

Métaux pour le GC

21 Mai 2025

**Modes de durcissement ....**

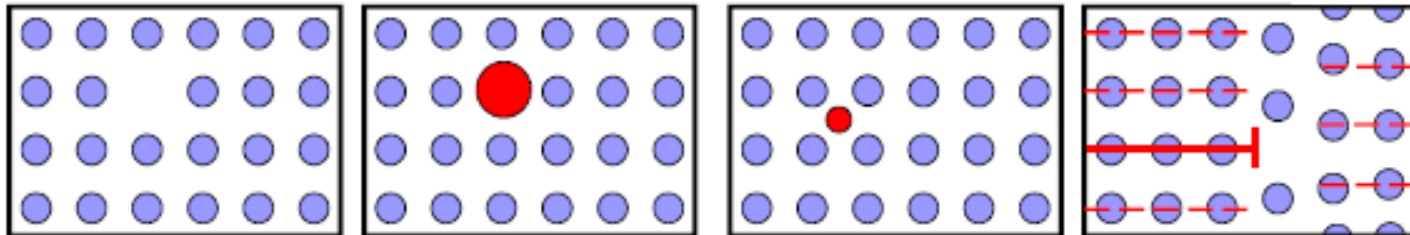
**ou comment augmenter la limite élastique d'un alliage  
métallique**

**ou encore comment « repousser » l'entrée en  
plasticité.**

# Mécanismes de déformation plastique

Les alliages métalliques sont constitués de cristaux (= grains).

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



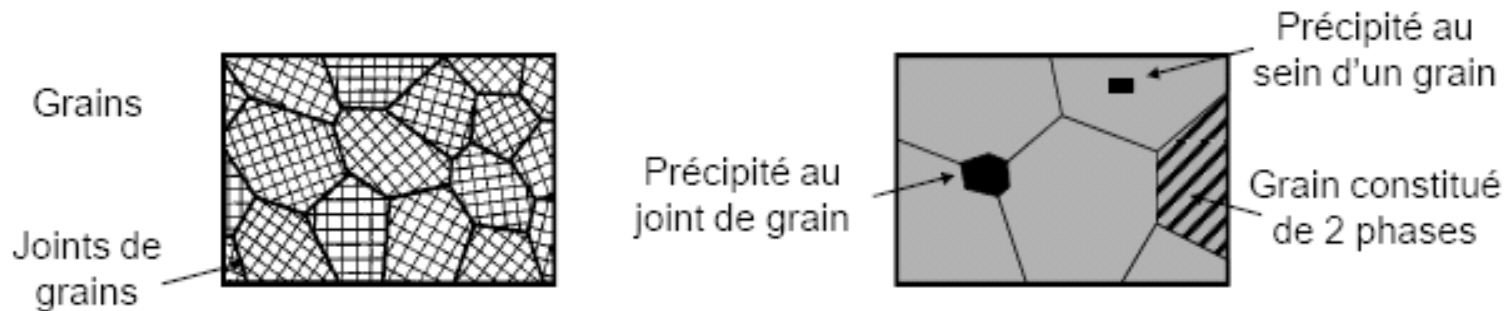
Lacune

Défaut ponctuel  
(substitutionnel)

Défaut ponctuel  
(interstitiel)

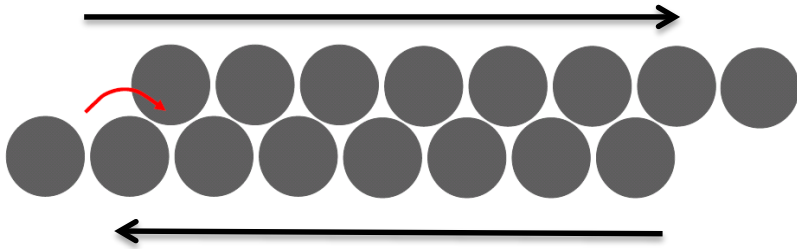
Dislocation

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

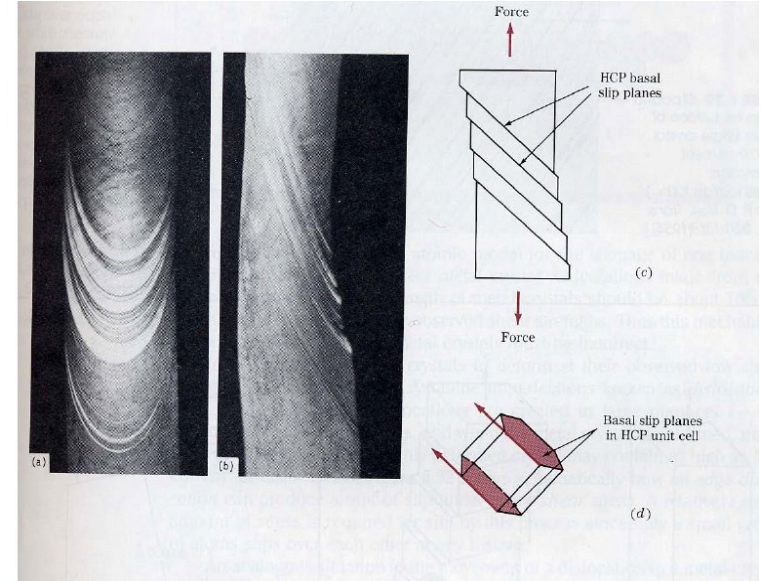


# Mécanismes de déformation plastique

Un monocristal sans défauts se déforme par glissement des plans cristallins denses, e.g. plans (111) pour les cfc.



déformation d'un cristal de Zinc (hexagonal compact) par glissement dans les plans denses.



From Foundations of Materials Science and Engineering, W.F. Smith, McGraw Hill 1993

Mais on observe qu'un alliage polycristallin se déforme plastiquement à des **contraintes de cisaillement plus faibles comparées au monocristal sans défauts**.

La déformation plastique procède par un autre mécanisme, **le mouvement des dislocations** (faute d'empilement dans le réseau cristallin) .

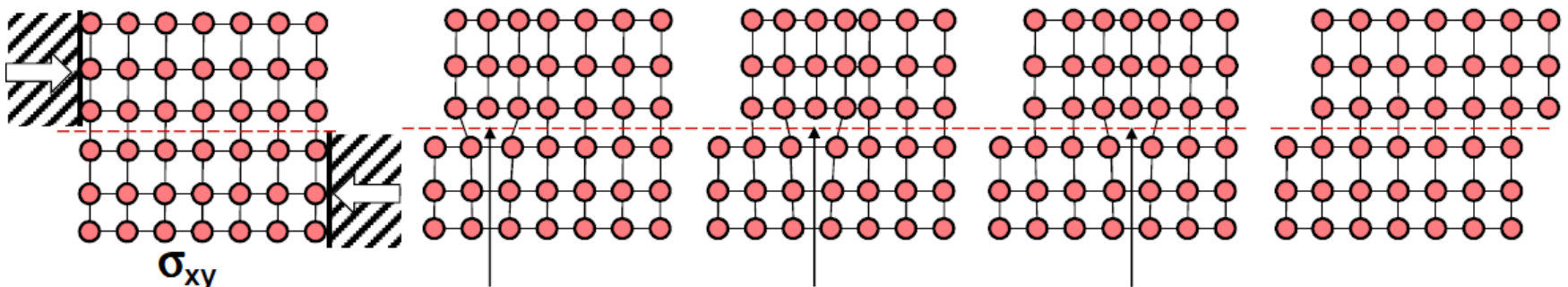
# Mécanismes de déformation plastique

La déformation plastique se fait par mouvement des dislocations (vis et coin) : glissement et montée des dislocations.

Mais pourquoi avoir des dislocations ?



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



Sous l'effet du cisaillement, le métal s'est déformé de manière plastique: une déformation résiduelle persiste.

# Mécanismes de déformation plastique

On durcit un métal, i.e. on augmente sa limite élastique et donc sa dureté, en :

- empêchant ou en gênant le mouvement des dislocations
- et donc en ancrant les dislocations sur des défauts (toute interaction, attractive ou répulsive, avec un défaut freine ou bloque une dislocation)

## ceci par cinq méthodes :

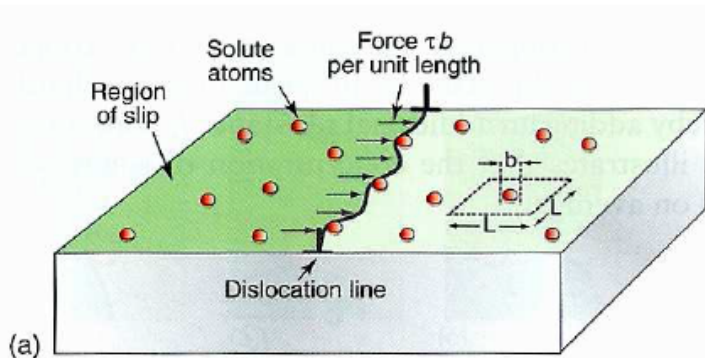
- Par **écrouissage** (corroyage, mise en forme), dislocations = obstacles à leur mouvement
- Par **solution solide** avec des éléments d'alliage (atomes étrangers = obstacles, ex. C dans Fe- $\gamma$  ou Mn en solution solide dans ferrite)
- Par un **affinage de grains** (jdg = joints de grain = obstacles)
- Par **précipitation contrôlée** (petits précipités = obstacles)
- Par une **structure composite fine** (ex. aciers perlitiques, beaucoup d'interfaces Fe- $\alpha$  / Fe<sub>3</sub>C dans la perlite)

NB: Par formation de martensite, phase très dure mais perte quasi totale de ductilité (martensite revenue).



# Durcissement par solution solide, précipités et écrouissage

$\Delta\sigma_{yy}$  : incrément de limite élastique obtenu par un mode de durcissement donné.



## Durcissement par solution solide

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

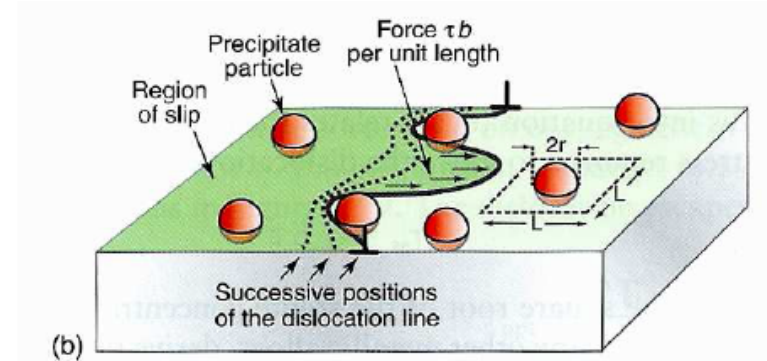
$\delta$ : différence de rayons atomiques

G: module de cisaillement

X: composition

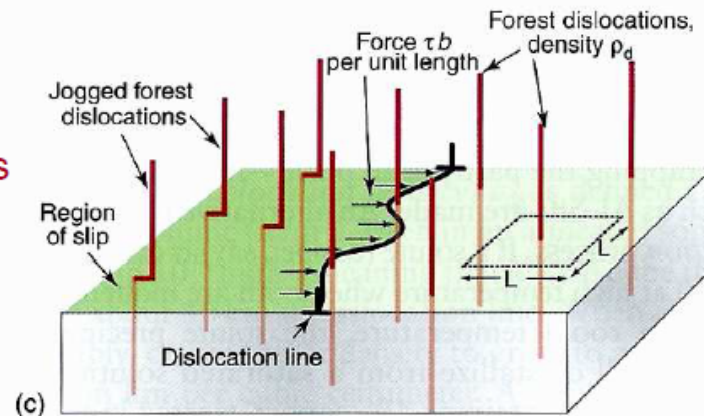
L: distance entre obstacles

$\rho_d$ : densité de dislocations [ $m^{-2}$ ]



## Durcissement par des précipités

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

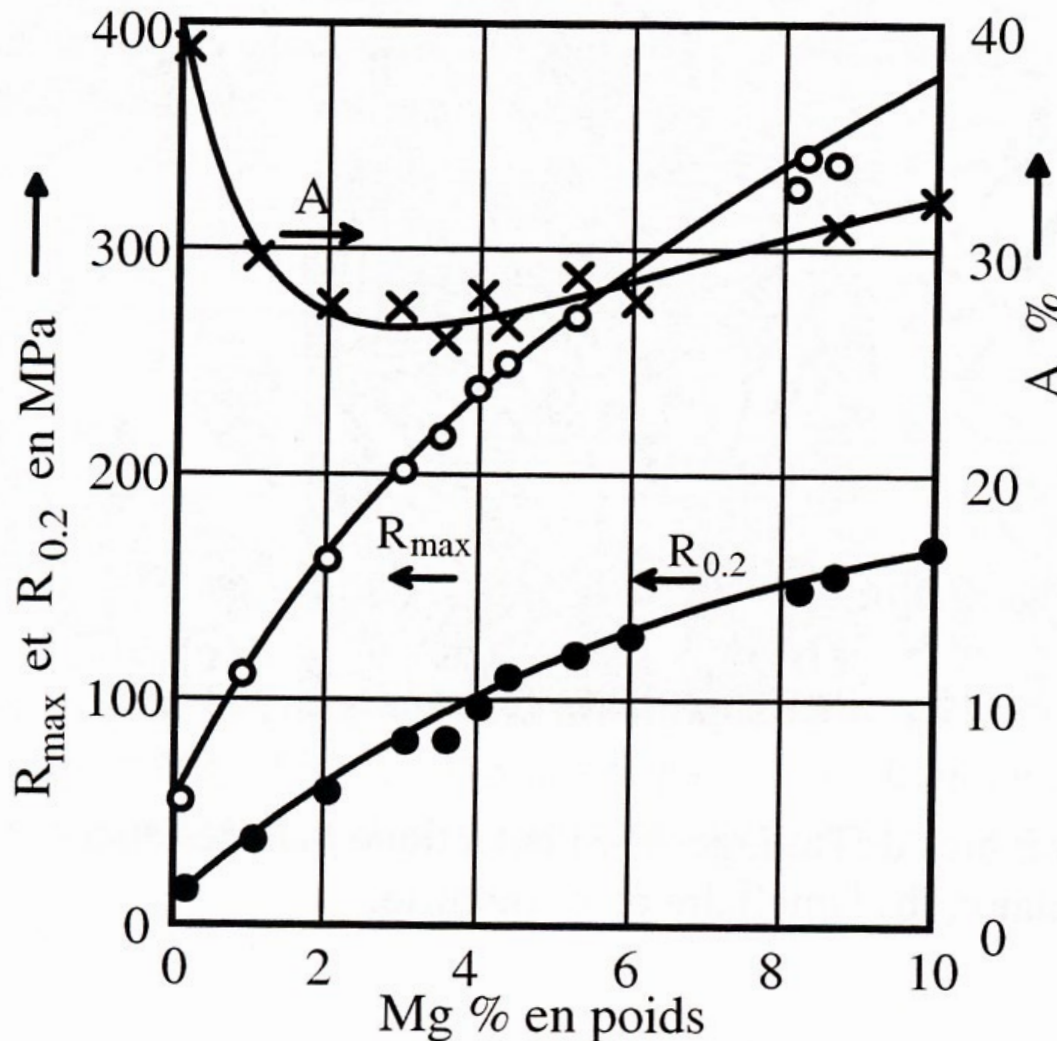


$$\Delta\sigma_Y^{ec} = K_e G b \sqrt{\rho_d}$$

## Durcissement par des dislocations: écrouissage

# Durcissement par solution solide (alliage)

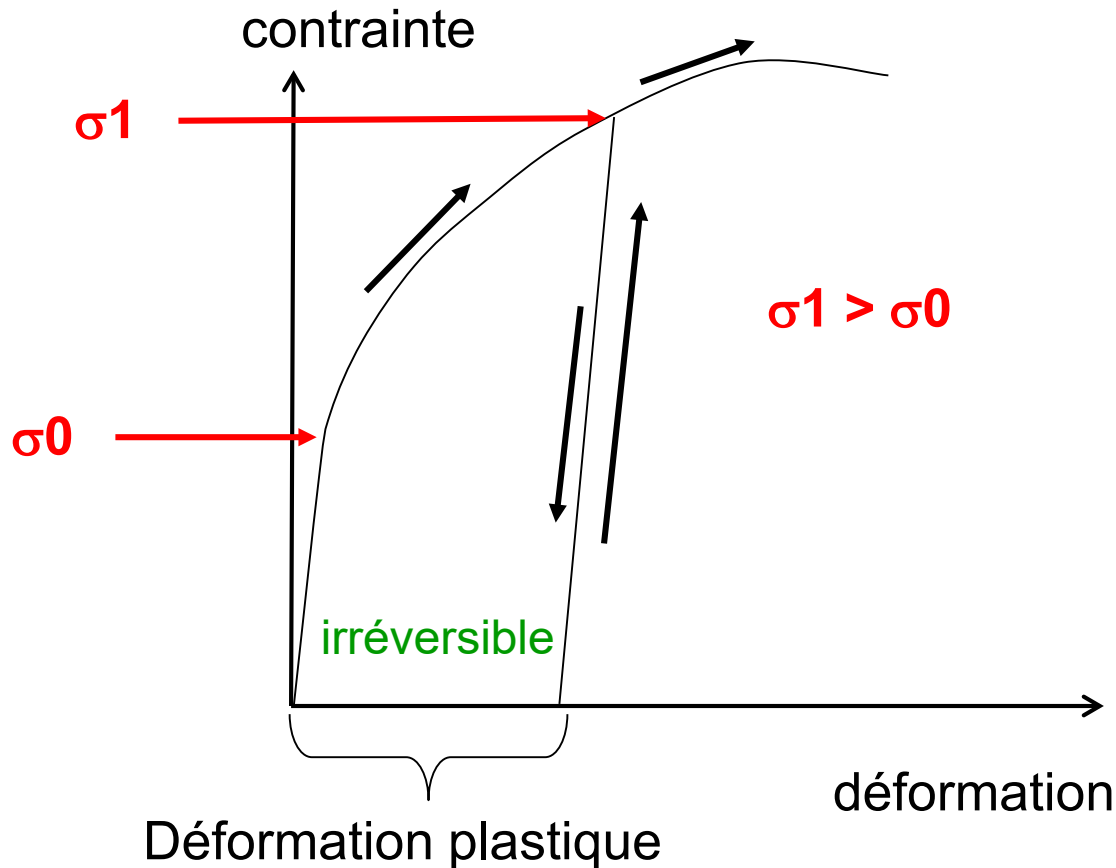
Incrément de limite d'élasticité:  $\Delta\sigma_y \approx K_s \sqrt{C}$



Durcissement des alliages Al-Mg (séries des 5xxx) par solution solide

# Durcissement par écrouissage

Déformation plastique : **écrouissage** (strain/work hardening, consolidation)



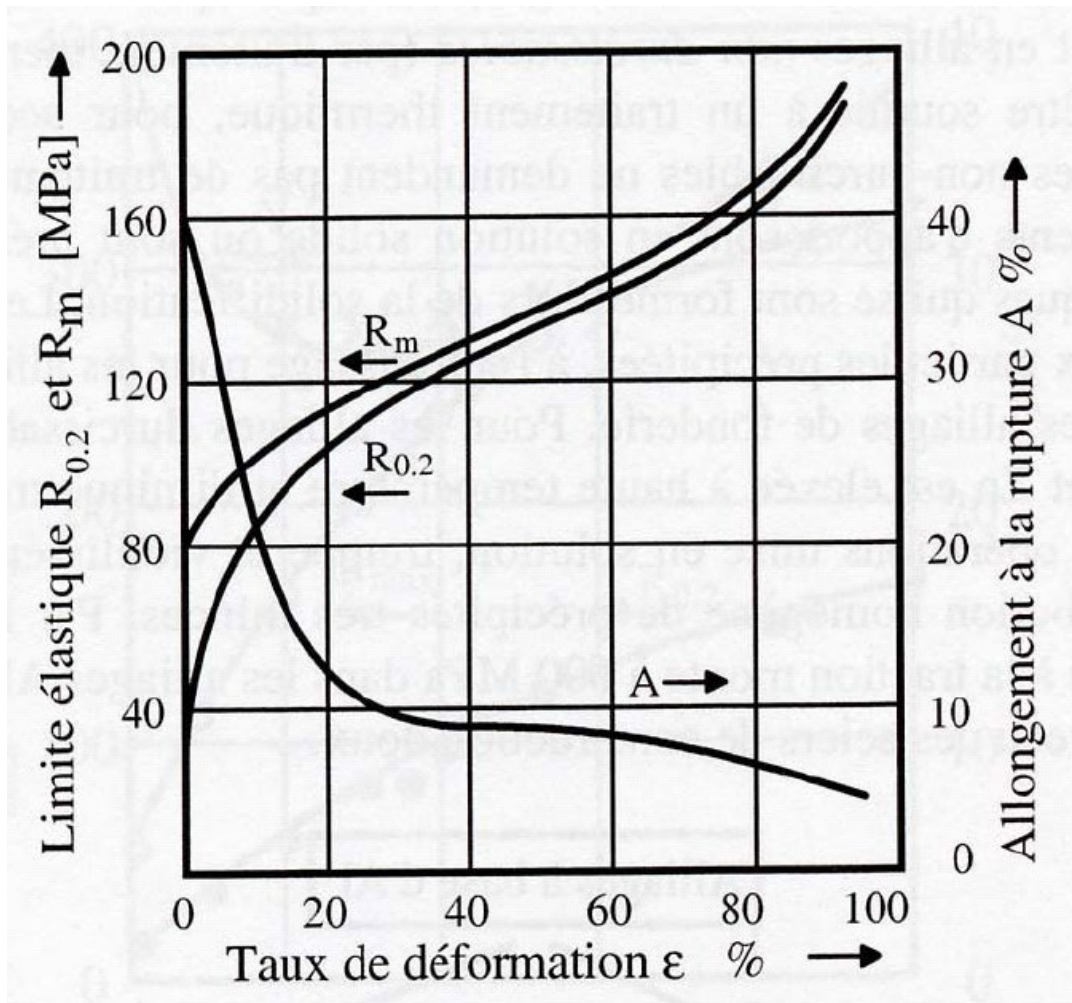
L'augmentation du nombre de dislocations (source de Frank et Read) rend leur mouvement plus difficile (**forêt de dislocations**)

Applicable à tous les métaux et réalisée lors de **la mise en forme lors de la dernière étape.**

**Limite à l'écrouissage:** les alliages durcissent par écrouissage mais deviennent alors fragiles (baisse de ductilité) puisque  $R_e$  tend vers  $R_m$ .



# Durcissement par écrouissage: intérêt du laminage



La limite à rupture  $R_m$  augmente car la déformation en compression par laminage « referme » les porosités.

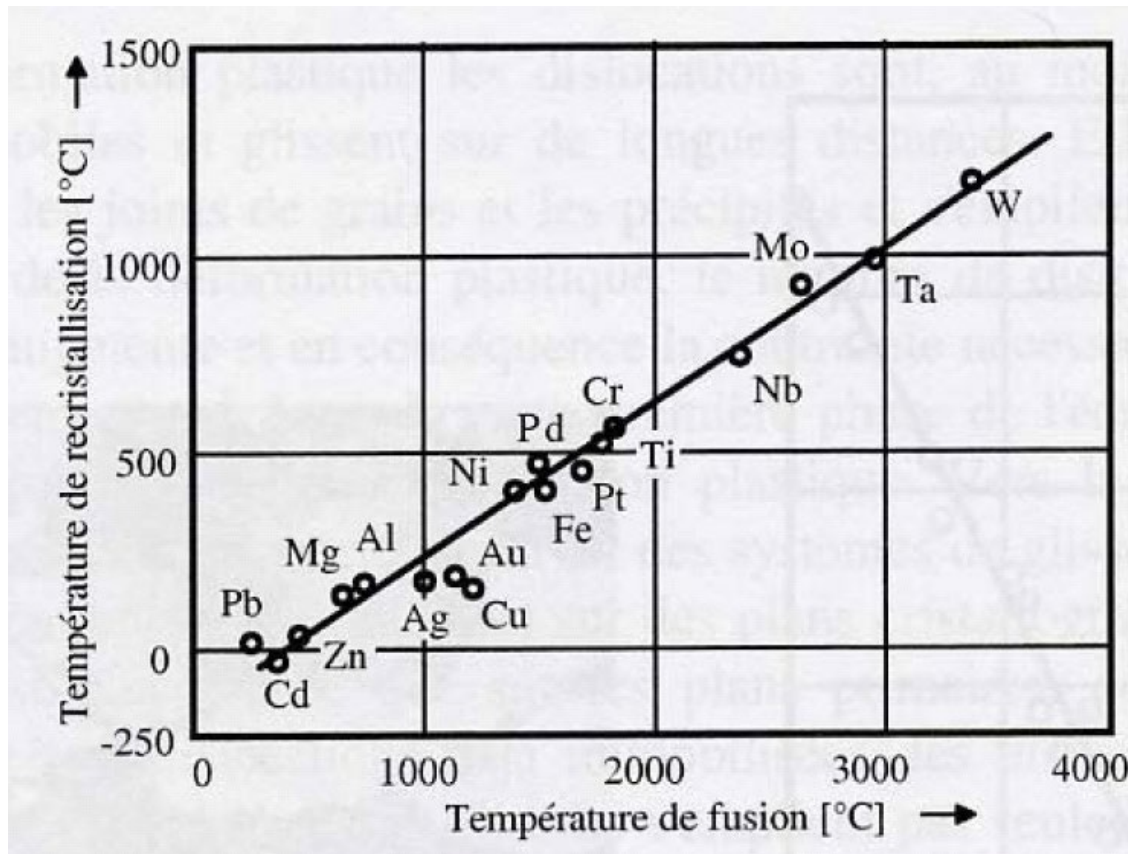
Les limites élastique  $R_{0.2}$  et à rupture  $R_m$  augmentent au détriment de la ductilité  $A$  qui diminue.

Aluminium pur déformé par laminage

# Restauration et recristallisation

Pour récupérer de la ductilité et faire plusieurs passes de mise en forme, on fait un **recuit** qui provoque :

- la **restauration** (vers  $T_m/3$  en K) qui annihile les dislocations
- et la **recristallisation à plus haute température** (vers  $T_m/2$  en K) qui mène soit à un affinage de grains (i.e. à un durcissement) soit à un grossissement de grains (i.e. à un adoucissement).



Températures de  
recristallisation:

Alus  
250C

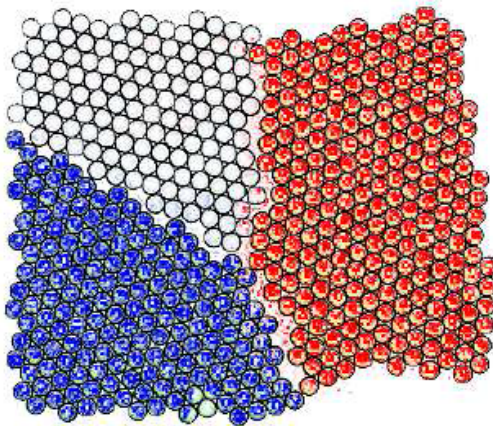
Aciers  
400C

# Déformation plastique dans la pratique industrielle

- L'**écrouissage** implique un accroissement de la limite élastique et se fait au détriment de sa ductilité. Continuer de le déformer devient alors risqué car il finira par casser.
- De plus, le **métal écroui** présente une microstructure perturbée avec de très nombreuses dislocations et d'importantes contraintes internes.
- La **restauration** (vers  $T_m/3$  en K) détend les contraintes internes, stabilise la microstructure en diminuant la densité de dislocations et redonne de la ductilité ce qui permet de poursuivre la mise en forme.
- La **recristallisation à des T plus élevées** (vers  $T_m/2$  en K) s'applique sur des produits fortement écrouis lors d'un travail à froid (laminage, tréfilage, etc.) et permet de **contrôler la taille de grains (TT de normalisation des aciers)**. Si la taille des nouveaux grains est plus faible, **on durcit l'alliage par effet Hall-Petch i.e. par affinage de grains.**

# Durcissement par affinage de grain (effet Hall-Petch)

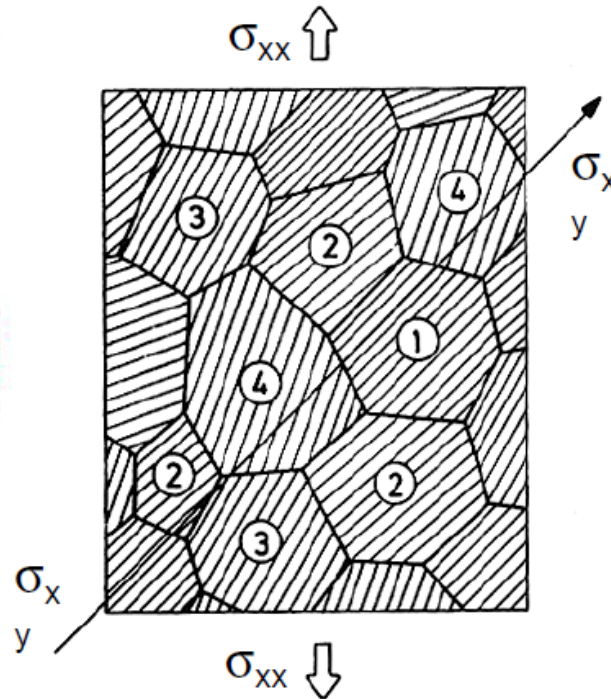
Dans un échantillon polycristallin, les grains forment des joints de grains qui ont tendance à bloquer les dislocations. **Effet Hall-Petch.**



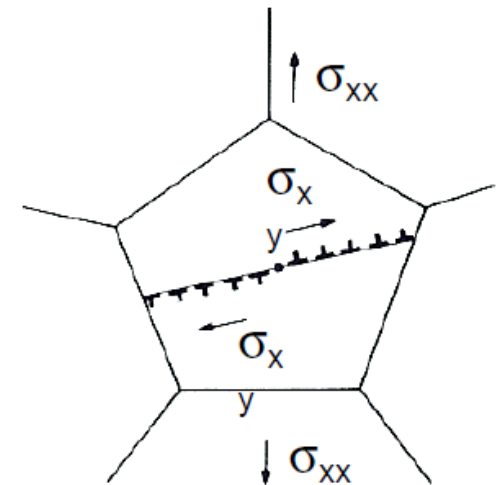
Joints de grains

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

$\phi_g$ : diamètre des grains



Echantillon polycristallin soumis à une traction



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



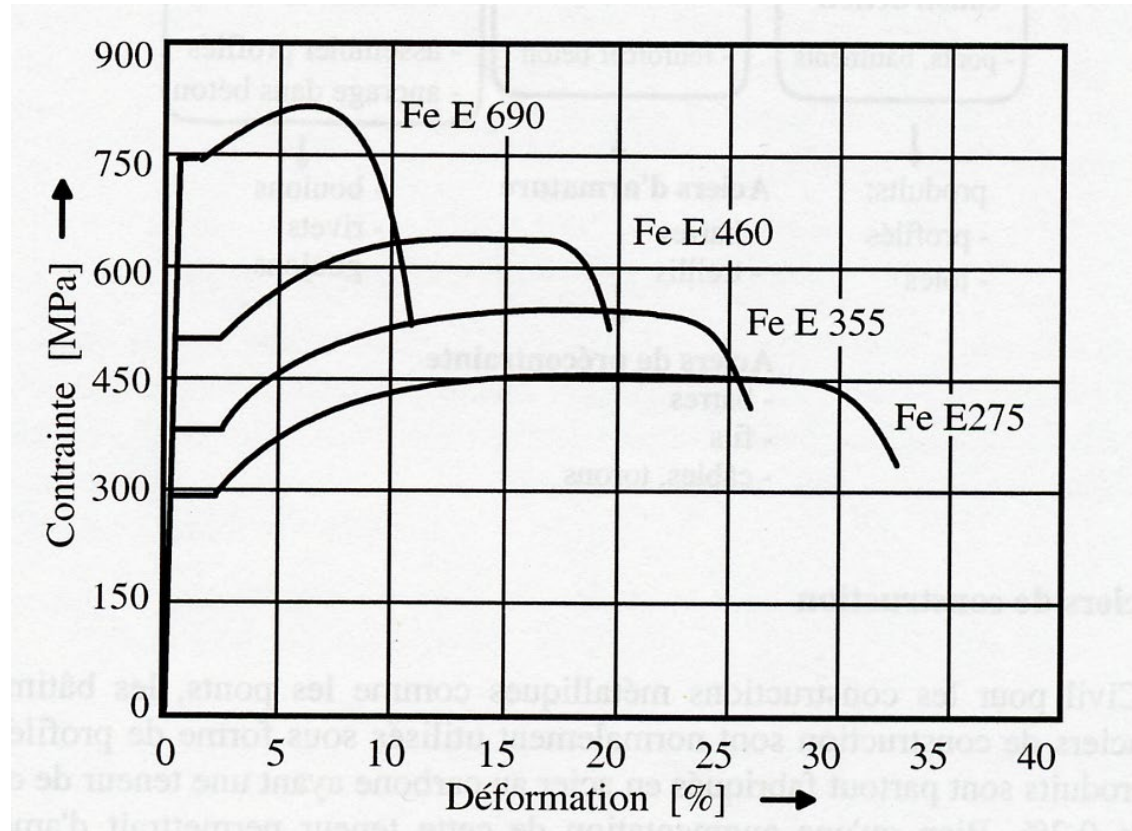
# Durcissement par affinage de grain (effet Hall-Petch)

limite  
d'élasticité

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_D}{\sqrt{D}}$$

D taille  
moyenne des  
grains

Limite élastique pour des  
structures très grossières



Fe E 690 et 460 sont dits “aciers à grains fins”. **Les chiffres 690 et 460 sont les limites élastiques à 0.2% de déformation.**



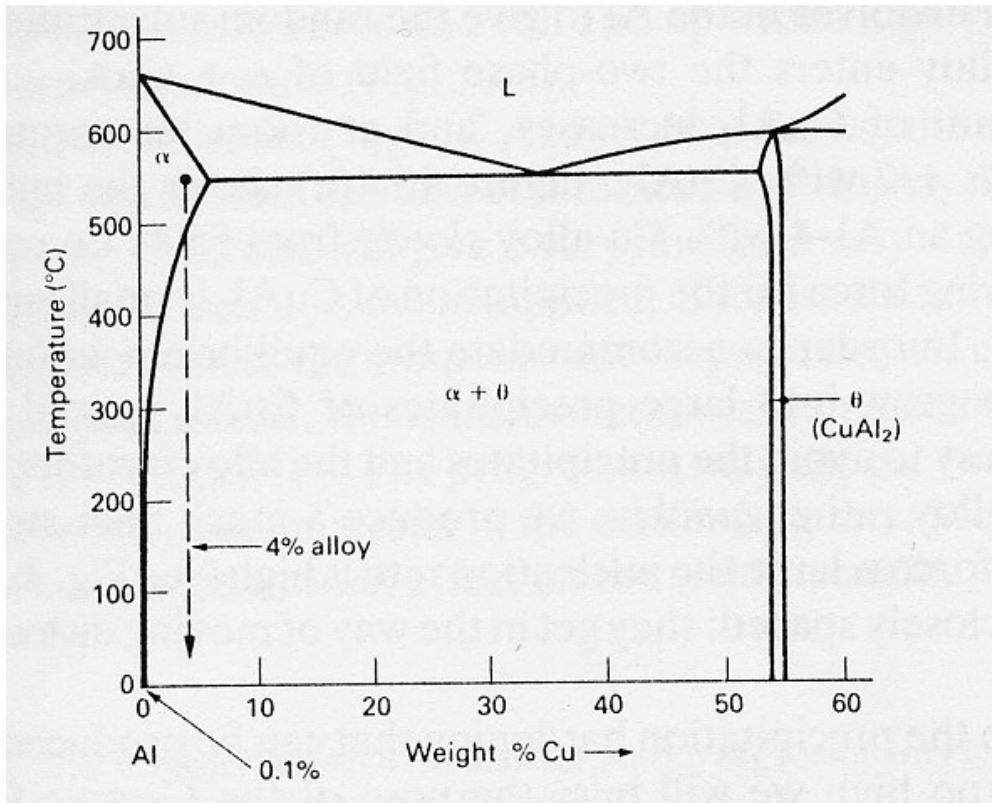
# Durcissement par précipitation: alliages à durcissement structural (heat treatable alloys)

Exemple: Al-Cu (Duralumin): solvus décroissant avec la température.

Par **trempe** depuis le domaine  $\alpha$ , on obtient une solution solide sursaturée en Cu à 20°C en empêchant la formation de la phase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ .

Par un **revenu** (réchauffage de quelques heures vers 150°C) on fait germer des précipités fins de  $\text{Al}_2\text{Cu}$  uniformément répartis de la phase  $\alpha$ .

La limite élastique s'en trouve alors fortement augmentée: **c'est le durcissement structural ou par précipitation.**



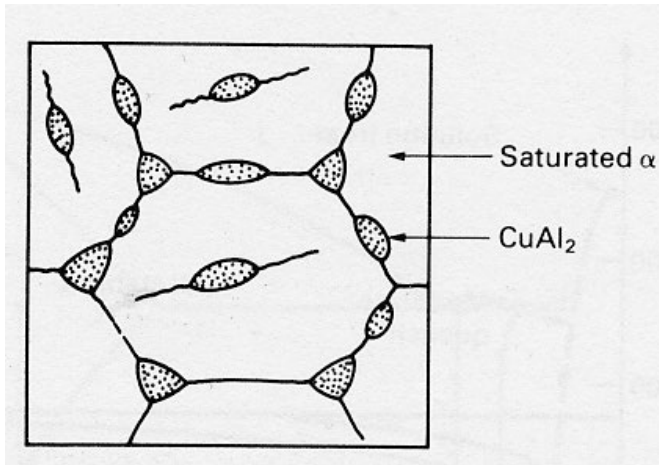
Solubilité de Cu à 548° C  
= 5 wt%

Solubilité à 20° C  
= 0.1 wt%  
= 1/40 atomique

## TT de précipitation:

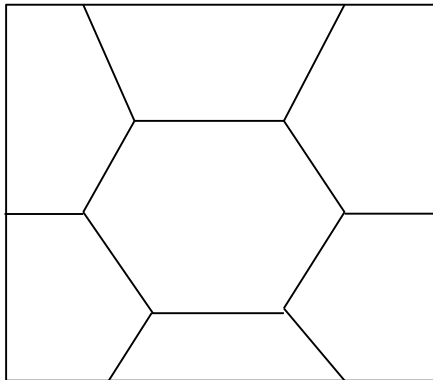
- mise en solution
- trempe
- revenu durcissant

# Durcissement par précipitation (trempe et revenu): alliages à durcissement structural (heat treatable alloys)



**a) Refroidissement lent depuis 550° C**

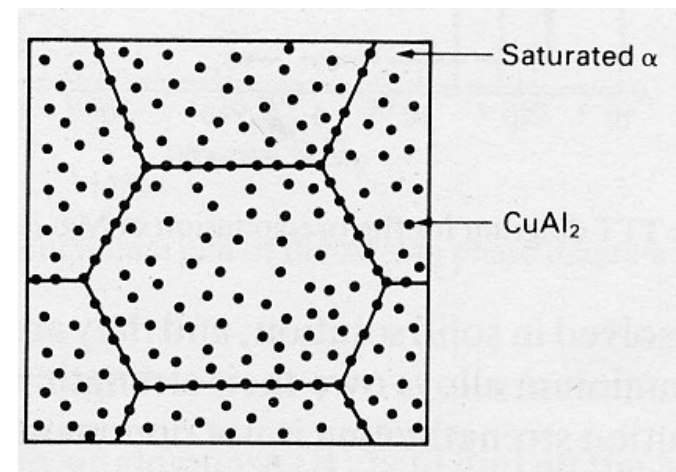
Croissance grossière de  $\theta$   
(pas de durcissement)



**b) Trempe depuis 550° C**

donnant une phase  $\alpha$   
sursaturée en Cu à 20° C

**c) Après revenu à 150° C** pour  
germer des précipités  $\text{Al}_2\text{Cu}$  très petits  
et uniformément répartis  
(fort durcissement)



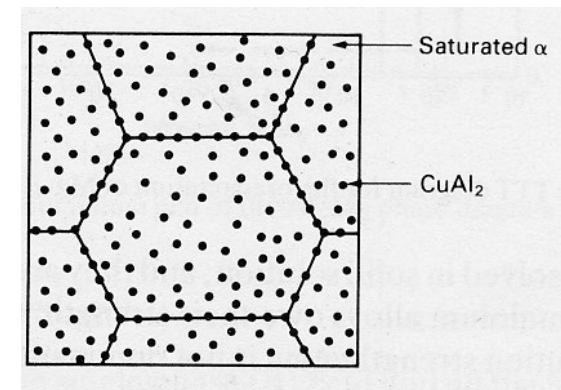
## Alliages d'aluminium durcissables par précipitation

	Refroidissement lent, $\sigma_y$	Trempe et revenu, $\sigma_y$
Al + 4Cu + Mg, Si, Mn (2xxx)	130 MPa	465 MPa
Al + 0.5 Mg 0.5 Si (6xxx)	85 MPa	210 MPa
Al + 6 Zn + Mg, Cu, Mn (7xxx)	300 MPa	570 MPa

$$\Delta\sigma_y \propto \sqrt{f_v} / L$$

$L$  : distance moyenne entre précipités

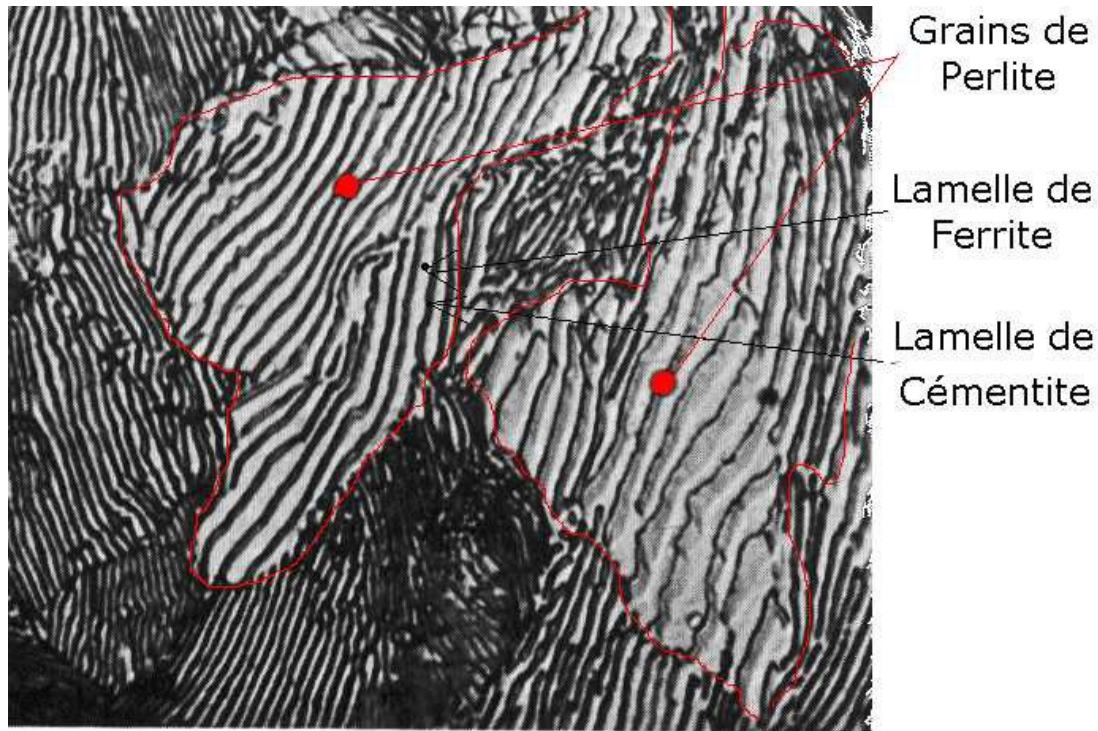
$f_v$  : fraction volumique de précipités



On cherche à avoir beaucoup ( $f_v$  grand) de petits précipités uniformément répartis ( $L$  petit).

## Durcissement composite : exemple de la perlite

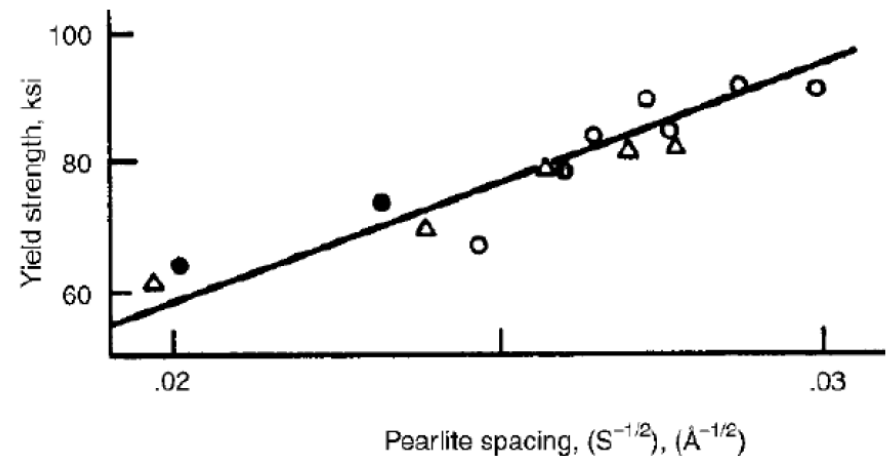
chaque interface Fe- $\alpha$  / Fe<sub>3</sub>C freine les dislocations



$$\Delta\sigma_y \propto K_c f_c / \sqrt{\Delta}$$

$\Delta$  : espace interlamellaire

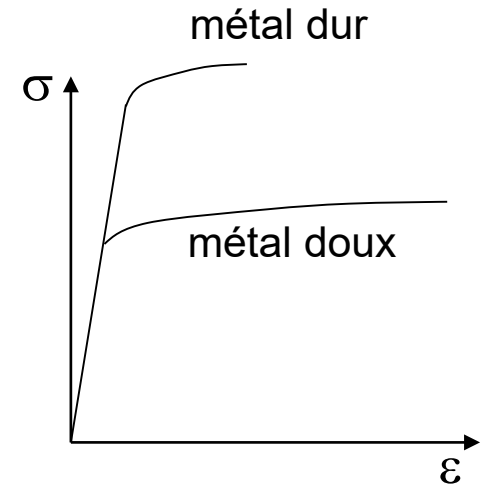
$f_c$  : fraction de structure composite



# Résumé des mécanismes de durcissement

But: freiner/empêcher le mouvement des dislocations

- Affinage de grains: joints de grains = obstacles
- Multiplication des dislocations – écrouissage
- Atomes étrangers en solution solide = obstacles
- Précipitation fine et homogène (trempe puis revenu)
- Par structures composites de taille caractéristique  $\Delta$



**Les effets sont additifs** (en 1<sup>ère</sup> approximation) mais le durcissement s'accompagne tjrs d'une baisse de la ductilité.

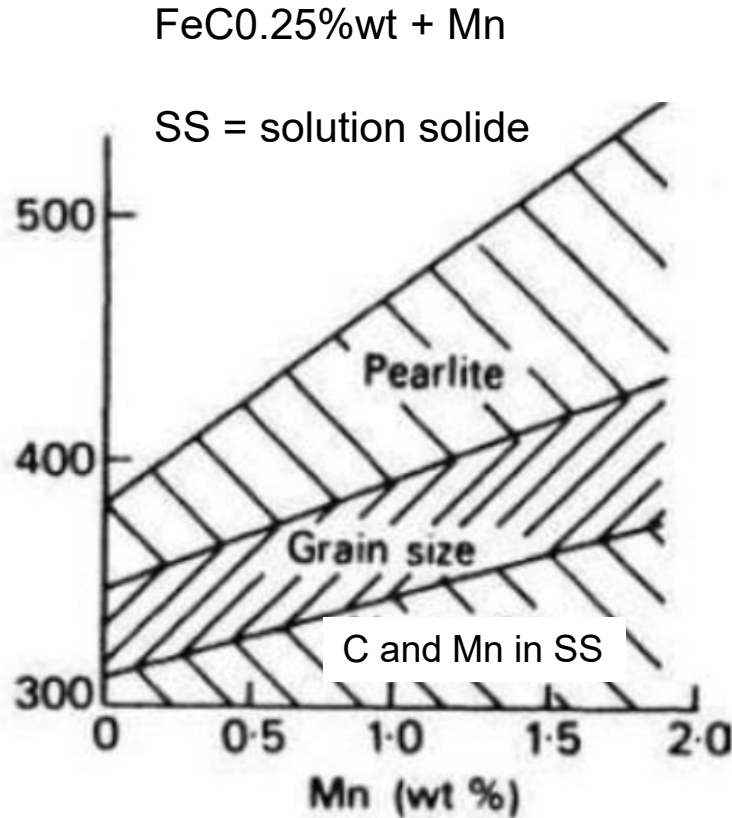
$$\Delta\sigma_y = k_D / \sqrt{D} + K_e \sqrt{\rho} + K_s \sqrt{C} + K_p \sqrt{f_p} / L + K_c f_c / \sqrt{\Delta}$$

taille de grain      écrouissage      soluté      précipités      composite

- On adoucit un alliage par recuit de restauration (e.g. pour sa mise en forme).
- On affine la taille de grains par recuit de recristallisation après un fort écrouissage (TT de normalisation des aciers).



# Exemple d'un acier doux ferrite-perlitique à 0.25 wt. pct C durci au Mn



Le durcissement par C et Mn en solution solide est **le plus important** (de 315 MPa à 0%Mn à 360 MPa à 2%Mn).

Un supplément de durcissement est obtenu par 2 contributions:

- par taille de grain, constant car pas d'influence de C et Mn sur cette taille
- et par durcissement perlitique: le Mn augmentant la fraction de perlite.

$$\Delta\sigma_y \approx k_D/\sqrt{D} + K_{Mn}f_\alpha c_{Mn} + K_C f_\alpha \sqrt{c_C} + K_p f_p / \sqrt{\Delta}$$

avec  $f_\alpha$  fraction de ferrite  $\alpha$  (primaire et dans la perlite),  
 $c_{Mn}$  teneur en Mn et  $c_C$  teneur en C.

**Lundi 26 mai 2025**

**Les modes de durcissement  
Corrigé des exos**

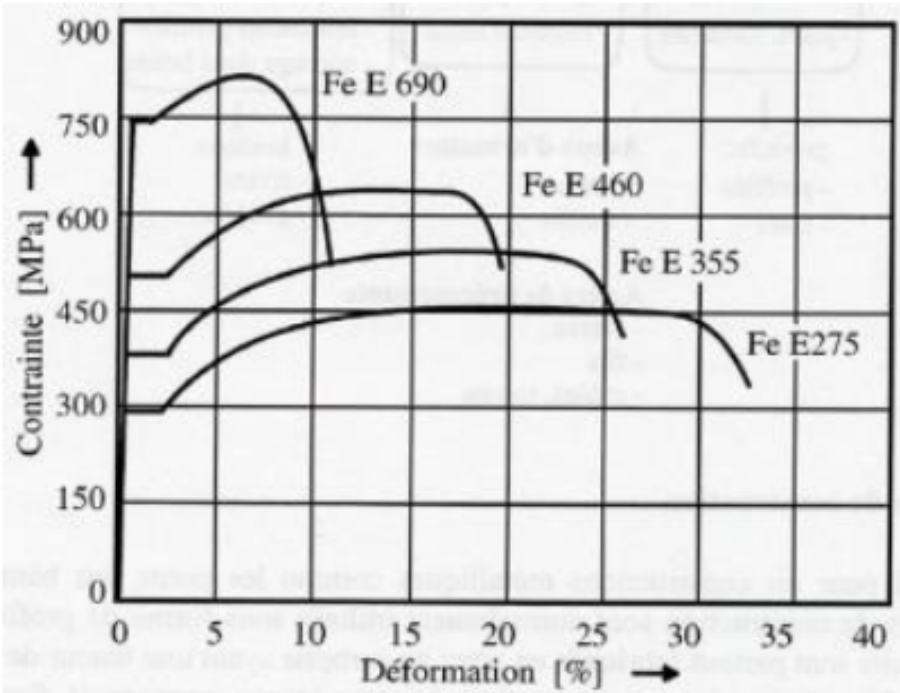
**Me 28 Mai: les aciers du génie civil  
Protection contre la corrosion  
Soudage des aciers**

# exos

Les aciers de construction sont typiquement des aciers ferrito-perlitiques durcis au carbone C et au manganèse Mn et par affinage de grain.

La figure ci-contre présente différentes courbes de traction de tels aciers à composition fixe. Détailler les informations contenues dans cette figure et préciser ce que signifie le chiffre après Fe E ? Quel acier présente le grain le plus fin ?

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 



A quel aspect faut-il faire attention lorsque l'on soude l'acier Fe E 690 ?

## exos

La figure ci-dessous décrit la relation entre la taille des grains ( $d$ ) et la limite élastique  $\sigma_{el}$  (lower yield limit) dans des aciers ferrito-perlitiques pour une composition donnée.

Quelles informations tire-t-on de cette figure ?

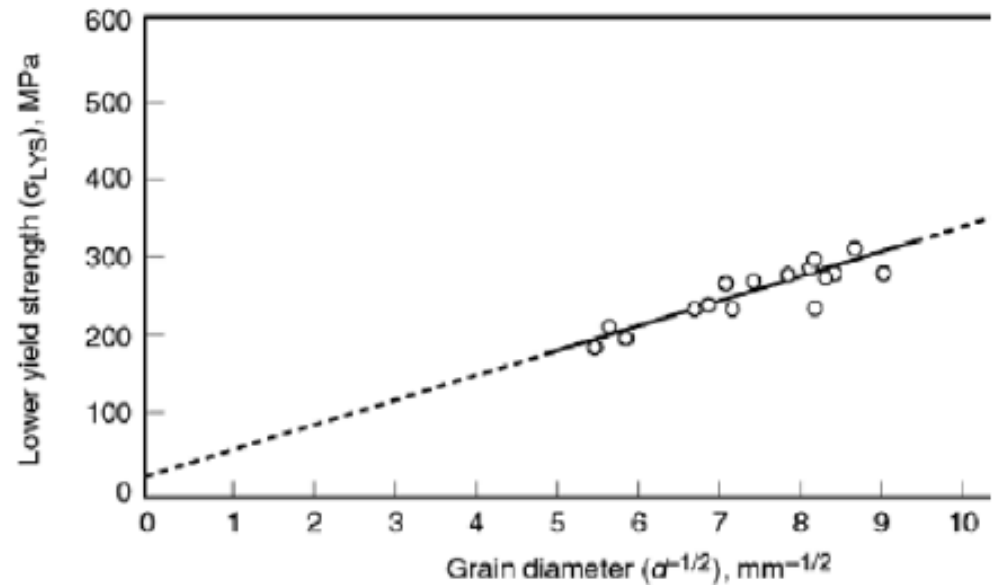
-  
-  
-  
-  
-

Quel mécanisme y est illustré ?

-  
-  
-

Ecrire l'équation générale traduisant ce mécanisme et évaluer chacun des termes.

-



Quel diamètre moyen de grain donnera une limite élastique de 400 MPa ?

## exos

La figure ci-dessous décrit l'évolution de la limite élastique à 0.2%,  $R_{e0.2}$ , la limite à rupture,  $R_m$ , et l'élongation  $A$  en fonction de la teneur en carbone dans des aciers ferrito-perlitiques pour une taille de grain donnée.

Quelles informations tire-t-on de cette figure ?

Quel mécanisme y est illustré ?

Ecrire l'équation générale traduisant ce mécanisme en précisant chacun des termes.

$R_{e0.2} =$

Pour mettre en évidence plus clairement la relation entre  $R_{e0.2}$ , et teneur en Carbone,  $C$ , en fonction de quelle quantité faudrait-il représenter la limite élastique  $R_{e0.2}$  ?

