

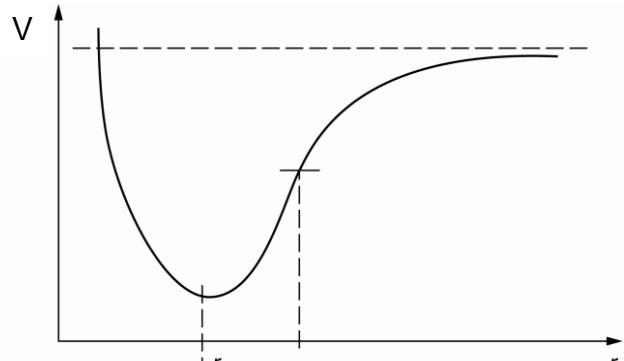
On a en traction uniaxiale, autour de la position d'équilibre:

$$\frac{F(r)}{r_0^2} = \frac{72\varepsilon_0}{r_0^3} \times \frac{r - r_0}{r_0}$$

$$E = \frac{72\varepsilon_0}{r_0^3}$$

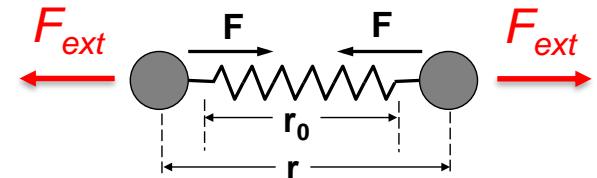


Loi de Hooke



Force externe

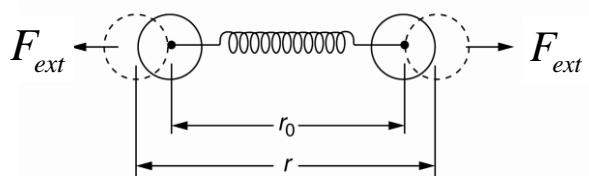
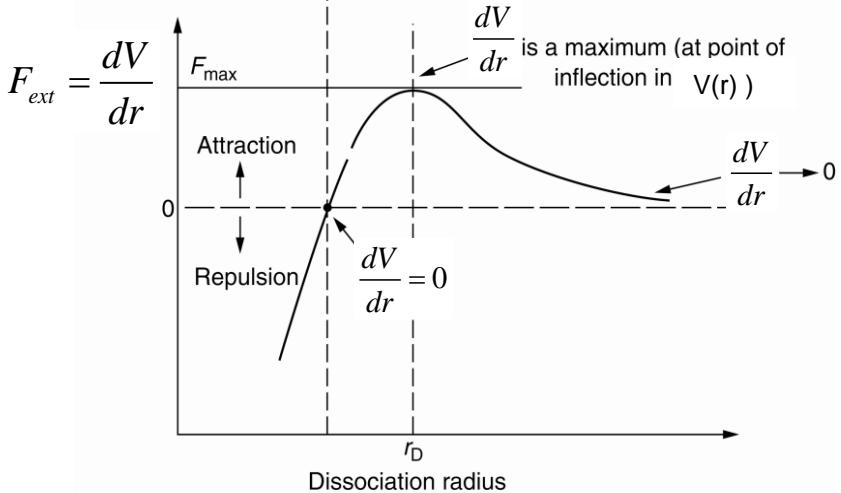
$$F_{ext} = -F = \frac{dV}{dr}$$



Raideur

$$R = \frac{dF_{ext}}{dr} = \frac{d^2V}{dr^2}$$

Courbure du potentiel V



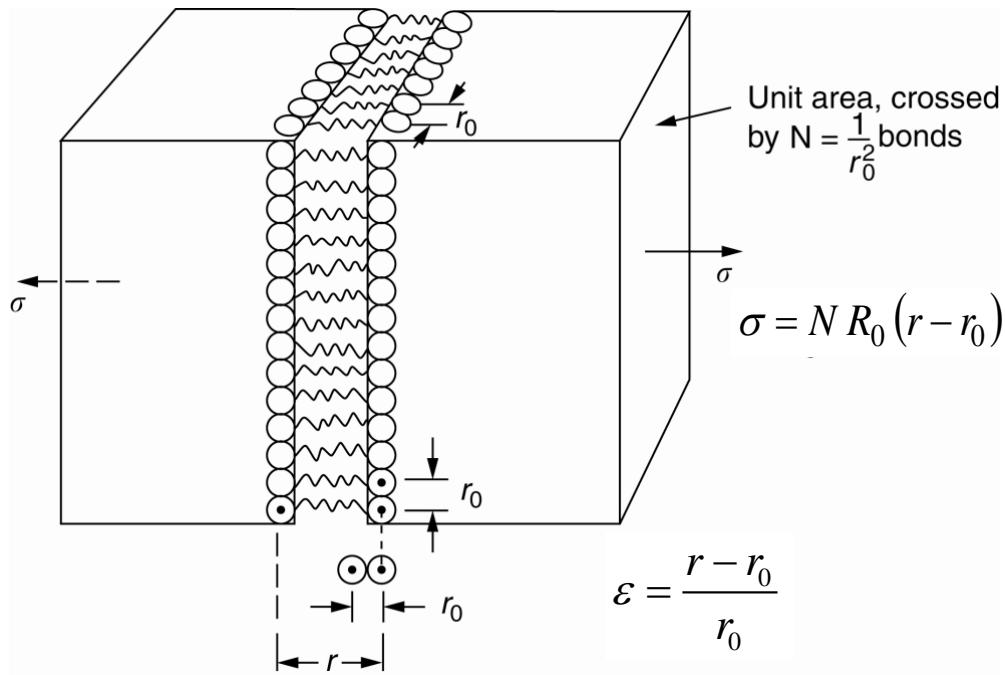
Faibles déformations (élasticité):

$$R = R_0 = \left(\frac{d^2V}{dr^2} \right)_{r=r_0}$$

$$\text{et } F_{ext} = R_0(r - r_0)$$

Force nécessaire pour changer la distance entre deux atomes de $r_0 \rightarrow r$

Loi de Hooke



$$\sigma = N R_0 (r - r_0)$$

$$N = \text{nombre de liaisons par m}^2 = \frac{1}{r_0^2}$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{R_0}{r_0} \frac{r - r_0}{r_0} = \frac{R_0}{r_0} \varepsilon$$

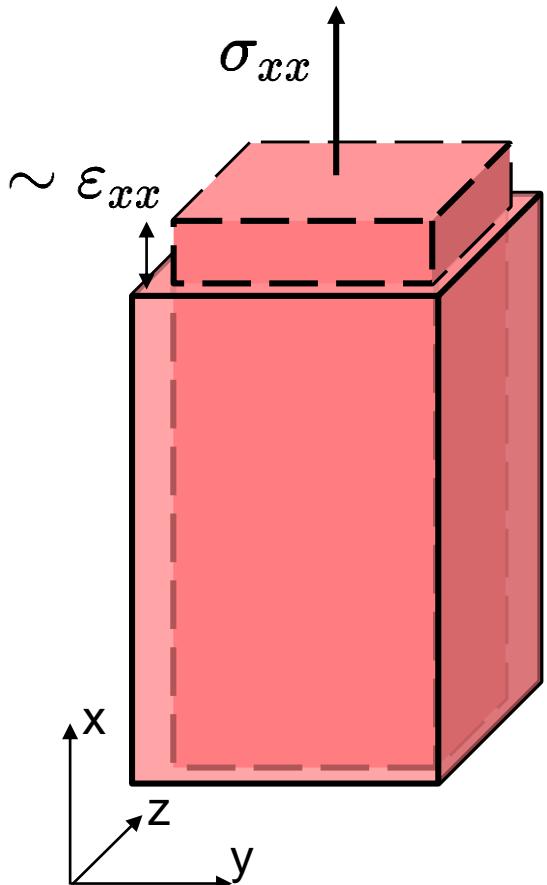
Module de Young :

$$E = \frac{R_0}{r_0} = \frac{1}{r_0} \left(\frac{d^2 V}{dr^2} \right)_{r=r_0}$$

Type de liaison	R ₀ (N/m)	E (GPa) = R ₀ /r ₀
Covalente (ex. C-C)	50 à 180	200 à 1000
Métallique (ex. Cu-Cu)	15 à 75	60 à 300
Ionique (ex. Na-Cl)	8 à 24	32 à 96
Hydrogène (ex. H ₂ O-H ₂ O)	2 à 3	8 à 12
Van der Waals	0.5 à 1	2 à 4

Traction/compression uniaxiale

Lors d'une déformation uniaxiale (ou autre), le matériau subit un **changement de volume** donné par:



$$V_0 = L_{0x} \times L_{0y} \times L_{0z}$$

$$V = (L_{0x} + \Delta L_{0x}) \times (L_{0y} + \Delta L_{0y}) \times (L_{0z} + \Delta L_{0z})$$

$$\frac{V}{V_0} = (1 + \varepsilon_{xx}) \times (1 + \varepsilon_{yy}) \times (1 + \varepsilon_{zz})$$

$$\cong 1 + (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})$$

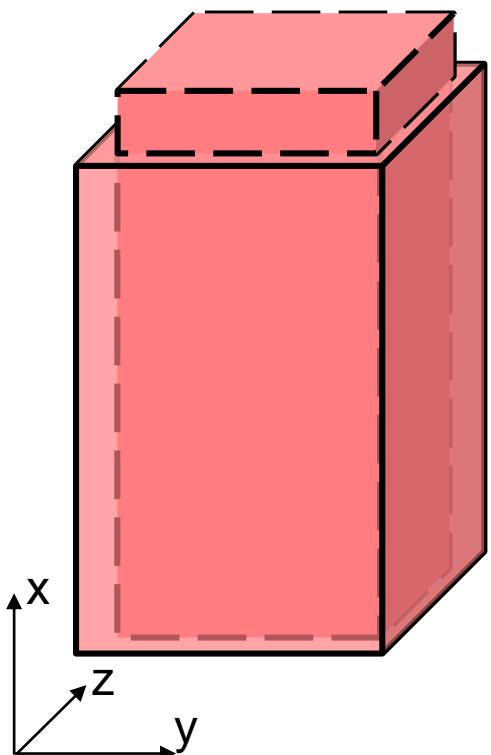
$$\boxed{\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0} \cong \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{xx}(1 - 2v)}$$

Le module de Poisson est donc ≤ 0.5 .

Le caoutchouc, avec $v \cong 0.5$ se déforme élastiquement presque sans changement de volume.

Traction/compression uniaxiale

De même, lors d'une déformation uniaxiale (ou autre), le matériau subit aussi un **changement de section efficace (ou transverse)** :



$$S_0 = L_{0y}L_{0z}$$

$$S = L_y L_z \underbrace{\Delta L_y / L_{0y}}_{\Delta L_z / L_{0z}}$$

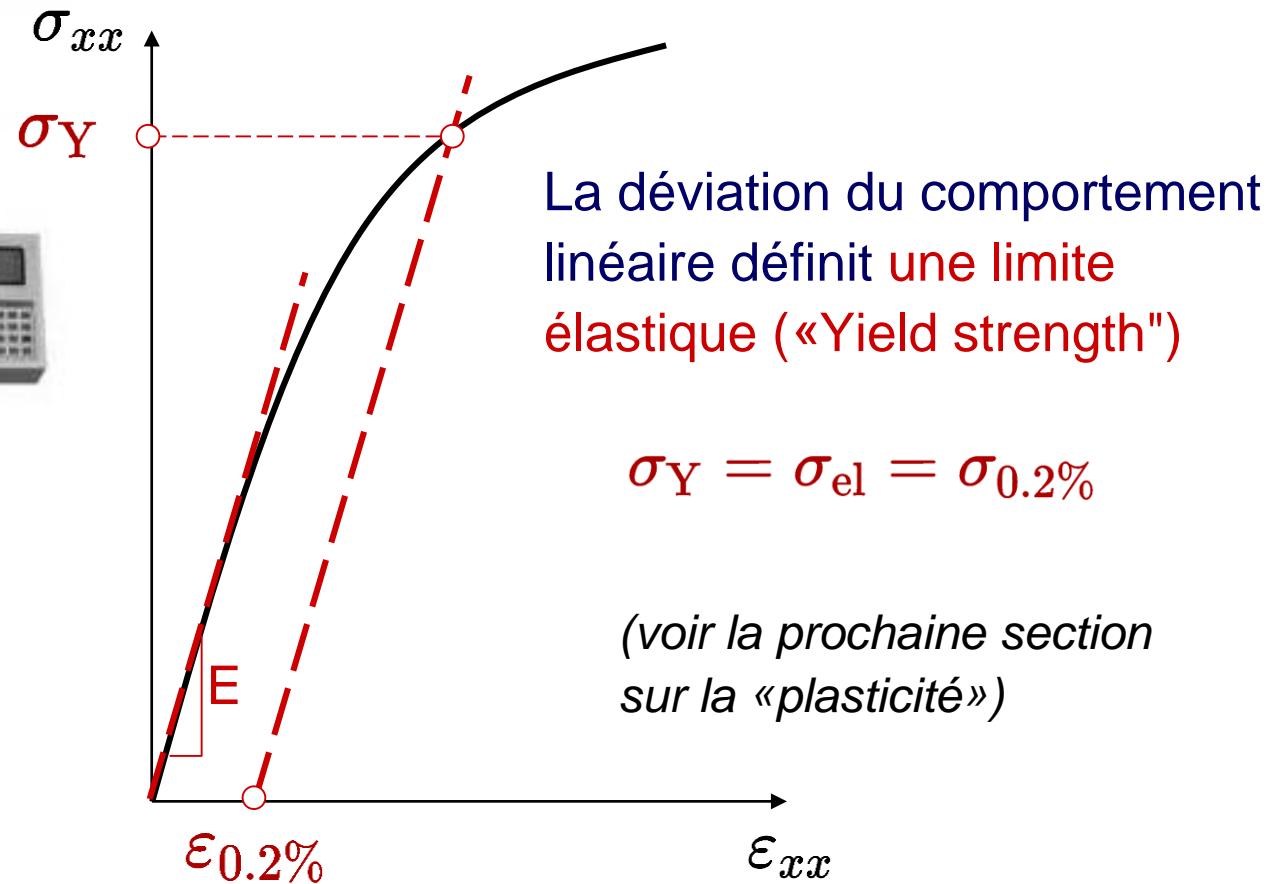
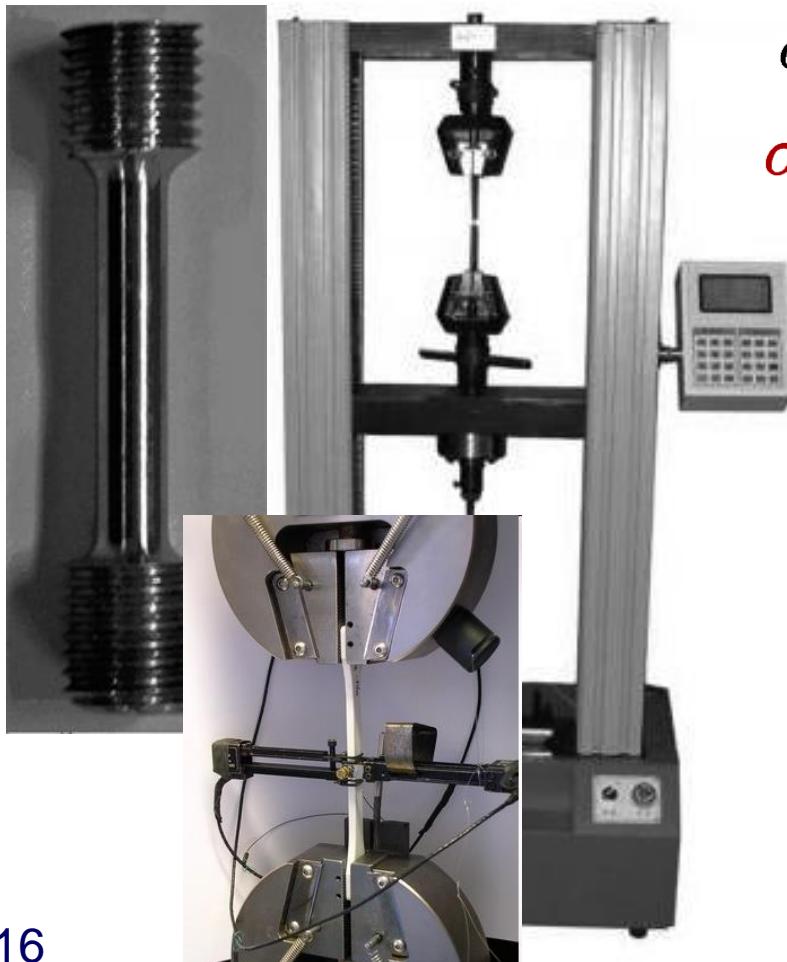
$$S = L_{0y}(1 - \nu\varepsilon_{xx}) \times L_{0z}(1 - \nu\varepsilon_{xx})$$

$$S = S_0(1 - 2\nu\varepsilon_{xx} + \nu^2\varepsilon_{xx}^2) \approx S_0(1 - 2\nu\varepsilon_{xx})$$

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \frac{S - S_0}{S_0} = -2\nu\varepsilon_{xx}$$

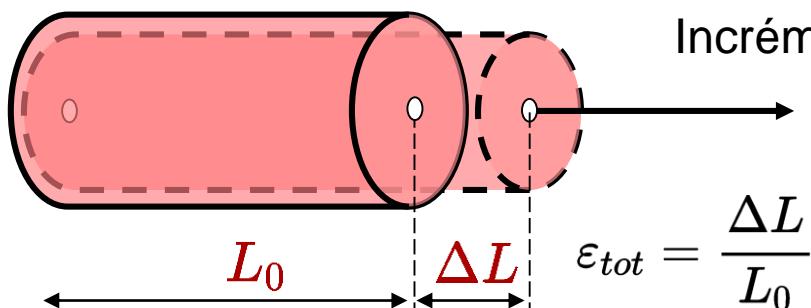
Traction/compression uniaxiale

La mesure du module élastique et du coefficient de Poisson se fait généralement sur une **éprouvette de traction**. On impose un mouvement et on mesure force/ allongement par des capteurs.



Energie Elastique

Pour déformer élastiquement un matériau, il faut lui appliquer une contrainte et donc fournir une énergie. Cette énergie est emmagasinée dans le matériau sous forme d'énergie élastique.



Incrément de **travail** pour un incrément dl : $dW = Fdl$

Soit au total: $W = \int_{L_0}^{L_0 + \Delta L} Fdl$

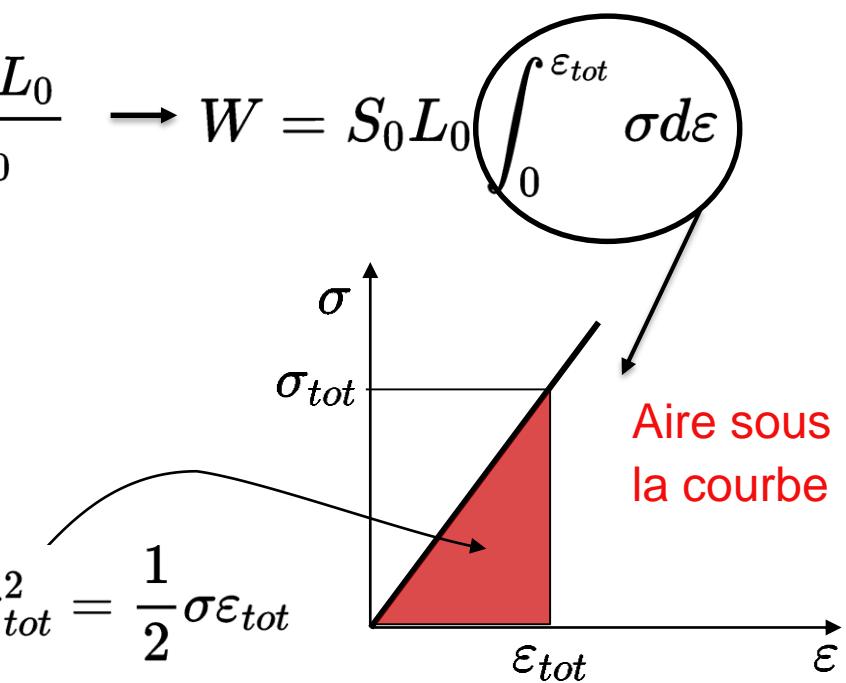
Avec le changement de variable : $\varepsilon = \frac{l - L_0}{L_0} \rightarrow W = S_0 L_0$

En utilisant la loi de Hooke : $\sigma = E\varepsilon$

On obtient l'énergie élastique stockée :

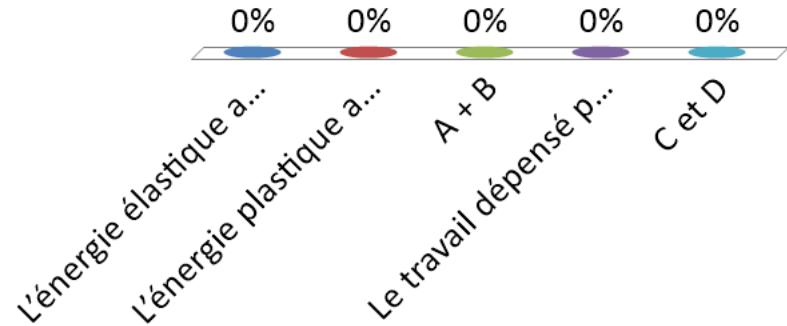
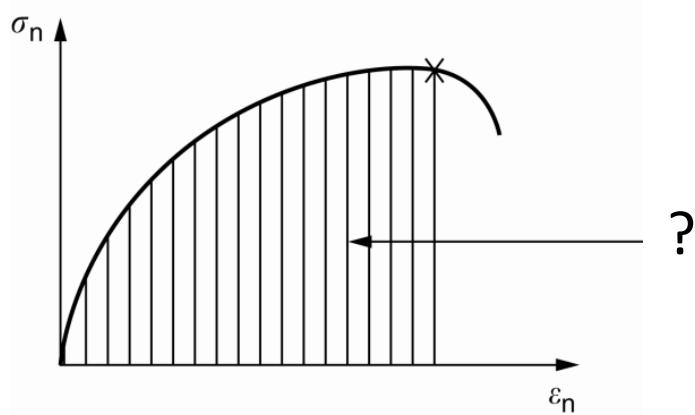
$$W [J] = S_0 L_0 \frac{E \varepsilon_{tot}^2}{2} = V_0 \frac{E \varepsilon_{tot}^2}{2}$$

Densité d'énergie élastique [J/m³]: $\omega = \frac{1}{2} E \varepsilon_{tot}^2 = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon_{tot}$



Dans le cas illustré ici, que représente l'aire sous la courbe contrainte-déformation ?

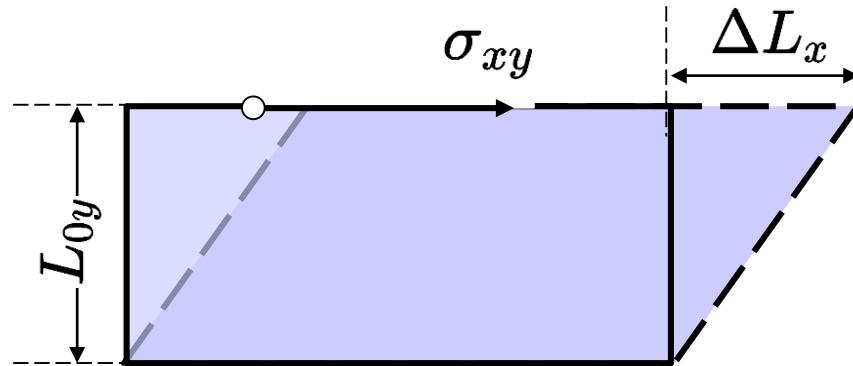
- A. L'énergie élastique accumulée jusqu'à la croix
- B. L'énergie plastique accumulée jusqu'à la croix
- C. A + B
- D. Le travail dépensé pour déformer le matériau jusqu'à la croix
- E. C et D



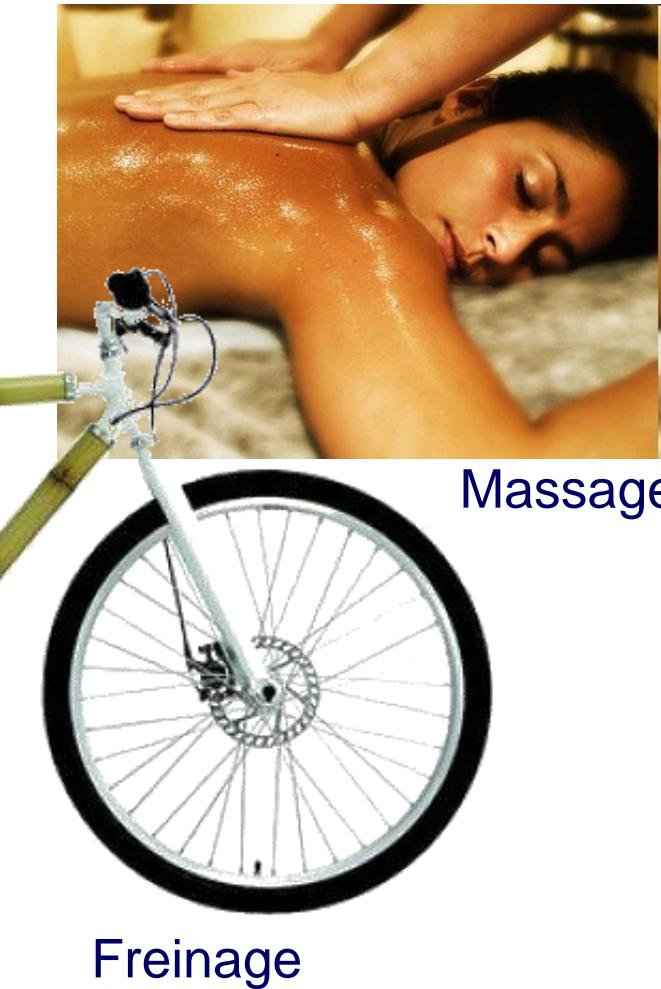
Cisaillement simple

Un corps soumis à un cisaillement simple élastique permet de définir un **module de cisaillement G** .

$$\sigma_{xy} = G 2 \varepsilon_{xy} = G \frac{\Delta L_x}{L_{0y}}$$



Application de vernis

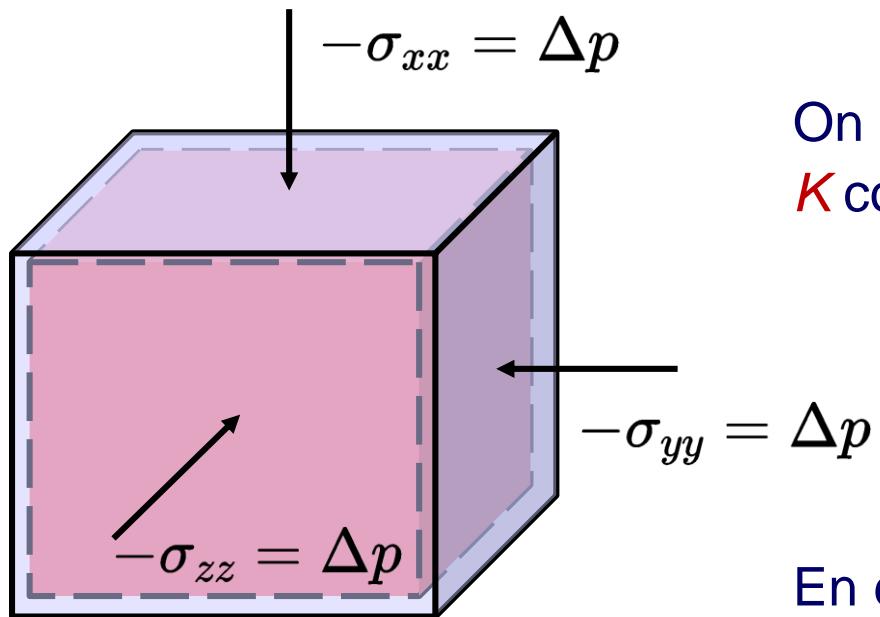


En élasticité isotrope, on peut montrer que:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Compression hydrostatique

Une compression hydrostatique correspond à une contrainte normale constante (négative) sur toute la surface du solide.

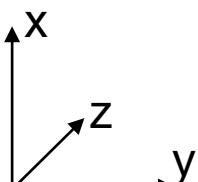


On définit le **coefficient de compressibilité** **K** comme:

$$K = -V_0 \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad [\text{Pa}]$$

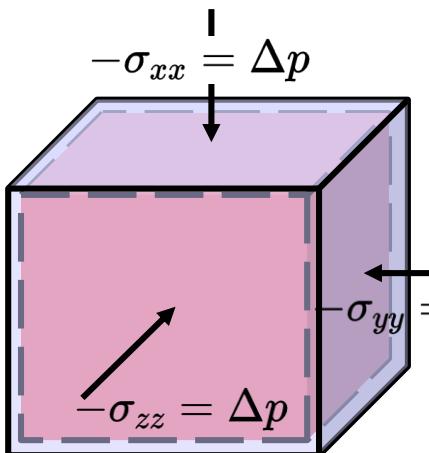
En élasticité isotrope, on peut montrer que:

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



Compression hydrostatique

On peut décomposer la pression en 3 temps:



1. Compression selon x:

$$L_{0x} \rightarrow L_{0x}(1 + \varepsilon_{xx}) = L_{0x}(1 + \varepsilon_{xx})$$

$$L_{0y} \rightarrow L_{0y}(1 + \varepsilon_{yy}) = L_{0y}(1 - \nu\varepsilon_{xx})$$

$$L_{0z} \rightarrow L_{0z}(1 + \varepsilon_{zz}) = L_{0z}(1 - \nu\varepsilon_{xx})$$

2. Compression selon y:

$$L_{0x}(1 + \varepsilon) \rightarrow L_{0x}(1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)$$

$$L_{0y}(1 - \nu\varepsilon) \rightarrow L_{0y}(1 - \nu\varepsilon)(1 + \varepsilon)$$

$$L_{0z}(1 - \nu\varepsilon) \rightarrow L_{0z}(1 - \nu\varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)$$

3. ...et z: $L_{0x}(1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon) \rightarrow L_{0x}(1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)$

$L_{0y}(1 - \nu\varepsilon)(1 + \varepsilon) \rightarrow L_{0y}(1 - \nu\varepsilon)(1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)$

$L_{0z}(1 - \nu\varepsilon)(1 - \nu\varepsilon) \rightarrow L_{0z}(1 - \nu\varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)(1 + \varepsilon)$

D'où les volumes:

$$V_0 = L_{0x} L_{0y} L_{0z}$$

$$V = L_{0x} L_{0y} L_{0z} ((1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)^2)^3 \approx V_0 (1 + (1 - 2\nu)\varepsilon)^3$$

$$K = -\frac{V_0}{\Delta V} \Delta p = -\frac{V_0}{V - V_0} \Delta p = -\frac{V_0}{V_0(1 + 3(1 - 2\nu)\varepsilon - 1)} \Delta p = \frac{-\Delta p}{3(1 - 2\nu)\varepsilon}$$

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

Compression hydrostatique

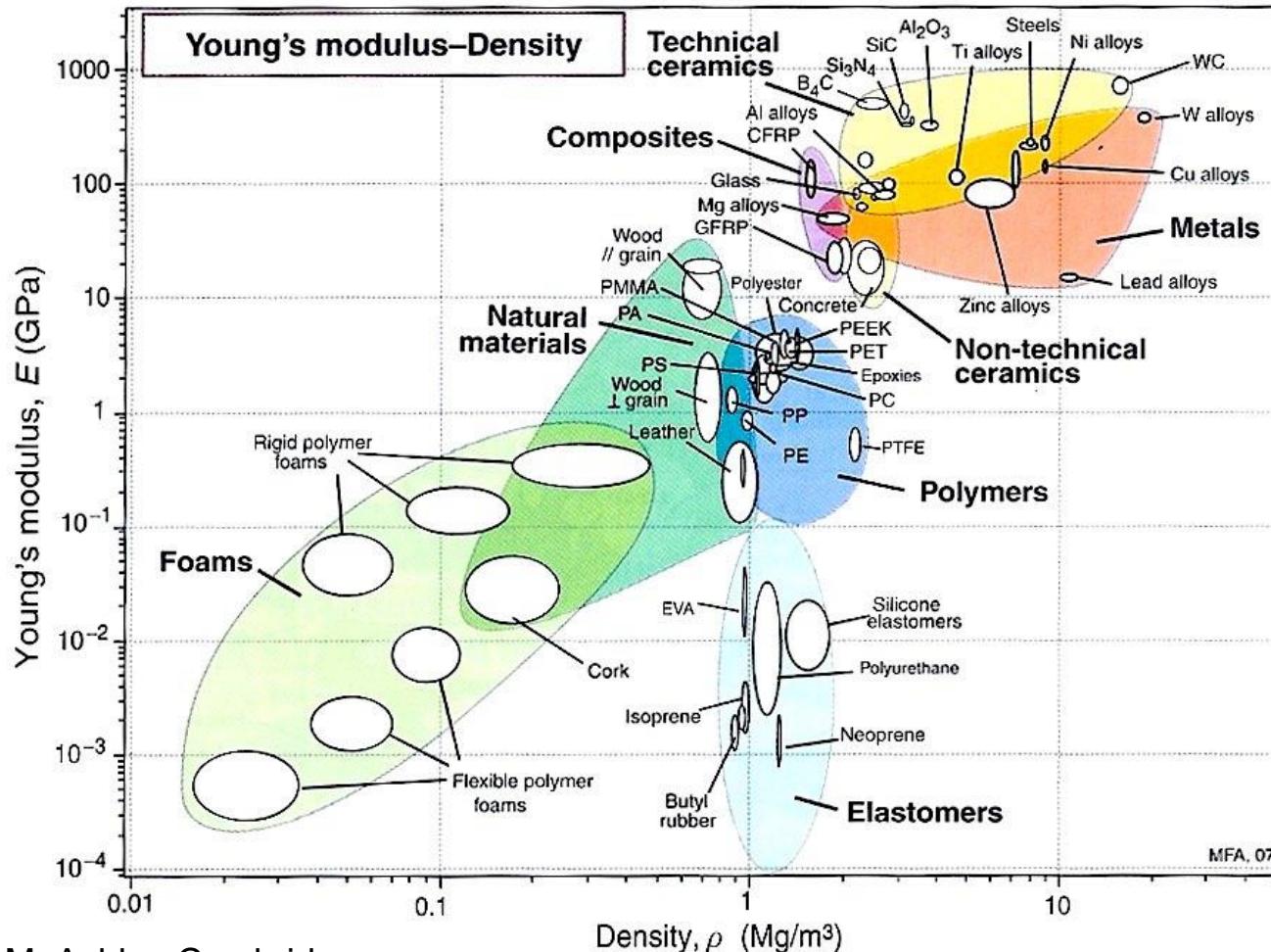
Propriétés élastiques des matériaux

Quelques valeurs de E et ν (dont on peut déduire K et G):

Matériaux	E [GPa]	ν [-]
Caoutchouc	0.001-0.1	~0.5
PTFE (Teflon)	0.5	0.46
Nylon	2 - 4	0.39
Chêne	11	0.3
Béton (en compression)	30	0.2
Aluminium	69	0.33
Verre	50 - 90	0.18 - 0.3
Acier	200	0.3
Saphir (Al ₂ O ₃) axe c	435	0.3
Carbure de silicium (SiC)	450	0.17
Carbure de tungstène (WC)	450 - 650	0.22
Nanotubes de carbone	>1.000	~0.2
Diamant	1220	0.1

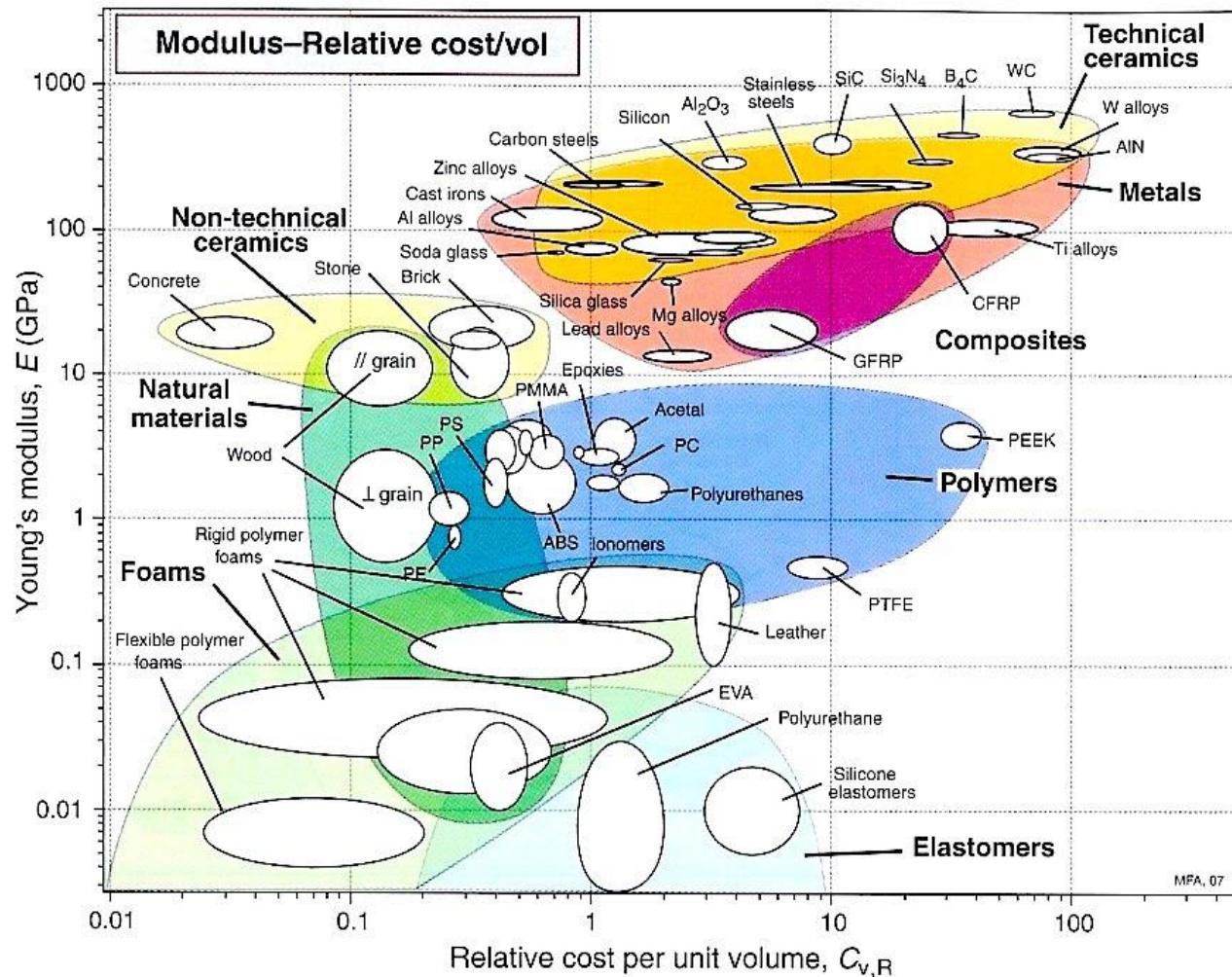
Propriétés élastiques des matériaux

Les cartes d'Ashby donnent une représentation graphique du module d'élasticité (ou de Young) en fonction de la densité...



Propriétés élastiques des matériaux

... ou du prix.



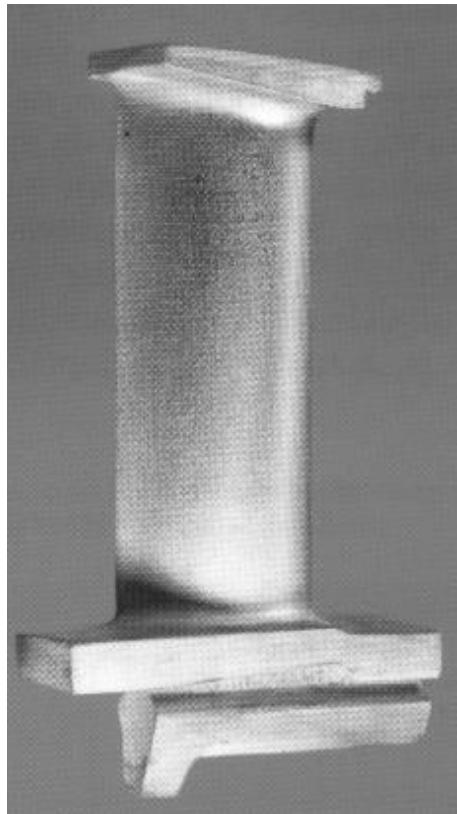
Propriétés élastiques des matériaux

Les coefficients (E , ν , G) peuvent dépendre de l'orientation et sont donc alors **anisotropes** (ex. monocristal). Un échantillon polycristallin présente des **propriétés isotropes** si les grains sont orientés aléatoirement.

$$\begin{array}{l} E([100]) \\ \nearrow \\ E([110]) \end{array}$$

$$E([110]) \neq E([100])$$

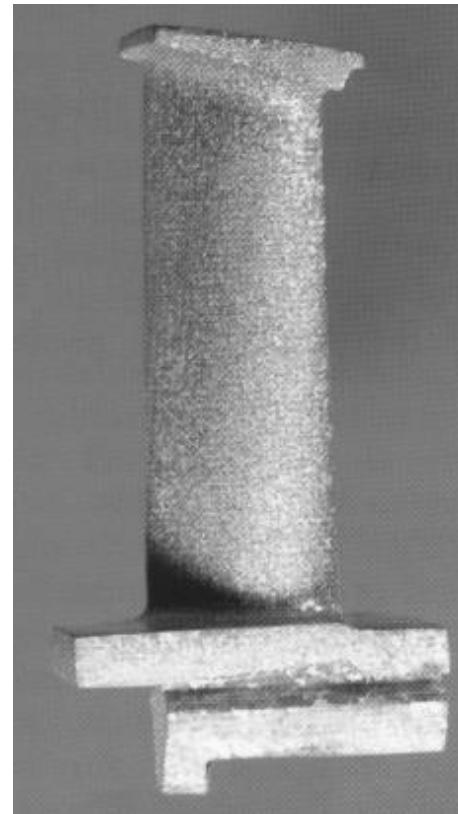
Aube de turbine
monocristalline



$$\begin{array}{l} \nearrow \\ E(\vec{n}) \end{array}$$

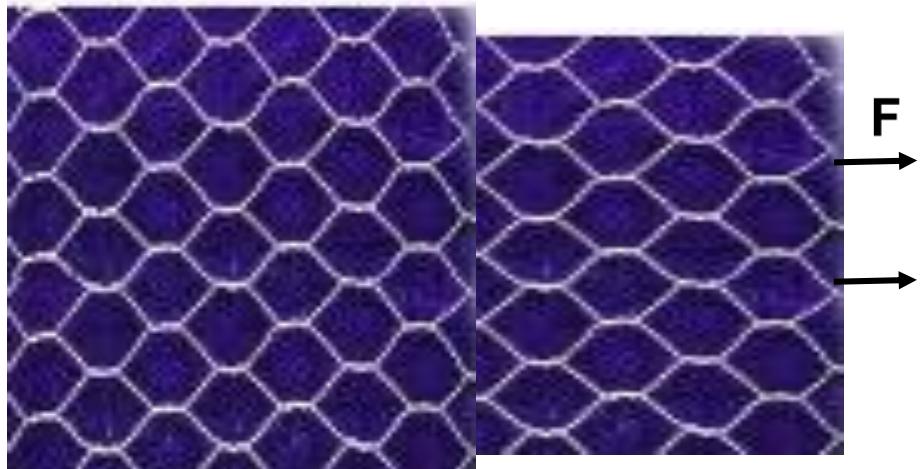
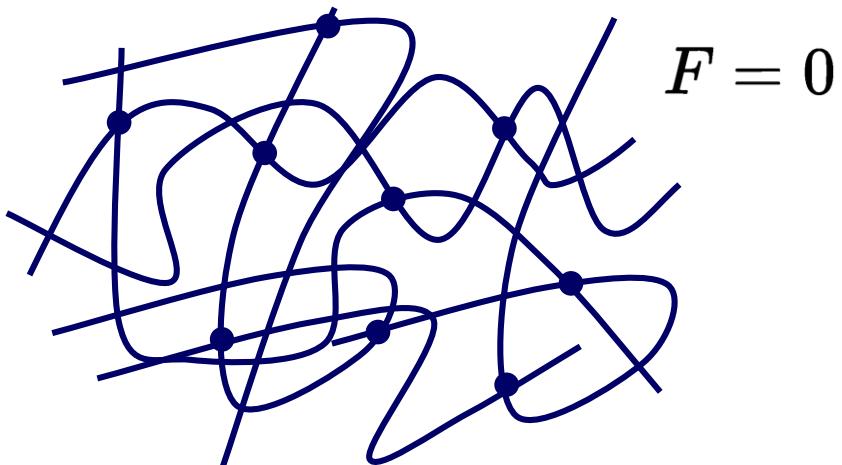
$$E(\vec{n}) = E \quad \forall \vec{n}$$

Aube de turbine
polycristalline



Propriétés élastiques des matériaux

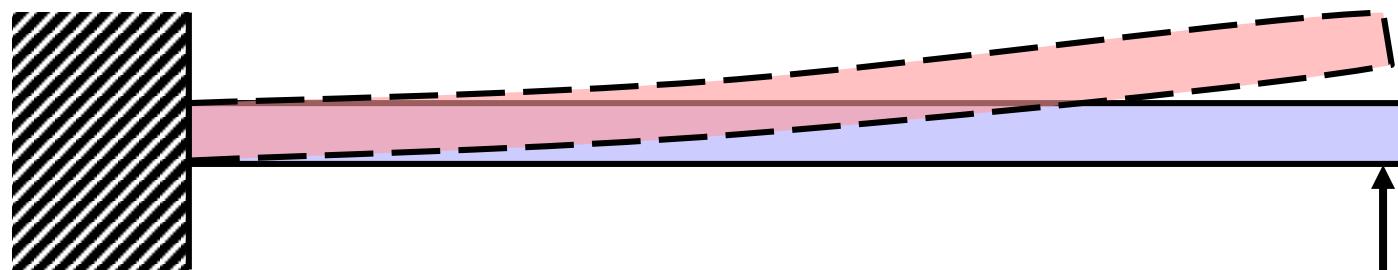
Pour un **élastomère**, la déformation élastique a lieu via les ponts entre les molécules, un peu comme un treillis.



La déformation élastique peut atteindre **1000%**. Au-delà d'une limite, tous les ligaments entre ponts sont étirés et le matériau se durcit: on tire alors sur les liaisons fortes.

Propriétés élastiques des matériaux

Une situation réelle de déformation élastique:



Différence de pression au niveau des ailes

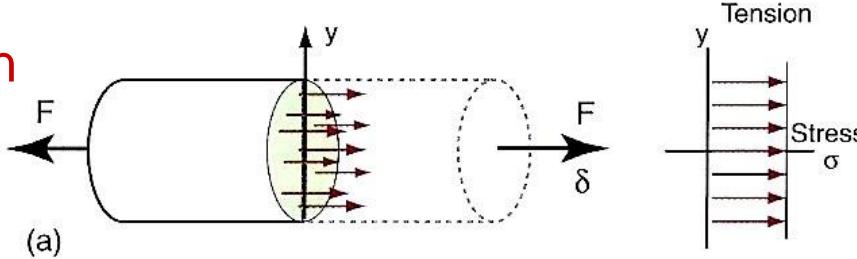
→ contraintes verticales qui compensent le poids de l'avion

Propriétés élastiques des matériaux

Le choix d'un matériau dépend de plusieurs facteurs: type de sollicitation, charge maximum, prix, etc. On peut définir un **indice de rigidité spécifique**:



Traction

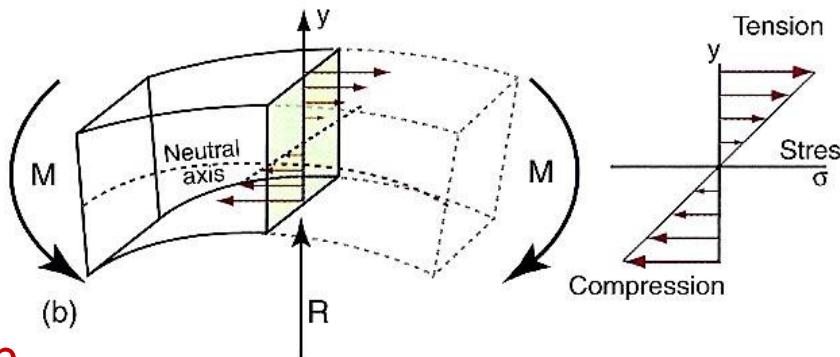


$$\frac{E}{\rho}$$

Acier : 25
Al : 26



Flexion

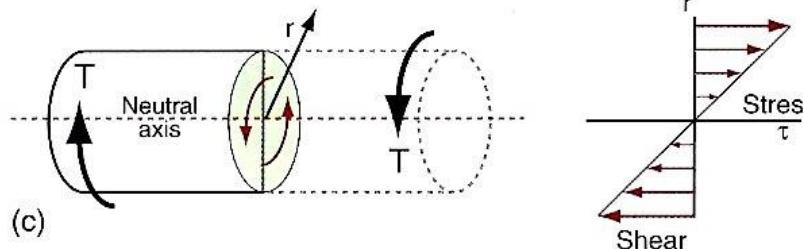


$$\frac{\sqrt{E}}{\rho}$$

Acier : 1.8
Al : 3.1



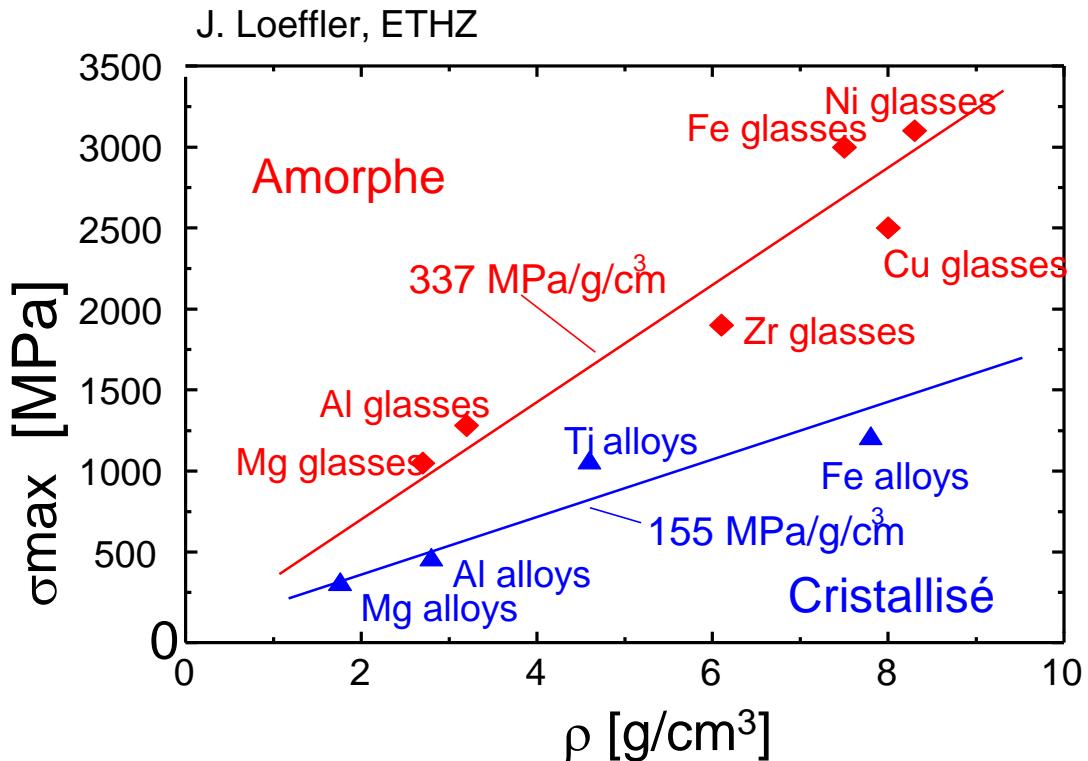
Torsion



$$\frac{\sqrt{G}}{\rho}$$

Propriétés élastiques des matériaux

Certains matériaux ont un comportement élastique remarquable.

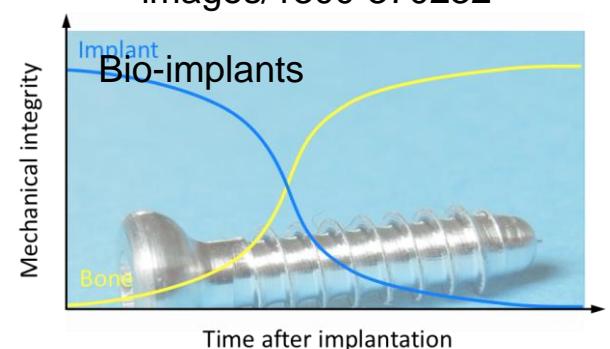


Les **verres métalliques** ont une plus grande limite élastique et des modules de Young peu élevés, ils peuvent donc stocker une plus grande énergie élastique.

$$w_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\max}^2}{E}$$



<https://www.giantbomb.com/images/1300-370232>



Prof. Löffler group at ETH Zurich

Résumé

- Pour caractériser la déformation de matériaux, on définit les **contraintes** (Pa) et les **déformations** (sans dimension).
- Le **module élastique** (E , en Pa) et le module de cisaillement G d'un matériau définissent sa rigidité.
- Ces propriétés dépendent essentiellement des liaisons inter-atomiques /moléculaires.
- Une déformation axiale s'accompagne d'une déformation transverse par l'intermédiaire du coeffcient de Poisson.
- Dans le domaine élastique, l'énergie est emmagasinée dans le matériau et restituée lorsque la contrainte diminue.
- La **limite élastique** est la contrainte au-delà de laquelle le matériau se déforme de manière permanente.
- Le choix d'un matériau dépend (entre autres facteurs) du mode de sollicitation (traction, compression, flexion, torsion,...).

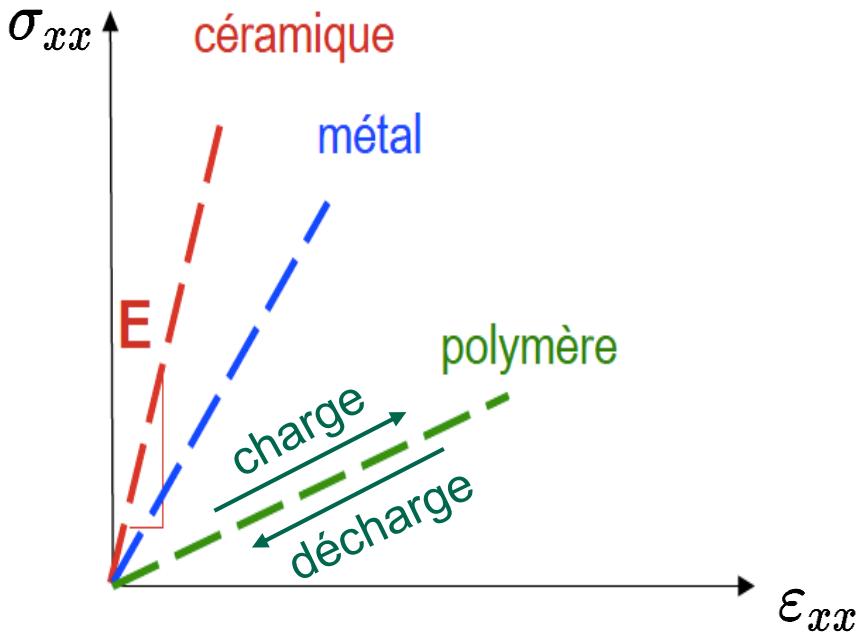
Plasticité

Table des matières

- Introduction
- Origine de la plasticité
- Plasticité des métaux
- Plasticité des polymères
- Dislocations

Introduction

Dans la plupart des applications, l'ingénieur conçoit un dispositif sur la base de son comportement élastique: Après sollicitation mécanique en cours d'utilisation, le dispositif est sensé revenir à son état initial.



- E est lié à l'énergie de liaison entre les atomes
- E représente la rigidité d'un matériau: plus E est grand, plus il est rigide
- E a la même dimension qu'une contrainte (Pa) (la déformation est sans unité)
- La déformation élastique est réversible
- Au-delà d'une certaine valeur, appelée limite élastique, il y aura une déformation résiduelle après décharge du matériau: on parle alors de déformation plastique

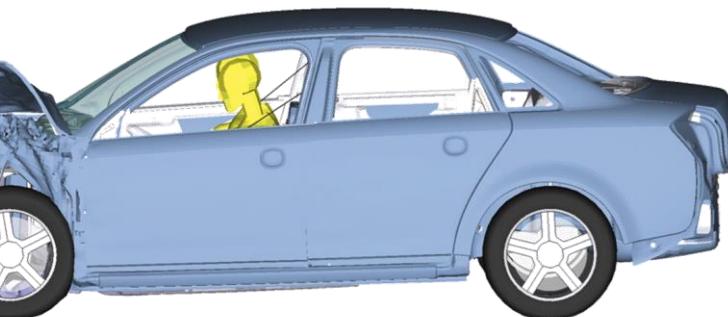
Introduction

Si le module élastique (rigidité) donne la pente initiale d'une courbe de traction et reflète les liaisons entre atomes/molécules, de nombreux **défauts** au niveau microstructural vont influencer ce comportement et **durcir**, voire **détruire** le matériau.



Déformation-rupture
d'un verre

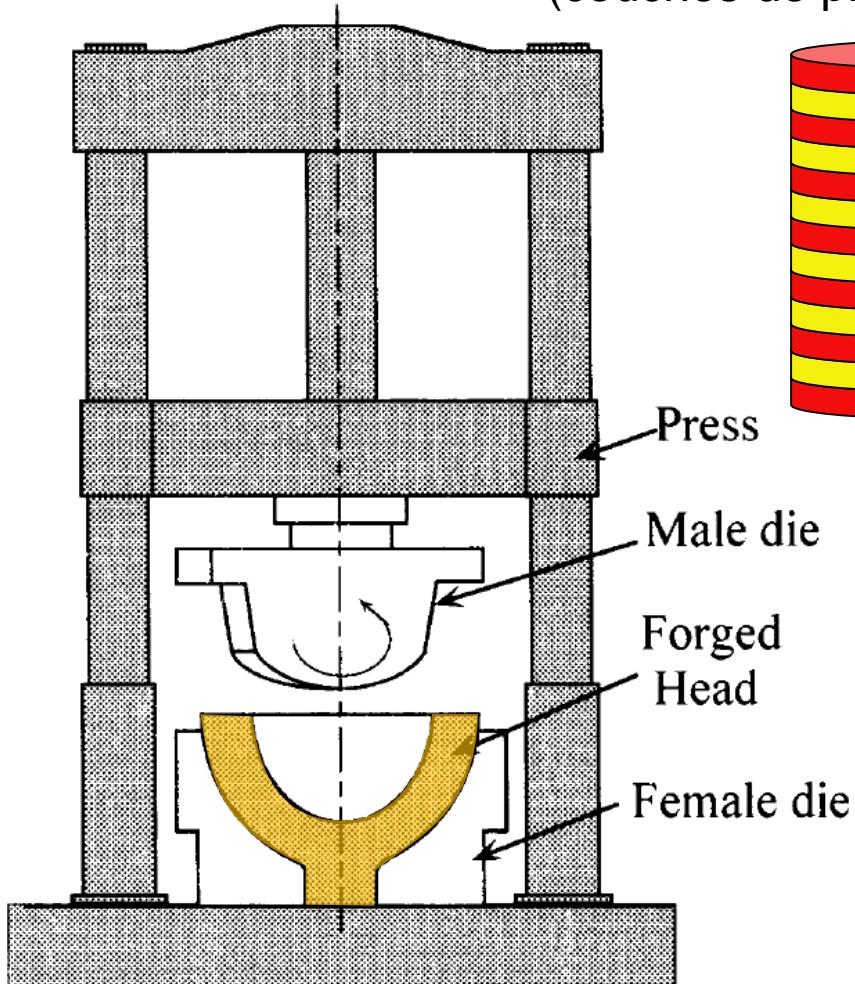
Crash-test d'une
voiture



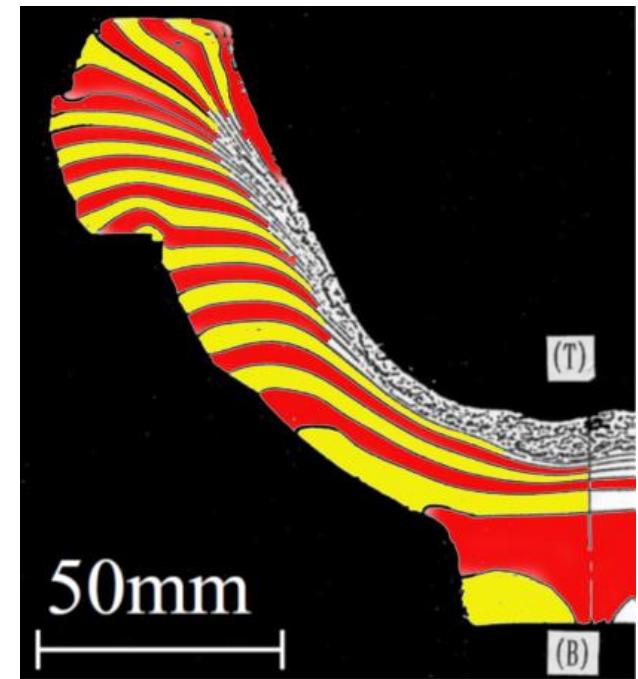
Déformation-rupture
d'un sac PE

Visualisation de la déformation lors du forgeage d'un couvercle de centrale nucléaire à l'aide de plasticine.

«Lingot» (modèle réduit) avant forgeage
(couches de plasticine de couleurs alternées)

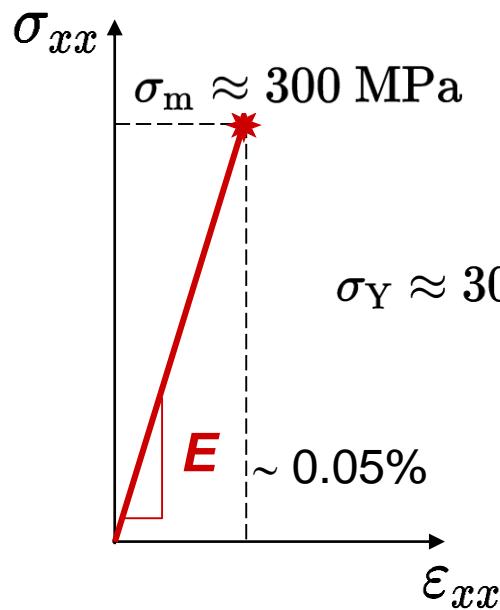


Résultat après forgeage



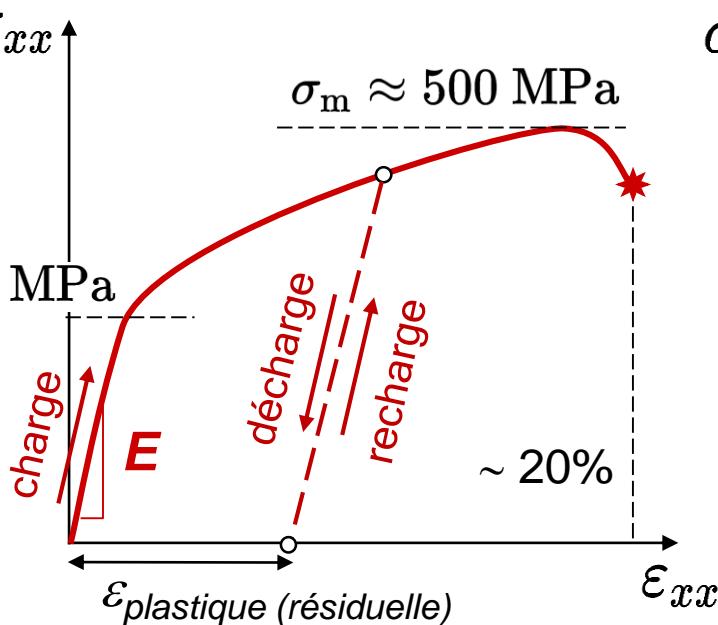
Introduction

La plupart des matériaux ont un comportement mécanique beaucoup plus complexe que ne le décrit l'élasticité linéaire, et qui dépend beaucoup du type de matériaux.



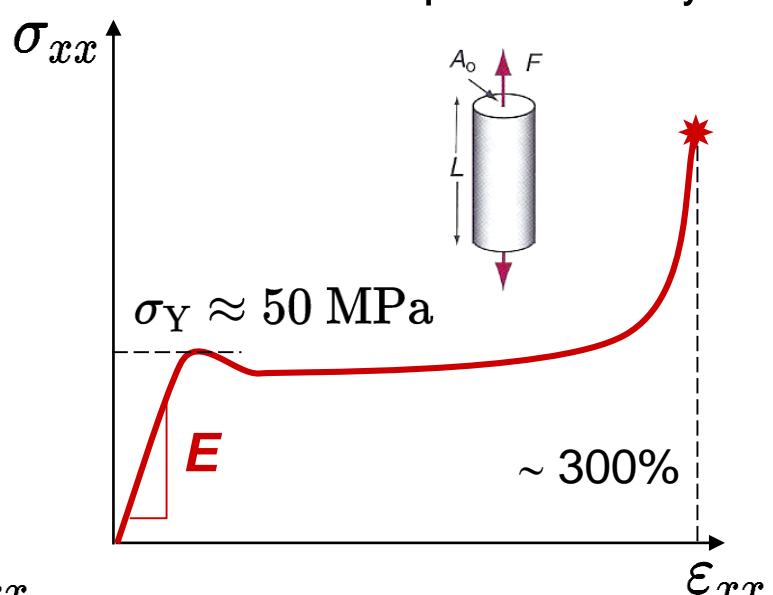
Céramiques

Comportement quasi-élastique jusqu'à la rupture. **Très faible ductilité.**



Métaux

Comportement élastique, puis plastique avec durcissement, striction et rupture. **Bonne ductilité.**

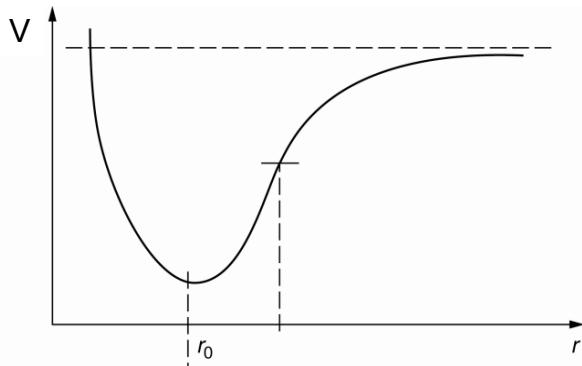


Polymères ductiles

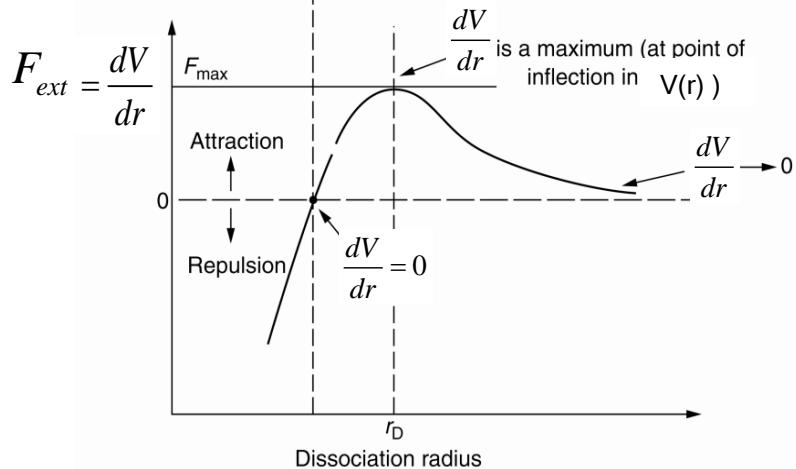
Faible limite élastique, **grande ductilité**, durcissement final et rupture.

Origine de la plasticité

Le modèle de Lennard-Jones permet de déduire le module élastique E et la résistance maximum σ_{max} .



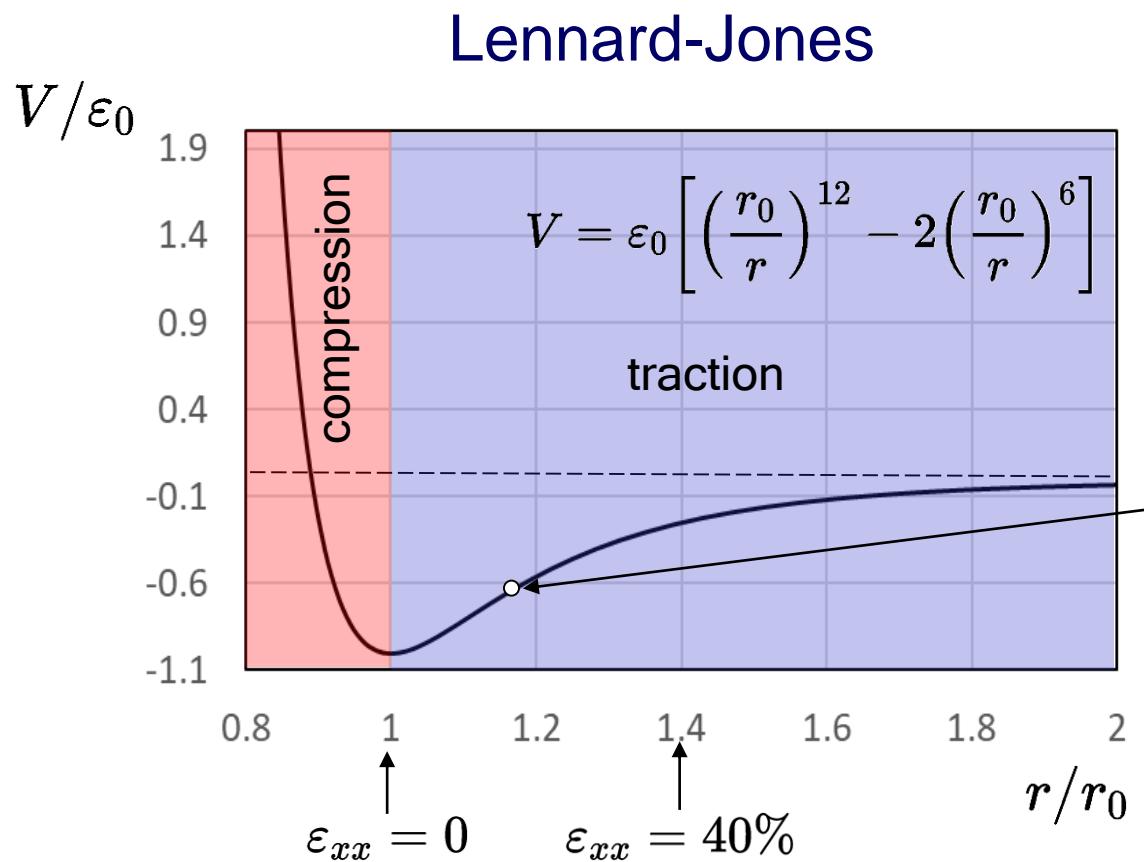
$$E = \frac{R_0}{r_0} = \frac{1}{r_0} \left(\frac{d^2V}{dr^2} \right)_{r=r_0}$$



$$F_{max} \rightarrow \frac{d^2V}{dr^2} = 0$$

Origine de la plasticité

Est-ce que F_{max} ou σ_{max} sont réalistes et que se passe-t-il en-deçà et au-delà de la résistance maximum ?



Courbure du puit de potentiel:
Module élastique

$$E = \frac{72\varepsilon_0}{r_0^3}$$

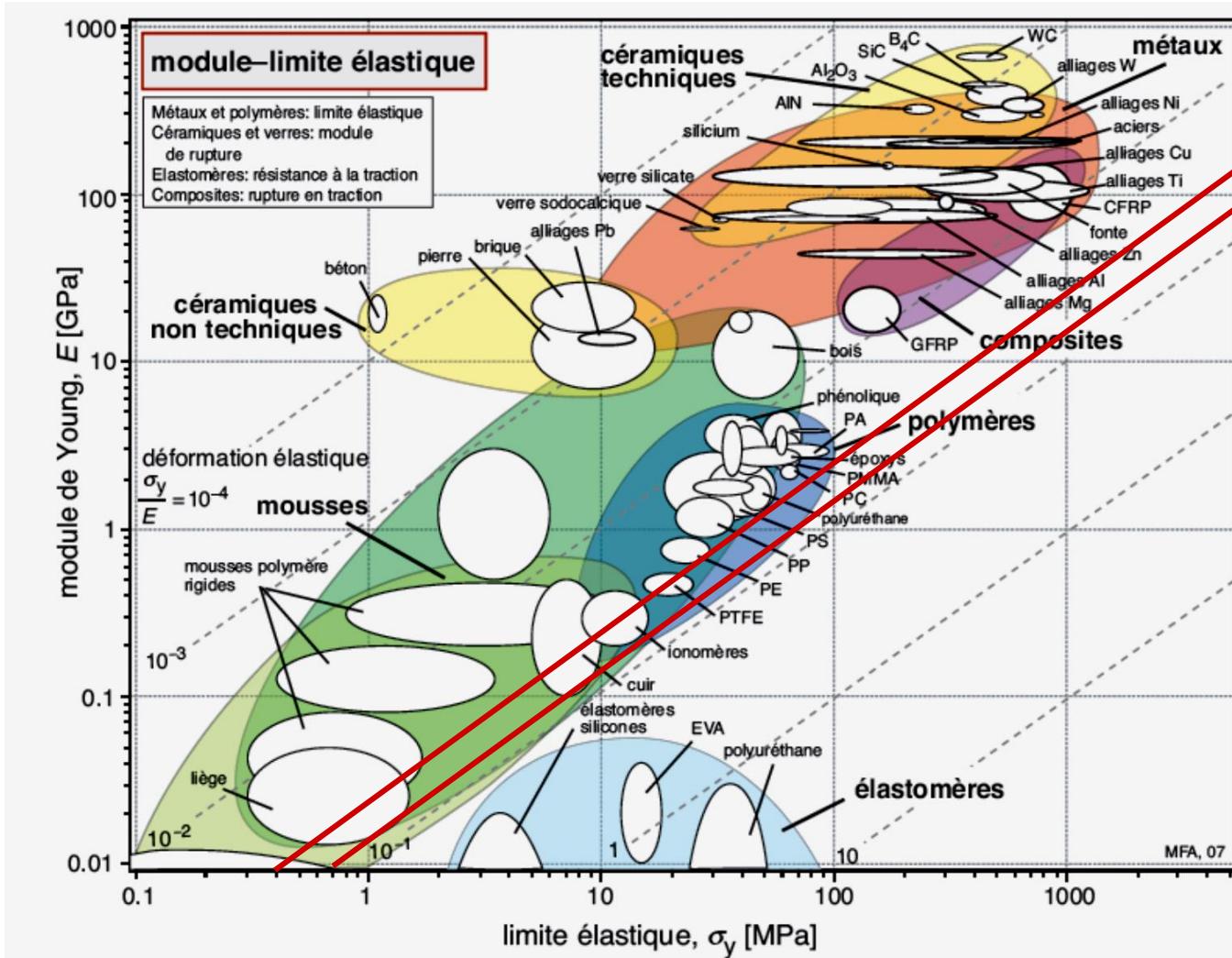
Point d'inflexion:
Résistance maximum

$$\sigma_{max} = 2.69 \frac{\varepsilon_0}{r_0^3}$$

$$\sigma_{max} \simeq \frac{E}{27}$$

Origine de la plasticité

La limite d'élasticité σ_{el} (ou σ_Y) est beaucoup plus faible que la résistance théorique idéale. Pourquoi ? Parce le cristal se déforme plastiquement via la **formation et le mouvement de défauts**: pour les métaux, ce sont essentiellement les **dislocations**

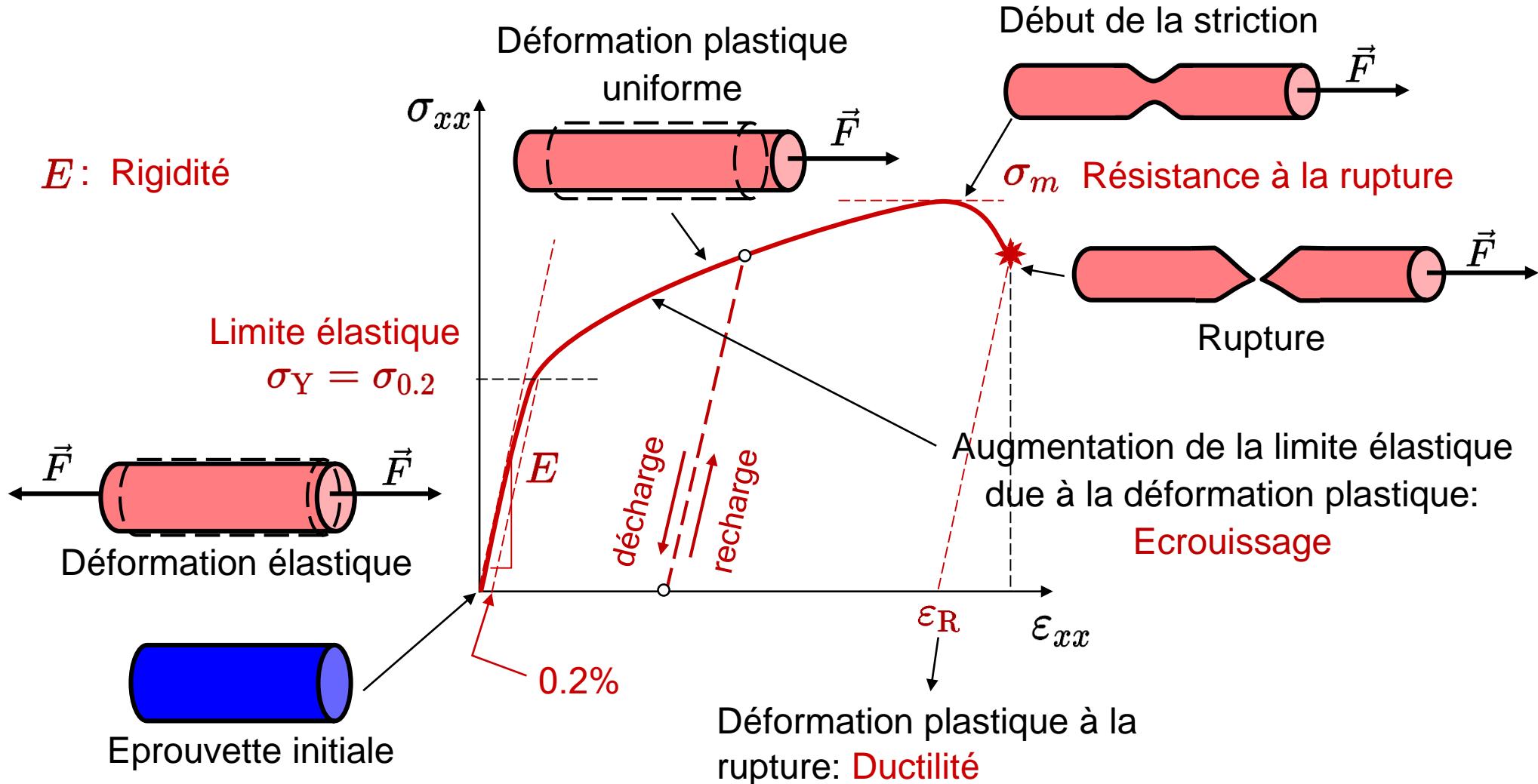


$$\sigma_{max}^{LJ} = \frac{E}{27}$$

$$\sigma_Y = \frac{E}{15}$$

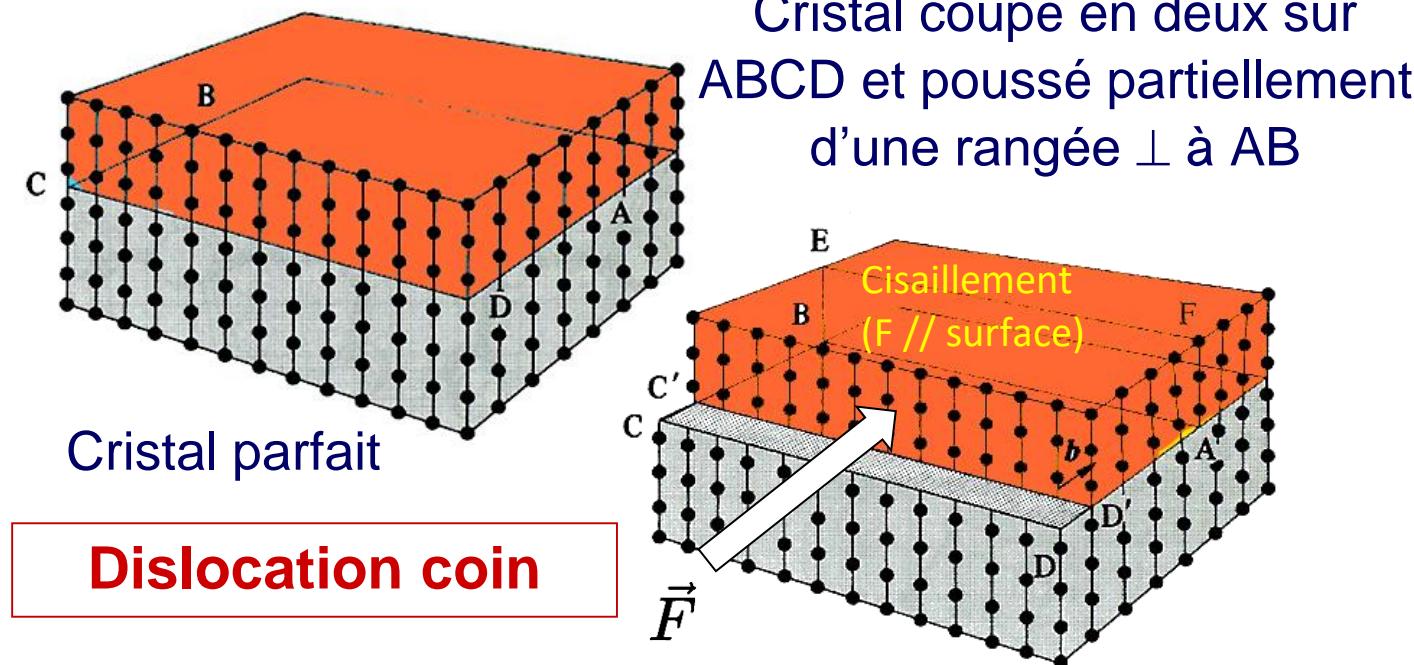
Plasticité des métaux

Pour un métal typique, les étapes de la déformation en traction sont:

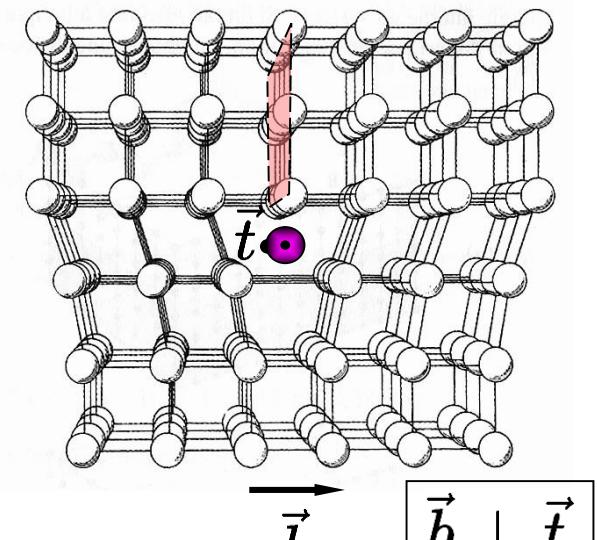


Plasticité des métaux

L'un des principaux défauts responsable de la plasticité des métaux est la **dislocation**. C'est un **défaut linéaire** qui correspond à une discontinuité du réseau cristallin (liaisons interrompues sur une rangée).



Cristal coupé en deux sur ABCD et poussé partiellement d'une rangée \perp à AB

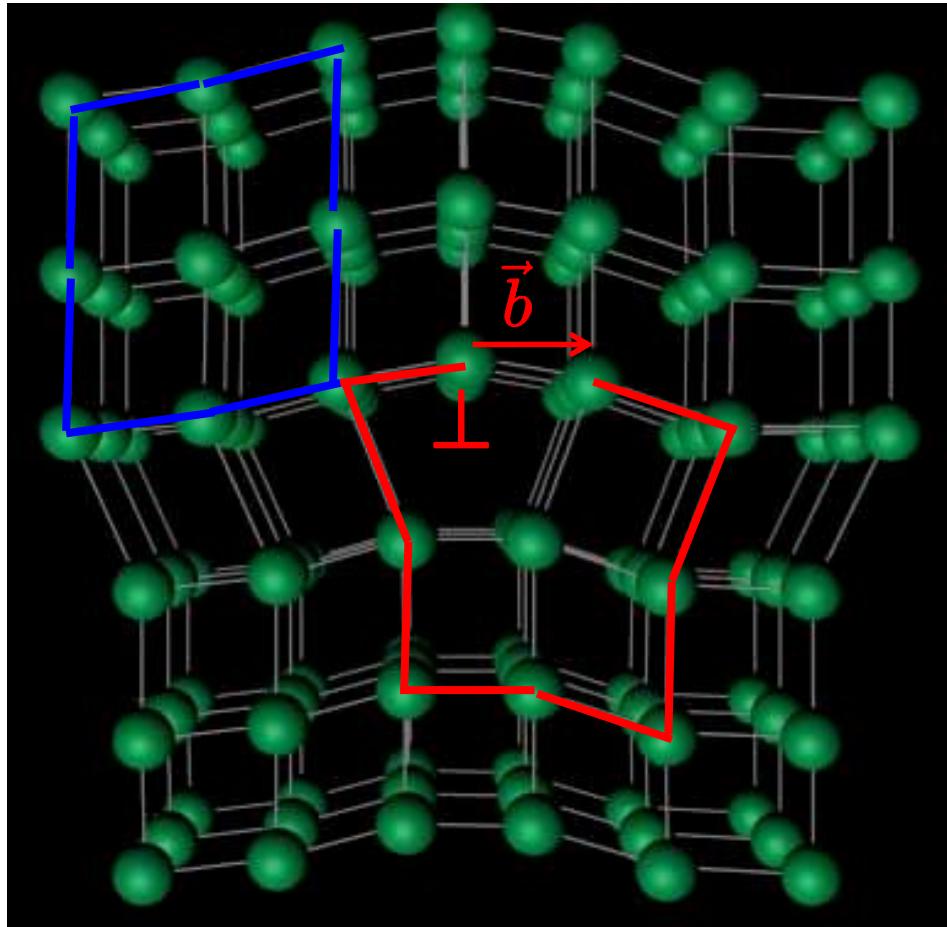


Ligne de dislocation: elle délimite la discontinuité de l'arrangement cristallin. On la repère par son vecteur tangent \vec{t} ($= \overrightarrow{AB}$).

Vecteur de Burgers: vecteur de déplacement correspondant au cisaillement élémentaire. On le dénote par \vec{b} .

Plasticité des métaux

La dislocation coin est impliquée dans la déformation plastique des métaux. Son mouvement dans la direction \vec{b} induit un cisaillement.

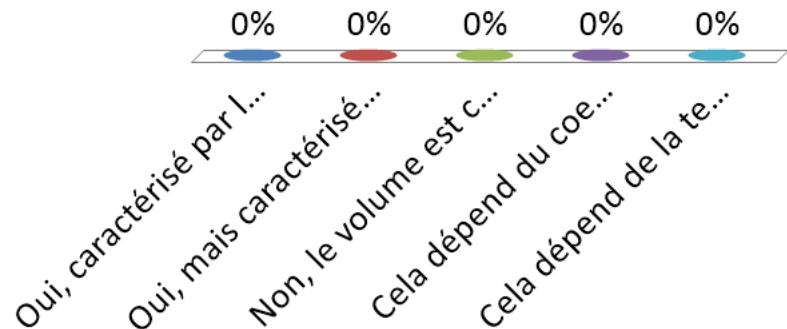


- Symbole: \perp
- $\vec{b} \perp \vec{t}$: la dislocation se déplace le long de la direction de cisaillement, parallèlement au vecteur de Burgers \vec{b} .
- Champ de contraintes autour de la dislocation coin très complexe:

compression – tension - cisaillement

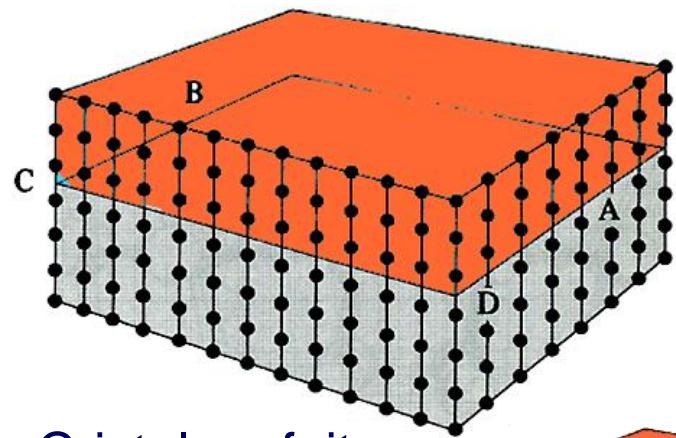
La déformation plastique implique-t-elle un changement de volume du matériau ?

- A. Oui, caractérisé par le coefficient de compressibilité K
- B. Oui, mais caractérisé par un autre coefficient que K
- C. Non, le volume est constant
- D. Cela dépend du coefficient de Poisson
- E. Cela dépend de la température



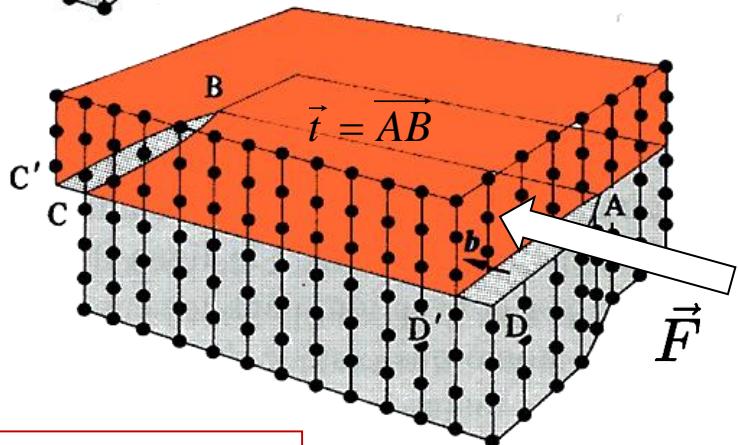
Plasticité des métaux

Il y a aussi des **dislocations vis**:



Cristal parfait

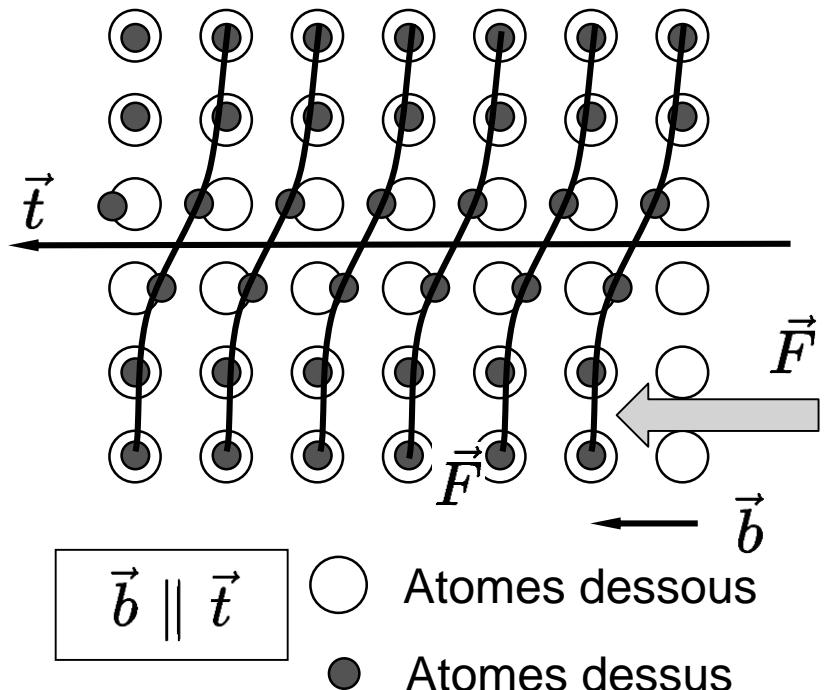
$$= AB$$



Dislocation vis

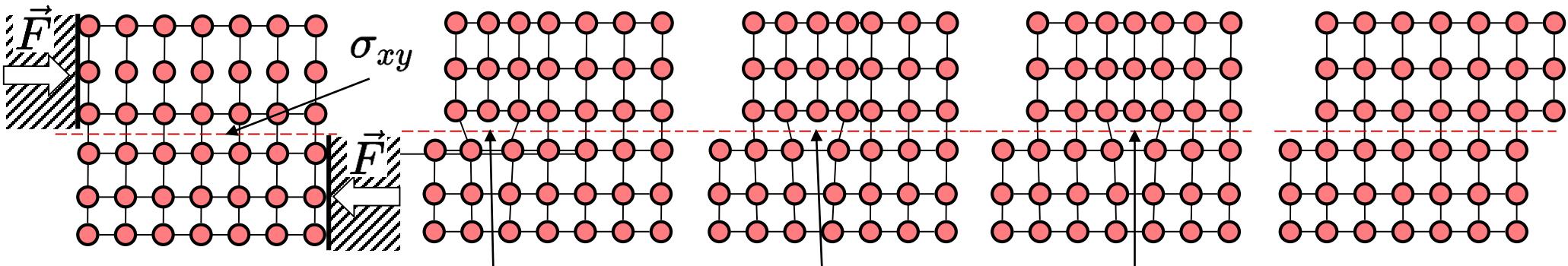
Cristal coupé en deux sur ABCD et poussé partiellement d'une rangée // à AB

Vue de dessus plan ABCD au niveau de la dislocation



Plasticité des métaux

Mais pourquoi avoir des dislocations ?



La rupture de liaisons progresse d'une rangée à l'autre (mouvement de la **dislocation coin**) pour finalement émerger à droite, comme si on avait coupé le cristal en deux et recollé les deux parties

... pour la même raison qu'il est plus facile de faire glisser un tapis sur le sol en faisant un pli et en repoussant ce dernier, ou pour la chenille de se déplacer !

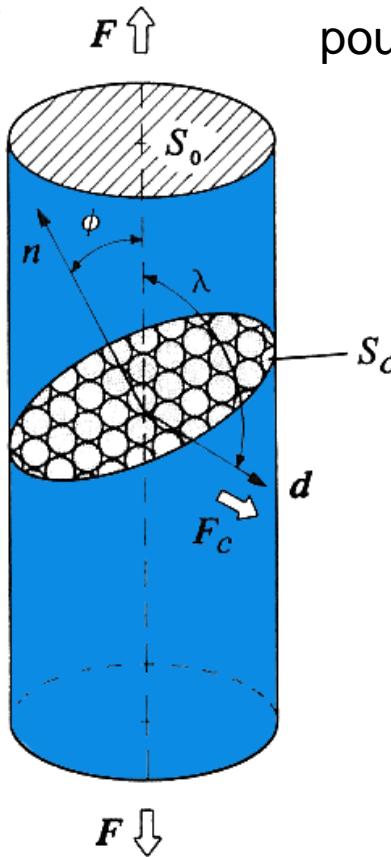
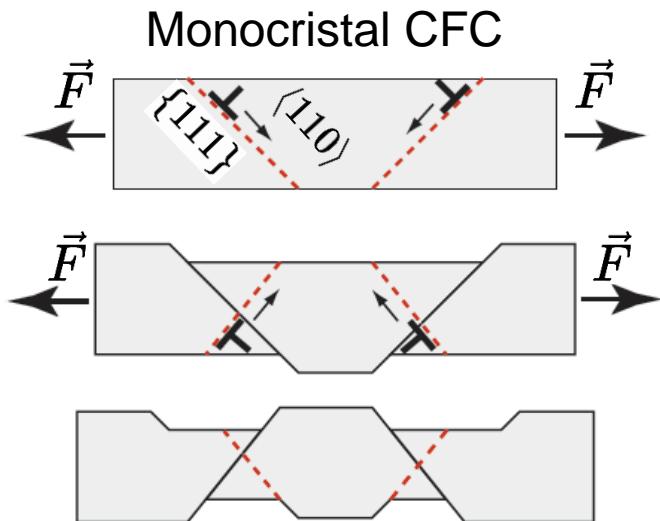


Plasticité des métaux

La déformation plastique se fait à volume constant. Les dislocations glissent sur des plans et le long de directions en réalisant un cisaillement. Pour la structure CFC, les systèmes de glissement sont $\{111\} \langle 110 \rangle$.

Composante de la force \vec{F} selon une direction de glissement \vec{d} : $F \cos \lambda$

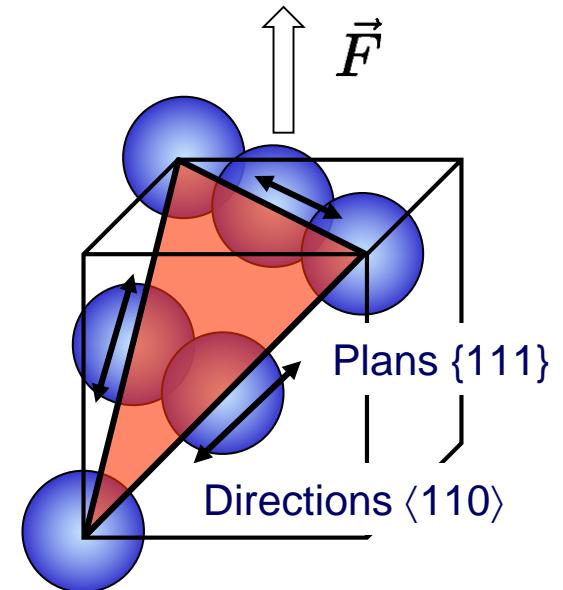
Surface effective sur laquelle agit la force \vec{F} : $S_0 / \cos \phi$



Contrainte de cisaillement effective pour un système de glissement :

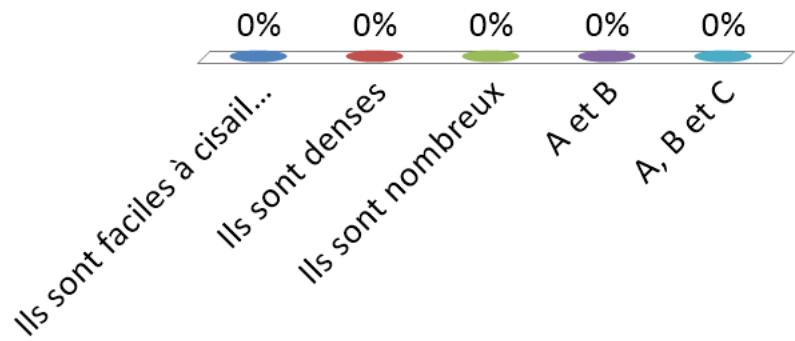
$$\tau = \sigma_{xx} \cos \lambda \cos \phi$$

Facteur de Schmid



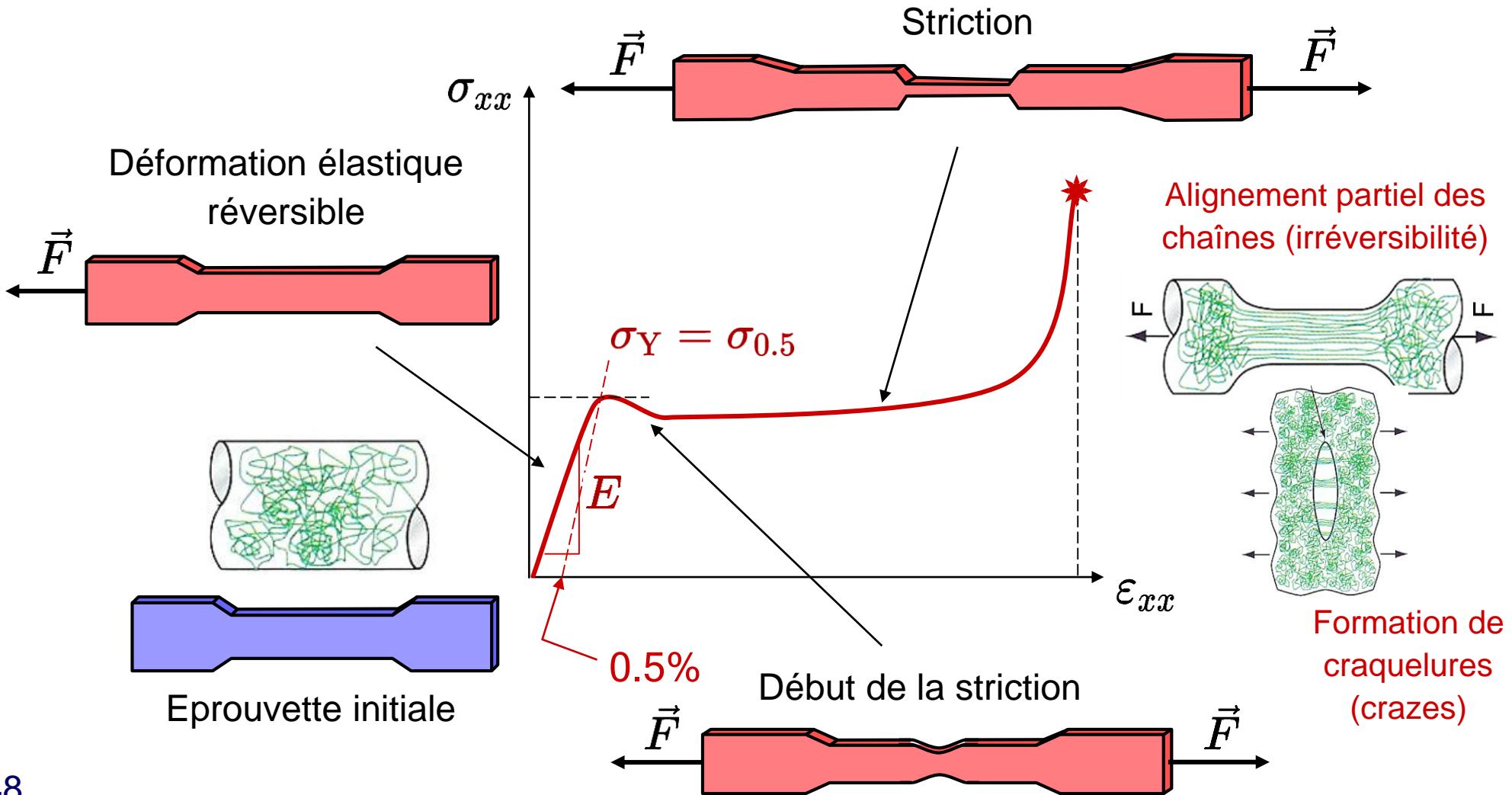
Quelle est la particularité des plans {111} dans une maille CFC ?

- A. Ils sont faciles à cisailler
- B. Ils sont denses
- C. Ils sont nombreux
- D. A et B
- E. A, B et C



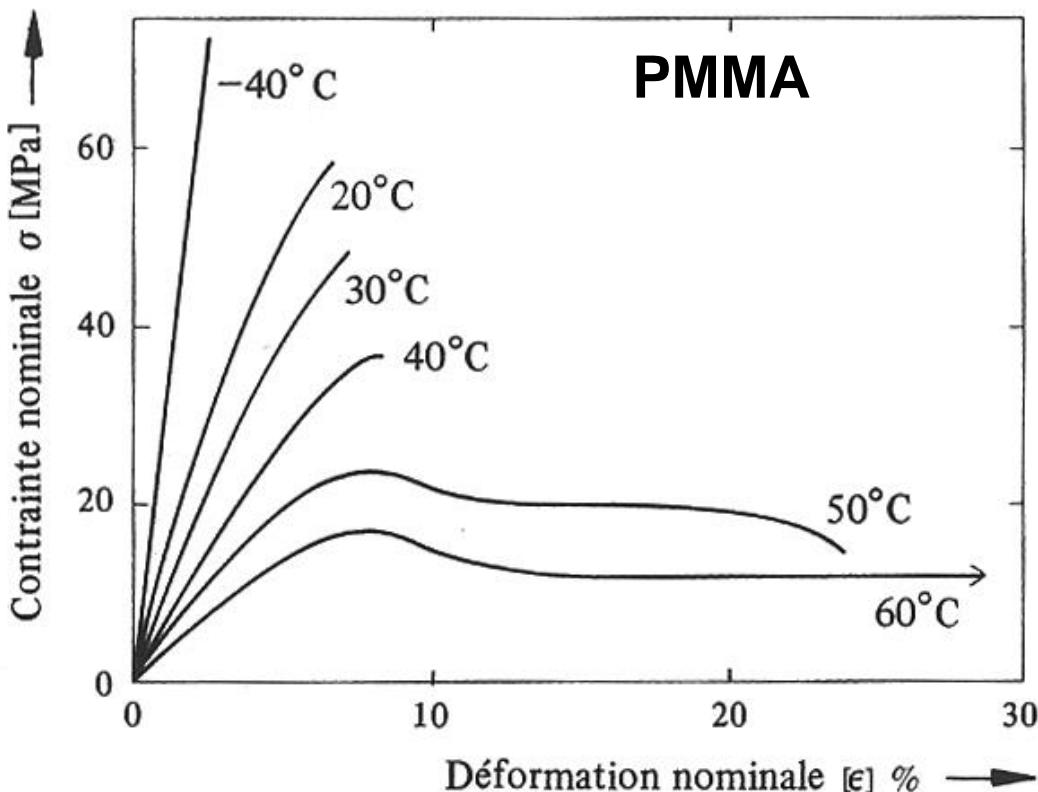
Plasticité des polymères

A la différence des métaux, un polymère thermoplastique ductile continue de se déformer après le début de la striction.



Plasticité des polymères et mécanismes

Le comportement des polymères dépend notamment de la **vitesse de déformation** et de la **température**.



En-dessous de $0.75T_g$, où T_g est la température de transformation vitreuse, il peut être fragile; au-dessus il a un comportement ductile.

Résumé

- Les céramiques sont très résistantes, mais **fragiles**. Leur comportement sera examiné plus en détails au chapitre suivant.
- Les métaux offrent un bon compromis entre **résistance** et **ductilité**: la densité d'énergie totale pour les déformer jusqu'à la rupture (surface sous la courbe $\sigma(\varepsilon)$) est grande.
- Le comportement plastique des métaux est essentiellement lié aux **dislocations**.
- Les dislocations, très impliquées dans la déformation plastique des métaux, se déplacent sous des contraintes de **cisaillement** relativement faibles, selon des **systèmes de glissement** préférentiels.
- La déformation plastique des polymères est liée à l'**alignement irréversible des chaînes** accompagné de formation de crazes.

Pour les prochains cours

- *Re-lire le **Chapitre 6** du livre
(Plasticité et ductilité)*
- *Lire le **Chapitre 8** du livre
(Rupture et ténacité)*