

**Partie II: Cours No 6.1**  
**Limite d'élasticité**

**V.Michaud**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**



# Table des matières

---

- Mécanismes de plasticité des métaux
- Plasticité des polymères



Source: <https://www.cadfem.net/fr/simulation-du-comportement-plastique-des-metaux-12707.html>

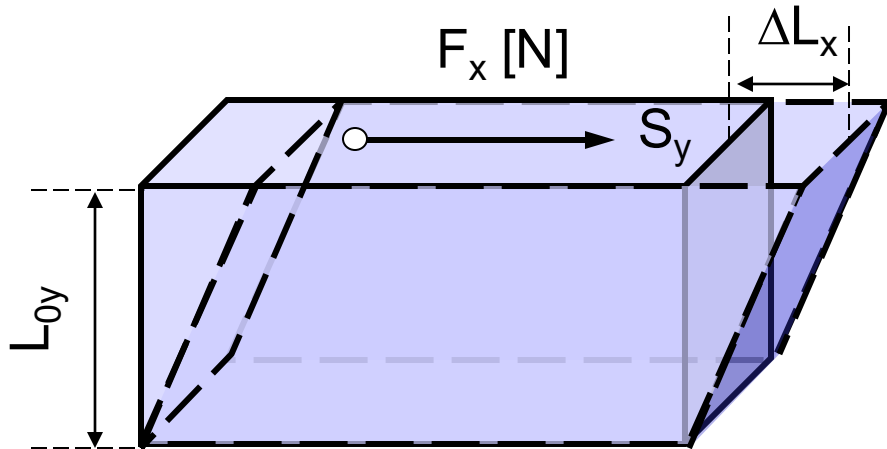
# Objectifs du cours

---

- Pour les métaux, comprendre le mécanisme de mouvement des défauts: les dislocations
- Pour les polymères, savoir que les mécanismes sont différents car ces matériaux sont (au moins partiellement) amorphes.



# Rappel: la déformation en cisaillement est plus facile



En cisaillement  $\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma = \frac{1}{2} \frac{\Delta L_x}{L_{0y}}$

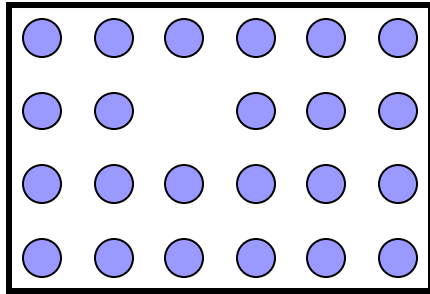
$$\sigma_{xy} = G 2\varepsilon_{xy} = G\gamma = G \frac{\Delta L_x}{L_{0y}}$$

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

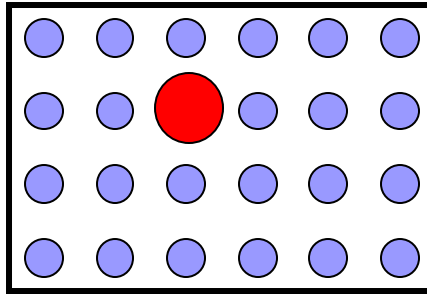
La rigidité en cisaillement est donc toujours plus faible que celle en traction ou compression, donc la déformation des matériaux cristallins se fera souvent selon des plans cristallins qui glissent les uns sur les autres, par cisaillement.

# Rappel: Les défauts dans les matériaux cristallins

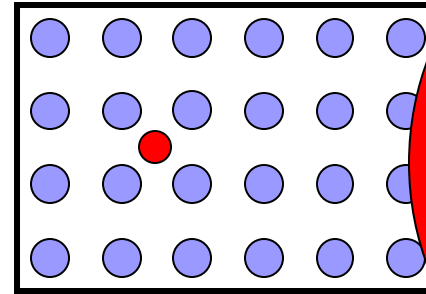
Le cristal parfait n'existe pas! Types de **défauts**:



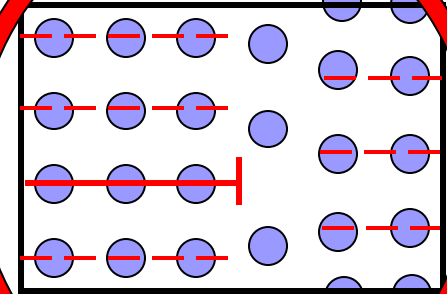
Lacune



Défaut ponctuel  
(substitutionnel)

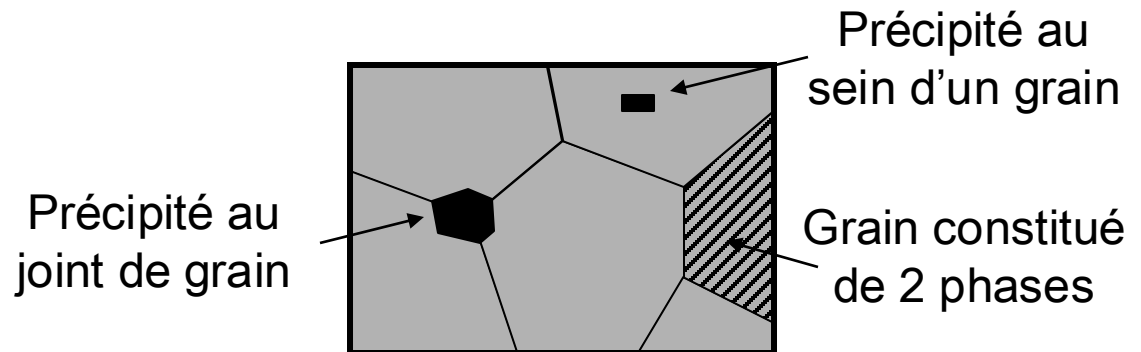
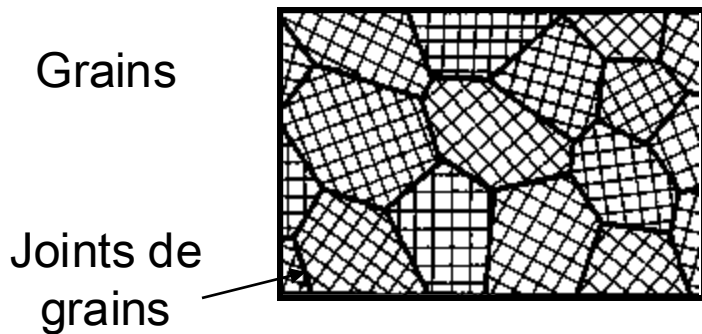


Défaut ponctuel  
(interstitiel)



Dislocation

Mais surtout, la plupart des matériaux sont **polycristallins** et composés de plusieurs phases (**multiphasés**)



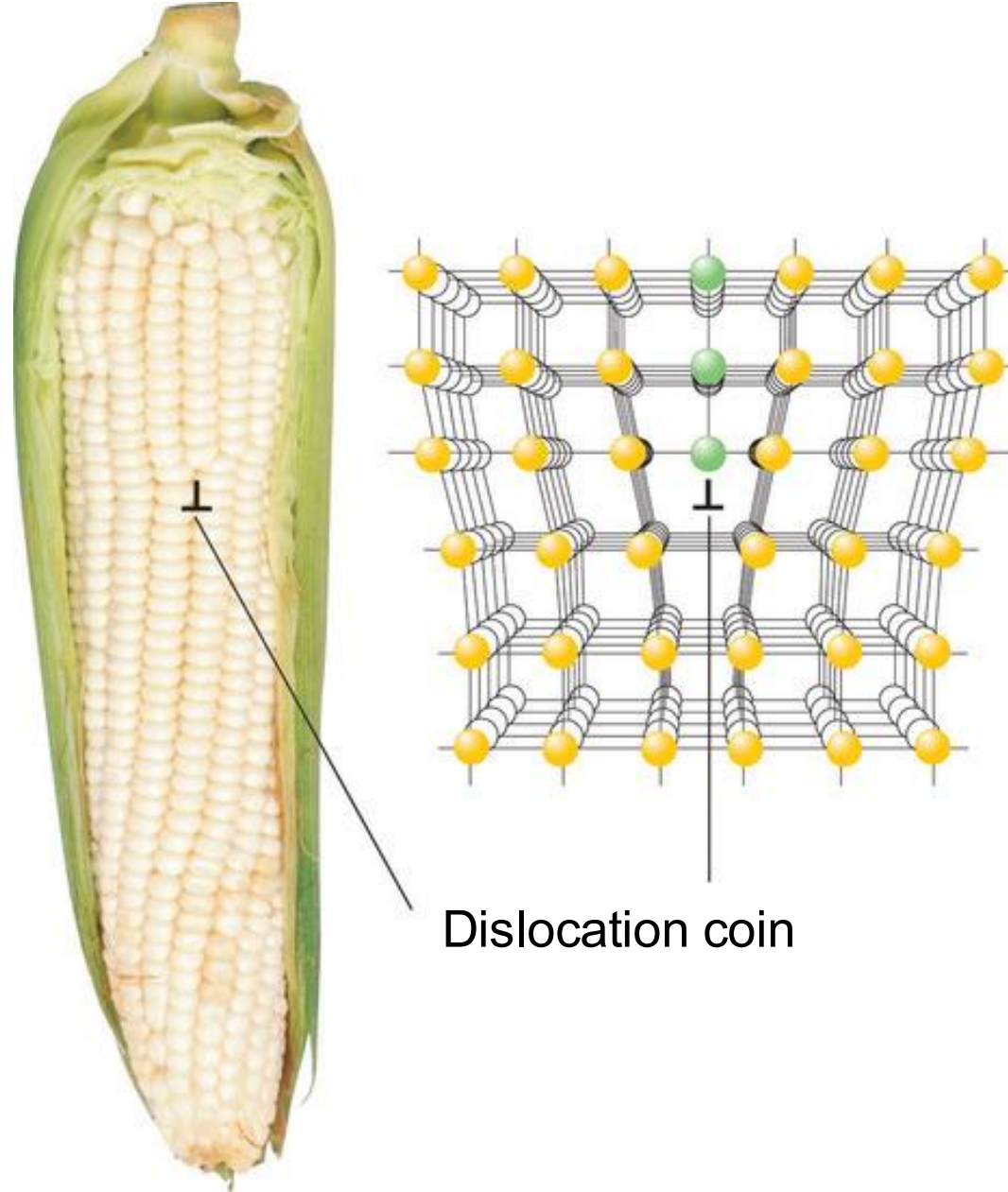
# Les défauts dans les matériaux cristallins

---

C'est donc la présence de défauts dans la structure cristalline qui va:

- D'une part, faire en sorte que la structure cristalline puisse se déformer plus facilement et de manière irréversible (dislocation mobiles).
- D'autre part, faire en sorte que la structure cristalline ne se déforme quand même pas trop facilement, grâce à la présence d'atome interstitiels, de joints de grain, d'amas d'atomes (précipités), etc.. qui bloquent la mobilité des dislocations.

# Les défauts d'empilements arrivent naturellement

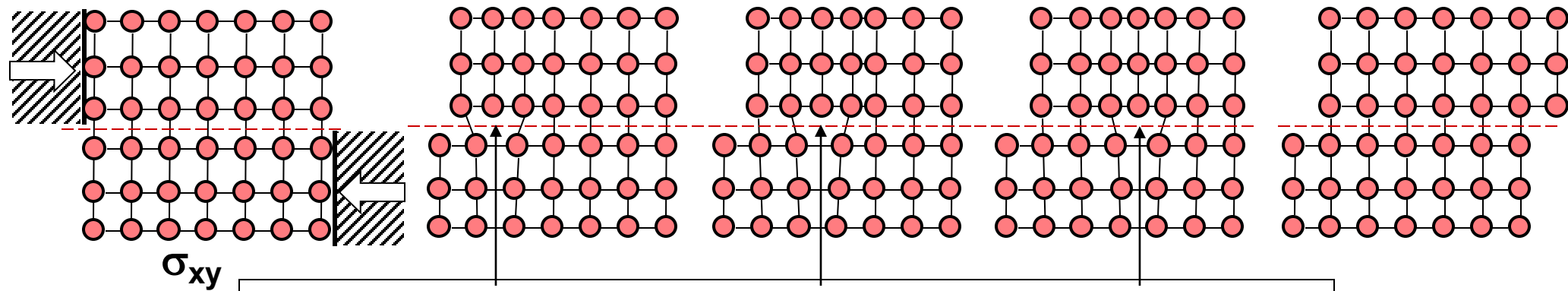


# Mécanismes de plasticité des métaux

Des défauts d'empilement des rangées d'atomes facilitent leur mouvement...



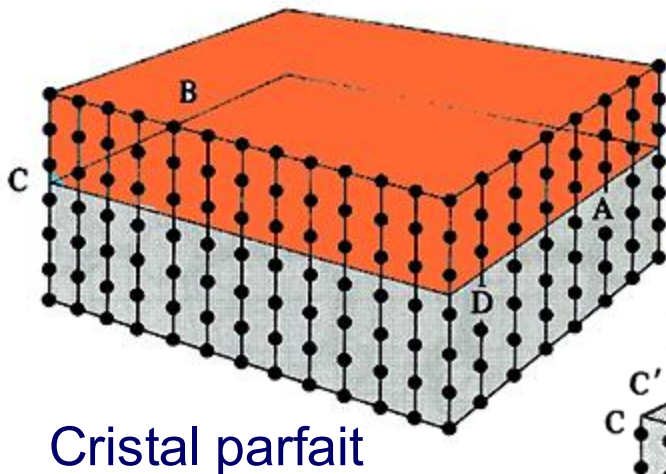
... pour la même raison qu'il est plus facile de faire glisser un tapis sur le sol en faisant un pli et en repoussant ce dernier!



Position de la dislocation et émergence de l'autre côté du cristal

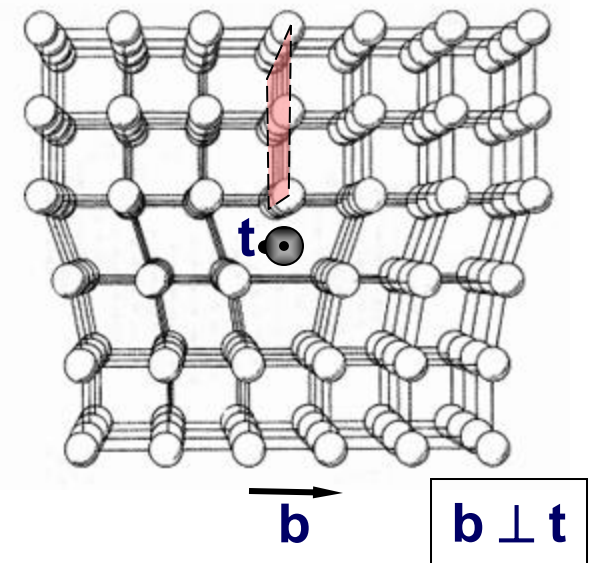
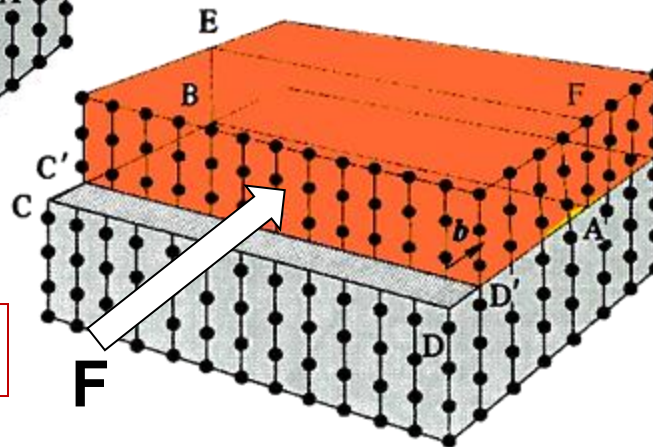
# Dislocation coin

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. Dans un métal, il y en a beaucoup par unité de volume.



**Dislocation coin**

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

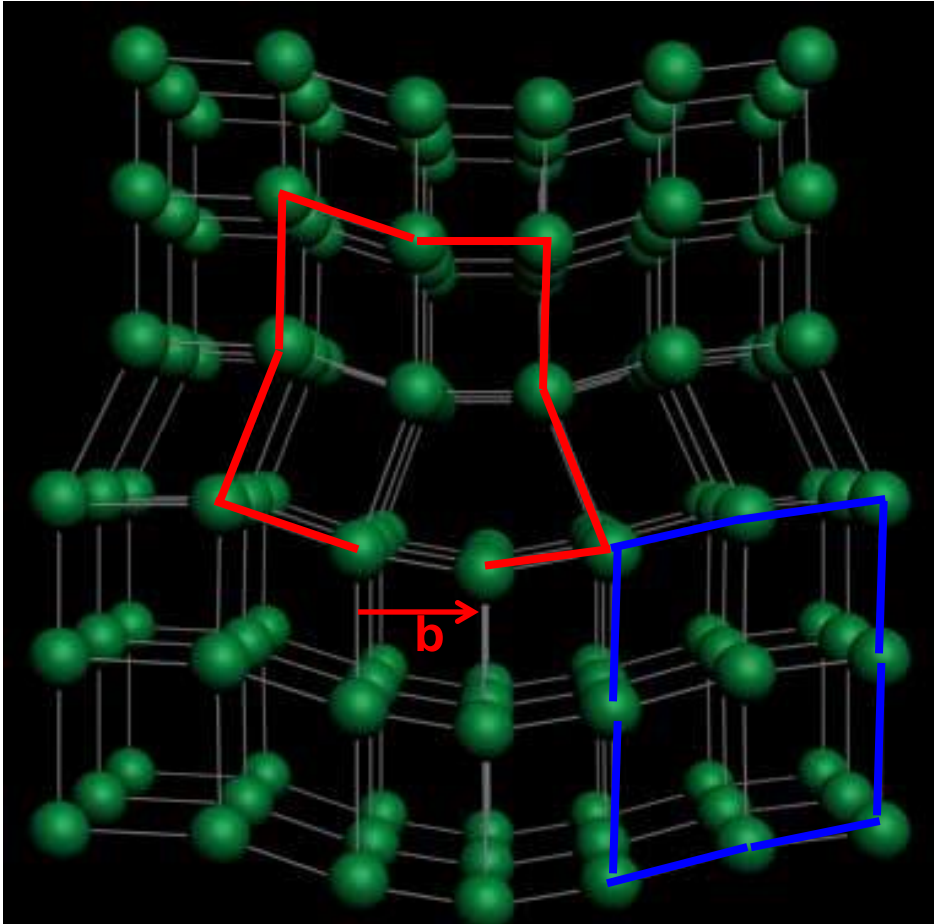


**Ligne de dislocation:** elle délimite la discontinuité de l'arrangement cristallin. On la repère par son vecteur tangent  $t$ .

**Vecteur de Burgers:** vecteur correspondant à la déformation élémentaire. On le dénote par  $b$ .

# Mécanismes de plasticité des métaux

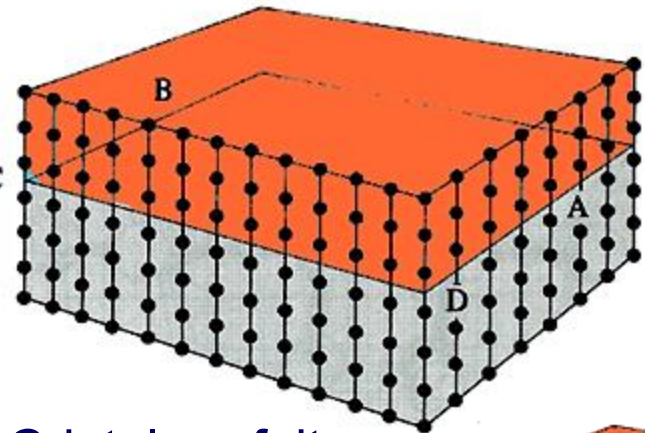
La dislocation coin est la plus impliquée dans la déformation plastique des métaux



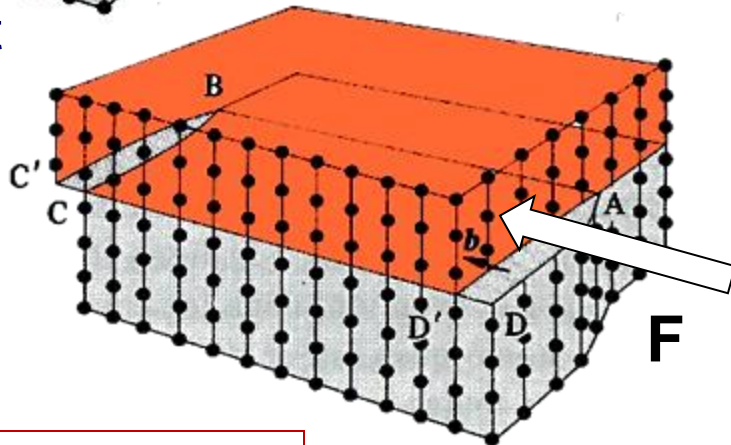
- Symbole:  $\perp$
- $\mathbf{b} \perp \mathbf{t}$ : la dislocation se déplace le long de la direction de cisaillement, et aussi donc parallèlement au vecteur de Burgers.
- Champ de contraintes autour de la dislocation coin très complexe:  
*compression – tension - cisaillement*

# Dislocation vis

Il y aussi des **dislocations vis**:



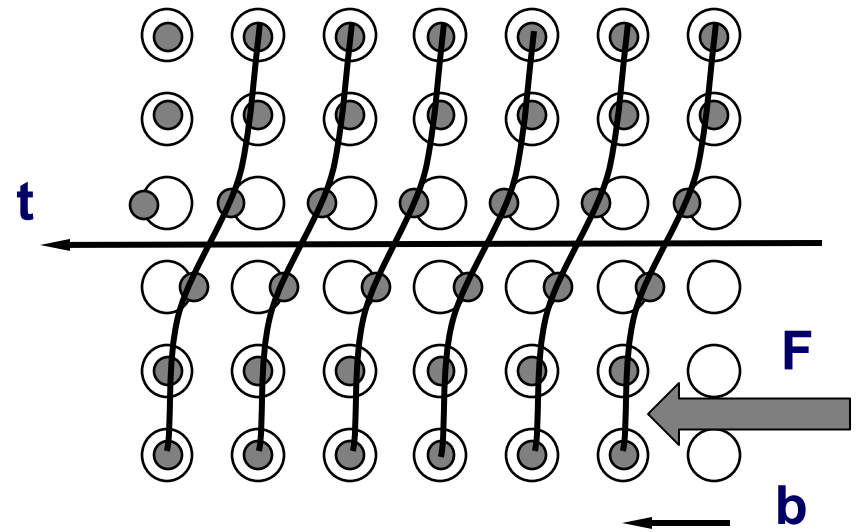
Cristal parfait



**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

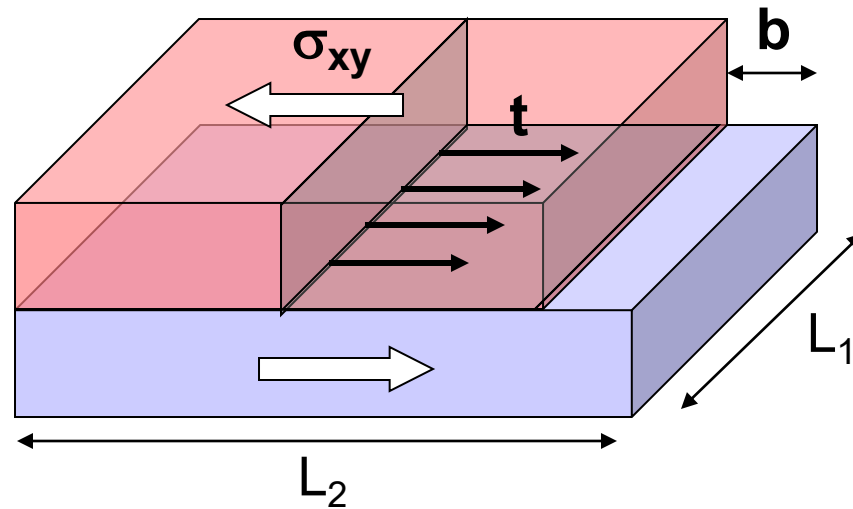


- $b // t$
- Atomes dessous
  - Atomes dessus

# Déplacement des dislocations

Quelles sont les énergies mises en jeu pour le déplacement des dislocations?

Exemple: dislocation coin



Force appliquée sur la surface cisailée:

$$\sigma_{xy} L_1 L_2 \quad [\text{N}]$$

Travail de cette force après l'émergence de la dislocation:

$$\sigma_{xy} L_1 L_2 b \quad [\text{J}]$$

Force (par unité de longueur) opposée par la dislocation:

$$t \quad [\text{N/m}]$$

Travail de résistance de cette force:

$$t L_1 L_2 \quad [\text{J}]$$

Si  $\sigma_{xy} > \frac{t}{b}$  la dislocation bouge

Attention,  $t$  ici n'est pas le vecteur tangent, c'est la tension de ligne, une force de résistance par unité de longueur et il peut être estimé par:  $t = 1/2 E b^2 / l$ , où  $l$  est la longueur de la dislocation entre 2 points d'accroche.

# Mécanismes de plasticité des métaux

---

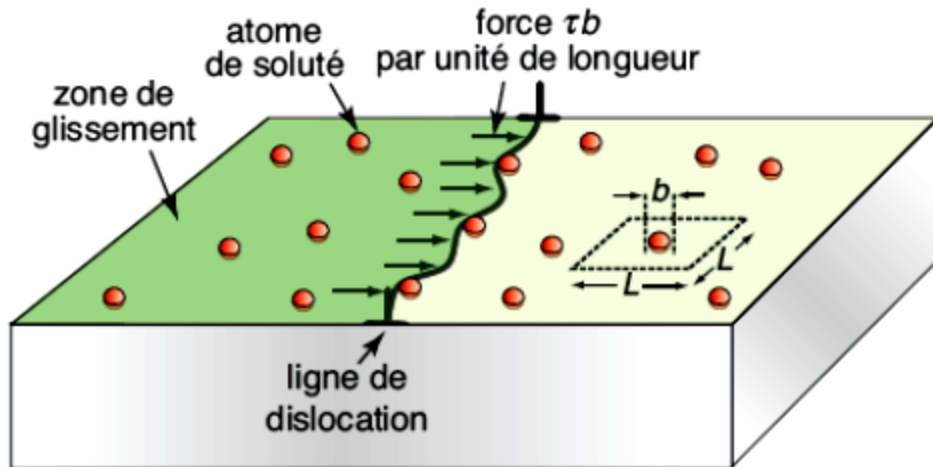
Du coup, les dislocations peuvent donc bouger si la contrainte en cisaillement dépasse une certaine valeur, et la déformation du matériau devient facile (papier d'aluminium se plie facilement).

La limite d'élasticité (contrainte à laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement) peut donc être trop faible, et on va chercher à bloquer le mouvement des dislocations pour "durcir" le matériau.

Comment les bloquer??? 4 façons de durcir les métaux ont été développées, en général en jouant sur la présence d'autres défauts (précipités, atomes interstitiels..) qui vont bloquer le mouvement des dislocations.

# Durcissement des métaux

Ainsi, afin d'augmenter la résistance du matériau, il faut **bloquer ou freiner le mouvement des dislocations** par des obstacles.



## Durcissement par **solution solide**

On utilise la présence d'atomes qui déforment la maille pour ralentir les dislocations. Cela donne une augmentation de la limite d'élasticité d'une valeur:

$$\Delta\sigma_Y^{SS} = K_{SS} G \delta \sqrt{X}$$

$\delta$ : différence de rayons atomiques entre les atomes interstitiels et ceux de la maille de départ [m]

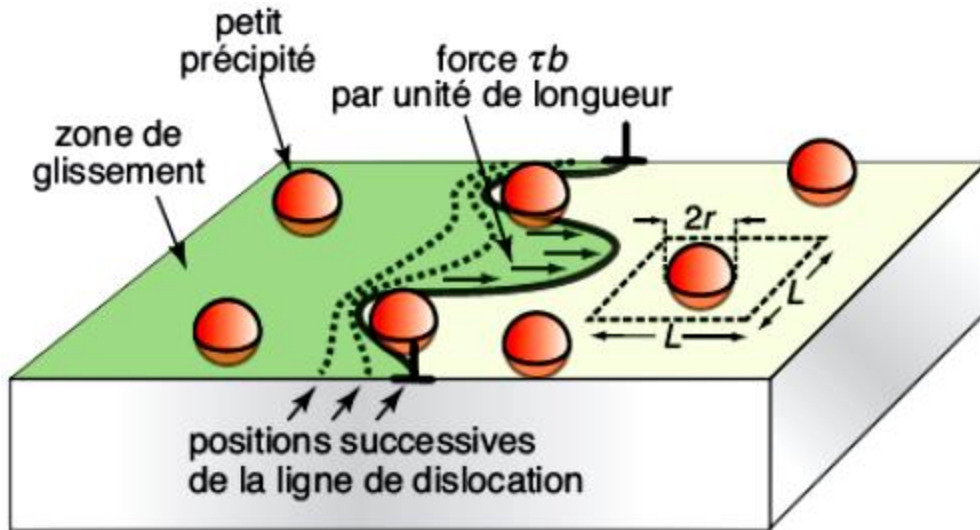
$G$ : module de cisaillement [Pa]

$X$ : composition en atomes interstitiels [-]

$K_{SS}$  est une constante

# Durcissement des métaux

## Durcissement par des précipités



On utilise la présence de précipités qui déforment la maille pour ralentir les dislocations. Cela donne une augmentation de la limite d'élasticité d'une valeur:

$$\Delta\sigma_Y^{pr} = K_p \frac{Gb}{L}$$

G: module de cisaillement [Pa]

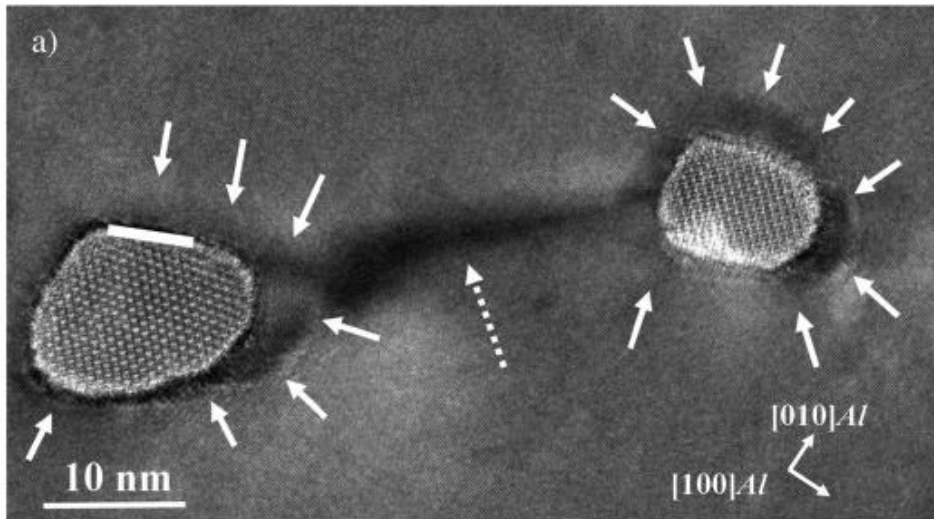
L: distance entre obstacles [m]

b: norme du vecteur de Burgers [m]

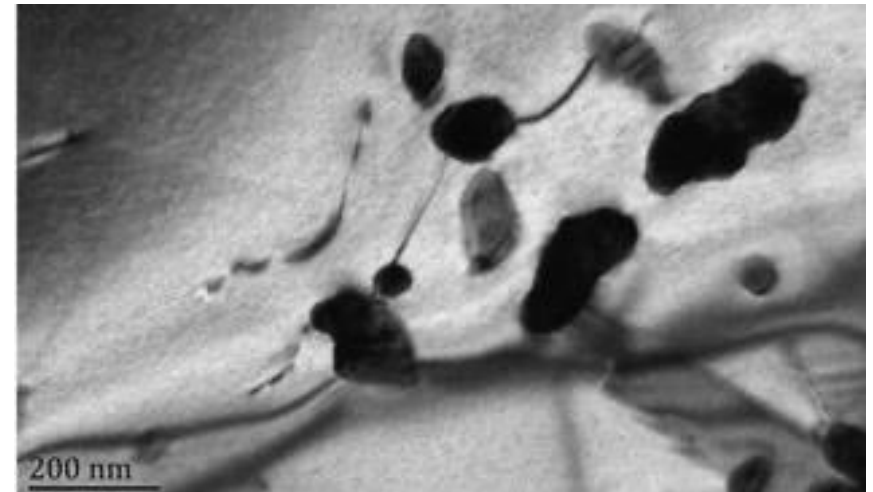
$K_p$ : constante

# Qu'est ce qu'un précipité?

**Précipités:** Amas d'atomes, de quelques nanomètres de diamètre, qui se forme lors de la solidification d'alliages



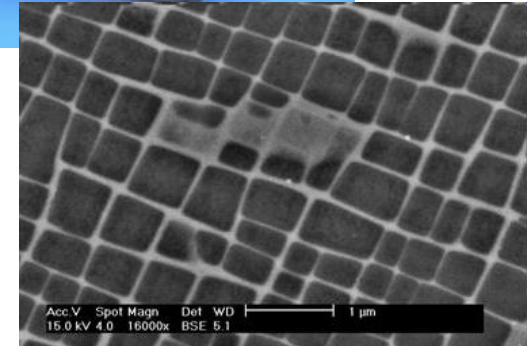
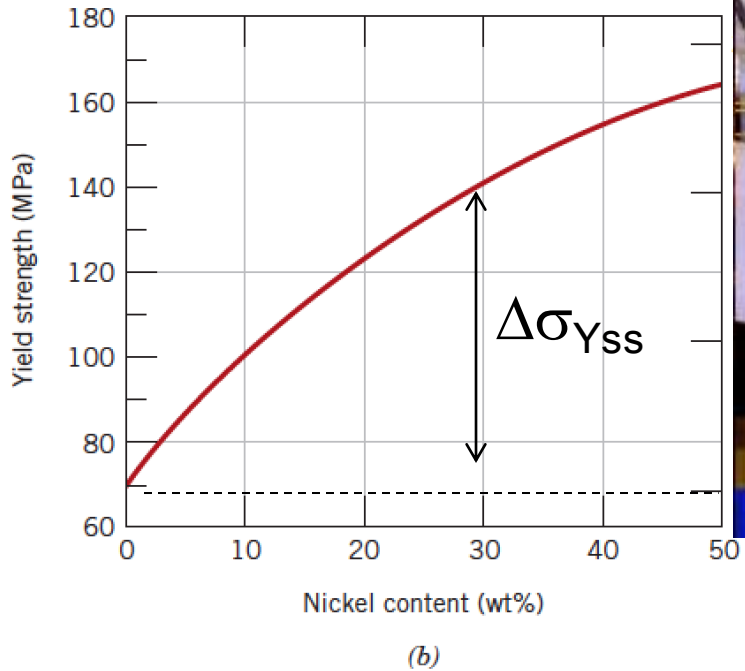
Précipité  $Mg_2Si$  dans un alliage d'aluminium, magnésium et silicium



Interaction avec une dislocation, alliage de CrFeCoNiMo



# Illustration des trois mécanismes précédents



Limite élastique d'alliage Cu-Ni  
en fonction de la composition

Mc Calister, introduction to materials

Structure écrouie d'un  
acier laminé à froid

<http://www.arcelormittal.com/>

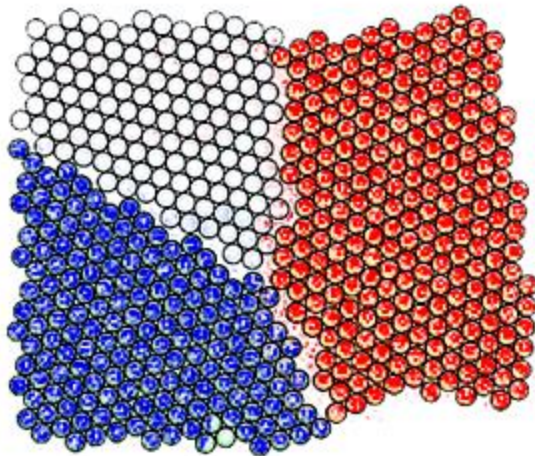
Durcissement par des précipités  
Ni<sub>3</sub>Al dans des alliages base Ni

<http://www.camm.ohio-state.edu/>

# Freinage des dislocations

Un autre mécanisme très utilisé pour freiner/bloquer les dislocations est de réduire la **taille des grains**.

Dans un échantillon polycristallin, les grains forment des joints de grains qui ont tendance à bloquer les dislocations. (Cela s'appelle l'**Effet Hall-Petch**).

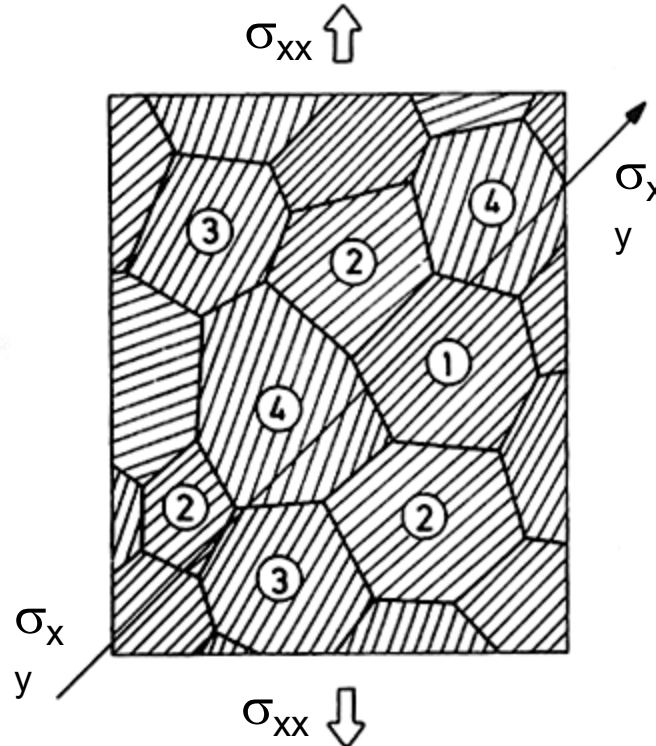


Joints de grains

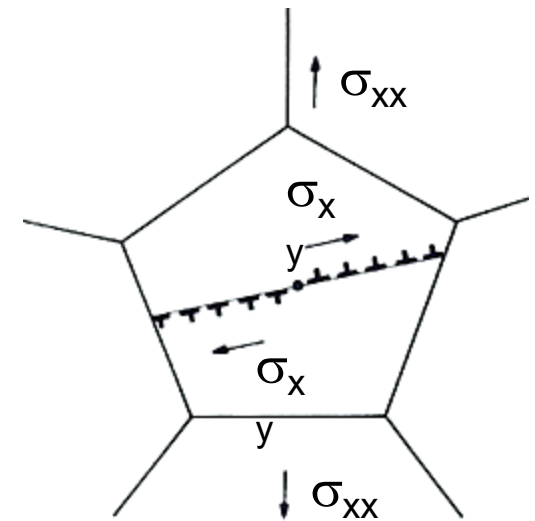
$$\Delta\sigma_Y^{HP} = \frac{K_{HP}}{\sqrt{\phi_g}}$$

$\phi_g$ : diamètre des grains

$K_{HP}$  constante



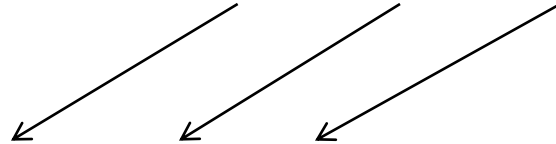
Echantillon polycristallin  
soumis à une traction



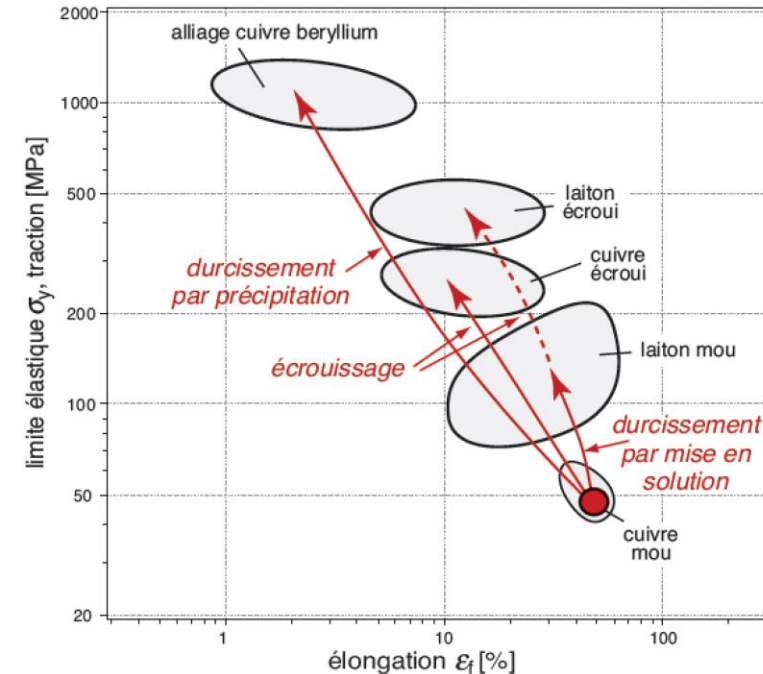
Activation d'un système  
de glissements avec  
accumulation des  
dislocations aux joints

# Résumé: plasticité des métaux

Au final:  $\sigma_Y = \sigma_Y^C + \Delta\sigma_Y^{ss} + \Delta\sigma_Y^{pr} + \Delta\sigma_Y^{ec} + \Delta\sigma_Y^{HP}$



Alliage	Usage typique	Solution solide	Precipit.	Ecrouissage
Pur Al	Papier alu cuisine			XXX
Pur Cu	Fil			XXX
Al, Mg coulé	Pièces auto	XXX	X	
Bronze (Cu-Sn), Laiton (Cu-Zn)	Pièces maritimes	XXX	X	XX
Al laminé non traité	Bateaux, cannettes, structures	XXX		XXX
Al laminé traité à chaud	Avions, structures	X	XXX	X
Acier bas carbone	Carrosseries, structures, bateaux, canettes	XXX		XXX
Acier peu allié	Pièces auto, outils	X	XXX	X
Acier inox	Récipients pression	XXX	X	XXX
Alliages Ni coulés	turbines moteur avion	XXX	XXX	



Exemple : alliages de Cuivre

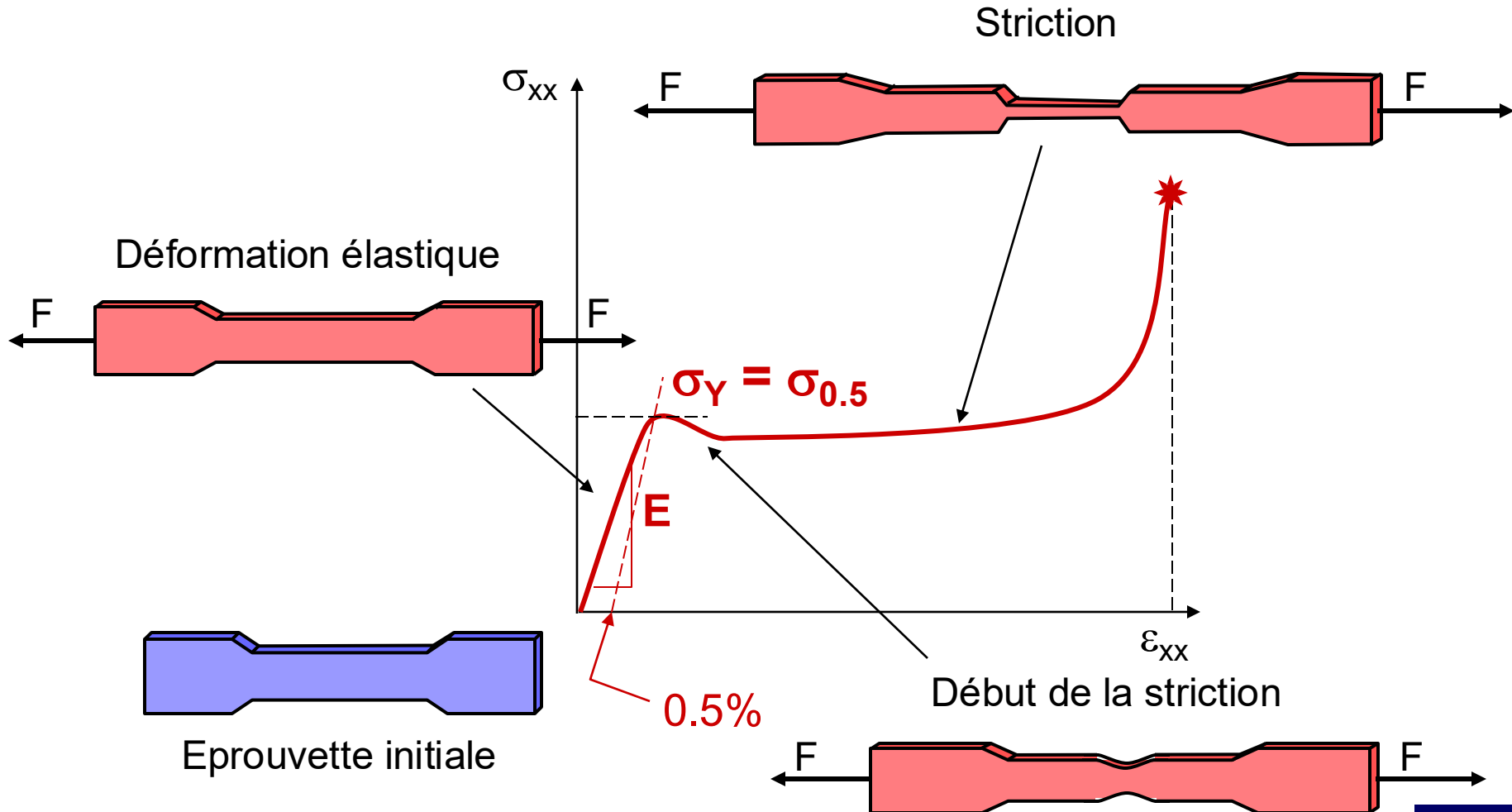
Tiré de Ashby et al.

XXX: très utilisé

X: parfois utilisé

# Plasticité des polymères et mécanismes

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



# Plasticité des polymères et mécanismes

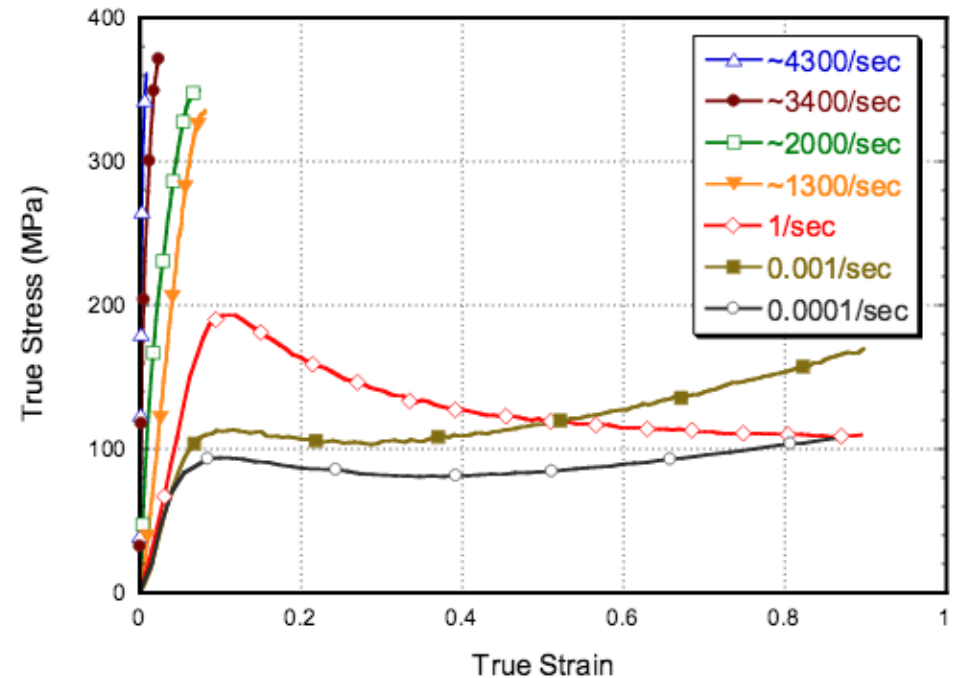
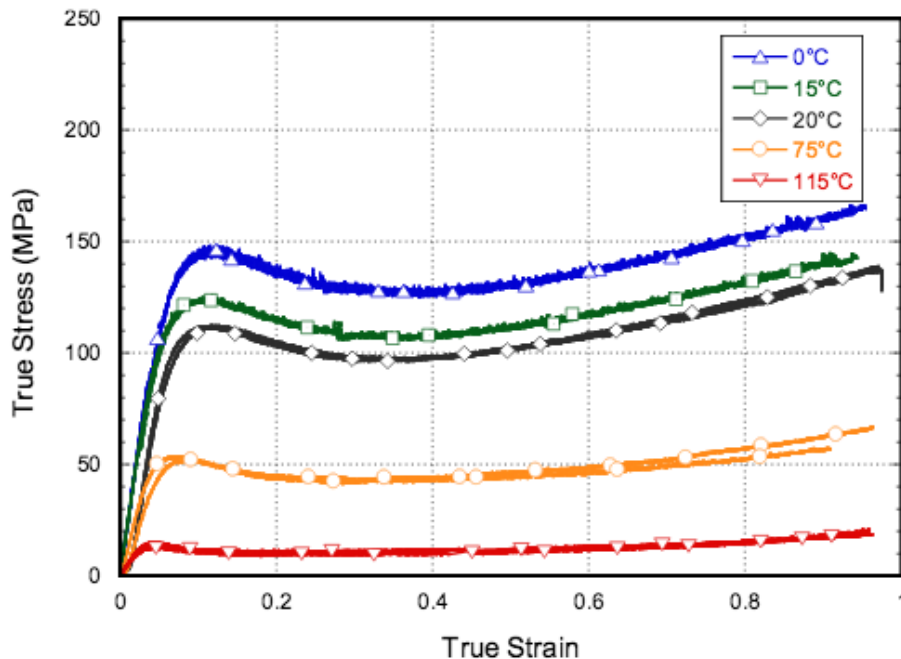
---

Les polymères ne sont pas ou peu cristallins, et sont formés de liaisons covalentes le long des chaînes de macromolécules, et de liaisons faibles entre les chaînes. L'enchevêtrement des chaînes joue un rôle important lors de la déformation, ce qui rend le matériau sensible à la vitesse de déformation et à la température (par rapport à sa température de transition vitreuse).

# Plasticité des polymères et mécanismes

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

## PMMA

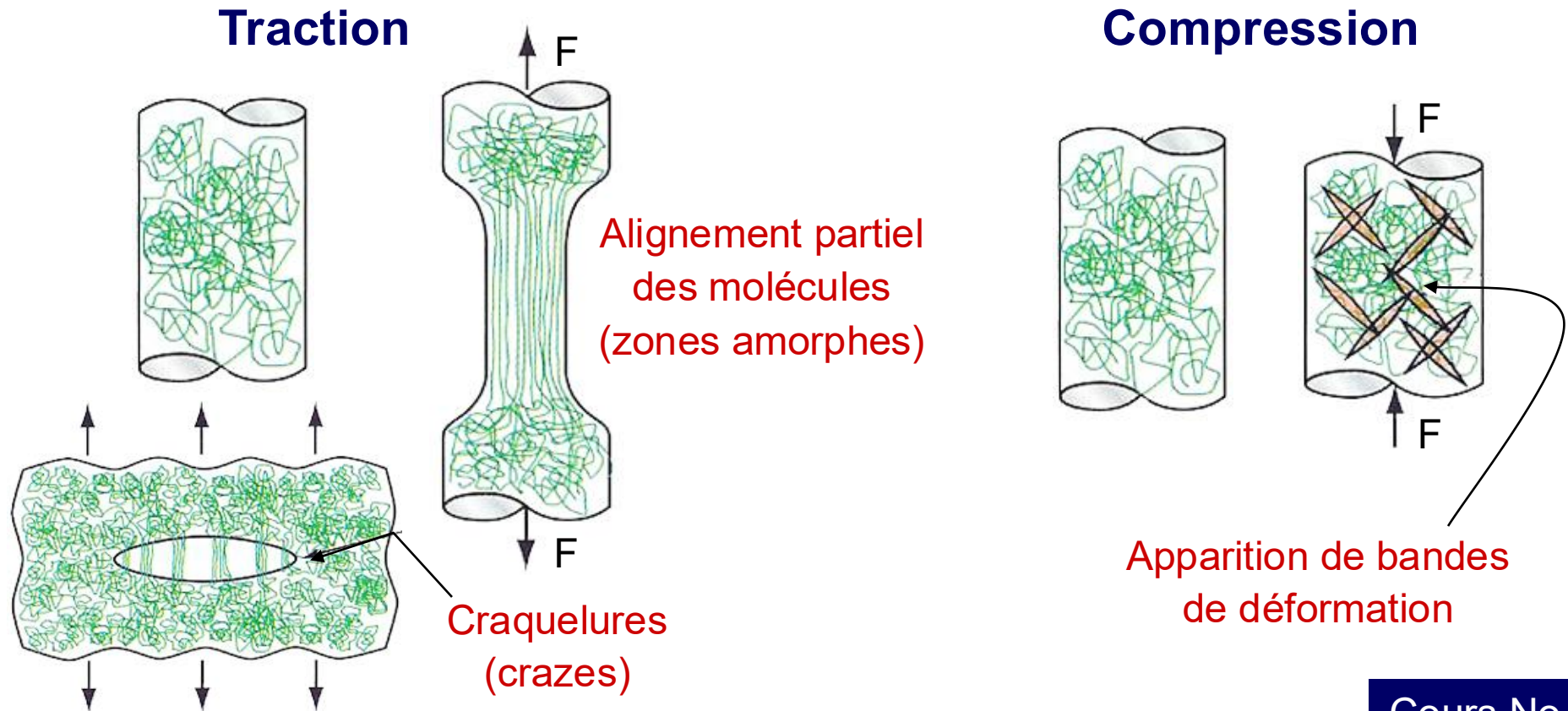


T. Proulx (ed.), Dynamic Behavior of Materials, Volume 1, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 99,

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

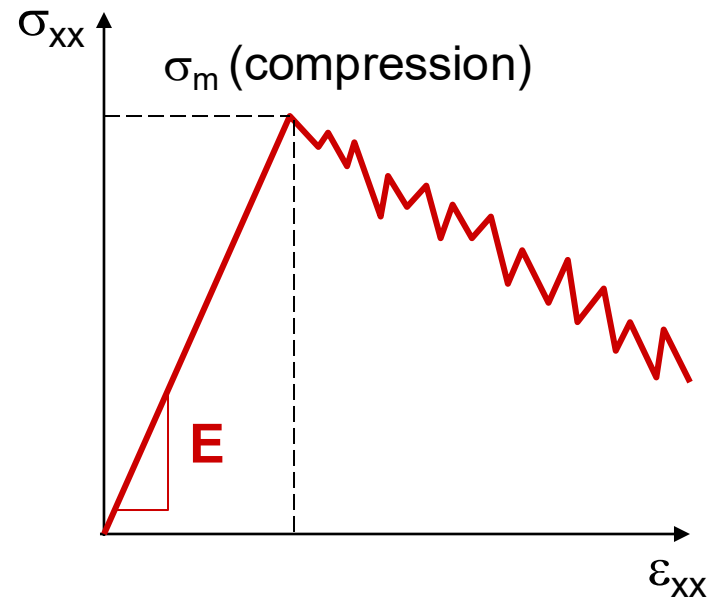
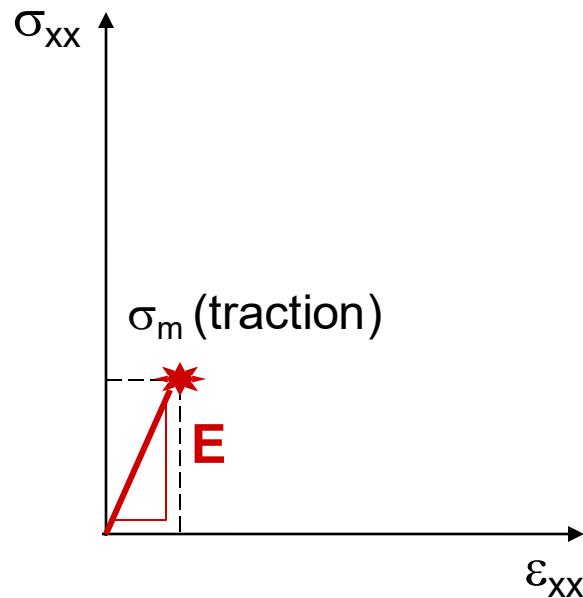
# Plasticité des polymères et mécanismes

Lors de la traction en dessus de  $0.75T_g$ , on peut distinguer deux mécanismes de déformation: cisaillement comme les métaux et déformation plastique locale en traction induisant des **craquelures (crazes)**.



# Propriétés des céramiques

Les céramiques, mais aussi le béton, sont particulièrement **fragiles** en traction: elles rompent par **fracture** avant d'atteindre leur limite élastique. En compression, leur résistance peut être bien plus élevée.



## Exemples:

**saphir** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )\*  $E = 345 \text{ GPa}$

en compression:  $\sigma_m \cong 2'000 \text{ MPa}$  / en traction:  $\sigma_m \cong 400 \text{ MPa}$

**Béton:**  $E = 30 \text{ GPa}$  (compression)

en compression:  $\sigma_m \cong 30 \text{ MPa}$  / en traction:  $\sigma_m \cong 3 \text{ MPa}$

# Synthèse

	Paramètres	Relations	Origines
Rigidité (module d'Young)	E	$\sigma_{xx} = E \cdot \epsilon_{xx}$	Mét. et Cér.: liaisons entre les atomes Polym: Liaisons entre les chaînes
Limite d'Elasticité	$\sigma_y$	Convention: Mét. et Cér: $e_y = 0.2\%$ Polym: $e_y = 0.5\%$	Mét. et Cér.: début du mouvement des dislocations Polym: début du glissement des chaînes
Dureté	$H_v, H_B$	$H_v \text{ (MPa)} \approx 3 \cdot \sigma_y$	
Ecrouissage	n	$n = d\sigma/d\epsilon$ au-delà de $\sigma_y$	Mét. et Cér.: renforcement par création de dislocations pendant la déformation Polym.: pas d'écrouissage
Résistance	$\sigma_m$	Contrainte maximale avant rupture	Mét.: Striction puis rupture Cér.: rupture fragile - fissures Polym.: striction, microfissures
Ductilité	$\epsilon_R$	Déformation résiduelle juste avant la rupture  $\epsilon_R = \epsilon_{tot} - \sigma/E$	Mét.: mouvement des dislocations (10%) Cér.: cassent avant de se déformer plastiquement Polym.: Elongation des chaînes et microfissures (50-100%)
Ténacité	$K_{1c}$	$K_{1c} = (2\gamma + G_{pl}^c)^{1/2}$	

# Résumé

---

- Le comportement plastique des métaux est essentiellement lié aux dislocations, défauts linéaires marquant une discontinuité de l'arrangement cristallin.
- Pour augmenter la résistance des métaux, il faut épingler les dislocations ou les freiner, par des éléments de soluté en solution, par des précipités, par écrouissage ou par les joints de grains.
- Les polymères sont fragiles à basse température et très ductiles à plus haute température.

# A retenir du cours d'aujourd'hui

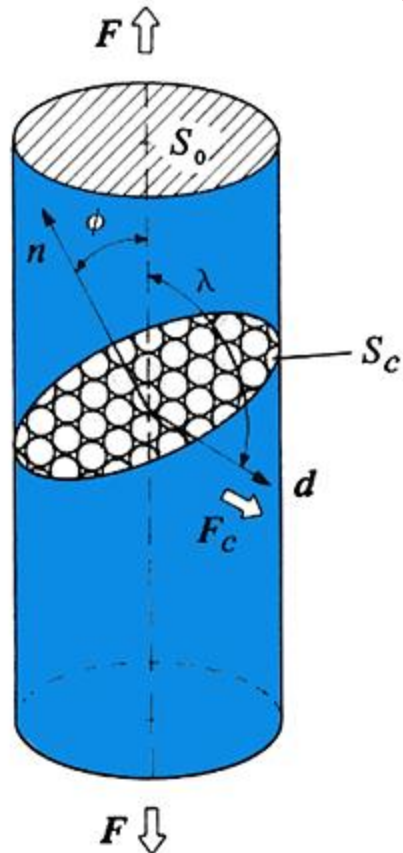
---

- *Savoir ce que c'est qu'une dislocation vis et coin, un vecteur de Burgers,*
- *Savoir citer les mécanismes de durcissement des métaux et à quoi cela correspond, et utiliser les formules simplifiées donnant l'augmentation de limite d'élasticité.*
- *Savoir que pour un polymère, la ductilité provient de mécanismes un peu différents (pas de dislocations).*

# Pour info: lien avec la structure cristalline

Dans un monocristal donné (ou un grain), seuls certains **systemes de glissement** sont mis en jeu et peuvent être activés.

Systemes cfc: **plans de glissement {111} plans denses**  
**directions de glissements  $\langle 110 \rangle$**

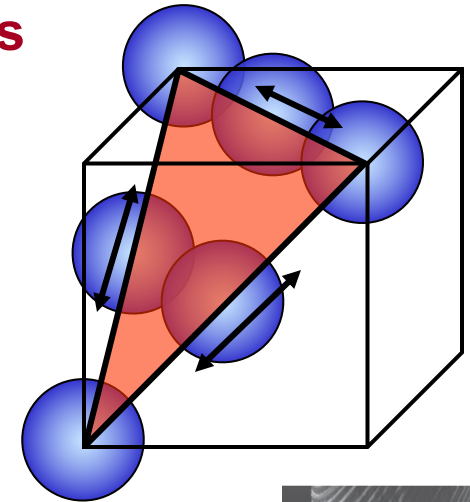


Composant de la force  $\mathbf{F}$  selon une direction de glissement  $\mathbf{d}$ :  $F \cos \lambda$

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

Contrainte de cisaillement effective pour le système de glissement considéré:

$$\tau = F \cos \lambda / S = \sigma_{xx} \cos \lambda \cos \phi \quad \text{Facteur de Schmid}$$



Fil alu,  
J.Krebs, EPFL 2015