

# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (1)

## La déformation finie et sa caractérisation



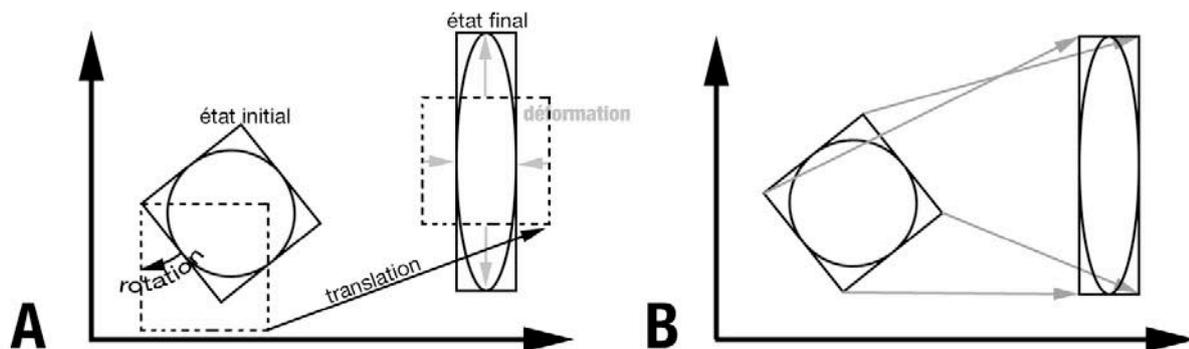
### Un objet déformé

La seule observation d'un objet (géologique ou non) ne permet pas *a priori* de déterminer qu'il a été déformé.

On ne peut identifier une déformation qu'en comparant un état initial et un état final. Il est donc nécessaire de connaître l'état initial de l'objet étudié... ce qui n'est pas forcément immédiat en géologie !

De plus, même si une déformation est identifiée, on ne peut analyser le plus souvent que le **résultat** de la déformation ; on ne peut pas reconstituer le déroulement de la déformation.

On dit que l'on mesure la **déformation finie**.



### La déformation finie d'un objet en deux dimensions

On peut analyser une déformation finie (pas les mécanismes, donc) de deux manières :

**A** : Toute déformation peut être définie comme la somme de trois transformations, une rotation rigide, une translation et enfin une déformation s.s. (un changement de forme).

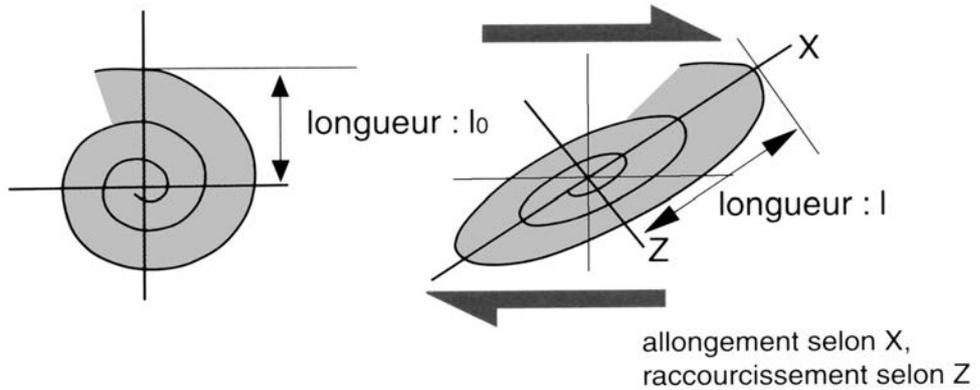
**B** : On peut caractériser la déformation en donnant l'ensemble des vecteurs déplacement de chaque point de l'objet, de l'état initial vers l'état final. La déformation est alors donnée par un champ de vecteurs.

# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (2)

## L'ellipsoïde des déformations

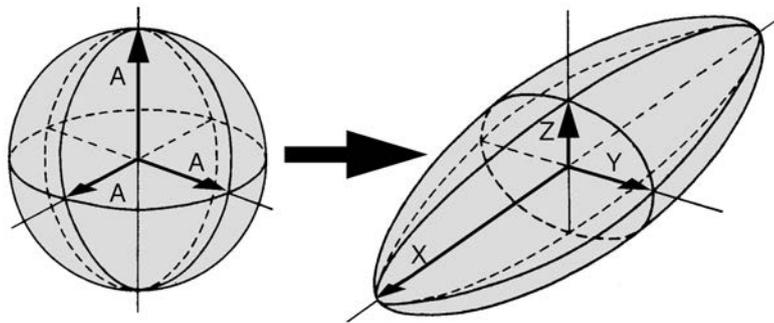
### Les axes de la déformation :

Il est possible, en comparant état initial et état final, de définir trois directions essentielles de la déformation :



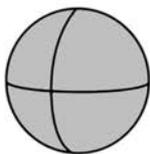
une direction X de plus fort allongement, une direction Z de plus fort raccourcissement (nécessairement orthogonale à X) et une direction Y orthogonale à X et à Z.

### L'ellipsoïde de la déformation finie

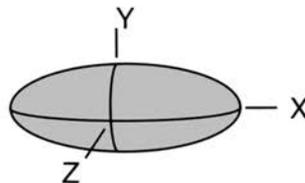


Les trois axes X, Y et Z permettent de définir un ellipsoïde, représentant la forme en laquelle serait transformée une sphère initiale. Une déformation est alors définie par la donnée des ellipsoïdes de déformation en tout point de l'objet étudié

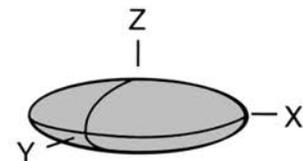
X : axe d'allongement maximum  
Y : axe intermédiaire  
Z : axe de raccourcissement maximum



état initial



cas 1 :  
Z proche de Y



cas 2 :  
X proche de Y



**CONSTRICION**



**APPLATISSEMENT**

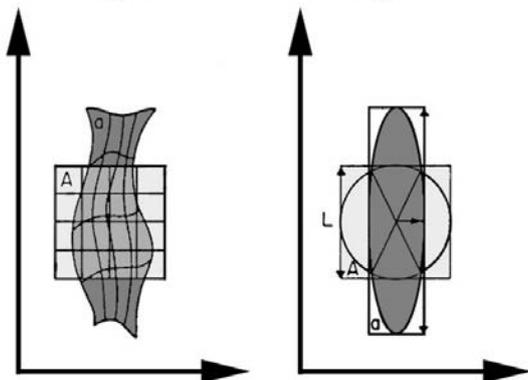
# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (3)

## Mode et régime de déformation

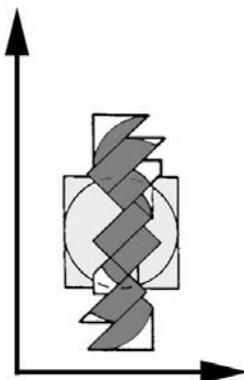
### Déformation continue

*hétérogène*

*homogène*



### Déformation discontinue



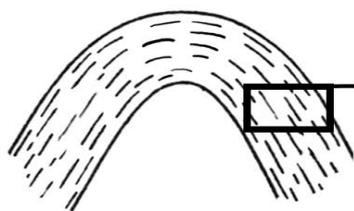
### Mode de déformation

La déformation est dite continue lorsque toute ligne est transformée en une autre ligne (non brisée).

La déformation est homogène si toute droite est transformée en une droite (et non une courbe).

### Transferts d'échelle :

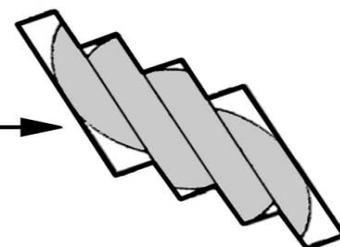
Lorsque l'on change d'échelle d'observation, il est souvent plus pertinent de changer de modèle de déformation.



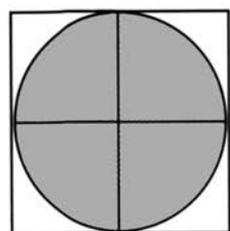
Déformation hétérogène (plissement)



déformation homogène (ellipse étirée)

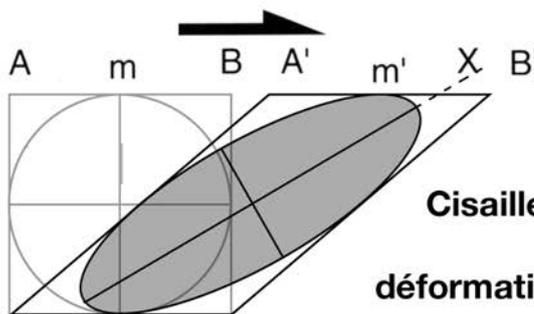


déformation discontinue (fractures)



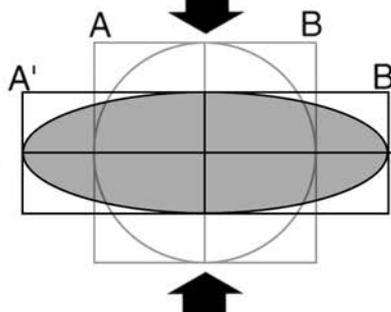
État initial

①



**Cisaillement simple**  
= déformation non-coaxiale

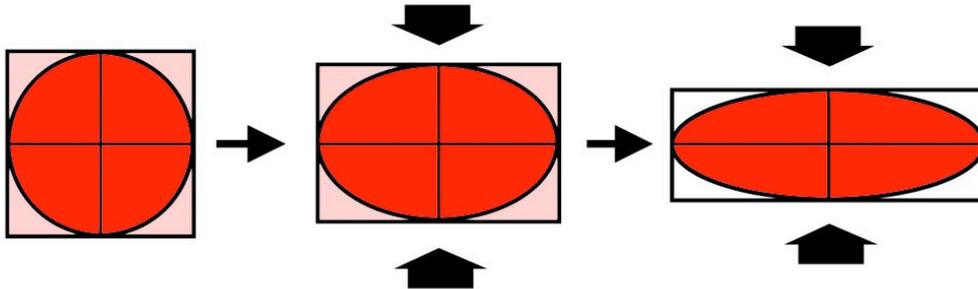
②



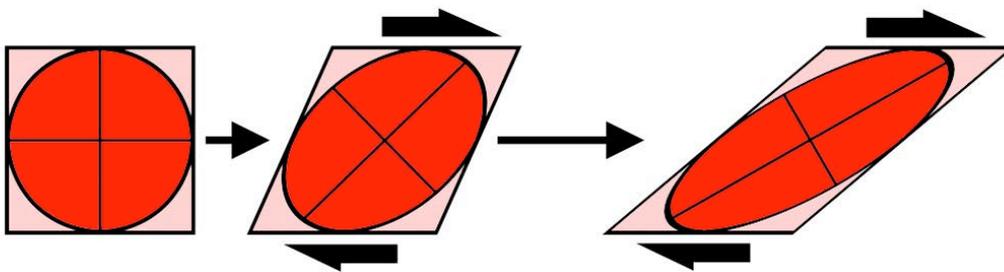
**Cisaillement pur**  
= déformation coaxiale

# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (4)

## Le régime de déformation : la déformation incrémentale

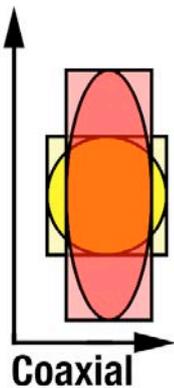


Les axes de la déformation conservent leur orientation au fur et à mesure de l'applatissage : **déformation coaxiale**

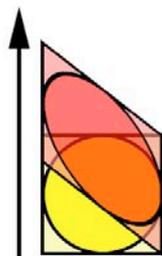


Les axes de la déformation (de l'ellipse) tournent au fur et à mesure du cisaillement : **déformation non-coaxiale**

### Déformation continue

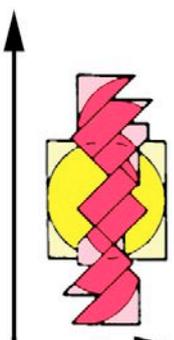


Coaxial

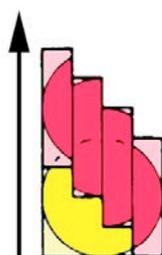


Non-coaxial

### Déformation discontinue



Coaxial



Non-coaxial

### La déformation finie ne donne pas tout !

Que ce soit dans le cadre de la déformation continue (un cercle donne une ellipse) ou discontinue (un cercle donne un «machin» à forme d'ellipse...), il est impossible de déduire le régime de déformation (= la déformation incrémentale = le «film» de la déformation) de la seule observation du résultat (la déformation finie).

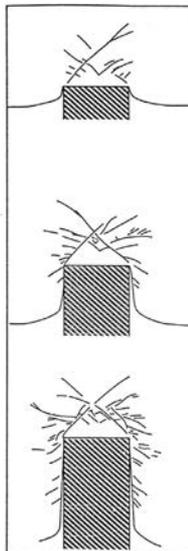
C'est assez fâcheux, car la déformation incrémentale est très liée au mouvement des blocs aux limites de la zone déformée... or, ce sont ces mouvements que le géologue cherche le plus souvent à décrire.

Et comme en géologie on n'a le plus souvent accès qu'à la déformation finie...

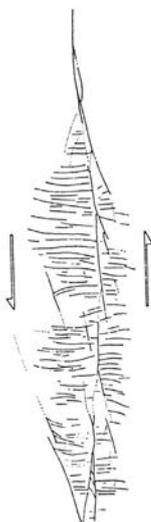
# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (5)

## Les marqueurs du régime de déformation -1-

Fracturation expérimentale dans des conditions coaxiales



Champ de fractures dans un domaine cisailé



### Régime de déformation et symétries

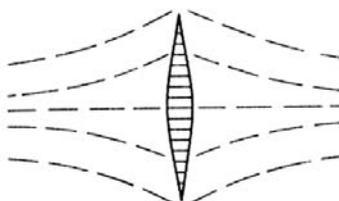
Classiquement, un régime d'aplatissement (déformation coaxiale) génère des figures de déformation symétriques (au sens d'une symétrie bilatérale). C'est ce que montrent les essais en compression pure.

En revanche, les régimes de cisaillement (déformation non-coaxiale) produisent des champs de fractures de type «dysymétrique» (ou plutôt présentant une symétrie axiale et non bilatérale).

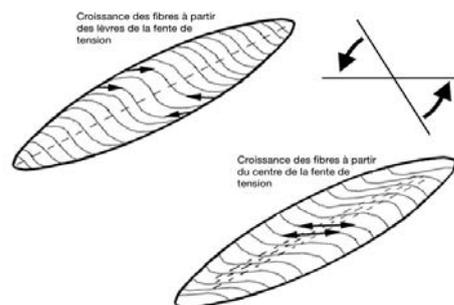
### Fentes de tension et rotation

Les minéraux fibreux qui cristallisent dans les fentes de tension se forment parallèlement à X. Ceci permet alors d'enregistrer une éventuelle rotation de cet axe X

Axe X de la déformation stable au cours de la déformation



Rotation de l'axe X au cours de la déformation



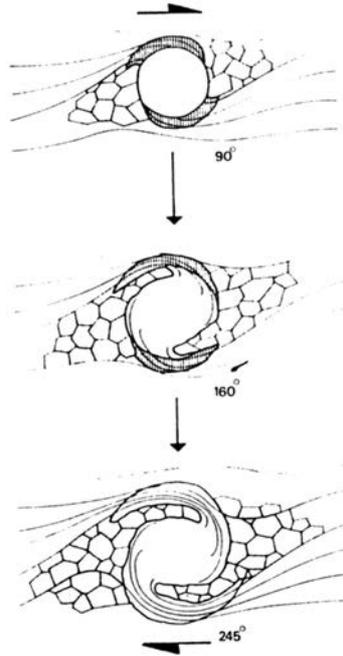
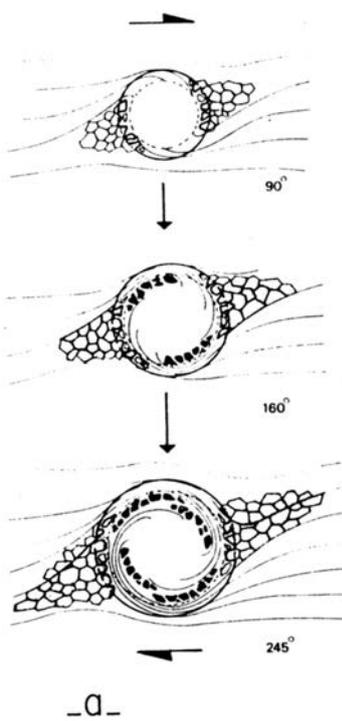
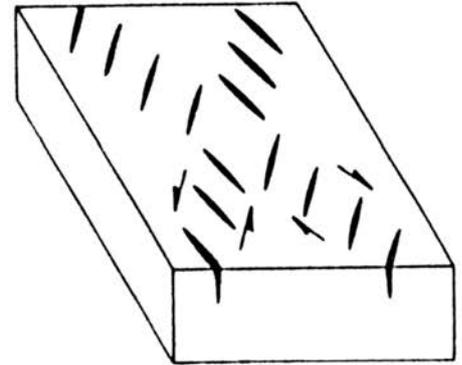
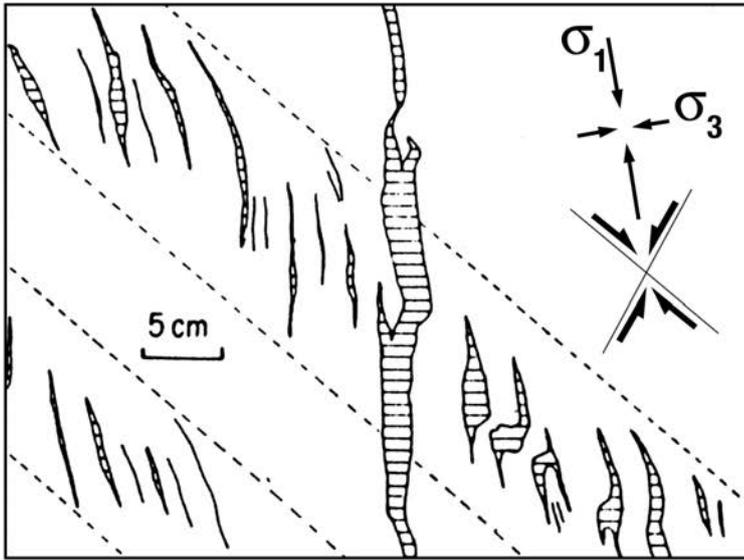
### Fentes en échelon

La disposition de fentes de tension en échelons est la marque d'une dynamique (localement) cisailante. Encore une fois, le caractère non-coaxial (local) est souligné par l'asymétrie du système.

Noter l'allure **sigmoïde** de certaines des fentes.

# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (6)

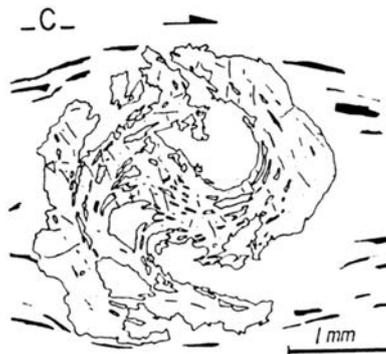
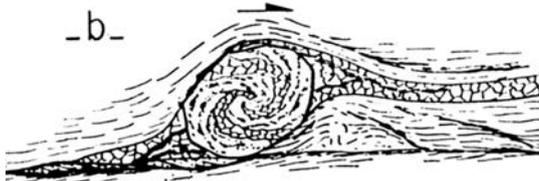
## Les marqueurs du régime de déformation -2-



### Minéraux hélicitiques

Dans certaines roches métamorphiques, on peut observer des minéraux qui, au cours de leur croissance ont «emprisonné» des reliques de minéraux environnants.

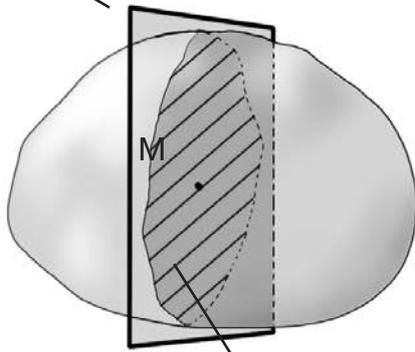
Si du cisaillement a lieu, le minéral subit une rotation au cours de sa croissance, et les inclusions qu'il contient dessinent un résultat de cette rotation.



# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (7)

## Contraintes dans un matériau

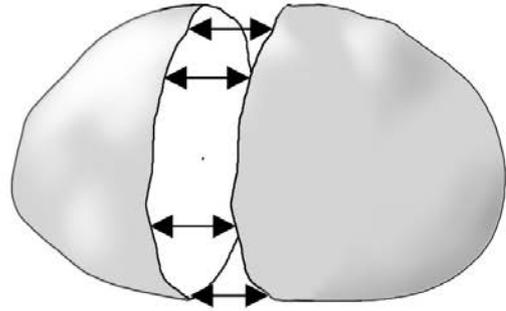
Plan P passant par le point M



Section de surface S contenant le point M

### Cohésion au voisinage d'un point.

Pourquoi l'objet ne se sépare-t-il pas



en deux morceaux de part et d'autre du plan P ?

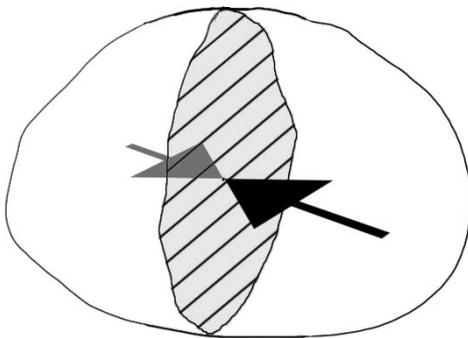
### Forces de cohésion et contraintes

Il y a en fait nécessairement des forces de part et d'autre du plan P, qui maintiennent ensemble ces deux moitiés.

Selon le principe d'action et de réaction, les deux forces sont opposées et égales en module.

Selon un autre plan P', on aurait une autre paire de forces.

**CES FORCES NE SONT PAS FORCÉMENT NORMALES AU PLAN P**



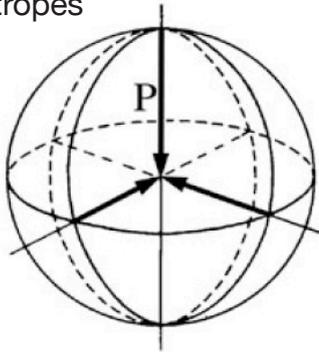
### Contraintes et cisaillement

- Si l'objet est au repos et ne subit aucune force extérieure particulière, toutes les forces de cohésion considérées sont normales aux surfaces choisies.
- En revanche, si l'objet subit des forces extérieures (songeons à un bloc de gélatine que l'on tente de déformer par torsion, écrasement ou autre...), certaines surfaces vont tendre à cisailer plus que d'autres, c'est à dire que les forces exercées sur de telles surfaces ont une composante tangentielle non nulle.
- Comme ces forces sont proportionnelles à la surface choisie, il est préférable de considérer les rapports  $F/S$ , et, mieux encore, la limite de ce rapport lorsque  $S$  tend vers 0, c'est-à-dire  $dF/dS$  qui représente une CONTRAINTE

# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (8)

## Etat de contrainte, état de pression, déviateur

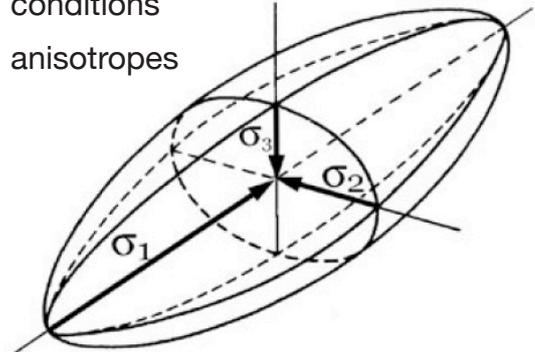
conditions isotropes



### État de pression en un point

Aucune force de cisaillement dans quelque direction que ce soit.

conditions anisotropes

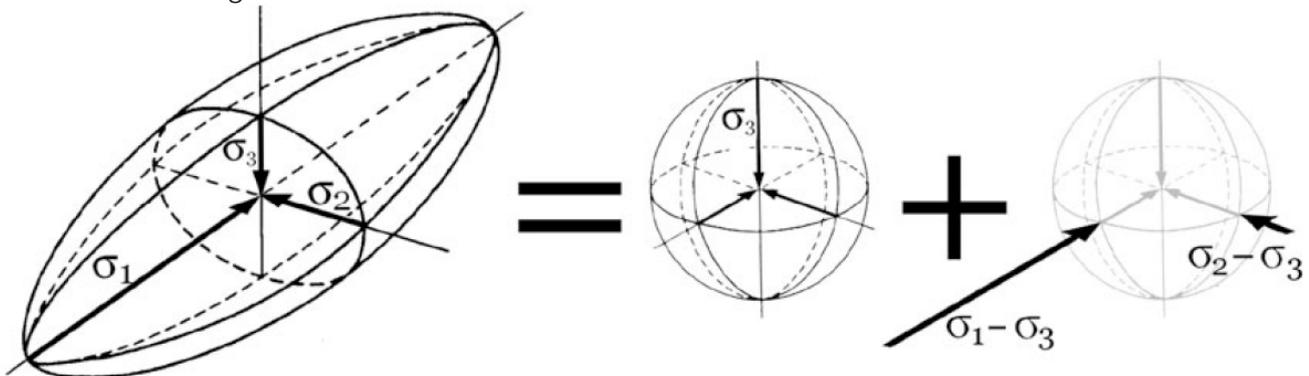


### État de contrainte en un point

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

## Contrainte et déviateur des contraintes.

Tout état de contrainte en un point est donné par un tenseur (une matrice 3X3), donc par trois vecteurs. Cette matrice est diagonalisable, ce qui signifie qu'il existe un certain repère dans lequel les trois contraintes sont normales aux surfaces élémentaires (et donc orthogonales entre elles). Ce repère définit l'ellipsoïde des contraintes (l'orientation des axes et les valeurs des contraintes selon chaque face) qui représente le tenseur sous sa forme diagonalisée.



**Etat de contrainte**

**= Pression isotrope**

**+**

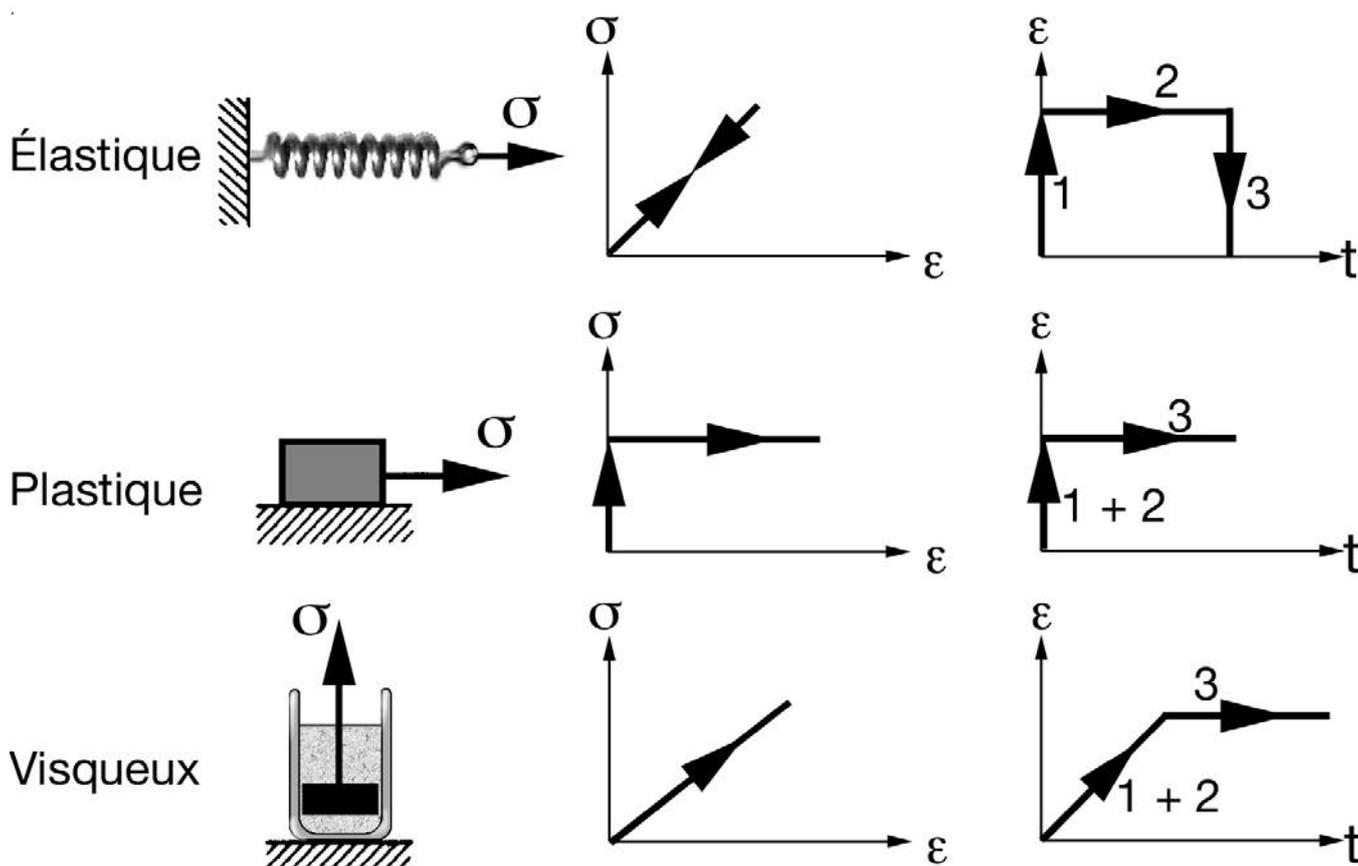
**Déviateur des contraintes**

L'état de contrainte peut alors facilement être décomposé en deux termes : un terme totalement isotrope représentant une pression (égale à  $\sigma_3$ ), et un terme ajouté qui exprime un «surplus» de contrainte dans les directions de  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ .

C'est ce surplus, cet «écart à la normale (!)» que l'on nomme le déviateur des contraintes.

# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (9)

## La réponse d'un matériau à un état de contrainte

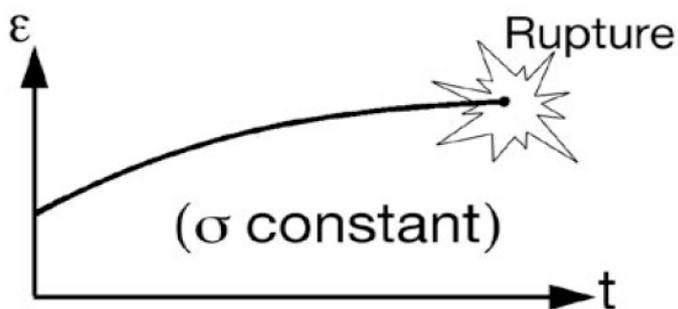
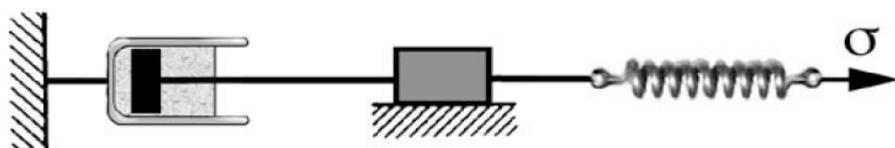


### Comportement de matériaux idéaux

Relations entre contrainte et déformation

$\sigma$  = déviateur  
 $\epsilon$  = déformation

### Comportement d'un matériau réel.

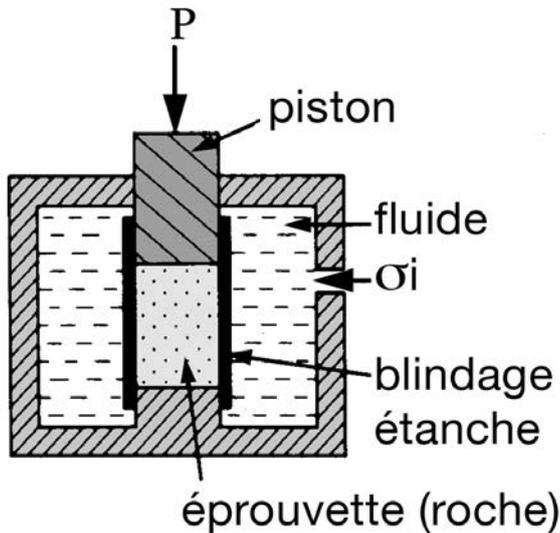


La rupture peut survenir plus ou moins «tôt», selon la raideur du matériau.

$\sigma$  = déviateur  
 $\epsilon$  = déformation  
 $t$  = temps

# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (10)

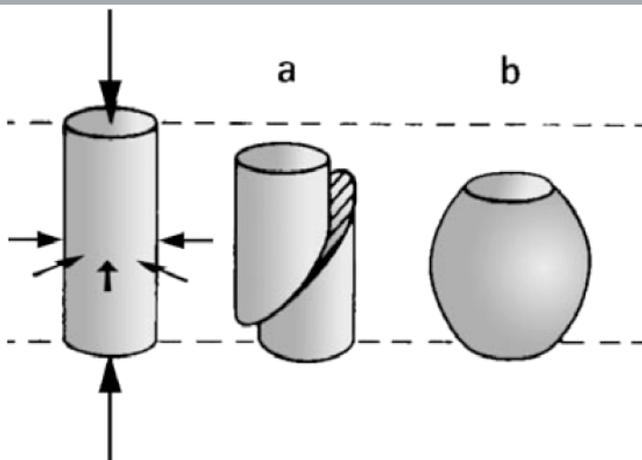
## Analyse expérimentale de la rupture



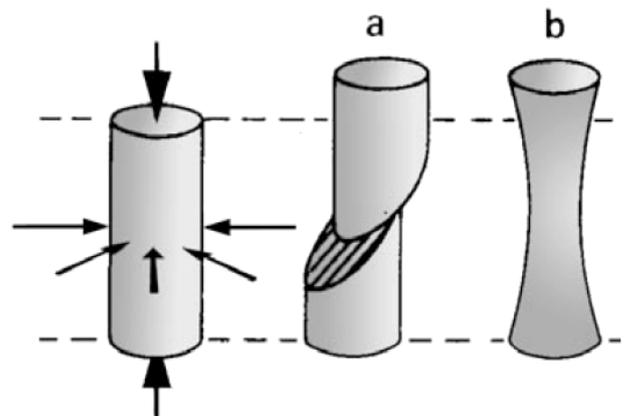
### Principe d'une presse biaxiale

Un piston permet d'exercer une compression orientée (anisotrope donc) le long de l'axe de l'éprouvette, tandis qu'un fluide comprimé permet d'exercer une pression isotrope sur les parois de l'éprouvette.

Si  $P$  est supérieure à  $\sigma_i$ ,  $P$  représente  $\sigma_1$  et on a un essai en compression. Si  $P$  est plus petit que  $\sigma_i$ , on a un essai en traction et  $P$  représente alors  $\sigma_3$

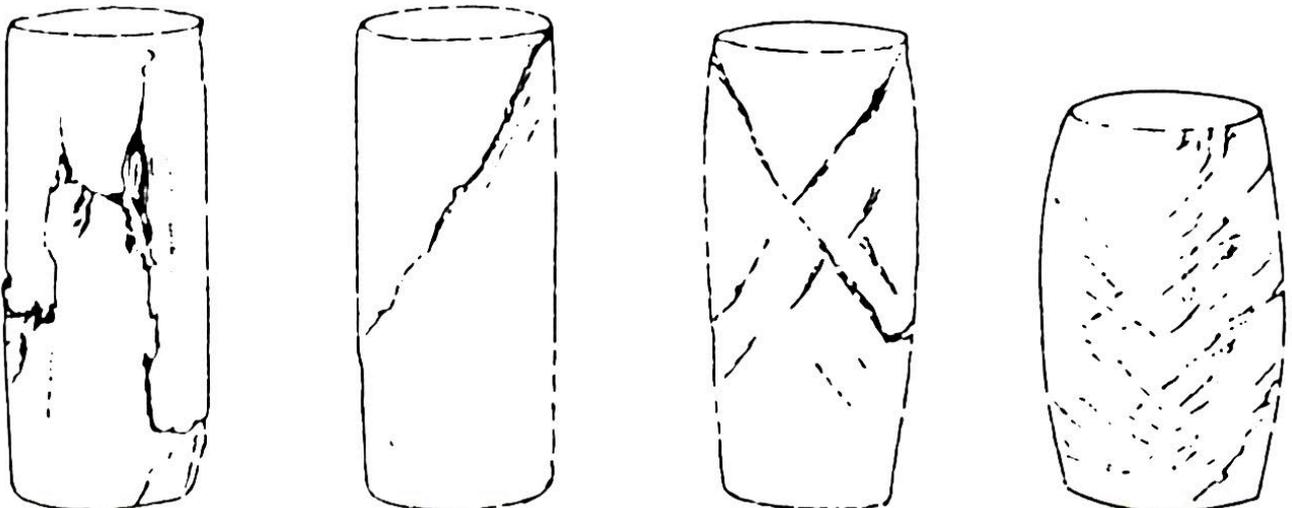


**Essai en compression**



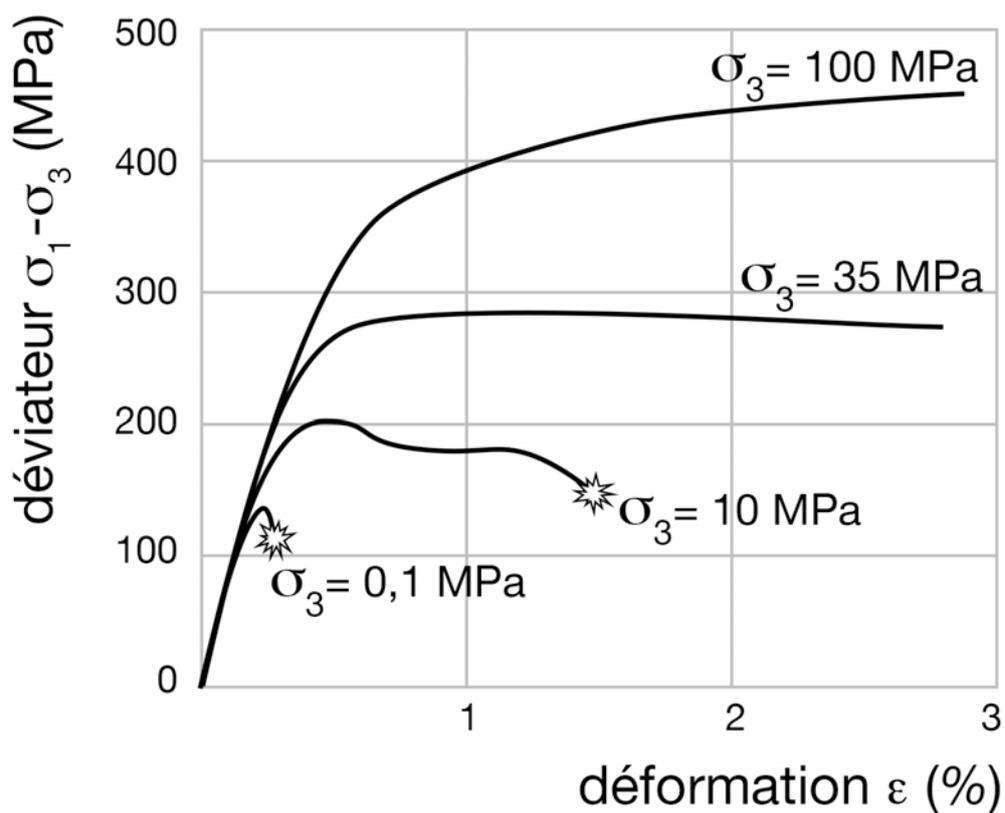
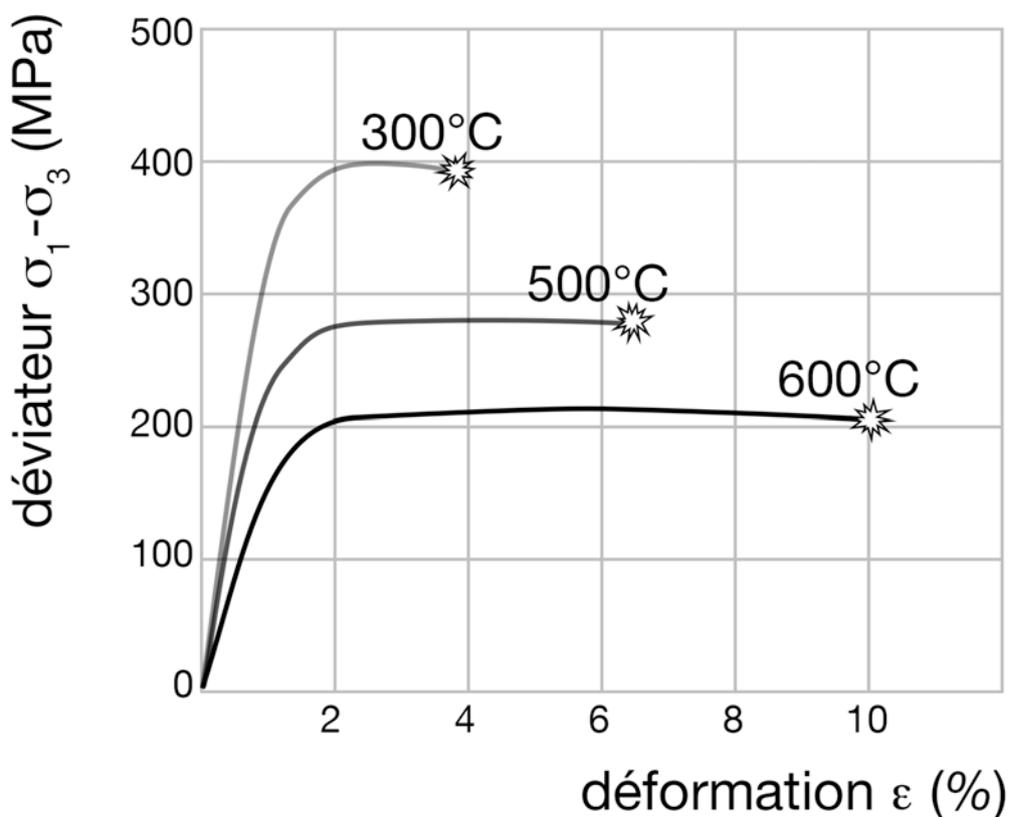
**Essai en traction**

Selon les conditions de l'essai, la déformation obtenue peut être continue ou discontinue (rappelons cependant que ce n'est parfois qu'une question d'échelle d'observation). Dans le cas d'une rupture, l'angle fait entre le plan de rupture et la direction de  $\sigma_1$  est généralement proche de  $30^\circ$ .



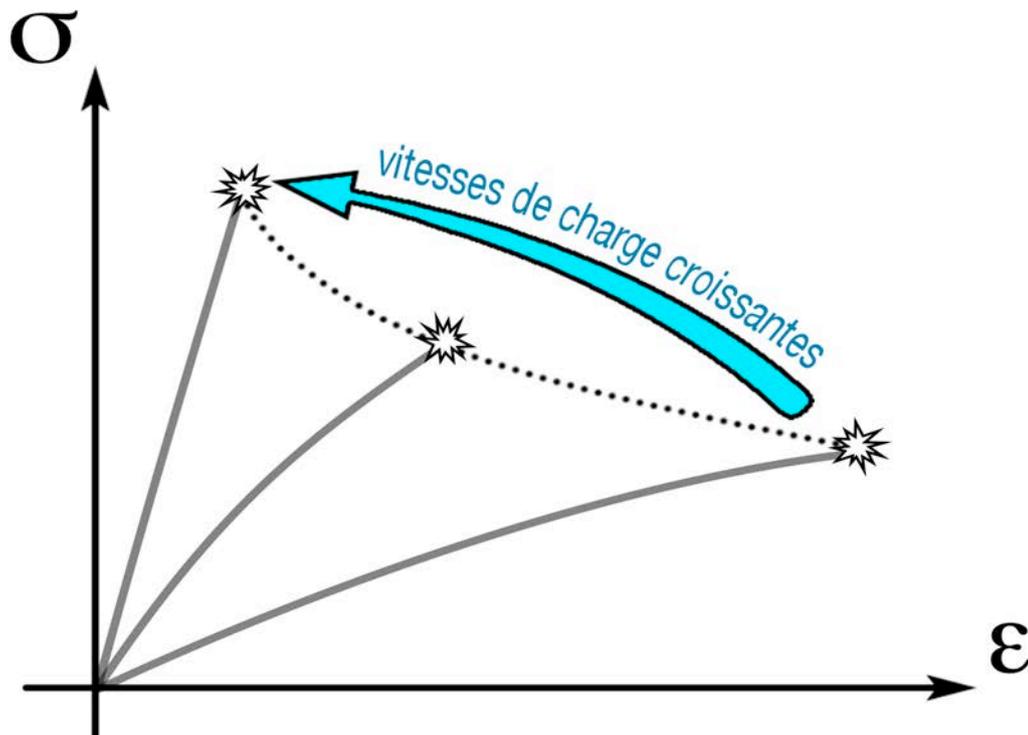
# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (11)

Les conditions de la déformation -1-



# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (12)

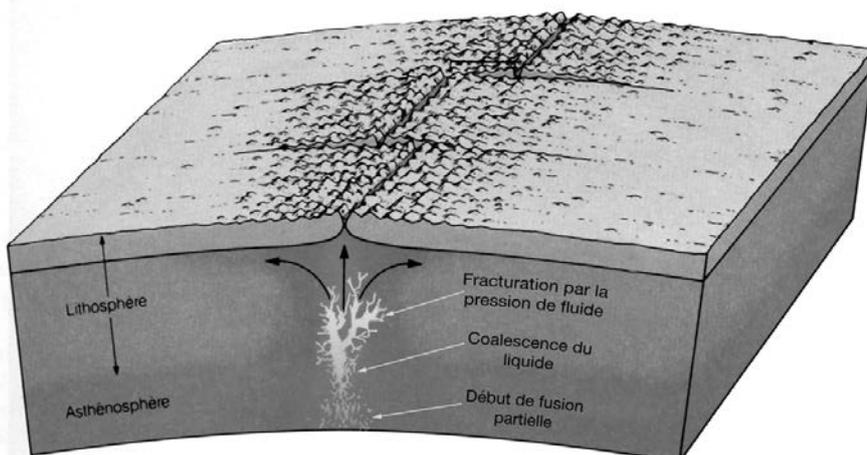
## Les conditions de la déformation -2-



### Effets d'une pression de fluide circulant.

Lorsqu'un fluide sous pression remplit les pores de la roche, sa pression (isotrope !) s'oppose (à l'interface avec le solide) aux contraintes ou pressions de la roche, dans toutes les directions.

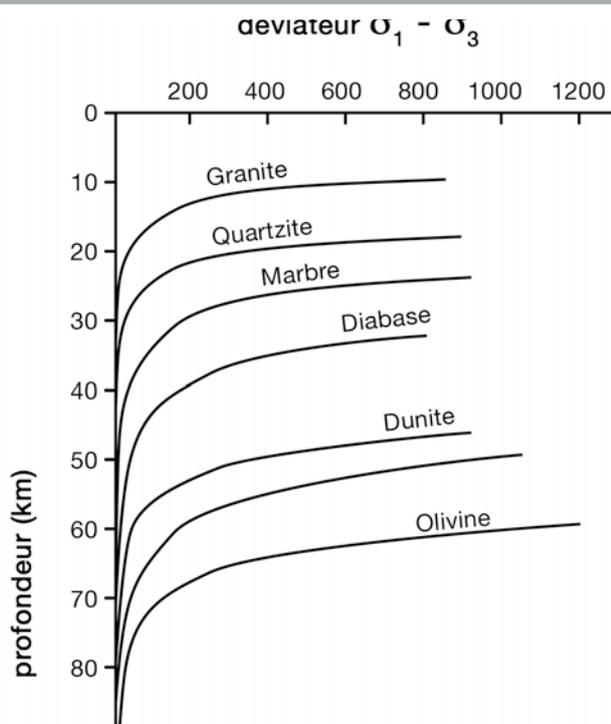
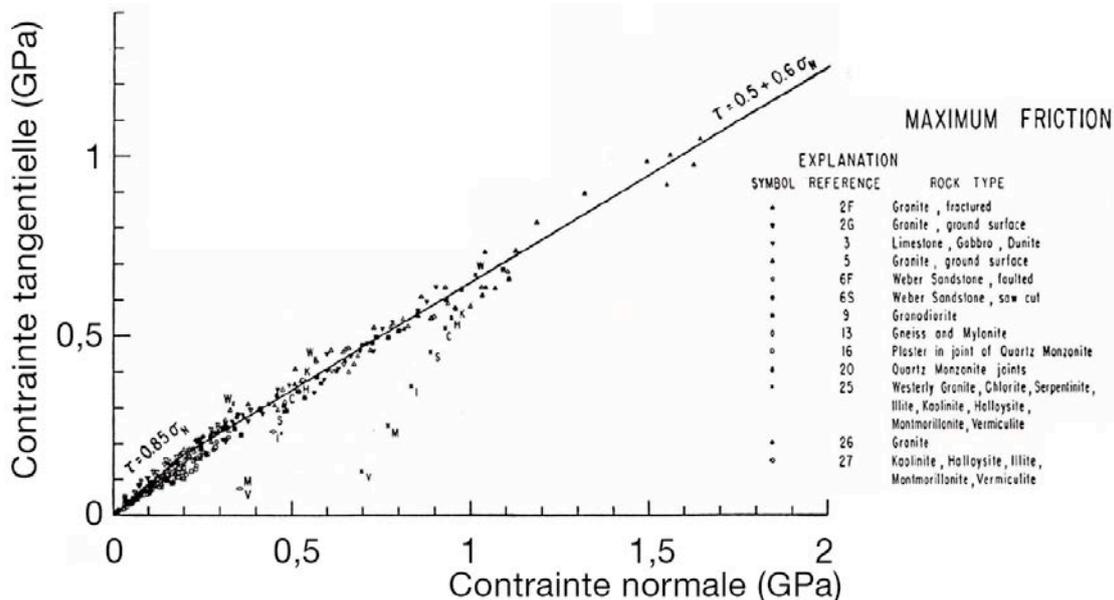
Les contraintes effectives se trouvent donc toutes diminuées de la même valeur : la valeur de cette pression de fluide. Il en résulte que le déviateur est inchangé, tandis que la pression de confinement se trouve diminuée. L'ellipsoïde se rapproche donc des conditions de la rupture.



C'est ce qui se produit, par exemple, sous les dorsales, où le magma sous pression peut fracturer le sommet de la lithosphère et se frayer ainsi un chemin jusqu'à la surface

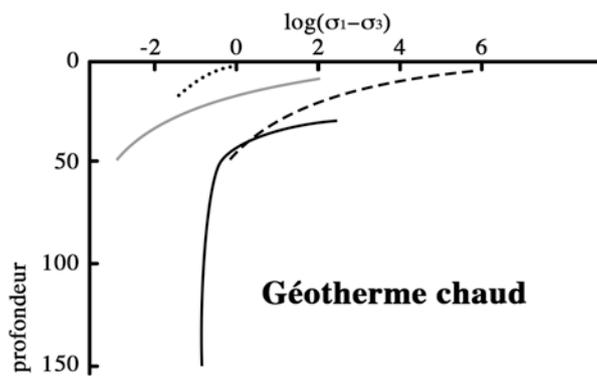
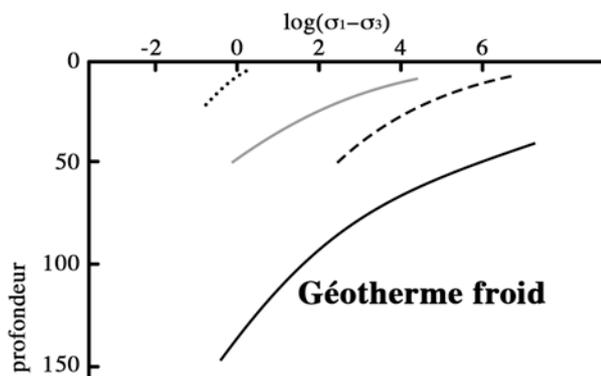
# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (13)

## Enveloppe rhéologique de la lithosphère -1-



### Lois de fluage

Sont représentées les lois de fluage de différents matériaux plus ou moins représentatifs de la croûte continentale ou du manteau



# DÉFORMATION DE LA LITHOSPHERE - (14)

Enveloppe rhéologique de la lithosphère -2-

