

# Mécanique-physique des matériaux

L'objectif principal de cette partie du cours est de fournir la culture minimale permettant d'écrire des comportements de matériaux en **grandes déformations**

et de comprendre les concepts utilisés par les codes de calcul industriels pour les calculs en grandes transformations.

# Programme indicatif

## **Séance 7: Comportement des alliages métalliques: élastoplasticité**

### **Séance 8: Elastoplasticité en petites transformations**

Etude de cas de calcul de structures en élastoplasticité en petites transformations

### **Séance 9: Elastoplasticité en grandes transformations**

Etude de cas de calcul de structures en élastoplasticité en grandes transformations

Rapport sur l'étude de cas ou devoir

### **Séance 10: Etude thermodynamique de la progression d'une fissure:**

taux de relaxation d'énergie

Hypothèses de la mécanique linéaire de la rupture, ténacité, loi de Paris, limite d'endurance.

### **Séance 11: Etude de cas de structures fissurées**

Rapport sur l'étude de cas

### **Séance 12: (facultative) Viscoélasticité en grandes transformations:**

étude de cas de calcul de structures en viscoélasticité en grandes transformations

Éventuellement, rapport sur l'étude de cas ou questionnaire

### **Séance 13: Examen final**

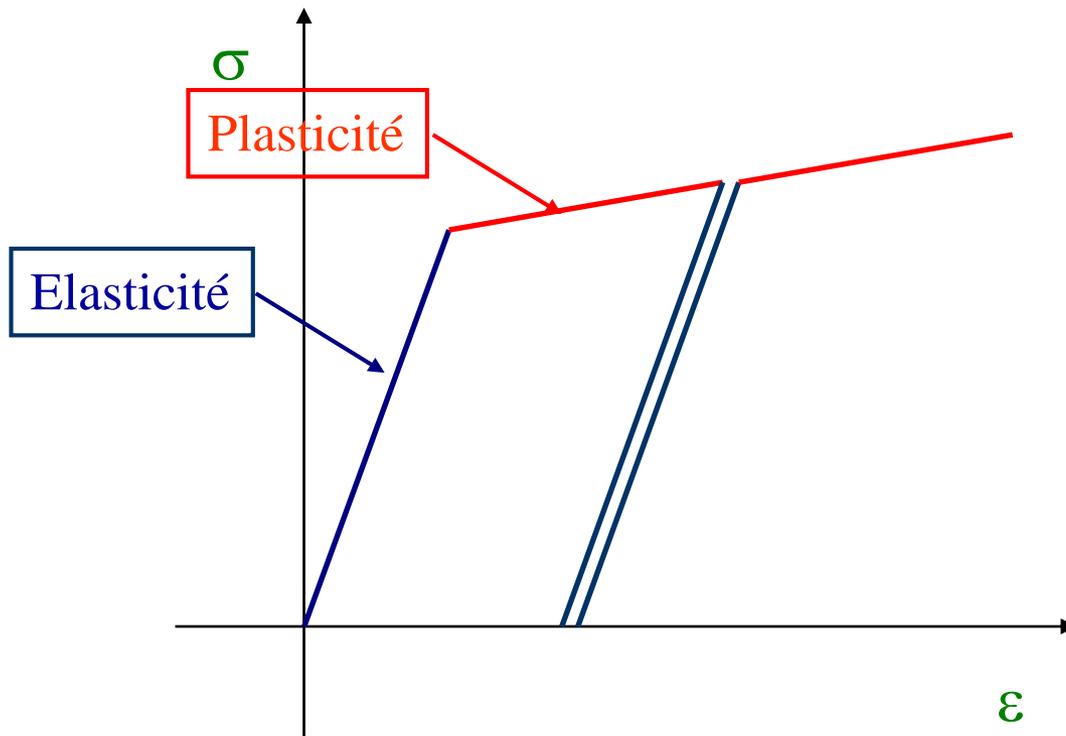
# Séance 7

## **Comportement des alliages métalliques: élastoplasticité**

# Plasticité

## Origines physiques

# Essai de traction sur un métal



La pente est le module d'Young  $E$

Début de la striction

Fracture finale

Limite d'élasticité Conventiennelle  $R_{p0,2}$

Limite d'élasticité  $R_e$

Résistance à la traction  $R_m$

Acier doux  
 $E=210$  GPa  
 $R_e=210$  MPa  
 $R_m=450$  MPa  
 $A=27\%$

Déformation de 0,2%

Déformation plastique après rupture,  $A_R$

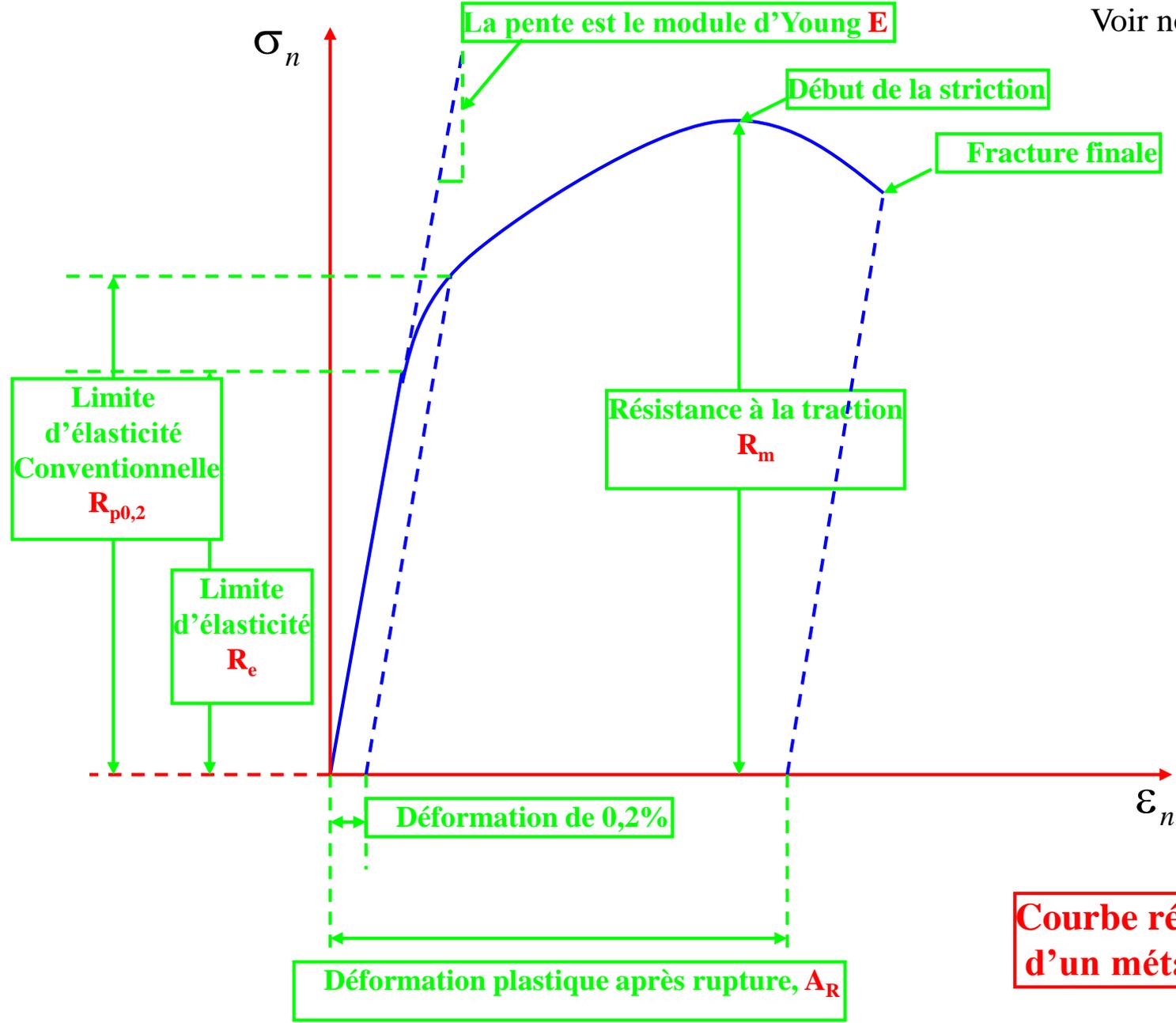
Courbe réelle de plasticité d'un métal

$\sigma_n$

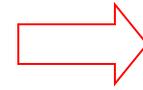
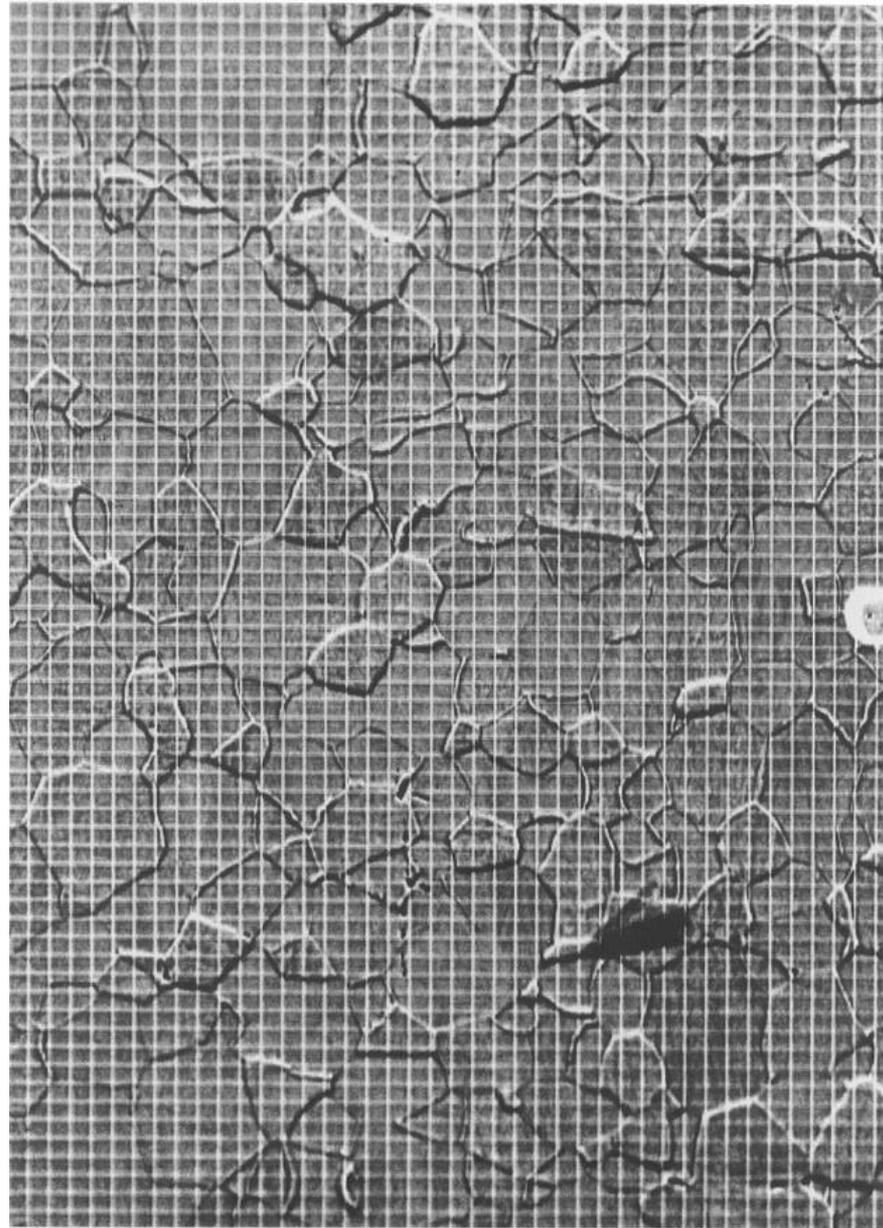
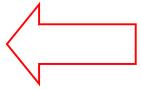
$\epsilon_n$

MPM

Alain Ehrlacher



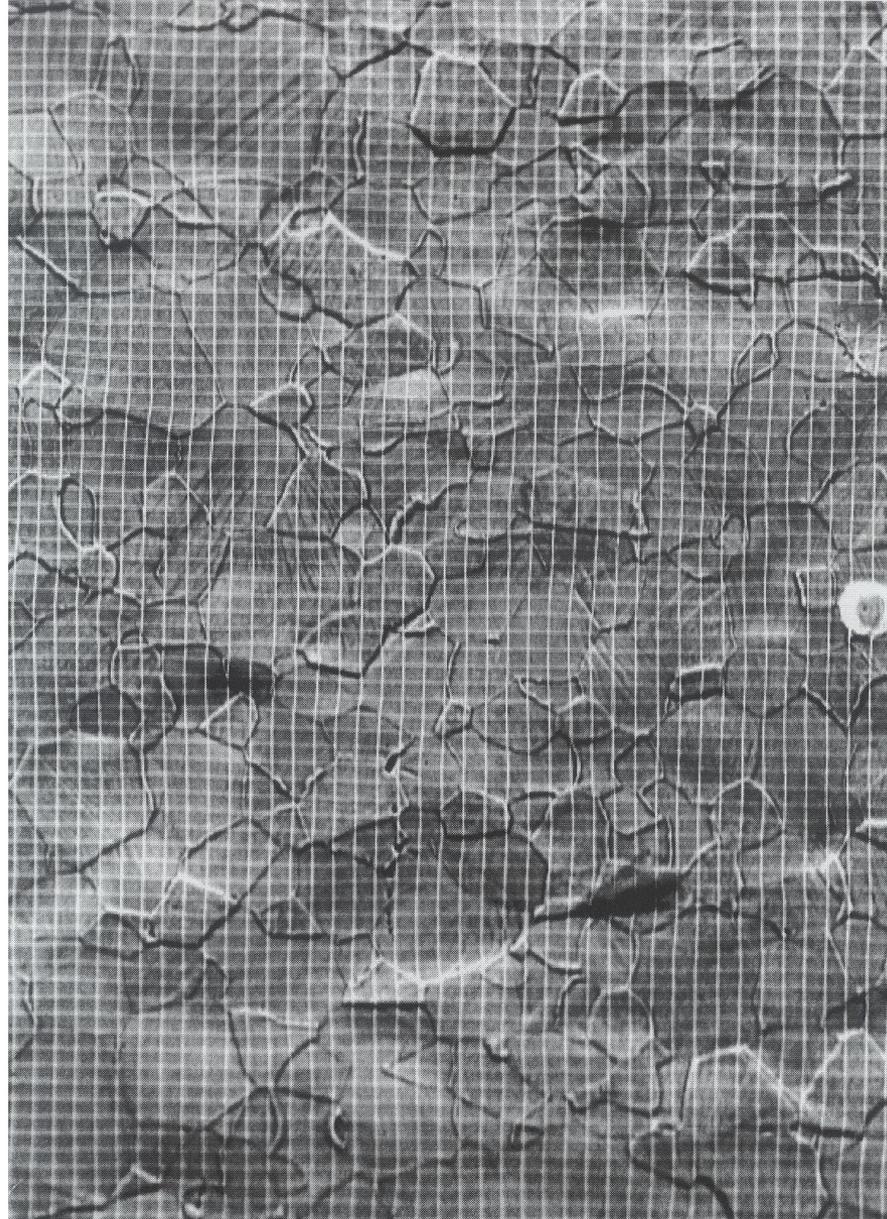
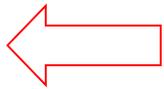
# Hétérogénéité du métal



**100μm**

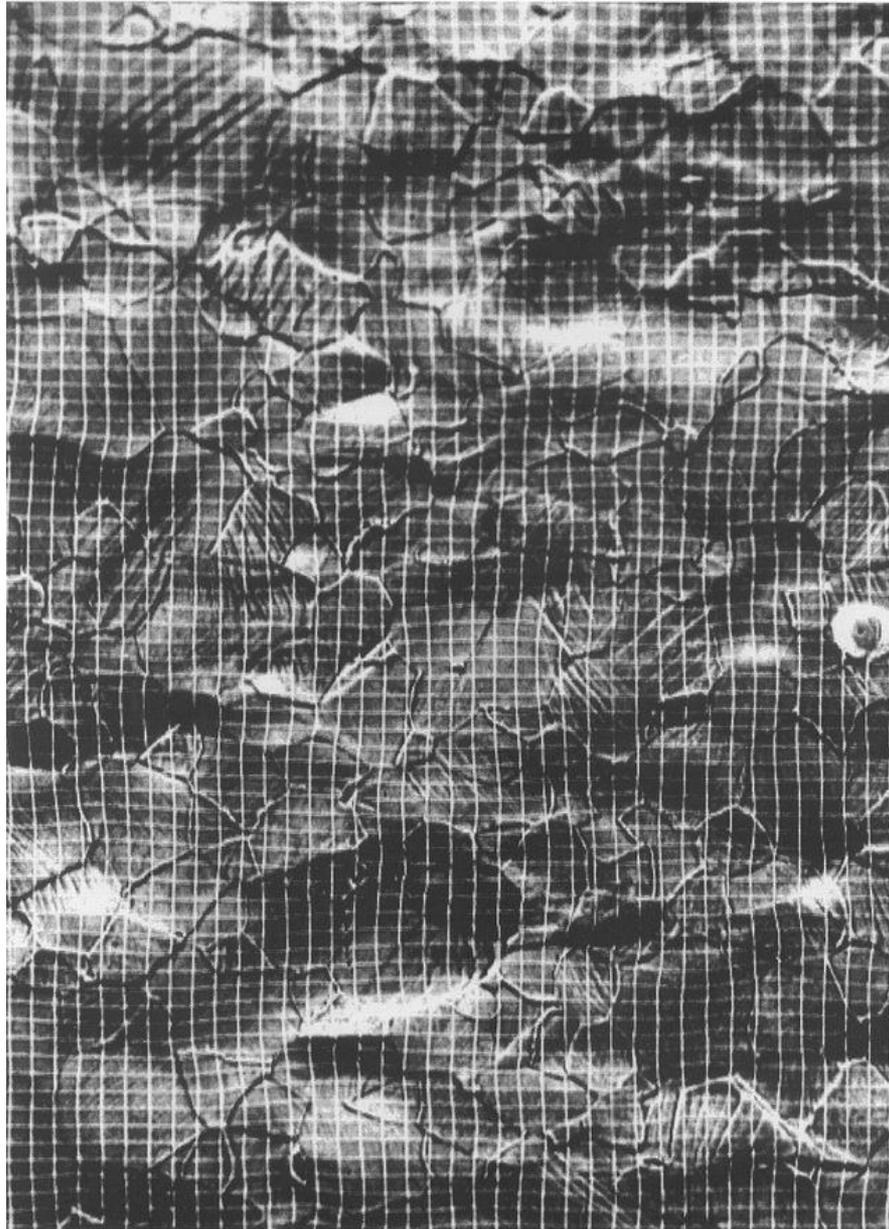
ET6HROT

**MPM**  
**Alain Ehrlacher**



**100μm**

FT6HRST



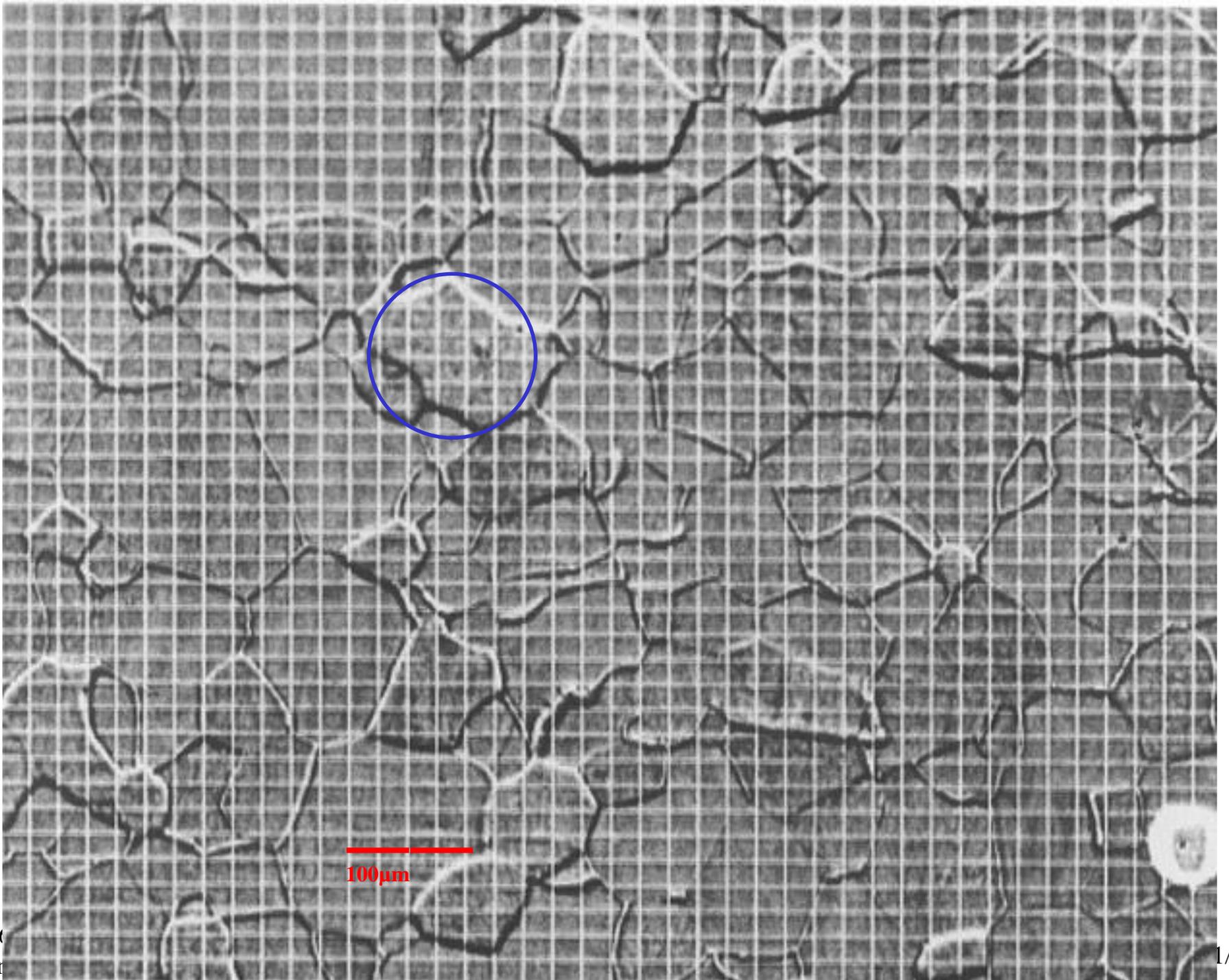
**100μm**

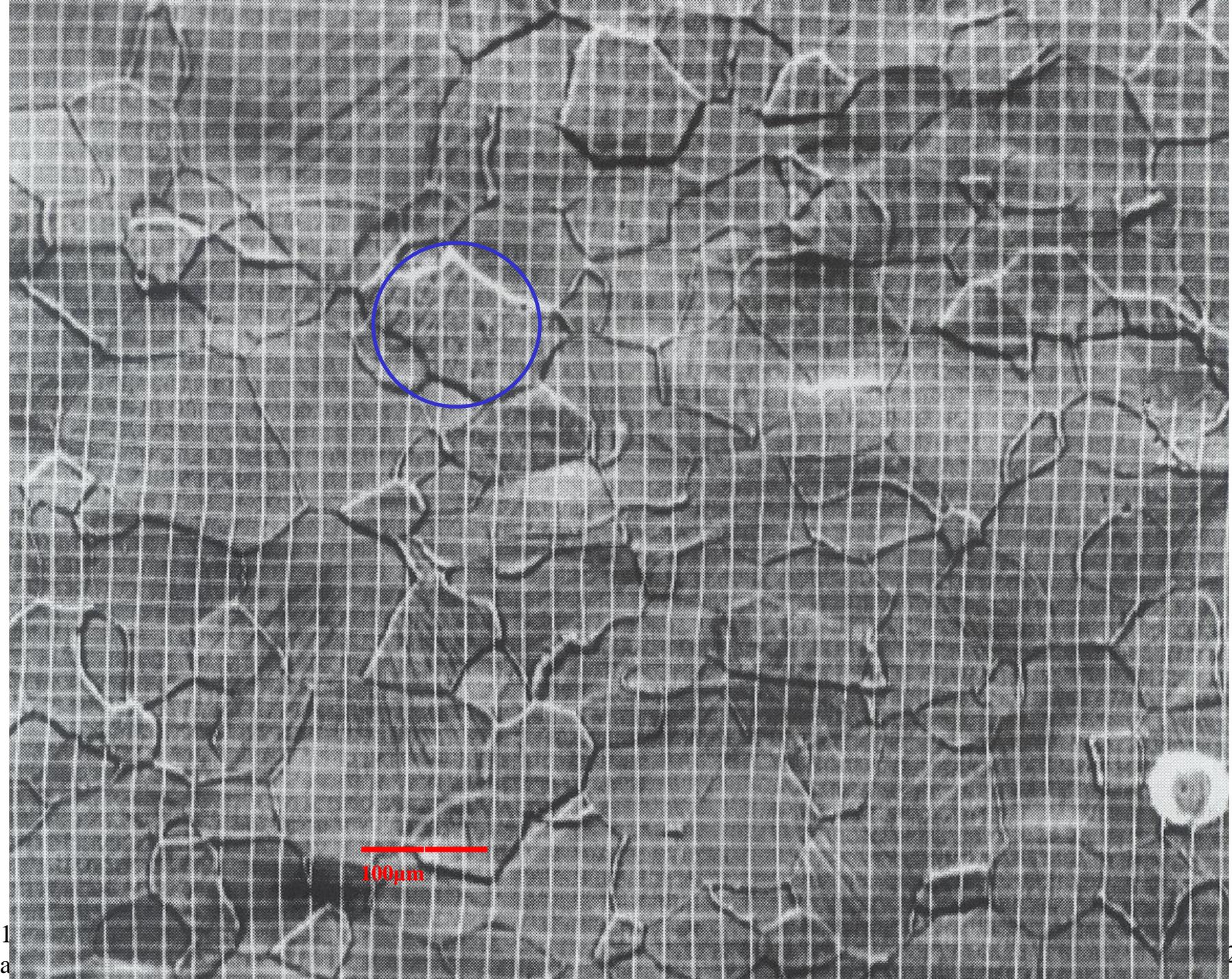
FT6HR9T

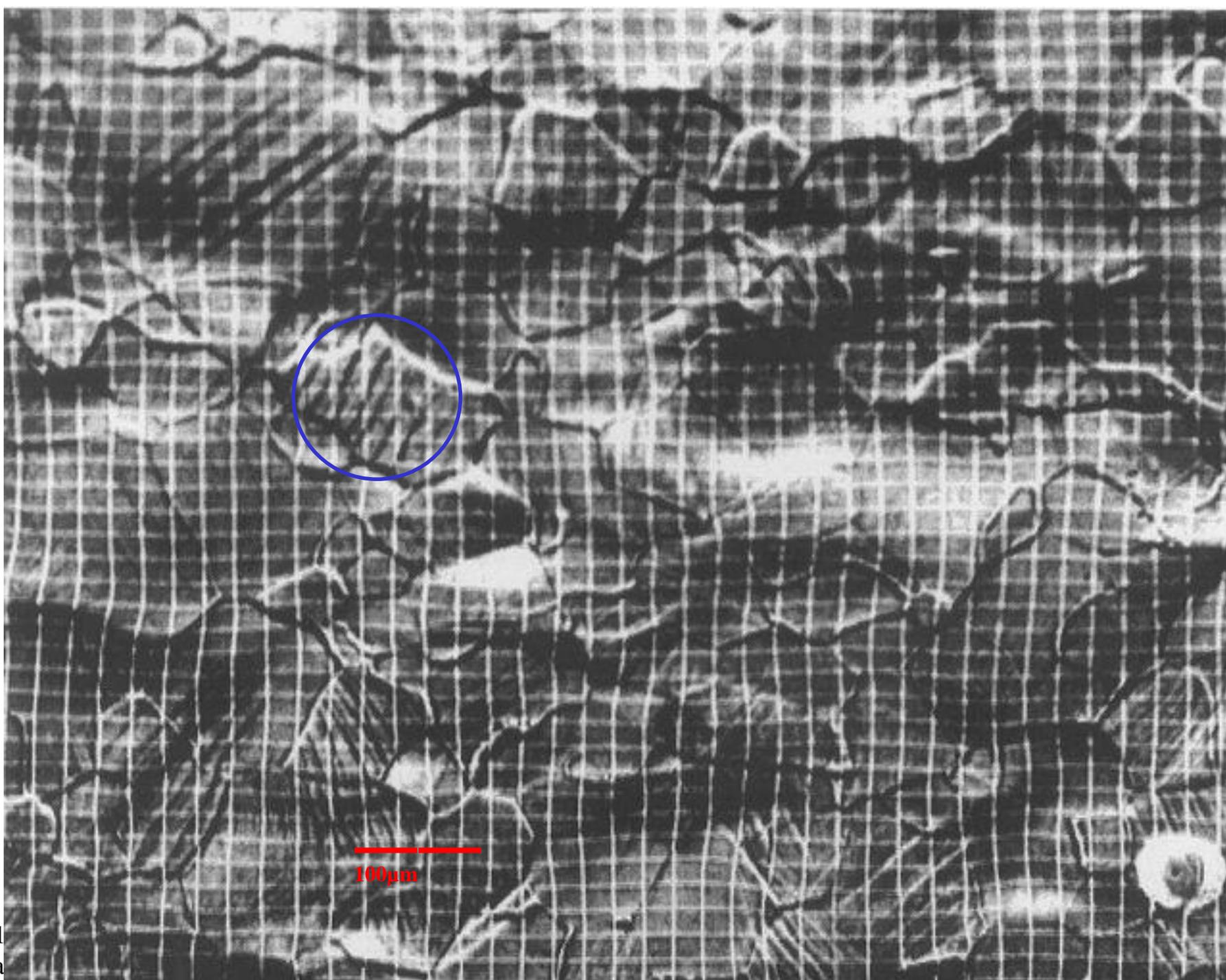


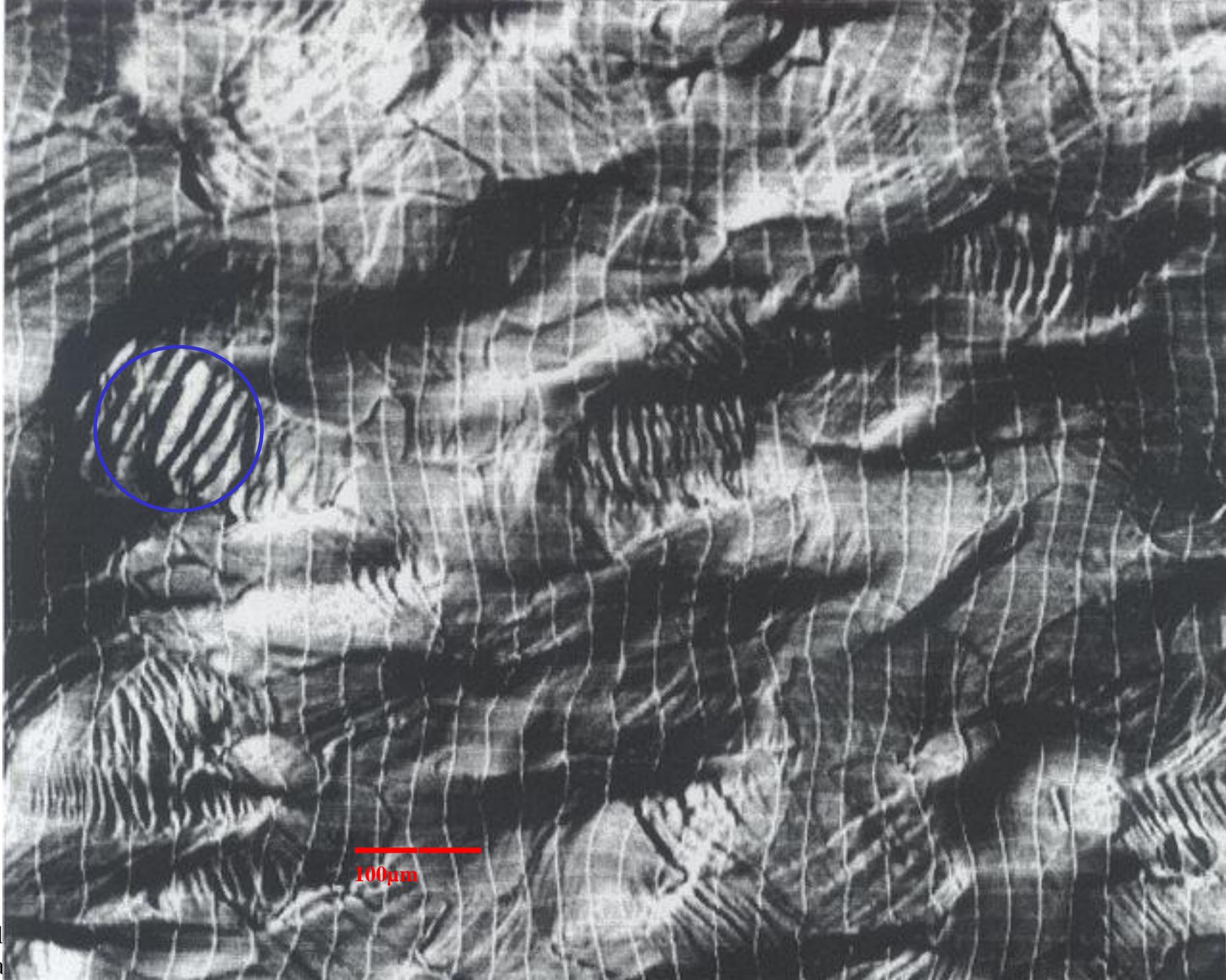
**100µm**

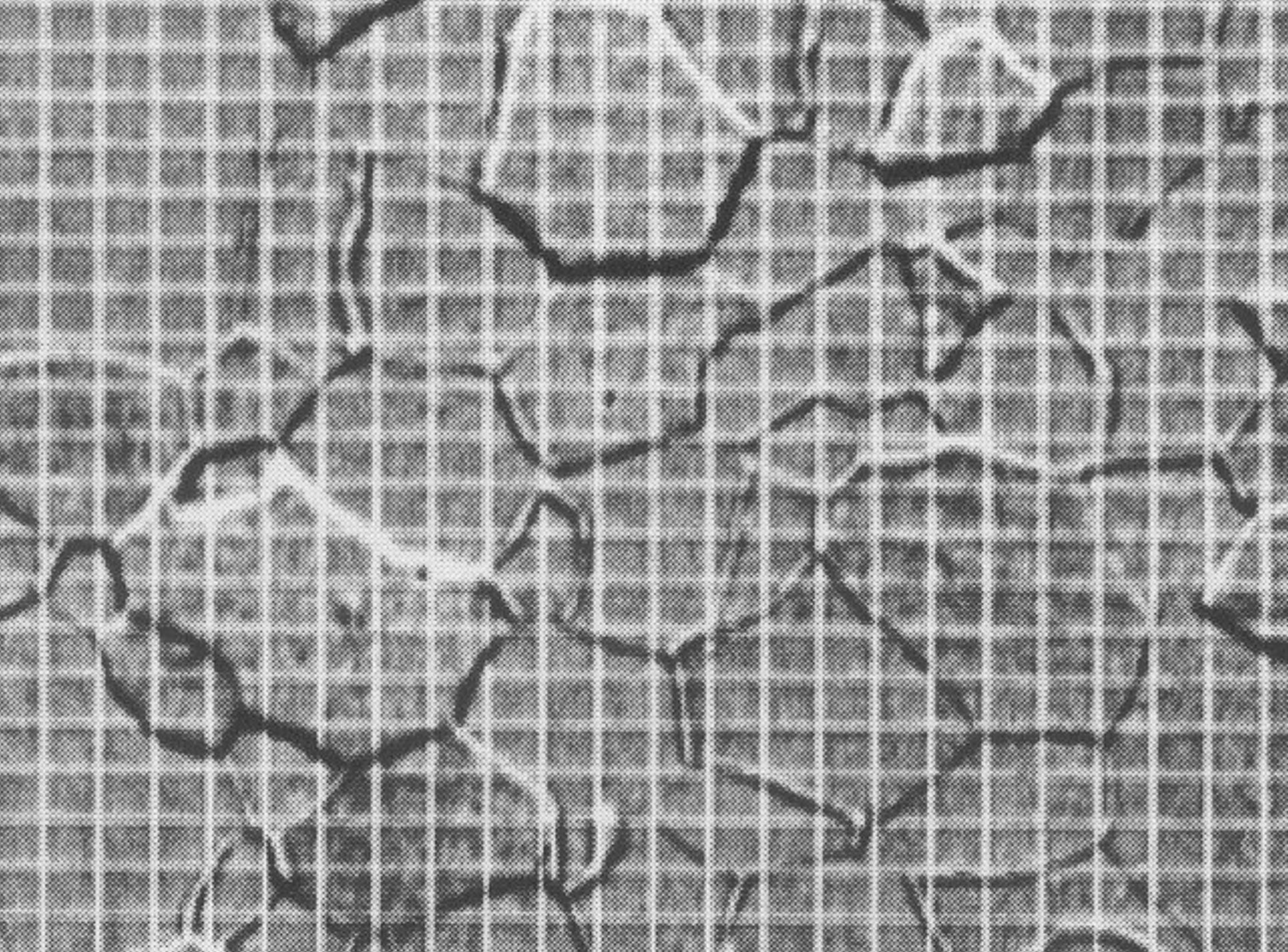
FT6 HR 1T

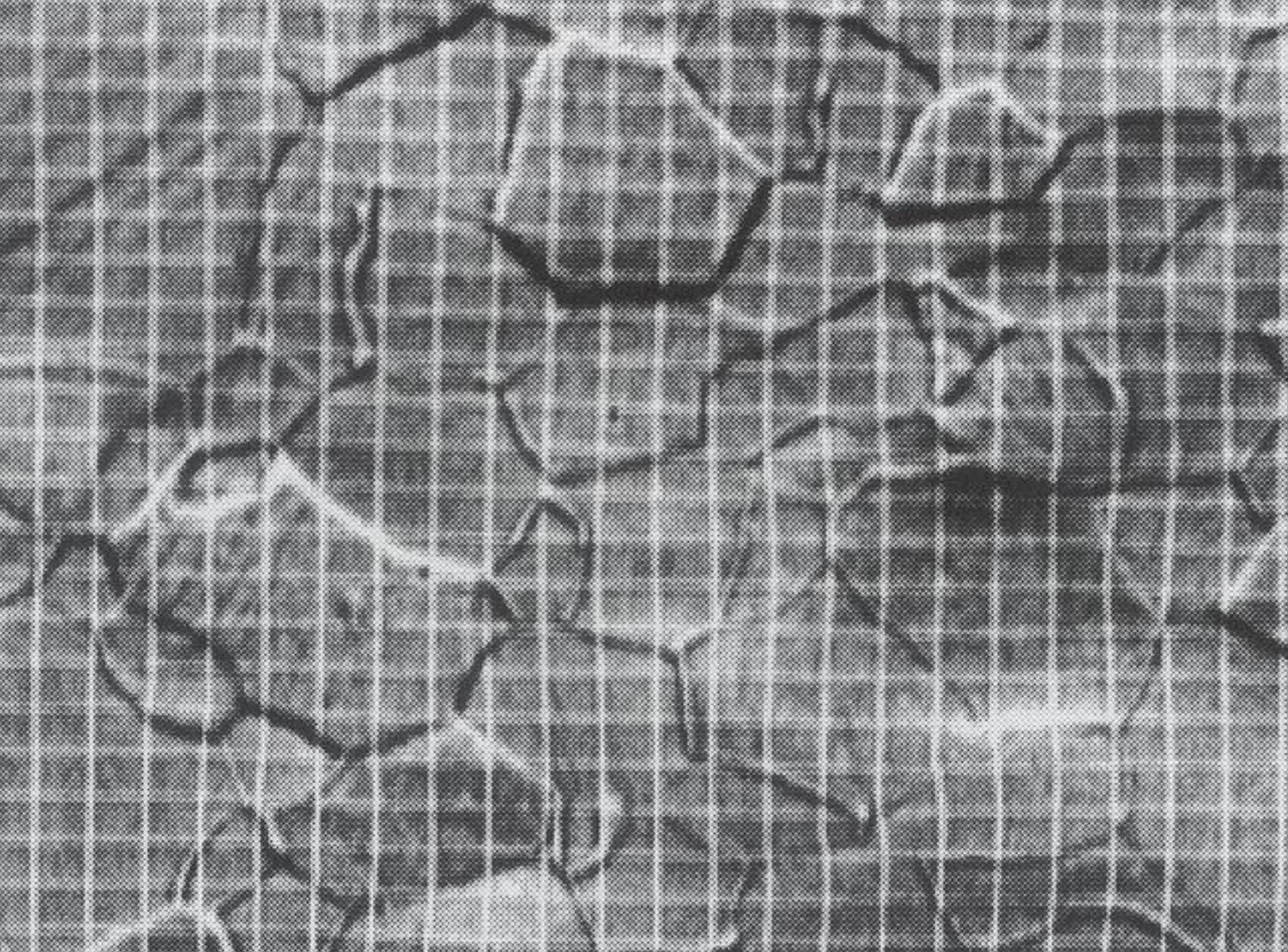




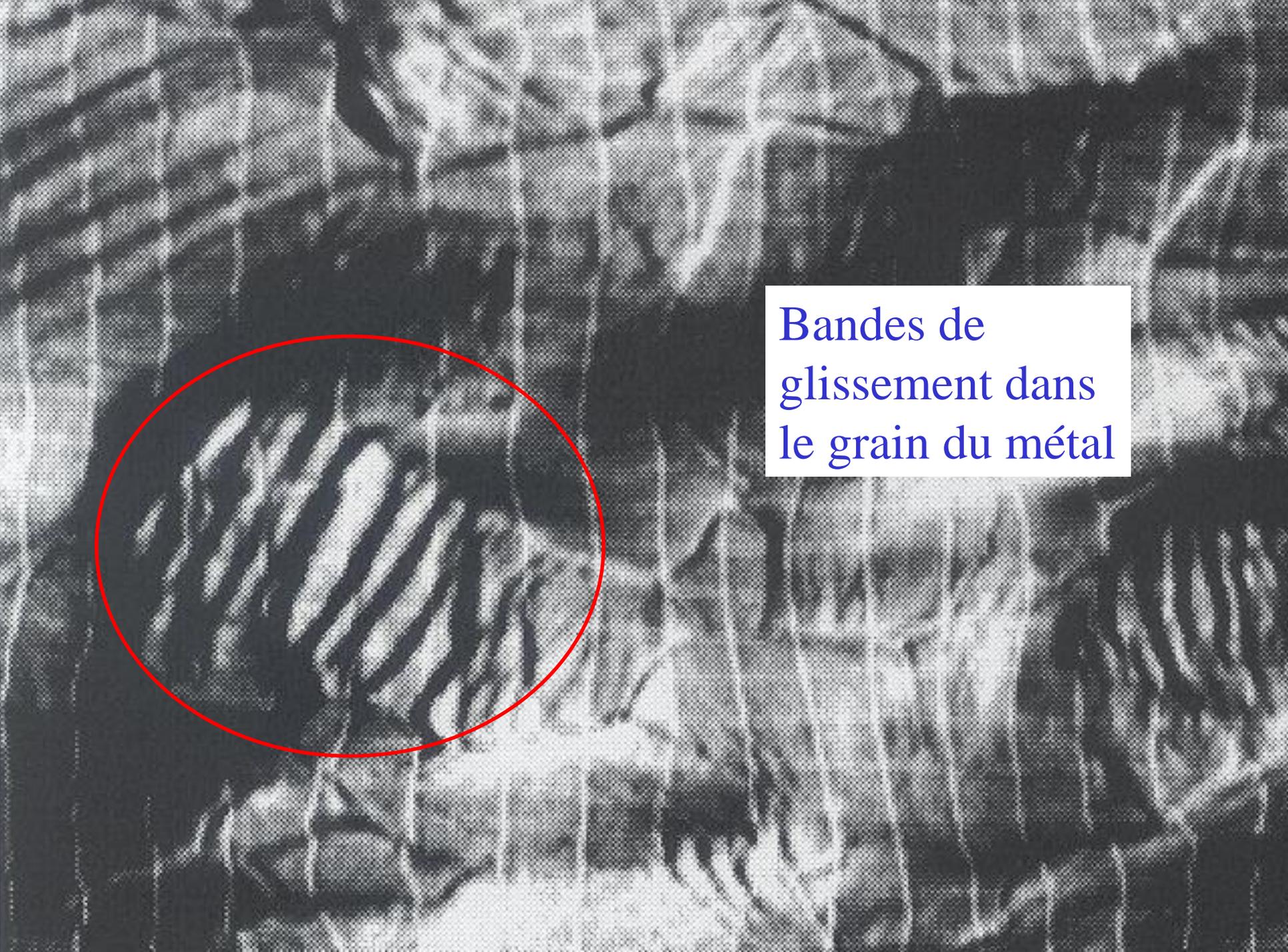






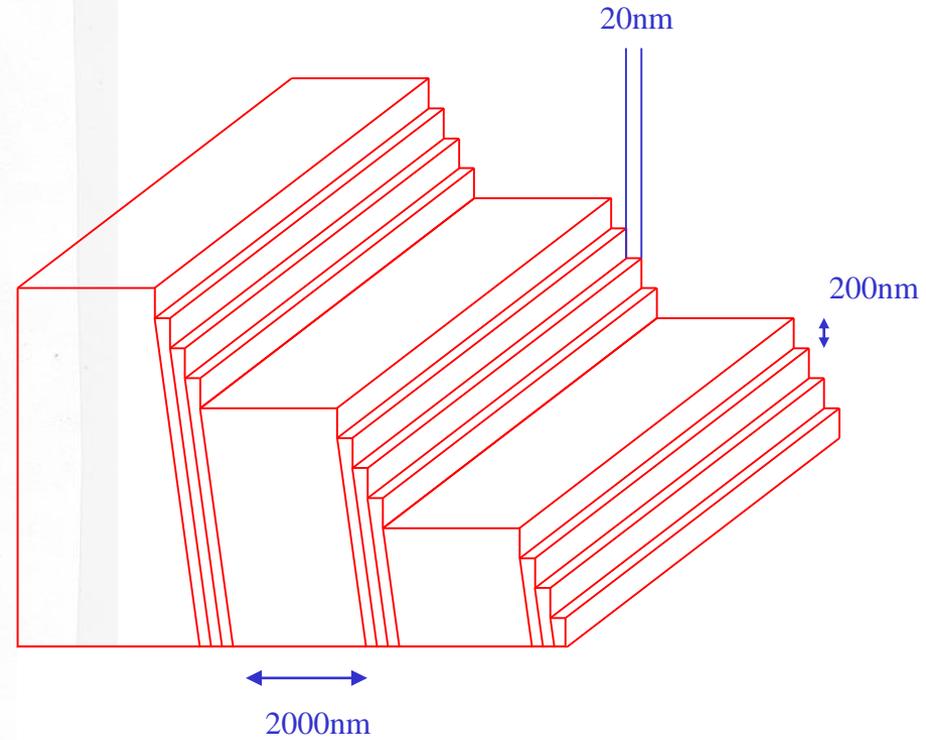
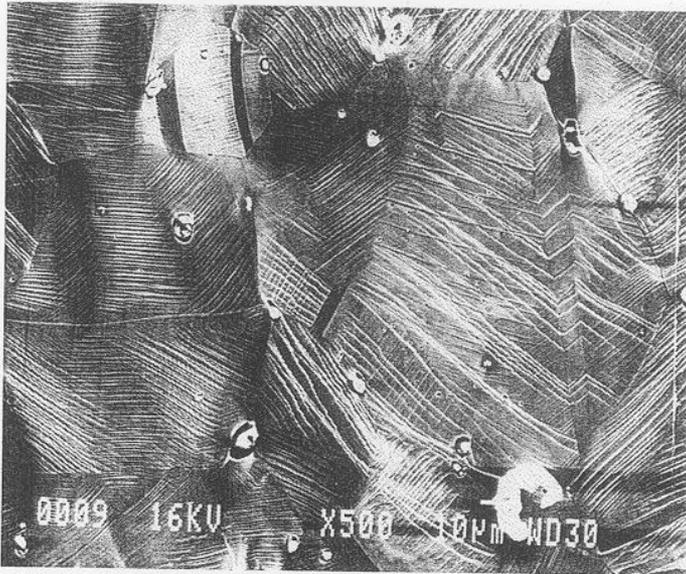
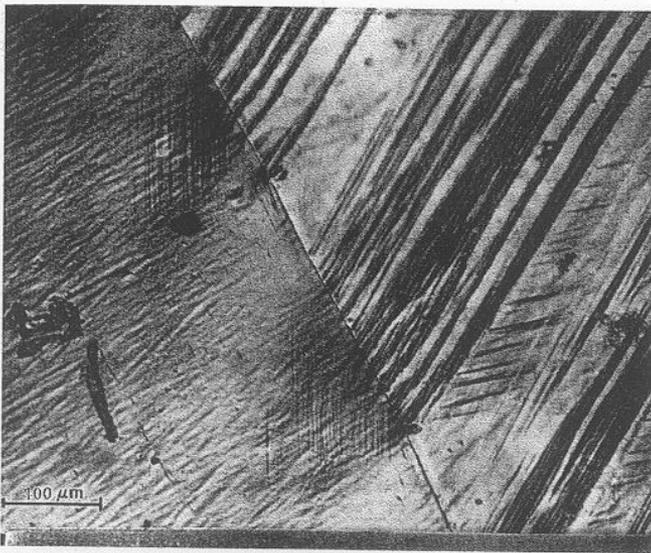




A black and white micrograph showing a polycrystalline metal structure. The grains are separated by grain boundaries. Within one grain, there are several dark, parallel lines representing slip bands. A red circle highlights a specific region where these slip bands are clearly visible. The overall texture is granular and somewhat irregular.

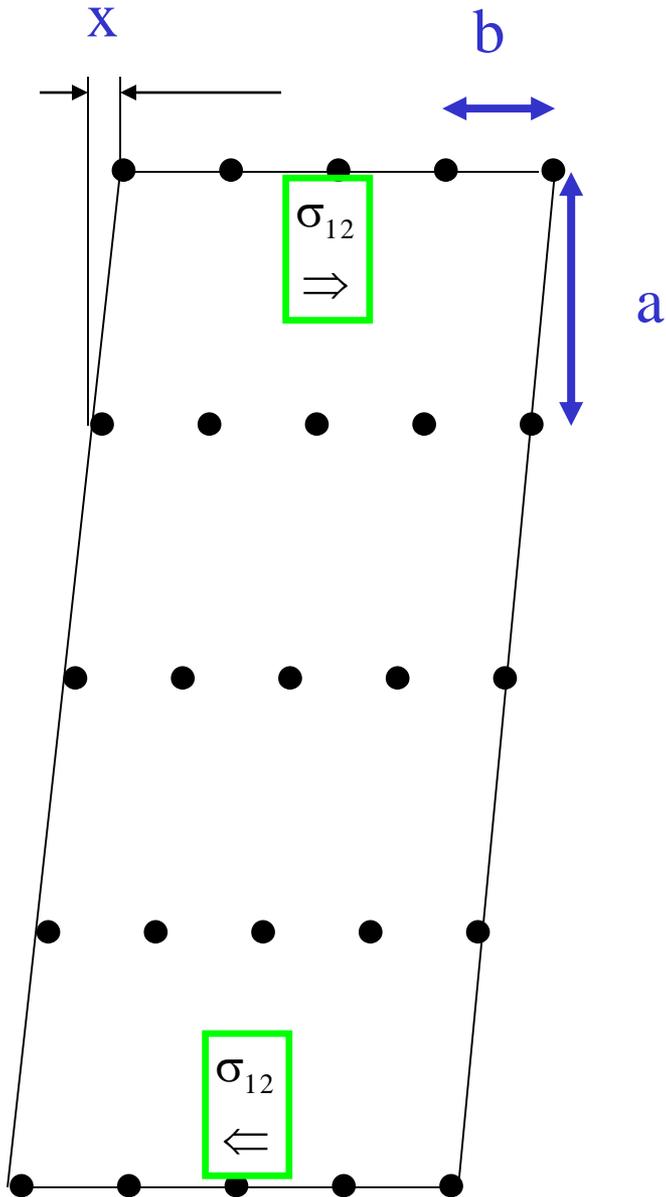
Bandes de  
glissement dans  
le grain du métal

# Bandes de glissement dans le grain du métal



# Première idée: glissement **plan sur plan** dans le cristal

Estimation de la contrainte de glissement



## Estimation de la contrainte de glissement

$$\sigma_{12} = 2\mu\varepsilon_{12} = \mu \frac{x}{a} \quad \text{si } \frac{x}{a} \ll 1$$

Mais si  $\frac{x}{a}$  augmente:

### Périodicité de période $b$

$$\sigma_{12} \approx \text{proportionnel à } \sin\left(\frac{2\pi x}{b}\right)$$

$$\sigma_{12} \approx \frac{\mu b}{2\pi a} \sin\left(\frac{2\pi x}{b}\right) \Rightarrow \sigma_{12}^{max} \approx \frac{\mu b}{2\pi a}$$

## Estimation de la contrainte de glissement

$$\sigma_{12}^{max} \approx \frac{\mu b}{2\pi a}$$

Métal	$\mu$ Module de cisaillement MPa	$\sigma_{12}^{max}$ Plan/plan MPa	$\sigma_{12}^{max}$ Expérimental MPa
Al	24 400	3 900	0,79
Ag	25 000	3 980	0,37
Cu	40 700	6 480	0,49
Fe	59 000	9 400	26,60
Mg	16 500	2 600	0,39

**Le mécanisme n'est donc pas un glissement plan sur plan**

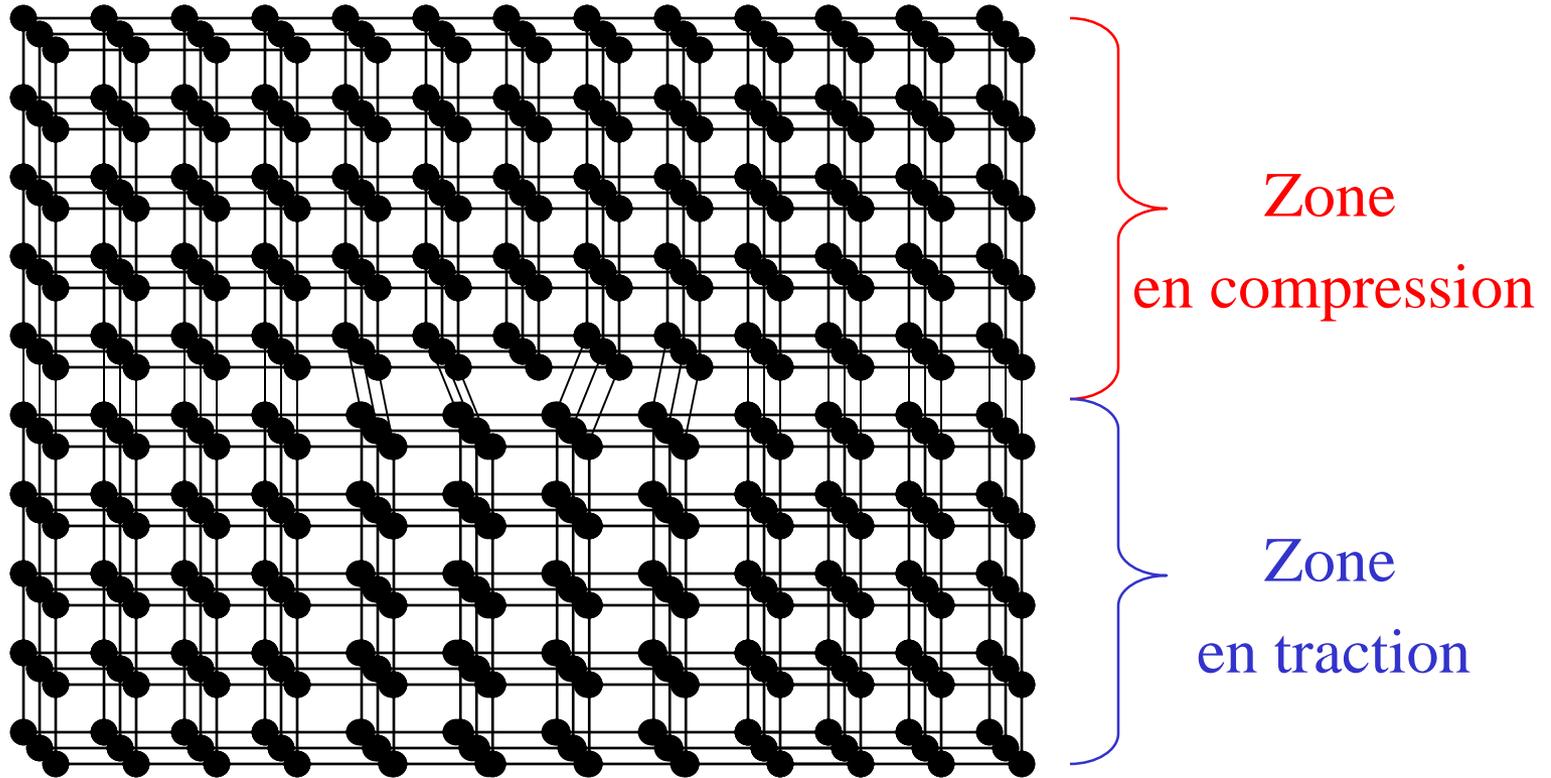
## Deuxième idée: analogie du tapis



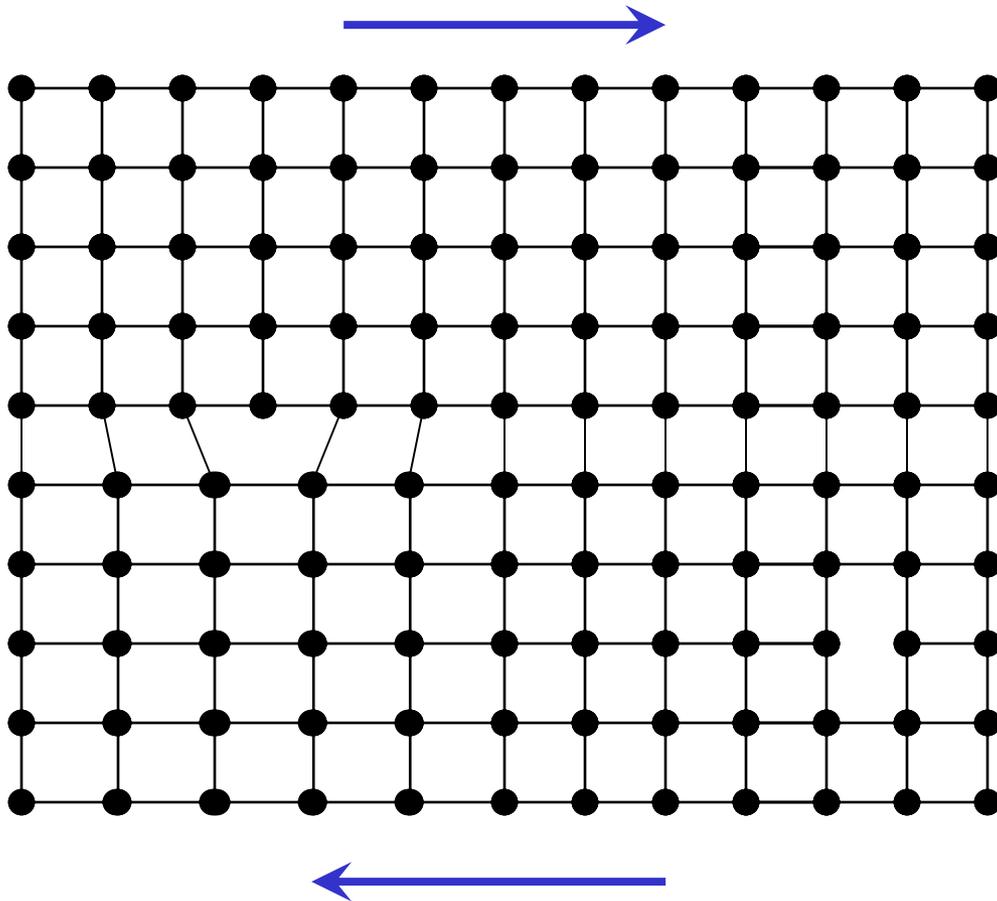
La propagation du « défaut » entraîne un « glissement » du tapis pour un effort beaucoup plus faible.

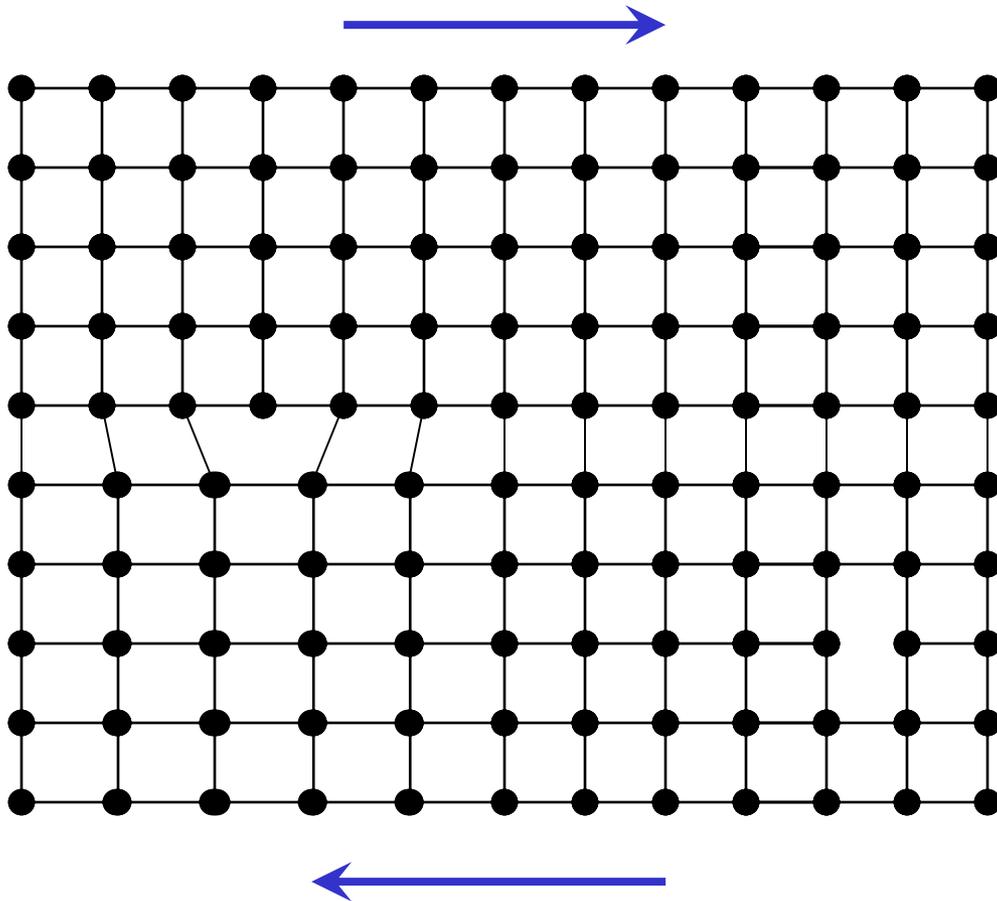
La plasticité des métaux est la conséquence des déplacements de défauts du cristal (Dislocations)

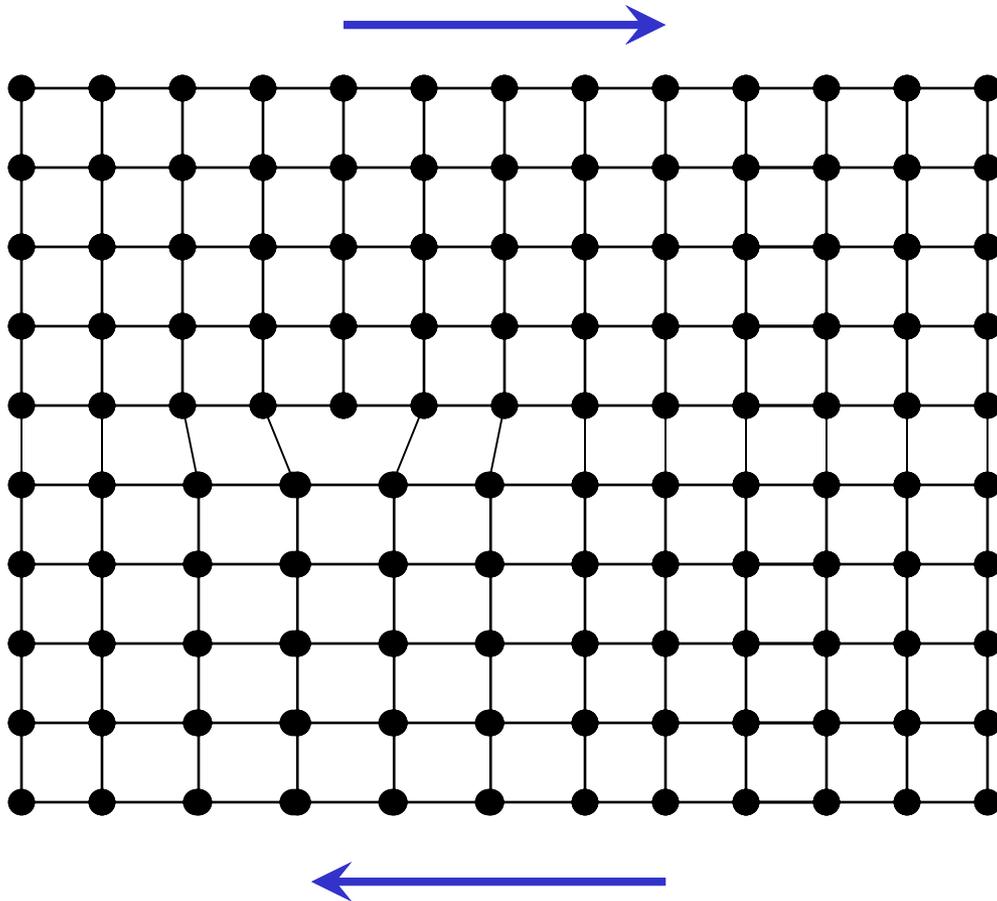
# Dislocation « coin »

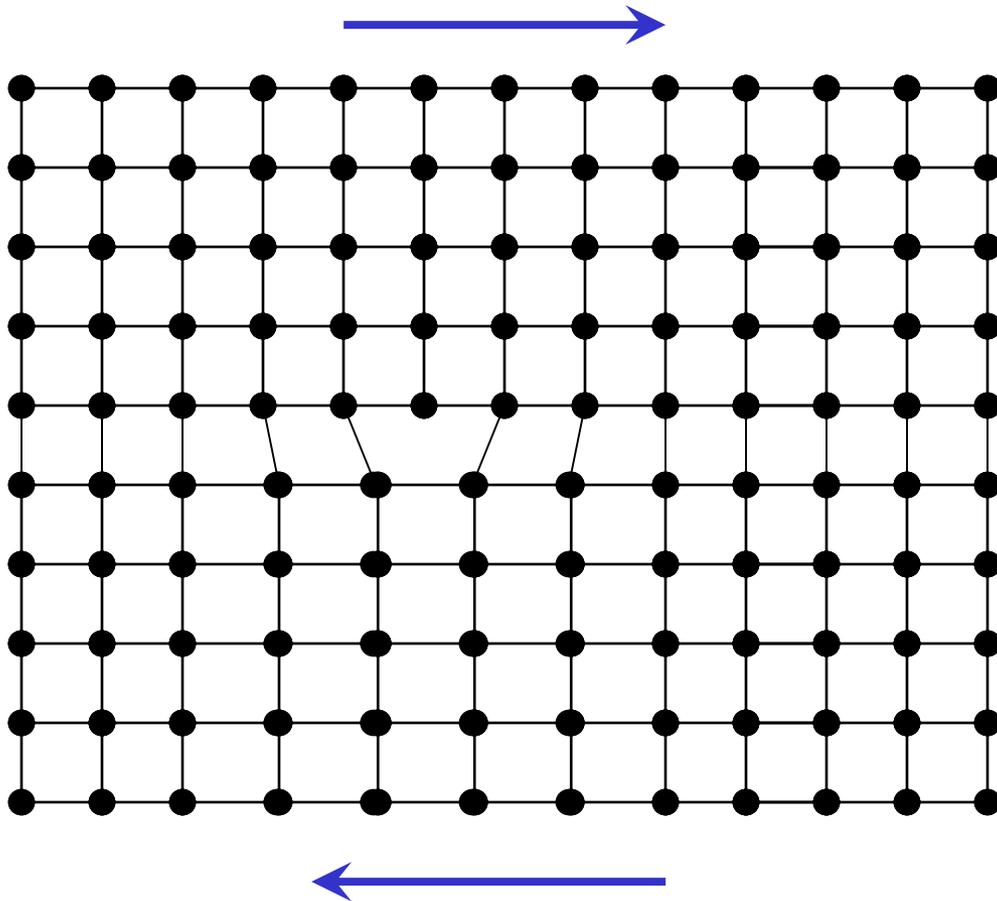


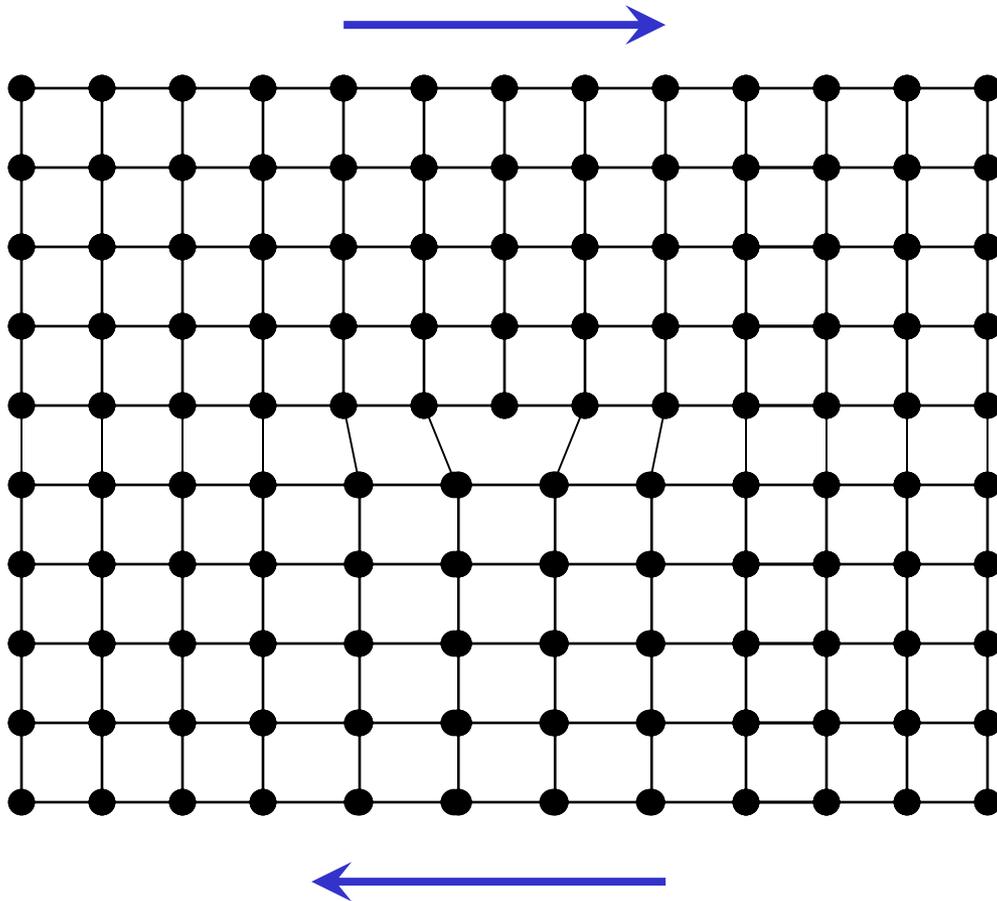
# Mécanisme de glissement dans le cristal par déplacement d'une **dislocation coin**

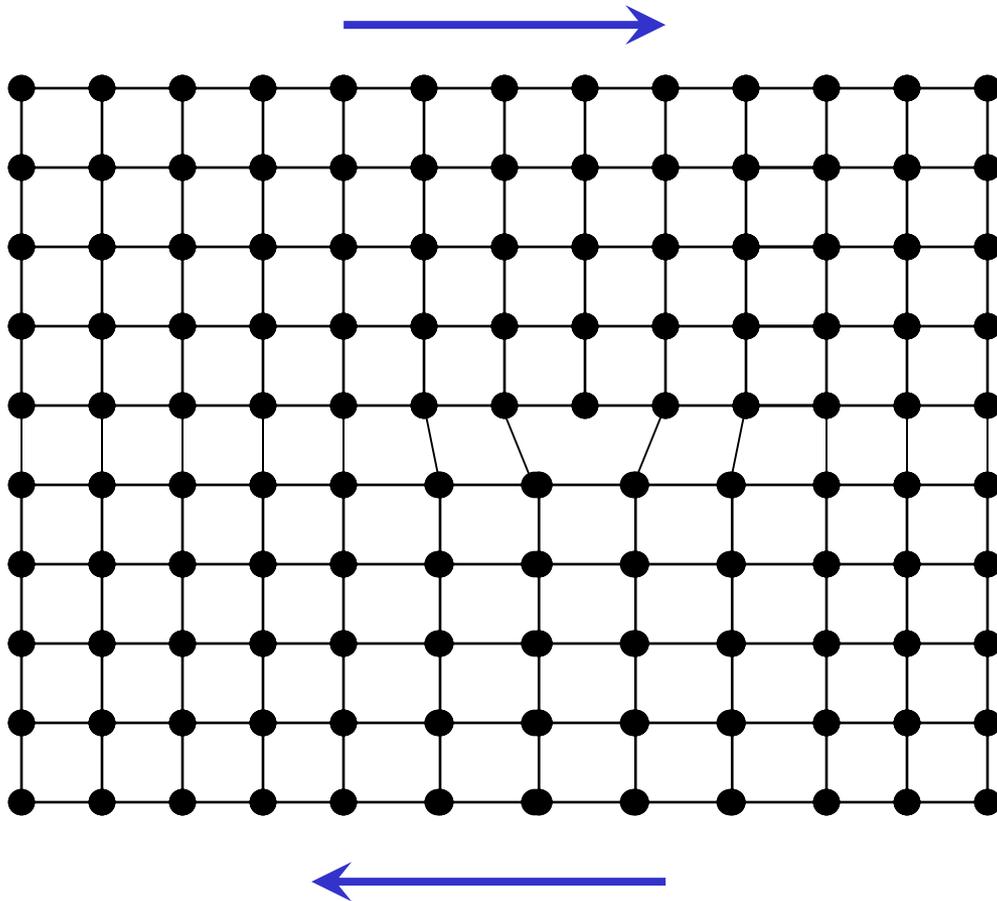


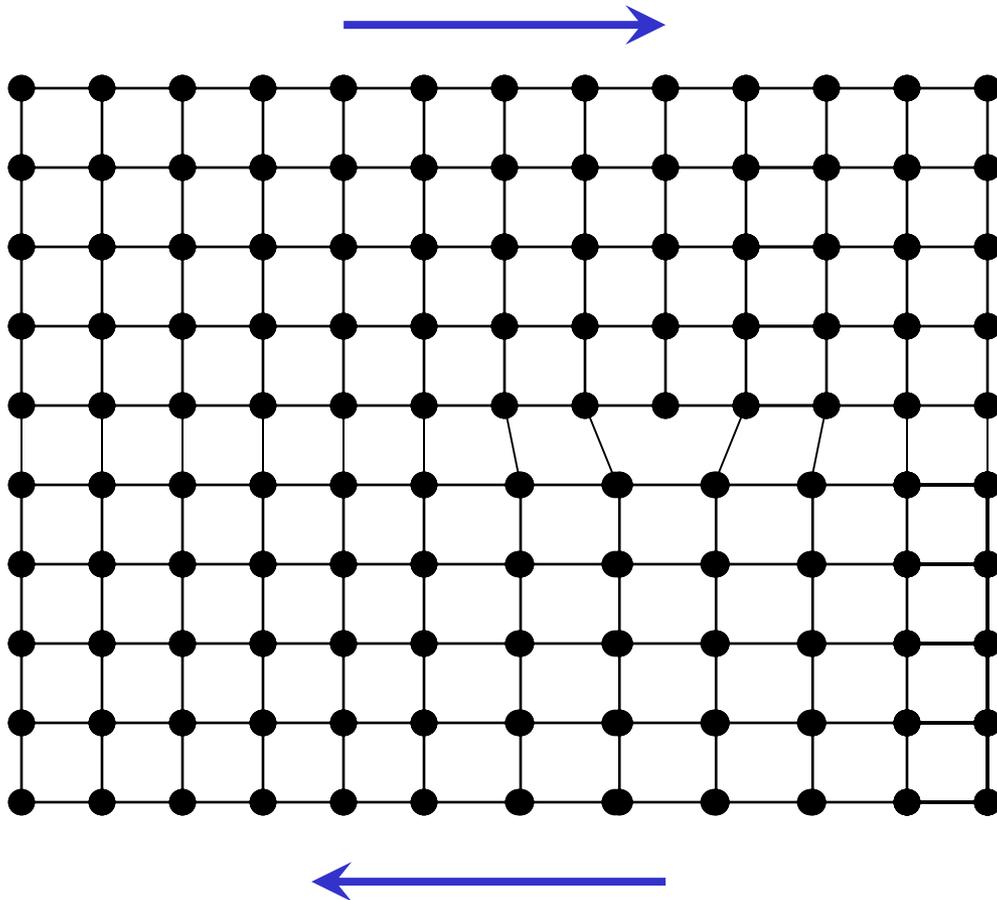


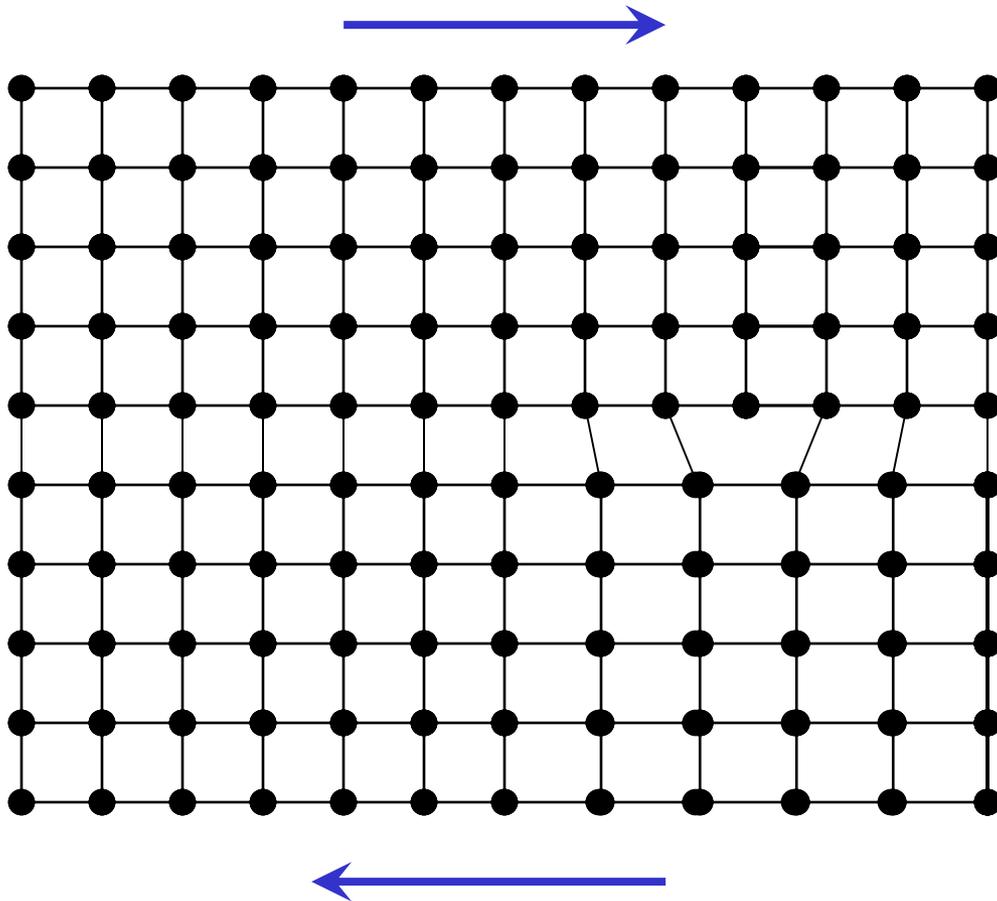


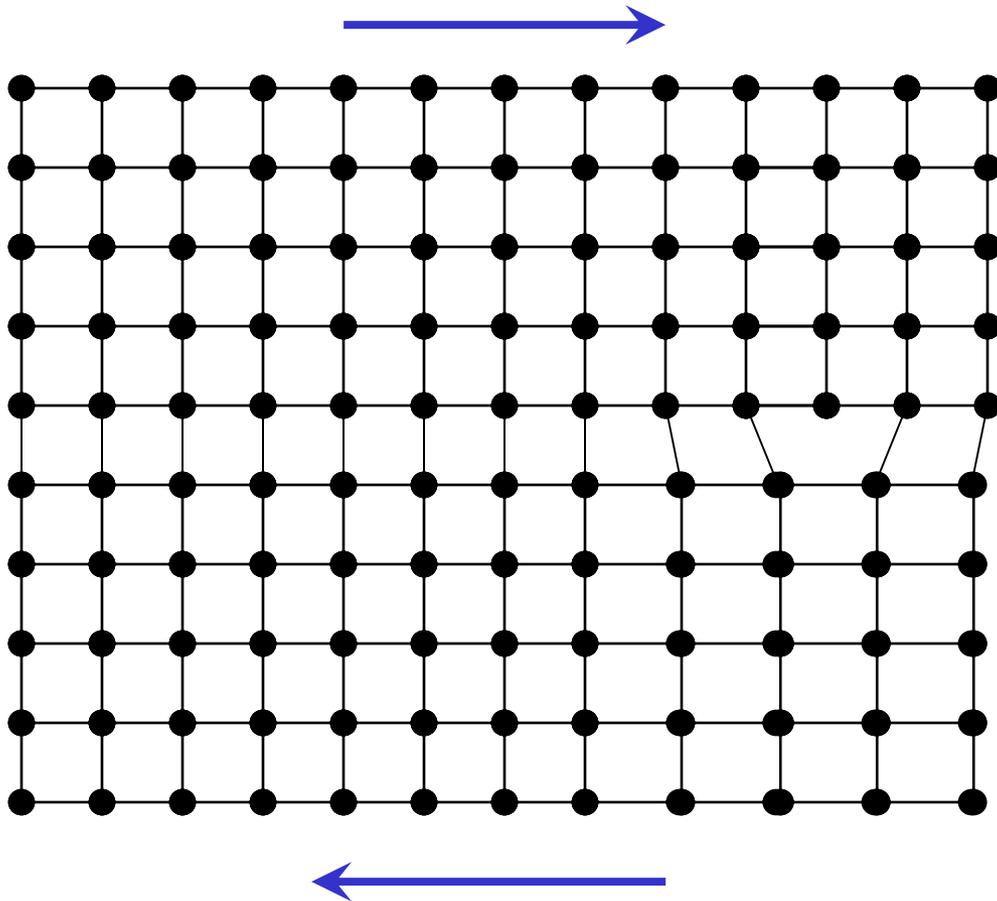


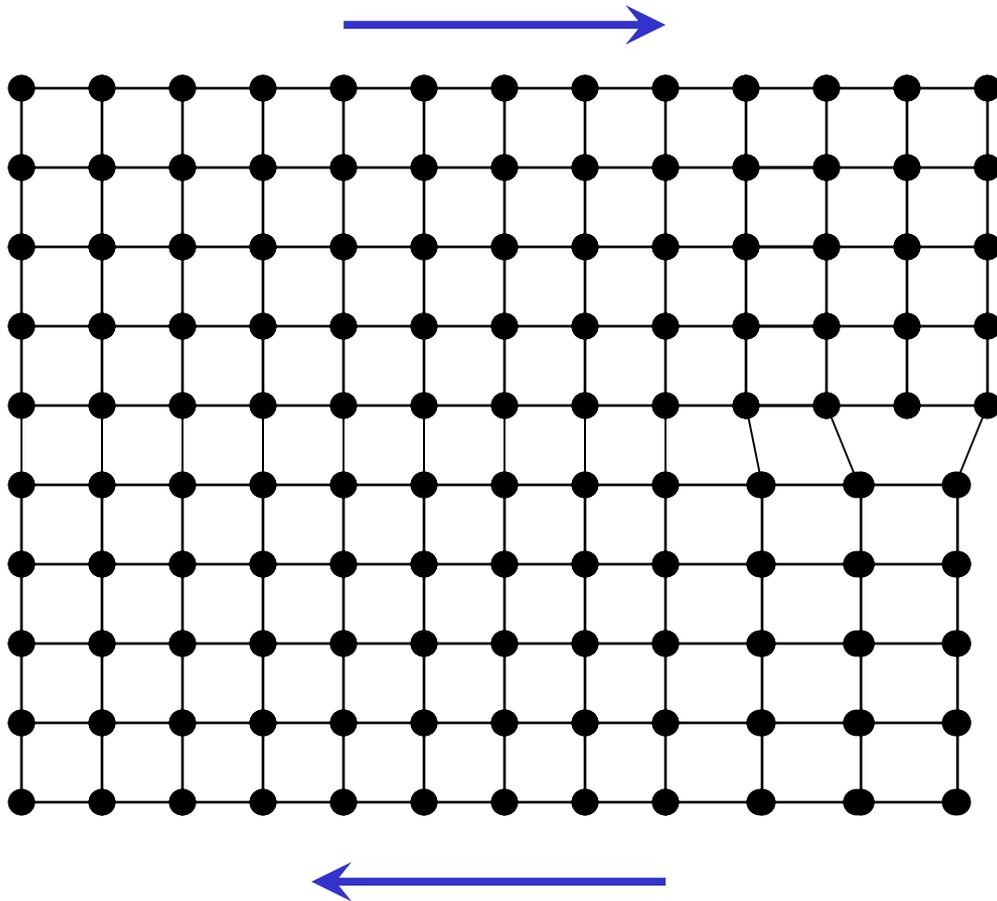


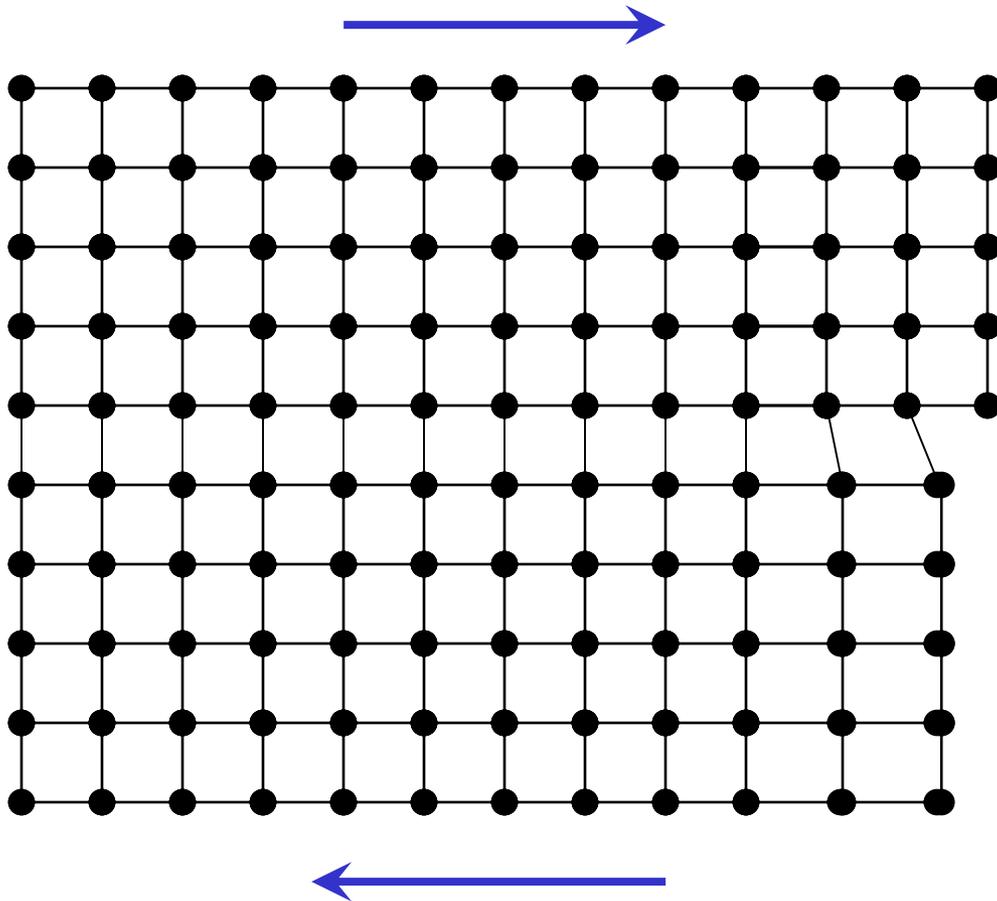


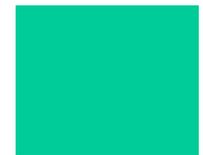
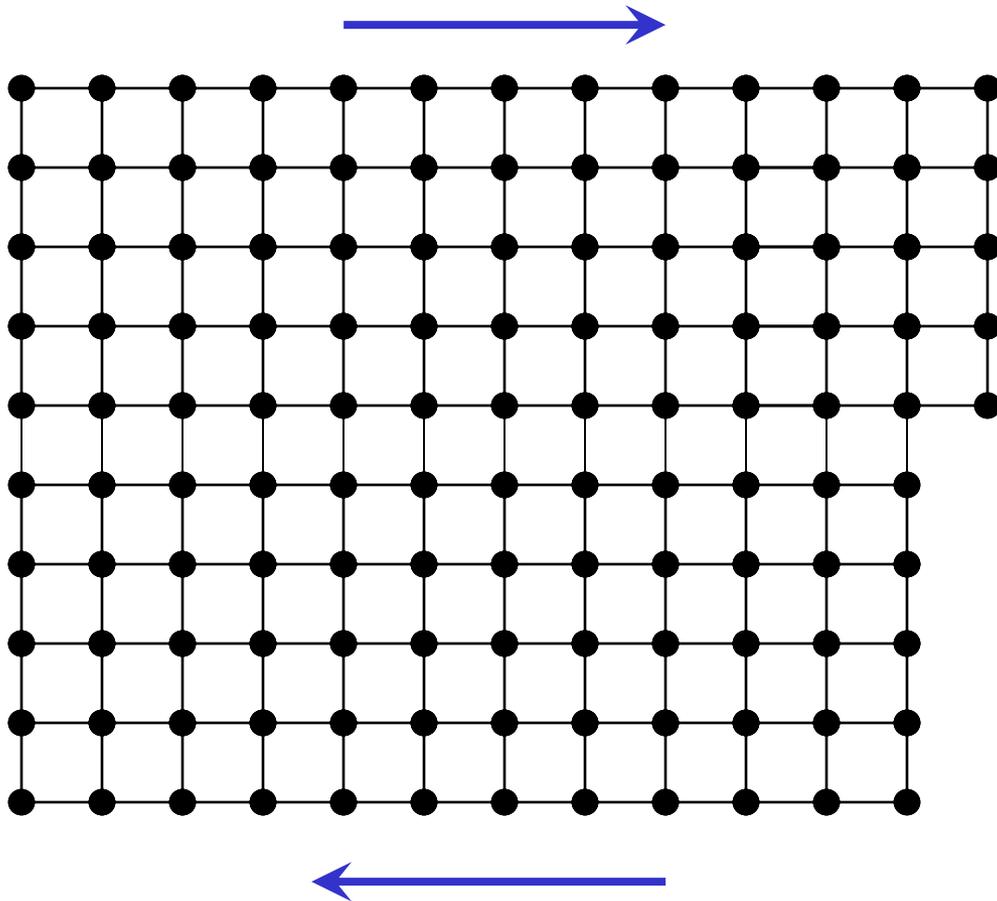






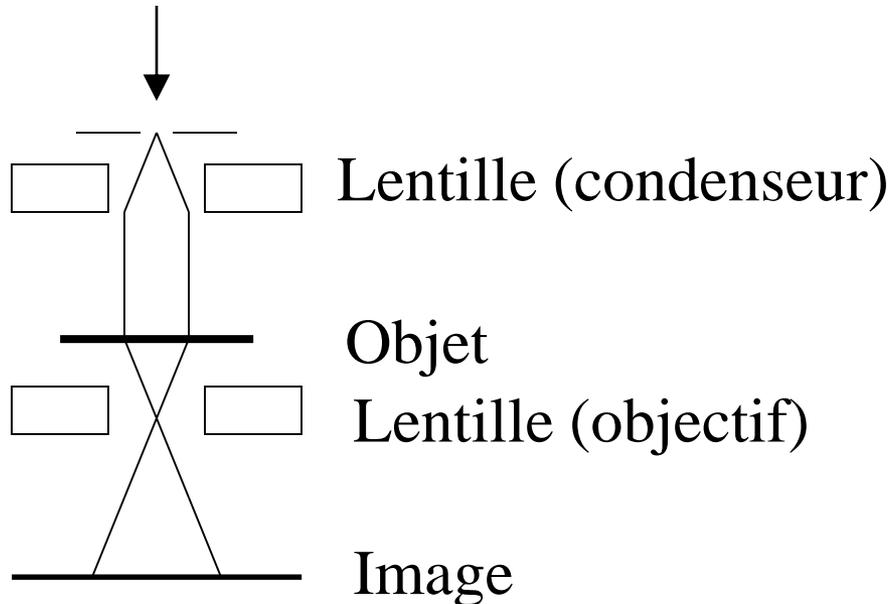




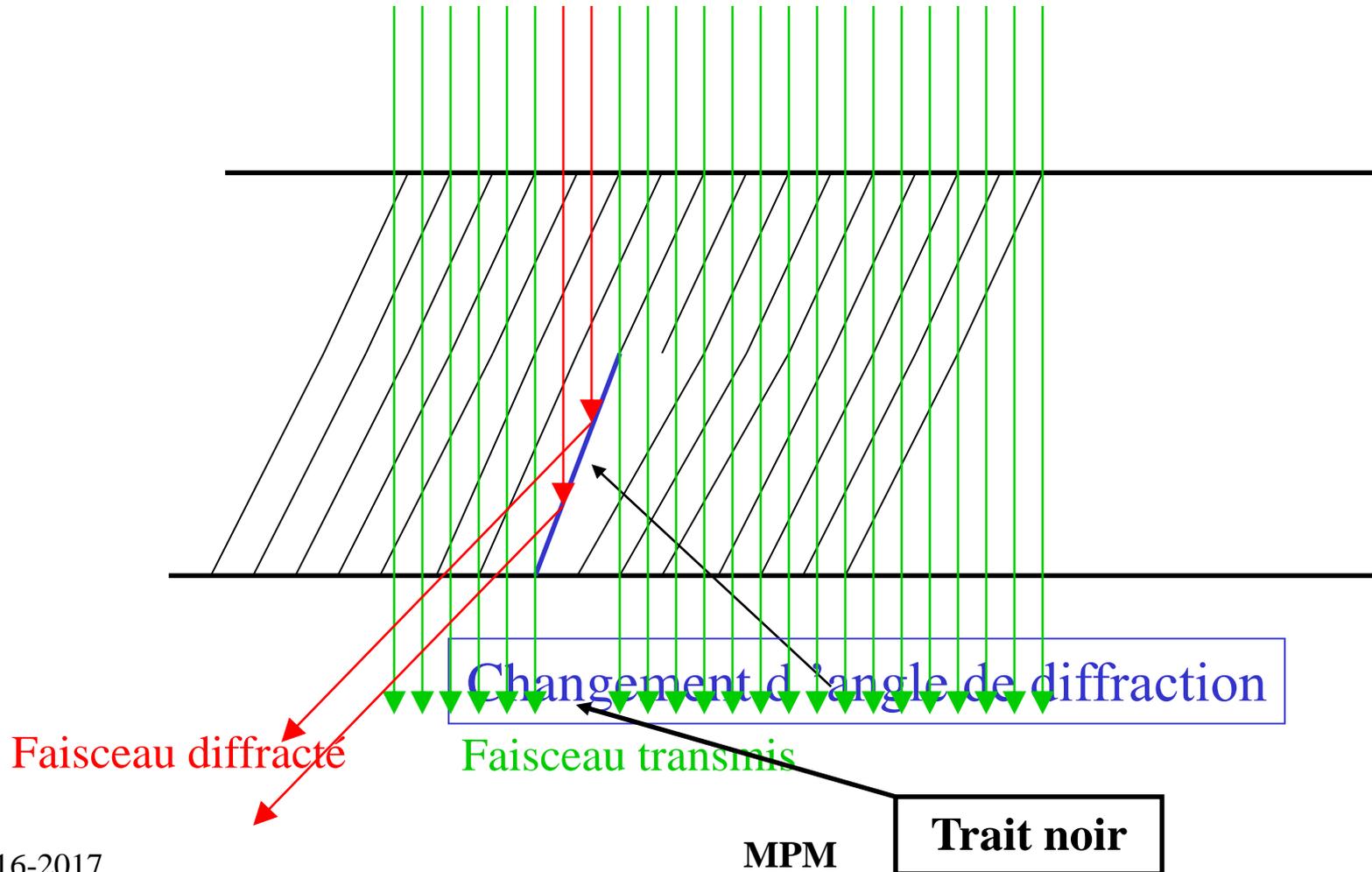


# Schéma du microscope électronique à transmission (MET)

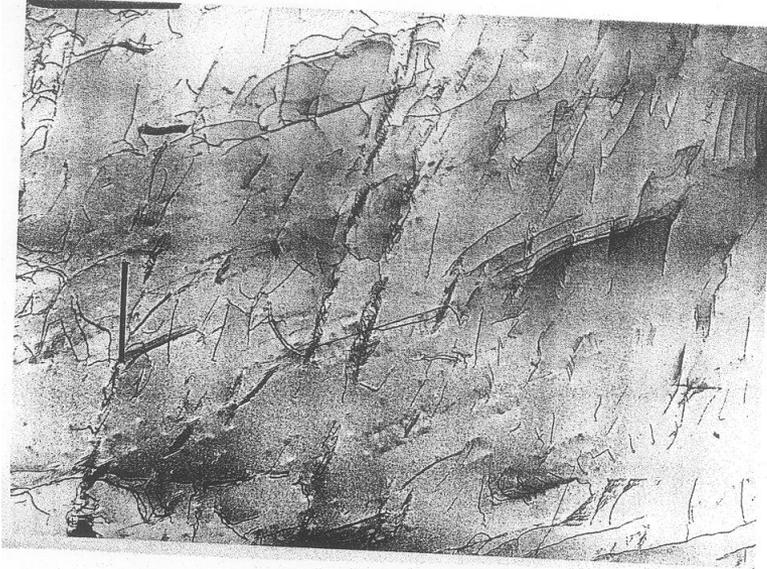
Filament de tungstène



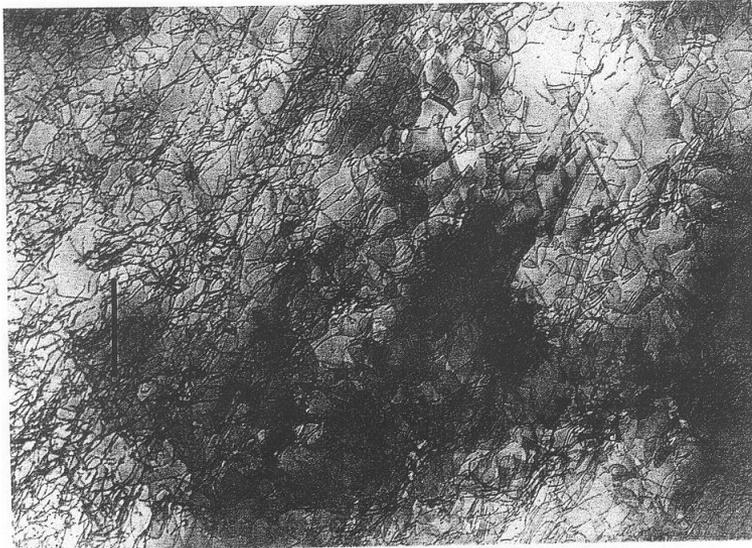
# Observation au MET d'une dislocation



# Observation de dislocations au MET



Densité de dislocation  $10^6 \text{ km/cm}^3$

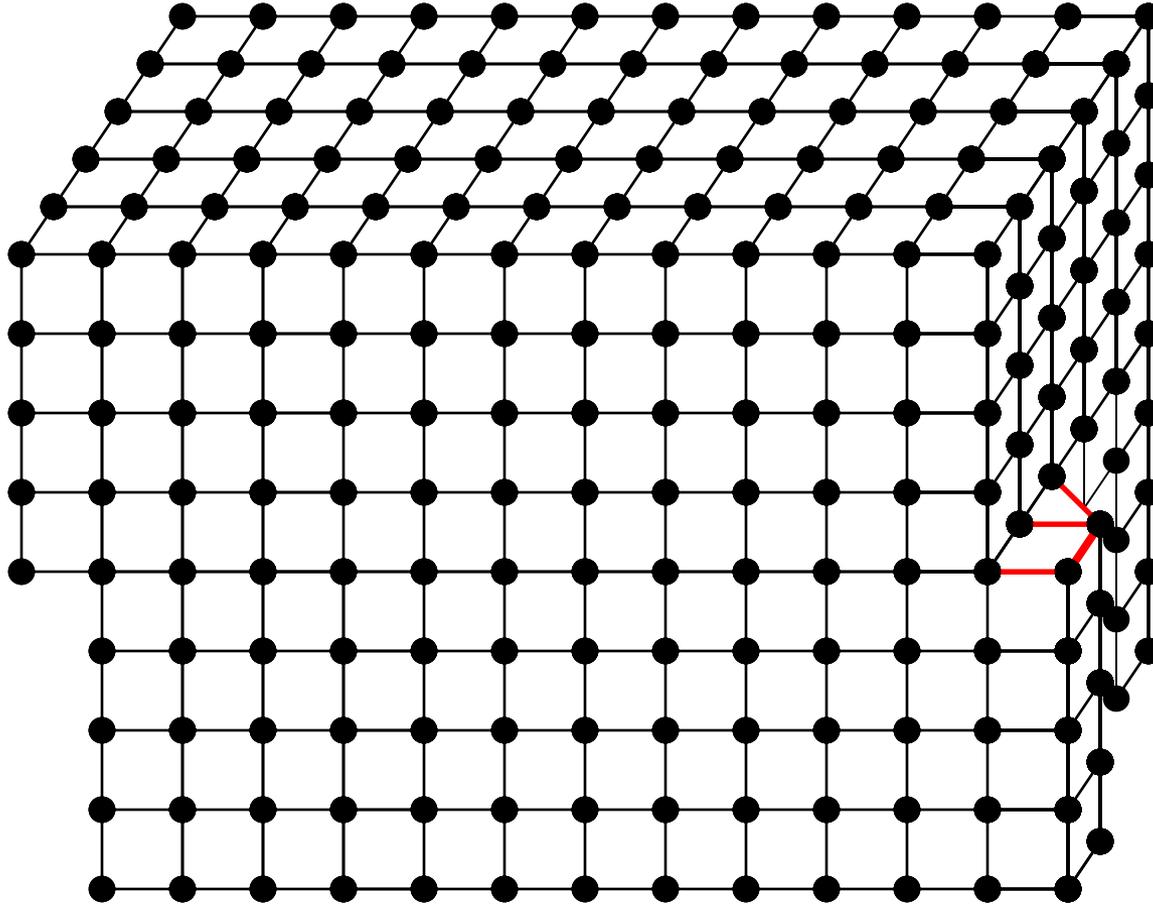


Eprouvette écrouie : augmentation du nombre de dislocations

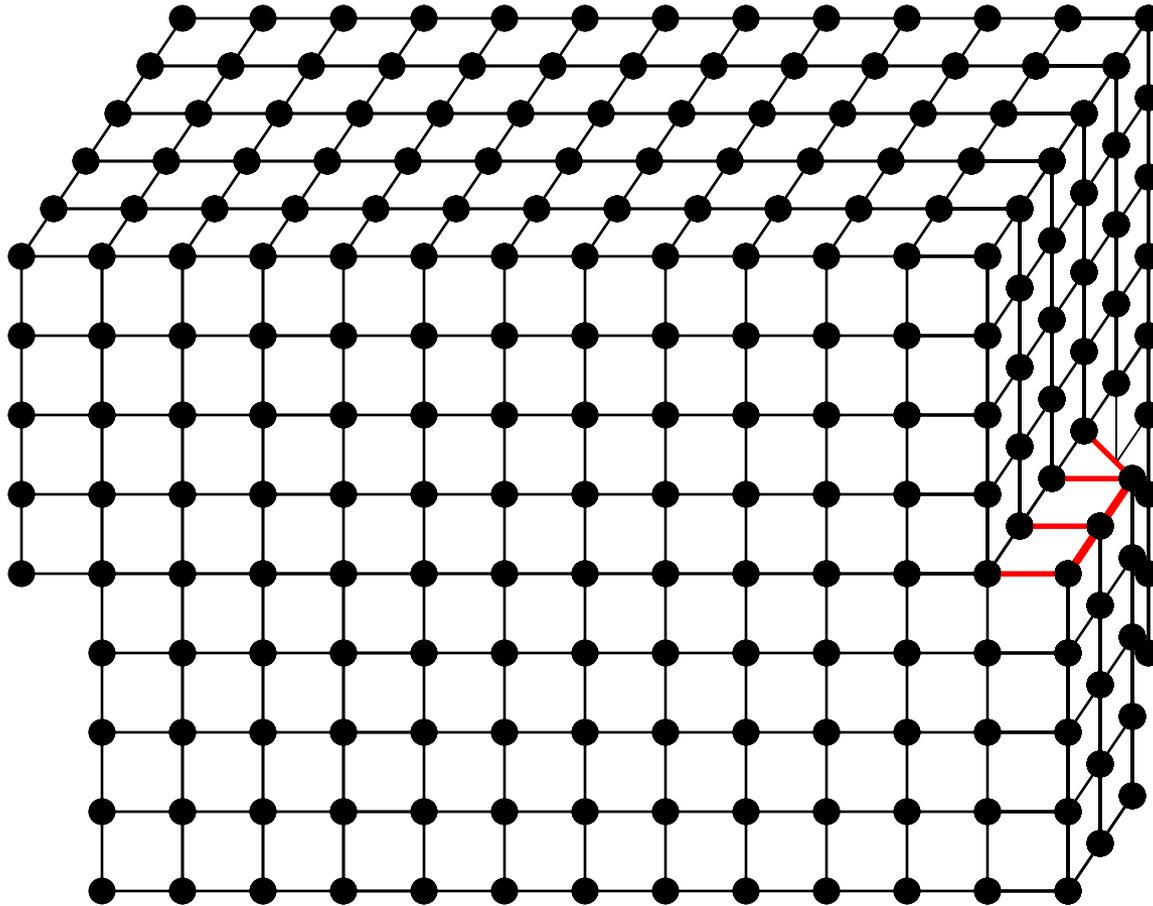
Densité de dislocation  $10^7 \text{ km/cm}^3$

**Problème: d'où vient cette augmentation?**

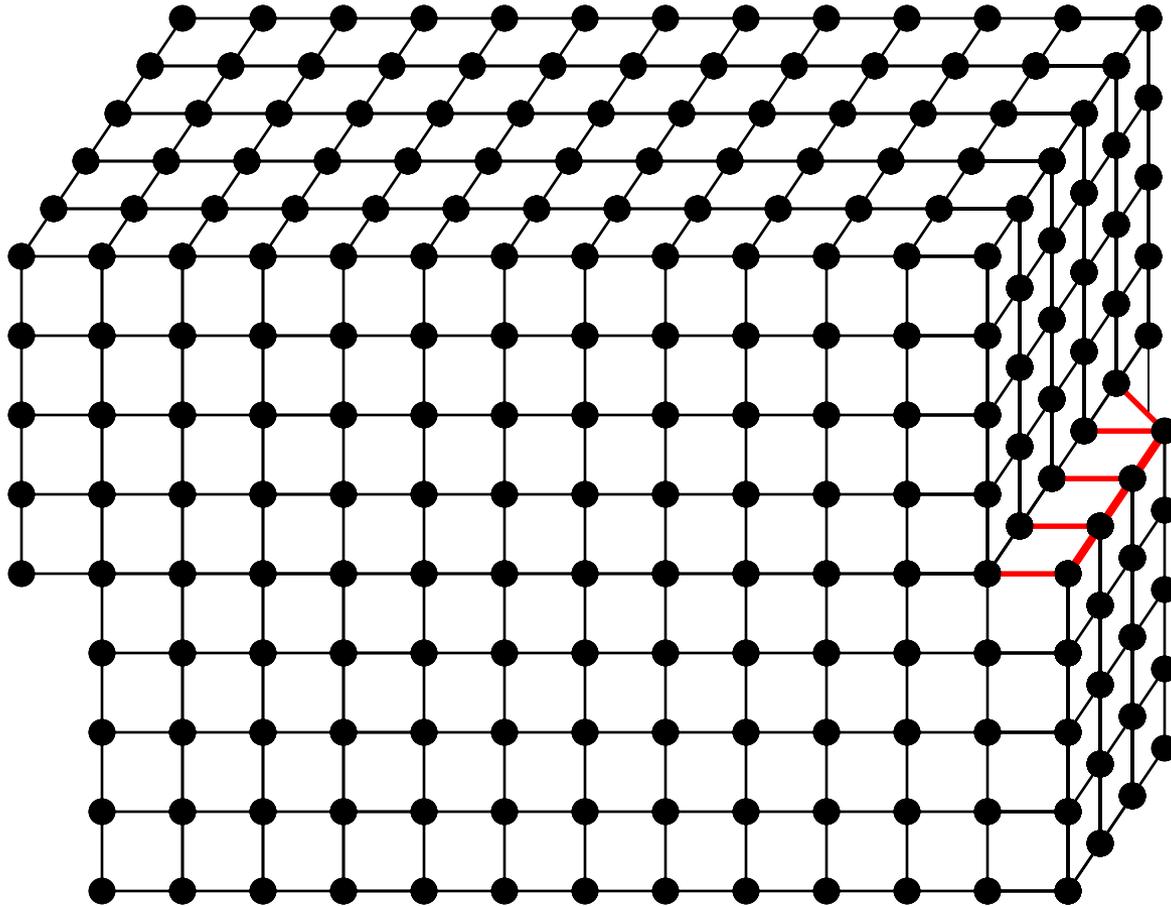
# Dislocation vis



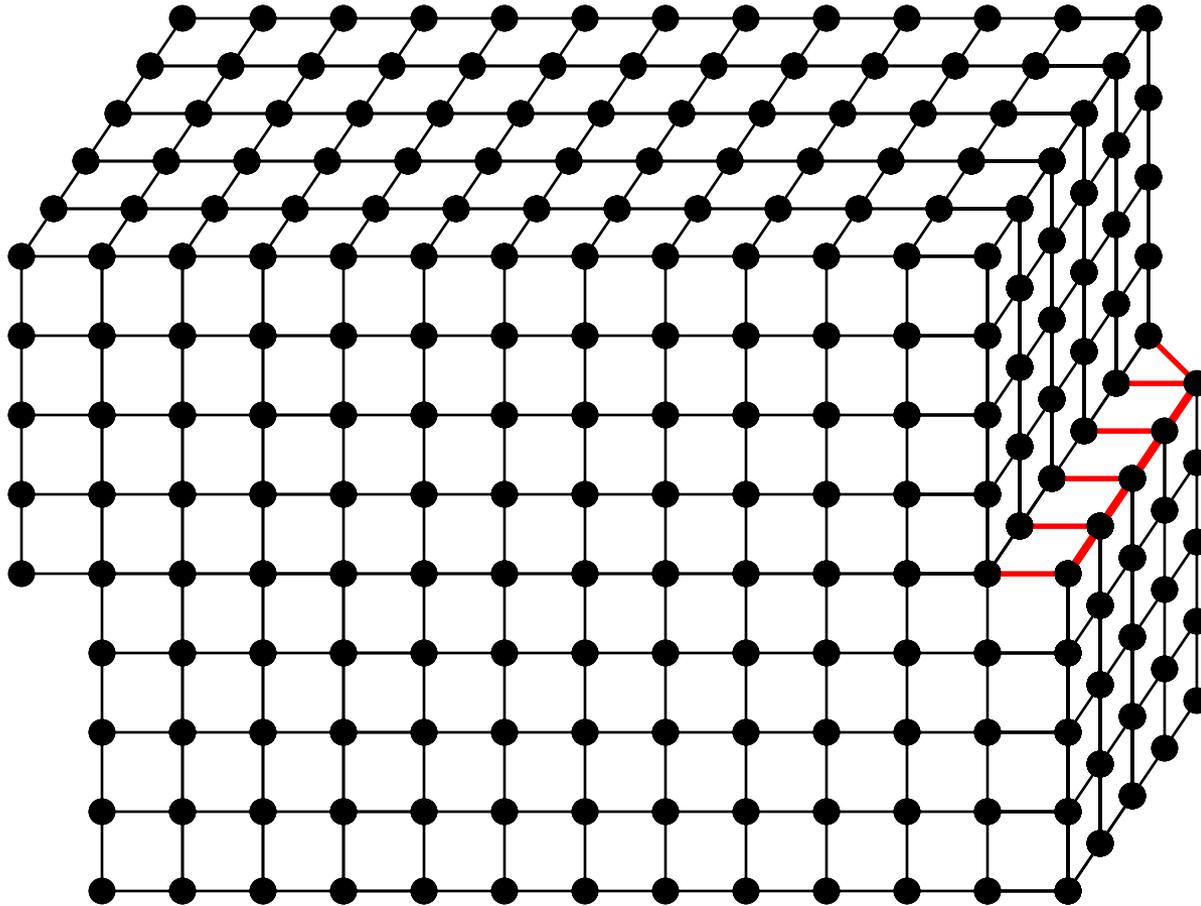
# Dislocation vis



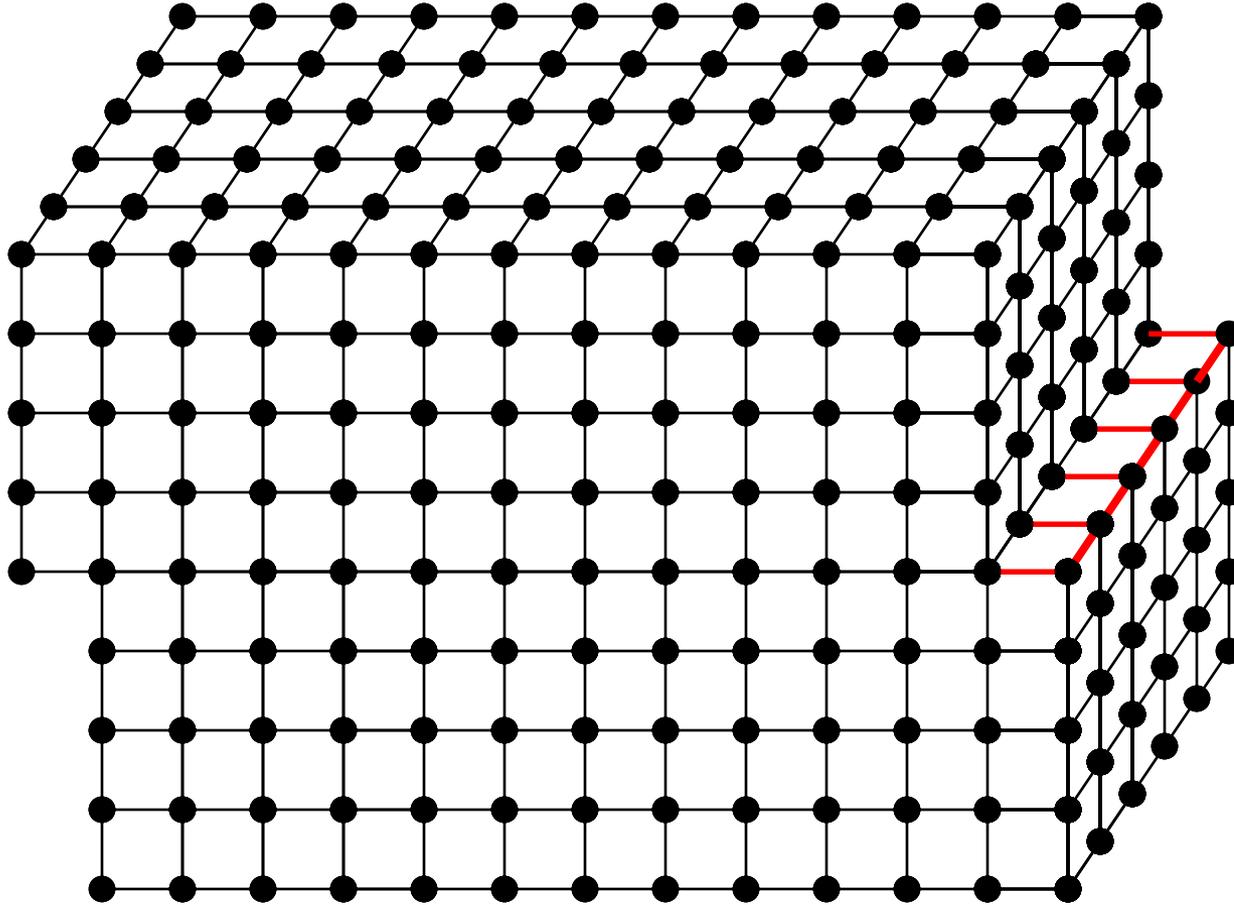
# Dislocation vis



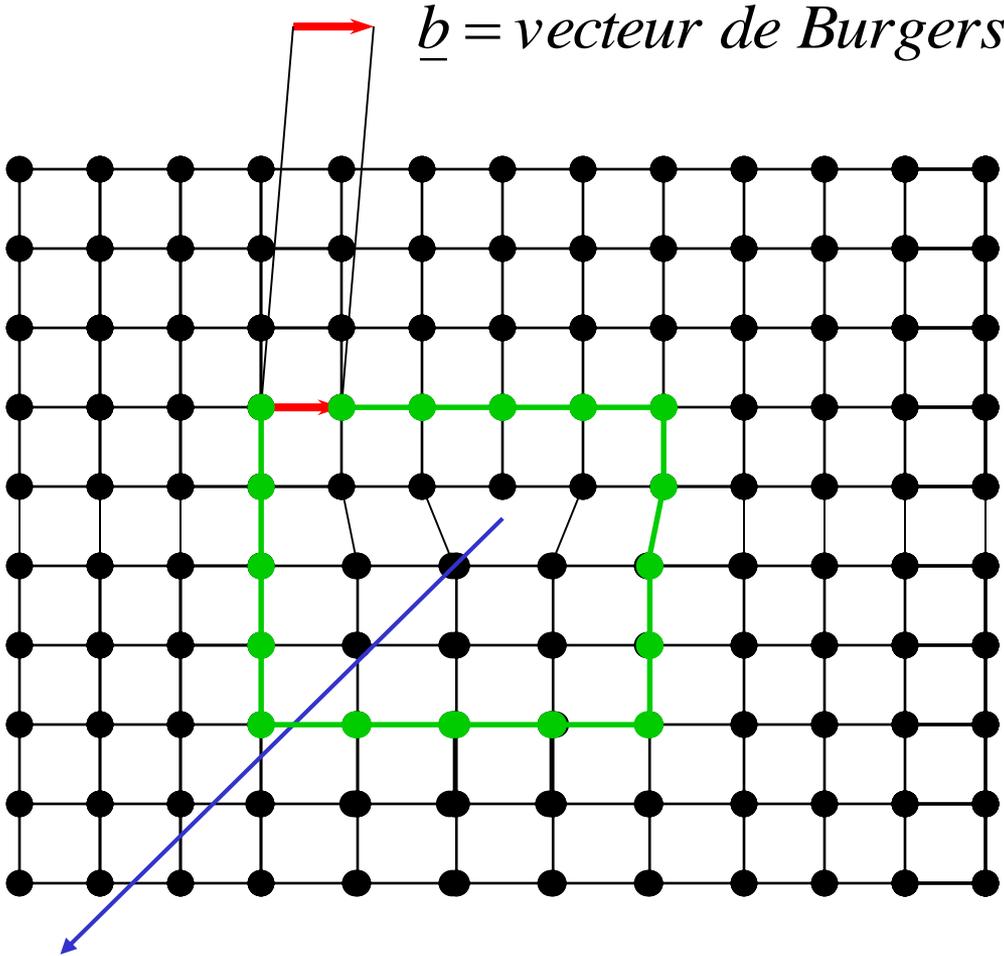
# Dislocation vis



# Dislocation vis



# Dislocation coin



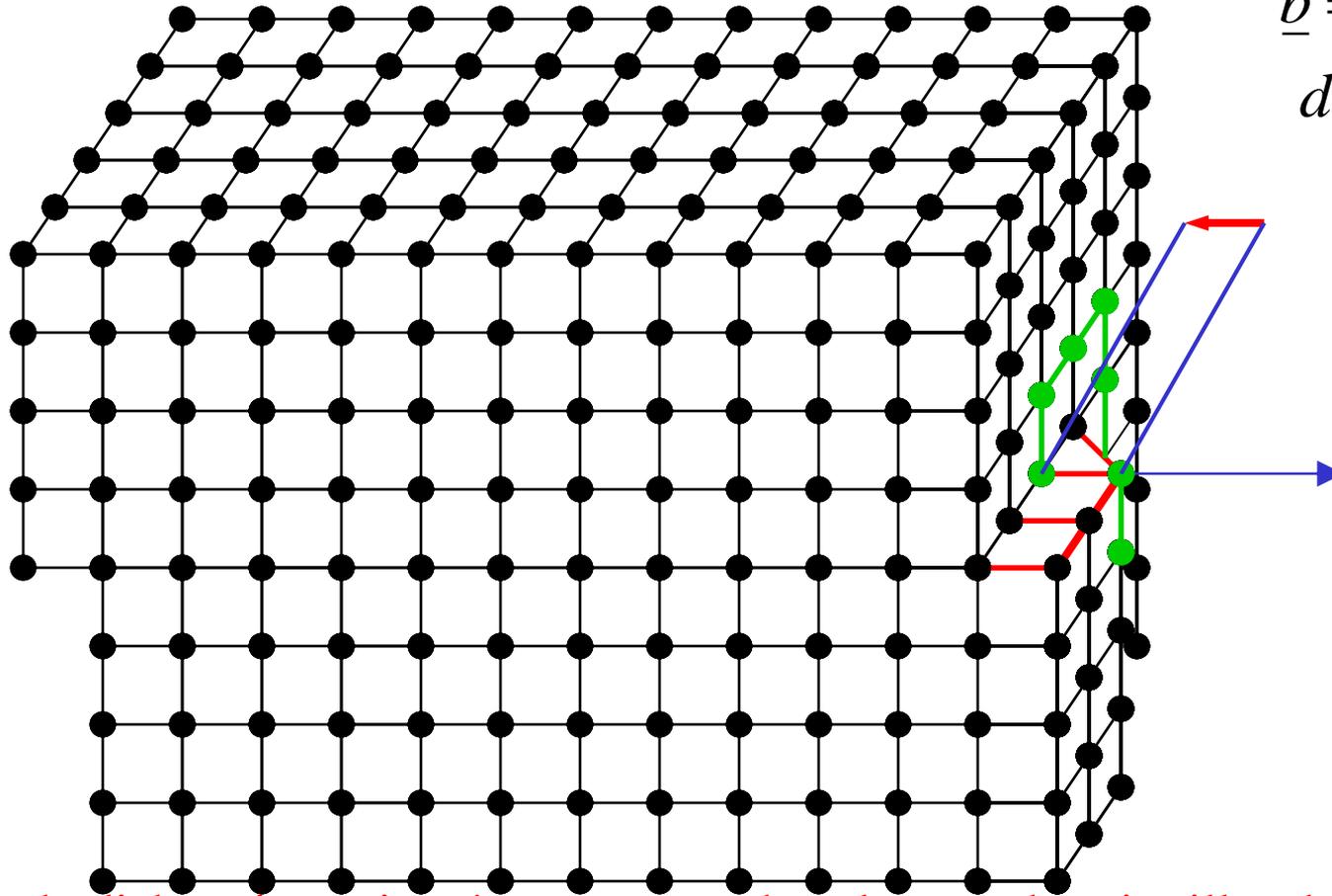
Perpendiculaire  
à la ligne  
de dislocation

Ligne de dislocation orientée; on tourne dans le sens des aiguilles d'une montre

**Le vecteur de Burgers « ferme la ligne »**

# Dislocation vis

Parallèle à la ligne  
de dislocation



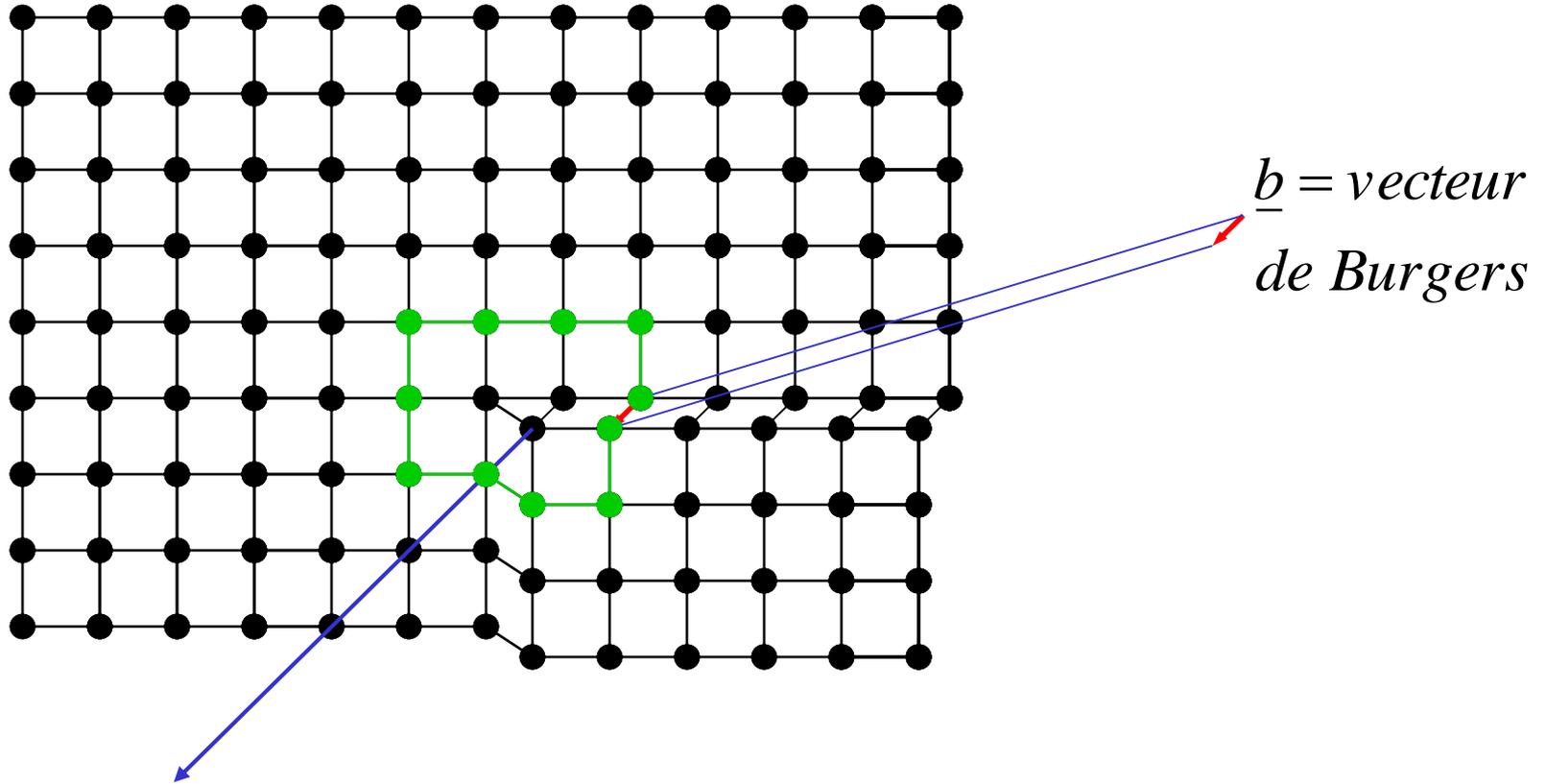
$\underline{b}$  = vecteur  
de Burgers

Ligne de dislocation orientée; on tourne dans le sens des aiguilles d'une montre

Le vecteur de Burgers « ferme la ligne »

# Dislocation vis

Parallèle à la ligne  
de dislocation



Ligne de dislocation orientée; on tourne dans le sens des aiguilles d'une montre

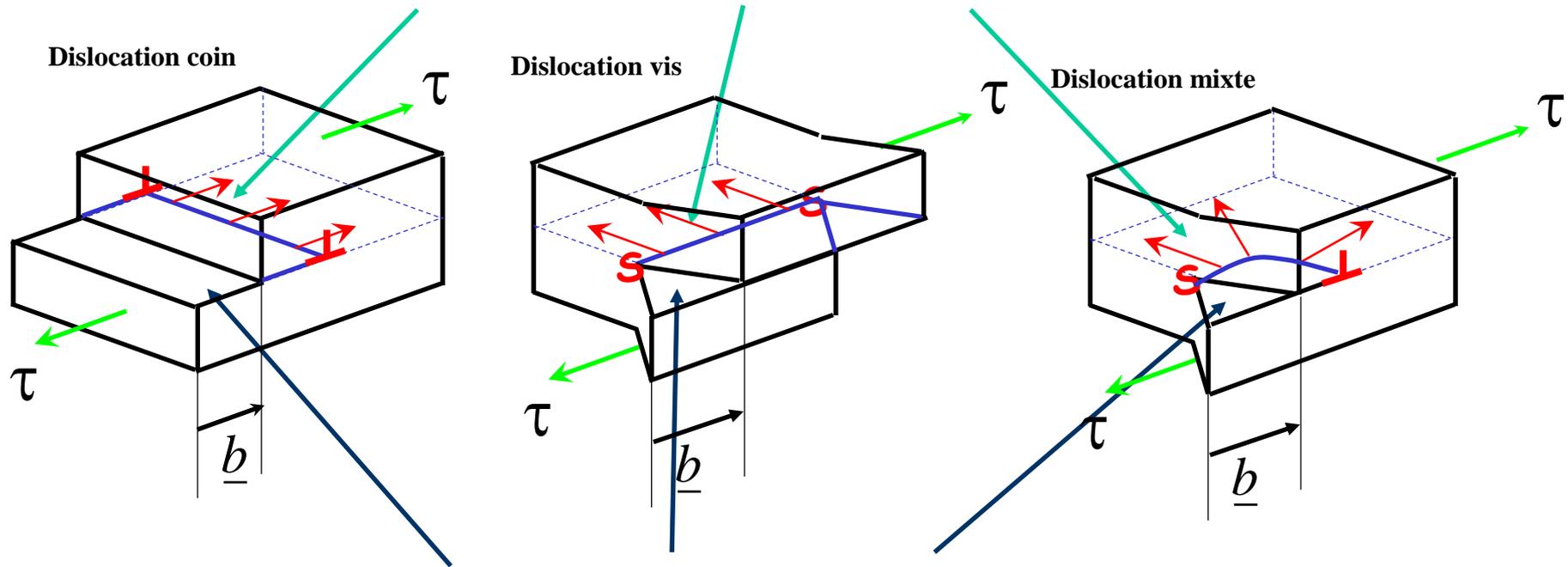
**Le vecteur de Burgers « ferme la ligne »**

MPM

Alain Ehrlacher

# Déplacement des dislocations

Sens du déplacement des dislocations

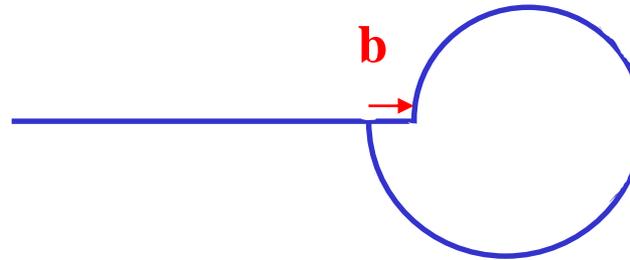
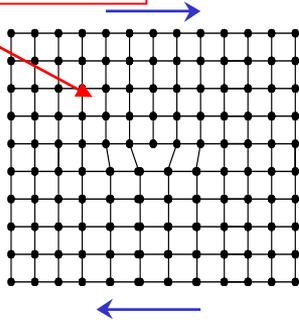


Zones de glissement

# Champ de contrainte élastique au voisinage d'une dislocation

Volterra 1907

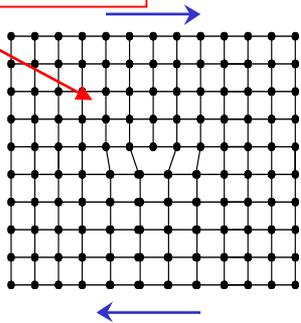
Hypothèse:  
Élasticité  
isotrope



# Champ de contrainte élastique au voisinage d'une dislocation

Volterra 1907

Hypothèse:  
Élasticité  
isotrope

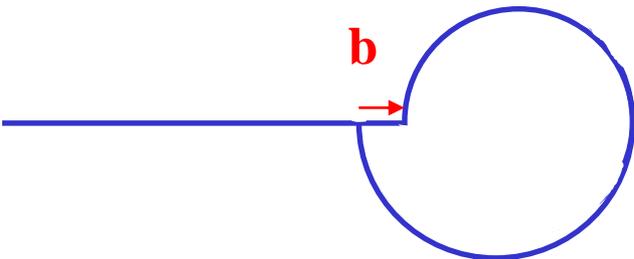


$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \frac{-\mu b \sin(\theta)}{\pi r}$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\mu b \cos(\theta)}{\pi r}$$

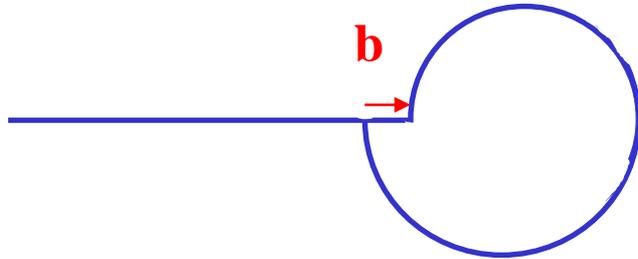
$$\sigma_{zz} = \frac{-2\mu b v \sin(\theta)}{\pi r}$$

$$\begin{aligned} \underline{\text{div}}(\underline{\underline{\sigma}}) = & \left[ \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} \right] e_r \\ & + \left[ \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\sigma_{r\theta}}{r} \right] e_\theta \\ & + \left[ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{z\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} \right] e_z = \underline{0} \end{aligned}$$



**Equilibre vérifié**

# Champ de contrainte élastique au voisinage d'une dislocation



Volterra 1907

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \frac{-\mu b \sin(\theta)}{\pi r}$$

$$\varepsilon_{rr} = \varepsilon_{\theta\theta} = (1-2\nu) \frac{-b \sin(\theta)}{2\pi r}$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\mu b \cos(\theta)}{\pi r}$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{b \cos(\theta)}{2\pi r}$$

$$\sigma_{zz} = \frac{-2\mu b \nu \sin(\theta)}{\pi r}$$

$$\varepsilon_{zz} = 0$$

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} (\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}))$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{r\theta}$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} (\sigma_{\theta\theta} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{zz}))$$

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

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}))$$

**Déformation plane**

$$\varepsilon_{rr} = \varepsilon_{\theta\theta} = (1-2\nu) \frac{-b \sin(\theta)}{2\pi r}$$

$$\xi_r = (1-2\nu) \frac{-b}{2\pi} \sin(\theta) \log(r) + f(\theta)$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{b \cos(\theta)}{2\pi r}$$

$$\xi_{\theta} = (1-2\nu) \frac{-b}{2\pi} \cos(\theta) \log(r) - \int f(\theta) + (1-2\nu) \frac{b}{2\pi} \cos(\theta) + g(r)$$

$$\varepsilon_{zz} = 0$$

$$\underline{\underline{\text{grad}(\xi)}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_r}{\partial r} & \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial \xi_r}{\partial \theta} - \xi_{\theta} \right] & \frac{\partial \xi_r}{\partial z} \\ \frac{\partial \xi_{\theta}}{\partial r} & \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial \xi_{\theta}}{\partial \theta} + \xi_r \right] & \frac{\partial \xi_{\theta}}{\partial z} \\ \frac{\partial \xi_z}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial \xi_z}{\partial \theta} & \frac{\partial \xi_z}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial \xi_r}{\partial \theta} - \xi_{\theta} \right] + \frac{\partial \xi_{\theta}}{\partial r} \right)$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \left[ f'(\theta) + \int f(\theta) - (1-2\nu) \frac{b}{2\pi} \cos(\theta) - g(r) + (1-2\nu) \frac{-b}{2\pi} \cos(\theta) \right] + g'(r) \right)$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \left[ f'(\theta) + \int f(\theta) - g(r) \right] + g'(r) \right)$$

$$g(r) = Cr$$

Mouvement de rotation de corps rigide

$$f'(\theta) + \int f(\theta) = \frac{b}{\pi} \cos(\theta)$$

Choix:  $C=0$

Choix:  $Cste1=Cste2=0$

$$f'(\theta) + \int f(\theta) = \frac{b}{\pi} \cos(\theta)$$

$$\int f(\theta) = \frac{b\theta}{2\pi} \sin(\theta) + Cste1.\cos(\theta) + Cste2.\sin(\theta)$$

$$f(\theta) = \frac{b}{2\pi} (\sin(\theta) + \theta \cos(\theta)) - Cste1.\sin(\theta) + Cste2.\cos(\theta)$$

$$\xi_r = (1-2\nu) \frac{-b}{2\pi} \sin(\theta) \log(r) + f(\theta)$$

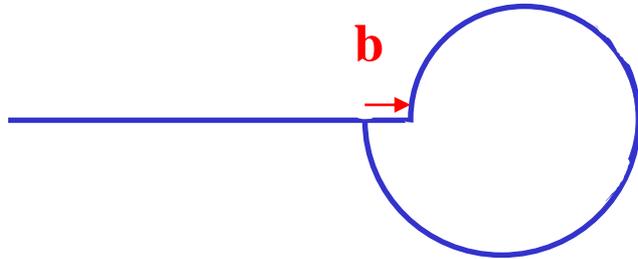
$$\xi_r = (1-2\nu) \frac{-b}{2\pi} \sin(\theta) \log(r) + \frac{b}{2\pi} (\sin(\theta) + \theta \cos(\theta)) - Cste1.\sin(\theta) + Cste2.\cos(\theta)$$

$$\xi_\theta = (1-2\nu) \frac{-b}{2\pi} \cos(\theta) \log(r) - \int f(\theta) + (1-2\nu) \frac{b}{2\pi} \cos(\theta) + g(r)$$

$$\xi_\theta = (1-2\nu) \frac{-b}{2\pi} \cos(\theta) \log(r) - \frac{b\theta}{2\pi} \sin(\theta) - Cste1.\cos(\theta) - Cste2.\sin(\theta) + (1-2\nu) \frac{b}{2\pi} \cos(\theta)$$

Mouvement de translation  
de corps rigide

# Champ de contrainte élastique au voisinage d'une dislocation



Volterra 1907

$$\xi_r = (1-2\nu) \frac{-b}{2\pi} \sin(\theta) \log(r) + \frac{b}{2\pi} (\sin(\theta) + \theta \cos(\theta))$$

$$\xi_\theta = (1-2\nu) \frac{b}{2\pi} \cos(\theta) [1 - \log(r)] - \frac{b\theta}{2\pi} \sin(\theta)$$

$$\xi_z = 0$$

*En  $\theta = \pm\pi$   $\xi_r$  est discontinu*

$$\|\xi_r\| = b$$

# Champ de contrainte élastique au voisinage d'une dislocation

Volterra 1907

$$\varepsilon_{rr} = \varepsilon_{\theta\theta} = (1-2\nu) \frac{-b \sin(\theta)}{2\pi r}$$

$$\underline{\underline{R}} = 2\mu \left[ \frac{\nu}{1-2\nu} \underline{\underline{I}} \otimes \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{I}} \right]$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{b \cos(\theta)}{2\pi r}$$

$$W = \frac{1}{2} \underline{\underline{\varepsilon}} : \underline{\underline{R}} : \underline{\underline{\varepsilon}} = \mu \underline{\underline{\varepsilon}} : \left[ \frac{\nu}{1-2\nu} \underline{\underline{I}} \otimes \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{I}} \right] : \underline{\underline{\varepsilon}} = \mu \left[ \frac{\nu}{1-2\nu} \text{tr}(\underline{\underline{\varepsilon}})^2 + \underline{\underline{\varepsilon}} : \underline{\underline{\varepsilon}} \right]$$

$$\varepsilon_{zz} = 0$$

$$W = \mu \frac{b^2}{(2\pi r)^2} \left[ 2(1-2\nu) \sin^2(\theta) + \cos^2(\theta) \right]$$

$W$  est non intégrable

Energie élastique par unité de longueur

$$E = \int_{r_0}^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} W(r, \theta) r d\theta dr \approx \mu b^2$$

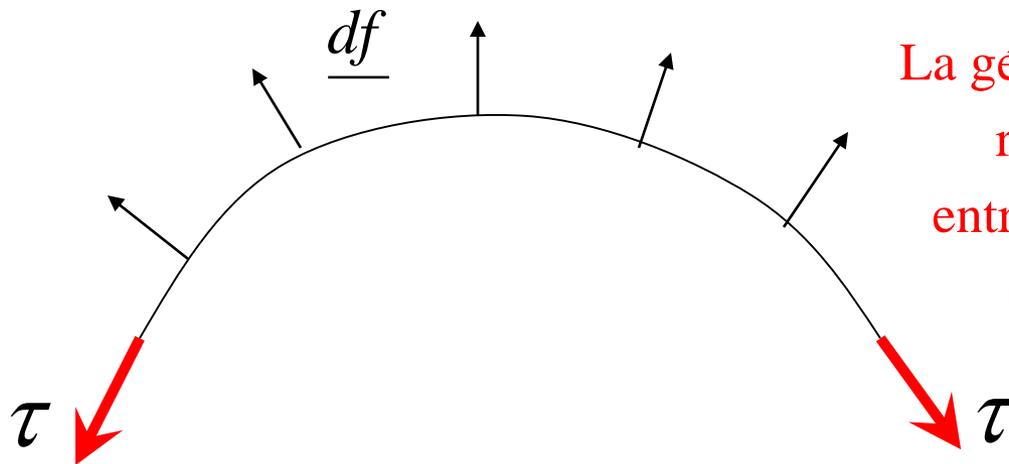
Tension de ligne  $\tau \approx \mu b^2$

Tension de ligne  $\tau \approx \mu b^2$

## Loi de Peach et Koehler:

Un segment  $\underline{dl}$  de dislocation de vecteur de Burgers  $\underline{b}$  dans un champ de contrainte  $\underline{\underline{\sigma}}$  subit une force élémentaire

$$\underline{df} = (\underline{b} \cdot \underline{\underline{\sigma}}) \wedge \underline{dl}$$

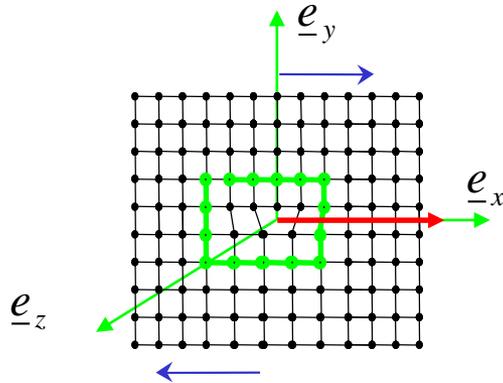


La géométrie de la dislocation  
résulte de l'équilibre  
entre les efforts sur la ligne  
et la tension de ligne

Tension de ligne  $\tau \approx \mu b^2$

## Loi de Peach et Koehler:

Un segment  $\underline{dl}$  de dislocation de vecteur de Burgers  $\underline{b}$  dans un champ de contrainte  $\underline{\underline{\sigma}}$  subit une force élémentaire



$$\underline{df} = (\underline{b} \cdot \underline{\underline{\sigma}}) \wedge \underline{dl}$$

$$\underline{dl} = dl \underline{e}_z \quad \underline{b} = b \underline{e}_x$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \tau (\underline{e}_x \otimes \underline{e}_y + \underline{e}_y \otimes \underline{e}_x)$$

$$\underline{df} = (b\tau \underline{e}_y) \wedge dl \underline{e}_z$$

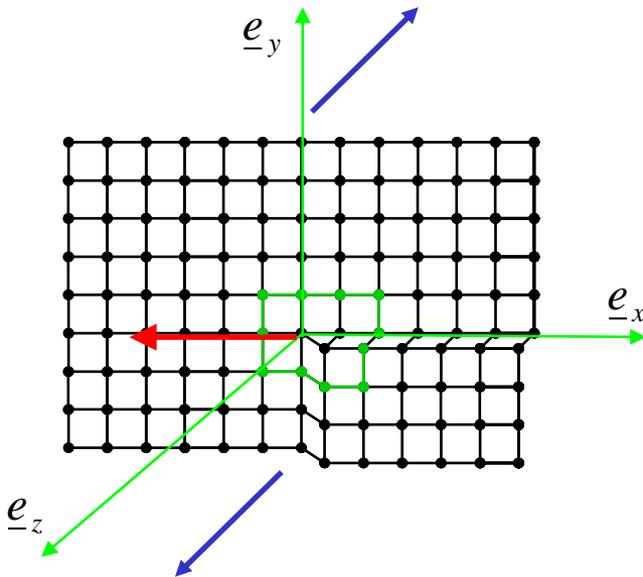
$$\underline{df} = b\tau dl \underline{e}_x$$

Ligne de dislocation orientée; on tourne dans le sens des aiguilles d'une montre

Tension de ligne  $\tau \approx \mu b^2$

## Loi de Peach et Koehler:

Un segment  $\underline{dl}$  de dislocation de vecteur de Burgers  $\underline{b}$  dans un champ de contrainte  $\underline{\underline{\sigma}}$  subit une force élémentaire



$$\underline{df} = (\underline{b} \cdot \underline{\underline{\sigma}}) \wedge \underline{dl}$$

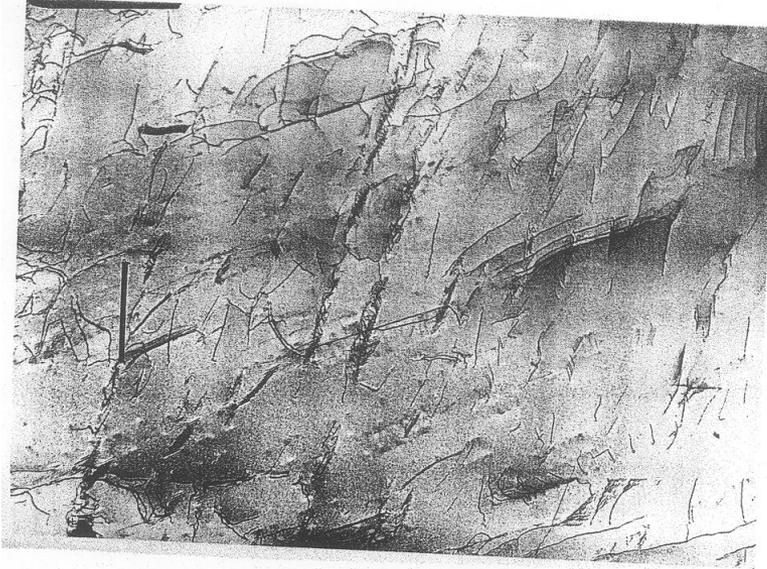
$$\underline{dl} = dl \underline{e}_z \quad \underline{b} = b \underline{e}_z$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = -\tau (\underline{e}_z \otimes \underline{e}_y + \underline{e}_y \otimes \underline{e}_z)$$

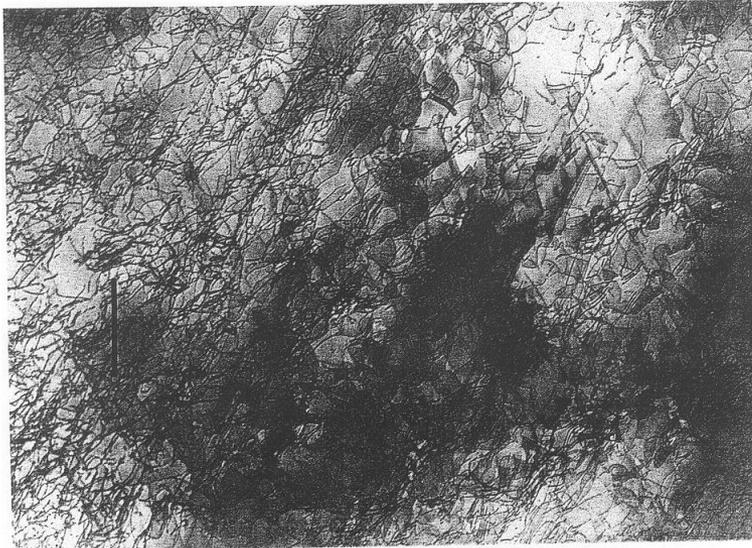
$$\underline{df} = -b\tau dl \underline{e}_x$$

Ligne de dislocation orientée; on tourne dans le sens des aiguilles d'une montre

# Observation de dislocations au MET



Densité de dislocation  $10^6 \text{ km/cm}^3$



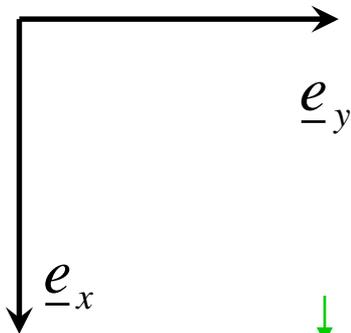
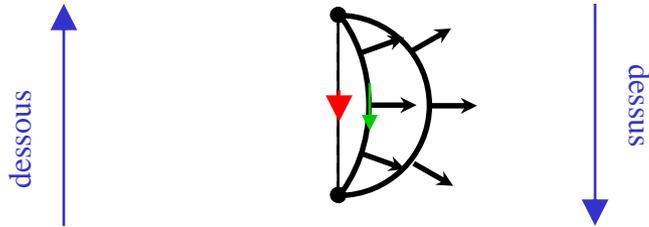
Eprouvette écrouie : augmentation du nombre de dislocations

Densité de dislocation  $10^7 \text{ km/cm}^3$

**Problème: d'où vient cette  
augmentation?**

# Source de Frank et Read

dislocation vis ancrée en deux points



- ↓ Vecteur de Burgers
- ▼ Orientation de la dislocation

$$\underline{b} = b\underline{e}_x$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \tau(\underline{e}_x \otimes \underline{e}_z + \underline{e}_z \otimes \underline{e}_x)$$

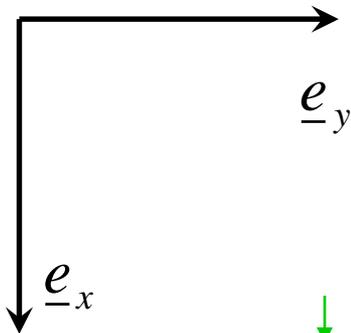
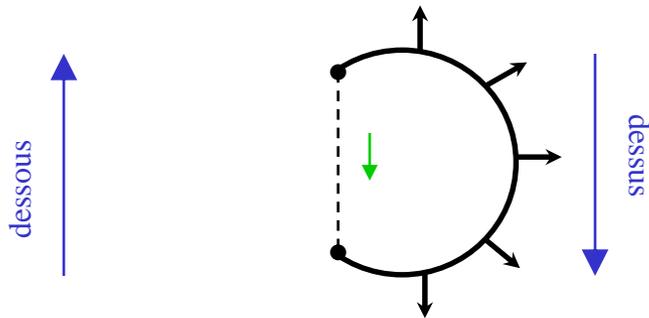
$$\underline{df} = (\underline{b} \cdot \underline{\underline{\sigma}}) \wedge \underline{dl}$$

$$\underline{df} = b\tau\underline{e}_z \wedge \underline{dl}$$

**Force linéique d'intensité uniforme  
perpendiculaire à la ligne**

# Source de Frank et Read

dislocation vis ancrée en deux points



↓ Vecteur de Burgers

▼ Orientation de la dislocation

$$\underline{b} = b\underline{e}_x$$
$$\underline{\underline{\sigma}} = \tau(\underline{e}_x \otimes \underline{e}_z + \underline{e}_z \otimes \underline{e}_x)$$

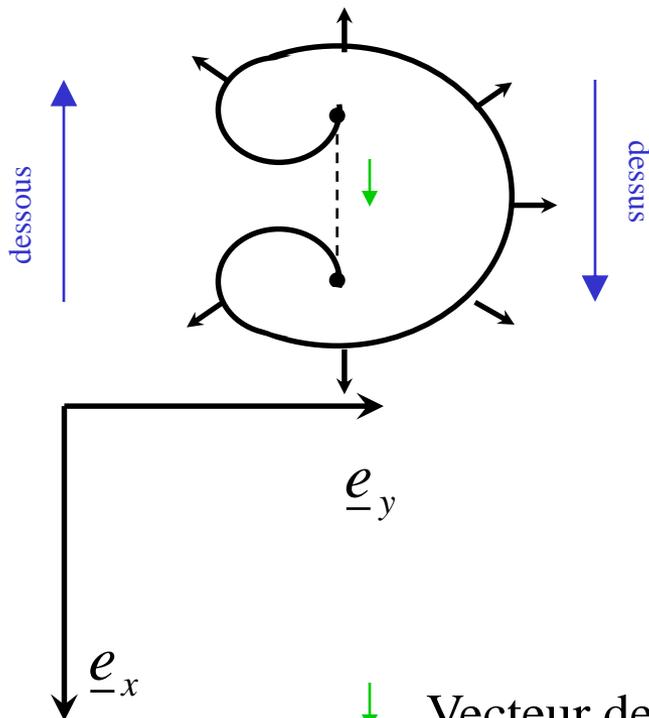
$$\underline{df} = (\underline{b} \cdot \underline{\underline{\sigma}}) \wedge \underline{dl}$$

$$\underline{df} = b\tau\underline{e}_z \wedge \underline{dl}$$

**Force linéique d'intensité uniforme  
perpendiculaire à la ligne**

# Source de Frank et Read

dislocation vis ancrée en deux points



↓ Vecteur de Burgers

▼ Orientation de la dislocation

$$\underline{b} = b\underline{e}_x$$
$$\underline{\underline{\sigma}} = \tau(\underline{e}_x \otimes \underline{e}_z + \underline{e}_z \otimes \underline{e}_x)$$

$$\underline{df} = (\underline{b} \cdot \underline{\underline{\sigma}}) \wedge \underline{dl}$$

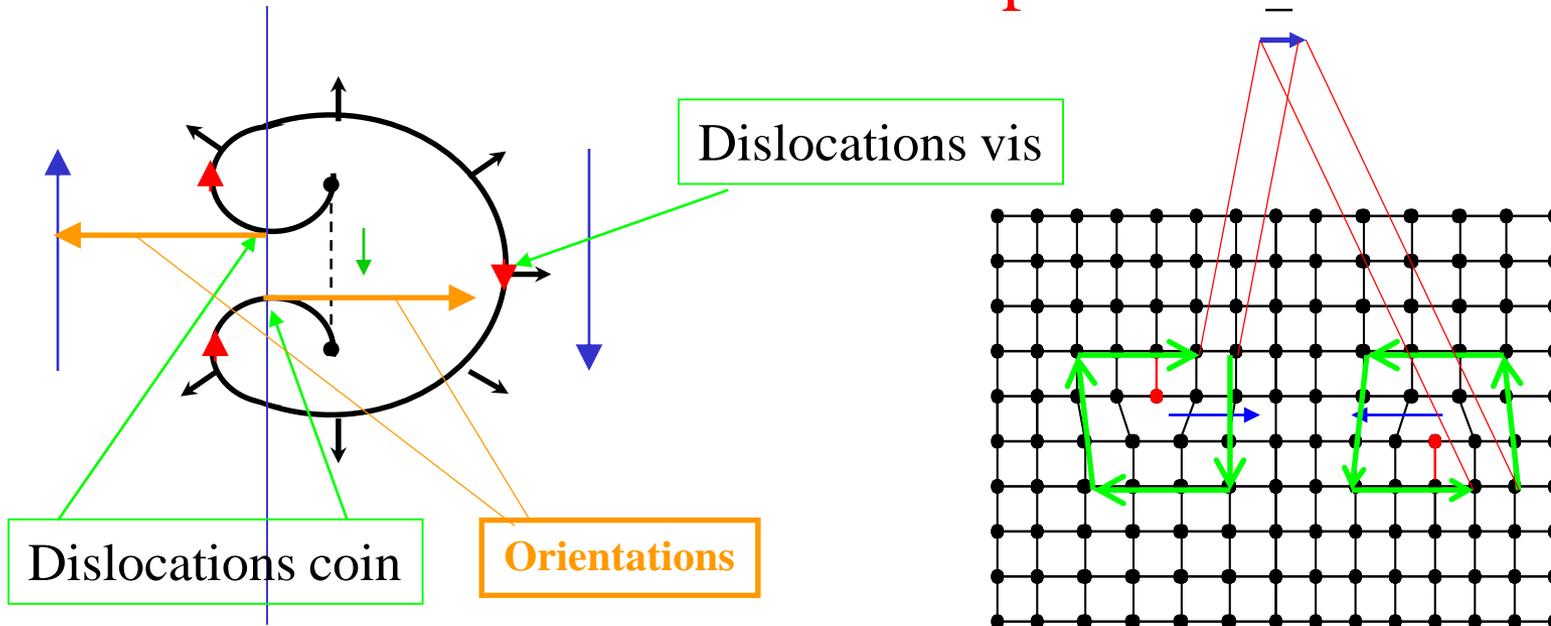
$$\underline{df} = b\tau\underline{e}_z \wedge \underline{dl}$$

**Force linéique d'intensité uniforme  
perpendiculaire à la ligne**

# Source de Frank et Read

dislocation vis ancrée en deux points

$\underline{b}$  = vecteur de Burgers

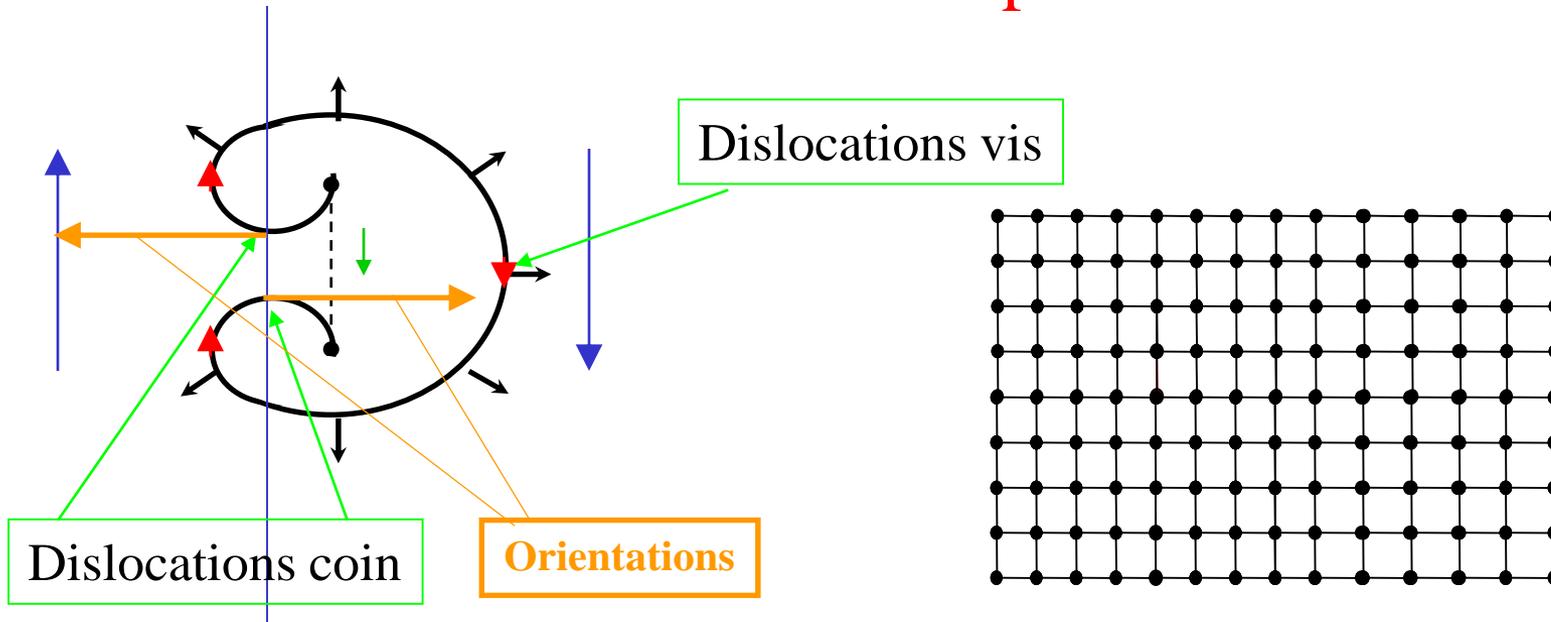


↓ Vecteur de Burgers

▼ Orientation de la dislocation

# Source de Frank et Read

dislocation vis ancrée en deux points

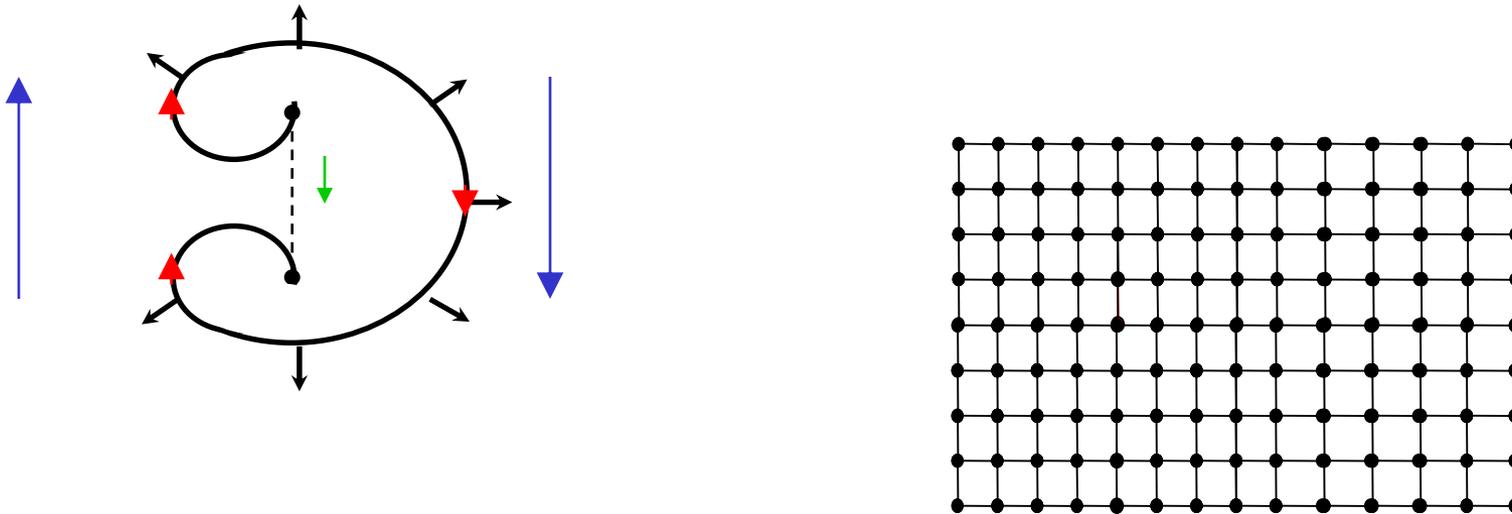


↓ Vecteur de Burgers

▼ Orientation de la dislocation

# Source de Frank et Read

dislocation vis ancrée en deux points

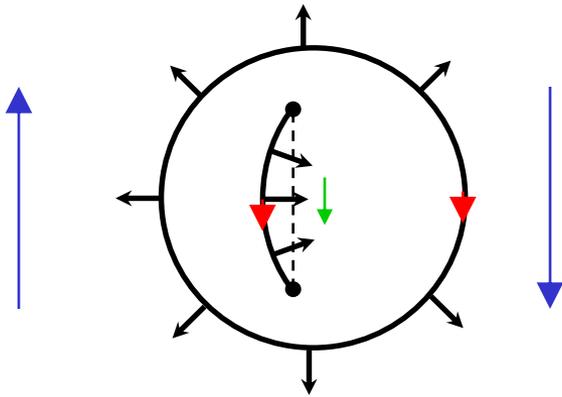


↓ Vecteur de Burgers

▼ Orientation de la dislocation

# Source de Frank et Read

dislocation vis ancrée en deux points

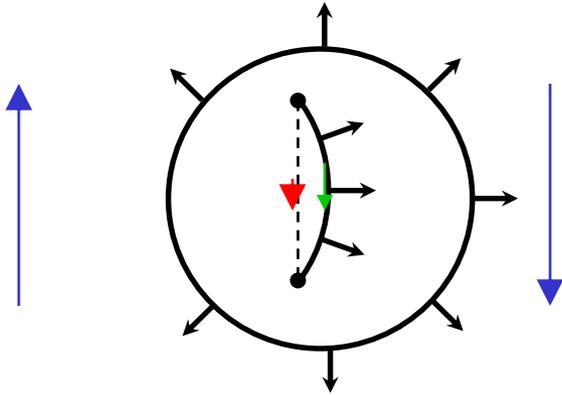


↓ Vecteur de Burgers

▼ Orientation de la dislocation

# Source de Frank et Read

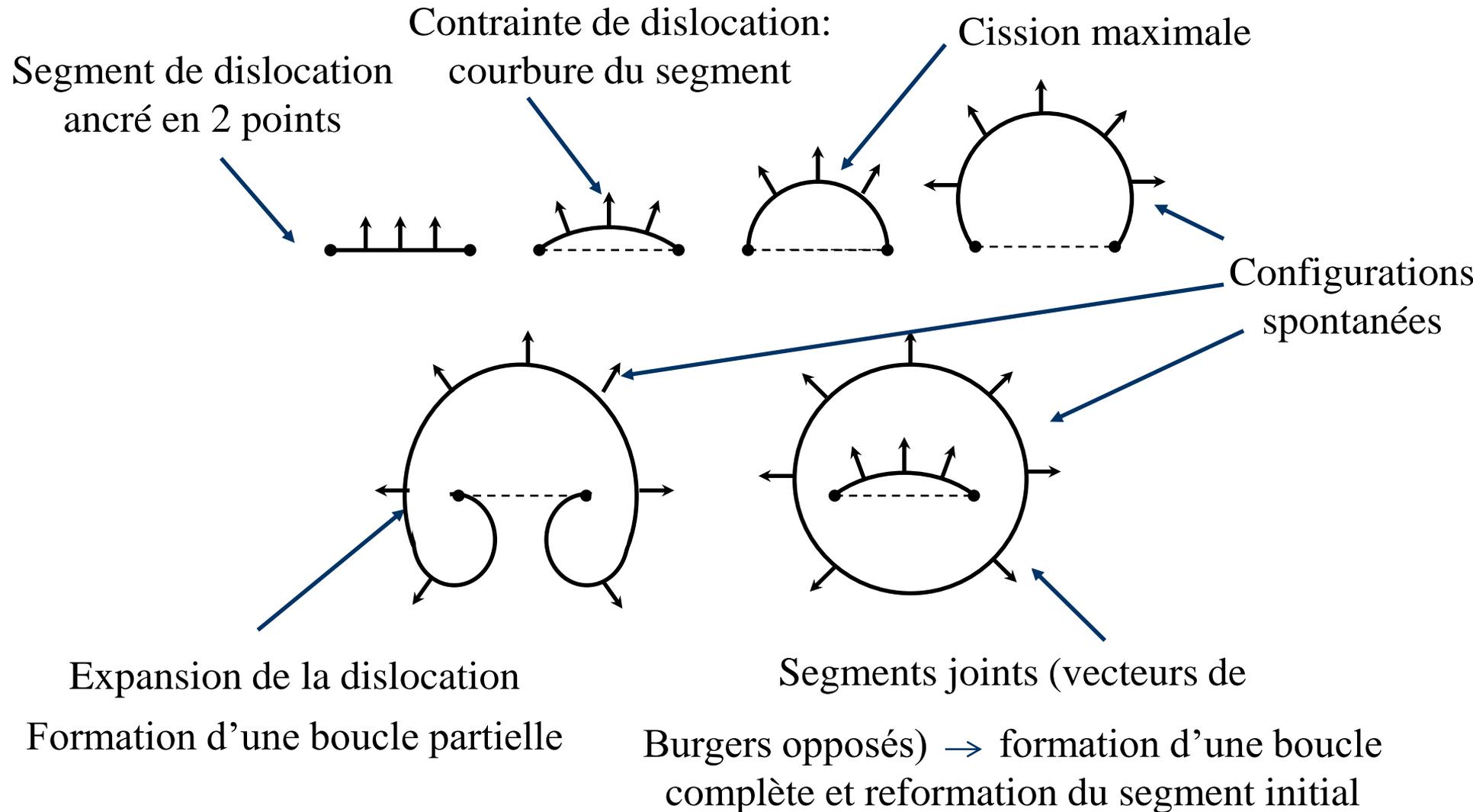
dislocation vis ancrée en deux points

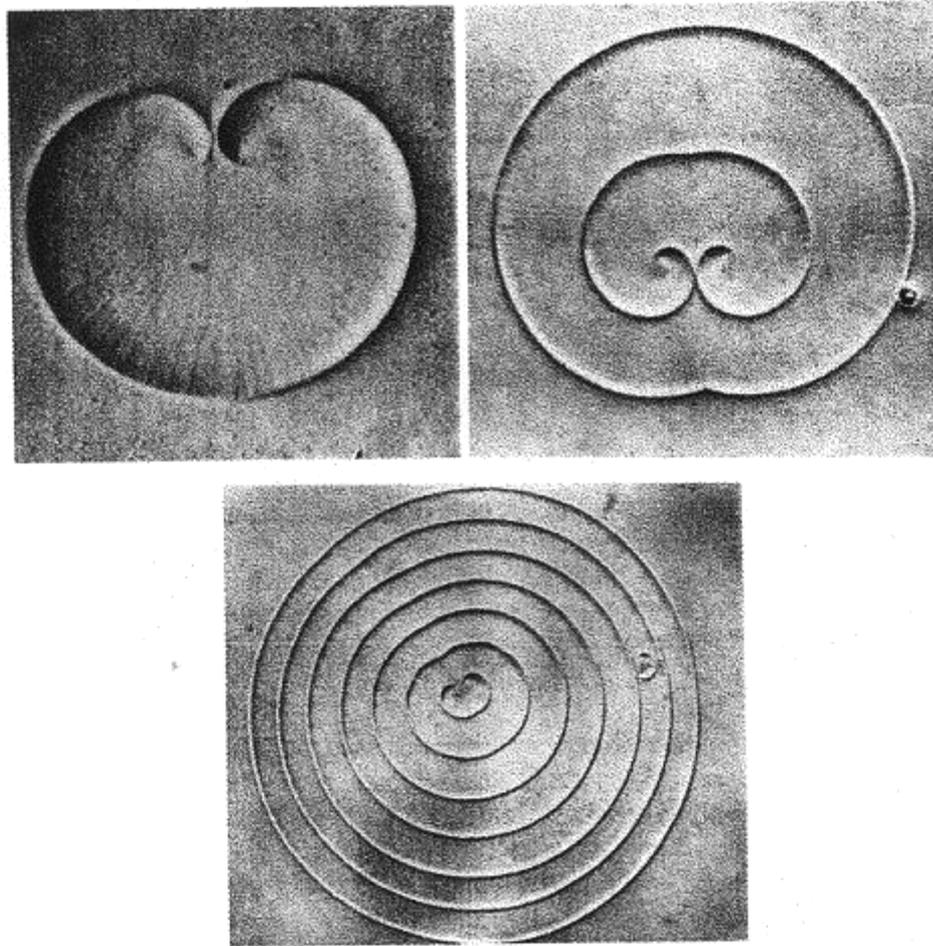


↓ Vecteur de Burgers

▼ Orientation de la dislocation

# Source de Frank et Read

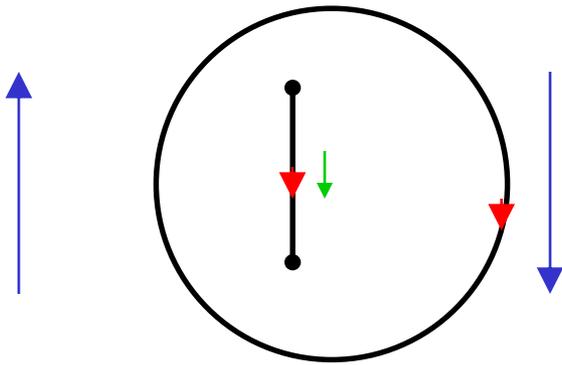




**Figure 3.34.** *Fronts de croissance à la surface d'échantillons d'aluminium polis électrolytiquement ; il s'agit là de marches superficielles résultant de l'émergence de deux dislocations vis (J.M. Marchin et G. Wyon, Acta. Met. 10 (1962)915)*

# Source de Frank et Read

dislocation vis ancrée en deux points



$$\sigma_c = \frac{2\mu b}{L(1-\nu)}$$

$$L \approx 10^3 \text{ à } 10^5 b$$

$$\sigma_c \approx 10^{-3} \text{ à } 10^{-5} \mu$$

$$\text{Plan / plan} \quad \sigma_{12}^{max} \approx \frac{\mu b}{2\pi a}$$

## Estimation de la contrainte de glissement

$$\sigma_c \approx 10^{-5} \text{ à } 10^{-3} \mu$$

Métal	$\mu$ Module de cisaillement MPa	$\sigma_{12}^{\max}$ Plan/plan MPa	$\sigma_{12}^{\max}$ Expérimental MPa
Al	24 400	3 900	0,79
Ag	25 000	3 980	0,37
Cu	40 700	6 480	0,49
Fe	59 000	9 400	26,60
Mg	16 500	2 600	0,39

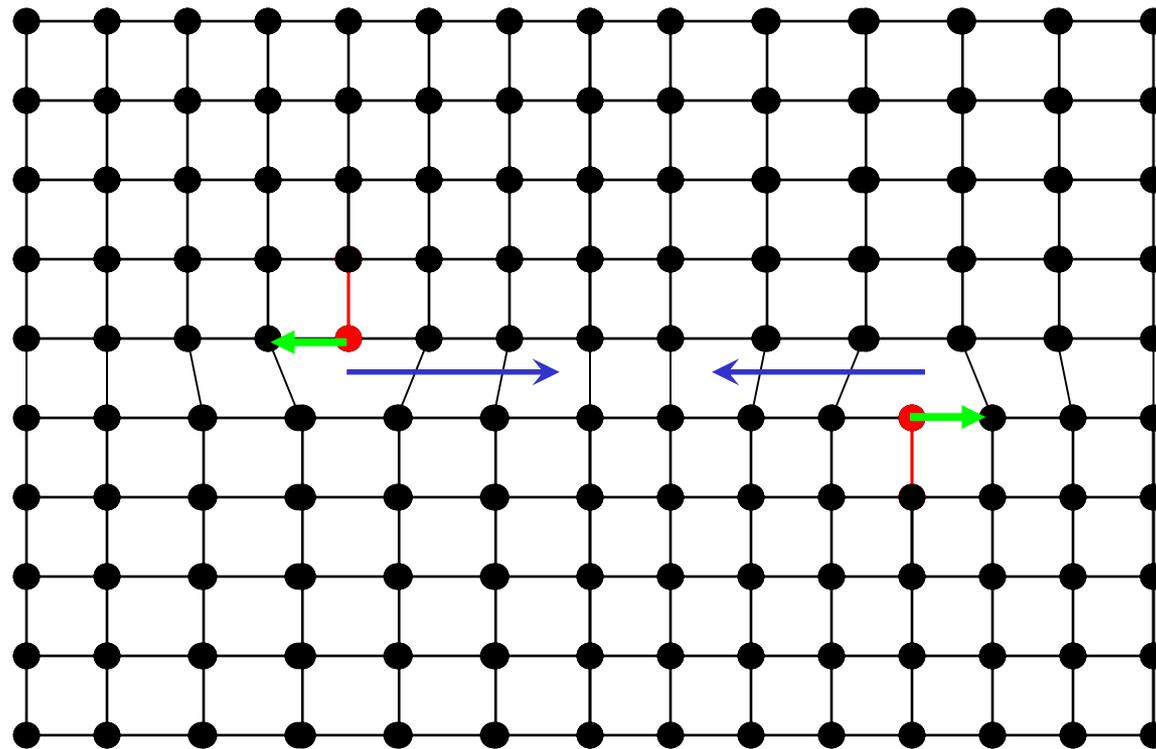
# Durcissement du métal

Taille des grains

Alliages et précipités

Foret de dislocations

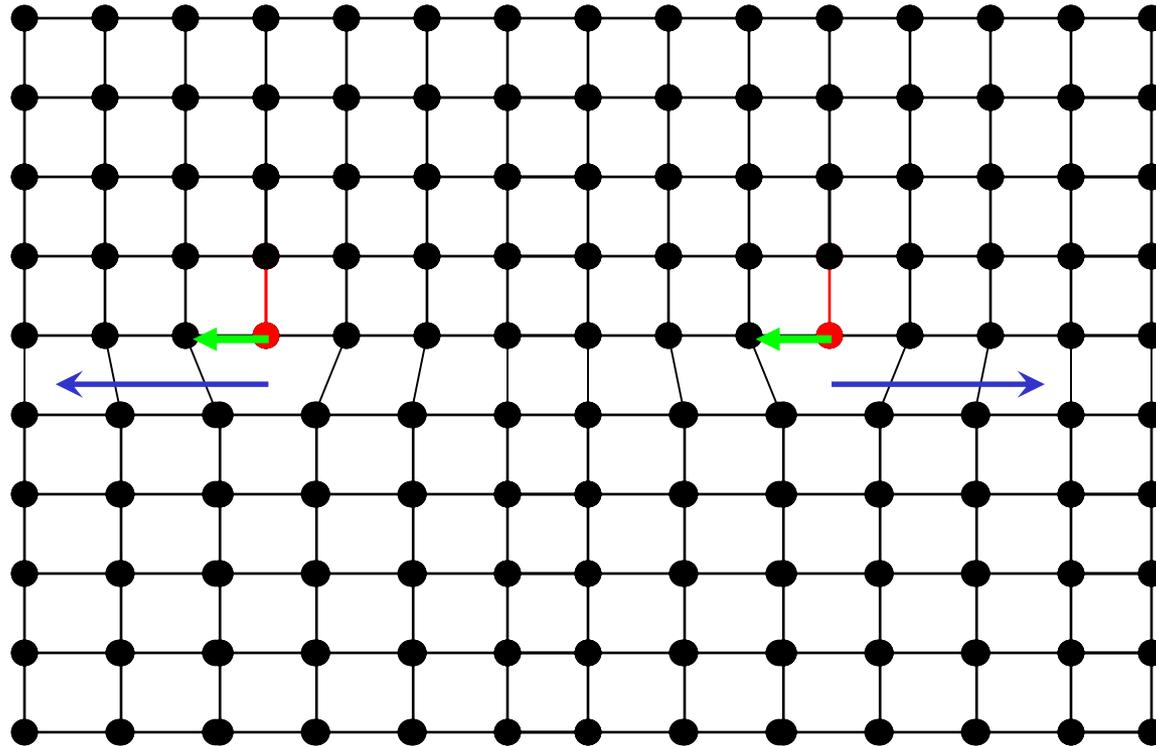
# Taille des grains: Rôle du joint de grain



Vecteurs de  
Burger de signe  
opposé  
avec la même  
orientation  
de la  
ligne  
de dislocation

Des dislocations de signe contraire s'attirent

# Taille des grains: Rôle du joint de grain

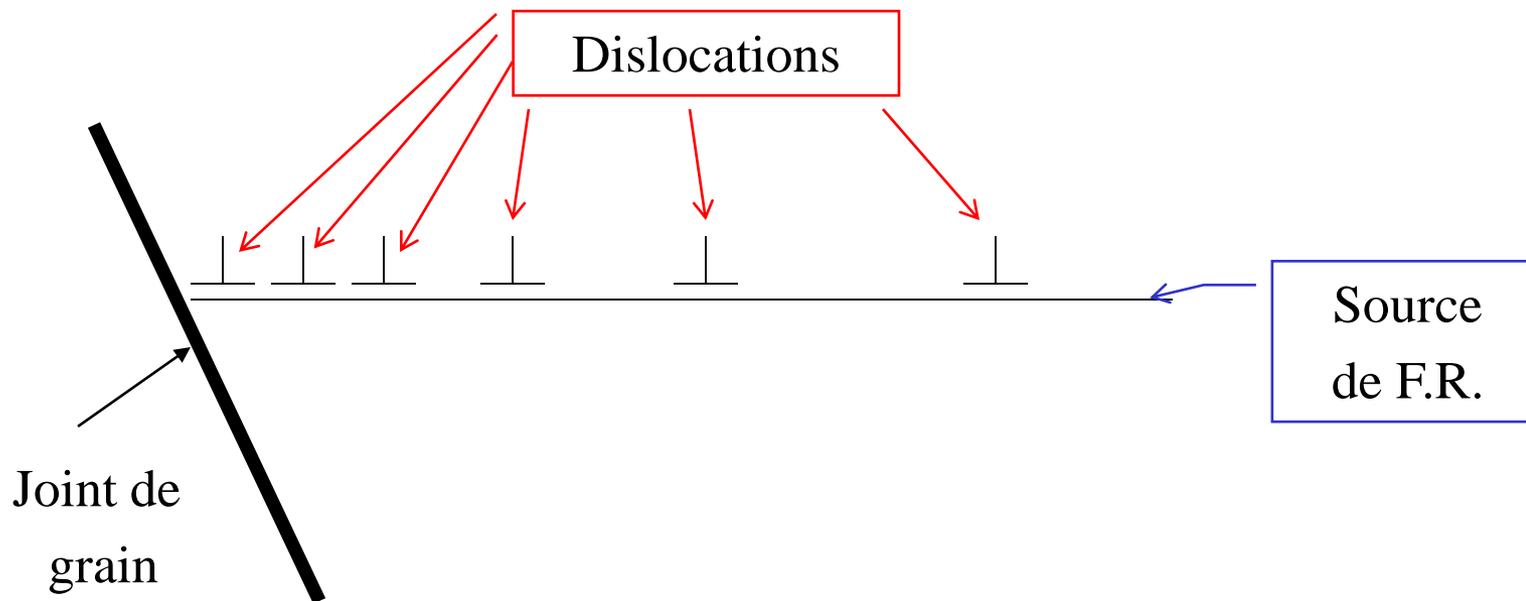


Vecteurs de  
Burger de  
même signe  
avec la même  
orientation  
de la  
ligne  
de dislocation

Des dislocations de même signe se repoussent

# Taille des grains: Rôle du joint de grain

Les dislocations émises par une source (par exemple Frank et Read) s'empilent à la frontière du grain, diminuant la mobilité de celles ci.



## Taille des grains

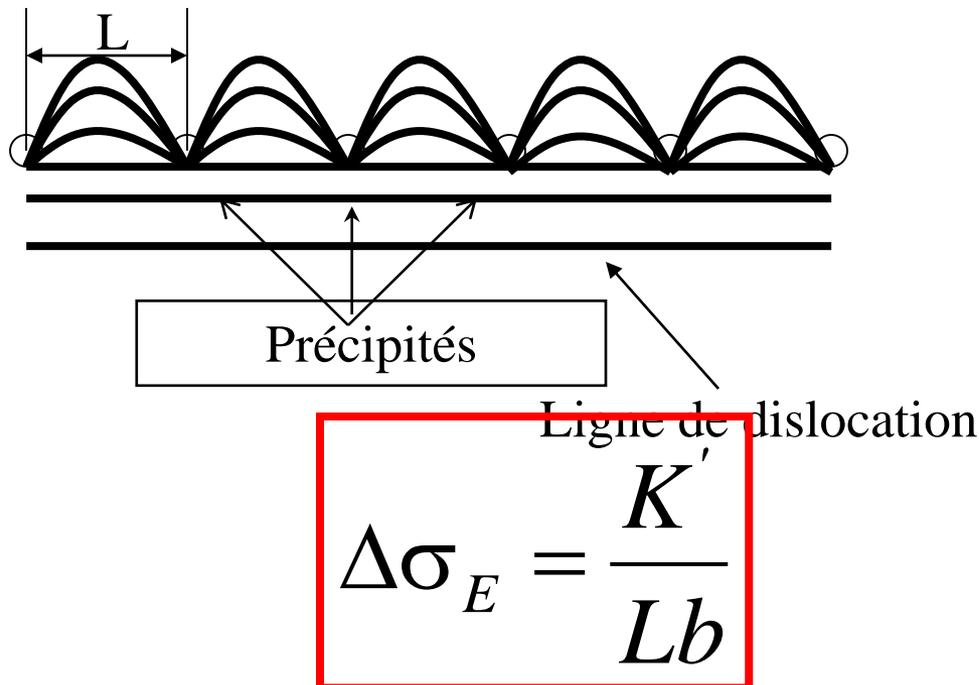
Limite d'élasticité  $\sigma_E$  de polycristaux en fonction de la taille (diamètre  $\phi$ ) des grains:

$$\sigma_E = \sigma_0 + K\phi^{-1/2}$$

Résultats expérimentaux de D. Mac Lean (1962)

# Rôle des précipités

Une dispersion de précipités gêne le mouvement des dislocations et contribue à limiter la déformation plastique des matériaux.



# Rôle de la forêt des dislocations

Densité de dislocation  $\rho$  = Longueur totale de dislocation par unité de volume.

$$\rho = 10^6 \text{ cm}^{-2} = 10 \text{ km} / \text{ cm}^3 \quad \text{pour un métal bien recuit}$$

$$\rho = 10^{12} \text{ cm}^{-2} \quad \text{pour un métal très déformé}$$

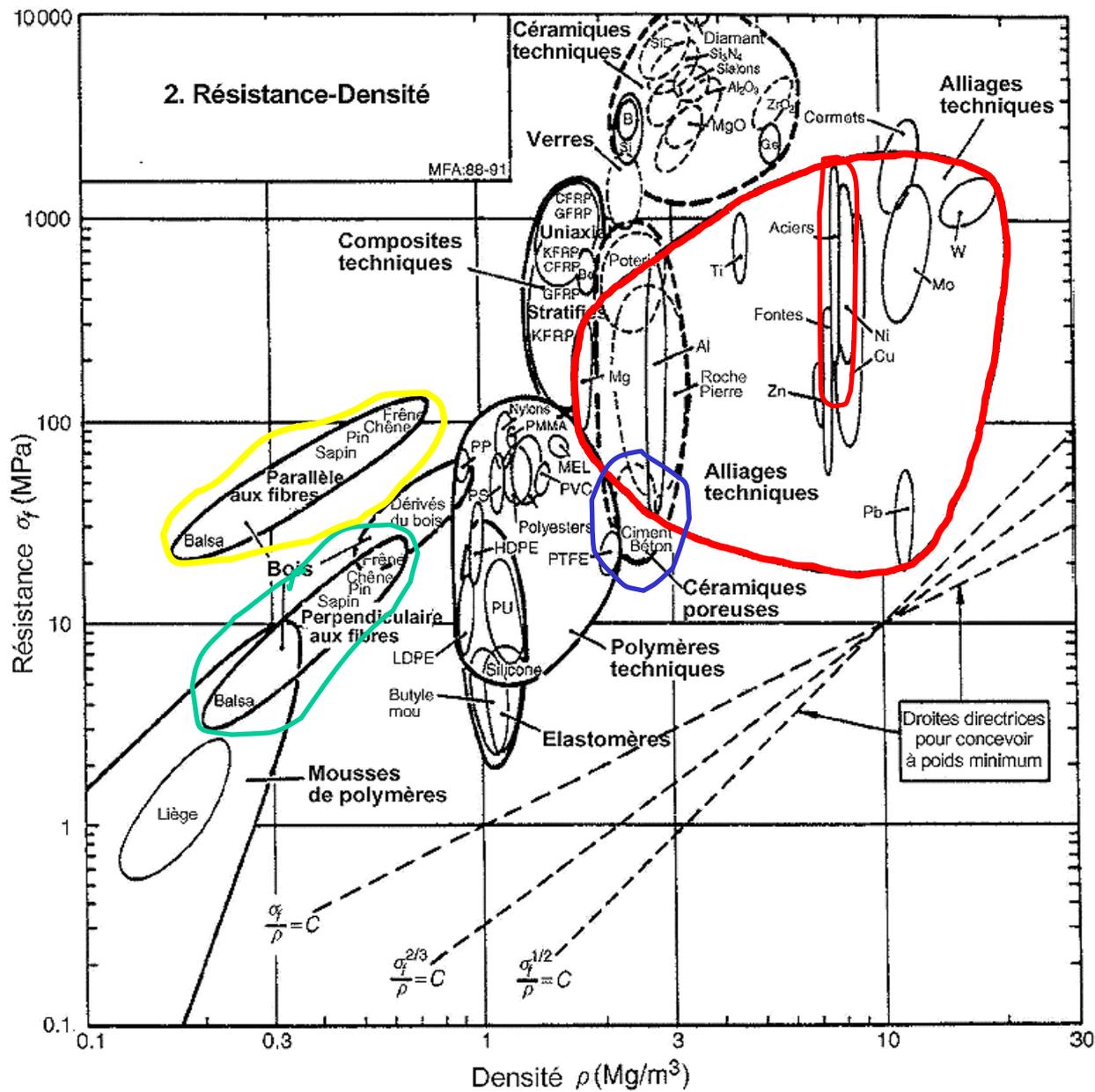
# Rôle de la foret des dislocations

Force entre dislocations, proportionnelle à  $\underline{b}_1 \cdot \underline{b}_2 \Rightarrow$

Elles s'attirent ou se repoussent.

Dans les deux cas cela freine la progression

$$\sigma_E = \alpha \mu b \sqrt{\rho}$$



# Les quatre échelles de la plasticité

## Echelle atomique

Défaut linéaire dans l'empilement

## Echelle de la dislocation

Milieu continu élastique, ligne en tension dans un champ de forces

## Echelle du cristal

Milieu continu, glissements plastiques sur les plans du cristal

## Echelle du polycristal

Milieu continu élastoplastique

## Loi de comportement « macro »