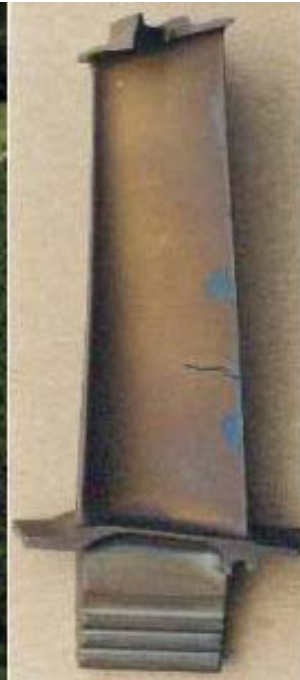


Fluage :

à quoi bon ?



www.mms2.ensmp.fr

Fluage :

- contrainte (charge) constante
- évolution de la déformation au cours du temps sous température
- essais longs (unité = 1000h), machines simples et robustes

Principe de l'essai :

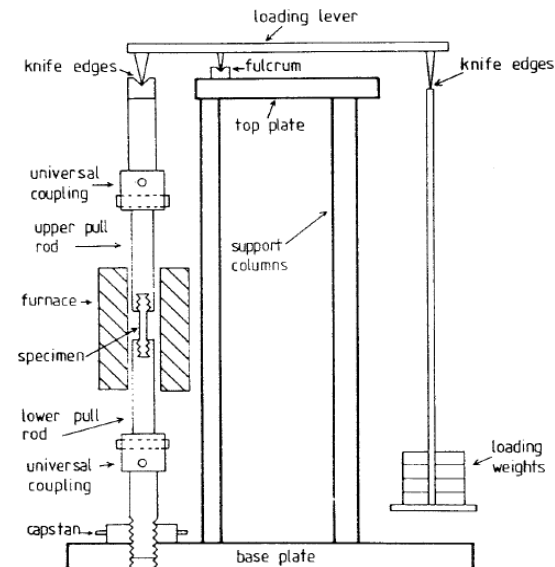
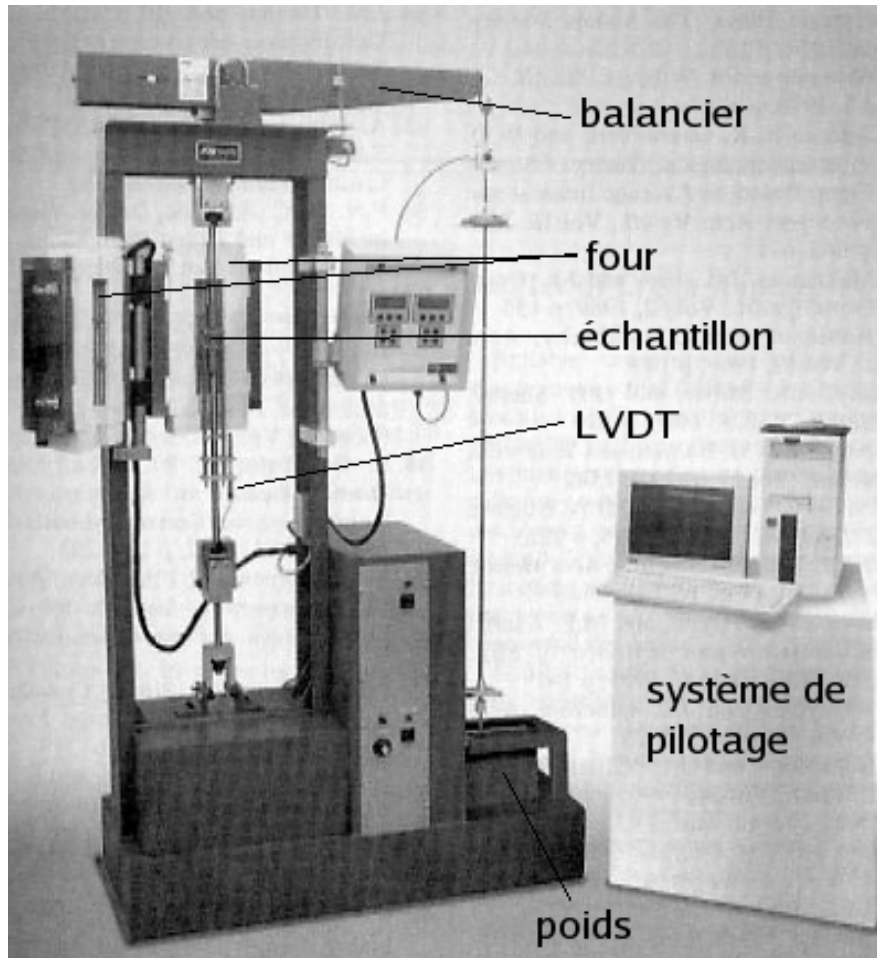


Fig. I- 4 : Illustration d'une machine de fluage



Fluage lent sous poids propre

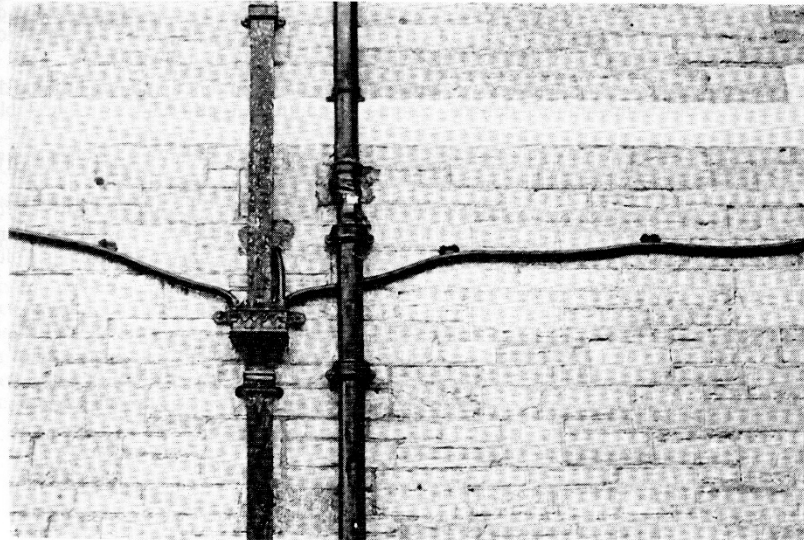


Figure 17.2 : Les tuyaux de plomb fluent souvent de façon notable au cours des années.

Sous la Température de fluage : $\epsilon_p = f(\sigma)$: Déformation Indépendante du temps : **Plasticité**

Au-delà de la température de fluage : $\epsilon_p = f(\sigma, t, T)$: Def. dépendante du temps et de la température : **Visco - Plasticité**

La **Température** à laquelle un Matériau **commence à Fluier** est une fonction de sa **Température de Fusion T_f (°K)** ou de sa Température de Ramollissement (**Transition Vitreuse T_g**) pour les **Polymères**.

Fluage	Métaux	Céramiques	Polymères
$T >$	0,3-0,4 T_f	0,4-0,5 T_f	T_g

Mécanismes physiques du fluage

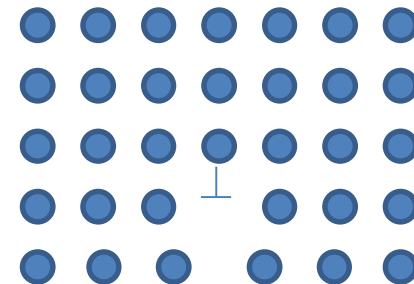
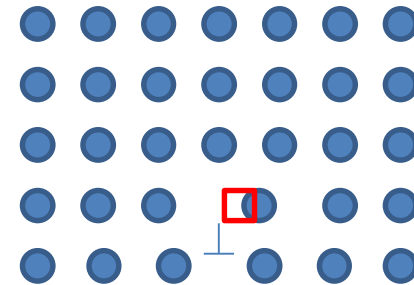
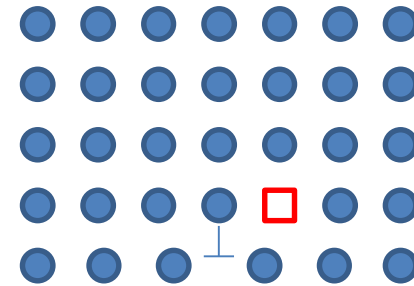
Fluage = **déformation plastique** à
haute température.



Mouvement de dislocations sous
l'effet de la diffusion atomique et des
contraintes appliquées.

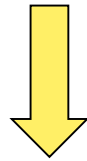


Montée de dislocations

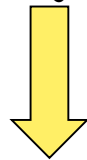


Mécanismes physiques du fluage

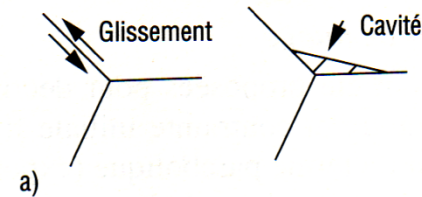
La déformation plastique **se traduit** souvent par le **rassemblement de lacunes** sur certains sites intergranulaires.



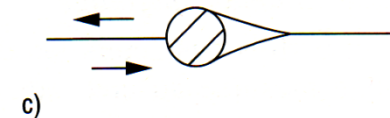
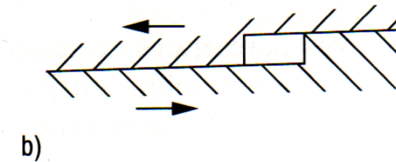
Cavitation aux joints de grains.



Rupture intergranulaire.



Joint triple



Particule

Mécanismes de la formation de cavités intergranulaires en fluage.

La courbe de fluage se décompose en trois phases

- **Le fluage primaire (I)** : effacement de l'histoire du chargement
 - écrouissage du matériau : il se déforme de moins en moins vite
- **Le fluage secondaire (II)** : état stationnaire
 - équilibre dynamique entre restauration et écrouissage
 - vitesse de déformation minimale
- **Le fluage tertiaire (III)** : accélération du fluage jusqu'à la ruine du matériau
 - effet de structure (la contrainte augmente car la section diminue)
 - effet d'endommagement (cavités)
 - effet de vieillissement du matériau (adoucissement)

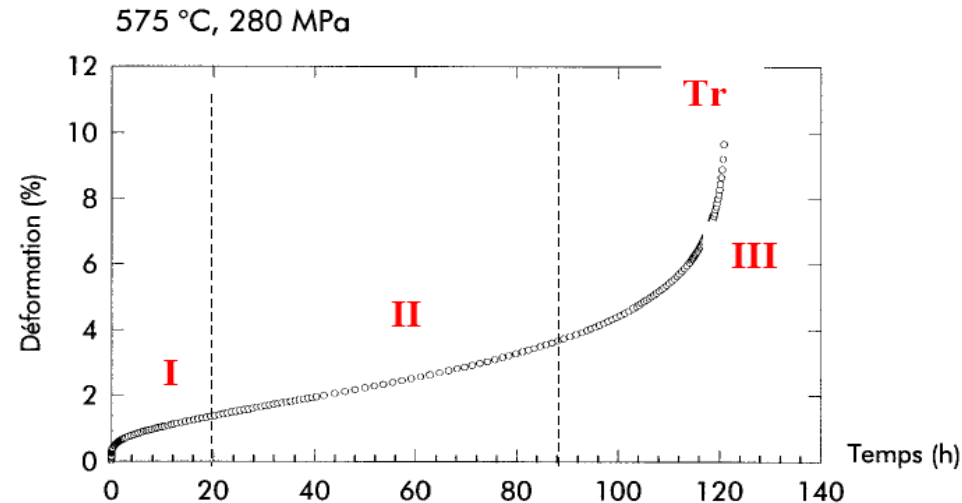


Fig. I- 5 : Illustration d'une courbe de fluage expérimentale

Le Fluage est une Déformation Lente et Continue fonction du Temps, de la Température et de la Contrainte Appliquée

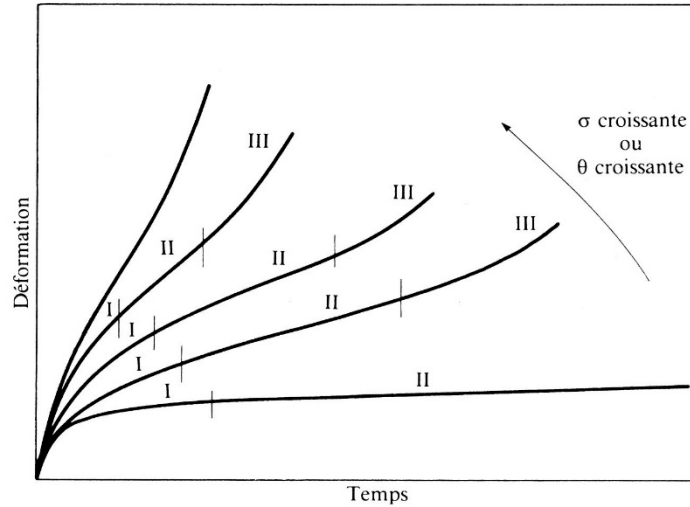
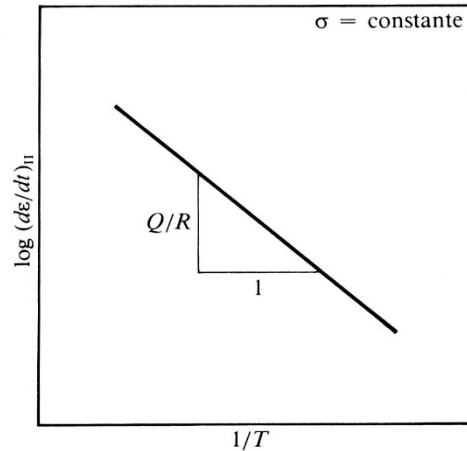


Figure 7.5 Courbes de fluage, pour des températures ou des contraintes croissantes : pour certaines valeurs de la température ou de la contrainte, on distingue nettement trois stades. Ce diagramme représente uniquement la déformation permanente, sans tenir compte de la déformation élastique instantanée.

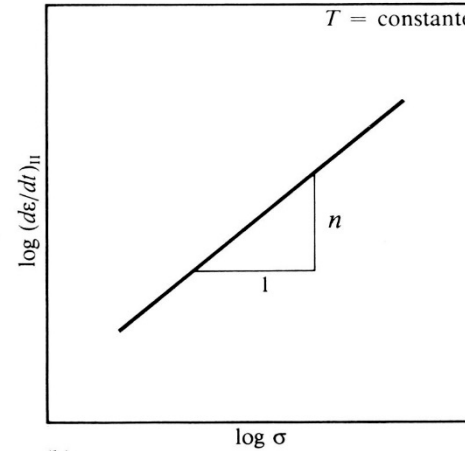
$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{II} = C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{II} = B\sigma^n$$

Loi de Norton



(a)



(b)

Figure 7.6 Influence sur la vitesse de fluage secondaire, $(d\varepsilon/dt)_{II}$: a) de la température ; b) de la contrainte.

Loi de Norton

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{II} = B\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

n : « l'exposant de Norton » diminue avec la température.

$n=1$ fluage-diffusion (haute **température** $T > 0,7 T_f$)

$n=4-5$ fluage-dislocations (moyenne température $T > 0,5 T_f$)

La viscoplasticité à haute température fait appel à des phénomènes de diffusion.
Deux modes sont alors distingués selon la distance parcourue par la matière.



Le fluage – dislocations :

Mécanisme à relative courte distance

Fortes σ

Mécanisme contrôlé par le mouvement des dislocations

Le fluage – diffusion :

Mécanisme à longue distance, celle de la taille des grains

Faibles σ

Mécanisme contrôlé par le déplacement de matière par diffusion transgranulaire ou intergranulaire sans l'intervention des dislo

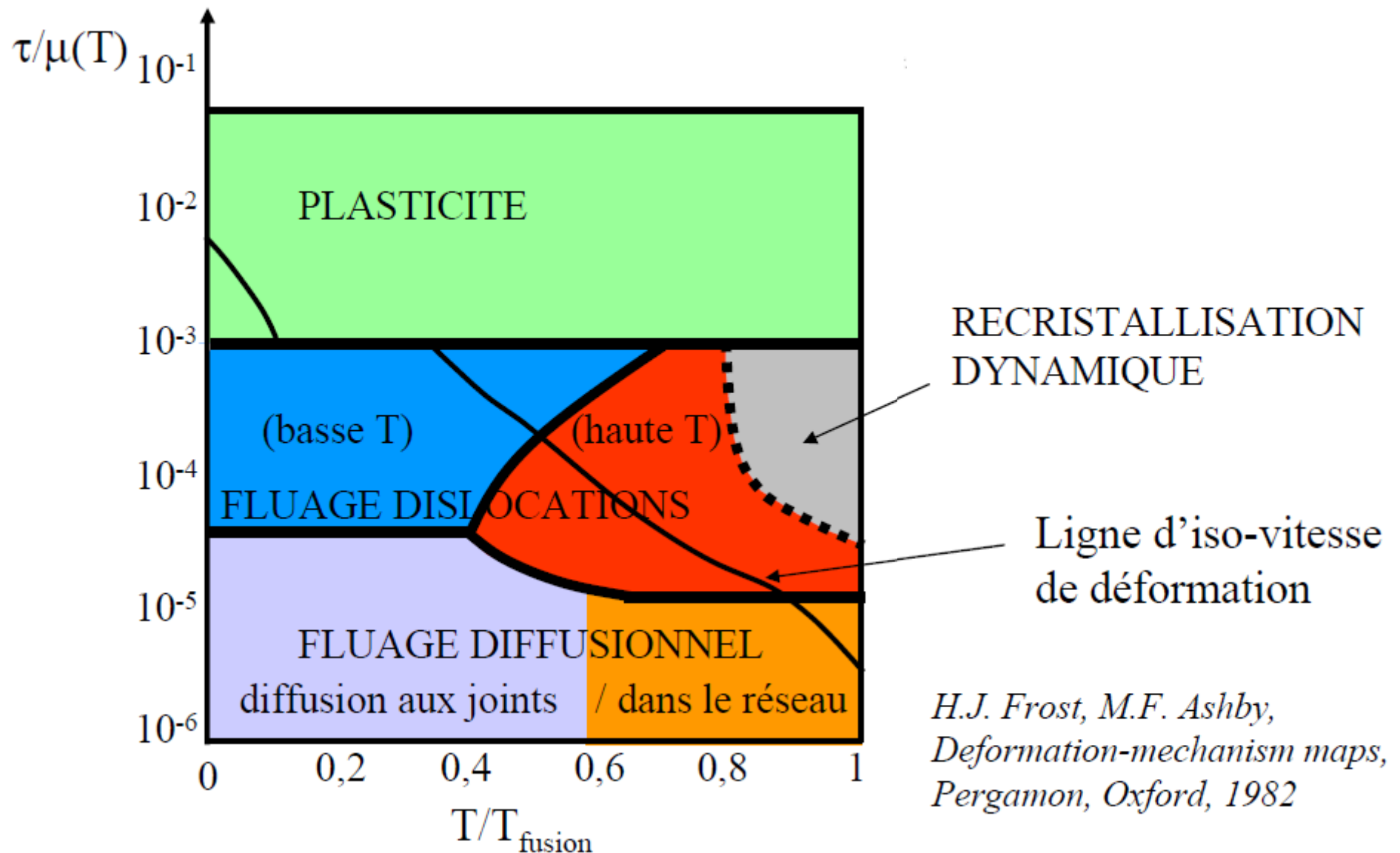
Transport de matière :

le long des joints de grains (**fluage de Coble**)

ou

pour de + hautes T ($T > 0,8 T_f$) à l'intérieur du grain (**fluage de Herring-Nabarro**)

Cartes de mécanismes de déformation



*H.J. Frost, M.F. Ashby,
Deformation-mechanism maps,
Pergamon, Oxford, 1982*

Le fluage-dislocations

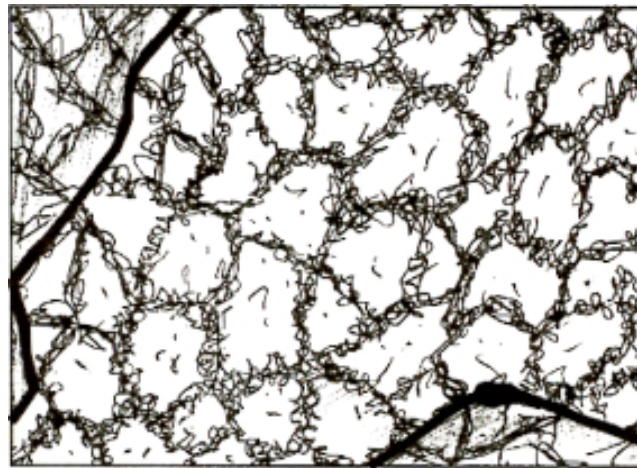
Aux basses températures ($T < 0,4$ à $0,5 T_f$), il s'agit d'une déformation plastique, liée à des **mécanismes de dislocations**.

Lors du chargement et du fluage primaire :

- Création et propagation des dislocations
- Pas de formation de structures cellulaires
- Dislocations enchevêtrées (par glissement des dislocations : bandes de déformation et lignes de glissement...)

Lors du fluage secondaire :

- Formations de cellules de dislocations (polygonisation)
- Densité de dislocations stable au cours de ce stade : il y a équilibre entre les processus de formation et d'annihilation des dislocations
- La désorientation entre les sous-grains augmente avec le temps



— joints de grain
murs des cellules

Schéma d'une structure cellulaire de dislocations

[Essais de fluage, F. SAINT-ANTONIN, *Techniques de l'Ingénieur*, M140 v3, 1995]

Le fluage-dislocations

A hautes températures ($T > 0,4$ à $0,5 T_f$), la déformation plastique est liée à la présence de **mécanismes de montée des dislocations**, phénomène qui est thermiquement activé.

Lors du chargement et du fluage primaire :

- Création et propagation des dislocations
- Formation de structures cellulaires équiaxes**

Lors du fluage secondaire :

- Formations de cellules de dislocations (polygonisation)
- La taille des sous-grains est inversement proportionnelle à la contrainte σ et n'évolue pas pendant le fluage secondaire**
- Pour les très fortes contraintes, un phénomène de recristallisation peut se produire**

[Essais de fluage, F. SAINT-ANTONIN, *Techniques de l'Ingénieur*, M140 v3, 1995]

Le fluage-diffusion

Fluage de Coble

$$\dot{\epsilon}_v = B' \frac{\delta_j D_j \sigma \Omega}{kT d^3}$$

où :

- δ_j largeur des joints de grain
- B' une constante

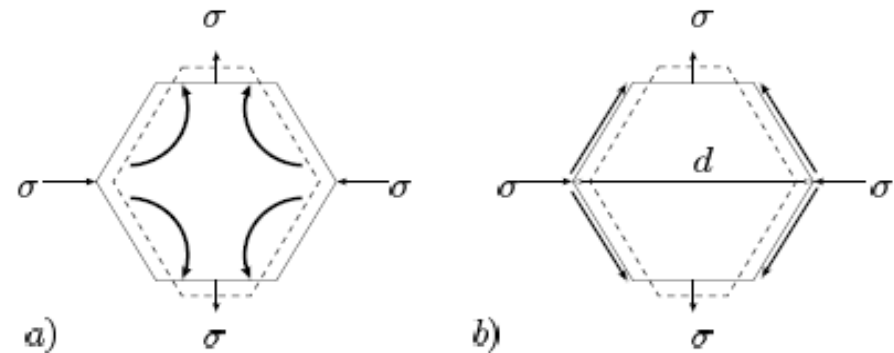


Figure XIV.9: a) diffusion intergranulaire et b) diffusion aux joints de grains (schéma pour des grains à géométrie polyédrique)

Coble propose un modèle de fluage polycristallin où la vitesse de déformation est gouvernée par la diffusion le long des grains et non à travers le grain (voir figure XIV.9). Il introduit alors le coefficient de diffusion intergranulaire D_j pour écrire le flux de lacunes et évalue comme précédemment l'allongement élémentaire.

Le fluage-diffusion

Fluage de Herring-Nabarro

Monocristal de forme cubique, d'arrête d soumis à un cisaillement pur : mouvement des lacunes de la face en tension vers face compression, inverse matière.

$$\dot{\epsilon}_v = B \frac{\Omega D_v \sigma}{d^2 kT}$$

où

- D_v la vitesse de fluage
- Ω volume atomique
- $B = 16$ pour des grains sphériques

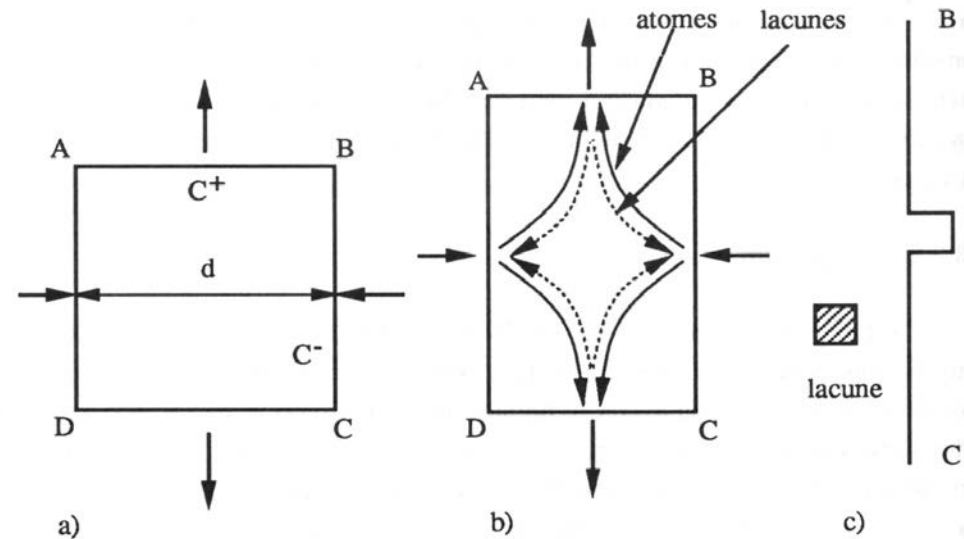


Figure 1.25. Modèle de Herring-Nabarro : transport des lacunes des faces en tension (AB et CD) vers les faces en compression (BC et DA)

Herring et Nabarro pensent que le transport de la matière se fait par extraction d'atomes de l'intérieur d'un cristal à travers sa surface. L'atome se déplace de la face du cristal en compression vers la face soumise à de la tension. Les lacunes font le chemin inverse :

=> les grains s'allongent dans la direction de la contrainte

Différence entre les deux modèles

Influence de la taille de grains

Cartographies d'Ashby

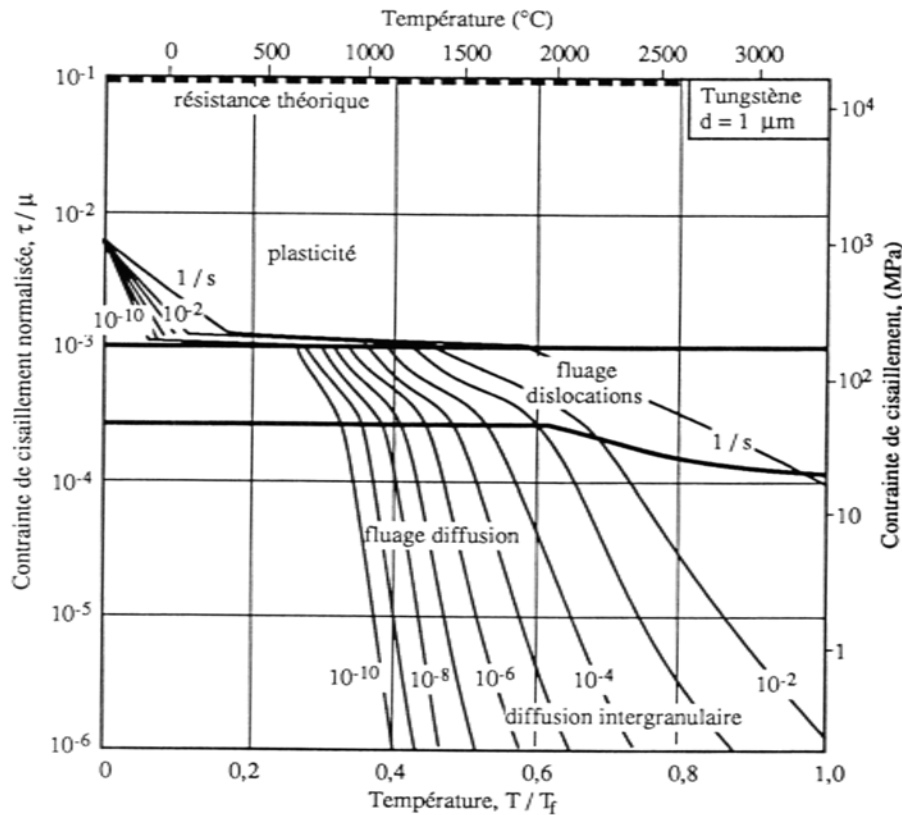


Figure 1.32. Diagramme de déformation du tungstène pur avec une taille de grain de $1 \mu\text{m}$ (d'après H.J. Frost et M.J. Ashby)

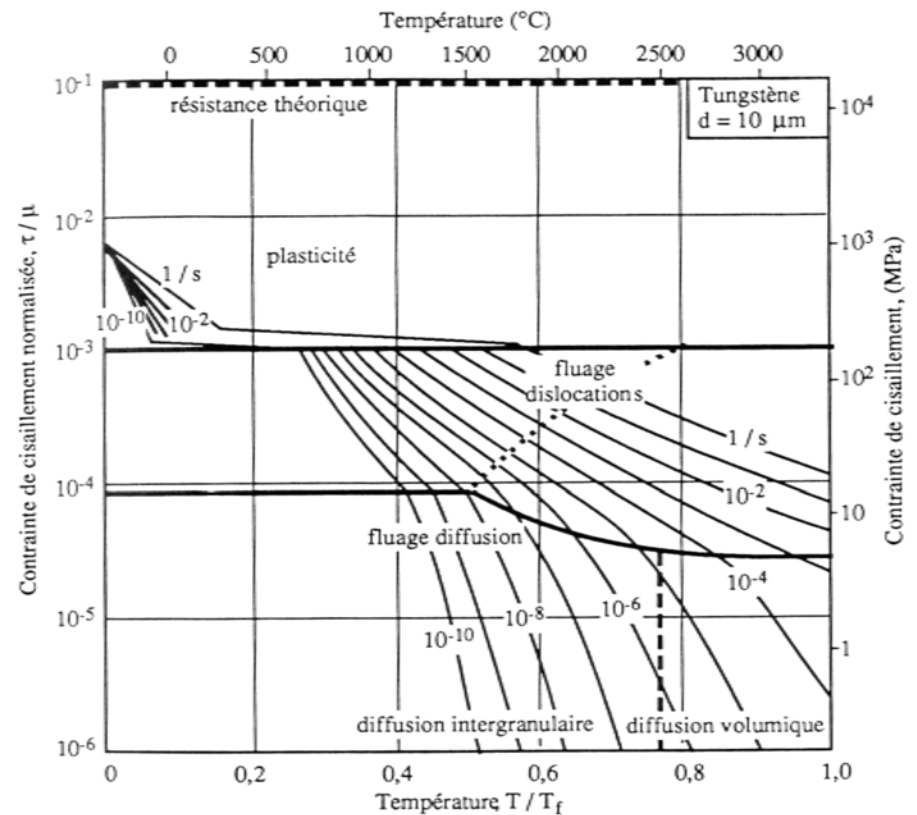
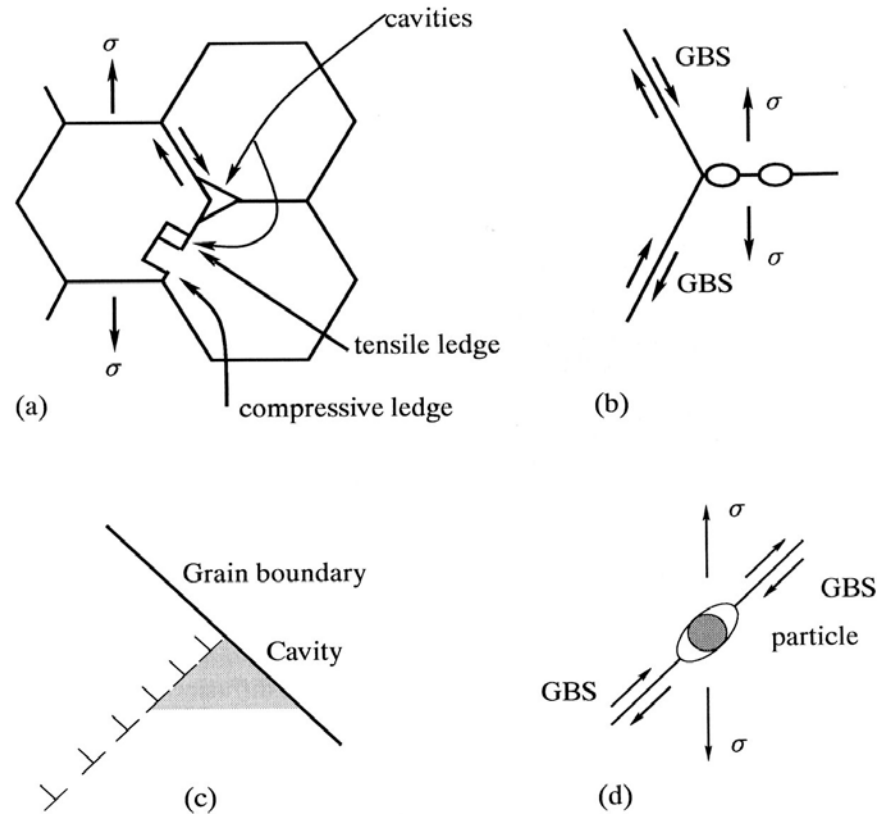


Figure 1.33. Diagramme de déformation du tungstène pur avec une taille de grain de $10 \mu\text{m}$ (d'après H.J. Frost et M.J. Ashby)

Une forte taille de grains retarde l'apparition du fluage diffusion

Germination de cavités :



- a) Glissement aux joints de grains
- b) Regroupement de lacunes dans zones très contraintes
- c) Empilement de dislocations
- d) Cavitation autour d'une particule

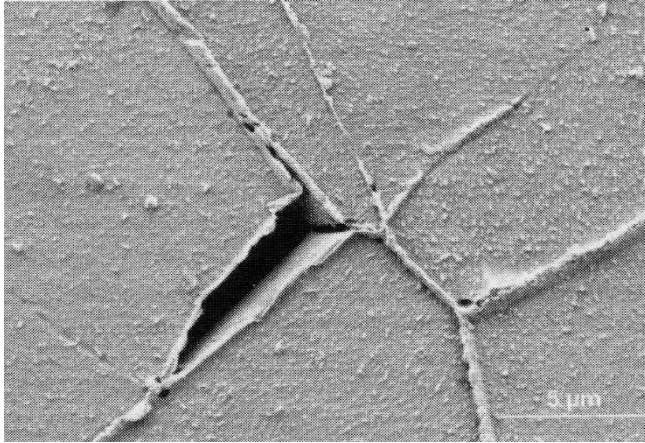


Figure II.33: Scanning electron micrograph illustrating the formation of wedge-type intergranular cracks in austenitic stainless steel (source: (Auzoux, 2003)).

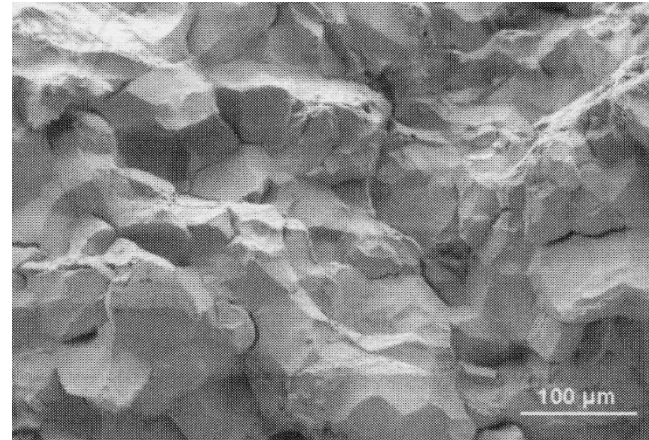
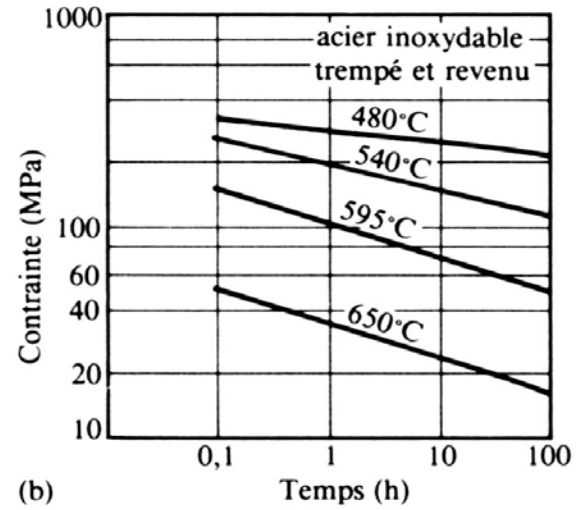
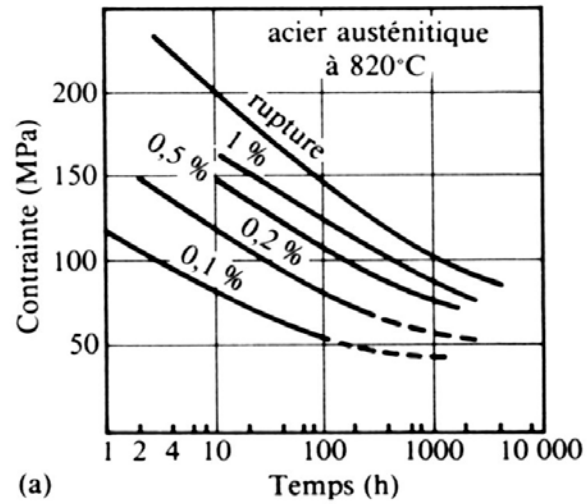


Figure II.36: Scanning electron fractograph showing intergranular fracture in austenitic stainless steel tested under creep conditions at 600 °C (source (Auzoux, 2003)).

La rupture par fluage :



Matériaux résistants au fluage

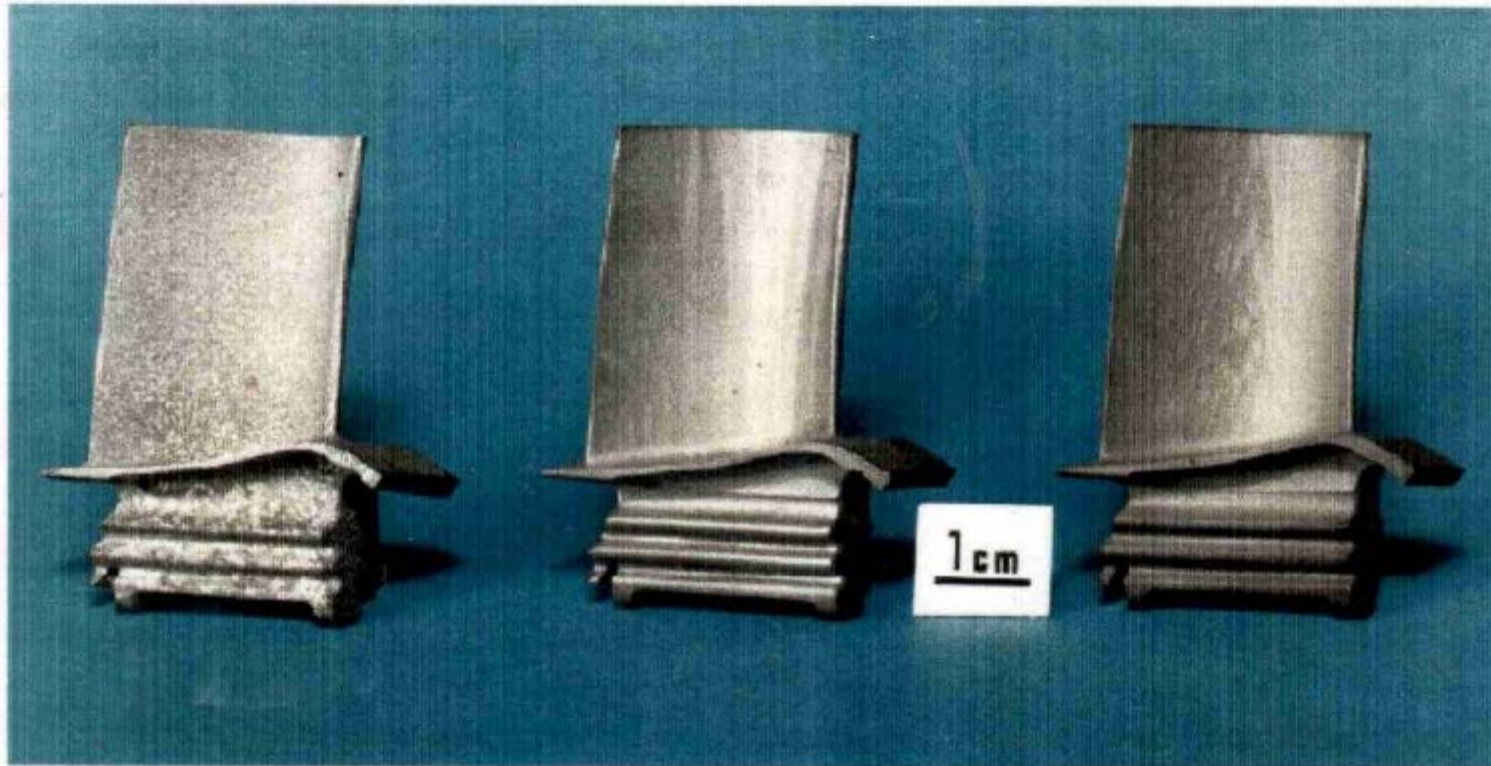
- Température de fusion élevée
- Présence de nombreux précipités
- Force de friction du réseau importante
- Peu de joints de grains (monocristaux)
- Précipitation intergranulaire

Les alliages résistants au fluage

Grains equiaxes

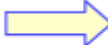
Grains allongés

Aube monocristalline



Snecma Moteurs
groupe snecma

Bilan des situations d'endommagement et de rupture

Contrainte forte, continue ou brutale  •rupture fragile
•rupture ductile

limite d'élasticité, résistance à la rupture, résilience, ténacité...

Contrainte faible mais continue (et à haute température)  rupture par fluage

Contrainte faible mais périodique  rupture par fatigue

Contrainte + milieu  corrosion sous contrainte