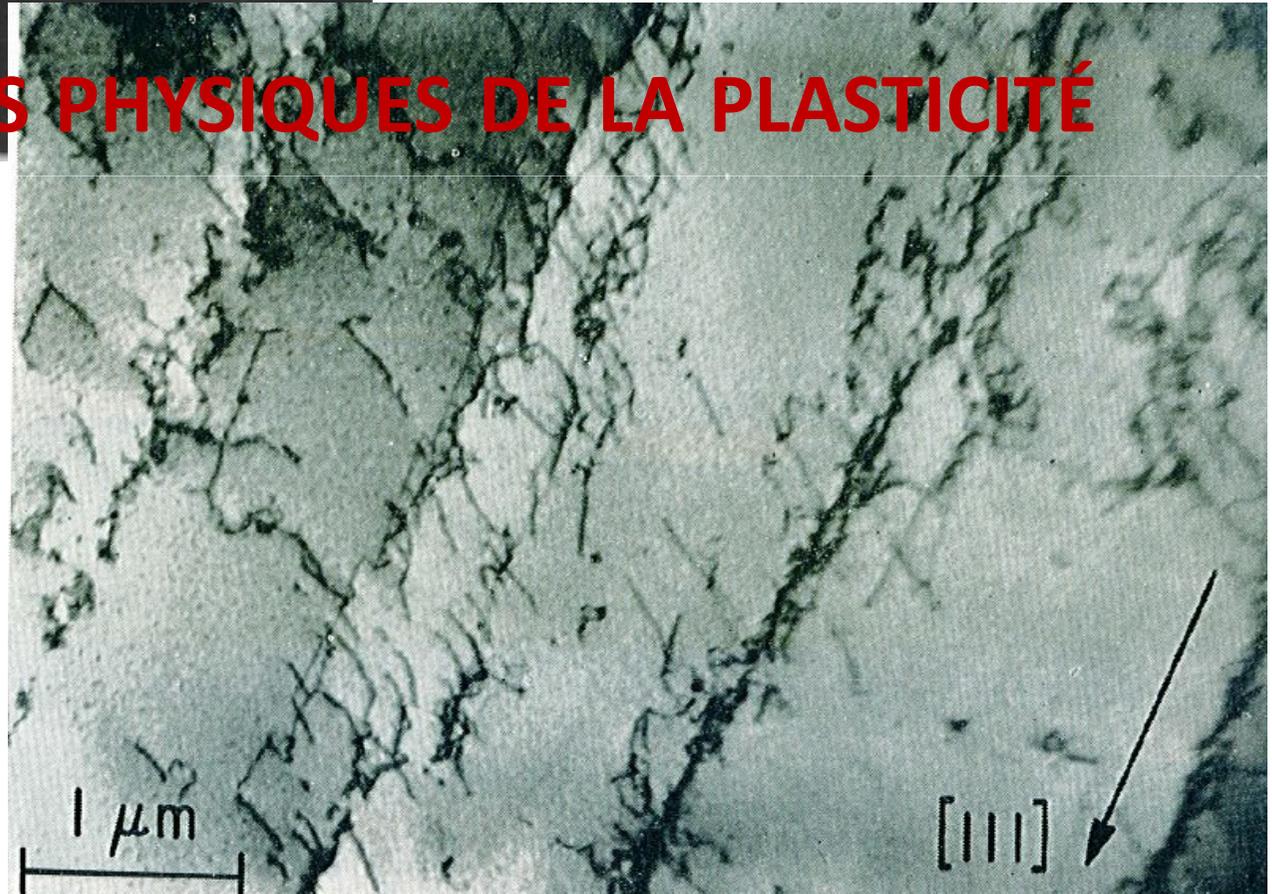




MATÉRIAUX À HAUTES PERFORMANCES
MATÉRIAUX POUR L'ÉNERGIE

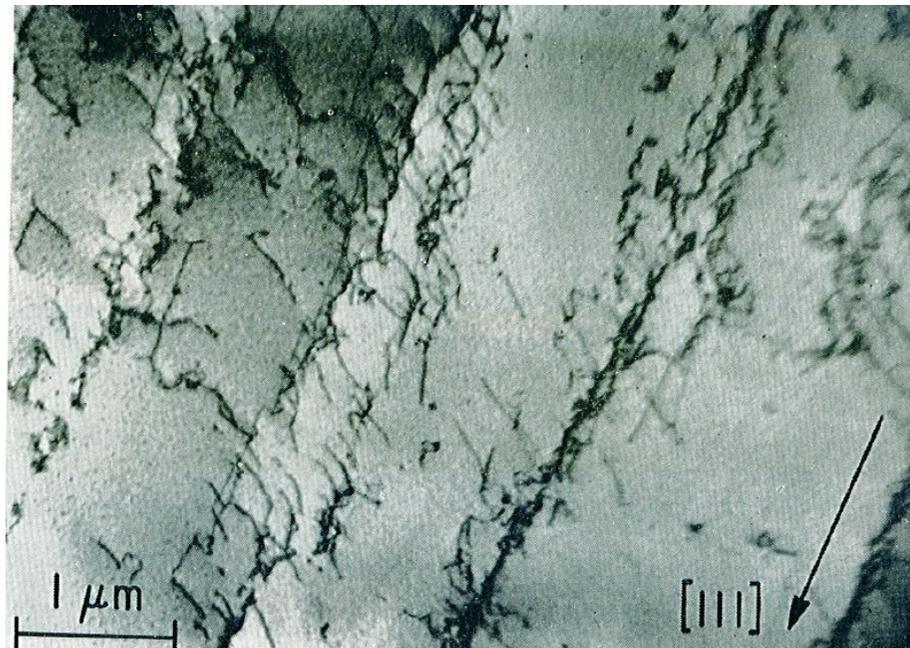
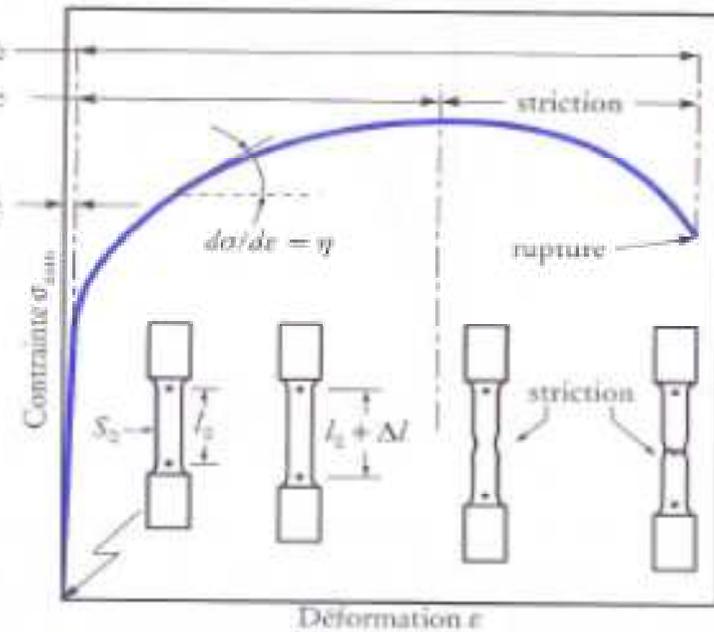
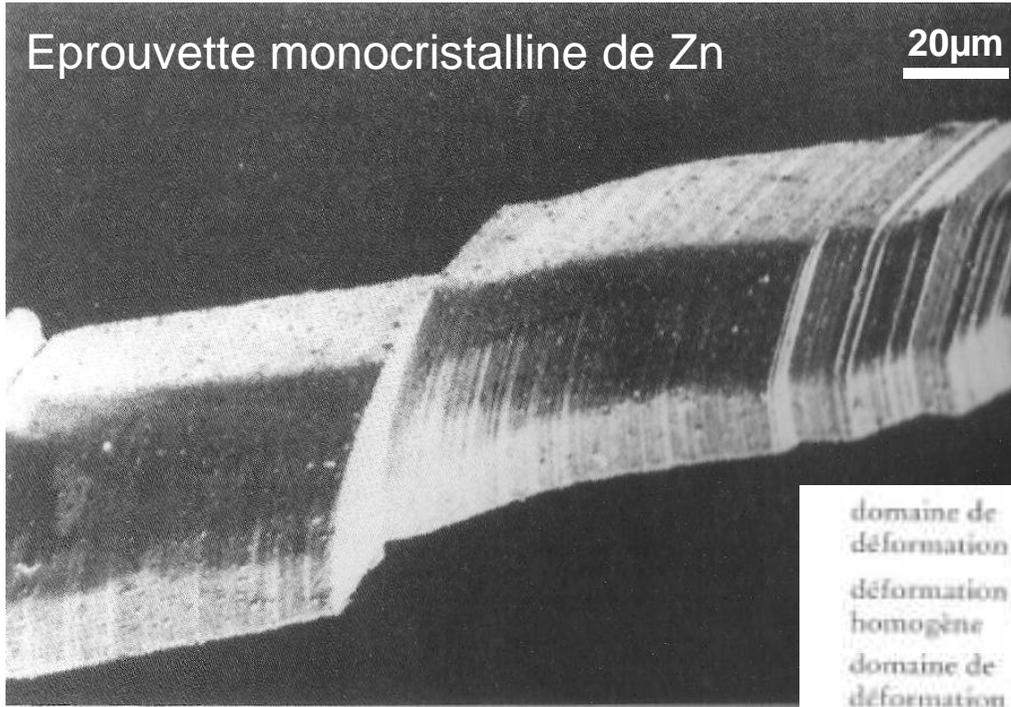
MÉCANISMES PHYSIQUES DE LA PLASTICITÉ

Jean-Hubert Schmitt
jean-hubert.schmitt@ecp.fr



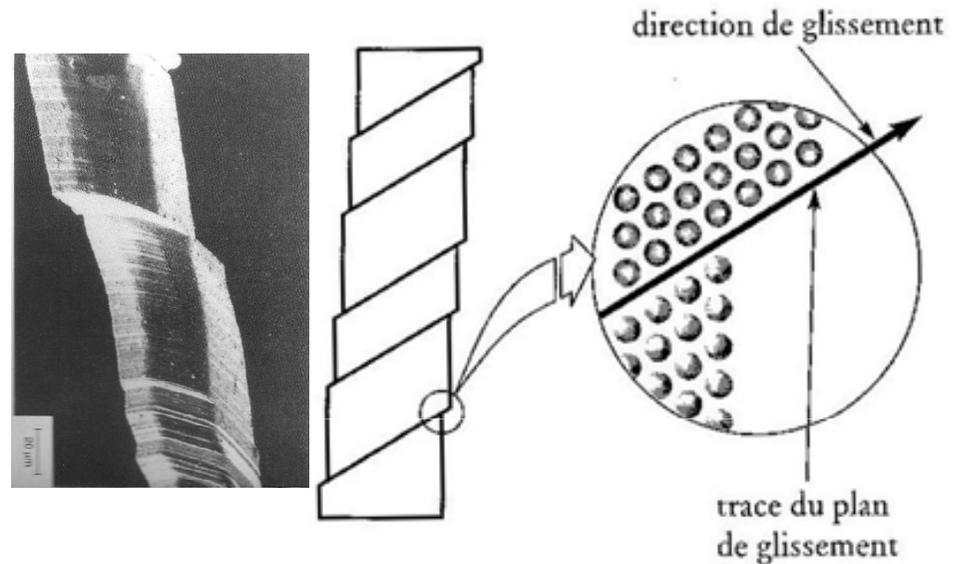
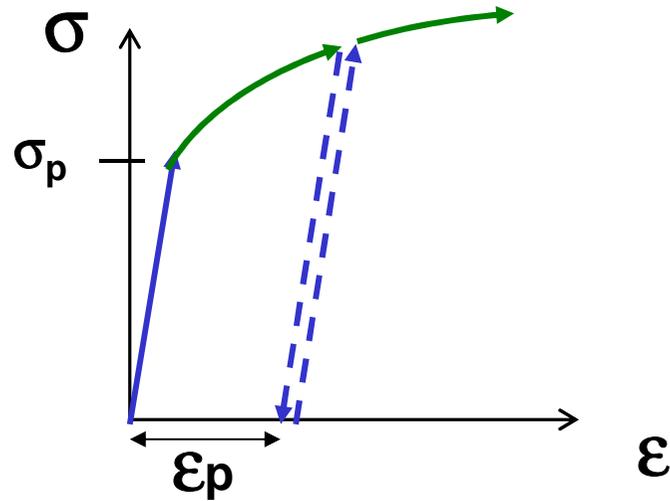
Eprouvette monocristalline de Zn

20μm



Dislocations MET
monocrystal Fe

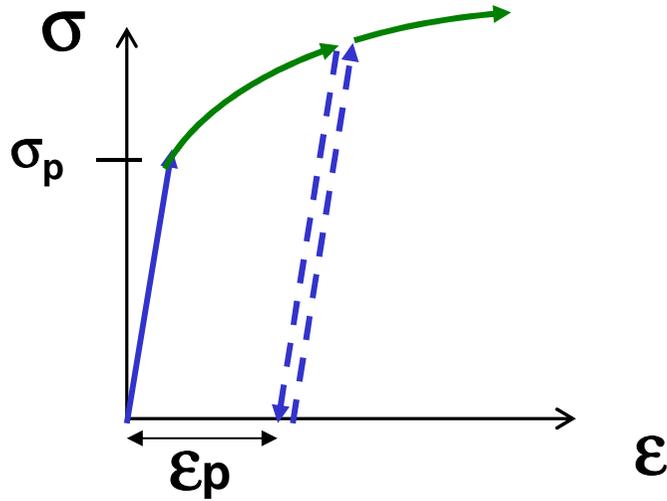
Limite d'élasticité théorique



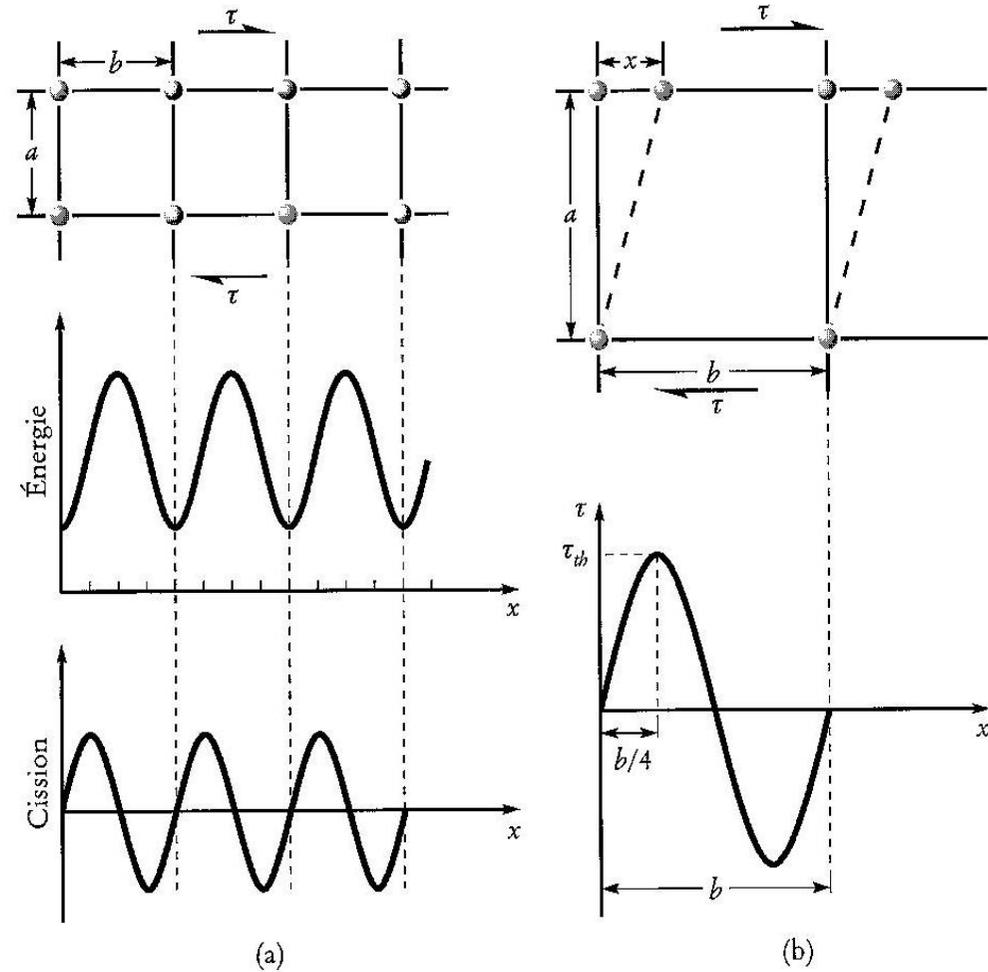
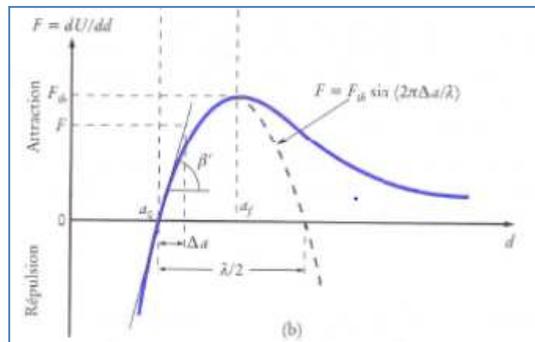
Limite d'élasticité : **critère ?**

Les matériaux cristallins se déforment sur des plans parallèles, inclinés par rapport à la direction de traction

Limite d'élasticité théorique

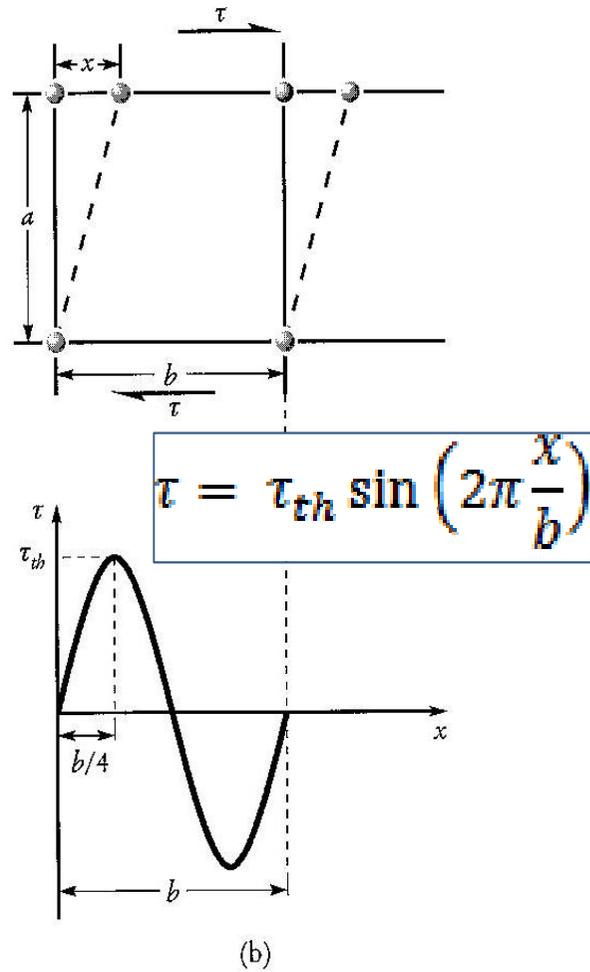
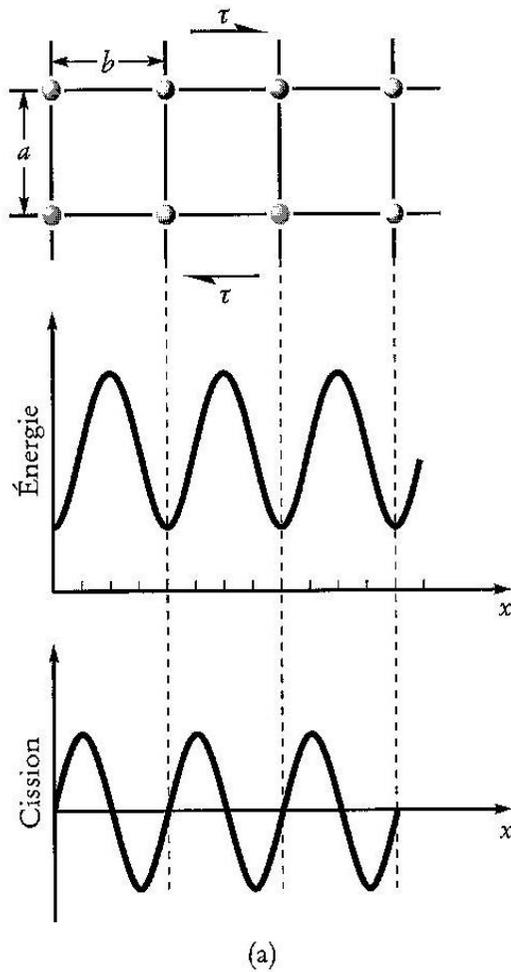


Limite d'élasticité : critère ?



$$\tau = \tau_{th} \sin\left(2\pi \frac{x}{b}\right)$$

Limite d'élasticité théorique

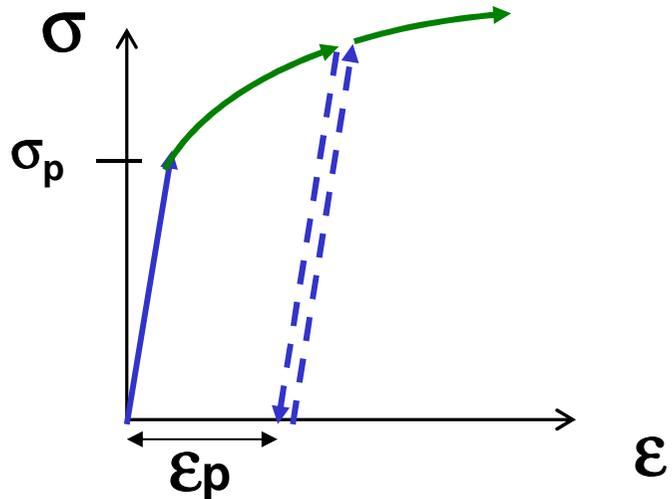


$$\gamma = \frac{x}{a} \quad \tau = G\gamma = G \frac{x}{a}$$

$$\tau_{th} = \frac{G b}{2\pi a}$$

$$\tau_{th} = \frac{G}{2\pi} \approx \frac{G}{6}$$

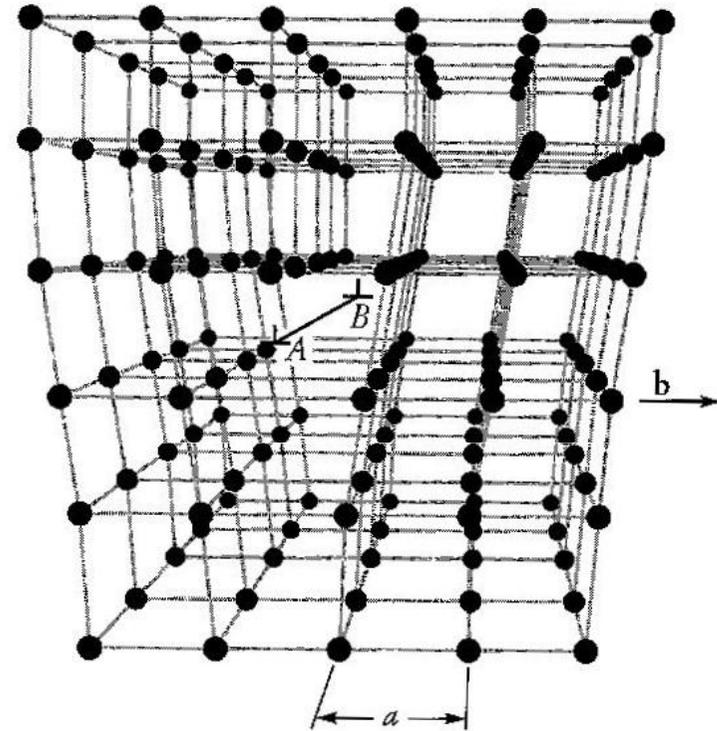
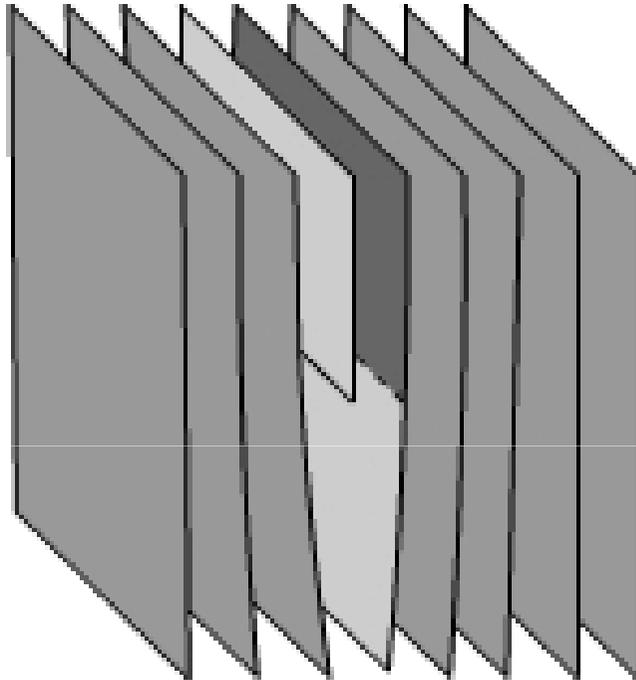
Limite d'élasticité théorique



$$\sigma_p \approx 2\tau_{th} = \frac{2G}{2\pi} \approx \frac{G}{3} \approx \frac{E}{8}$$

Métal	Module de cisaillement selon la direction de glissement (MPa)	Cission théorique (MPa)	Cission expérimentale (MPa)
Al	27 500	9 033	30
Fe α	83 100	27 700	190
Ni	76 500	25 500	70
Ti α	40 100	13 366	250

Dislocations



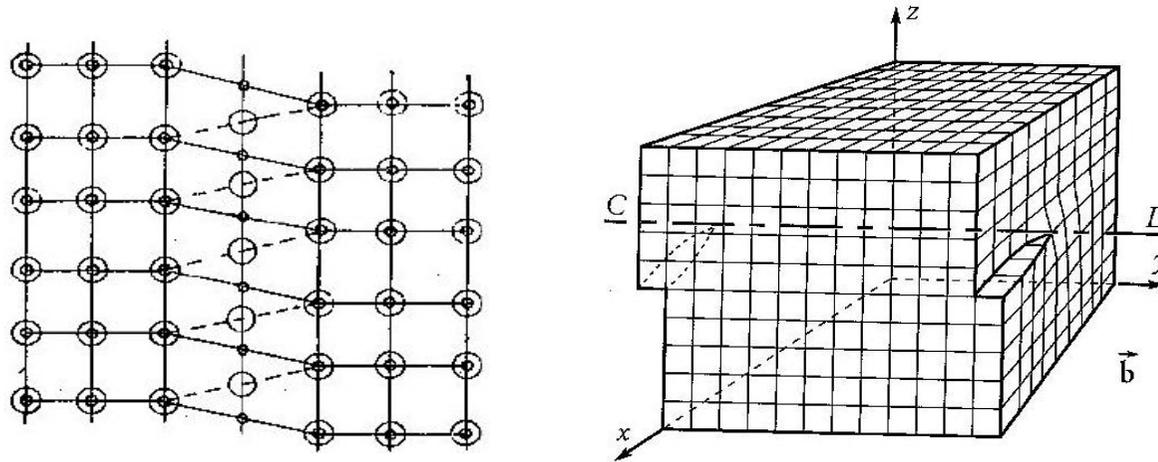
dislocation coin

Ligne de dislocation AB

Vecteur de Burgers b

Plan de glissement $\{(AB), b\}$

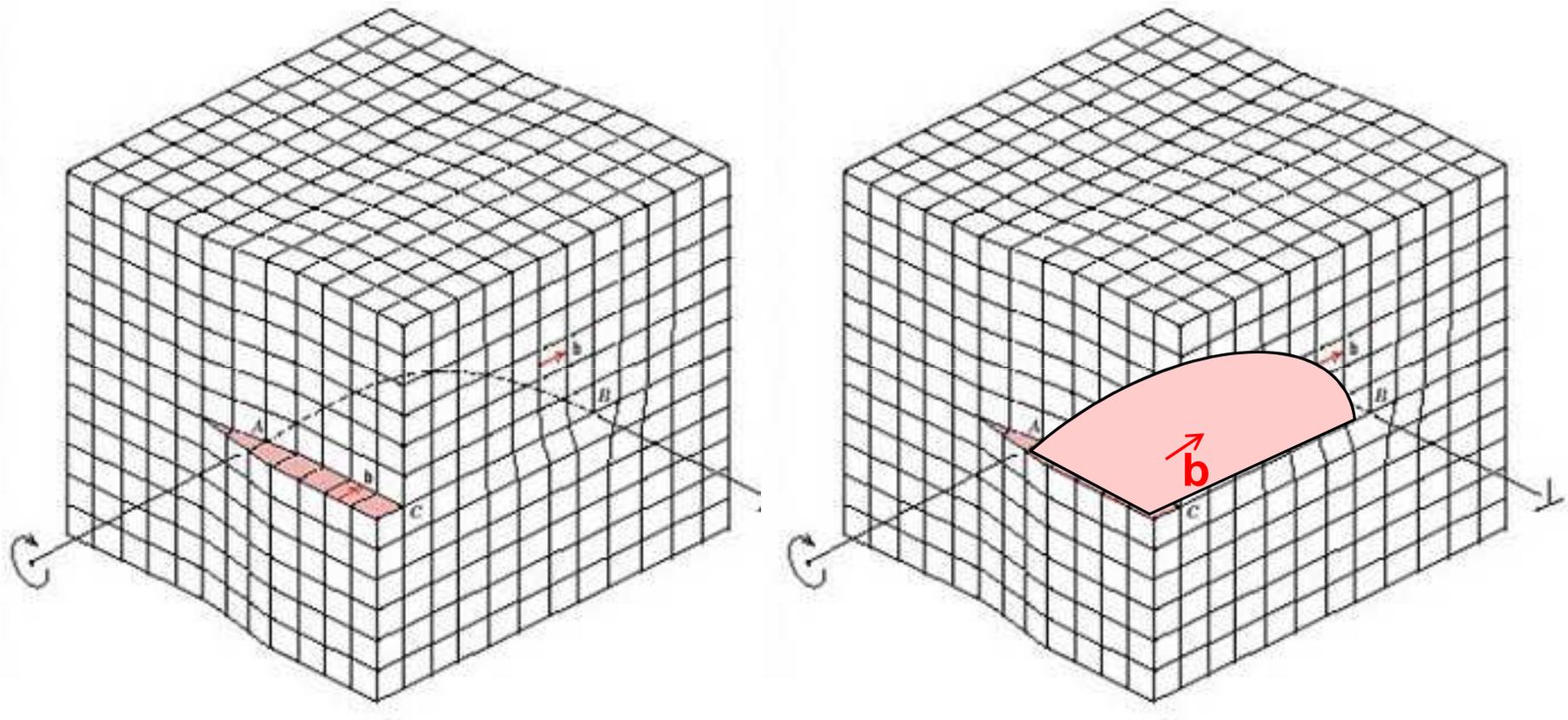
Dislocations



dislocation vis

Ligne de dislocation CD // vecteur de Burgers b
Plan de glissement : tout plan contenant (CD)

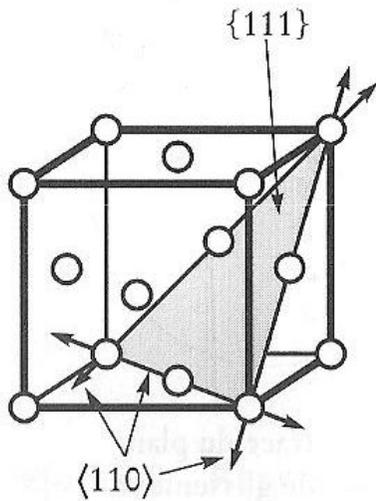
Dislocations



dislocations mixtes (bucles)

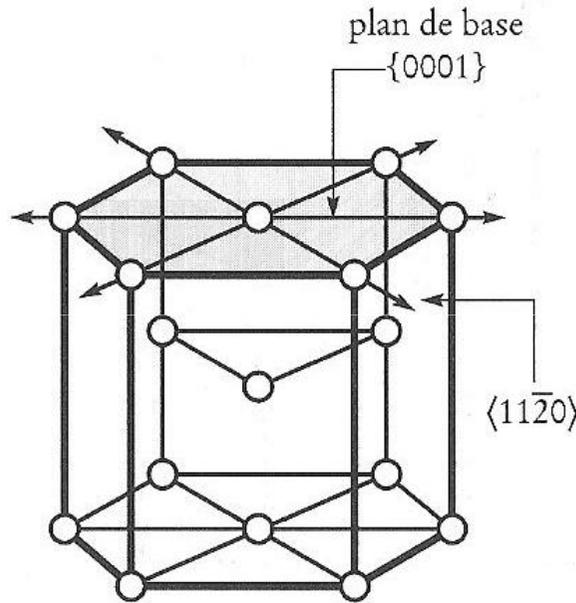
Dislocations

Systèmes de glissement



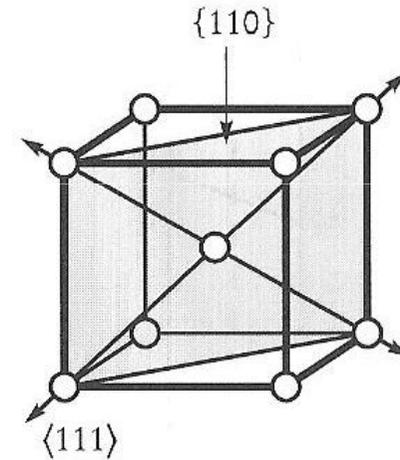
cfc
 $\{111\}\langle 110 \rangle$

Al, Cu, Ni



hc
 $\{0001\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$

Ti, Zn, Mg

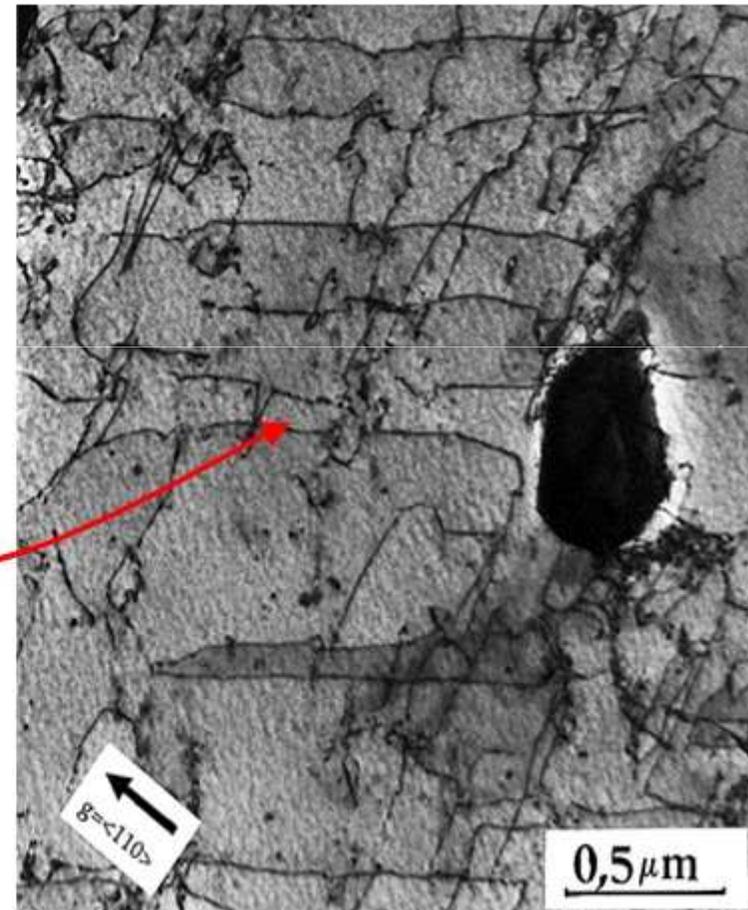
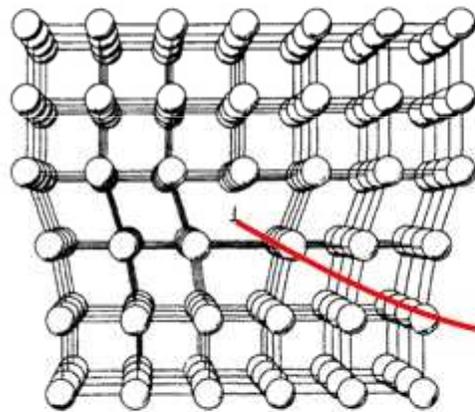


cc
 $\{110\}\langle 111 \rangle$

Fe_α , Mo, Nb

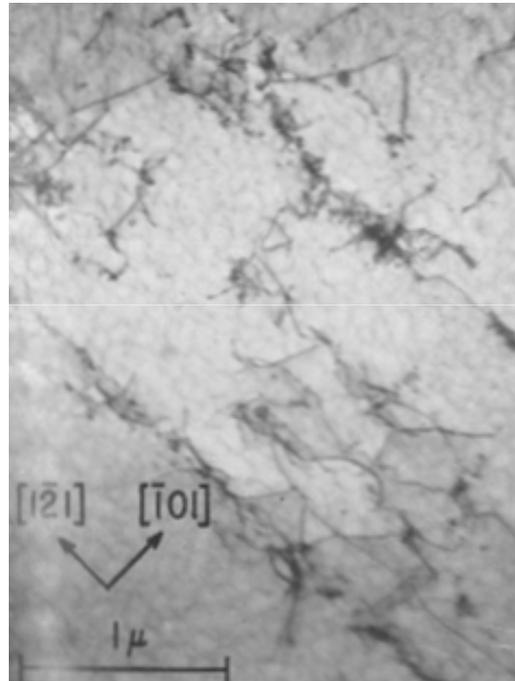
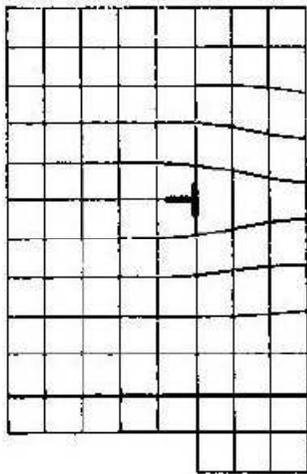
Observation des dislocations

Observation des dislocations par MET
Exemple d'une dislocation coin

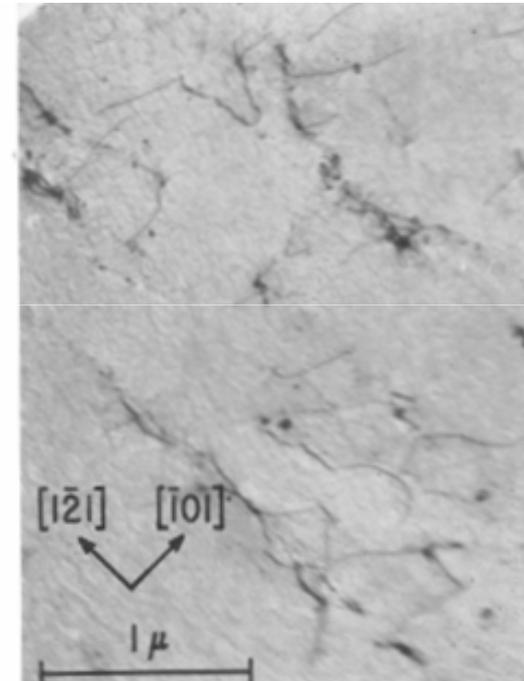


Observation des dislocations

Observation des dislocations par MET
Exemple d'une dislocation coin



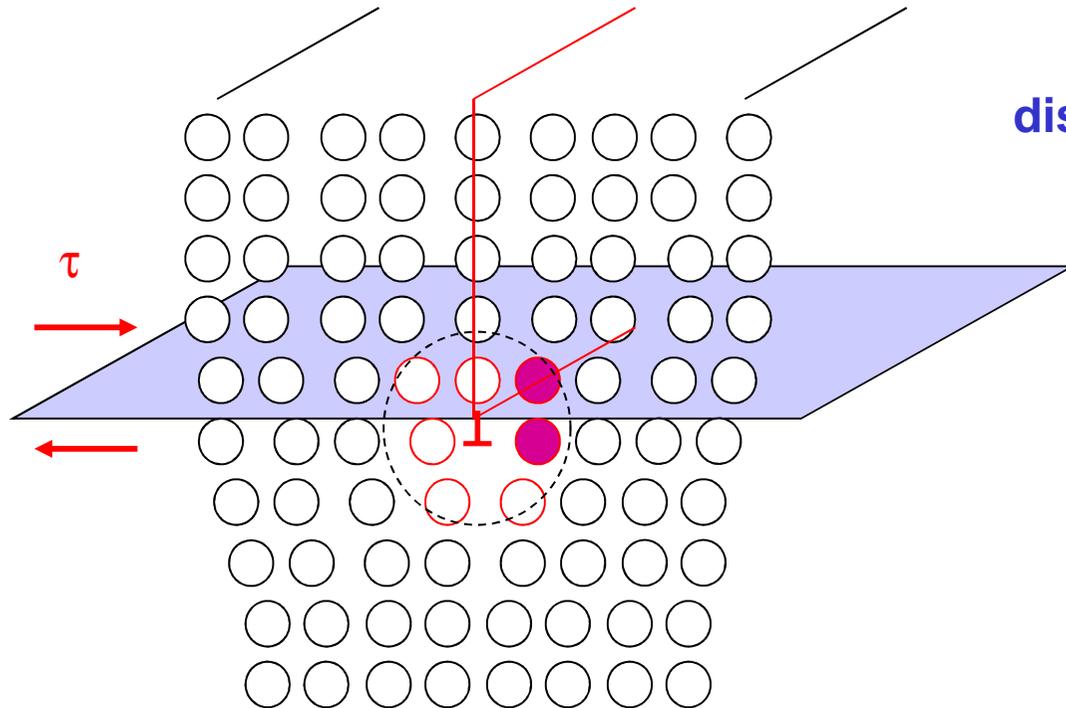
$$\vec{g} = [11\bar{2}]$$



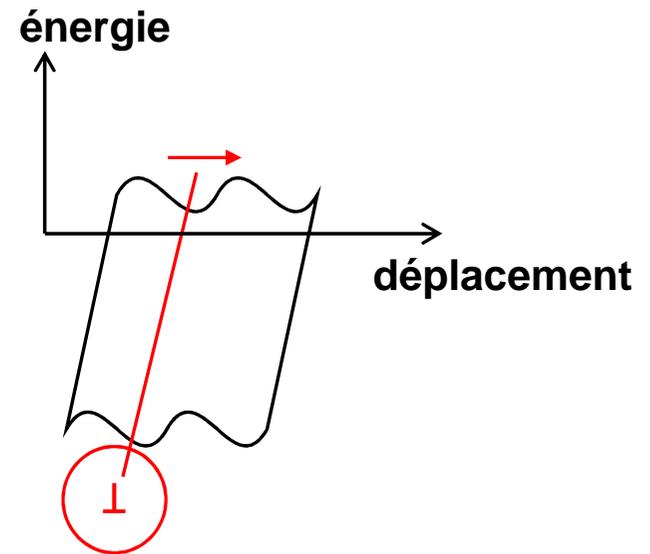
$$\vec{g} = [\bar{1}01]$$

Monocristal de Fe – 8% traction
Distinction entre dislocations primaires et secondaires

Mouvement d'une dislocation

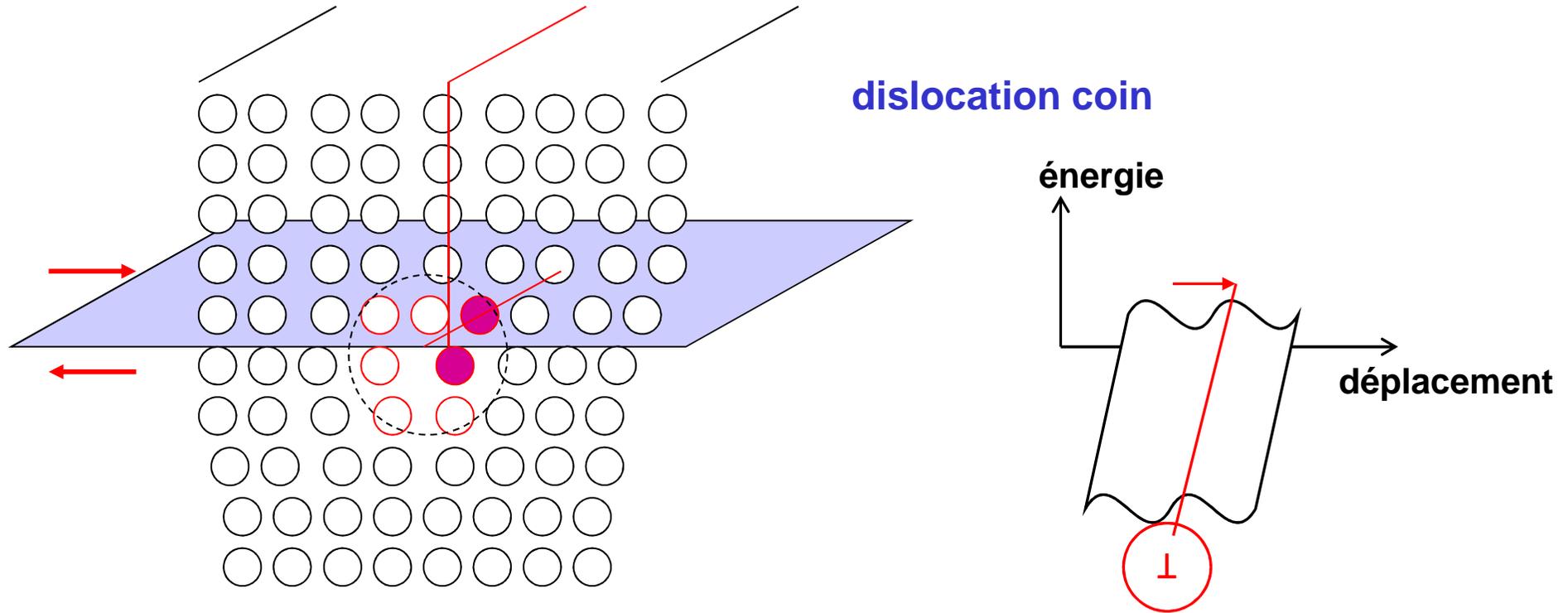


dislocation coin



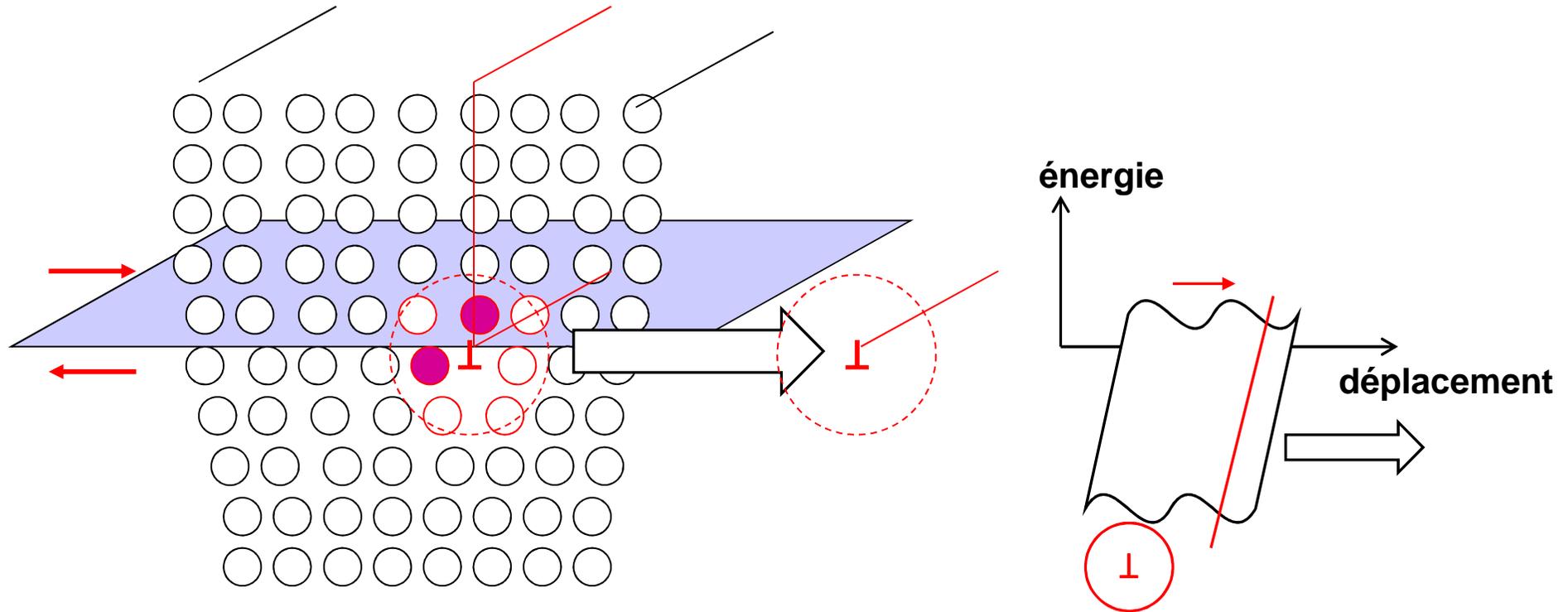
Glissement de la dislocation si la contrainte de cisaillement τ appliquée sur le plan de glissement est suffisante ($\tau = \tau_c$)

Mouvement d'une dislocation



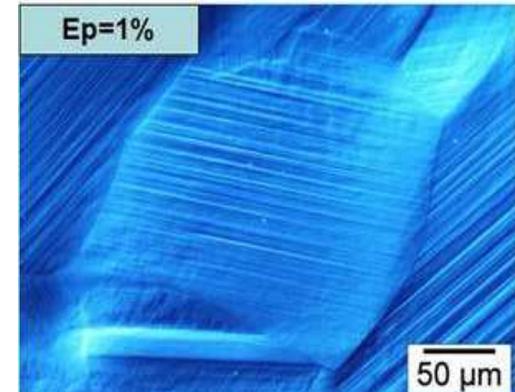
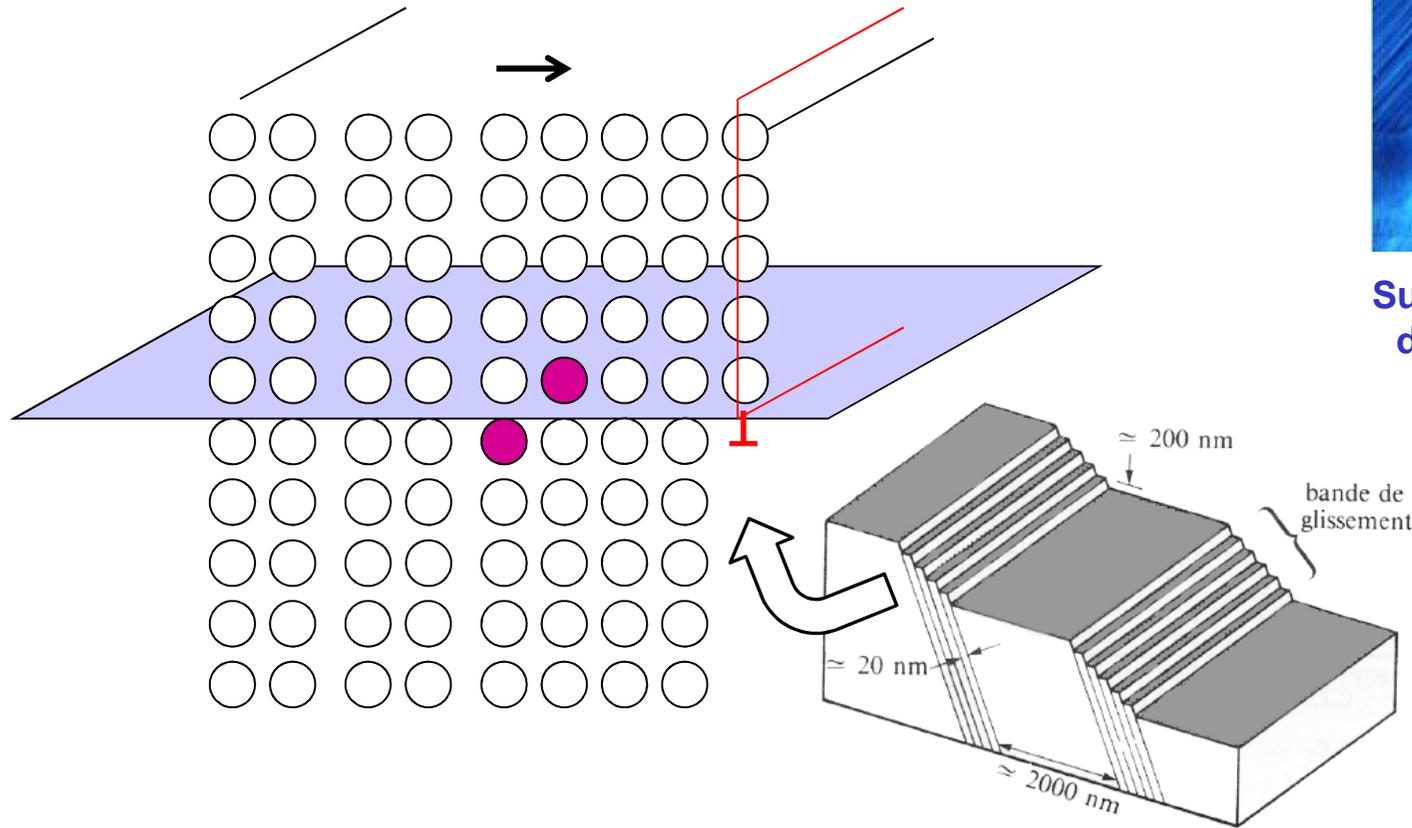
Glissement lié à la contrainte de cisaillement sur le plan: passage par τ_c

Mouvement d'une dislocation

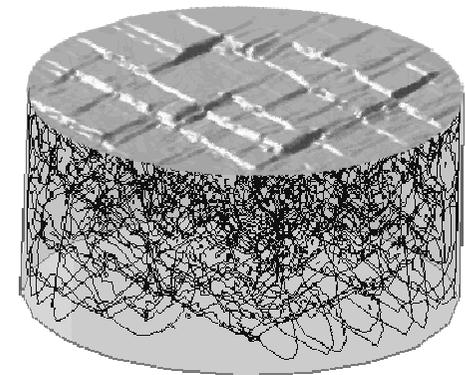


Glissement plastique d'une distance interatomique de l'ensemble du réseau après le passage de la dislocation

Mouvement d'une dislocation



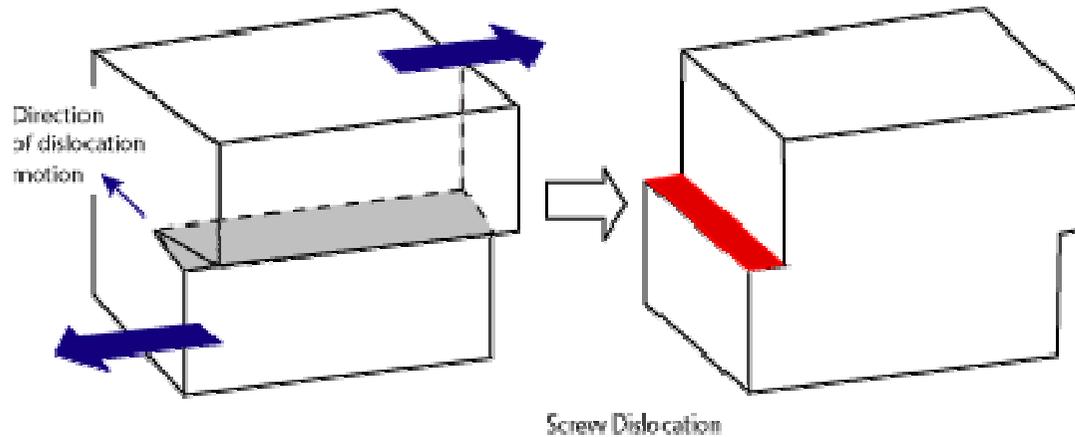
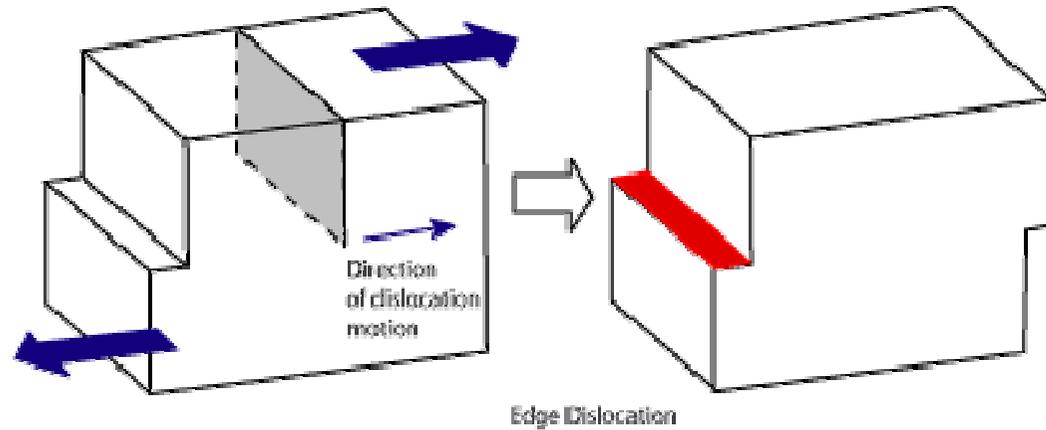
Surface polycristal Cuivre déformé plastiquement



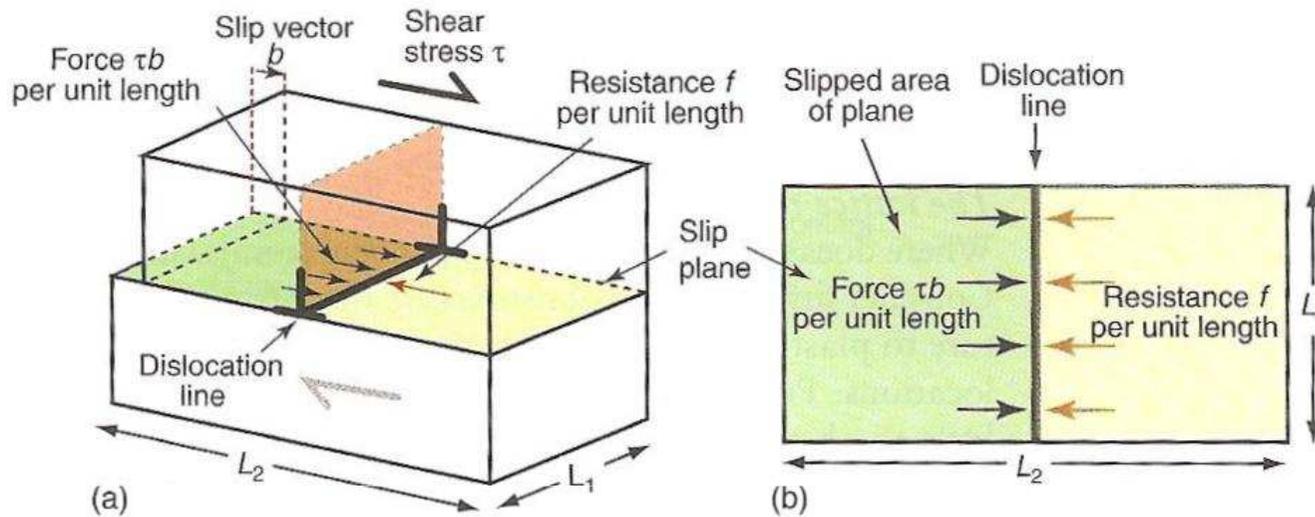
Glissements de l'ensemble du cristal sur les plans => changements de forme sans changement de volume Simulation numérique glissement des dislocations (monocrystal)

Mouvement d'une dislocation

glissement des coins
et des vis: même
résultat macroscopique



Mouvement d'une dislocation



Forces extérieures : $\tau S = \tau L_1 L_2$

Forces sur la dislocation : $f L_1$

Déplacement macroscopique : b

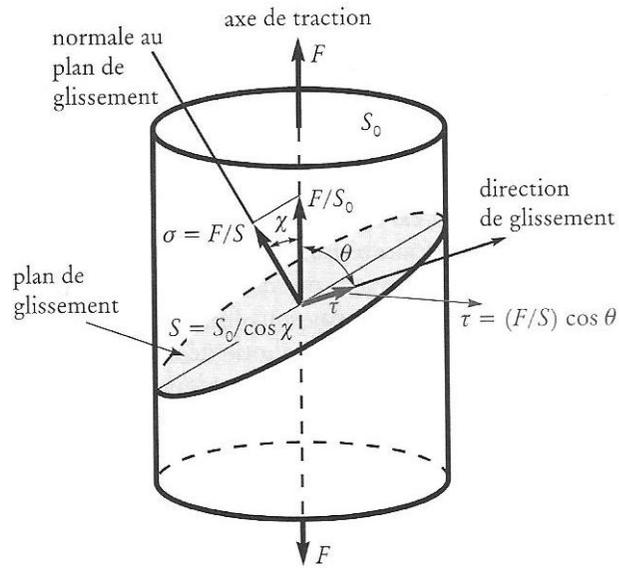
Déplacement de la dislocation : L_2

Equivalence des travaux :

$$\tau L_1 L_2 b = f L_1 L_2$$

$$\text{Force sur une dislocation : } f = \tau b$$

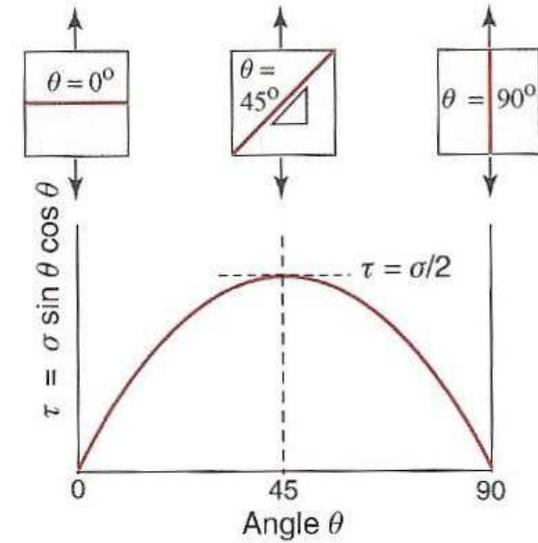
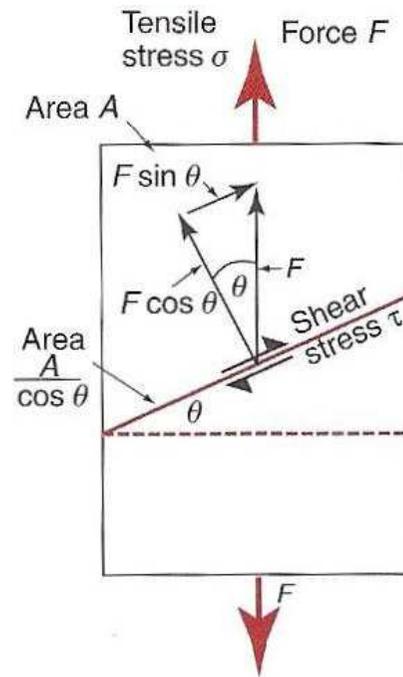
Limite d'élasticité



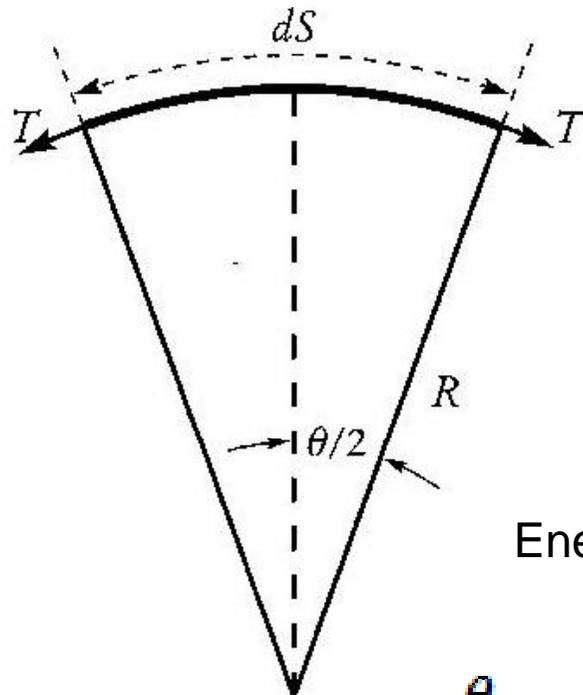
Facteur de Schmid :

$$\tau = \frac{F}{S_0} \cos \theta \cos \chi$$

On observe que les plans de glissement correspondent aux plans avec une cission max.
Idem pour la direction de glissement



Limite d'élasticité



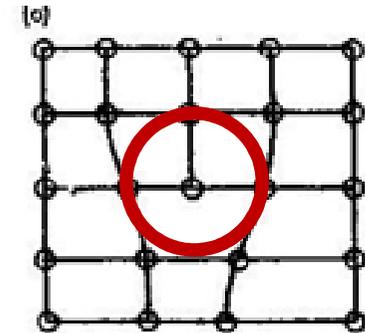
$$\tau b \cdot dS = 2T \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\tau = \frac{T}{2bR} \approx \frac{Gb}{2R}$$

Déplacements atomiques = énergie stockée



Cisaillement de l'ordre de 1/2, soit une cission de G/2



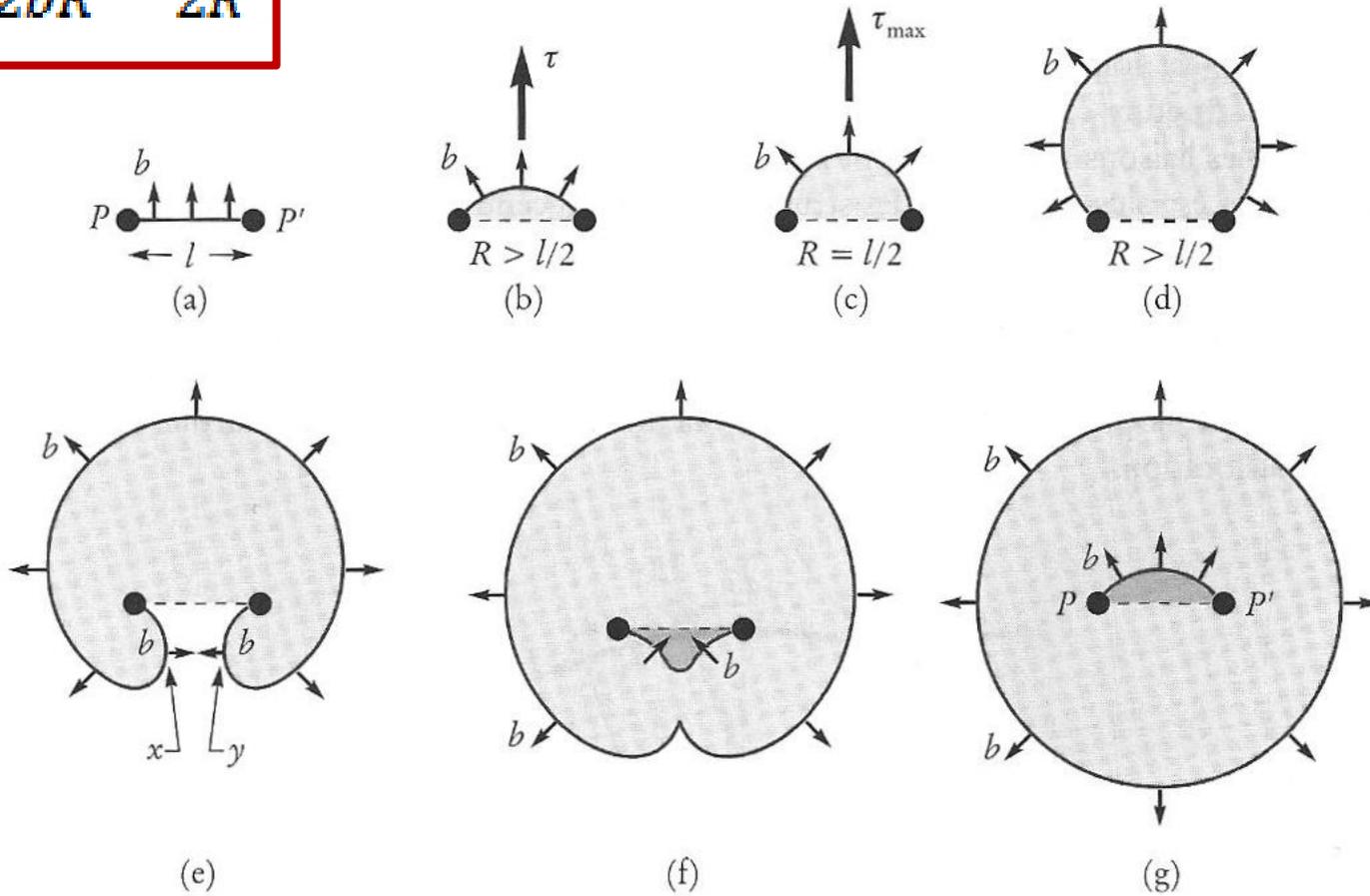
Energie élastique par unité de ligne de l'ordre de G/8, avec une surface de cœur de πb^2



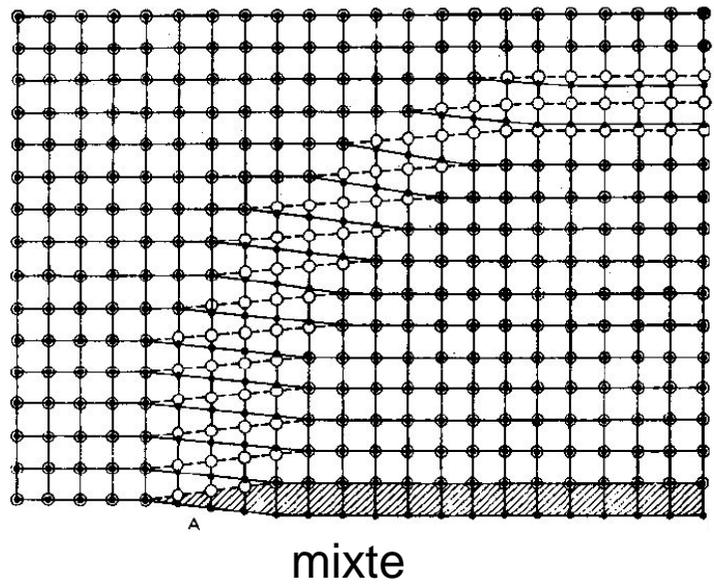
$$T = \frac{\pi}{8} Gb^2 \approx G \frac{b^2}{2}$$

Limite d'élasticité

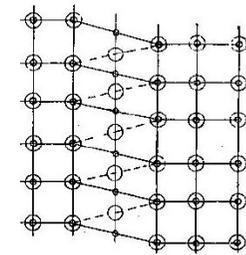
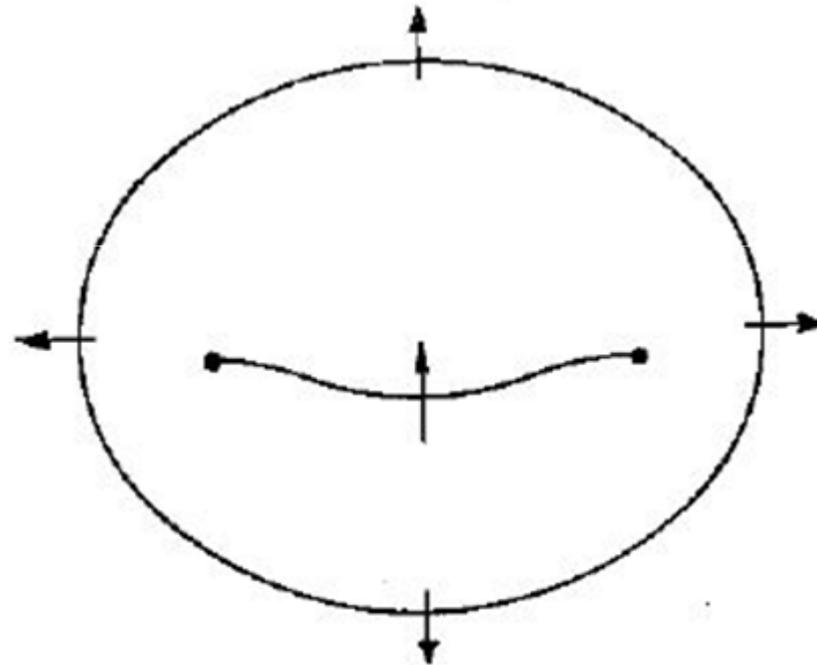
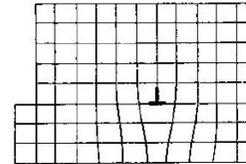
$$\tau = \frac{T}{2bR} \approx \frac{Gb}{2R}$$



Limite d'élasticité

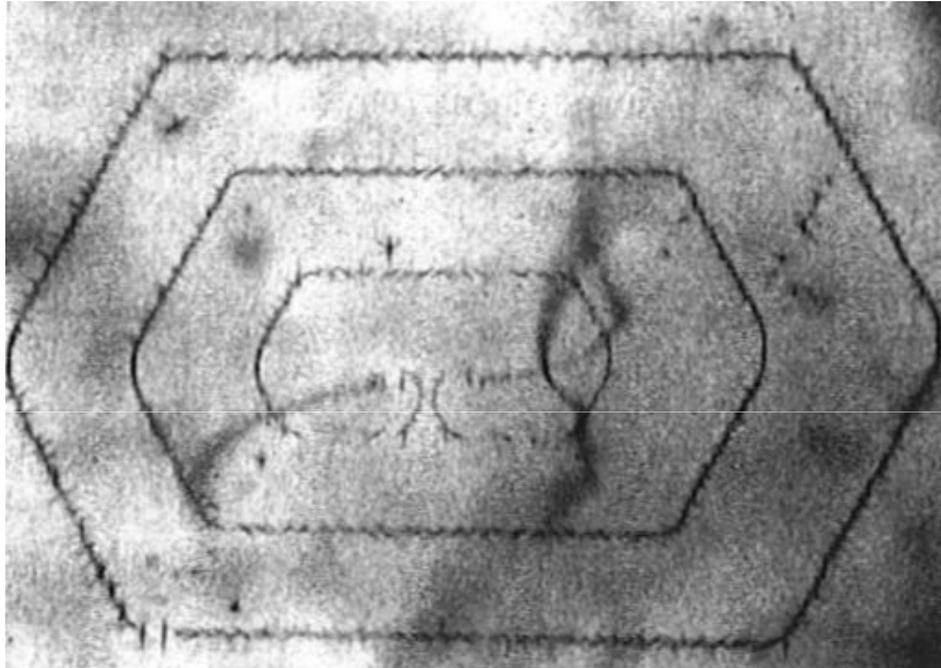


coin



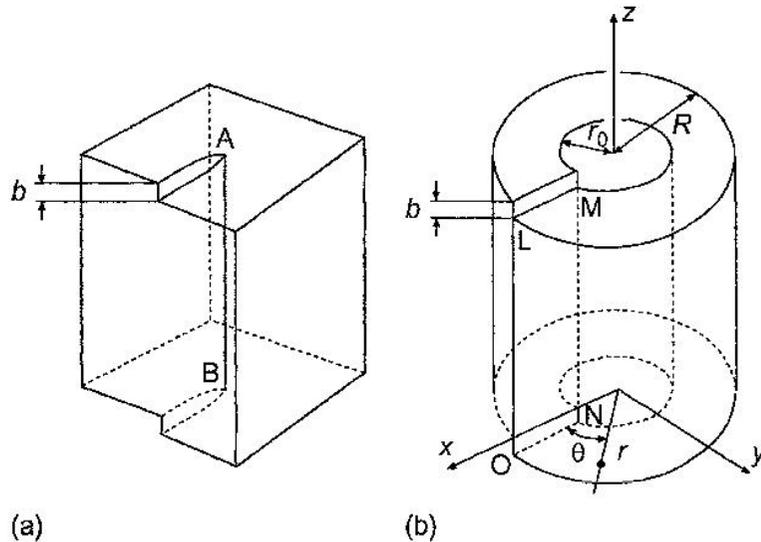
Boucle de dislocation

Limite d'élasticité



An example of a Frank Read source in Si
(note the specific regular shape due to lattice friction (Peierls))

Champ de contrainte autour d'une dislocation



Dislocation vis :
seule composante de déplacement non nulle

$$u_z = \frac{b\theta}{2\pi}$$

Les seules composantes non nulles de la déformation :

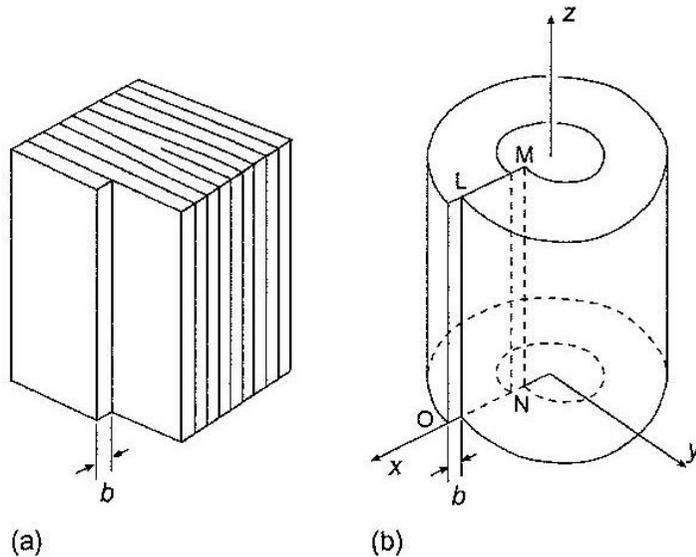
$$\epsilon_{\theta z} = \frac{1}{2} \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} = \epsilon_{z\theta}$$

$$\epsilon_{\theta z} = \epsilon_{z\theta} = \frac{b}{4\pi r}$$

Soit une contrainte :

$$\sigma_{\theta z} = \sigma_{z\theta} = \frac{Gb}{2\pi r}$$

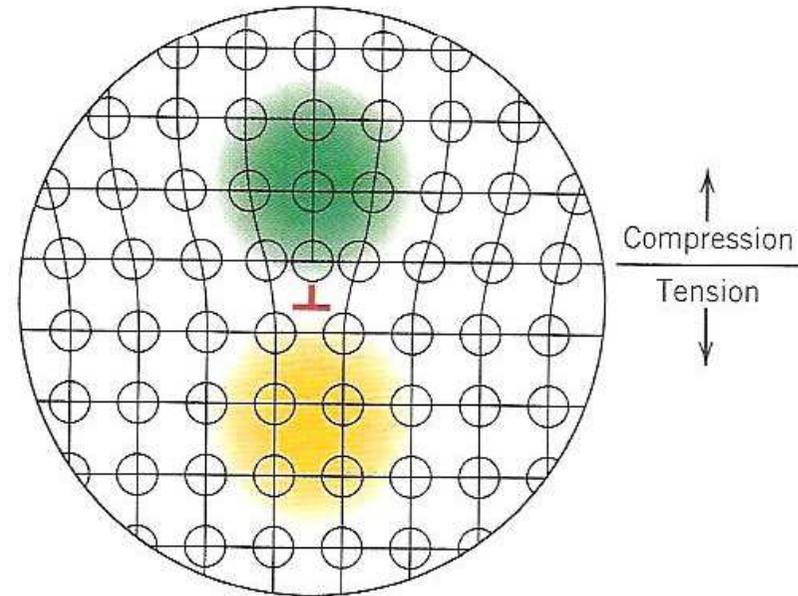
Champ de contrainte autour d'une dislocation



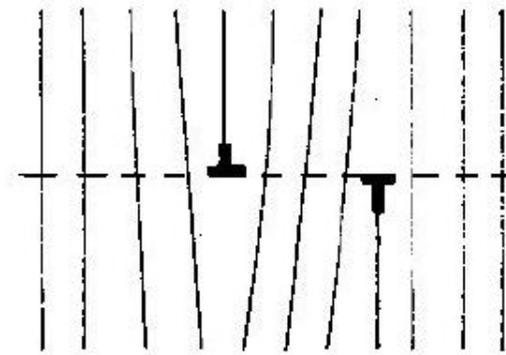
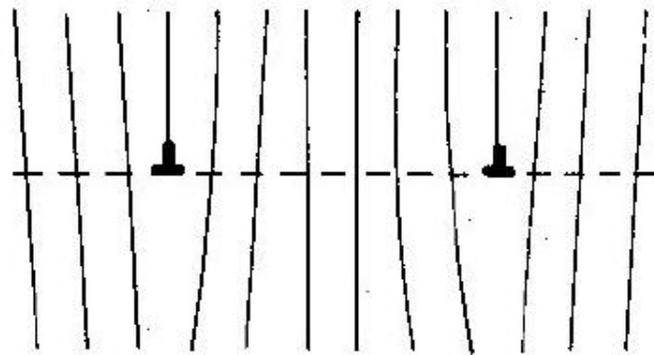
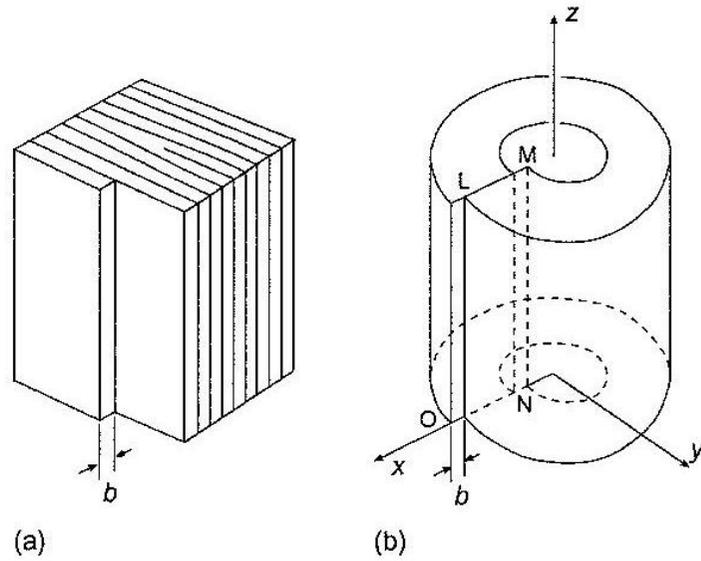
Dislocation coin :
Calcul plus complexe

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\mu b_1}{2\pi(1-\nu)} \frac{1}{r}$$

$$F = \frac{\mu b_1 b_2}{2\pi(1-\nu)r}$$

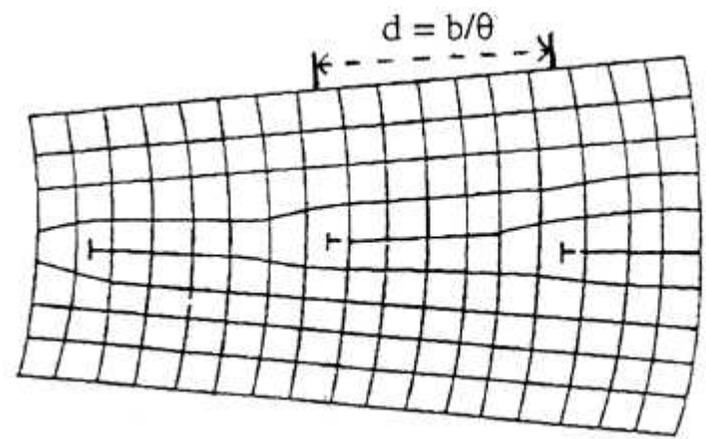
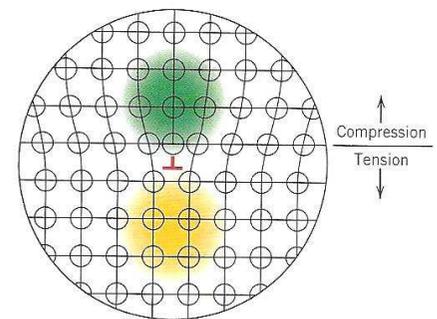
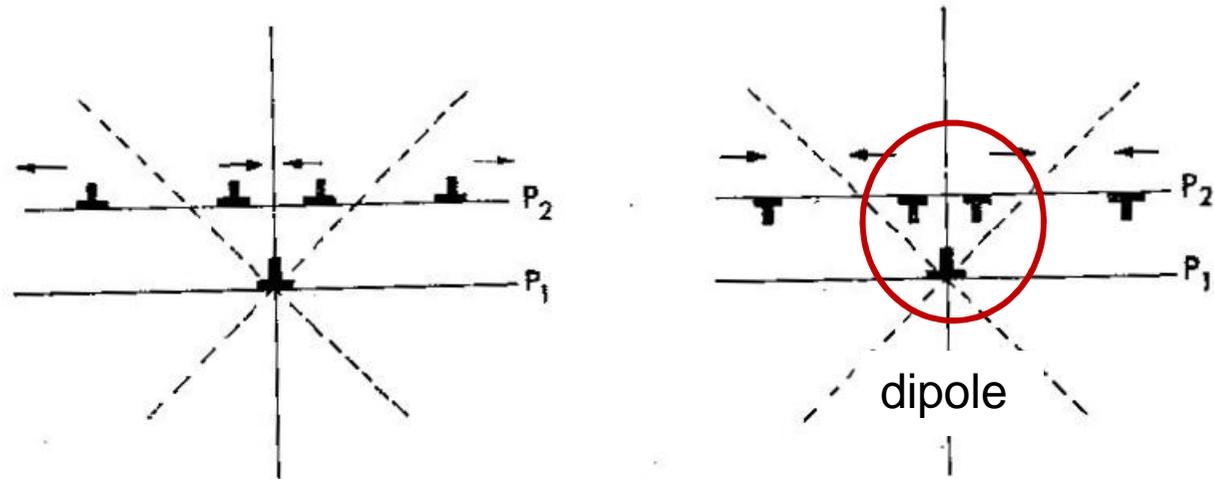


Interaction entre dislocations



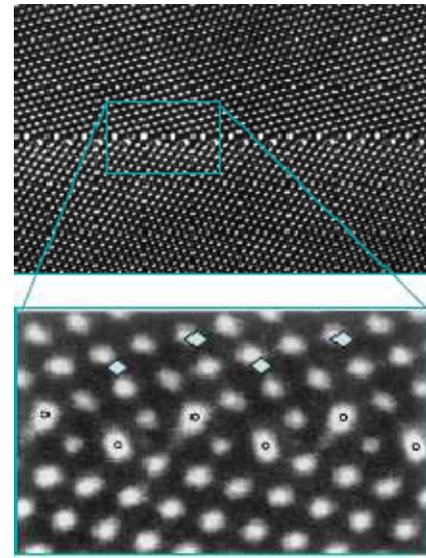
→ annihilation

Interaction entre dislocations



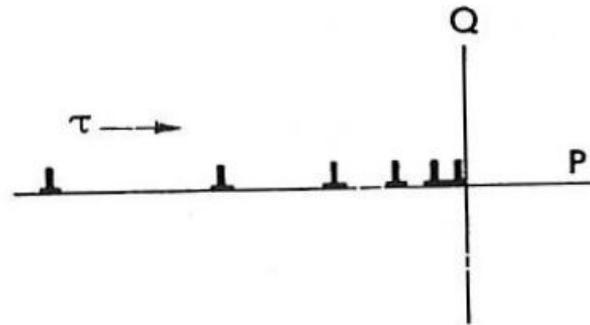
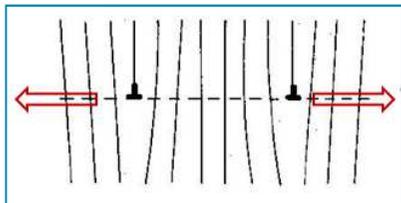
$$\theta = \frac{|b|}{d}$$

Joint de flexion → désorientation locale

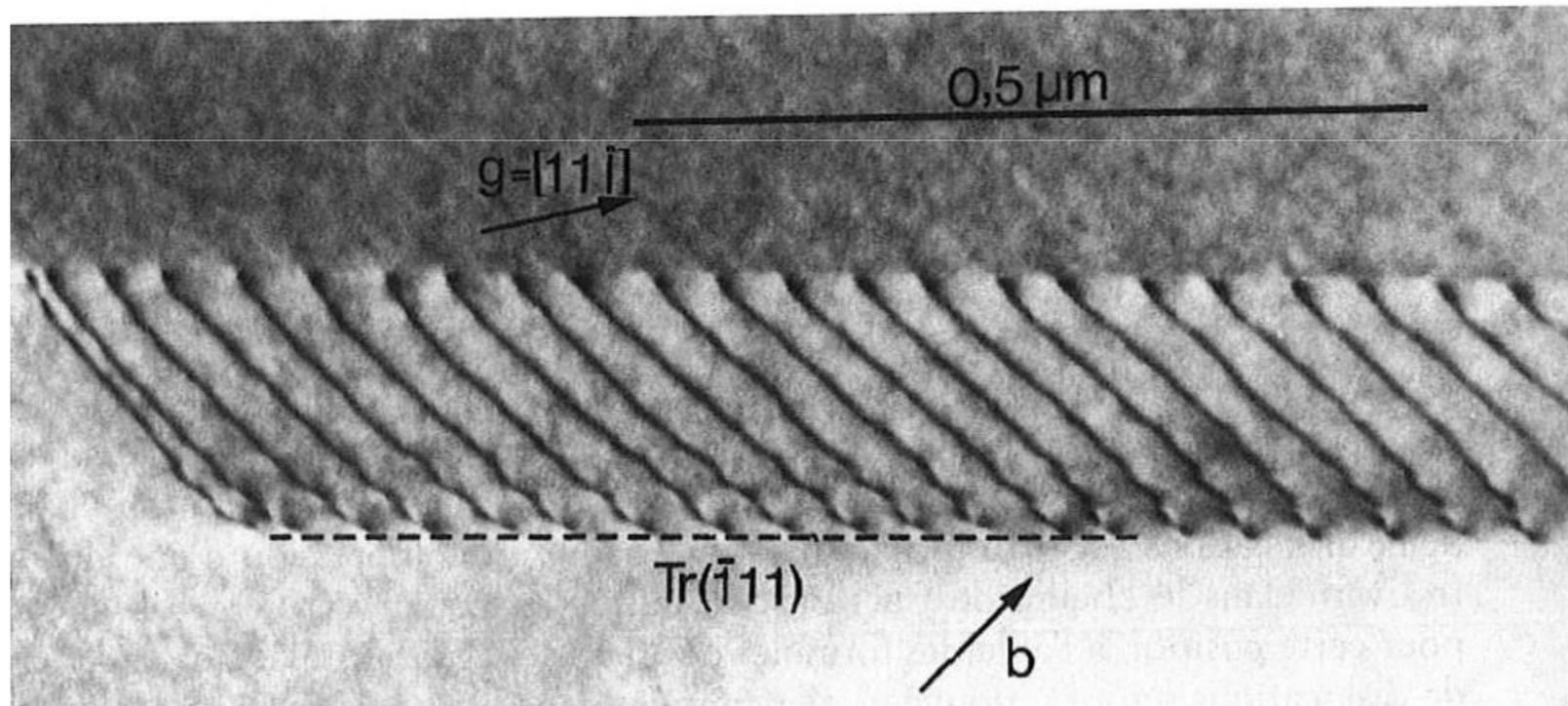


Joint $\Sigma 9$ dans Si
M. Elkajbaji et al. – CEA Grenoble

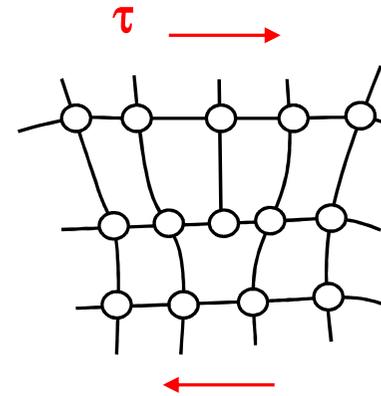
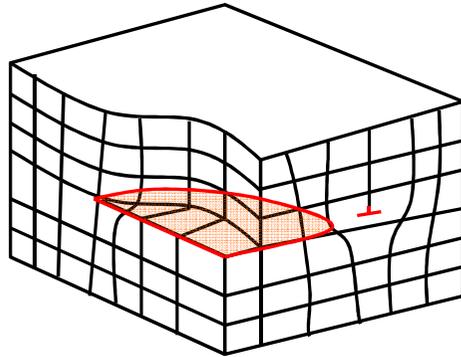
Interaction entre dislocations



Empilement sur un obstacle



Critère de plasticité monocristal



Critère micro

Facteur de Schmid :

$$\tau = \frac{F}{S_0} \cos \theta \cos \chi$$

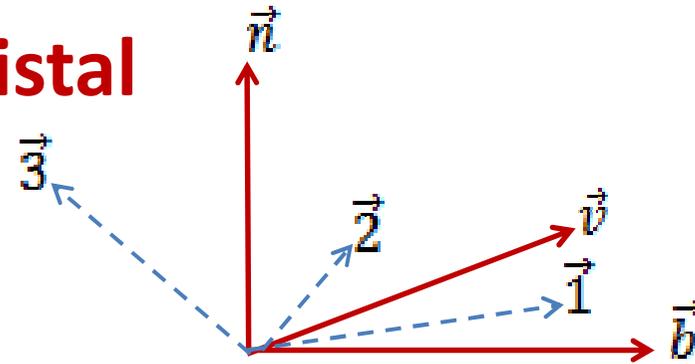
$$\tau_c = \frac{Gb}{L}$$

$$\tau \leq \tau_c$$

Critère de plasticité monocristal

Σ dans $\{\vec{1}, \vec{2}, \vec{3}\}$

σ dans $\{\vec{b}, \vec{v}, \vec{n}\}$



$R : \{\vec{1}, \vec{2}, \vec{3}\} \rightarrow \{\vec{b}, \vec{v}, \vec{n}\}$

$$R = \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{pmatrix}$$

$$\sigma = R^T \Sigma R$$

- Hypothèses :
- pas de sensibilité à la pression
 - seule la composante de cisssion est efficace

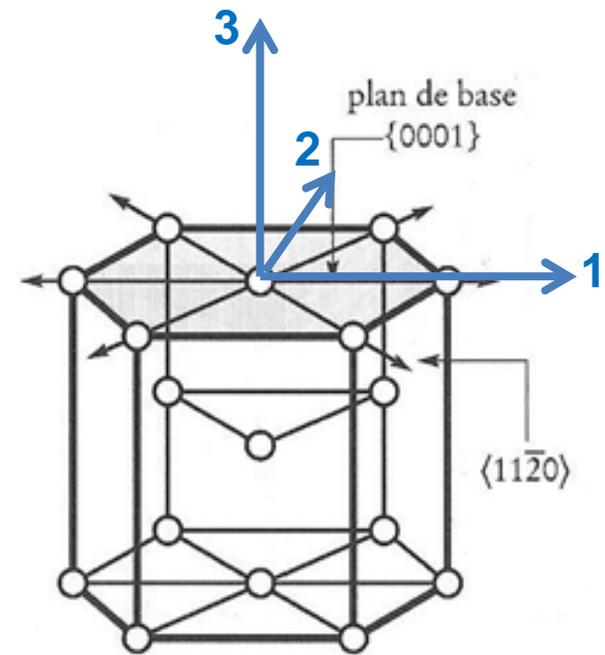
$$\tau = \sigma_{\vec{b}\vec{n}} = n_i b_j \Sigma_{ij}$$

$\{n_i b_j\}$: tenseur de Schmid généralisé

Cas particulier d'une traction : $\sigma_{13} = n_1 b_1 \Sigma = \cos\theta \cos\chi \Sigma$

Critère de plasticité monocristal

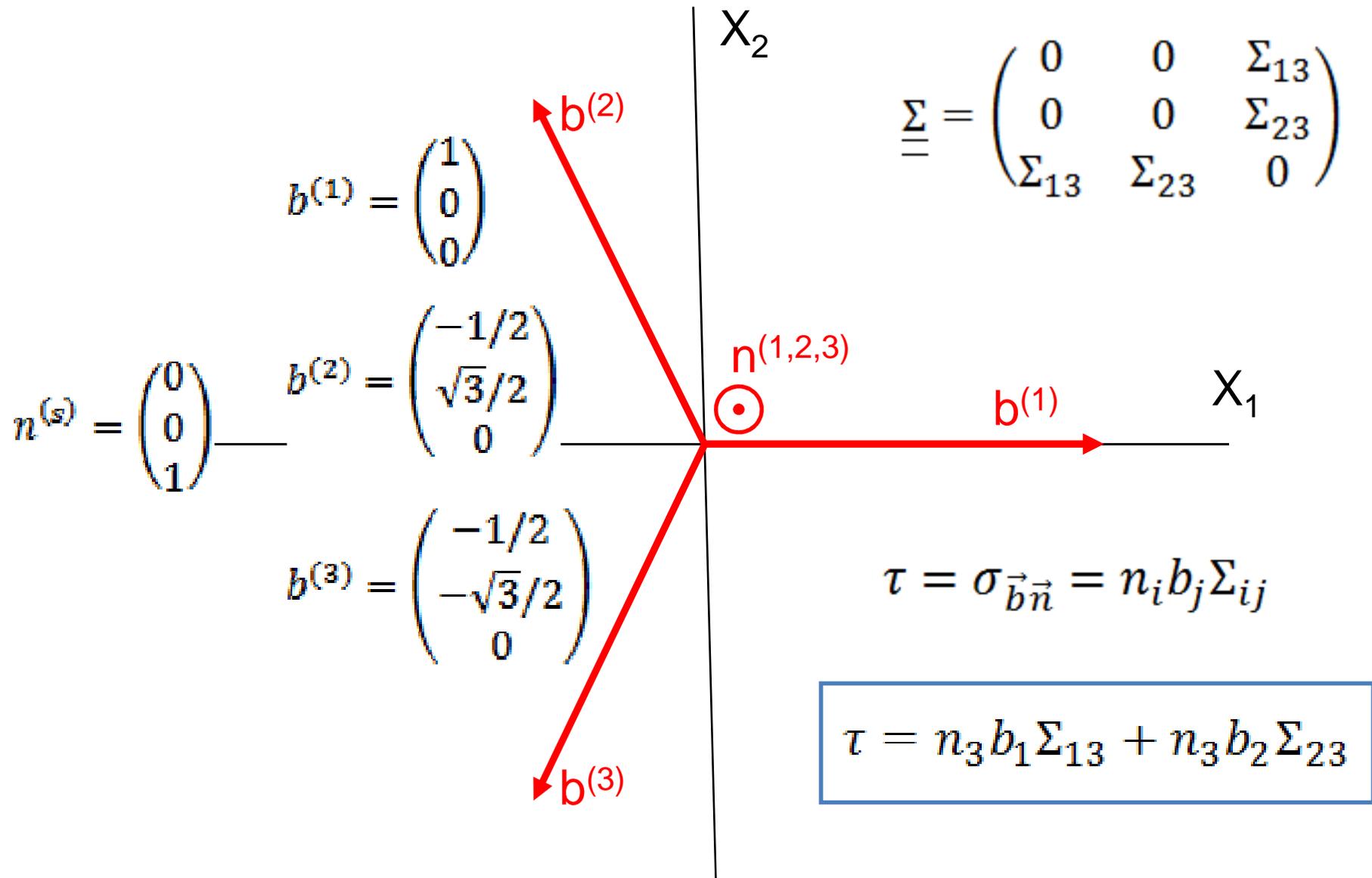
- Exercice d'application :
 - *Monocristal de structure hexagonale*
 - *Glissement restreint au plan basal*
 - *1 seul plan de glissement*
 - *3 directions de glissement*
 - *On applique une cission dans le plan basal*



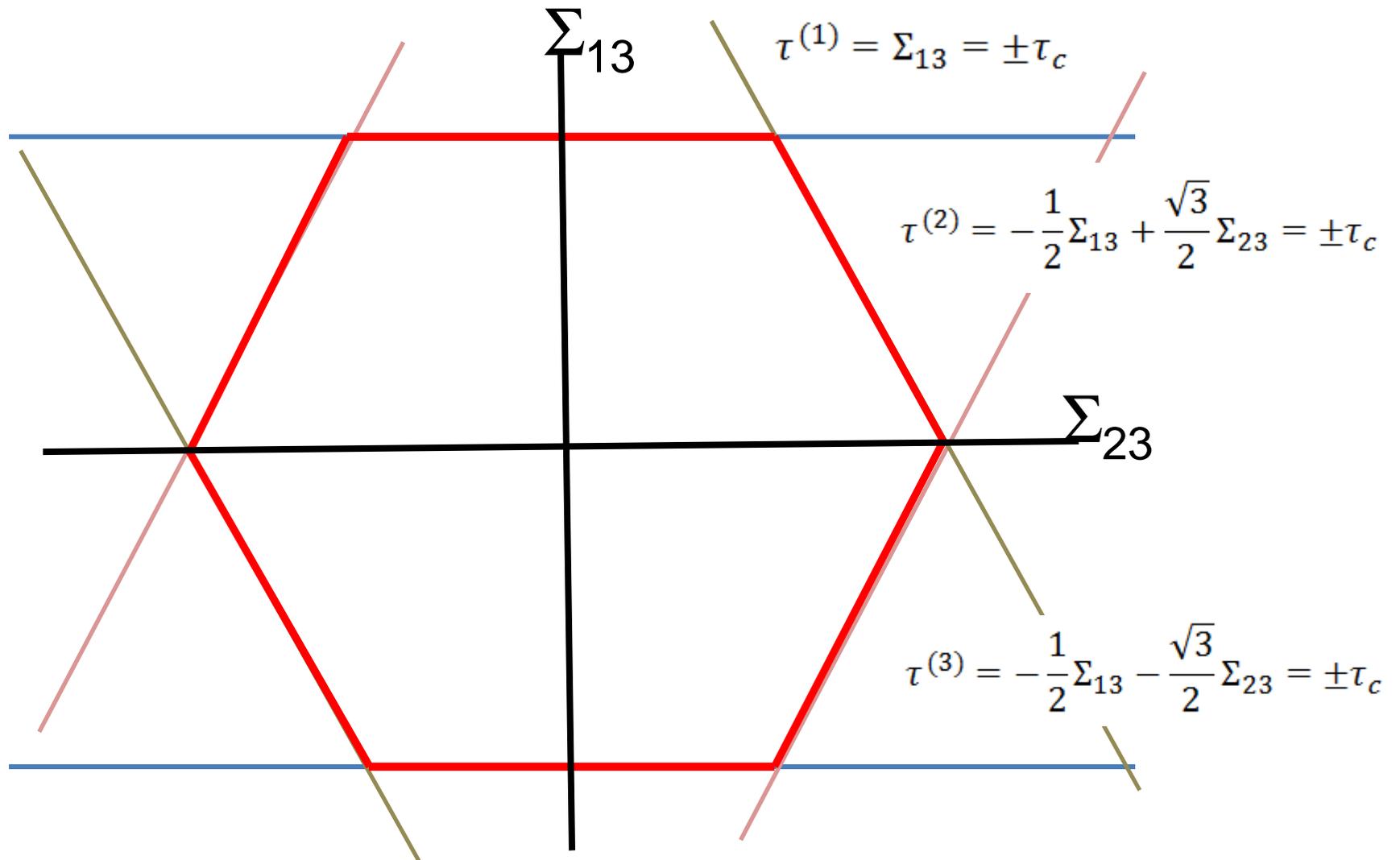
$$\underline{\underline{\Sigma}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \Sigma_{13} \\ 0 & 0 & \Sigma_{23} \\ \Sigma_{13} & \Sigma_{23} & 0 \end{pmatrix}$$

- Ecrire la normal au plan de glissement et les 3 directions de glissement dans le repère macro {1,2,3}
- Ecrire la cission résolue sur chacun des 3 systèmes de glissement (prendre en compte les deux sens possibles de glissement)
- En déduire la surface de plasticité dans le plan $\{\Sigma_{13}, \Sigma_{23}\}$ et positionner la déformation plastique induite

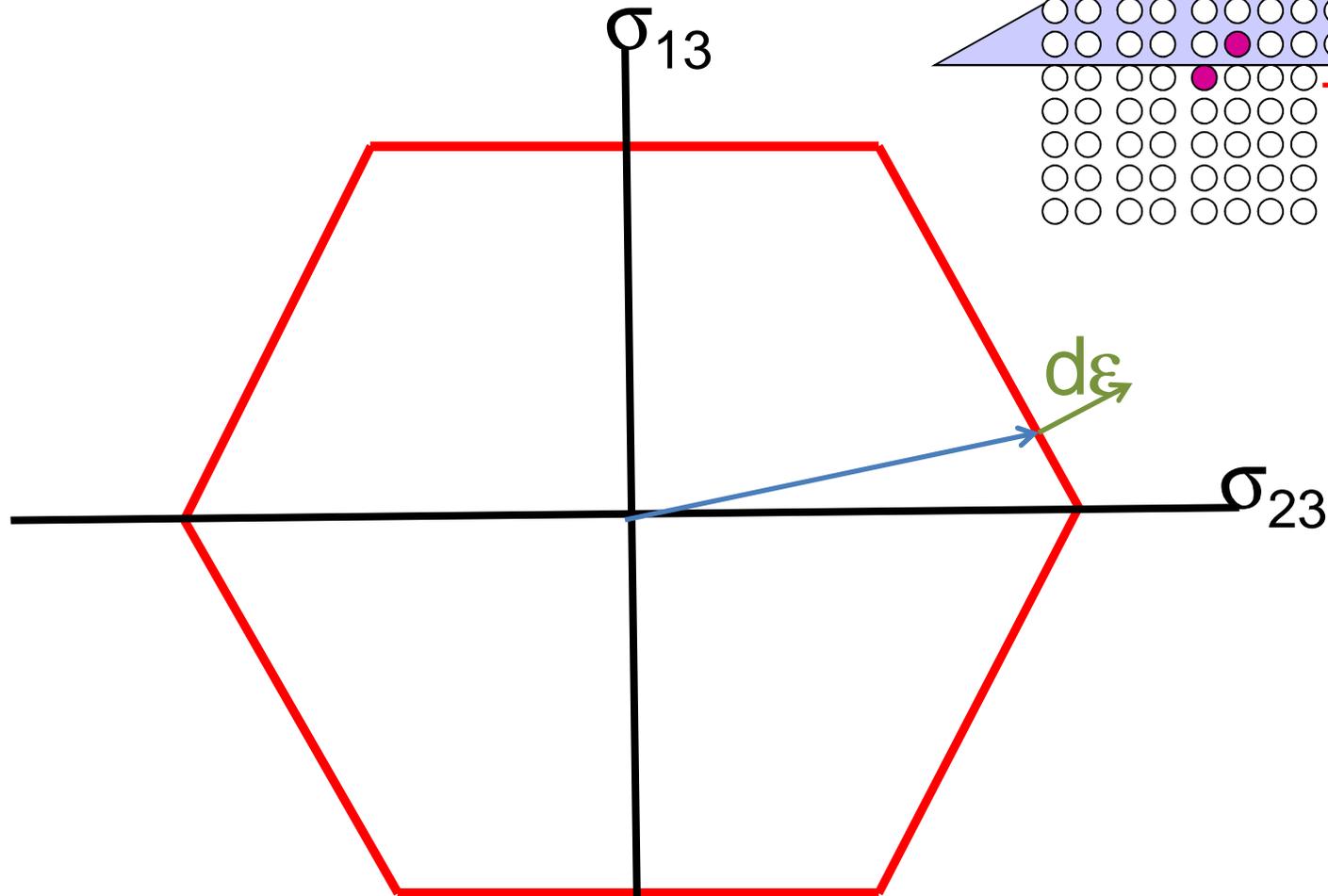
Critère de plasticité monocristal



Critère de plasticité monocristal



Critère de plasticité monocristal



$$\tau^{(s)} \leq \tau_c^{(s)} \quad d\beta_{ij}^{(s)} = n_i^{(s)} b_j^{(s)} d\gamma^{(s)}$$

$$d\varepsilon_{ij}^{(s)} = \frac{1}{2} \left(n_i^{(s)} b_j^{(s)} + n_j^{(s)} b_i^{(s)} \right) d\gamma^{(s)}$$

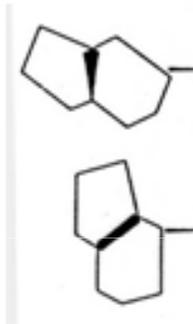
Critère de plasticité : du mono au polycristal



Critère de plasticité : du mono au polycristal

Sachs or static model

$$\underline{\underline{\sigma}}^{grain} = \underline{\underline{\sigma}}^{app}$$



→ Tresca criterion

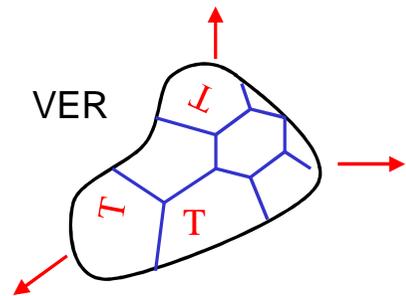
Taylor model

$$\underline{\underline{\varepsilon}}^{grain} = \underline{\underline{\varepsilon}}^{app}$$

$$\underline{\underline{\sigma}}^{macro} = \frac{1}{V} \int_V \underline{\underline{\sigma}}^{grain} dV$$

→ texture

Critère de plasticité polycristal



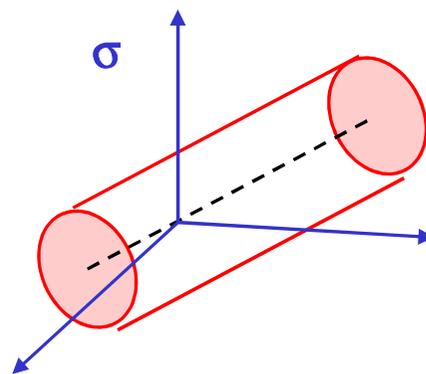
- $V = \text{cste}$ → indépendance de σ_m
- ∇ repère → invariants du déviateur J_i
- Symétrique en $\underline{\underline{\sigma}}$ → fonction paire

Critère de plasticité

$$\Rightarrow \underline{\underline{\sigma}} = \sigma_m \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{s}}$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{J_2(\underline{\underline{s}})}$$



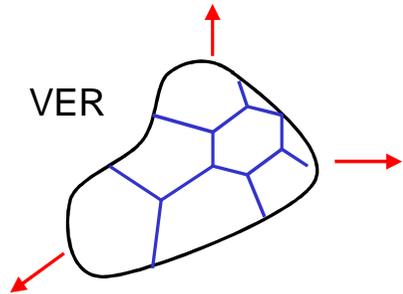
Von Mises :

$$\boxed{\sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} - R = 0}$$

2eme invariant de s

Énergie de distorsion élastique

Critère de plasticité polycristal

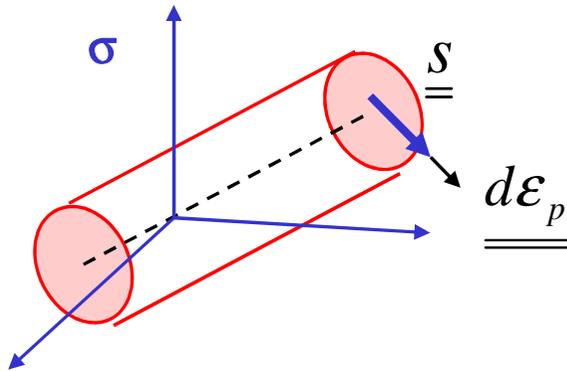


densité de dislocations
 $10^5 \rightarrow 10^{12} \text{ cm/cm}^3$
 \Rightarrow **écrouissage**

- $V = \text{cste} \rightarrow d\varepsilon_{p11} + d\varepsilon_{p22} + d\varepsilon_{p33} = 0$
 - travail plastique maximal : $dW_p = \sigma : d\varepsilon_p$
- $\rightarrow d\varepsilon_p$ a pour directions celles du déviateur s
 \rightarrow proportionnalité entre $d\varepsilon_{ijp}$ et s_{ij}

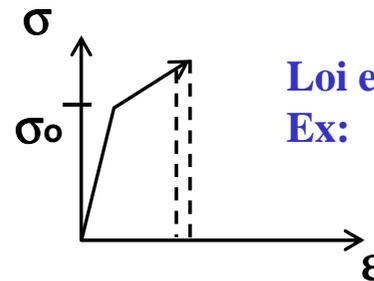
Travail du déviateur s

$$\underline{\underline{\sigma}} = \sigma_m \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{s}}$$



Loi d'écoulement plastique :

$$\frac{d\varepsilon_{pij}}{s_{ij}} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}}$$

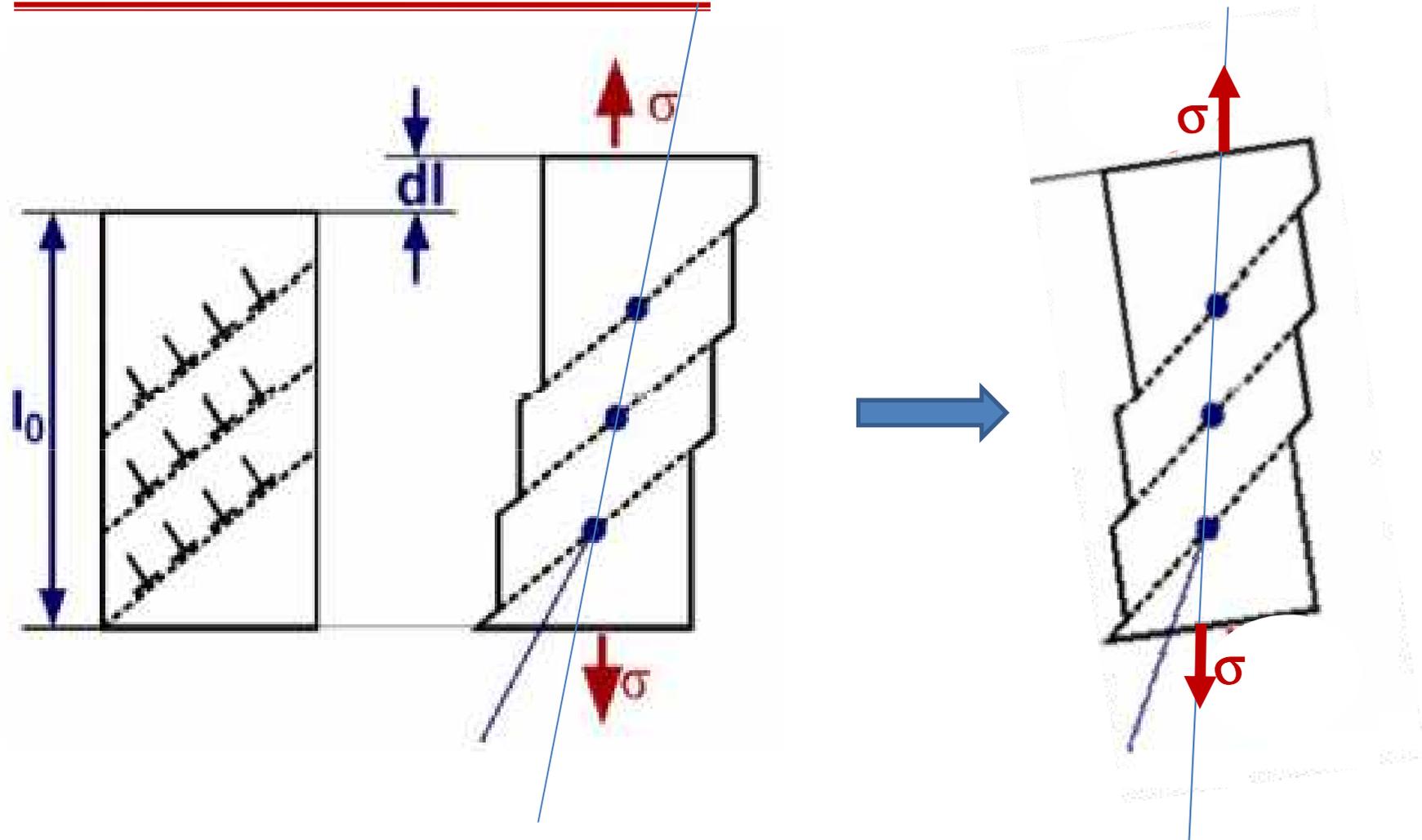


Loi expérimentale en traction

Ex:

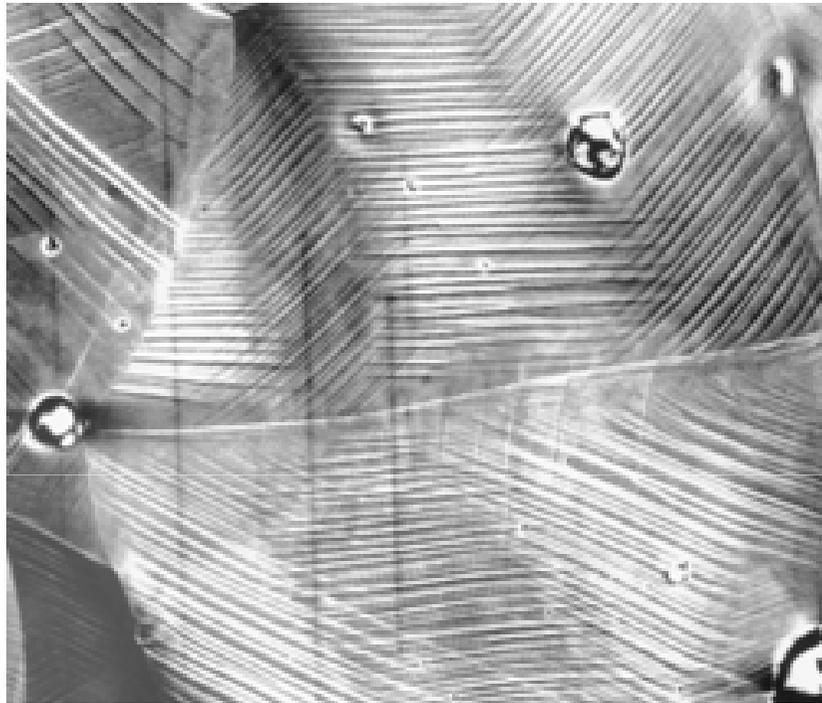
$$\sigma_{eq} = \sigma_0 + k\varepsilon_{peq}^n$$

Ecrouissage

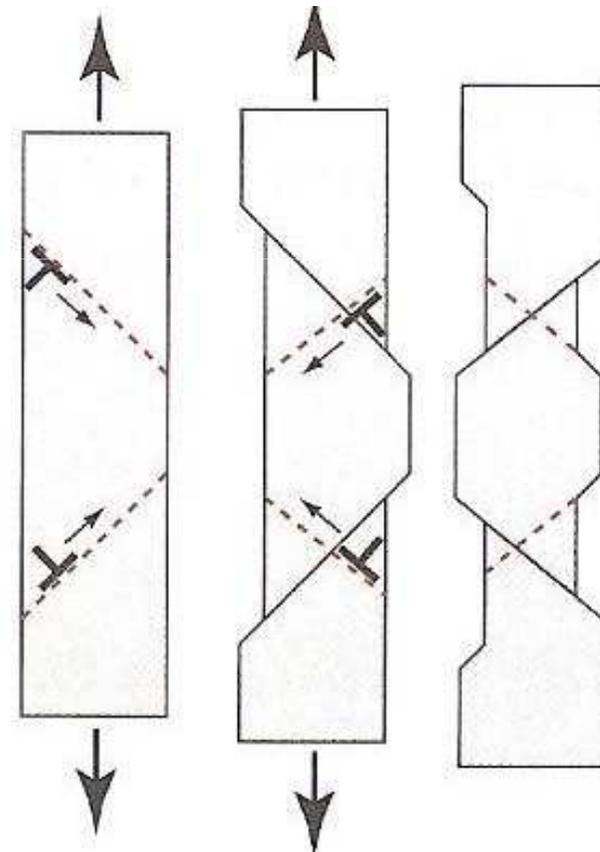
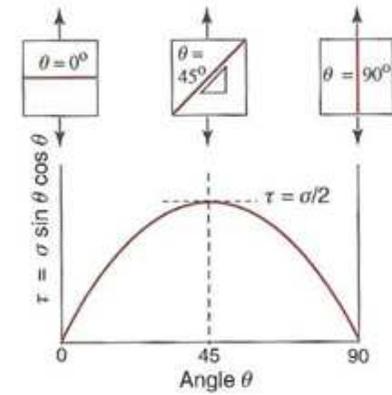


Glissement dislocations \rightarrow rotation cristalline \rightarrow diminution facteur Schmid

Ecrouissage



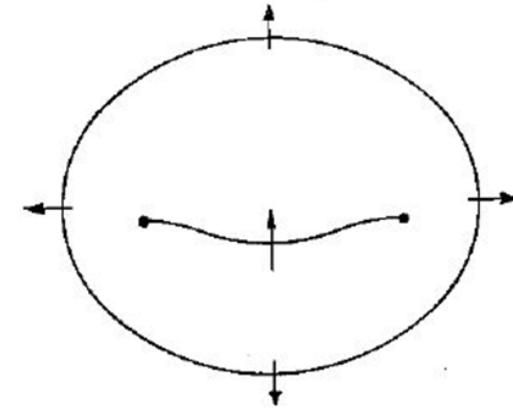
Surface de cuivre déformé



Ecrouissage

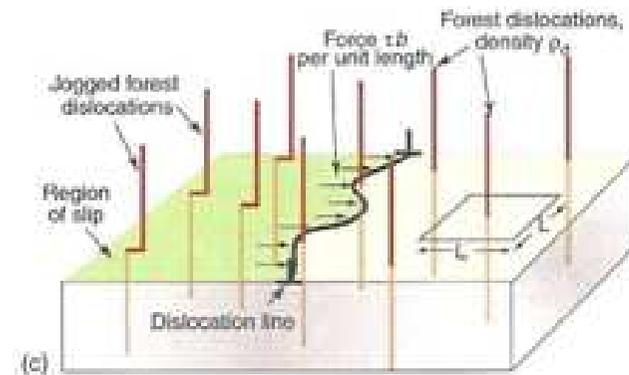
$$\tau_c = \frac{Gb}{L}$$

$$L \approx \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

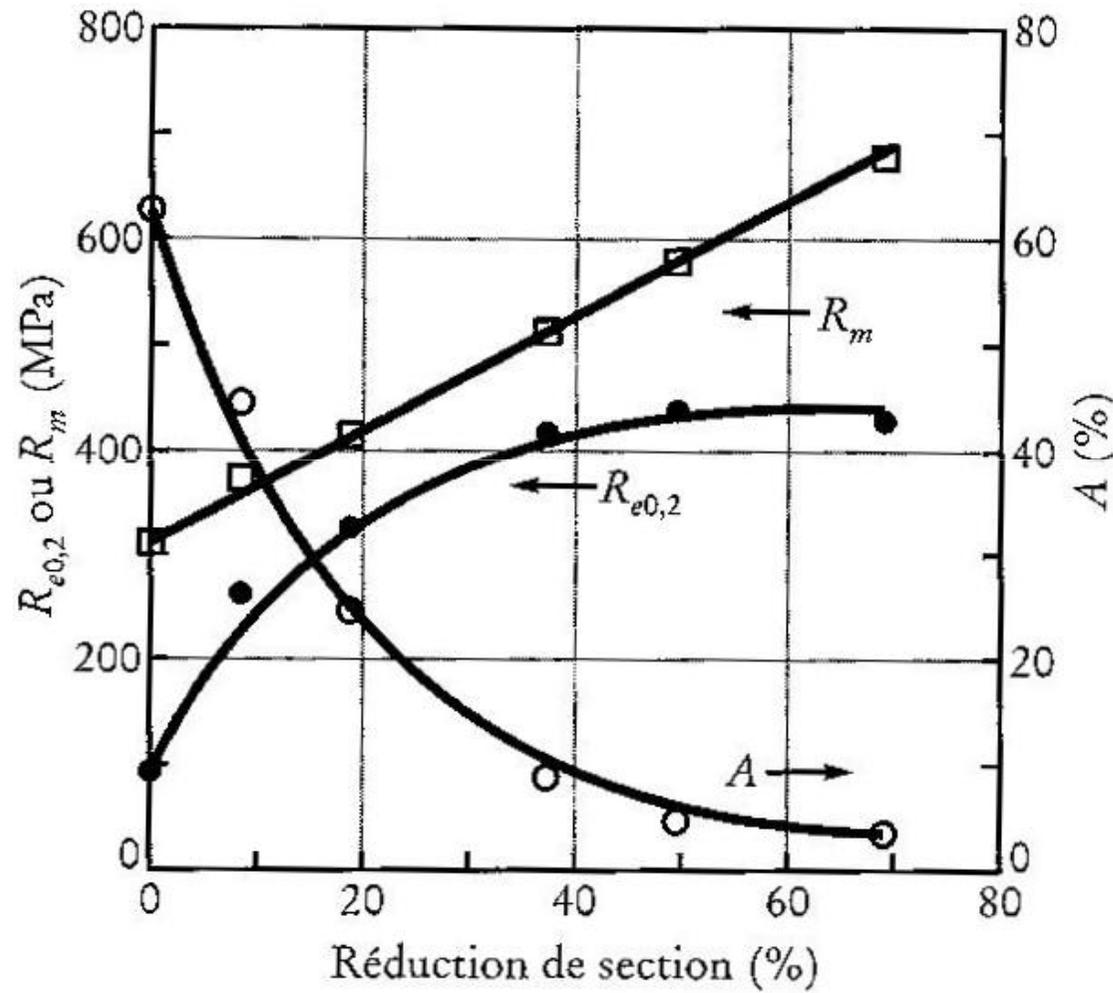


Densité ρ de dislocations augmente de 10^5 à 10^{12} cm/cm²

$$\tau_{\text{écr}} \approx Gb\sqrt{\rho}$$

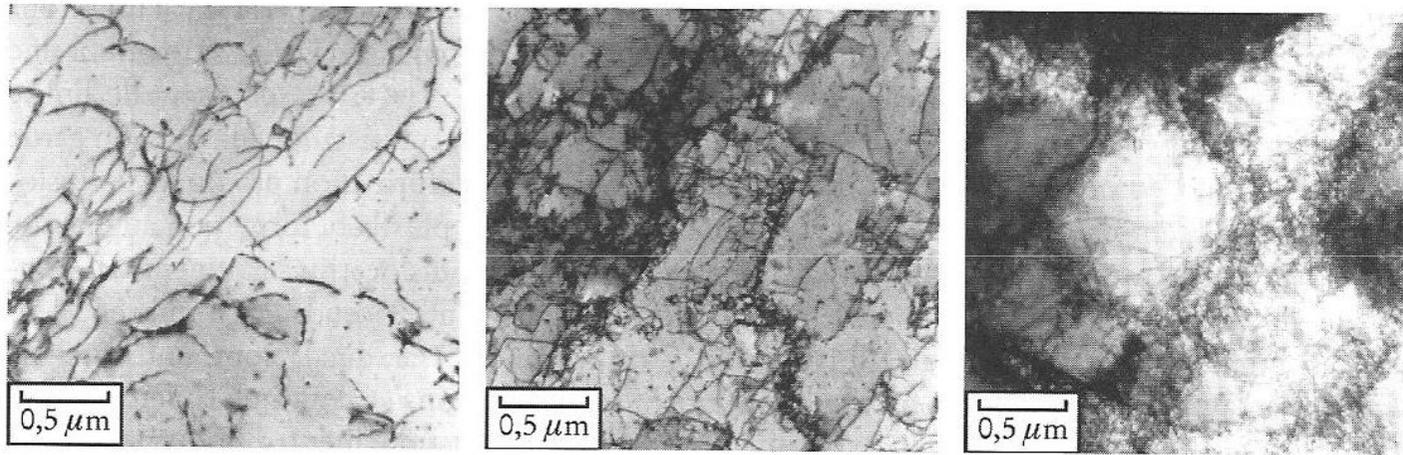


Ecrouissage



Laiton
Cu-35%Zn

Ecrouissage : énergie stockée



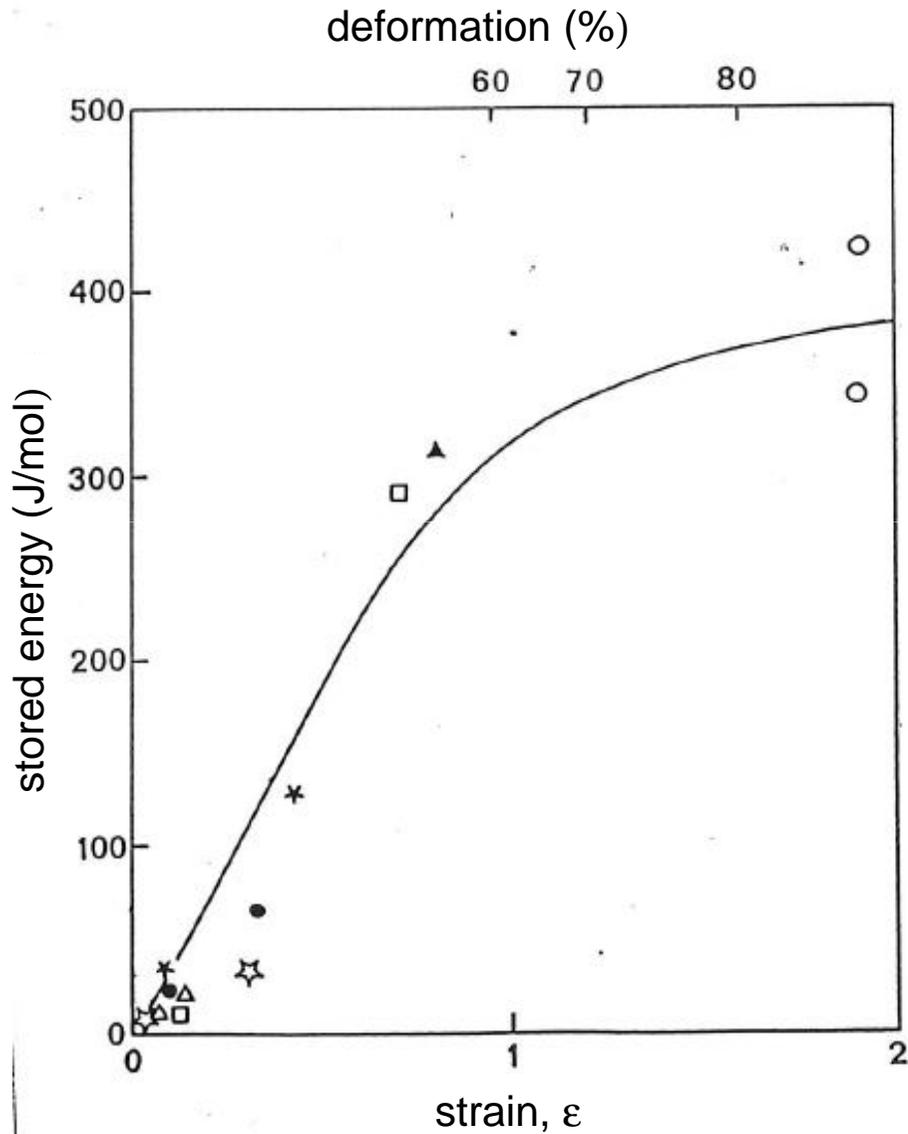
(a)

(b)

(c)

Structures de dislocations dans un acier

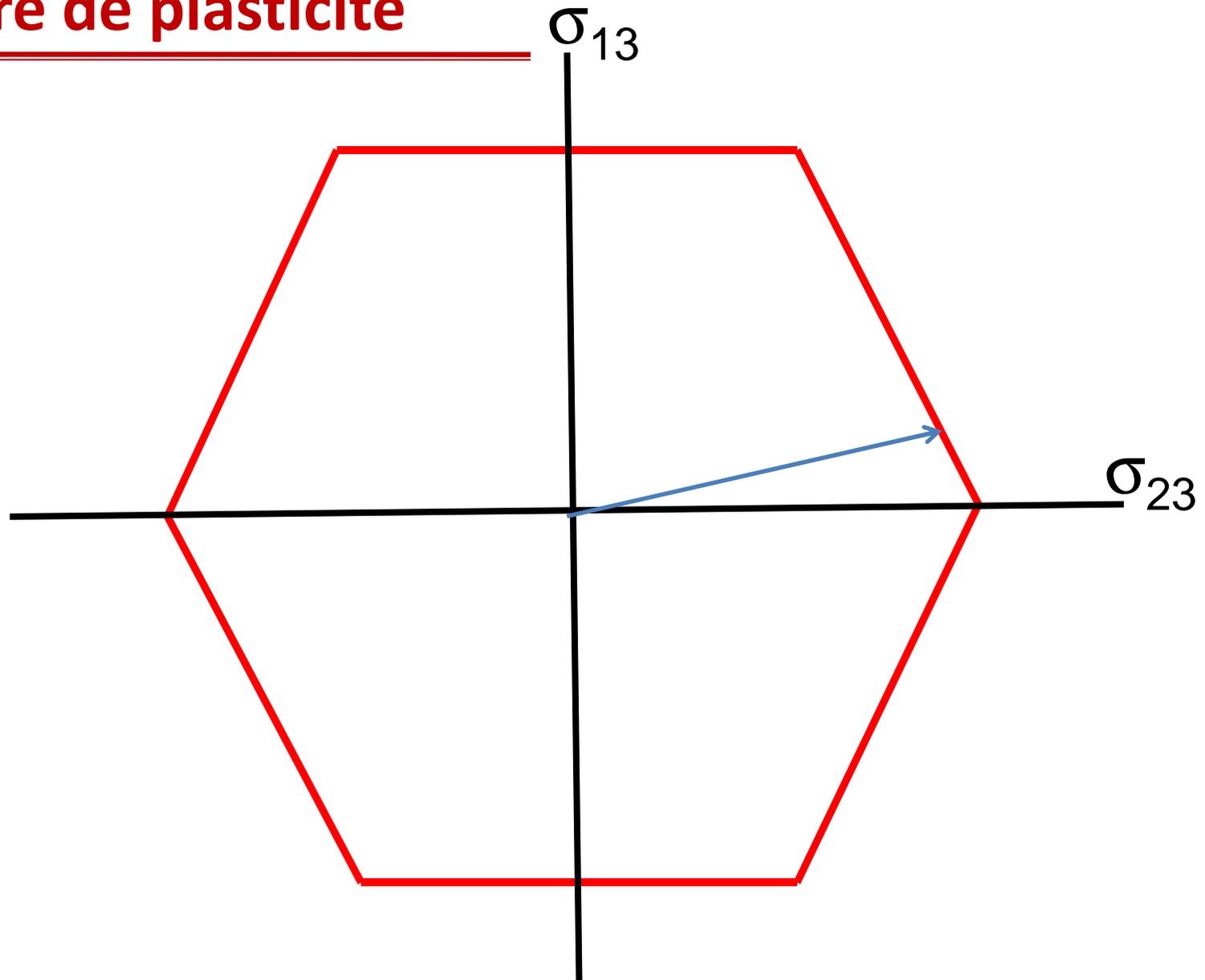
Ecrouissage : énergie stockée



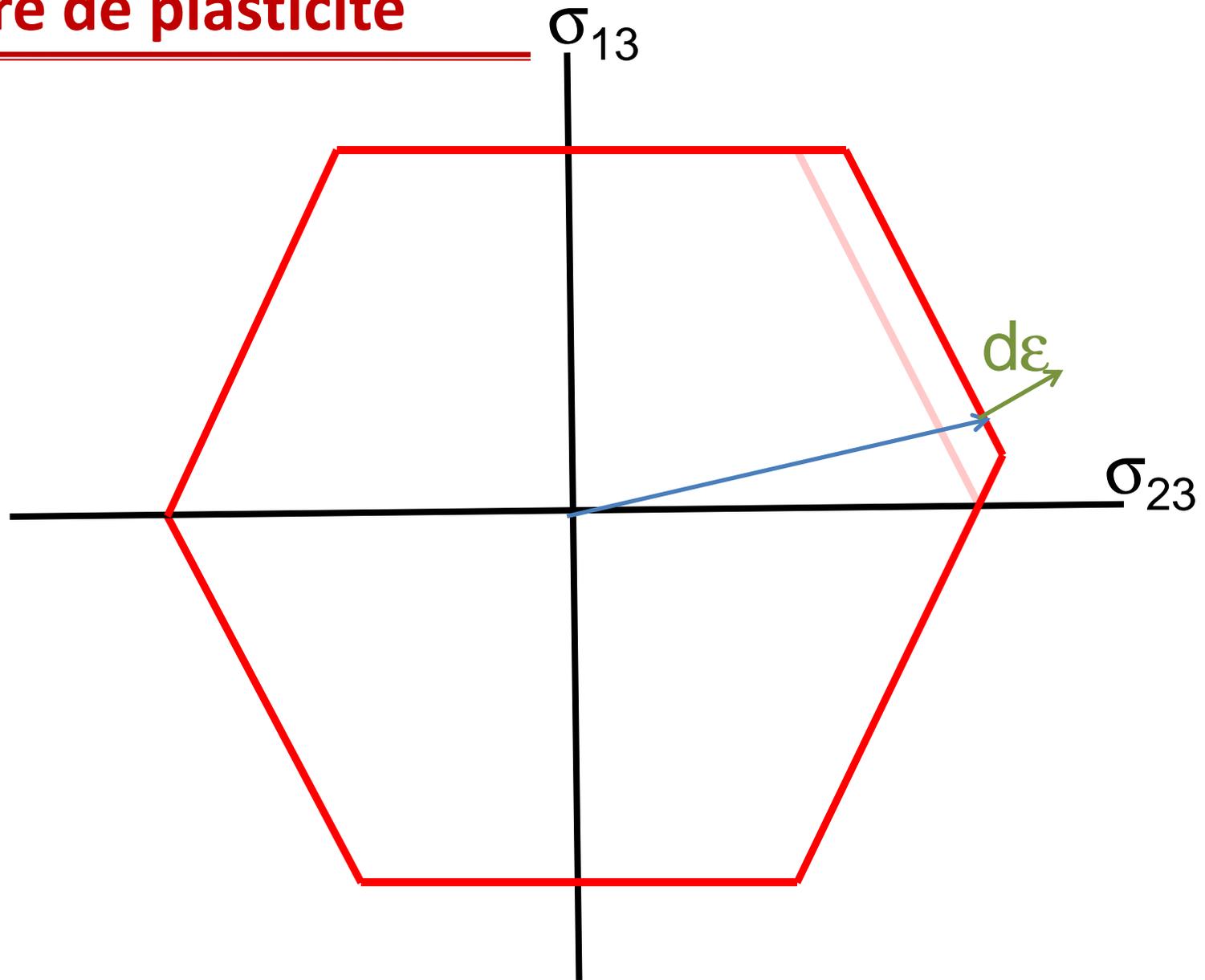
- dislocation production
→ plastic deformation
- dislocation storage
→ stored energy

$$E = Gb^2\rho$$

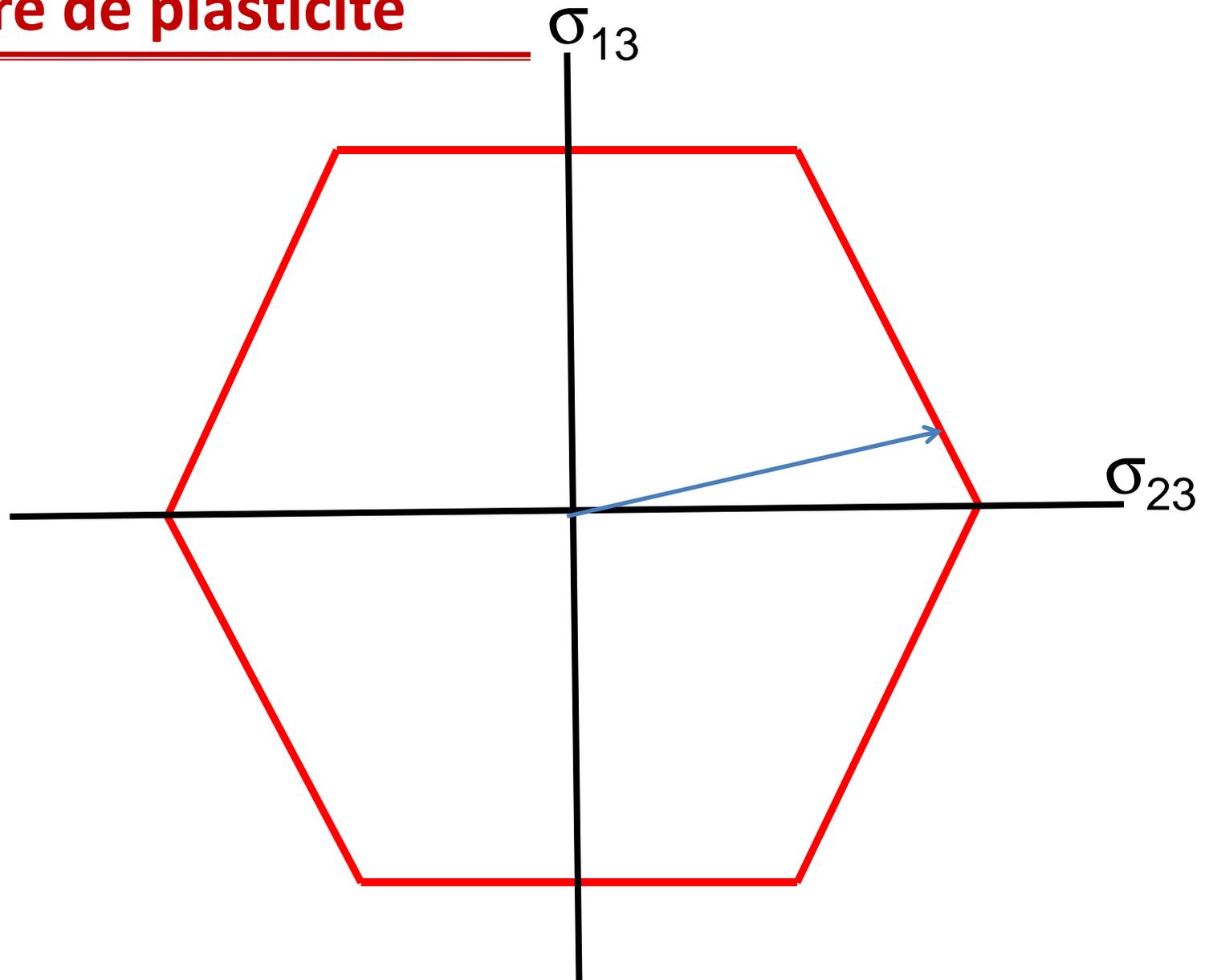
Critère de plasticité



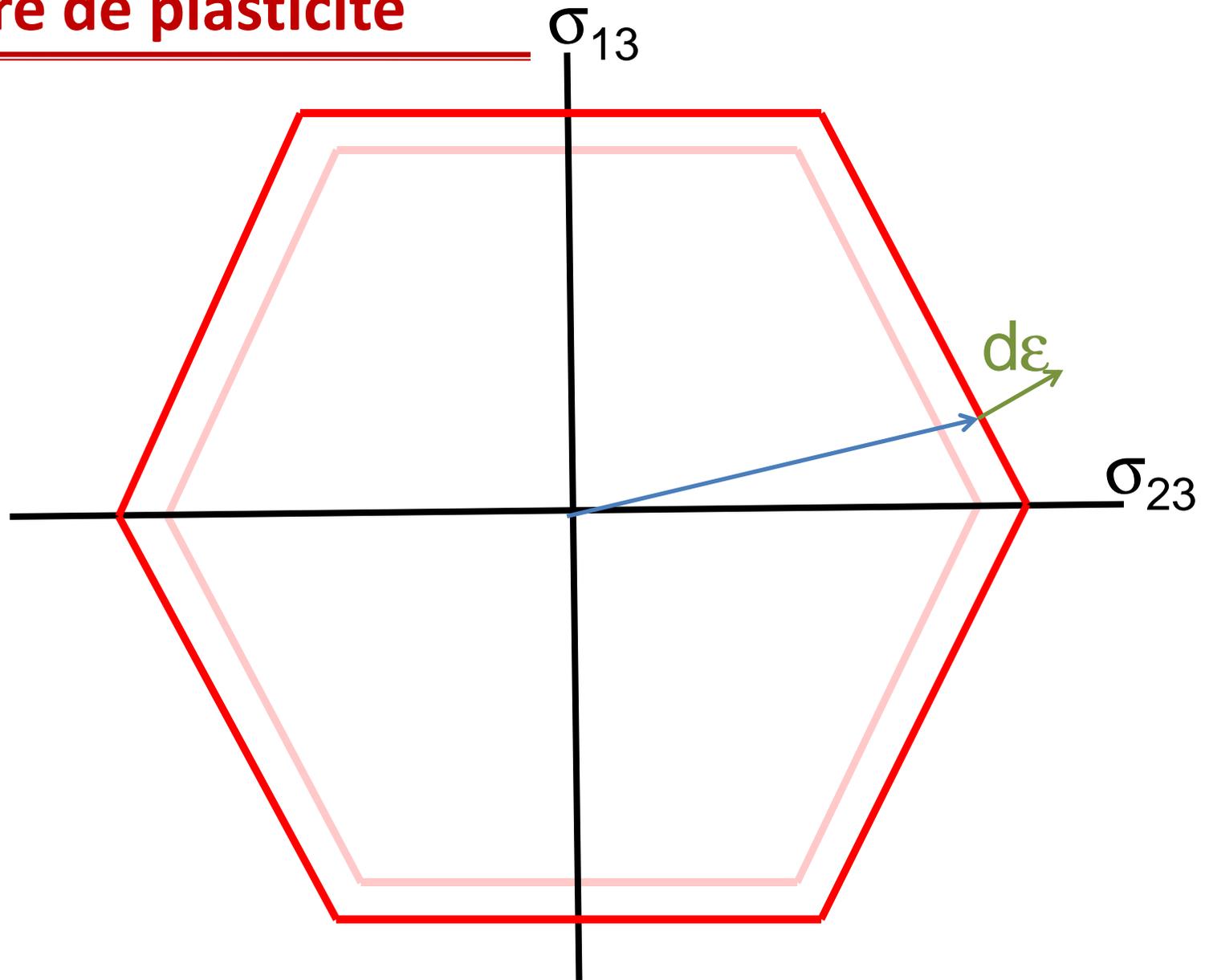
Critère de plasticité



Critère de plasticité

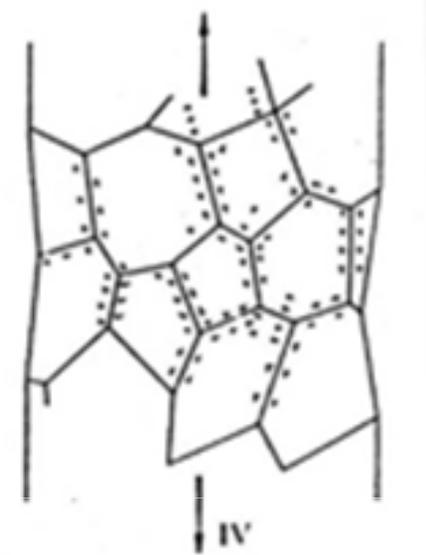
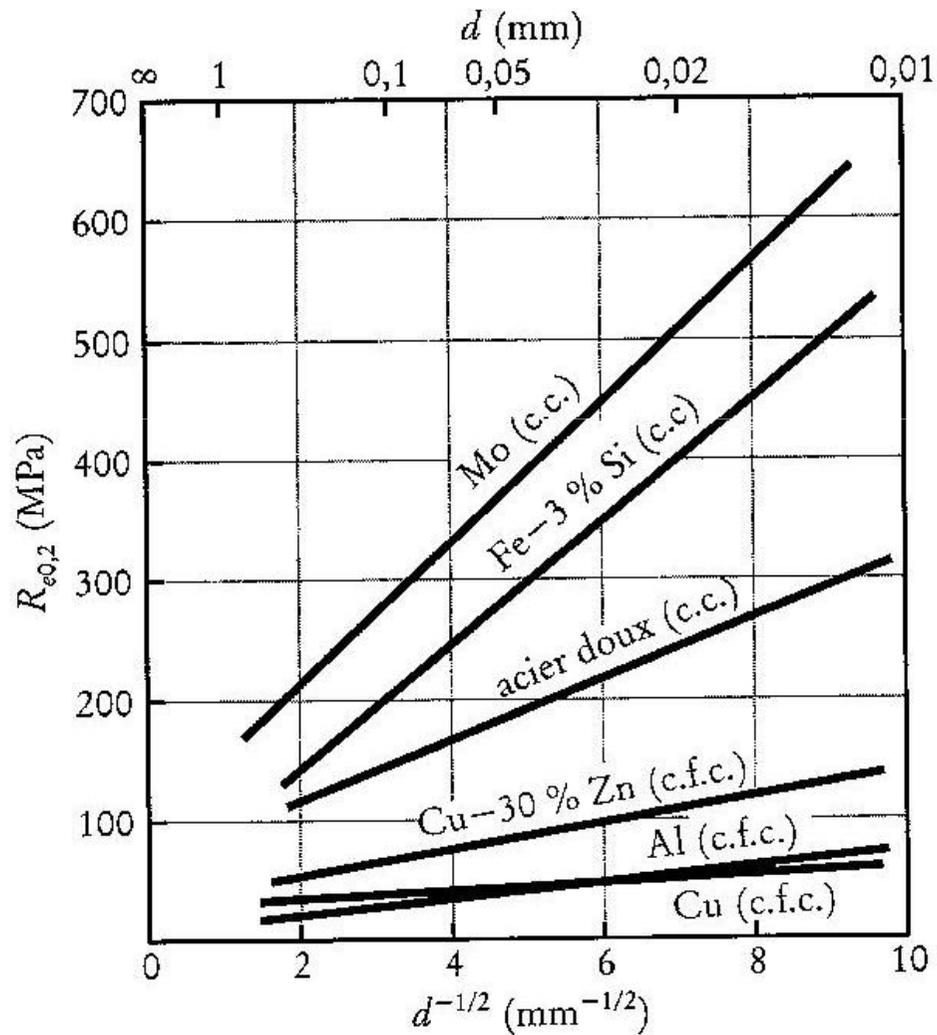


Critère de plasticité



Modes de durcissement

Effet de la taille des grains

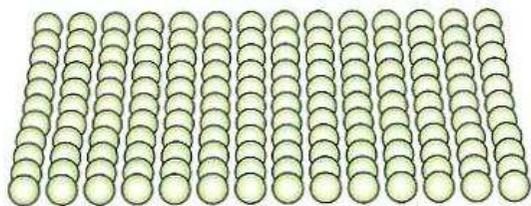


Loi de Hall-Petch :

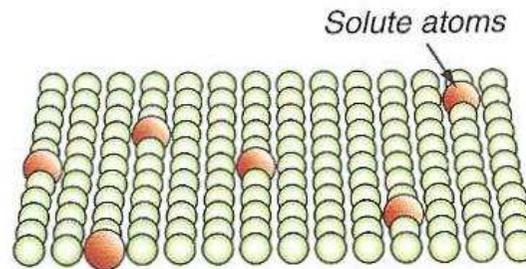
$$\tau_{jdg} \propto d^{-1/2}$$

Modes de durcissement

Effet de solution solide

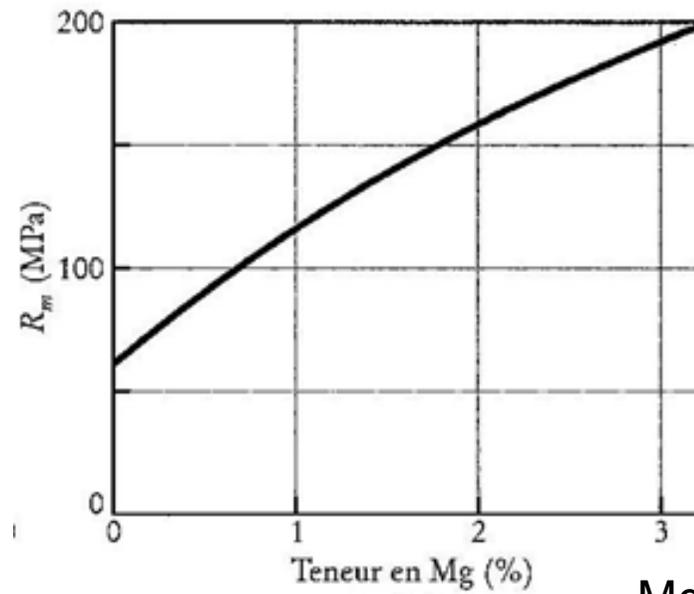


(a) Perfect lattice, resistance f_i



(b) Solution hardening, resistance f_{ss}

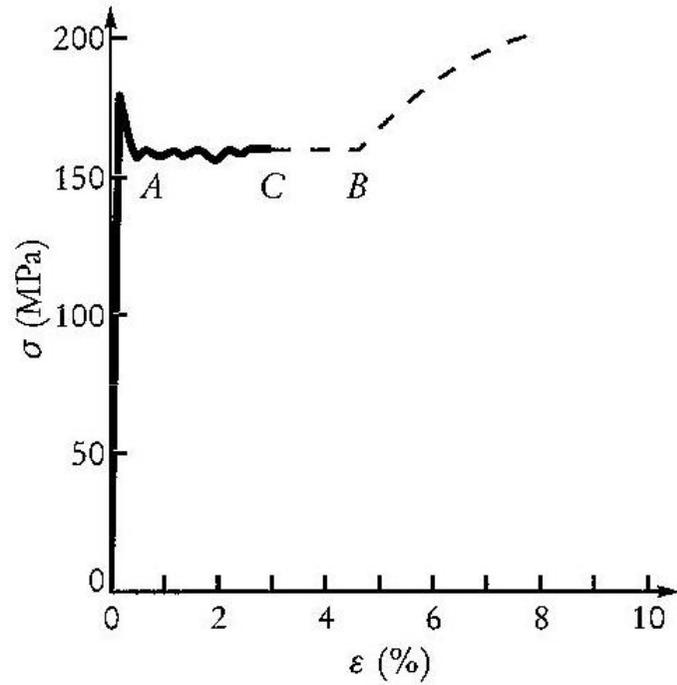
$$\tau_{sol} \propto [X]^{1/2}$$



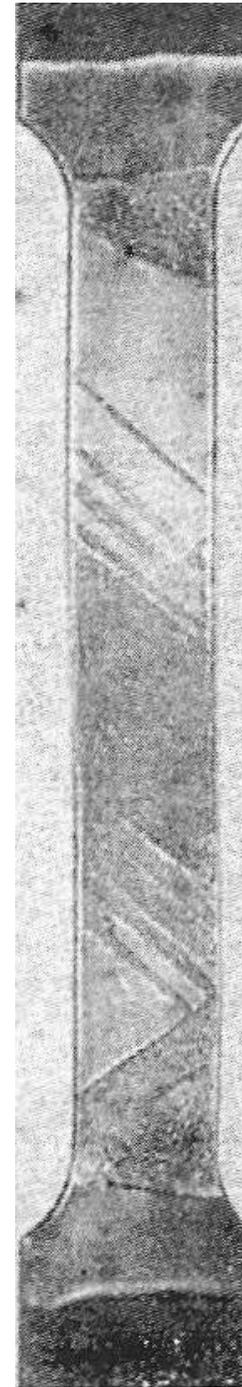
Mg dans Al

Modes de durcissement

Effet de solution solide



Phénomène de Lüders



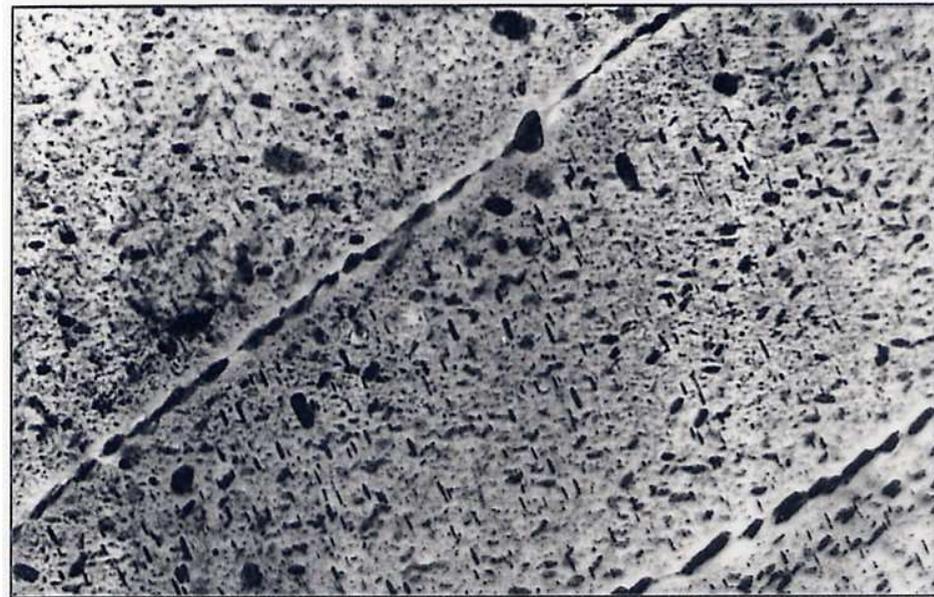
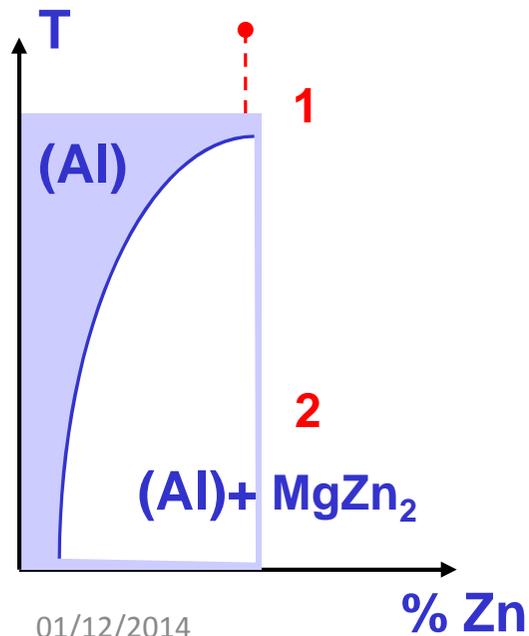
Modes de durcissement

Effet des précipités

Alliages à hautes performances:
microstructure optimisée

Précipités très fins:
obstacles au mouvement
des dislocations

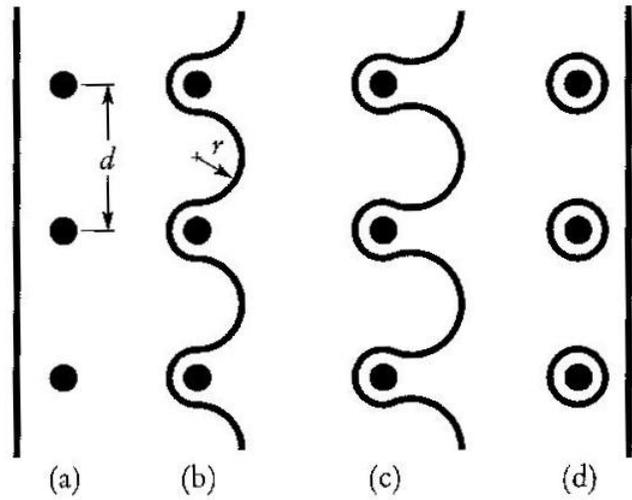
=> limite d'élasticité
élevée



Alliage Al_Zn_Cu_Mg durci
par précipités MgZn₂

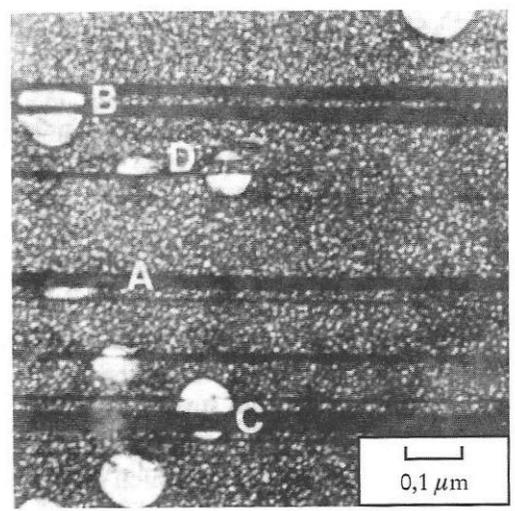
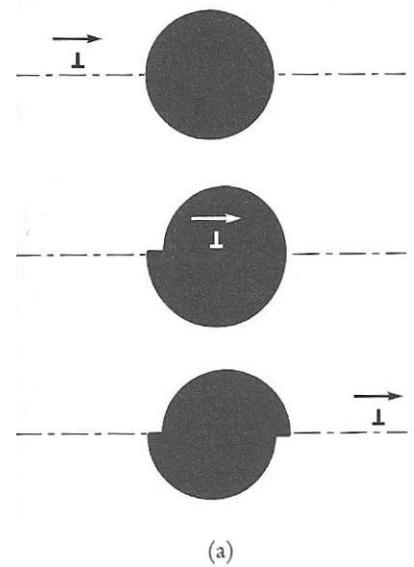
Modes de durcissement

Effet des précipités



$$\tau_{\text{ptés}} \propto 1/d$$

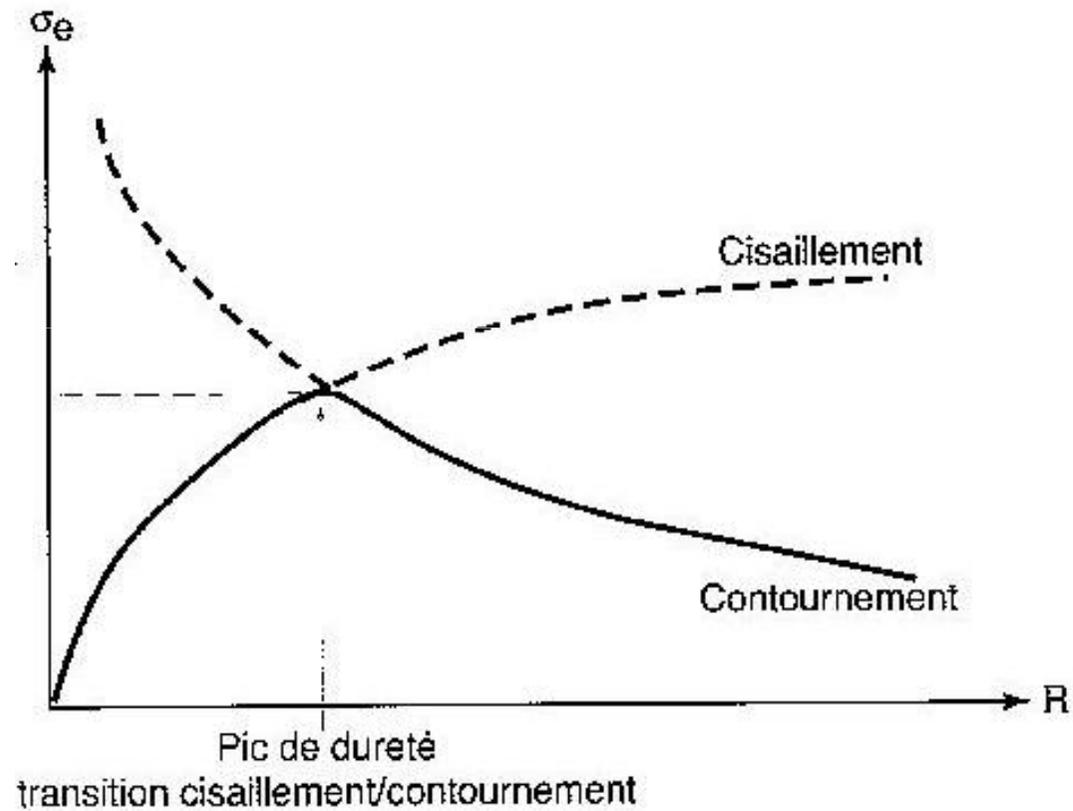
$$\tau_{\text{ptés}} \approx \sqrt{fvr}$$



Modes de durcissement

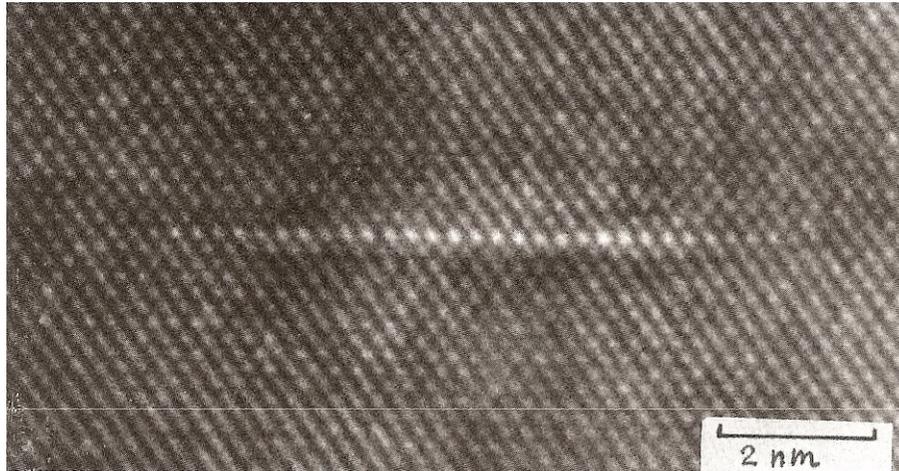
Effet des précipités

Evolution de $\tau_{ptés}$
pour f_v cste



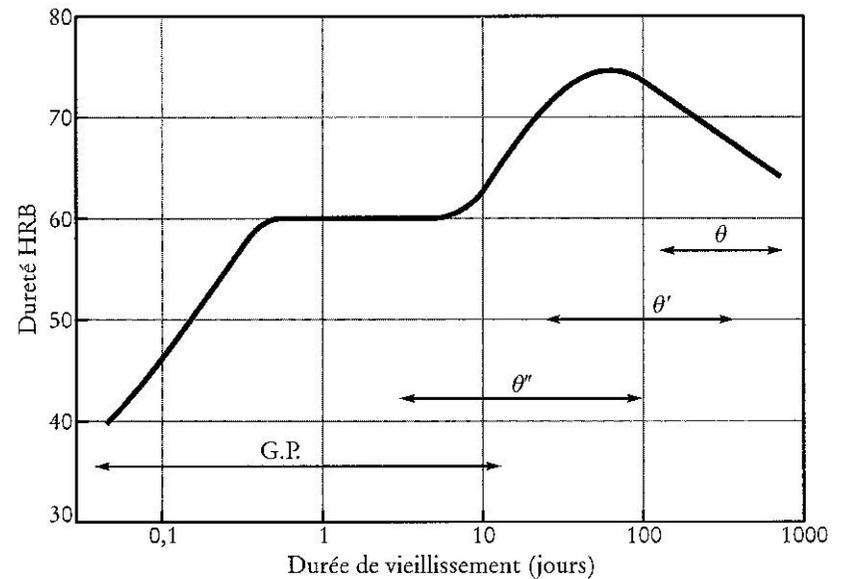
Modes de durcissement

Effet des précipités



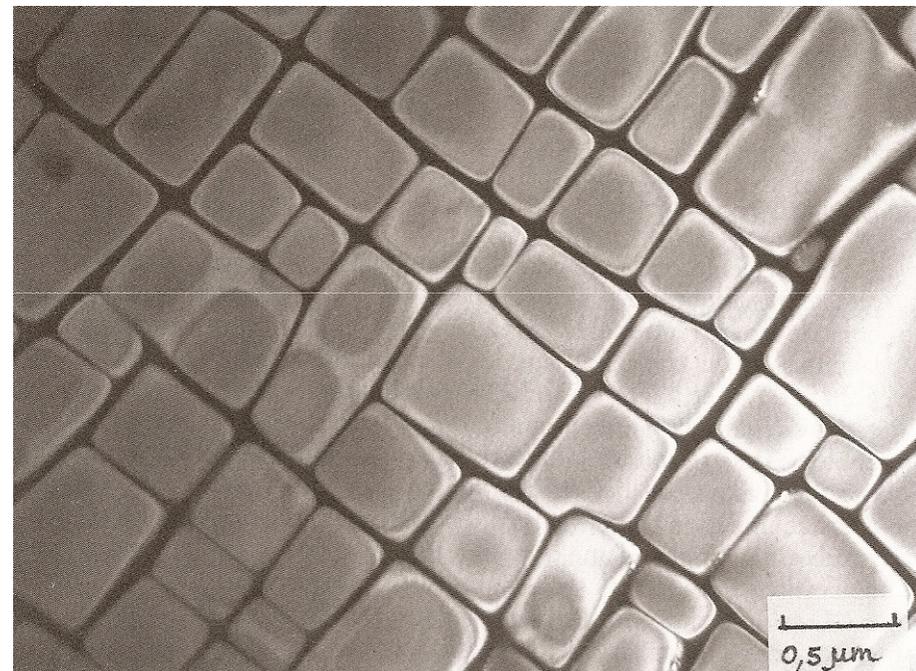
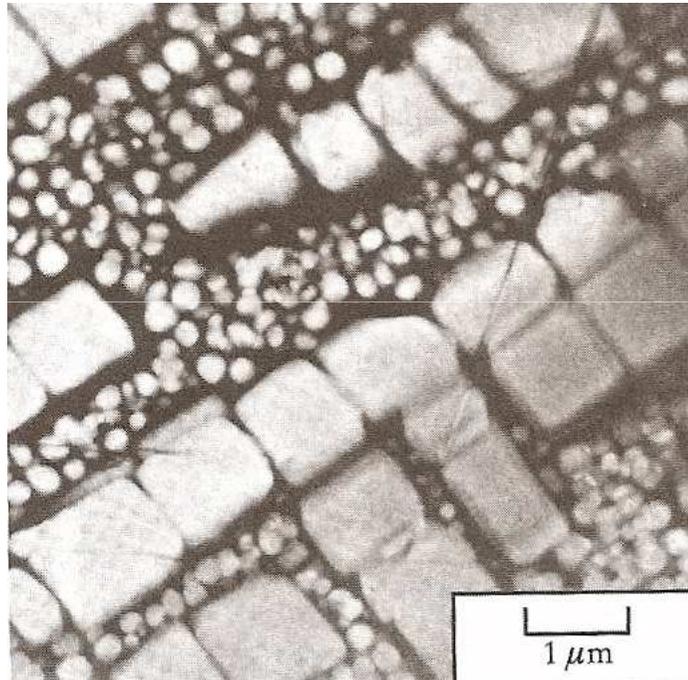
Zone de Guinier-Preston –
Al-1,7%Cu 10h à 100°C

Alliage Al-
4,5%Cu trempé
depuis 550°C



Modes de durcissement

Effet des précipités

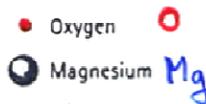
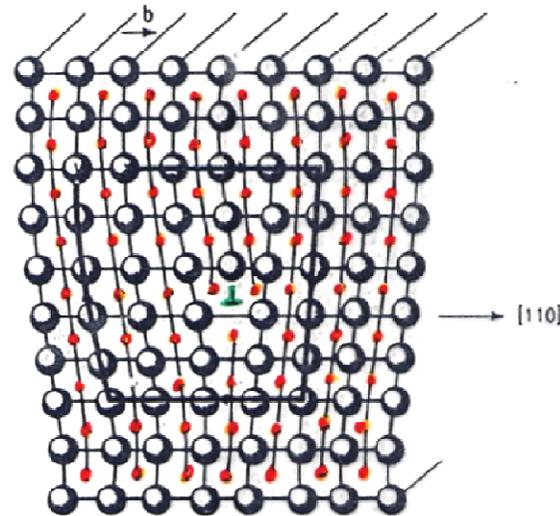
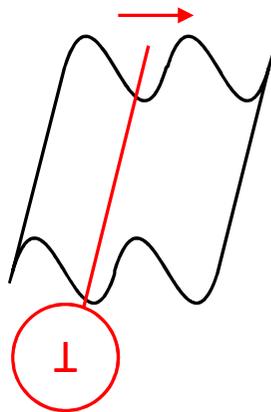


Ni_3Al dans superalliage Ni

Cas des céramiques

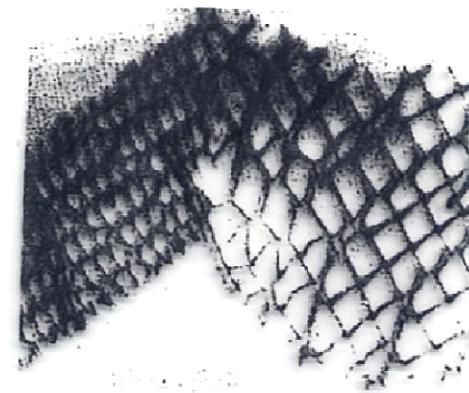
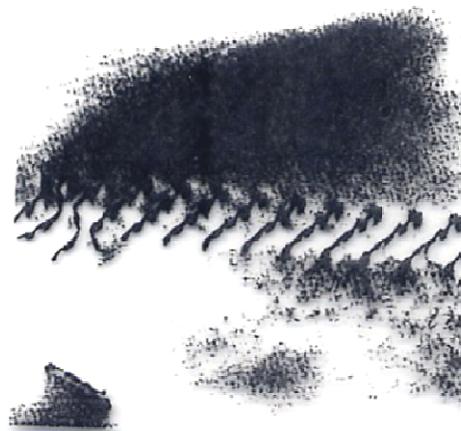
Dislocations peu mobiles

=> fragilité

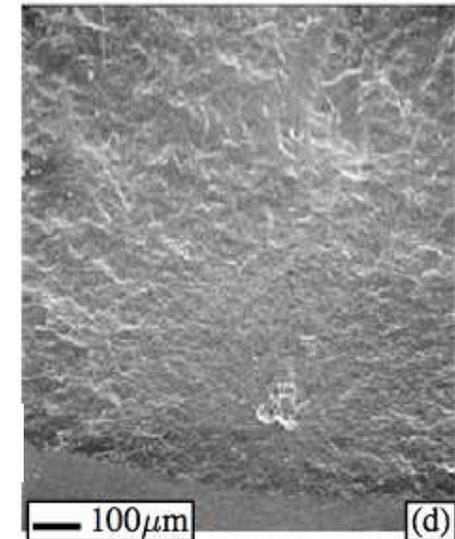
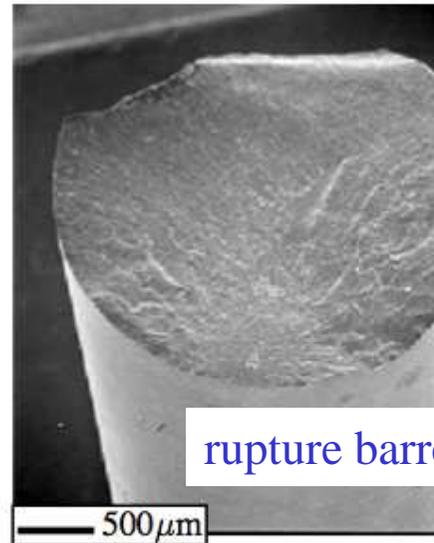
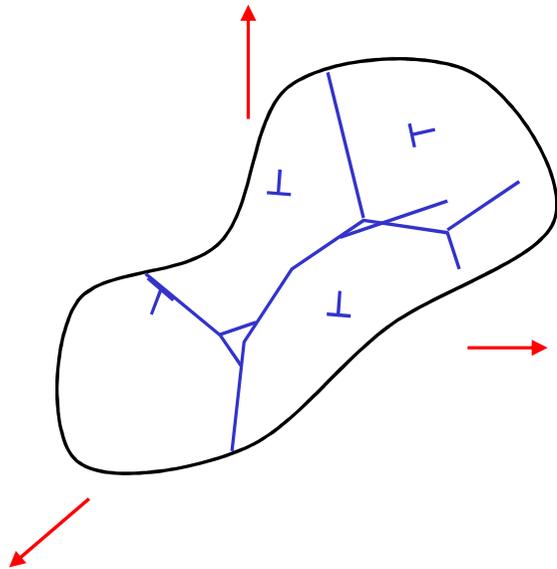


Dislocation dans MgO
 cœur complexe, barrière d'énergie élevée, rupture avant glissement

Figure 4.6
 An edge dislocation in MgO showing the slip direction and Burgers vector (for Example 4.1). (Adapted from W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, Introduction to Ceramics, John Wiley, 1976.)



Cas des céramiques



- dislocations non mobiles → fragilité
- μdéfauts a_i → propagation si σ_{ouv} suffisante

- ⇒ critère en σ_I (principale max) = σ_c (traction)
- ⇒ $\sigma_c = f(a_i)$ → dispersion et probabilité de rupture
- ⇒ Critère de Weibull $p_{rupture} = f(\sigma_I)$

Cas des polymères

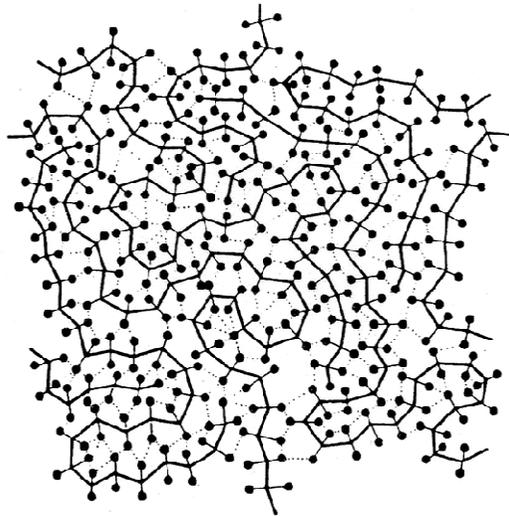


Fig. 23.2. A schematic of a linear-amorphous polymer, showing the secondary bonds (dotted lines). When the polymer is loaded below T_g

- température de transition vitreuse T_g
- comportement caoutchoutique au dessus de T_g , puis fusion

Polymères: température et plasticité des enchevêtrements de chaînes (rupture des liaisons faibles entre chaînes)

- liaisons entre chaînes → élasticité
- effet de T sur la mobilité des chaînes

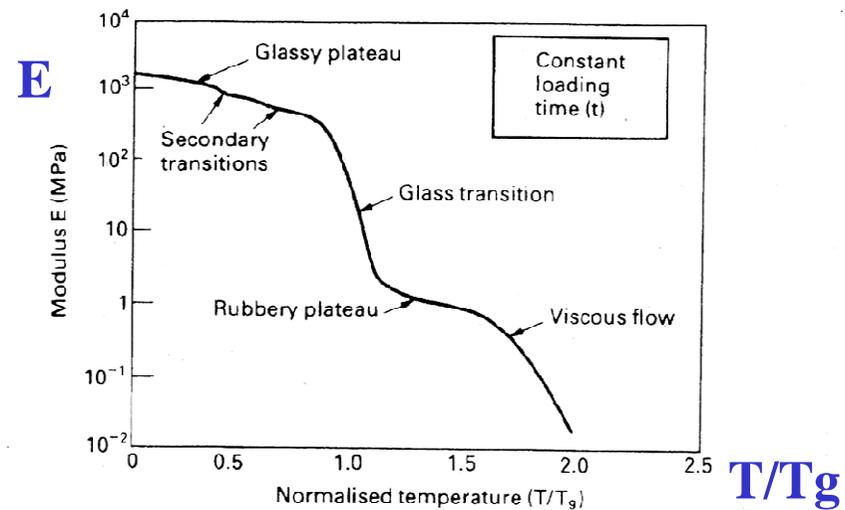


Fig. 23.1. Schematic showing the way in which Young's modulus E for a linear polymer changes with temperature for a fixed loading time.

Cas des polymères

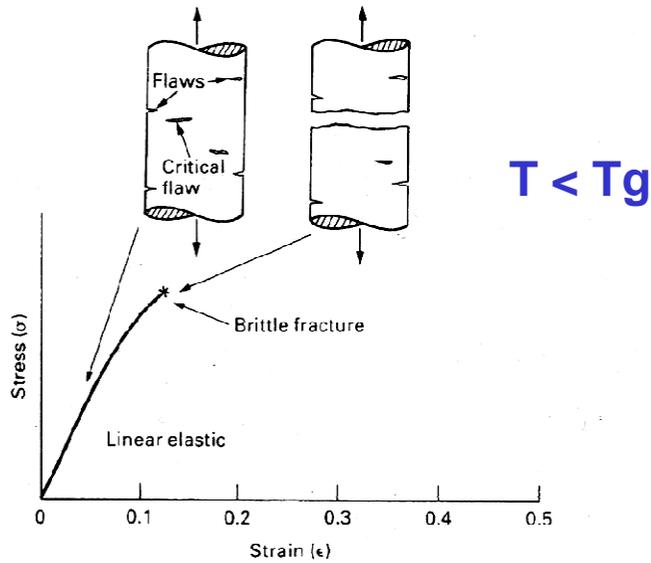


Fig. 23.9. Brittle fracture: the largest crack propagates when the fast-fracture criterion is satisfied.

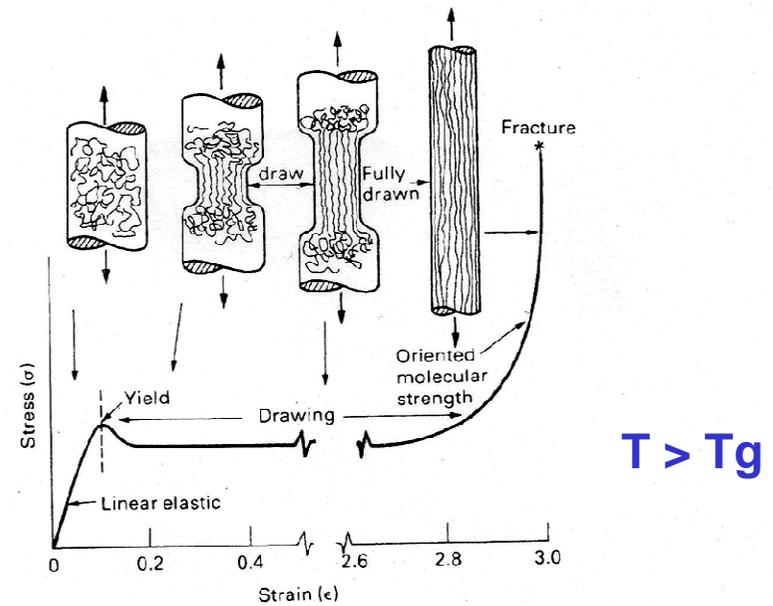
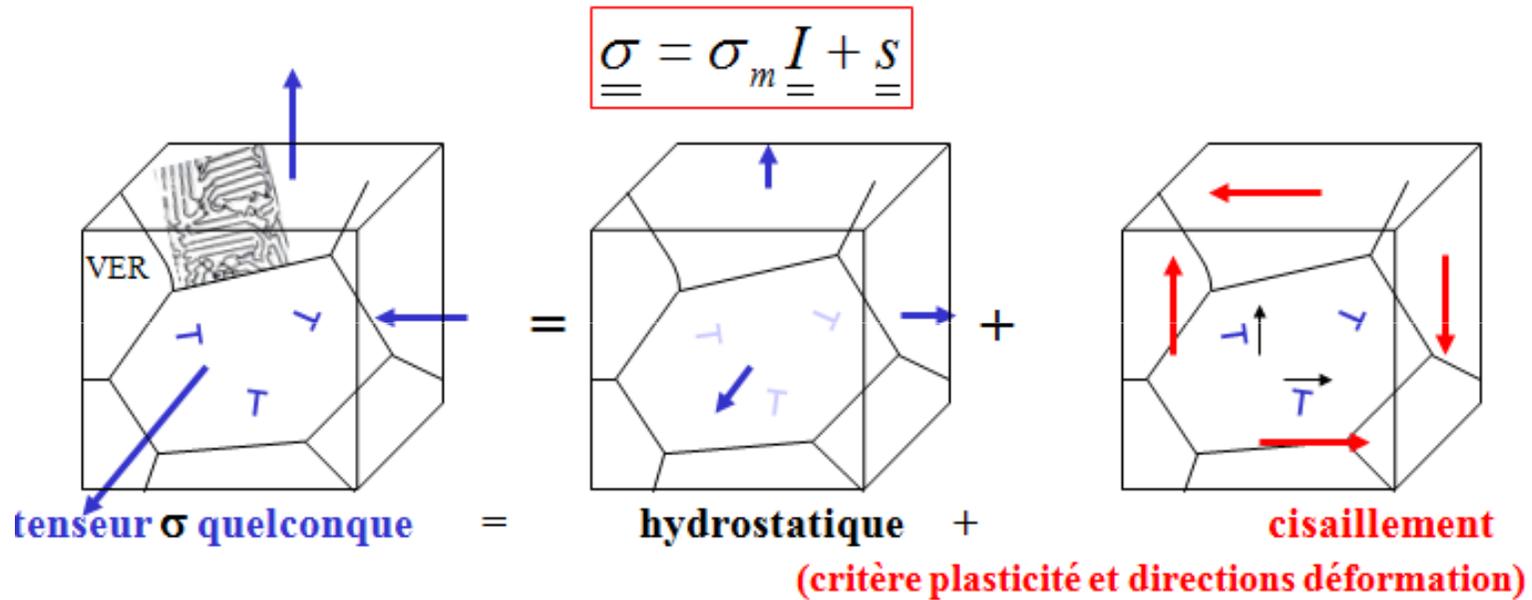


Fig. 23.10. Cold-drawing of a linear polymer: the molecules are drawn out and aligned giving, after a draw ratio of about 4, a material which is much stronger in the draw direction than it was before.

Synthèse

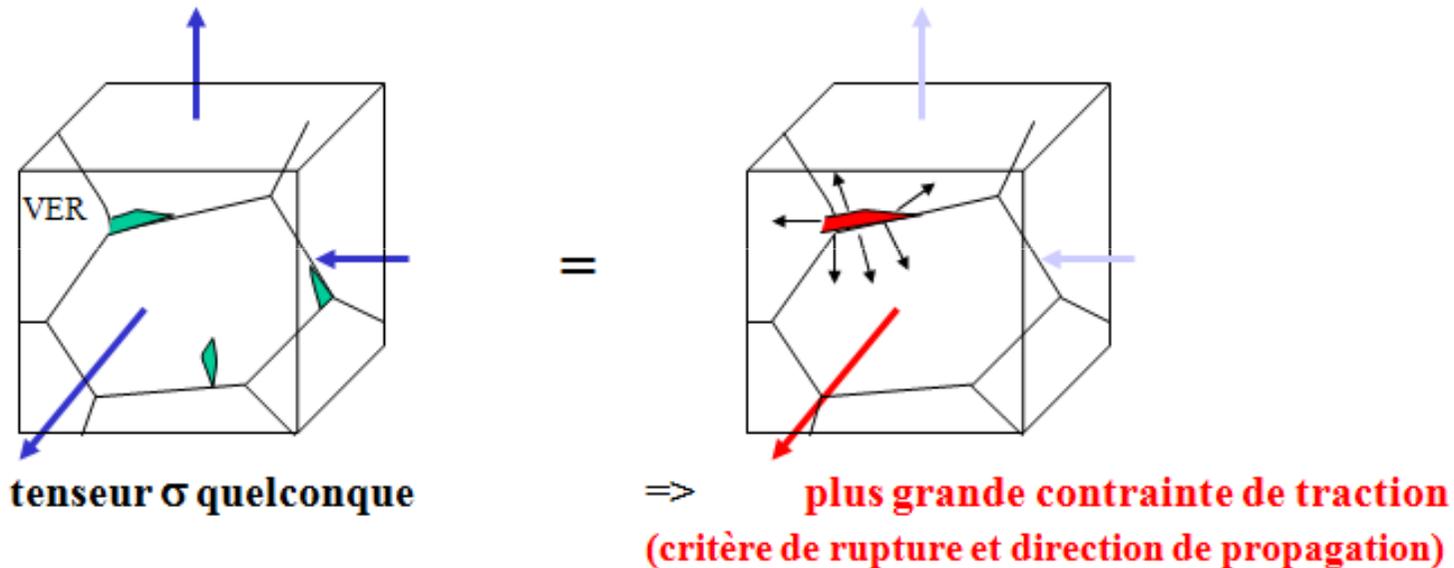
Plasticité des métalliques et polymères: contraintes de cisaillements



Plasticité = changement de forme irréversible
- métalliques : glissement de dislocations
- polymères : glissement de chaînes moléculaires
- céramiques : impossible

Synthèse

Fragilité des céramiques: contraintes de traction sur les microdéfauts

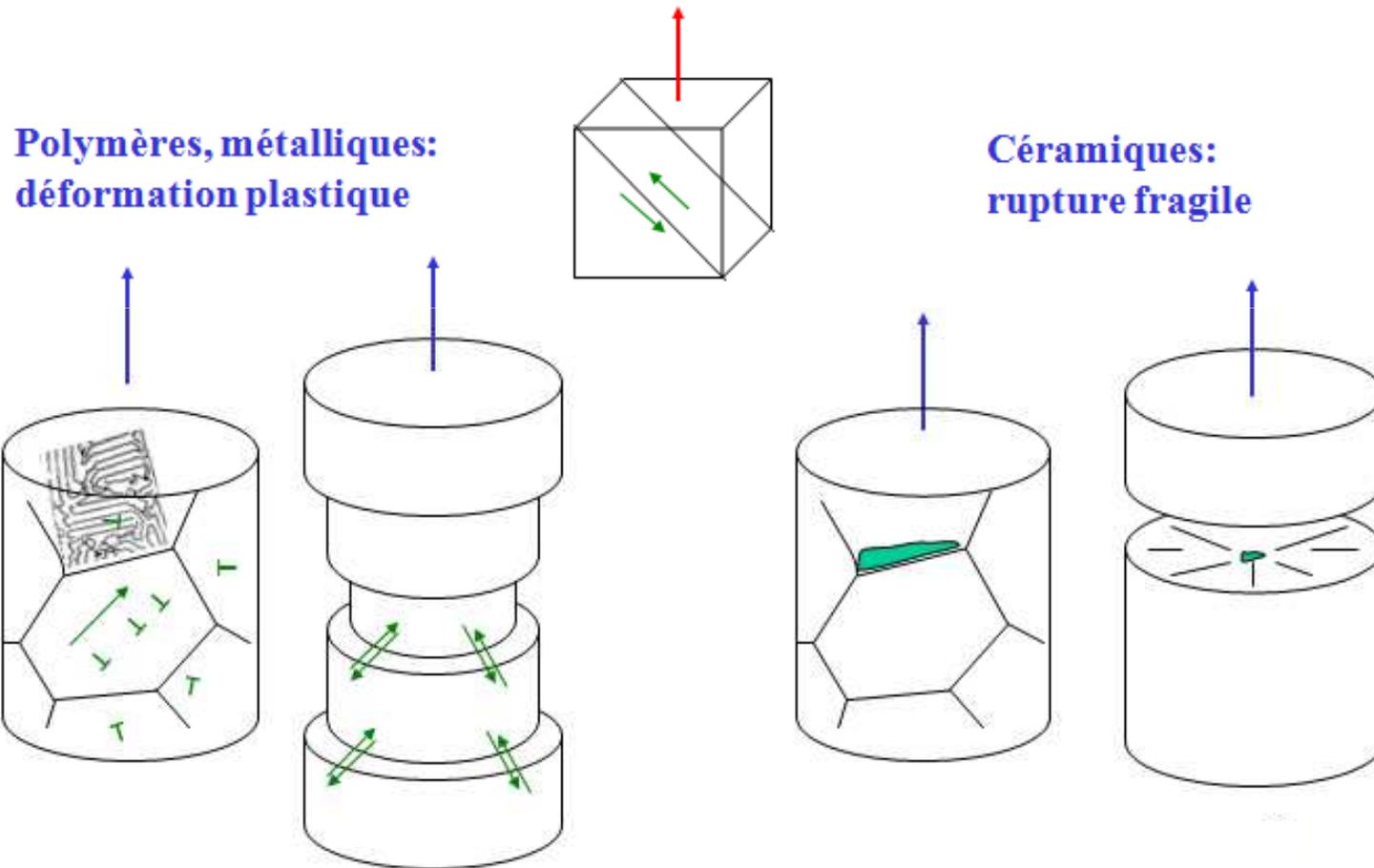


Comportement fragile des céramiques : propagation brutale de microdéfauts pour $\sigma_{max} = \sigma_{critique}$

- =>** - comportement bien meilleur en compression
- dispersion des résistances \Leftrightarrow statistique des défauts
- =>** *si possible cristaux très fins pour microdéfauts très petits !*

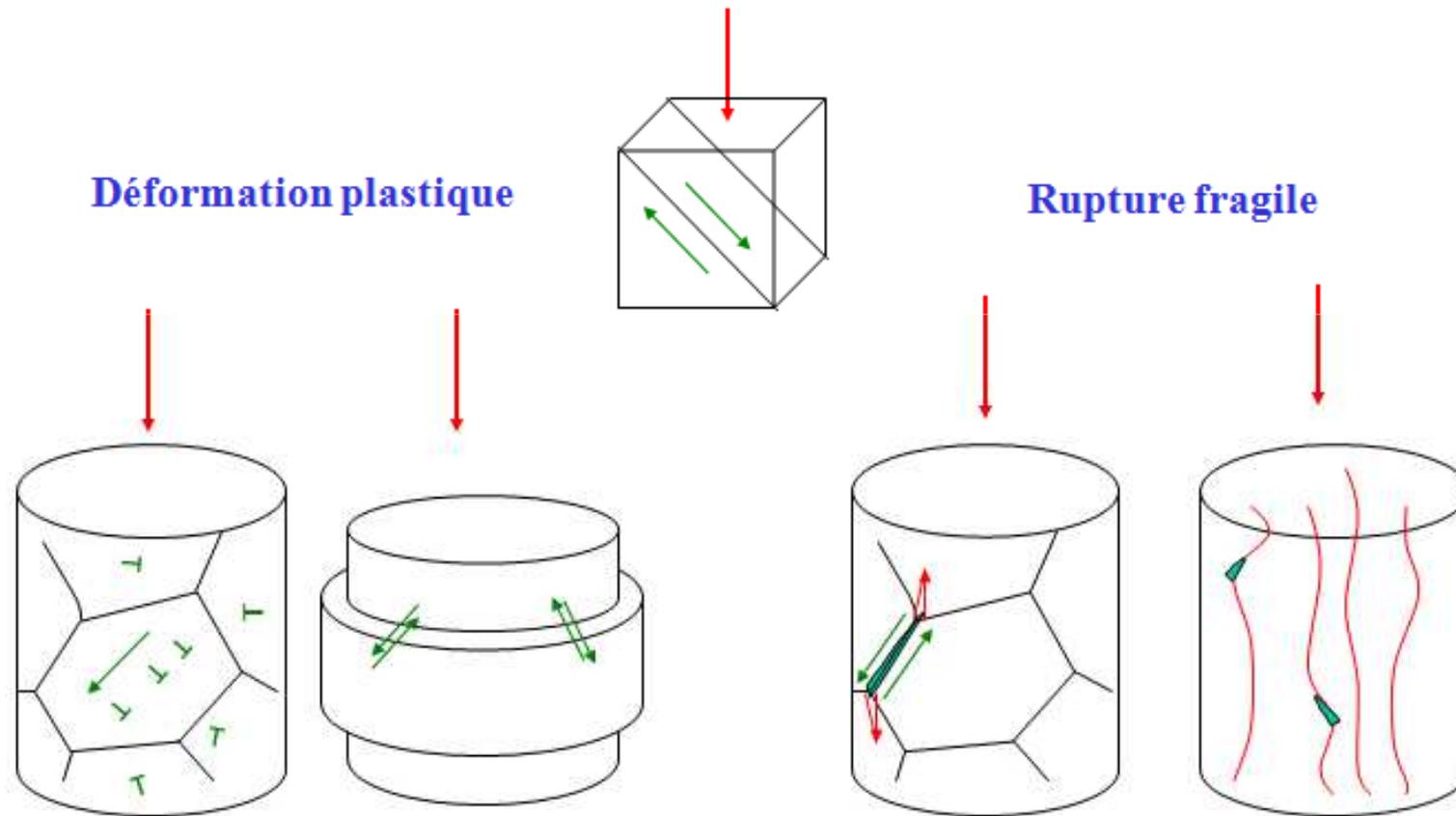
Synthèse

Comparaison des comportements en traction



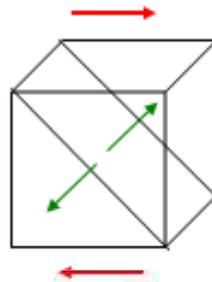
Synthèse

Compression

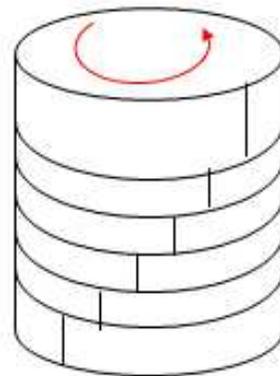
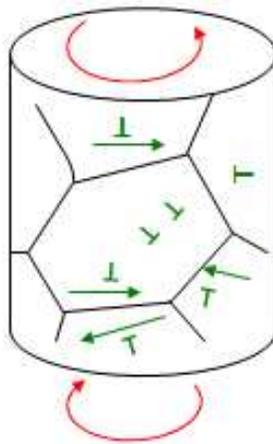


Synthèse

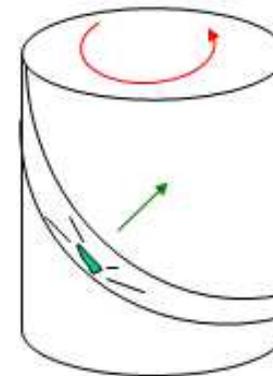
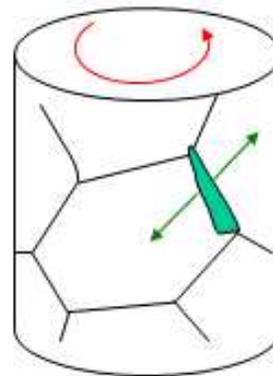
Torsion



Déformation plastique



Rupture fragile



Bibliographie sur les matériaux et leur comportement mécanique (non métalliques)

- D.W Richerson : « **Modern ceramics engineering** » Dekker
- JB. Wachtman : « **Mechanical properties of ceramics** » Wiley
- C. G'sell, JM. Haudin : « **Introduction à la mécanique des polymères** » INPL
- D. Gay : « **Matériaux composites** » Hermès
- Cl Bathias: « **Matériaux composites** » Usine Nouvelle

Bibliographie sur les matériaux et leur comportement mécanique (niveau avancé)

- J. Besson, G. Cailletaud, JL. Chaboche, S. Forest :
« **Mécanique non linéaire des matériaux** » Hermès
- D. François, A. Pineau, A. Zaoui :
« **Comportement mécanique des matériaux** »
- tome 1 : élasticité et plasticité,
- tome 2 : viscoplasticité, endommagement, mécanique de la rupture,
mécanique du contact
Hermès
- JM Berthelot « **Matériaux composites** » Tec & Doc