



Jubilé du Comité Français de Mécanique des Roches



Mécanique des Roches: Défis et Enjeux

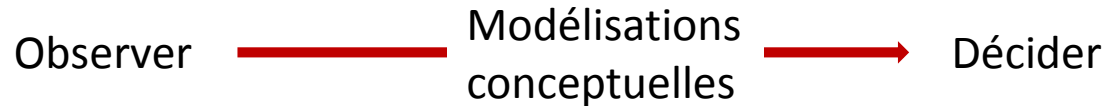
Apport de la Mécanique des Roches Fondamentale

Frédéric L. Pellet

MINES ParisTech

Spécificité de la Mécanique des Roches

Géotechnique



Le cadre théorique:

- Thermodynamique des processus irréversibles
- Mécanique des Milieux Continus - Lois constitutives (principe d'objectivité, déterminisme, temps universel...)

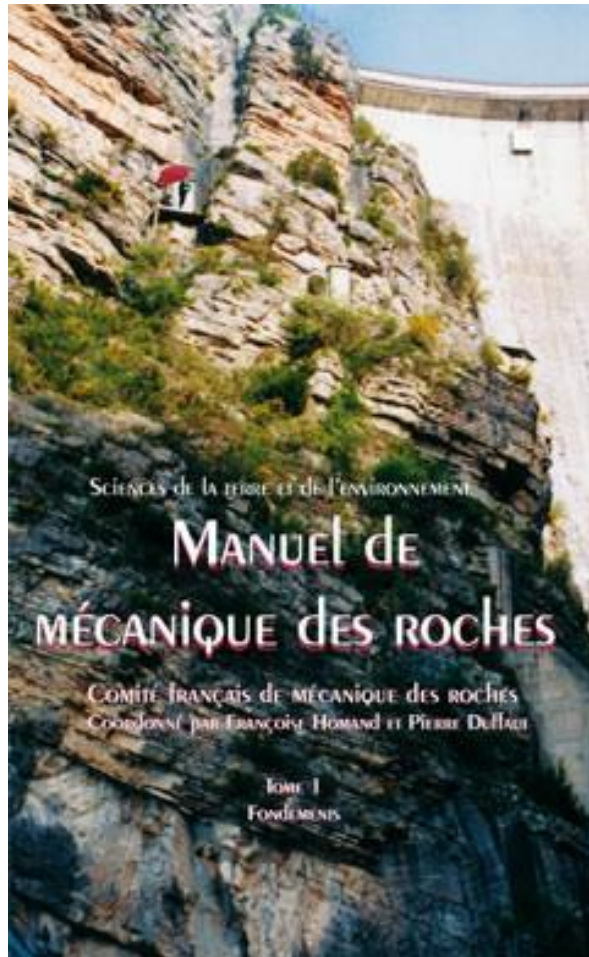
L' expérimentation :

- En laboratoire (présentation à suivre **J. Fortin**)
- In situ

La modélisation numérique:

- FEM, DEM, BEM,... (présentation à suivre **R. Charlier**)

Manuel de Mécanique des roches - Tome 1 – Fondements (2000)



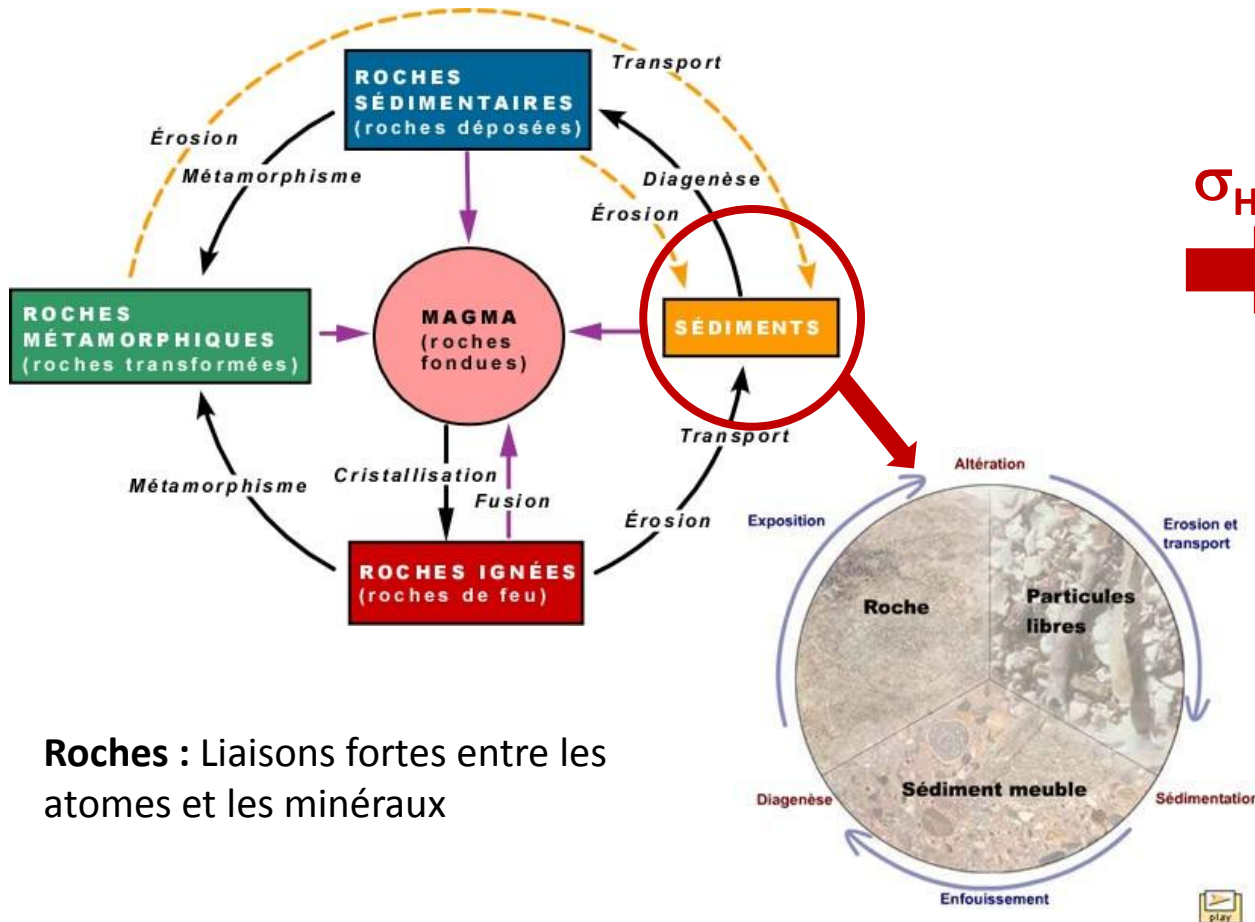
- Physique des roches
- Comportement mécanique des roches
- Description structurale du massif rocheux
- Comportement mécanique des discontinuités
- L'eau dans les roches et les massifs rocheux
- Les contraintes dans les massifs rocheux
- Lois de comportement
- Rupture
- Couplages Thermo-Hydro-Mécanique
- Roches argileuses

Coordonné par P. Duffaut et F. Homand

www.pressesdesmines.com

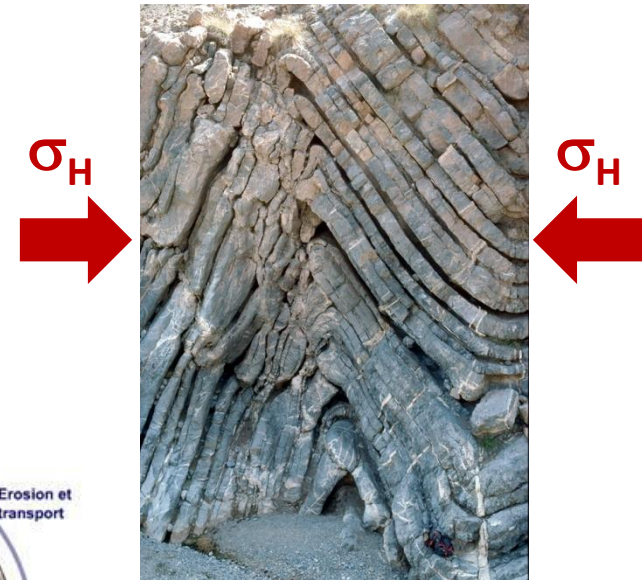
Le Cadre Géologique

La Formation et la Transformation des Roches



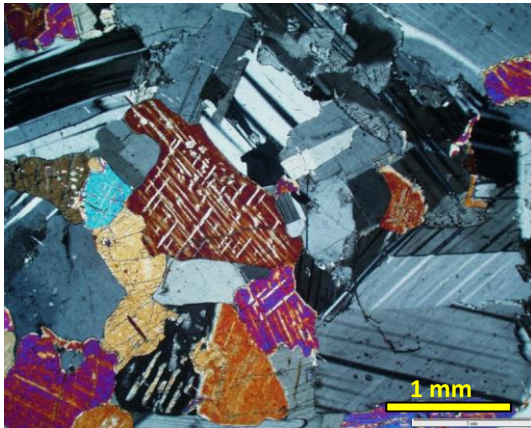
Roches : Liaisons fortes entre les atomes et les minéraux

Géologie structurale
État de contraintes initial

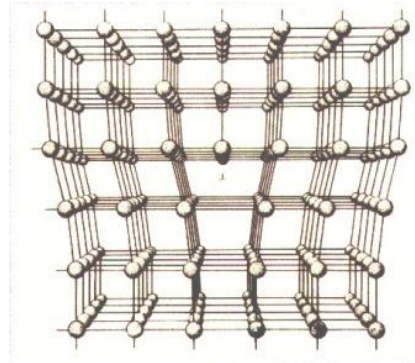


Sols (roche meuble): Liaisons inexistantes ou faibles entre les grains (**force de van der Waals**)

Un Milieu Polycristallin

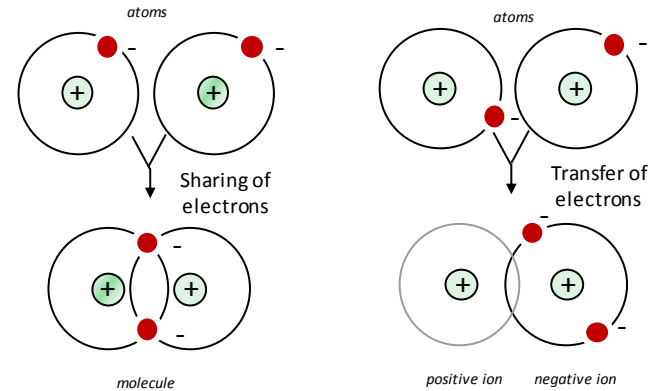


Gabbro



Dislocation

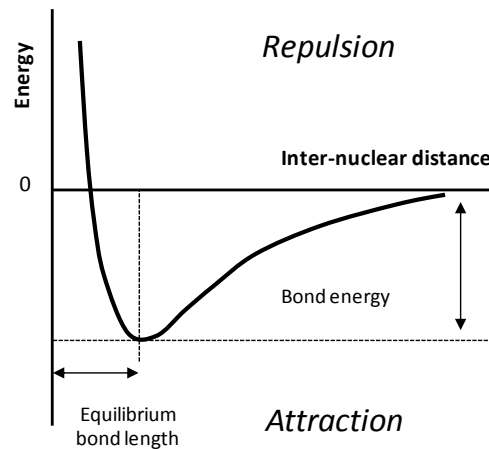
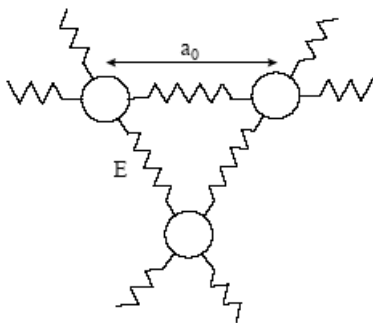
Poirier (1995)



covalent bond

ionic bond

Déformation et rupture à l'échelle atomique



Résistance théorique du cristal

$$R_{th} = 2 \sqrt{\frac{E \gamma}{a_o}}$$

$$3E < R_{th} < 10 E$$

E , module d'élasticité du cristal

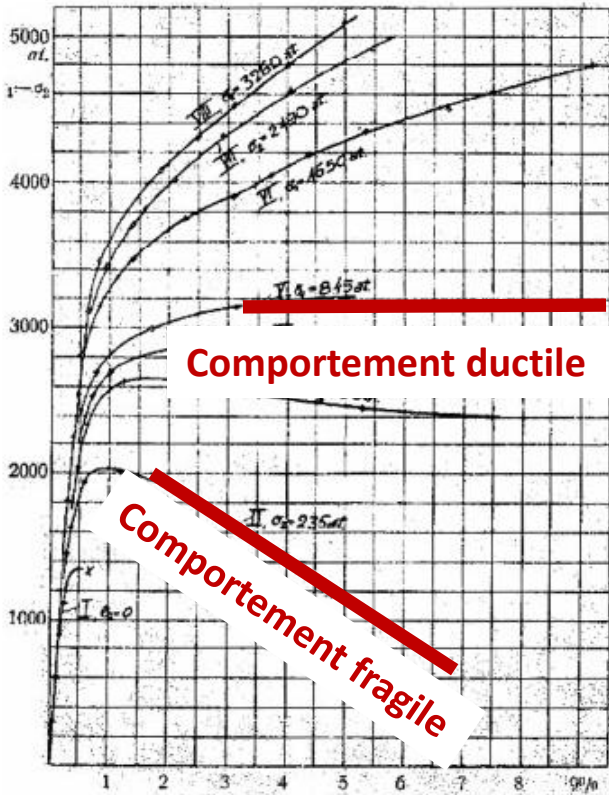
γ , énergie de surface par unité d'aire \longrightarrow Cohésion

a_o , distance d'équilibre entre les atomes

La Rupture

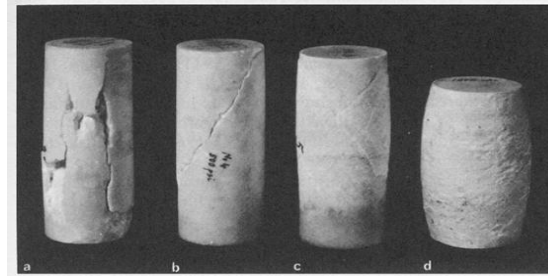
Rupture Macroscopique des Roches

Essais triaxiaux en compression et en extension sur le marbre de Carrare

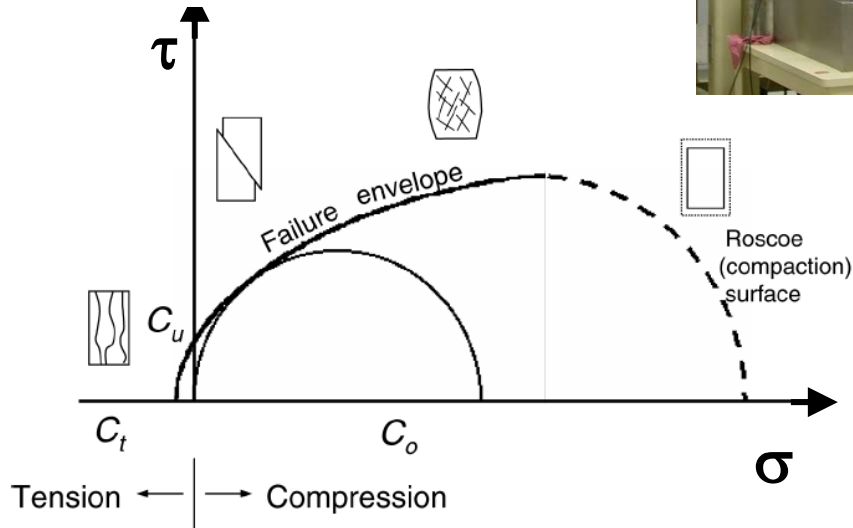


von Karman (1911)

Kármán von Th. 1911. Festigkeits Versuche unter allseitigem Druck. Verhandl. Deut. Ingr. 55: 1749-1758. (in German)



Presse rigide à colonnes courtes

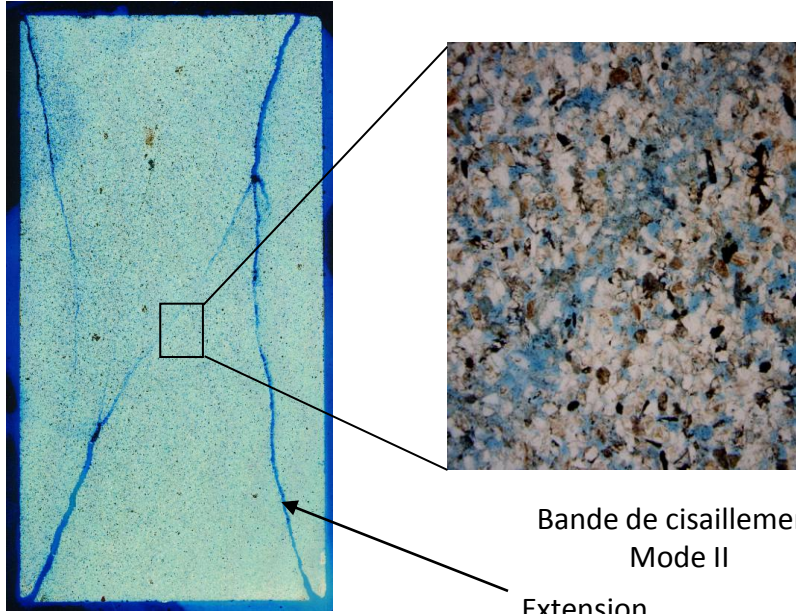


$\dot{\epsilon}, p, T, k_p$

Critère de Hoek & Brown

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_3 \sigma_c + S \sigma_c^2}$$

Mécanique Linéaire de la Rupture

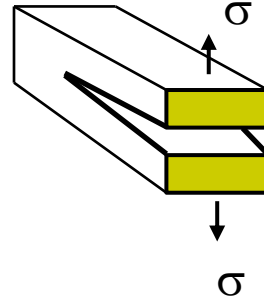


Grès des Vosges - Gatelier (2001)

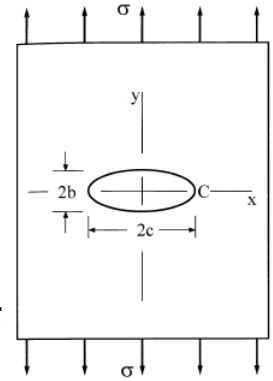
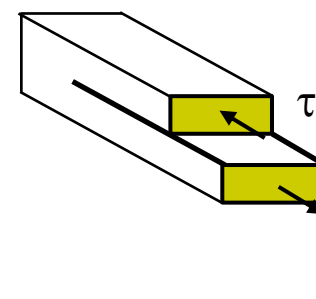
Bande de cisaillement
Mode II
Extension
Mode I

Griffith (1924), Irwin (1957)

Mode I



Mode II



Contrainte critique
d'initiation de la
fissuration en mode I

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi c}}$$

γ , énergie de
surface par unité
d'aire

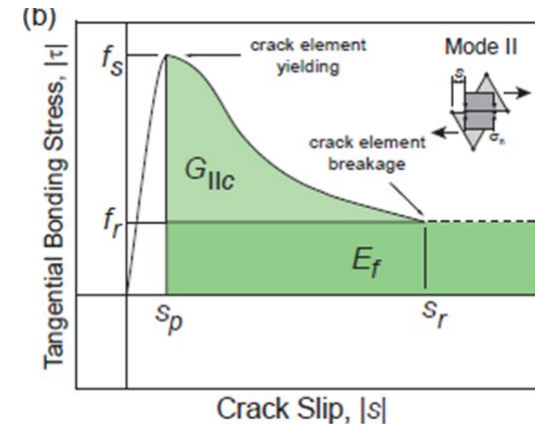
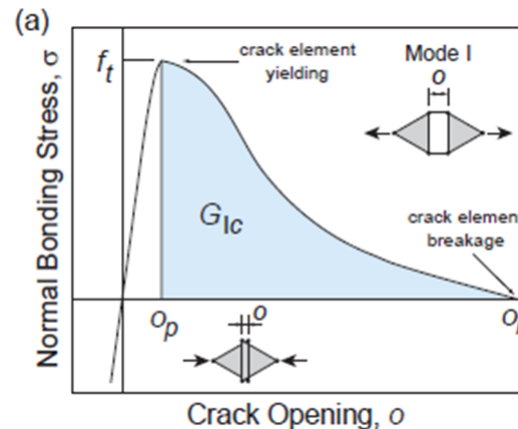
Propagation de la fissuration:

Taux de restitution d'énergie:

$$G = - \frac{d\Pi}{dA}$$

Critère de fracturation: $G = G_C$

G_C : Ténacité de la roche



Figures after Lisjak-Bradley (2013)

L' Anisotropie

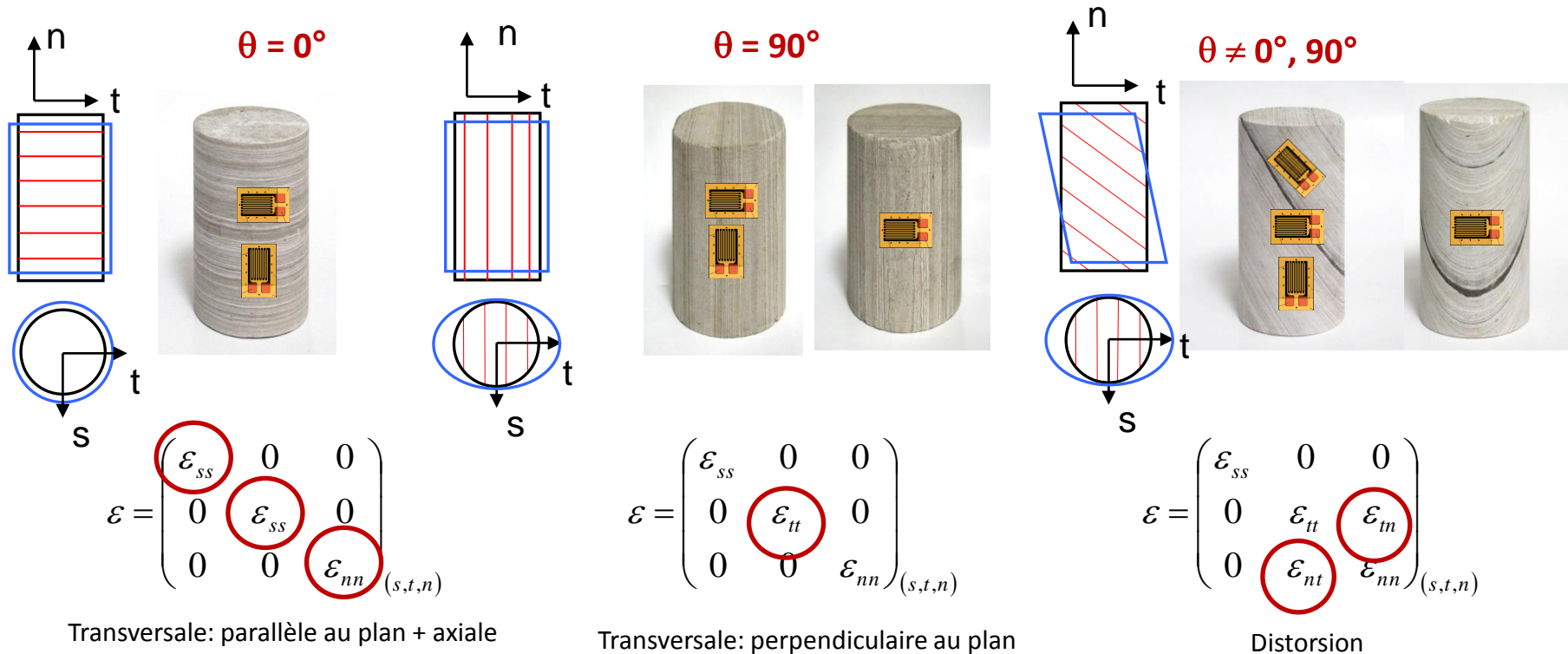
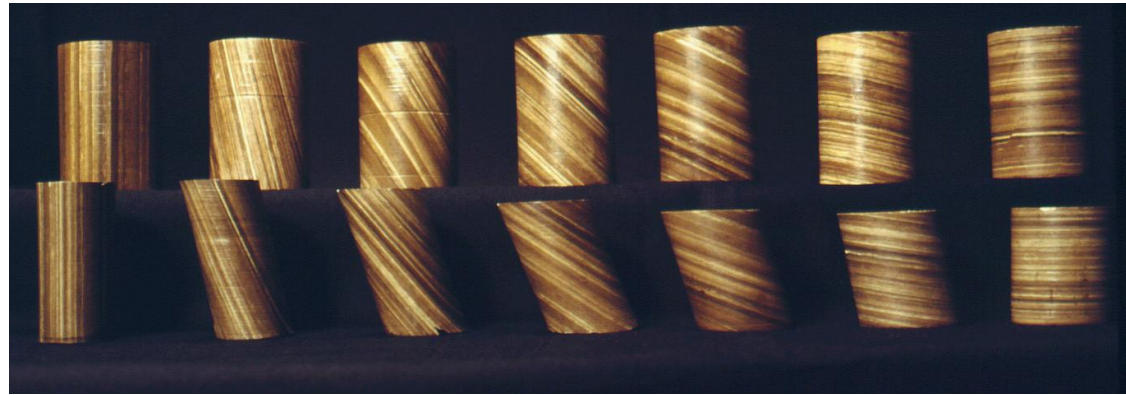
Déformabilité des Roches et Anisotropie

Diatomite

Allirot et Boehler (1977)

Tenseur de structure

$$\bar{\sigma}_{ij} = A_{ijkl} \sigma_{kl}$$

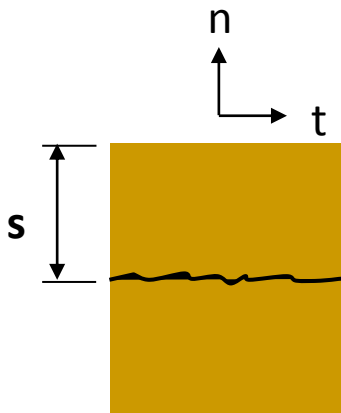


Le Massif Rocheux: Un Milieu Orthotrope



Orthotrope

Joint d'épaisseur nulle



$$\frac{1}{E_n} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{k_n s} = \frac{1}{E_L}$$

$$\frac{1}{G_{tn}} = \frac{1}{G_r} + \frac{1}{k_s s} = \frac{1}{G_L}$$

Modèle d'équilibre

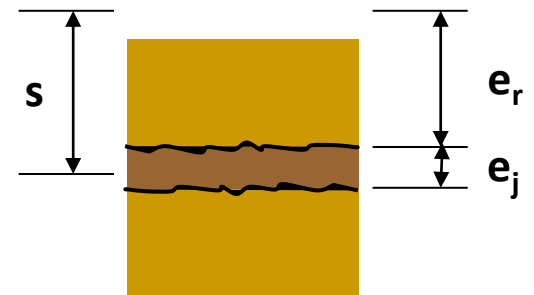
$$\sigma = \sigma_r = \sigma_j$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_j$$



Orthotrope de révolution

Joint d'épaisseur non nulle



$$\frac{1}{E_n} = \frac{V_r}{E_r} + \frac{V_j}{E_j}$$

$$\frac{1}{G_{tn}} = \frac{V_r}{G_r} + \frac{V_j}{G_j}$$

σ/ε



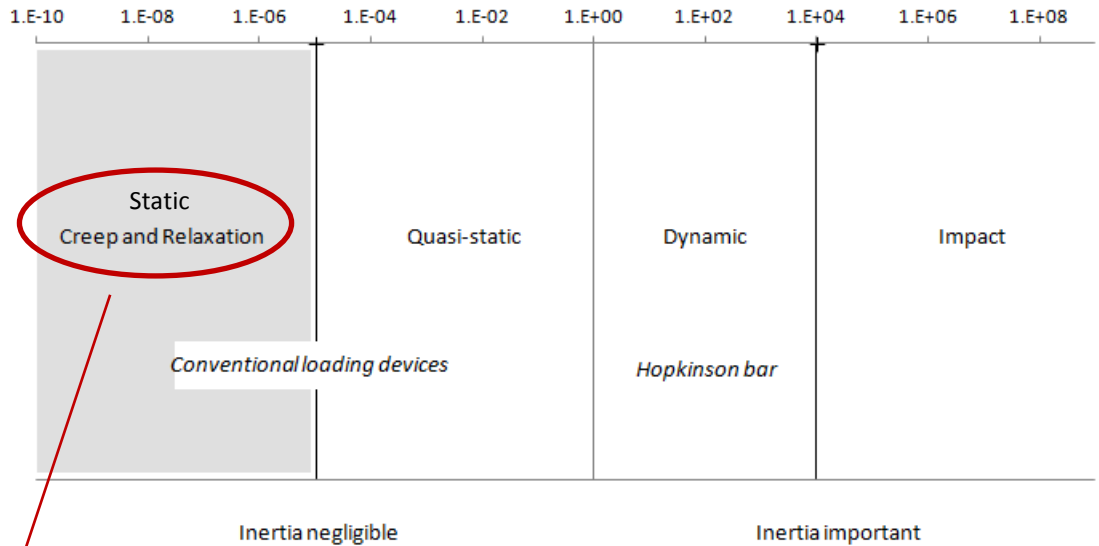
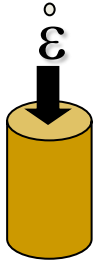
Roche

Joint

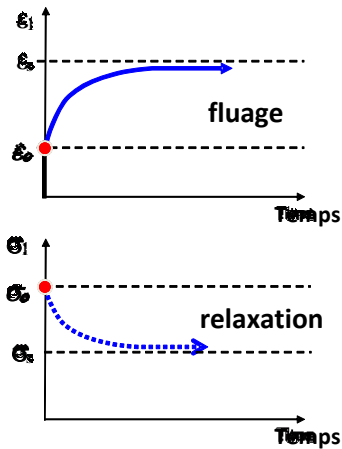
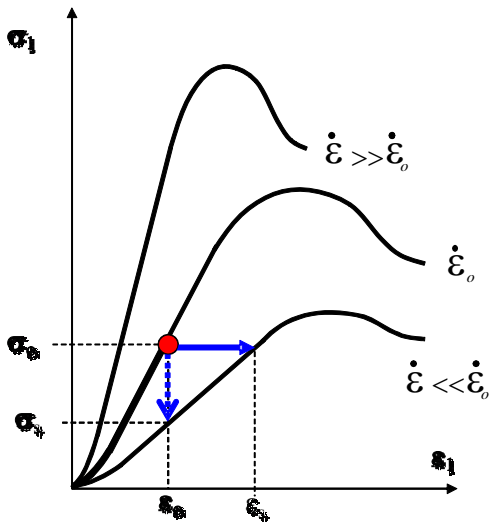
Les Effets du Temps

Vitesse de Sollicitation, Réponse, Vieillessement

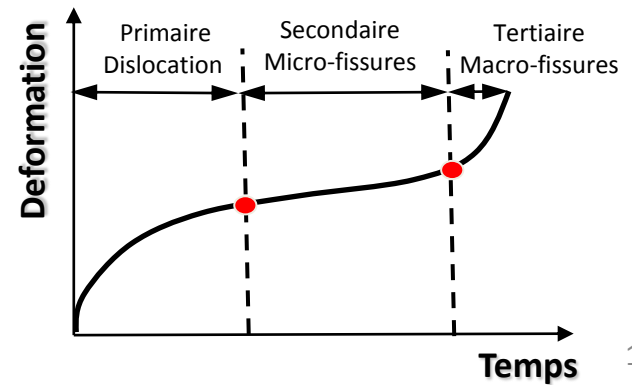
- La sollicitation



- La réponse



- Le vieillissement: temps long (réaction chimique, corrosion sous contraintes...)



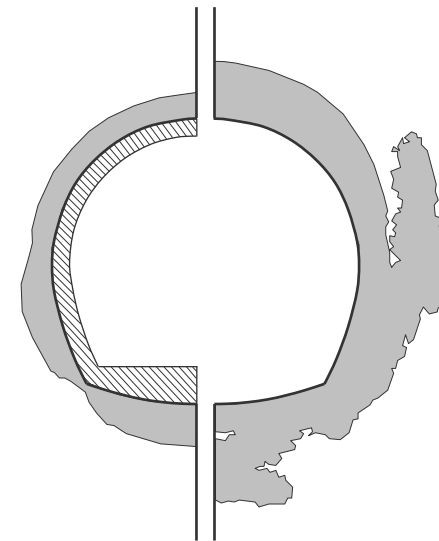
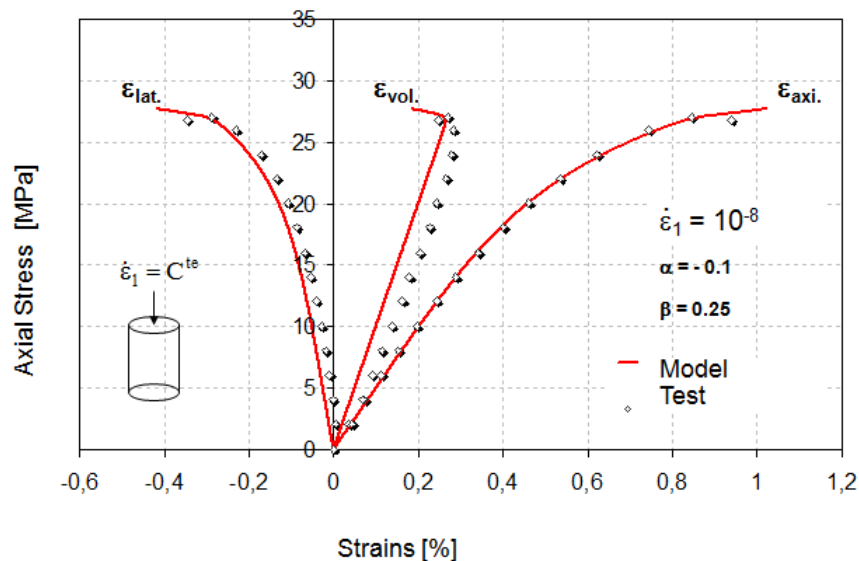
Viscoplasticité et Endommagement Continu

Théorie de la contrainte effective (Kachanov, 1958); Concept de la surcontrainte (Perzyna, 1966, Lemaitre, 1996)

$$\boldsymbol{\sigma} \rightarrow \tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{1-D} \quad \tilde{\boldsymbol{\sigma}}, \text{ contrainte effective; } D, \text{ paramètre d'endommagement isotrope } (0 < D < 1).$$

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{vp} = \frac{\partial \Omega}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{ij}} = \frac{3}{2} \frac{1}{1-D} \left[\frac{\boldsymbol{\sigma}_{eq}}{(1-D) K p^{1/M}} \right]^N \frac{\mathbf{S}}{\boldsymbol{\sigma}_{eq}}$$

Ω , potentiel viscoplastique K , N and M paramètre du modèle
 $\boldsymbol{\sigma}_{eq}$ contrainte de von Mises stress, \mathbf{S} , déviateur des contraintes



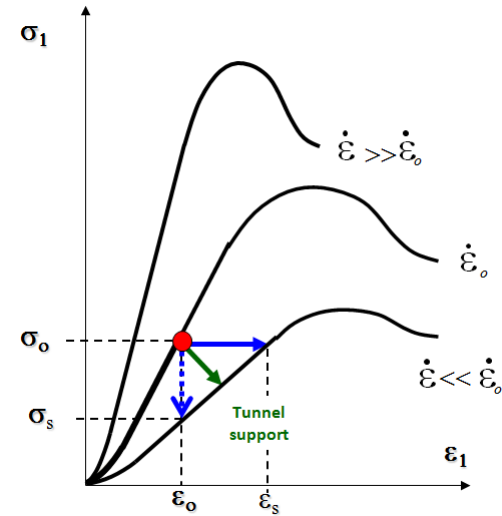
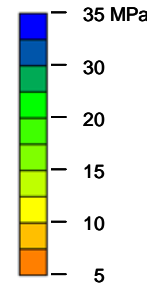
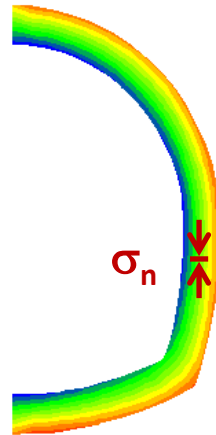
Exemple d'extension de la Zone endommagée (EDZ) autour d'un tunnel 300ans après l'excavation

Comportement différé d'une excavation souterraine

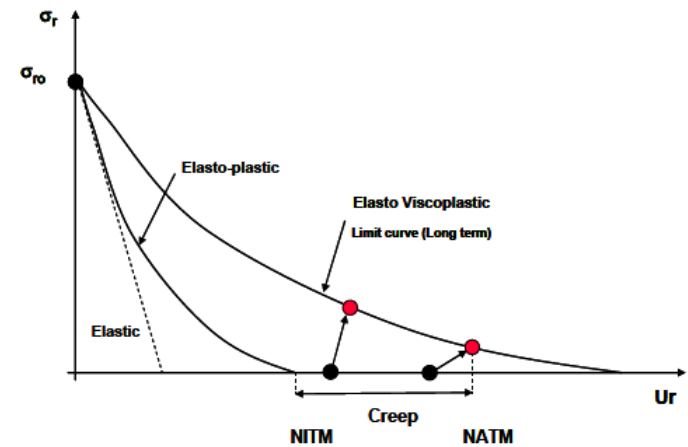
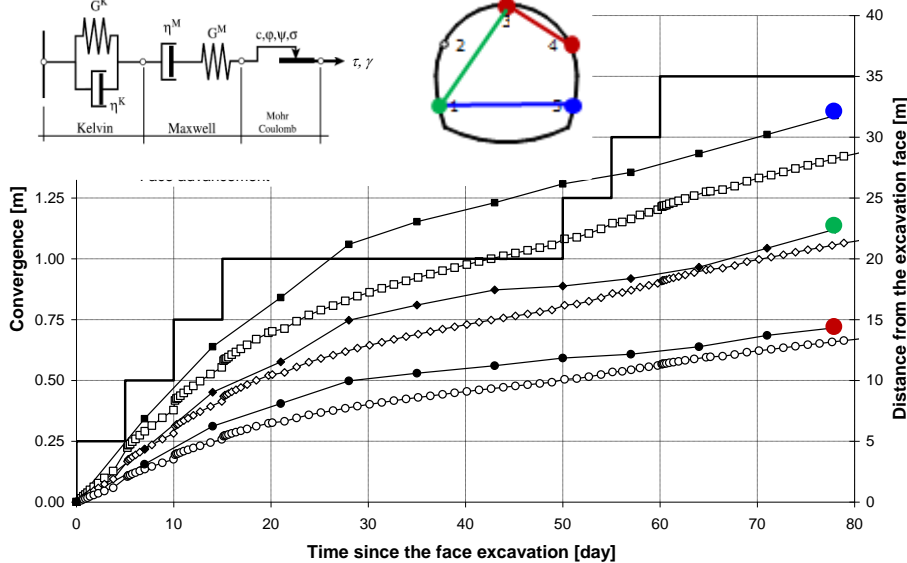
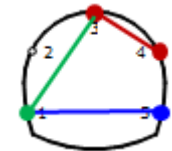
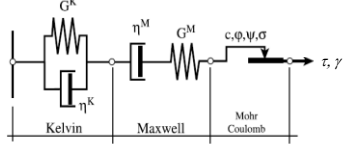


Galerie de Saint Martin La Porte (TELT)

Contrainte dans le revêtement
80 jours après sa pose



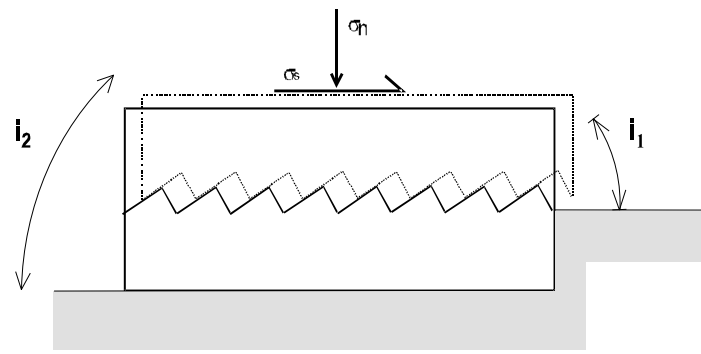
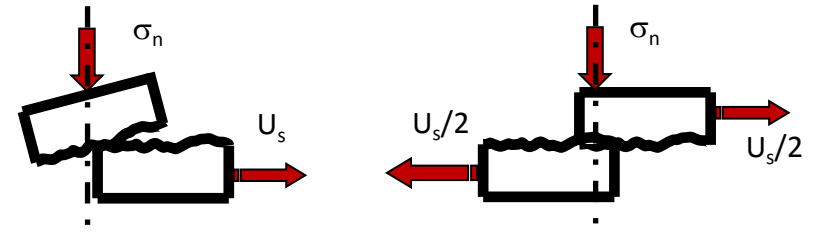
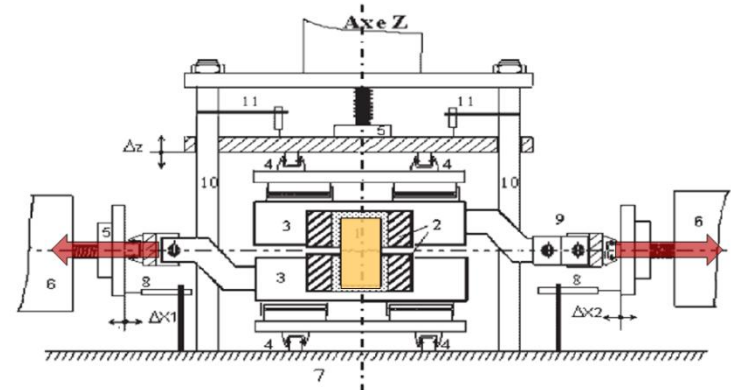
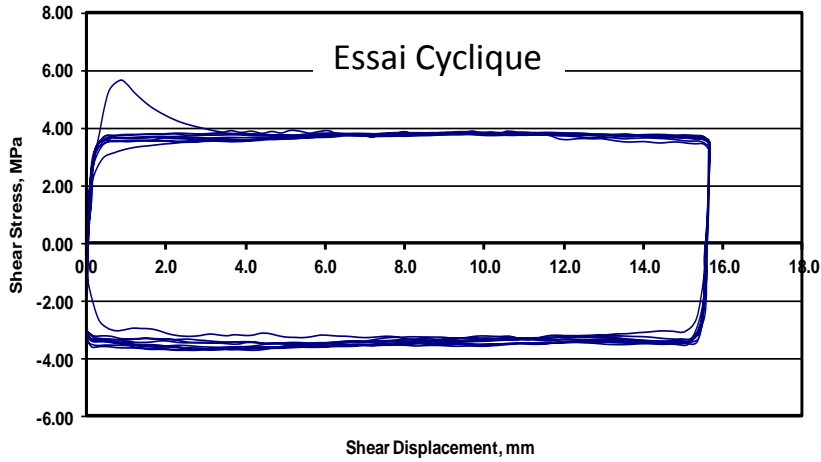
Modèle Visco-plastique CVISC



Panet, Sulem (1986)

Les Discontinuités

Discontinuités et Essais de Cisaillement Direct

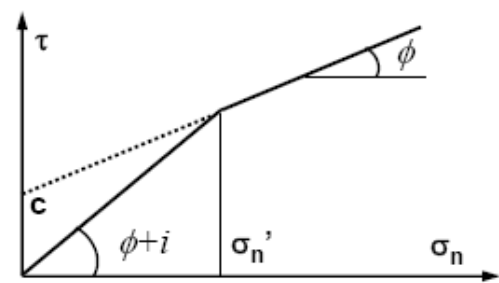


Matrice de rigidité

$$\begin{bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & k_{ns} \\ k_{sn} & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_n \\ u_s \end{bmatrix}$$

Boite de cisaillement conventionnelle : rotation

BCR3D : pas de rotation



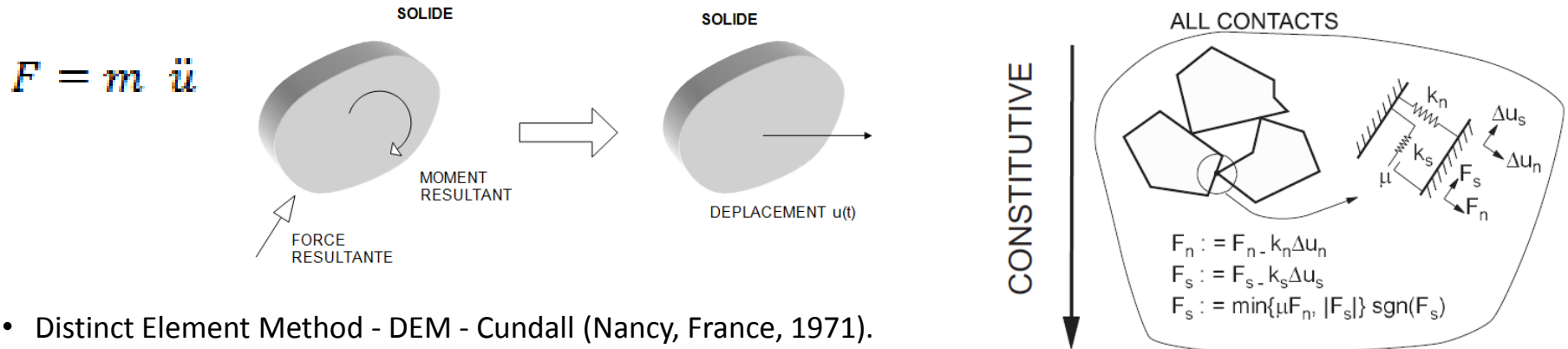
$$\sigma_s = \sigma_n \tan(\phi_j + i)$$

$$\sigma_s = \sigma_n \tan \phi_r + c_r$$

Patton (1966)

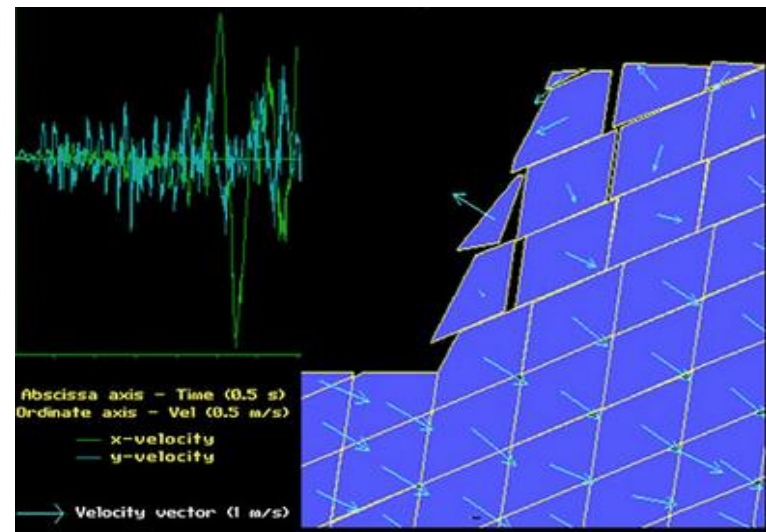
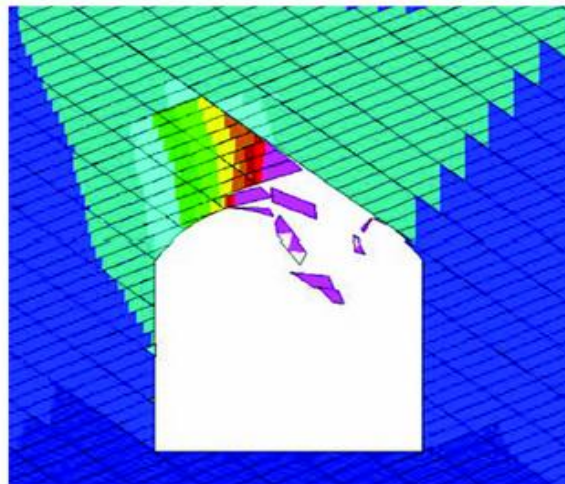
Modélisation des Milieux Discontinus par Eléments Distincts

Equation du mouvement, conservation de l'énergie



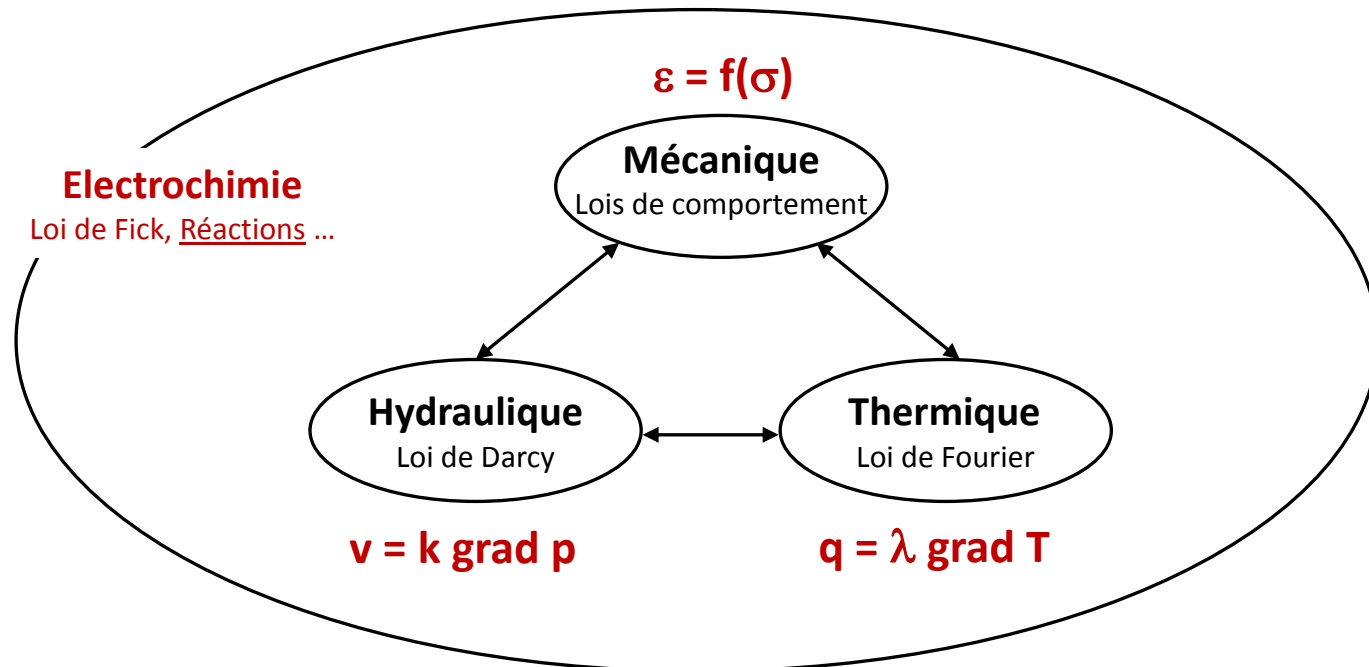
- Distinct Element Method - DEM - Cundall (Nancy, France, 1971).
- Discontinuous Deformation Analysis – DDA - Shi, G.-H. (1989)

UDEC - 3DEC - Itasca



Les Couplages Multiphysiques

Couplages Multiphysiques (THM-C)

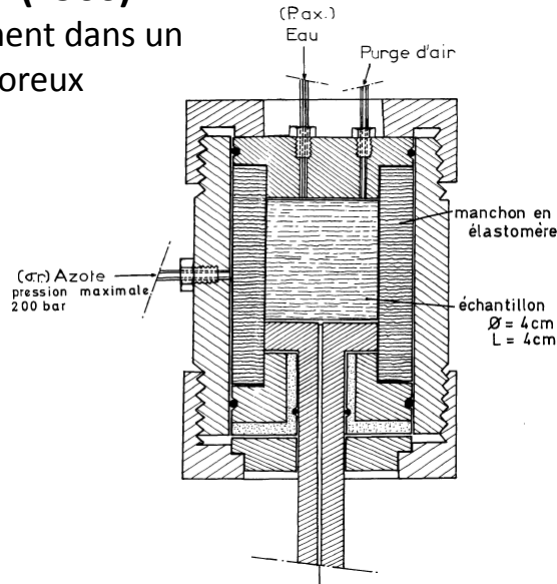


Temps caractéristique

Couplage Hydromécanique

Bernaix (1966)

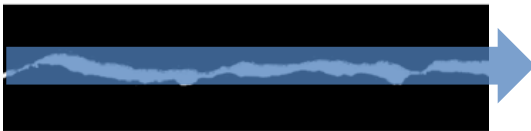
Ecoulement dans un milieu poreux



Perméamètre sous contraintes

Claude Louis (1967)

Milieu fracturé - écoulement laminaire dans une fissure



$$q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{l}$$

Biot (1941):

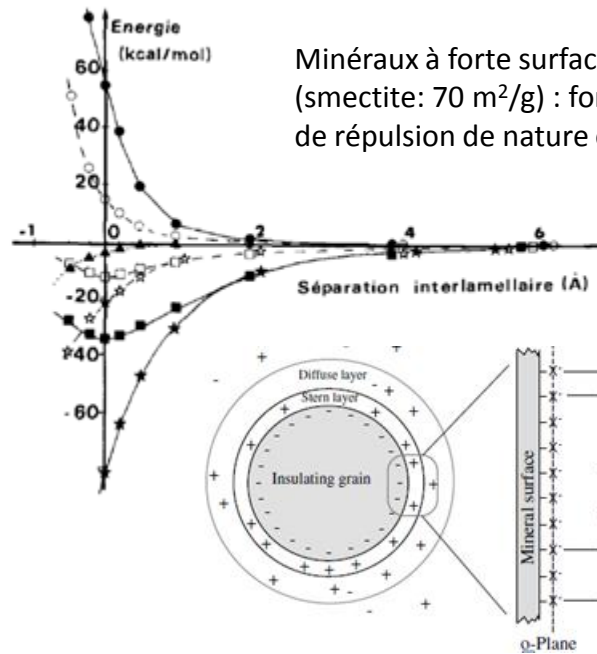
$$\sigma = \sigma' + \alpha p$$

p: pression de pore

α: coefficient de Biot

(compressibilité des grains: contact de Hertz)

La pression de pore se développe dans l'eau libre



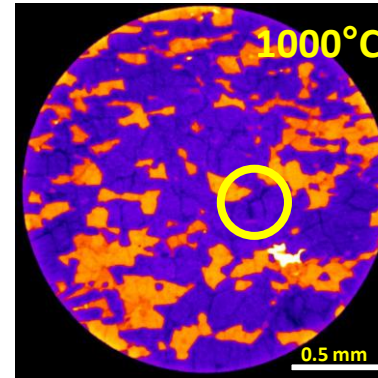
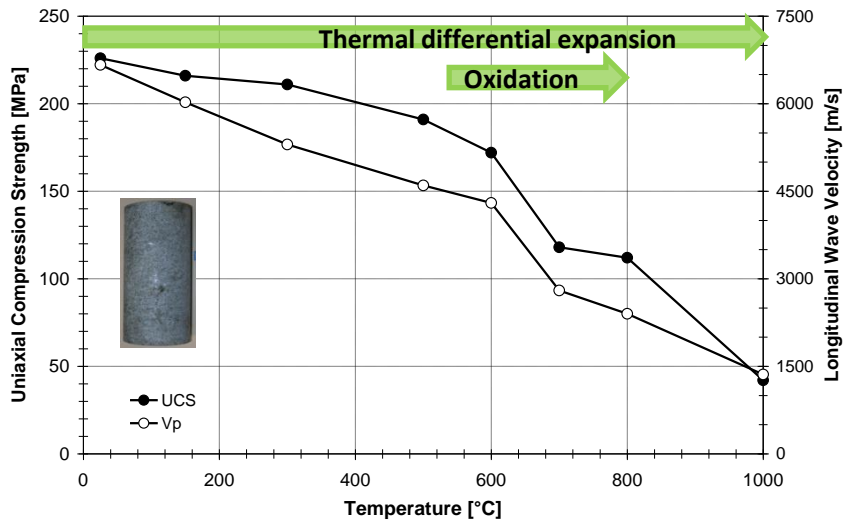
Minéraux à forte surface spécifique (smectite: 70 m²/g) : forces d'attraction et de répulsion de nature électrochimique.

Revil et al. 2006

Dans les roches à forte proportion d'argile, l'utilisation du concept de la pression effective est sujet à caution

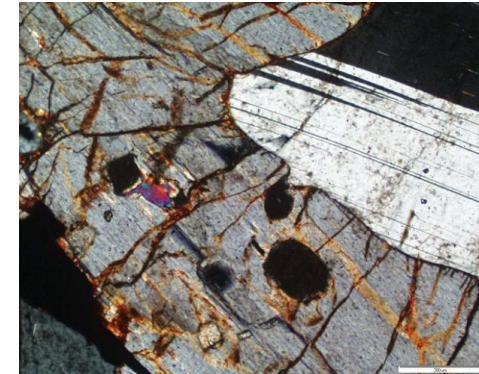
Endommagement et Fracturation Thermique

Fortes températures (essais sur Gabbro)



Tomographie rayon X,
Desrues, 3SR Grenoble

Keshavarz et al. 2010

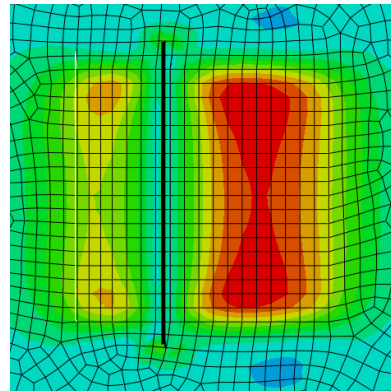


Oxydation diffuse des pyroxènes
à la température de 800°C
(Magnetite) $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ (Hématite)

Refroidissement du Sel – Mine de Varangéville



Billiotte et Tessier, MinesParisTech, INERIS, Storengy



Contrainte de traction direction X
Modélisation XFEF

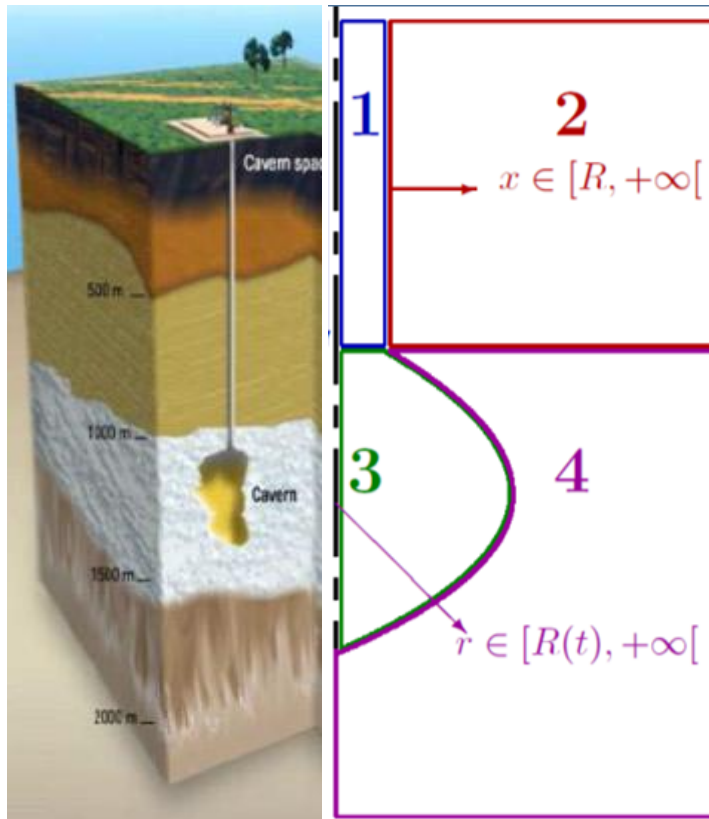


Couplages en Situation Complexe

Couplages multiphysiques et stabilité de failles (Sulem, ISRM online Lecture 2015)

Stockage souterrain d'énergie: air comprimé, hydrogène...

(Rouabhi, Tijani, Hadj-Hassen)



- 1 – Ecoulement fluide compressible
- 2 – Conduction thermique massif hétérogène
- 3 – Evolution thermodynamique d'un système ouvert
- 4 – Thermo-élastoviscoplasticité en grandes déformations

DEMETHER : résolution de problèmes thermodynamiques liés aux stockages d'énergie dans des cavités souterraines:

Changements de phases

Stockage CO₂, congélation,...

Conclusion

Le futur...

... le sujet de cette journée !

Merci de votre attention