

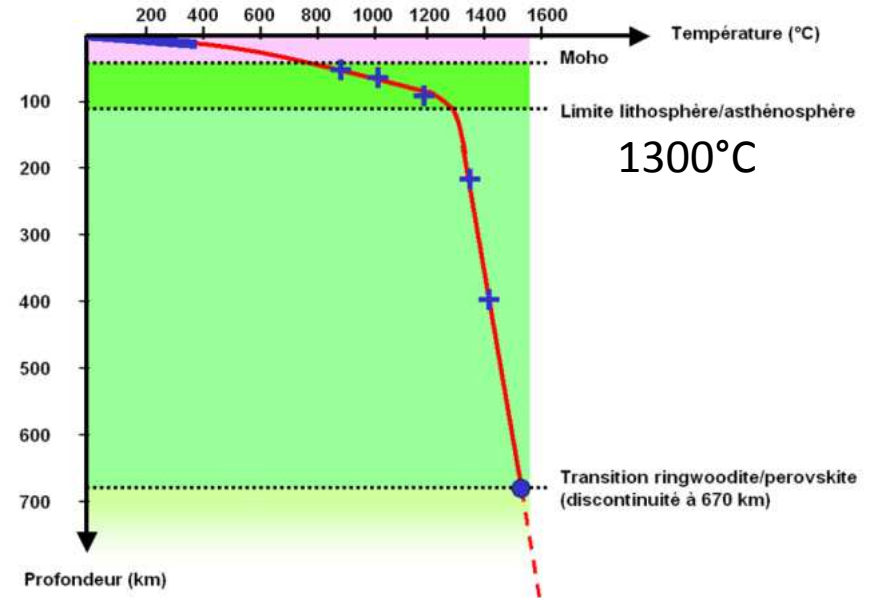
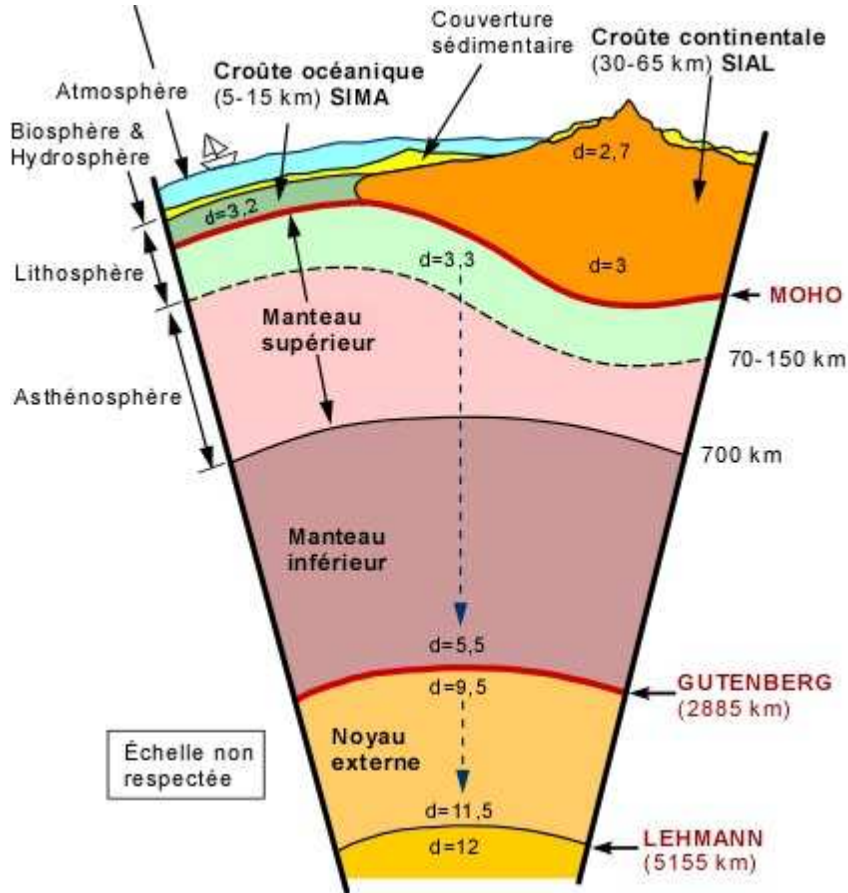
STD – Les déformations de la lithosphère

Chapitre 1 – La rhéologie de la lithosphère



Source : <http://blog.univ-angers.fr/rabinlicoispilletplanchenault/>

La lithosphère



- Gradient superficiel mesuré dans les mines et forages
- Données tirées des enclaves mantelliques
- Température au niveau de la transition ringwoodite/perovskite

1. Déformations et contraintes

1.1. Les déformations continues ou discontinues

Photo 1



Photographie : Pierre Thomas

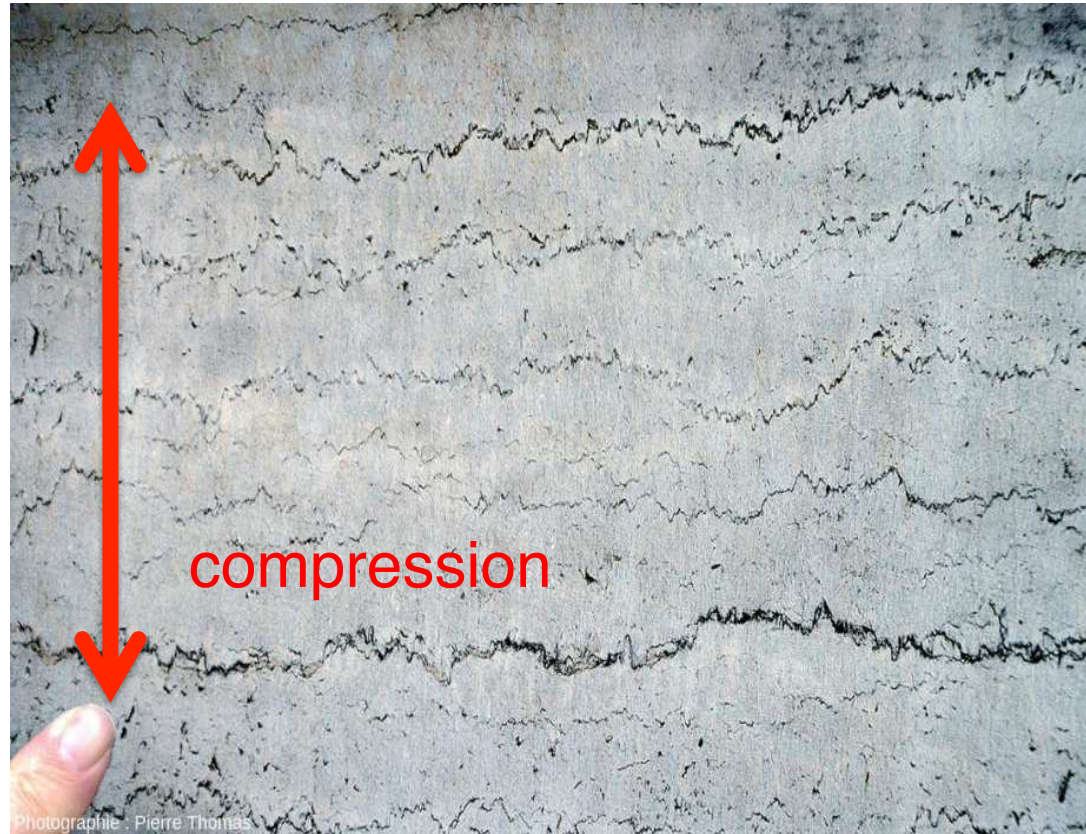
Photo 2



Photo 3



Photo 4



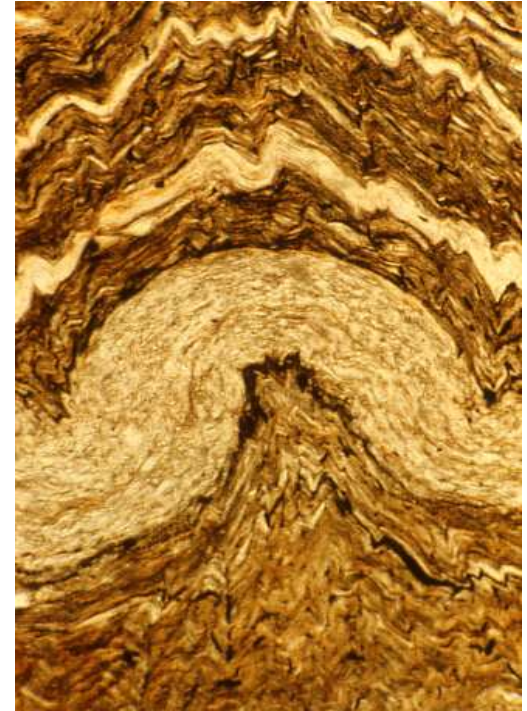
Réponses

- Photo 1 = faille normale : déformation discontinue
- Photo 2 = pli : déformation continue
- Photo 3 = fentes de tension : déformation discontinue
- Photo 4 = stylolithes: déformation discontinue

1. Déformations et contraintes

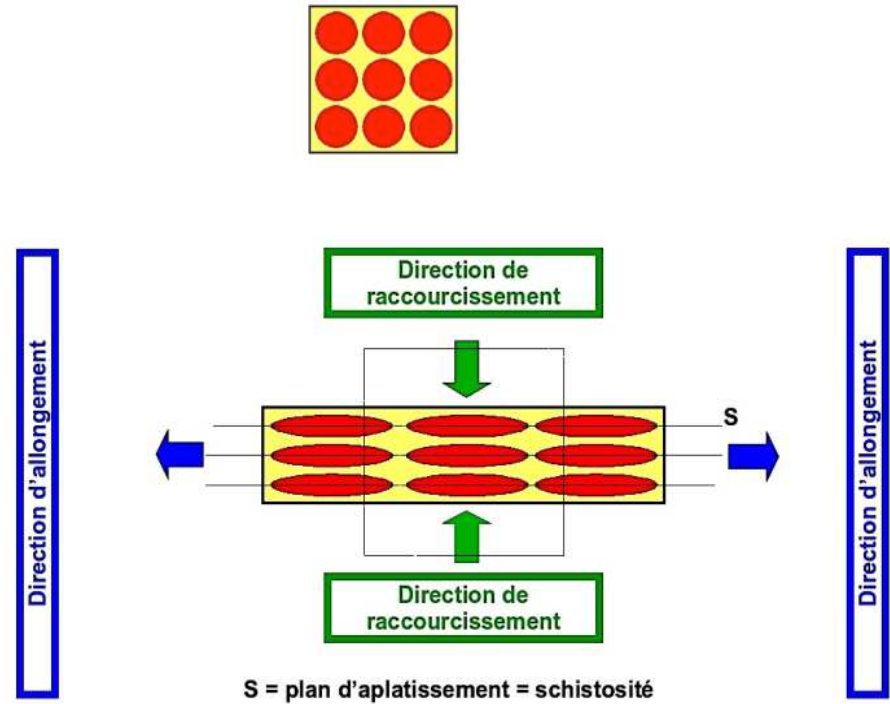
1.2. Les déformations continues homogènes ou hétérogènes

Photos 5 et 6

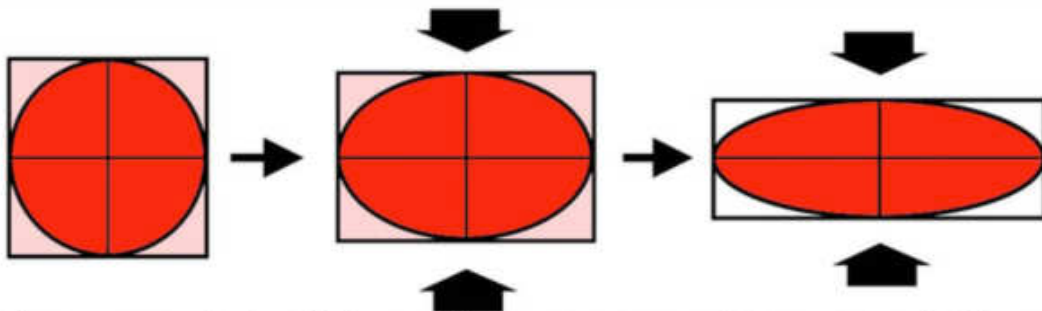
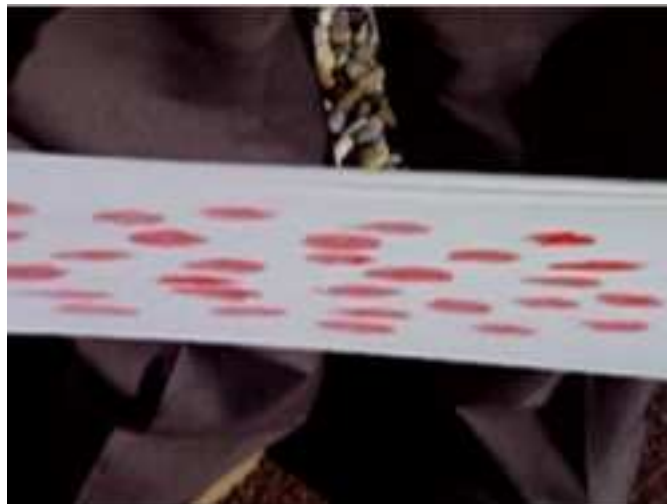
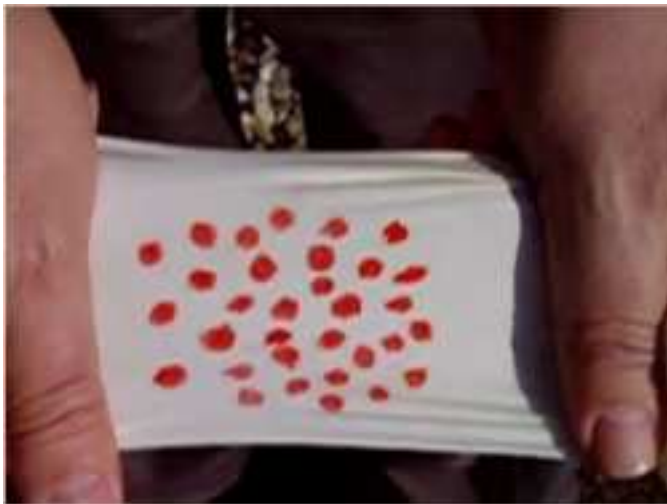


Les droites sont devenues des courbes : la déformation est **hétérogène**

Photo 7 : cisaillement pur, déformation homogène

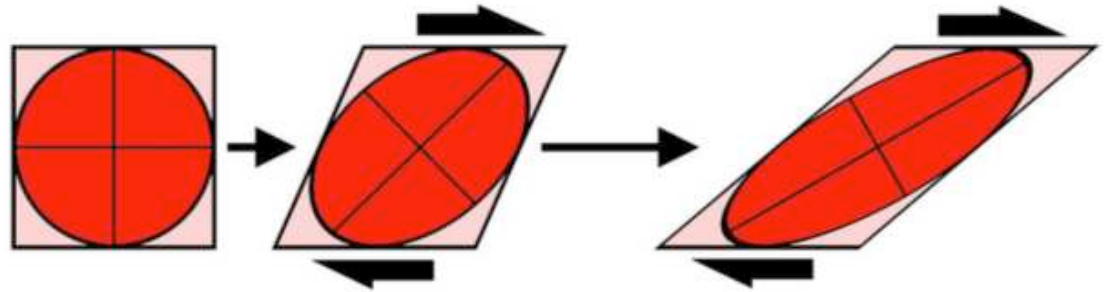


Modélisation



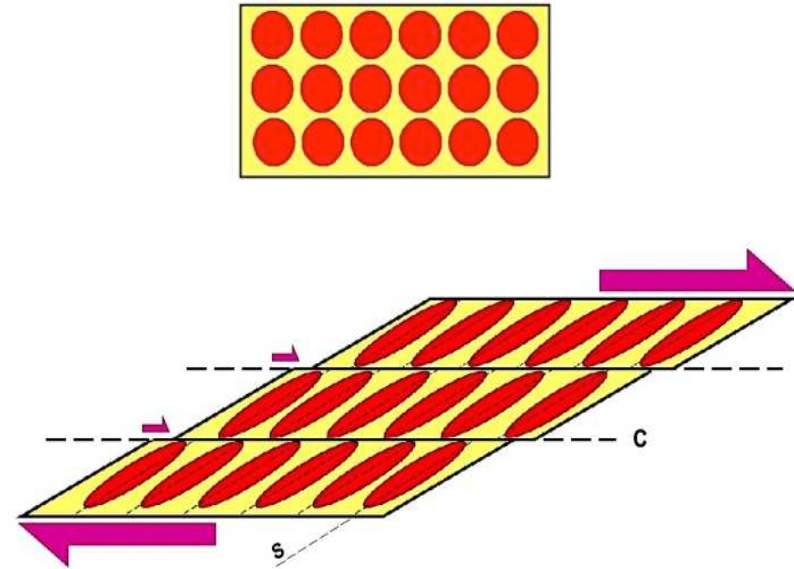
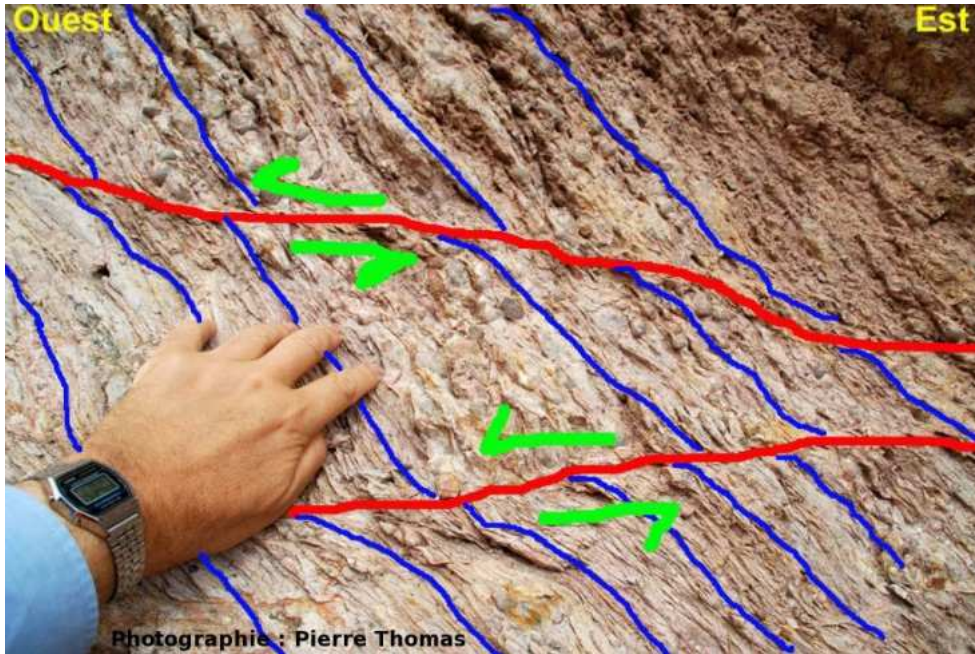
Les axes de la déformation conservent leur orientation au fur et à mesure de l'aplatissement : **déformation coaxiale**

Photo 8 : cisaillement simple, déformation homogène



Les axes de la déformation (de l'ellipse) tournent au fur et à mesure du cisaillement : **déformation non-coaxiale**

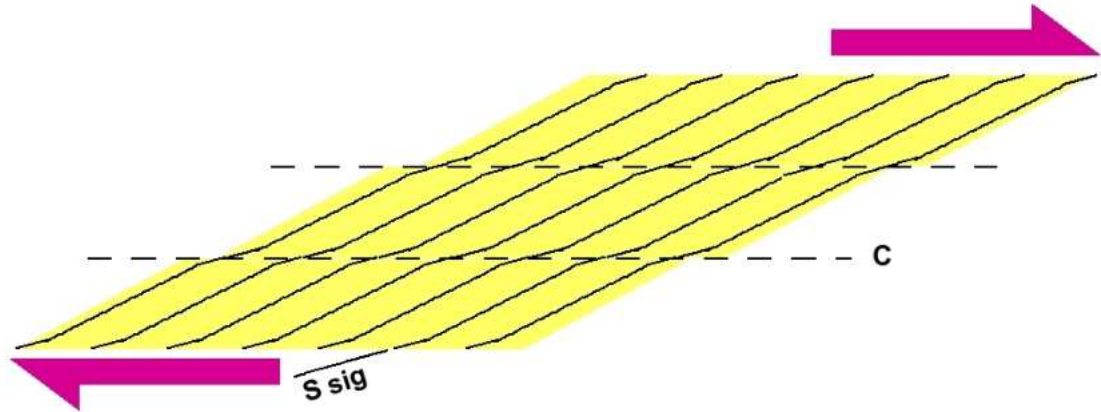
Photo 8 : cisaillement simple, déformation homogène



Modélisation



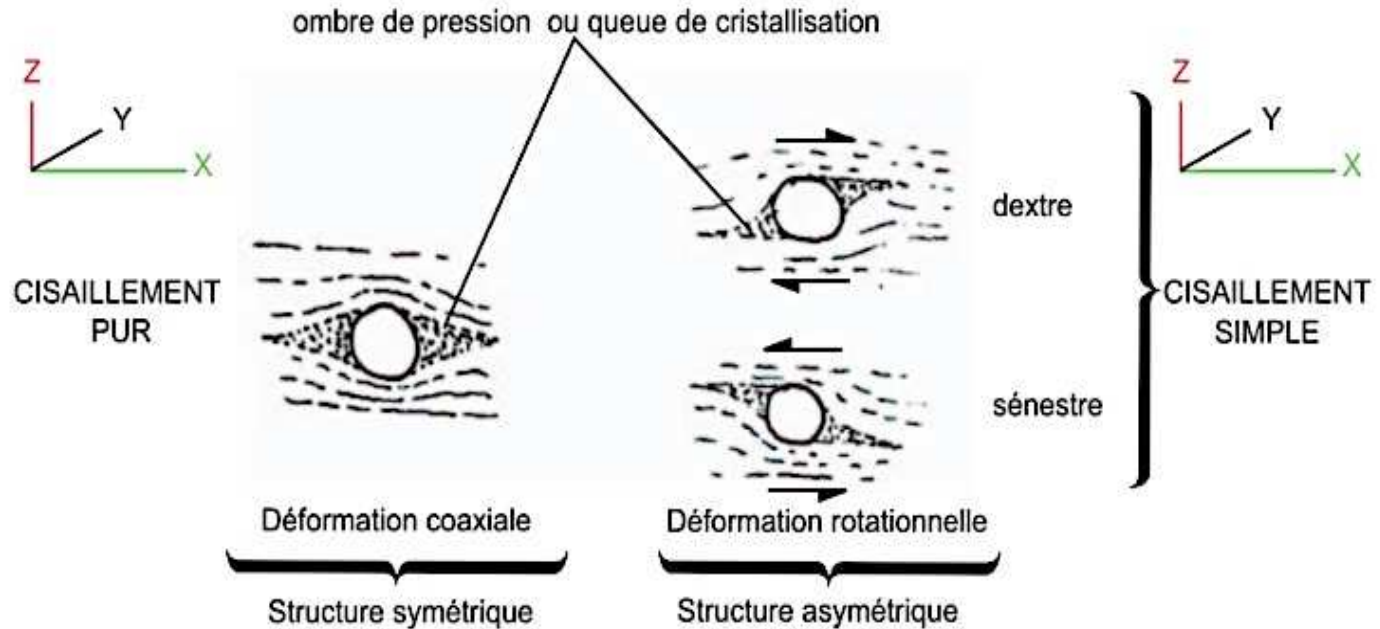
Déformation par cisaillement simple
Déformation importante, partiellement discontinue :
plans C et schistosité sigmoïde



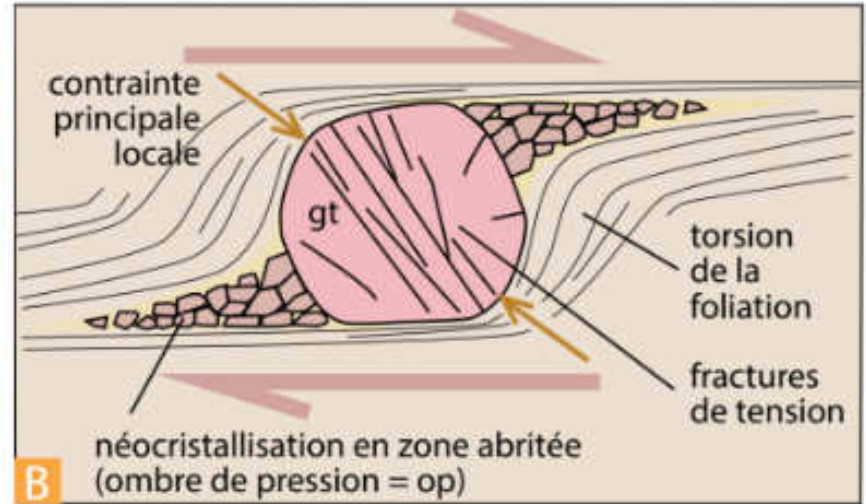
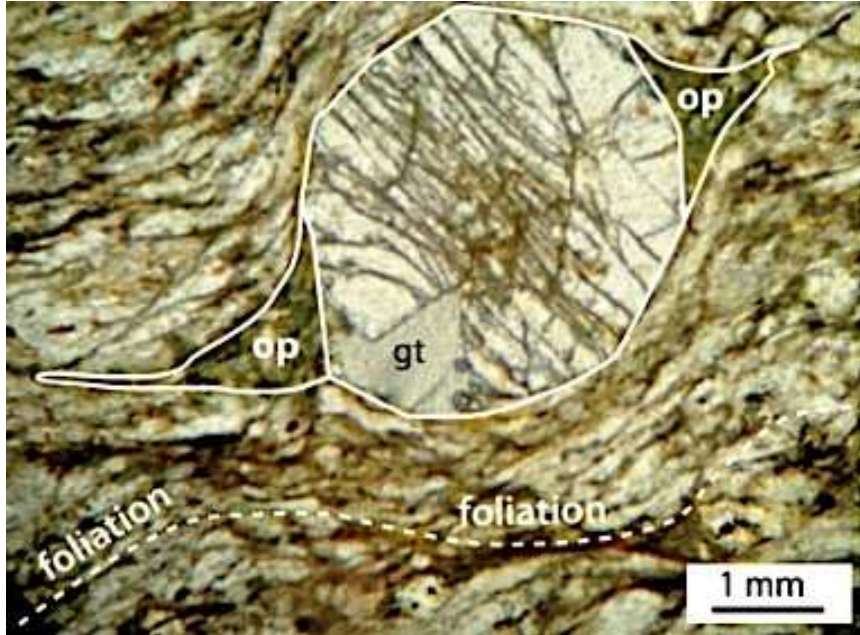
S sig = plan d'aplatissement cisailé = schistosité sigmoïde
C = plan de cisaillement

Cisaillement simple ou pur ?

À l'échelle du minéral



Cisaillement simple



Schistes bleus à grenat (Grèce)

Quels cisaillements ?



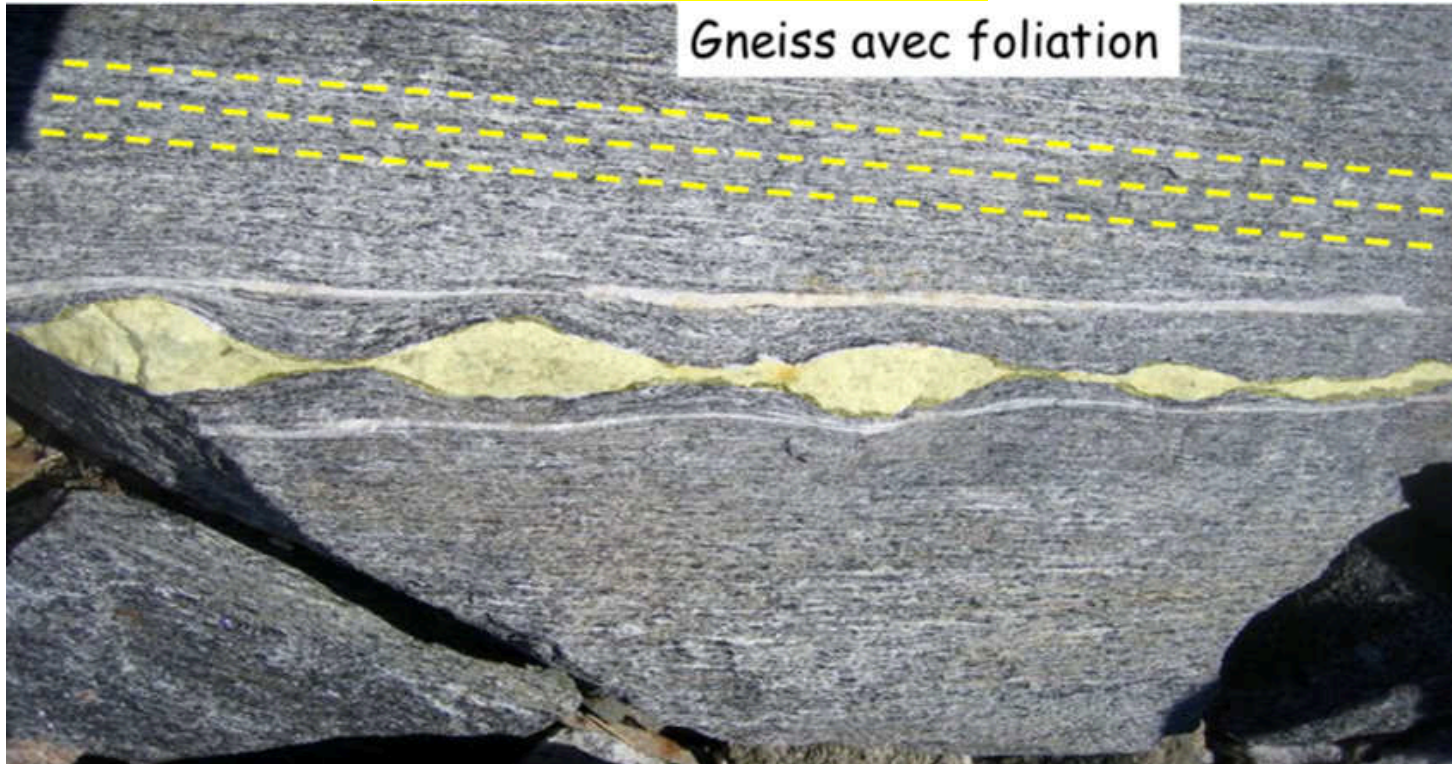
Cisaillement simple dextre



Cisaillement simple senestre

Cisaillement simple ou pur ?

À l'échelle de la roche



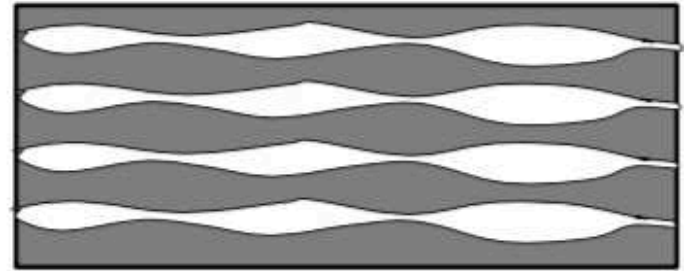
Cisaillement simple ou pur ?

À l'échelle de la roche

Phénomène de **boudinage** : **cisaillement pur**

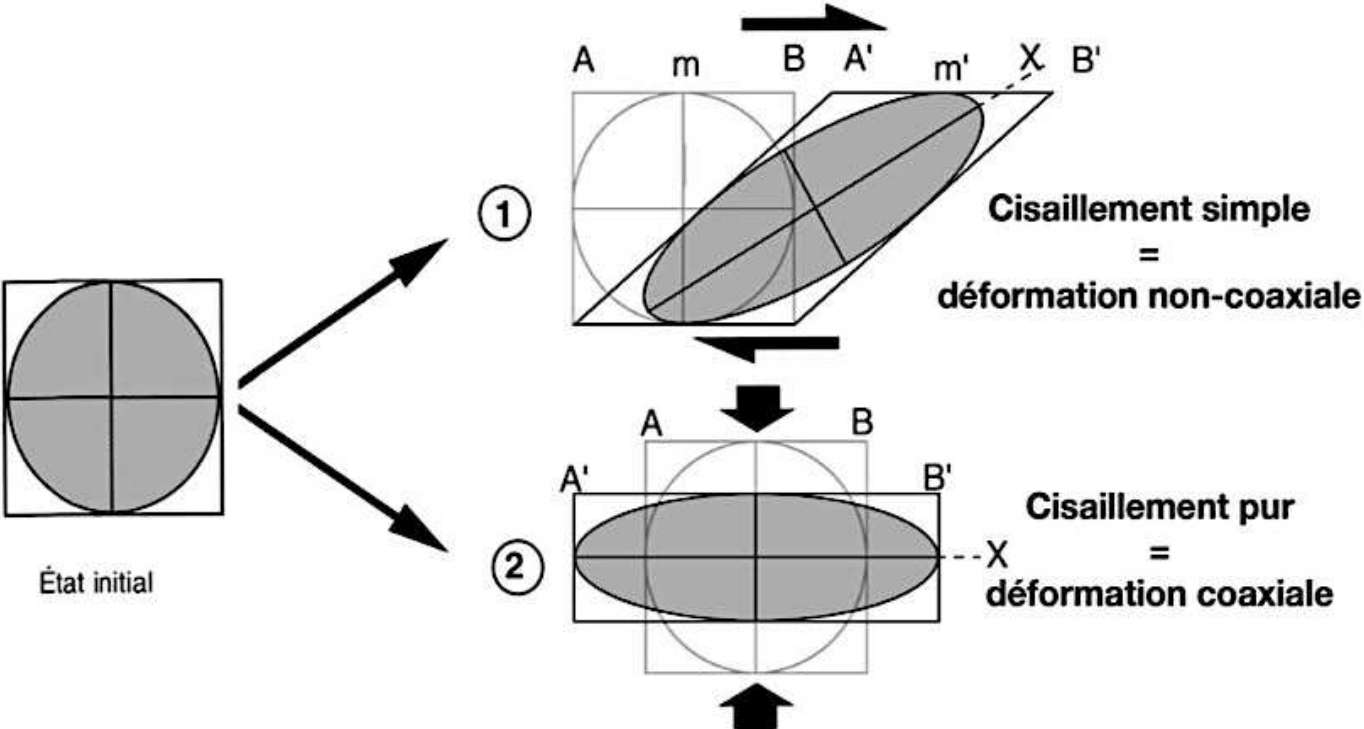


État initial



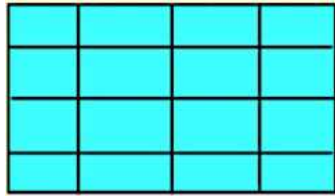
État final

BILAN



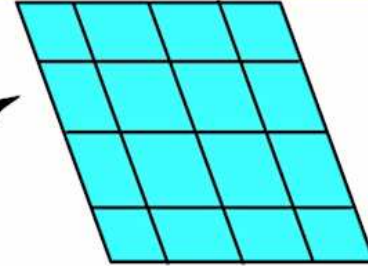
Différents types de déformation

Cisaillement
pur



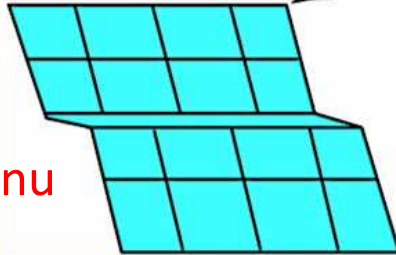
homogène
aplatissement

Cisaillement
simple continu

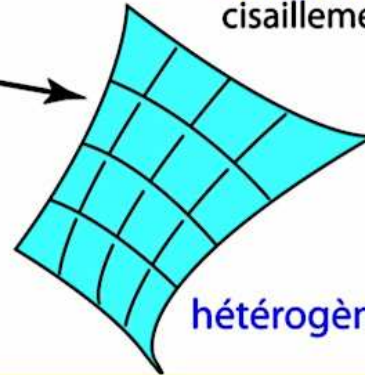


homogène
cisaillement

Cisaillement
simple discontinu



localisée
cisaillement



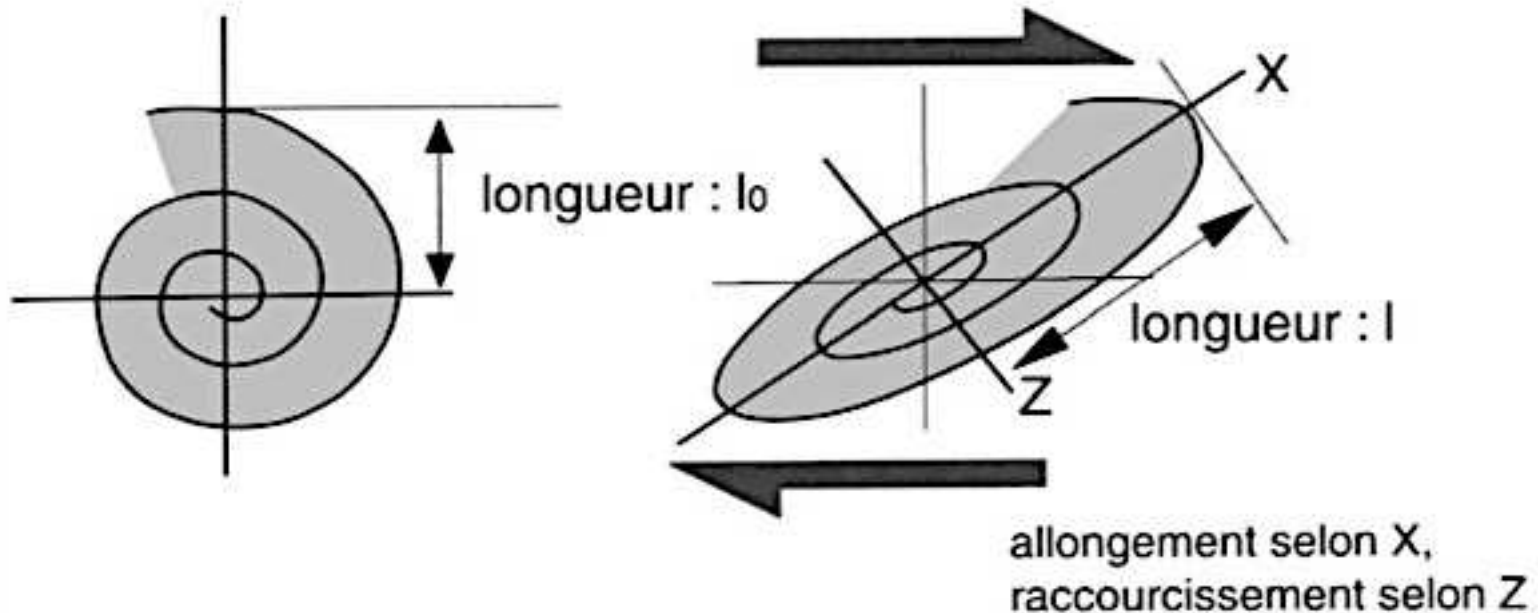
hétérogène

La déformation finie peut se décomposer en étapes (= incréments) de deux types comportant une part de rotation (cisaillement simple) ou non (cisaillement pur).

1. Déformations et contraintes

1.3. L'ellipsoïde des déformations

La déformation d'un fossile

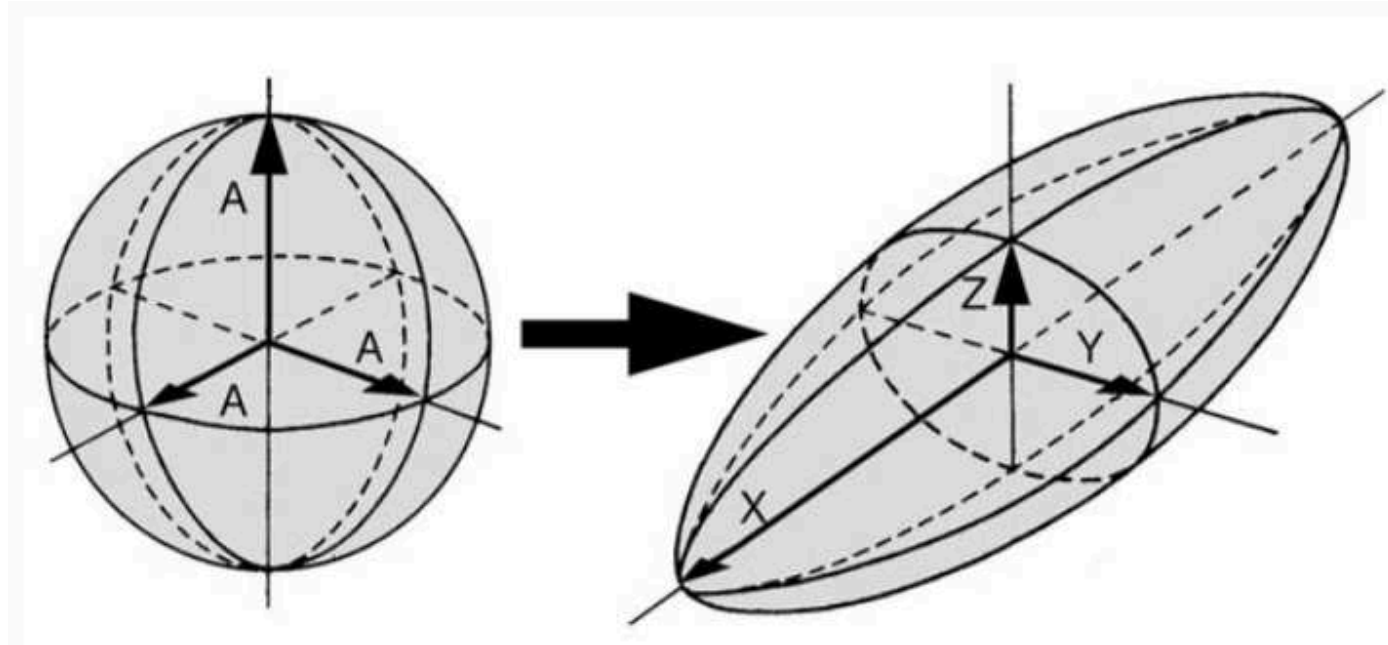


Ici, on n'a que 2 dimensions.

X = axe d'allongement maximal

Z = axe de plus fort raccourcissement

Ellipsoïde des déformations en un point



Quantifier la déformation

Soit l_f la longueur finale et l_0 la longueur initiale d'un objet

On peut quantifier

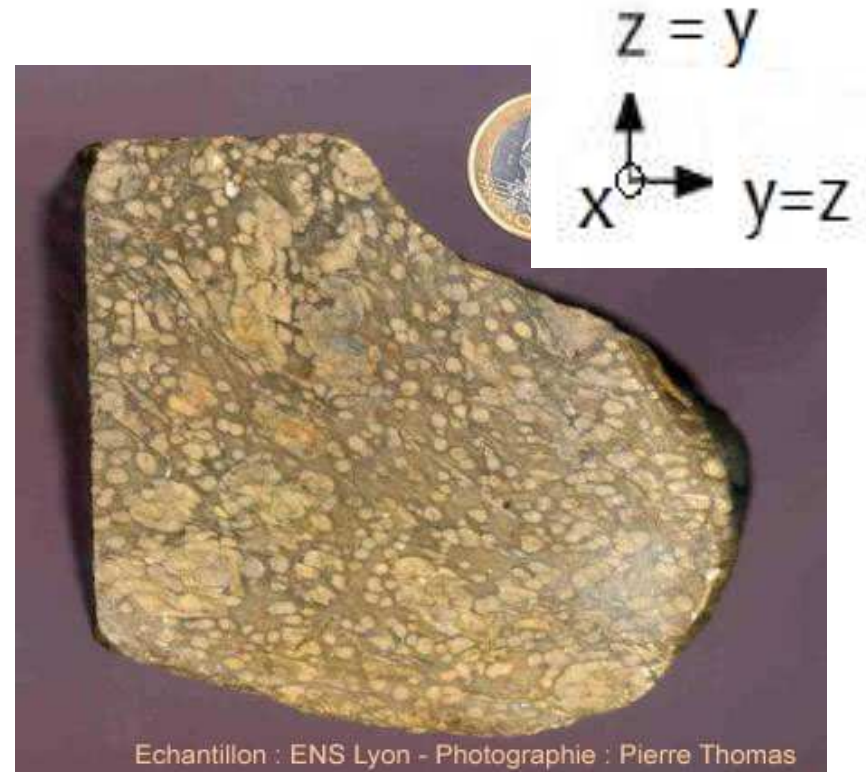
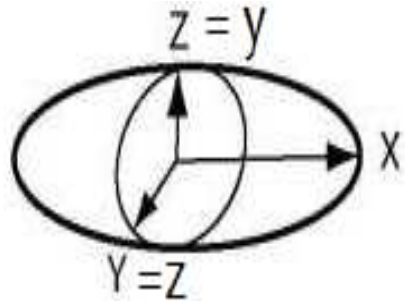
- l'allongement relatif ε :

$$\varepsilon = \frac{(l_f - l_0)}{l_0} \times 100$$

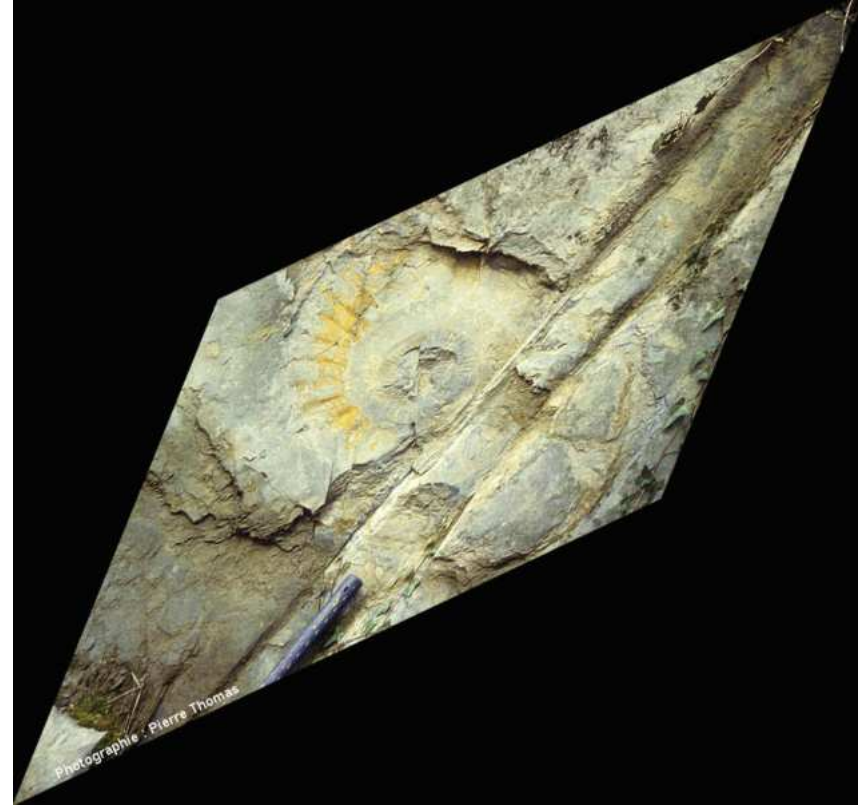
- l'étirement S

$$S = \frac{l_f}{l_0} = 1 + \varepsilon$$

Exemple du méta-conglomérat (photo 9)

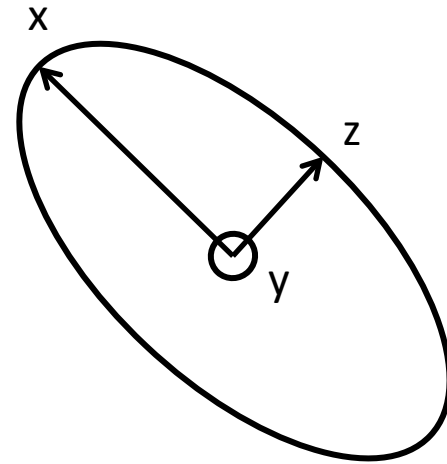
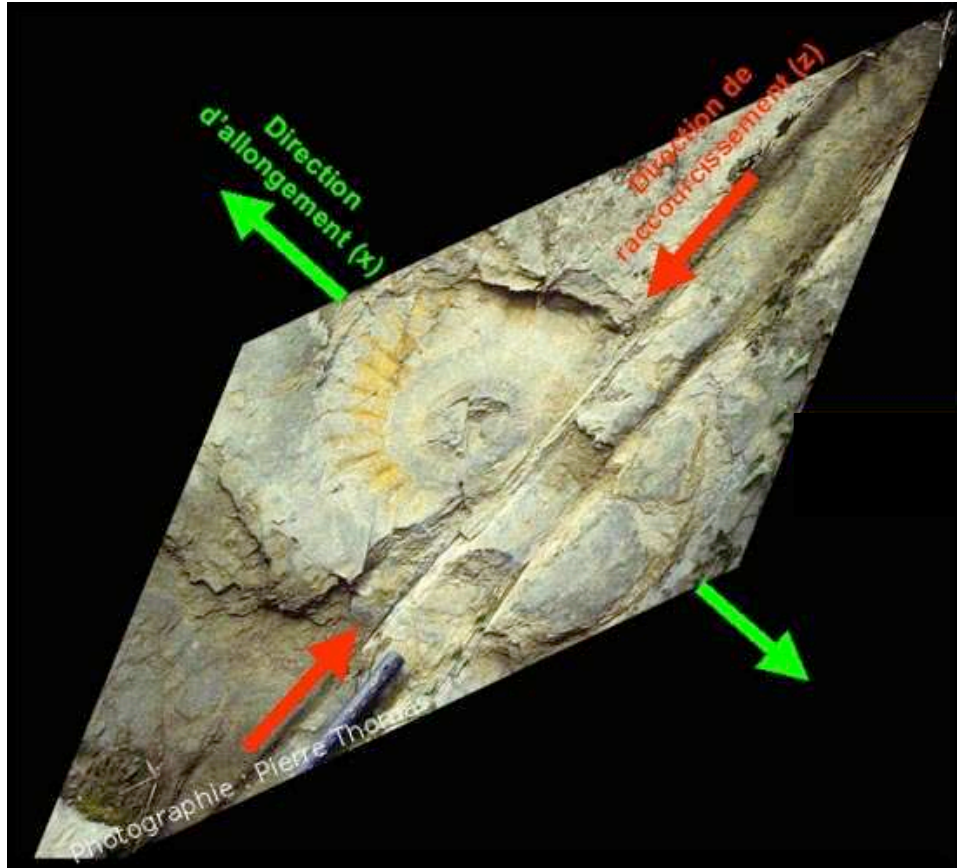


La déformation d'une ammonite (photo 10)



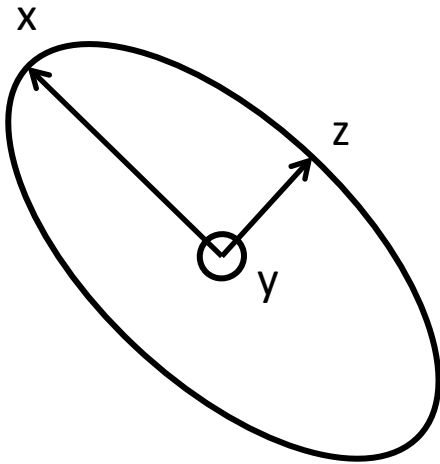
Déformation numérique de l'image pour retrouver la forme circulaire de l'ammonite

La déformation d'une ammonite



La déformation d'une ammonite

$$S = \frac{l_f}{l_0} = 1 + \varepsilon$$



Calcul des facteurs de déformation S et ε

Soit D le diamètre initial, alors :

D a été allongé jusqu'à X = 75 cm donc X = D . S

D a été raccourci jusqu'à Z = 25 cm donc Z = D/S

Donc D = Z.S

$$\Rightarrow X = Z . S^2$$

$$\Rightarrow S^2 = X/Z = 3$$

Alors S = $\sqrt{3}$ = 1,7 et D vaut 43,3 cm.

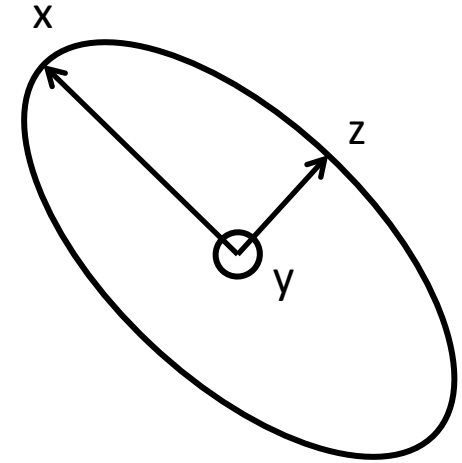
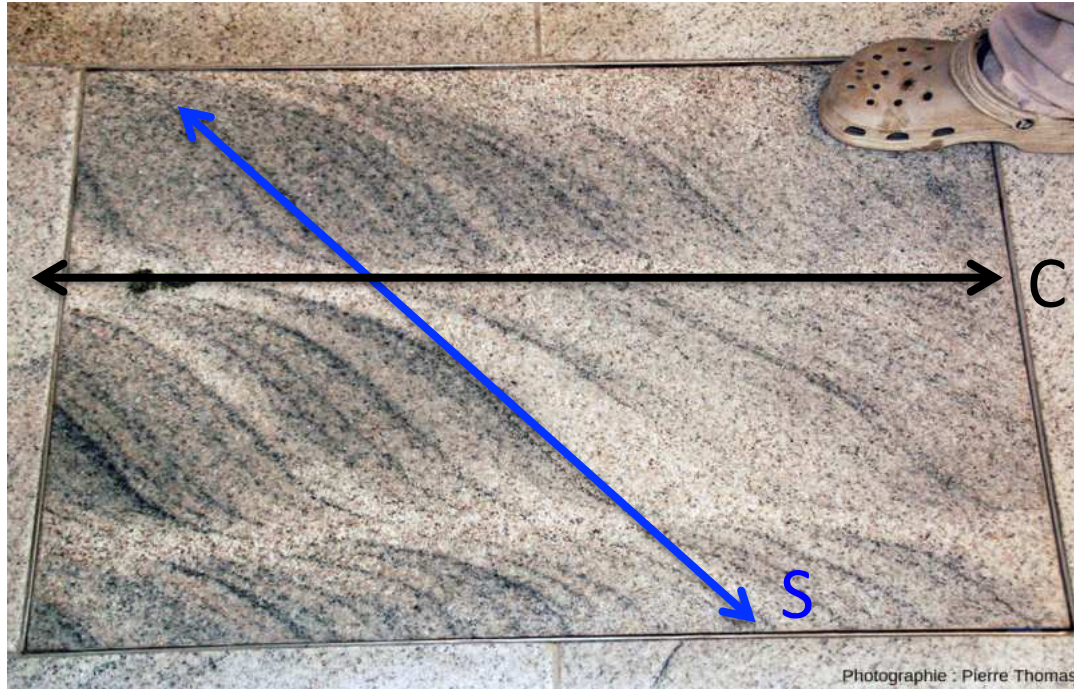
$$\varepsilon = \frac{(l_f - l_0)}{l_0} \times 100$$

$$\varepsilon = S - 1 = 0,7 \quad \text{ou} \quad \varepsilon = \frac{(75 - 43,3)}{43,3} = 0,7$$

Dalle de marbre (plan x,z) : photo 11



Dalle de marbre (plan x,z)



Cisaillement simple senestre

Orthogneiss œillé avec ombre de pression



Cisaillement pur

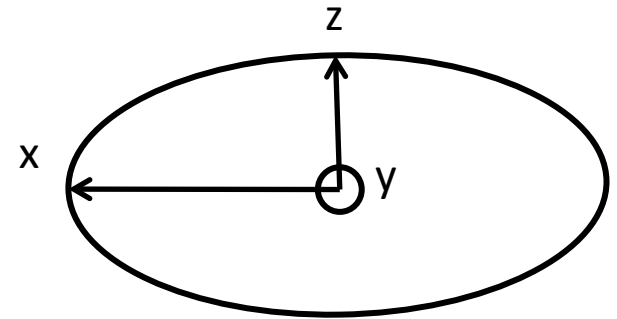


Photo 12

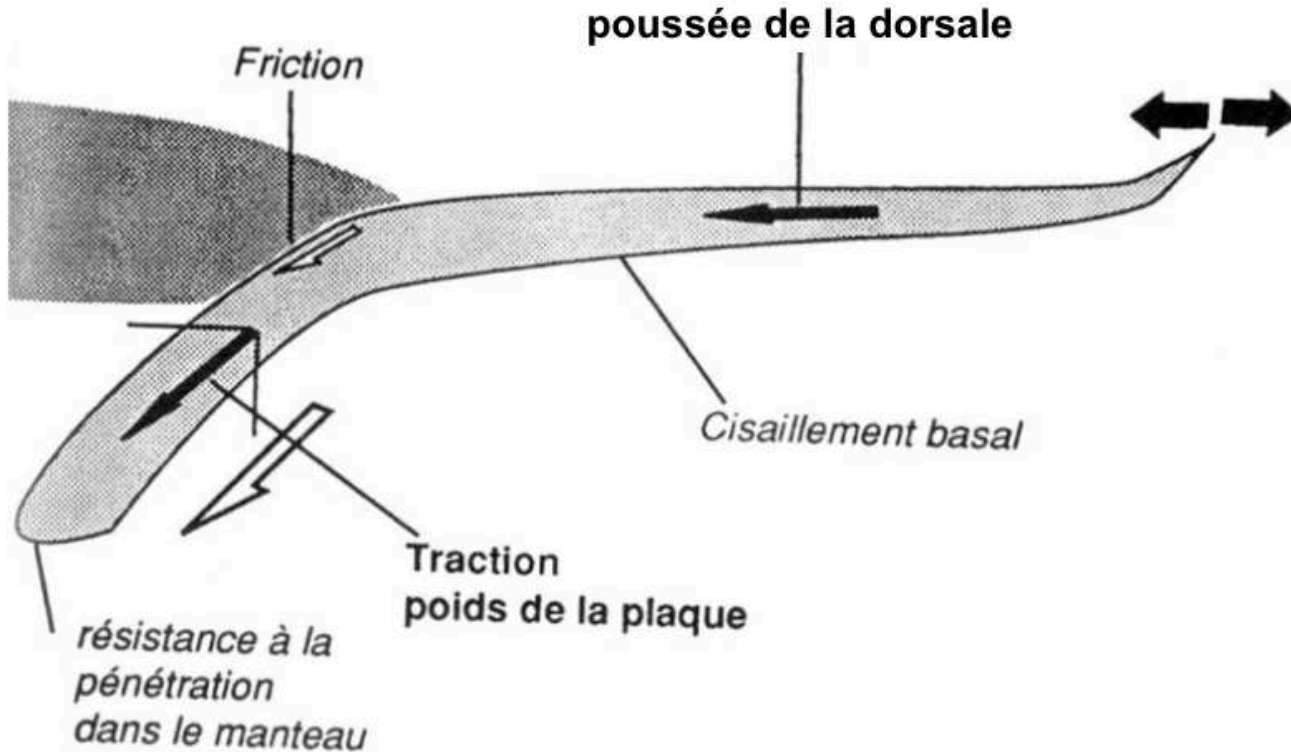
Cas particuliers

- $X > Y = Z$: l'ellipsoïde prend la forme d'un cigare. Cette situation correspond à un étirement (selon X).
- $X = Y > Z$: l'ellipsoïde a la forme d'une crêpe. Cette situation est un écrasement (selon Z).

1. Déformations et contraintes

1.4. L'ellipsoïde des contraintes

Les roches subissent des forces



Exemples de forces appliquées à une plaque

Les contraintes, des pressions orientées

Une force exercée sur une surface exerce une contrainte (*stress*)

$$\vec{\sigma} = \frac{\vec{F}}{S}$$

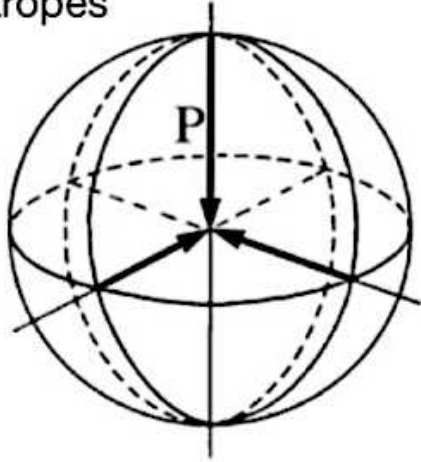
Une contrainte est homogène à une pression ; elle s'exprime donc en Pa (unité SI) ou en bar.

Une contrainte, contrairement à une pression, est un vecteur.



L'ellipsoïde des contraintes

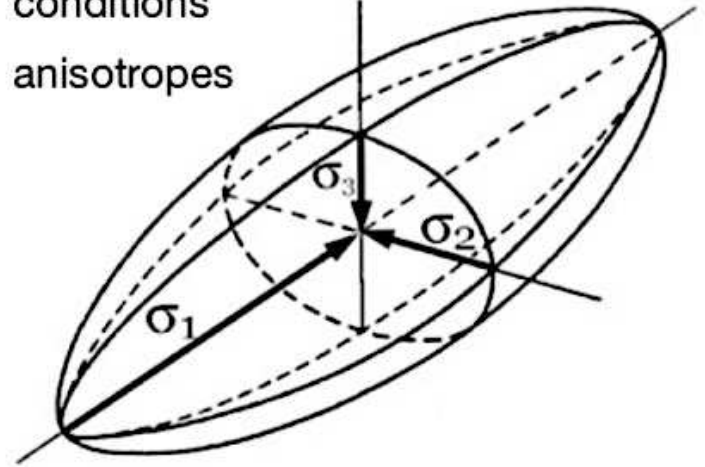
conditions isotropes



État de pression en un point

Aucune force de cisaillement dans quelque direction que ce soit.

conditions anisotropes



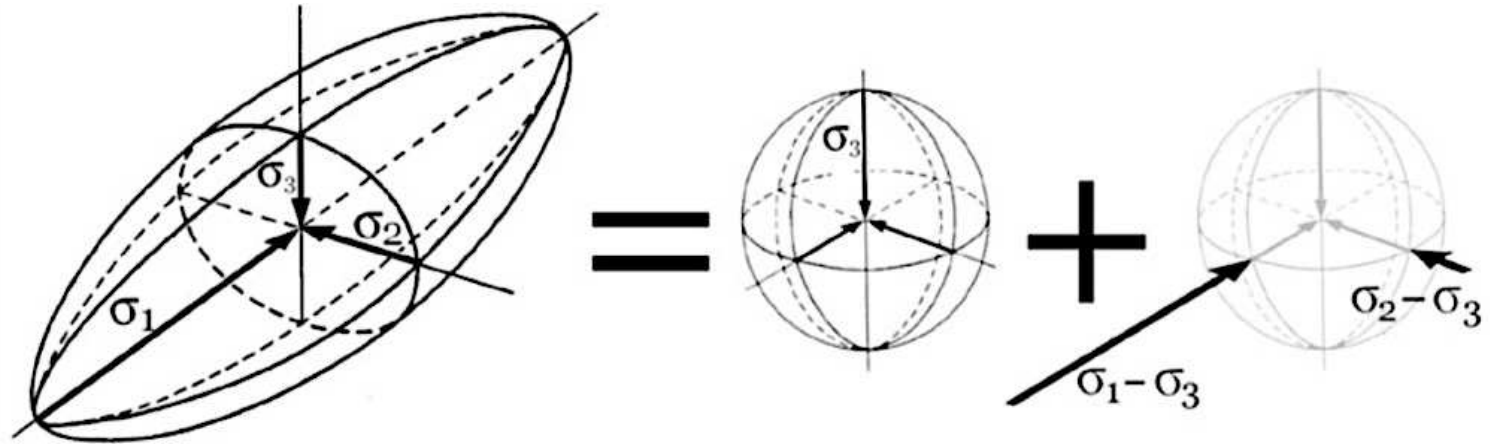
État de contrainte en un point

L'anisotropie des forces appliquées crée du cisaillement selon certains plans.

2. Le comportement mécanique des roches

2.1. Les courbes rhéologiques

La notion de déviateur de contrainte



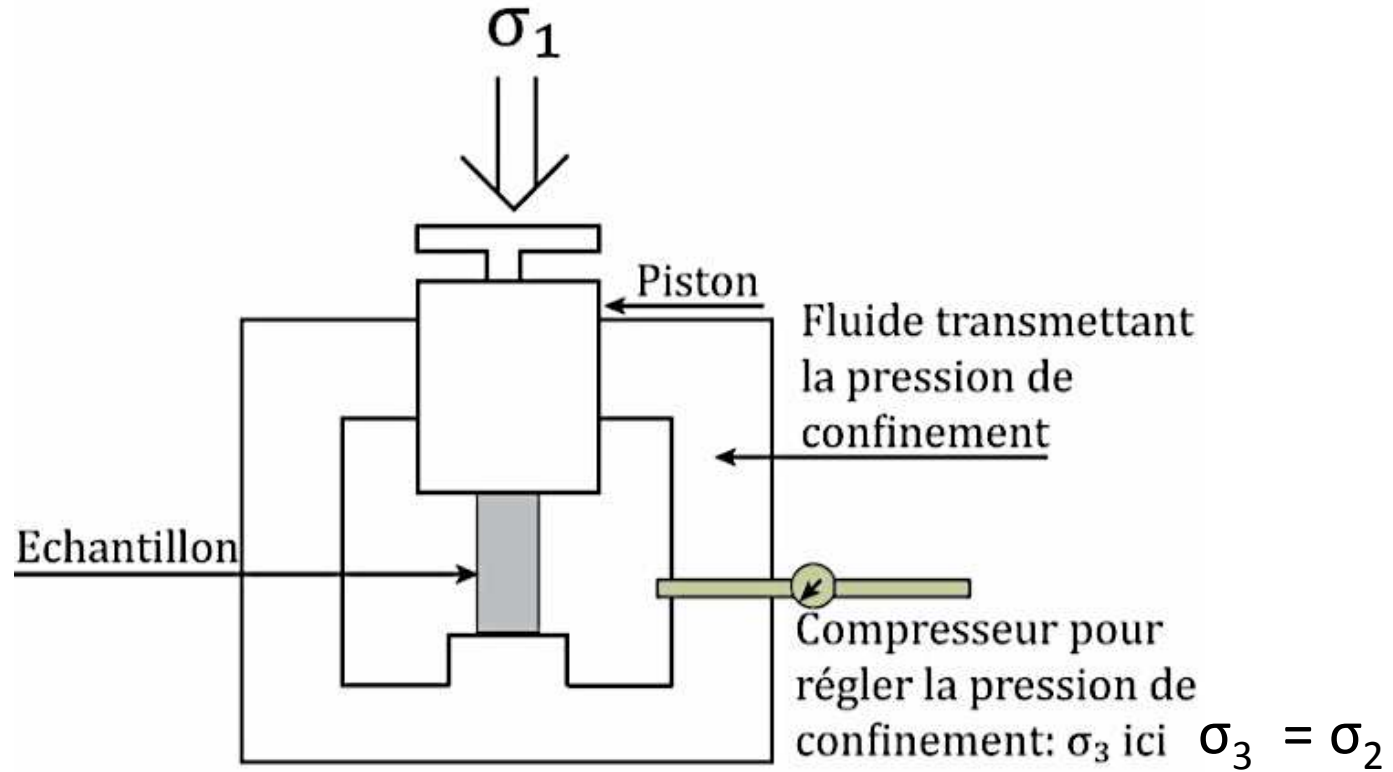
Etat de contrainte

= Pression isotrope

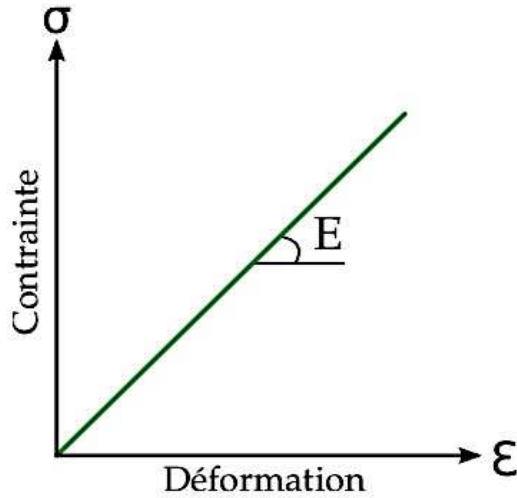
+

**Déviateur des
contraintes**

La presse triaxiale

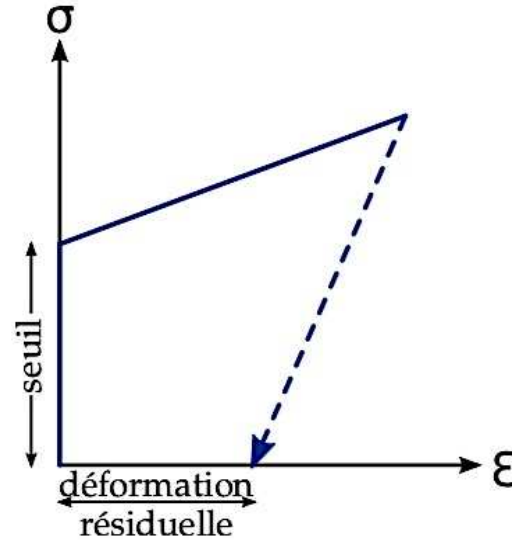


Les comportements



Élastique

E = module de Young



Plastique

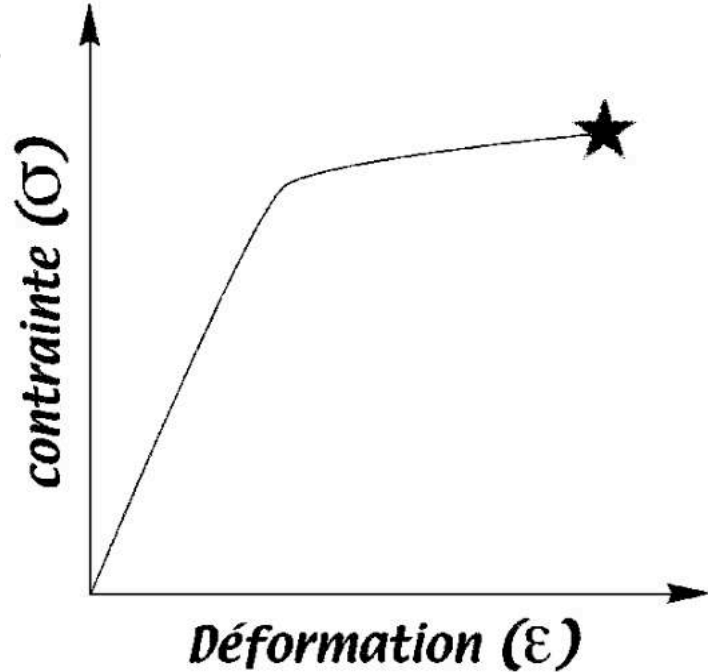
Visqueux possible

Cassant

Courbe rhéologique d'un granite

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$$

Unité = Pa

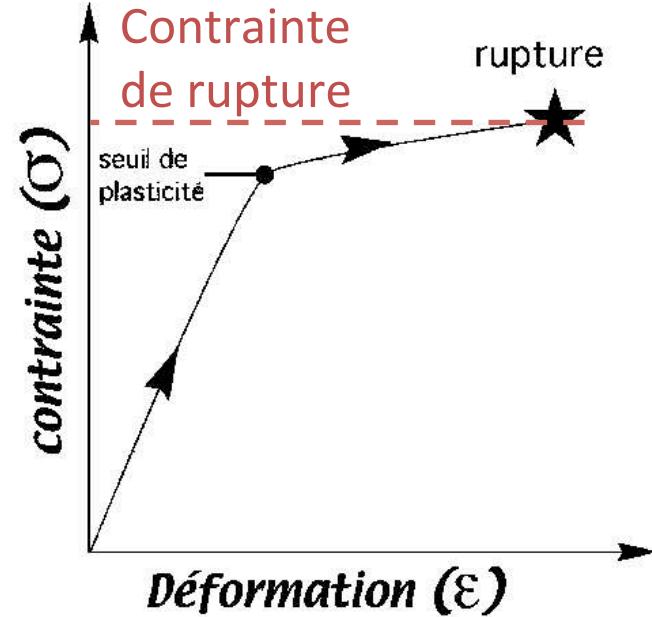
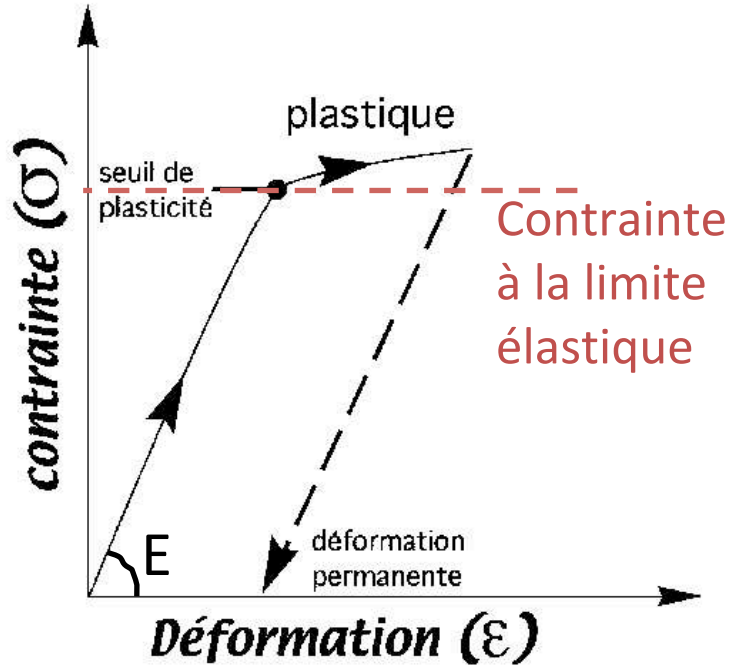


L_0 = longueur initiale

L_f = longueur finale

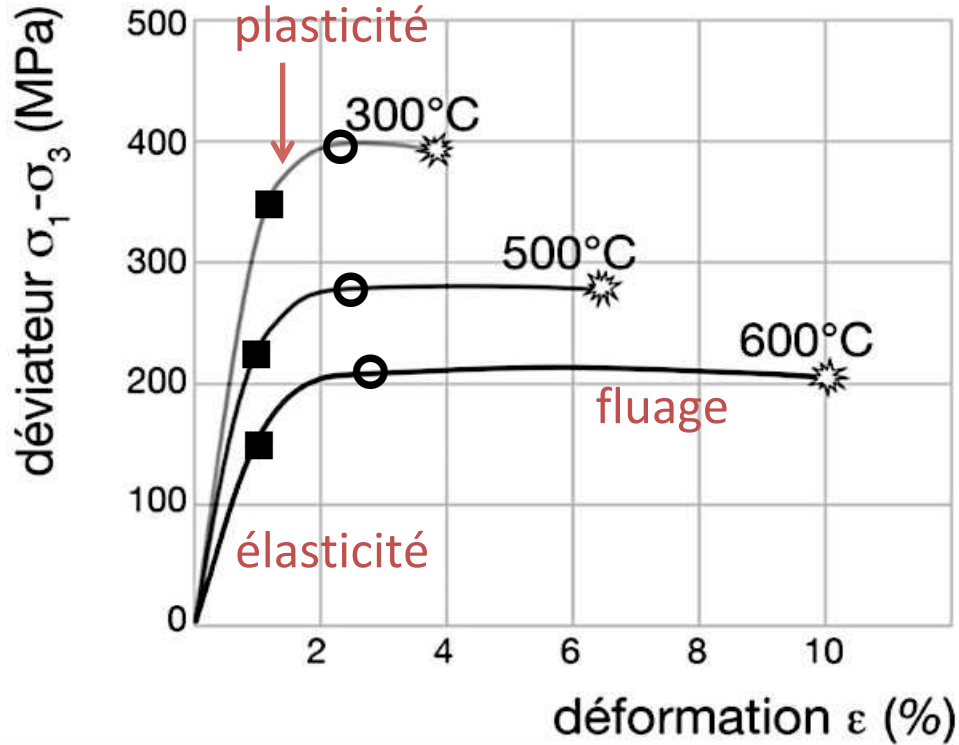
$$\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

Seuil de plasticité et rupture



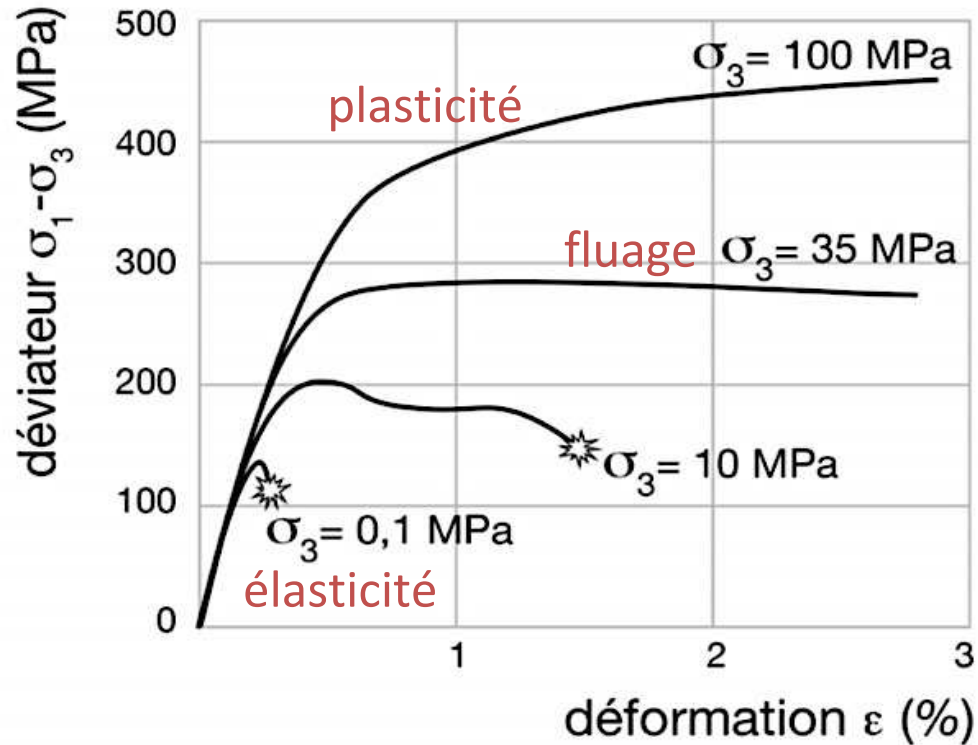
E = module de Young en Pa

Effet de la température



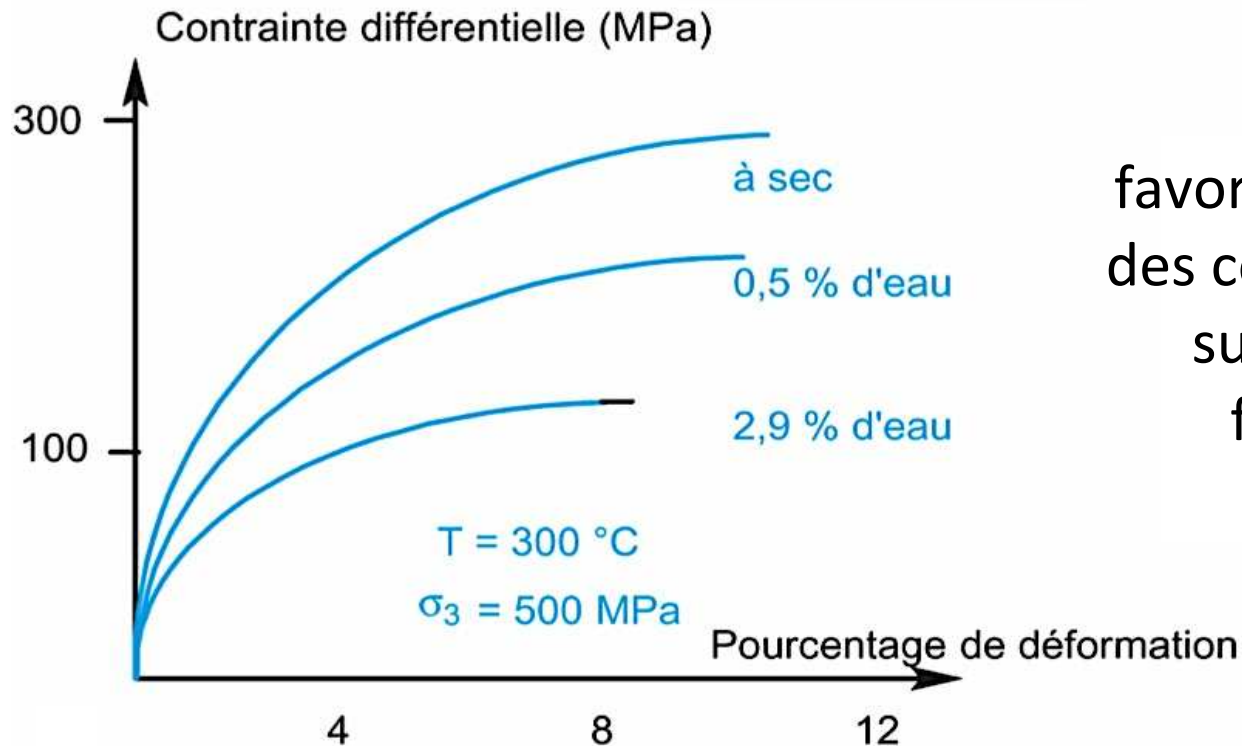
- La hausse de température fait
- diminuer le seuil de plasticité (■) et de fluage (○) ;
 - augmente la déformation avant rupture.

Effet de la pression de confinement



- La hausse de pression
- éloigne les conditions de rupture donc favorise le comportement ductile ;
 - augmente la plasticité et le fluage avant rupture.

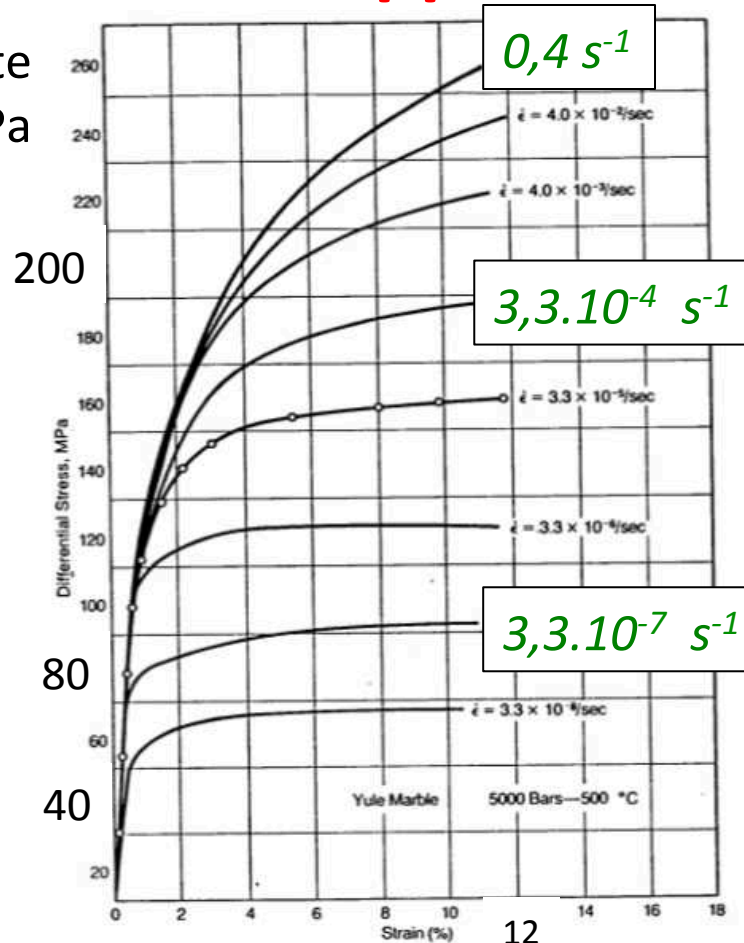
Effet des fluides



La présence de fluides favorise la fracturation dans des conditions proches de la surface. Si la pression est forte, le comportement ductile est favorisé.

Effet de la vitesse d'application des contraintes

Contrainte différentielle en MPa

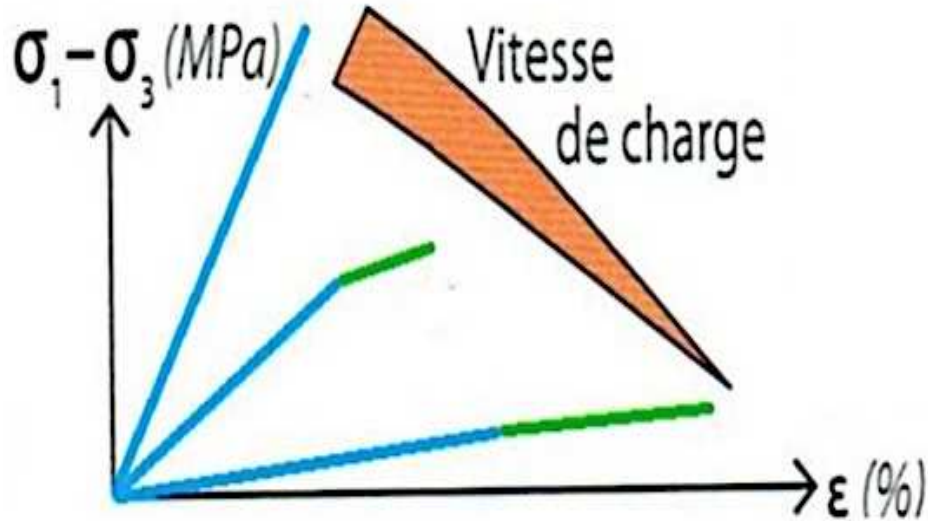


Étude d'un marbre à 500 MPa et 500 °C soumis à une pression

$vitesse = d\epsilon/dt$, exprimé en s^{-1}

Déformation (%)

Effet de la vitesse d'application des contraintes



La hausse de vitesse d'application des contraintes :

- diminue la plasticité de la roche ;
- favorise la rupture.

Bilan

déformation

$$\varepsilon = f(\sigma, T, P, P_{H_2O}, \dot{\varepsilon}, t, \mu_x, \dots)$$

Potentiels chimiques

contraintes

température, pression
lithostatique

pression
fluide

vitesse
de la
déformation
temps

Retour sur le gneiss œillé

Température de transition entre comportement cassant et ductile :

- Quartz 280 à 300°C
- Feldspaths 450 à 500 °C



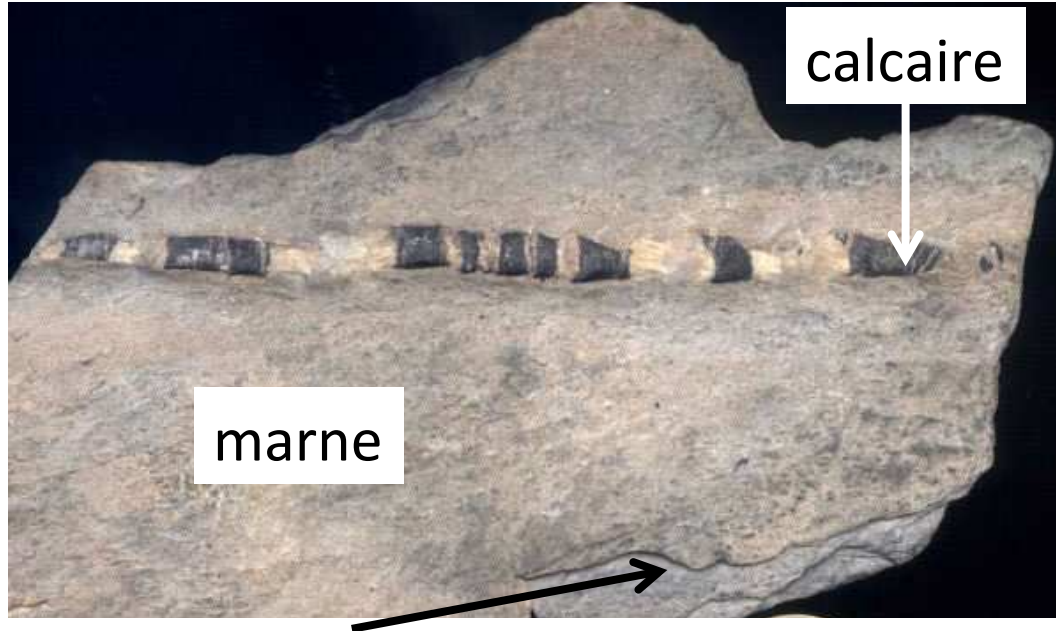
À partir de 300°C
Les quartz sont ductiles et
forment des rubans déformés
Les feldspaths résistent jusqu'à
450°C.

Au-delà de 500°C, tout est
ductile.

2. Le comportement mécanique des roches

2.2. Le comportement cassant des roches

Influence de la nature de la roche (photo 13)

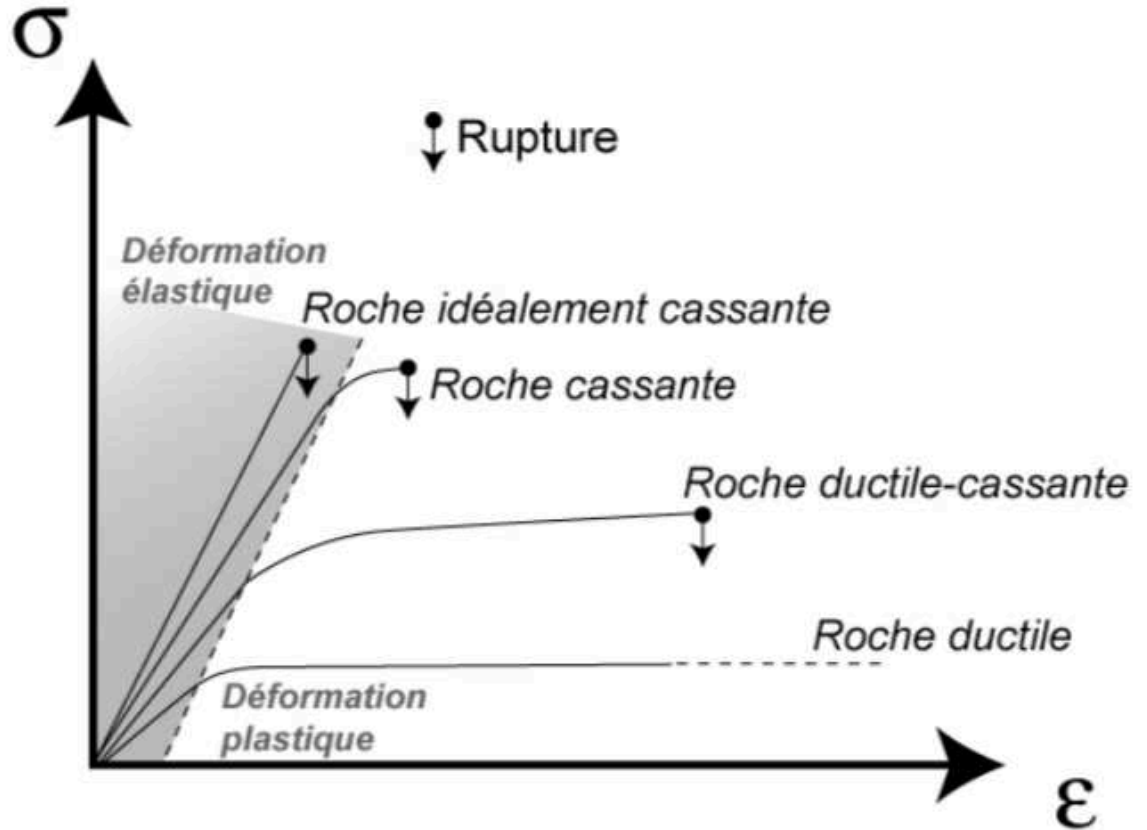


Le calcaire présente une fracturation (comportement fragile, cassant) mais la marne montre un comportement ductile.

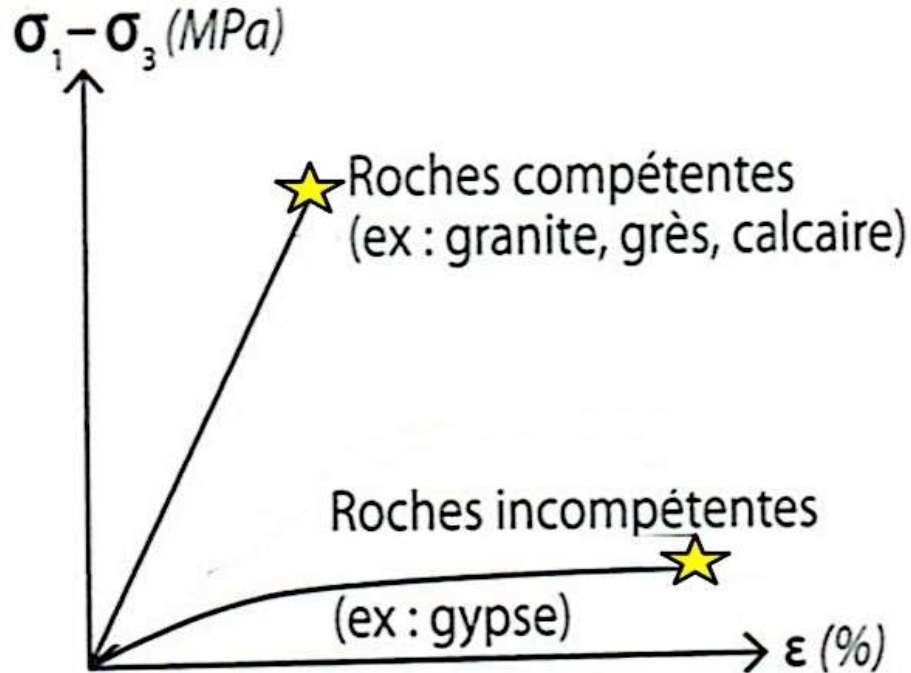
Si la schistosité est d'origine sédimentaire, on ne peut pas placer les axes y et z mais si la schistosité est d'origine tectonique, alors z est perpendiculaire au plan de la schistosité (= plan de la photo).

Le comportement des roches

Une roche a un **comportement fragile = cassant** si elle ne subit que pas, ou peu de déformation plastique avant la rupture. Elle a un **comportement ductile** si elle subit de grandes déformations plastiques.



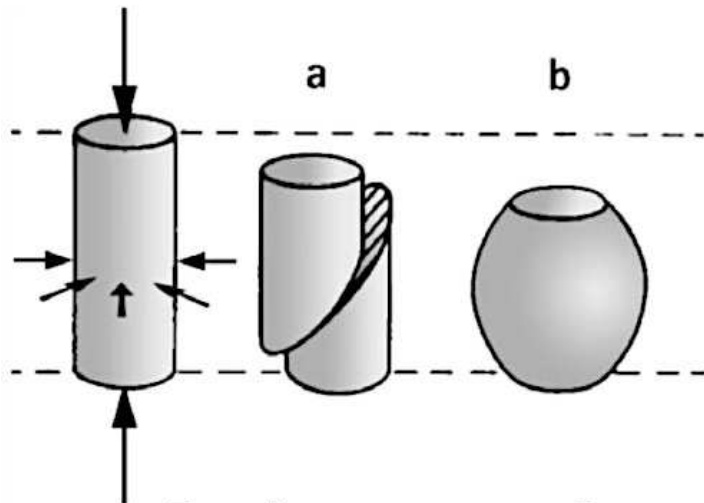
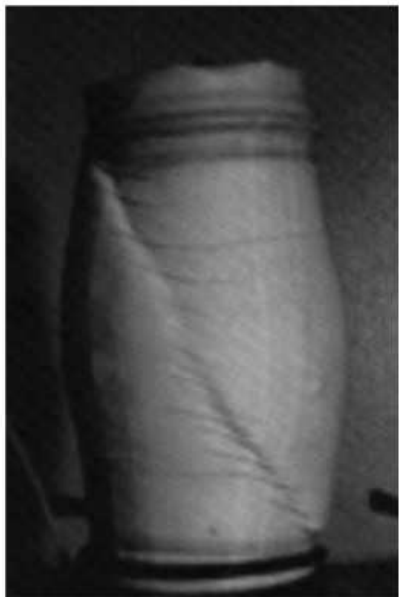
Roches compétentes et incompétentes



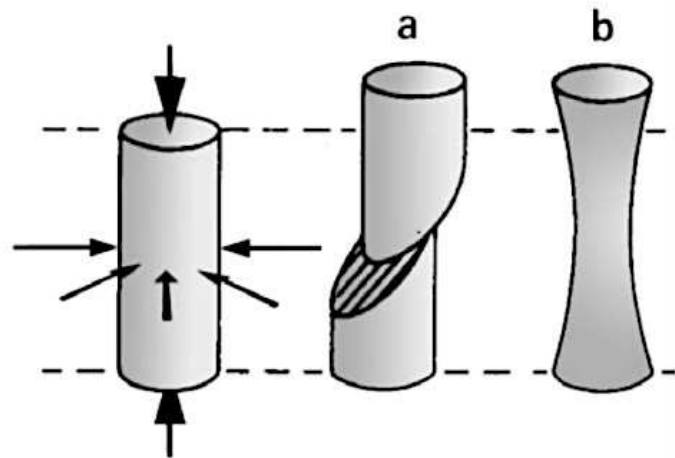
Échelle empirique de compétence (de la plus faible à la plus forte)

- **Roches sédimentaires**
Sel – gypse – argile – calcaire – grès – dolomie
- **Roches endogènes**
Schiste – marbre – quartzite – gneiss – granite – basalte – gabbro

Fracturations expérimentales

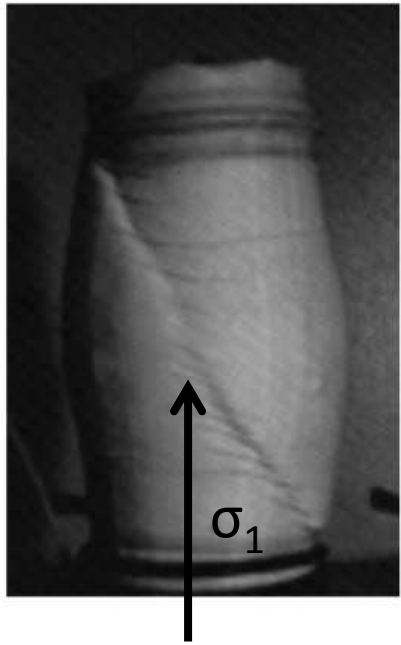


Essai en compression

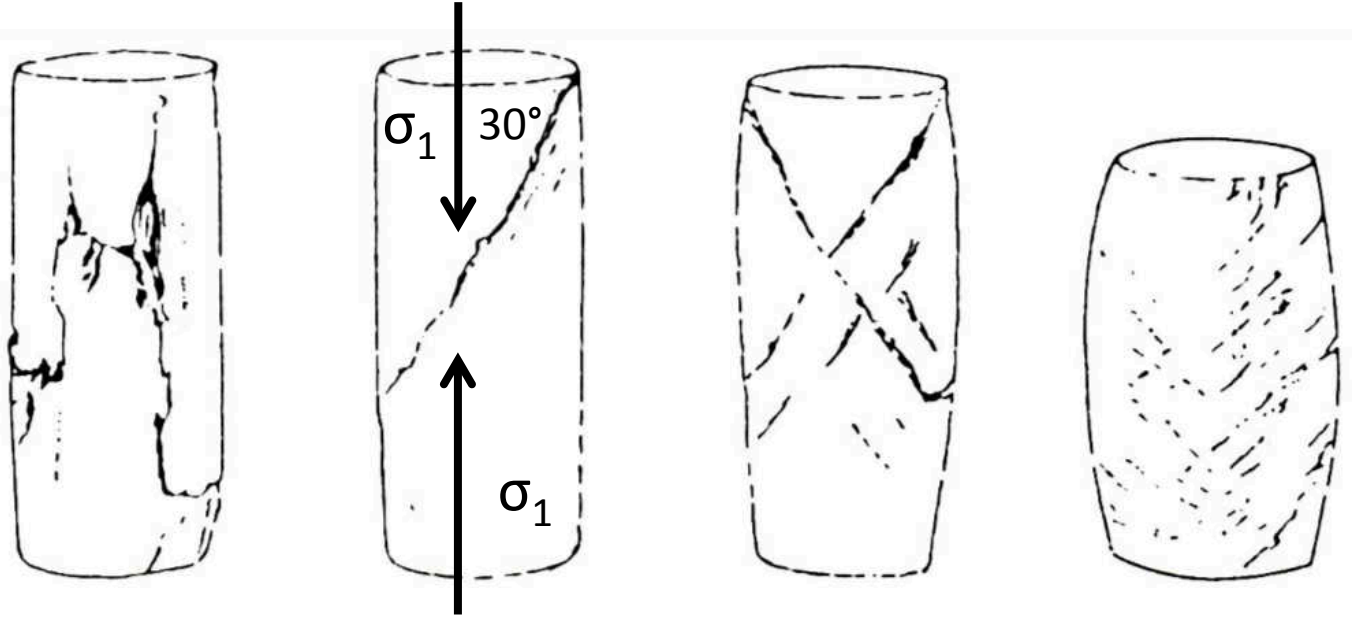


Essai en traction

Fracturations expérimentales en compression



Fracturation avec un angle de 30° par rapport à σ_1 .

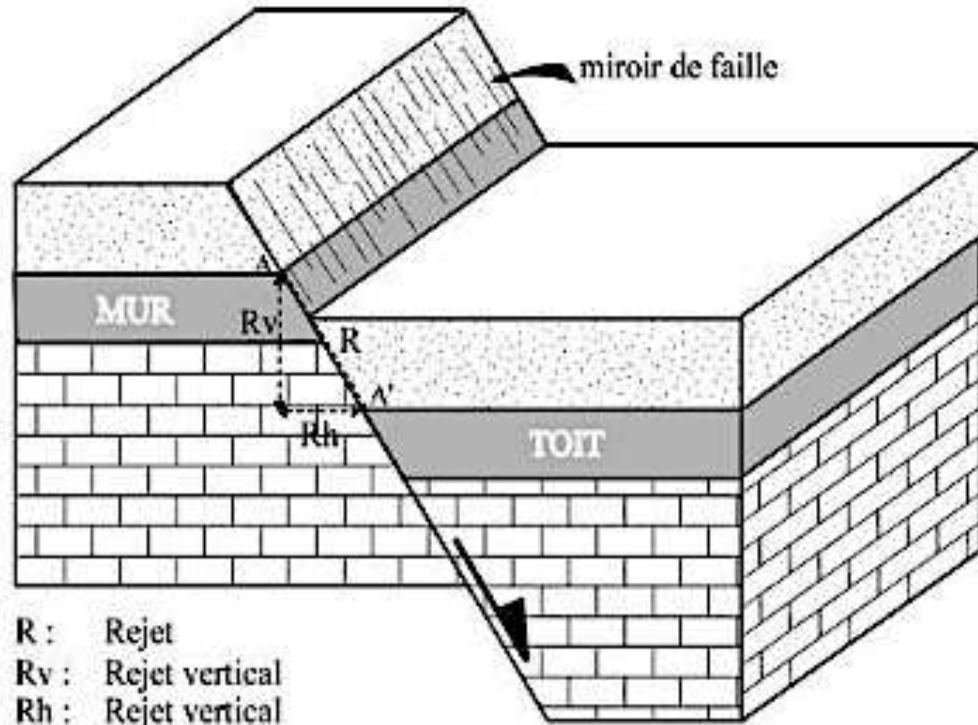


Failles conjuguées

3. Les structures tectoniques générées

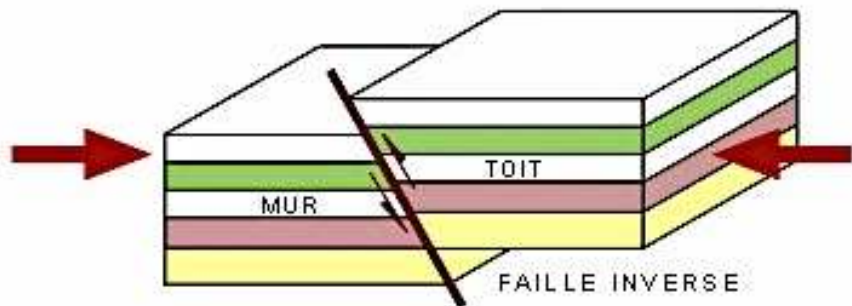
3.1. Les failles et la déformation discontinue

Les termes pour décrire une faille

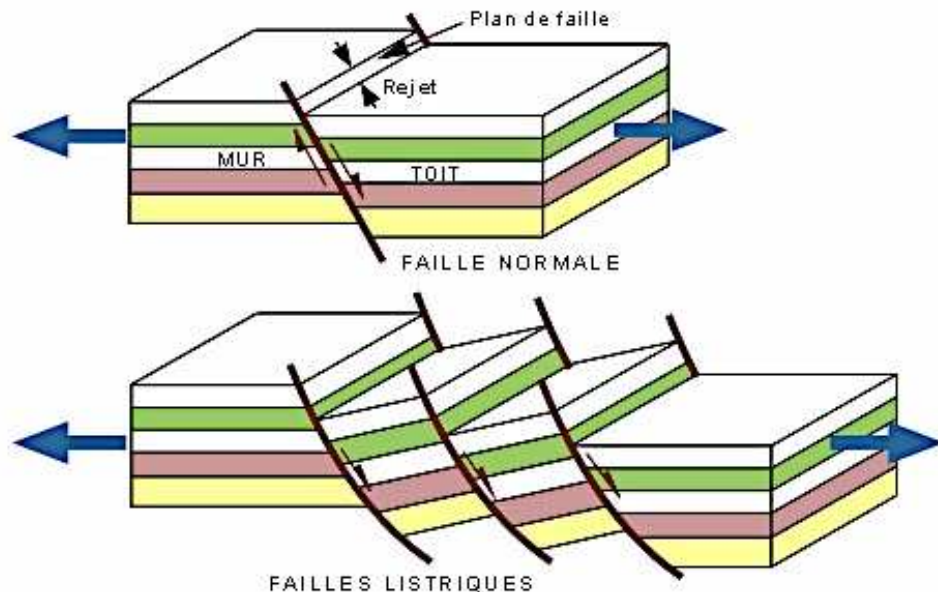


Les 3 types de failles

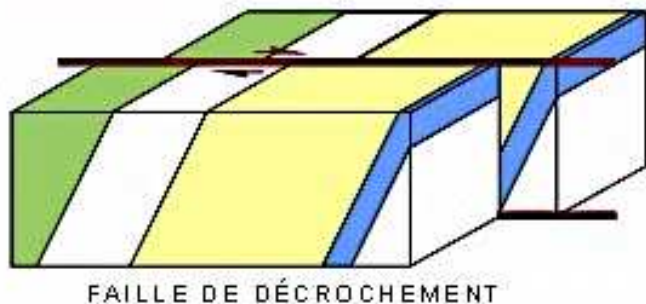
Déformation cassante - Régime compressif



Déformation cassante - Régime extensif

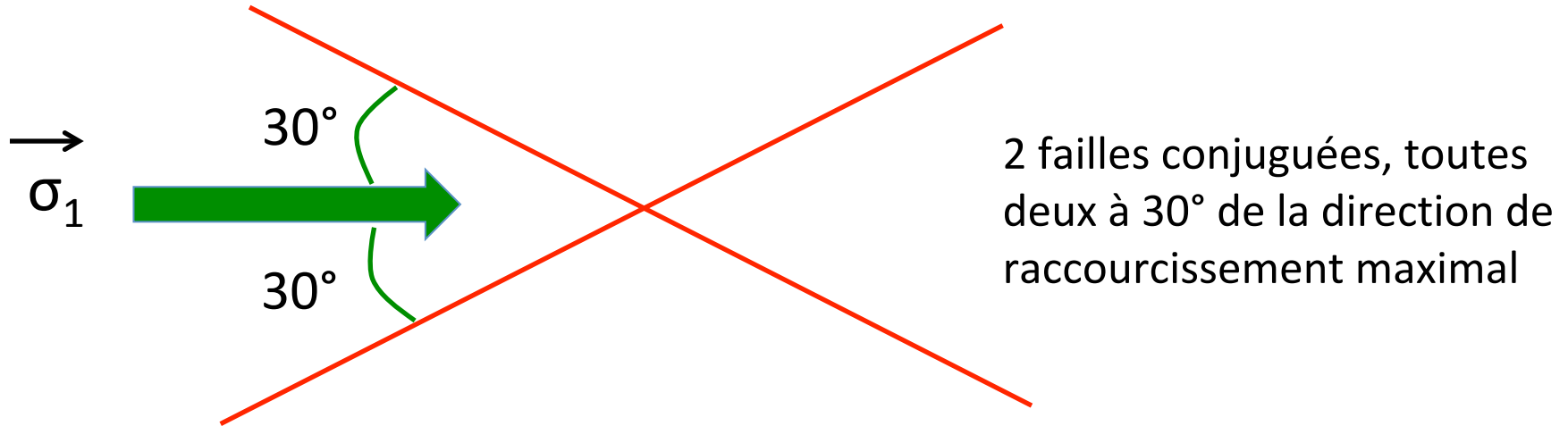


Déformation cassante - Régime coulissant

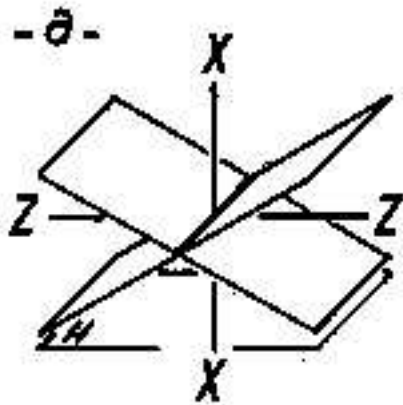


Les failles conjuguées

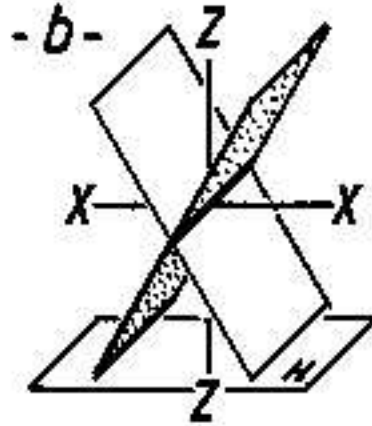
Les études mécaniques ont montré que les failles se disposent, lors de leur formation, de façon à former un angle de l'ordre de 30° par rapport à σ_1 . Il peut donc se former deux failles symétriques, dites "**conjuguées**", par rapport à cette direction.



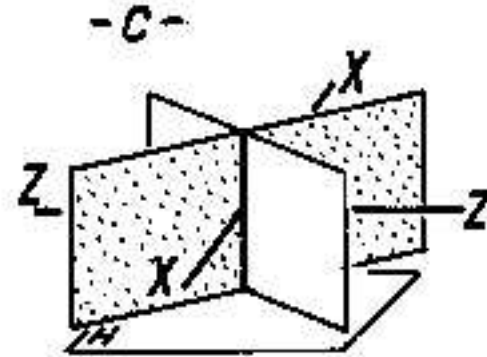
Les failles conjuguées dans leur contexte



Faille inverse



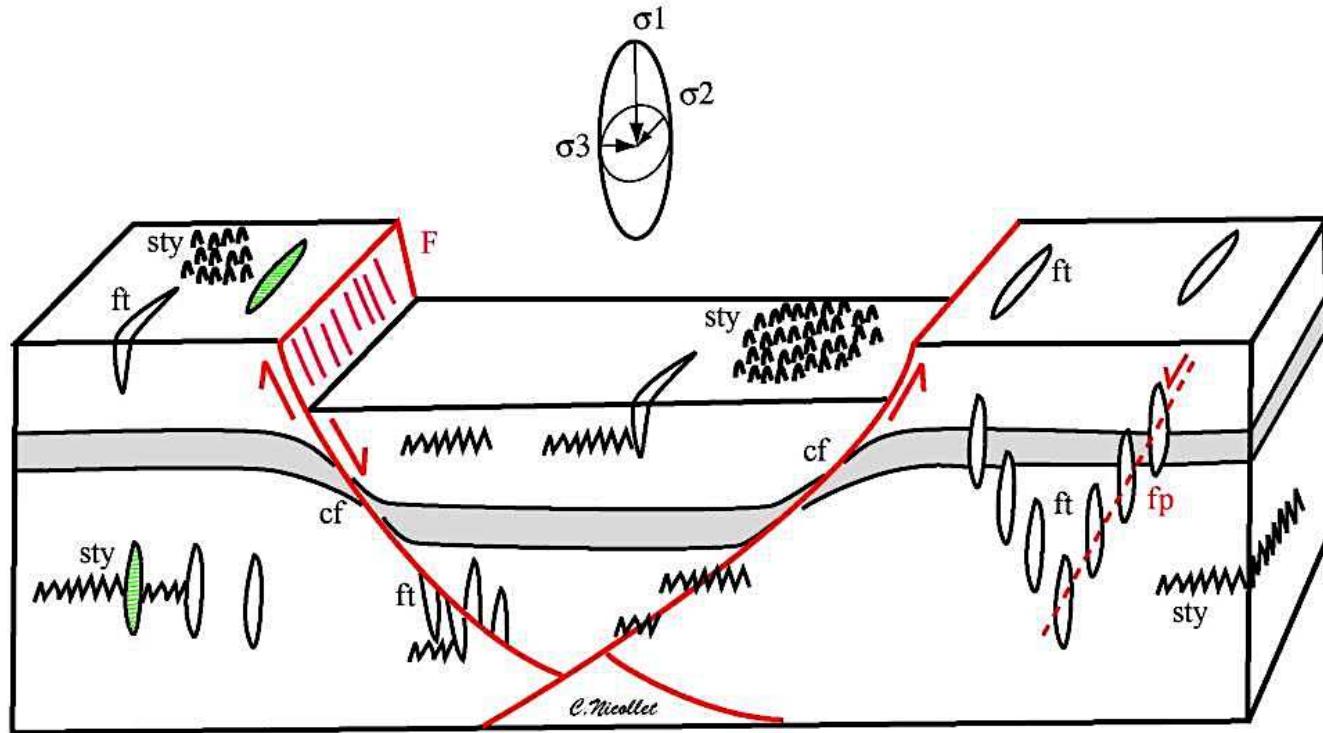
Faille normale



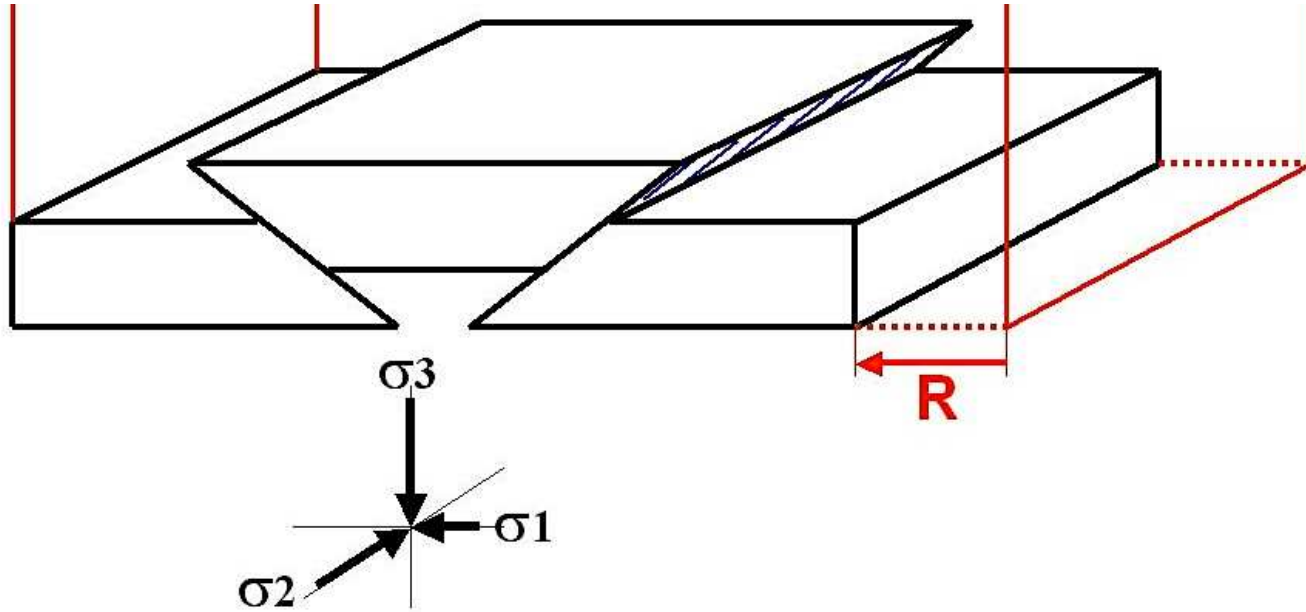
Décrochement

disposition des surfaces de cassures des failles conjuguées

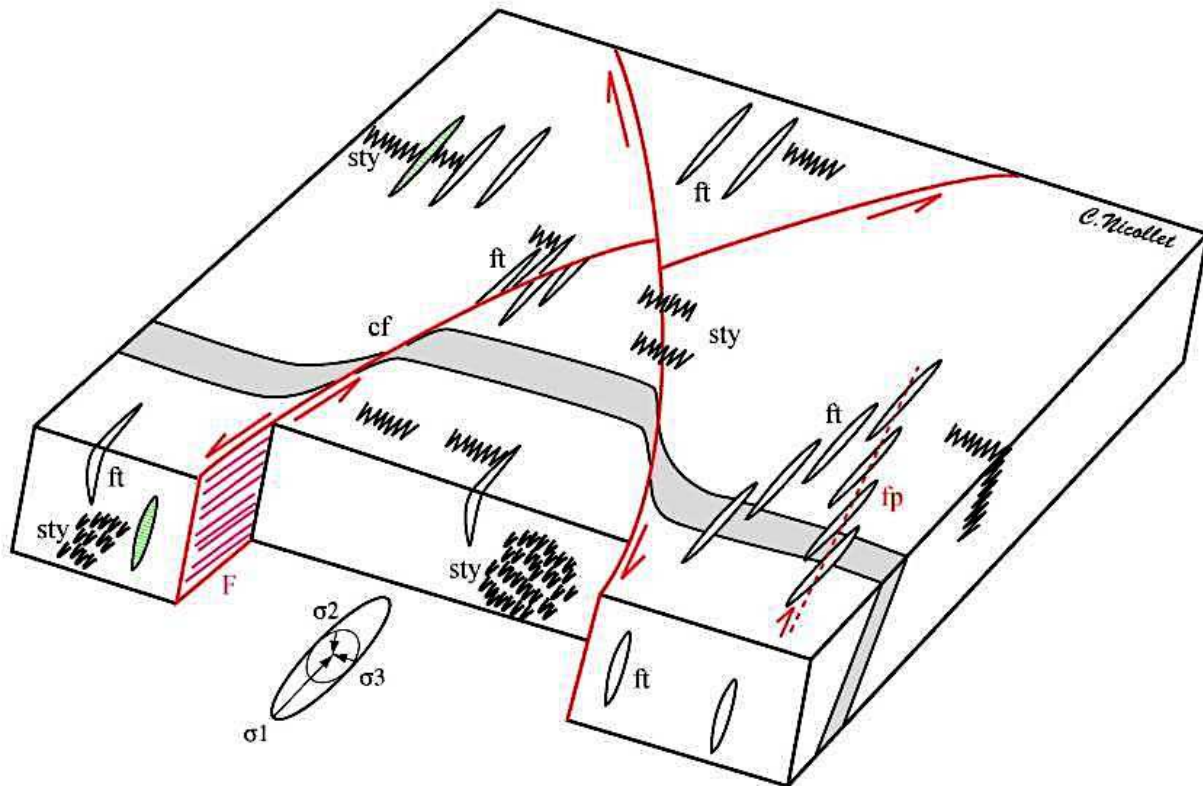
Les contraintes en extension



Les contraintes en compression



Les contraintes en décrochement



σ_1 à 30° de chaque faille, dans le plan horizontal

Un exemple de failles conjuguées

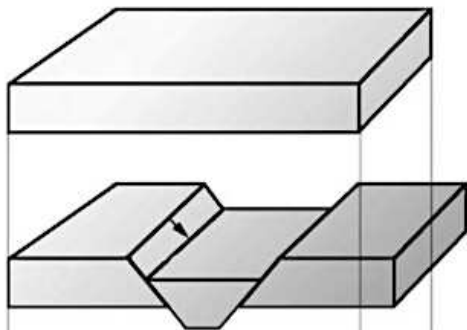


Falaise de Charminelle

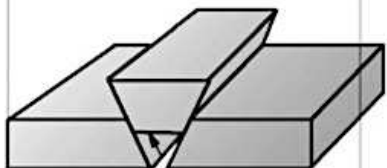
Source : http://www.geol-alp.com/chartreuse/6_sommets_ch/lorzier.html#minigraben_Grepy

BILAN

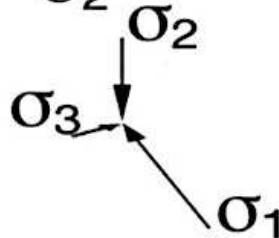
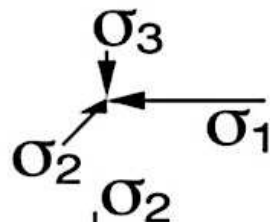
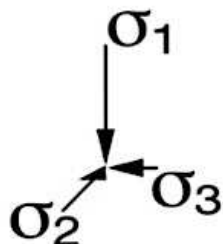
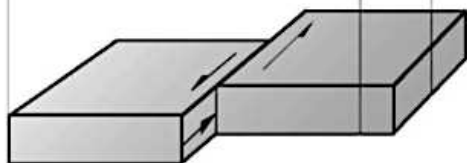
Faille normale



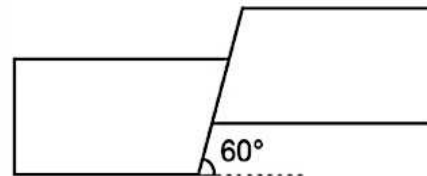
Faille inverse



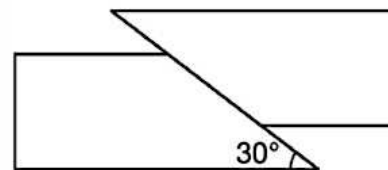
Décrochement



En vue de profil



Faille normale



Faille inverse

Les microstructures indices

Crochon

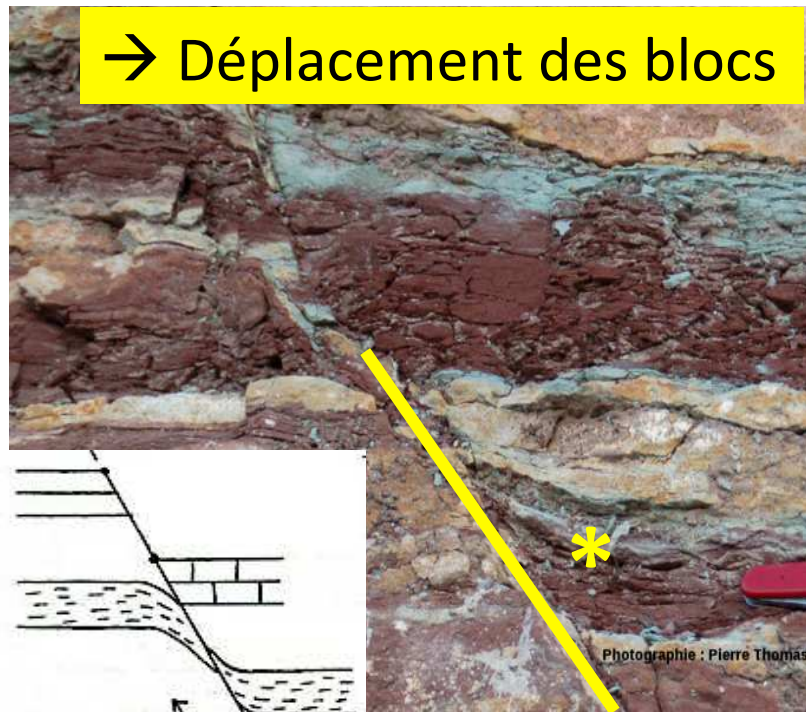
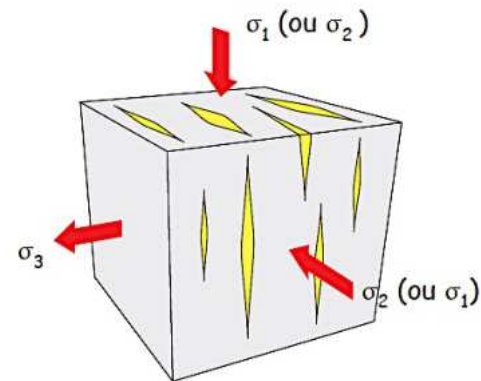


Photo 16

Photo 15



Fentes de tension

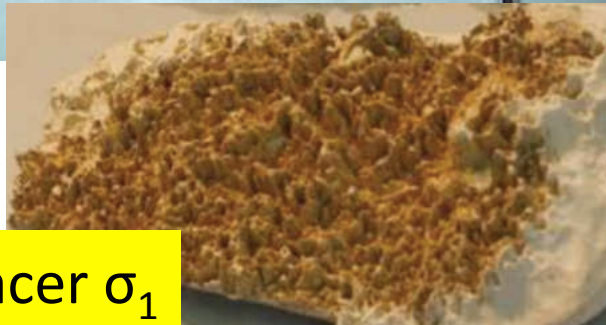
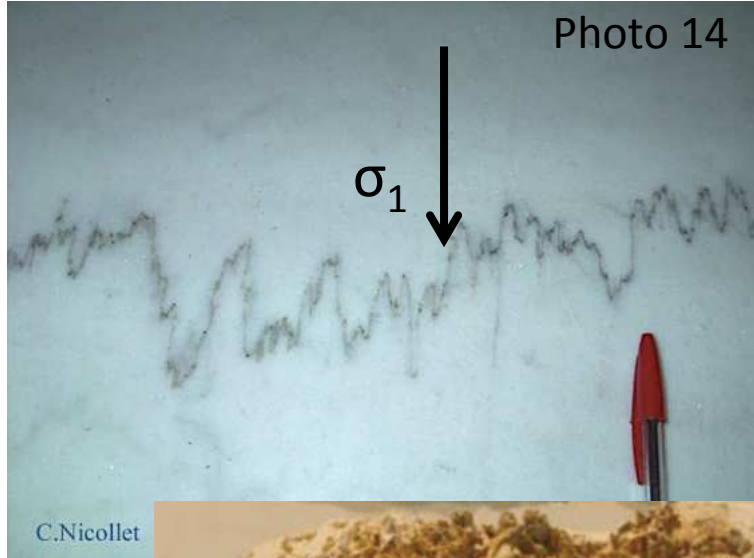


→ σ_3

→ Placer σ_3

Les microstructures indices

Styloolithes

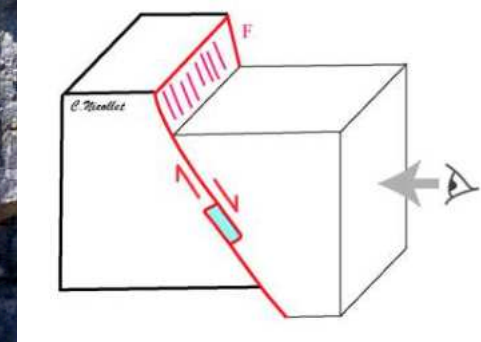
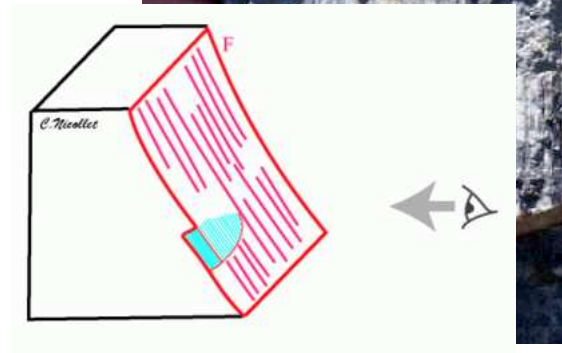


→ Placer σ_1

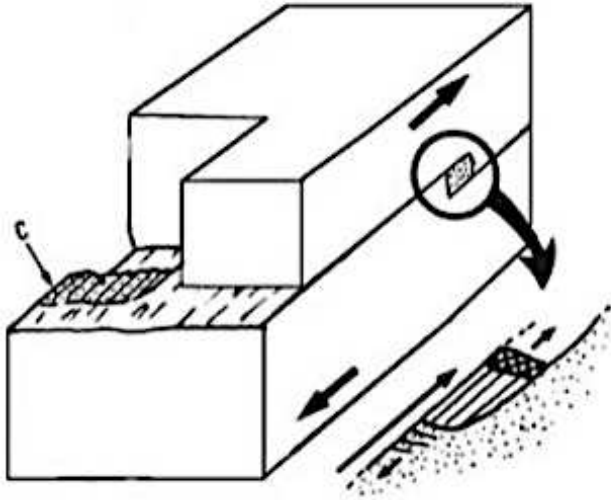


Ressauts,
gradins,
ou enduits

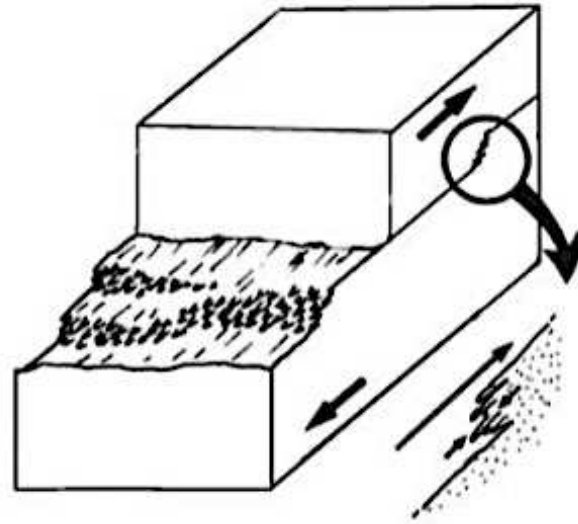
Photo 17



Stylolithes et ressauts sont liés



Ressaut avec précipitation
dans les espaces formés



Compression avec formation
de stylolithes

Une combinaison d'indices



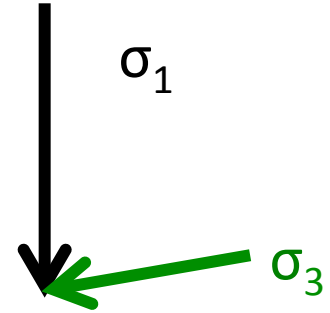
Un exemple de déformation dans laquelle il est possible de « remonter » aux contraintes subies par un calcaire hauterivien

Les microstructures



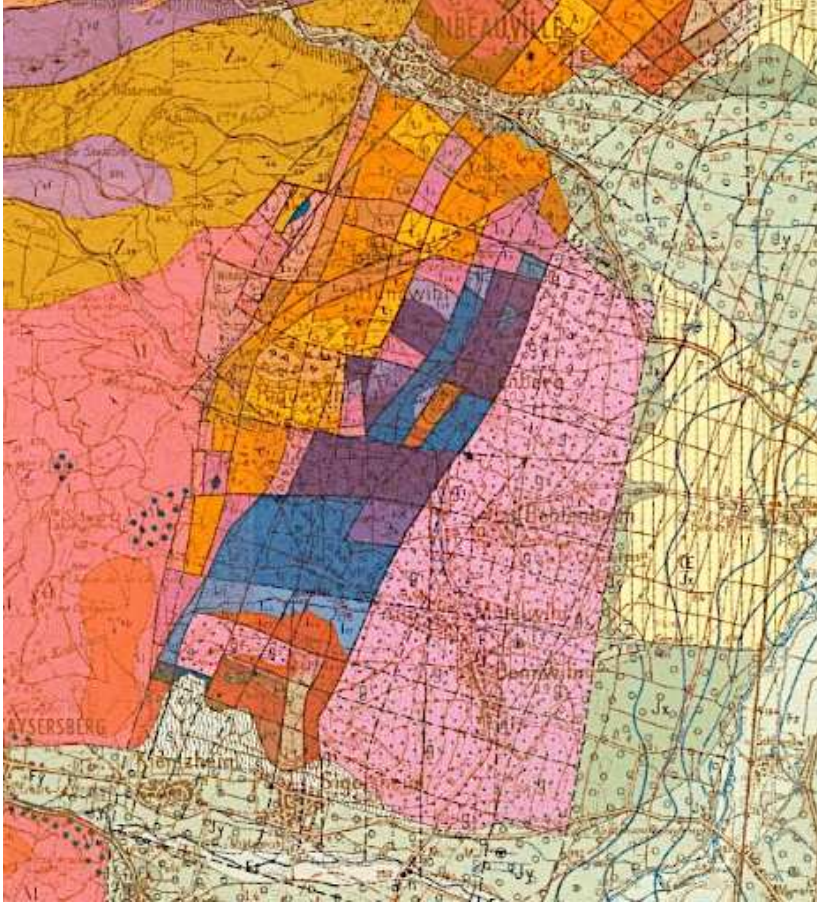
Photo 18

D'après les stylolithes



D'après la précipitation

Les failles à toutes les échelles

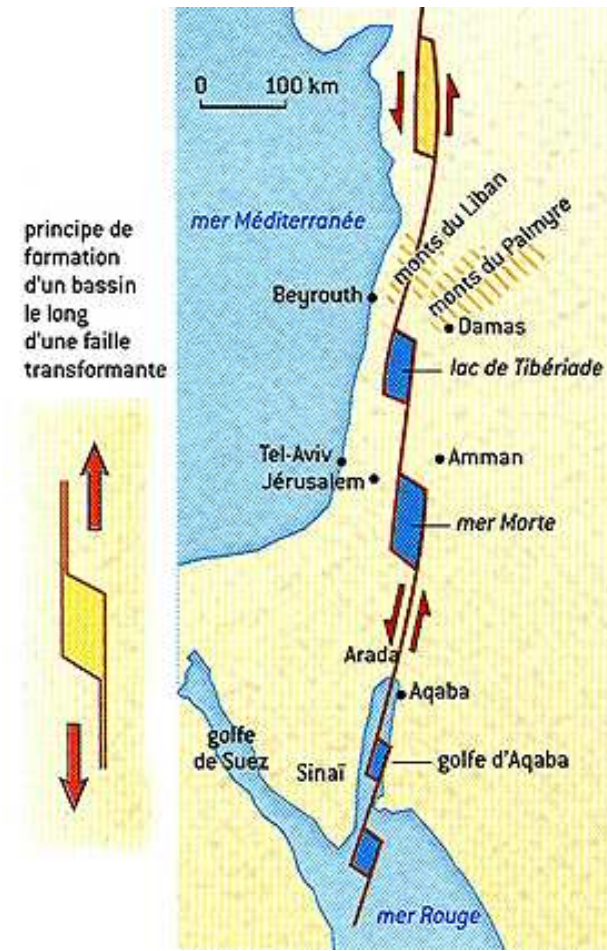


Le champ de fracture entre Kaysersberg et Ribeauvillé (carte de Colmar au 1/50 000)

Un bassin en pull-apart



Faille du Levant



Exercice : photo 19

Faille normale

Rejet total = 7 cm environ

Longueur du
crayon = 15 cm

Rejet vertical = 6,5 cm
Rejet horizontal = 2 cm

La faille de San Andrea (photo 20)

La rivière, décalée, permet de reconnaître un décrochement dextre.



Photographie : Pierre Thomas

Source : planet-terre.ens-lyon.fr

3. Les structures tectoniques générées

3.2. Les structures issues de déformations continues

- a) Structures homogènes pénétratives (schistosité, foliation, linéation)
- b) Structures hétérogènes : plis

Schistosité, foliation

Photo 22

Marne à schistosité



Photographie : Pierre Thomas

Photo 21



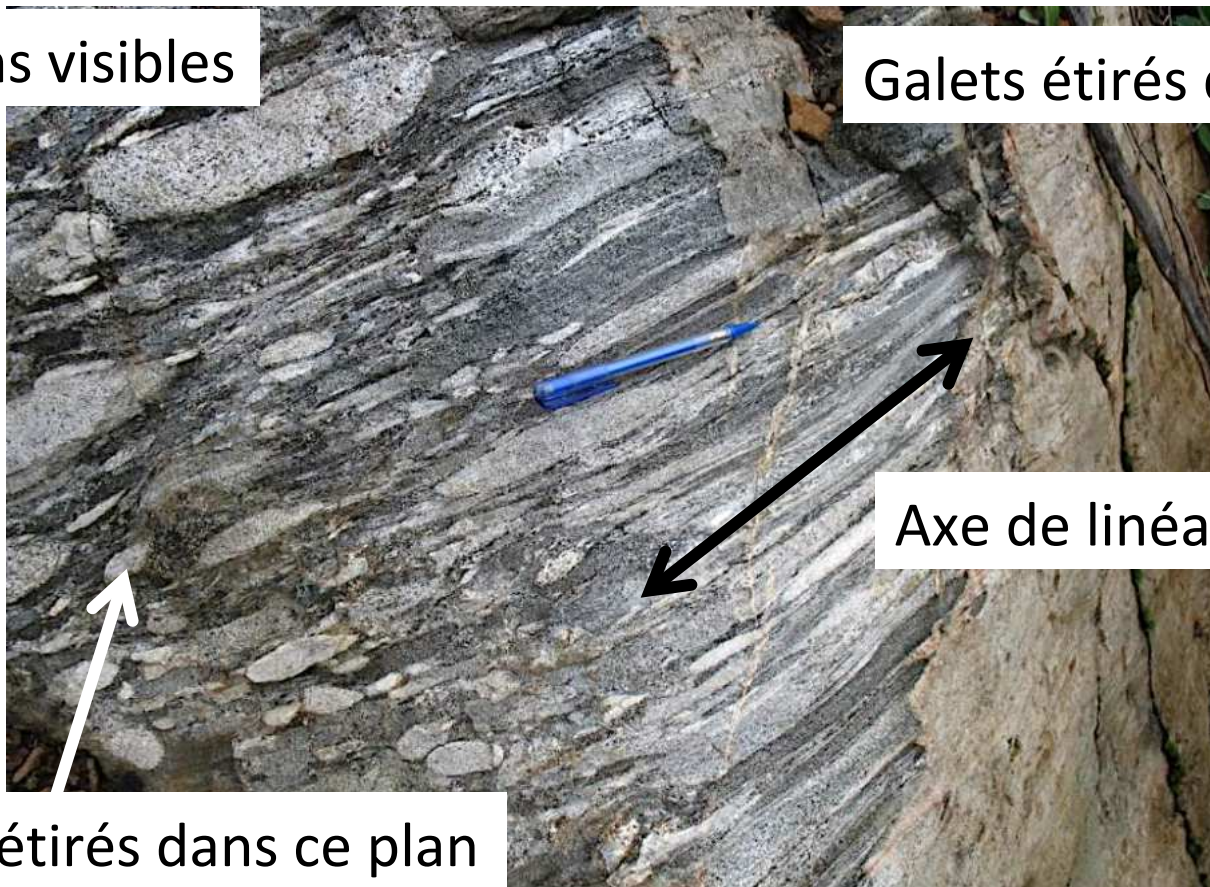
Foliation du gneiss du massif des Maures

Linéation de galets

2 sections visibles

Galets étirés dans ce plan

Photo 23
Voir aussi
Photo 9

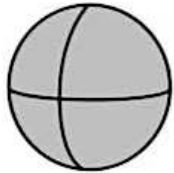


Axe de linéation

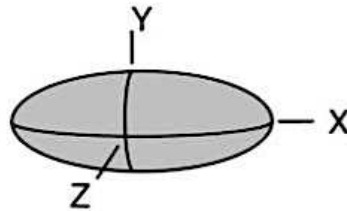
Galets non étirés dans ce plan

Interprétation

X : axe d'allongement maximum
Y : axe intermédiaire
Z : axe de raccourcissement maximum



état initial

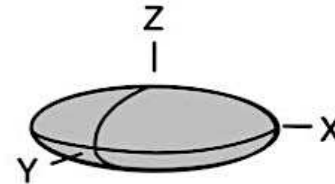


cas 1 :
Z proche de Y

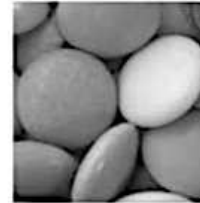


CONSTRICTION

LINÉATION



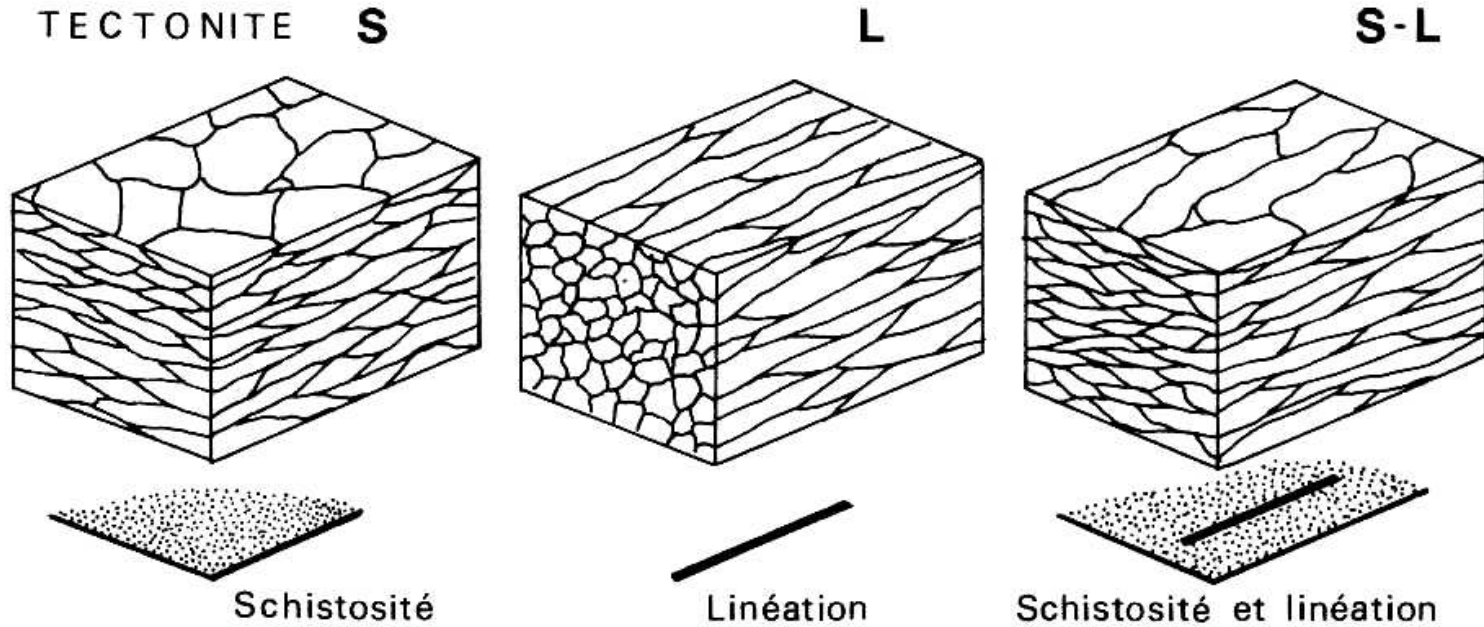
cas 2 :
X proche de Y



APPLATISSEMENT

SCHISTOSITÉ-FOLIATION

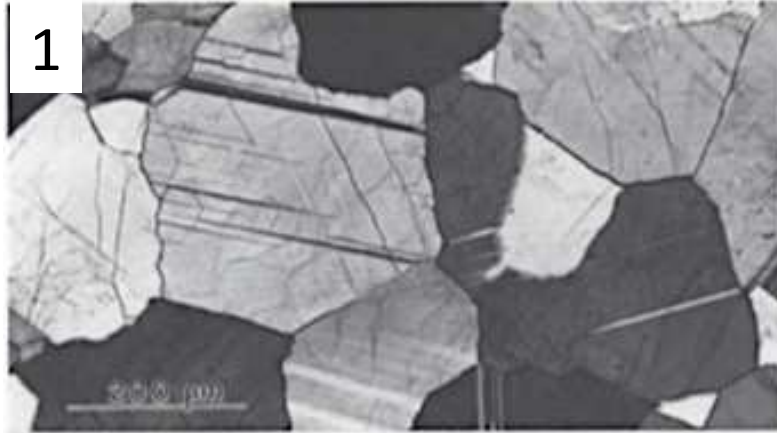
La fabrication



X est parallèle à la linéation
Z est perpendiculaire à la schistosité-foliation

Expérience de compression à 900°C

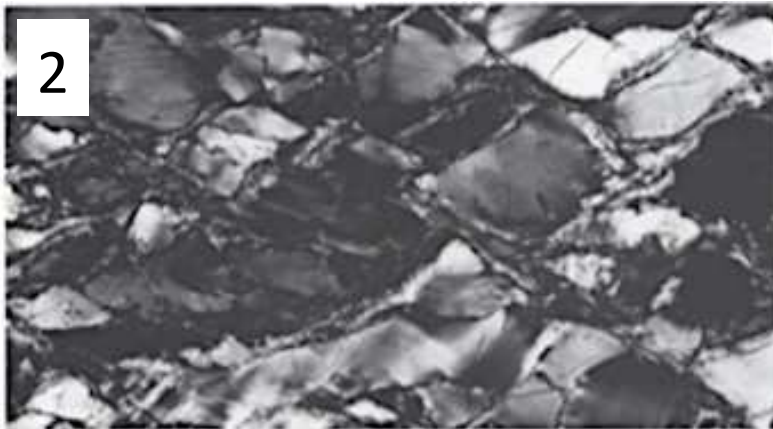
1



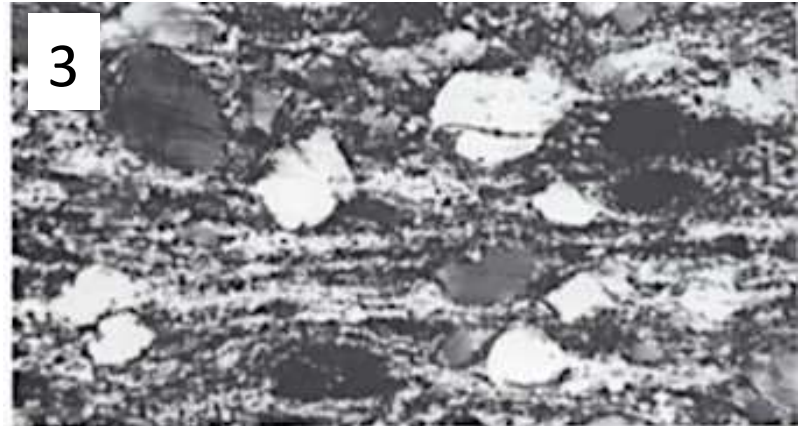
$$d\varepsilon/dt = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

Réduction de la taille des grains + réorganisation de la matière (orientation préférentielle de forme) à chimie constante sans changement d'état.

2



3



Cisaillements pur et simple

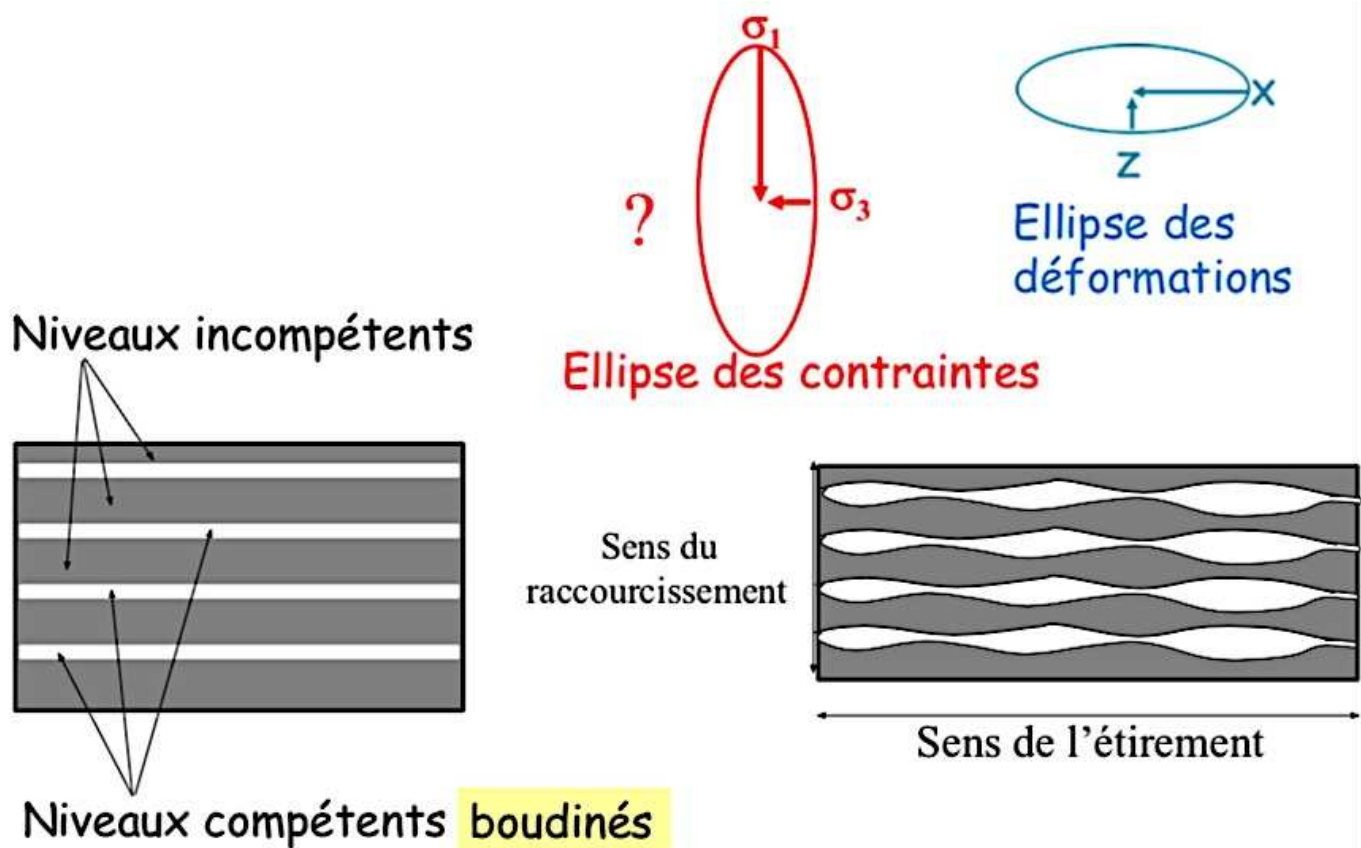
Cisaillement pur (= aplatissement)

- indices = boudinage et/ou ombres de pression symétriques
- ellipsoïdes possibles à placer

Cisaillement simple

- indices = ombres de pression asymétriques, plans de schistosité et cisaillement distincts
- seul l'ellipsoïde des déformations peut être déterminé.

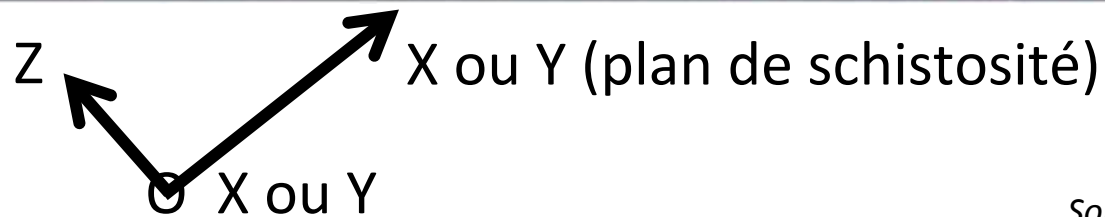
Cisaillement pur et boudinage



Déterminer le cisaillement (photo 24)



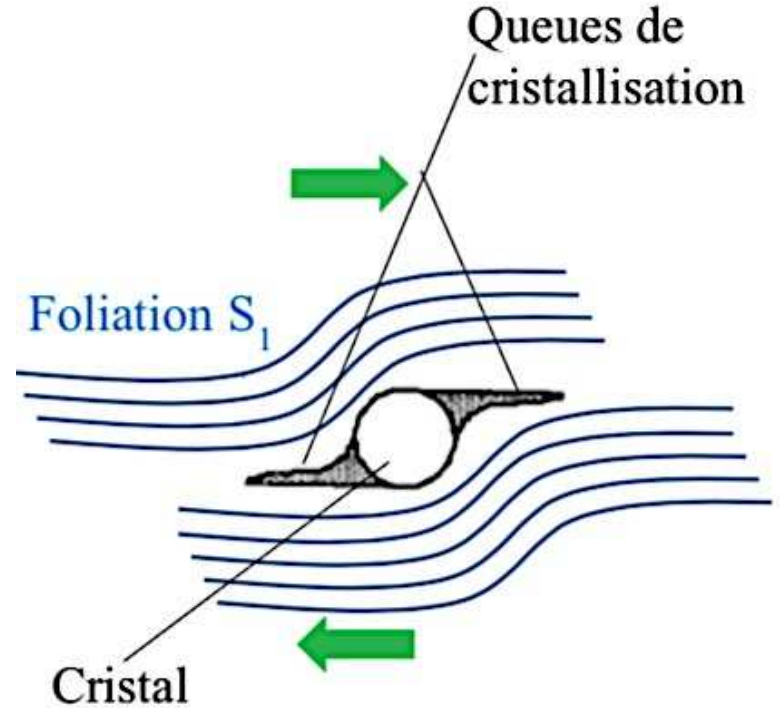
Cisaillement simple car plan C-S



Analyse de lame mince (photo 25)



Ellipse des déformations



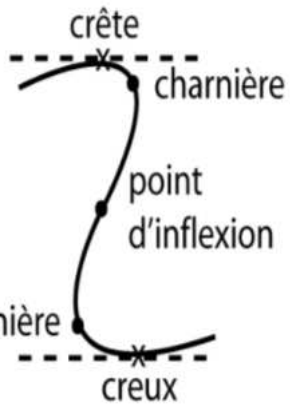
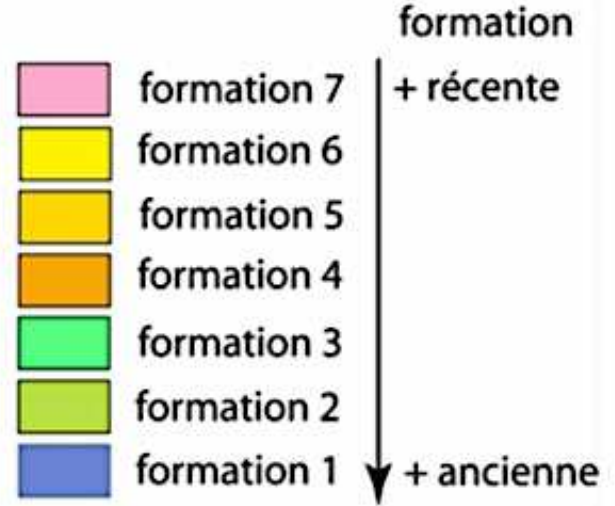
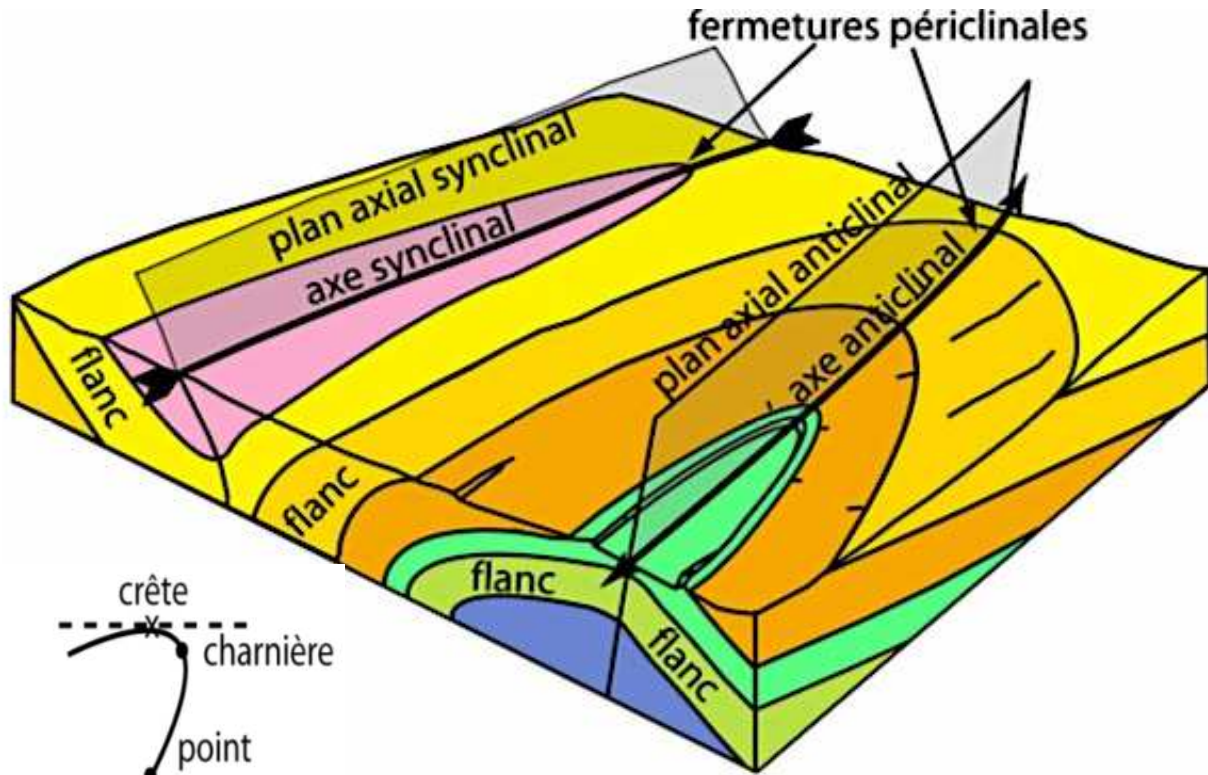
Asymétrie => cisaillement simple

3. Les structures tectoniques générées

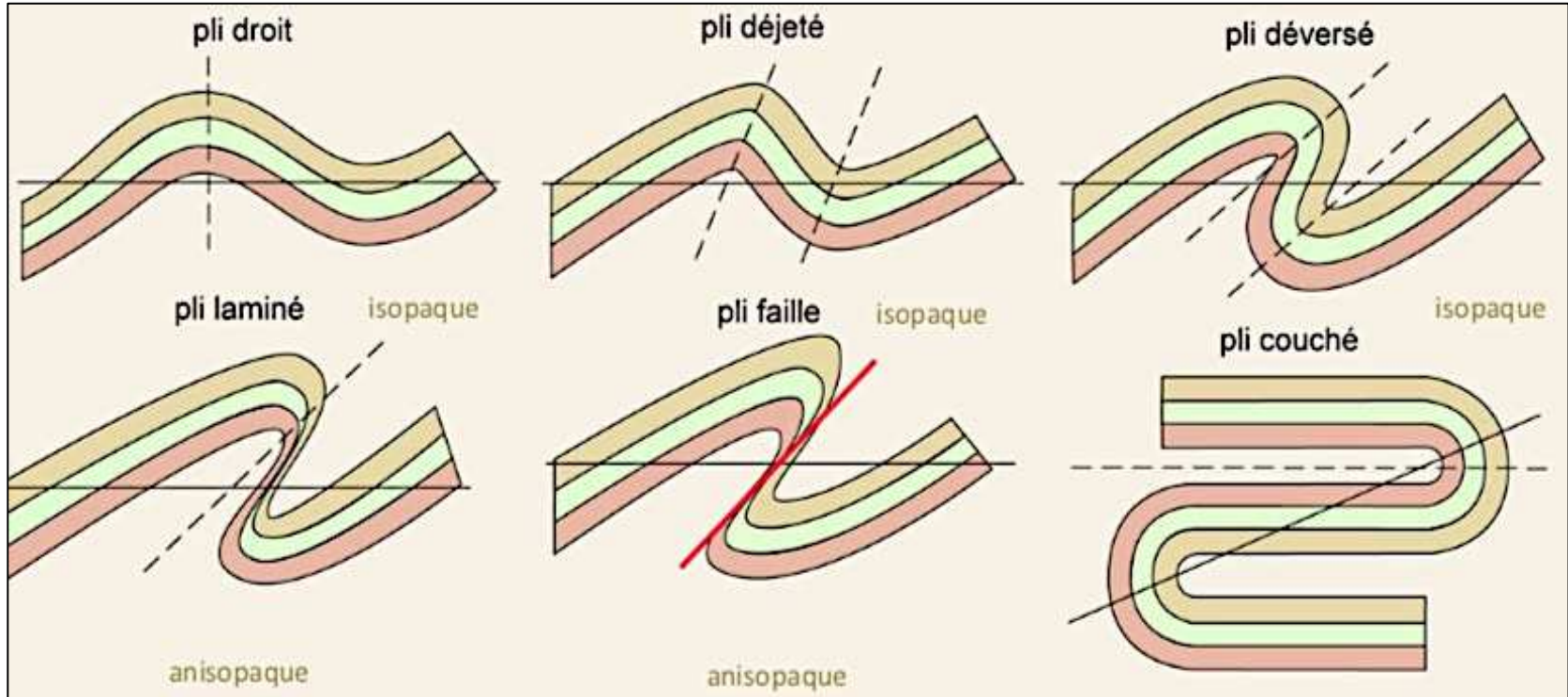
3.2. Les structures issues de déformations continues

- a) Structures homogènes pénétratives (schistosité, foliation, linéation)
- b) Structures hétérogènes : plis

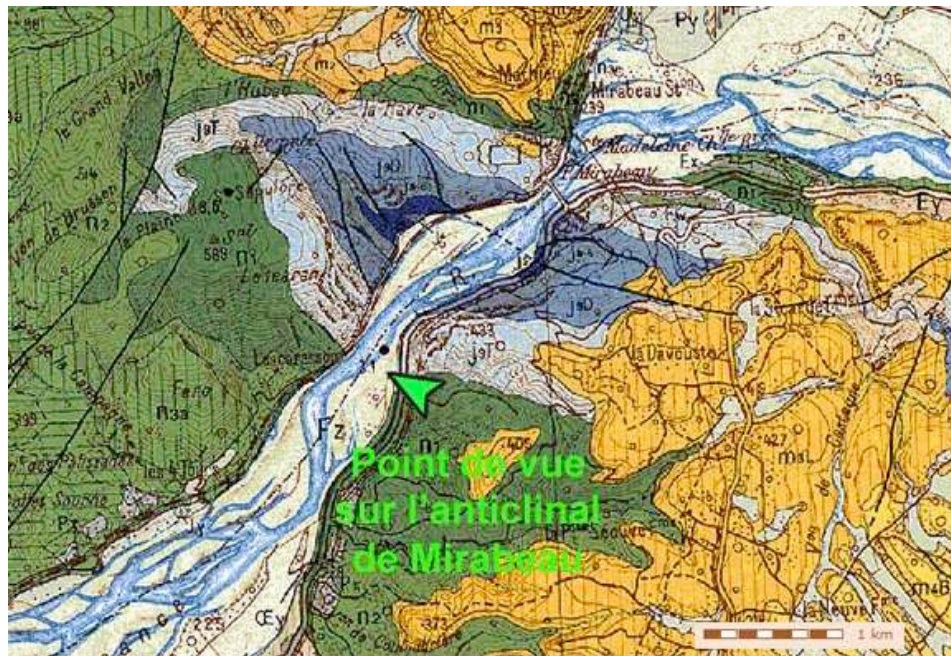
La terminologie des plis



La diversité des plis



Exercice

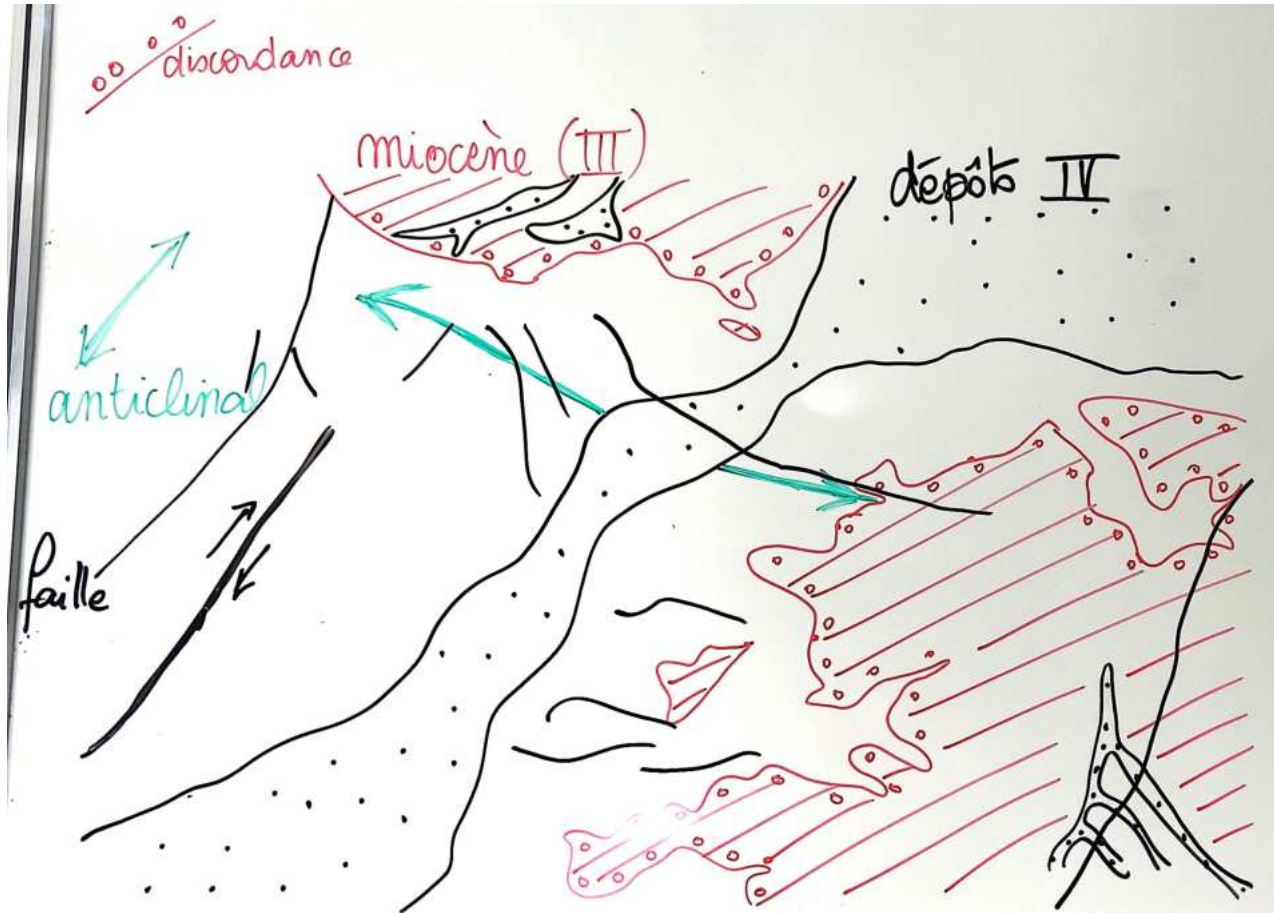


Fz	Aluvions récentes
Py	Ependages locaux, colluvions (Wwurm)
Ey	Eboulis würmiens
CEy	Loess würmien
m3	Tortonien marin
m2	Helvétien
n3	Hauterivien
n2	Valanginien
n1	Berriasien
j9T	Portlandien calcaire
j9D	Portlandien dolomitique
j8-4	Kimméridgien
j5	Oxfordien supérieur

Photo 26

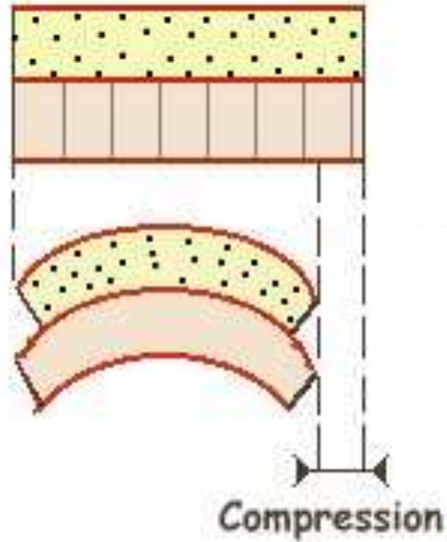


Schéma structural

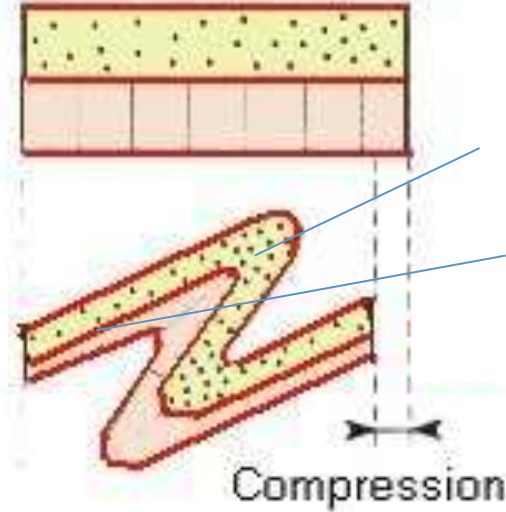


Plis isopaque et anisopaque

Épaisseur
constante



PLI ISOPAQUE



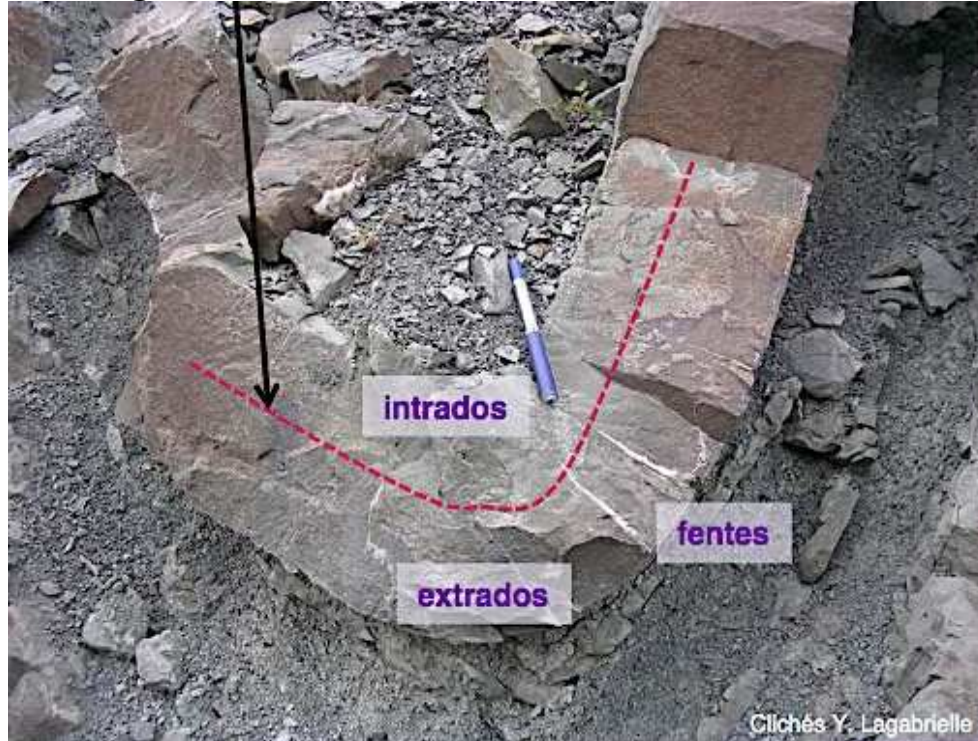
Épaisseur
max à charnière

Amincissement
sur les flancs

PLI ANISOPAQUE

Le pli isopaque (photo 27)

ligne neutre



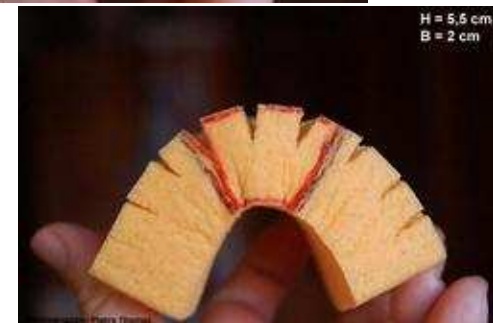
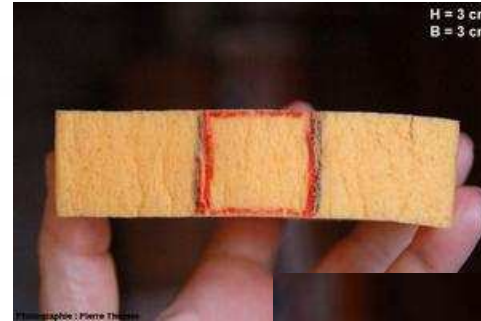
Épaisseur constante des couches

Intrados siège de compression montrant stylolithes, microfailles inverses voire microplis

Extrados siège d'extension présentant des fentes de tension

La déformation associée à un pli isopaque

Extrados en extension



Le pli anisopaque (photo 28)



Glissement différentiel de matière

=> Épaississement au niveau de la charnière

=> Amincissement des flancs

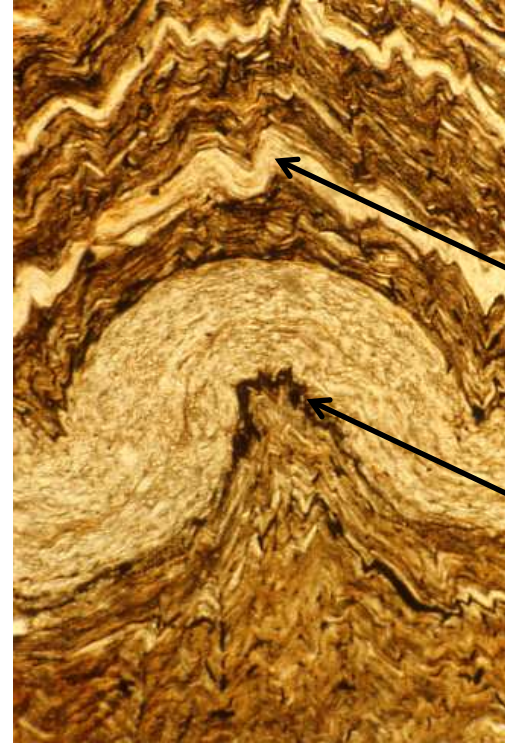
Des microplis (photos 29 et 30)

Charnière
épaisse



Flanc étroit

anisopaques



dysharmonie

Figure de
compression
(intrados)

isopaques

Les plis-faille



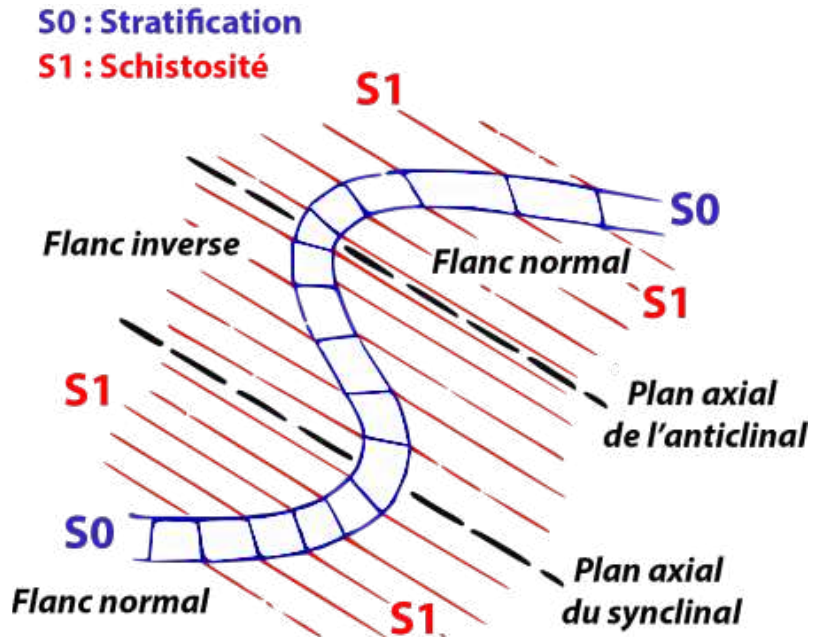
Bourg-d'Oisans

Photographie : Pierre Thomas

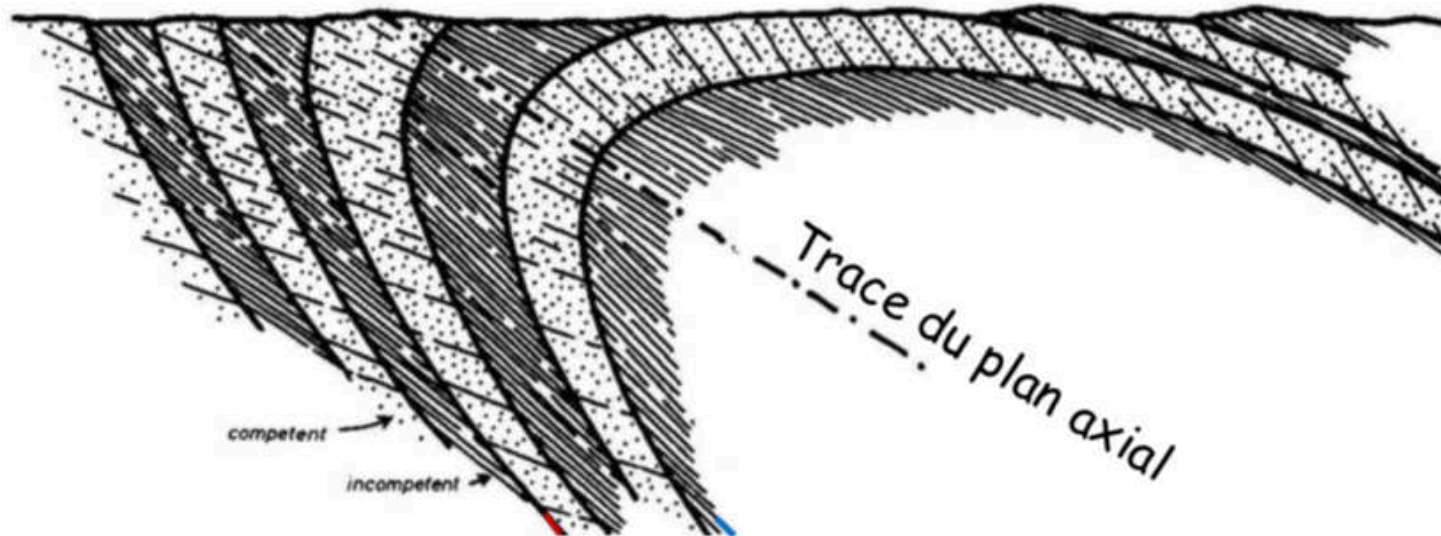
Source : planet-terre.ens-lyon.fr

Développement d'une schistosité de plan axial

La schistosité est plus marquée dans les niveaux incompetentes.
Elle apparaît pour $T > 300^{\circ}\text{C}$.



Plissement et schistosité



Niveaux compétents

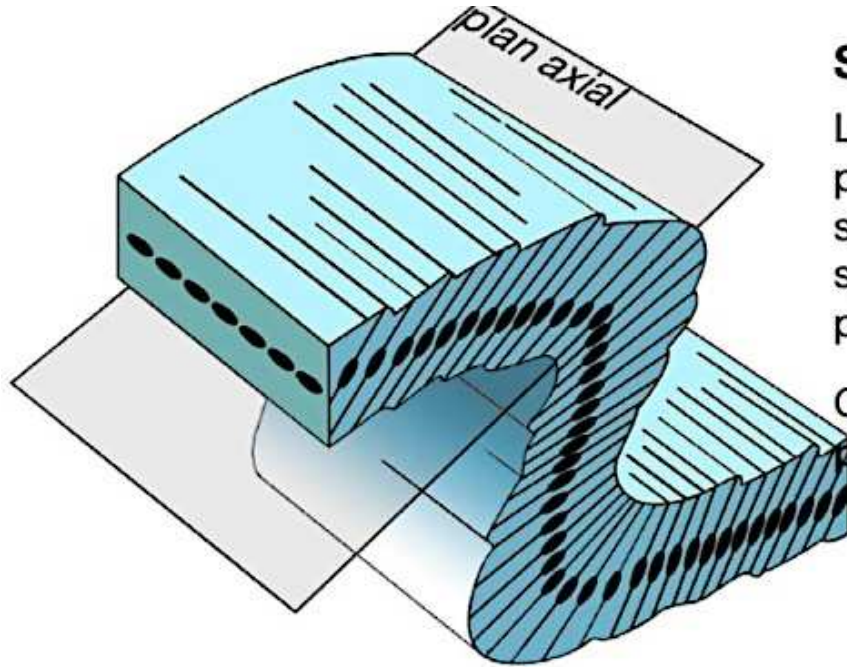
□ Schistosité
peu marquée

Niveaux incompétents

□ Schistosité
marquée

$S_1 = \text{schistosité}$
 $S_0 = \text{stratification}$

La schistosité de plan axial

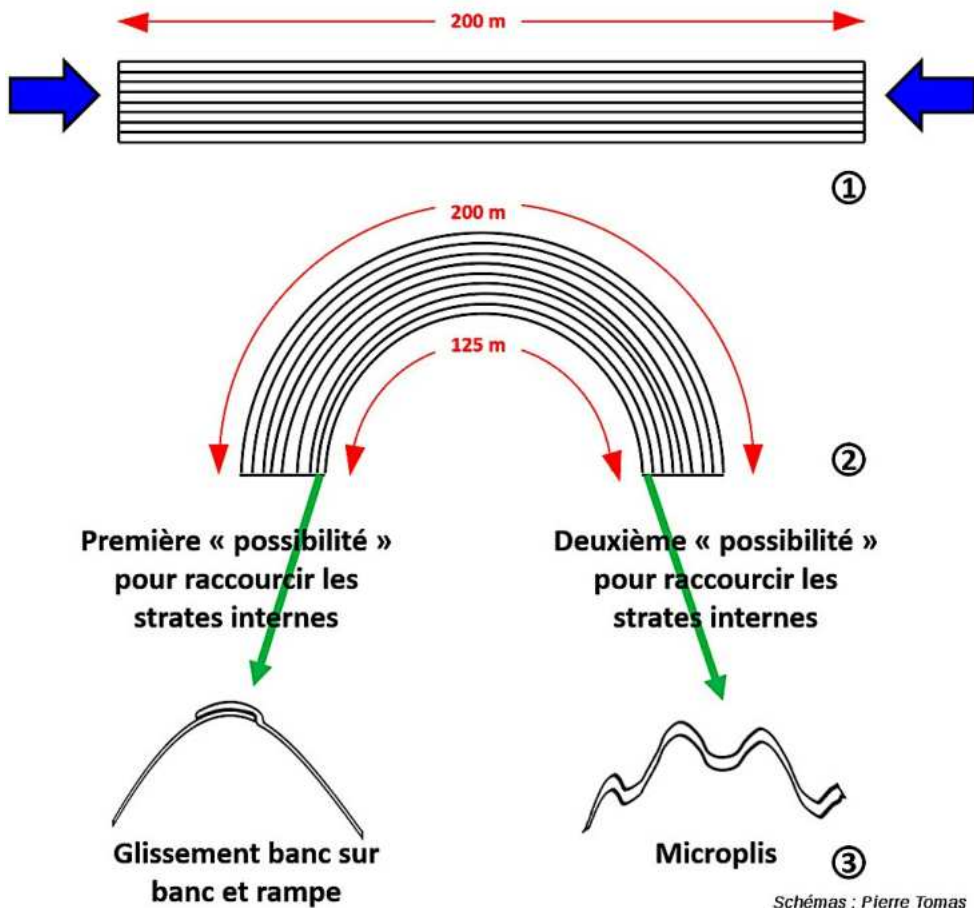


Schistosité de plan axial

Lorsqu'un plissement s'accompagne de la mise place d'une schistosité, celle-ci est le plus souvent parallèle au plan axial du pli.

On parle alors de **schistosité de plan axial**.

Les structures de l'intrados et la dysharmonie

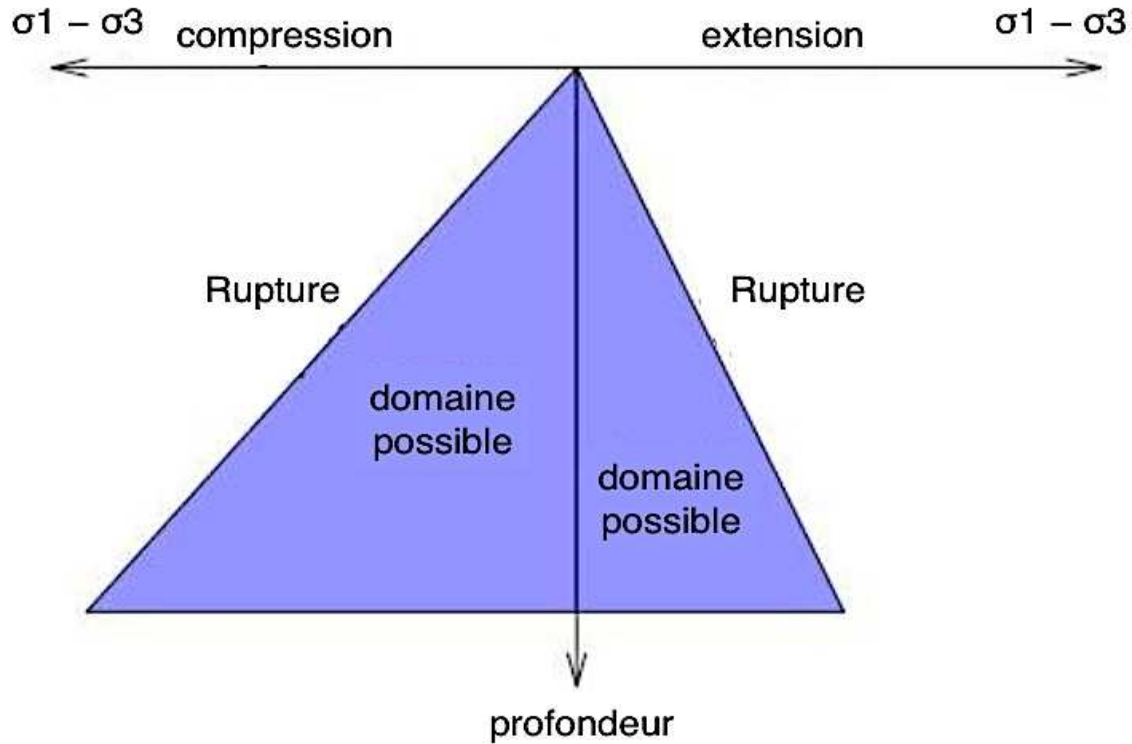


Pli de Beauchêne, Alpes du Sud

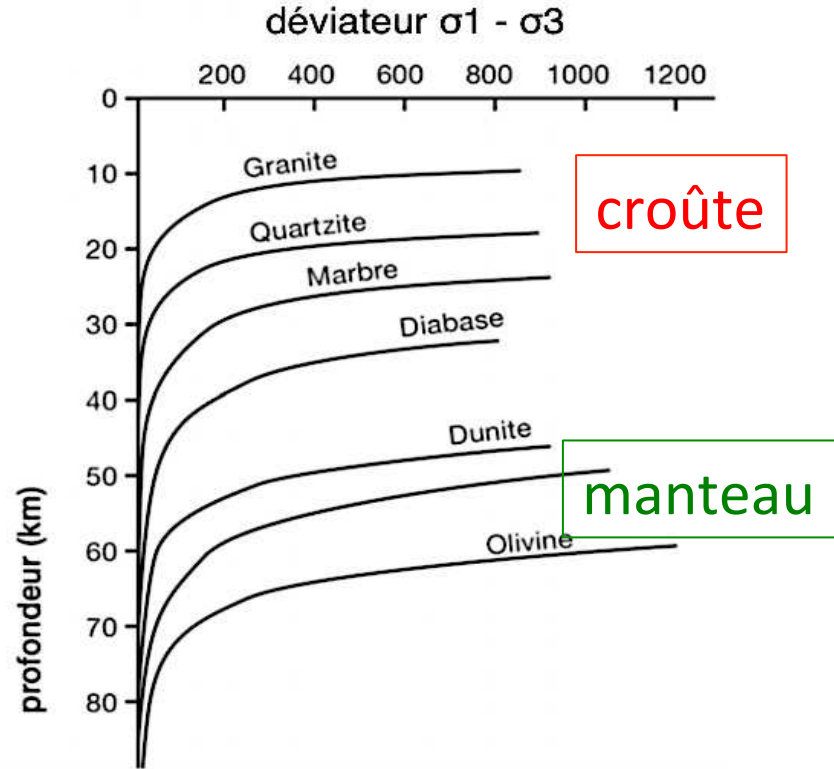
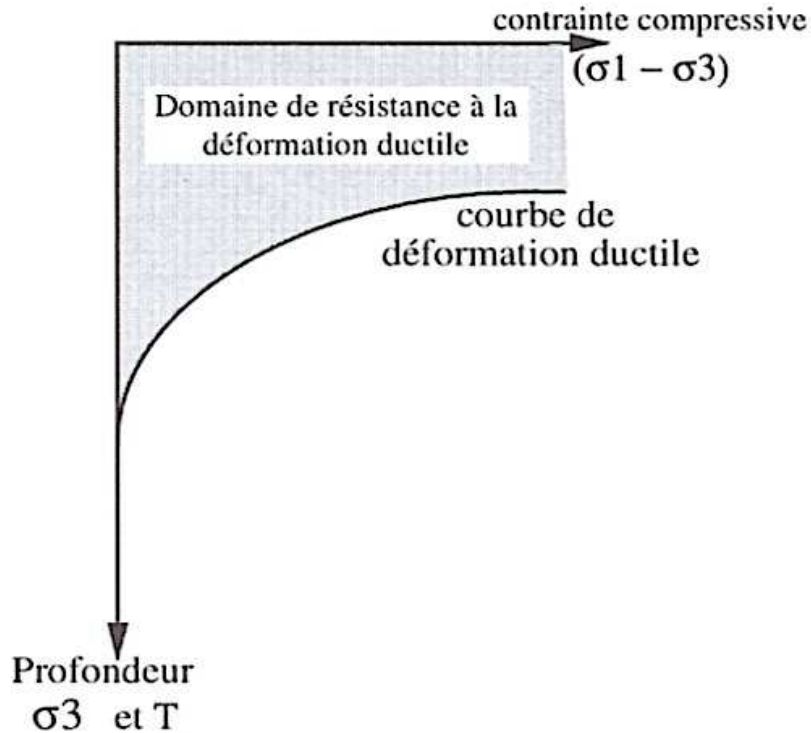
4. Le comportement mécanique de la lithosphère

4.1. Construction du profil rhéologique de la lithosphère

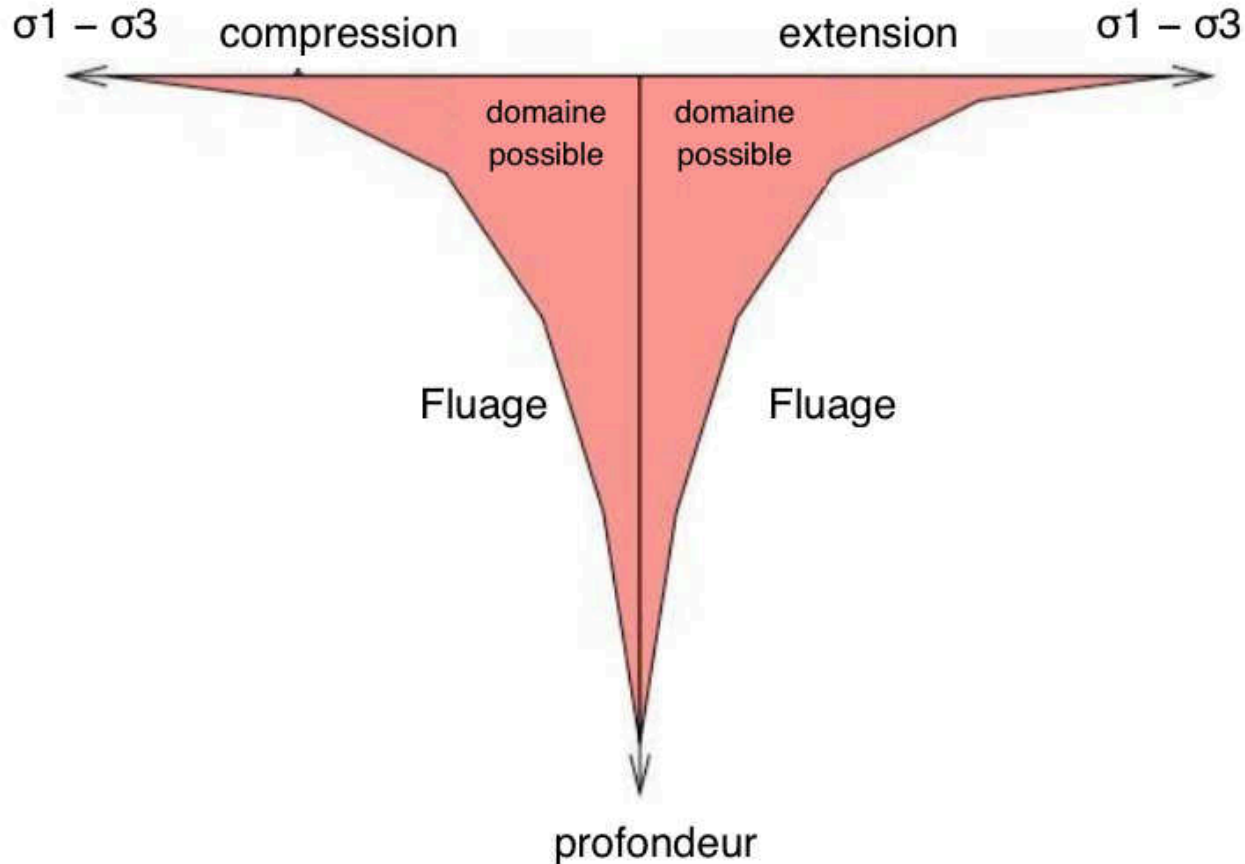
La droite de Byerlee



Les courbes de fluage



Fluage en compression et extension



Attention au vocabulaire

Pour les **déformations**

- discontinue
- continue homogène
- continue hétérogène

Pour les **roches** : **comportement**

- **fragile** (= cassant) si elle ne subit que pas ou peu de déformation continue avant la rupture.
- **ductile** si elle subit de grandes déformations continues (exemple : plastique avec fluage). Le domaine élastique est associé au comportement ductile.

La construction du profil rhéologique

En terme de déformation

contrainte compressive
($\sigma_1 - \sigma_3$)

fragile

discontinue

résistance à la déformation

courbe de déformation ductile

en-dessous de cette courbe = fluage

Pas de déformation ou déformation élastique

Profondeur de transition de comportement

point d'intersection des 2 courbes
= point de passage fragile-ductile

continue :
plastique
avec ou
sans fluage

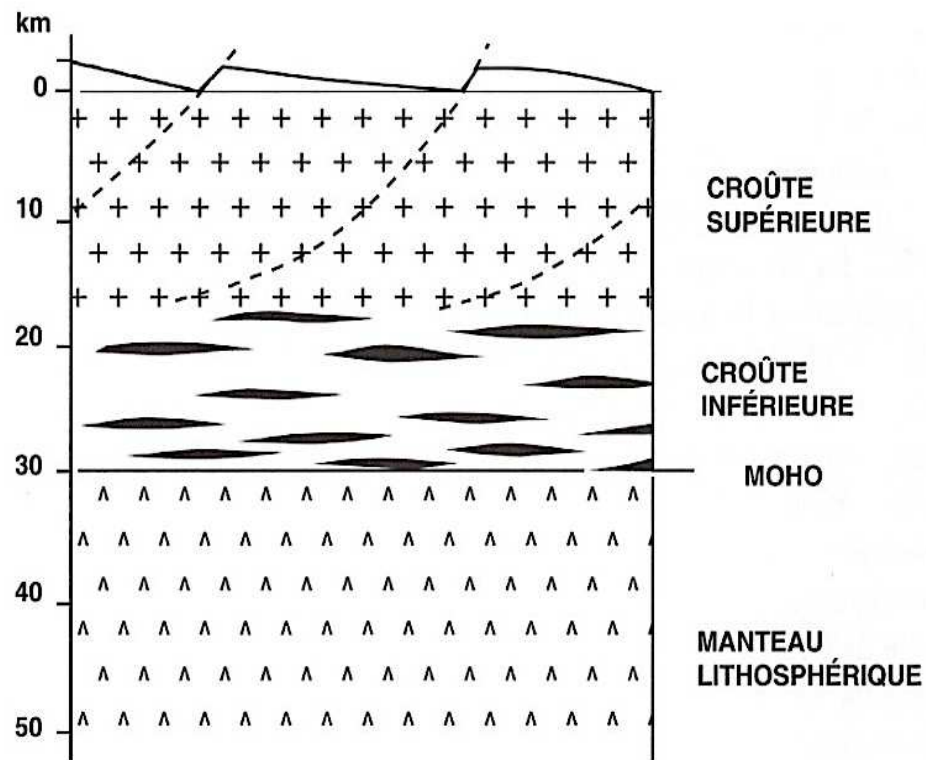
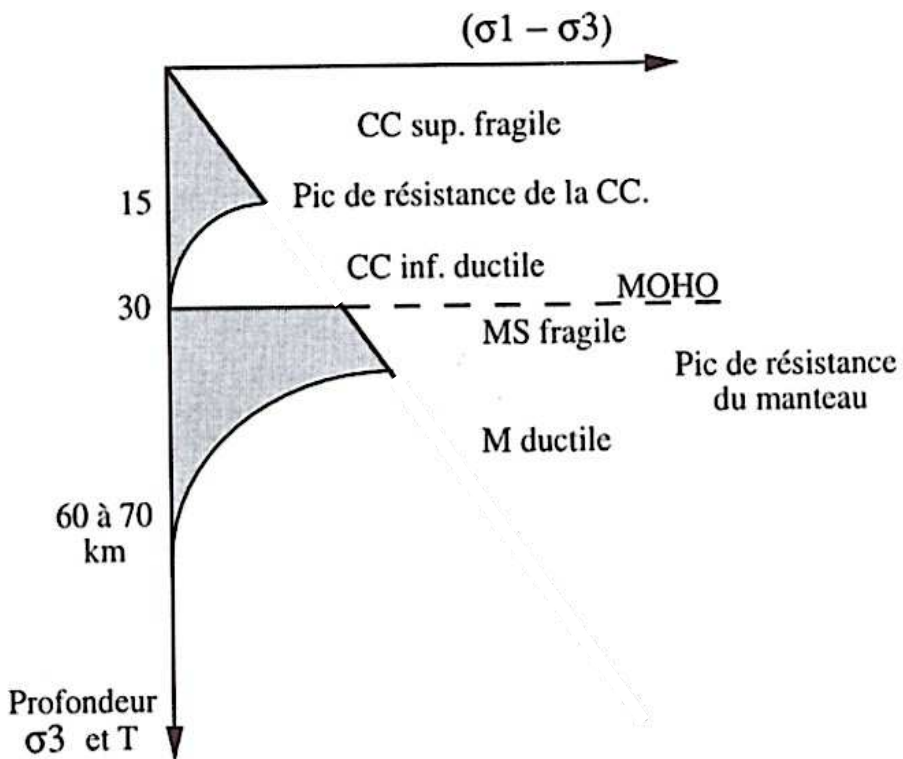
ductile

Profondeur
 σ_3 et T

droite de rupture en
déformation fragile
= droite de Byerlee

En terme de comportement

Le profil rhéologique de la lithosphère continentale



Source : d'après Boillot, conférence de JM Lardeaux

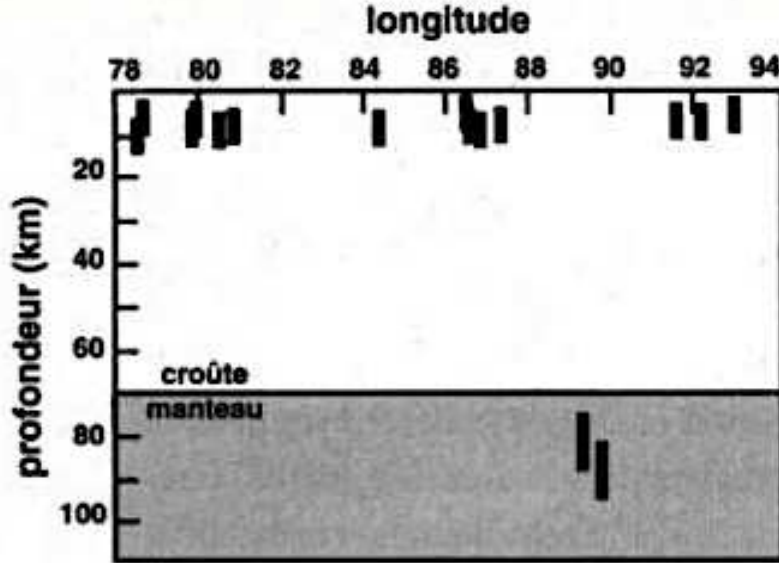
Les réserves au modèle

- Le modèle assimile la croûte à une roche unique, le granite, et ignore la diversité des roches constitutives.
- La vitesse de déformation n'est pas prise en compte.
- La droite de Byerlee est construite à température ambiante.
- La présence d'eau peut modifier le comportement des roches.
- Des séismes sont enregistrés dans les zones considérées comme ductiles par le modèle...

4. Le comportement mécanique de la lithosphère

4.2. Interprétation des profils rhéologiques de la lithosphère

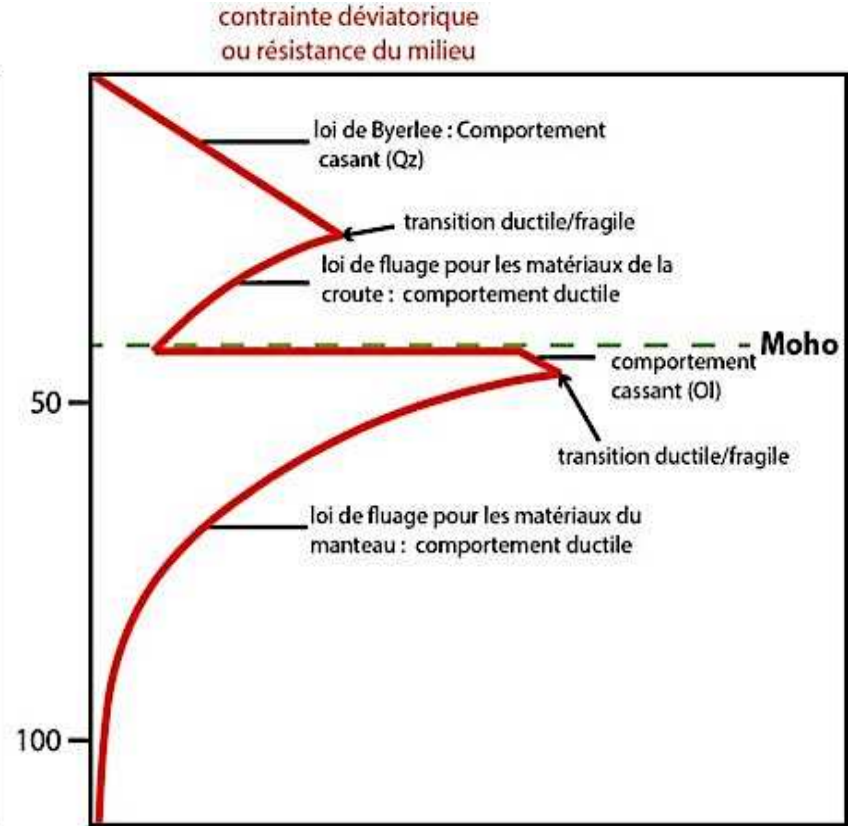
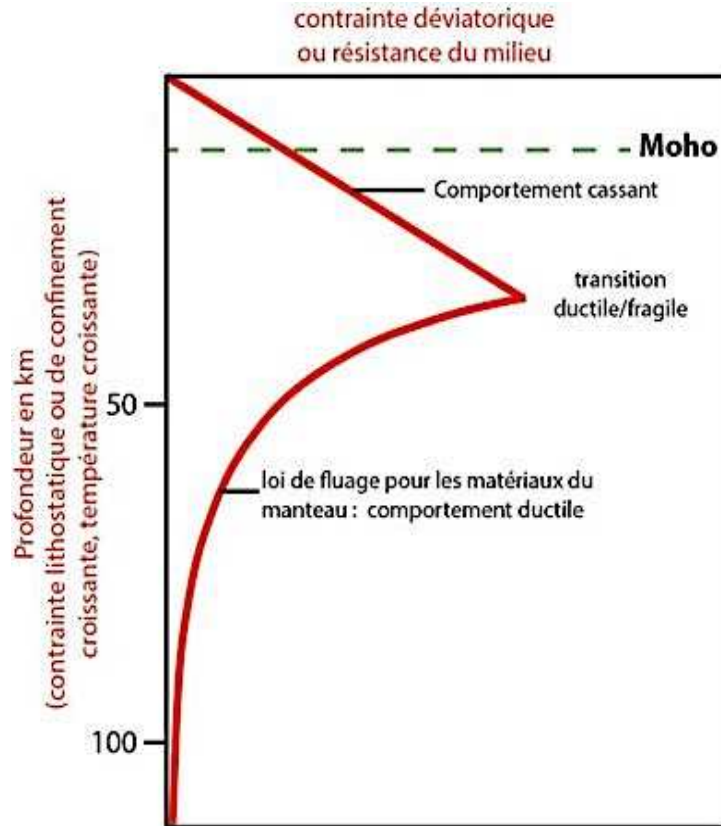
La sismogenèse



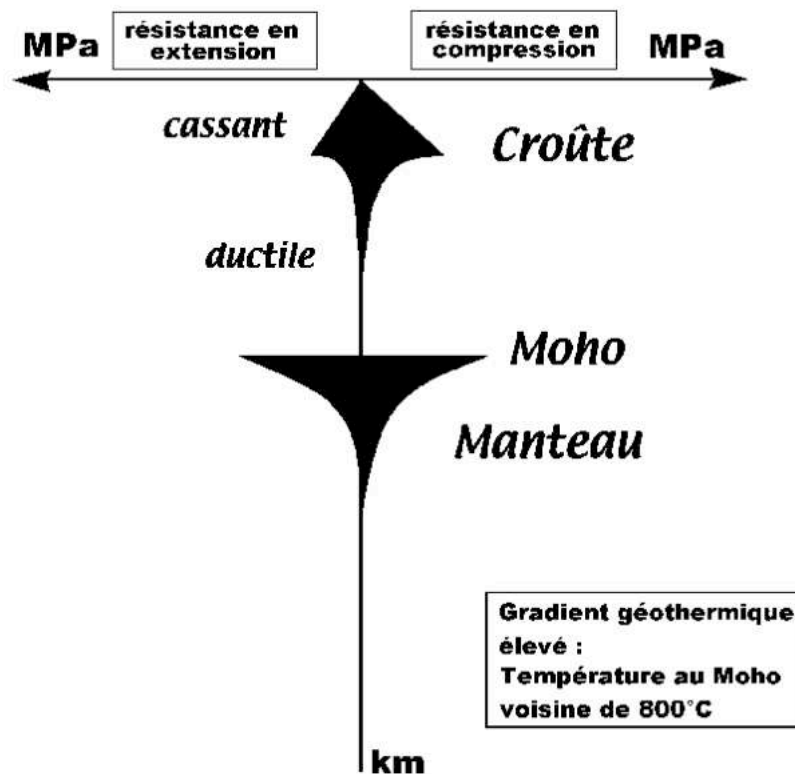
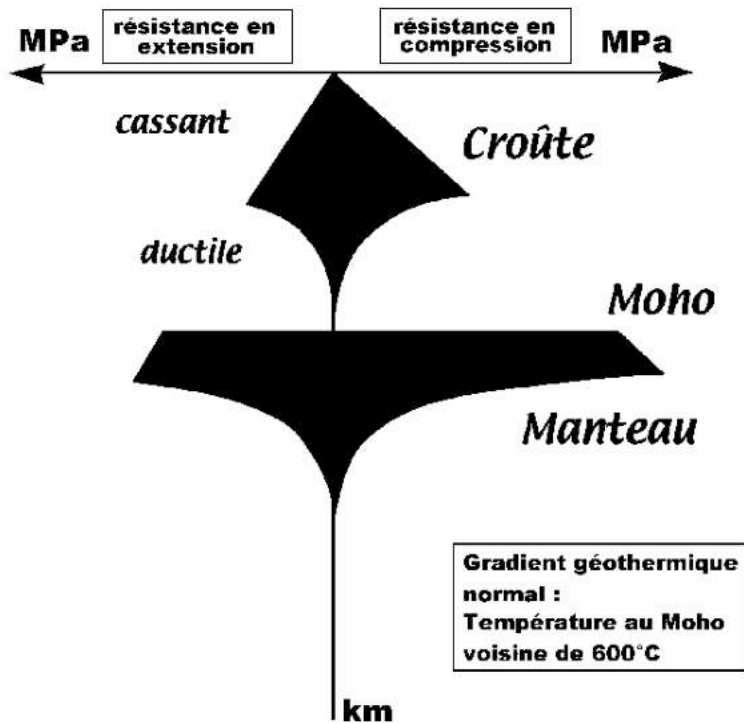
PLATEAU TIBETAIN

Les séismes sont enregistrés dans les niveaux structuraux fragiles : croûte supérieure et manteau supérieur.

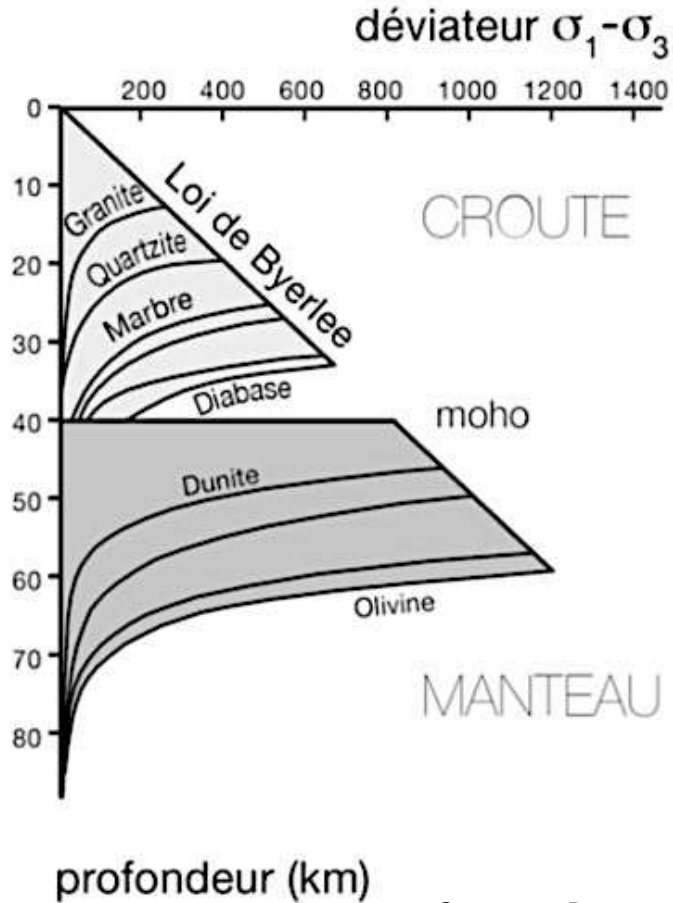
Les profils selon le type de lithosphère



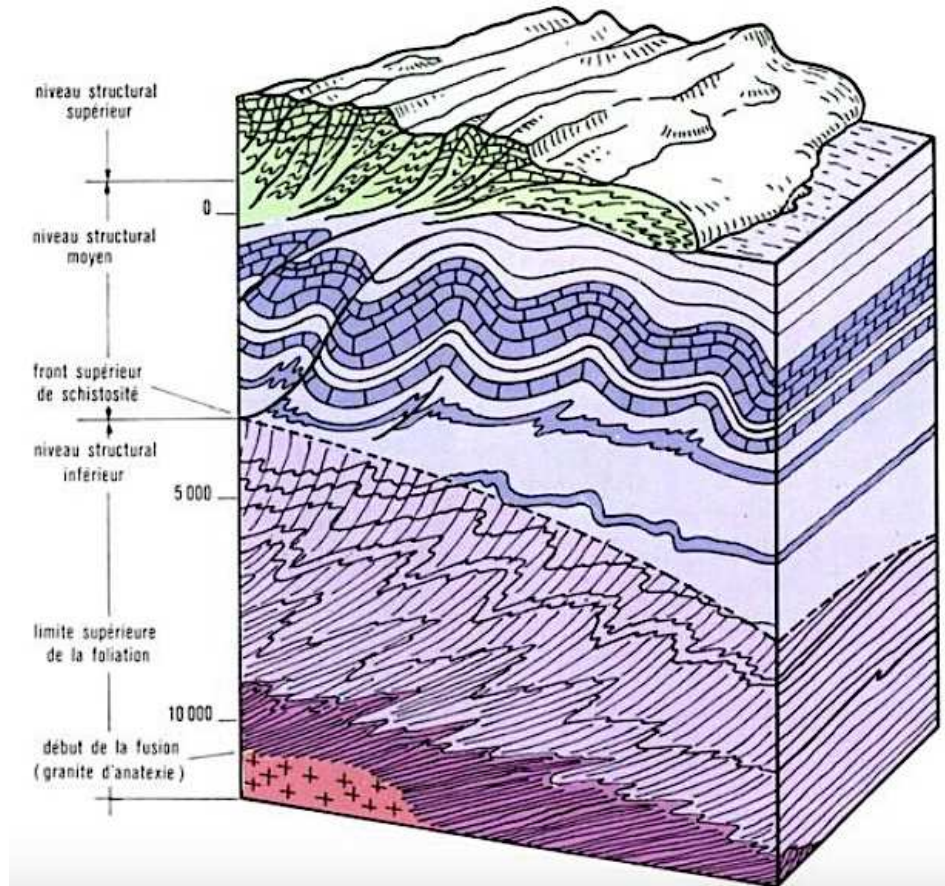
Les profils selon le gradient géothermique



Bilan



Source : Bruno Anselme



Source : Mattauer

CONCLUSION

- Déformation **discontinue** = failles (à toutes les échelles)
- Déformation **continue homogène** = cisaillement
- Déformation **continue hétérogène** = pli

- Les roches adoptent un comportement **ductile** (élastique et plastique avec éventuellement fluage) ou **fragile** (= cassant).

- Le comportement plastique est favorisé par l'incompétence des roches, les fortes pressions et températures, une faible vitesse d'application des contraintes ainsi que la présence de fluides.

- La lithosphère présente un profil rhéologique hétérogène.

Les différents objets selon l'échelle

Lame mince : ombres de pression – schistosité - microplis

Roche : fentes de tension – stylolithes – schistosité – linéation – figures C/S

Affleurement, carte : faille, pli

Lithosphère : bombement flexural, grandes failles...