Métaux -
III. Défauts des réseaux cristallins

Anne Mertens

LIÈGE université

M.M.S Metallic Materials Science

Rappel: modèle du cristal parfait

- Propriétés physiques : OK
  - Densité, T_{fusion}, dilatabilité
- Propriétés mécaniques : pas satisfaisant
  - OK pour élasticité
  - Niveaux de contraintes prédits pour le clivage ou la déformation plastique sont trop élevés.
- Propriétés de conduction: $\pm$ OK
  - Mais on ne peut expliquer que l'effet d'un seul paramètre: T

$\Rightarrow$ **Il faut prendre en compte les défauts!**

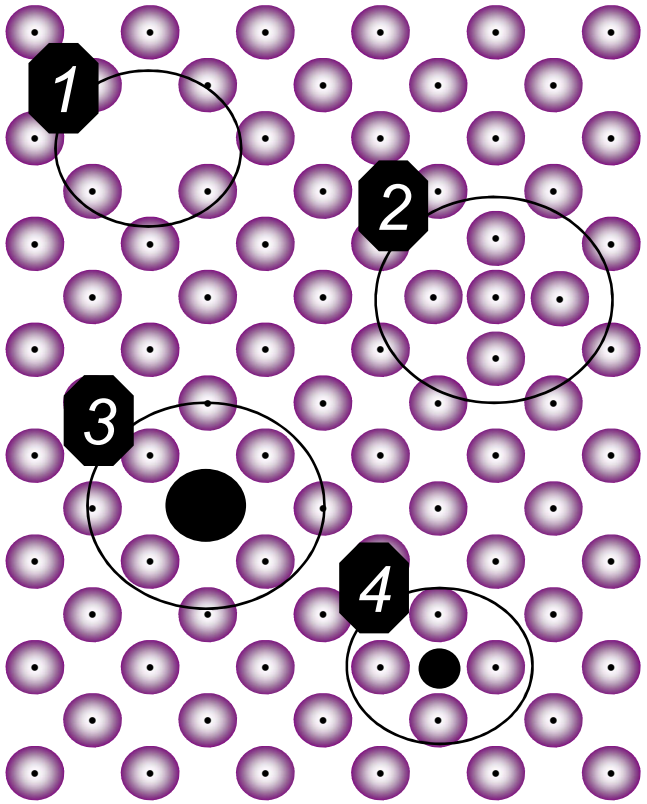
Plan

4 types de défauts cristallins

- Défauts ponctuels
- 1D - défauts linéaires
- 2D
- 3D

Défauts ponctuels

1. Lacunes
2. Auto-interstitiel
3. Atomes en substitution
4. Atomes en insertion



Lacunes

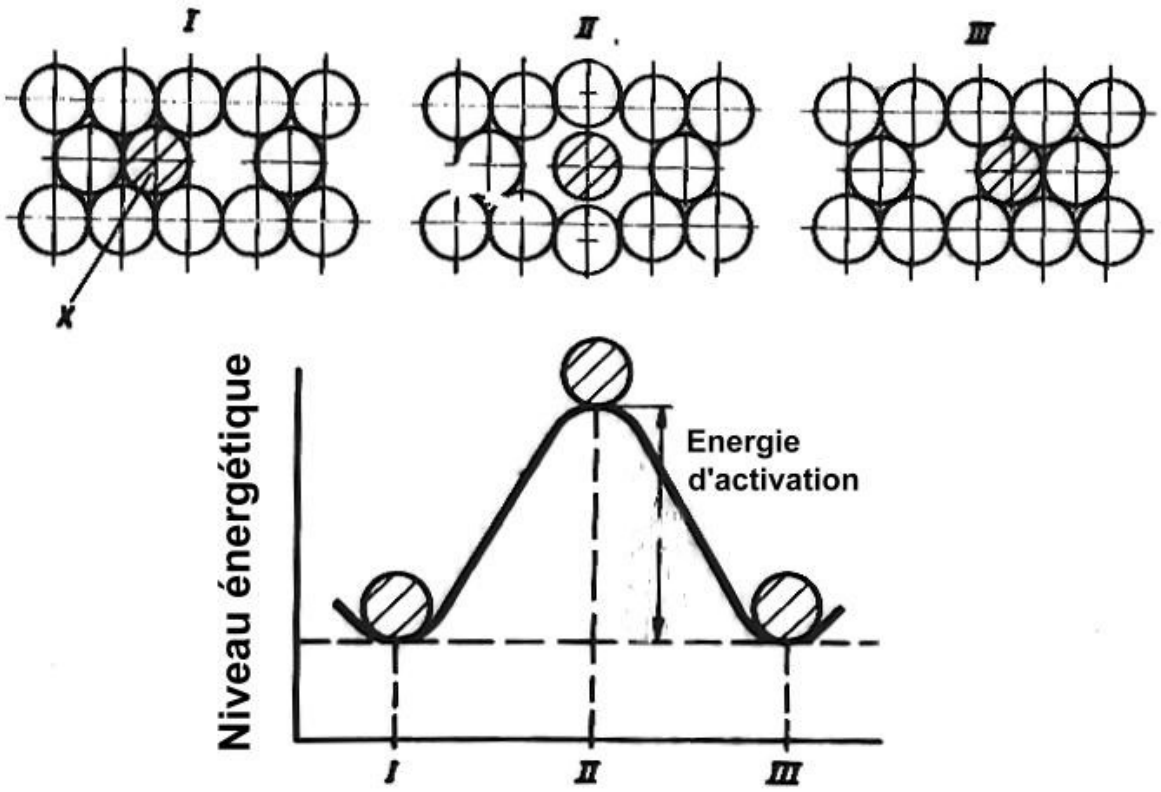
- Nombre dépend de la température

$$\frac{n_{lacunes}}{n_{noeuds}} = e^{-\frac{E}{kT}}$$

- E =1 eV

Effet des lacunes

- La présence de lacunes explique la diffusion dans les solides



Modélisation de la diffusion

- Lois de Fick, analogues aux lois de Fourier
  - Transfert de matière n au lieu de chaleur Q
  - Gradient de concentration au lieu de température

$$\frac{dQ}{dt} = KS\frac{dT}{dx} \quad \Rightarrow \quad \frac{dn}{dt} = DS\frac{dC}{dx}$$

$$\frac{dT}{dt} = \alpha\frac{d^2T}{dx^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{dC}{dt} = D\frac{d^2C}{dx^2}$$

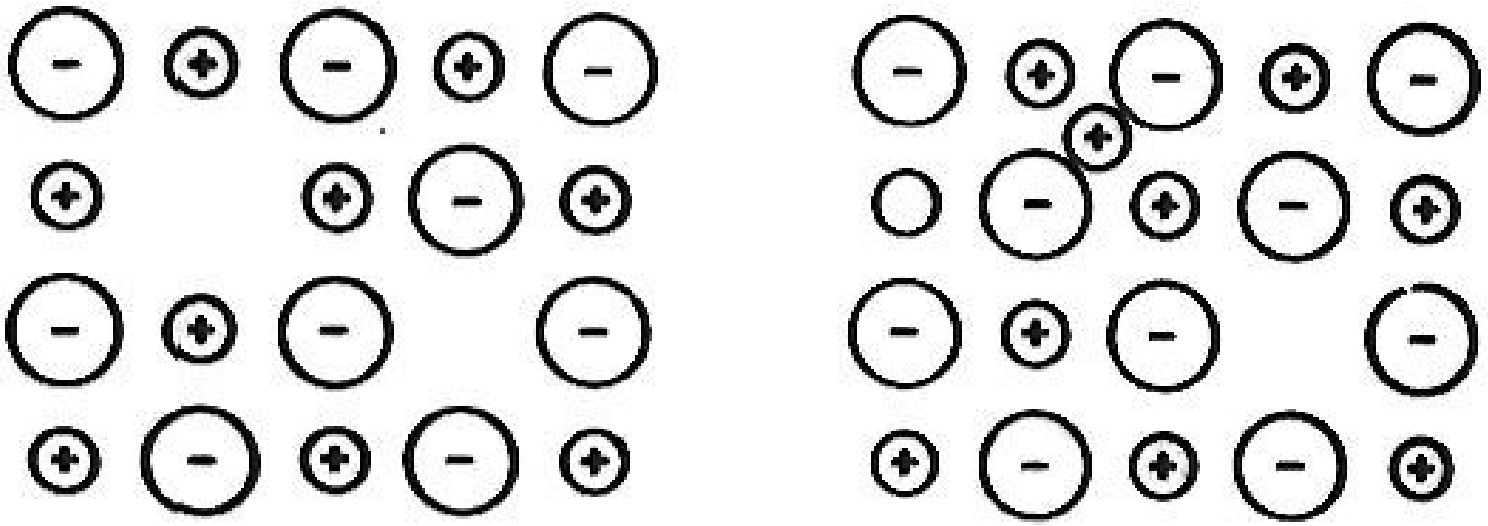
- Un seul coefficient de diffusion en m²/s
  → dépend du nombre de lacunes →T: $D = D_0 e^{-\frac{E}{RT}}$

Autres effets des lacunes

- Pas d'impact sur les propriétés physiques (masse volumique, dilatabilité, température de fusion, …) et de conductivité
- Interagissent avec d'autres défauts et ont ainsi un effet indirect sur les propriétés mécaniques

Lacunes dans les réseaux ioniques

- Lacunes existent aussi, mais forment des paires de défauts pour respecter l'électroneutralité.



Plan

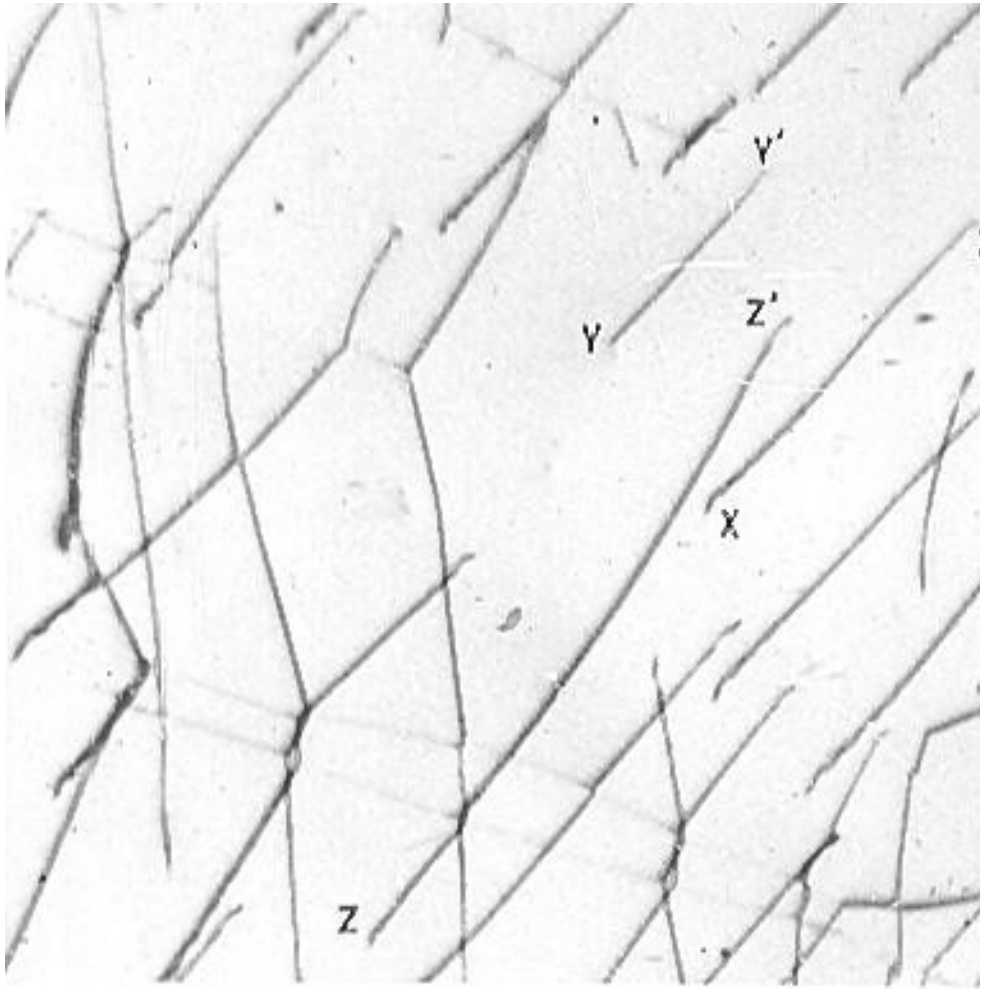
4 types de défauts cristallins

- Défauts ponctuels
- 1D - défauts linéaires
- 2D
- 3D

Défauts linéaires : dislocations

= Défauts visibles par microscopie électronique en transmission (sur lames minces)

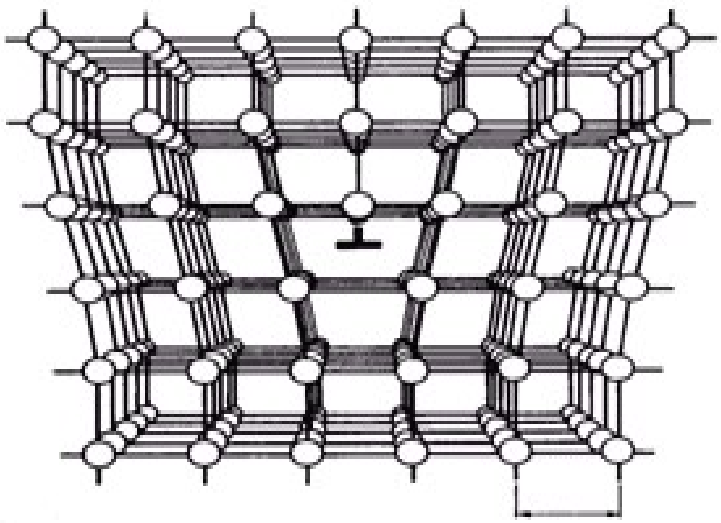
→ Lignes



Les dislocations - modèles

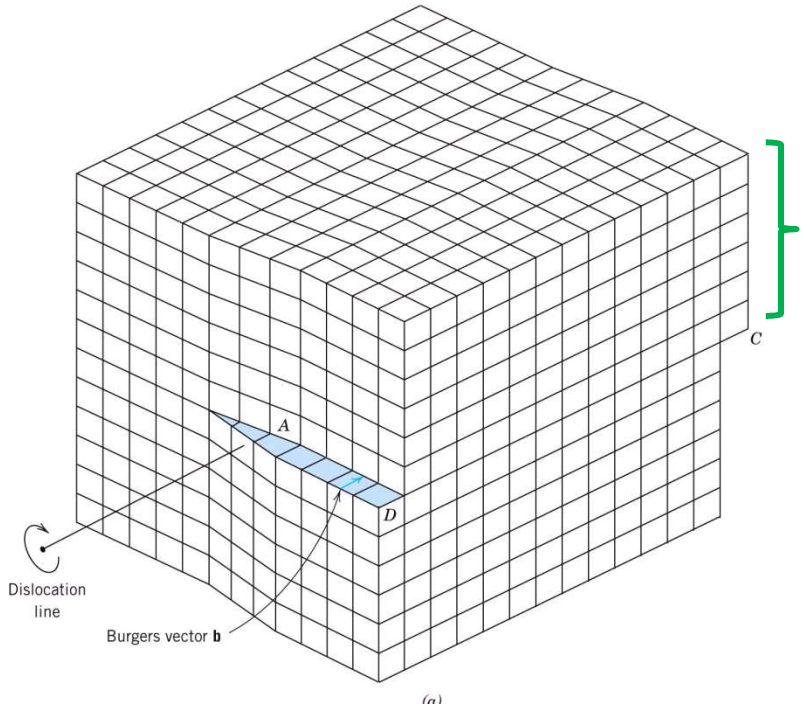
DISLOCATION-COIN

Plan atomique supplémentaire



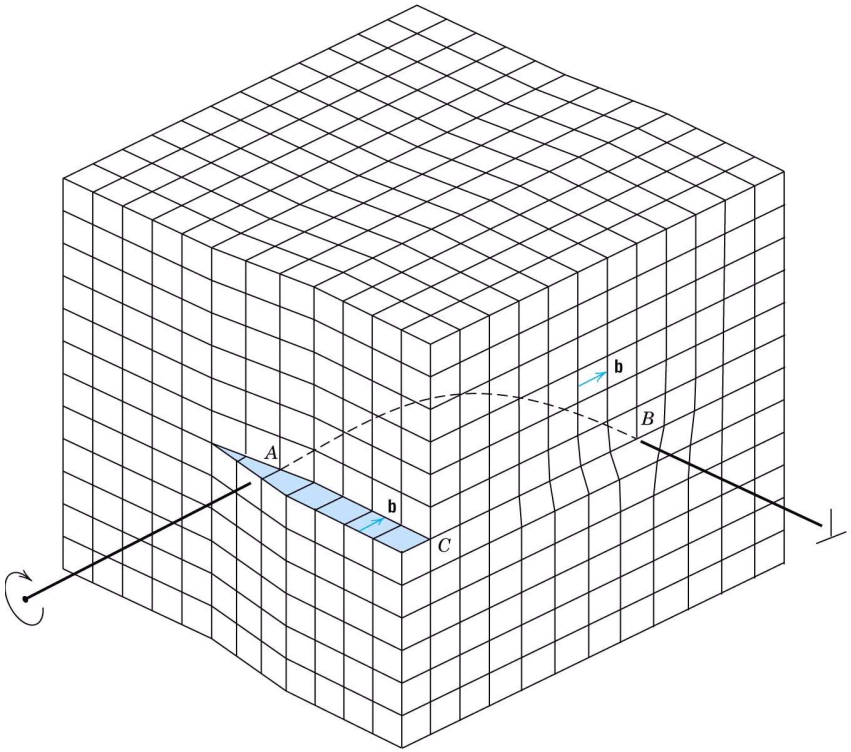
DISLOCATION-VIS

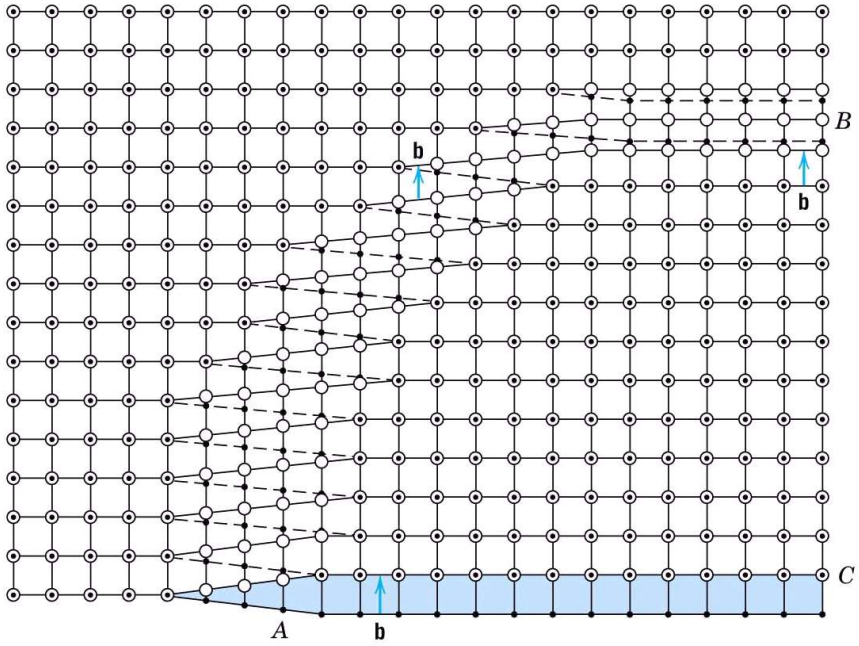
Glissement d'une partie du cristal



Les dislocations – modèles (suite)

DISLOCATION-MIXTE

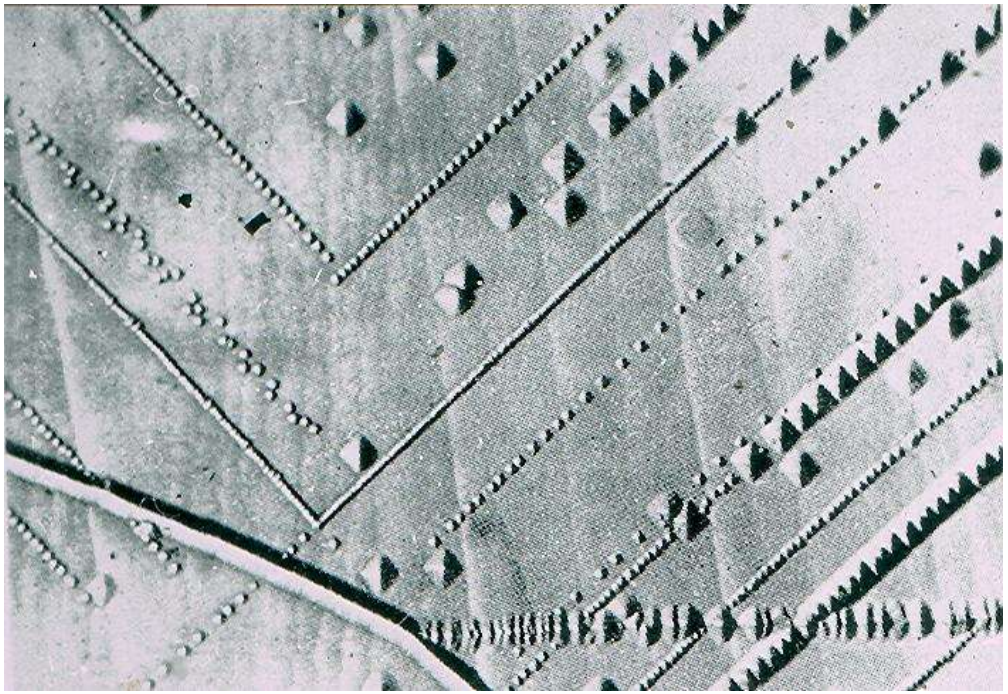




A la surface

- Une dislocation simple ne peut pas finir à l'intérieur du cristal

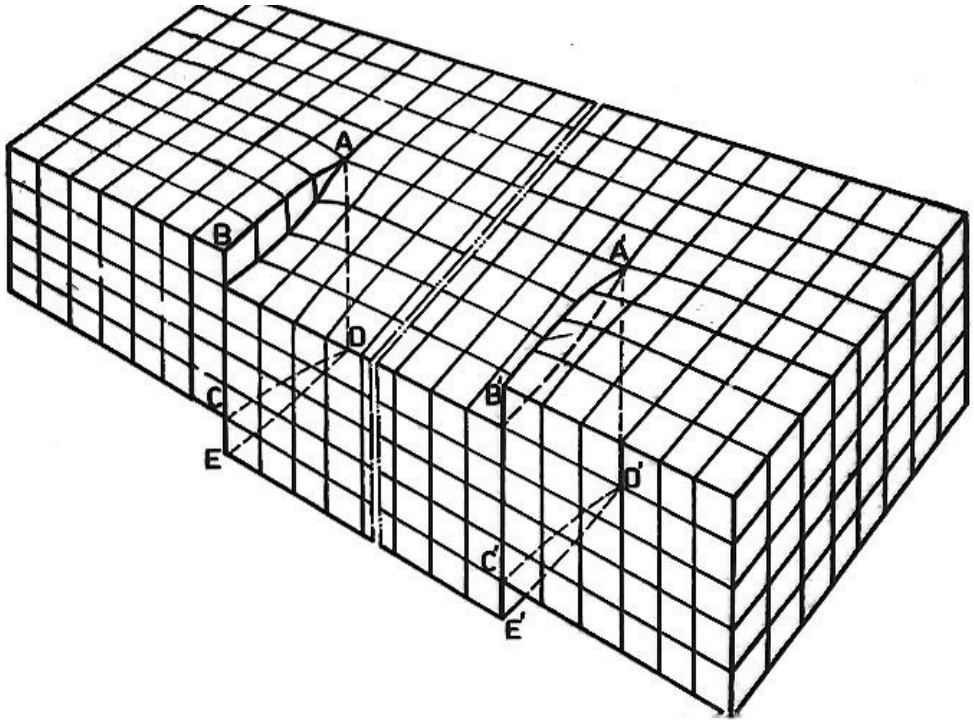
$\Rightarrow$ Elle doit atteindre la surface $\Rightarrow$ Relief



Microscopie électronique

Boucles de dislocations

- Association de plusieurs dislocations pour former une boucle fermée et contenue dans le cristal
  - 2 dislocations coins (AA’ et DD’)
  - 2 dislocations vis (AD et A’D’)

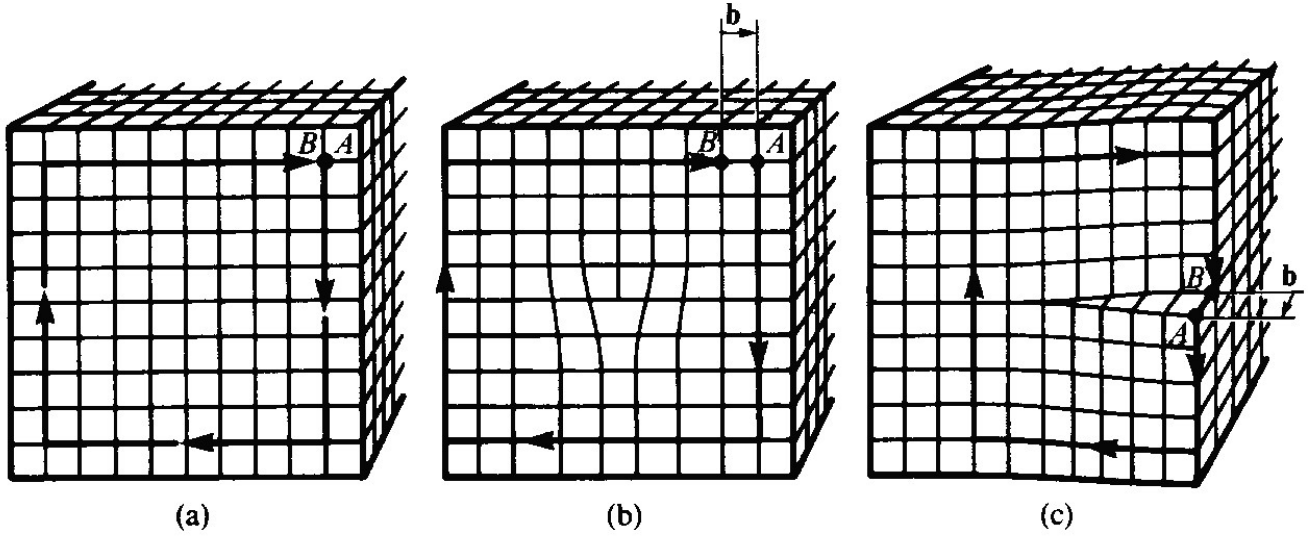


Densité de dislocations

- Varie suivant les conditions d'élaboration du matériau, pex: vitesse de refroidissement
  - très lente : qq cm/cm³ (whiskers)
  - normale : 100 km/cm³
  - trempe : 1.000 km/cm³

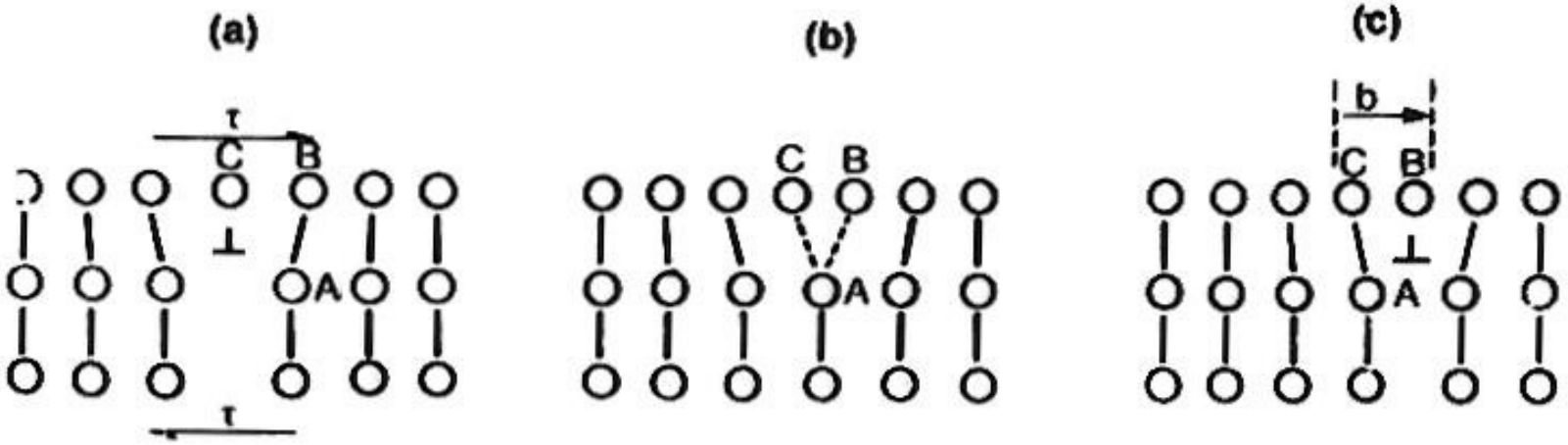
Caractérisation des dislocations

- Vecteur de Burgers (*b*) = défaut de fermeture d'un circuit AB tracé dans un plan perpendiculaire à la dislocation

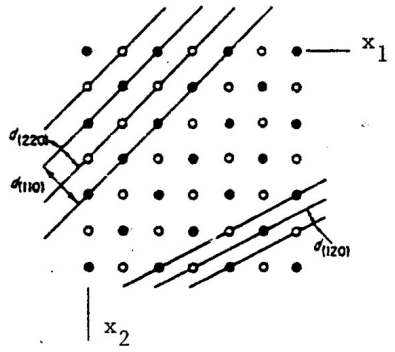


- Energie par unité de longueur: $E_D = \frac{1}{2} G b^2$

Mouvement des dislocations : glissement

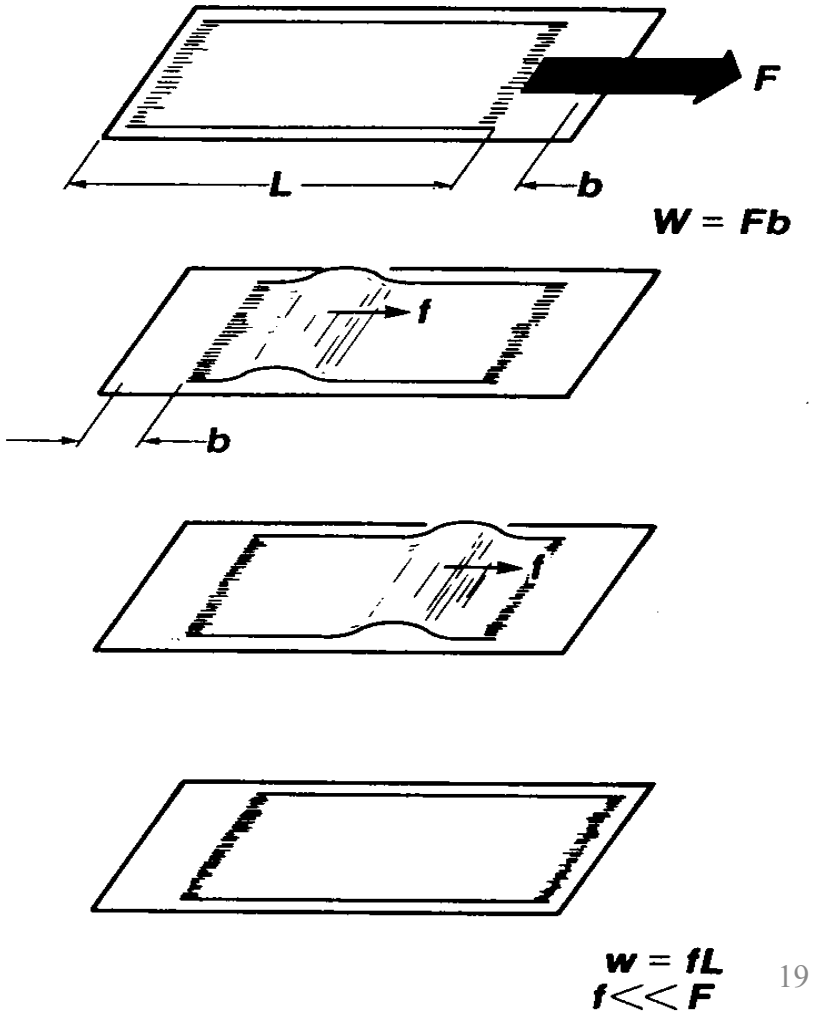


- Déplacement des dislocations, sous l'effet des contraintes extérieures : **<u>glissement</u>**
- Les plans et directions de glissement sont ceux définis pour les cristaux parfaits.
  $\rightarrow$ Plans écartés les uns des autres et de forte densité atomique



Glissement des dislocations

Le glissement des dislocations est beaucoup plus aisé que celui des plans cristallographiques complets ...

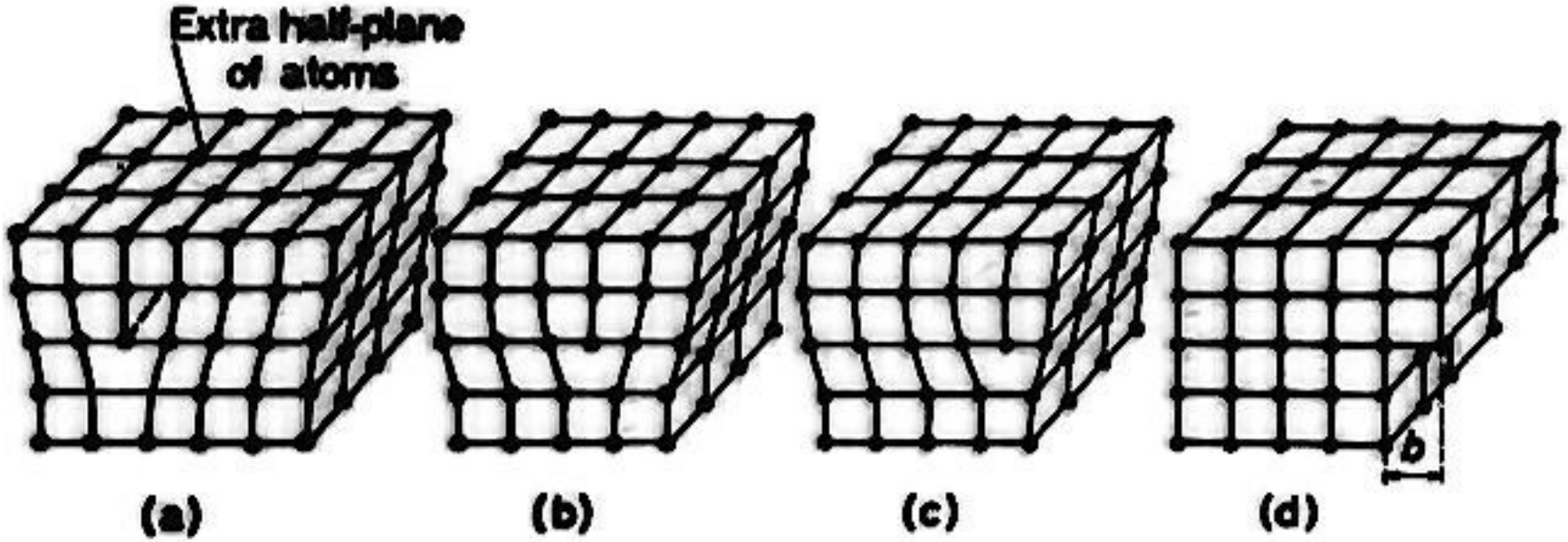


Le glissement des dislocations

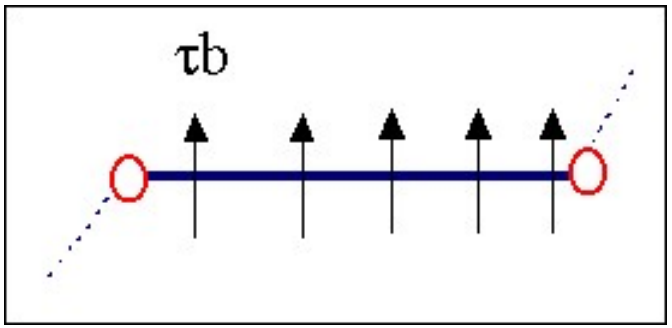
... mais il conduit à un déplacement infinétisimal

$\Rightarrow$ Il faut multiplier les dislocations pour atteindre une déformation importante

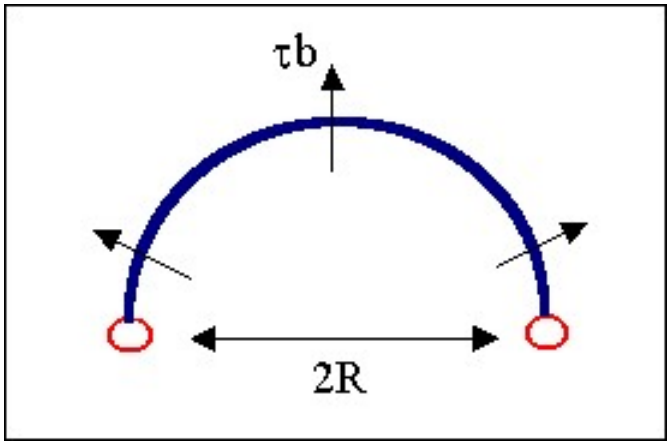
$\Rightarrow$ Modèle de Frank-Read des sources de dislocations

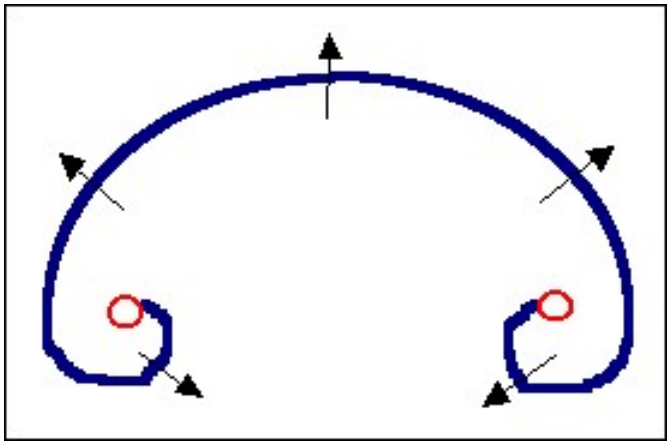


Fonctionnement d'une source

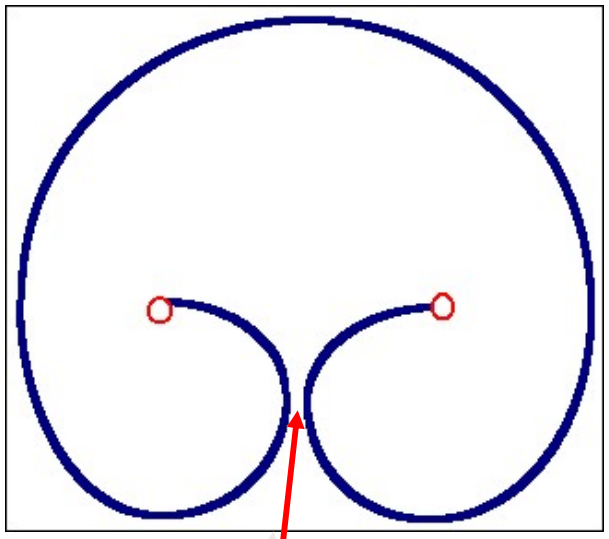


- Longueur de dislocation ↑
- Stockage d'énergie dans la matière

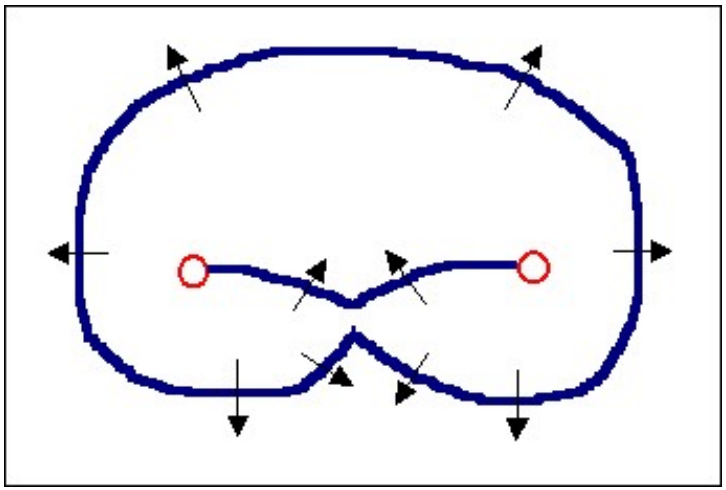


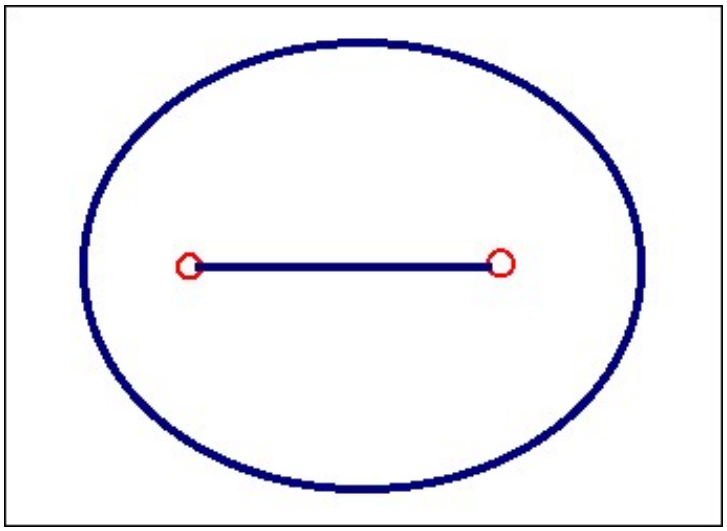


Fonctionnement d'une source (suite)



2 dislocations de signes opposés s'annulent.



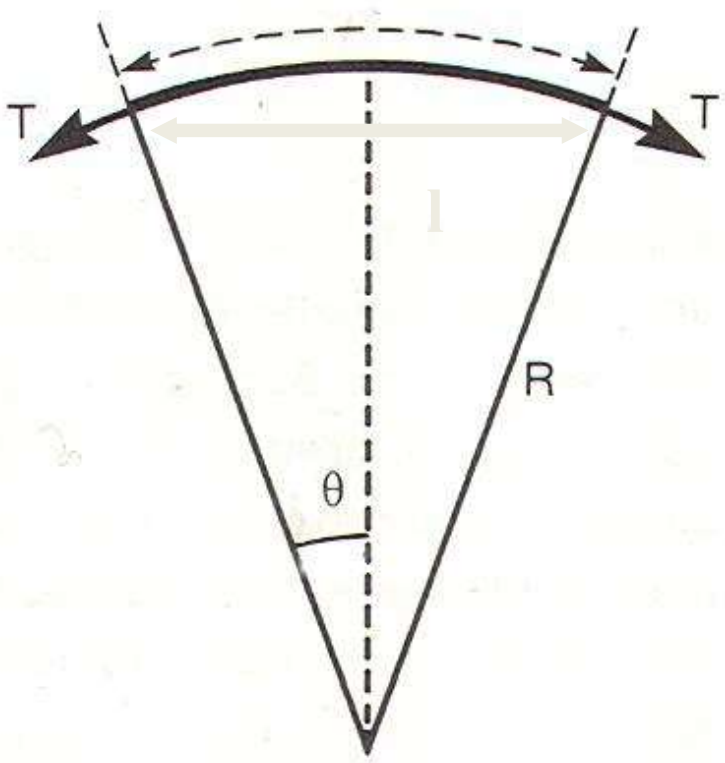


Tension critique pour activer une source

- Equilibre vertical de la corde – Modèle d'Orowan

$$2T\sin\theta = \tau * 2R\theta * b$$

$$T = \tau * R * b$$



- Remplacement de T, par ½Gb²

$$\tau = \frac{Gb}{2R} \Rightarrow \tau_{max} = \frac{Gb}{2R_{min}}$$

- $R_{min} = \frac{1}{2}l$ ⇒ $\boxed{\tau_{max} = \frac{Gb}{l}}$

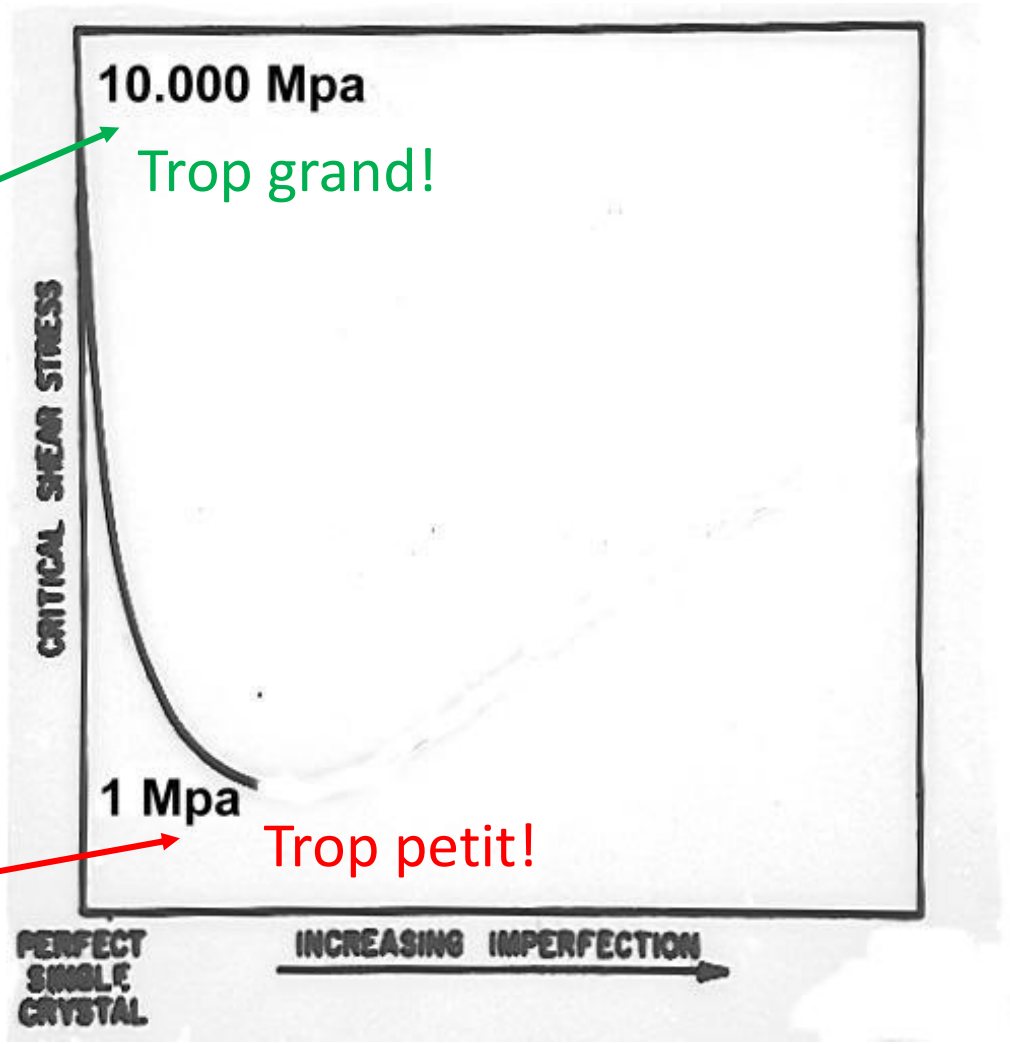
Tension critique

- Cristal parfait

$$\tau_{max} = \frac{G\beta}{2\pi\alpha}$$

- Cristal avec sources de Frank-Read, où *l*~1µm et *b*~1Å

$$\tau_{max} = \frac{Gb}{l}$$

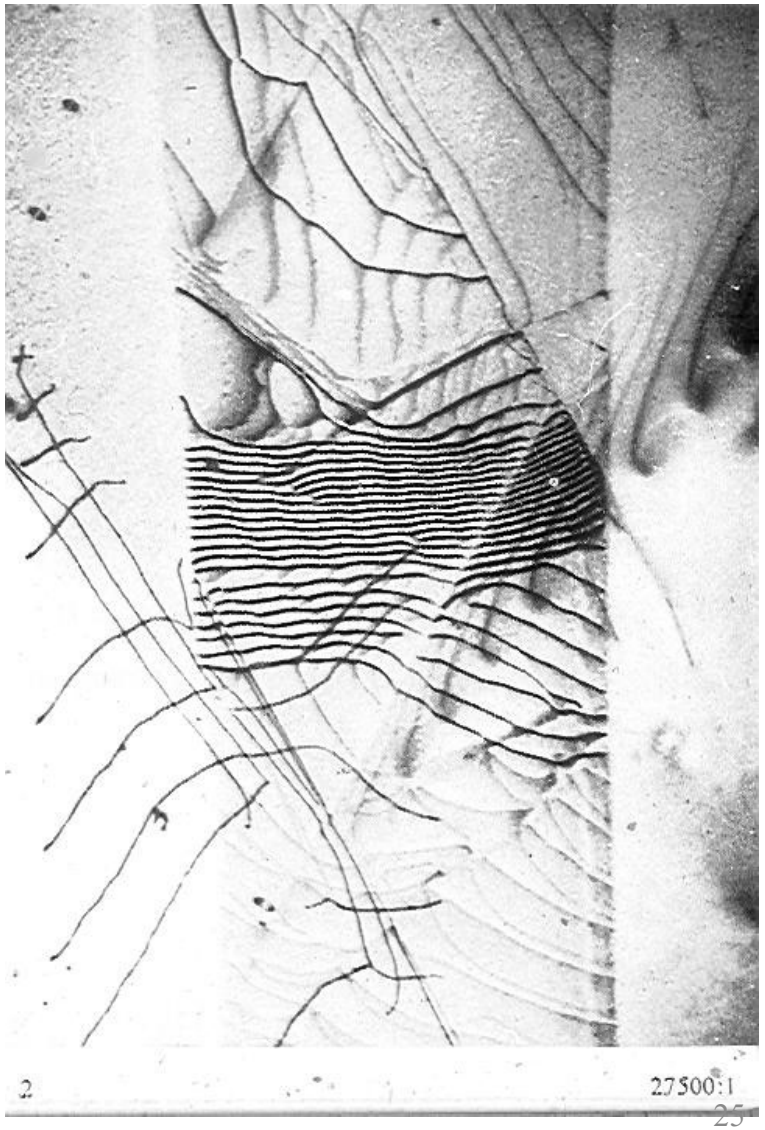


Arrêt d'une source

Les dislocations s'arrêtent sur des obstacles

- croisement avec d'autres dislocations circulant dans des plans qui se coupent (réseaux cubiques)
- défauts 2D ou 3D

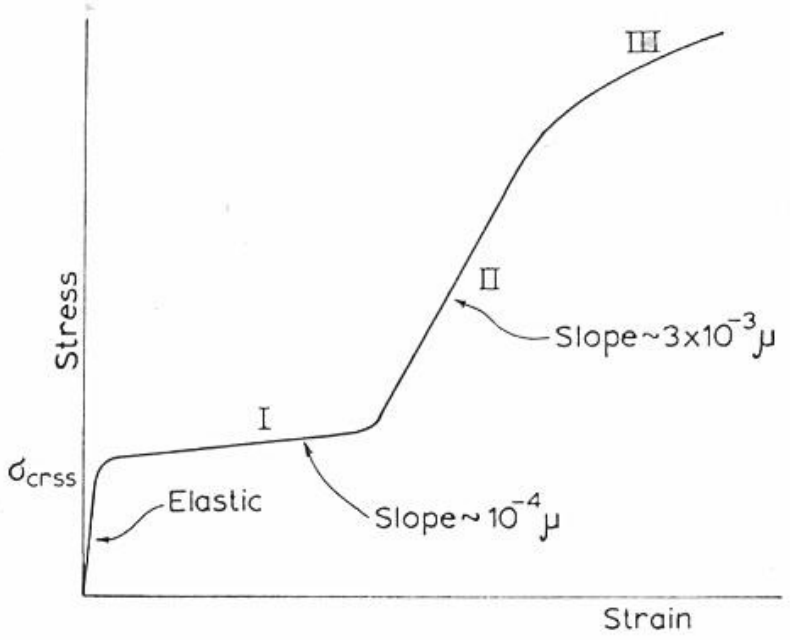
$\Rightarrow$ Arrêt des sources après création de 1.000 à 10.000 boucles de dislocations.



Continuation de la déformation plastique

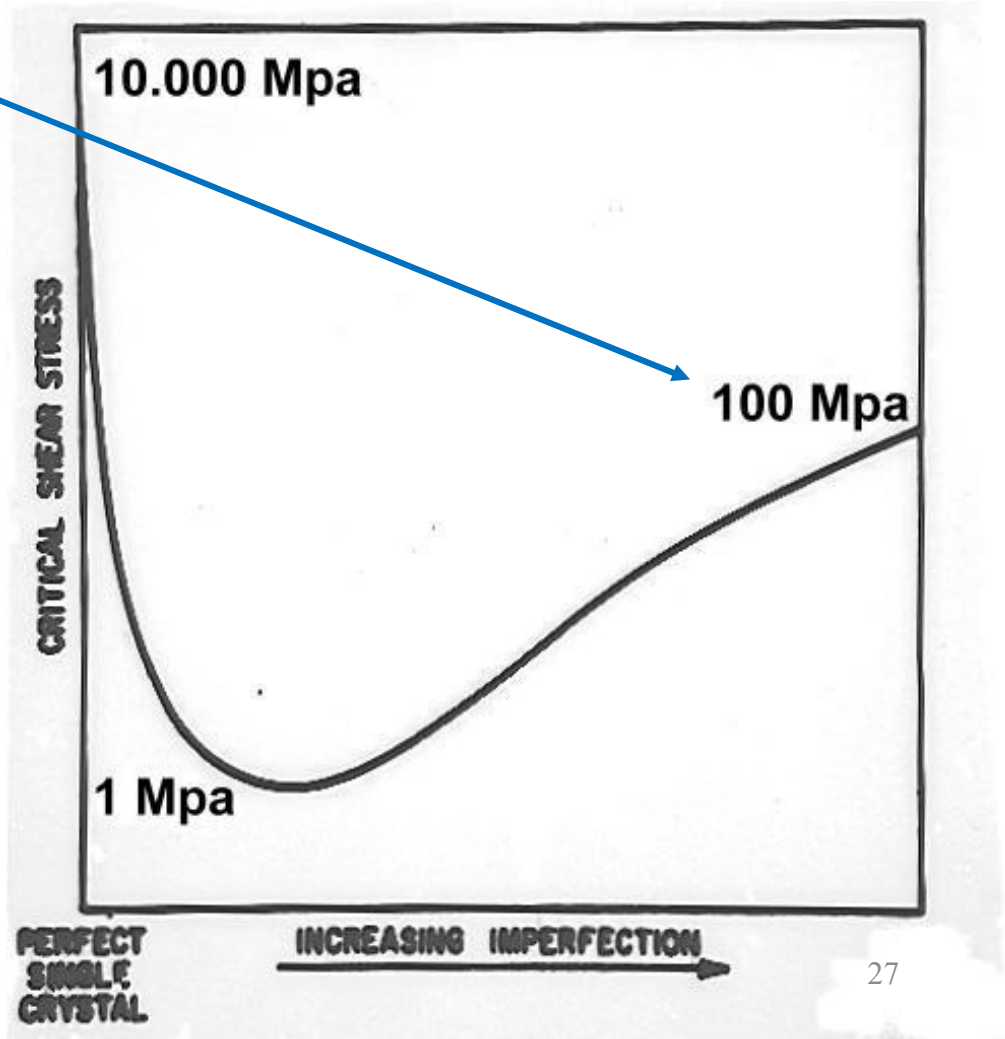
- La déformation reprend si on active d'autres sources de Franck Read a priori moins favorables
  - Soit avec *l* petit ($\tau = Gb/l$)
  - Soit situées dans des plans de glissement moins bien orientés par rapport à l'effort extérieur.

$\Rightarrow$ **Consolidation** ou,
dans le langage courant,
durcissement ou écrouissage.



Effet de la quantité de dislocations sur la tension de glissement

- Dans un métal réel, lorsque la densité de dislocations ↑, la tension de glissement ↑.
- On retrouve ainsi les ordres de grandeur des limites élastiques des métaux réels ~ 100 MPa.

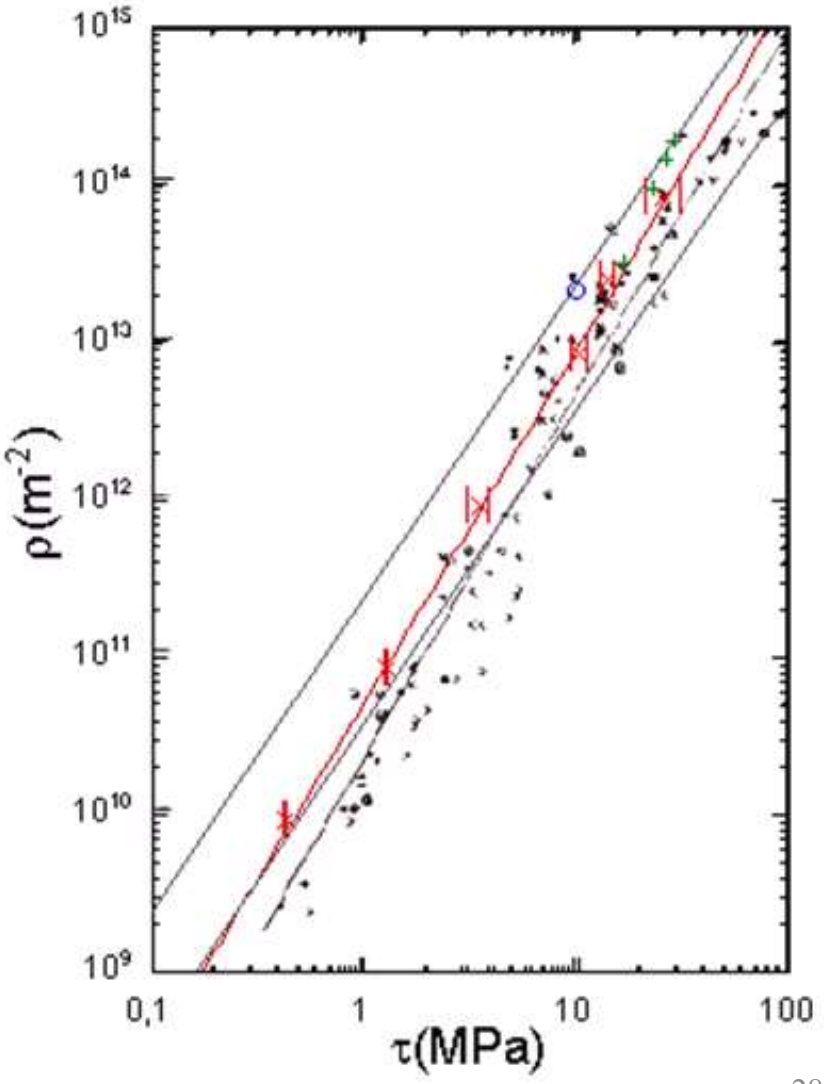


Quantitativement

Tension critique de glissement en fonction de la densité de dislocations (ρ):

$$\tau = cte + \alpha G b \sqrt{\rho}$$

avec α = 0,35±0,15

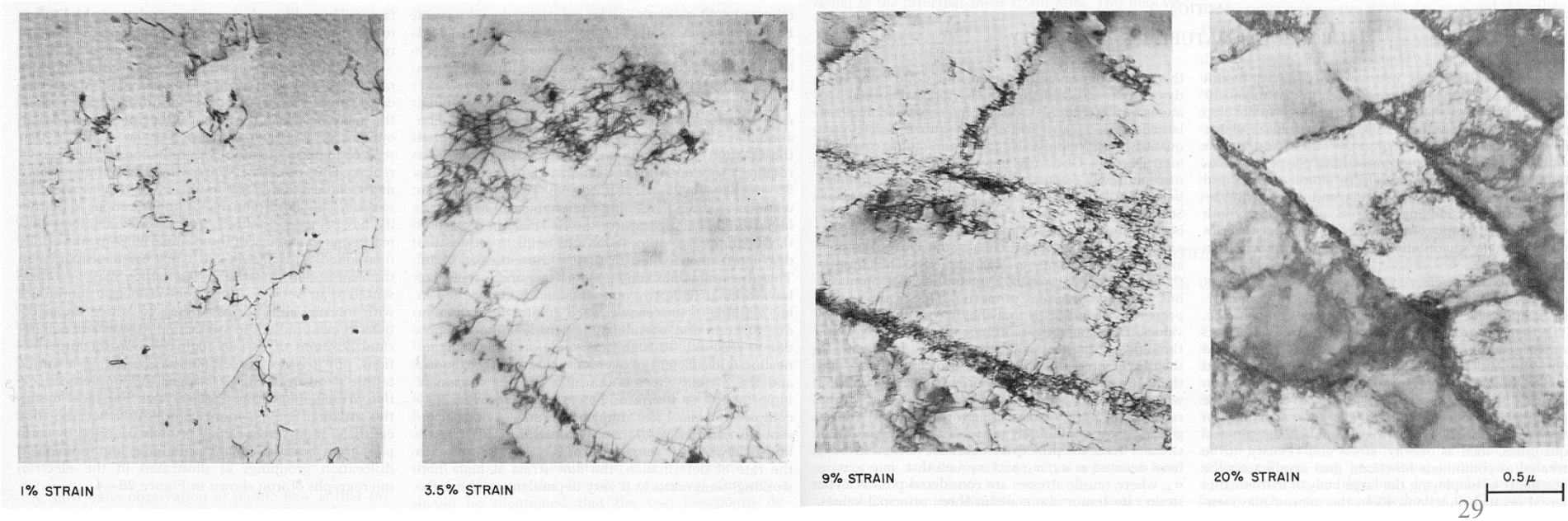


Effet de la multiplication des dislocations

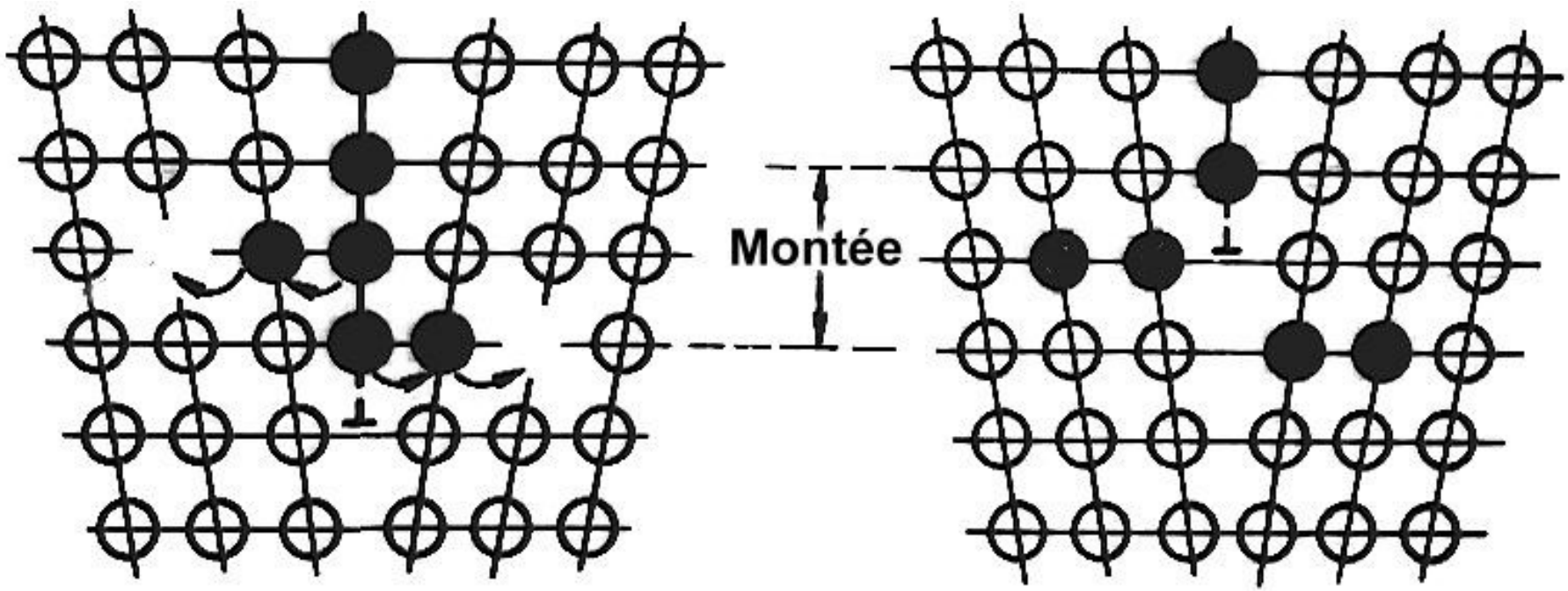
Accumulation localisée des dislocations

$\Rightarrow$ Formation de microfissures, puis de fissures et enfin rupture (ductile)

= **Endommagement** du métal.

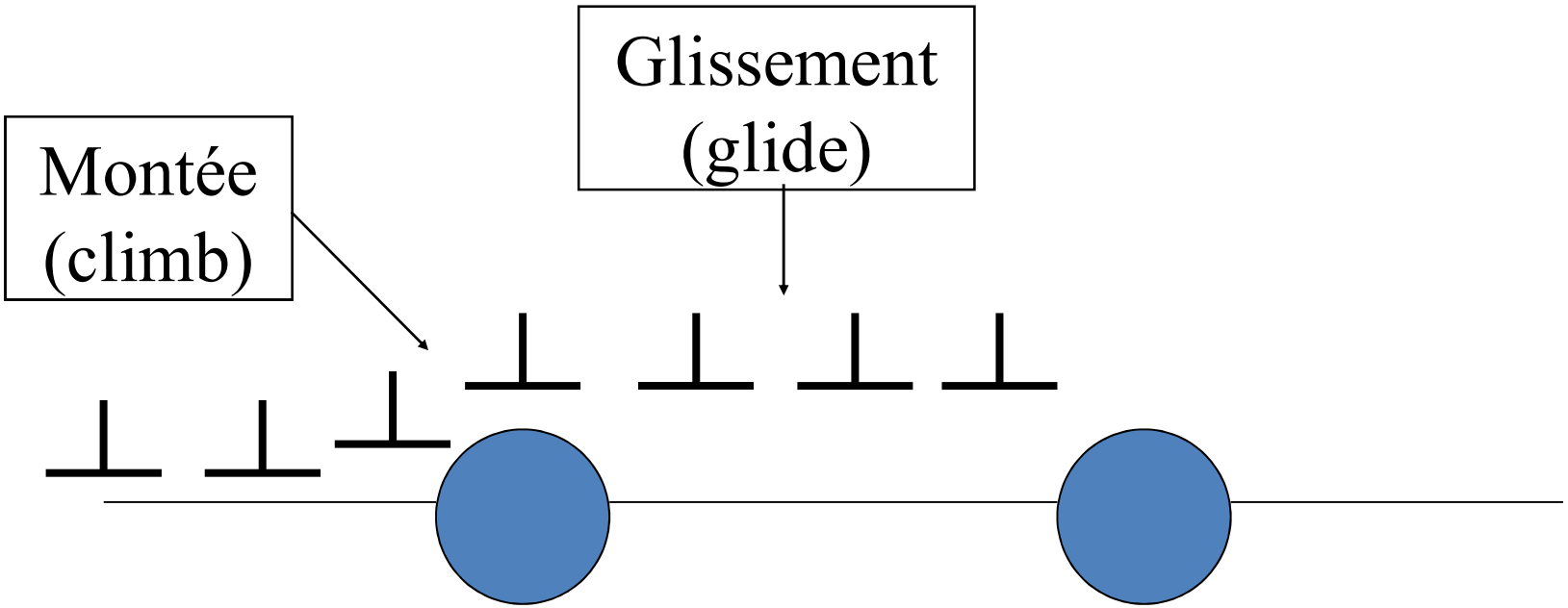


Alternative au glissement: **montée**



- Rendue possible par la présence de lacunes.
  $\Rightarrow$ Effective à haute température.
- Ne nécessite pas d'énergie mécanique.

Effet de la montée des dislocations



La montée permet aux dislocations de franchir des obstacles.

>< Consolidation

>< Concentration des dislocations sur les obstacles et endommagement

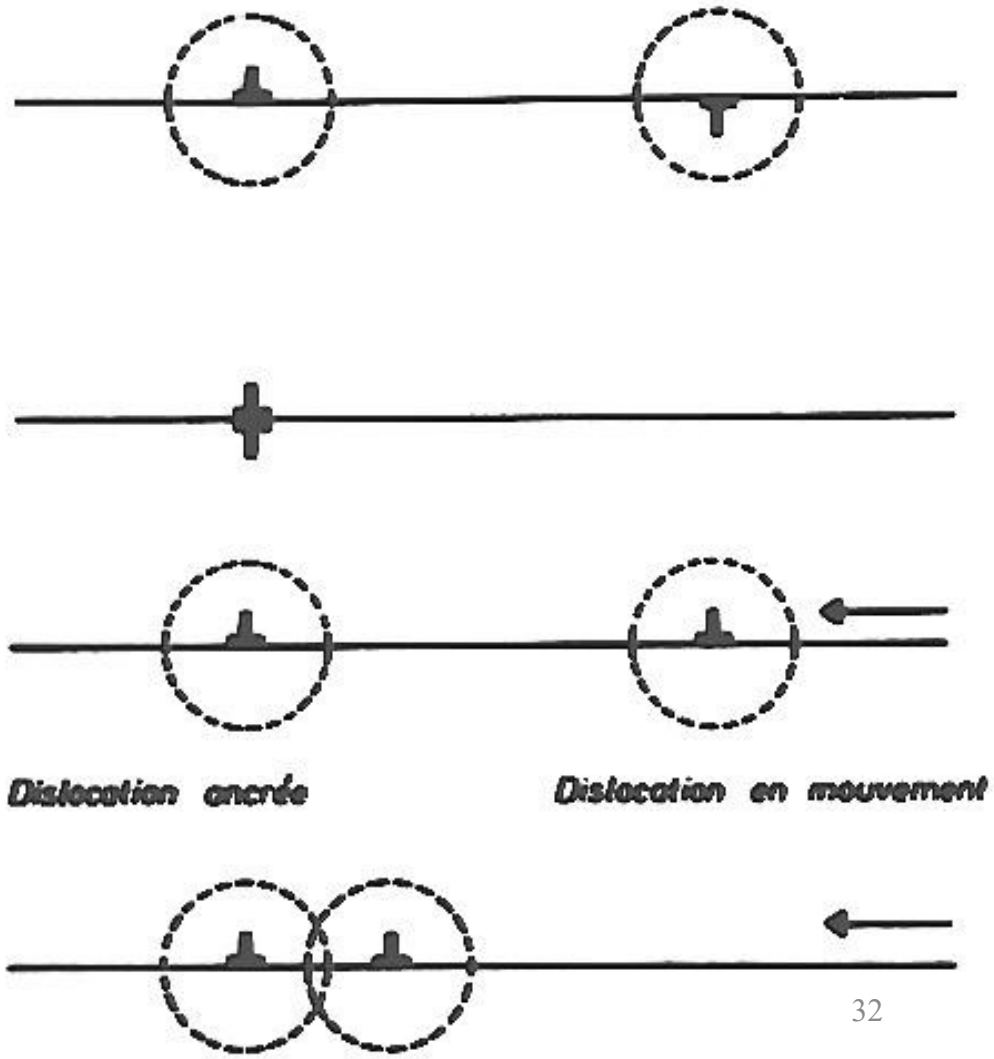
Effet de la montée des dislocations

Permet à des dislocations de sens opposé de se rencontrer et de disparaître.

$\Rightarrow$ Diminution du nombre de dislocations

$\Rightarrow$ Répartition plus uniforme des dislocations

= Restauration, nécessite temps et température

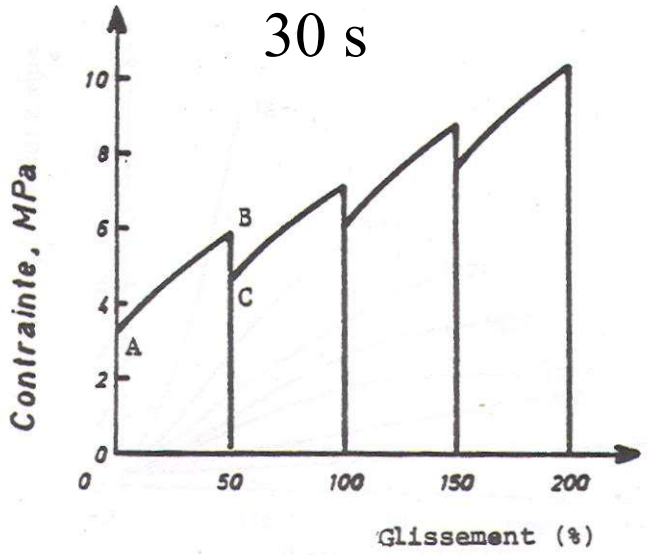


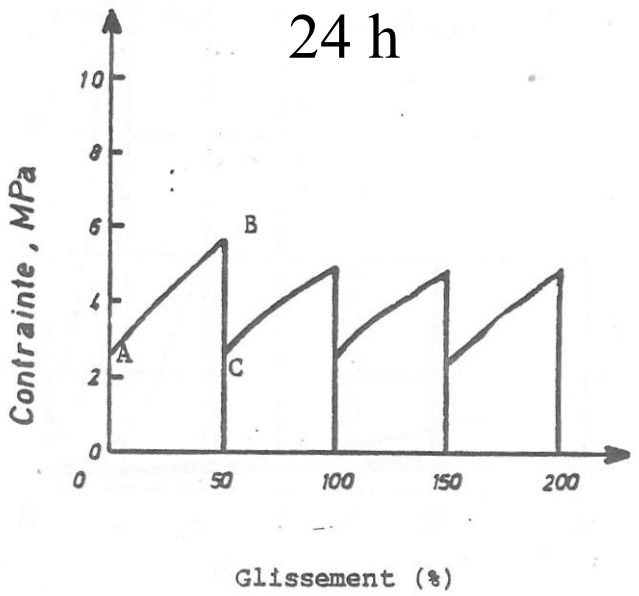
Restauration statique

– Lors d'une déformation à chaud.

– Pendant les interruptions de déformation

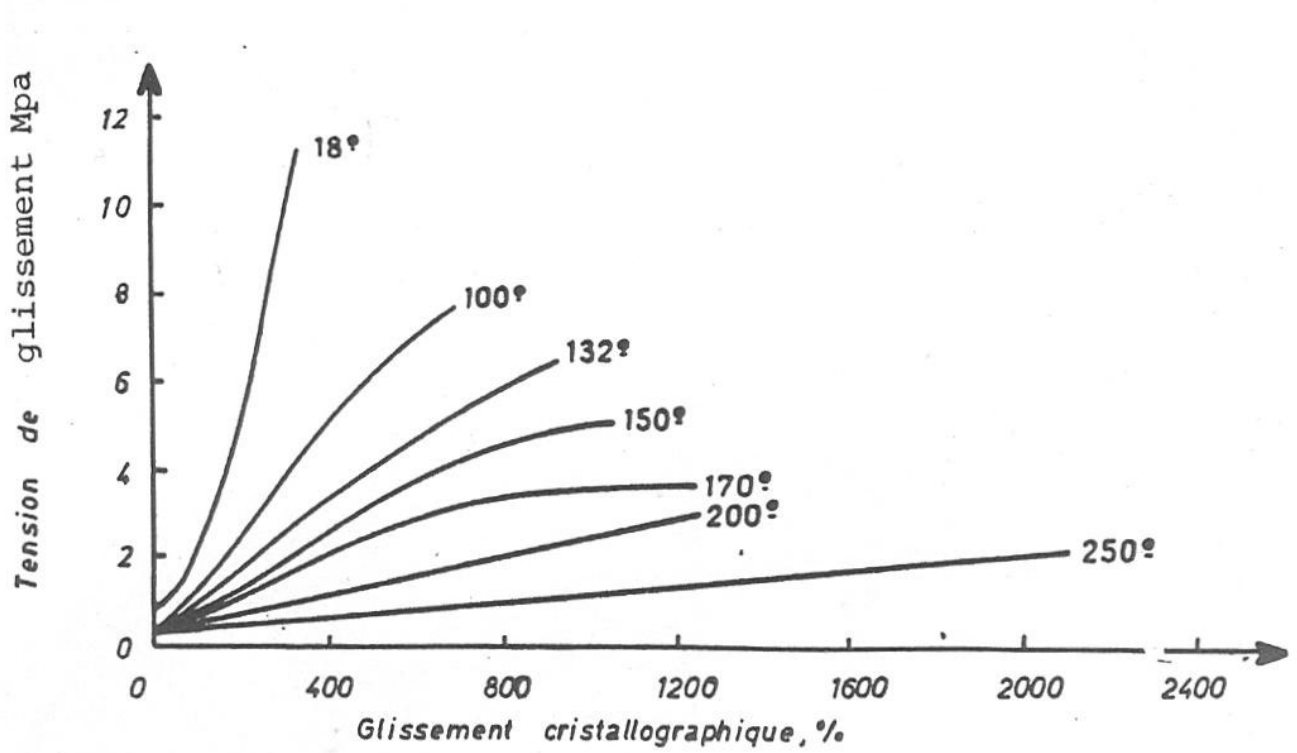
– A la limite, la restauration statique permet une déformation infinie du métal.





Restauration dynamique

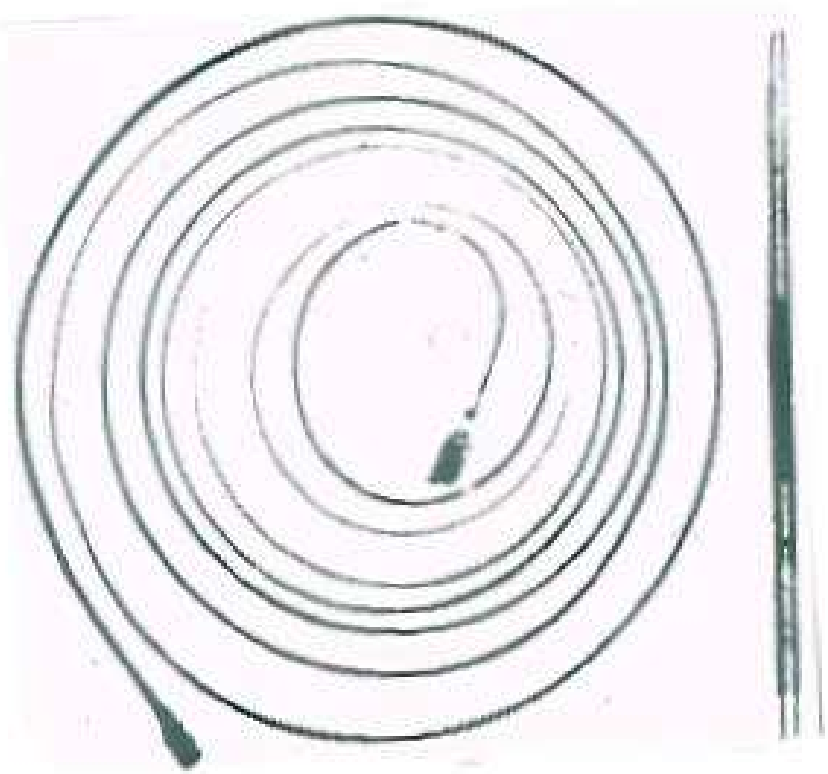
- Restauration simultanée à la déformation
  - si la température est élevée



Restauration dynamique

- Restauration simultanée à la déformation
  - si la température est élevée
  - si la déformation est lente

En déformant très lentement des cristaux qui restaurent facilement, on peut atteindre des déformations considérables en une seule opération : **superplasticité**



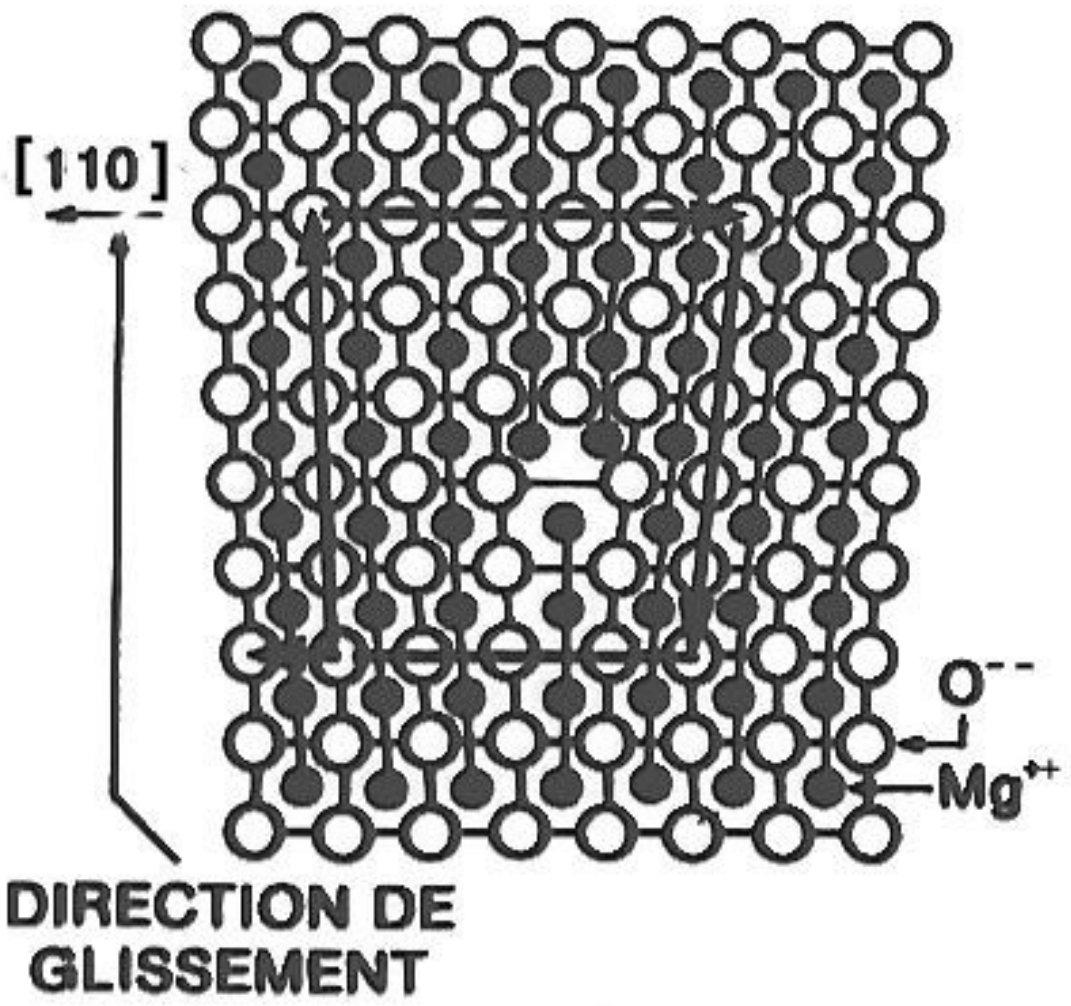
Conclusions - Théorie des dislocations

La théorie des dislocations permet d'expliquer bon nombre des comportements mécaniques des métaux :

- La limite élastique
  - Niveau
  - Paramètres d'influence (densité de dislocations:ρ)
- La déformation plastique
  - Confirmation du glissement, des directions et plans de glissement
  - Consolidation
  - Restauration statique et dynamique
- L'endommagement et la rupture

Dans les autres matériaux

- Elles existent
- Le mode de liaison rend leur déplacement beaucoup plus difficile que dans les métaux.



Conséquences du déplacement aisé des dislocations dans les métaux

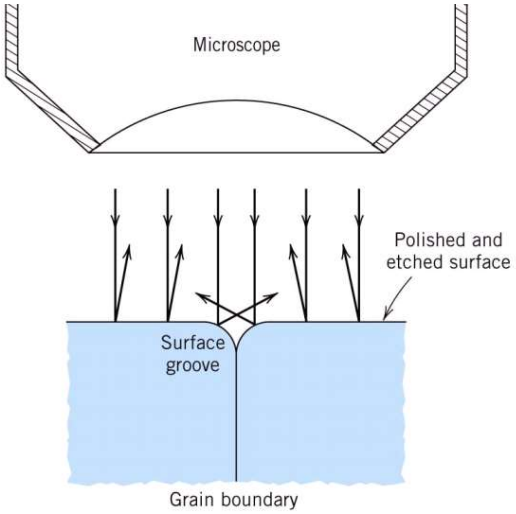
- La théorie des dislocations explique la grande ductilité des métaux.
- Cette ductilité présente de grands avantages.
  - Elle confère aux métaux une grande résistance au choc : **ténacité**
  - Elle permet l'adaptation des structures aux surcharges
  - Elle facilite la mise en forme

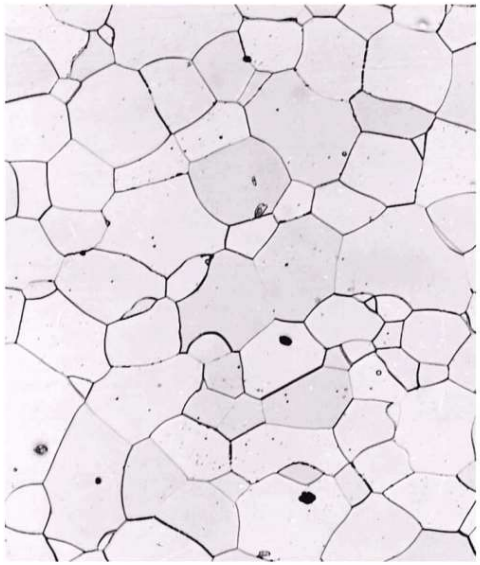
Plan

4 types de défauts cristallins

- Défauts ponctuels: lacunes $\Rightarrow$ diffusion
- 1D - dislocations $\Rightarrow$ plasticité, consolidation, restauration, rupture
- 2D
- 3D

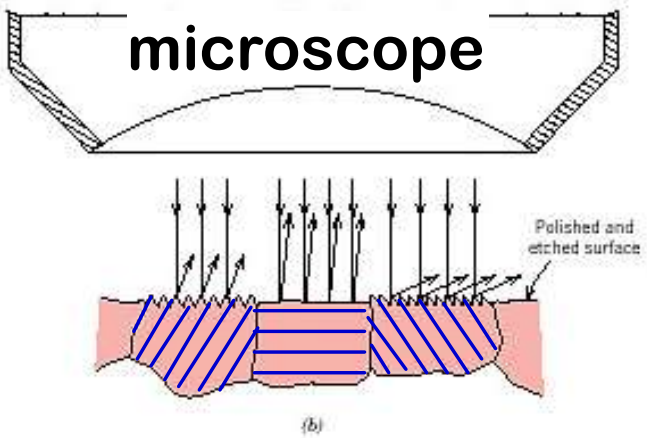
Observations au microscope optique





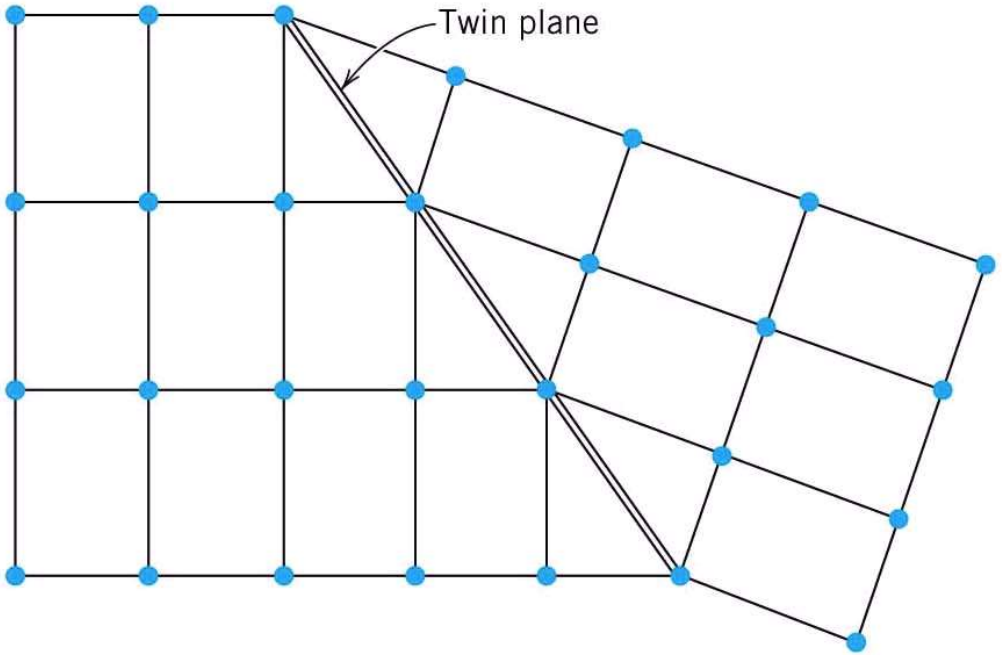
- La surface des métaux réfléchit très bien la lumière. Elle apparaît brillante au microscope.
- En attaquant cette surface par un agent corrosif (acide) on peut mettre en évidence les défauts, qui sont attaqués en premier lieu et ne réfléchissent plus la lumière.

Observations au microscope optique



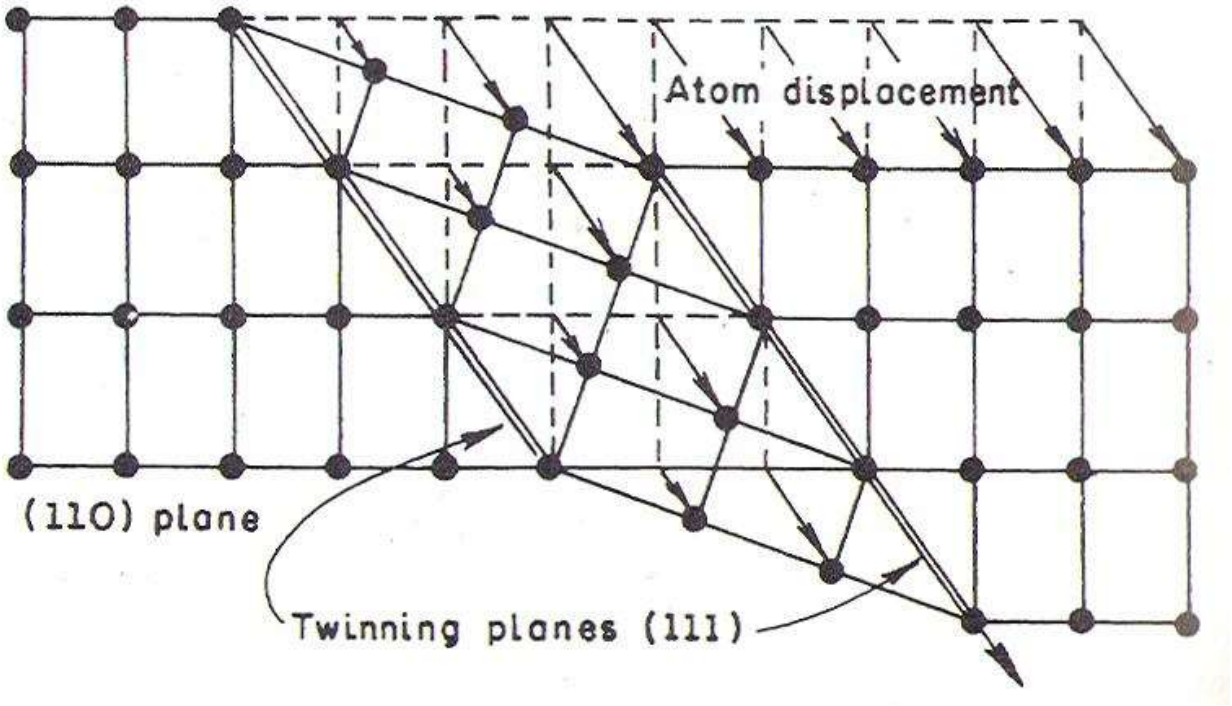
- Certaines zones du métal sont plus attaquées que d'autres.
- C'est le révélateur que différents plans cristallographiques sont présents en surface.

Les macles



- Les plans de macles sont des plans de symétrie.
- Elles se forment lors de la cristallisation.

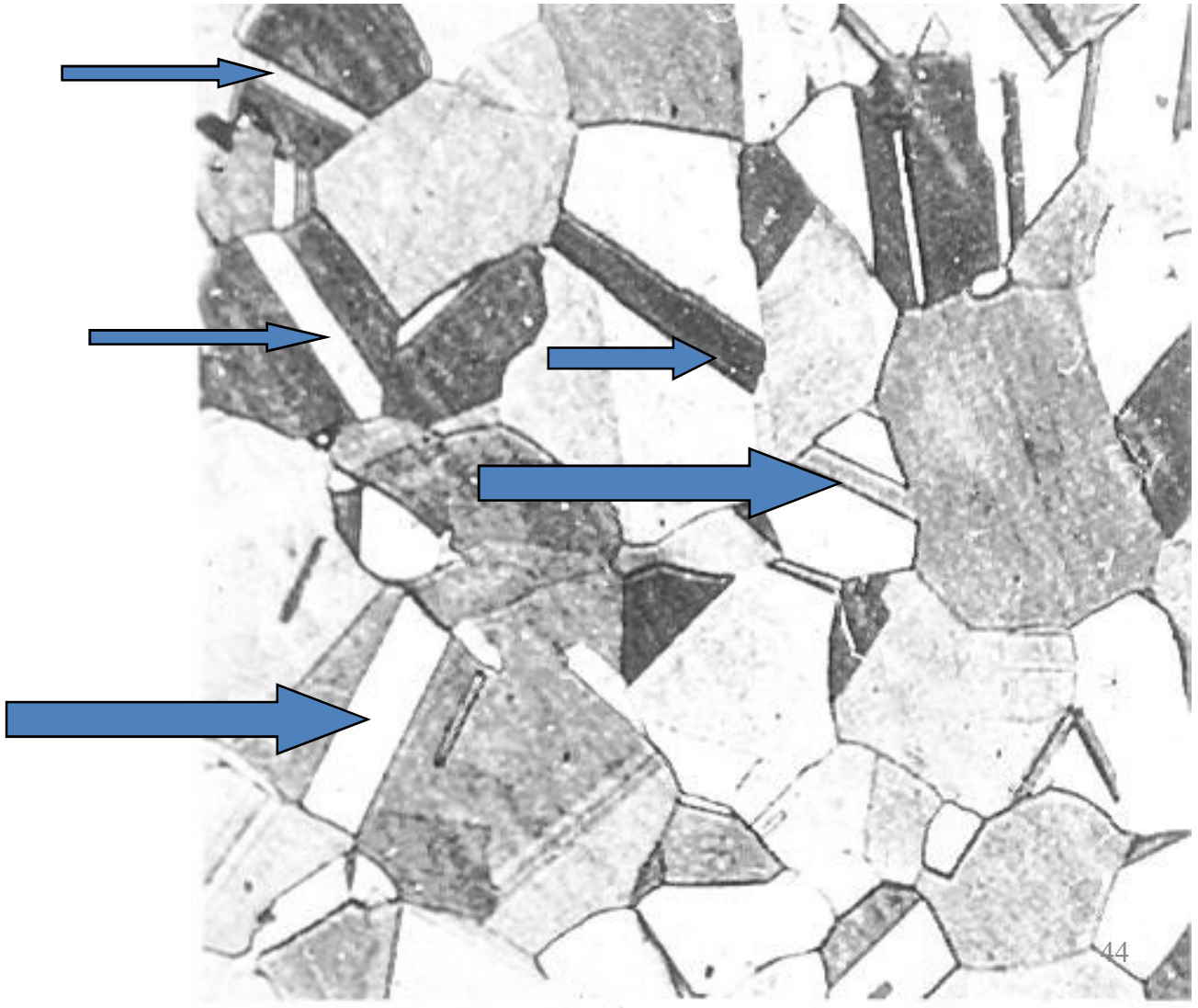
Les macles



Elles peuvent aussi résulter de déformations plastiques (mécanisme secondaire, en complément du glissement des dislocations)

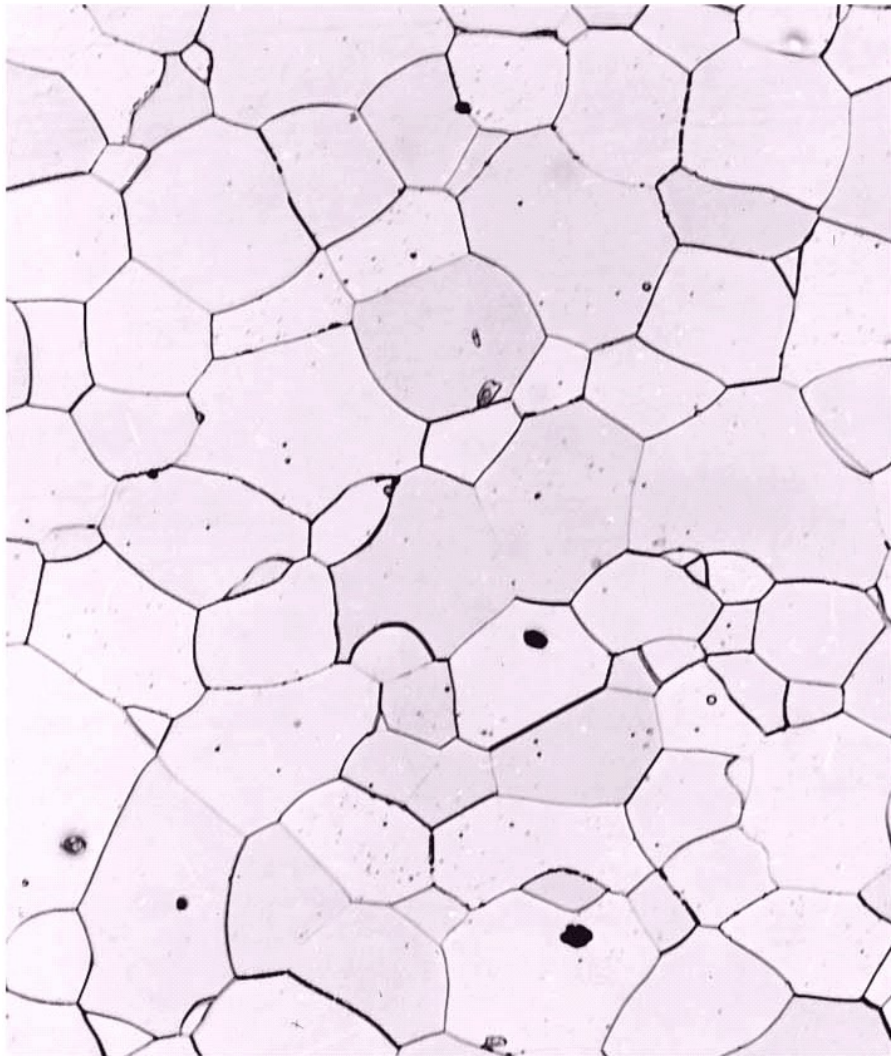
Les macles

Illustration des zones maclées.



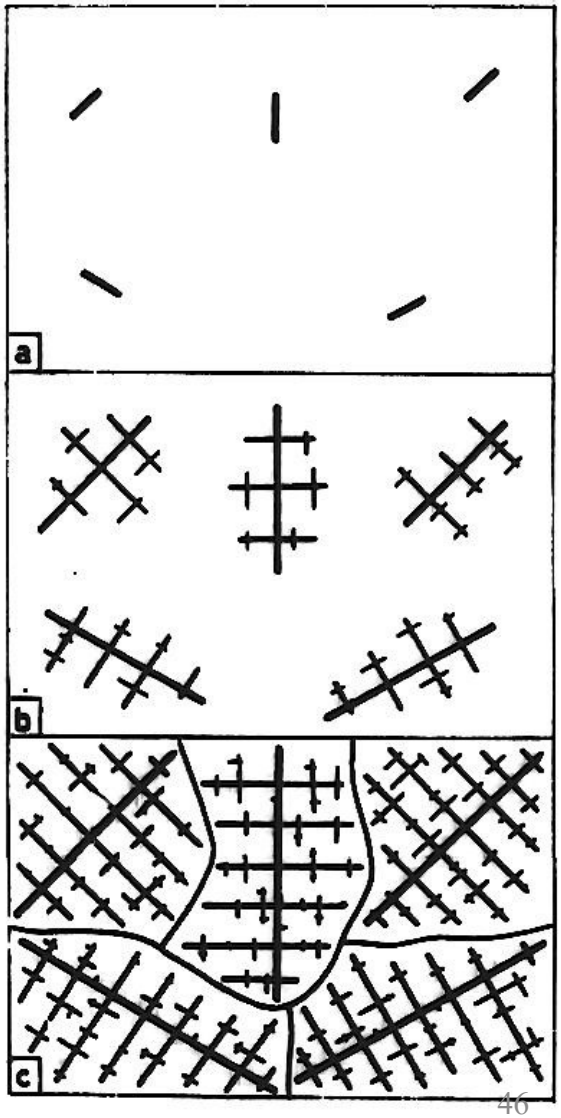
Les joints de grains

- Les métaux réels sont le plus souvent constitués de nombreux cristaux (ou **grains**) séparés par des joints de grains.
- On les appelle **polycristaux**.
- Tous les grains n'ont pas la même orientation.



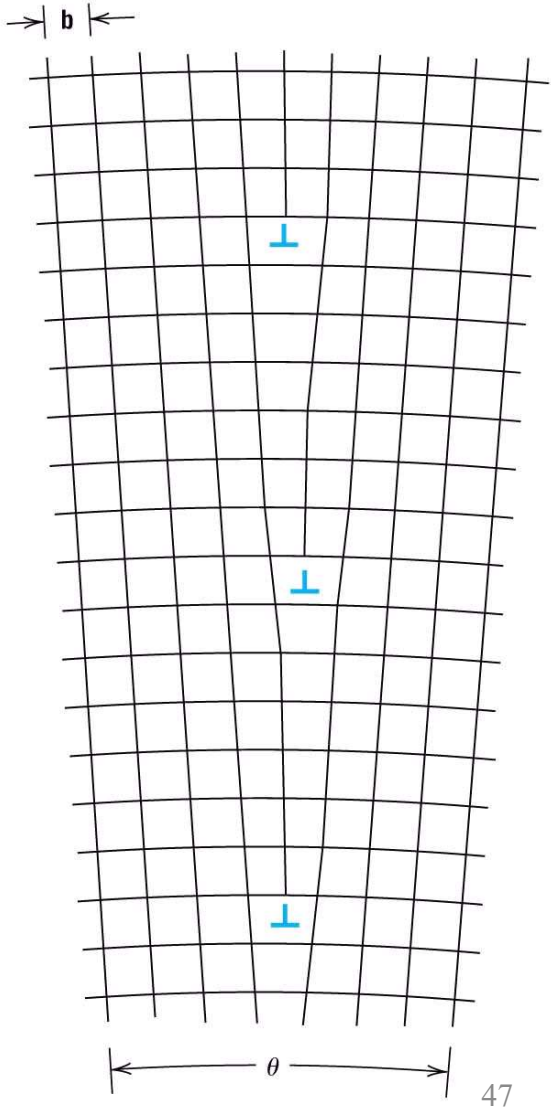
Origine des polycristaux

- Lors de la solidification des métaux, plusieurs cristaux (germes) se forment dans le liquide.
- A la fin de la solidification les différents cristaux se raccordent les uns aux autres via des interfaces appelés joints de grains.



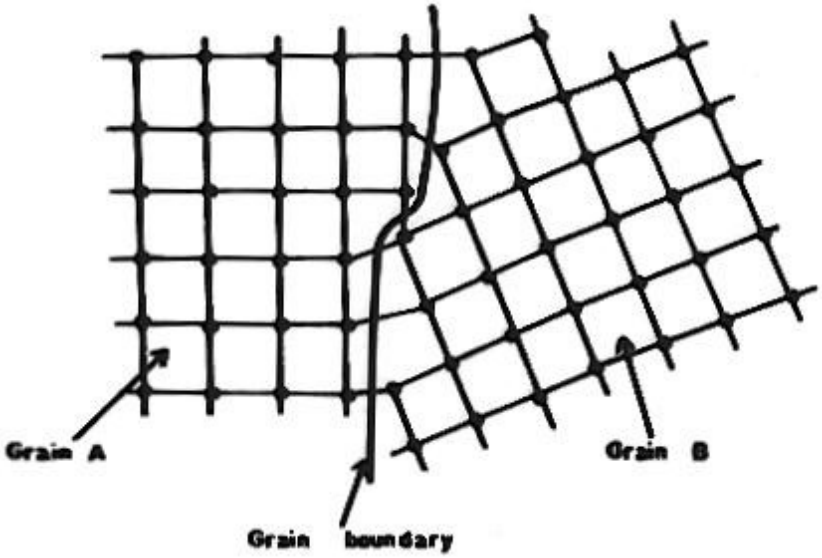
Nature des joints de grains

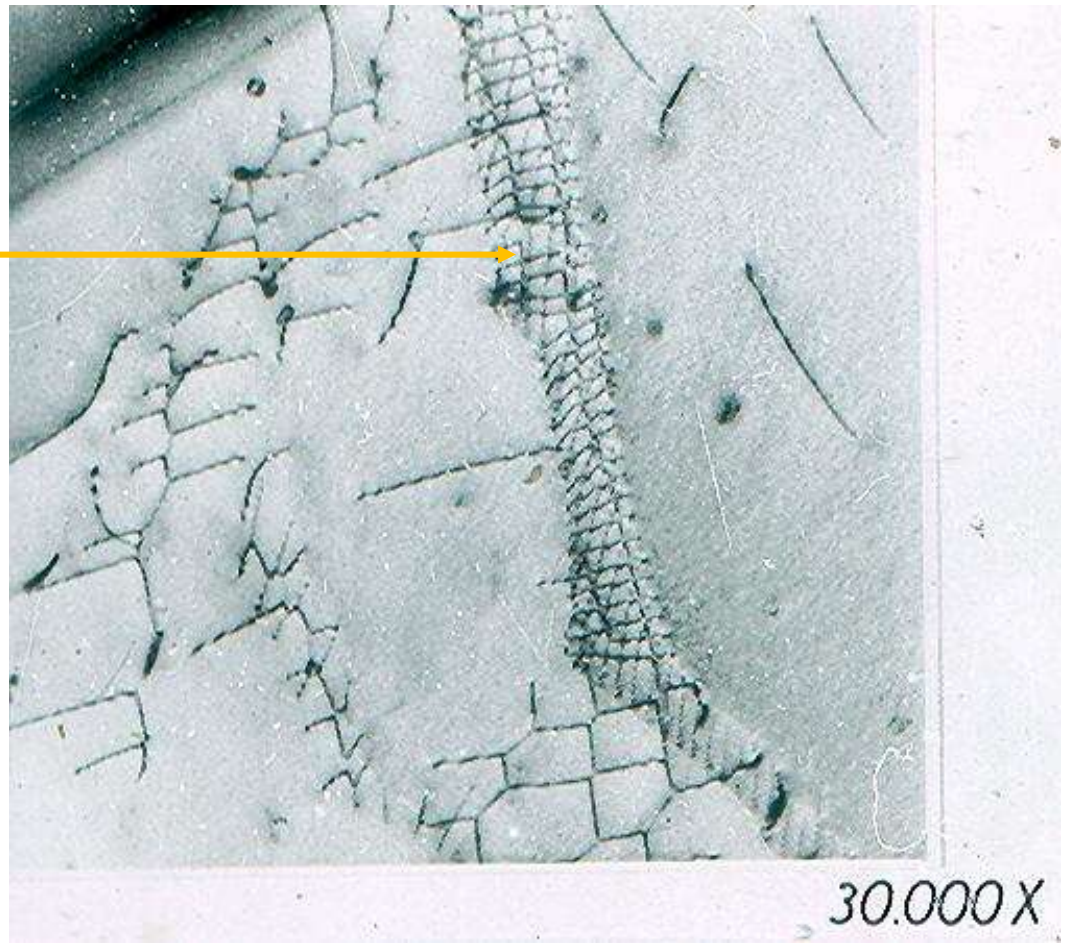
- Le joint de grain résulte d'un empilement de dislocations, dont la complexité dépend du décalage entre les cristaux voisins
- En cas de décalage faible suivant un seul axe, la distance entre dislocations vaut D=b/θ



Nature des joints de grains

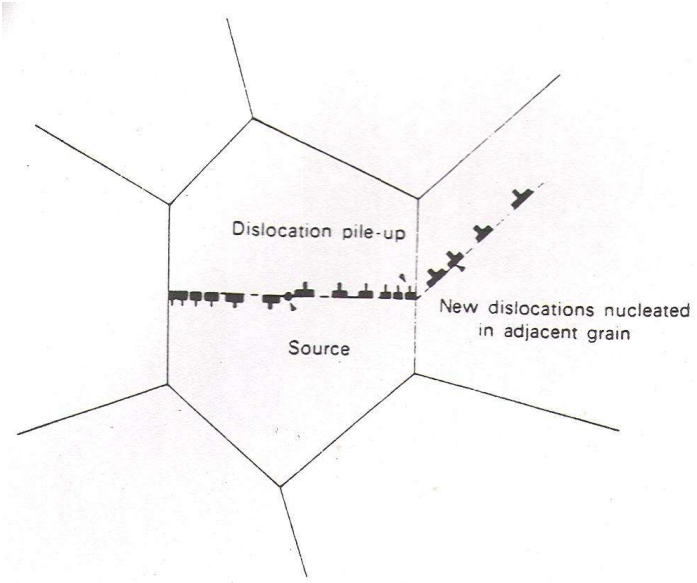
Lorsque les décalages entre cristaux ↑, les empilements de dislocations forment une structure à 3D complexe





Propriétés des joints de grains

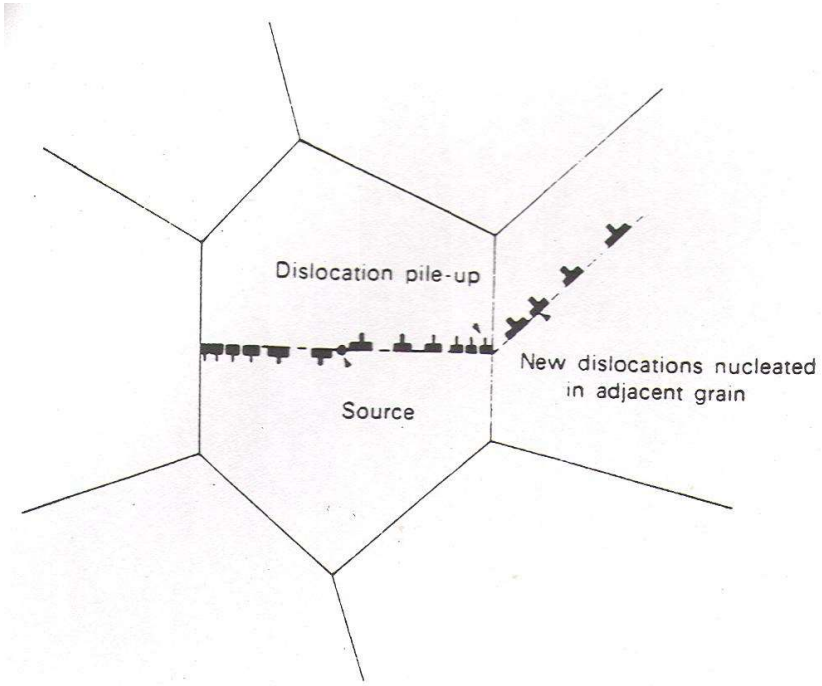
- Joint de grain = obstacle pour les dislocations qui s'y empilent.
- Empilement de dislocations
  $\Rightarrow$ Concentration de tension sur le joint de grain.
  $\Rightarrow$ Activation d'une source de Frank-Read dans le grain voisin et reprise de la déformation



Propriétés des joints de grains

- La reprise de déformation sera d'autant plus aisée que l'empilement de dislocations est important

$\Rightarrow$ En d'autres mots, si le grain est + grand



- **Loi de Hall-Petch**

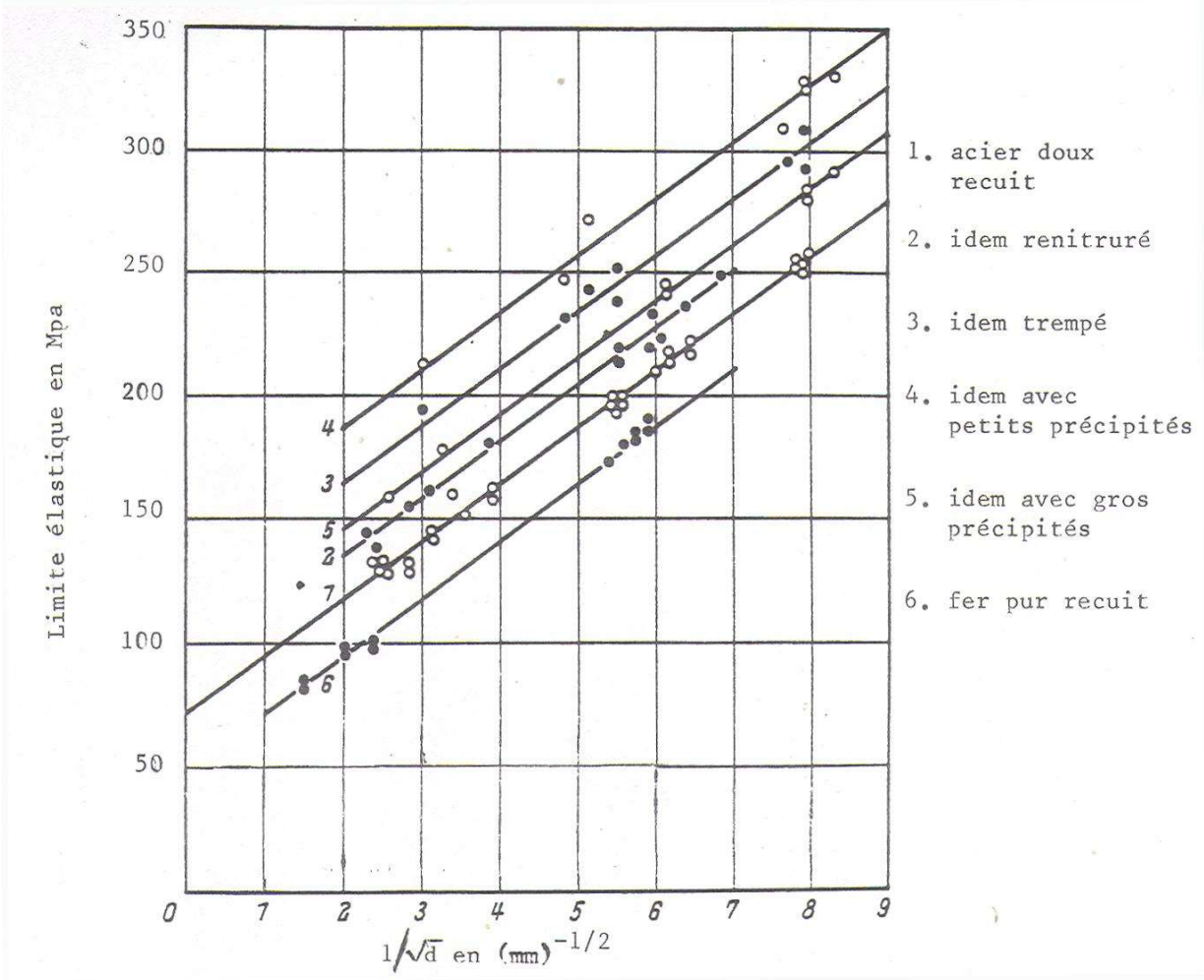
$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

Avec d: taille de grains

Dans le cristal voisin les plans et directions de glissement sont orientés différemment.

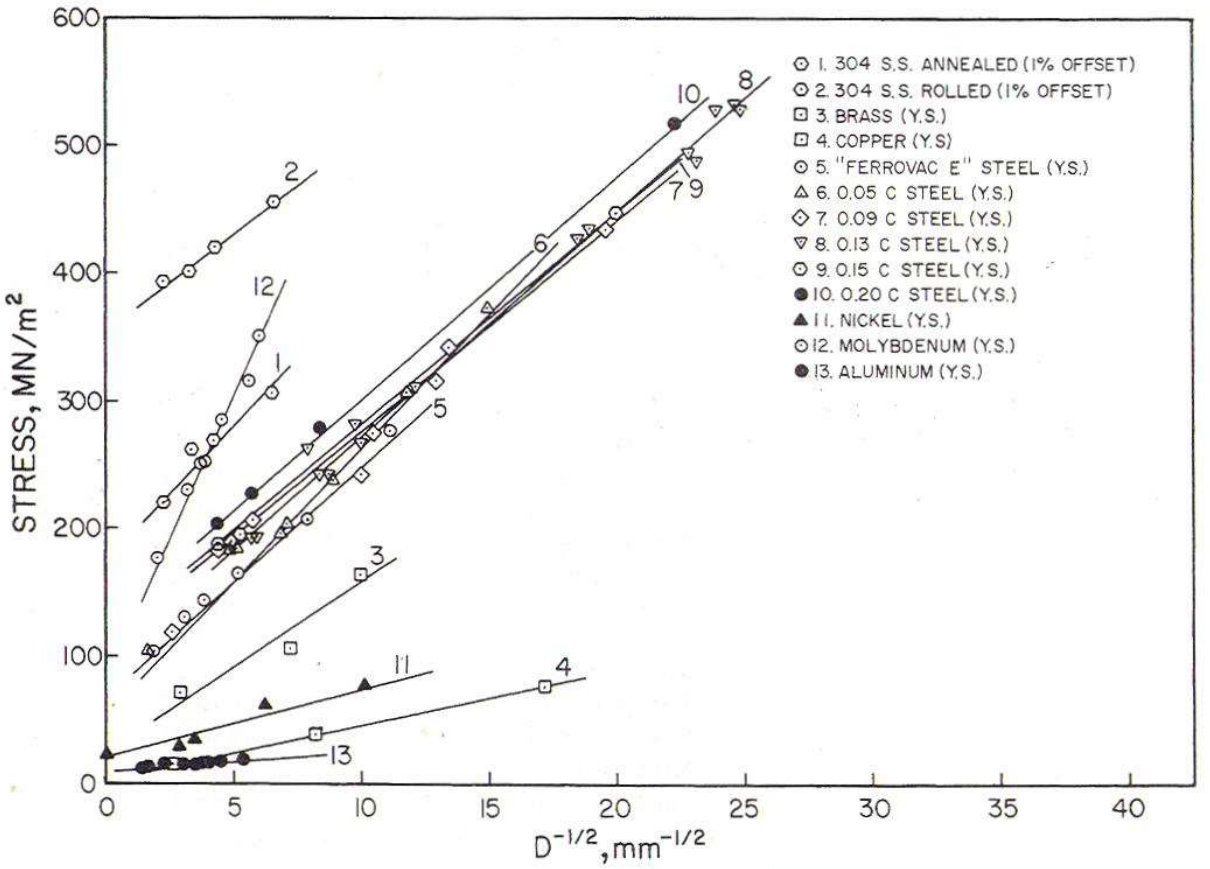
Loi de Hall-Petch pour les aciers

- En pratique la loi de Hall-Petch est bien respectée.
- L'effet de la taille des cristaux est très marqué.
- Les métaux testés ont des tailles de grains entre 10 µm et 1 mm.

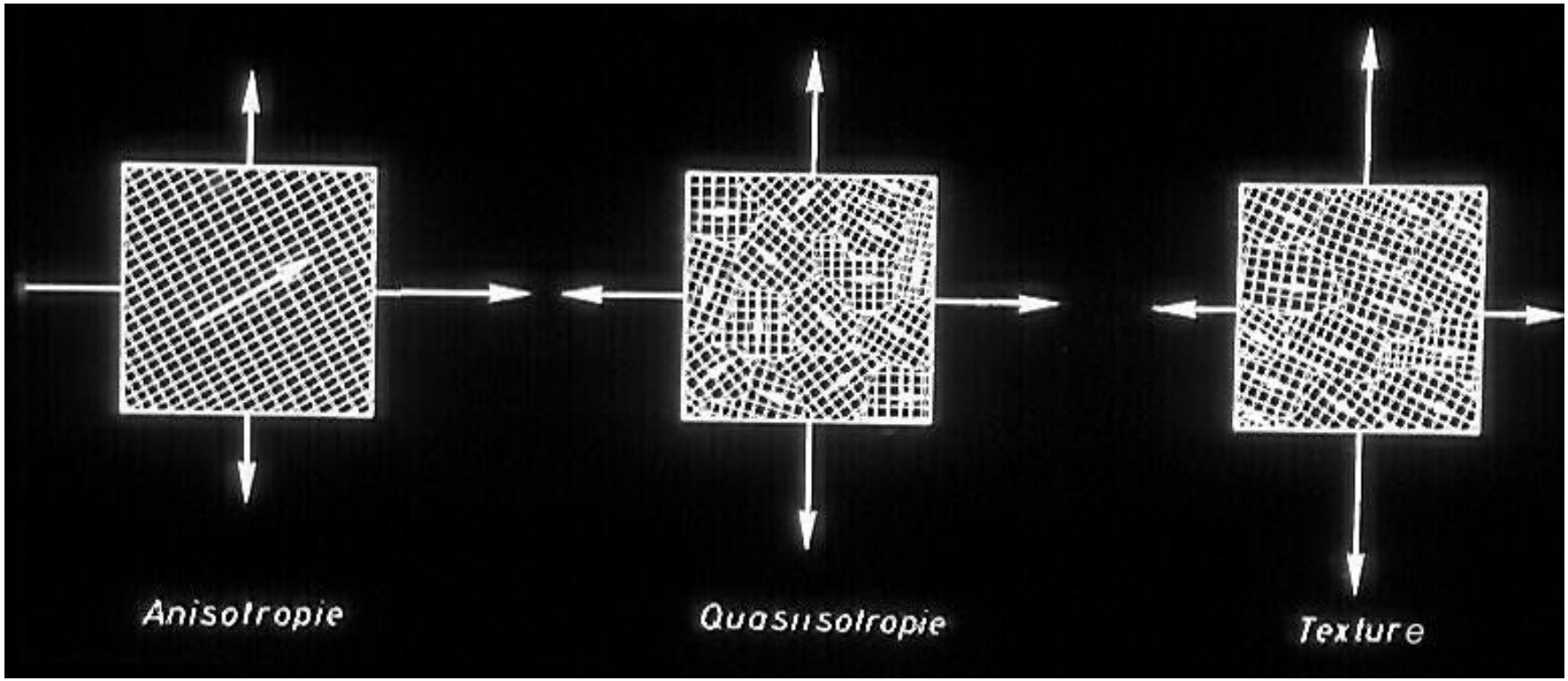


Loi de Hall-Petch pour d'autres métaux

- Pour les autres métaux, les conclusions sont les mêmes.
- Les métaux testés ont des tailles de grains entre 1 µm et 1 mm.

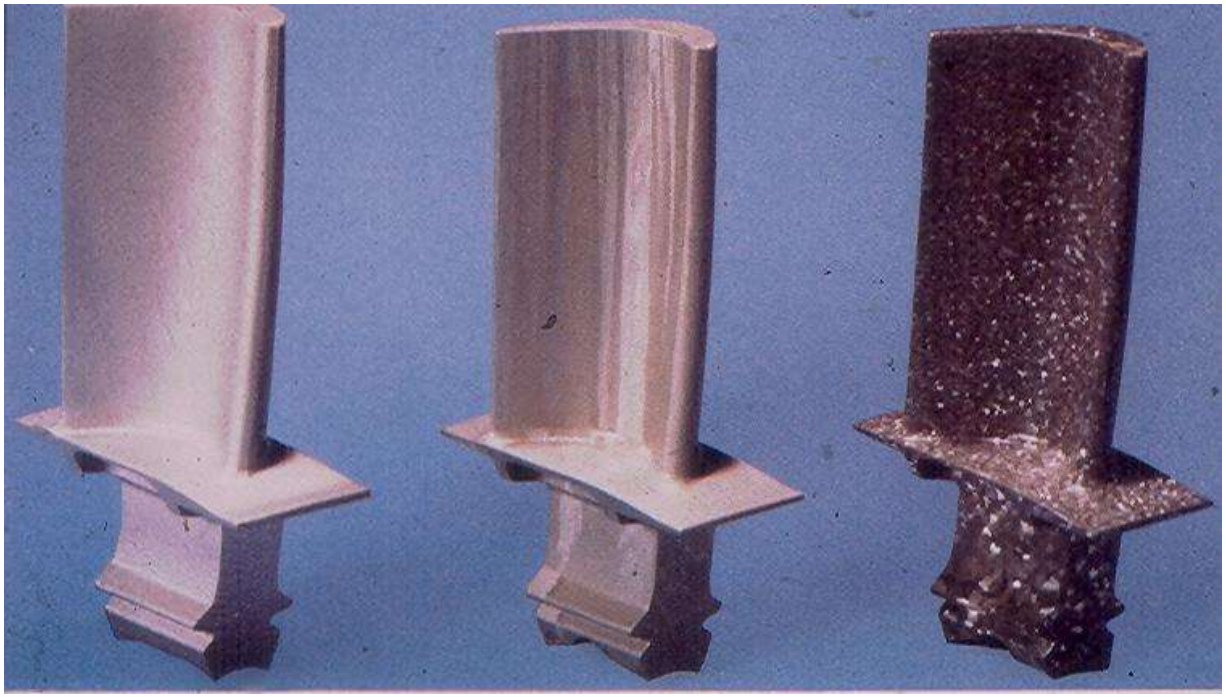


Orientation des cristaux



Suivant l'orientation des cristaux le métal sera quasi-isotrope (orientations aléatoires) ou au contraire anisotrope (orientation préférentielle = texture)

Orientation des cristaux

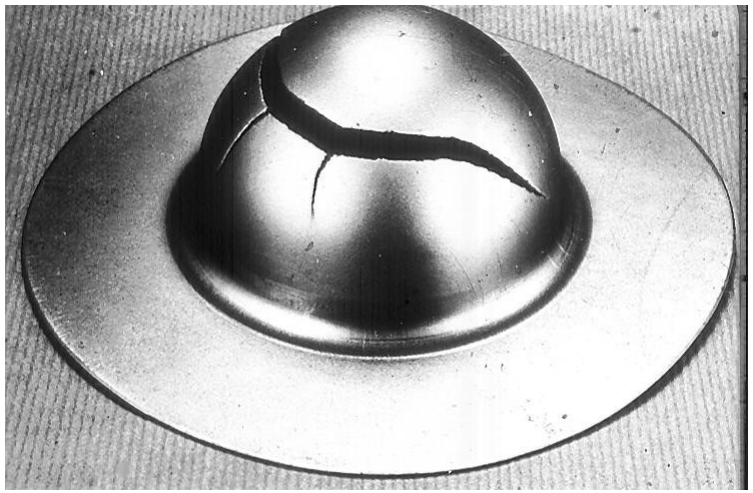


En agissant sur les techniques de production, il est possible de réaliser les 3 types de microstructures (avec des propriétés différentes)

- monocristallines
- polycristallines à grains orientés
- polycristallines à grains équiaxes

Que choisir ?

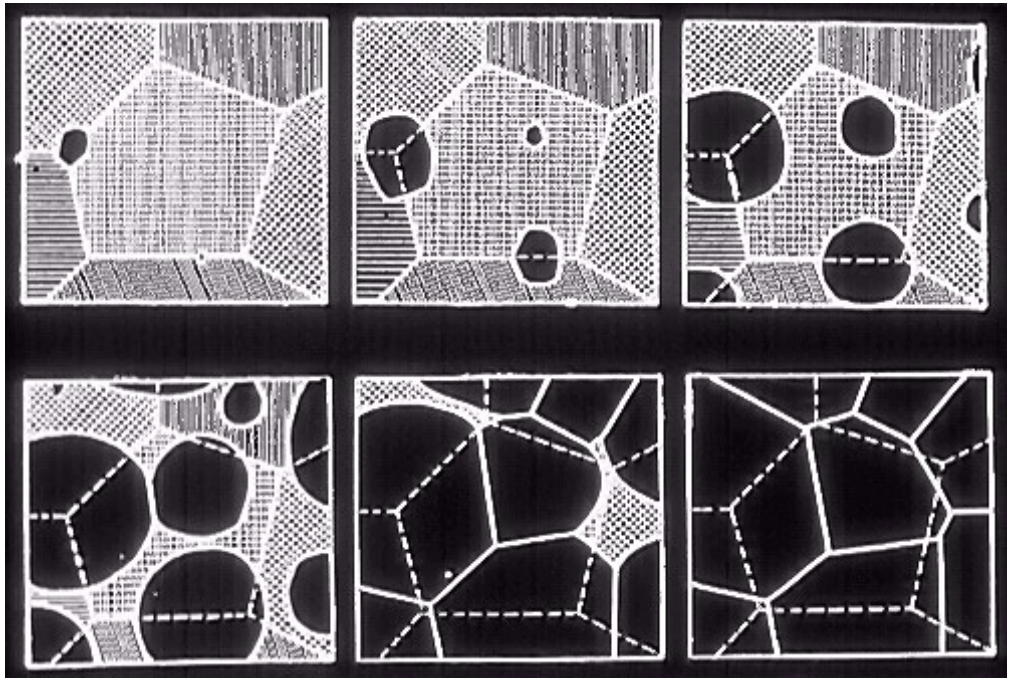
- On peut être tenté par l'isotropie : facilité des calculs
- Pour certaines applications, la matière est mieux utilisée si elle est anisotrope.



- En emboutissage, la déformation dans le sens de l'épaisseur doit rester faible.
- Pour un métal anisotrope sollicité uniaxialement $\varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$
- On est ainsi amené à définir un coefficient r de Lankford (ε_3 dans le sens de l'épaisseur de la tôle)

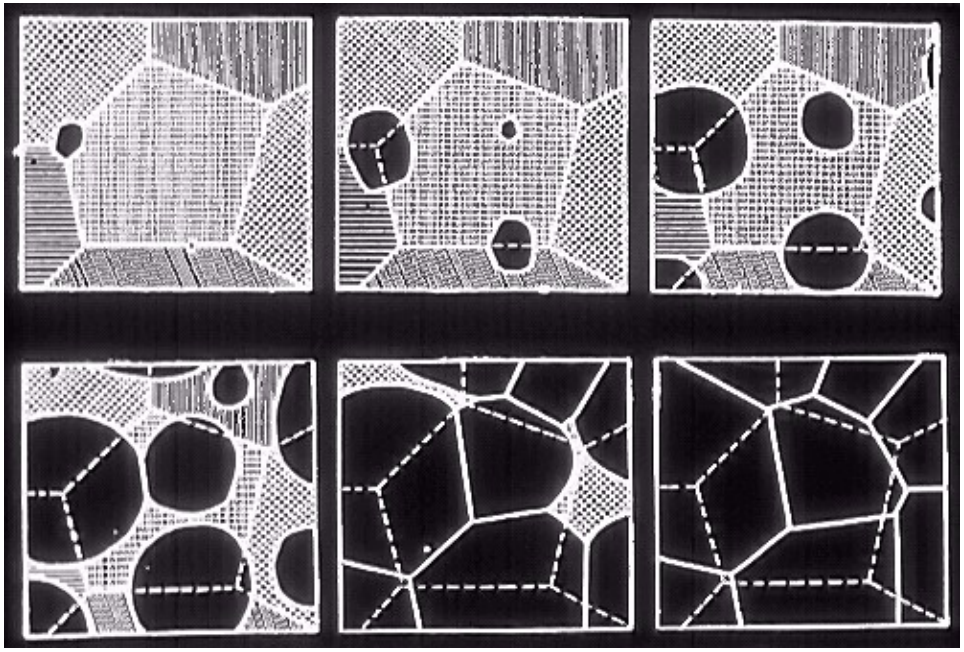
$$r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3}$$ r peut atteindre ~ 2

Recristallisation



- Déformation
  $\Rightarrow$ stockage d'énergie de dislocations $\frac{1}{2}Gb^2\rho_1$
- Le matériau peut recristalliser pour former de nouveaux cristaux avec une densité de dislocations $\downarrow \rho_2$.

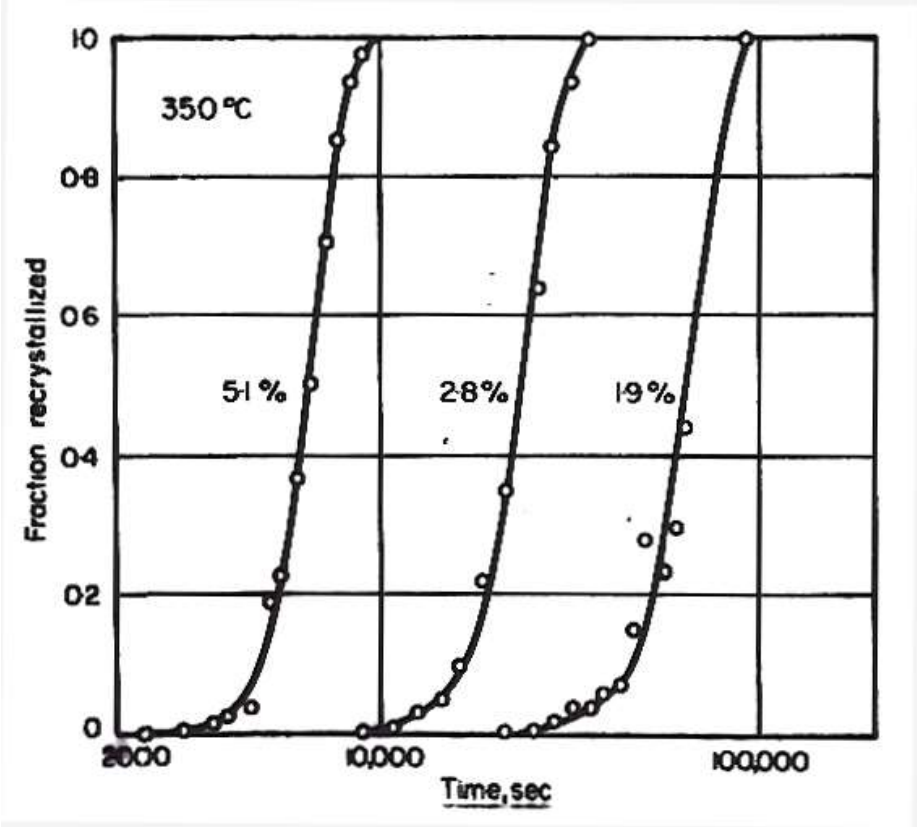
Recristallisation $\Rightarrow$ Germination



- La formation des germes des nouveaux cristaux implique l'existence de vides dans le solide.
- Elle s'initie donc aux joints de grains et aux nœuds de dislocations.

Temps d'incubation

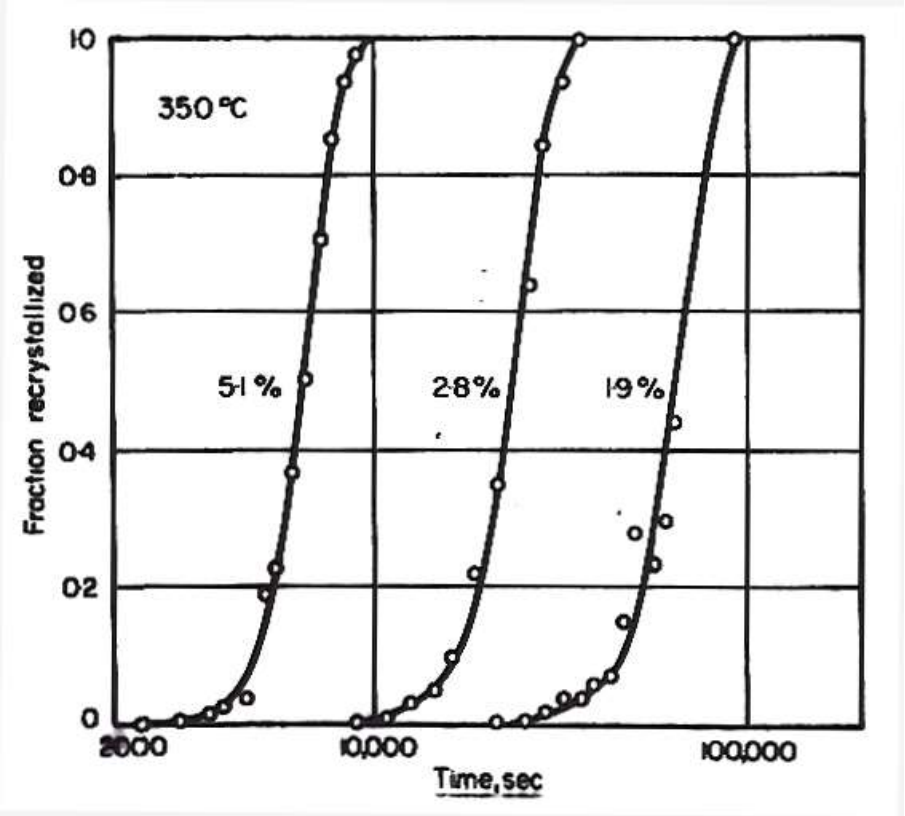
- La germination n’est pas instantanée = incubation
- Incubation ↓ si
  - L’écrouissage (et donc l'excès d'énergie) est élevé
  - La température est élevée



Conditions de recristallisation

Le temps d'incubation de
recristallisation impossibl

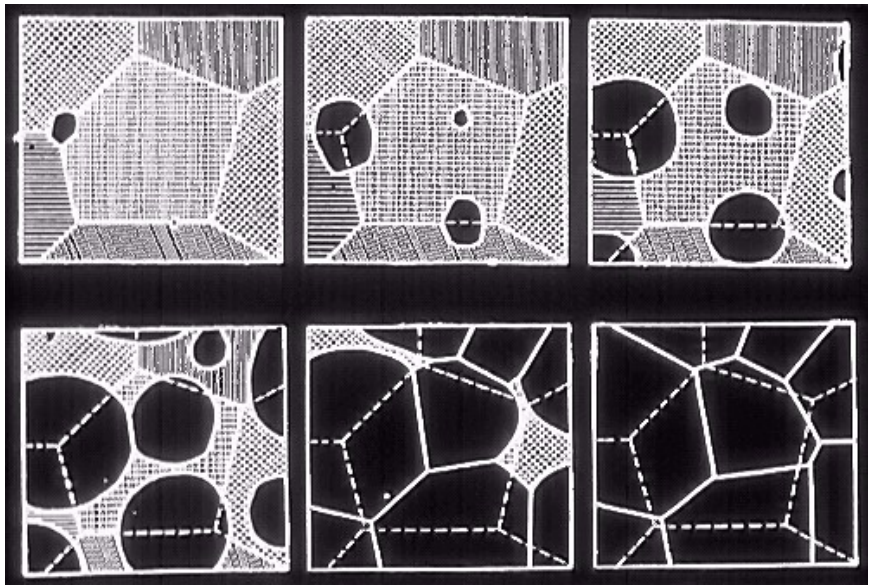
- Si l'écrouissage (l'excès d'énergie) n'est pas suffisant.
- La température est trop basse.



En pratique :

$$T_{recristallisation} \geq 0{,}5 * T_{fusion}(K)$$

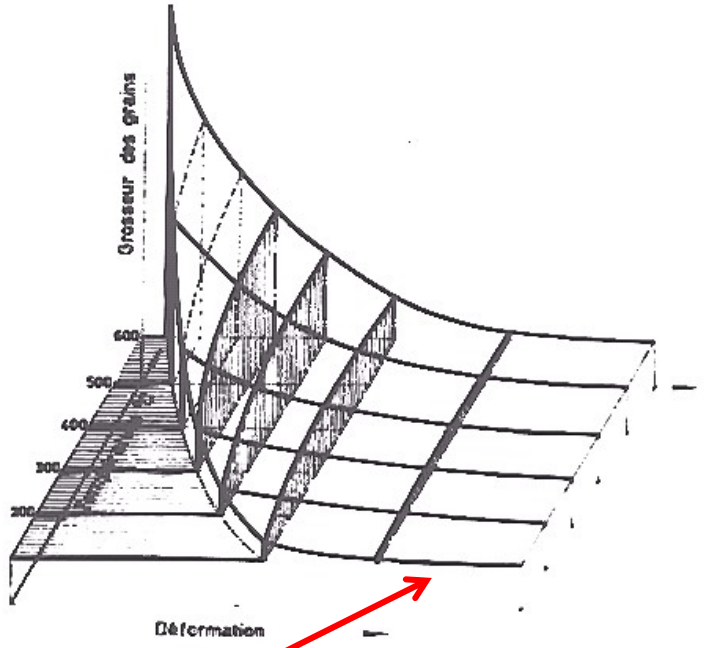
Structure recristallisée



La structure recristallisée est différente de la structure de départ

- Les grains peuvent être plus gros ou plus petits
- Les grains peuvent être orientés différemment.

Taille des grains recristallisés



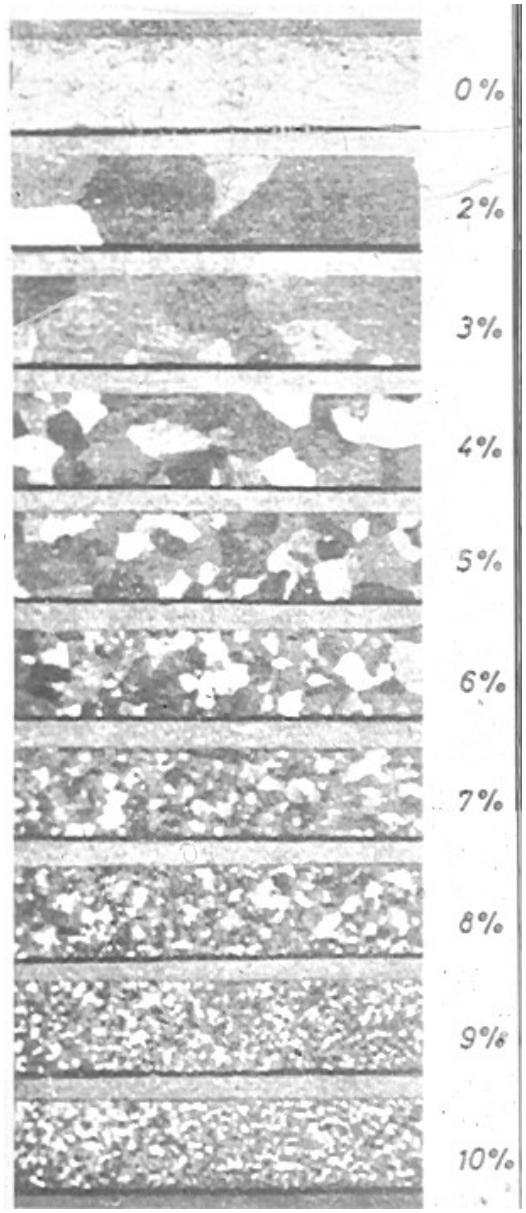
Beaucoup de défauts

$\Rightarrow$ Beaucoup de germes

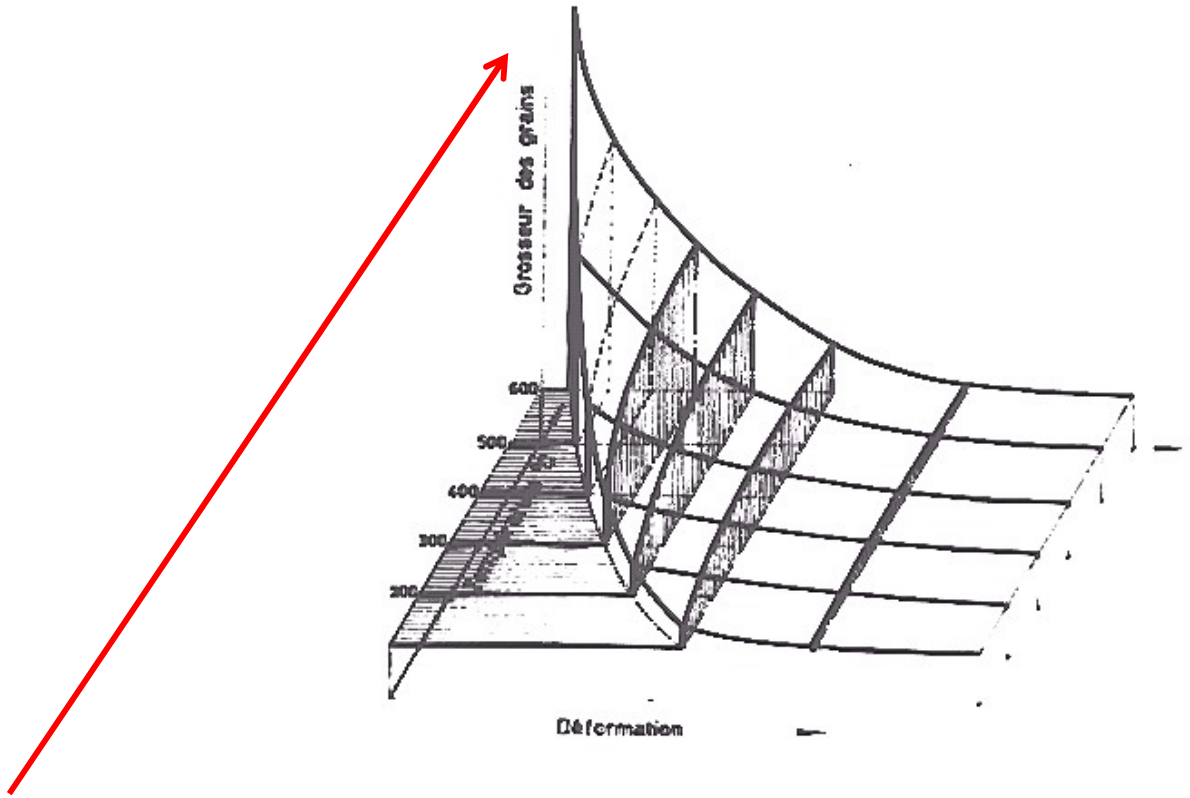
$\Rightarrow$ Les grains recristallisés sont petits

Effet de l'écrouissage

- Plus le matériau est déformé, plus les grains sont petits.
- Effet très marqué!



Taille des grains recristallisés

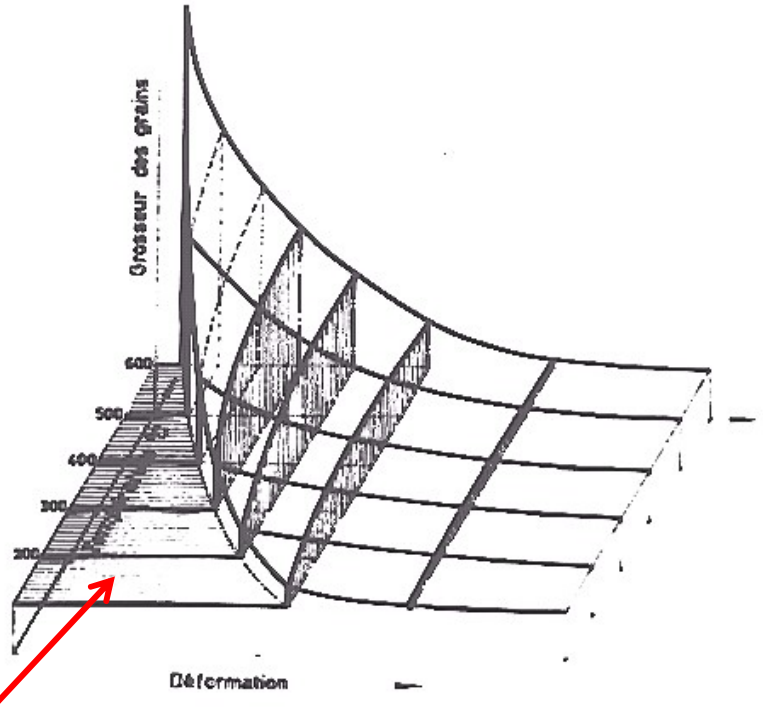


Température ↑, la diffusion est plus rapide

⇒ Les grains grossissent vite

⇒ Les grains recristallisés sont plus gros.

Taille des grains recristallisés



Il n'y a pas recristallisation

- Lorsque l'écrouissage est trop faible
- Lorsque T est trop faible

Plan

4 types de défauts cristallins

- Défauts ponctuels: lacunes $\Rightarrow$ diffusion
- 1D - dislocations $\Rightarrow$ plasticité, consolidation, restauration, rupture
- 2D - Matériaux polycristallins
  Loi de Hall-Petch, isotropie vs anisotropie, recristallisation, coalescence
- 3D

Défauts 3D

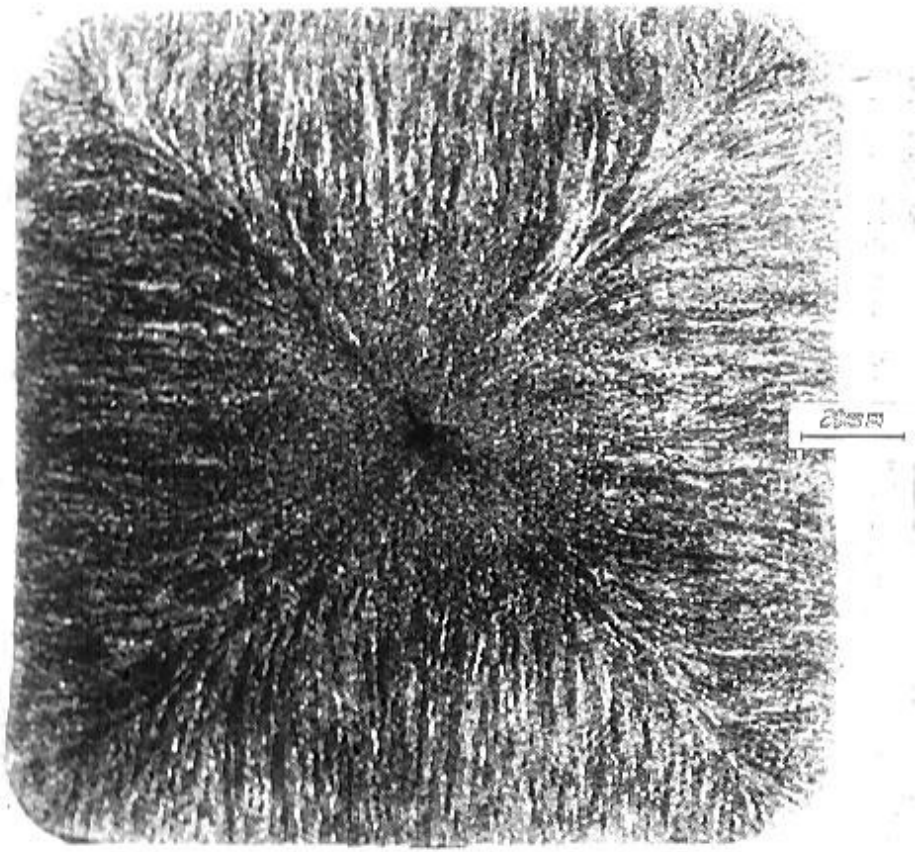
- Porosité
- Inclusions

Les porosités sont visibles à l'œil nu si on découpe la pièce à l'endroit voulu.

Elles sont détectables par radiographie (pièces de sécurité)

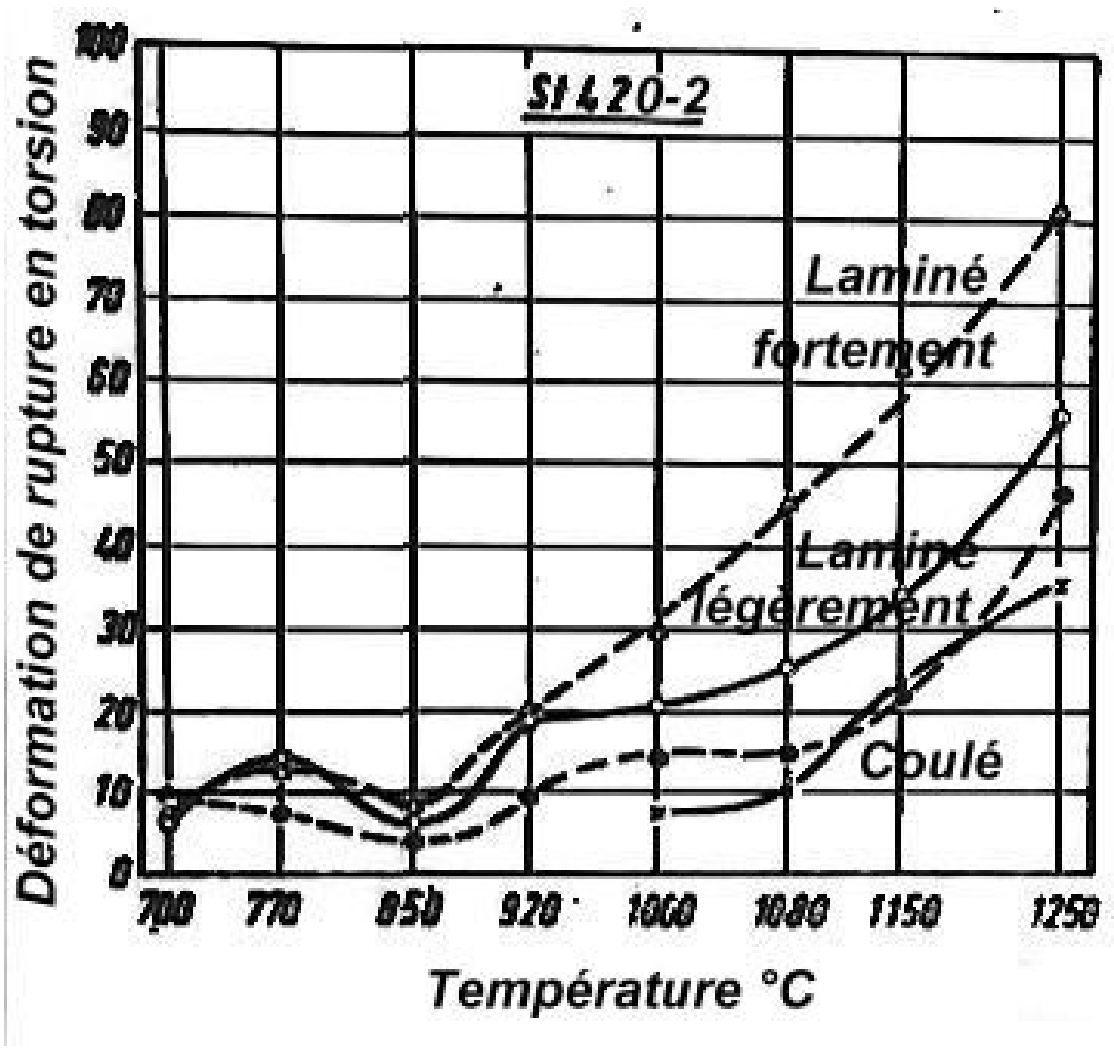
Porosités

- Fréquentes dans les pièces coulées car la solidification s'accompagne d'une contraction.
- Un laminage (compression à chaud) permet généralement de les refermer, si elles ne débouchent pas en surface.



Effet des porosités

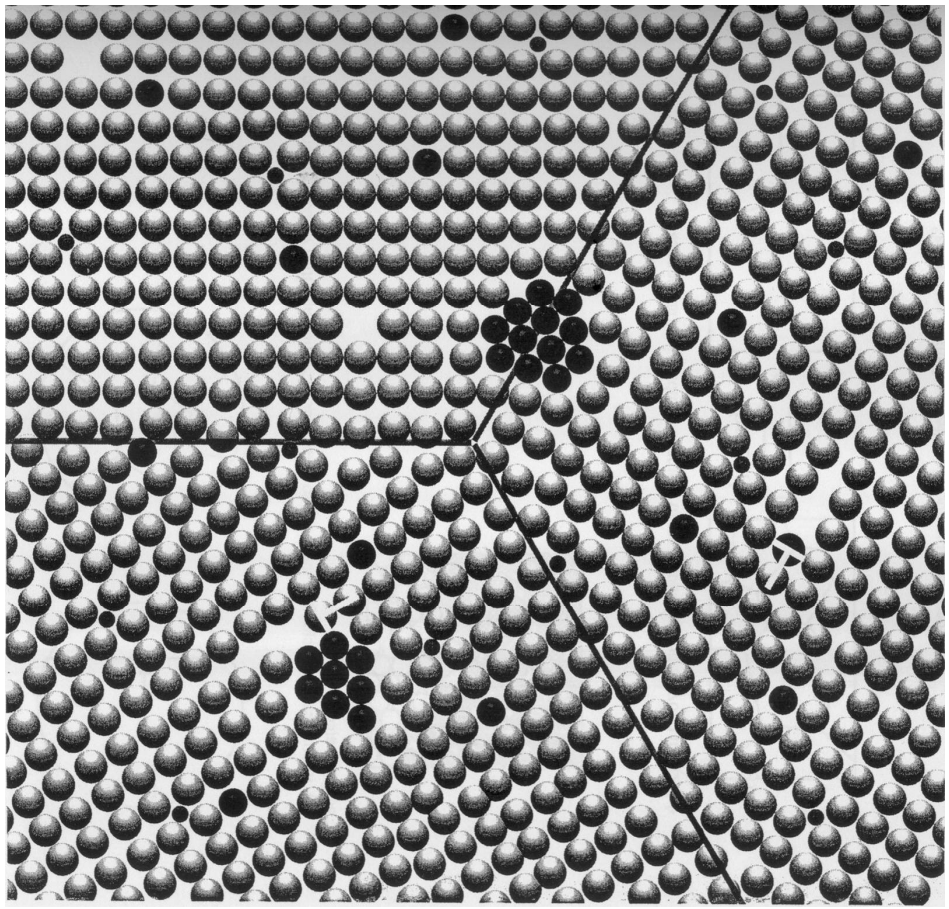
Ductilité
(= déformation à rupture) ↓↓



Métal réel

Pour un métal "A" pur

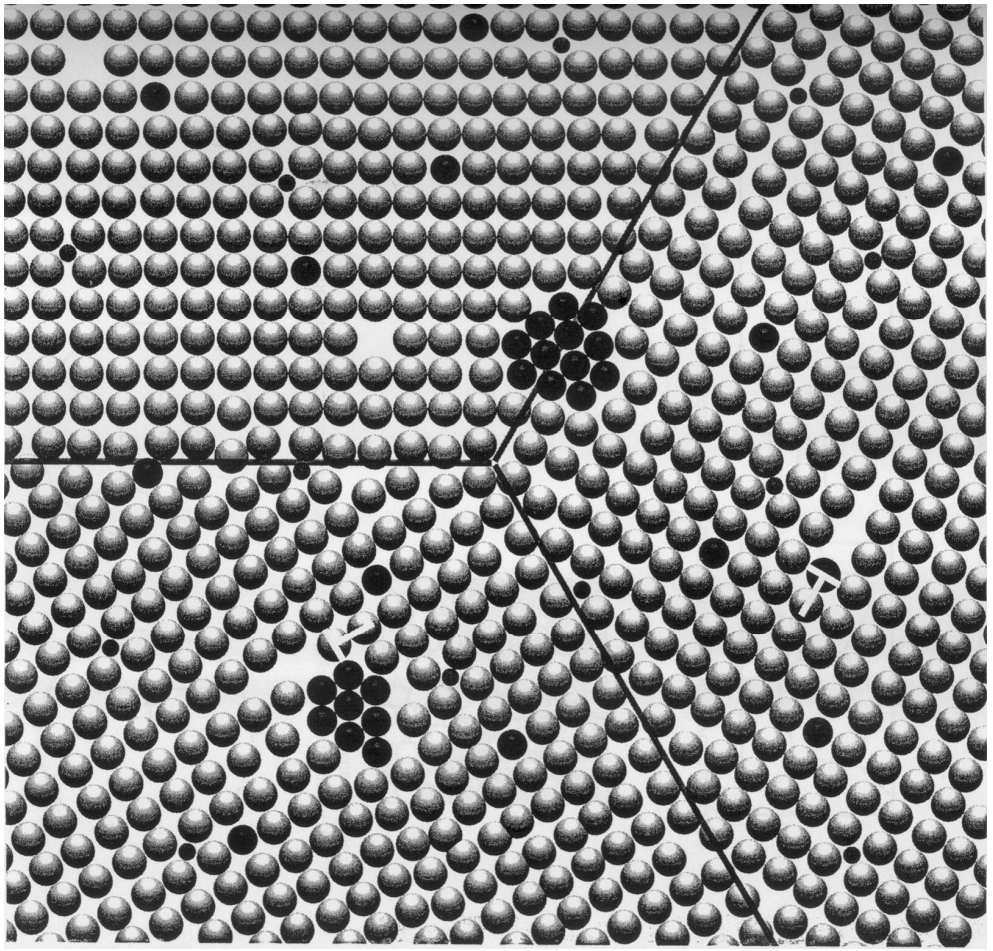
- Lacunes
- Dislocations
- Joints de grains
- Porosités



Métal réel

Métal A + autres éléments (B, C...)

- Atomes étrangers en solution (substitution ou insertion)
- Autres phases (précipités, intermétalliques)



Chapitre 4