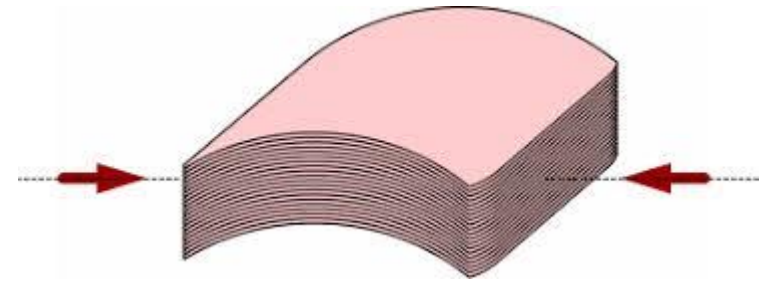
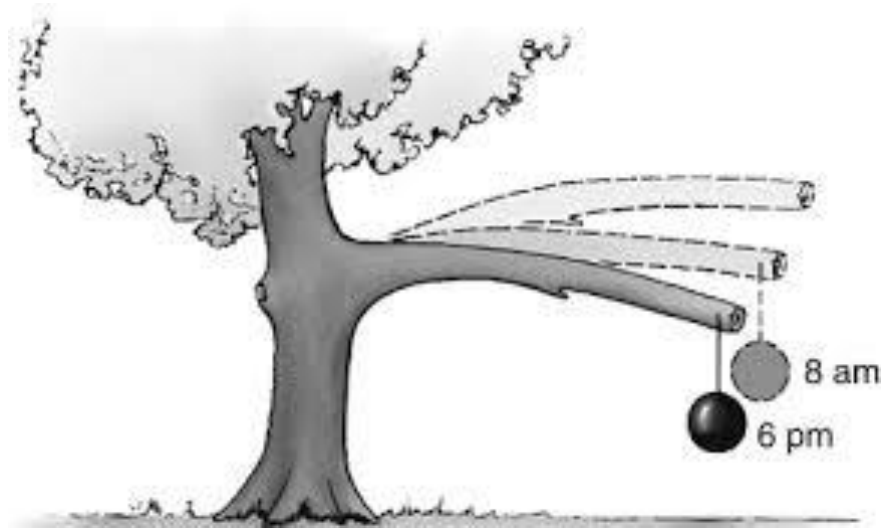
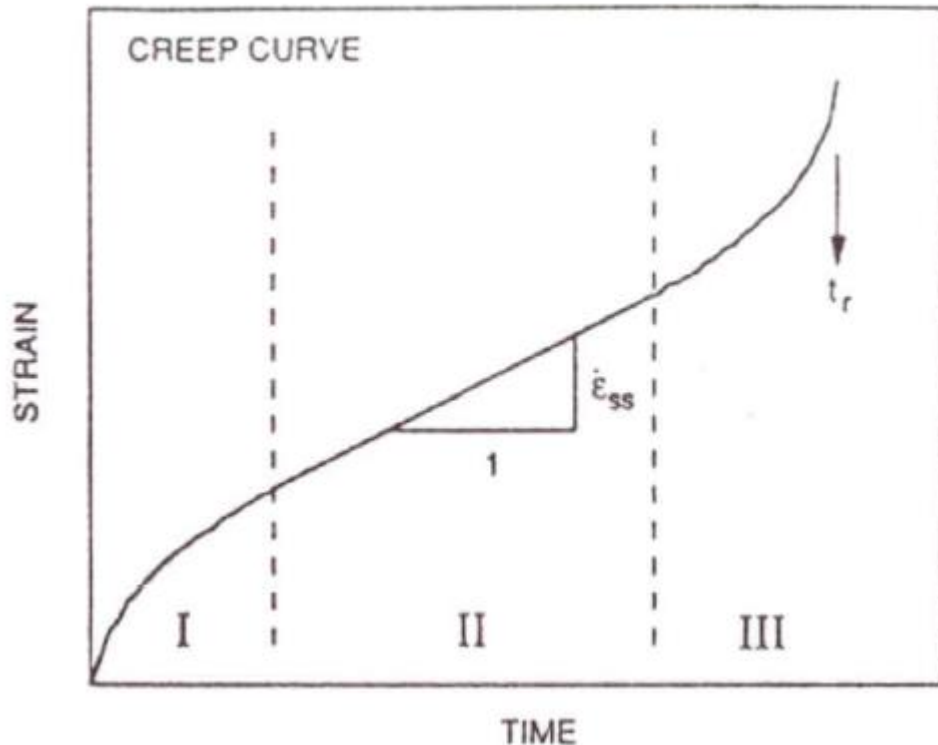


Fluage



Courbe de fluage

Déformation (ε) sous contrainte (σ) en fonction du temps



Trois stades jusque la rupture:

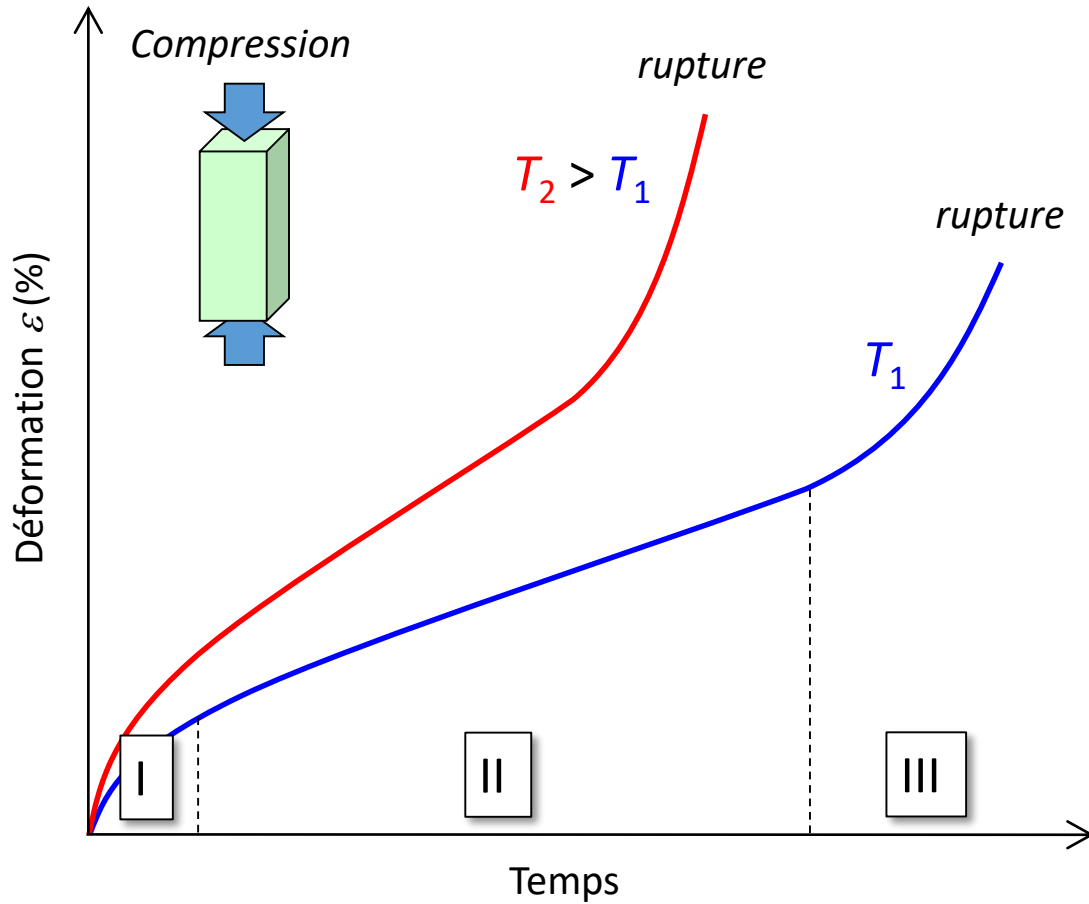
I) Le fluage primaire ou transitoire (souvent caractérisé par une diminution de la vitesse de déformation).

II) Le fluage secondaire ou stationnaire (pour lequel la vitesse de fluage est constante).

III) le fluage tertiaire caractérisé par une accélération de la vitesse de déformation précédant la rupture de l'éprouvette.

Déformation *irréversible* au cours du temps

d'un matériau soumis à une charge constante à température constante



Déformation totale à rupture < 2 à 3 %

Domaine I

$$\varepsilon = A_1 \ln(t)$$

Fluage α : **primaire**
ou transitoire

Domaine II

$$\varepsilon = A_2 t$$

Fluage β : **secondaire**
ou stationnaire

Domaine III

$$\varepsilon = A_3 \exp(t)$$

Fluage χ : **tertiaire**
ou accéléré

L'essentiel de la **durée de vie**
de la céramique a lieu
pendant le fluage secondaire

Vitesse (taux) de déformation $\dot{\varepsilon}$
pendant le fluage secondaire (s^{-1})

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = a \frac{\sigma^k}{d^m} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

σ : contrainte appliquée (Pa)

d : taille de grains (m)

T : température absolue (K)

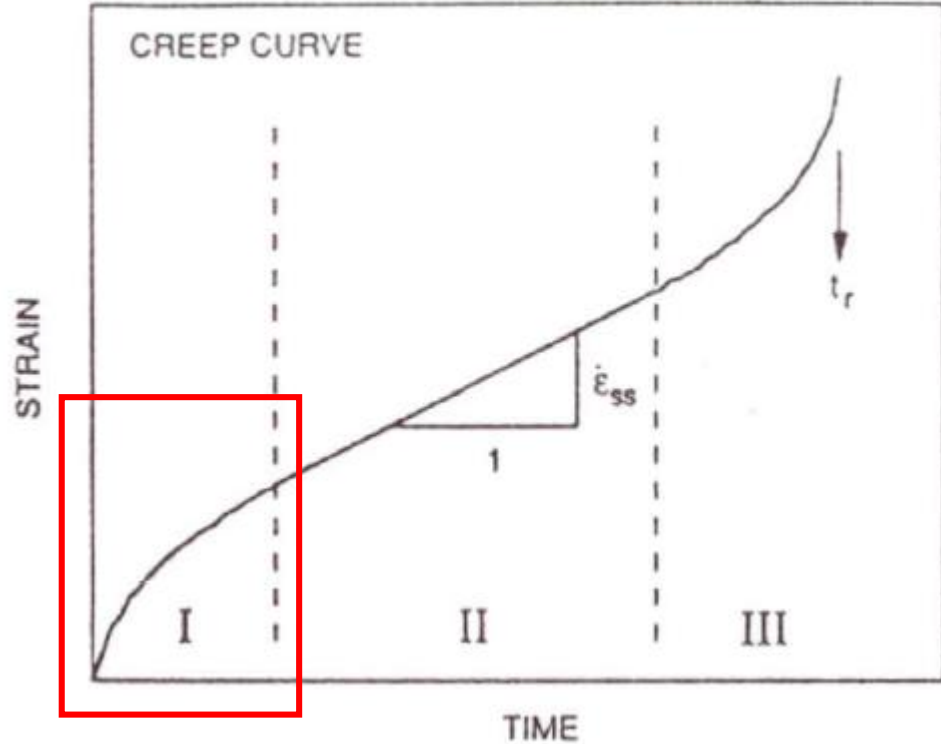
k et m : paramètres de fluage

Q : énergie d'activation ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)

R : constante thermodynamique
($8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

Courbe de fluage

Déformation (ϵ) sous contrainte (σ) en fonction du temps

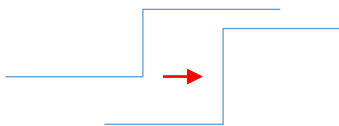


Stade I

la déformation visco-élastique E_{ve} :

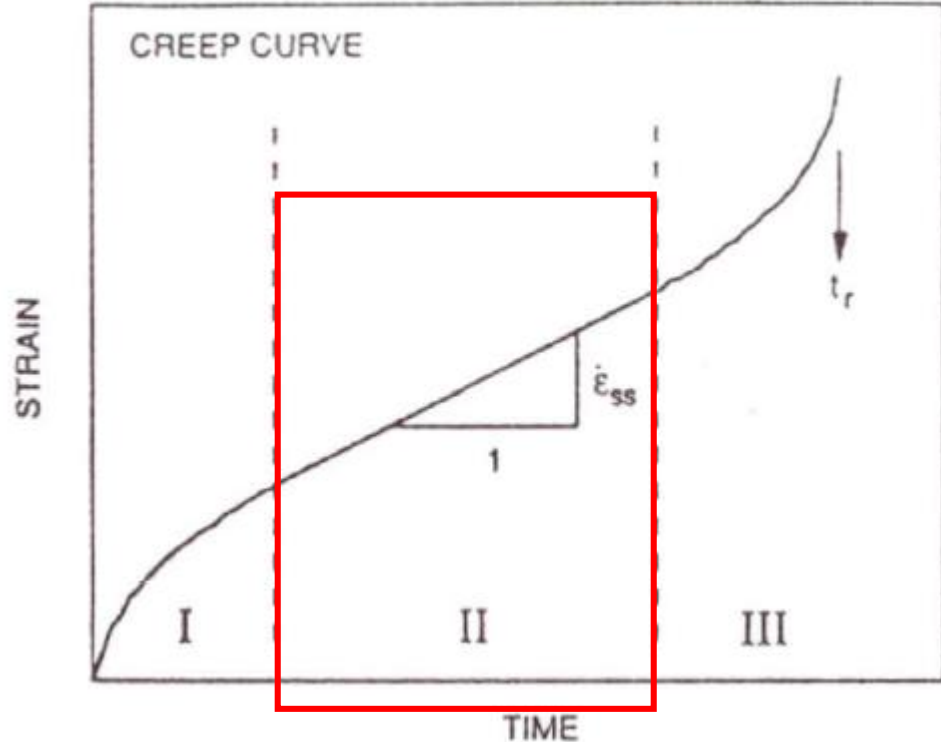
un phénomène de glissement aux joints de grains bloqué par les aspérités des joints de grains ou par des particules d'une seconde phase situées dans les joints de grains.

Eve



Courbe de fluage

Déformation (ϵ) sous contrainte (σ) en fonction du temps



E_{diff}

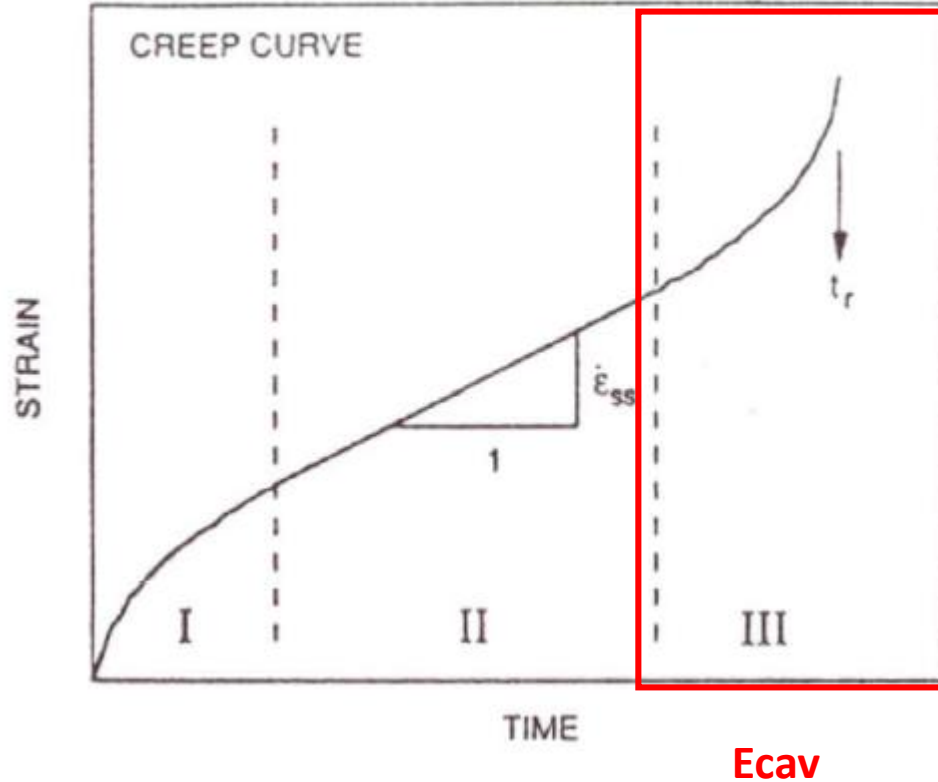
Stade II

la déformation par diffusion E_{diff} :

diffusion d'un ou plusieurs
éléments constituant le matériau.

Courbe de fluage

Déformation (ε) sous contrainte (σ) en fonction du temps

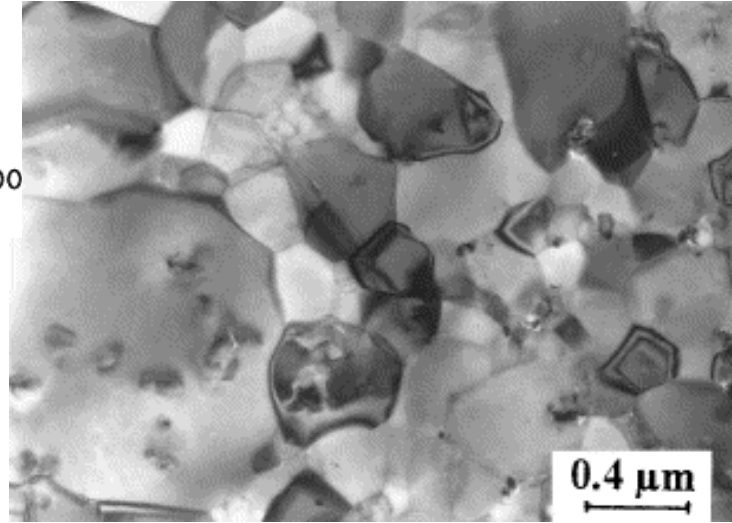
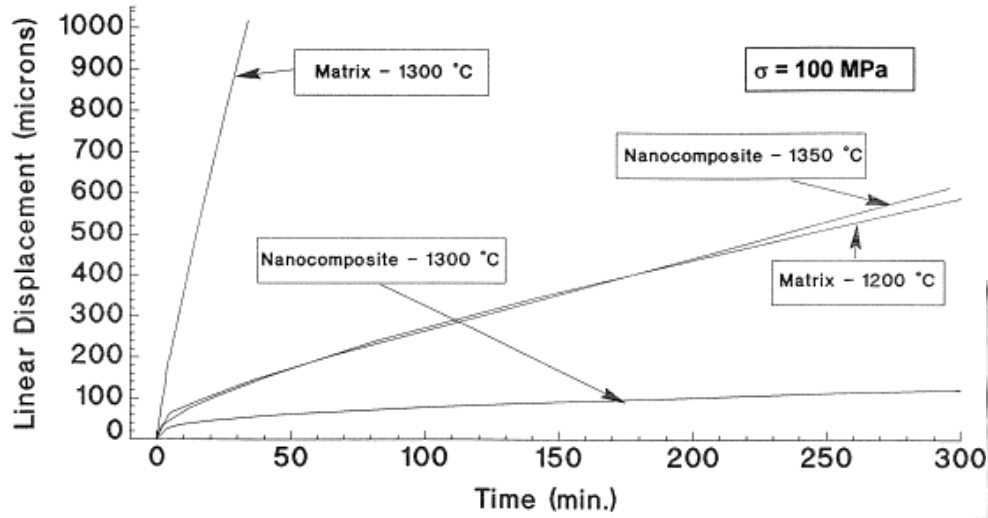


Stade III

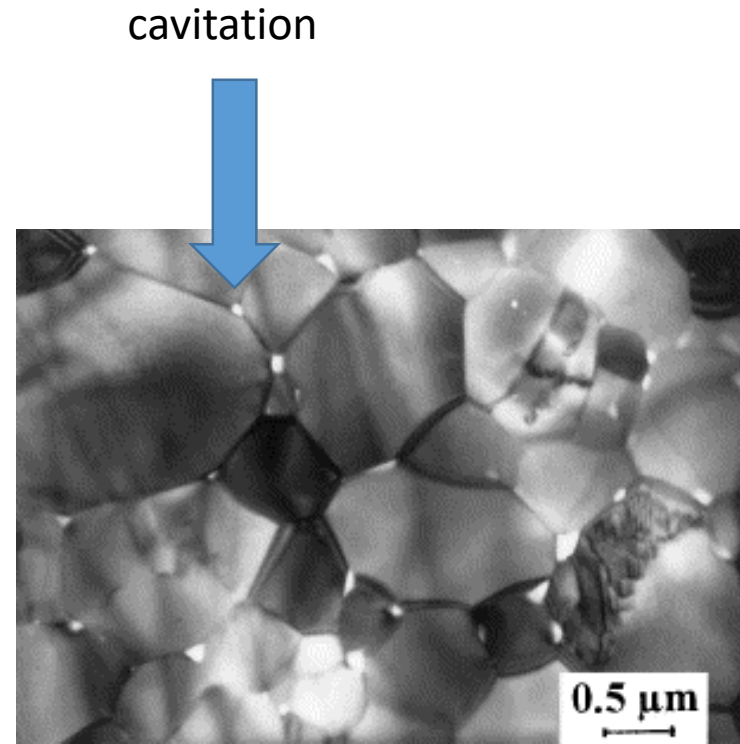
la déformation par cavitation E_{cav} :
rendue possible par le glissement aux joints de grains.

Ce troisième stade s'accompagne d'une modification de la microstructure par une accumulation de défauts tels que la nucléation et la croissance de cavités et de fissures, phénomène appelé "cavitation"

Résistance au fluage améliorée



Nanocomposite: Alumine-nanoparticules de SiC

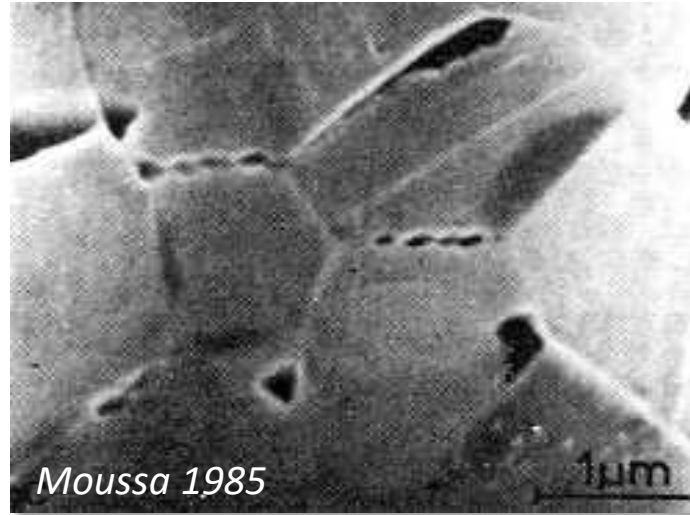


Présence de cavitations beaucoup plus importante dans l'alumine monolithique

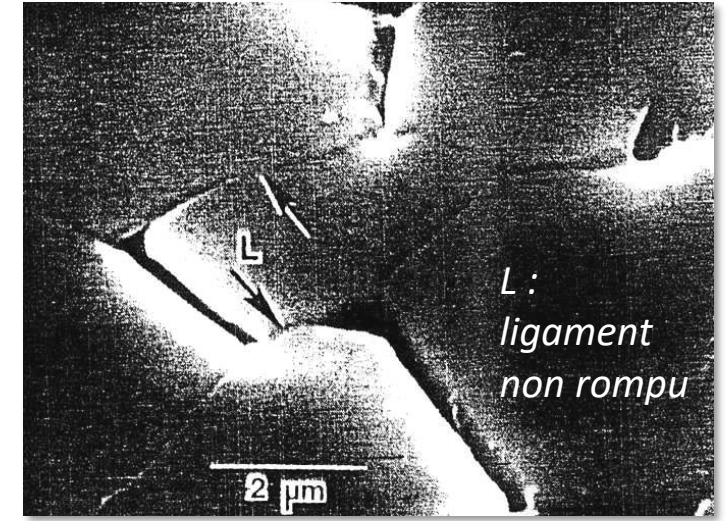
Fluage-cavitation

Fissuration multiple aux joints des grains (*Kossowski 1975*)

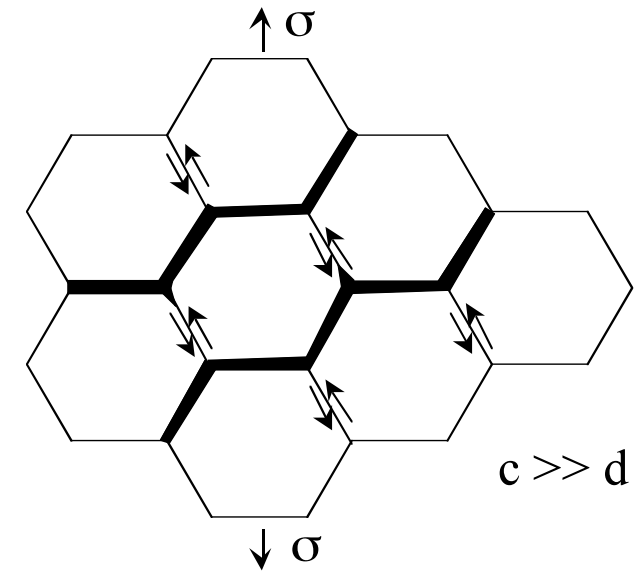
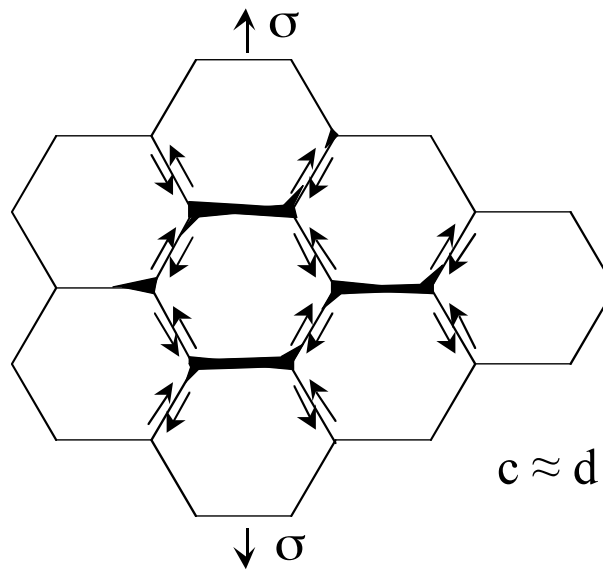
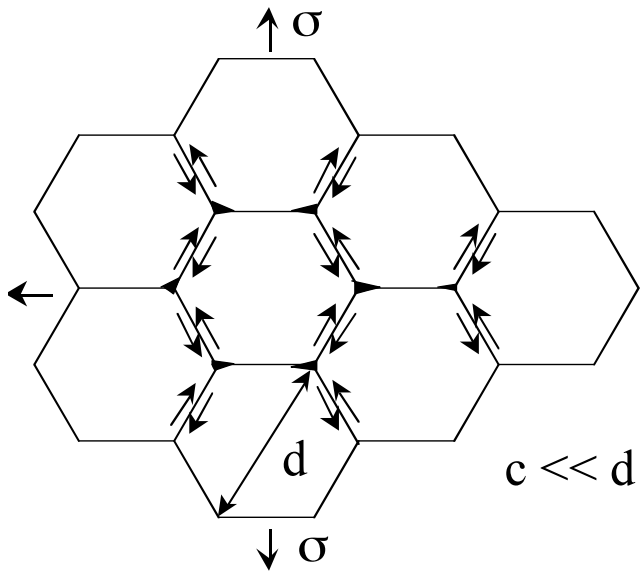
Formation de cavités aux joints triples, croissance (*coalescence des cavités*) et propagation des microfissures (*séparation des grains*)



SiC 1500 °C - 150 puis 220 MPa

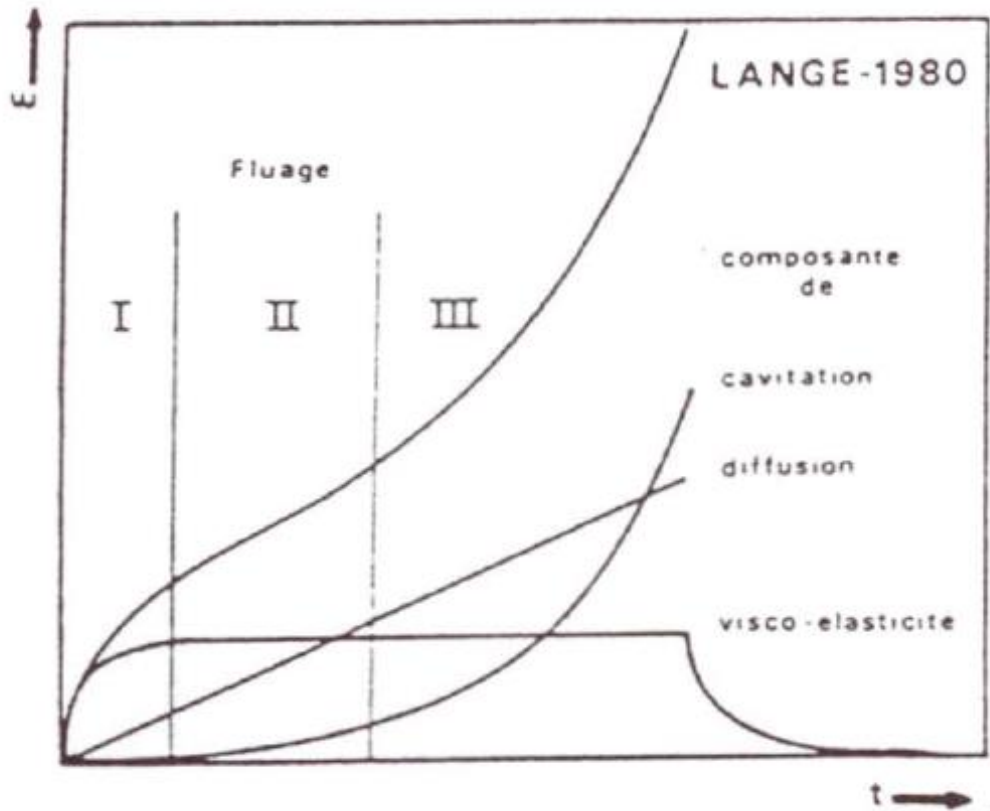


Alumine 1000 °C, 80 MPa, 78 h, déf. 0,076 %



Courbe de fluage

Déformation (ϵ) sous contrainte (σ) en fonction du temps



- la déformation visco-élastique E_{ve} , prédominante dans le fluage primaire,
- la déformation par diffusion d'un ou plusieurs éléments constituant le matériau Edif, prédominante dans le fluage stationnaire.
- la déformation par cavitation E_{cav} prédominante dans le stade tertiaire du fluage mais intervenant également très souvent dans le domaine de fluage stationnaire.

Cette courbe de fluage est en réalité la résultante de plusieurs composantes dont les principales sont: $E_{totale} = E_{ve} + E_{diff.} + E_{cav.}$

Il faut ajouter deux autres mécanismes:

- la déformation intragranulaire par mouvement de dislocations E_{intrag} , peu effective dans les céramiques car l'énergie nécessaire au mouvement des dislocations est supérieure à l'énergie du joint de grains.
- la déformation due à un mécanisme de dissolution - reprécipitation sous l'effet de la contrainte E_{dp}

$$\epsilon_t = \epsilon_{ve} + \epsilon_{\text{intrag}} + \epsilon_{\text{diff}} + \epsilon_{\text{cav}} + \epsilon_{\text{dp}}$$

Dans le cas de mécanismes compétitifs, la déformation s'exprime alors par la vitesse du mécanisme le plus rapide, ce dernier étant différent selon la température.

Le stade de fluage secondaire est le plus utile pour prédire la durée de vie d'un matériau car la vitesse de déformation est constante et est donnée par la loi de DORN.

la loi de DORN.

$$\dot{\epsilon} = A \frac{Gb}{kT} D \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n$$

$\dot{\epsilon}$ = vitesse de fluage dans l'état stationnaire

A = constante sans dimension

G = module de cisaillement

b = vecteur de Burgers

k = constante de Boltzmann ($1.38110^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

T = température absolue

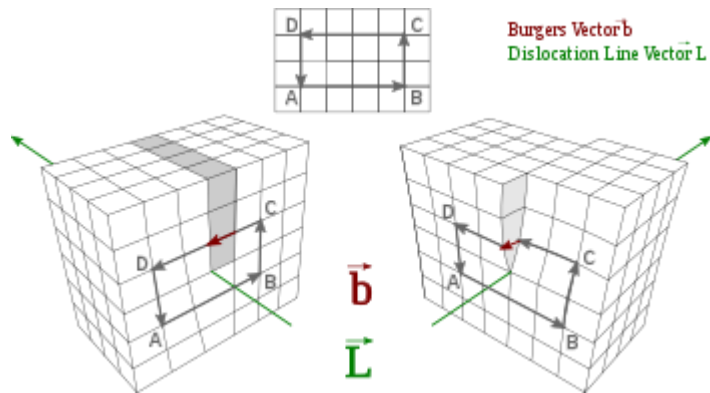
D = coefficient de diffusion

d = taille moyenne des grains

p = exposant de la taille des grains

σ = contrainte appliquée

n = exposant des contraintes



$$\dot{\varepsilon} = A \frac{Gb}{kT} D \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

D_0 = facteur de fréquence

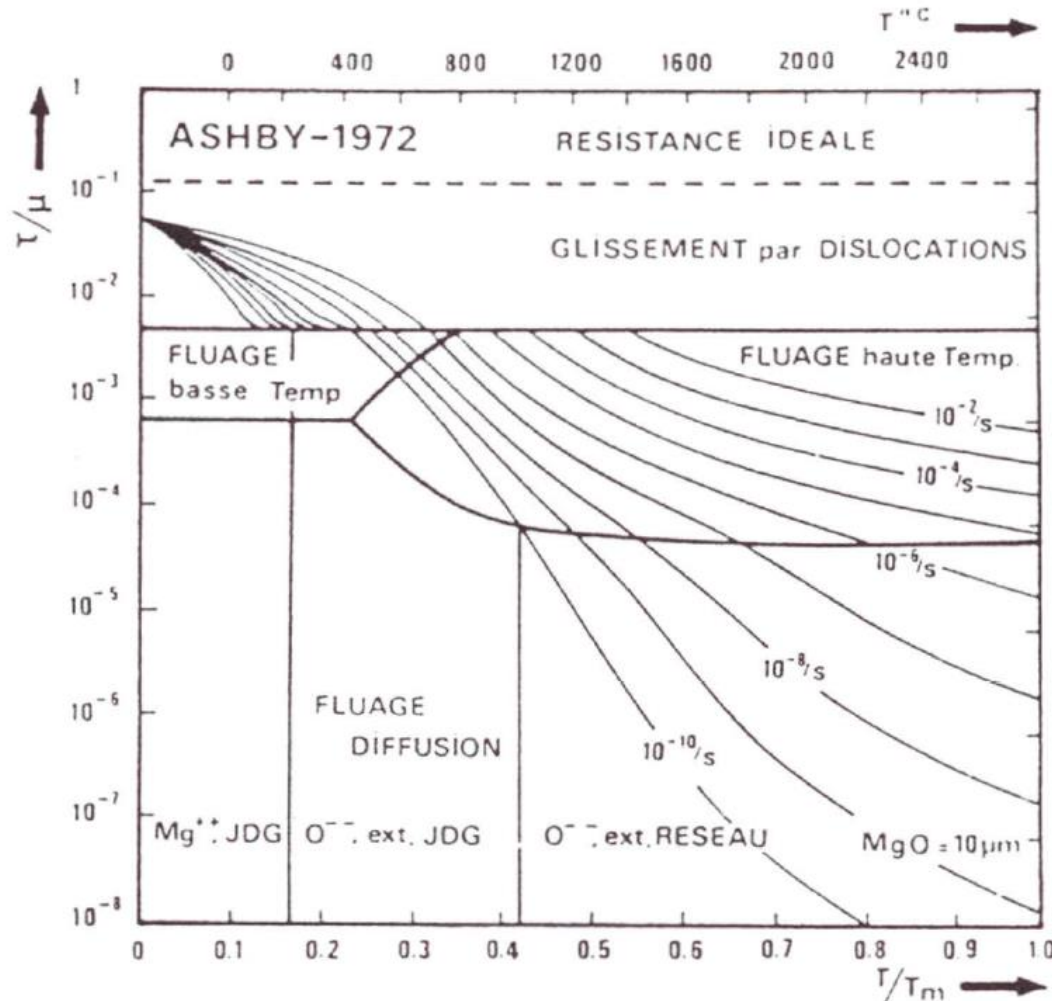
Q = énergie d'activation du processus de diffusion

R = constante des gaz parfaits ($8.31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

On obtient l'équation générale :

$$\dot{\varepsilon} = A' \frac{\sigma^n}{d^p} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

diagrammes de déformation d'ASHBY (1972) permettent de mettre en évidence le mécanisme prépondérant pour des paramètres expérimentaux donnés



MgO d = 10 μm

$$\dot{\epsilon} = A \frac{Gb}{kT} D \left(\frac{b}{d} \right)^p \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n$$




$$\dot{\varepsilon} = A' \frac{\sigma^n}{d^p} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

La détermination des paramètres n , p et Q permet de connaître le mécanisme de diffusion prépondérant.

Mécanisme de fluage $\dot{\varepsilon} = A' \frac{\sigma^n}{d^p} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$	n exposant de contrainte	p exposant de taille de grain	Q énergie d'activation
Diffusion aux joints de grains (Coble)	1	3	Q_{JDG}
Diffusion en volume (Nabarro-Herring)	1	2	Q_v
Glissement aux joints de grains (contrôlé par diffusion)	1	2-3	Q_v, Q_{JDG}
Glissement aux joints de grains (contrôlé par réaction d'interface)	2	1-2	Q_v, Q_{JDG}
Réaction d'interface	1-2	1	Q_v, Q_{JDG}
Mouvement de dislocations (montée + glissement contrôlé par la montée)	>4	0	Q_v
Mouvement de dislocations (montée contrôlée par diffusion en volume)	3	0	Q_v
Fluage endommagement (cavitation)	>3	>3	Q_v, Q_{JDG}

Modèles théoriques décrivant le fluage

- Mécanismes de joints de grains

- Uniquement pour les matériaux polycristallins
- Dépendance avec la taille des grains  $p >$ ou égal à 1

- Mécanismes de réseau

- Indépendant de la présence des joints de grains
- Ont lieu soit dans les monocristaux, soit les polycristaux
- Ont lieu à l'intérieur des grains, donc pas de dépendance avec la taille des grains

 $p = 0$

Mécanismes de joints de grains

A. Glissement de Lifshitz

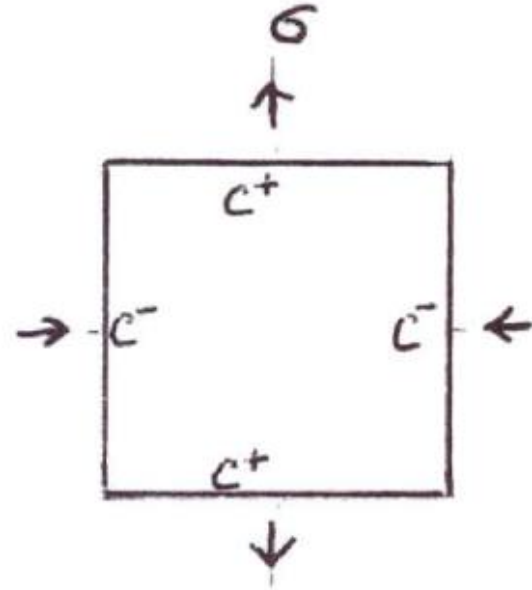
Les grains s'allongent le long de l'axe de tension et gardent leurs voisins adjacents

A1 Modèle de Nabarro Herring

A2 Modèle de Coble

A3 Modèle de Crossman et Ashby

A partir d'un monocristal soumis à un champ de contraintes non hydrostatiques, Nabarro a montré que la concentration des lacunes à l'équilibre thermique est modifiée au voisinage des surfaces de façon différente selon la contrainte appliquée.



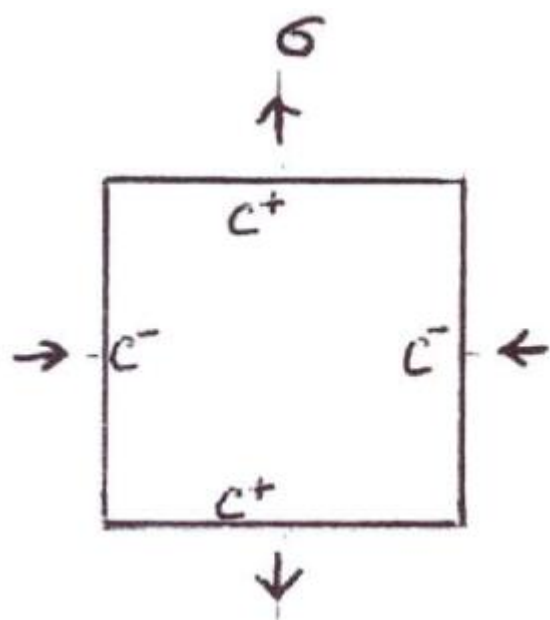
L'enthalpie de formation d'une lacune :

-augmente de la quantité $\sigma\Omega$ (où Ω est le volume de la lacune) sur les faces en compression et la concentration en lacunes devient c^-

-diminue de la même quantité sur les faces en tension et la concentration en lacunes augmente et devient c^+ .

Ce gradient de concentration de lacunes engendre un flux de lacunes des faces en tension vers les faces en compression et un flux d'atomes en sens inverse. Ce transport d'atomes se traduit par une déformation macroscopique du cristal.

Ce gradient de concentration de lacunes engendre un flux de lacunes des faces en tension vers les faces en compression et un flux d'atomes en sens inverse. Ce transport d'atomes se traduit par une déformation macroscopique du cristal.



Transport de matière par diffusion de lacunes vers les parties en compression entraînant un flux de matière dans le sens opposé

→ atomes

--> lacunes

A1 Modèle de Nabarro Herring

Lorsque le chemin de diffusion se fait à travers les grains (diffusion en volume), la vitesse de déformation est donnée par

$$\dot{\varepsilon} = A \frac{\Omega}{kT} \frac{D_V}{d^2} \sigma$$

avec

A = constante entre 10 et 20

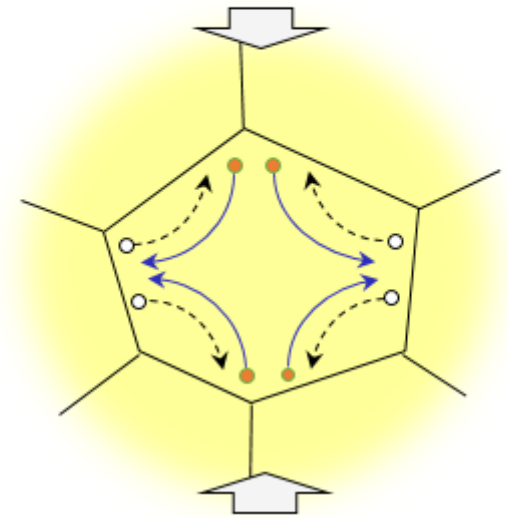
Ω = volume atomique de l'espèce diffusante.

D_V = coefficient de diffusion en volume.

d = la taille des grains.

$$\sigma = 1 \text{ et } p = 2$$

Diffusion dans le volume des grains



A2 Modèle de Coble

Le modèle de Coble ne diffère de celui de Nabarro-Herring que par le fait que la diffusion se fait le long des joints de grains et non plus en volume et la vitesse de fluage s'écrit :

$$\dot{\varepsilon} = A \frac{\Omega}{kT} \frac{D_b \delta}{d^3} \sigma$$

avec

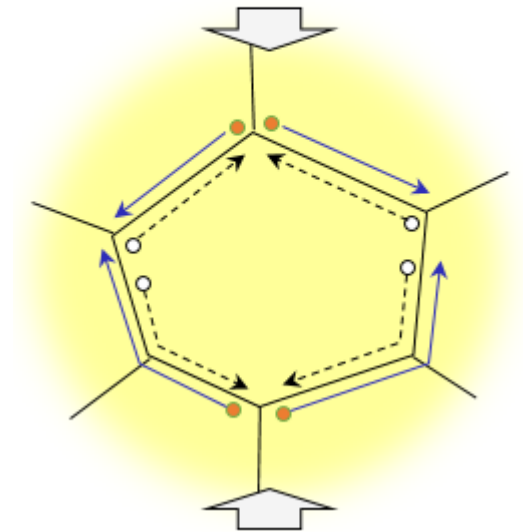
A = constante entre 40 et 50

D_b = coefficient de diffusion aux joints de grains

δ = épaisseur du joint de grains.

$$\sigma = 1 \text{ et } p = 3$$

Diffusion aux
joints de grains

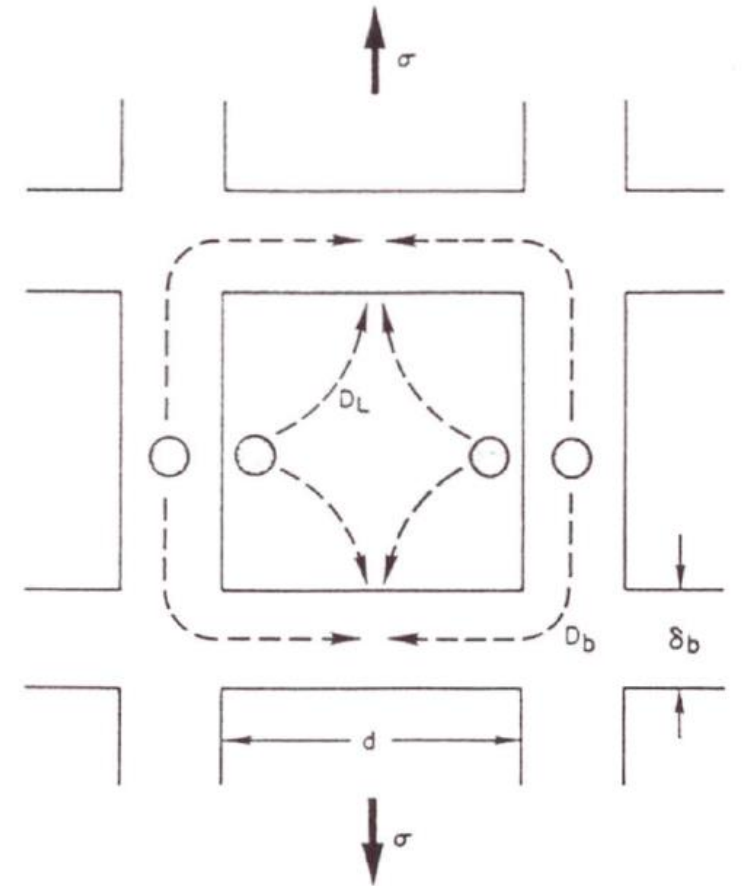


Le fluage de Coble est favorisé par rapport à celui de Nabarro-Herring lorsque les grains sont petits (d^3 au lieu de d^2)

Lorsque les 2 mécanismes de diffusion en volume et aux joints de grains agissent en parallèle, on peut écrire:

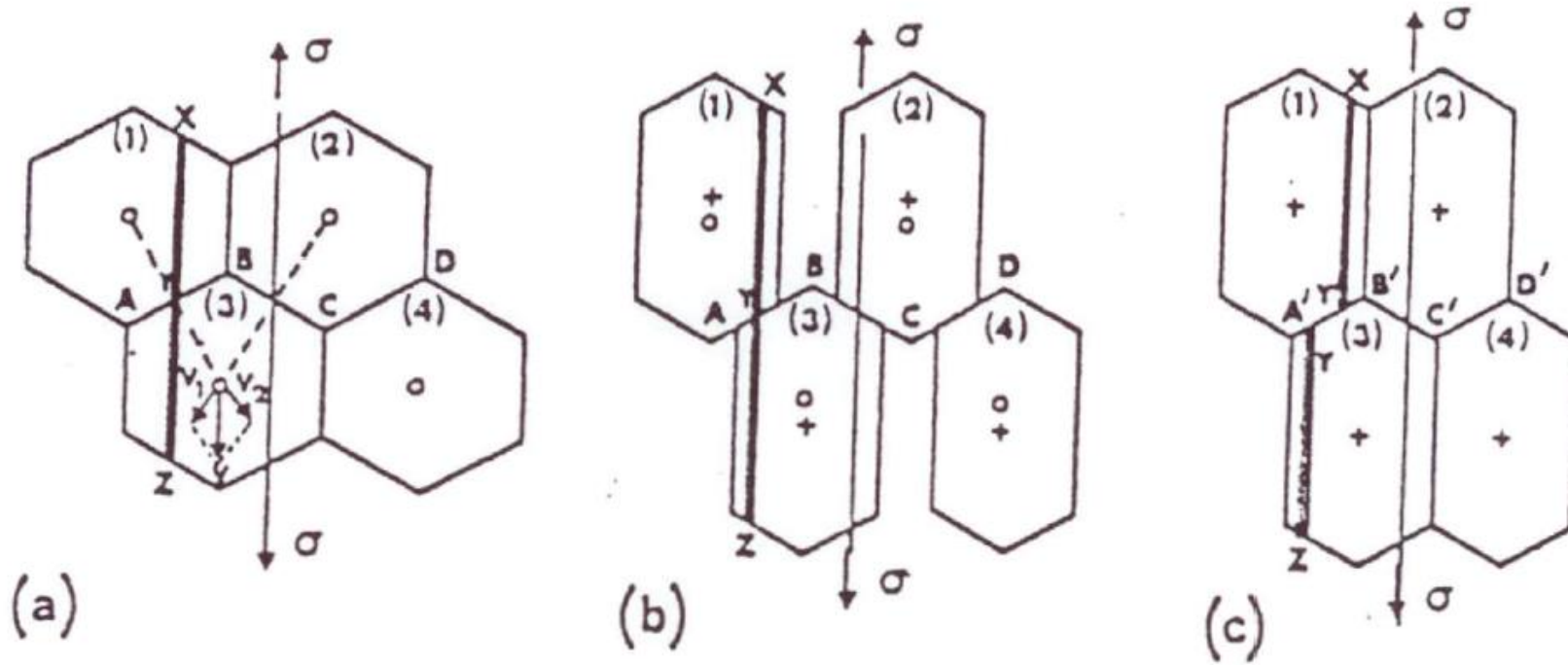
$$\dot{\varepsilon} = A\sigma \frac{\Omega}{kT} \frac{D_V}{d^2} \left[1 + \frac{\pi\delta}{d} \frac{D_b}{D_V} \right]$$

avec $A = 14$



En général, le fluage de type Nabarro-Herring est observé à haute température et le fluage de type Coble pour des températures plus basses.

A3 Couplage des fluages diffusion avec glissement aux joints de grains (Ashby-Verrall)



(a) Etat initial de quatre grains hexagonaux. La ligne repère XYZ est parallèle à σ .

(b) Elongation des grains par fluage-diffusion sans glissement. La ligne repère XYZ est inchangée.

(c) Nécessité d'un glissement aux joints pour maintenir la cohésion des grains. La ligne se divise en deux segments XY et YZ décalés au niveau du joint (d'après Langdon).

Mécanismes de joints de grains

B. Glissement de Rachinger

Ce glissement maintient la forme initiale des grains par un échange de voisins et a été observé pour des joints de grains exempts de phase vitreuse ou avec phase vitreuse.

RACHINGER a montré que la déformation axiale était le résultat conjugué

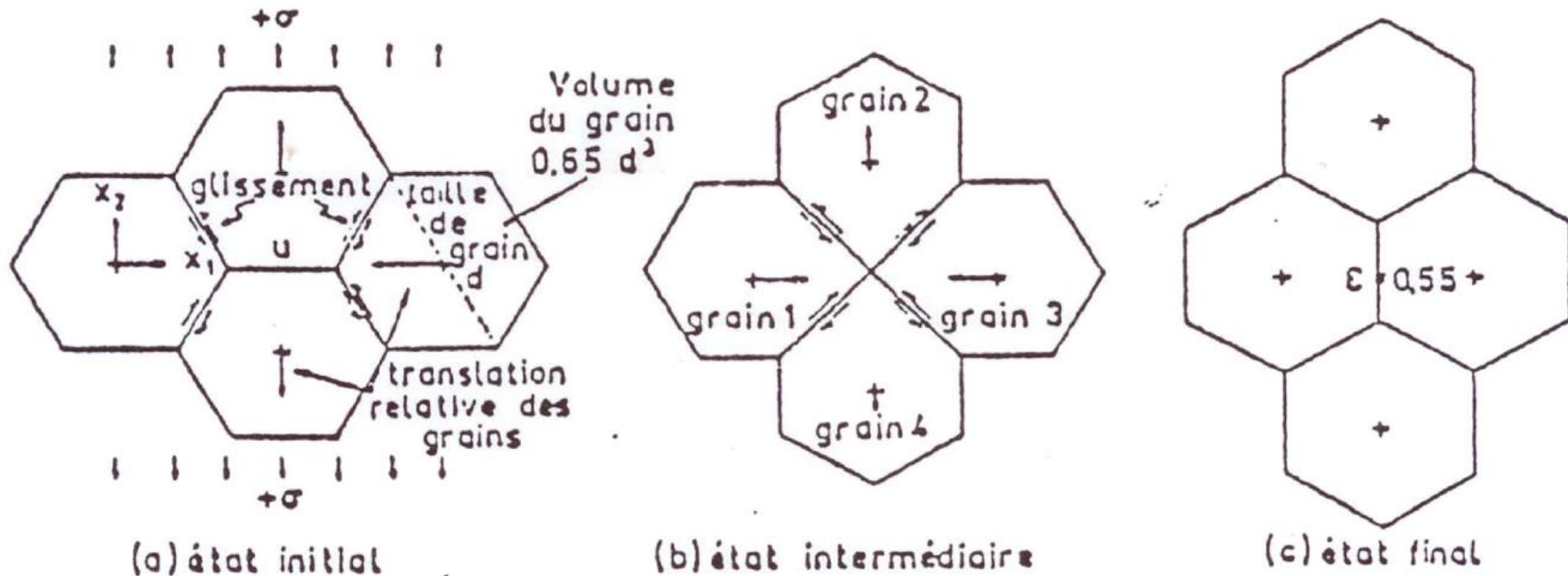
- de l'élongation des grains (mécanisme de compatibilité de la déformation).

- et du mouvement relatif de ces mêmes grains (mécanisme d'intercalation de grains).

Il résulte que les grains changent de voisins au cours de la déformation et que leur nombre moyen augmente dans la direction de traction de l'éprouvette.

Mécanismes de joints de grains

B. Glissement de Rachinger (Modèle de Gifkins)

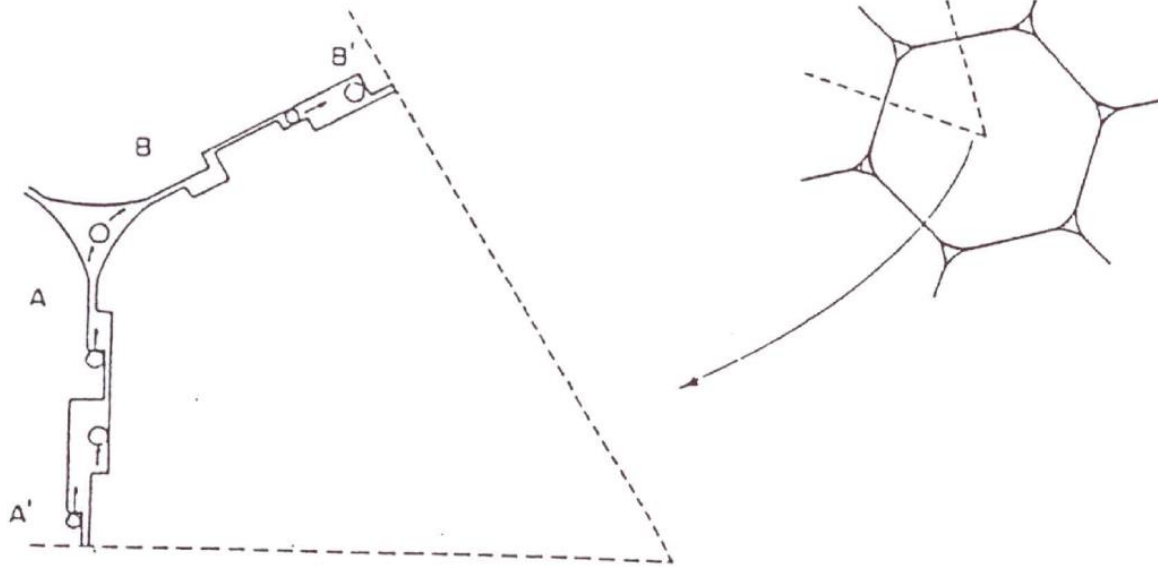


La déformation finale du groupe de quatre grains vaut 55 % mais la forme des grains reste inchangée.

Mécanismes de joints de grains

C. Contrôle par réaction d'interface

Modèle de Raj et Chyung: fluage est contrôlé par un processus de dissolution-diffusion-précipitation dans une phase vitreuse aux joints de grains



2 étapes:

- Transport de matière à l'interface cristal/ phase vitreuse
- Diffusion de matière au sein de la phase vitreuse

Le fluage est contrôlé par l'étape la plus lente

Le fluage est alors contrôlé par l'étape la plus lente :

- ♦ soit la réaction dissolution-précipitation.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1 = \frac{v}{d} = \frac{\sigma \Omega K'}{2(1-x)kTd}$$

avec K' la vitesse d'échange d'atomes entre le cristal et le verre.

x la fraction de surface occupée par la phase vitreuse au joint de grains.

- ♦ soit la diffusion à travers la phase vitreuse.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_2 = \frac{3.7 \sigma \Omega c \alpha}{(1-x) \eta d^3}$$

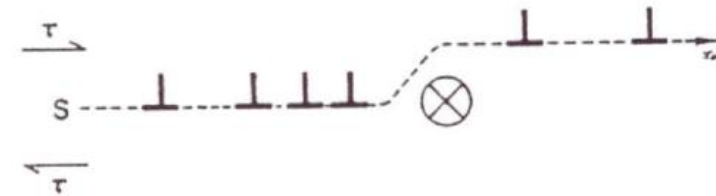
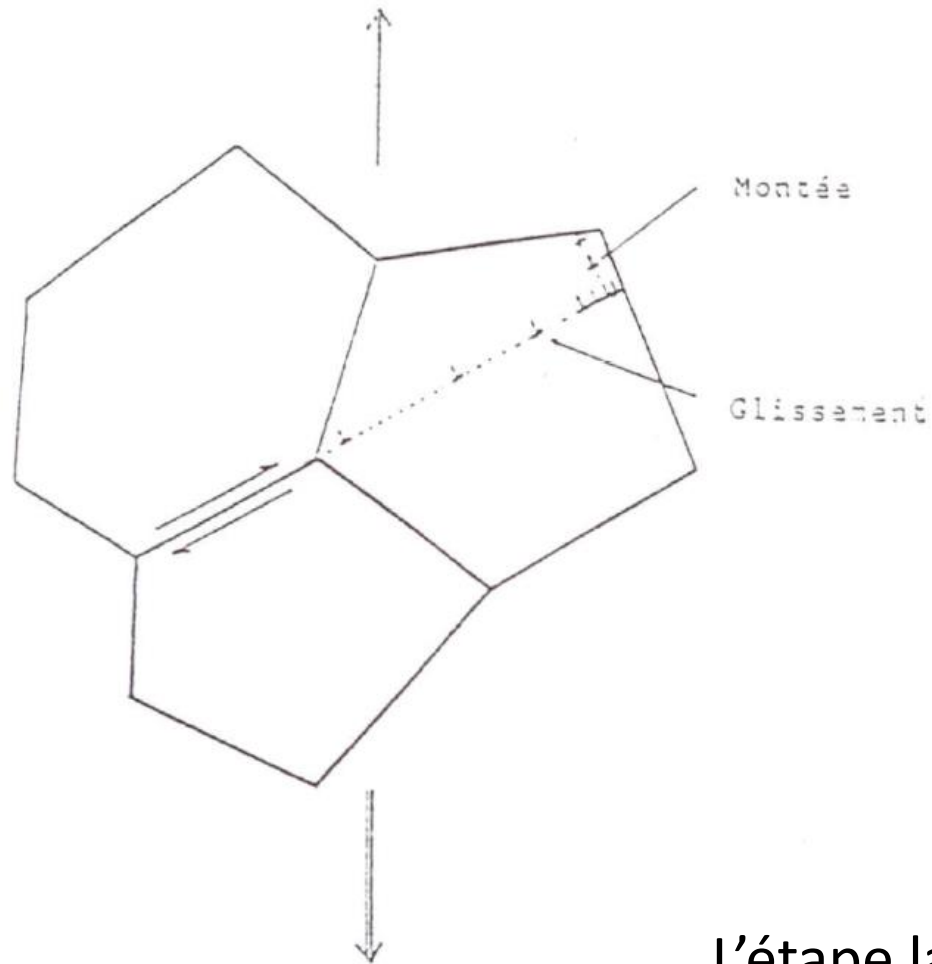
avec $\alpha \sim 1$

η = viscosité du liquide

c = concentration molaire du soluté dans la phase vitreuse.

Mécanismes de réseau

$$p = 0$$



3 étapes:

- 1) génération des dislocations au sein du cristal
- 2) diffusion - glissement des plans
- 3) empilement/montée des dislocations.

L'étape la plus lente contrôle la vitesse de fluage

**TABLEAU 2 : PARAMETRES DE FLUAGE POUR LES MECANISMES
DE RESEAU (en volume) $\rightarrow p = 0$**

Mécanisme	n	Q	Réf.
• glissement et montée de dislocations contrôlés par la montée	4.5	Q_L	Weertman (1957 - 68 - 75)
• glissement et montée de dislocations contrôlés par le glissement	3	Q_{ci}	Weertman (1957)
• montée des dislocations à partir de sources Bardeen-Herring			
- contrôlée par diffusion volumique	3	Q_L	Nabarro (1967)
- contrôlée par diffusion en court circuit le long des dislocations	5	Q_p	Nabarro (1967)
• fluage Harper-Dorn	1	Q_L	Langdon (1982) Harper-Dorn (1957)

Modèles de Weertman

$$\dot{\varepsilon} \sim \frac{D_v}{kT} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \text{ avec } G \text{ le module de cisaillement.}$$

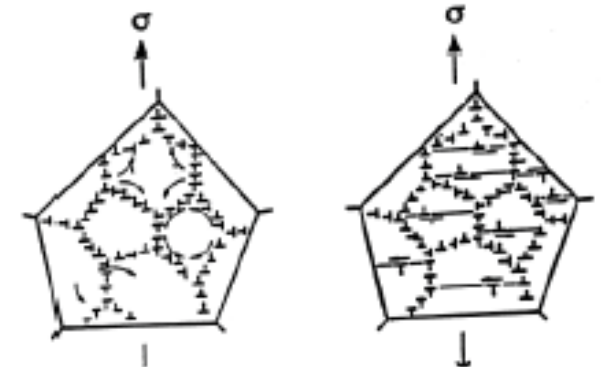


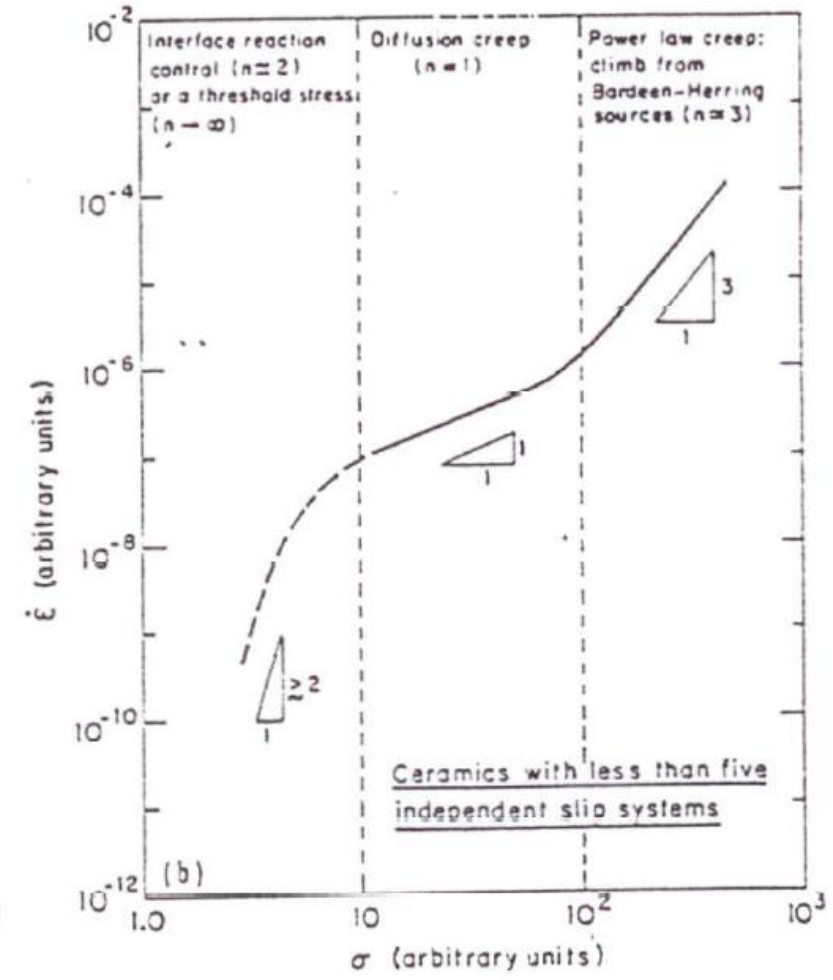
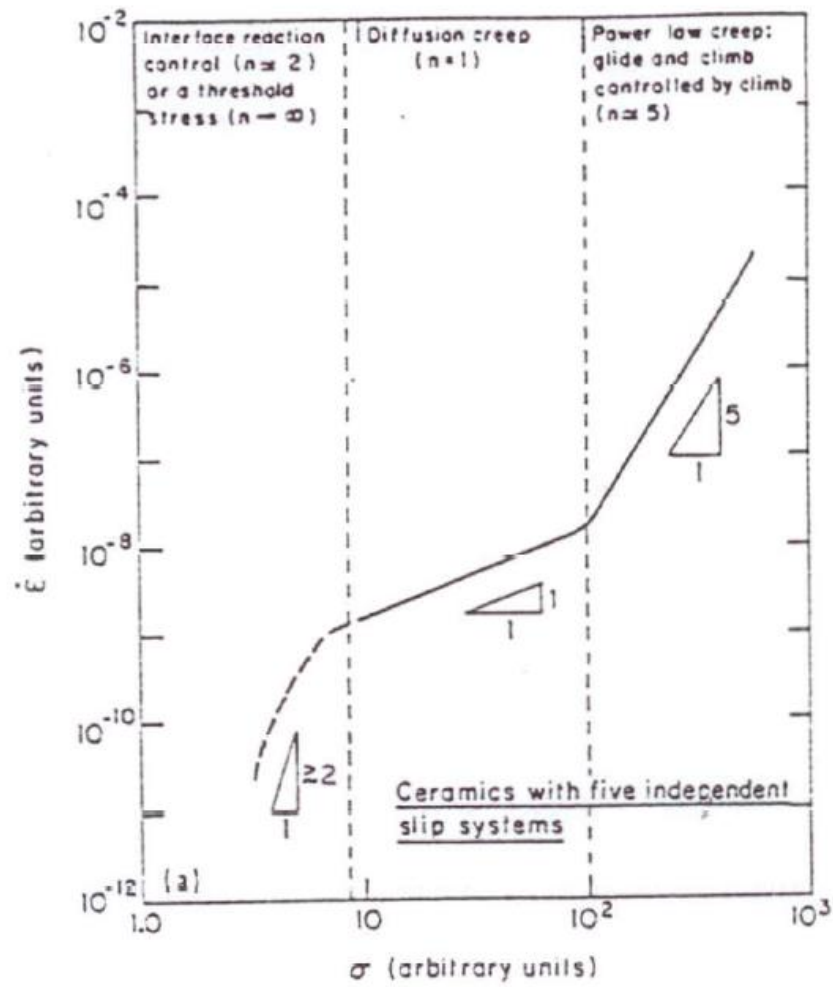
Figure II. 10 Fluage par montée et montée-glisement de dislocations [d'après Tai' 99].

Lorsque le fluage est *contrôlé par la montée de dislocations*, l'exposant de contrainte n se situe entre 4 et 5.

Lorsque le fluage est *contrôlé par le glissement de dislocations*, l'exposant de contrainte n vaut 3.

Ces mécanismes de fluage sont toujours prépondérants dans les matériaux métalliques en raison de la grande mobilité des dislocations et de leur nombre élevé.

Transitions de mécanismes de fluage



Merci pour votre attention

Questions?