

CHAPITRE: II

**NOTION DE MECANIQUE DES
ROCHES (RHEOLOGIE)**

Introduction

Qu'est-ce que la rhéologie?

Rhéologie : Étude du comportement des matériaux soumis à **une contrainte**.

La rhéologie des matériaux de la croûte terrestre dépend de **trois facteurs principaux** :

- **La température ;**
- **La pression lithostatique ;**
- **La vitesse de déformation.**

Contraintes anisotropes et déformations

Les forces tectoniques : notion de contrainte

Il y a deux catégories de forces qui sont responsables de **la déformation des roches** :

- **La gravité** : c'est l'attraction terrestre, elle engendre **des forces verticales**.
- **La dérive des continents** : liée aux **courants de convection** dans le manteau, elle engendre **des forces horizontales**. Ces forces déterminent dans les roches un état de **contrainte**.

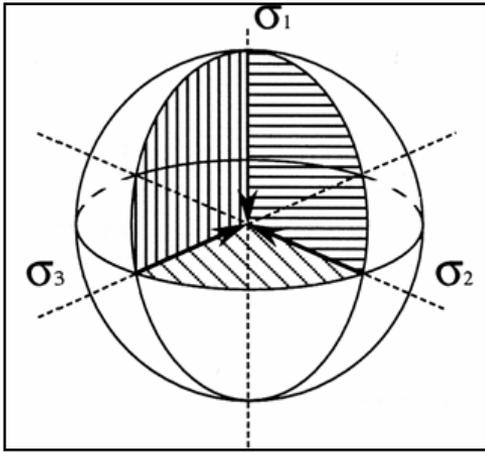
Notion de contrainte

- **La contrainte** est une force appliquée à une certaine unité de volume.
- **Les solides** possèdent **une force** pour résister à la contrainte.
- Lorsque **la contrainte dépasse la résistance du matériau**, l'objet est déformé et il s'ensuit **un changement** dans la **forme** et/ou le **volume**.

Contraintes anisotropes et déformations

Les états de contraintes dans l'écorce terrestre

Ecorce stable, non déformée

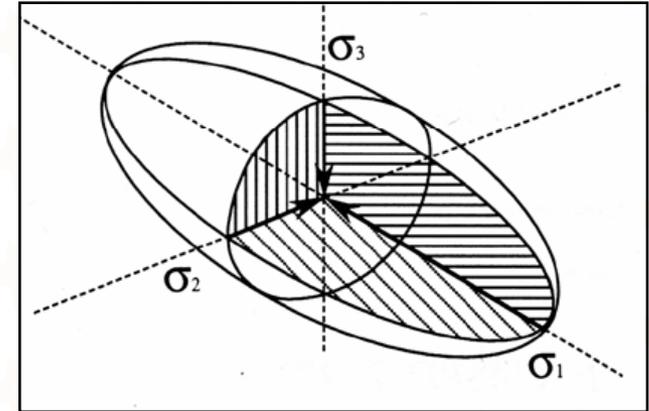


$$F = \rho g h$$

(ρ : densité moyenne des roches; g : accélération de pesanteur)

- La contrainte est **isotrope**.
- Le champ de contrainte est assimilable à **une sphère**.
- Il n'y a pas de déformations ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), **contrainte uniaxiale**.

Ecorce déformée



- **Les forces tectoniques**+**pression lithostatique**.
- Un champ de contrainte **anisotrope**.
- Le champ de contrainte est représenté par **un ellipsoïde** (ellipsoïde de contrainte).
- Les roches vont se déformer. $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (**contrainte triaxiale**).
- Les axes d'ellipsoïde des contraintes sont perpendiculaires (**Fig.**) :
 - σ_1 , la **contrainte maximale**;
 - σ_3 , la **contrainte minimale**;
 - σ_2 , la **contrainte intermédiaire**.

Contraintes anisotropes et déformations

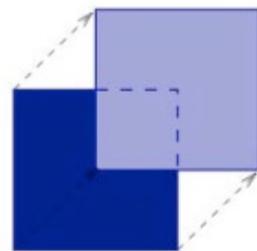
Les forces tectoniques

Notion de déformation

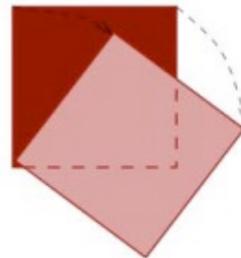
En réponse aux **contraintes**, les roches vont **se déformer**, au sens large, le terme de déformation comprend:

- des déplacements : **rotations** et **translations**.
- des **changements de formes** : c'est la **déformation au sens strict** qui sera surtout envisagée dans **ce cours**.

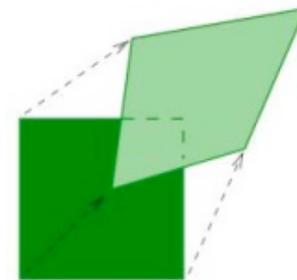
La distorsion ou changement de forme, sous l'influence d'une contrainte, est le composant qui intéresse le plus le géologue, c'est la déformation proprement dite. Elle peut être **discontinue** ou **continue** (cassante ou ductile), **homogène** ou **hétérogène**.



Translation



Rotation



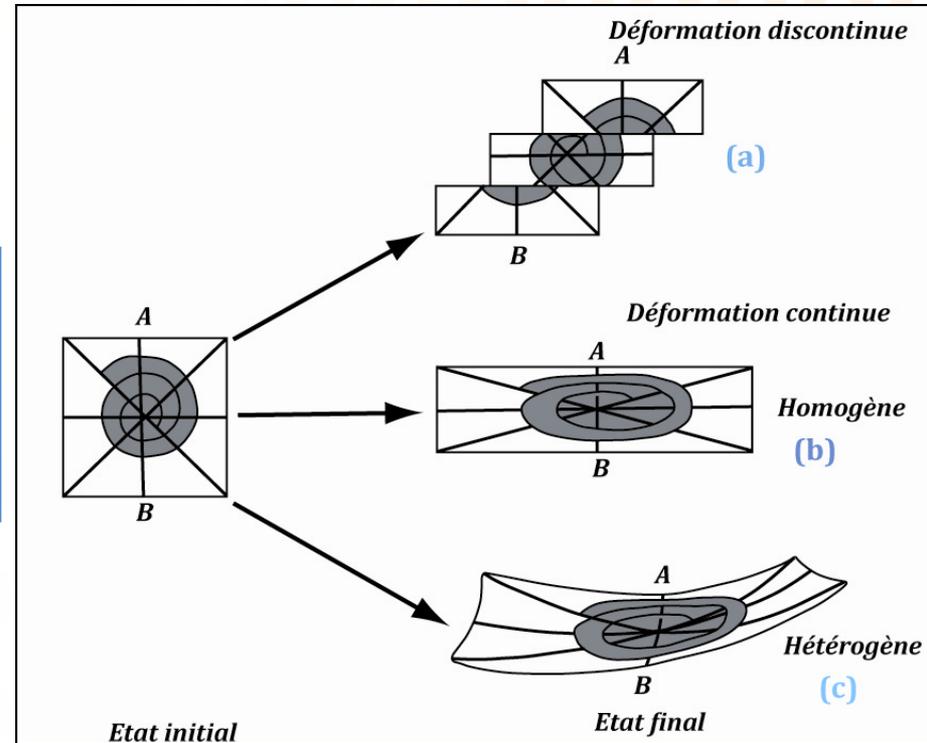
Déformation

Contraintes anisotropes et déformations

Les forces tectoniques

Notion de déformation

- La déformation continue :
Lors d'une déformation continue, l'objet change de forme sans subir de ruptures.



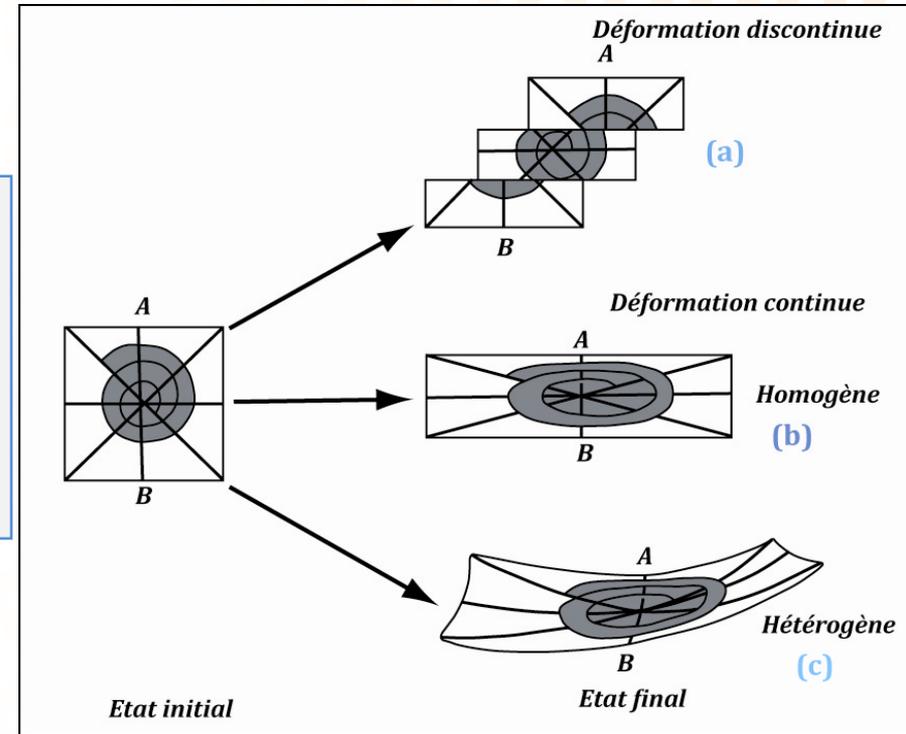
- ◆ **Déformation continue homogène (Fig. b)** : dans une telle déformation des droites parallèles sont transformées en d'autres droites parallèles de longueur et de directions différentes.
- ◆ **Déformation continue hétérogène (Fig. c)** : des droites parallèles sont transformées en courbes non parallèles.

Contraintes anisotropes et déformations

Les forces tectoniques

Notion de déformation

La déformation discontinue (Fig. a) : une déformation est dite discontinue si dans l'objet déformé apparaissent **des plans de discontinuités** ou **de ruptures** le long desquels s'opère des déplacements et des glissements.



Une déformation peut être s'exprimée par une ou des discontinuités, ce sont **des failles** ou **des fractures** on dit que **la déformation est discontinue**, cela indique **un comportement mécanique cassant** ou **fragile** de la roche.

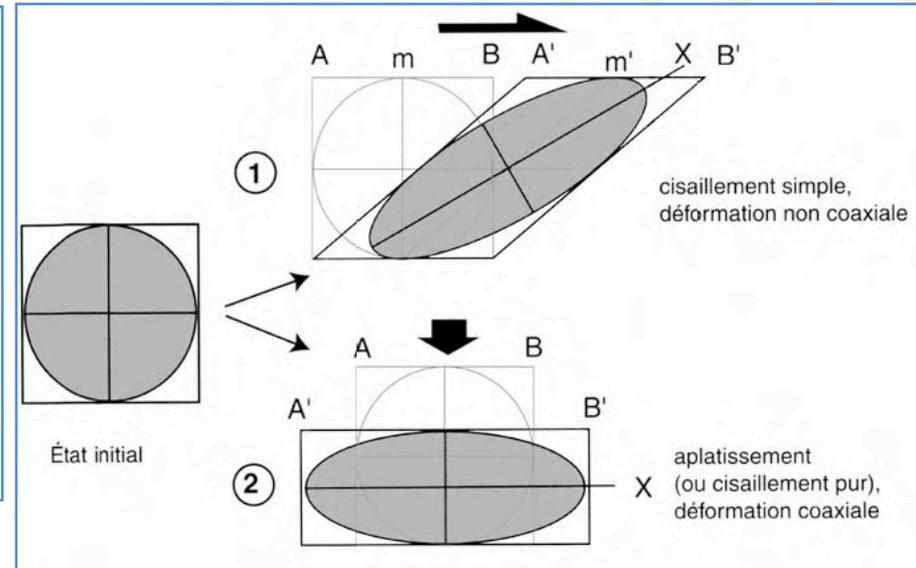
La déformation peut être **souple** comme dans le cas **des plis** par exemples, on dit alors qu'elle est **continue**, cela indique **un comportement mécanique ductile**.

Contraintes anisotropes et déformations

Les forces tectoniques

Notion de déformation

♦ Aplatissement pur : (Fig. 2) Pour simplifier on considèrera la déformation en deux dimensions (2D). Le carré et le cercle se transforment en rectangle et ellipse, respectivement. Dans l'état déformé, on définit des axes de déformation :
L'axe (X) : c'est l'axe d'étirement ou d'extension.
L'axe (Z) : c'est l'axe de compression ou de raccourcissement.



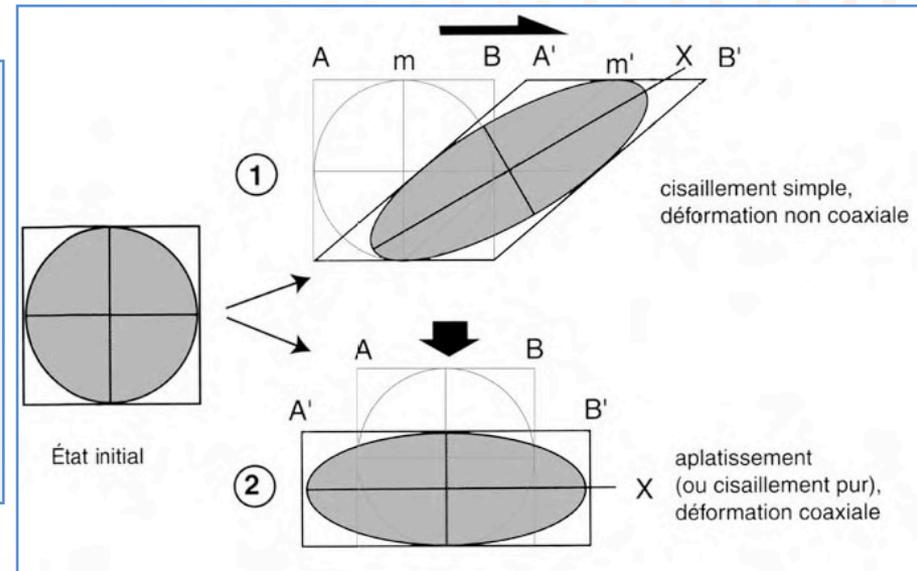
Dans l'aplatissement pur les axes X et Z gardent toujours **la même orientation**, L'objet est « **écrasé** ». Les axes X et Z sont parallèles à la direction de contrainte principale ($\sigma_1 // Z$ et $\sigma_3 // X$) on dit que la déformation est coaxiale.

Contraintes anisotropes et déformations

Les forces tectoniques

Notion de déformation

♦ **Cisaillement simple** : (Fig.1) On raisonne toujours en deux dimensions, les contraintes principales sont **obliques** sur le côté du carré, il y a **cisaillement** ou **glissement** le long des côtés ($AB \rightarrow A'B'$; $m \rightarrow m'$) qui gardent toujours **la même longueur**, le **carré** et le **cercle** se transforment en **losange** et en **ellipse**, respectivement.



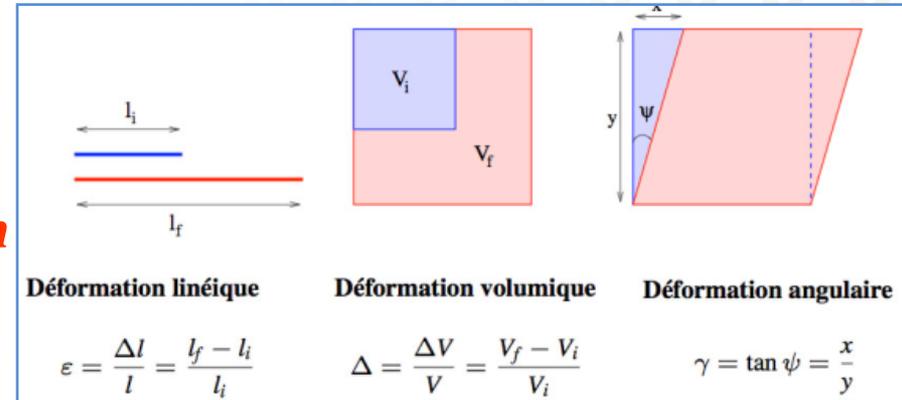
La déformation peut être continue ou discontinue. Dans le **cisaillement simple** les axes X et Z **changent de direction** pendant la déformation, **ils ne restent pas parallèles aux contraintes principales**, l'objet est « **cisailé** ». On dit que **la déformation est non coaxiale**.

Contraintes anisotropes et déformations

Les forces tectoniques

Notion de déformation

Mesure, quantification de la déformation



Quantifier une déformation revient à comparer l'état initial (avant déformation) à l'état final (déformé). Deux paramètres sont généralement pris en compte.

- La variation de longueur ou extension (ou élongation):

$$\varepsilon = l_f - l_i / l_i$$

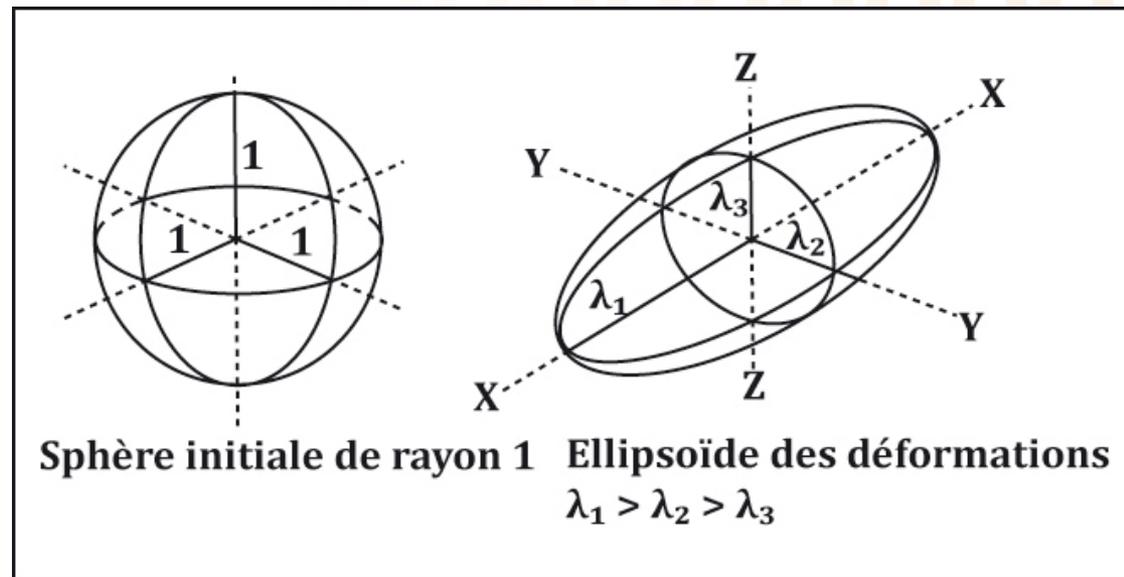
- La déformation angulaire ou « cisaillement ». C'est l'angle ψ que font deux droites initialement orthogonales. Le cisaillement est donné par la formule :

$$\gamma = \tan \psi = x/y$$

Contraintes anisotropes et déformations

L'ellipsoïde des déformations

(x,y,z) caractérisent le champ de **déformation**. C'est une **observation** de l'objet.



La déformation d'une sphère donne un ellipsoïde dont les 3 axes principaux peuvent être identifiés comme suit : **OX : élongation maximale** ; **OZ : raccourcissement maximal** et **OY : raccourcissement intermédiaire**.

Contraintes anisotropes et déformations

Classification des ellipsoïdes de déformation

La détermination de l'ellipsoïde (**mesure et orientation**) est un des objectifs de l'analyse structurale. Il faut disposer **d'objets déformés** dont on connaît la forme initiale: galets, fossiles, grains détritiques, etc...

En 3 dimensions, l'ellipsoïde de déformation est défini par ses 3 axes, $X \geq Y \geq Z$. Selon la taille relative des 3 axes, on peut distinguer deux cas extrêmes (**Fig. a et b**) :

Contraintes anisotropes et déformations

Classification des ellipsoïdes de déformation

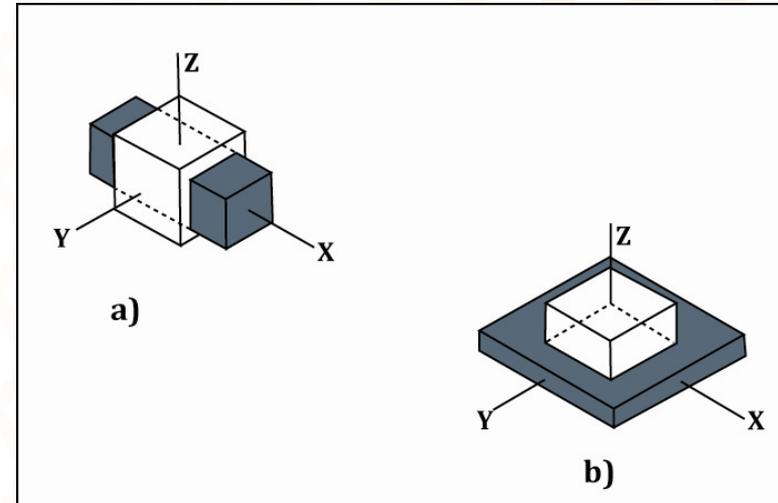
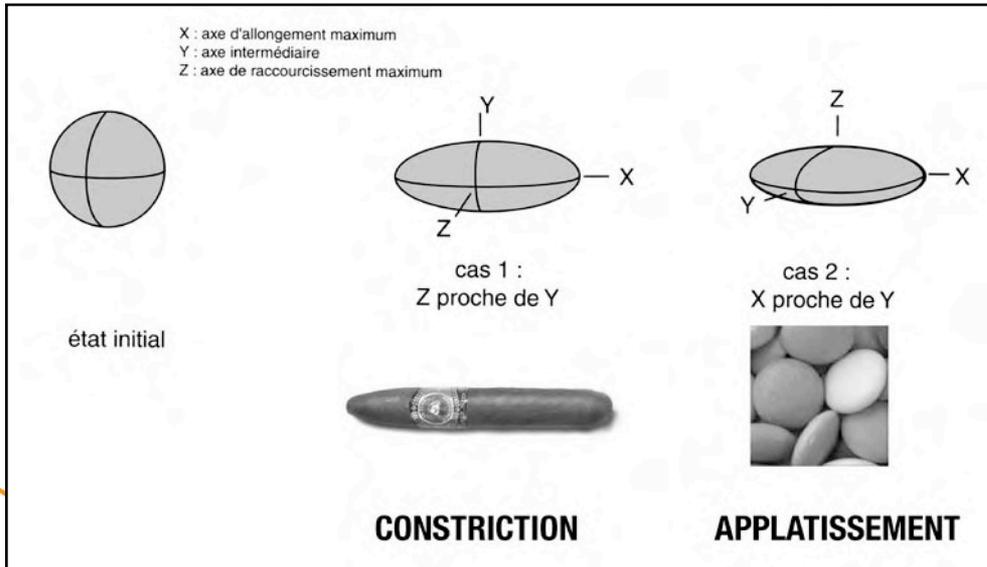


Fig. : (a) Déformation en constriction; et (b) en aplatissement; d'un objet initialement cubique.

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

Contraintes anisotropes et déformations

Classification des ellipsoïdes de déformation

Diagramme de Flinn

Une façon simple de représenter les différents cas est de construire un diagramme (**diagramme de Flinn**), où on porte X/Y en fonction de Y/Z . Le paramètre de Flinn, $k = X/Y - 1/Y/Z - 1$, permet de décrire la forme de l'ellipsoïde. K peut varier de 0 ($X = Y$, **aplatissement**) à $+\infty$ ($Y=Z$, **constriction**), en passant par toutes les valeurs intermédiaires. Si $k > 1$, c'est la **constriction** qui domine; Si $k < 1$, c'est l'**aplatissement** qui domine (Fig.).

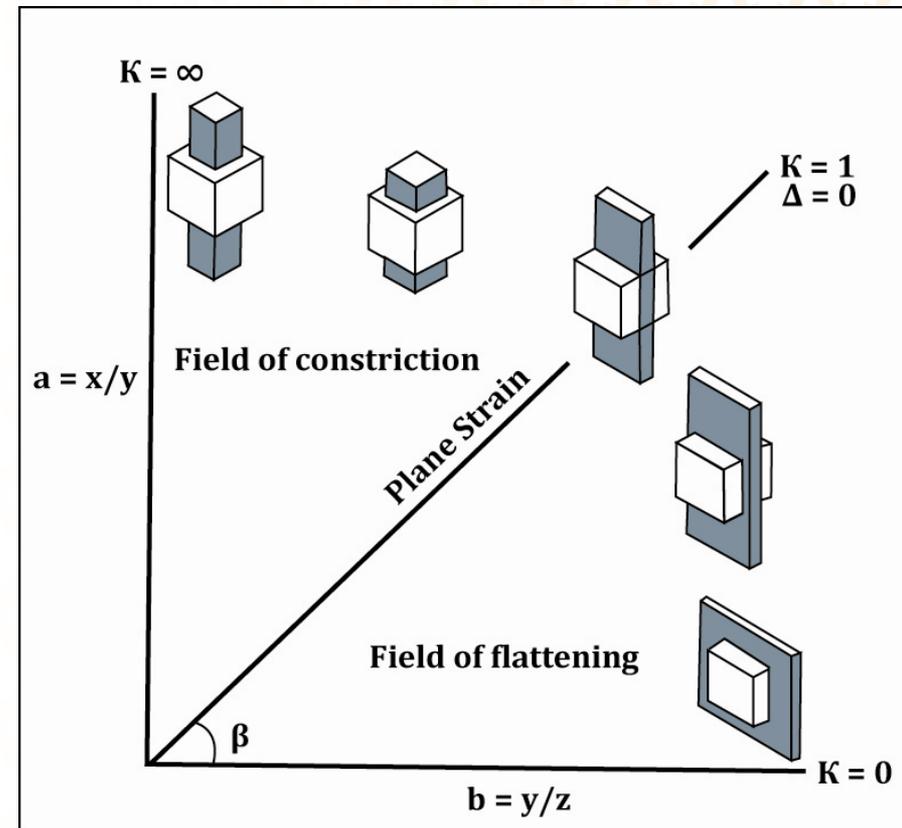


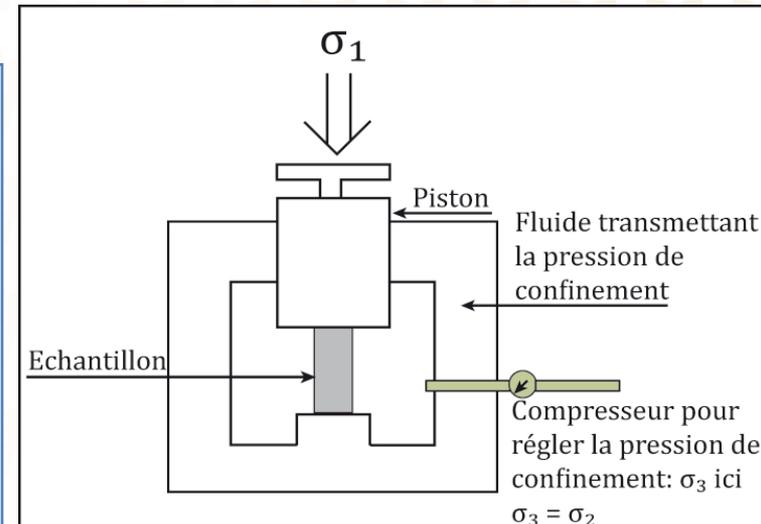
Fig. : Diagramme de Flinn. Un cube blanc est déformé en différents parallélépipèdes gris.

Relation contrainte - déformation

Le comportement des roches est essentiellement étudié grâce à **la mécanique des roches**, c'est à dire à partir des résultats de **la tectonique expérimentale**.

Principe de l'expérience

Des échantillons de roches sont placés à l'intérieur d'une enceinte, on les soumet à des contraintes tectoniques d'intensités variables, tout en faisant varier les paramètres de P et T de façon à reproduire les conditions régnantes à l'intérieur de l'écorce terrestre.



Relation contrainte - déformation

Résultats

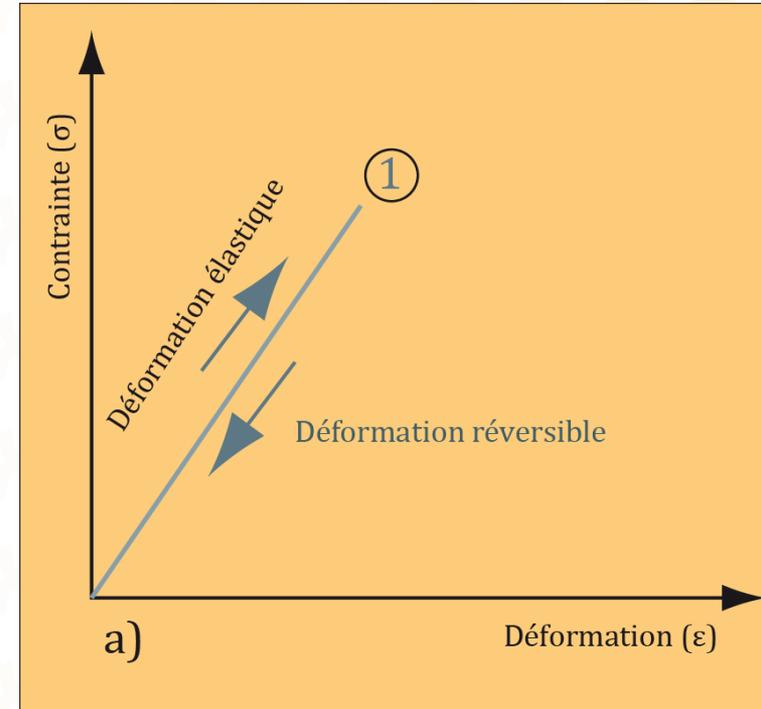
Les courbes : *contrainte/déformation*

Types de comportements des roches

Déformation élastique

Comportement élastique : déformation immédiate (pas de seuil), réversible de la roche

- Relation linéaire (**proportionnelle**) entre σ et ϵ .
- Matériaux élastiques accumulent une déformation qu'ils restituent quand la contrainte est relâchée.



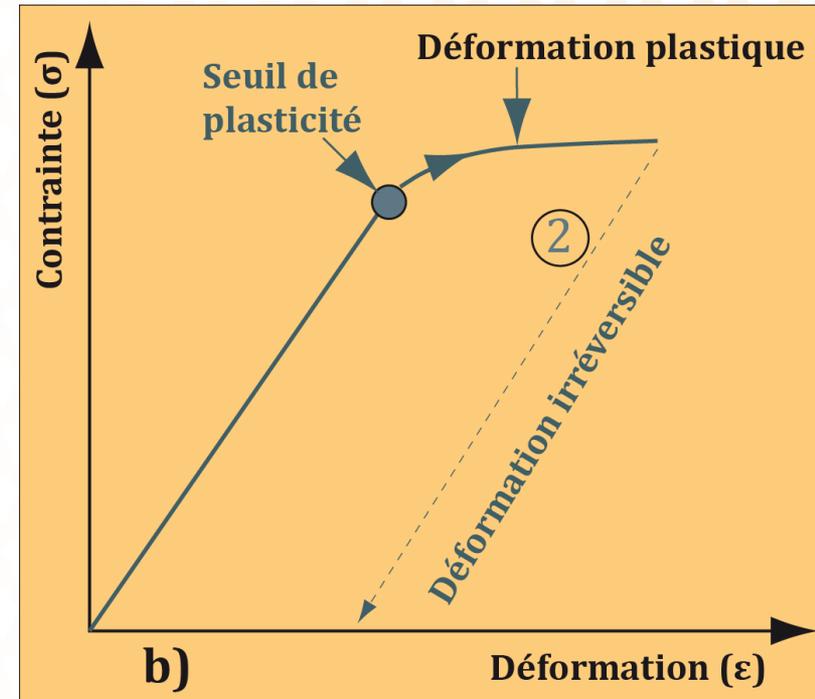
Relation contrainte - déformation

Résultats

Les courbes : *contrainte/déformation*

Types de comportements des roches

Déformation plastique



Comportement plastique : déformation non réversible de la roche

- Pas de relation linéaire entre σ et ϵ .
- Matériaux plastiques ne restituent pas la déformation après relaxation des contraintes.

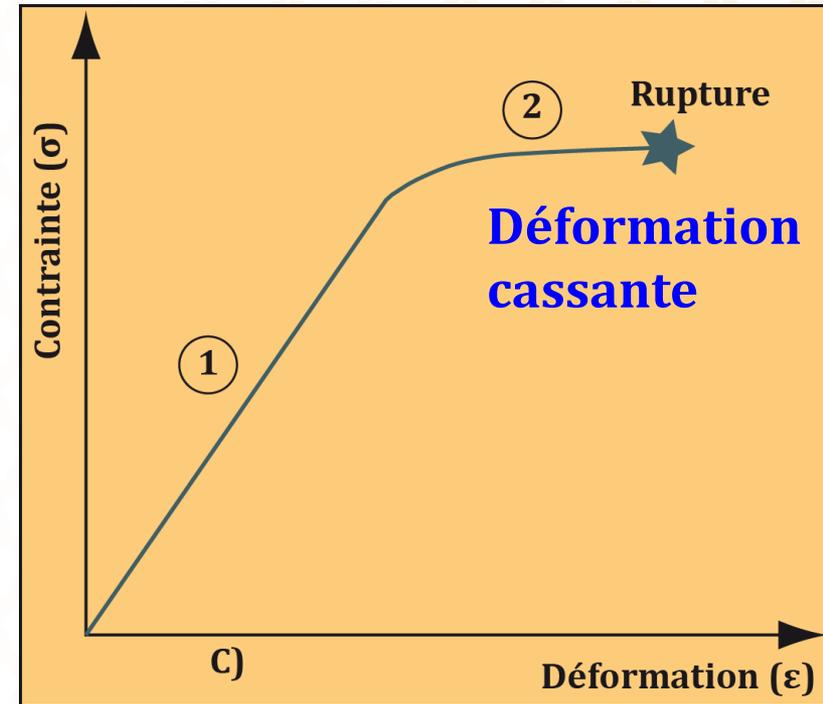
Relation contrainte - déformation

Résultats

Les courbes : *contrainte/déformation*

Types de comportements des roches

Déformation cassante



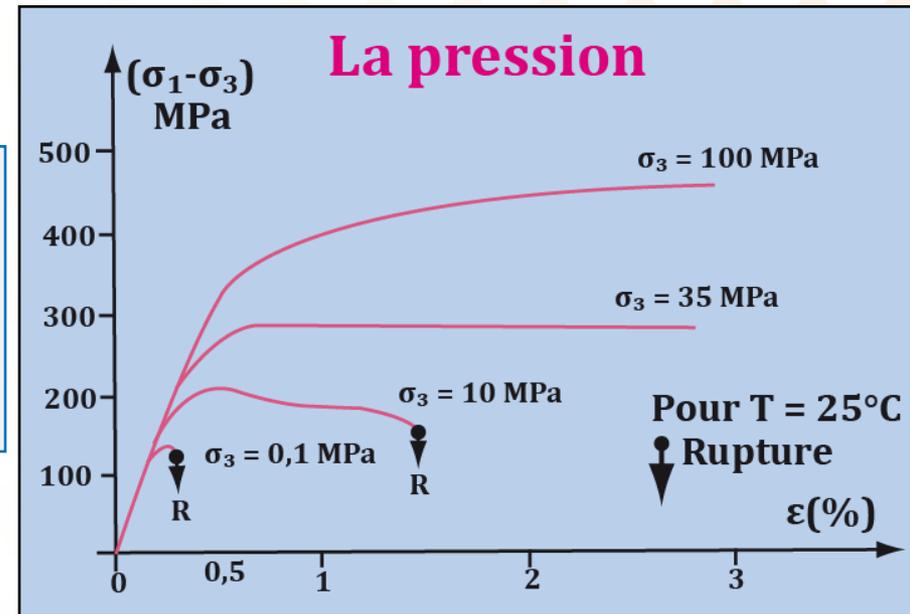
Roche cassante : se déforme de manière élastique voir même un peu plastiquement avant la rupture.

- Déformation permanente de la roche.
- Toute l'énergie est utilisée pour déformer le matériau.
- Les matériaux se cassent.
- Déformation discontinue, froide et rapide.

Paramètres qui contrôlent la déformation

Variation de la Pression confinante

- Fracturation retardée par augmentation de la pression de confinement.
- Si la pression de confinement atteint de valeurs élevées supérieure à **30 MP**, la rupture n'existe plus.



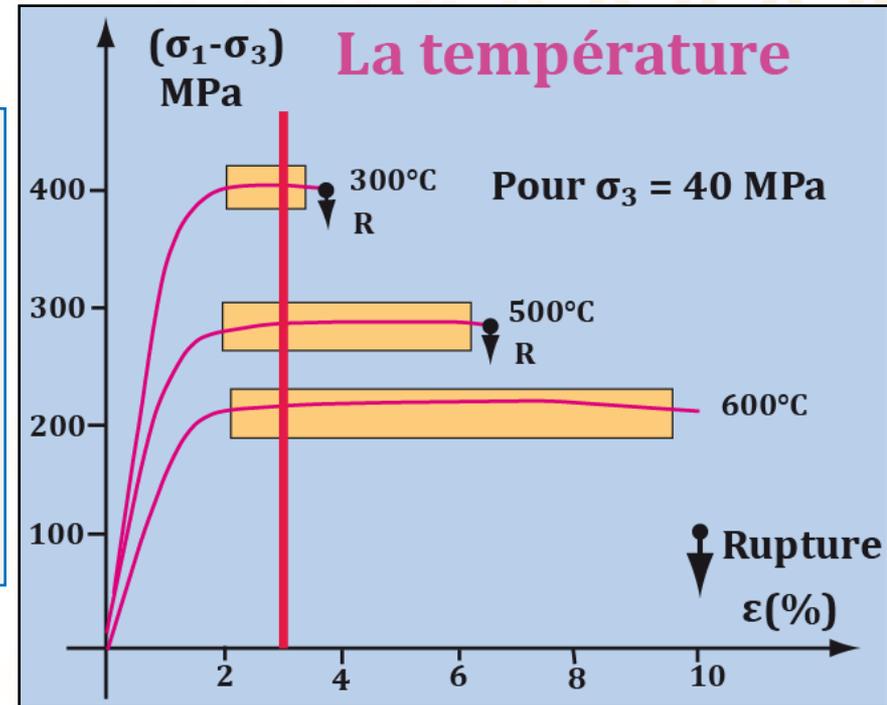
- Pour des P confinante faibles le comportement est cassant, pour des P croissantes les roche ont un comportement plutôt plastique; la déformation est ductile.

Paramètres qui contrôlent la déformation

Variation de la Température confinante

- Si la température augmente, le seuil de fluage plastique diminue.
- Amollissement de la roche et déformation avant rupture.

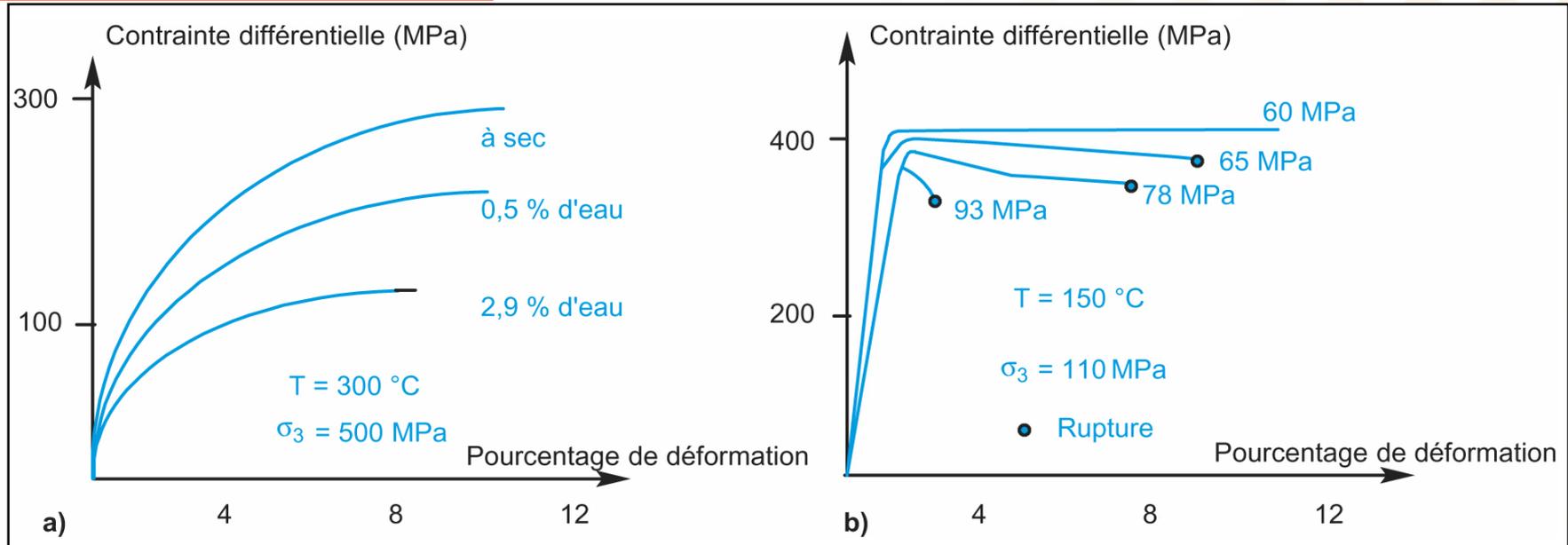
La pression hydrostatique retarde la rupture → effets conjugués de la pression et de la température étend le domaine ductile de la roche.



Pour des T faibles les roches ont un comportement cassant, pour des T croissantes la déformation sont plus faciles, plus ductiles; les roches ont un comportement plastique.

Paramètres qui contrôlent la déformation

Présence de fluides



- À **température** et **pression de confinement élevées** (a), la teneur en fluide rend la roche plus **ductile**.
- À **température** et **pression de confinement basses** (b), l'augmentation de la **pression d'eau** favorise la **rupture**.
- Ainsi l'effet des fluides est différent selon **la profondeur** : la pression de fluide favorise **la fracturation** à **faible profondeur** alors qu'à **plus grande profondeur**, la présence de fluides favorise un comportement **ductile**.

Paramètres qui contrôlent la déformation

Influence de la lithologie

Pour des P et des T données, le comportement des roches varie en fonction de leur lithologie: c'est la notion de compétence d'une roche, c'est à dire son aptitude à résister à la déformation, on distingue pour des conditions de P et de T relativement faibles :

◆ **Des roches compétentes** : elles se déforment difficilement en donnant plutôt des structures cassantes ce sont : **Granite, Grés, Calcaire...**

◆ **Des roches incompétentes** : elles se déforment facilement, et en général d'une façon ductile : **Argiles, Marnes, Pérites,...**