

La déformation des objets géologiques

Laurie BOUGEOIS

ST3 - Polytech' Paris UPMC

5 décembre 2014



1. Introduction

2. Description de la déformation et définitions

3. Contraintes et rhéologie

4. Loi de comportement lithosphérique

Observations

- ▶ La déformation des objets géologiques est visible à toutes les échelles :

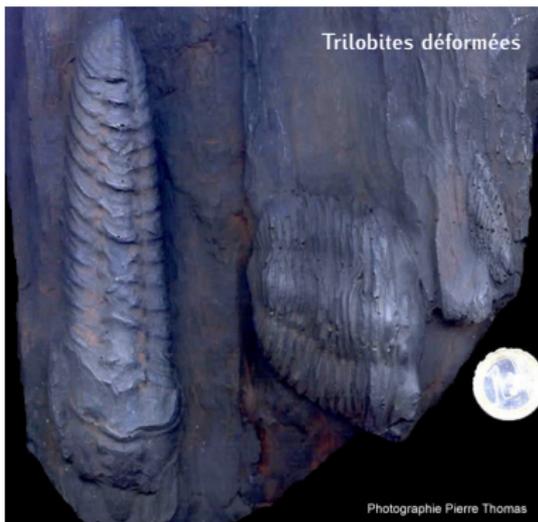
↪ affleurement



Observations

- ▶ La déformation des objets géologiques est visible à toutes les échelles :

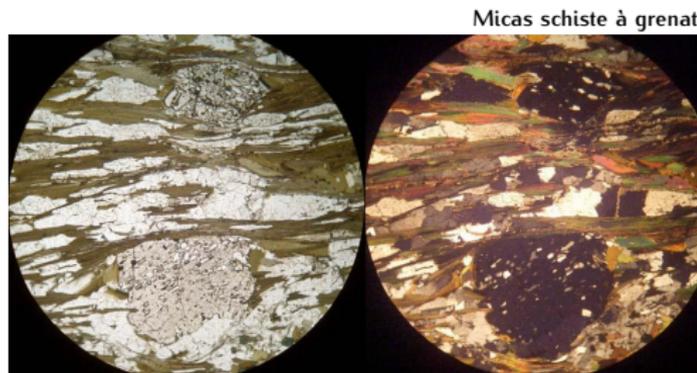
- ↪ affleurement
- ↪ roche



Observations

- ▶ La déformation des objets géologiques est visible à toutes les échelles :

- ↪ affleurement
- ↪ roche
- ↪ lame mince



Rhéologie

Définition

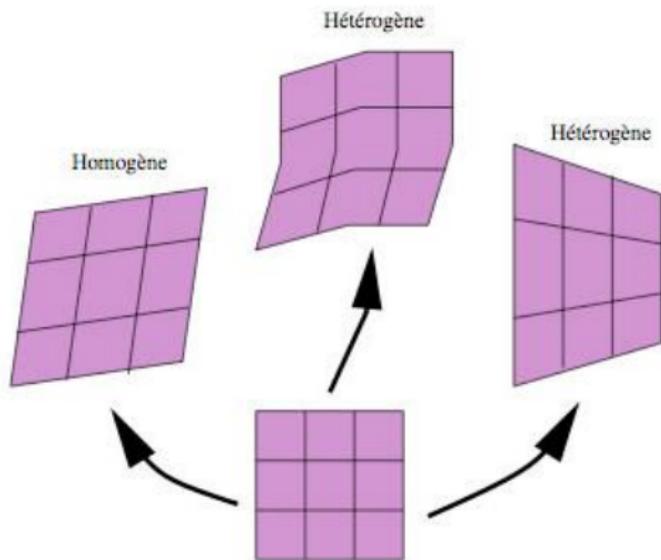
La rhéologie vient du grec **RHEO** = couler et **LOGOS** = étude

↪ science de l'écoulement, branche de la physique qui étudie la déformation d'un corps soumis à des contraintes.

1. Introduction
- 2. Description de la déformation et définitions**
3. Contraintes et rhéologie
4. Loi de comportement lithosphérique

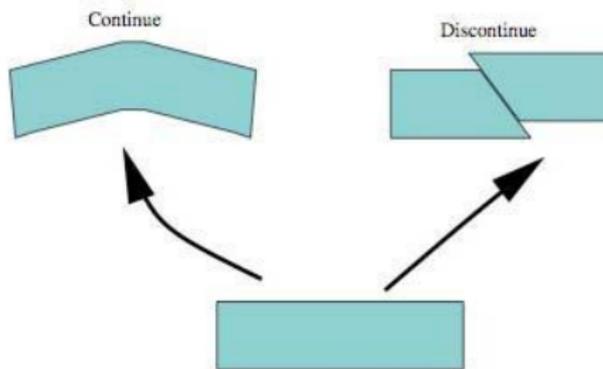
Description de la déformation

► Déformation homogène vs hétérogène



Description de la déformation

- ▶ Déformation homogène vs hétérogène
- ▶ Déformation continue vs discontinue



Description de la déformation

- ▶ Déformation homogène vs hétérogène
- ▶ Déformation continue vs discontinue
- ▶ Déformation pénétrative vs non pénétrative



Schistes lustrés (Haute-Maurienne)

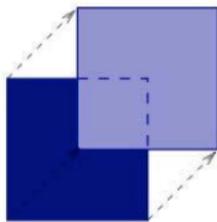


Granodiorite (Tyrol, Suisse)

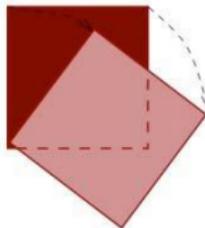
Description de la déformation

Définition

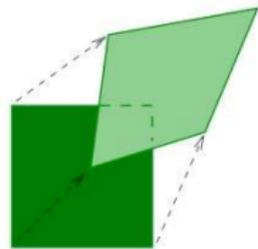
La **déformation** est la conséquence d'un **mouvement différentiel** des particules élémentaires constituant le milieu considéré



Translation



Rotation

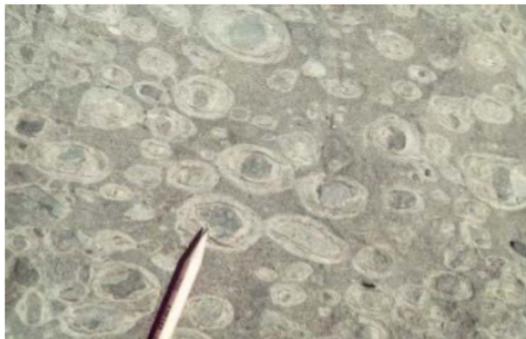


Déformation

Description de la déformation

► Travail du géologue :

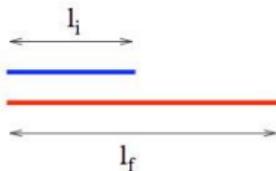
- ↪ Décrire géométrie et forme initiale de l'objet
- ↪ Interpréter les marqueurs de la déformation
- ↪ Quantifier la déformation
- ↪ Remonter aux causes de la déformation



Description de la déformation

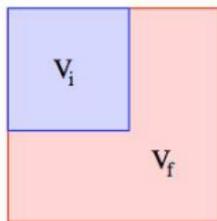
Définition

La **quantification de la déformation** est la variation en terme de distance, volume, angle par rapport à un état initial. C'est une grandeur sans dimension.



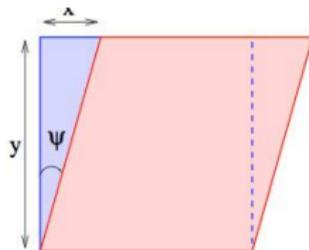
Déformation linéique

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l_f - l_i}{l_i}$$



Déformation volumique

$$\Delta = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_f - V_i}{V_i}$$



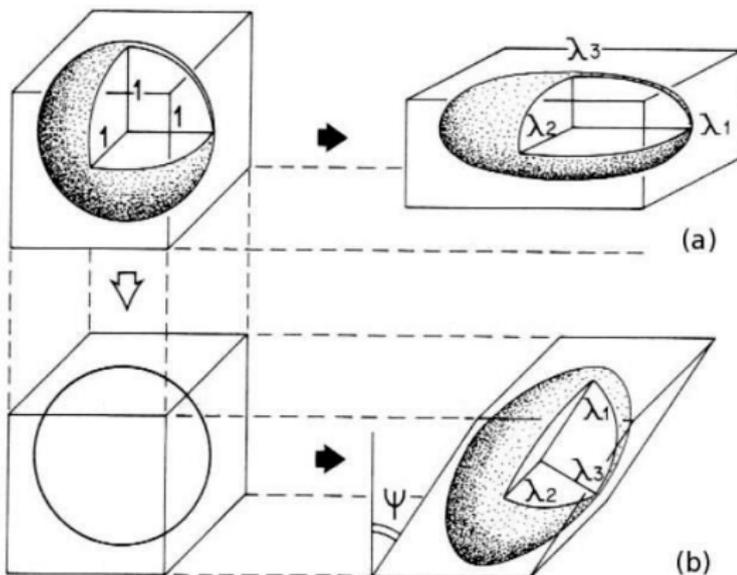
Déformation angulaire

$$\gamma = \tan \psi = \frac{x}{y}$$

Description de la déformation

► Ellipsoïde des déformations

- ↪ défini par trois vecteurs $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (x, y, z)$ qui caractérisent le champ de déformation.
- ↪ c'est une **observation de l'objet**.



La déformation cassante

► Déformation discontinue et non pénétrative

↪ À l'échelle de l'affleurement



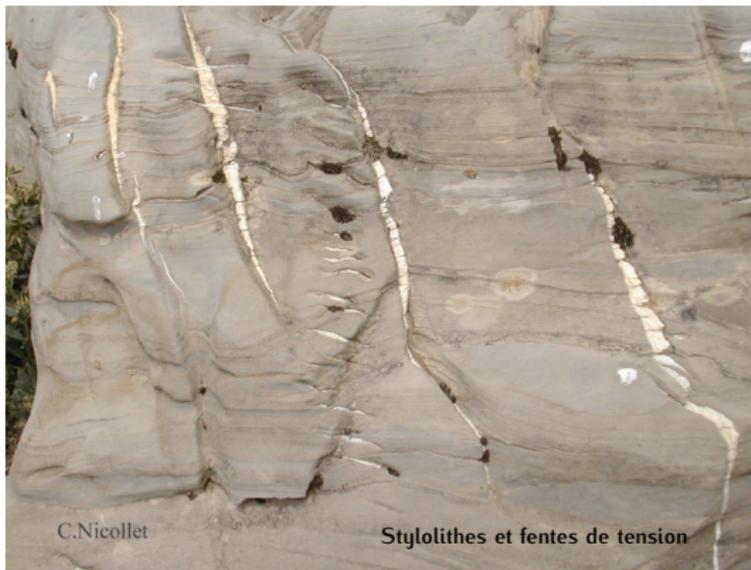
Grandes failles normales (péninsule de Boso, Japon)

La déformation cassante

► Déformation discontinue et non pénétrative

↪ À l'échelle de l'affleurement

↪ À l'échelle de la roche



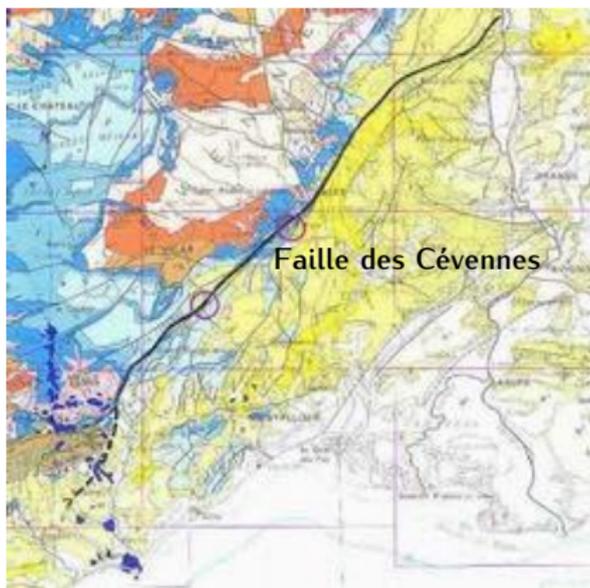
C.Nicollet

Stylolithes et fentes de tension

La déformation cassante

► Déformation discontinue et non pénétrative

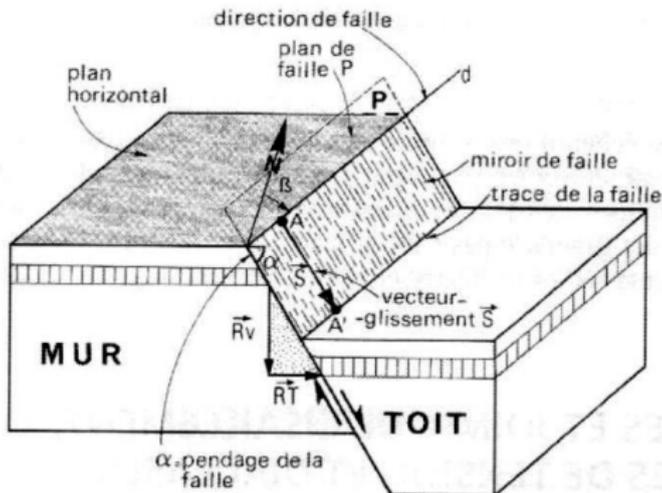
- ↪ À l'échelle de l'affleurement
- ↪ À l'échelle de la roche
- ↪ À l'échelle régionale



La déformation cassante

Définition

Faïlle : déformation consistant en un plan définissant une zone de rupture le long de laquelle deux blocs rocheux se déplacent l'un par rapport à l'autre.

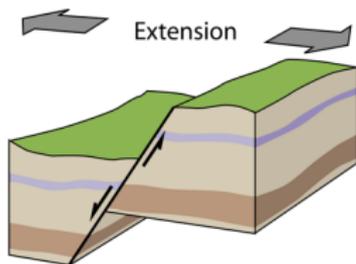


La déformation cassante

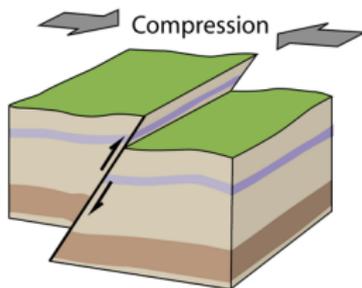
Définition

Faïlle : déformation consistant en un plan définissant une zone de rupture le long de laquelle deux blocs rocheux se déplacent l'un par rapport à l'autre.

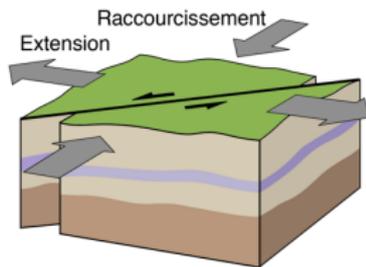
Faïlle normale



Faïlle inverse



Faïlle décrochante



La déformation cassante



La déformation cassante

**Faïlle
normale**



La déformation cassante



La déformation cassante

Faille
inverse



La déformation cassante



Séisme de Landers, Californie



La déformation des objets géologiques

La déformation cassante

Décrochement senestre vs dextre

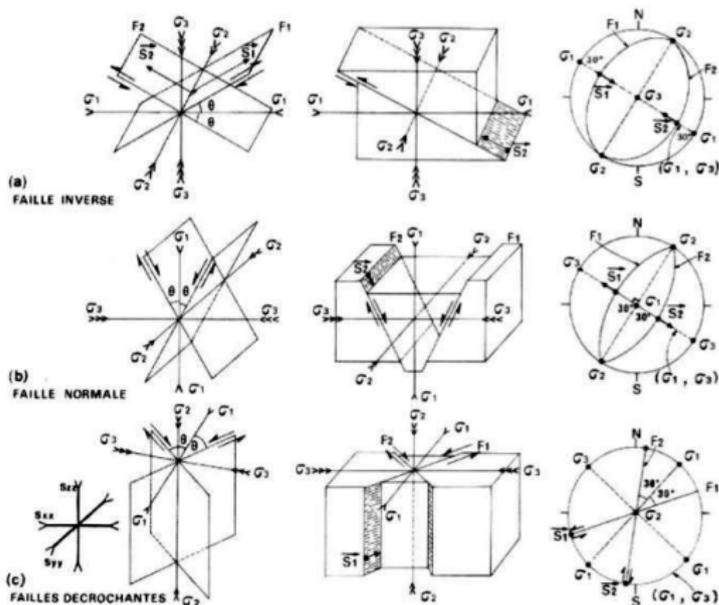


Séisme de Landers, Californie



La déformation cassante

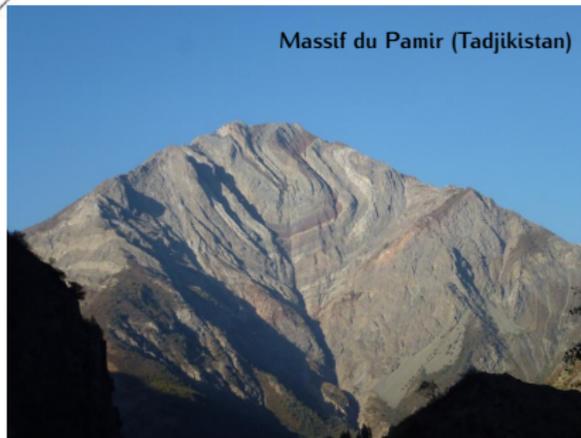
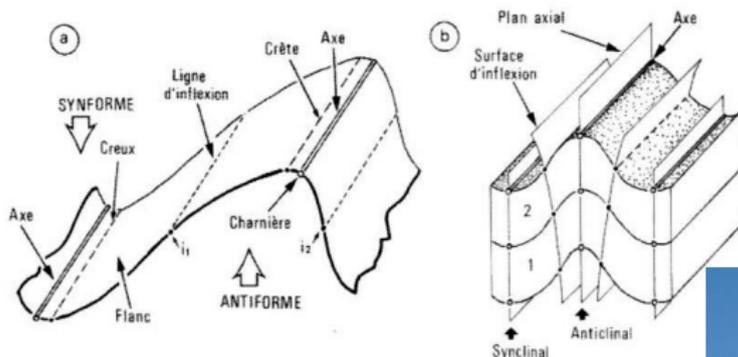
► Failles conjuguées



La déformation ductile

► Déformation continue et pénétrative

↪ Plis



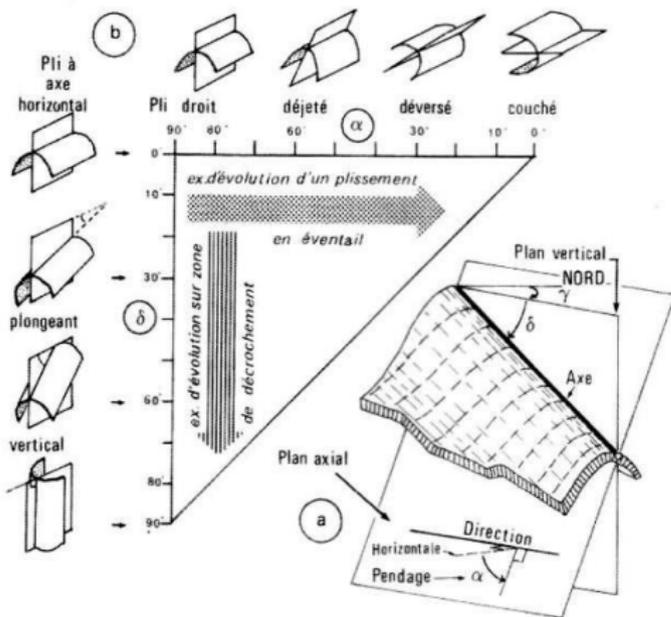
La déformation des objets géologiques

La déformation ductile

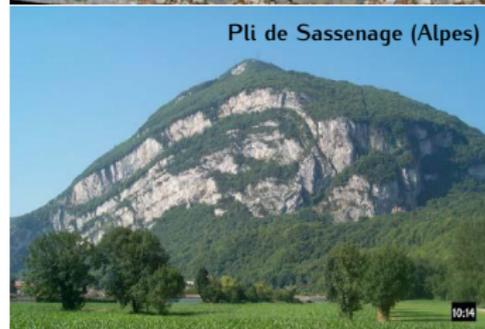
► Déformation continue et pénétrative

↪ Plis

Classification des plis :
Diagramme de Fleuty



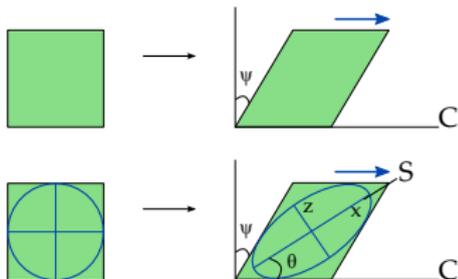
Pli de Sassenage (Alpes)



La déformation ductile

► Déformation continue et pénétrative

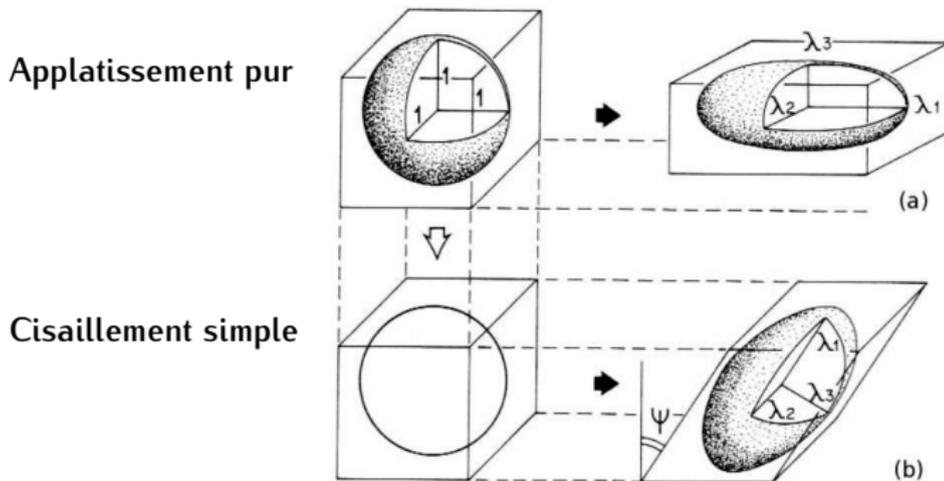
↪ Cisaillement



La déformation ductile

► Déformation continue et pénétrative

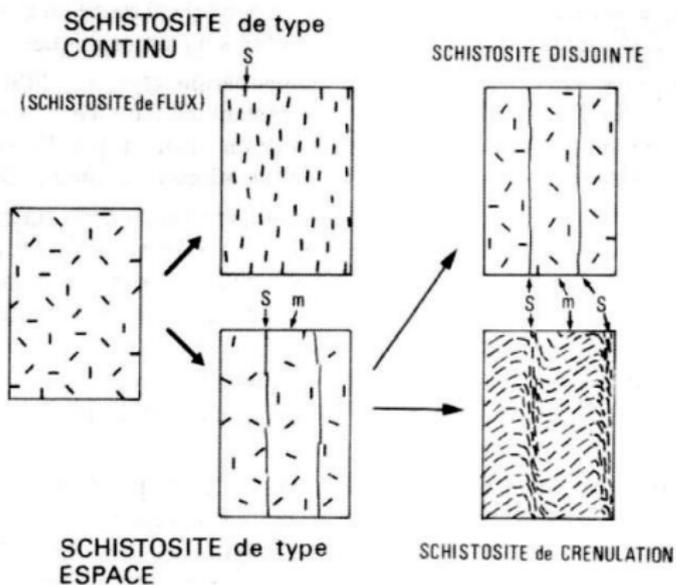
- ↪ Cisaillement pur
- ↪ Cisaillement simple



La déformation ductile

► Déformation continue et pénétrative

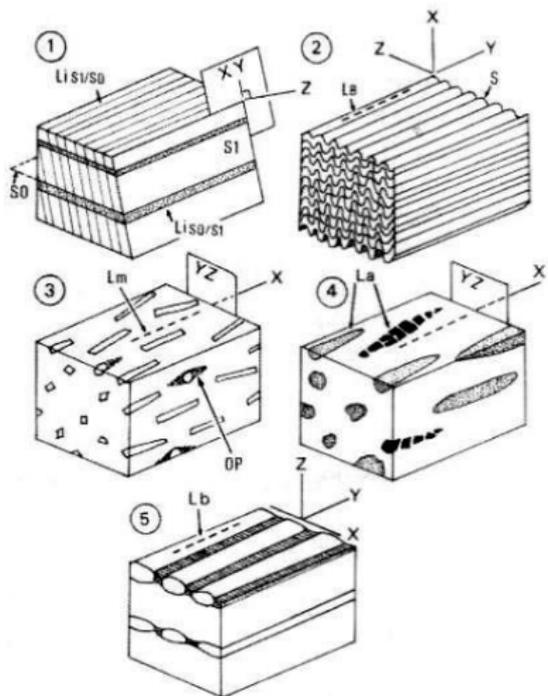
↪ Schistosité et foliations



La déformation ductile

► Déformation continue et pénétrative

↪ Linéation



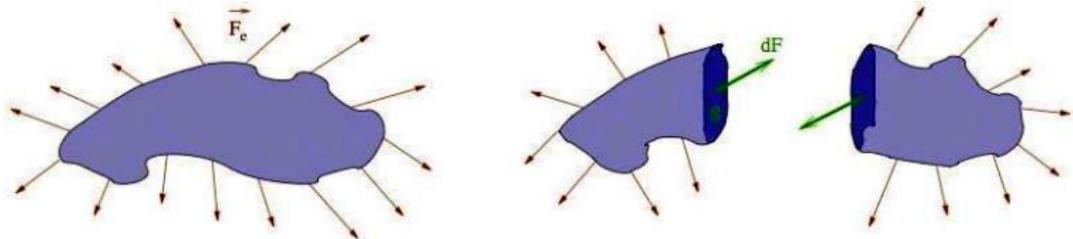
1. Introduction
2. Description de la déformation et définitions
- 3. Contraintes et rhéologie**
4. Loi de comportement lithosphérique

Les roches sont soumises à des contraintes

Définition

La **contrainte** (σ) est une force appliquée sur une surface qui s'exprime en Pa (N/m^2). C'est l'équivalent d'une pression.

$$\sigma = \frac{dF}{dS}$$



Les roches sont soumises à des contraintes

Contrainte

=

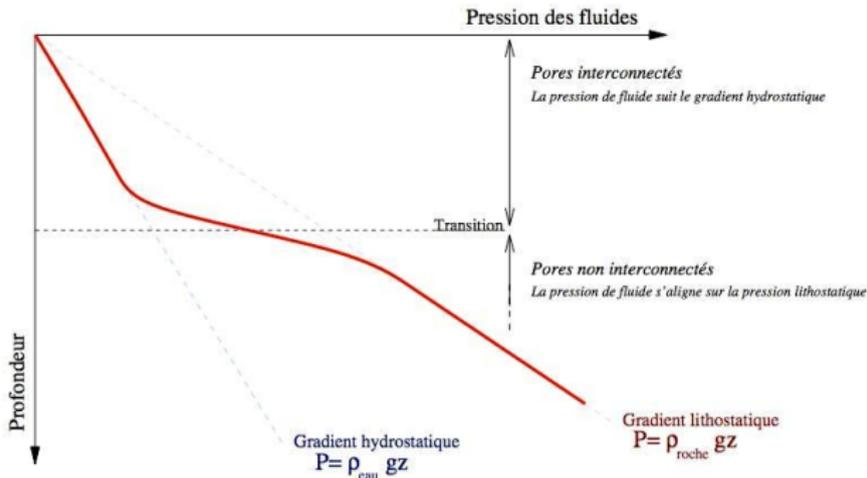
Contrainte lithostatique

$$P = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

+

Contrainte déviatorique

σ_d = perturbations =
tectonique



Les roches sont soumises à des contraintes

► Ellipsoïde des contraintes

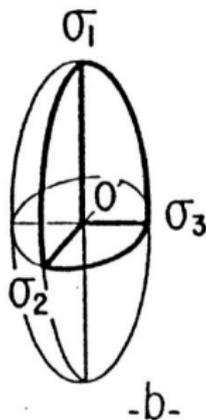
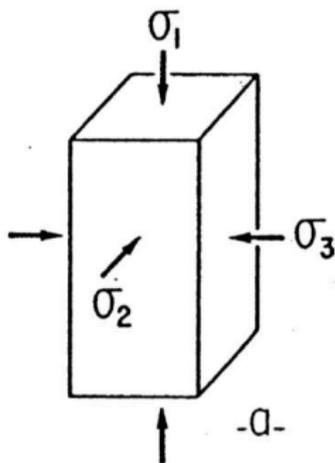
↪ défini par trois vecteurs $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ tels que :

σ_1 = contrainte maximale

σ_2 = contrainte intermédiaire

σ_3 = contrainte minimale

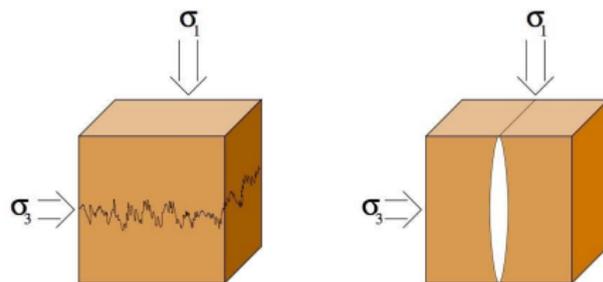
↪ \neq de l'ellipsoïde des déformations



Les roches sont soumises à des contraintes

► Relation déformation/contraintes

- ↪ stylolithes
- ↪ fentes de tension

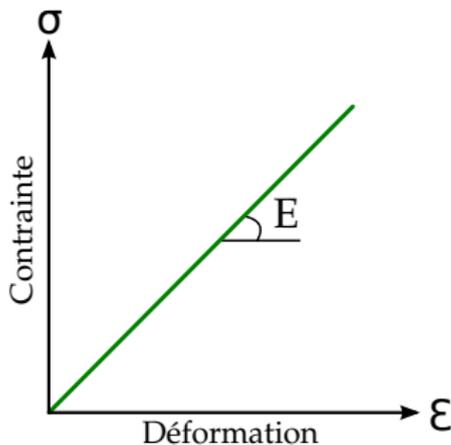


Comportements élémentaires des roches

► Elasticité

Définition

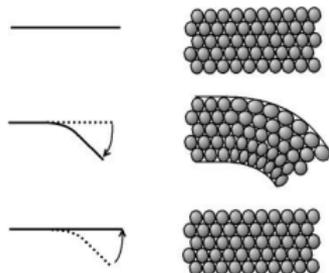
L'**élasticité** caractérise une déformation immédiate (pas de seuil) et réversible \Rightarrow relation proportionnelle entre contrainte et déformation.



Loi d'élasticité de Hooke

$$\epsilon = \sigma / E$$

avec E : module d'Young



Causes physiques :

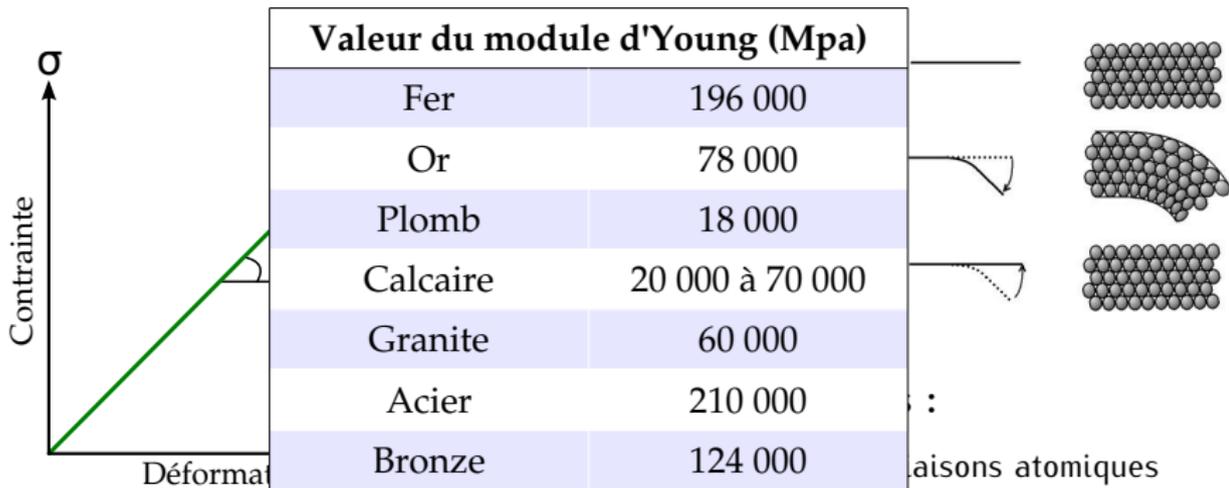
\rightsquigarrow Élasticité des liaisons atomiques

Comportements élémentaires des roches

► Elasticité

Définition

L'**élasticité** caractérise une déformation immédiate (pas de seuil) et réversible \Rightarrow relation proportionnelle entre contrainte et déformation.

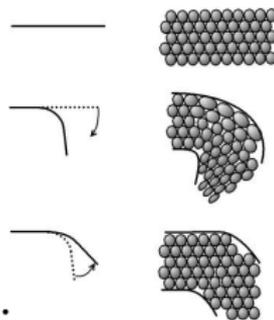
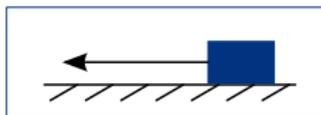
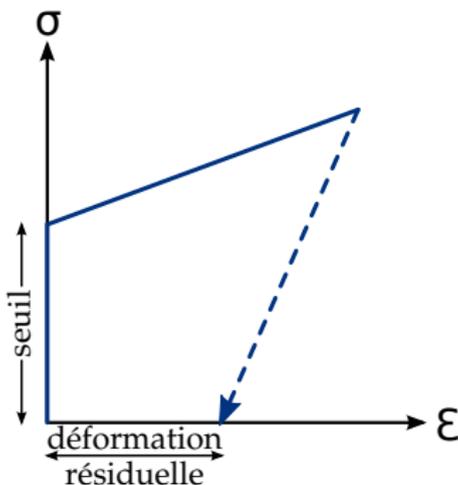


Comportements élémentaires des roches

► Plasticité

Définition

La **plasticité** d'une roche caractérise l'existence d'un seuil et d'une déformation résiduelle.



Causes physiques :

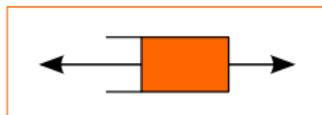
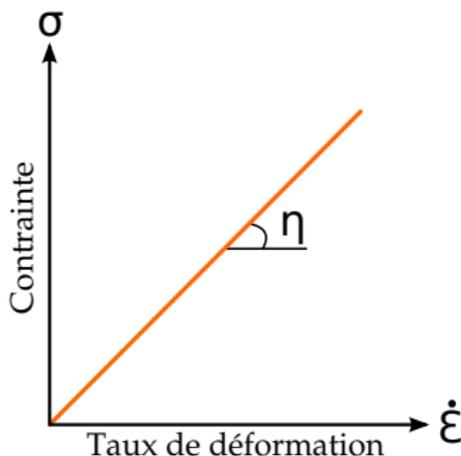
- ↪ Migration des impuretés du réseau cristallin
- ↪ Cassure du matériau

Comportements élémentaires des roches

► Viscosité

Définition

La **viscosité** n'a pas de seuil mais inclut le paramètre temps dans son expression (vitesse de déformation).



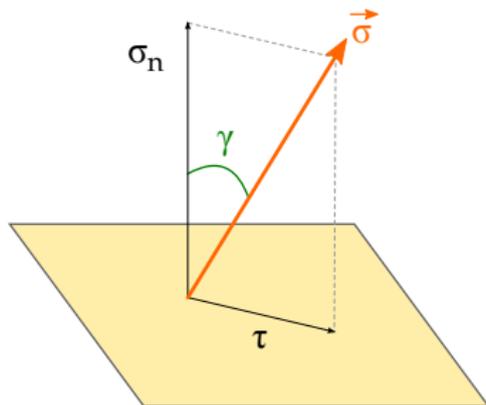
$$d\varepsilon/dt = \sigma/\eta$$

avec η : la viscosité

Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

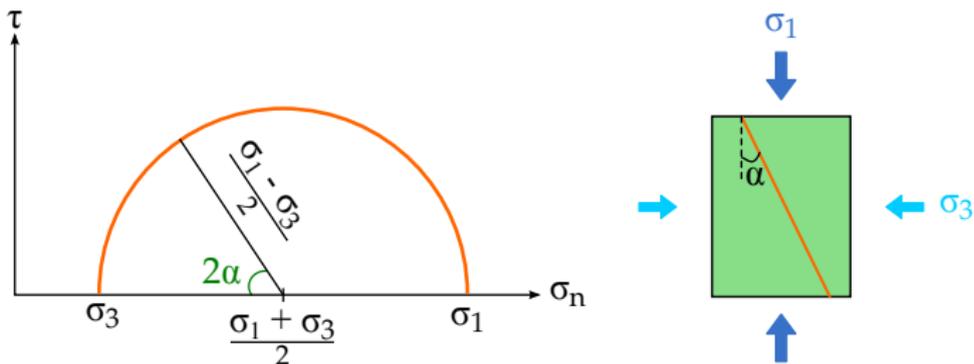
► Décomposition de la contrainte sur un plan

- ↪ composante **dans le plan** = composante tangentielle τ
- ↪ composante **normale au plan** = composante normale σ_n



Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

► Cercle de Mohr



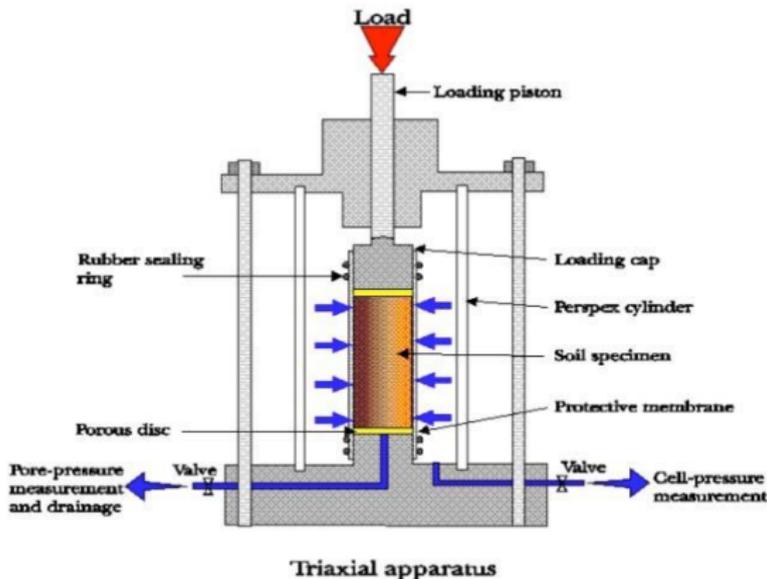
$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \times \cos 2\alpha$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \times \sin 2\alpha$$

Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

► Critère de rupture

- ↪ expériences sur presse
- ↪ cellule triaxiale



Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

Critère de rupture

► Critère de Coulomb (théorie)

$$\rightsquigarrow \tau = C + \mu_d \cdot \sigma_n$$

avec μ_d = coefficient de frottement dynamique
et C = cohésion du milieu

Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

Critère de rupture

► Critère de Coulomb (théorie)

$$\rightsquigarrow \tau = C + \mu_d \cdot \sigma_n$$

avec μ_d = coefficient de frottement dynamique
et C = cohésion du milieu

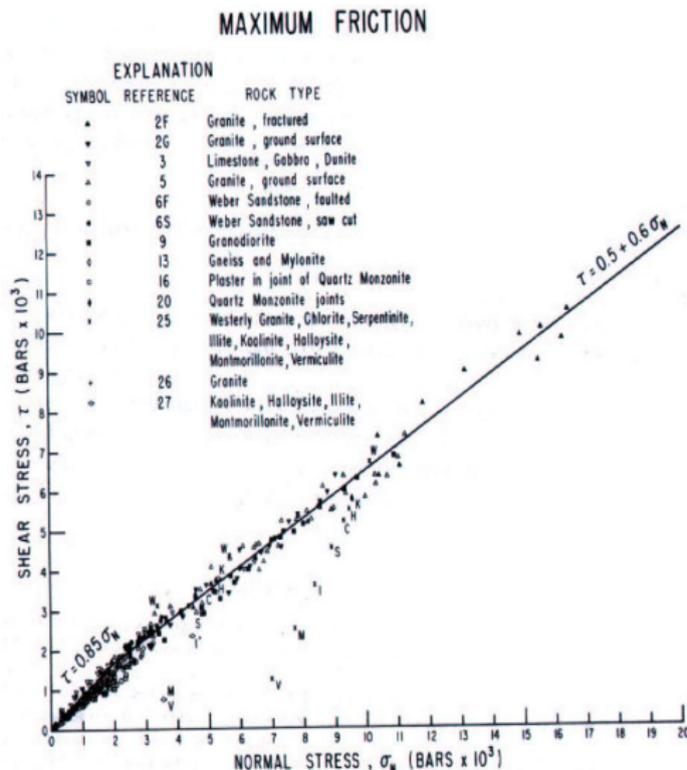
► Loi de Byerlee (empirique)

$$\rightsquigarrow \tau = 0.85\sigma_n$$

pour $\sigma_n < 200$ MPa

$$\rightsquigarrow \tau = 0.5 + 0.6\sigma_n$$

pour $\sigma_n > 200$ MPa



Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

Critère de rupture

► Critère de Coulomb (théorie)

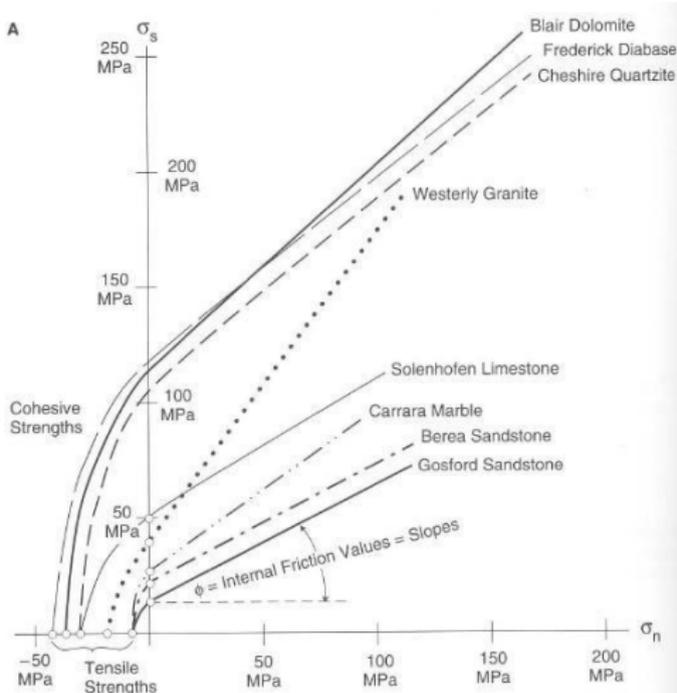
$\rightsquigarrow \tau = C + \mu_d \cdot \sigma_n$
 avec μ_d = coefficient de frottement dynamique
 et C = cohésion du milieu

► Loi de Byerlee (empirique)

$\rightsquigarrow \tau = 0.85\sigma_n$
 pour $\sigma_n < 200$ MPa

$\rightsquigarrow \tau = 0.5 + 0.6\sigma_n$
 pour $\sigma_n > 200$ MPa

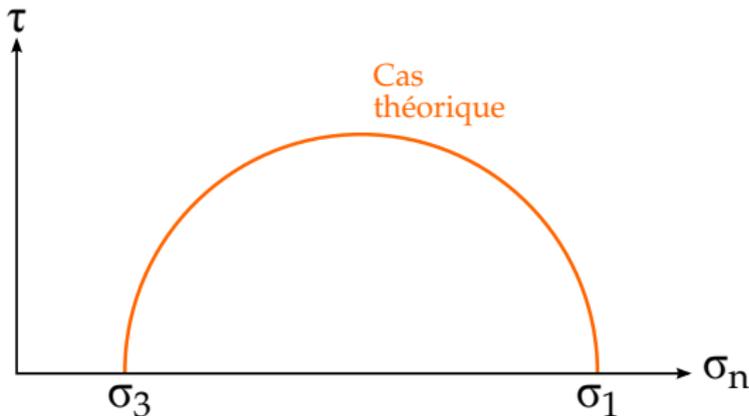
► Les plans de fracture ont des angles voisins, quelque soit la cohésion de la roche.



Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

Diagramme Mohr - Coulomb

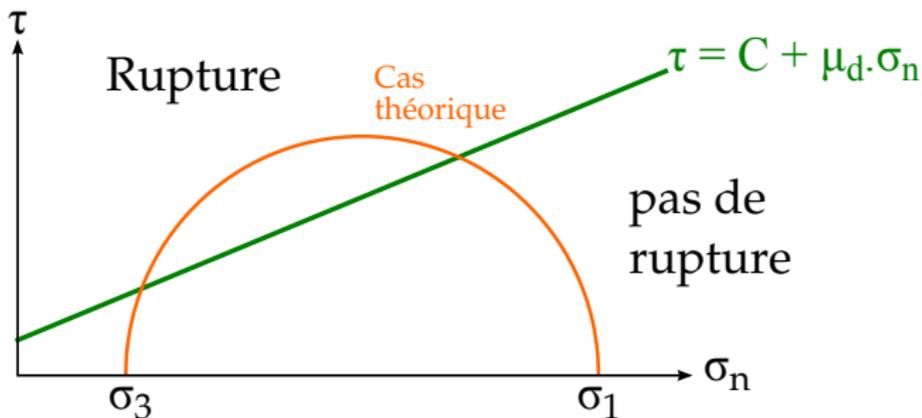
Le critère de rupture délimite un champ sans rupture (bas) et un champ où la roche se fracture (haut).



Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

Diagramme Mohr - Coulomb

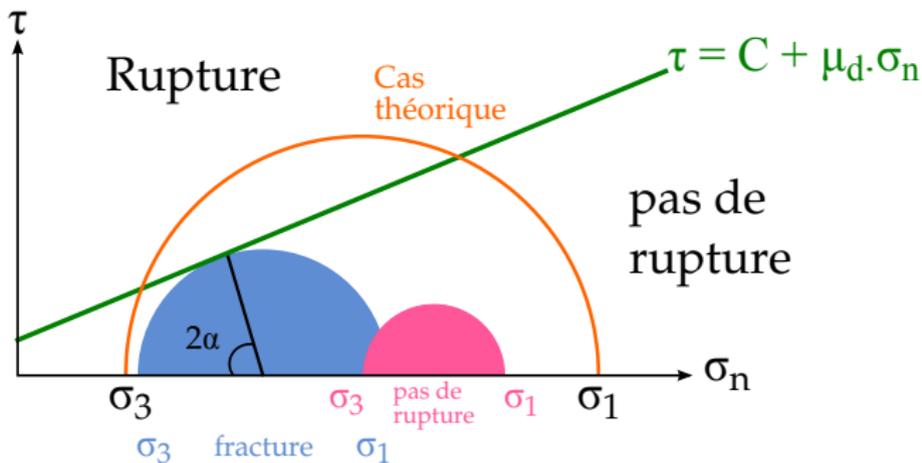
Le critère de rupture délimite un champ sans rupture (bas) et un champ où la roche se fracture (haut).



Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

Diagramme Mohr - Coulomb

Le critère de rupture délimite un champ sans rupture (bas) et un champ où la roche se fracture (haut).

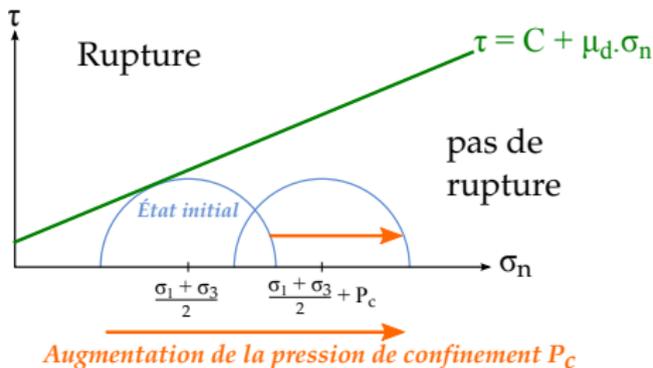


Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

Conséquence n°1

L'augmentation de la pression de confinement éloigne des conditions de rupture.

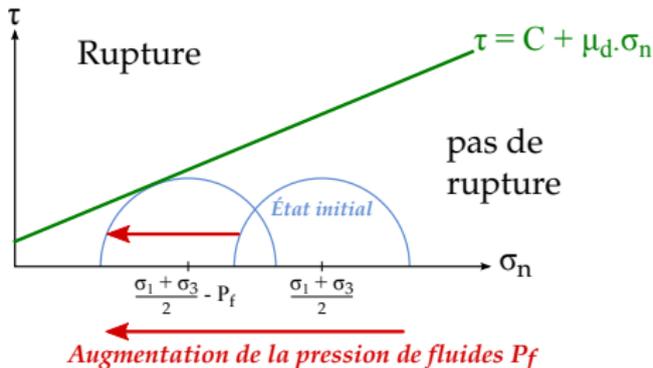
⇒ **Enfouissement**



Conséquence n°2

L'augmentation de la pression de fluides rapproche des conditions de rupture.

⇒ **Fracturation hydraulique**

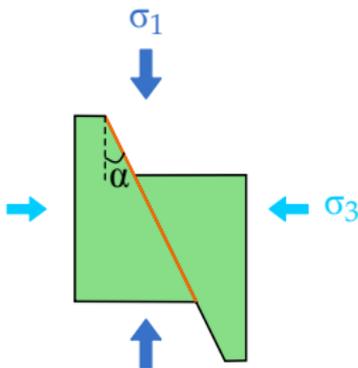


Comportement cassant (Loi de Mohr-Coulomb)

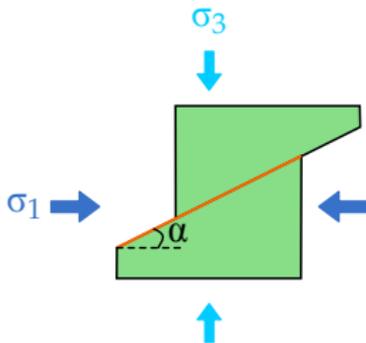
Conséquence n°3

Angle par rapport à σ_1 :
 $2\alpha = 60^\circ$ donc $\alpha = 30^\circ$

Failles normales
⇒ **pendage de 60°**



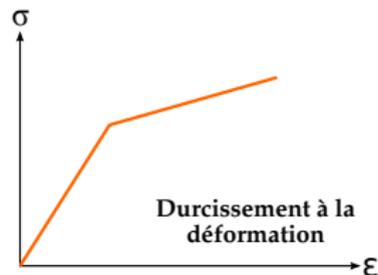
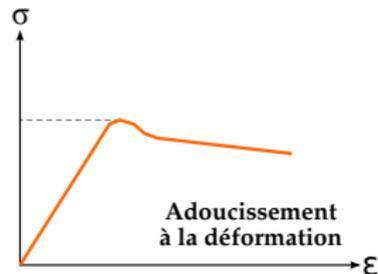
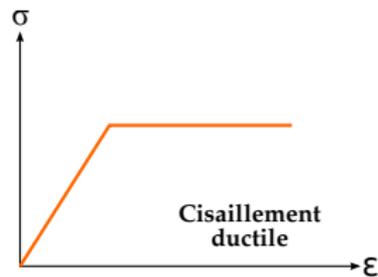
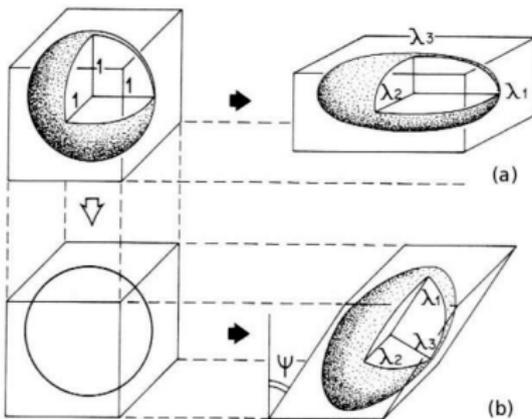
Failles inverses
⇒ **pendage de 30°**



Comportement ductile

► Deux grands types de cisaillement :

- ↪ Cisaillement **pur**
- ↪ Cisaillement **simple**



Lois de comportement

Comportement fragile vs. ductile

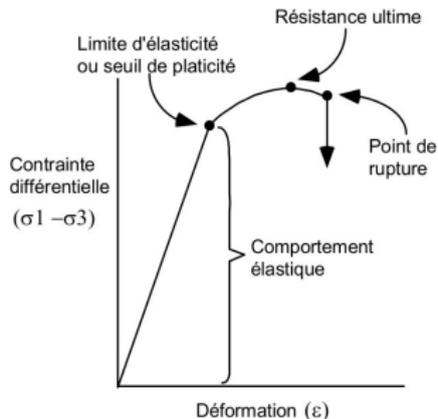


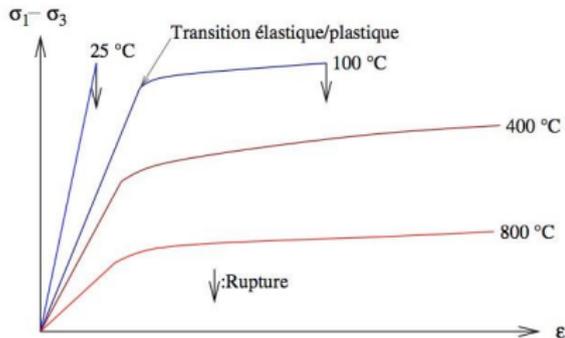
Diagramme : $(\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_d = f(\epsilon)$

- ▶ Quelles paramètres influencent les transitions :
 1. élastique - plastique ?
 2. fragile - ductile ?

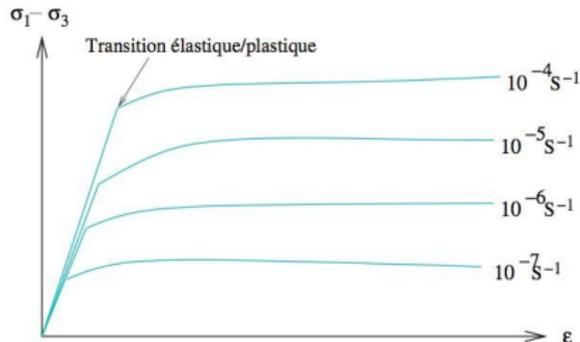
Lois de comportement

Transitions comportementales

- La **température** fait diminuer les seuils de fluage et de plasticité



- La **vitesse de déformation** a aussi une influence sur le seuil de fluage et de plasticité.



Lois de comportement

Transitions comportementales

- ▶ La **pression de confinement** éloigne des conditions de rupture

↪ transition cassant-ductile

- ▶ **Conséquence :**

↪ sismicité dans la croûte

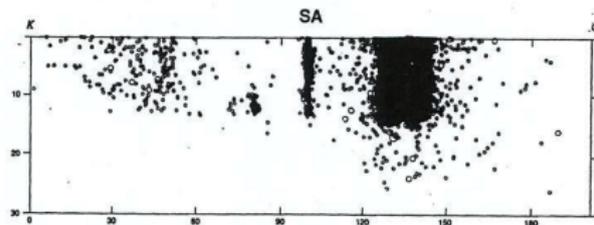
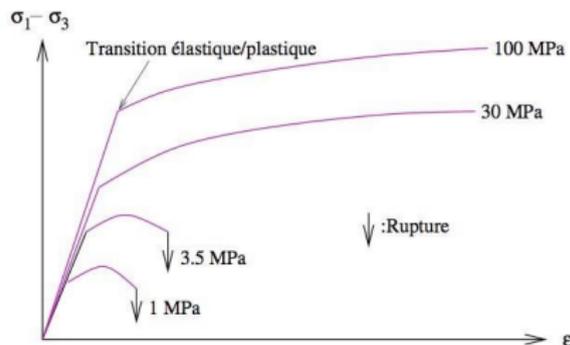
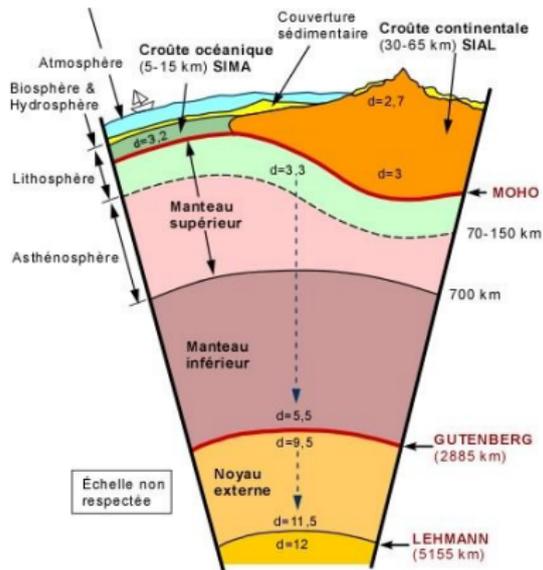
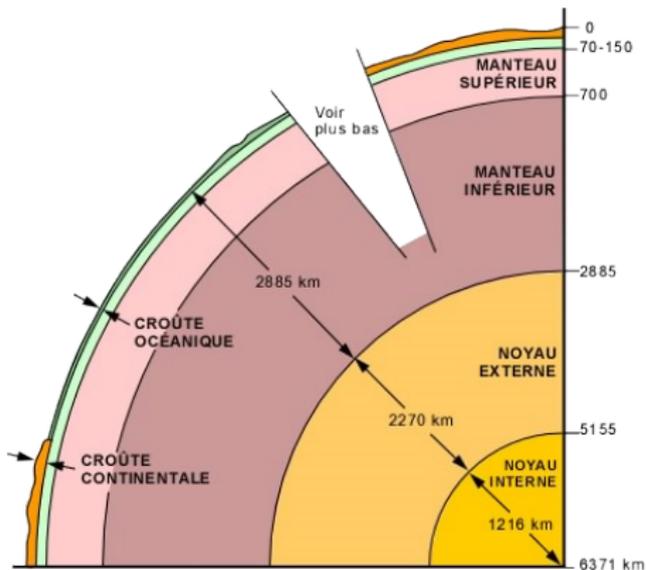


Figure V.17
Sismicité en coupe (voir aussi figure II.4 pour la coupe parallèle à la faille)
(Wallace, 1990)

1. Introduction
2. Description de la déformation et définitions
3. Contraintes et rhéologie
- 4. Loi de comportement lithosphérique**

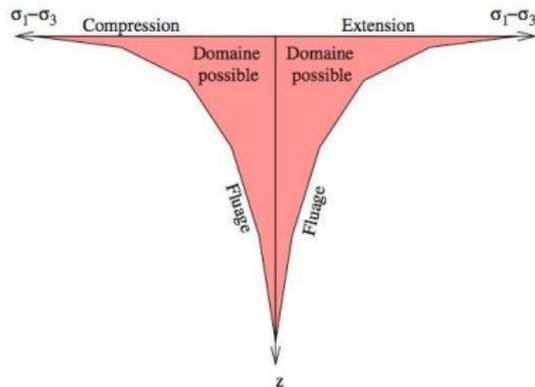
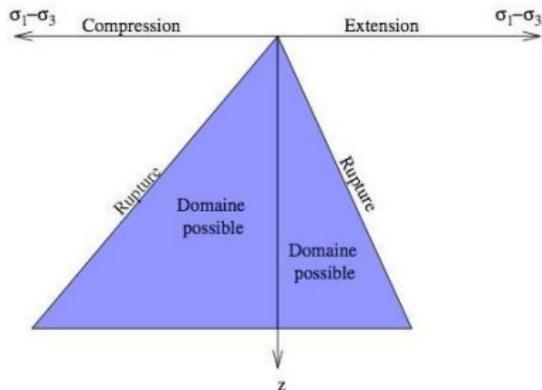
Rappels

Structure interne de la Terre



À l'échelle de la lithosphère

- ▶ **Déformation fragile** : déviateur des contraintes maximal supporté par la roche avant qu'elle ne casse.
 - ↪ Ne dépend pas de la lithologie ni de la température.
- ▶ **Déformation ductile** : déviateur des contraintes maximal supporté par la roche avant qu'elle ne flue.
 - ↪ Dépend de la température et de la lithologie.

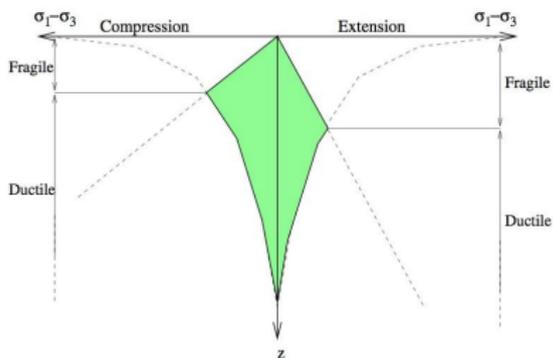


$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} = 2\rho g z \quad (\sigma_1 - \sigma_3)_{max} = \frac{2}{3}\rho g z$$

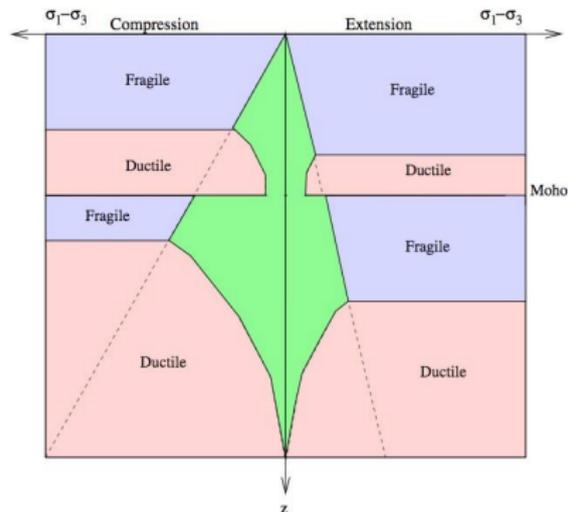
À l'échelle de la lithosphère

Profil rhéologique

En domaine océanique



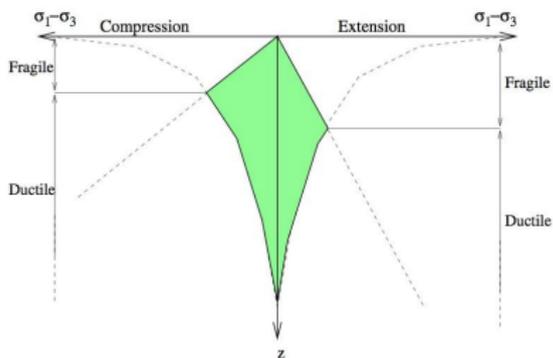
En domaine continental



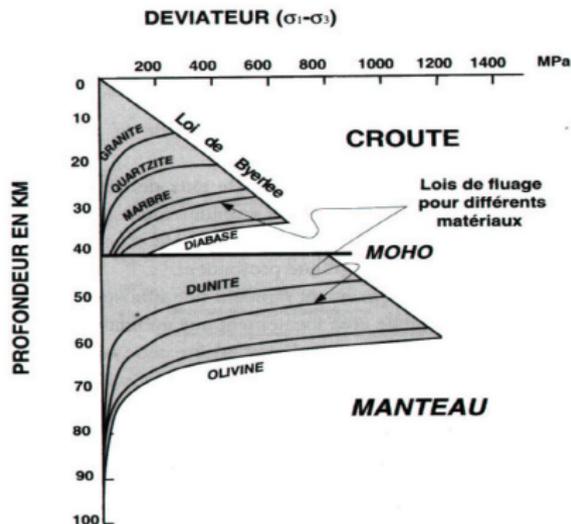
À l'échelle de la lithosphère

Profil rhéologique

En domaine océanique



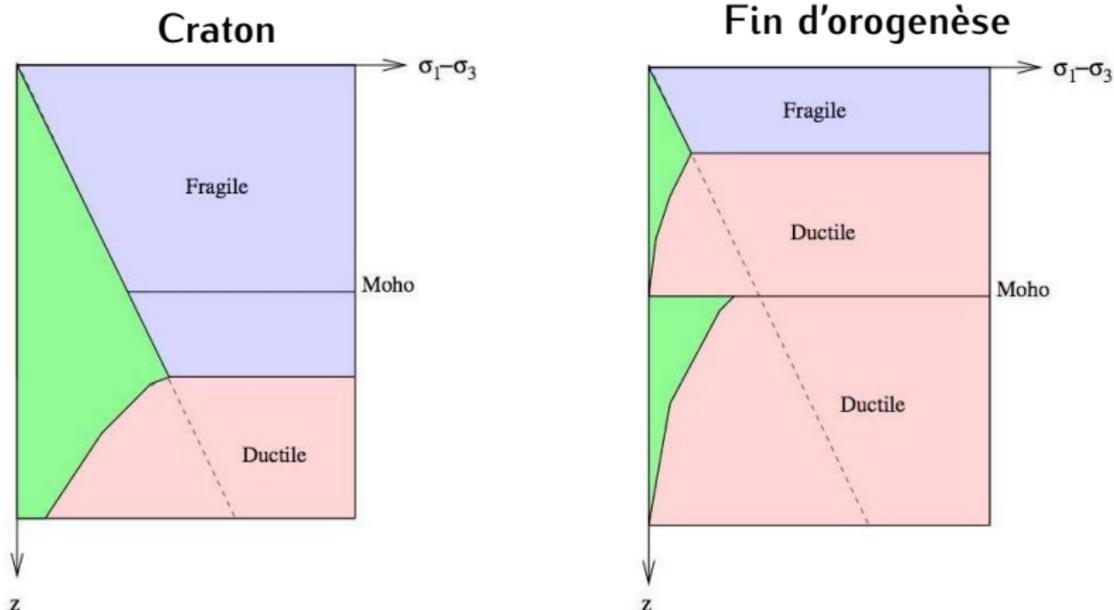
En domaine continental



À l'échelle de la lithosphère

Profil rhéologique

Variation du géotherme



À l'échelle de la lithosphère

Modélisation analogique - comportement fragile -

- ▶ **Sable sec** : matériau granulaire analogue pour le contexte fragile (croûte supérieure)
 - ↪ Obéit à la loi de Mohr-Coulomb, avec un angle de friction de 30° .
 - ↪ Disposition des failles indépendante de la vitesse de déformation.



À l'échelle de la lithosphère

Modélisation analogique - comportement ductile -

- ▶ dépend de la **température** et du **taux de déformation**
 - ↪ difficile à modéliser
 - ↪ utilisation des silicones

Exemple du modèle à deux couches

