

# COURS DISPONIBLE SUR INTERNET

Serveur [step.ipgpp.jussieu.fr](http://step.ipgpp.jussieu.fr)

→ TICE

→ Serveur de Cours

# I - INTRODUCTION

## II – PHENOMENES PHYSIQUES

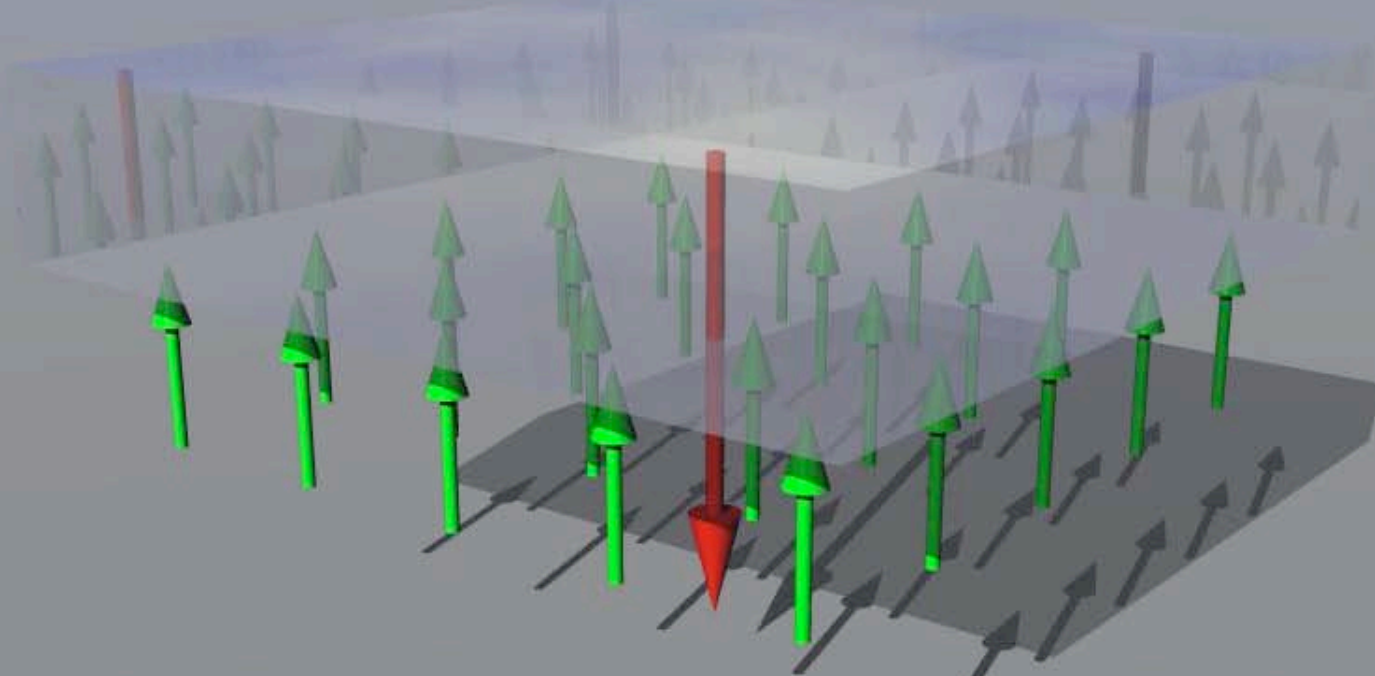
4°) Convection Thermique

5°) Déformation

6°) Fusion - Cristallisation

7°) Erosion - Sédimentation

## Un milieu continu est soumis à des forces



- exercées par l'intermédiaire des frontières  
(ex: réaction d'un support, pression): **forces de surface.**
- exercées sur la matière contenue à l'intérieur  
(ex; le poids): **forces de volume.**

# Les contraintes

La contrainte est une force divisée par une surface  
(comme la pression)

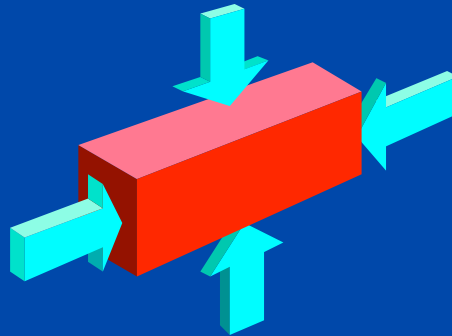
$$\sigma = \mathbf{F} / \mathbf{S} \quad (\text{en N/m}^2 = \text{Pa, ou en bar})$$

La contrainte s'exerce dans une direction  
(contrairement à la pression).

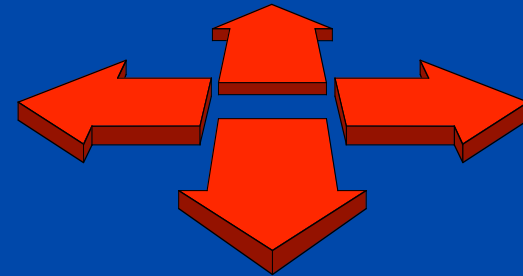
# Les contraintes

On distingue trois grands types de contraintes:

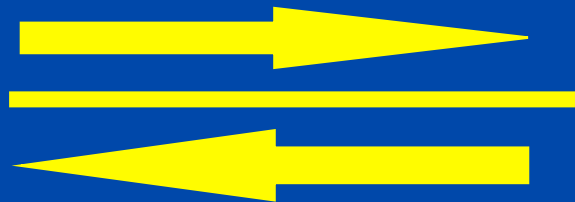
- Compression



- Extension



- Cisaillement



# La déformation

La déformation exprime le changement de dimension d'un objet sous l'action d'une force.

Elle se mesure sous forme d'un accroissement de dimension rapporté à la dimension d'origine (donc sans dimension)

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad (\text{par exemple en \%})$$

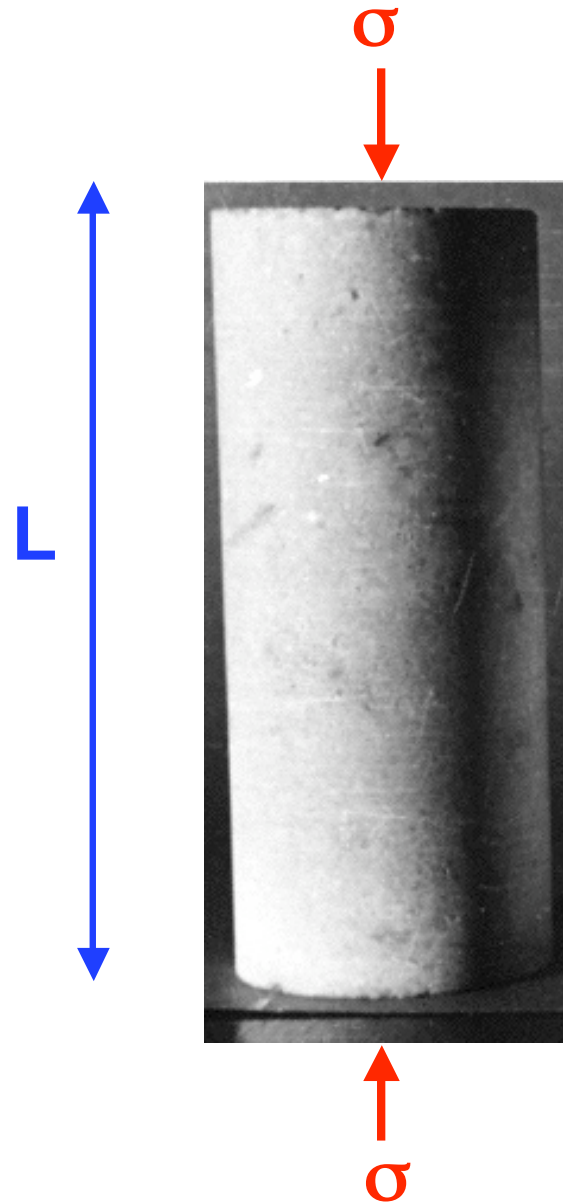
# Les modes de déformation

On distingue trois grands modes de déformation:

- **Elastique** : réversible, déformation du réseau
- **Ductile (plastique)** : permanente, glissements d'atomes sans perte de cohésion
- **Fragile (rupture)** : perte de cohésion



# Déformation

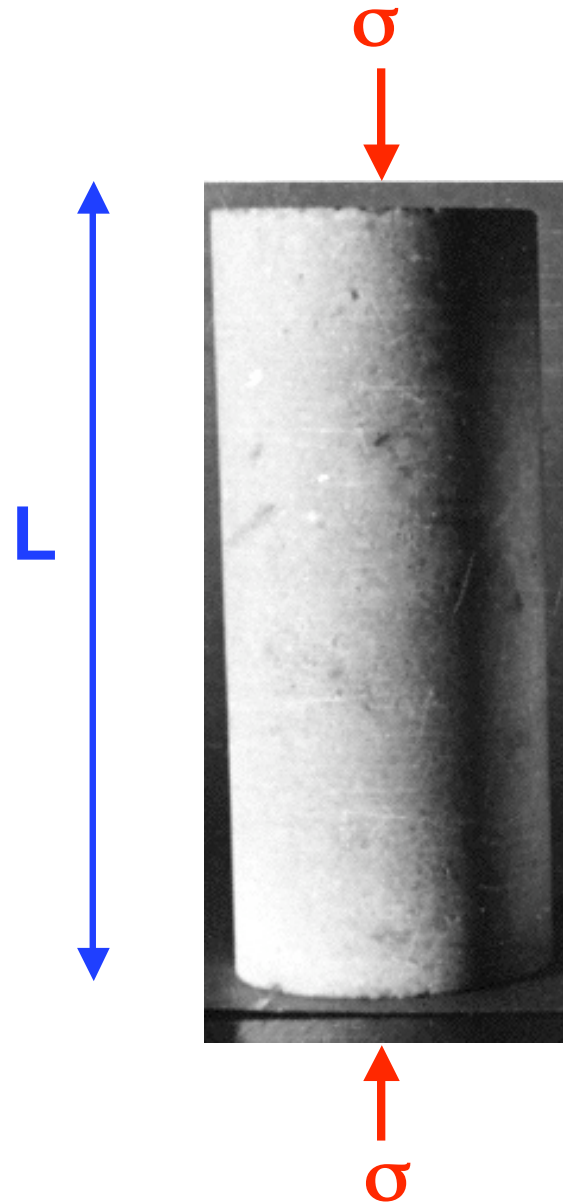


$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Relation  
entre  $\sigma$  et  $\varepsilon$

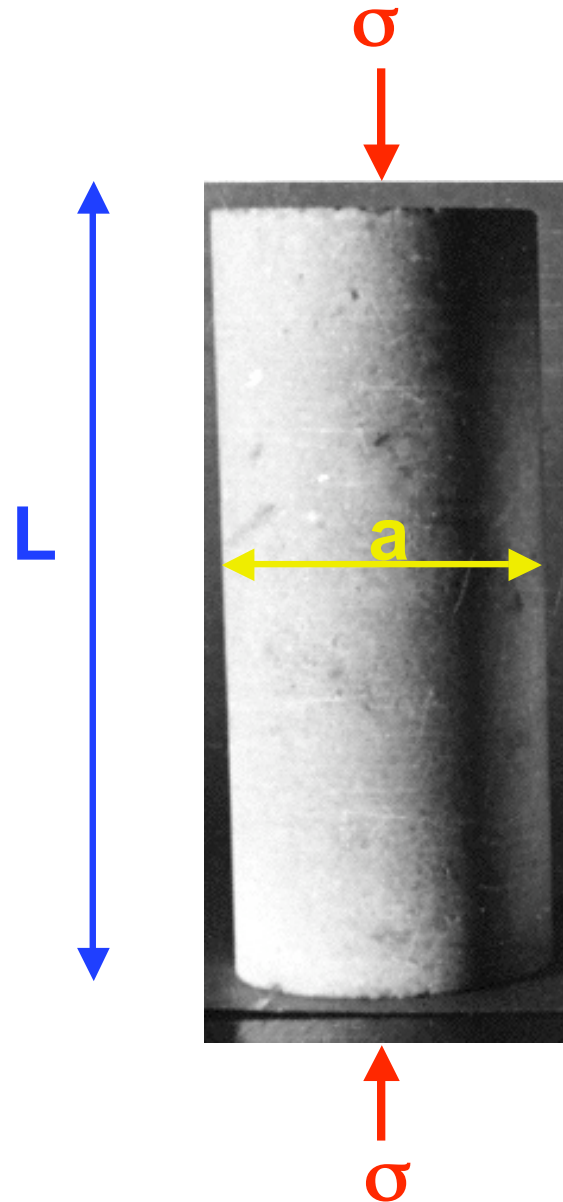


# Plusieurs déformations



$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

# Plusieurs déformations



$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}$$

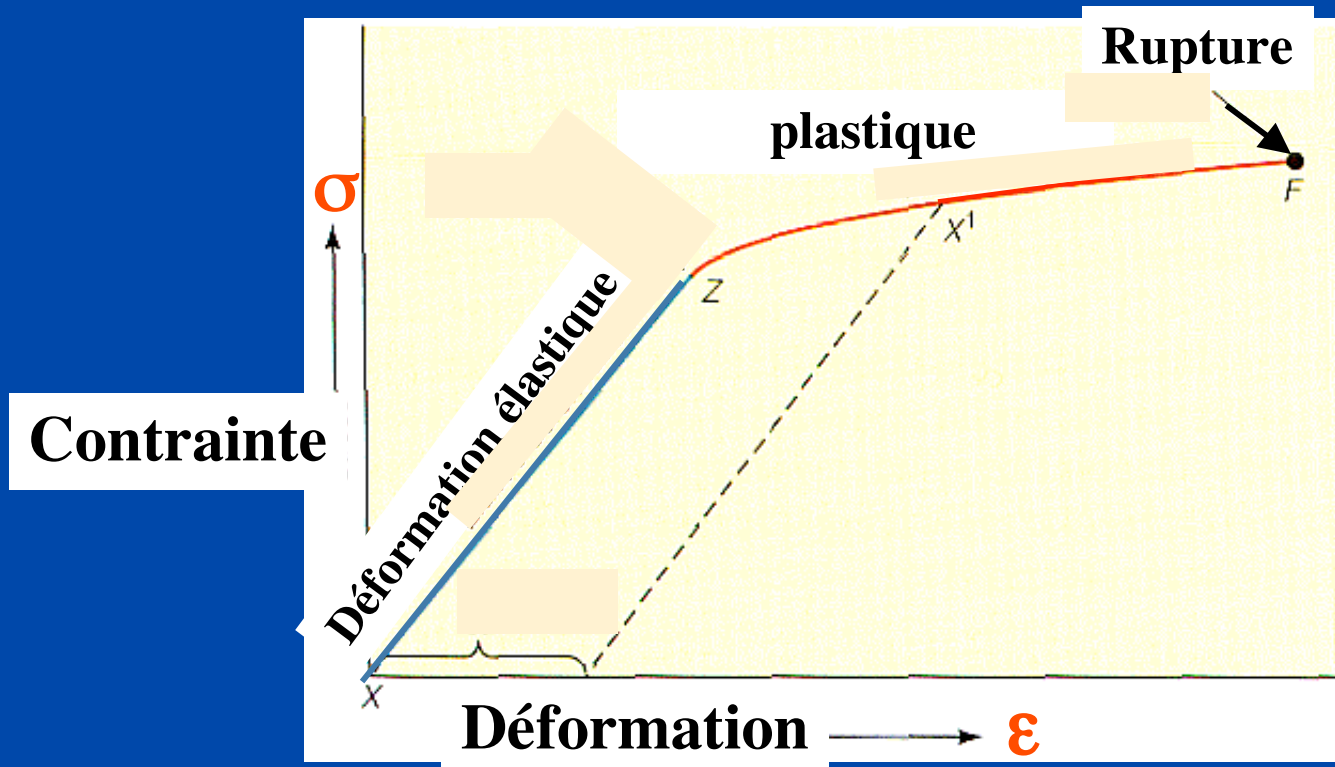
$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta a}{a}$$

## Déformations et contraintes.

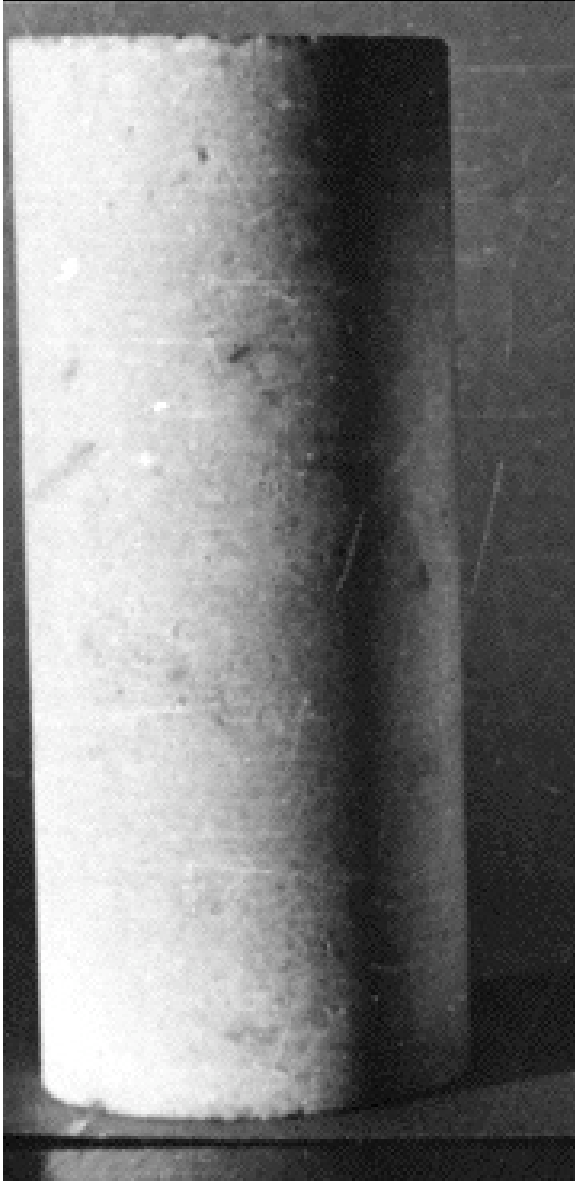
Contraintes faibles : régime élastique

Contraintes intermédiaire : régime « plastique »

Contraintes fortes : rupture



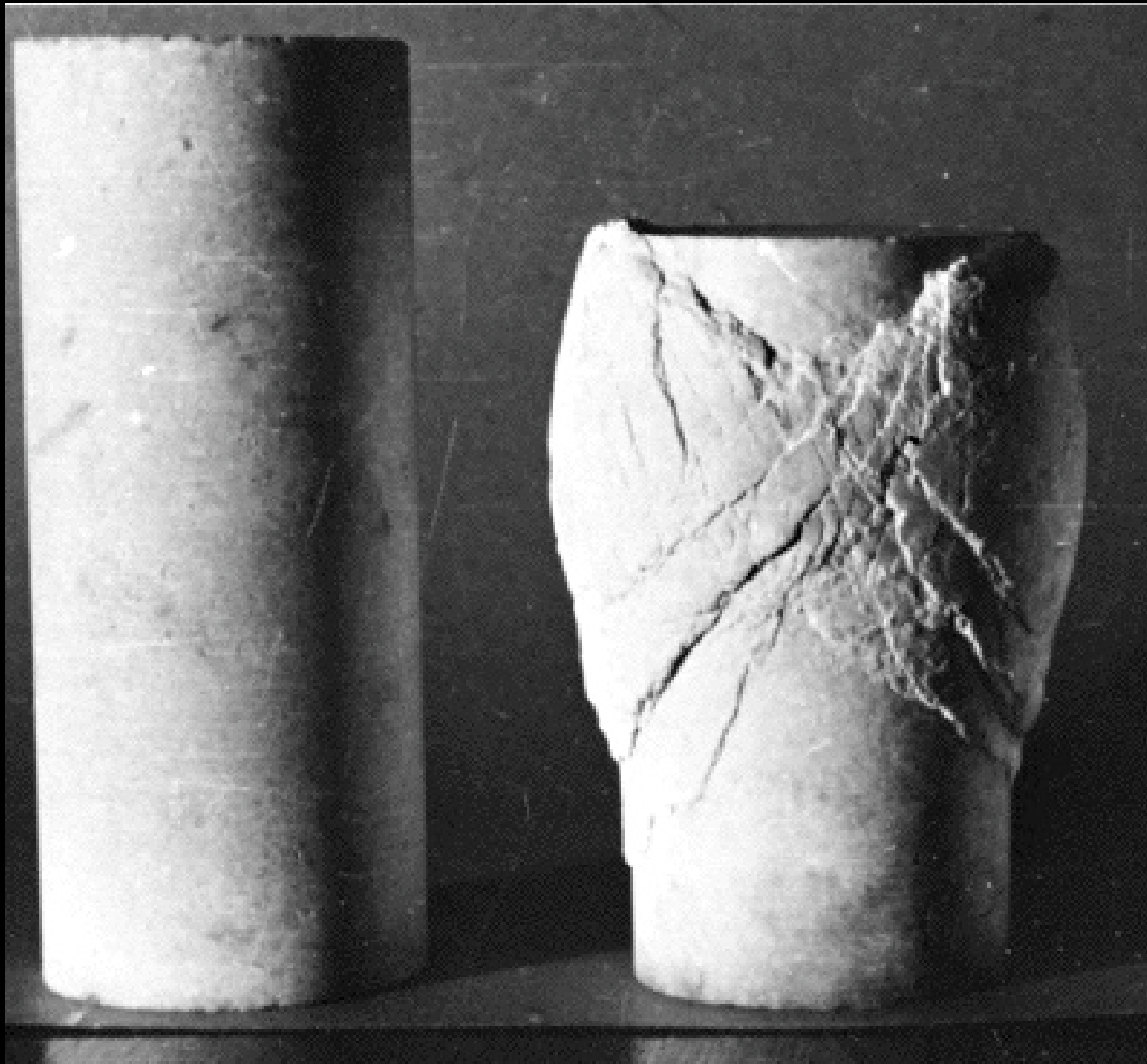
# Déformation ductile



$$L - \Delta L$$



## Déformation fragile (rupture)



# Déformation cassante (fragile)

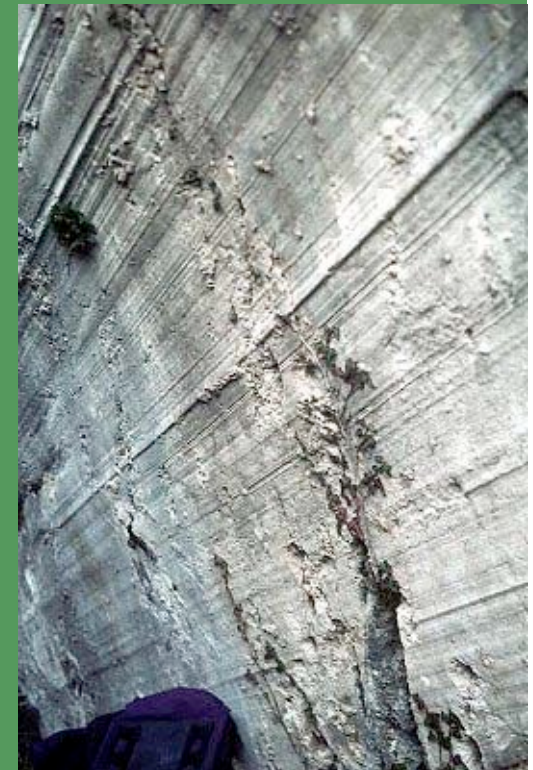
Faille sismique



Faille inverse décalant un filon



Stries sur miroir de faille



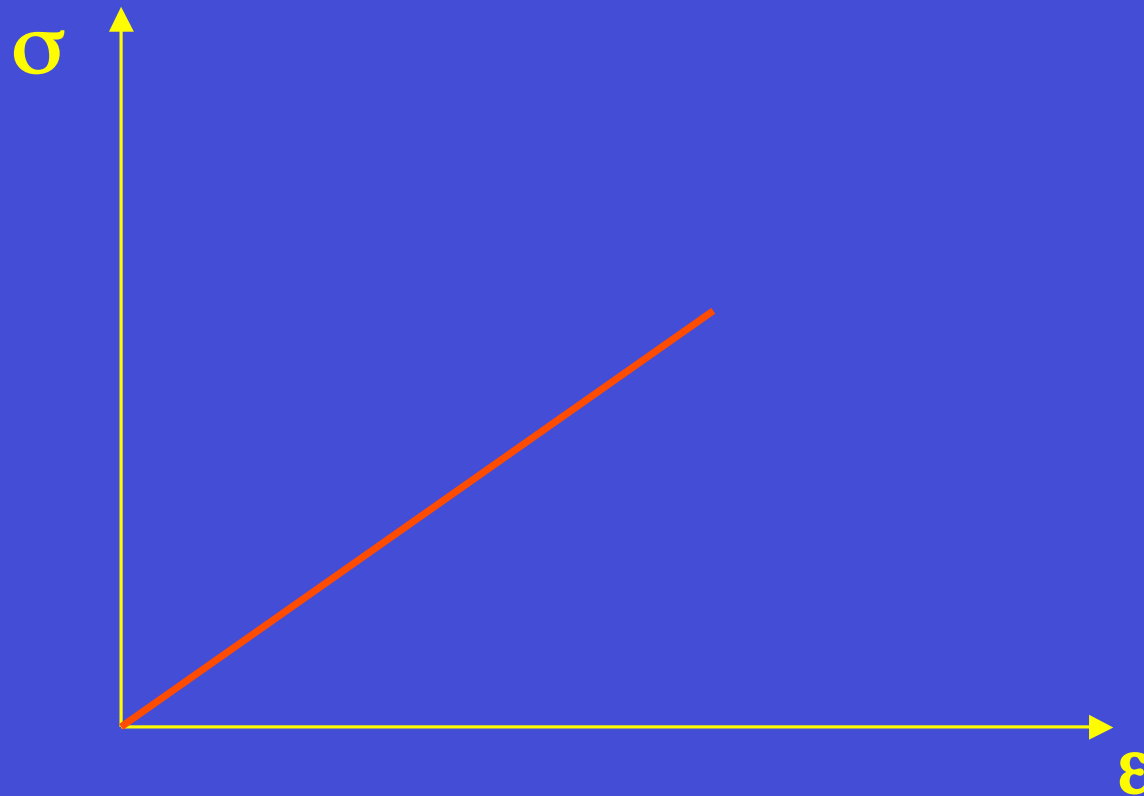
# Facteurs affectant la déformation

- Température
- Pression
- Vitesse de déformation
- Type de roche



# Régime élastique

(comme un ressort)



$\varepsilon$  proportionnelle à  $\sigma$ :  
 $\sigma = \lambda \varepsilon$ ,  $\lambda$  module "élastique"



$$\sigma = \lambda \varepsilon, \quad \lambda \text{ module "élastique"}$$

Unités :

$$\sigma = \text{contrainte} = \text{Pa (N/m}^2\text{)}$$

$$\varepsilon = \text{déformation} = \text{sans dimension}$$

$$\lambda = \text{module} = \text{Pa (N/m}^2\text{)}$$

Pour les roches

$$\lambda \approx 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\text{Contraintes} \approx 10^7 - 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{donc } \varepsilon \approx 10^{-2} - 10^{-3} : \text{TRES FAIBLE}$$

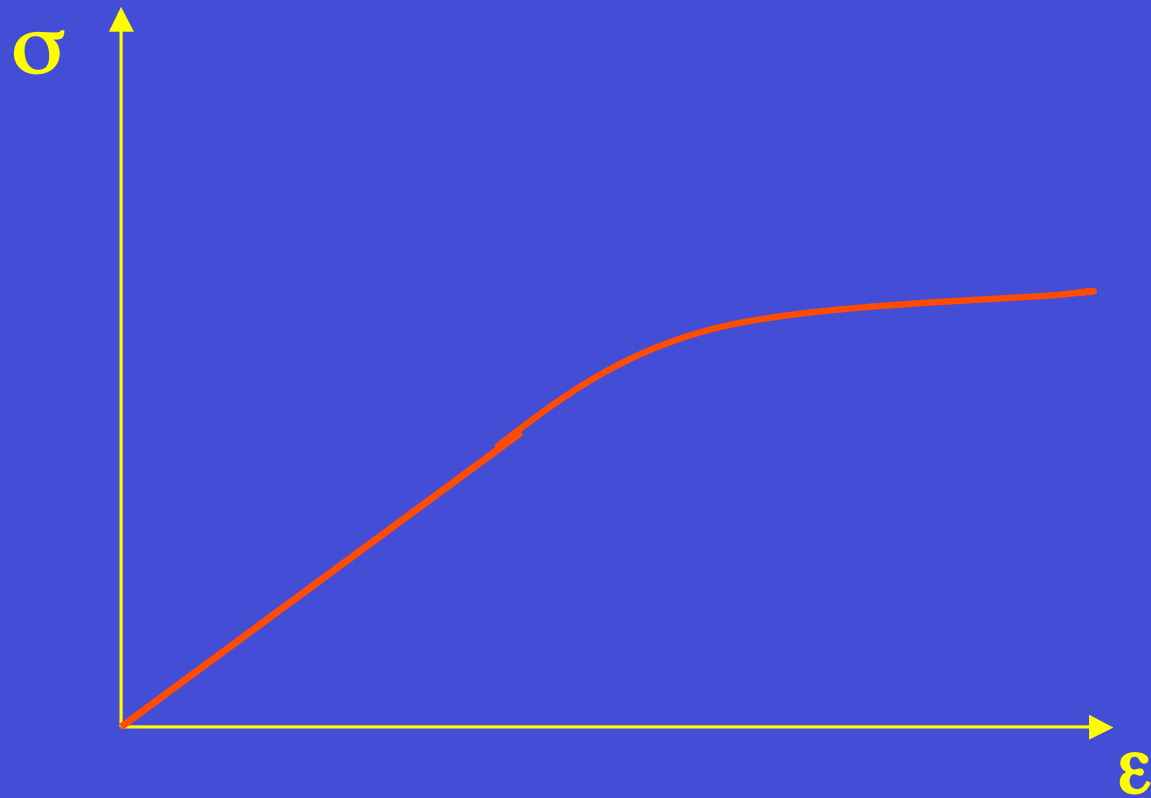
$\varepsilon$  très faible, **MAIS**

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\varepsilon = 10^{-2}$$

pour  $L \approx 100$  km,  $\Delta L \approx 1$  km.

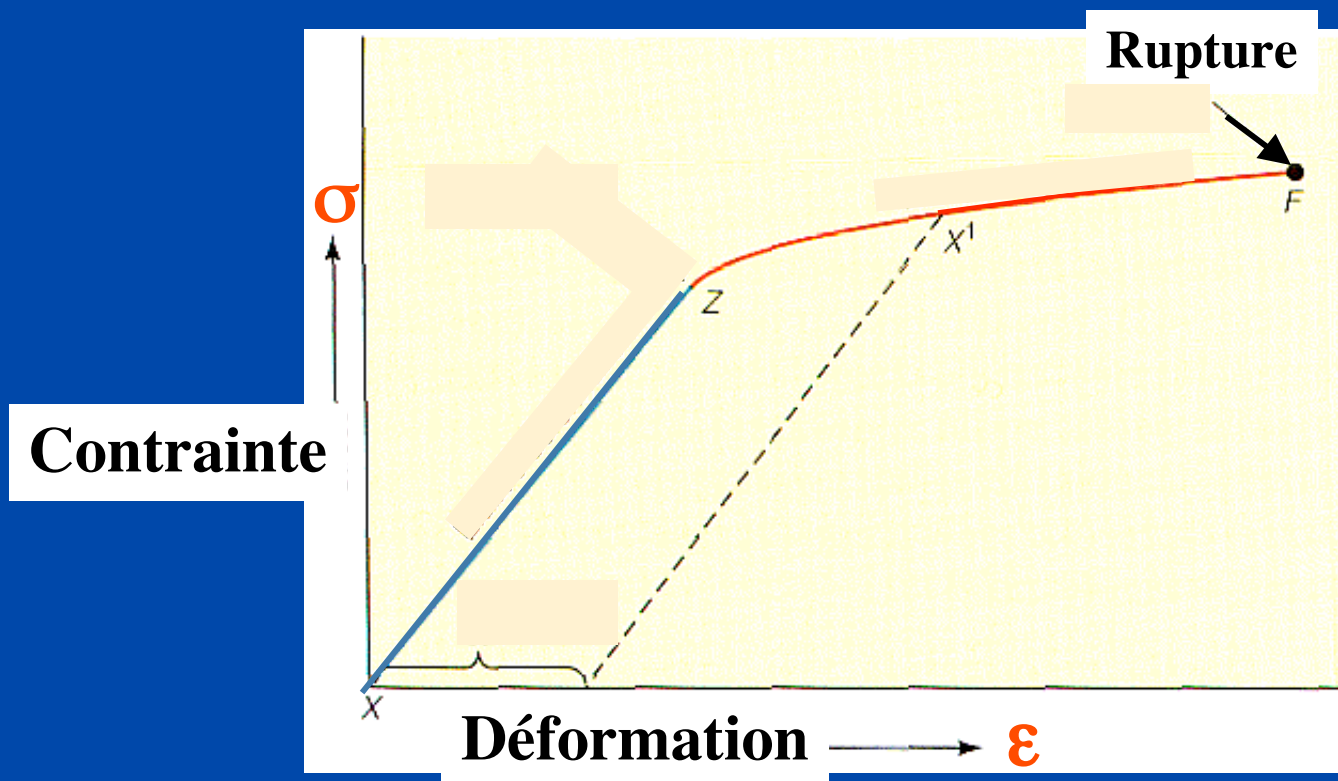
# Régime plastique



$\varepsilon$  n'est pas proportionnelle à  $\sigma$ .

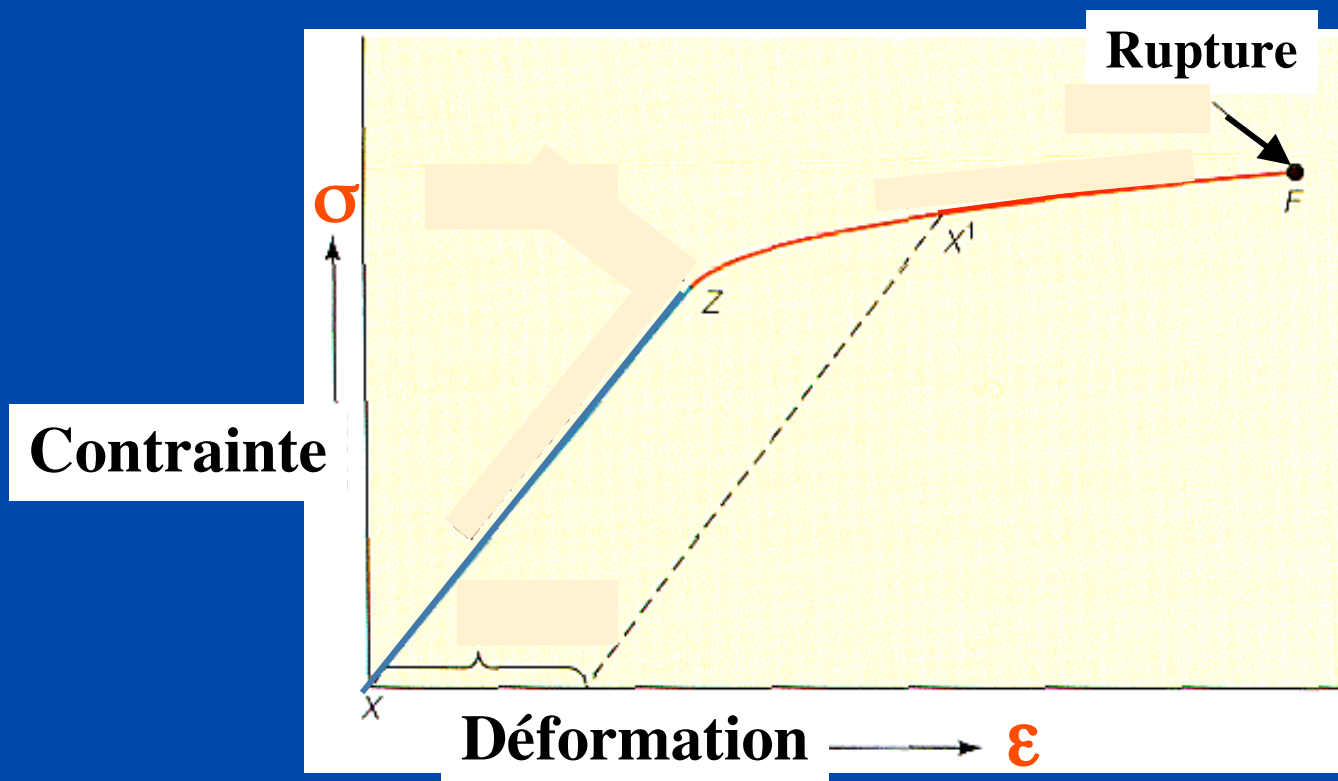
# Déformations et contraintes.

Contraintes fortes : rupture



# Déformations et contraintes.

Seuil de rupture  $\sigma_{\text{critique}} \approx 10^7 \text{ Pa}$

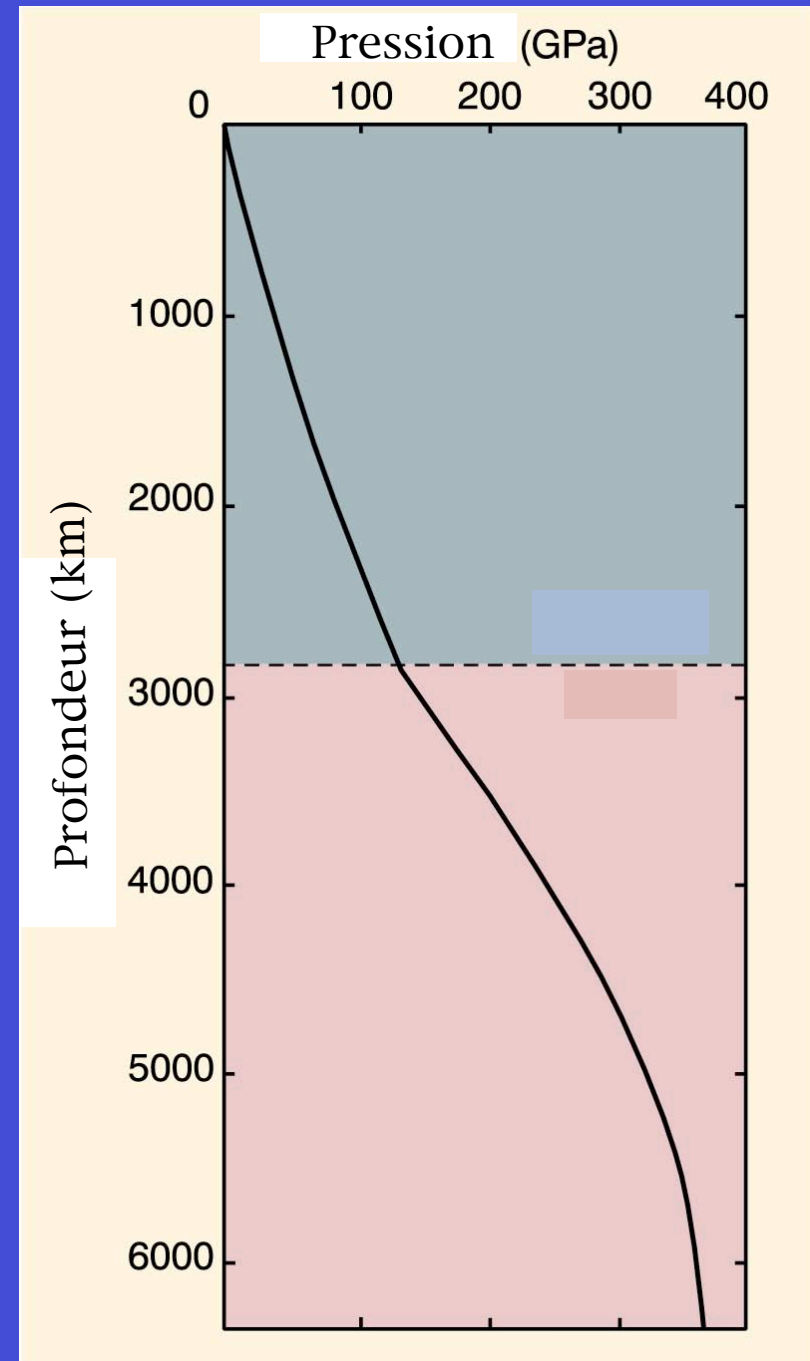


# Facteurs affectant la déformation

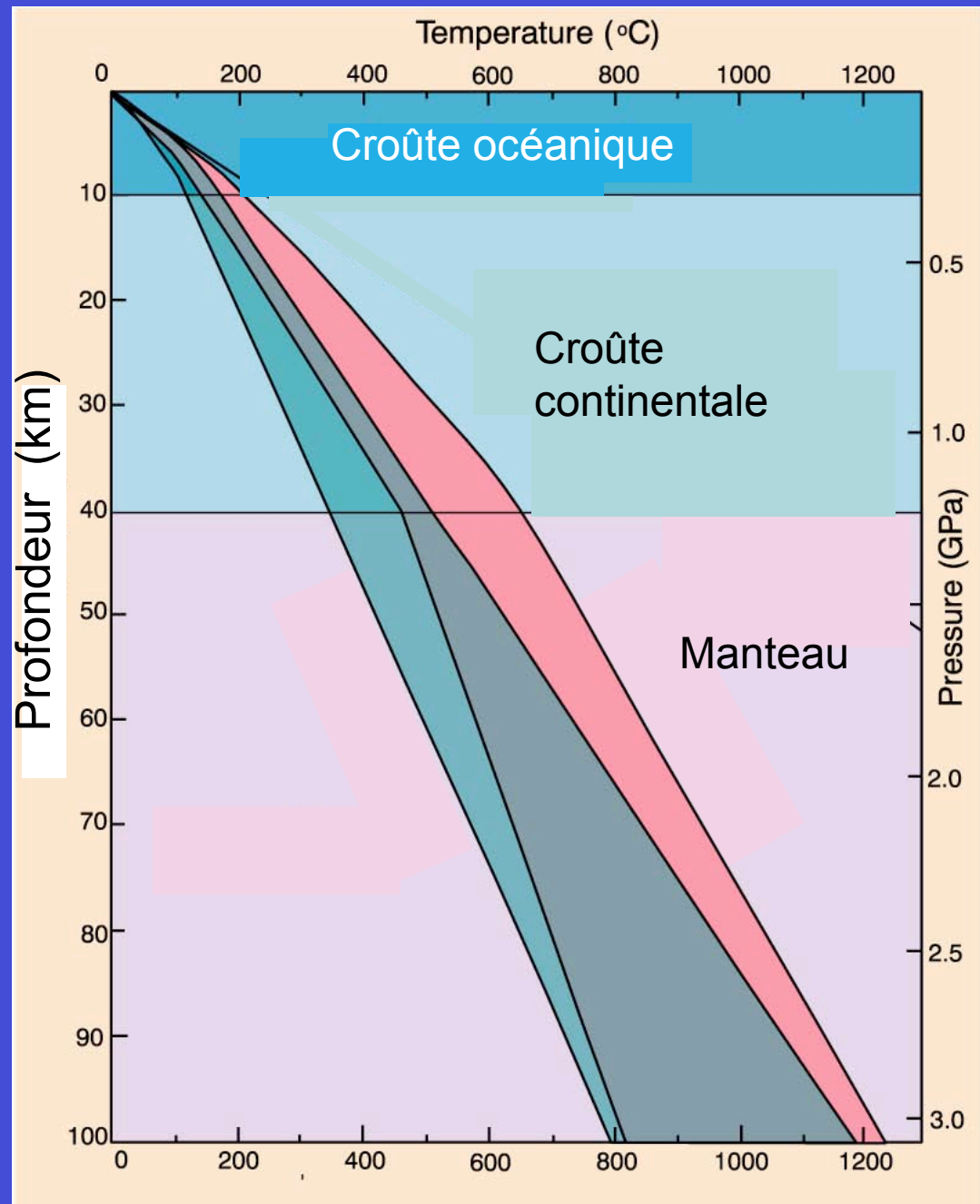
- Température
- Pression
- Vitesse de déformation
- Type de roche



# La pression

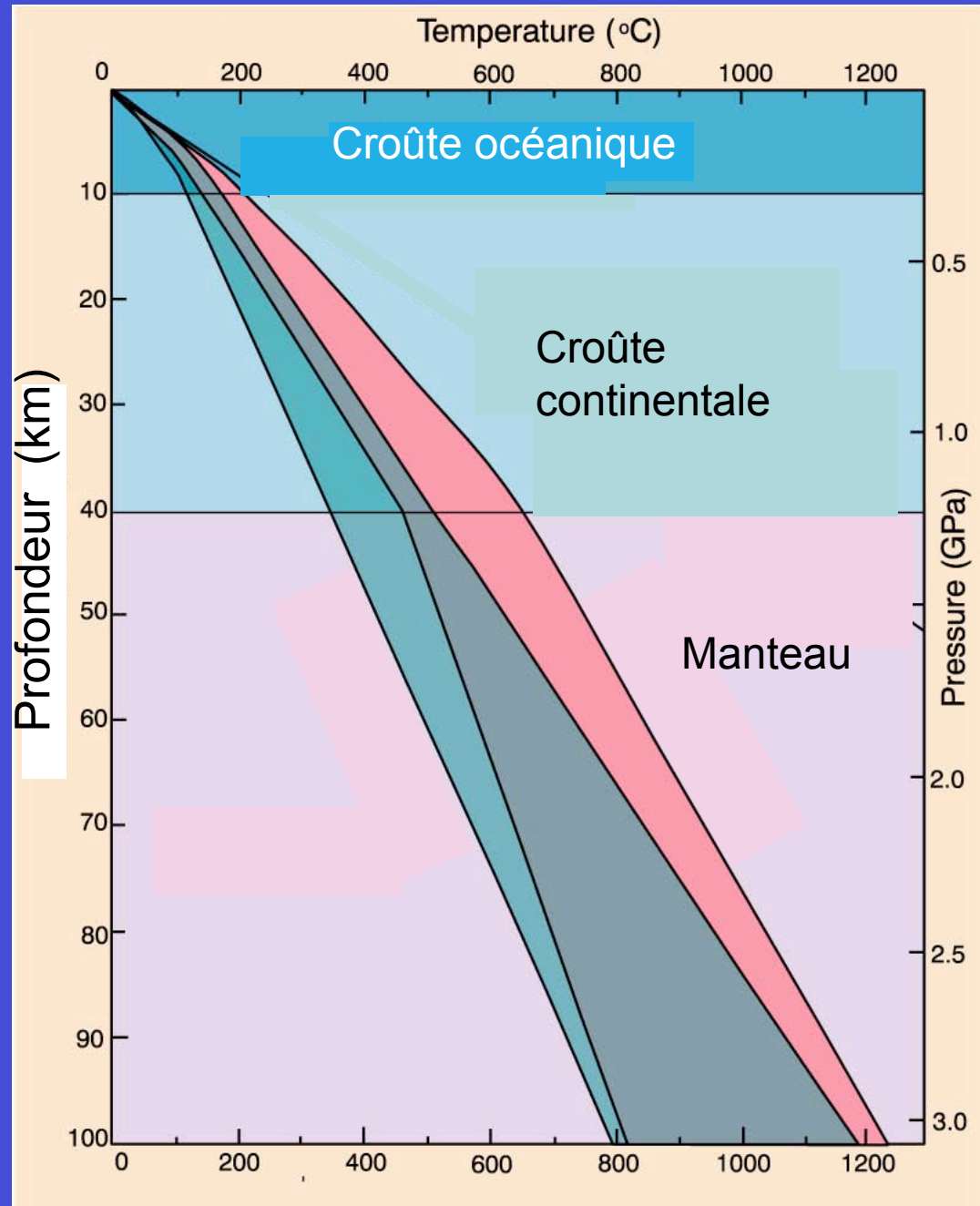


# La température





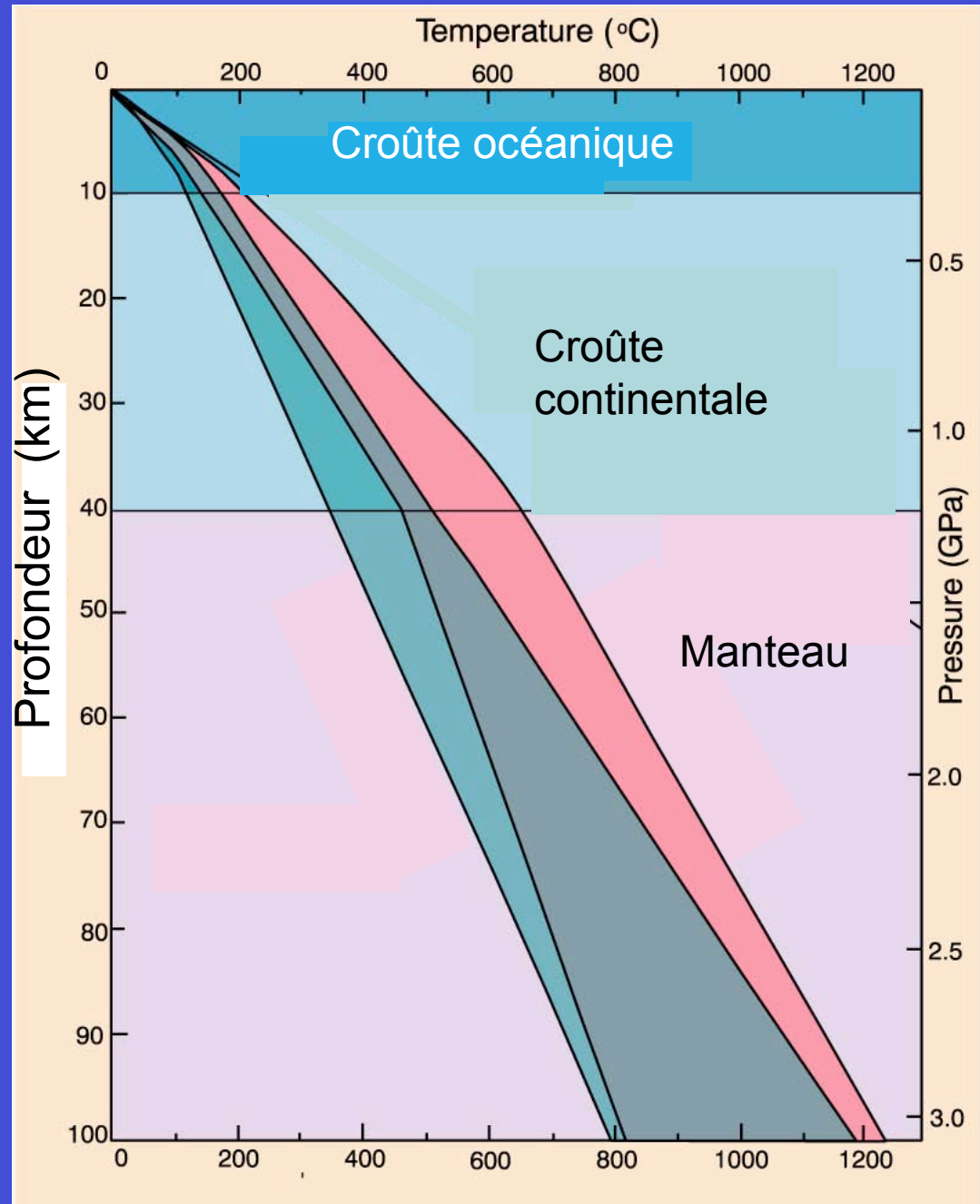
**Stratification  
thermique  
=  
stratification  
rhéologique**



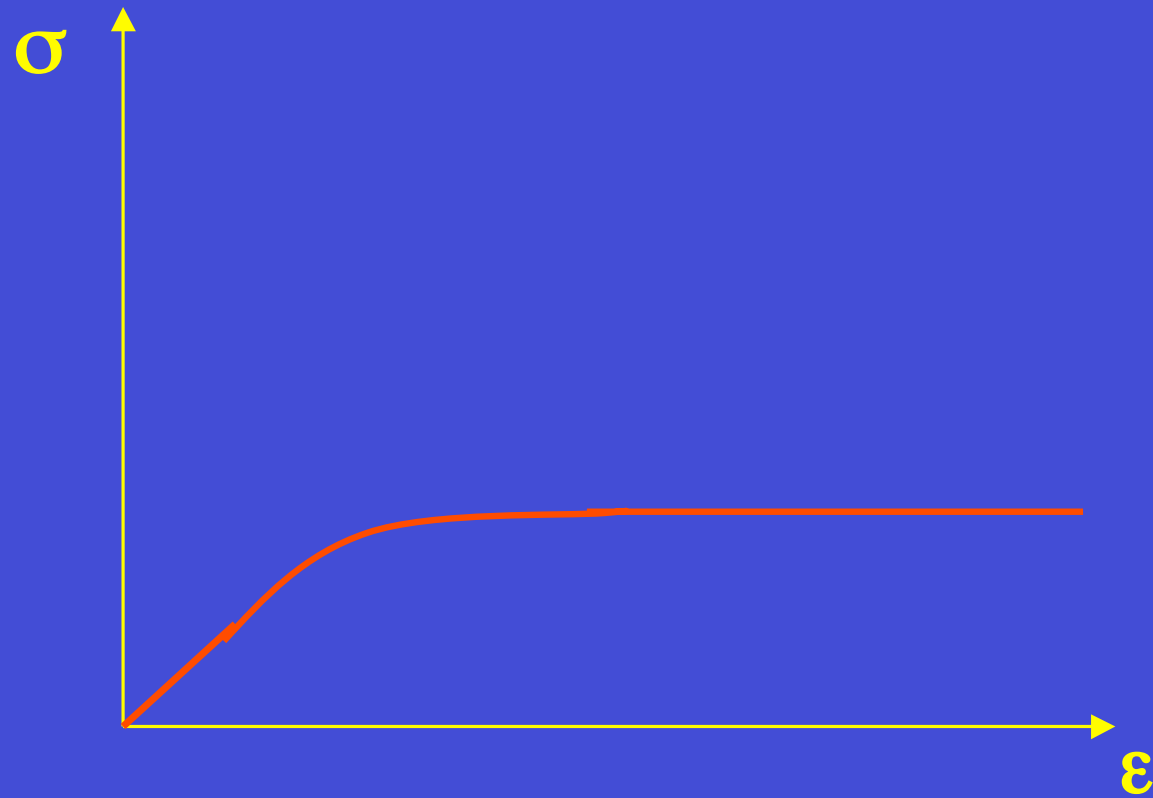
Elastique-cassant

Plastique-ductile

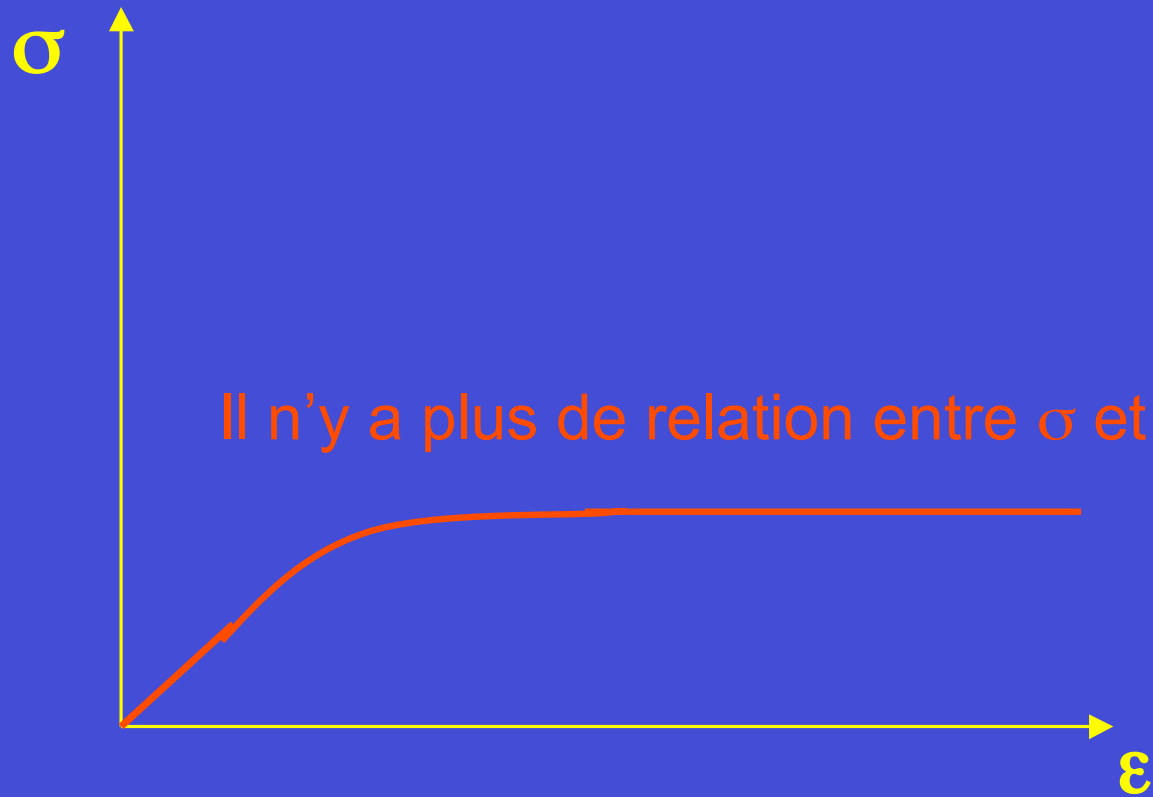
Fluage



# A haute température : fluage



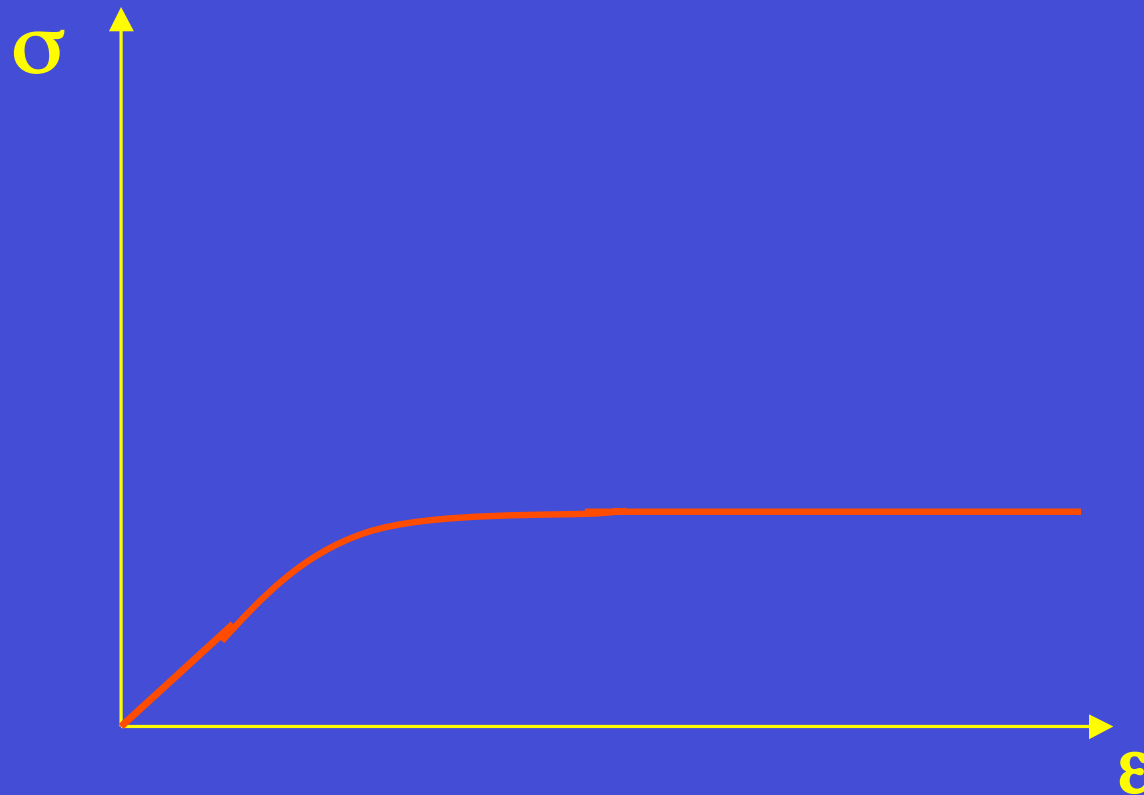
# A haute température : fluage



Il n'y a plus de relation entre  $\sigma$  et  $\varepsilon$ .

Relation entre  $\sigma$  et  $d\varepsilon/dt$ .

# A haute température : fluage



Relation entre  $\sigma$  et  $d\varepsilon/dt$ .

Régime visqueux:

$$\sigma = \mu \, d\varepsilon/dt, \quad \mu \text{ est la viscosité}$$

# Fluage visqueux

$$\sigma = \mu \, d\varepsilon/dt .$$

Unités:

$\sigma$  : Pa

$d\varepsilon/dt$  : s<sup>-1</sup>

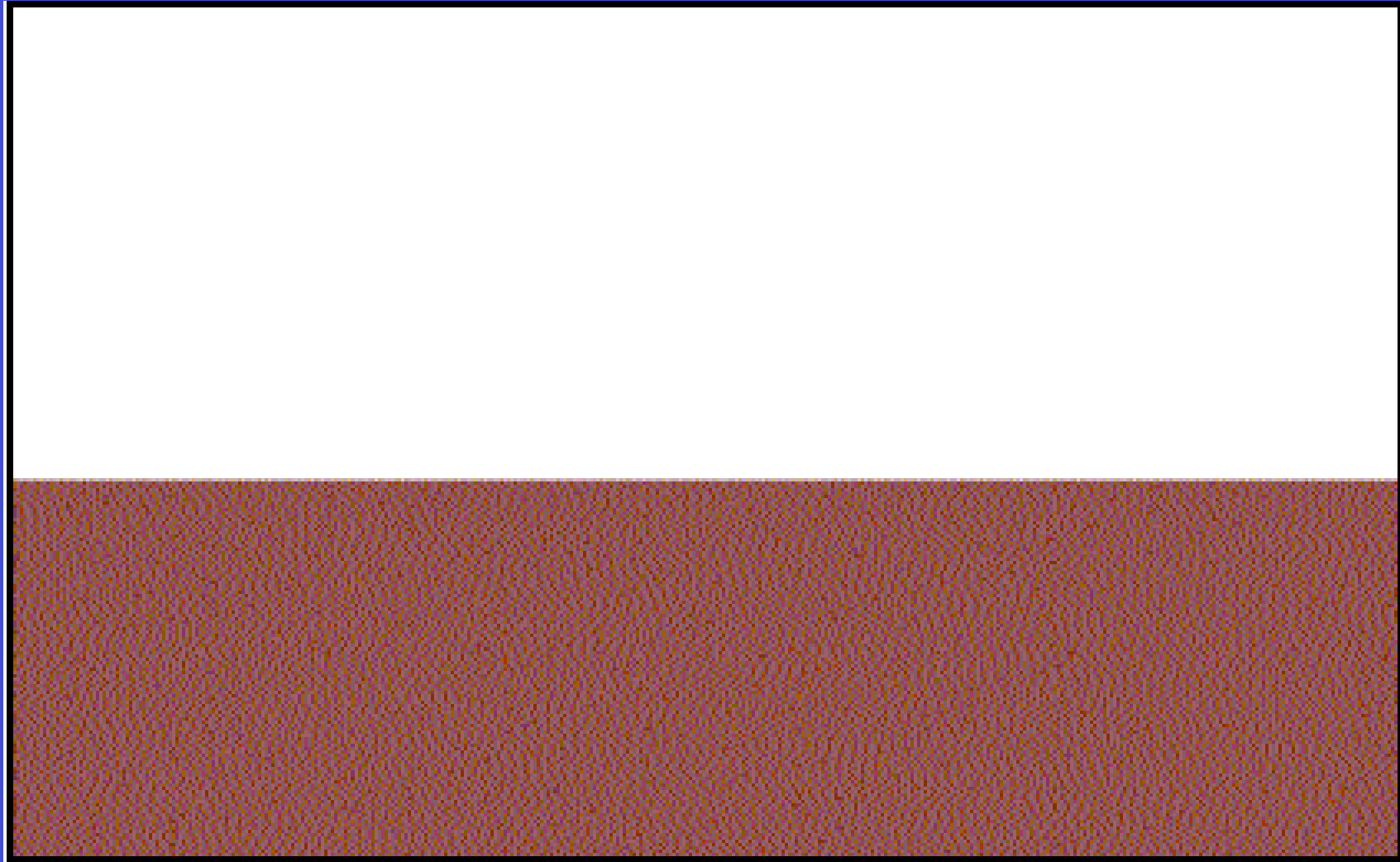
donc  $\mu$  : Pa s.

Pour le manteau terrestre:

$\mu \approx 10^{21}$  Pa s

(huile de cuisine  $\approx 10^{-1}$  Pa s)

# Rebond post-glaciaire





Différence de pression  $\approx \rho g h$   
 $\approx \sigma$  (contrainte)



## Rebond post-glaciaire

$$\sigma \approx \rho g h$$

$$h \approx 100 \text{ m}, \rho \approx 3 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\sigma \approx 2 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$d\varepsilon/dt \approx \sigma/\mu = 2 \times 10^6/10^{21} = 2 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$$

$$\varepsilon = \Delta L/L$$

$$L \approx 1000 \text{ km} = 10^6 \text{ m}$$

$$d(\Delta L)/dt = dL/dt = \text{vitesse} \approx 2 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$$

$$\approx 6 \text{ cm/an}$$

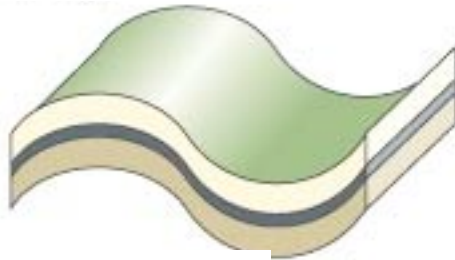
(vitesse initiale)

# Forces tectoniques et déformations résultantes

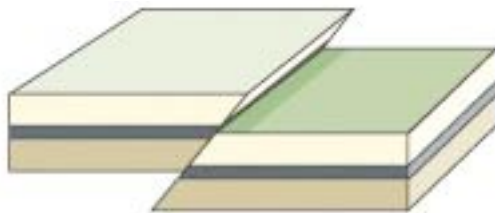
**FORCES  
COMPRESSIVES**



**Plissement**



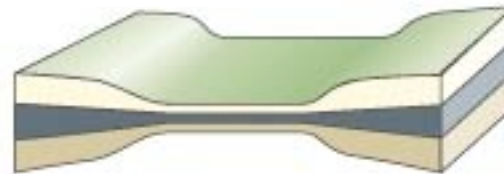
**Faïlle inverse**



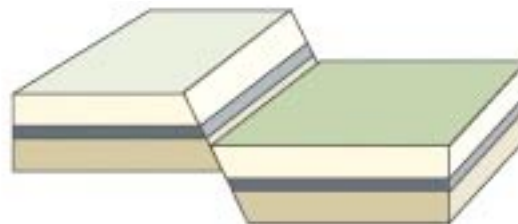
**FORCES  
EXTENSIVES**



**Etirement et  
amincissement**



**Faïlle normale**



**FORCES DE  
CISAILLEMENT**



**Cisaillement**



**Faïlle de cisaillement  
(décrochement)**

