

Modification de la microstructure des métaux après déformation plastique : Restauration et recristallisation



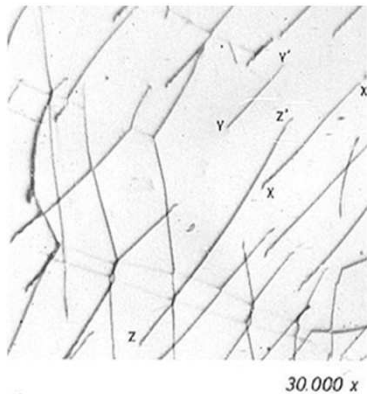
A. Mertens, Université de Liège
anne.mertens@ulg.ac.be
<http://orbi.ulg.ac.be/>

Plan

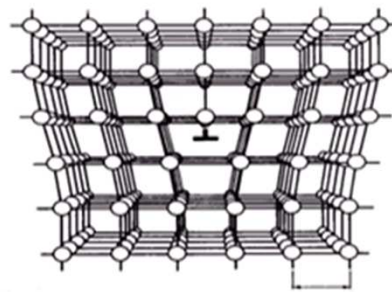
- 1. Introduction - la structure déformée**
2. La restauration
3. La recristallisation primaire
 - a) Energie de recristallisation
 - b) Vitesse de recristallisation
 - c) Taille des grains recristallisés
 - d) Propriétés mécaniques des structures recristallisées
 - e) Orientation des structures recristallisées
4. La coalescence et la recristallisation secondaire
5. Le vieillissement après déformation à froid
 - a) Mécanisme
 - b) Vieillissement naturel
 - c) Vieillissement artificiel
 - d) Métaux non vieillissants

Introduction - la structure déformée (1)

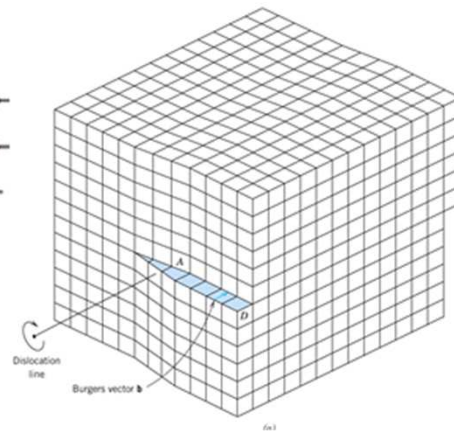
- Déformation plastique
⇒ Création et propagation de défauts dans le réseau cristallin
pex: dislocations, macles...



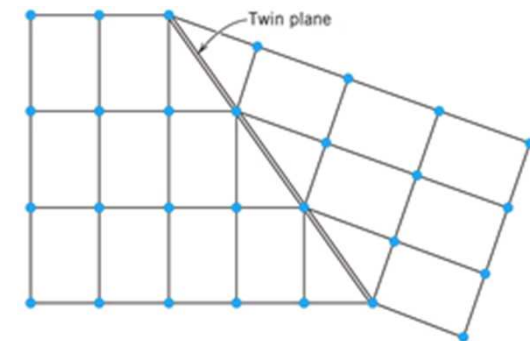
Dislocations
vues au
microscope
électronique en
transmission



Représentations
schématiques
d'une dislocation
coin...



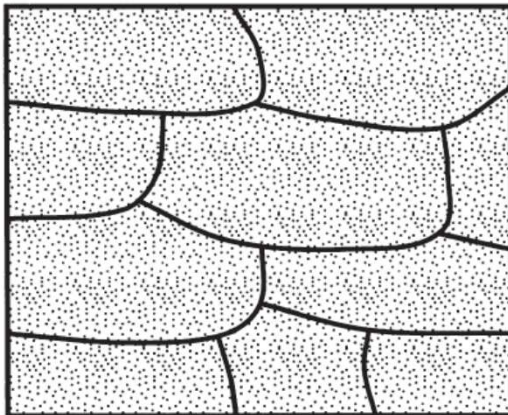
...,d'une dislocation
vis...



... et d'une macle

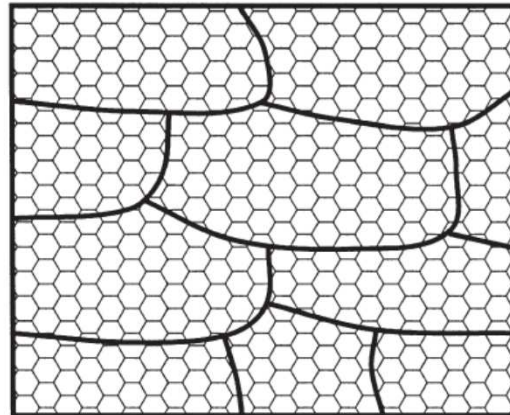
Introduction - la structure déformée (2)

- Déformation plastique
⇒ Création et propagation de défauts dans le réseau cristallin
- Une partie de l'énergie apportée par les forces extérieures causant la déformation est stockée dans le réseau cristallin, et ce, de façon hétérogène
- Cette structure métastable va évoluer vers un nouvel état d'équilibre (processus activés thermiquement)

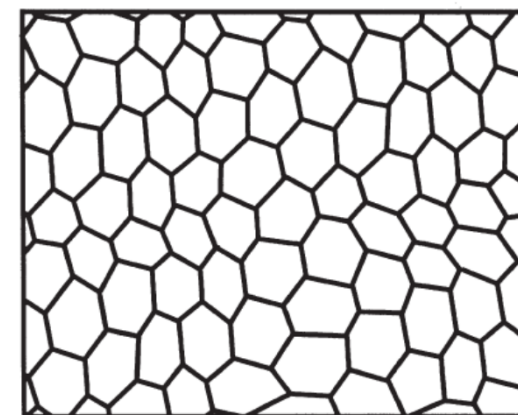


Structure déformée

[Humphreys et Hatherly]



Réorganisation des
imperfections réticulaires
= **Restauration**



... et à une température
plus élevée
Recristallisation

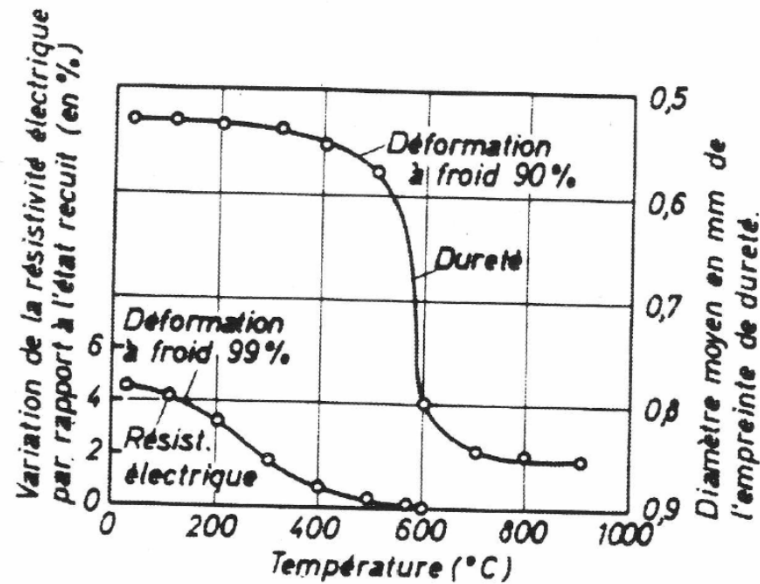
Plan

1. Introduction - la structure déformée
- 2. La restauration**
3. La recristallisation primaire
 - a) Energie de recristallisation
 - b) Vitesse de recristallisation
 - c) Taille des grains recristallisés
 - d) Propriétés mécaniques des structures recristallisées
 - e) Orientation des structures recristallisées
4. La coalescence et la recristallisation secondaire
5. Le vieillissement après déformation à froid
 - a) Mécanisme
 - b) Vieillissement naturel
 - c) Vieillissement artificiel
 - d) Métaux non vieillissants

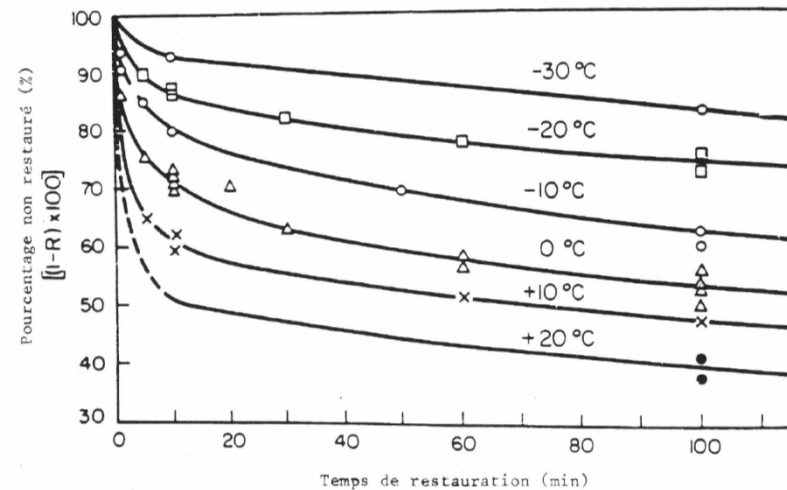
La Restauration (1)

- L'activation thermique permet la migration des imperfections
 ⇒ uniformisation de l'énergie interne du réseau cristallin
 ⇒ Impact sur les propriétés du matériau, sans changement de microstructure

Propriétés d'un acier après déformation et T.T.



Limite élastique d'une tôle de zinc



Influence de T et t !

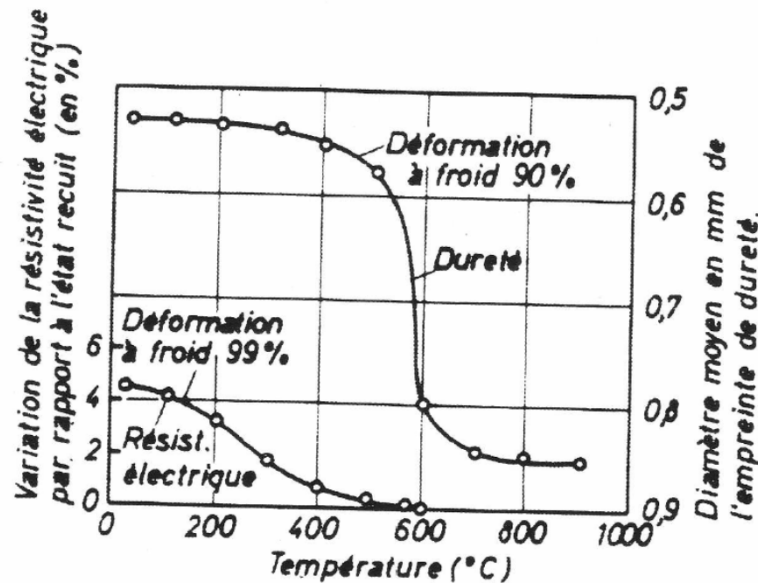
$$R = \frac{X_{\text{écroui}} - X_{\text{restauré}}}{X_{\text{écroui}} - X_{\text{avant déformation plastique}}}$$

$$\frac{dR}{dt} = Ae^{-\frac{\Delta E}{kN_0T}} (1-R)^n$$

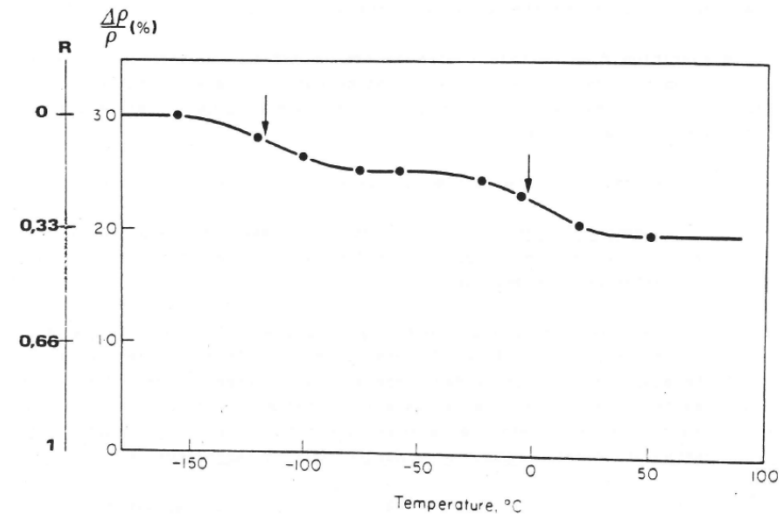
La Restauration (2)

- L'activation thermique permet la migration des imperfections
- Imperfections différentes \Rightarrow Energies d'activation différentes
- Différentes propriétés du matériau peuvent être influencées par différents types d'imperfections

Propriétés d'un acier après déformation et T.T.



Résistivité électrique d'un cuivre écroui



$$R = \frac{X_{\text{écroui}} - X_{\text{restauré}}}{X_{\text{écroui}} - X_{\text{avant déformation plastique}}}$$

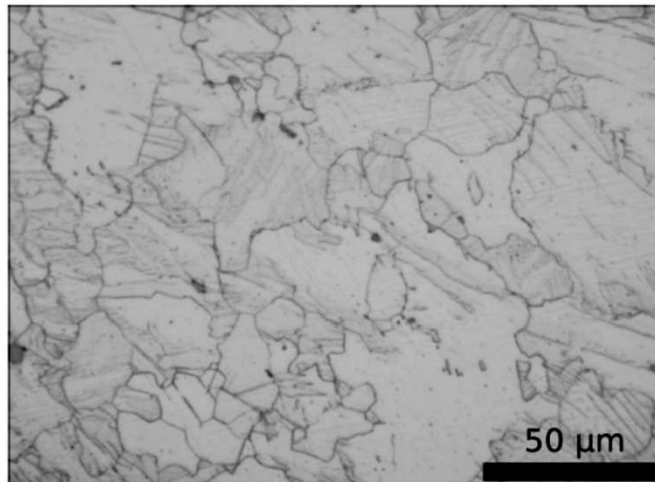
Plan

1. Introduction - la structure déformée
2. La restauration
- 3. La recristallisation primaire**
 - a) Energie de recristallisation
 - b) Vitesse de recristallisation
 - c) Taille des grains recristallisés
 - d) Propriétés mécaniques des structures recristallisées
 - e) Orientation des structures recristallisées
4. La coalescence et la recristallisation secondaire
5. Le vieillissement après déformation à froid
 - a) Mécanisme
 - b) Vieillissement naturel
 - c) Vieillissement artificiel
 - d) Métaux non vieillissants

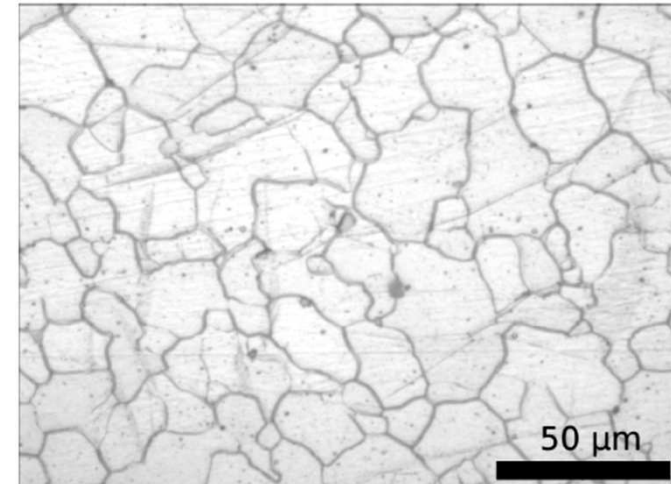
La Recristallisation Primaire (1)

- L'activation thermique permet la formation d'un nouveau réseau cristallin présentant moins d'imperfections

[A. Mertens et al., 2012]



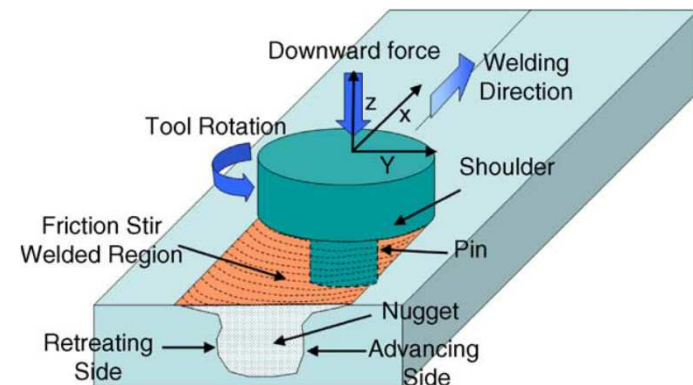
Recristallisation
dynamique



- Alliage de magnésium AZ31
- Etat laminé
- Forte densité de macles

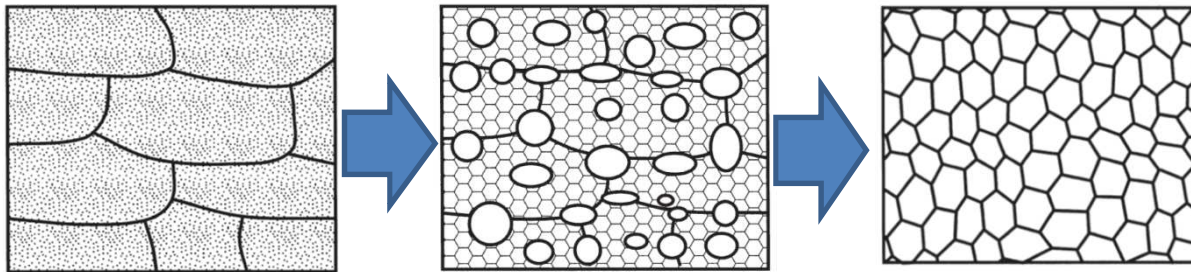
- Après friction-malaxage
- Faible densité de macles

[R.S. Mishra et Z.I. Ma, 2005]



La Recristallisation Primaire (2)

- L'activation thermique permet la formation d'un nouveau réseau cristallin présentant moins d'imperfections
- Ce changement microstructural s'effectue par germination et croissance, avec des cinétiques bien déterminées

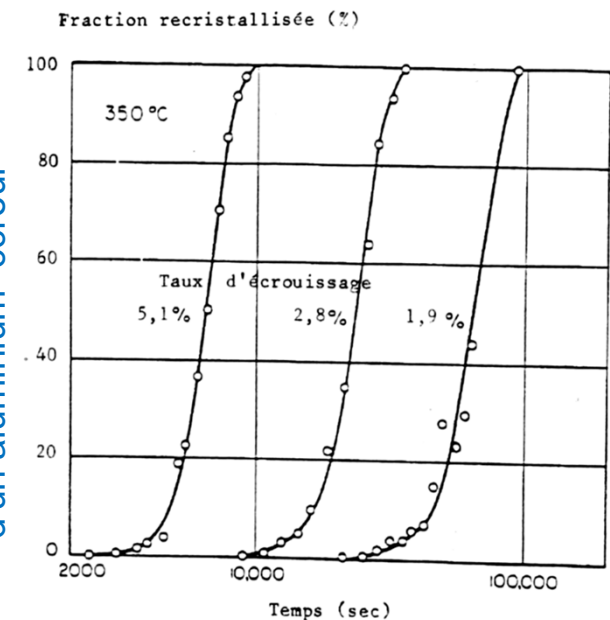


⇒ 3 stades:

- 1) incubation
 - 2) progression rapide par croissance des germes
 - 3) saturation
- T plus élevée que pour la restauration

[Humphreys et Hatherly]

Recristallisation à 350°C
d'un aluminium écroui



Vitesse de Recristallisation (1)

$$G = F[xg_I + (L - x)g_{II}] \quad \text{où } G: \text{ énergie libre}$$

$$\Delta G = F\Delta x(g_I - g_{II}) = -F\Delta x(g_{II} - g_I) = -F\Delta x\Delta g$$

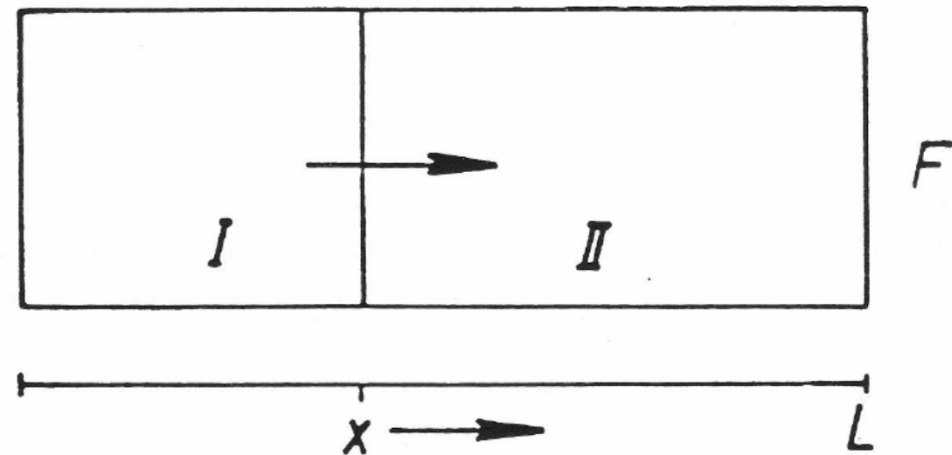
Or l'énergie d'une dislocation de longueur 1 vaut $\frac{1}{2}Gb^2$ où G : module de cisaillement

$$\text{d'où } g_I = \frac{1}{2}Gb^2\rho_I \text{ et } g_{II} = \frac{1}{2}Gb^2\rho_{II}$$

$$g_{II} - g_I = \frac{1}{2}Gb^2(\rho_{II} - \rho_I)$$

Dans l'exemple où $G = 100.000 \text{ MPa} = 10^{11} \text{ Pa}$, $b = 2,5 \text{ \AA} = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, $\rho_{II} = 10^7 \text{ km/cm}^3 = 10^{16} \text{ m/m}^3$ et $\rho_I = 100 \text{ km/cm}^3 = 10^{11} \text{ m/m}^3$, la différence $g_{II} - g_I$ vaut

$$g_{II} - g_I = \frac{1}{2}10^{11} (2,5 \cdot 10^{-10})^2 (10^{16} - 10^{11}) \text{ N/m}^2 \cdot \text{m}^2 \text{m/m}^3 \text{ ou } \text{J/m}^3 = 3,12 \cdot 10^7 \text{ J/m}^3 = 31,2 \text{ MJ/m}^3$$



Vitesse de Recristallisation (2)

D'après la loi d'Arrhenius, la vitesse de passage des atomes de II→I:

$$v_{II \rightarrow I} = A_1 e^{-\frac{(\Delta g^*)V_m}{kT}}$$

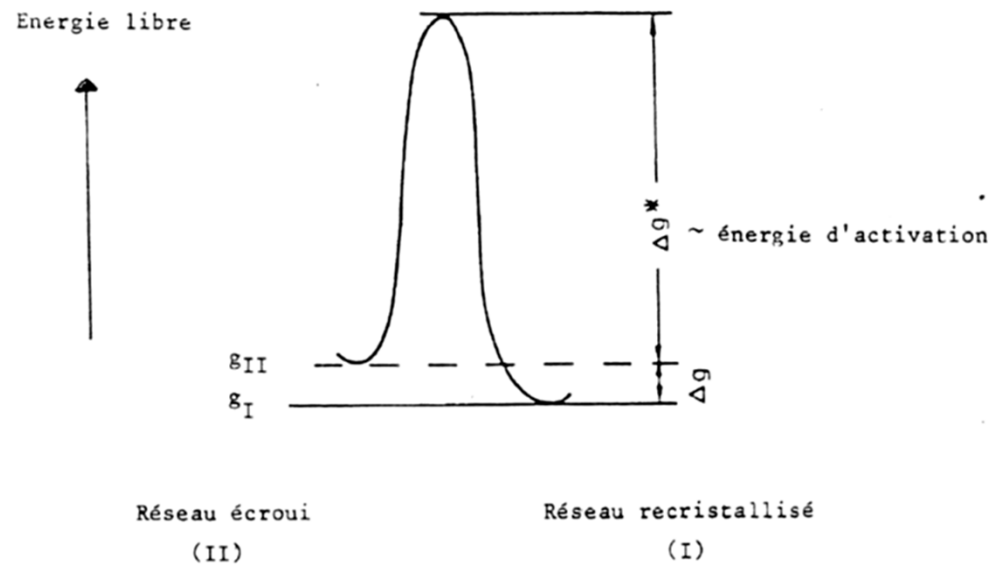
où Δg^* est l'énergie d'activation

et pour le passage de I→II:

$$v_{I \rightarrow II} = A_2 e^{-\frac{(\Delta g + \Delta g^*)V_m}{kT}}$$

où $\Delta g = g_{II} - g_I$

Variation d'énergie pour un atome passant d'une région écrouie (II) à une région recristallisée (I)



Vitesse de Recristallisation (3)

D'après la loi d'Arrhenius, la vitesse de passage des atomes de II→I:

$$v_{II \rightarrow I} = A_1 e^{-\frac{(\Delta g^*)V_m}{kT}}$$

où Δg^* est l'énergie d'activation

et pour le passage de I→II:

$$v_{I \rightarrow II} = A_2 e^{-\frac{(\Delta g + \Delta g^*)V_m}{kT}}$$

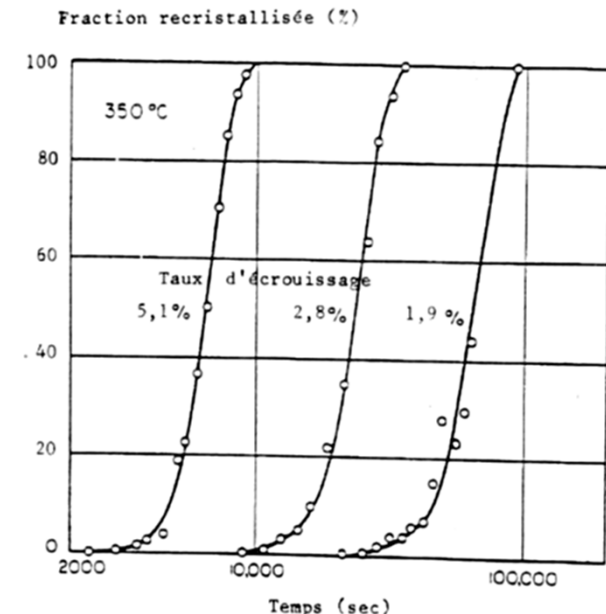
où $\Delta g = g_{II} - g_I$

Si $A_1 = A_2 = A$ et λ est l'effet de recul lié au transfert d'un atome de II→I

$$v = \lambda(v_{II \rightarrow I} - v_{I \rightarrow II}) = \lambda A \left[1 - e^{-\frac{(\Delta g)V_m}{kT}} \right] e^{-\frac{(\Delta g^*)V_m}{kT}}$$

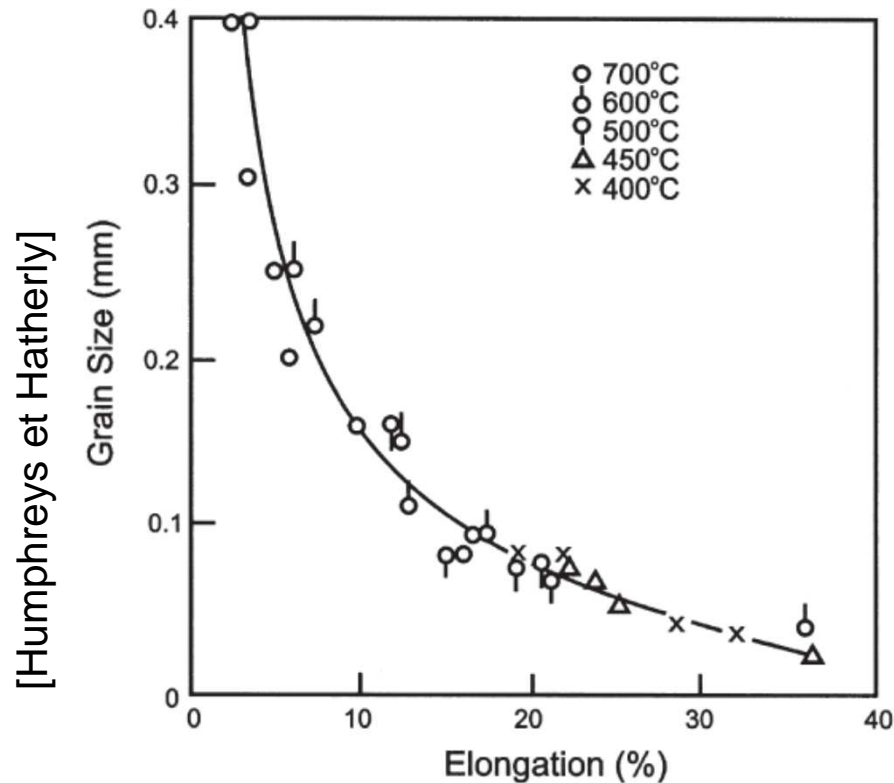
$$\text{soit, pour } \Delta g \text{ petit: } v = \lambda A V_m \frac{\Delta g}{kT} e^{-\frac{(\Delta g^*)V_m}{kT}}$$

Recristallisation à 350°C d'un aluminium écroui

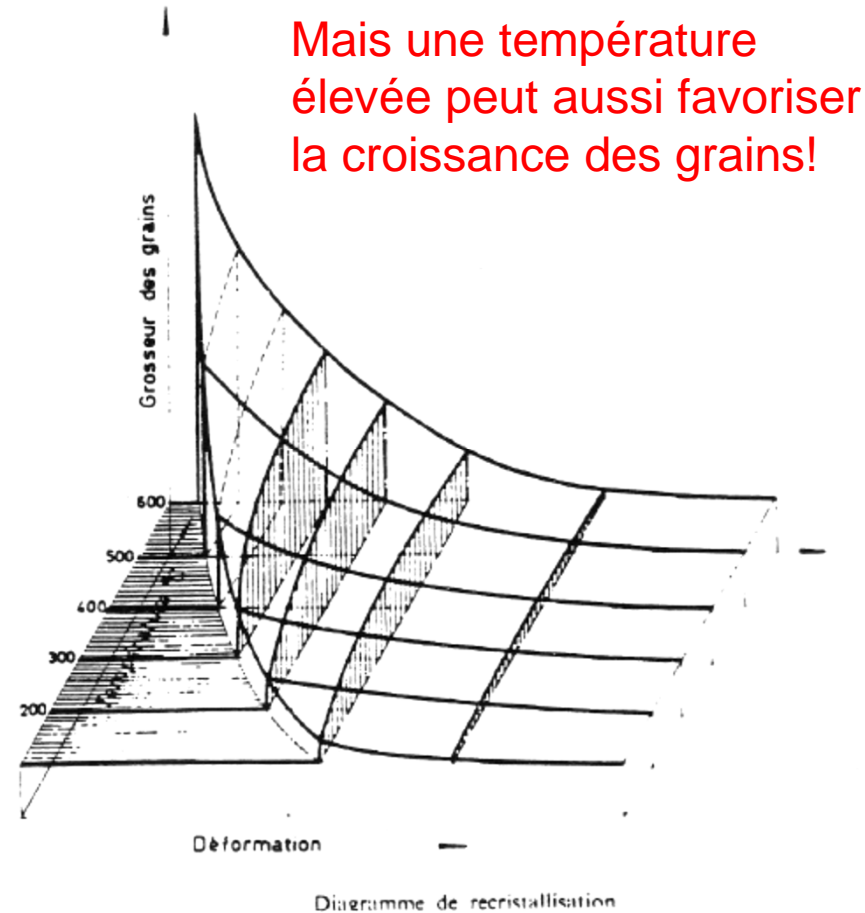


Taille des grains recristallisés (1)

- Le taux d'écouissage influence aussi le nombre de germes, donc la taille des grains



Effet de la déformation en traction uniaxiale sur la taille de grains dans un laiton recristallisé à différentes températures



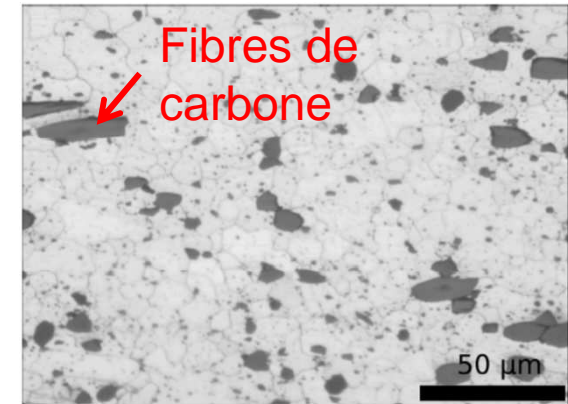
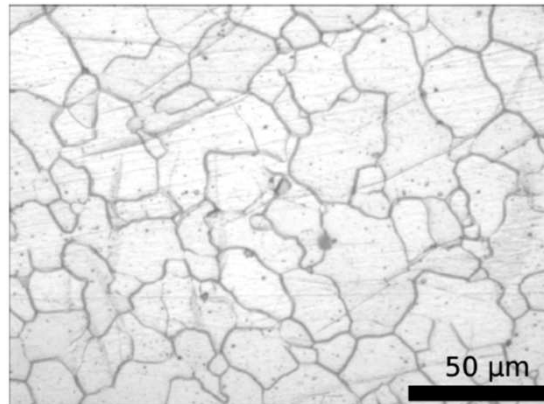
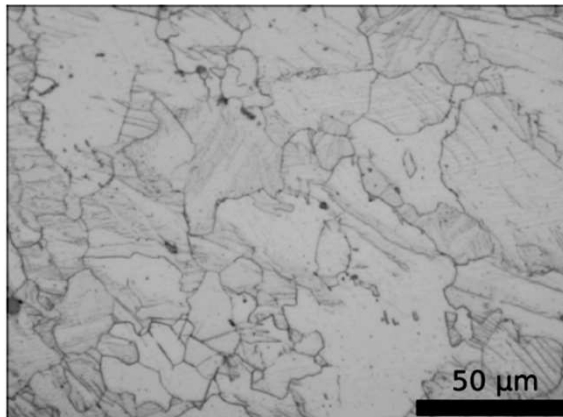
Taille des grains recristallisés (2)

- Dans des structures biphasées

Alliage de Mg, laminé

Après friction-malaxage

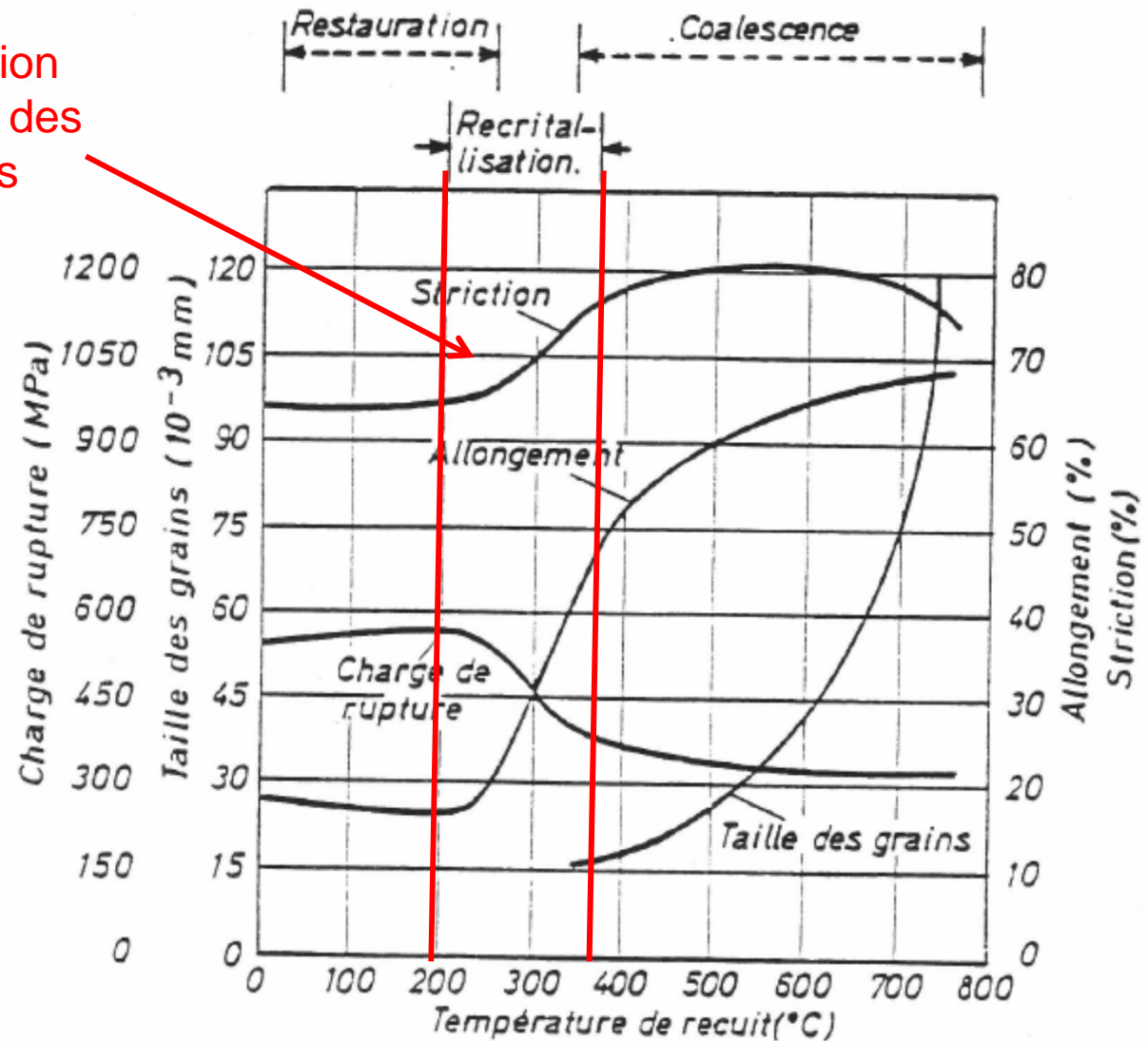
[A. Mertens et al., 2012]



- La recristallisation de structures biphasées est régie par des lois plus complexes
- En général, la recristallisation est plus lente que dans les structures monophasées
- Elle donne souvent lieu à un affinement de la microstructure
 - soit parce que la seconde phase favorise la germination des nouveaux cristaux
 - soit parce que la seconde phase "épingle" les joints de grains, limitant ainsi la croissance des grains

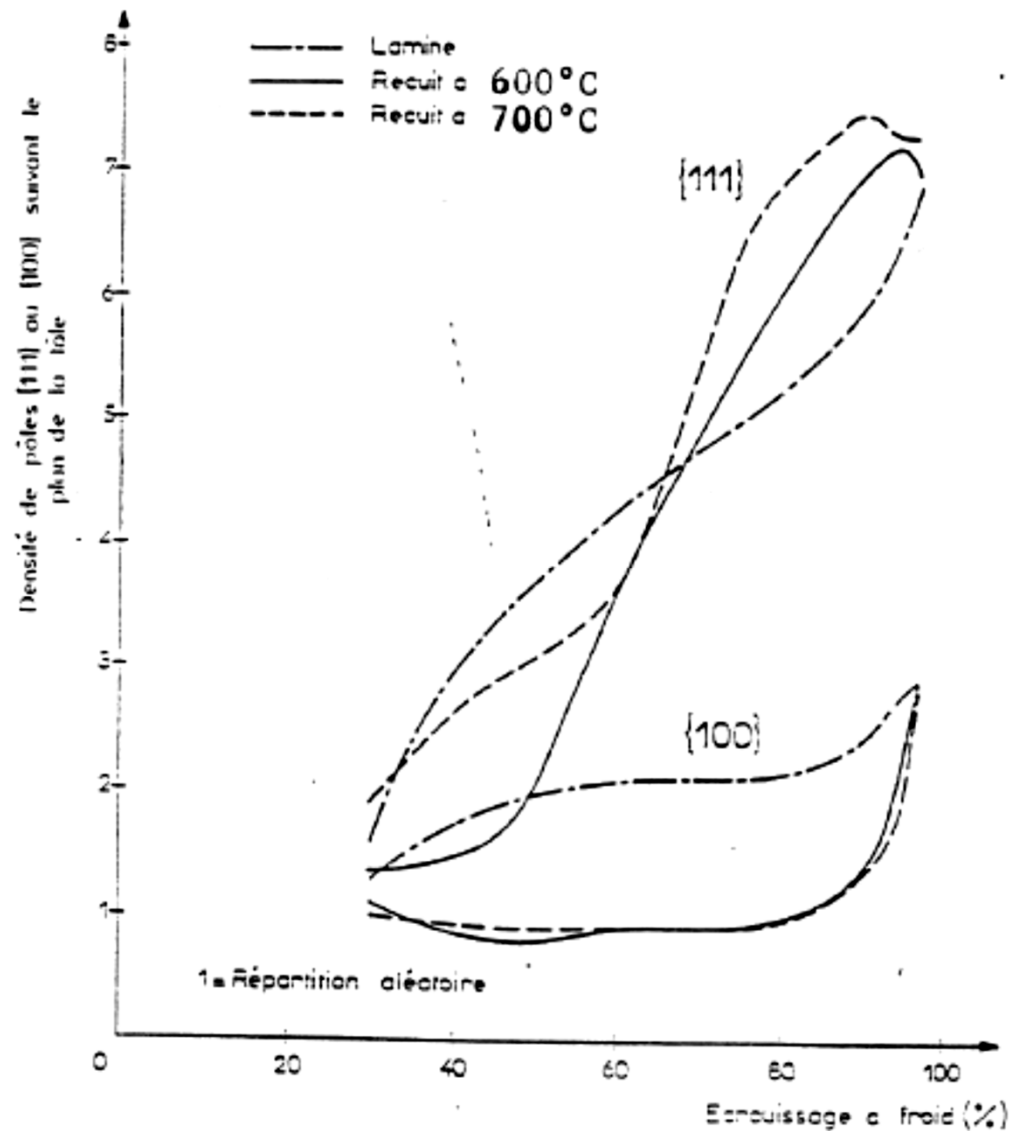
Propriétés mécaniques des structures recristallisées

Modification
marquée des
propriétés



Variation de la taille de grains et des propriétés mécaniques en traction d'un laiton écroui, en fonction de la température de recuit

Orientation des structures recristallisées



Influence de la déformation sur la texture

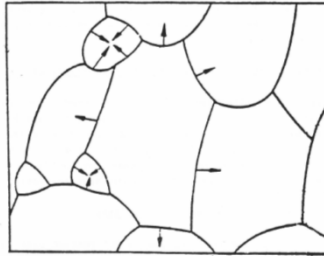
- d'un acier laminé à froid
- du même acier après recristallisation

Plan

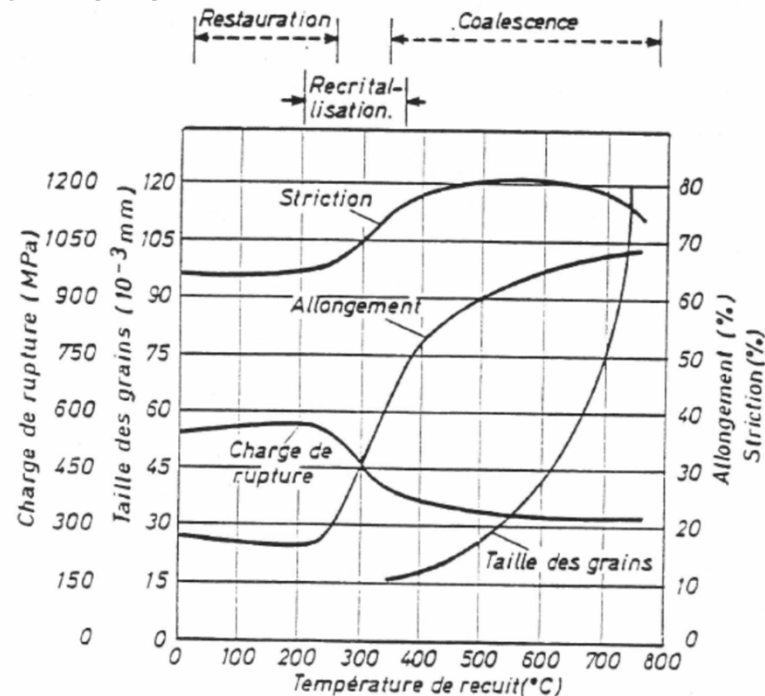
1. Introduction - la structure déformée
2. La restauration
3. La recristallisation primaire
 - a) Energie de recristallisation
 - b) Vitesse de recristallisation
 - c) Taille des grains recristallisés
 - d) Propriétés mécaniques des structures recristallisées
 - e) Orientation des structures recristallisées
- 4. La coalescence et la recristallisation secondaire**
5. Le vieillissement après déformation à froid
 - a) Mécanisme
 - b) Vieillissement naturel
 - c) Vieillissement artificiel
 - d) Métaux non vieillissants

Lors de maintiens prolongés à haute température

Coalescence



Croissance du grain; résorption de petits grains à la surface convexe



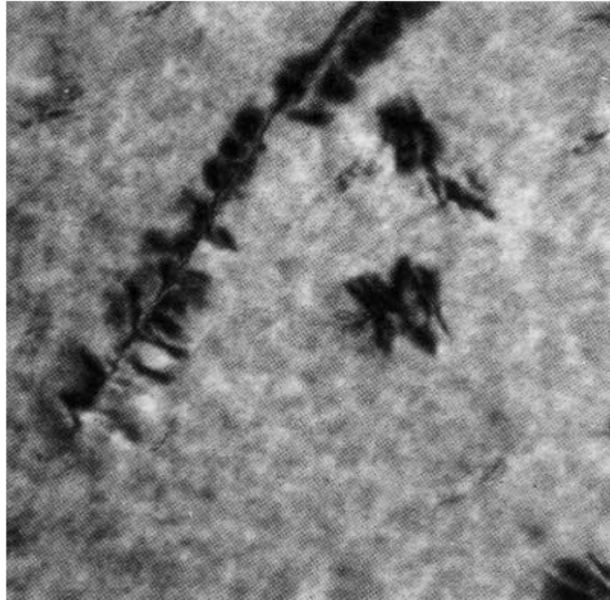
Recristallisation secondaire

- De nouveaux germes apparaissent dans la matière déjà recristallisée
- ⇒ Second état de recristallisation plus stable car présentant moins de défauts que les cristaux de recristallisation primaire
- Force motrice faible
- ⇒ La germination secondaire est possible seulement à haute température

Plan

1. Introduction - la structure déformée
2. La restauration
3. La recristallisation primaire
 - a) Energie de recristallisation
 - b) Vitesse de recristallisation
 - c) Taille des grains recristallisés
 - d) Propriétés mécaniques des structures recristallisées
 - e) Orientation des structures recristallisées
4. La coalescence et la recristallisation secondaire
- 5. Le vieillissement après déformation à froid**
 - a) Mécanisme
 - b) Vieillissement naturel
 - c) Vieillissement artificiel
 - d) Métaux non vieillissants

Mécanisme du vieillissement



[M. Grumbach]

Carbures de vieillissement sur une dislocation, observés par microscopie électronique en transmission

Sous l'effet du temps et de la température, des atomes en solution peuvent migrer les imperfections présentes dans une structure écrouie.

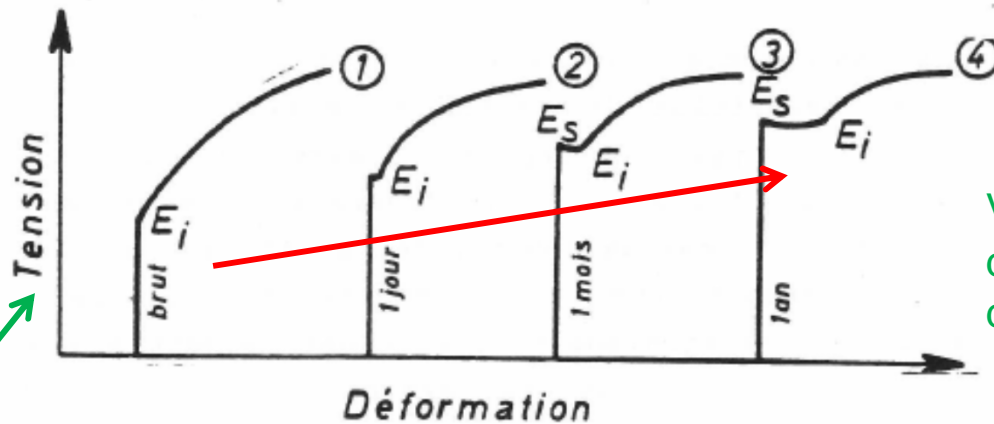
⇒ Formation d'atmosphères de Cottrell qui entravent le déplacement des dislocations

Le vieillissement proprement dit se marque avant tout par une **modification des propriétés!** Celle-ci est décelable même en l'absence de toute modification microstructurale visible.

Mais à plus long terme, la formation de précipités devient possible

Pour éviter le vieillissement, il faut éviter la présence d'éléments en solution pex: fixer le carbone sous forme de carbures (TiC...)

Vieillissement naturel (T_{amb}) vs artificiel ($T > T_{amb}$)



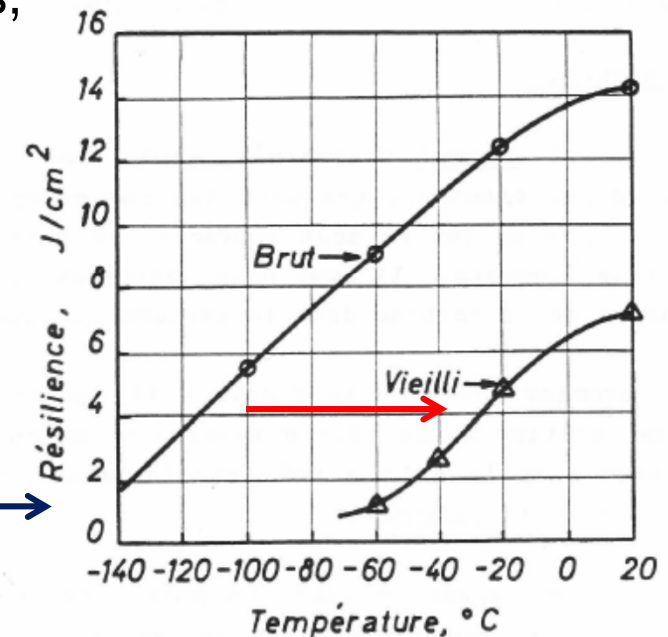
Bake hardening

Vieillissement naturel après déformation d'un acier extra-doux

A température ambiante et sous l'effet du temps, l'acier se durcit.
La limite d'élasticité augmente et on observe l'apparition d'un palier de traction.

Le vieillissement peut aussi conduire à une diminution de la résilience.
La température de transition augmente.

Vieillissement d'un acier de construction à 0,2 % C



Bibliographie

- F.J. Humphreys et M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", Burlington Elsevier, 2004
- M. Grumbach, "Vieillissement des aciers", Techniques de l'Ingénieur, m235 (1993)
- J. Lecomte-Beckers, "Physique des Matériaux: Matériaux métalliques", Chapitre III: Les imperfections des réseaux cristallins
- A. Mertens et al., Materials Science Forum **706-709** (2012), 1221-1226
- R.S. Mishra et Z.I. Ma, Mater. Sci. Eng. R **50** (2005), 1-78