



Déformations

Cours Géologie Ba2
Numéro 7

-  Forte importance
-  Moyenne importance
-  Faible importance

- Introduction
- Contraintes mécaniques
- Relations contraintes-déformations
- Notions de rhéologie
- Déformations cassantes (Fragile=localisé)
 - Diaclases
 - Fentes
 - Joint
 - Failles
- Déformations souples (Ductiles=non localisée)
 - Plis
 - Microstructures associées au plissement
 - Schistosité & foliation
 - Linéations

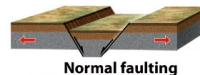
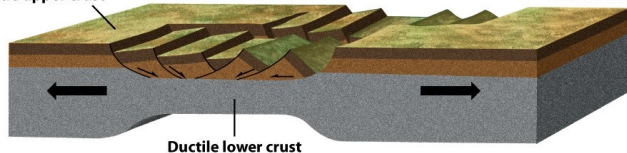
Pourquoi observe t'on des déformations....



Tectoniques des plaques

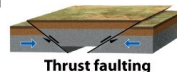
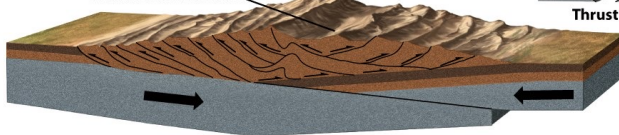
- (a) **Tensional tectonics:** Extension of continental crust produces normal faults with high dip angles in the upper crust that flatten with depth, forming curved fault surfaces.

Brittle upper crust

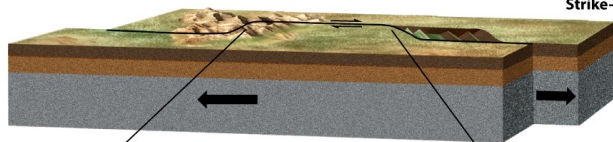
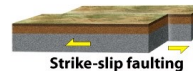


- (b) **Compressive tectonics:** Compression of continental crust occurs on low-angled thrust faults.

Fold and thrust belt



- (c) **Shearing tectonics:** Shearing of continental crust occurs on a nearly vertical strike-slip fault. The case shown here is for a right-lateral fault.



- Introduction
- **Contraintes mécaniques**
- Relations contraintes-déformations
- Notions de rhéologie
- Mesurer les structures
- Déformations cassantes (Fragile)
 - Diaclases
 - Fentes
 - Joint
 - Failles
- Déformation ductiles
 - Plis
 - Microstructures associées au plissement
 - Schistosité & foliation
 - Linéations

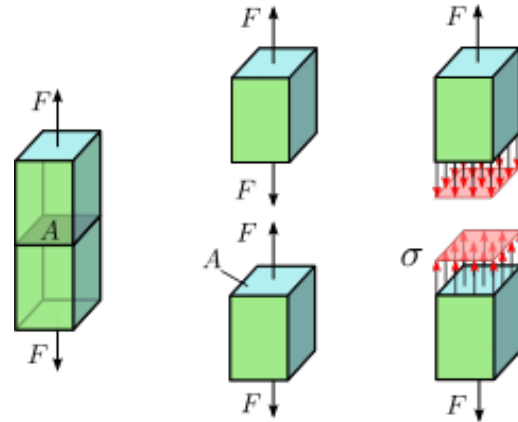
Force

$$F = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix}$$

La contrainte (σ) est une force appliquée sur une surface qui s'exprime en Pa (N/m²). C'est l'équivalent d'une pression

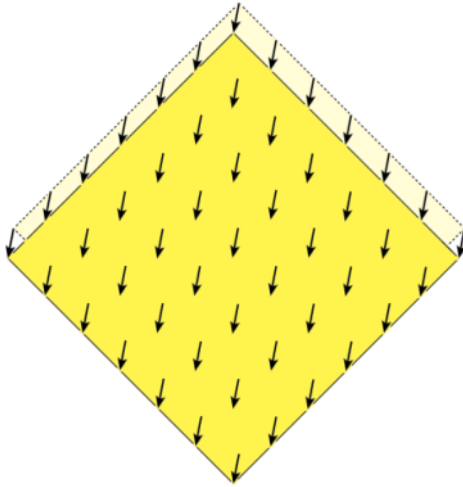
Contrainte

$$\sigma = dF/dA$$

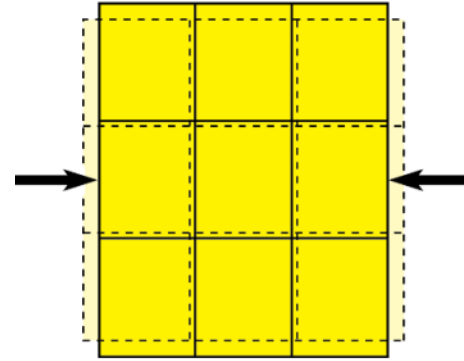


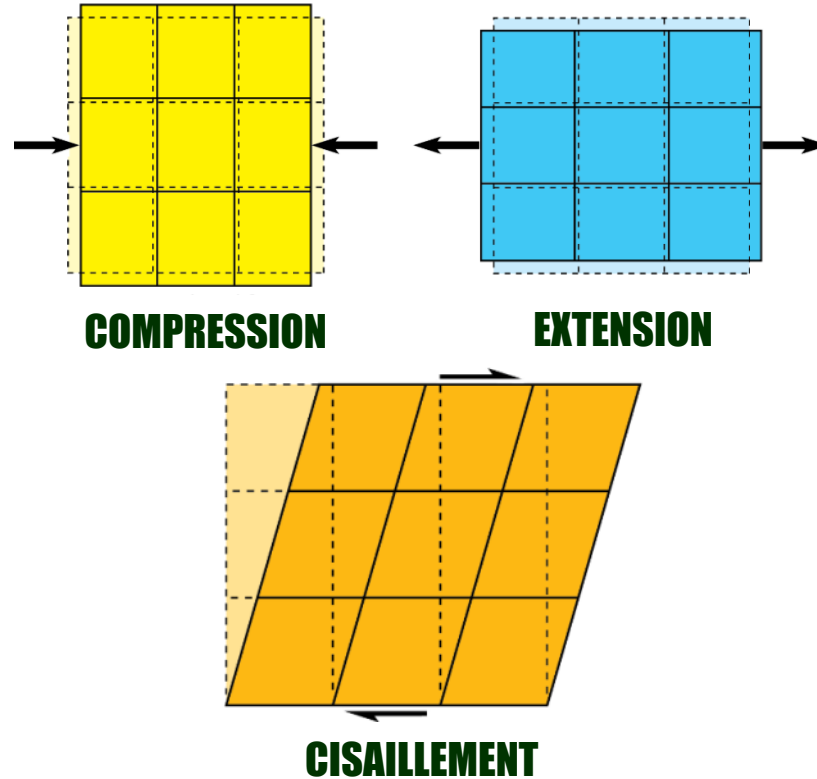


volume



surface





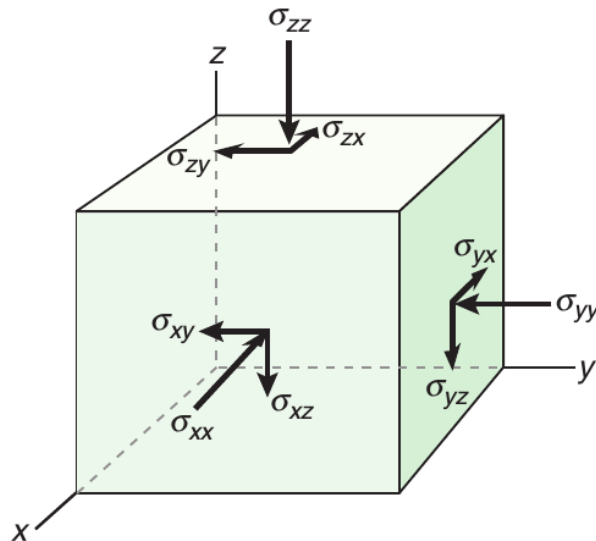
L'état de contrainte en un point est complètement défini par les composantes des contraintes normales et de cisaillement par rapport à un système de coordonnées orthogonal XYZ. En général, les valeurs des composantes de contrainte changent si le système de coordonnées subit une rotation.

Tenseur des contraintes

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Contraintes cisailantes

Contraintes normales





L'état de contrainte en un point est complètement défini par les composantes des contraintes normales et de cisaillement par rapport à un système de coordonnées orthogonal XYZ. En général, les valeurs des composantes de contrainte changent si le système de coordonnées subit une rotation.

Avec une certaine orientation (X'Y'Z'), toutes les contraintes de cisaillement s'annulent et l'état de contrainte est totalement défini par 3 composantes de contraintes normales.

Ces 3 composantes de contraintes normales sont appelées contraintes principales et les axes (X'Y'Z') correspondants sont appelés axes principaux

Tenseur des contraintes

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Tenseur des contraintes principales

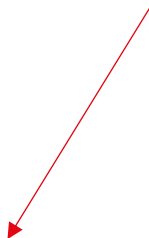
$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_1 & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & S_2 & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & S_3 \end{bmatrix}$$

ISOTROPE

DEVIATORIQUE



Conservation des formes=
Dilatation



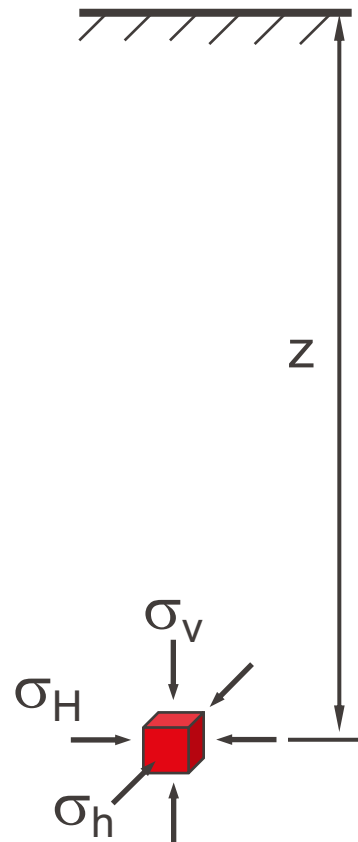
Distortion

Contrainte verticale et horizontale

En profondeur, la contrainte dans la roche est la contrainte de couverture générée par le poids des matériaux.

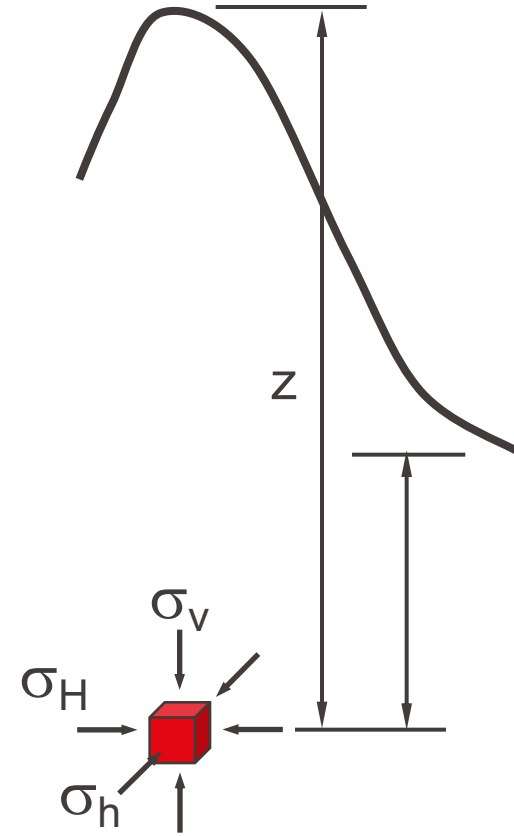
Le poids spécifique moyen des roches est de 2.7. La valeur de la contrainte en profondeur peut donc être estimée par

$$\sigma_v \text{ (MPa)} \approx 0.027 z \text{ (m)}$$



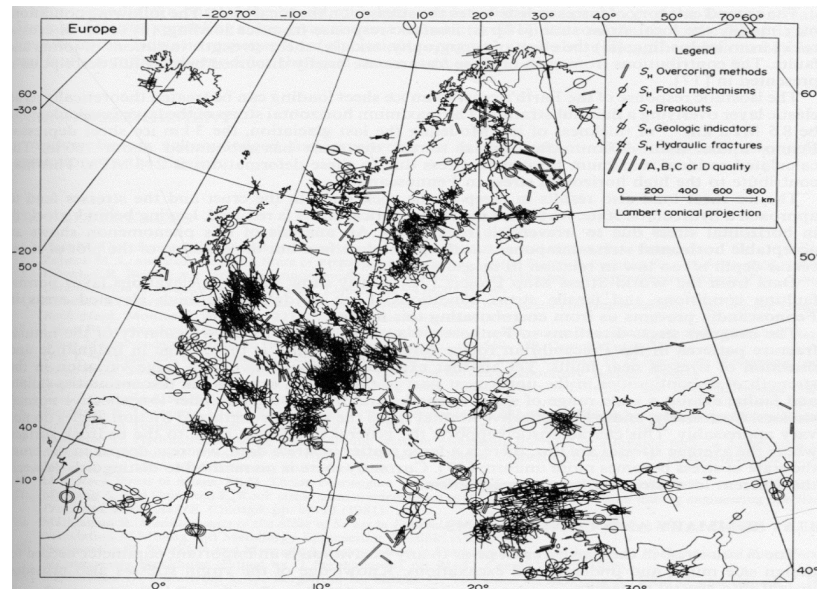
Le champ des contraintes in situ peut aussi être modifié par des facteurs et processus géologiques :

- La surface topographique
- L'érosion
- Les intrusions
- Les failles et la création de failles.



Les contraintes horizontales dans la roche sont principalement tectoniques.

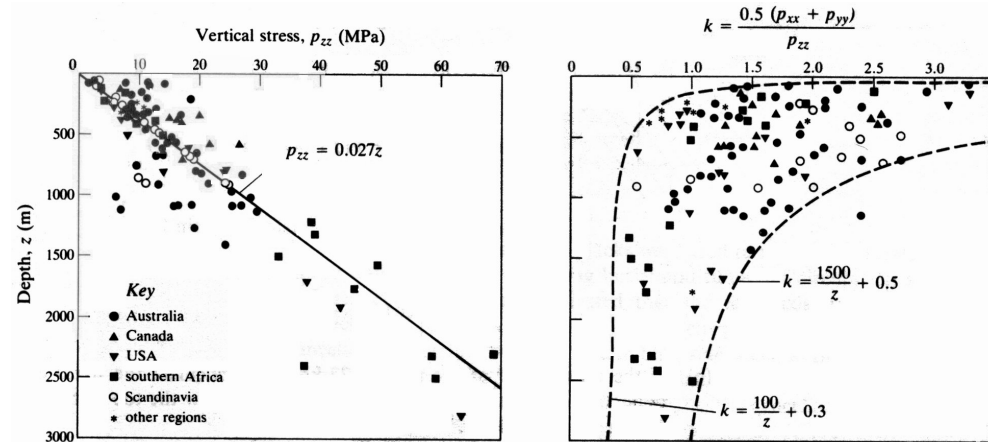
Les contraintes horizontales dans les roches sont généralement supérieures à la contrainte verticale. La contrainte horizontale maximale suivant dans la même direction que le mouvement de convergence des plaques tectoniques. Les contraintes tectoniques varient fortement en terme d'intensité, et peuvent être exceptionnellement fortes.



La mesure des contraintes in situ montre que la contrainte verticale vaut à peu près $0.027z$, poids des couches de couverture.

Le rapport entre la contrainte horizontale moyenne $(\sigma_H + \sigma_h)/2$ et la contrainte verticale varie de 0.5 à 3.0.

À des profondeurs usuelles pour le génie civil (<1000 m), les variations de la contrainte horizontale sont grandes





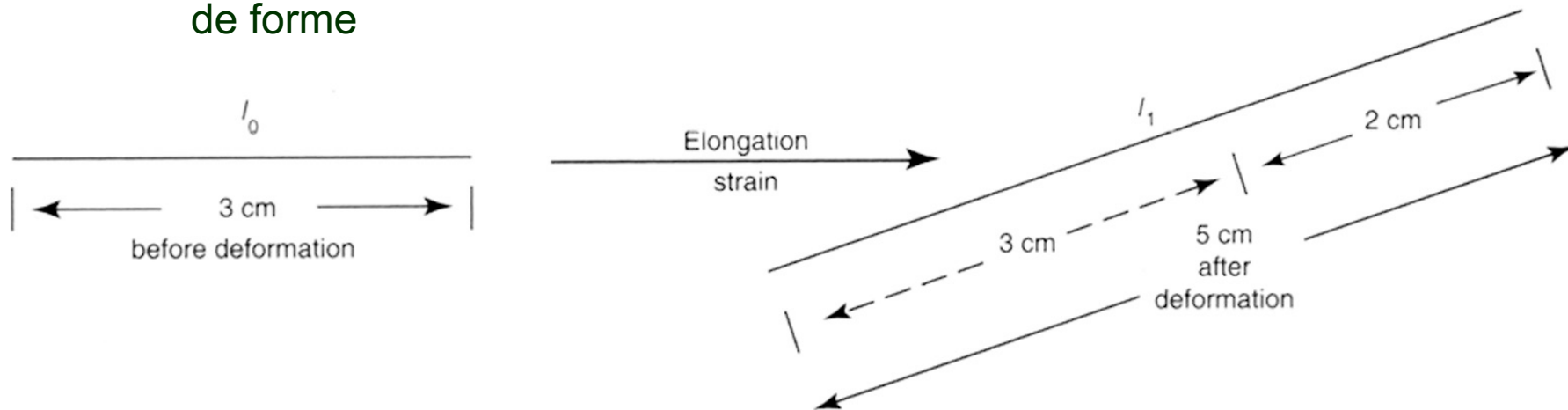
Dans la roche en GC, la contrainte horizontale est normalement la contrainte principale, alors que la contrainte verticale ou l'autre contrainte horizontale représentent les contraintes principales mineures.

$$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v \quad \text{ou} \quad \sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$$

La contrainte verticale peut être estimée à partir de la couverture. Si les directions et les intensités des contraintes horizontales sont nécessaires, des mesures des contraintes doivent être effectuées in situ.

- Introduction
- Contraintes mécaniques
- Relations contraintes-déformations
- Notions de rhéologie
- Mesurer les structures
- Déformations cassantes (Fragile)
 - Diaclases
 - Fentes
 - Joint
 - Failles
- Déformation ductiles
 - Plis
 - Microstructures associées au plissement
 - Schistosité & foliation
 - Linéations

- Mécanique: étude des effets des forces sur un corps
- Corps soumis à des forces externes: translation, rotation, changement de forme



Déformation?

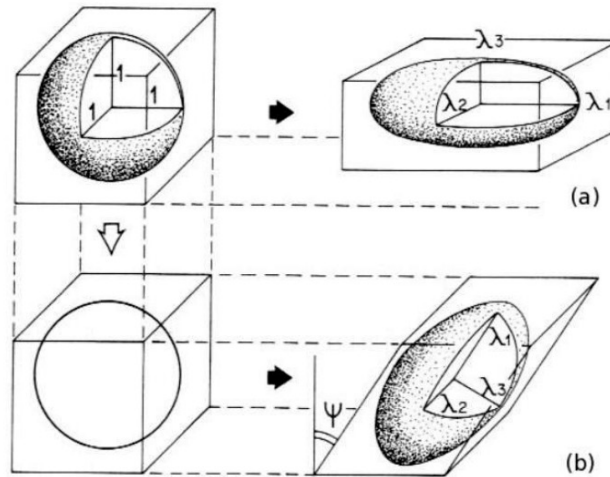
$$\varepsilon = (l_1 - l_0)/l_0 = (5-3)/3 = \mathbf{0.67}$$

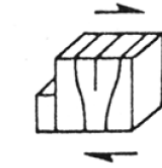
▪ Elongation?

$$S = l_1/l_0 = 5/3 = \mathbf{1.67}$$

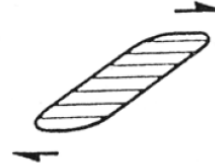
Ellipsoïde des déformations

- Défini par 3 vecteurs (λ_1 , λ_2 , λ_3) qui caractérisent le champ de déformation. (Tenseur des déformations).
- Observation de l'objet géologique.

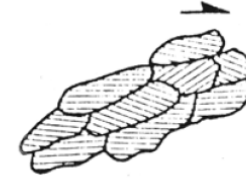




Dislocations
 10^{-8} cm



Cristal
 10^{-1} cm



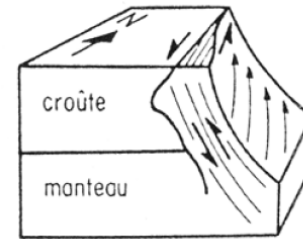
Echantillon
1 cm



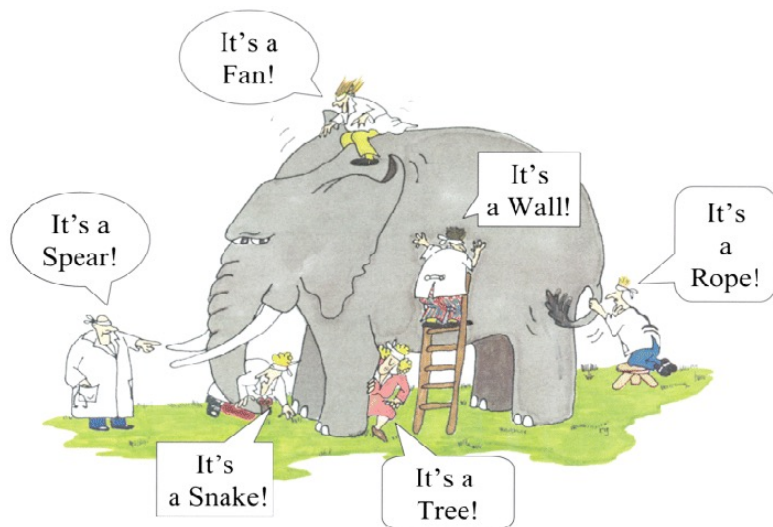
Affleurement
 10^3 cm

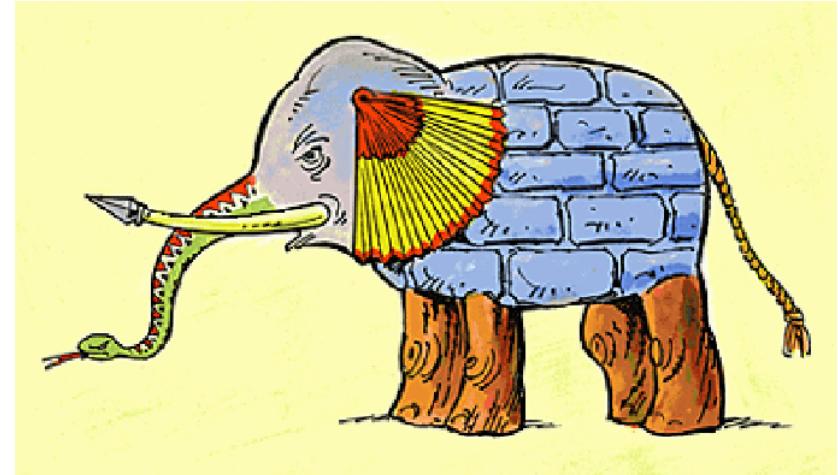
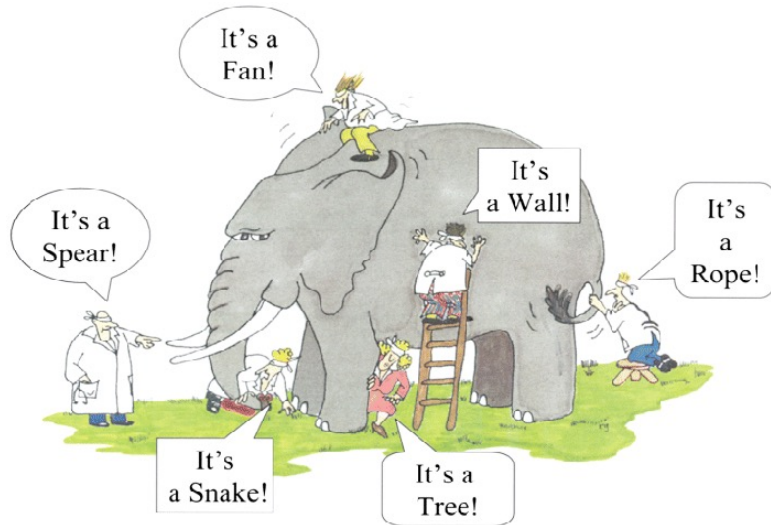


Massif
 10^6 cm

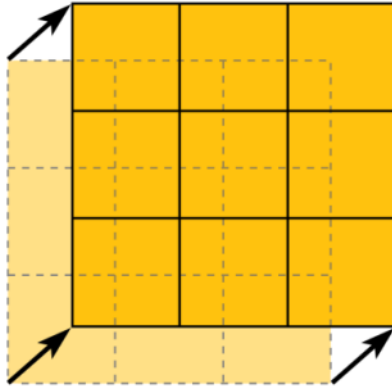


Plaque
 10^8 cm

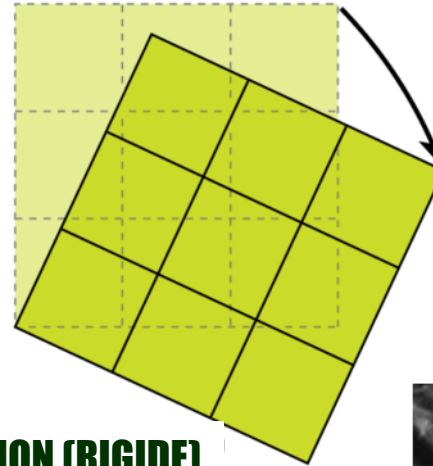




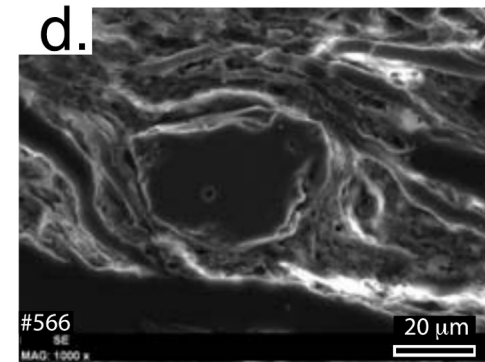
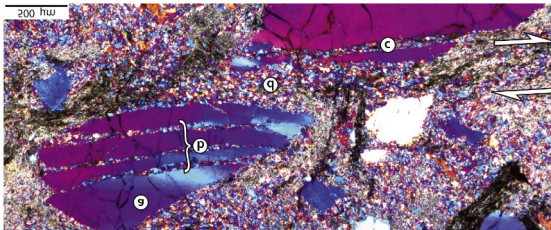
- Déformation rigide: rotation, translation (forme et taille originales)



TRANSLATION (RIGIDE)



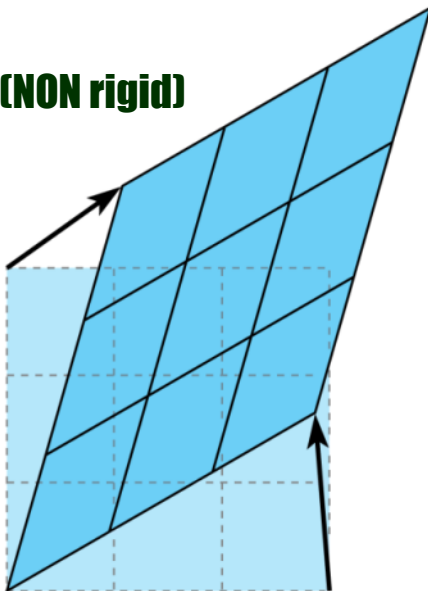
ROTATION (RIGIDE)



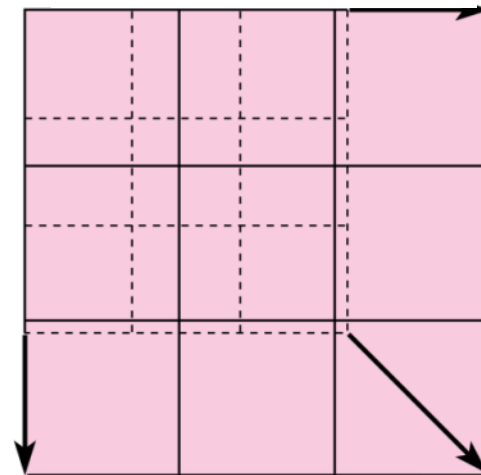


- Forces «absorbées»: déplacement de particules
- Le corps contraint (stress) change de forme
- Déformation (strain): déformation non rigide du corps, ou changement de forme.

DISTORTION (NON rigid)



DILATATION (NON rigid)

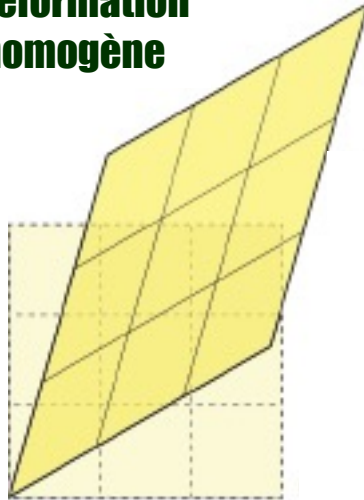


Déformation homogène vs hétérogène

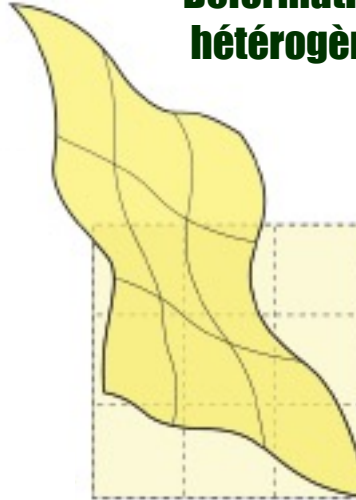


- homogène (lignes initialement parallèles, le restant après la déformation) ou hétérogène (cas le plus fréquent)

**Déformation
homogène**

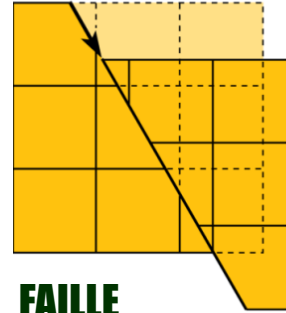


**Déformation
hétérogène**



- 2 modes de déformations
 - Fragile (localisée, perte de cohésion)
 - Ductile (distribuée, sans perte de cohésion)

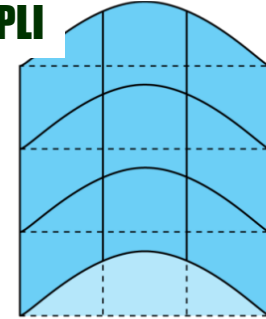
DEFORMATION FRAGILE



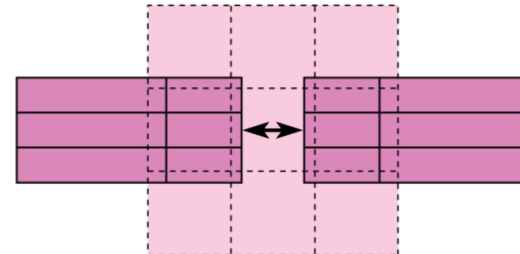
FAILLE

DEFORMATION DUCTILE

PLI



BOUDINAGE



DEFORMATION FRAGILE + DUCTILE







Déformation pénétrative

- Texture de déformation uniformément distribuée dans une roche

Foliation



Schistosité



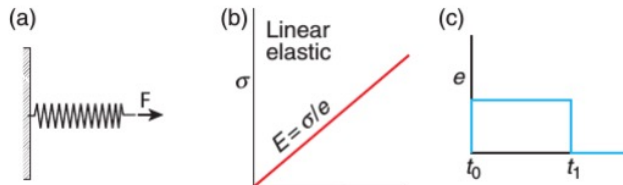
Linéation



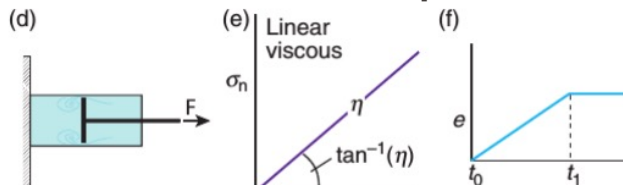
Diorite gneiss

- Introduction
- Contraintes mécaniques
- Relations contraintes-déformations
- **Notions de rhéologie**
- Mesurer les structures
- Déformations cassantes (Fragile)
 - Diaclases
 - Fentes
 - Joint
 - Failles
- Déformation ductiles
 - Plis
 - Microstructures associées au plissement
 - Schistosité & foliation
 - Linéations

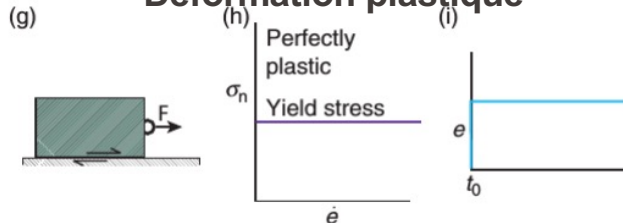
Déformation élastique



Déformation visqueuse



Déformation plastique



Analogie du ressort

- Relation linéaire contrainte-déformation
- Réponse instantané à la contrainte
- Pas de déformation permanente

Analogie du piston

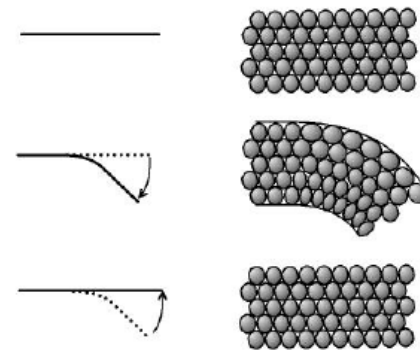
- Relation linéaire contrainte-vitesse de déformation
- Contrainte dépend de la vitesse de déformation
- Réponse différée (+ temps, + de déformation)
- Déformation permanente

Analogie du patin

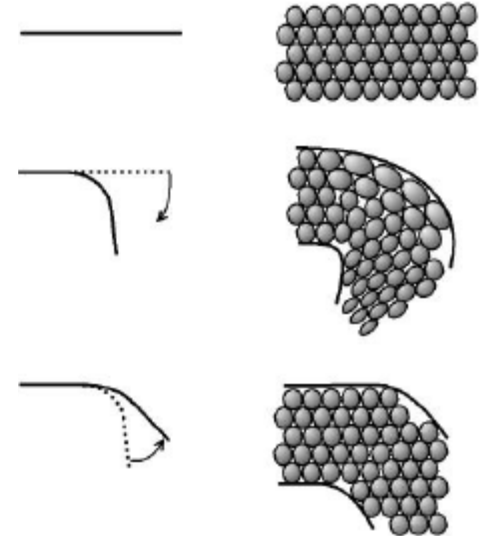
- Déformation à contrainte constante quand la limite de plasticité (yield point) est atteinte
- Contrainte ne dépend pas de la vitesse de déformation
- Déformation permanente



- L'élasticité caractérise une déformation immédiate (pas de seuil) et réversible → relation proportionnelle entre contrainte et déformation.
 - Cause physique: élasticité des liaisons atomiques
 - Loi de Hooke: $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ (E , *module de young*)

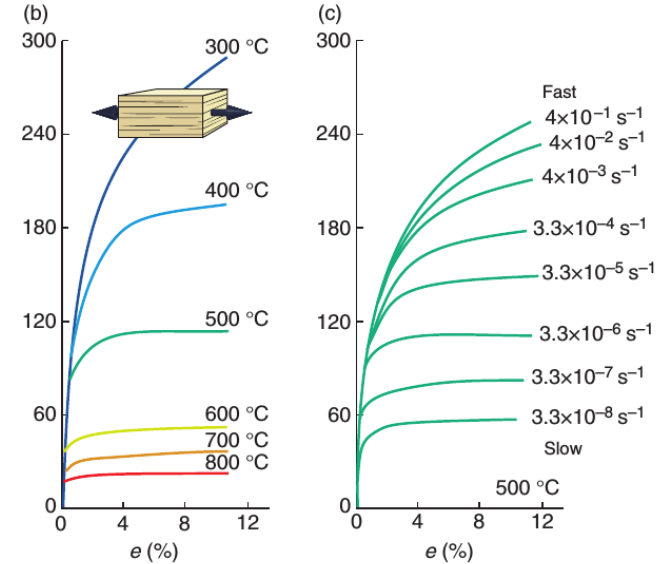


- La plasticité d'une roche caractérise l'existence d'un seuil et d'une déformation résiduelle
- Cause physique:
 - Migration des impuretés du réseau cristallin (atome + dislocation)
 - Cassure du matériau



- La viscosité n'a pas de seuil mais inclut le paramètre temps dans son expression
- Loi expérimentale

$$d\varepsilon/dt = A \sigma_d^n \exp^{-Q/RT}$$

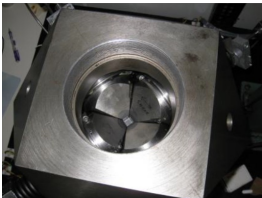




- Comportement des corps réels
- Les corps réels ne sont jamais parfaitement élastiques, plastiques ou visqueux. De plus, leur comportement peut changer au cours de la déformation. Dans le cas général, il combinent les propriétés des 3 types fondamentaux.
- C'est le cas des roches qui sont élastiques pour une contrainte faible et deviennent plastiques lorsque la contrainte devient plus forte.
- Avec la température, le comportement visqueux augmente

Mesure des propriétés mécaniques

- Oil confining medium rig
- Paterson Rig (gaz)
- Griggs Rig
- D-DIA
- Multi anvil
- Diamond anvil





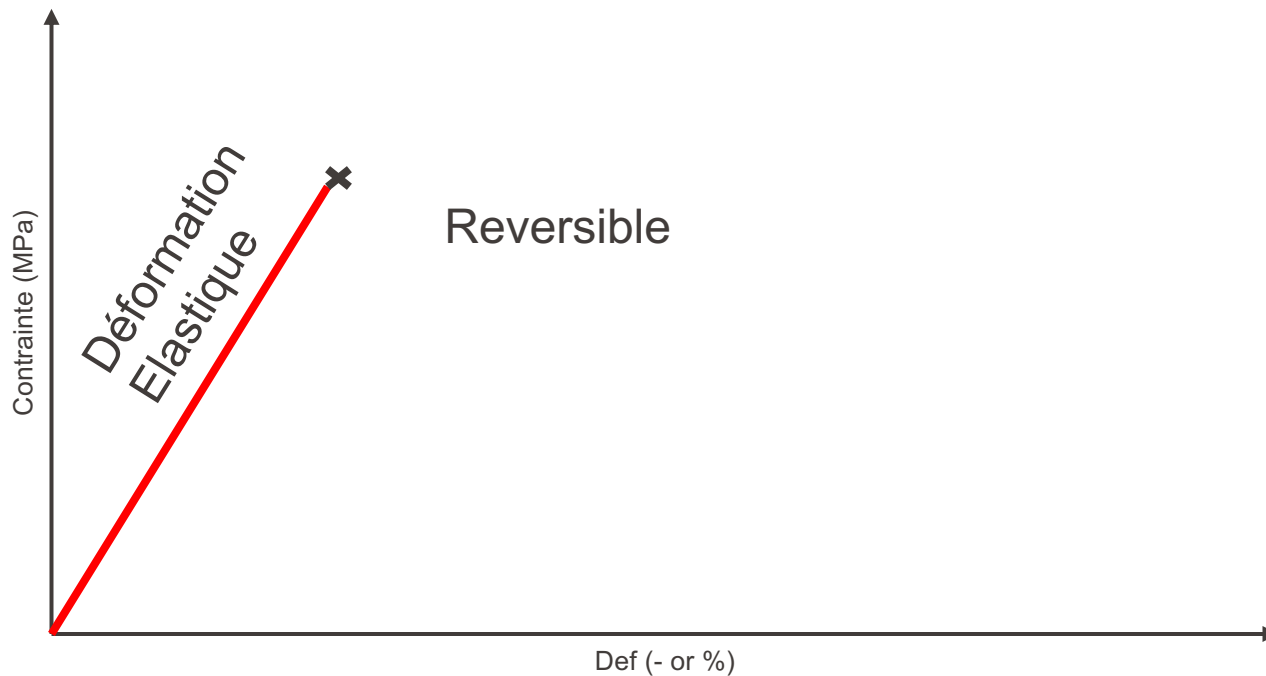
LABO

- Vitesse de déformation: $10^{-3} - 10^{-9} \text{ s}^{-1}$
- Contrainte différentielle: $10 - 500 \text{ MPa}$
- Température: $273 - 1600 \text{ K}$
- Pression: $0 - 0.5 \text{ GPa}$
- Déformation finie: max 10%
- Echantillon: qq. cm
- Taille de grain

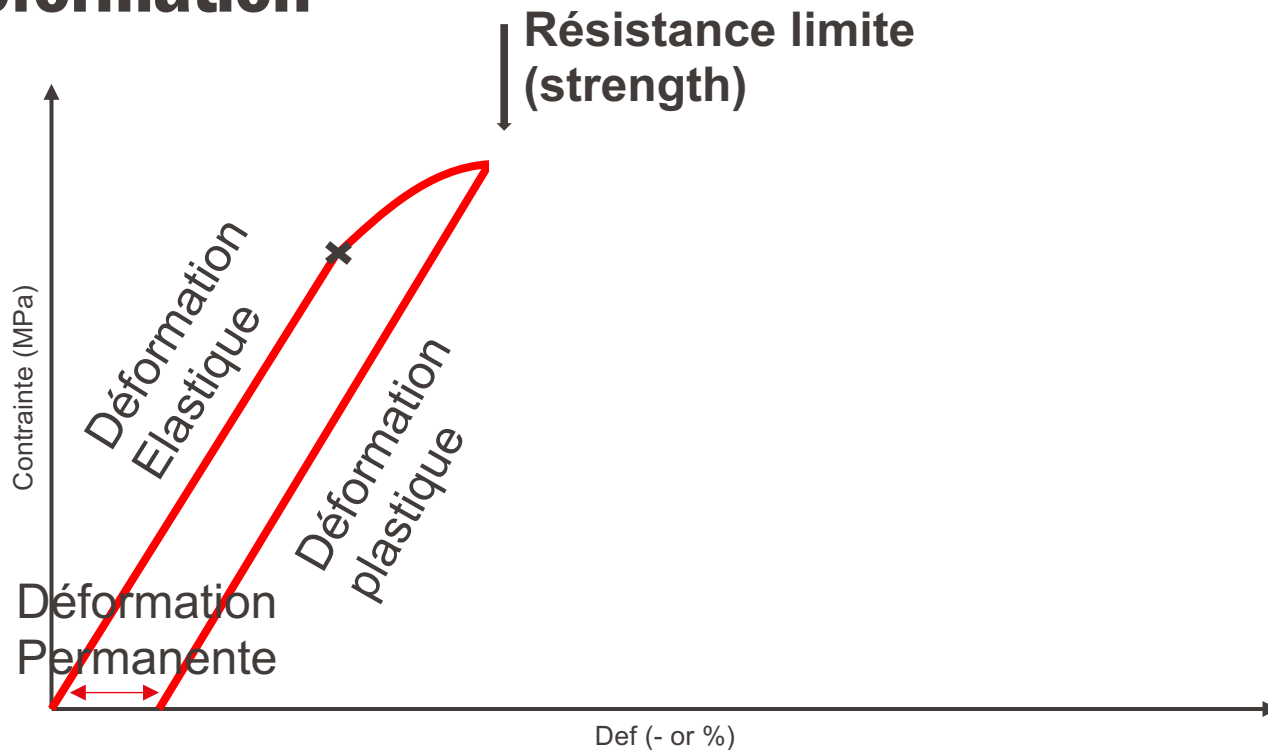
NATURE

$10^{-12} - 10^{-16} \text{ s}^{-1}$
 $0 - 100 \text{ MPa}$
 $273 - 1000 \text{ K}$
 $0 - 3 \text{ GPa}$
max ??
k*km

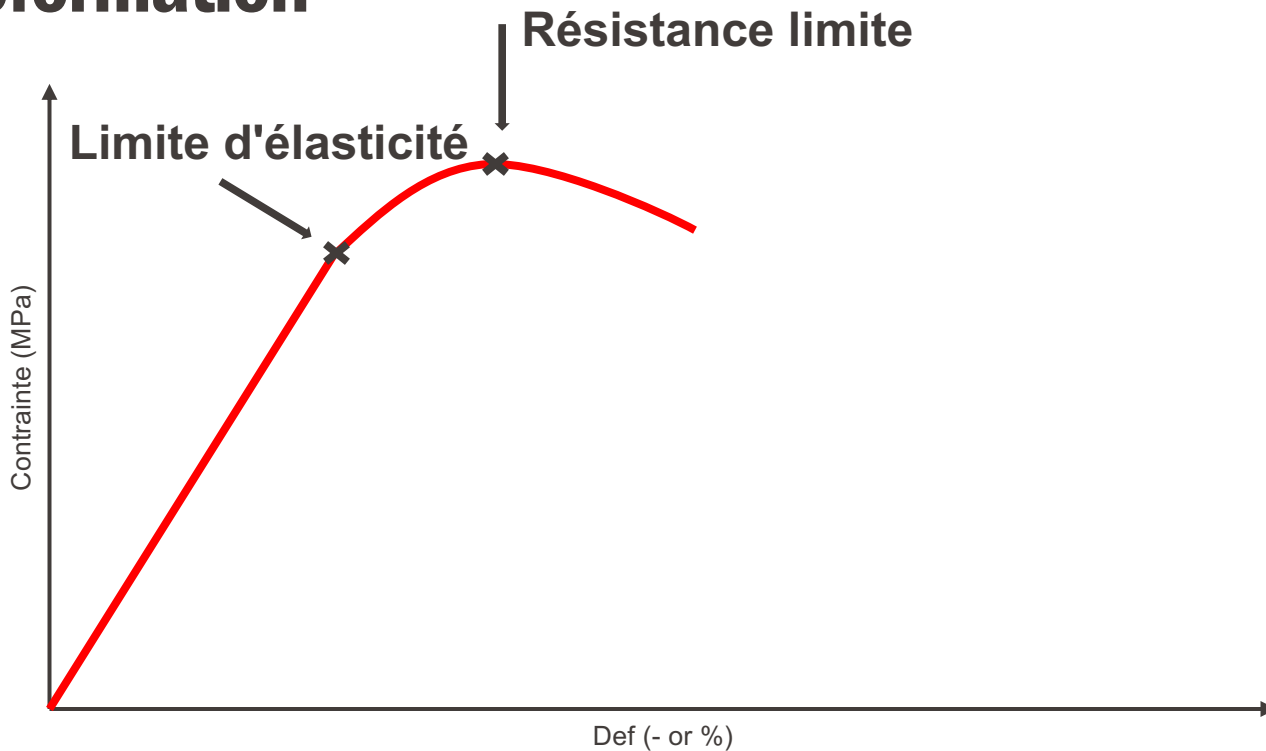
Courbe contrainte vs déformation



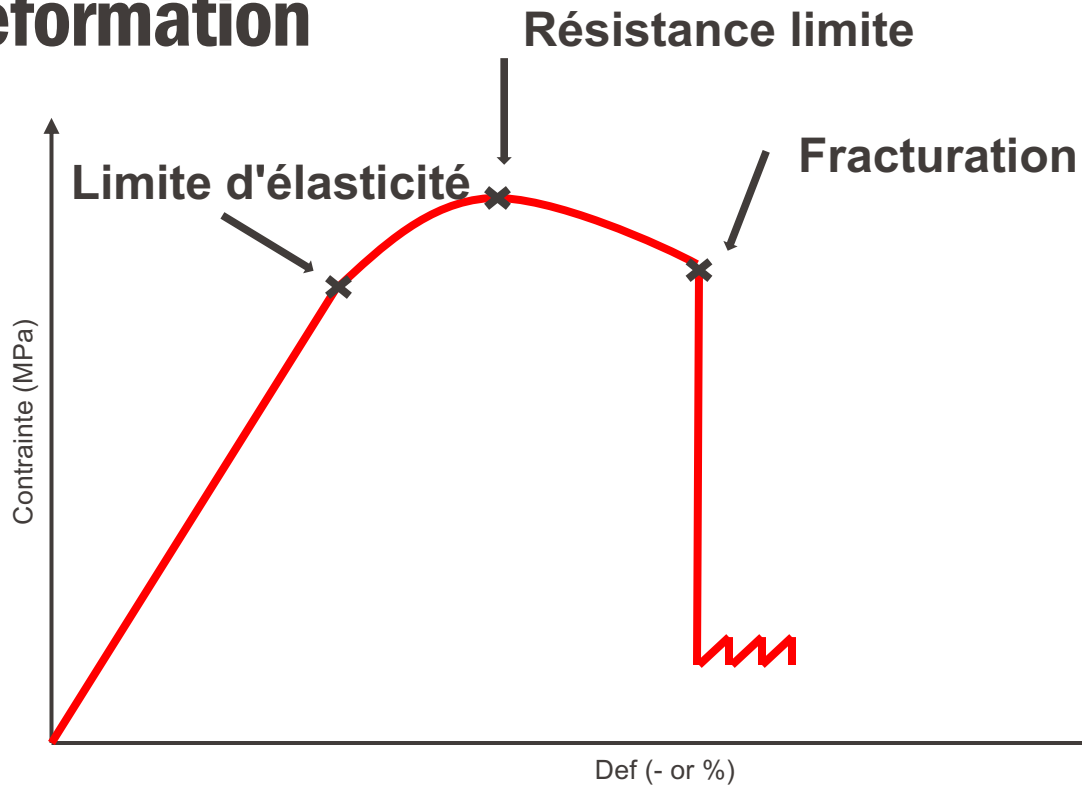
Courbe contrainte vs déformation



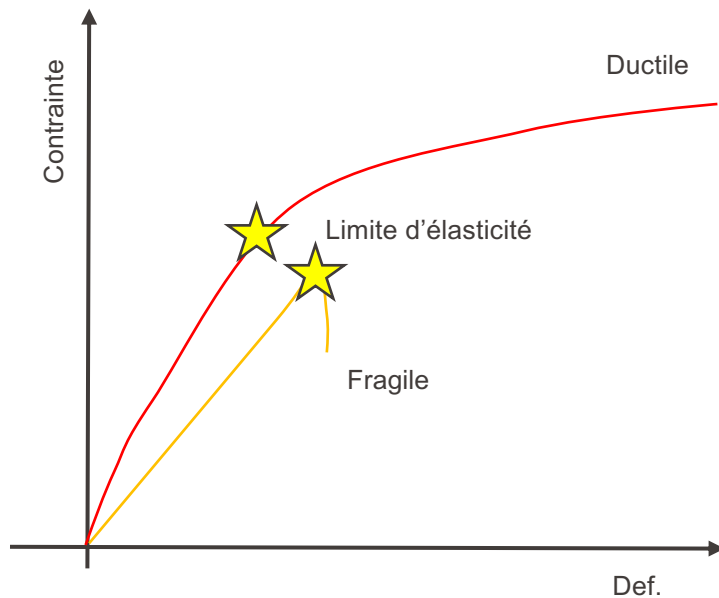
Courbe contrainte vs déformation



Courbe contrainte vs déformation

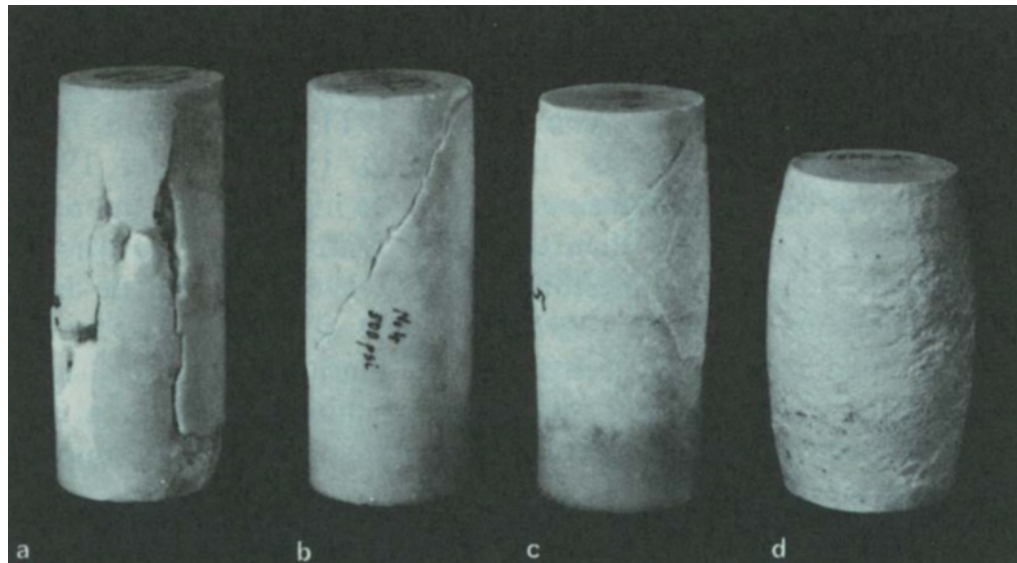
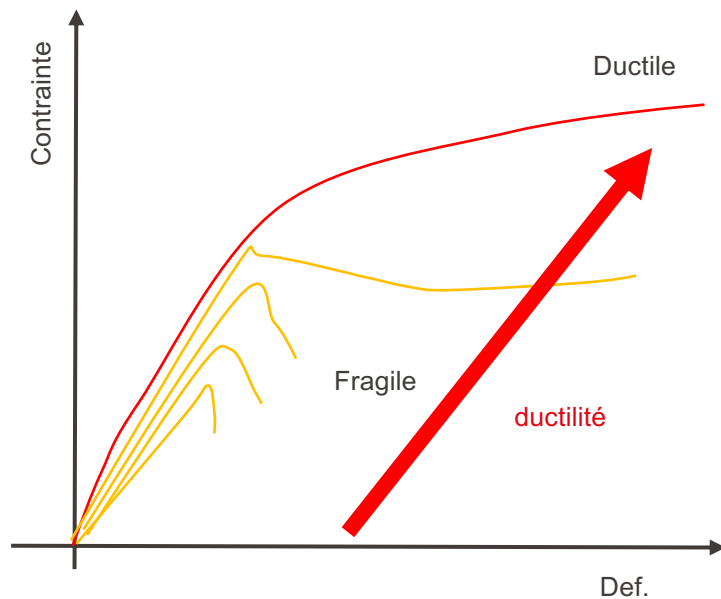


Courbe contrainte vs déformation



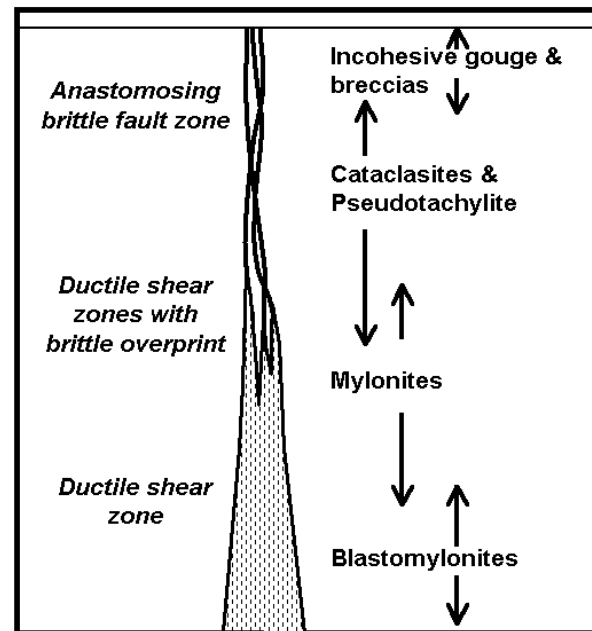
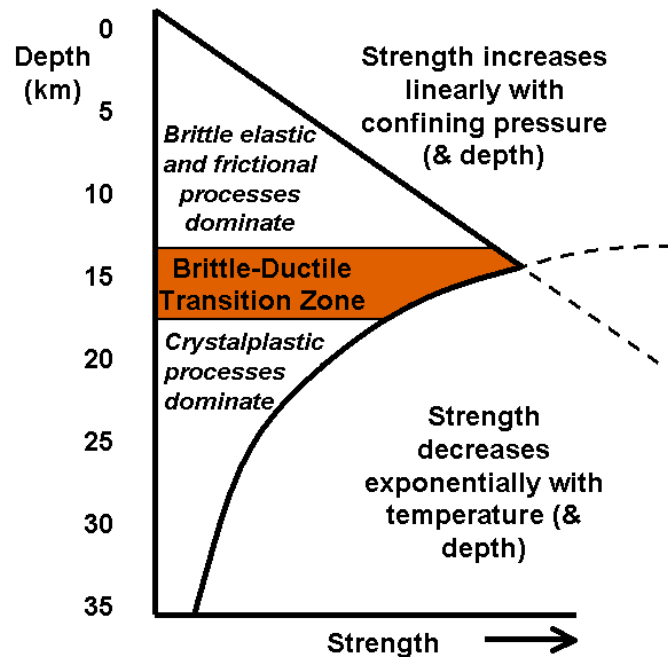
La déformation fragile est une déformation discontinue, localisée le long d'un plan de glissement, ou plan de fracture contrairement à la déformation ductile qui est continue et distribuée.

Déformation fragile vs. ductile





Behavior	Brittle	Ductile
Permanent Strain	<1%	lots
Makes Faults	Yes	No, Typically wide shear zones
Dilatancy	Yes	Depending of starting porosity
Mineral Plasticity	No	Yes, except cataclastic flow
Temp. - Time Dependence	Little or none	Yes
Makes Earthquakes	Yes	No



- Introduction
- Contraintes mécaniques
- Relations contraintes-déformations
- Notions de rhéologie
- **Mesurer les structure**
- Déformations cassantes (Fragile)
 - Diaclases
 - Fentes
 - Joint
 - Failles
- Déformation ductiles
 - Plis
 - Microstructures associées au plissement
 - Schistosité & foliation
 - Linéations

Documenter et mesurer les structures

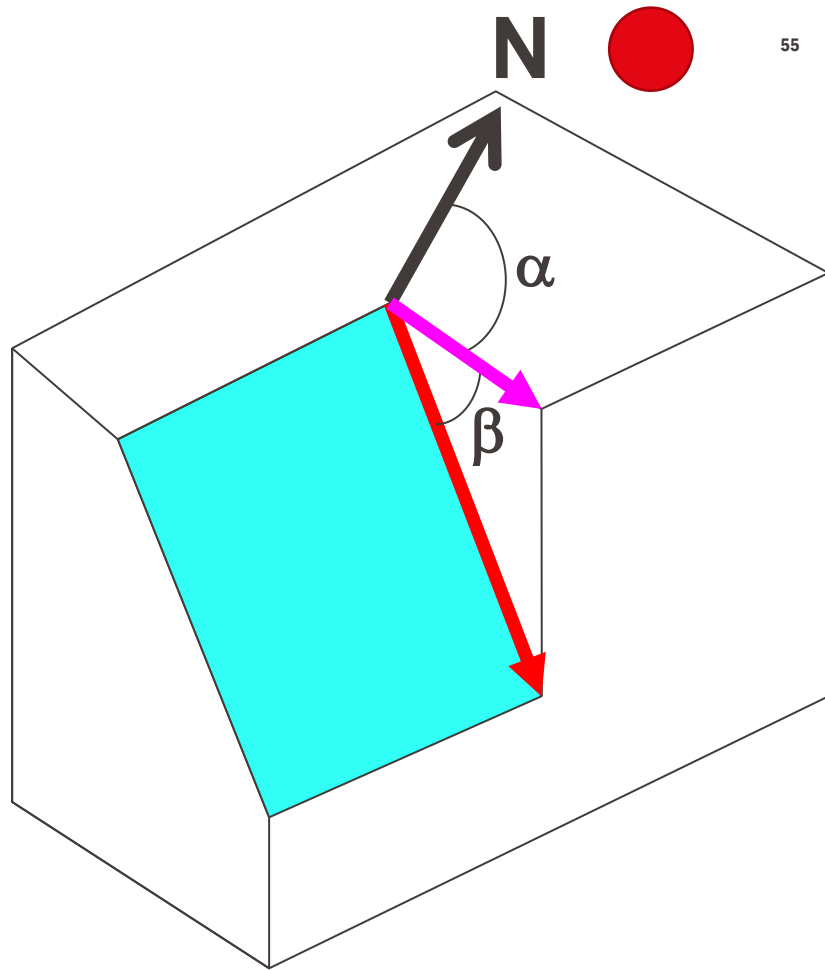


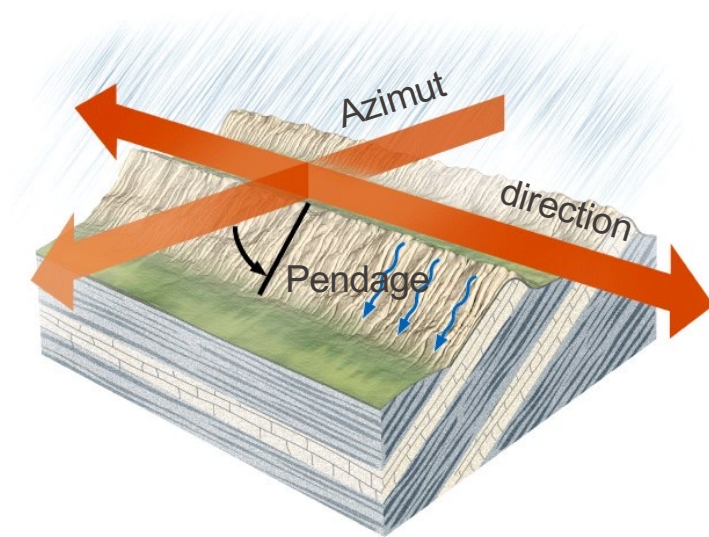
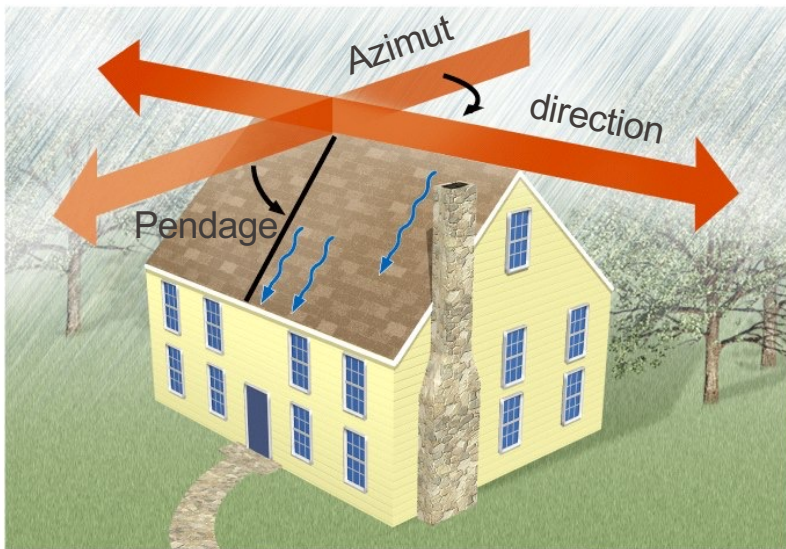
Figure 7.1b
Understanding Earth, Sixth Edition
© 2010 W. H. Freeman and Company



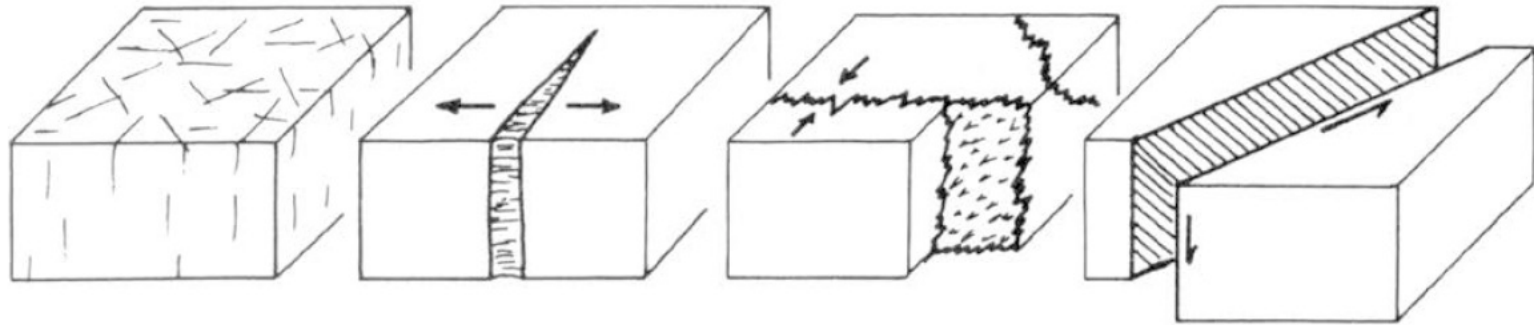
- Couche géologique: assimilée comme une surface plane localement
- Un plan est défini dans l'espace par trois points c'est à dire deux droites avec un point en commun.
- En géologie on utilise deux droites remarquables:
 - La droite horizontale: **Azimut**
 - La ligne de plus grande pente: **Inclinaison**

- **Azimut (α)** compris entre 0 et 360 degrés:
 - angle mesuré par rapport au Nord magnétique
 - lecture dans le sens horaire
 - lecture en rotation vers l'Est
- **Inclinaison (β)** compris entre 0 et 90 degrés:
 - angle mesuré par rapport a un plan horizontal
 - associé au sens du pendage





- Introduction
- Contraintes mécaniques
- Relations contraintes-déformations
- Notions de rhéologie
- Mesurer les structures
- Déformations cassantes (Fragile)
 - Diaclases
 - Fentes
 - Joint
 - Failles
- Déformation ductiles
 - Plis
 - Microstructures associées au plissement
 - Schistosité & foliation
 - Linéations



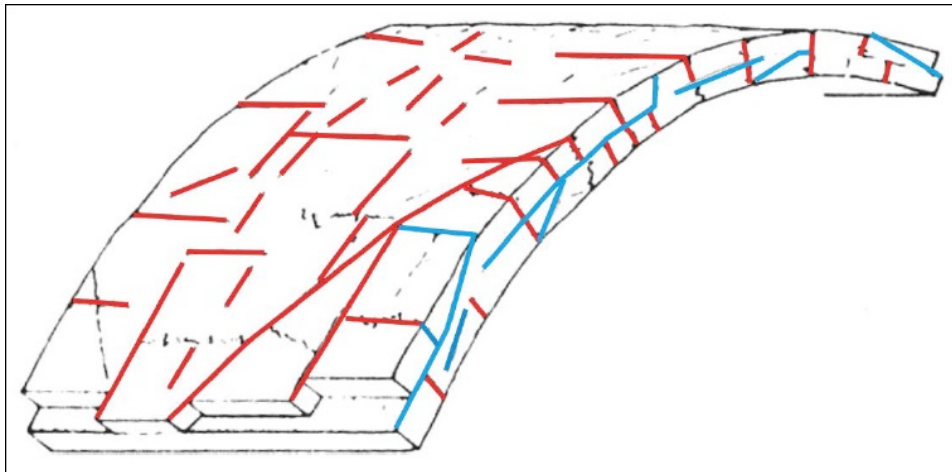
diaclasses

fente de tension

joint stylolitique

faille

Diaclase : Fracture dans une roche sans que les parties disjointes ne s'éloignent ou ne se décalent l'une de l'autre



Diaclases: perpendiculaires à la stratification

Joints: parallèles ou obliques à la stratification



Débit orthogonal

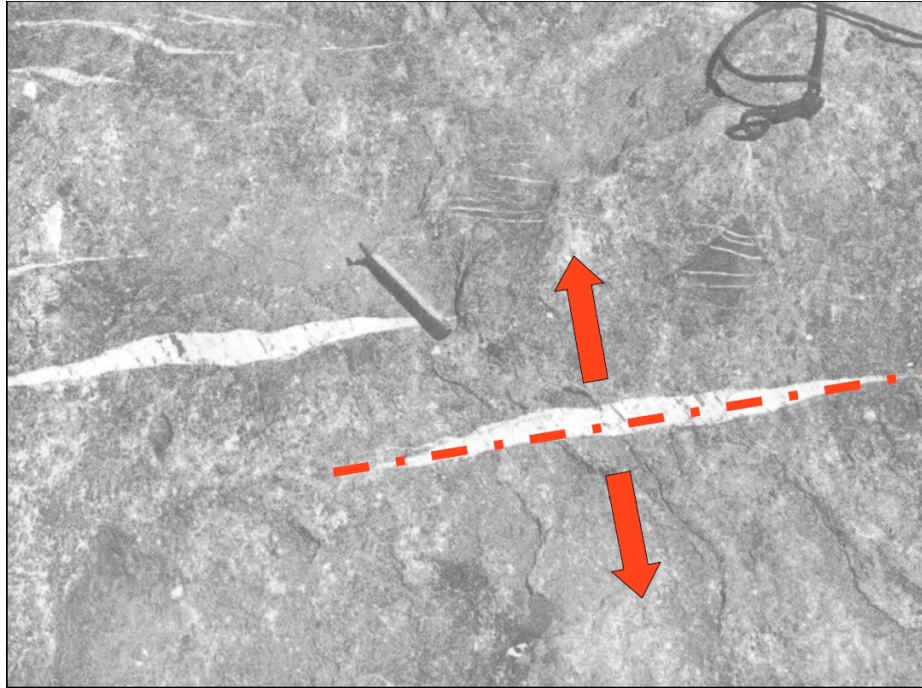
MATTAUER, M. Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Eds HERMANN.



Débit en baïonnette

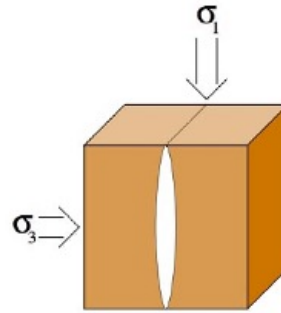
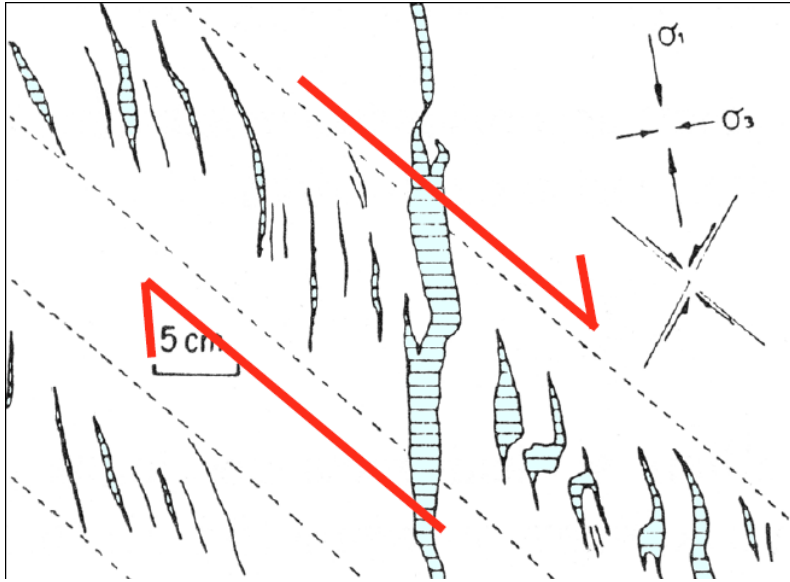


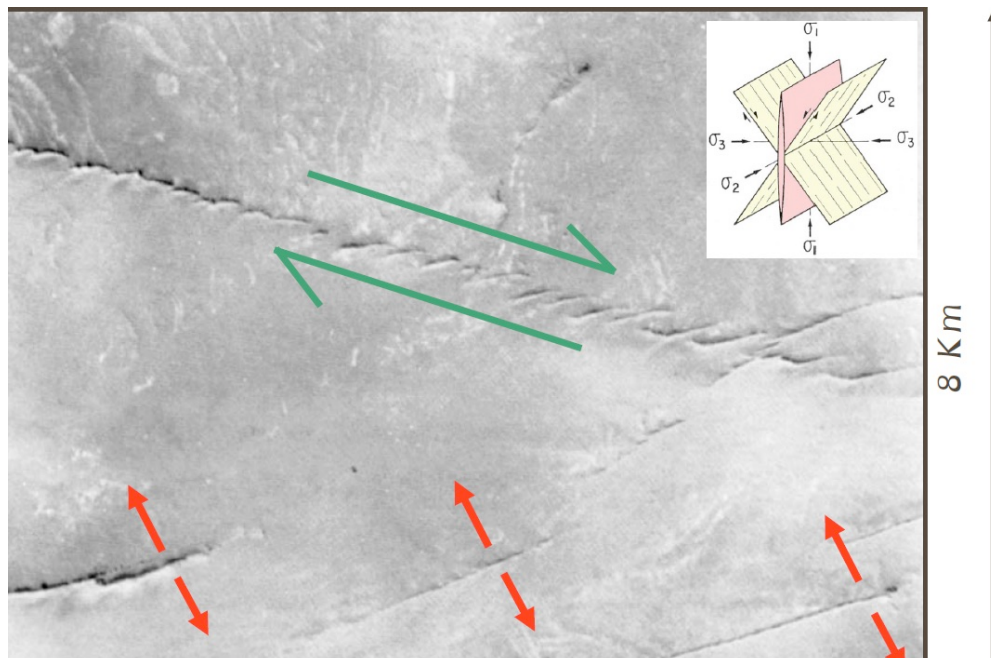
Cassure sans rejet en mode I



MATTAUER, M. Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Eds HERMANN.



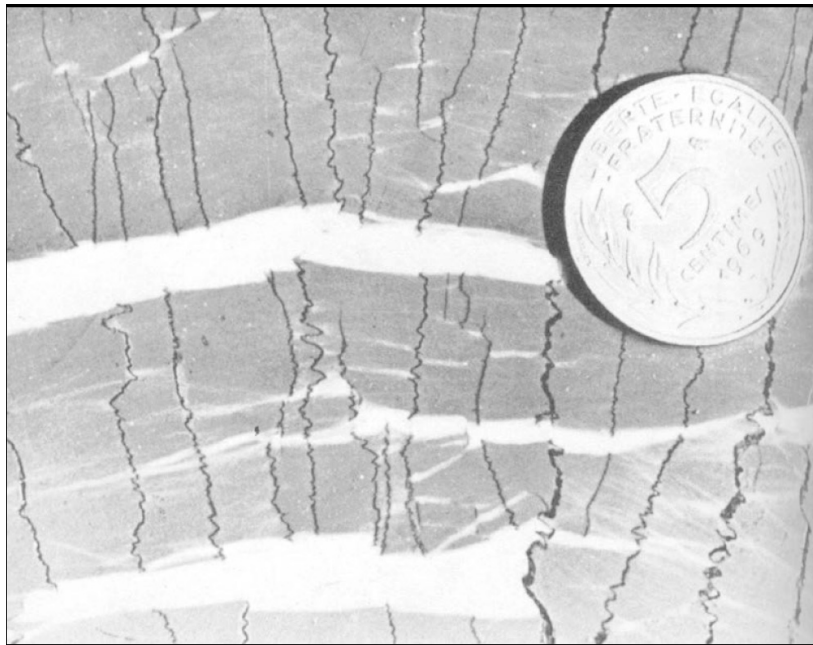
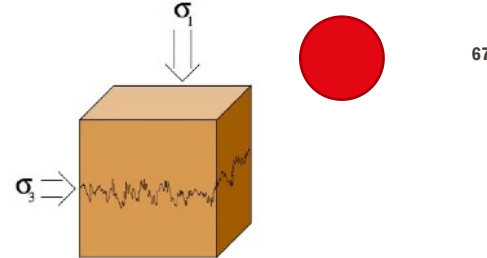




WRONG SHEAR SENSE?

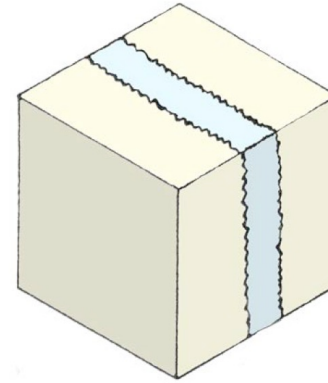
Jointes stylolitiques

Structures en forme de colonnettes s'interpénétrant au sein de roches calcaires en dessinant des joints irréguliers, généralement soulignés par une surface noirâtre ou brunâtre.

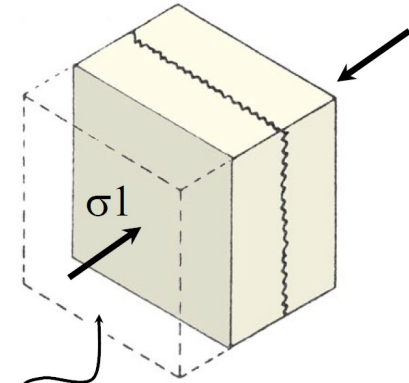




MATTAUER, M. Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Eds HERMANN.

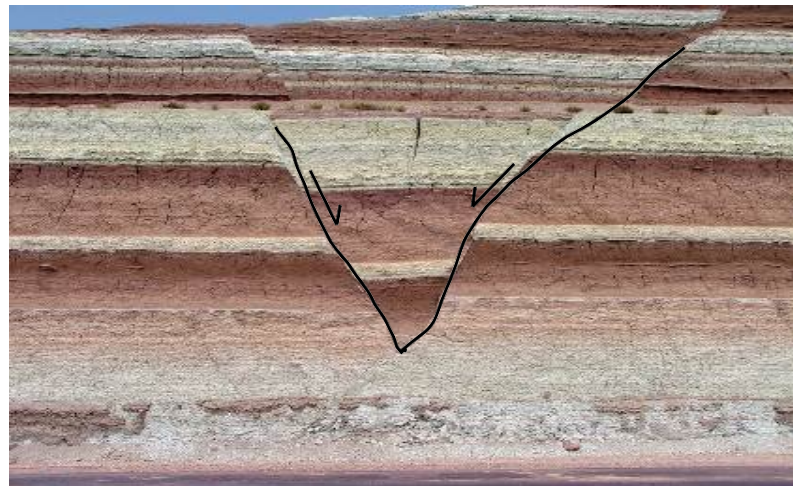


NICOLAS, A., Principe de tectonique. Eds. MASSON.

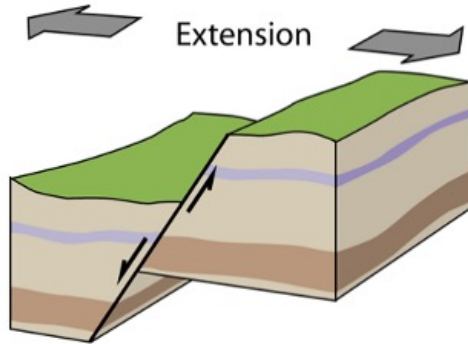


Volume
dissous

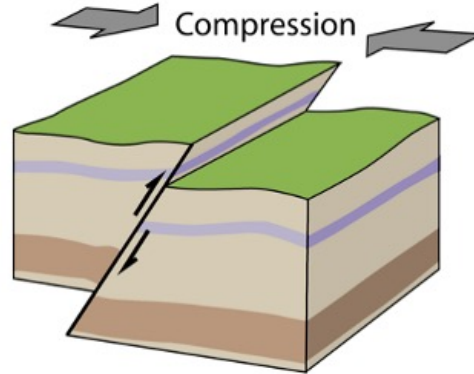
- **FAÏLLE:** En géologie, une faille est une structure tectonique consistant en un plan ou une zone de rupture le long duquel deux blocs rocheux se déplacent l'un par rapport à l'autre. Ce plan divise un volume rocheux en deux compartiments qui ont glissé l'un par rapport à l'autre dans un contexte de déformation fragile.
- Déformation localisée, fragile non pénétrative



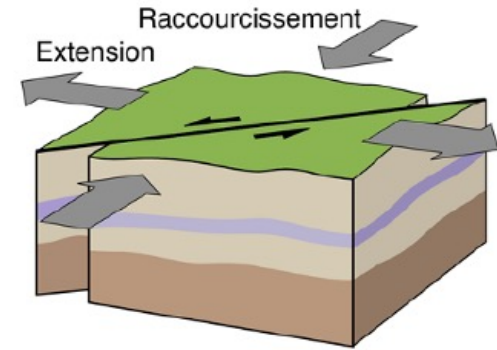
Faille normale



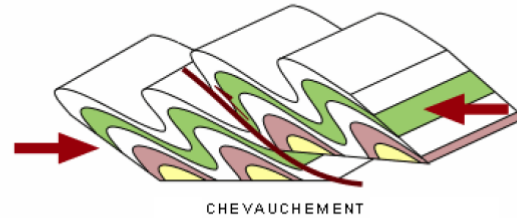
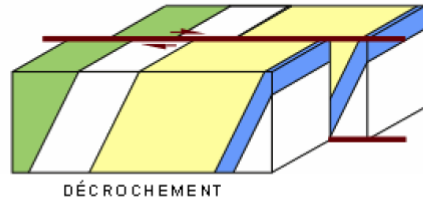
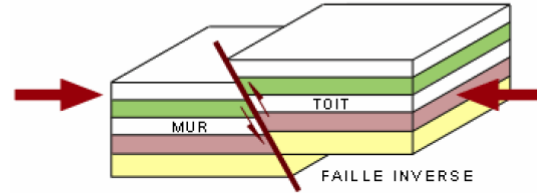
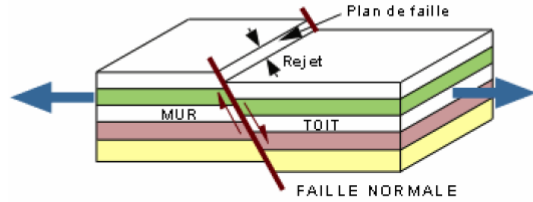
Faille inverse



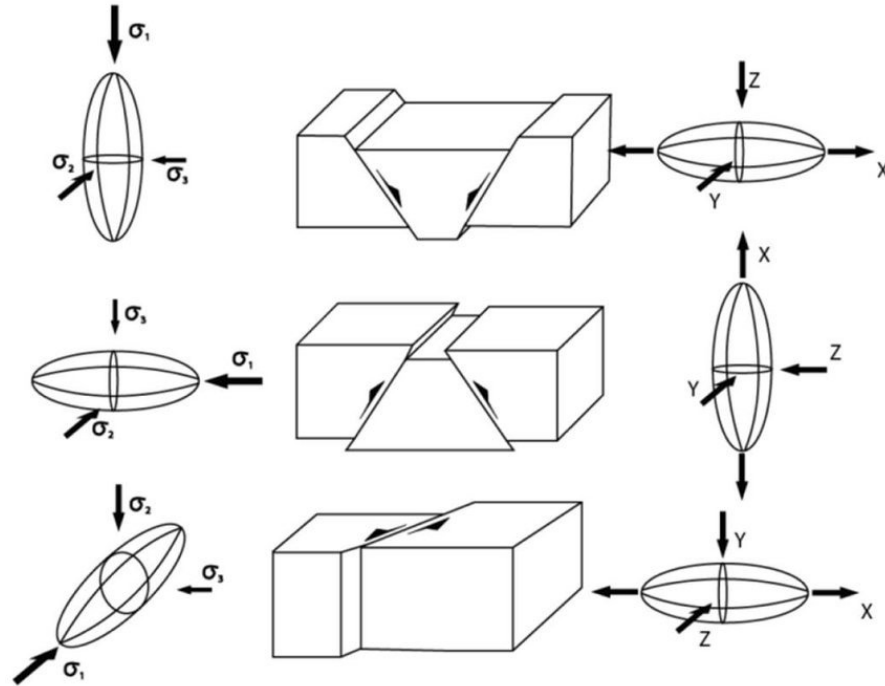
Faille décrochante

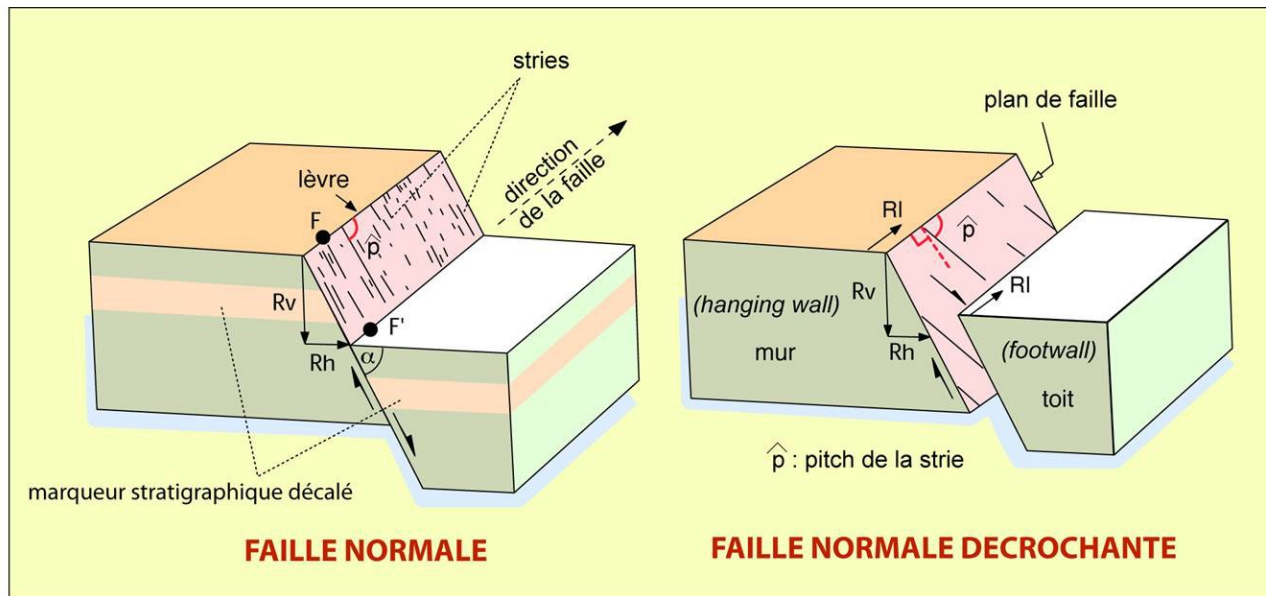


Dextre ou senestre



http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html





Cinématiques des failles- stries



Cinématiques des failles- stries



Cinématiques des failles- stries

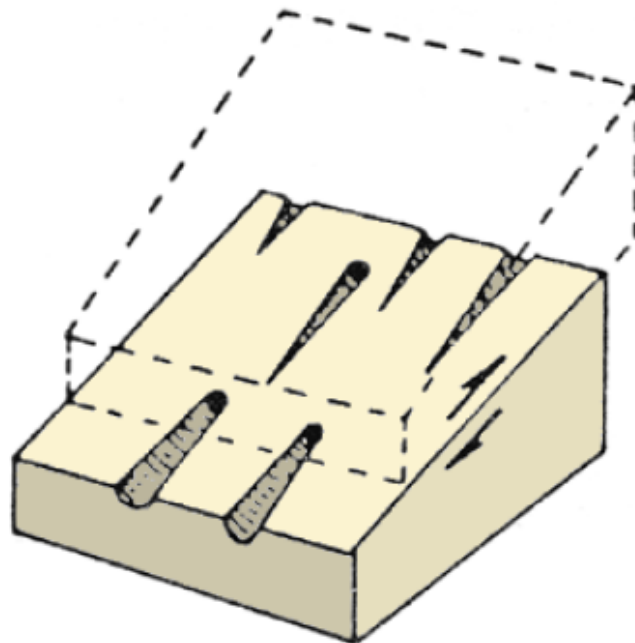
- Miroir de faille: section du plan de faille ayant subi par frottement un polissage mécanique ou affecté de stries de rayures ou de cannelures orientées dans le sens du mouvement.



Cinématiques des failles- stries

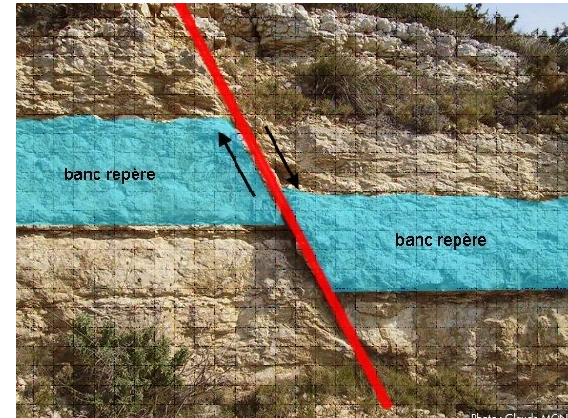
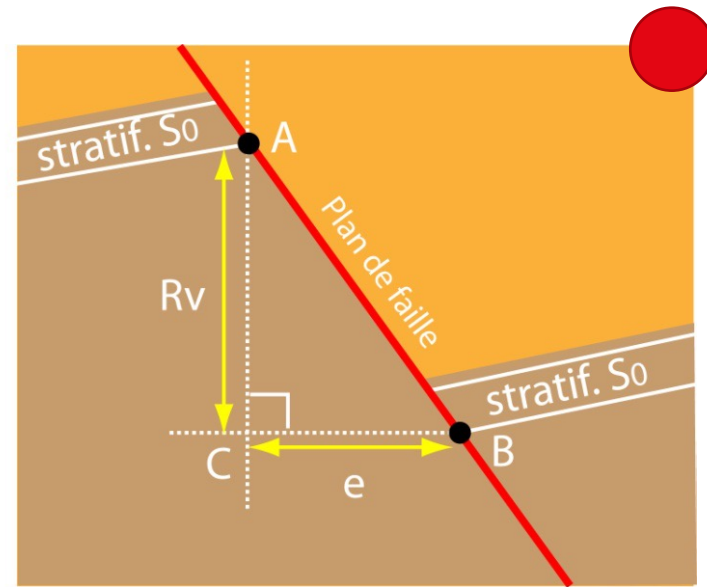


MATTAUER, M. Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Eds HERMANN.



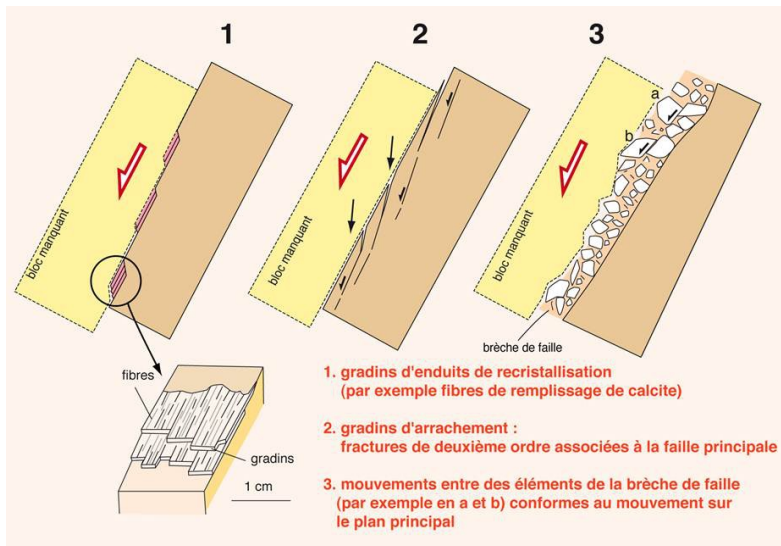
Cinématiques des failles- rejet

- Le rejet vertical R_v est la composante verticale du déplacement, ici AC.
- Le rejet horizontal R_h ou extension (e) dans le cas de cette faille normale est le décalage des deux marqueurs dans le plan horizontal, ici BC.



Cinématique des failles : les critères de sens de mouvement

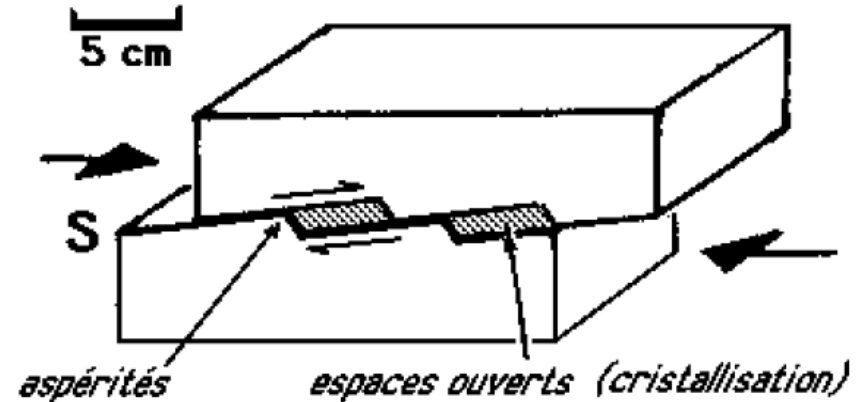
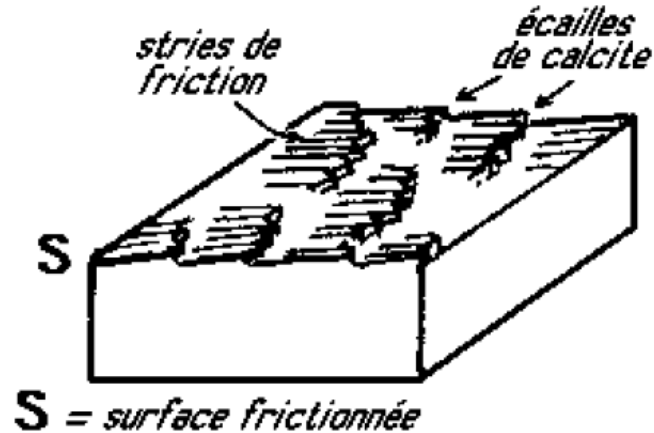
- Une fois les stries trouvées et mesurées, il convient de déterminer le sens du mouvement...



Cinématique des failles : les critères de sens de mouvement

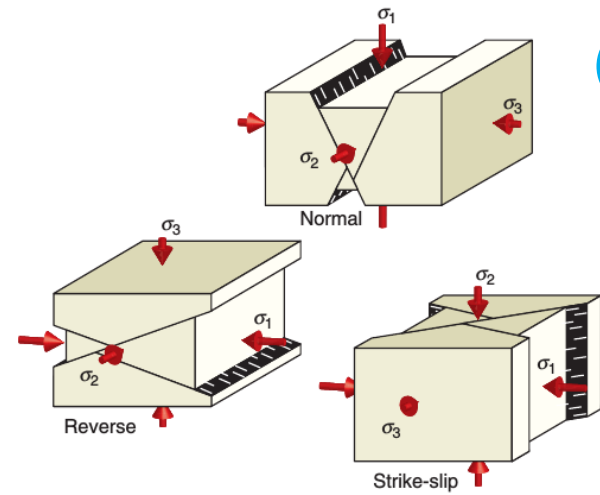


http://www-geol.unine.ch/cours/geol/09_structure.htm



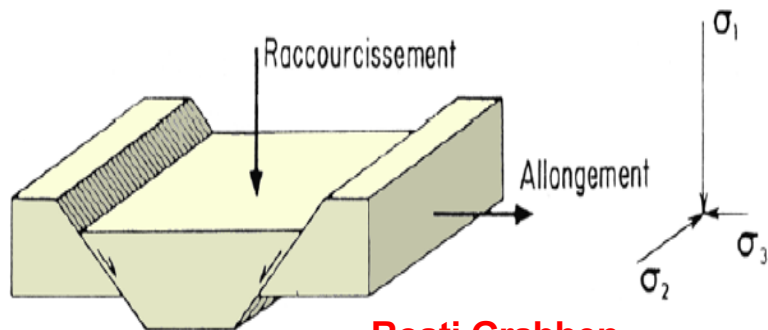
<http://www.geol-alpes.com>

Failles conjuguées

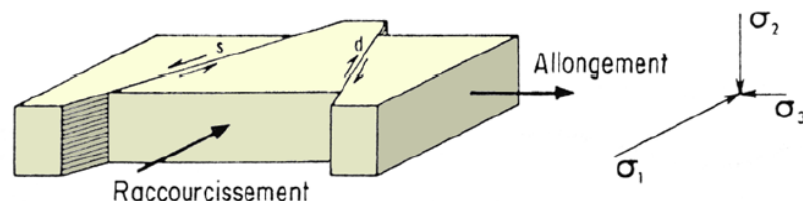


Failles conjuguées

GRABEN

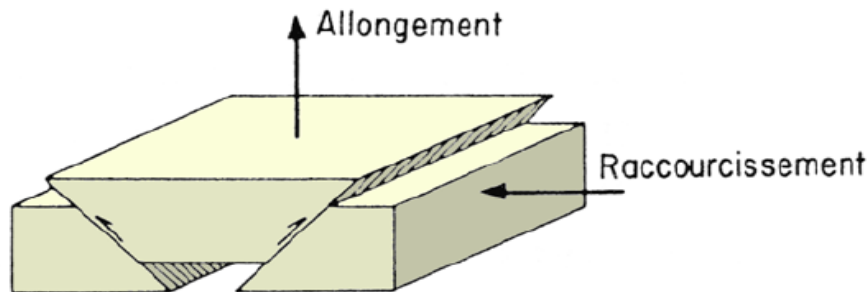


Rosti Graben



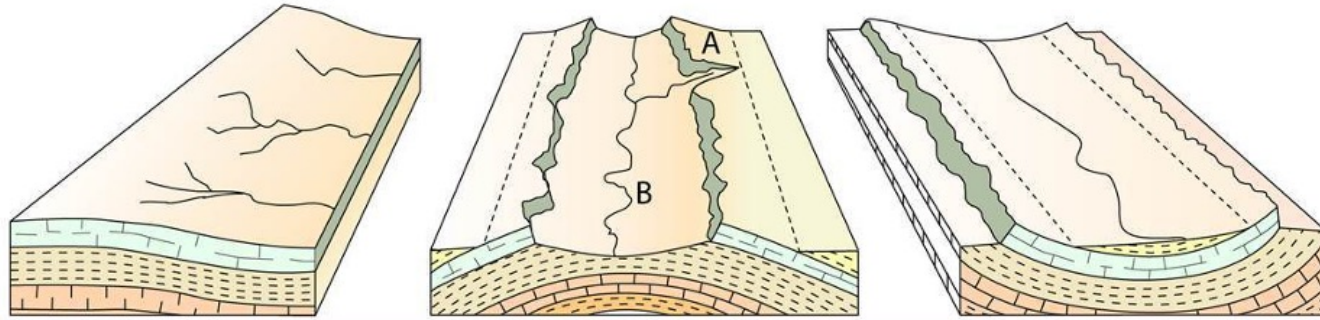
Chaine himalayenne

HORST



Chaine Pyrénienne

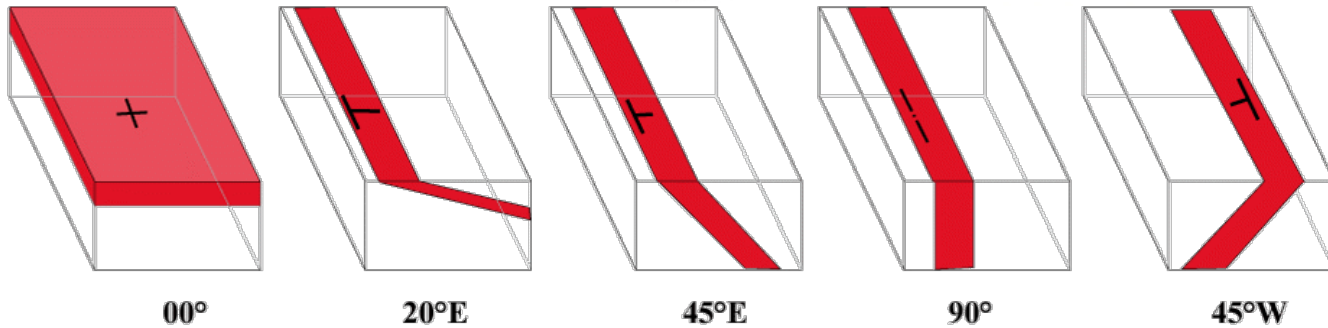
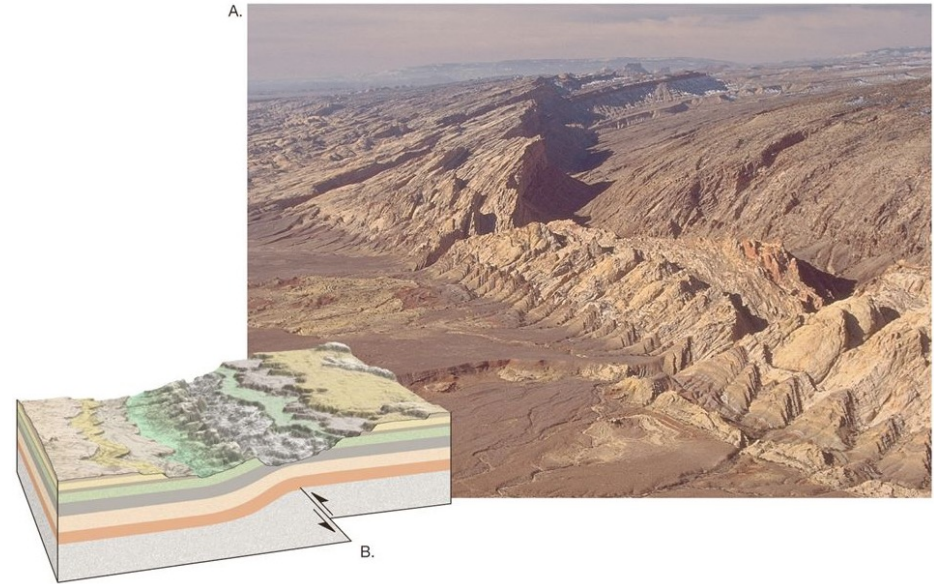
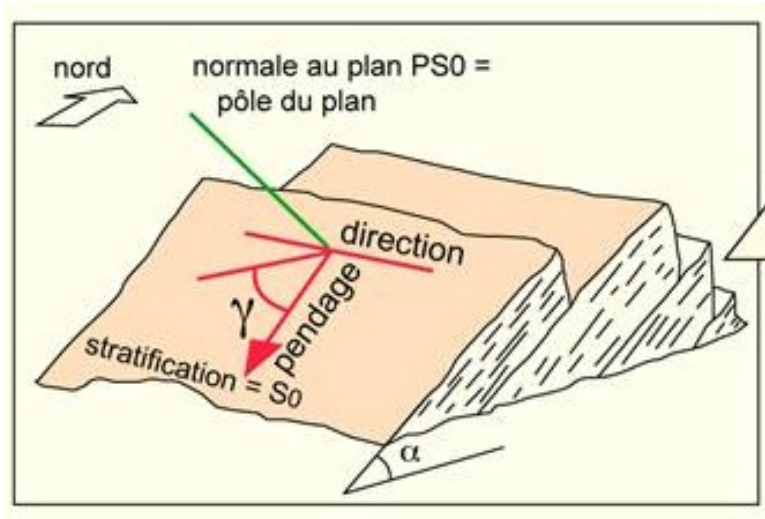
- Introduction
- Contraintes mécaniques
- Relations contraintes-déformations
- Notions de rhéologie
- Mesurer les structures
- Déformations cassantes (Fragile)
 - Diaclases
 - Fentes
 - Joint
 - Failles
- **Déformation ductiles**
 - Plis
 - Microstructures associées au plissement
 - Schistosité & foliation
 - Linéations



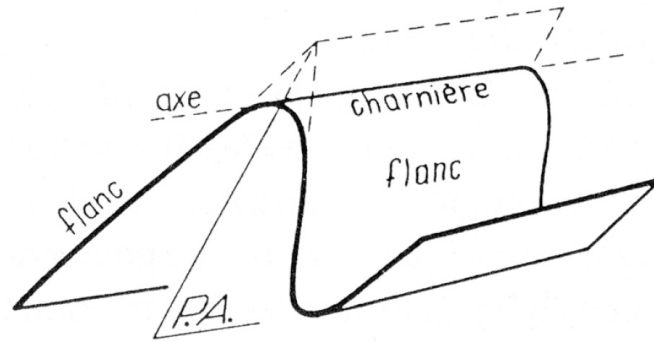
monoclinal

anticlinal

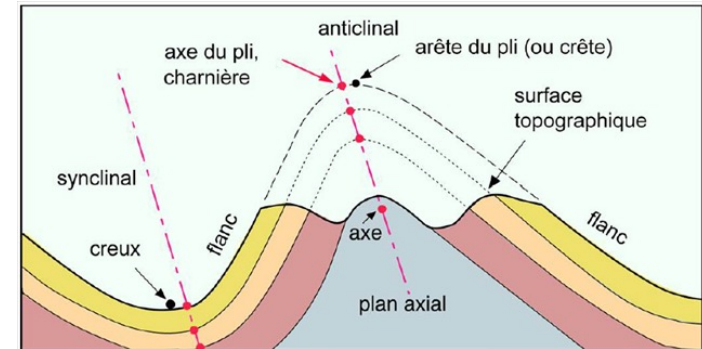
synclinal



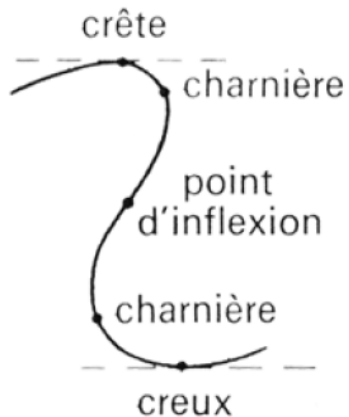
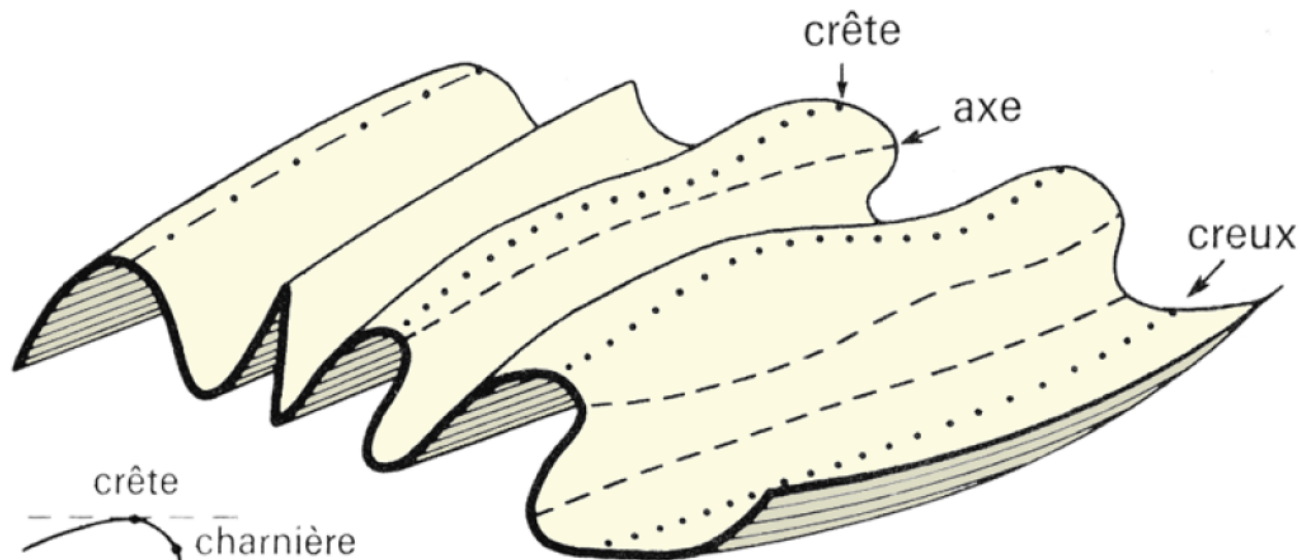




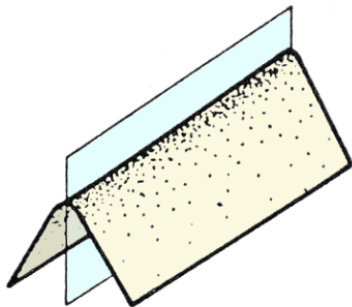
NICOLAS, A., Principe de tectonique. Eds. MASSON.



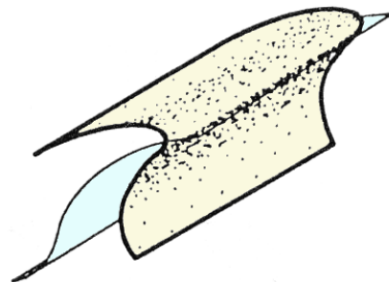
- La région du pli où la courbure est maximale est la charnière ou axe du plis.
- Le plan axial (PA) contient les axes des plis affectant les couches successives



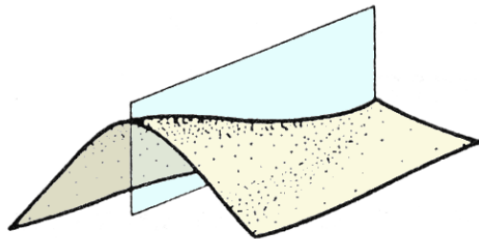
MATTAUER, M. Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Eds HERMANN.



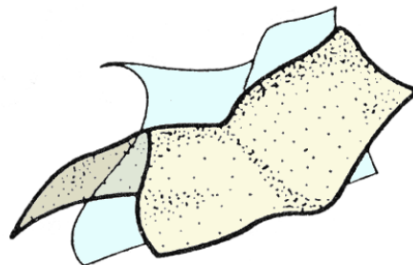
Pli plan et cylindrique



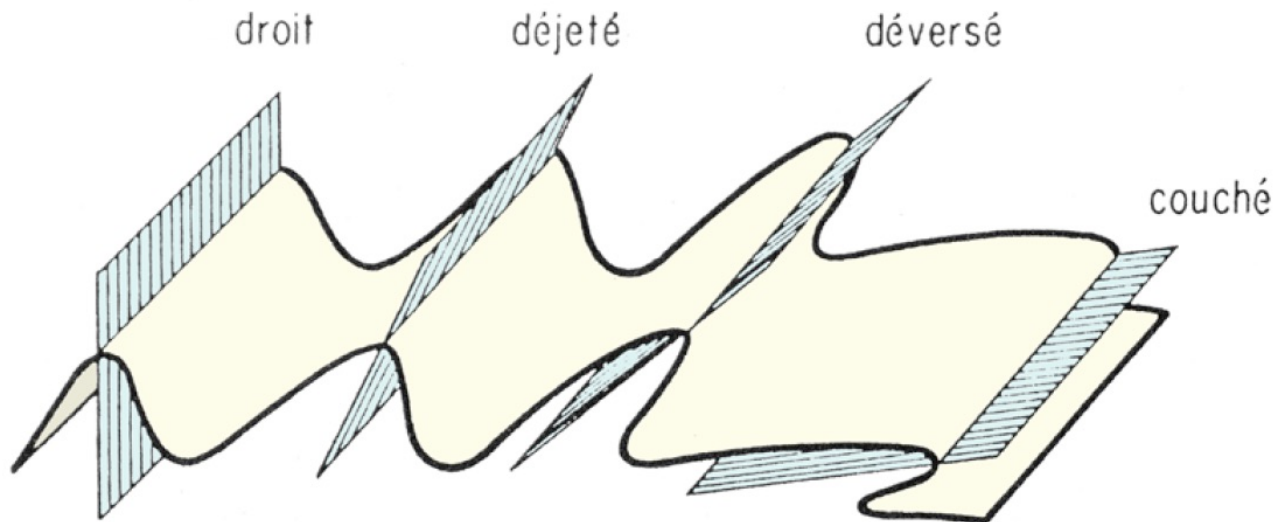
Pli non plan et cylindrique



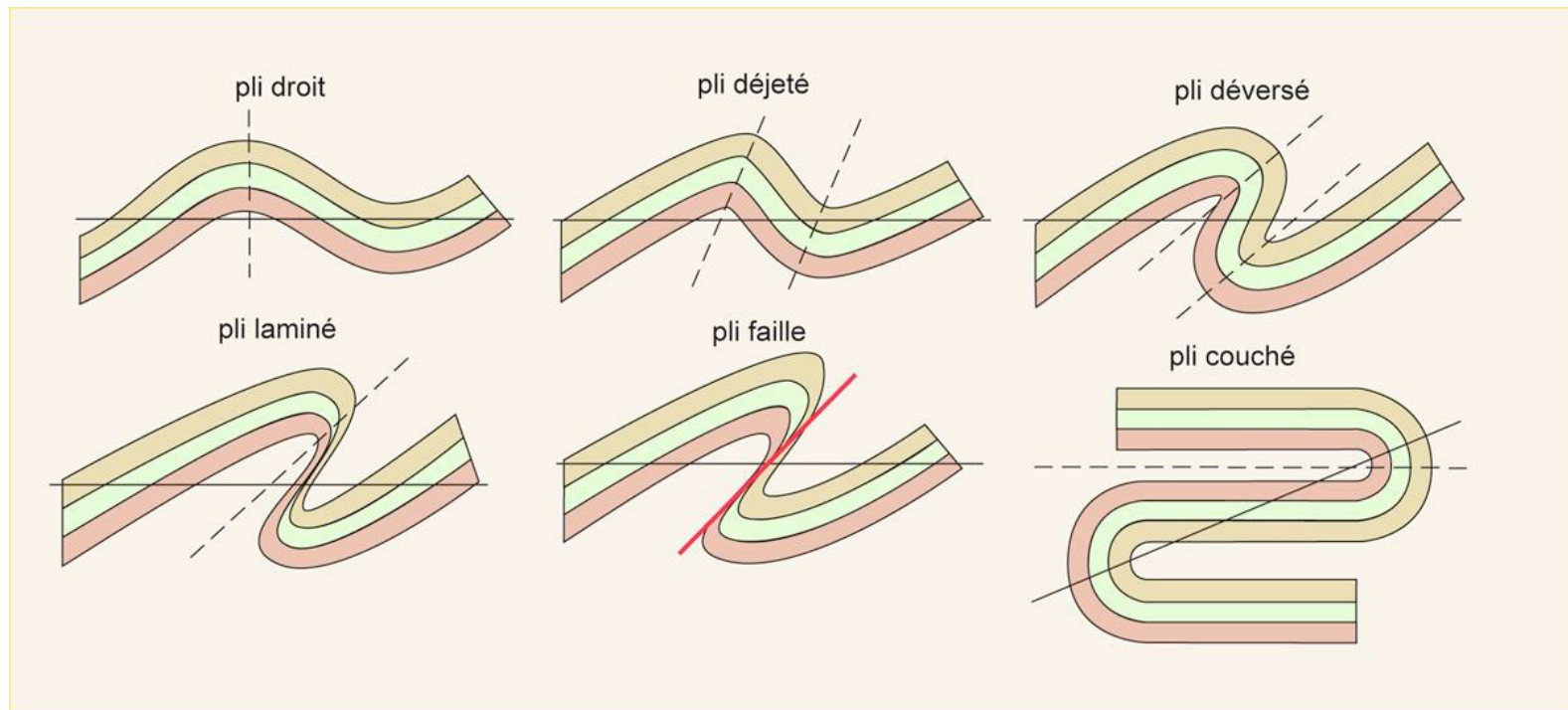
Pli plan et conique

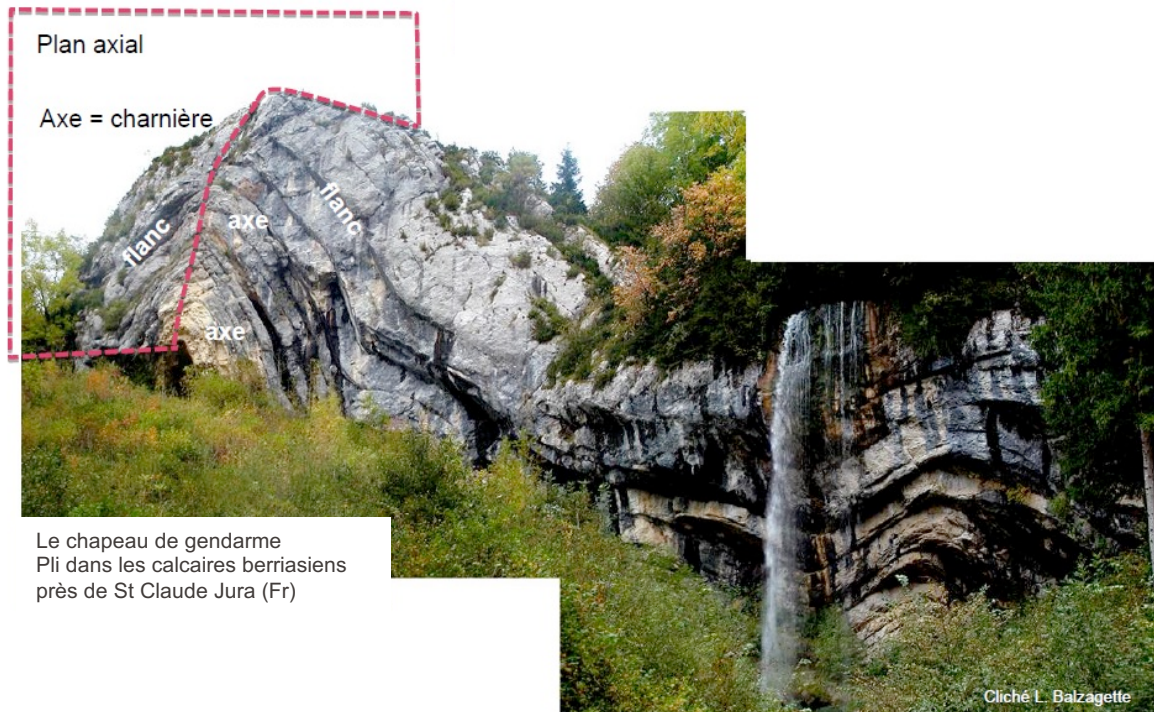


Pli non plan et non cylindrique



NICOLAS, A., Principe de tectonique. Eds. MASSON.

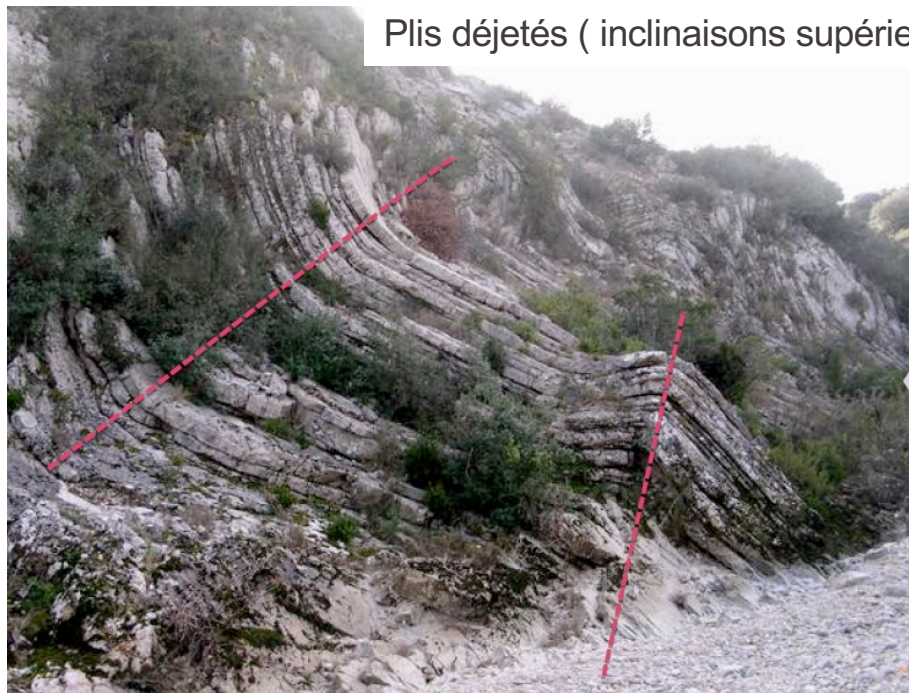




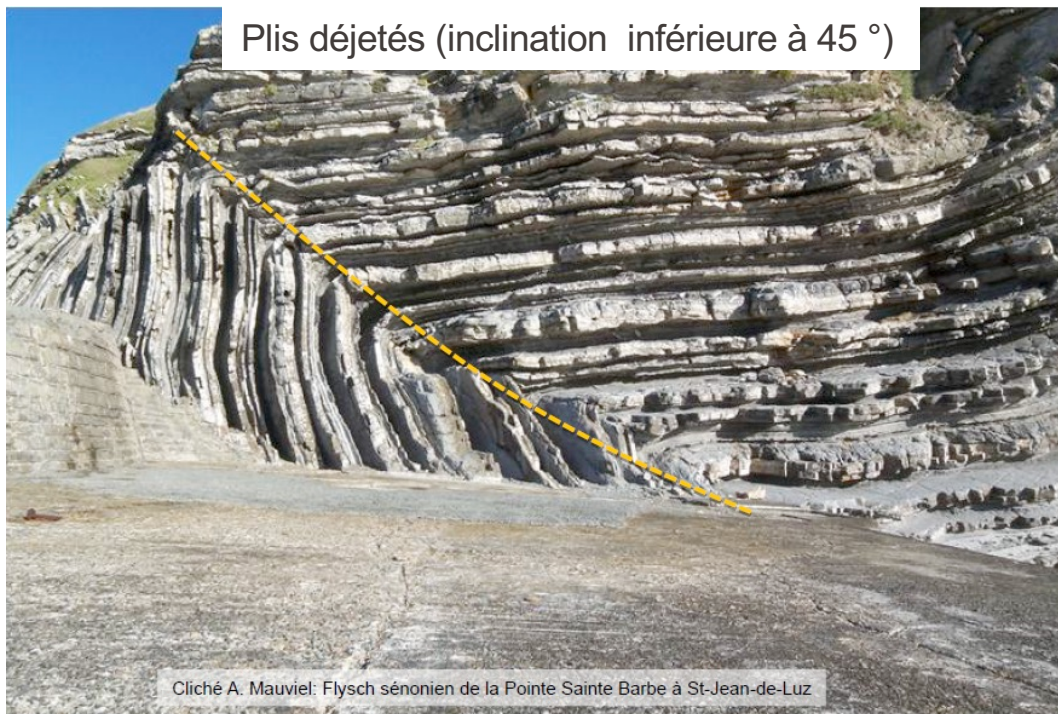
Pli déjeté ou dissymétrique



Plis déjetés (inclinaisons supérieure ou égale à 45°)

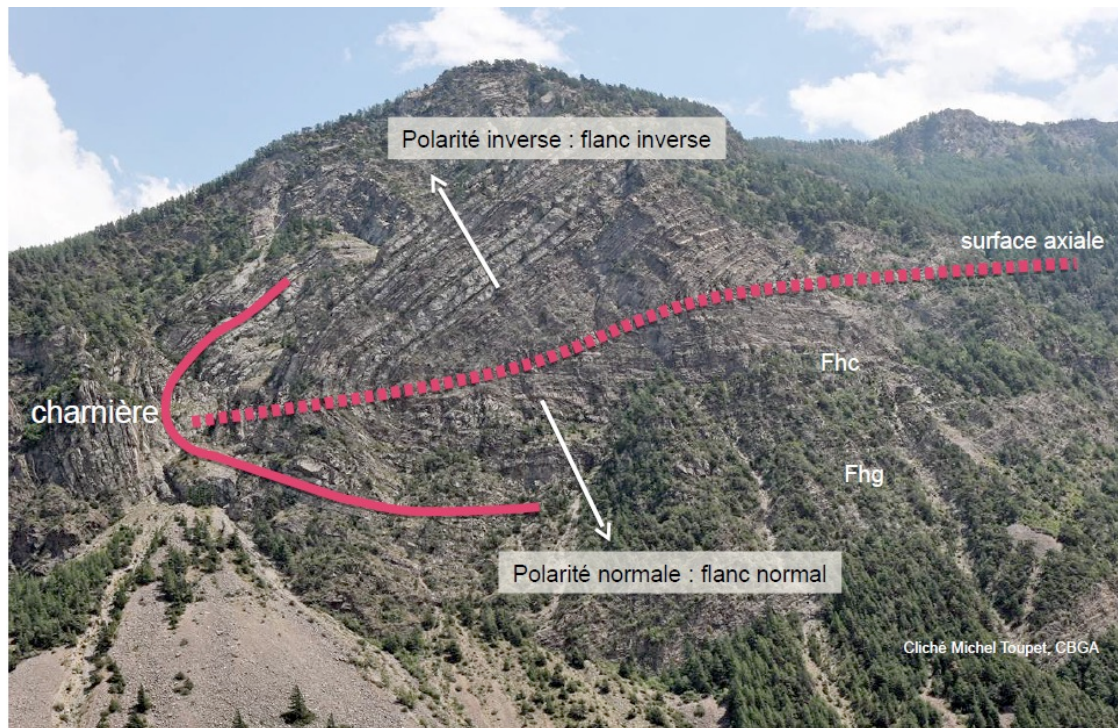


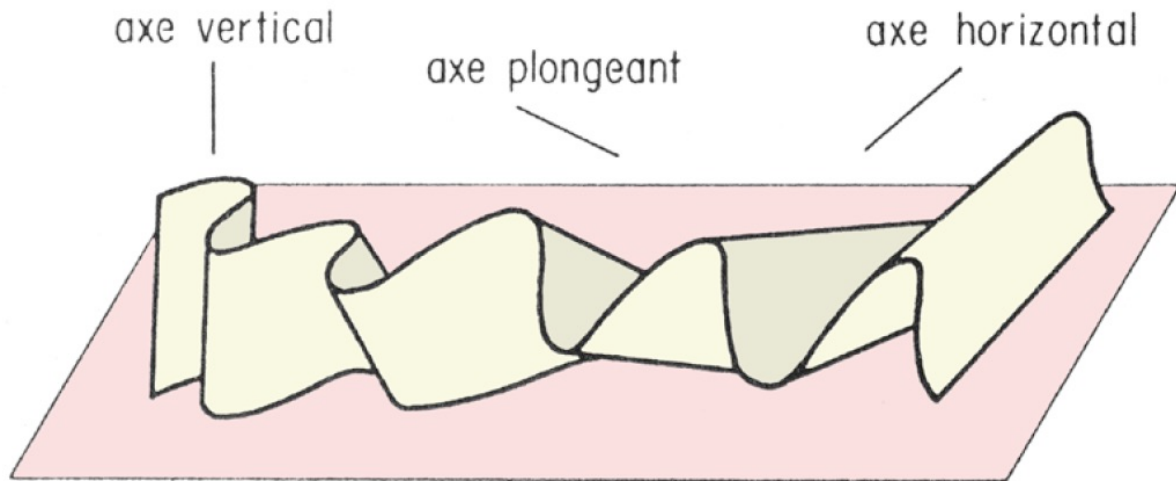
cliché L. Bazalgette : Crétacé inférieur du Languedoc



Dans un pli couché (donc à surface **axiale subhorizontale**), la série stratigraphique originelle est renversée dans l'un des deux flancs du pli. On nomme flanc inverse du pli, le flanc qui a été retourné par le plissement. Dans l'exemple ci-dessous, le flanc inverse est le flanc supérieur.

Il s'agit donc d'un synclinal couché.

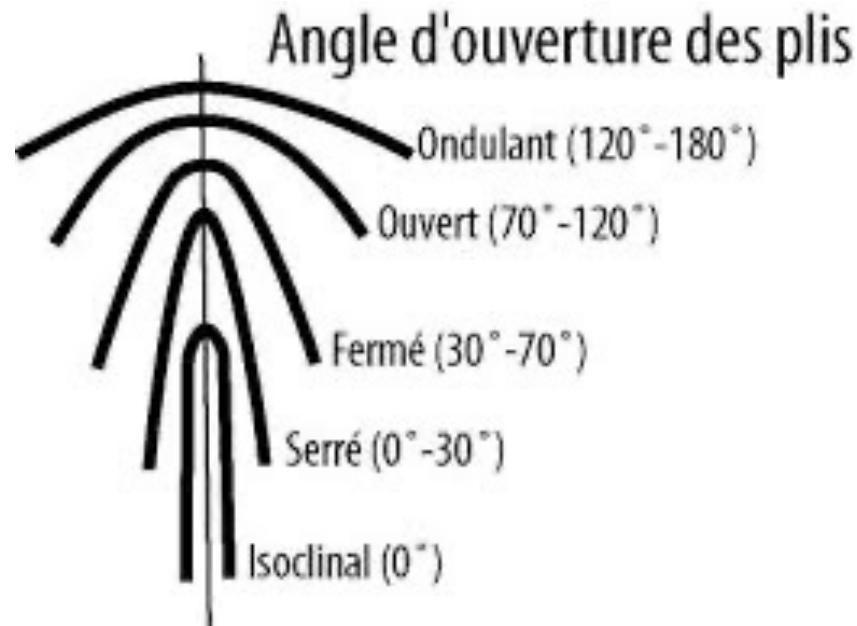


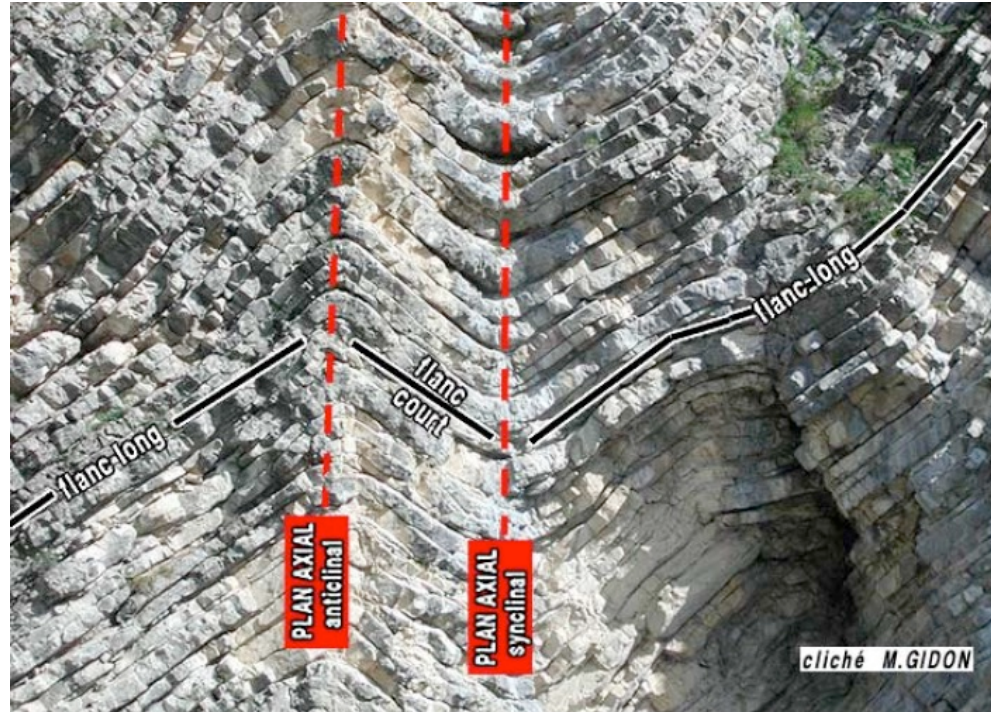


NICOLAS, A., Principe de tectonique. Eds. MASSON.

Un pli est :

- ouvert si l'angle entre ses flancs est très important,
- serré si l'angle est faible
- isoclinal si ses flancs sont parallèle





Angle d'ouverture de 120 à 70°



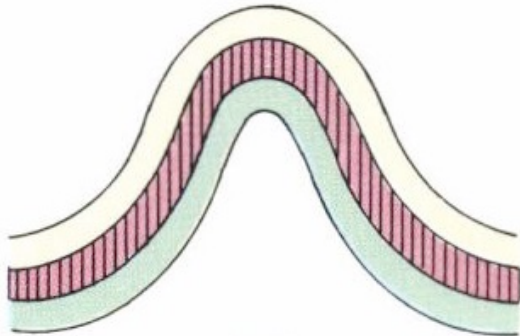
Angle d'ouverture de 70 à 30°



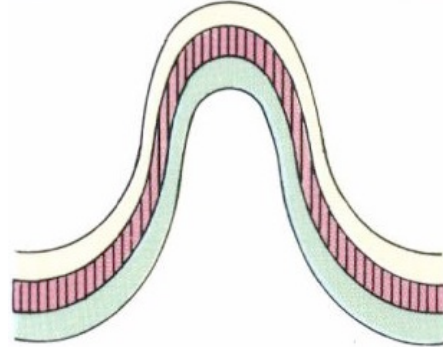
Angle d'ouverture inferieur à 30°

- Si l'épaisseur des flancs reste constante, le pli est dit isopaque. Si les flancs s'amincissent alors que les charnières s'épaississent, le pli est dit anisopaque.

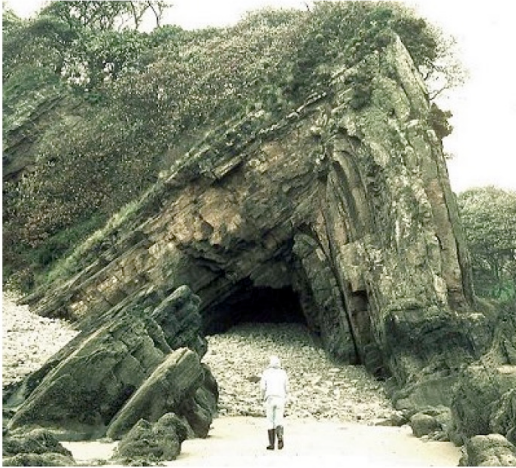
ISOPAUQUE



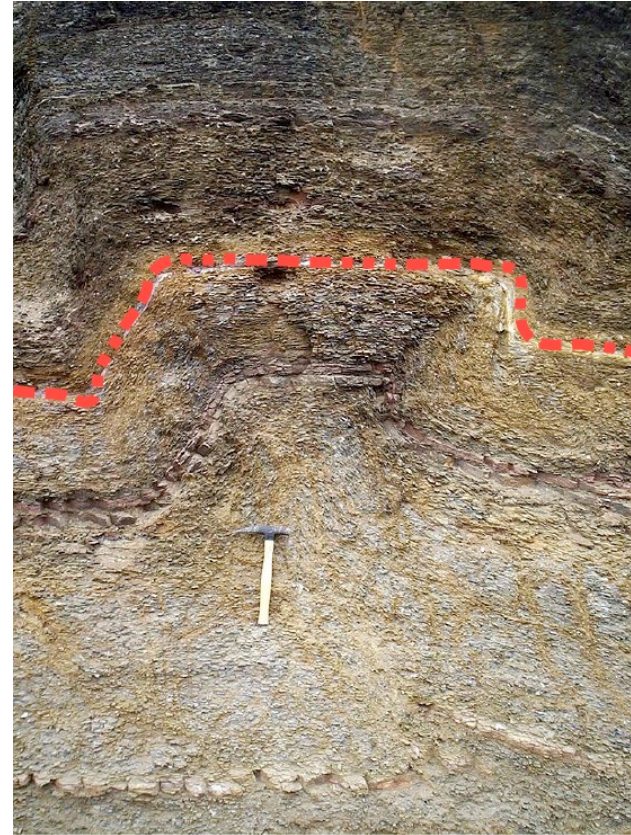
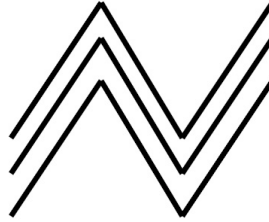
ANISOPAUQUE



Autres géométries de plis...



CHEVRONS



COFFRE

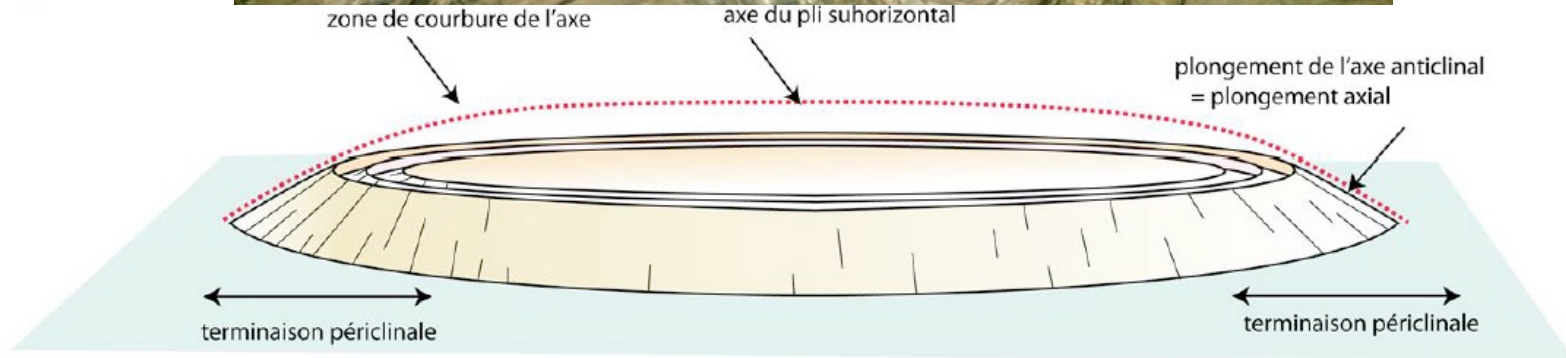
Pli faille (exemple de déformation Fragile_Ductile)



Le "pli-faille" est une déformation classique obtenu quand un raccourcissement affecte des couches géologiques assez "compétentes" (résistantes) pouvant glisser sur un niveau de décollement. Ce type de structure peut exister à différentes échelles.



Photographie : Pierre Thomas

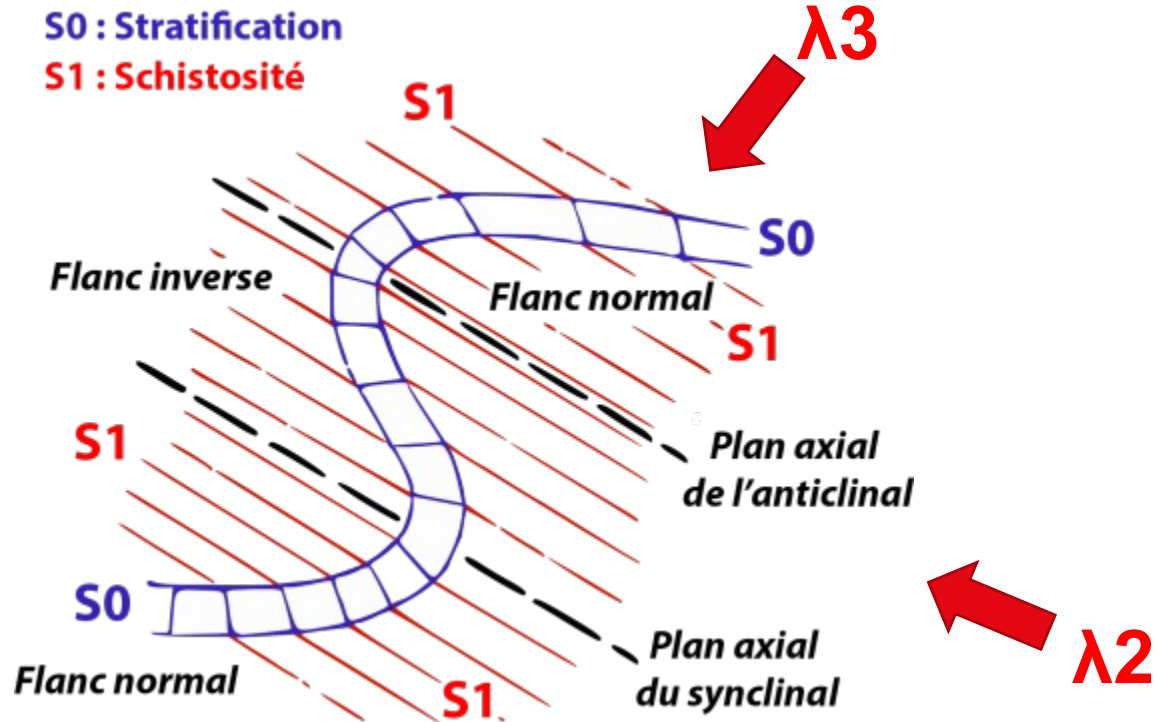


Microstructures associées au plissement

Schistosité parallèle à l'axe du pli

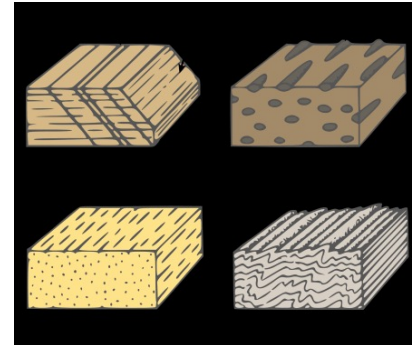
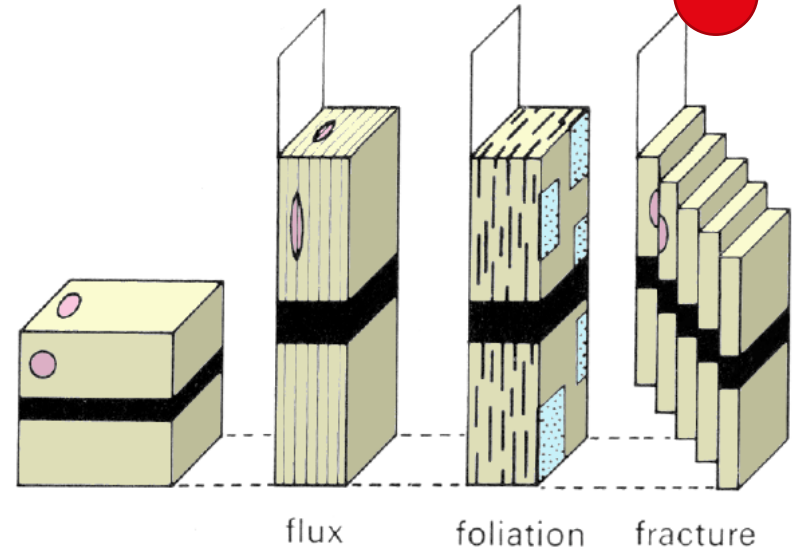
S0 : Stratification

S1 : Schistosité

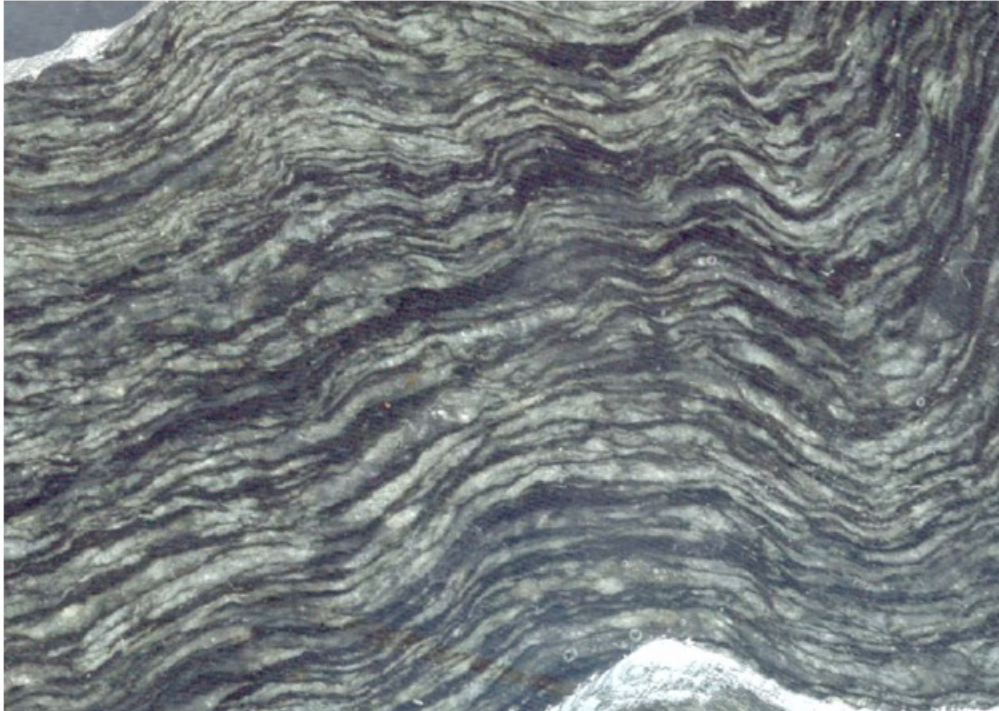


Microstructures associées au plissement

- Schistosité : elle décrit une famille de plans subparallèles et régulièrement espacés selon lesquels les roches schistosées se débitent (ou se clivent) facilement en feuillets plus ou moins épais.
- Foliation: c'est une structuration en plans distincts des roches métamorphiques. La structure est marquée par l'orientation préférentielle de minéraux visibles à l'œil nu — le plus souvent les micas — et aussi en microscopie optique. Contrairement à la schistosité affectant ces mêmes roches métamorphiques, le caractère spécifique de la foliation est la différence potentielle de minéralogie des différents feuillets.
- Linéation: c'est une structure linéaire apparaissant au sein d'une roche soumise à une déformation. Les types de linéations les plus communs sont les linéations d'intersection (par exemple, entre deux plans de schistosité ou un plan de schistosité et le plan de stratification), les linéations minérales (minéraux orientés durant les cristallisations métamorphiques) et les linéations d'étirement (ou d'allongement).







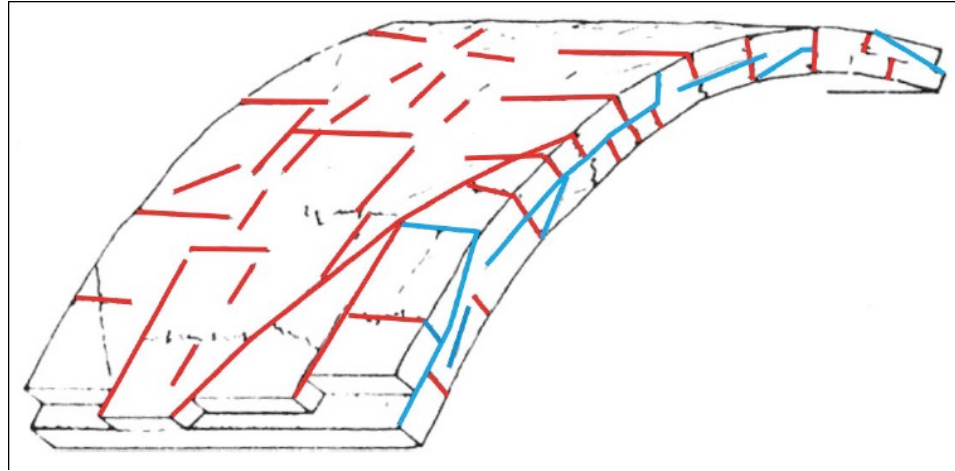


MATTAUER, M. Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Eds HERMANN.



MATTAUER, M. Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Eds HERMANN.

Diaclase : Fracture dans une roche sans que les parties disjointes ne s'éloignent ou ne se décalent l'une de l'autre

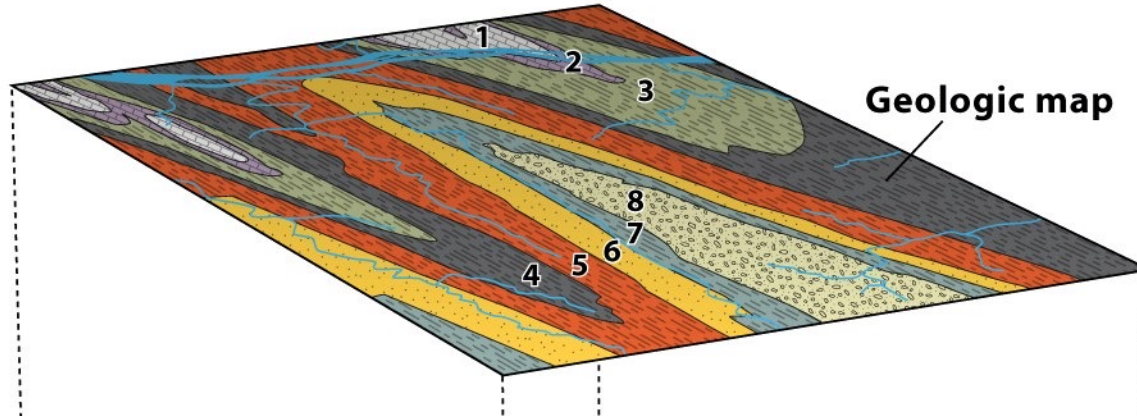


Diaclases: perpendiculaires à la stratification

Joints: parallèles ou obliques à la stratification



- 1) Réalisez un schéma légendé de chacune des deux déformations représentées par les documents 1 et 2.
- 2) En déduisez le type de pli et le type de failles présentés par ces documents
- 3) Préciser les contraintes tectoniques aboutissant à chacune des deux déformations tectoniques
- 4) Définissez le mode de déformation.



Synclinal ou anticlinal, les deux?

Jeune
↑
Vieux

- | | |
|---|---|
|  | 8 Mixed sandstone and conglomerate |
|  | 7 Shale |
|  | 6 Sandstone |
|  | 5 Siltstone |
|  | 4 Shale |
|  | 3 Shale and siltstone |
|  | 2 Limestone and dolomite |
|  | 1 Limestone |

