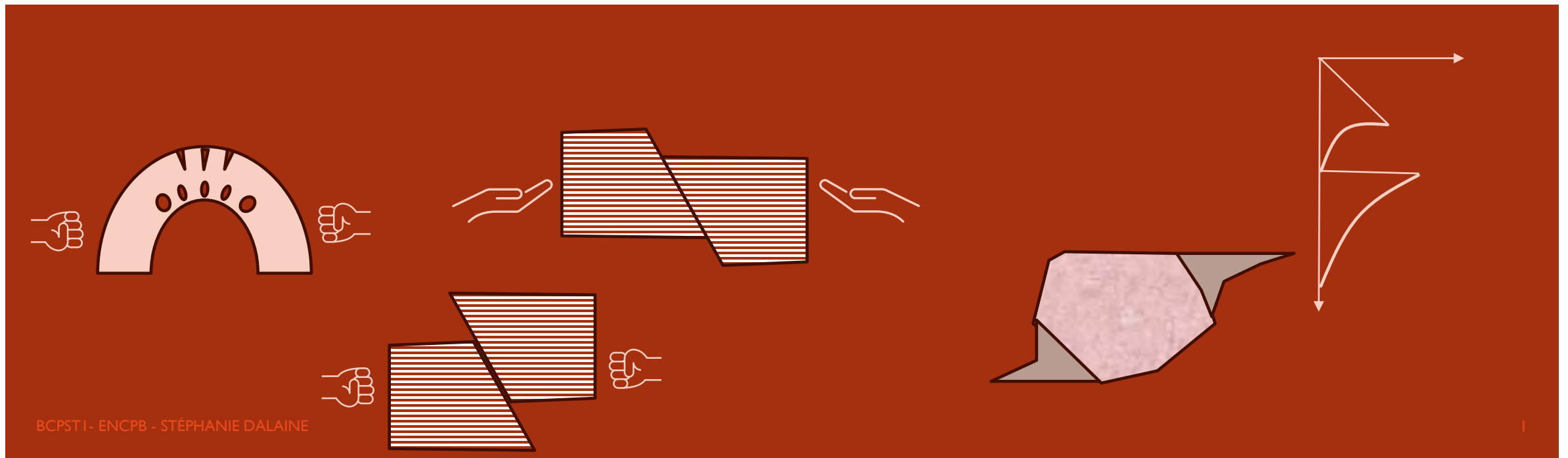


# ST-D LES DÉFORMATIONS DE LA LITHOSPHERE

ST-D-I RHÉOLOGIE



# LITHOSPHERE, LITHOSPHERE, OÙ EN ÊTES-VOUS?

wooclap

- Pour bien commencer l'après-midi, un petit ....



1 Allez sur [wooclap.com](https://wooclap.com)

2 Entrez le code d'événement dans le bandeau supérieur

Code d'événement  
**XAZIDY**

 Activer les réponses par SMS

# EXTRAIT DU B.O.

Savoirs visés	Capacités exigibles
<p><b>Les matériaux lithosphériques se déforment sous l'effet de contraintes : la déformation est réversible ou irréversible.</b></p> <p><b>La déformation finie peut se décomposer en étapes (ou incréments) de deux types comportant ou non une part de rotation. Le cisaillement est alors pur ou simple. Les propriétés mécaniques des roches dépendent de leur minéralogie, des conditions pression/température et de la présence de fluides ainsi que de la vitesse de déformation.</b></p> <p><b>Ces propriétés mécaniques mènent à la définition thermomécanique de la lithosphère abordée précédemment.</b></p> <p><b>Le comportement global de la lithosphère est déterminé par son enveloppe rhéologique, mais ce modèle statique est questionné par des observations de terrain ainsi que par des données géophysiques.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Distinguer déformation et contrainte.</li><li>- Construire une ellipse (2D) ou un ellipsoïde (3D) de déformations, dans le but d'établir, lorsque cela est possible, l'orientation des contraintes.</li><li>- Exploiter des courbes rhéologiques pour distinguer déformation élastique, déformation plastique, phénomène de fluage et la notion de rupture.</li><li>- Distinguer un comportement ductile et un comportement cassant (ou fragile).</li><li>- Relier les différents types de comportement à la compétence des roches et aux conditions thermodynamiques.</li><li>- Illustrer l'importance de la vitesse de déformation dans la rhéologie.</li><li>- Analyser des objets tectoniques à partir de différents supports à différentes échelles (cartes géologiques, photographies, échantillons).</li><li>- Analyser des objets tectoniques, en termes d'ellipsoïde des déformations finies et, lorsque c'est possible, faire le lien avec le régime de contraintes.</li><li>- Analyser des microstructures associées aux structures d'échelle supérieure.</li><li>- Analyser un style structural régional.</li><li>- Savoir relier observations de terrain et déformation.</li><li>- Établir un profil rhéologique de la lithosphère continentale à l'aide de la loi de Byerlee et des lois de fluage.</li><li>- Relier le profil rhéologique avec la distribution des séismes en profondeur.</li><li>- Comparer les profils rhéologiques des lithosphères continentale et océanique.</li><li>- Discuter l'allure de ces profils en fonction du gradient géothermique local.</li><li>- Discuter des limites d'application des enveloppes rhéologiques à partir d'observations.</li></ul>

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# DEUX TYPES DE DÉFORMATIONS: PLIS ET FAILLES

- Déformation= modification de la forme d'un objet
  - **contraintes** tectoniques ⇒ **déformation**
- Rhéologie: définir les **grandeurs** qui relient la déformation à l'état de contrainte qui leur a donné naissance
  - Température
  - Profondeur
  - Vitesse de déformation
- Faille et pli sont le **résultat de la contrainte**



Sur le terrain on ne peut observer que les **déformations** des roches, pas les contraintes



Figure 1 : deux types de déformations : plis et failles

# LE TAUX DE DÉFORMATION



1. Trouver la forme initiale (le « témoin »)
2. Mesurer la longueur initiale  $l_0$  et la longueur finale  $l$
3. Calculer le **taux de déformation** (sans unités!)

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

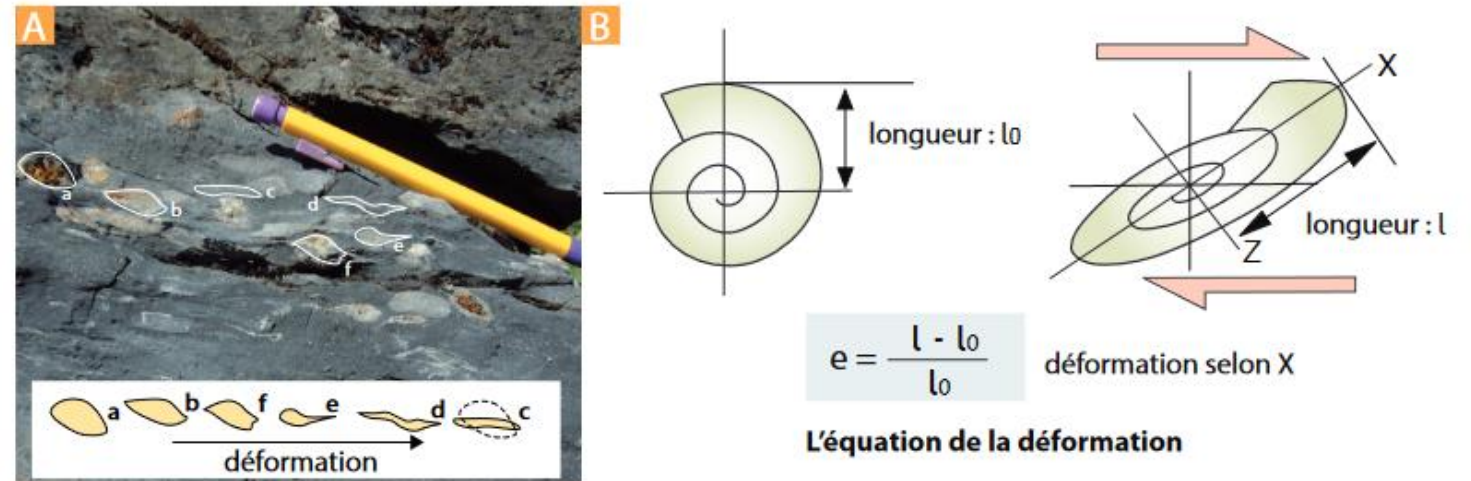


Figure 2 : le taux de déformation (Renard et al. 2016)

# LE TAUX DE DÉFORMATION

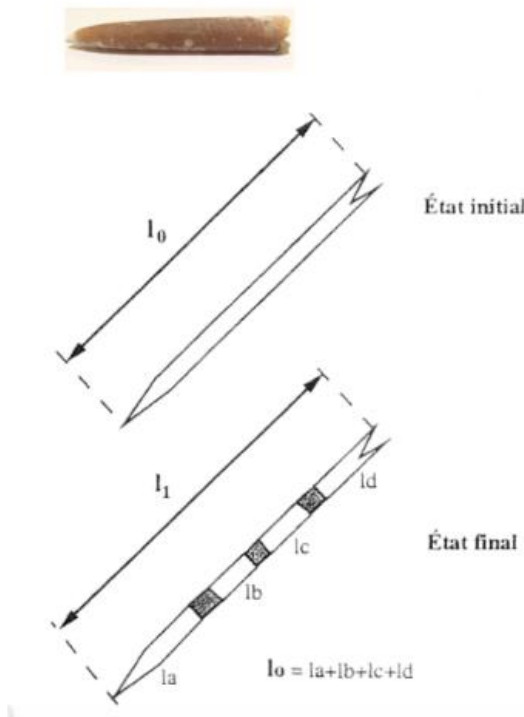


Bélemnites: céphalopodes marins ayant vécu du Dévonien au Crétacé (source Wikipédia)

1. Trouver la forme initiale (le « témoin »)
2. Mesurer la longueur initiale  $l_0$  et la longueur finale  $l_1$
3. Calculer le taux de déformation (**sans unités!**)

$$\varepsilon = \frac{l_1 - (l_a + l_b + l_c + l_d)}{(l_a + l_b + l_c + l_d)}$$

Allongement d'un rostre de belemnite tronçonné



Allongement d'un minéral

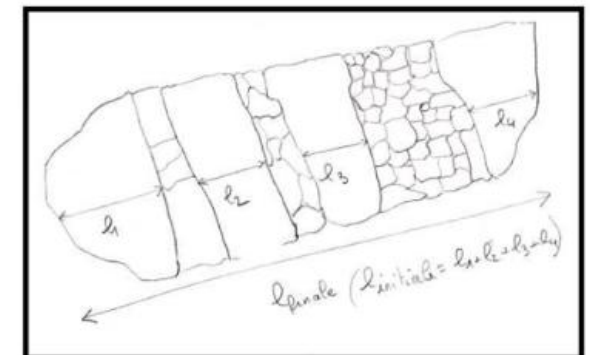
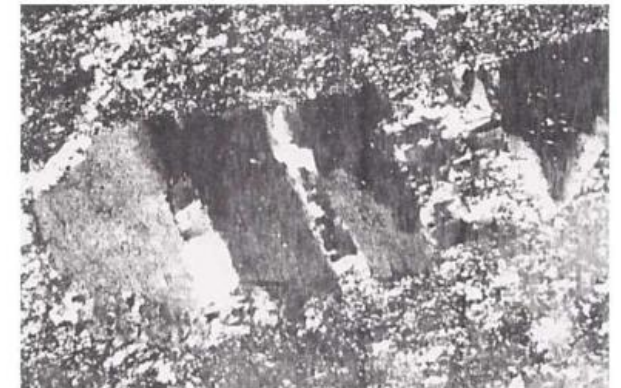


Figure 3 : estimation de la déformation linéaire

# CONTRAINTE SIGMA



- Comment passer de la déformation à la contrainte?

$F$  : force appliquée, en Newton

$S$  : la surface, en  $m^2$

$\sigma$  : contrainte en **Pascals**

Formule littérale  
très approximée,  
voir II.A. pour  
davantage de  
rigueur



Echantillon : ENS Lyon - Photographie : Pierre Thomas

Rostre de bélemnite tronqué

*En quoi l'étude des déformations sur le terrain permet-elle de déterminer les contraintes subies?*

*Comment l'expérimentation en laboratoire permet de comprendre les mécanismes de la déformation?*

*Quel est le comportement mécanique de la lithosphère?*

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/Images/lmg/63/63-belemnite-tronconnee.jpg>

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# I- MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS TYPES DE DEFORMATION



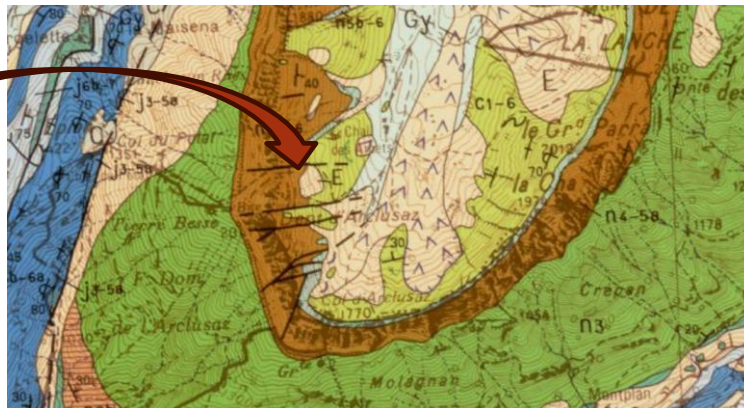
## A. DEFORMATIONS A L'ECHELLE REGIONALE

### I. Mise en évidence de deux grands types de déformations

#### I.1. Observation des déformations au sein des Alpes

- déformations au sein de la chaîne alpine sur la carte de France au millièmème.
  - grands chevauchements
  - plis (attention à l'échelle d'observation : à une plus petite échelle le pli présente des fractures)

#### Synclinal perché



Barre calcaire urgonienne (marron) typique des massifs subalpins du Vercors

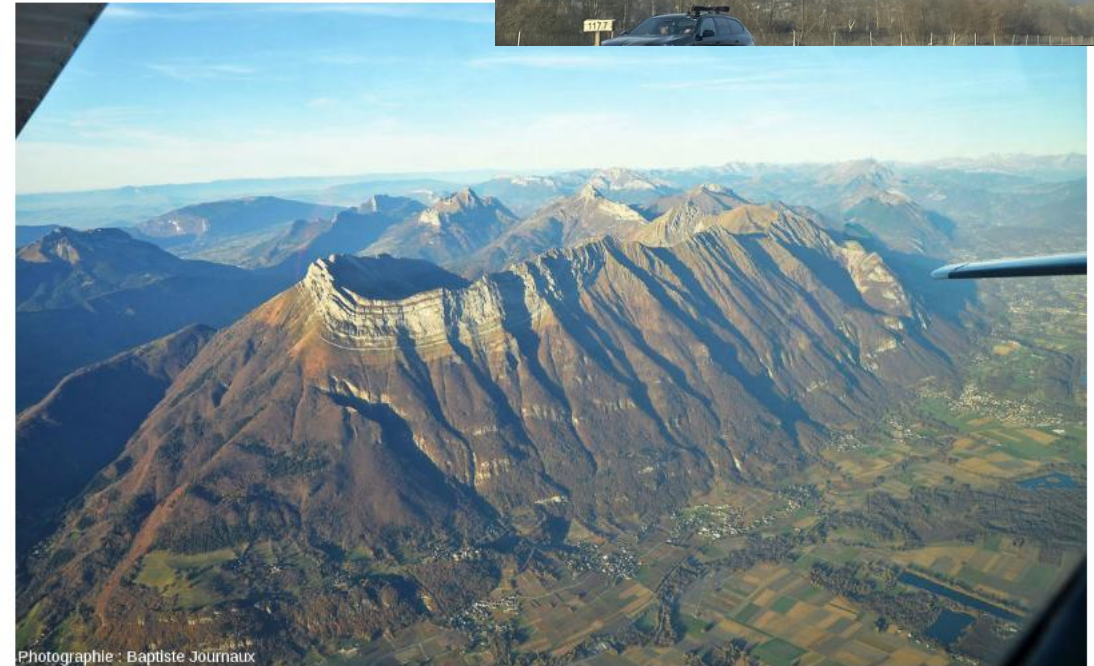
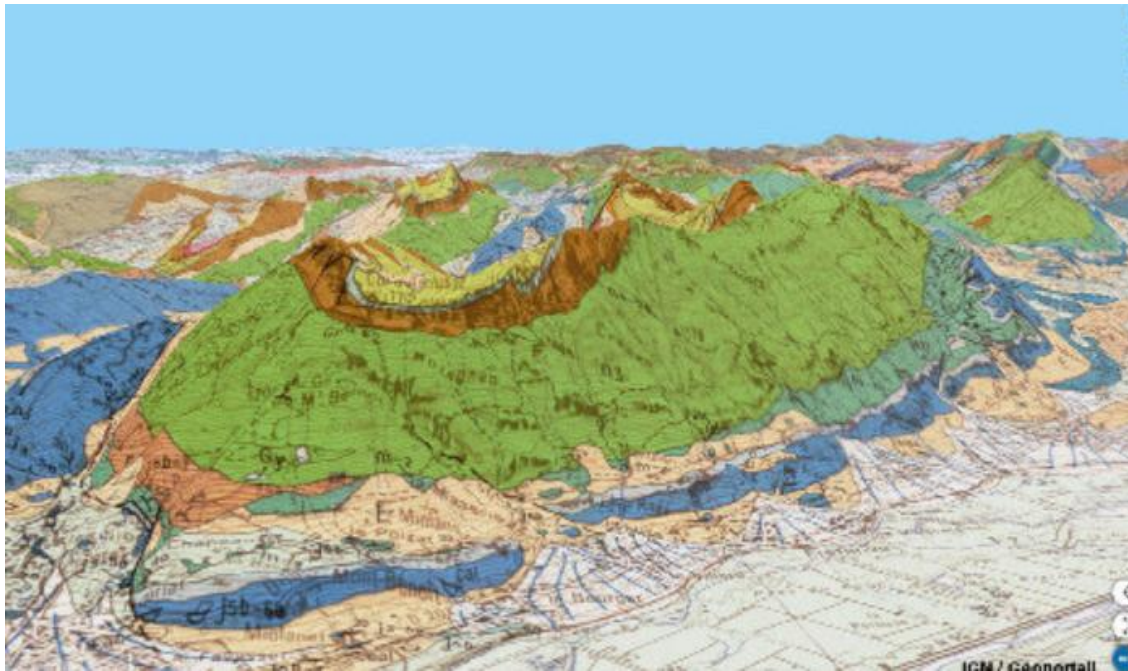
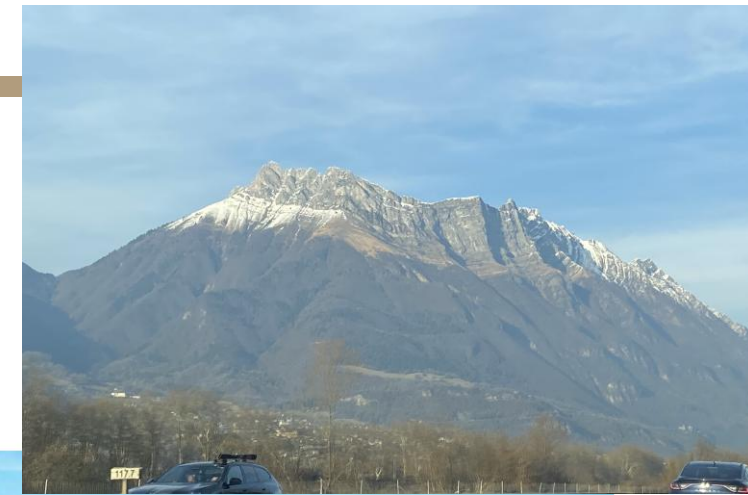


<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/lmg592-2018-01-22.xml>

## A. DÉFORMATIONS À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

### I. Mise en évidence de deux grands types de déformations

#### I.1. Observation des déformations au sein des Alpes

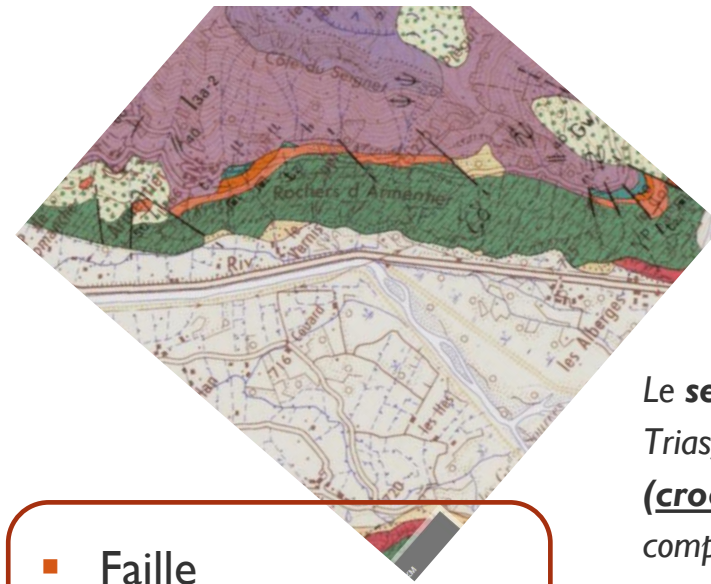
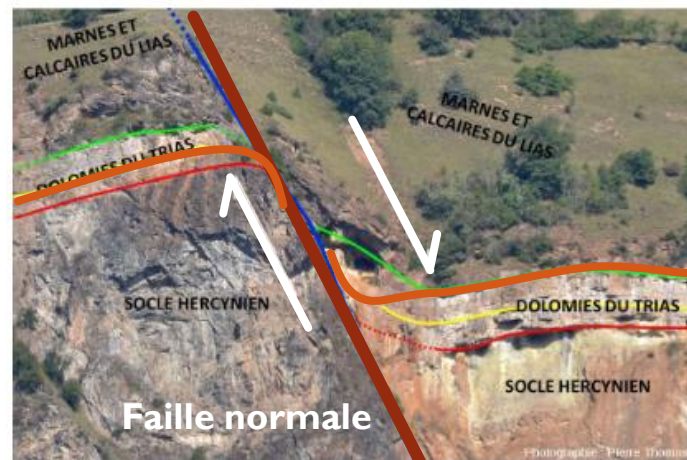


- Pli
- **Synclinal perché**
- **Relief inversé**

*Figure 4 : dent de l'Arclusaz, synclinal perché (Alpes externes), relief inversé (planet-terre.ens-lyon.fr/)*

# 1. Mise en évidence de deux grands types de déformations

## 1. Observation des déformations au sein des Alpes



**Faille normale** présentant un décalage d'une cinquantaine de mètre juste sous le hameau d'Armentier le Haut (La Garde, près de Bourg d'Oisans, Isère)

Le **sens du mouvement** peut s'apprécier par le décalage de la couche de Trias, et par **sa torsion au voisinage immédiat de la faille (crochons de failles)**. Tous les terrains situés sous le Trias du compartiment de droite (SO) sont recouverts d'oxydes de fer (couleur rouille ou jaune).

On peut noter des cavités dans ou à la base de ce Trias, dans le compartiment de droite : d'anciennes galeries de mines.

Figure 5 : Faille normale près de Bourg d'Oisans

- Faille
- Normale
- Toit qui descend

# I. Mise en évidence de deux grands types de déformations



## I.2. Bilan: déformation continue/discontinue

Deux types de déformation:

- **déformation localisée = discontinue** : 2 compartiments voisins lors de l'état initial se retrouvent séparés par une distance finie après la déformation. Il y a création de plans de **rupture** et déplacement suivant ceux-ci.
- **déformation distribuée = continue** : il n'y a **pas de formation de surface de discontinuité** (pour toute échelle). Le matériau a eu un comportement **ductile** au cours de sa déformation (il se déforme sans se rompre).

Elle peut être homogène ou hétérogène :

- une déformation **homogène** : les droites restent des droites, les parallèles des parallèles, seuls les angles changent (cube -> parallélépipède, sphère -> ellipsoïde)
- une déformation **non homogène ou inhomogène** pour laquelle certaines droites ne le restent pas après déformation.

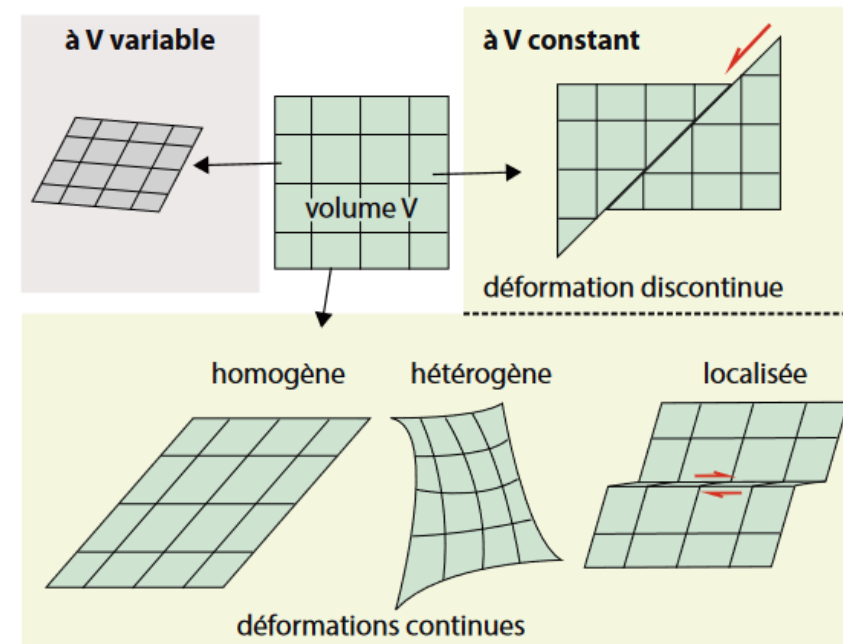


Figure 6 : déformation discontinue/continue (Renard et al. 2016)

Pli = déformation continue



Importance de l'échelle d'observation



failles = déformation discontinues affectant les bancs

# I- MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS TYPES DE DEFORMATION

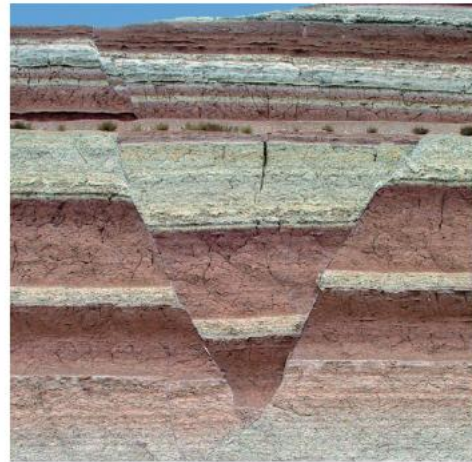
## A. DEFORMATIONS A L'ECHELLE REGIONALE

Faille (n.f.): correspond à la rupture des terrains avec déplacement relatif des blocs séparés

### 2. Structures localisées (discontinues) les failles

#### 2.1. Observations

- Faille marquée par une modification de la topographie
- Dans le cas où l'érosion a agi, la faille met en contact des terrains différents
  - ⇒ changement de végétation dans le paysage
  - ⇒ Sur certains affleurements, il est possible de voir une faille séparant des couches discontinues



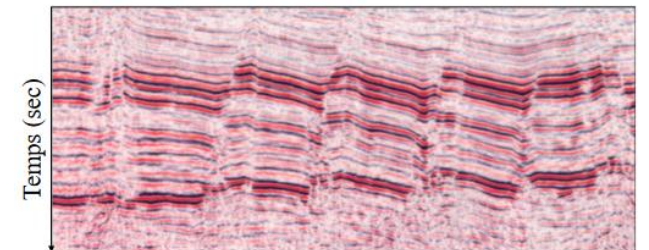
*Failles normales conjuguées dans des sédiments lacustres*



*Petite faille inverse dans des sédiments glaciaires de Patagonie*



*Failles normales parallèles*



*Failles normales sur un profil de sismique réflexion*

# I- MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS TYPES DE DEFORMATION

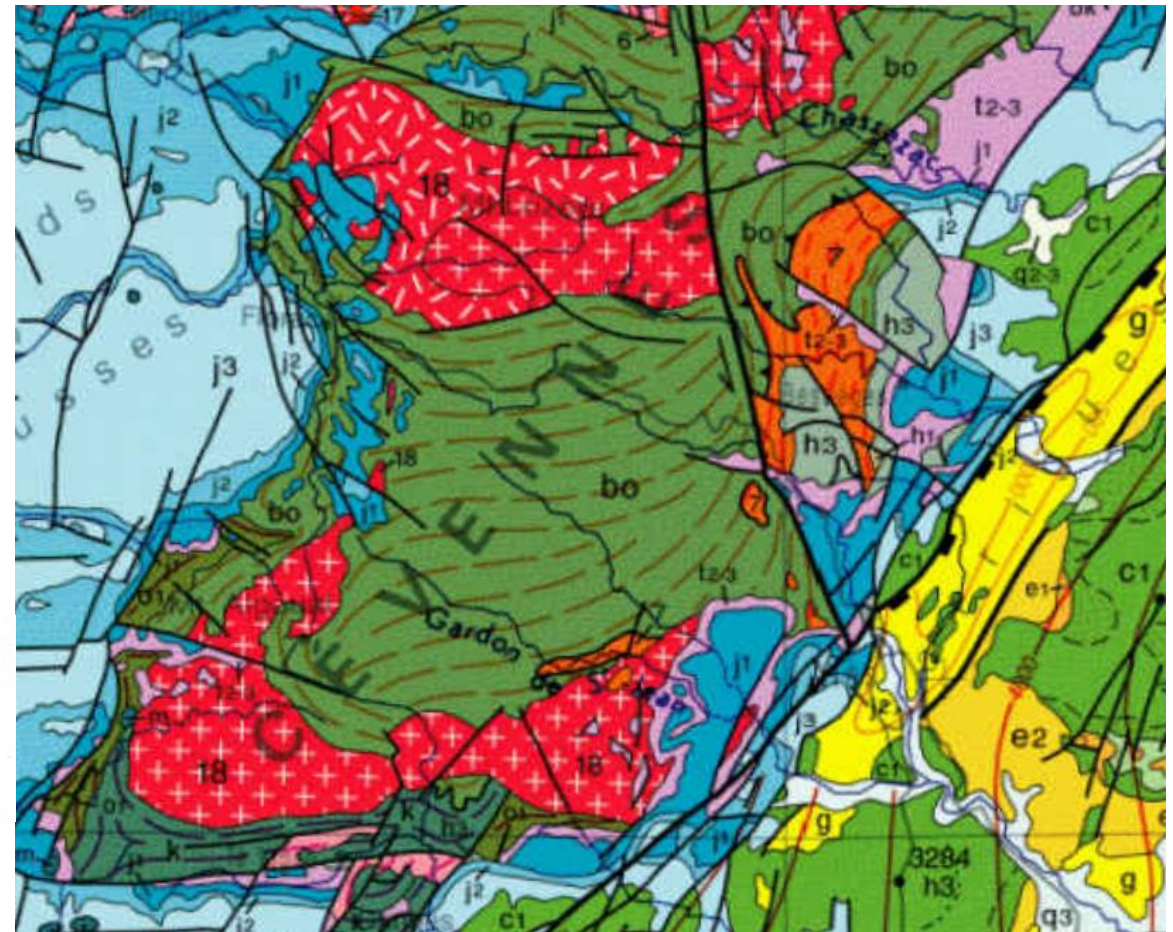
## A. DEFORMATIONS A L'ECHELLE REGIONALE

Faille (n.f.): correspond à la rupture des terrains avec déplacement relatif des blocs séparés

### 2. Structures localisées : les failles

#### 2.1. Observations

- Sur une carte géologique
  - un trait noir épais
  - des contacts anormaux (qui ne s'expliquent pas par la stratigraphie)



#### ÉLÉMENTS STRUCTURAUX

Faille normale, détachement  
 Accident décrochant

#### Accidents et failles

Faille inverse, chevauchement  
 Accident indifférencié

Accident majeur  
 Accident important  
 Accident mineur

en tiretés :  
accidents ou flexures  
masqués ou supposés

# I- MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS TYPES DE DEFORMATION

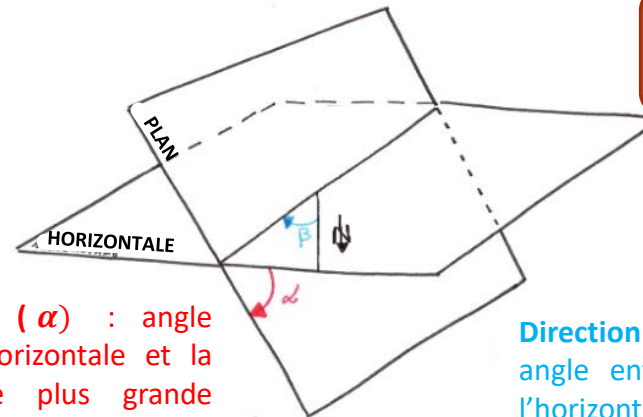
## A. DEFORMATIONS A L'ECHELLE REGIONALE



### 2. Structures localisées : les failles

#### 2.2. Nomenclature

- **Miroir** = plan de faille = plan qui sépare les 2 compartiments. Il est caractérisé par  $\Rightarrow$  TP carte de Condé / Noireau pour le vocabulaire pendage et azimut
- **Pendage** : angle entre l'horizontale et la ligne de plus grande pente de ce plan (ski en schuss)
- **Azimut** : angle entre le Nord et l'horizontale appartenant au plan de faille (skis à plat)
- **Toit / mur** : le toit correspond au bloc du dessus, le mur au bloc du dessous
- **Rejet** : matérialisé par un vecteur ayant pour extrémités 2 points confondus avant la déformation (décomposé en 2 composantes horizontales et une composante verticale).



**Pendage ( $\alpha$ )** : angle entre l'horizontale et la ligne de plus grande pente de ce plan

**Direction du plan ( $\beta$ )** : angle entre le Nord et l'horizontale contenue dans le plan

**PLAN:** Azimut  $30^\circ$  Pendage  $45^\circ$  Est  
Direction entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$     Pendage entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$     Direction de l'azimut

Faille (n.f.): correspond à la rupture des terrains avec déplacement relatif des blocs séparés

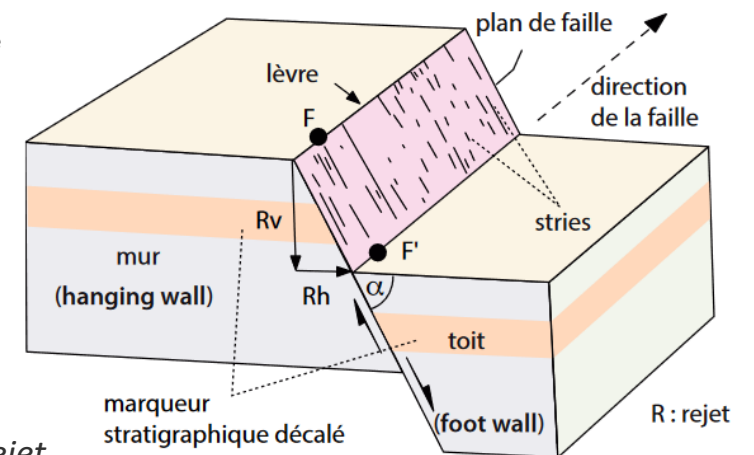
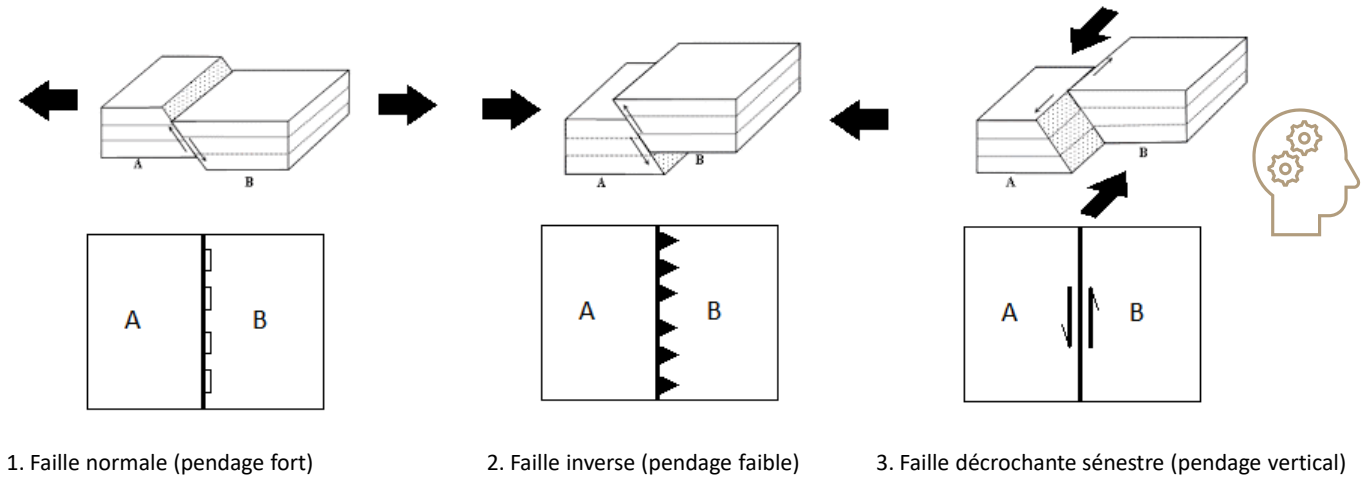


Figure 8 : vocabulaire associé aux failles Rv (rejet vertical) et Rh (rejet horizontal) (Renard et al. 2016)

## 2. Structures localisées : les failles

### 2.2. Nomenclature

- Si composante verticale négligeable
  - ⇒ décrochement senestre ou dextre
- Si composante horizontale négligeable
  - ⇒ deux types de failles :
    - faille **normale** = allongement (attention à décrire la déformation et non la contrainte) (marges passives, rifts...), pendage d'environ **60°**
    - faille **inverse** = raccourcissement (subduction, orogénèse...), pendage d'environ **30°**



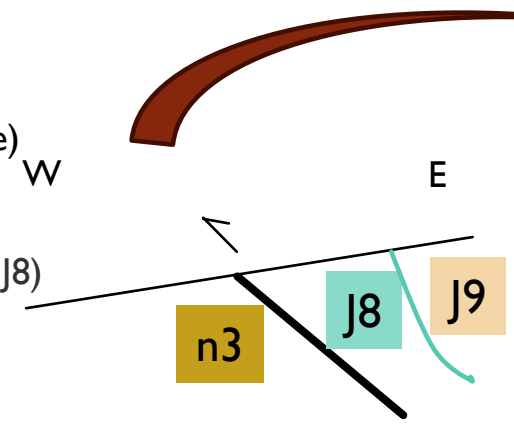
*allongement*

*raccourcissement*

*coulissage*

Figure 9 : 3 types de faille

- Détermination du pendage (méthode : du V dans la vallée)
  - ⇒ azimut 0°N, pendage vers le SE
- Détermination du jeu de la faille (n3 est plus récent que J8)
  - ⇒ faille inverse



## 2. Structures localisées : les failles

### 2.2. Nomenclature

- dans le contexte de **rift**, on observe plusieurs **failles normales** qui ont une direction privilégiée, il se forme un **graben** et **deux horsts** (ex : Clermont Ferrand, Alès, Fossé Rhéna).
- Par exemple, au niveau du **fossé Rhéna**, les failles sont normales, d'azimut Nord. Elles délimitent une plaine : **graben** encadré de deux reliefs (Vosges/Forêt Noire) = **horst** (épaule de rift). On parle de **failles conjuguées**.

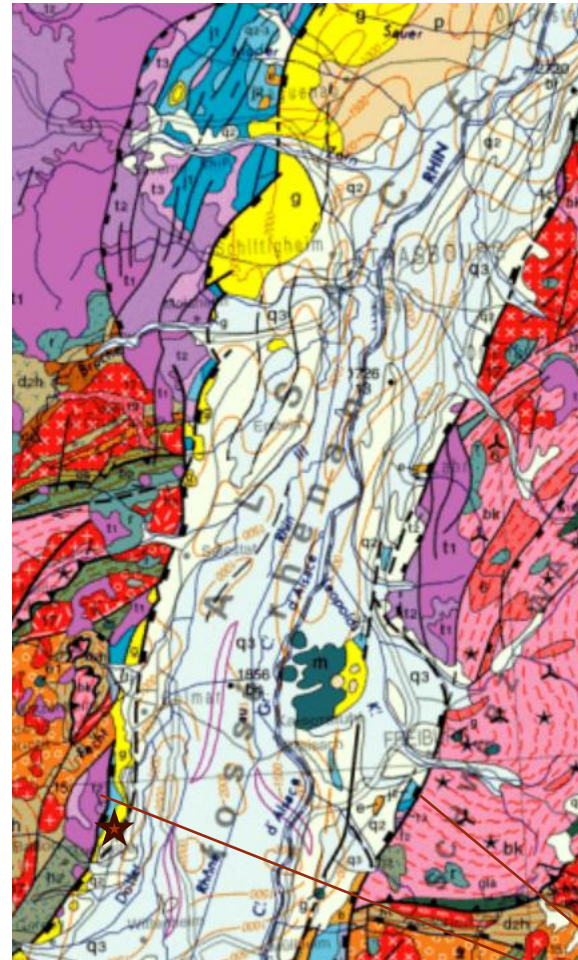
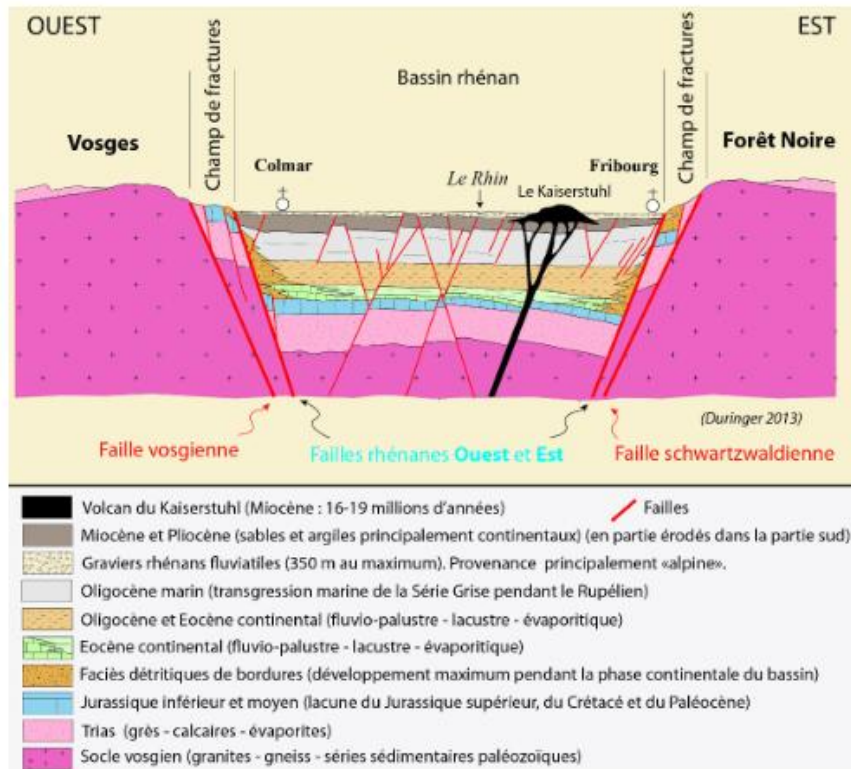


Figure 10 : le fossé rhéna (carte de France au 1/106, [planet-terre.ens-lyon.fr/](http://planet-terre.ens-lyon.fr/)) Faille normale affectant les dépôts de la carrière du Strangenberg. La faille décale vers le bas le compartiment de gauche, par rapport au compartiment de droite selon un plan de faille assez pentu.

**Failles normales conjuguées**

**Graben (n.m.):** fossé tectonique d'effondrement entre des failles normales. Voir aussi Rift.

**Horst (n.m.) :** compartiment soulevé entre des failles normales conjuguées.

## 2. Structures localisées : les failles

### 2.2. Nomenclature: failles décrochantes

- Contexte de décrochement: **failles transformantes** de la dorsale océanique
- Failles transformantes **sismiquement actives** dans la portion comprise entre les deux lèvres de dorsale
- En cas de cassure dans le décrochement possibilité de formation d'un **bassin en pull-apart**

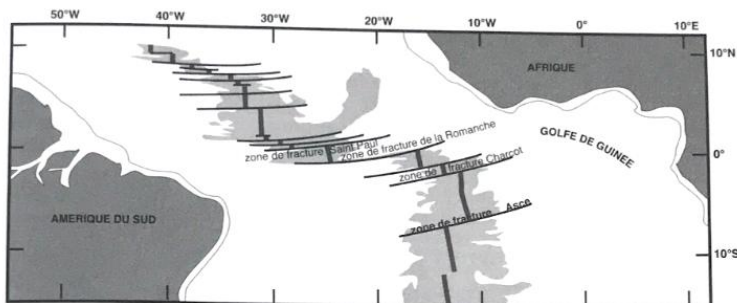


Fig. 11 : Carte des failles transformantes de l'Atlantique central (Morgan, 1967, Morgan, 1968).

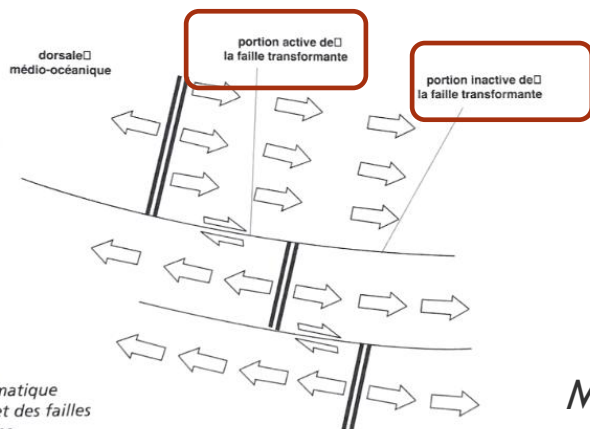
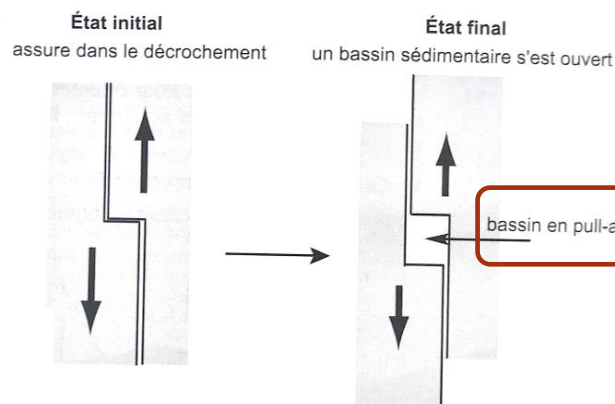


Fig. 12 : Cinématique des dorsales et des failles transformantes.



Mécanisme de formation d'un bassin en « pull-apart » (J'intègre 2008 Dunod)

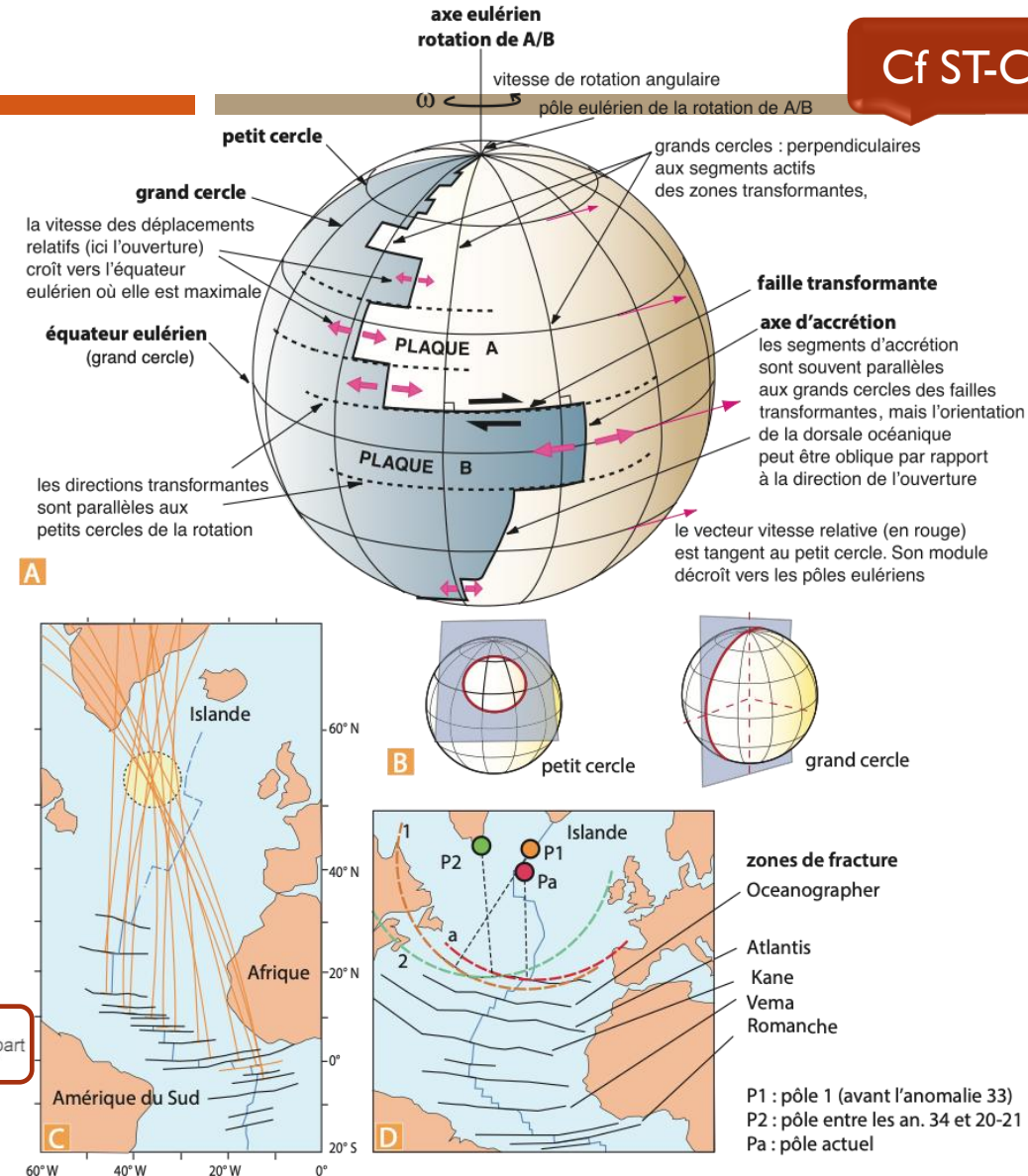


Figure 7.13 Les propriétés géométriques des frontières des plaques.

- A. Cas d'un globe contenant deux plaques (voir encart 7.10).
- B. Grand cercle et petit cercle : définitions géométriques
- C. Utilisation de l'orientation des zones de fracture pour déterminer le pôle de rotation entre deux plaques : exemple des plaques Afrique et Amérique du Sud.
- D. Utilisation de la segmentation des zones de fracture pour déterminer les variations de la position des pôles de rotation : exemple de l'Atlantique central (commentaire encart 7.11).

## 2. Structures localisées : les failles

### 2.3. Déformations associées aux failles

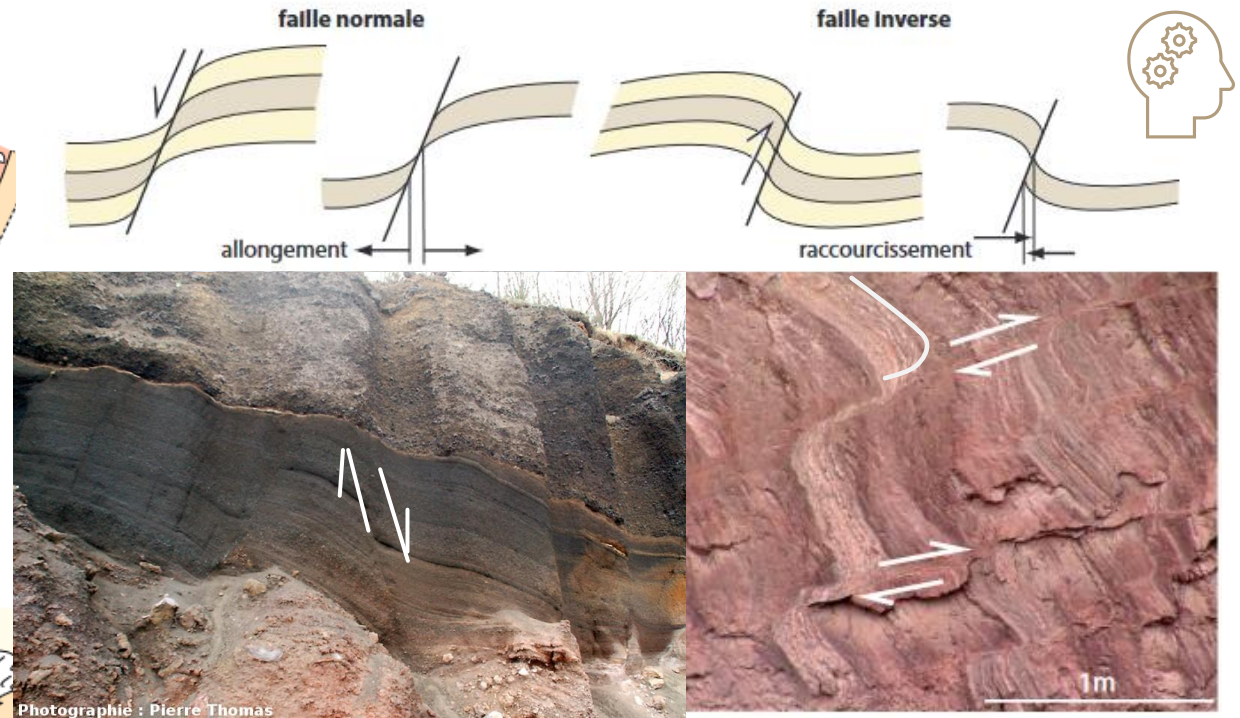
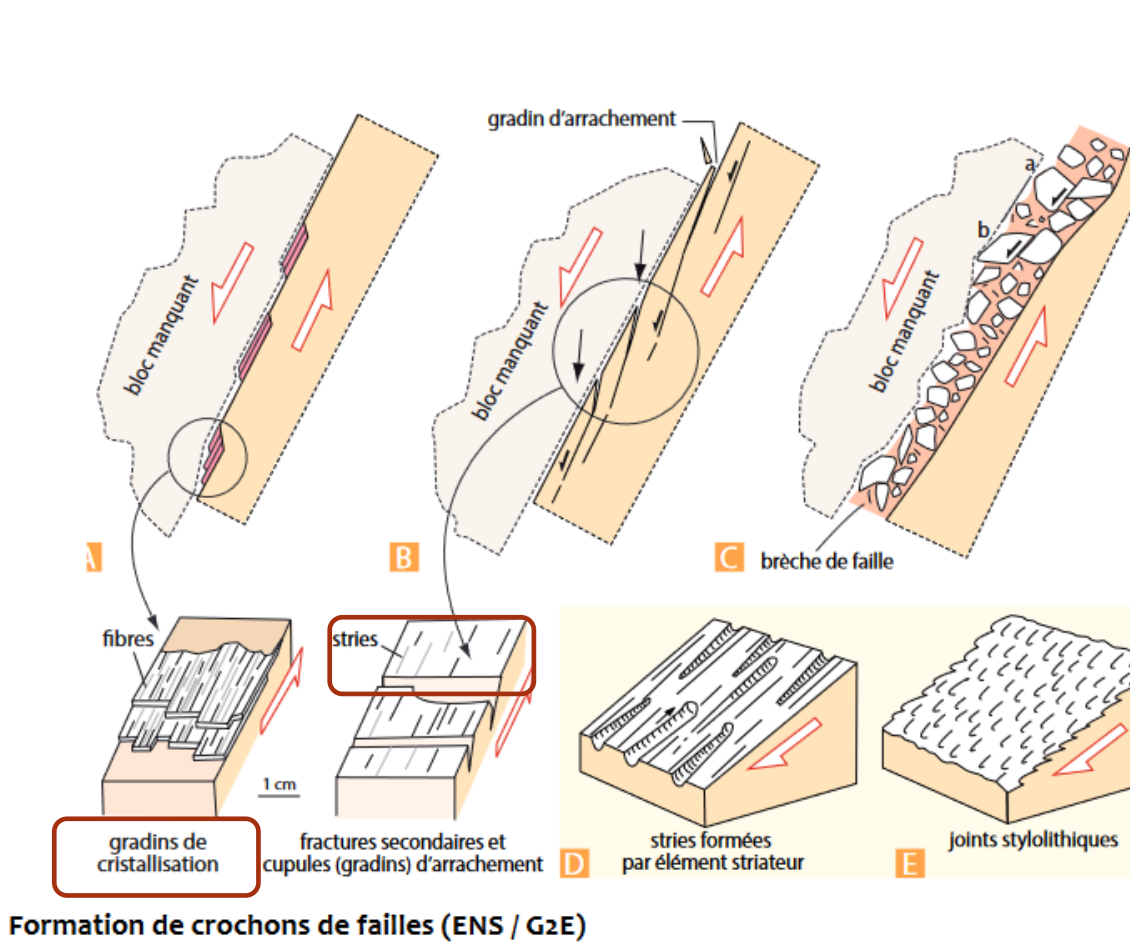
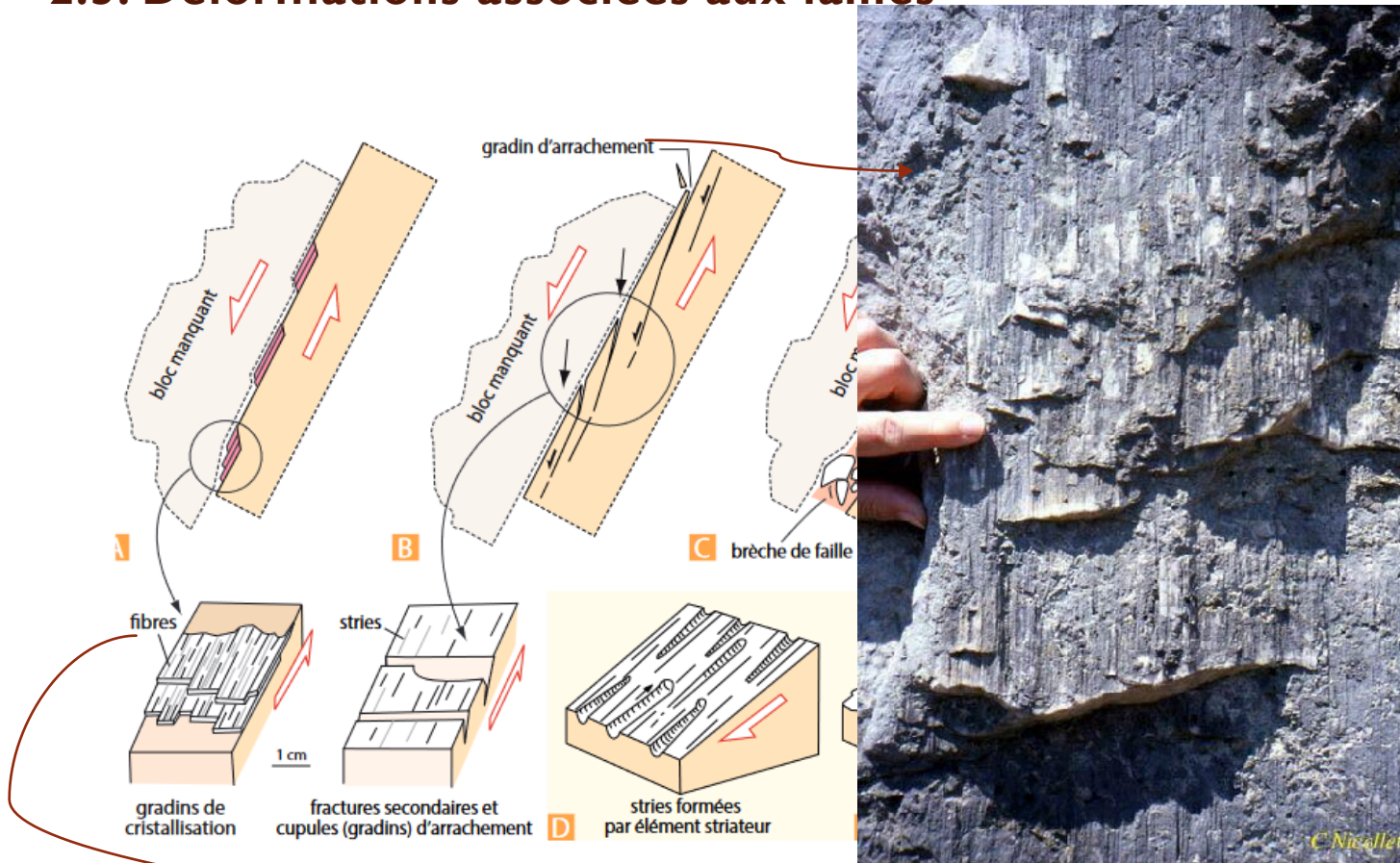


Figure 11 : déformations associées aux failles (ENS/G2E) (dans Renard et al. 2016) et planet-terre ens-lyon 2007 Pierre Thomas

## 2. Structures localisées : les failles

### 2.3. Déformations associées aux failles



Formation de crochons de failles (ENS / G2E)

Gradins d'arrachement



Gradins de cristallisation

# I. MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS TYPES DE DEFORMATION

## A. DEFORMATIONS A L'ECHELLE REGIONALE

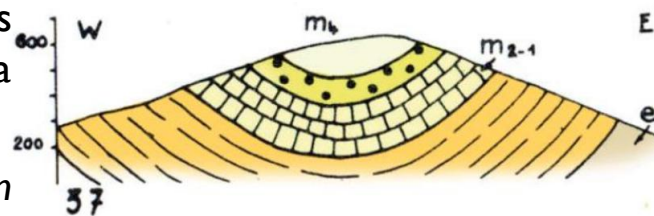
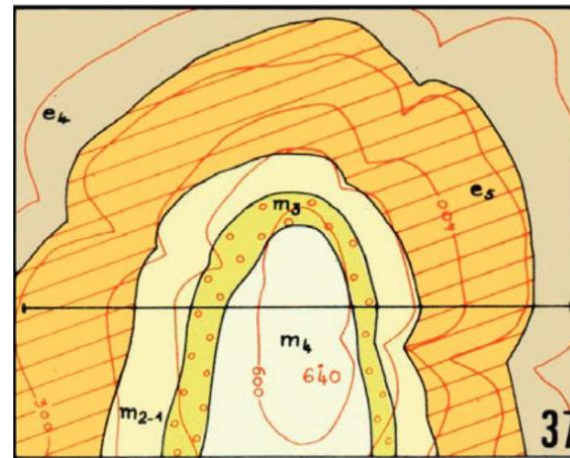
### 3. Les plis, déformation non homogène continue (+/- discontinue à une plus petite échelle)

#### 3.1. Observations

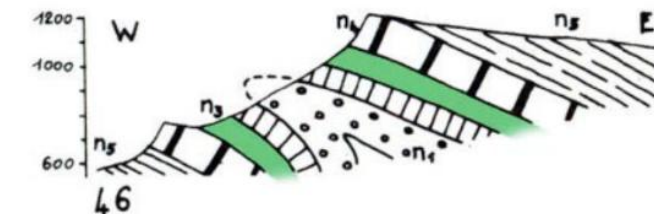
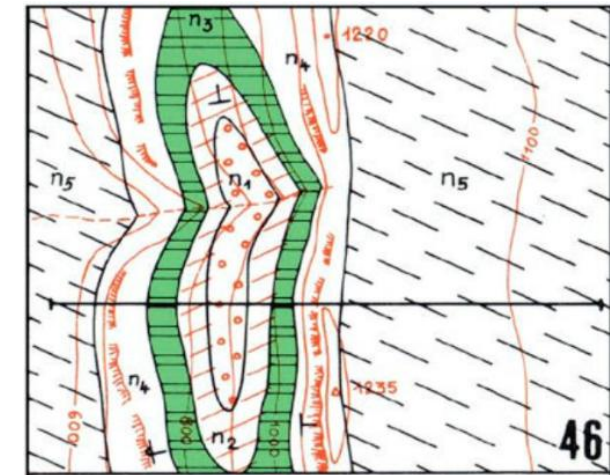


Le plissement intervient quand une surface initialement plane devient gauche sous l'effet des contraintes tectoniques

- Pli = déformation résultant du **flambage** (= flexion) de roches
  - ⇒ Ne peut être mis en évidence que s'il affecte un repère préexistant à la déformation (stratification, schistosité etc...)
- **Synclinal** : les éléments à l'intérieur de la courbure étaient à l'origine les plus hauts donc les + récents.
- **Anticlinal** : les éléments situés à l'intérieur de la courbure étaient les plus bas donc les + anciens.
- **Relief conforme** : un synclinal forme une dépression dans le paysage, l'anticlinal un relief. L'érosion peut conduire à la formation de *relief contraire* : synclinal perché.
  - ✦ **antiforme** : plis avec partie convexe vers le ciel (formation d'une « bosse »)
  - ✦ **synforme** : partie concave vers le ciel (formation d'un « creux »)



Pli synforme (cf V dans vallée)  
Synclinal si âge de  $m_4 < m_2$   
Relief inversé: synclinal perché



Pli antiforme couché (cf V dans vallée + indications de pendage)  
Anticlinal si âge de  $n_1 > n_3$  22

# I- MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS TYPES DE DEFORMATION

## A. DEFORMATIONS A L'ECHELLE REGIONALE

### 3. Les plis, déformation non homogène continue (+/- discontinue à une plus petite échelle)

#### 3.2. Analyse géométrique d'un pli

- **Charnière** : région correspondant aux points de courbure maximale
- **Flancs** : régions correspondant au plus grand rayon de courbure. Chaque flanc est défini par son **pendage** = angle entre l'horizontale et la ligne de plus grande pente (noté sur les cartes | - )
- **Surface axiale (plan axial)** : surface bissectrice du dièdre formé par les deux flancs. Elle correspond à la surface passant par les charnières consécutives
- **Axe du pli** : on le définit à partir de la surface axiale : il correspond à l'intersection entre la surface axiale et chacune des couches plissées.
- **Terminaison périclinale** : c'est la région où se termine le pli dans la direction de son axe (a, b, c, d ci-dessous).

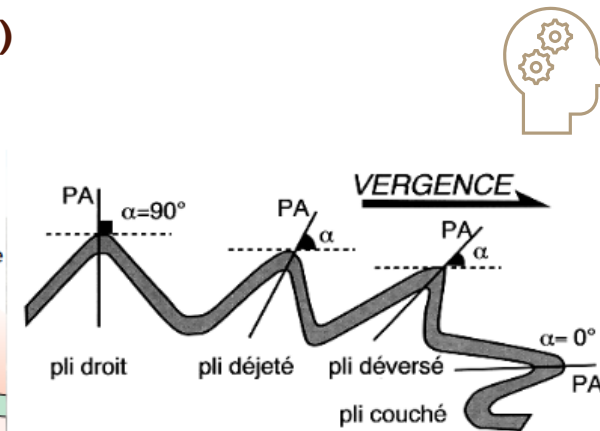
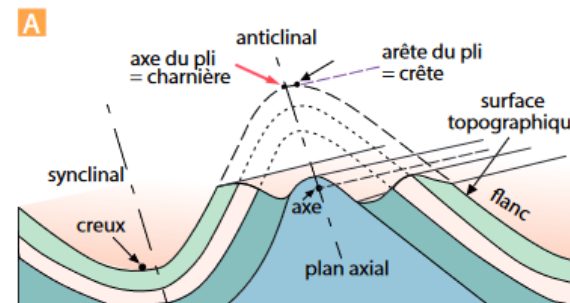
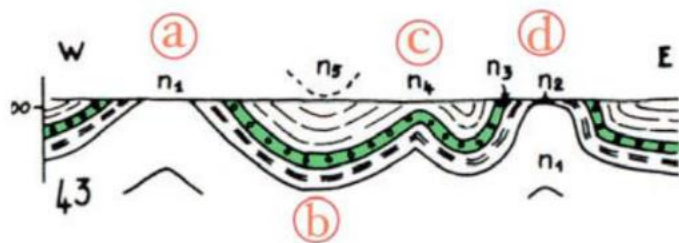
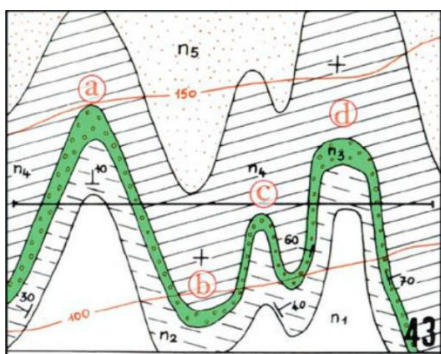
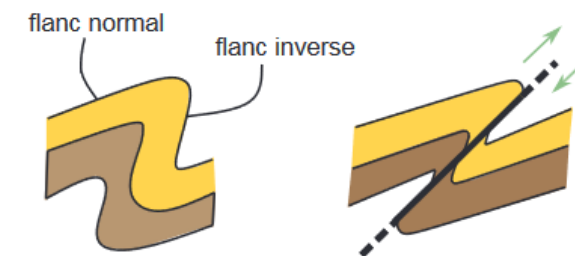
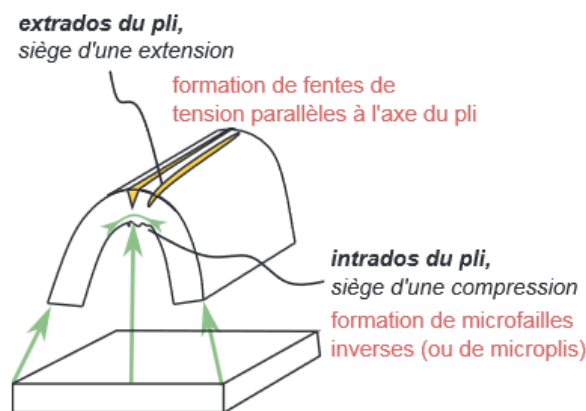


Figure 15 : association de plis et de failles (in Dunod et al 2021, in Renard et al. 2016)



**Formation d'un pli faille** : Il y a étirement progressif et amincissement du flanc inverse jusqu'à fracture. L'anticlinal chevauche alors directement le synclinal sous-jacent.

Figure 15 : association de plis et de failles (Dunod et al. 2021, Renard et al. 2016)

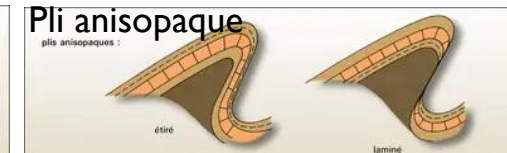
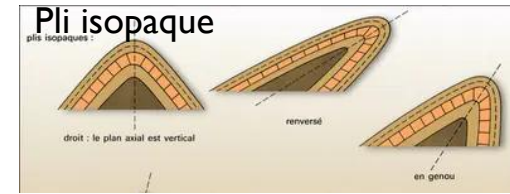
# I- MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS TYPES DE DEFORMATION

## A. DEFORMATIONS A L'ECHELLE REGIONALE

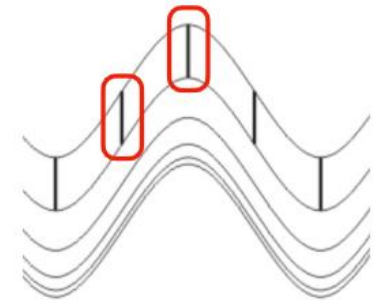
### 3. Les plis, déformation non homogène continue (+/- discontinue à une plus petite échelle)

#### 3.2. Analyse géométrique d'un pli

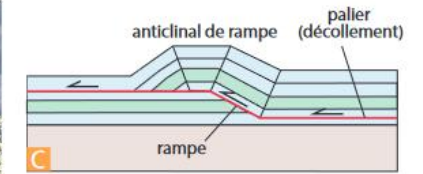
- **pli et épaisseur des couches** : la distance entre deux surfaces, mesurée parallèlement au plan axial, demeure constante en tout point.
  - **Pli isopaque**: épaisseur des couches reste constante dans la charnière et les flancs; il résulte d'une flexion
  - **Pli anisopaque**: épaisseur des couches et des flancs varie. Il résulte d'une flexion et d'un aplatissement
- Pli rampe: parfait pour le skate! Pli associé à une faille inverse
- Petite échelle:
  - **Extrados** (face convexe): face étirée ⇒ possibles fentes = déformation discontinue
  - **Intrados** (face concave): face compressée ⇒ failles inverses = déformation discontinue



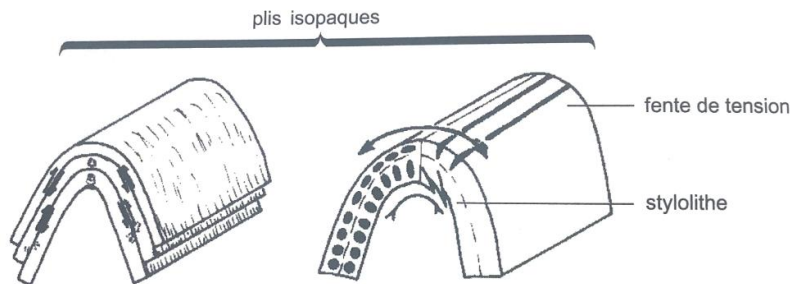
**Plis semblable** : l'épaisseur réelle des couches est variable le long des flancs du pli, tout en étant maximale aux charnières et minimale aux flancs (ci-contre). Par contre pour les plis semblables, l'épaisseur des couches mesurée parallèlement à la surface axiale du pli est constante.



A grande échelle, formation d'un pli rampe

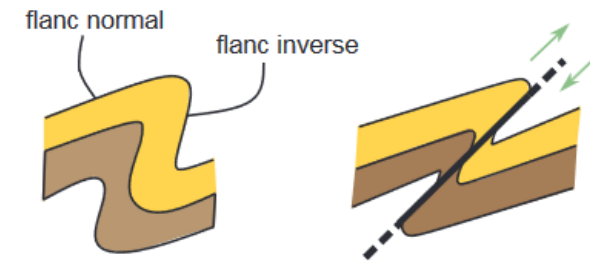
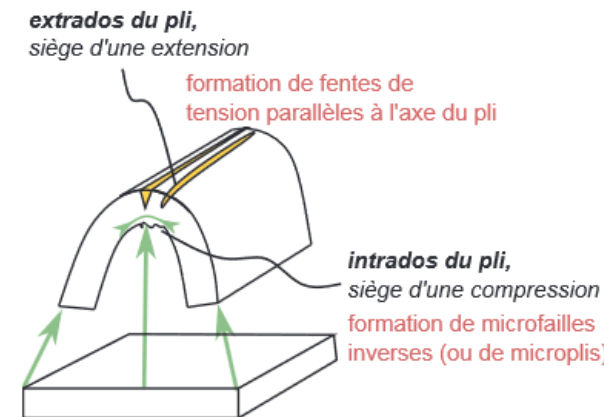


pli rampe



a) pli à déformation de flanc b) pli à déformation de charnière

Mode de formation des plis isopaques (J'intègre 2008, Dunod)



**Formation d'un pli faille** : Il y a étirement progressif et amincissement du flanc inverse jusqu'à fracturation. L'anticlinal chevauche alors directement le synclinal sous-jacent.

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

### I. Déformation localisée (=cassante = discontinue)

#### I.1. Diaclases : pas de déplacement

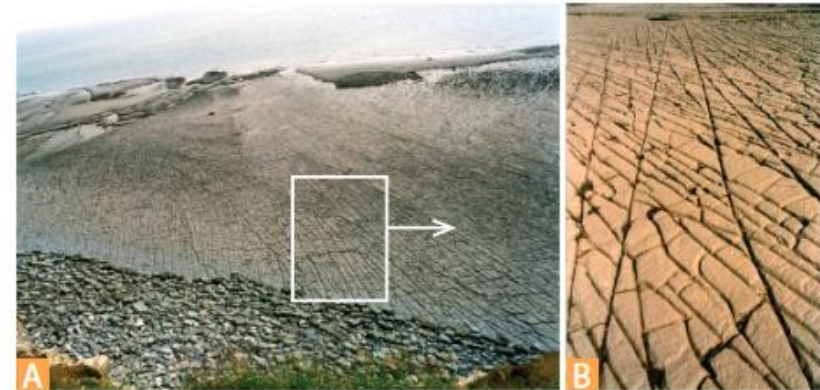


- **diaclases** = fractures sèches
  - ⇒ pas de déplacement ni de remplissage.
  - roches comme le calcaire, le granite
  - Leur évolution conduit au débit de la roche en prismes grossiers.



*Diaclase dans un granite près de Murol (S. Dalaine)*

A et B. champ de diaclases dans les sédiments paléozoïques du Pays de Galles.



*Figure 16 : diaclases, (Renard et al. 2016)*



*Œuf géant de dinosaure ou diaclase (S. Dalaine)*

## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

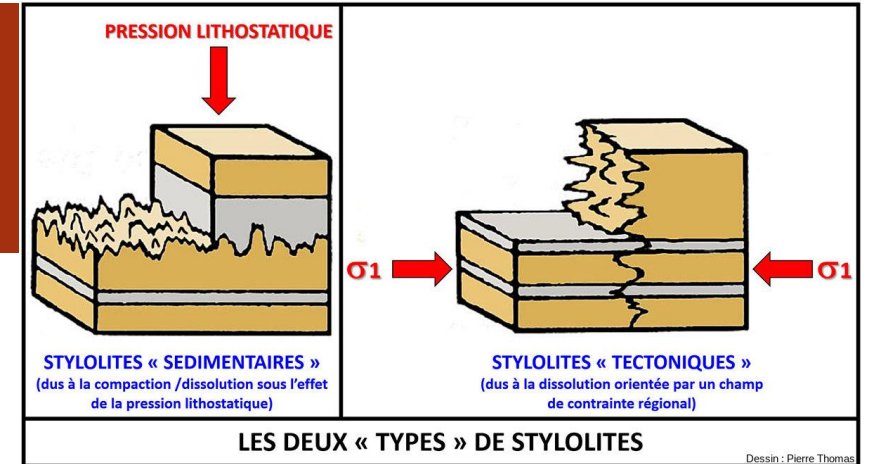
### I. Déformation localisée (=cassante = discontinue)

#### I.2. Joints stylolithiques



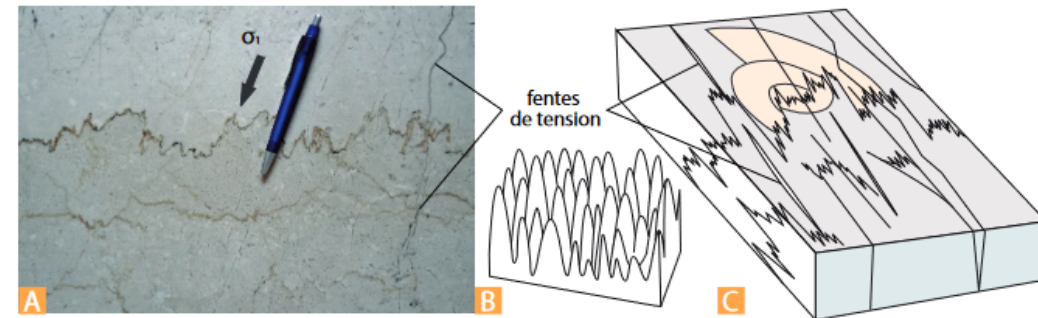
- **Stylolithe**: surface de discontinuités irrégulières (appelées les joints stylolithiques) formées par la juxtaposition de **pics** et de piliers. Tout cela résulte d'une **dissolution localisée** par des irrégularités minimales initiales dans la roche, dissolution induite par des **contraintes**

- soit pendant l'**enfouissement** (pression lithostatique),
- soit par des compressions d'origine tectonique
- **surfaces** très irrégulières hérissées de pics appelés **stylolithes**.
- ✓ dans les **calcaires** où ils se forment par dissolution (pression dissolution puis recristallisation ailleurs dans des fentes par exemple).
- ✓ Ils sont soulignés par une concentration des impuretés du carbonate.
- ✓ Ils sont souvent **perpendiculaires aux fractures d'extension**



<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/lmg735-2022-01-24.xml>

#### Joints stylolithiques



- A.** Un exemple de joint stylolithique dans des marbres bioclastiques. Notez la différence de teinte entre les deux blocs qui montre que le joint est une limite séparant des ensembles initialement éloignés. la matière organique se concentre sur le joint stylolithique en raison de la dissolution de la matière avoisinante. Photo : Y. lagabrielle.
- B.** schéma montrant la disposition des pics stylolithiques sur un joint.
- C.** schéma montrant la dissolution d'un fossile et la géométrie des fentes de tension par rapport aux joints stylolithiques.

Figure 16 : joints stylolithiques (Renard et al. 2016)

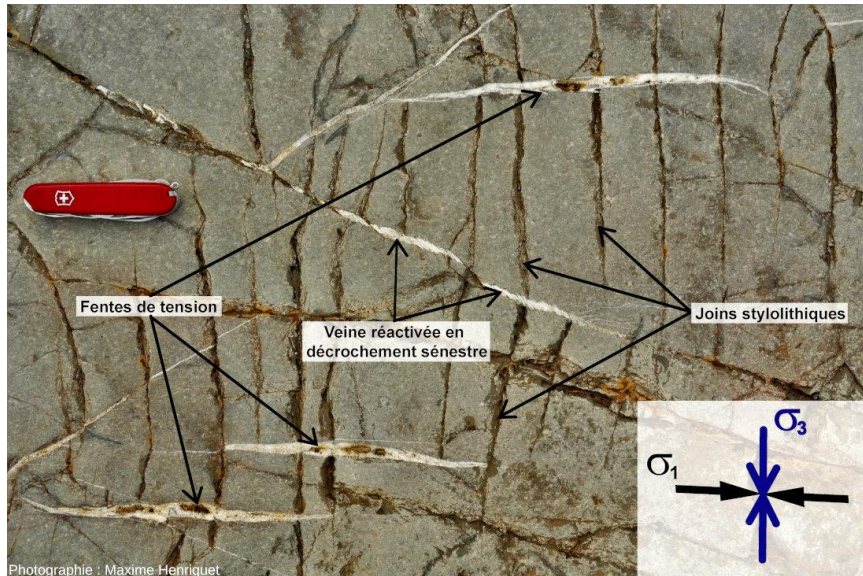
## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

### I. Déformation localisée (=cassante = discontinue)

#### I.3. Fentes de tension



- **Fente de tension:** fissures ouvertes où **recristallisent** les produits de la **dissolution** souvent associée à la formation des stylolithes dans les milieux carbonatés
  - remplissage par précipitations d'ions ( $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ )
  - Souvent système **d'échelon**

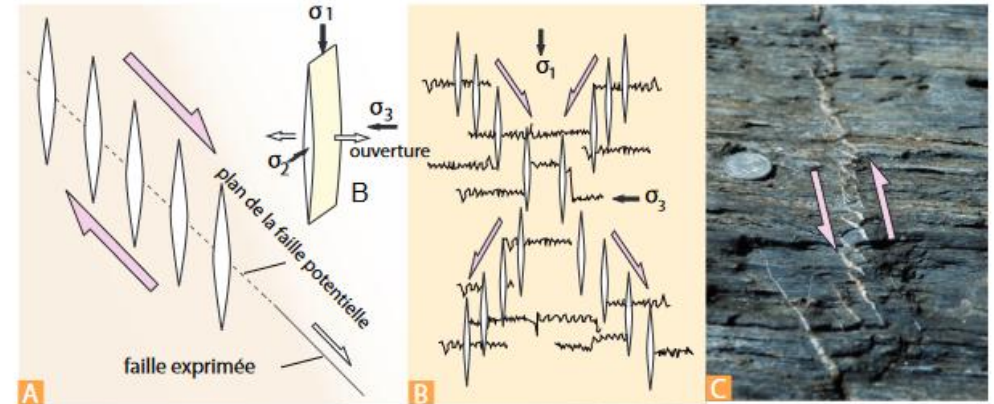


Source - © 2016 Maxime Henriquet

Figure 22. Veine de calcite cisillée, joints stylolithiques et fentes de tension, vue interprétée

BCPSTI - ENCPB - STÉPHANIE DALAINE

#### Fractures d'extension et filon



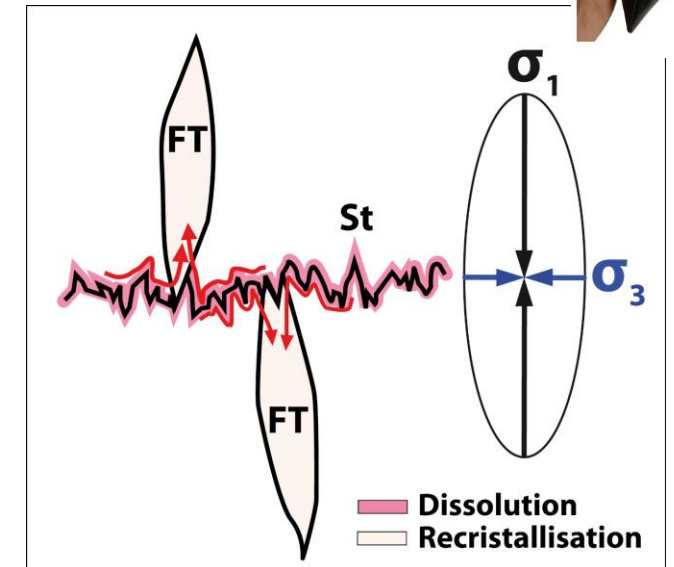
- A. Répartition en échelon le long d'une faille potentielle.
- B. Détail montrant la géométrie de l'ouverture par rapport aux contraintes principales.
- C. Exemple dans les schistes bleus du nord de la Nouvelle-Calédonie.

Figure 16 : fractures d'extension, filon (Renard et al. 2016)

#### Représentation schématique du processus de pression-dissolution associé aux joints stylolithiques



FT : Fente de tension, St : Stylolithes.  
 La zone rouge le long du **joint stylolithique** se dissout sous l'effet de la **pression**. Cette **dissolution** est anisotrope et s'oriente suivant l'axe de la contrainte maximale ( $\sigma_1$ ), créant des **pics stylolithiques** colinéaires à  $\sigma_1$ . Les produits dissouts migrent (flèches rouges) le long du joint et dans les fractures, puis **recristallisent dans les fentes de tension**. L'ellipse des contraintes sur la droite montre les orientations de  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  déduites à partir de ce type de microstructures.



## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

### I. Déformation localisée (=cassante = discontinue)

#### I.3. Fente de tension

##### ■ Fracture d'extension:

- remplissage par précipitations d'ions ( $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ )
- Souvent système d'échelon



Vue rapprochée de **filons de calcite** dans le marbre urgonien près de Sournia, Pyrénées-Orientales

Localement, les **cristaux croissant depuis les deux bords** ne se sont pas rejoints, laissant au centre du filon une cavité où l'on voit bien la forme pyramidale des pointes de chaque cristal de calcite. Ces cavités sont appelées **géodes**, ou druses.



Photographe : William Sassi

Couche de calcaire tronçonnée par des fentes de tension remplies de calcite au sein de marnes schistosées quasiment dépourvues de fentes de calcites, bord de la D954, Savines-le-Lac (Hautes-Alpes) (Source - © 2007 William Sassi)

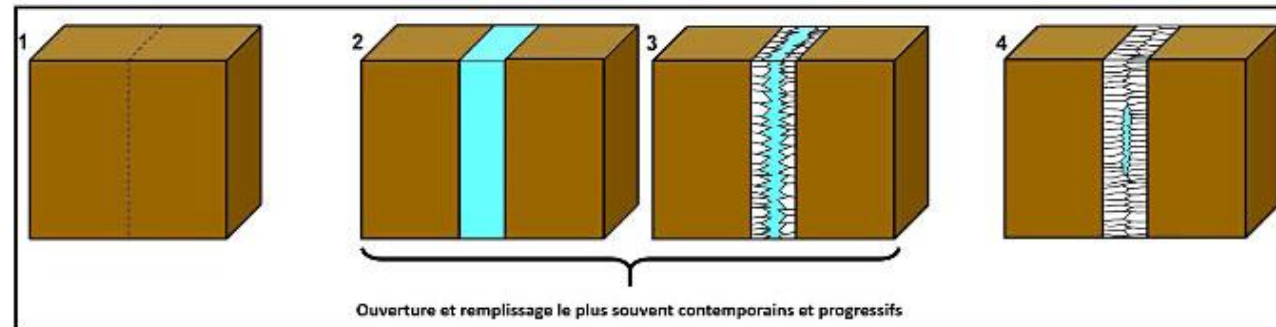
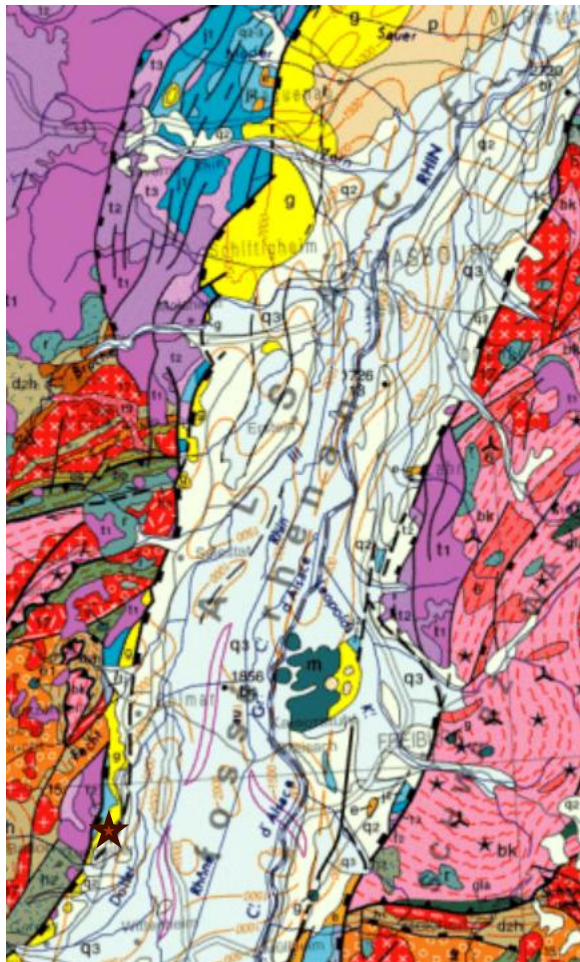


Schéma expliquant sommairement la genèse des filons de calcite (Source - © 2020 Pierre Thomas)

## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

### I. Déformation localisée (=cassante= discontinue)

#### I.4. Faille



**Faille normale** à l'affleurement dans une alternance de banc calcaire (gris) et dolomie (blanc) au site de Barrachin (S. Dalaine)



*Failles à décalage centimétrique affectant un gabbro folié, ophiolite hercynienne de Chamrousse (Isère)*  
Source - © 2005 Florence Kalfoun

## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

### I. Déformation localisée (=cassante = discontinue)

#### I.5. Bilan

- Déformations localisées = cassantes = discontinues:
  - Stylolithes (joints stylolithiques)
  - Fentes de tension
  - Faille
- Déformations distribuées = ductiles
  - Étirement de galets

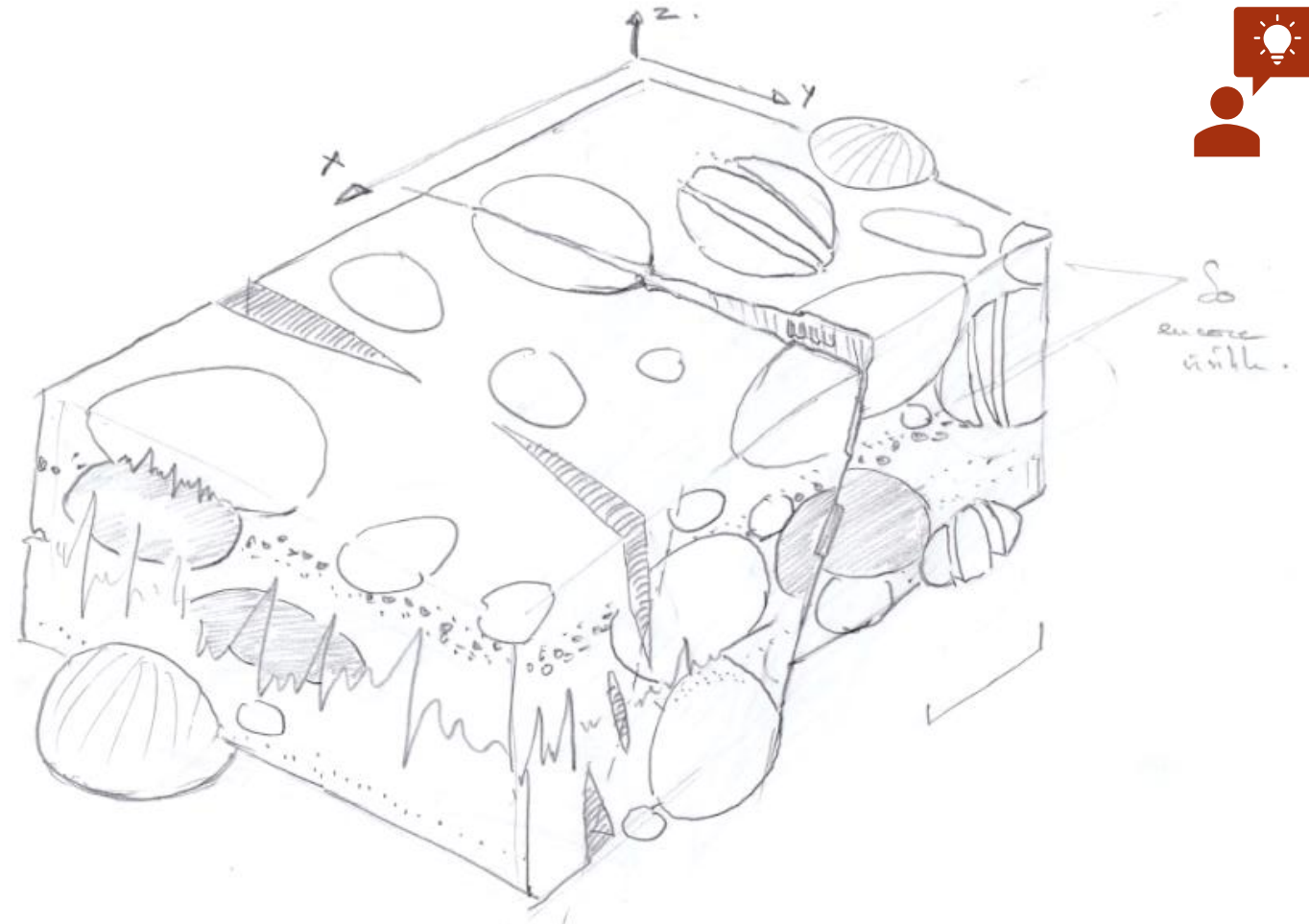


Figure 17 : bilan sur les déformations (Loïc Labrousse)

## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

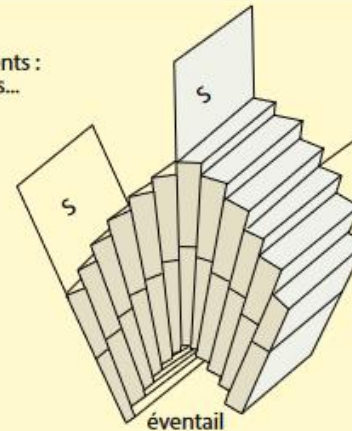
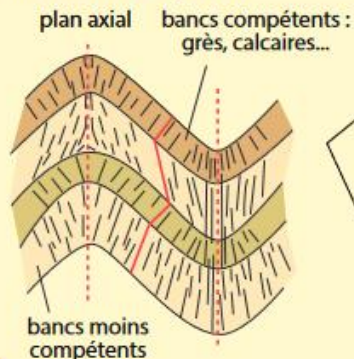
### 2. Déformation distribuée (=ductile= continue)

#### 2.1. Structures planaires

**Schistosité ( $S$  ou  $S_1$ )** : elle correspond à un débit mécanique de la roche en plans. Elle correspond au **plan d'aplatissement** de la matière au cours de la déformation = plan de raccourcissement. Elle est très fréquente dans les roches métamorphiques.

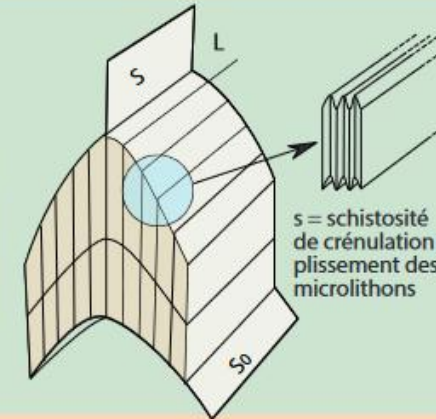
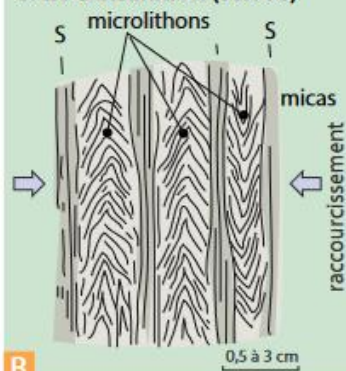
- **schistosité de fracture ou schistosité espacée** (spaced cleavage): plans espacés de quelques centimètres
  - plans parallèles aux axes des plis ou en éventail.
- **schistosité de crénulation** : espacement millimétrique
  - roches microplissées
- **schistosité de flux** : encore plus serrée, espacement inframillimétrique
  - schistosité du débit des ardoises (on parle de schistosité ardoisière).
  - liée au développement des feuillettes des micas métamorphiques.

#### s. de fracture (espacée)



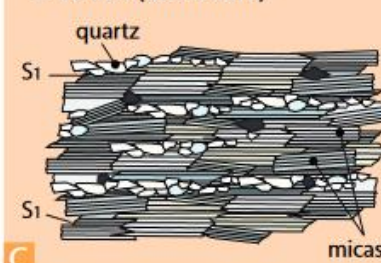
A

#### s. de crénulation (serrée)



B

#### s. de flux (ardoisière)



C

Figure 18 : déformation pénétrative : schistosité et foliation (in Renard et al., 2016)

## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

### 2. Déformation distribuée (=ductile=continue)

#### 2.1. Structures planaires



**foliation**: alternance de lits de minéralogie différente, plus ou moins parallèles

#### ■ Gneiss

- **Orthogneiss** si le **protolithe** est un granite
- **Paragneiss** si le protolithe est un grès
- Alternance de lits clairs et sombres (quartz + fd : micas noirs)

■ À l'échelle microscopique: **schistosité de flux** dans les ardoises correspond à une orientation des micas (phyllosilicates plans), => limite subtile entre schistosité et foliation

■ schistosité et foliation = **déformations pénétratives**

=> semblables à toutes les échelles de la roche = déformation de l'affleurement à la lame microscopique

Car **déformations purement continues** qui reposent sur des modifications à l'échelle des minéraux.

Foliation dans un gneiss (eduterre.ens-lyon)

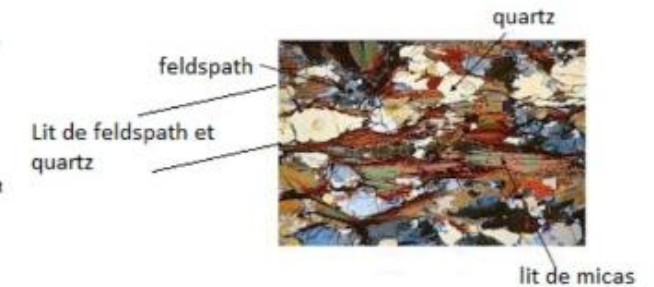


Vue macroscopique d'un gneiss

foliation minérale  
(= lits minéraux)  
alternativement  
blanche et  
sombre

Lit clair de quartz et  
feldspaths

Lit sombre de micas



Gneiss et foliations



Orthogneiss (gneiss oeilé du Rabuons,  
Mercantour S. Dalaine )



paragneiss  
Wikipédia

(source

## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

### 2. Déformation distribuée (=ductile=continue)

#### 2.2. Structures linéaires



**Structure linéaire:** toute trace linéaire inscrite sur un plan de schistosité ou de foliation.

#### ■ Linéations dans le plan d'aplatissement :

- linéation **d'étirement = allongement** : exemple d'un fossile étiré
- linéation **minérale** : on observe une orientation préférentielle des minéraux selon une direction dans le plan d'aplatissement



Linéation d'étirement  
(Bédarieux, S. Dalaine)

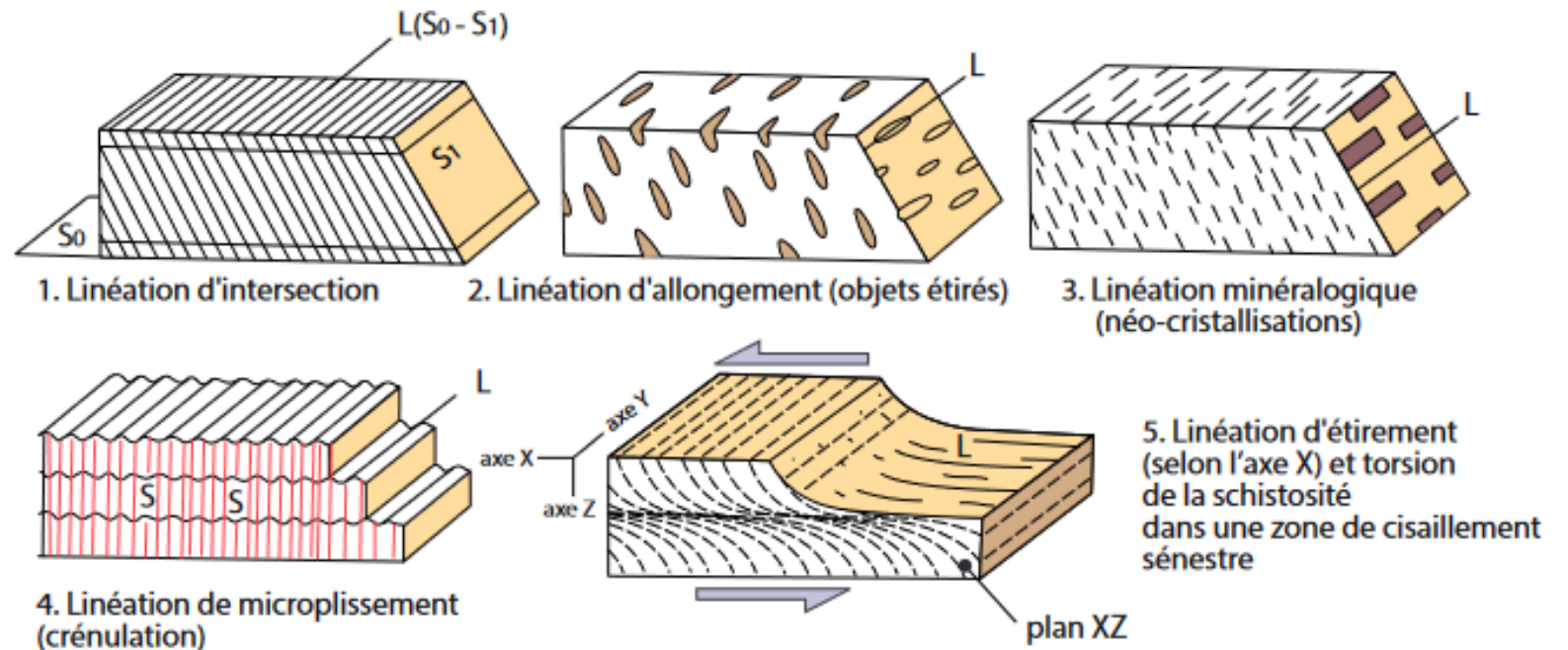


Figure 19 : les linéations (Renard et al. 2016)

## B. DEFORMATIONS A L'ECHELLE DE LA ROCHE

### 3. Bilan : le type de déformation dépend de l'échelle considérée

- Exemple d'un pli : déformation distribuée à l'échelle régionale, mais localisée à l'échelle locale (fentes de tension par exemple)
- Seules les **déformations pénétratives** sont semblables à toutes les échelles.



Exemple de déformations pénétratives (étirement) dans un orthogneiss (Bedarieux S. Dalaine)



Exemple de déformation continue à l'échelle de l'affleurement mais discontinue (fracture d'extension) à l'échelle localisée (S. Dalaine)

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

## I. Représentation de la déformation finie par l'ellipsoïde des déformations

### I.1. Ellipsoïde des déformations : X,Y,Z



- On considère une sphère = état initial.
- Après une déformation, cette sphère est transformée en un **ellipsoïde** = état final = **déformation finie**.
  - ⇒ **ellipsoïde de la déformation finie ou totale.**
- Les axes sont notés X,Y et Z avec :
  - **X : axe de l'élongation principale**
  - **Z : axe du raccourcissement principal**
  - Y : le 3ème axe.
  - $X \geq Y \geq Z$

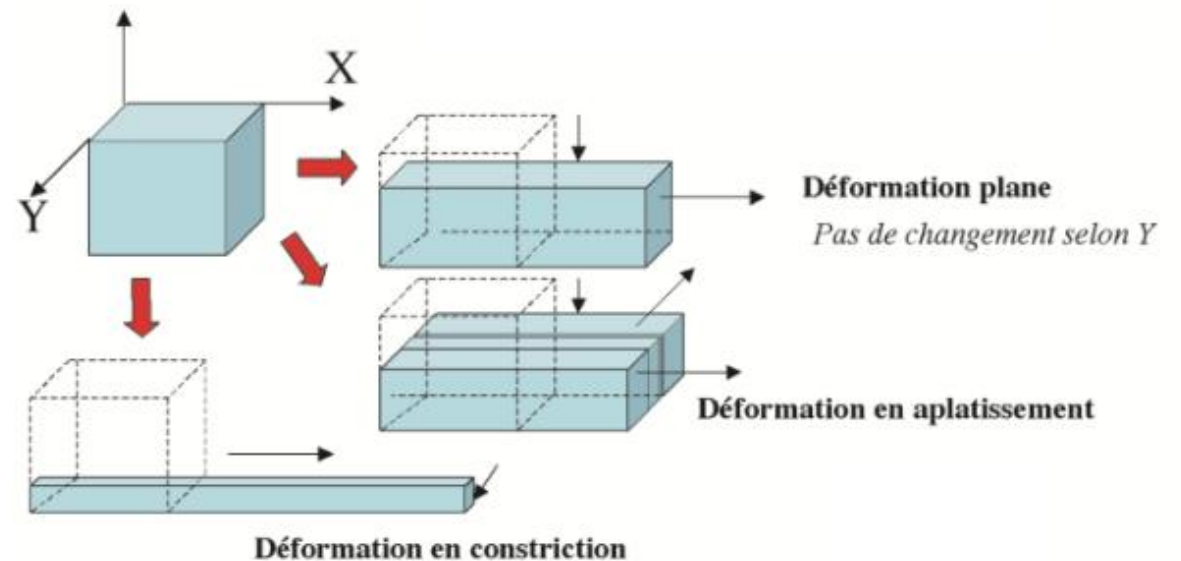
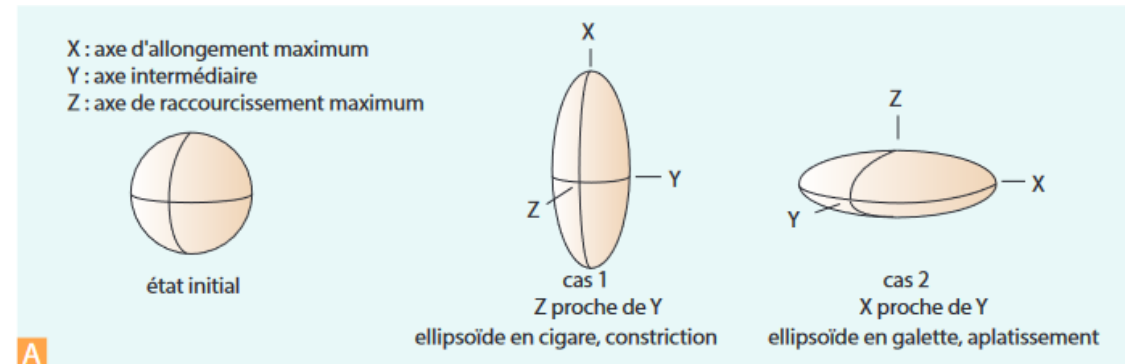
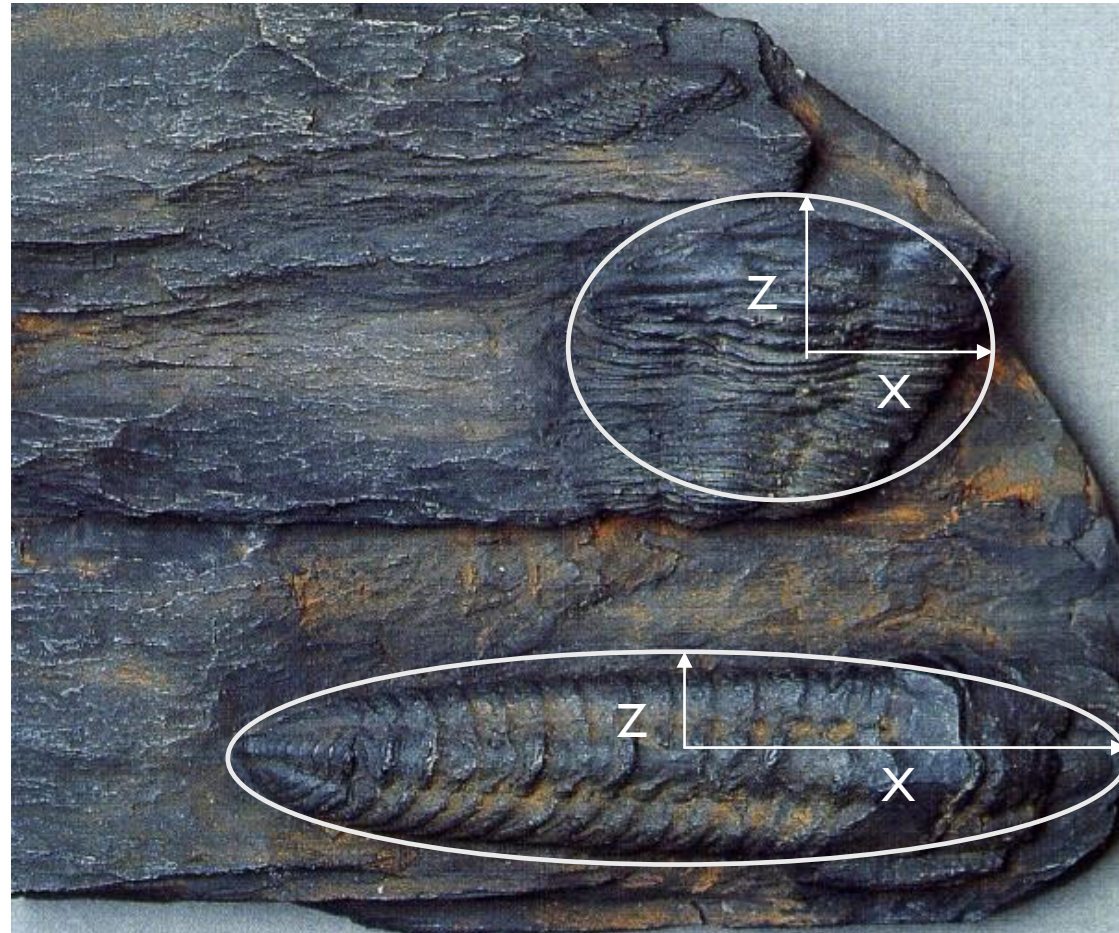


Figure 20 : l'ellipsoïde des déformations (dans Renard et al. 2016)

## C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

### I. Représentation de la déformation finie par l'ellipsoïde des déformations

#### I.1. Ellipsoïde des déformations : X, Y, Z



# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

I. Représentation de la déformation finie par l'ellipsoïde des déformations

I.2. Comment mesurer l'importance de la déformation?



- Avoir une idée de la géométrie de départ :



État initial



État final

- Deux cas extrêmes :

- **L tectonite** où l'ellipsoïde a la forme d'un cigare : l'**étirement** domine (donc linéation)
- **S tectonite** : l'ellipsoïde a la forme d'une galette et dans ce cas l'**aplatissement** domine (donc schistosité importante).



*L tectonite*  
(Bédarieux, S. Dalaine)



*S tectonite*  
(ardoise de Tralazé, S. Dalaine)

# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS



## 2. Déformation instantanée: coaxiale/cisillante (=rotationnelle)

- Difficile de décrire le processus de déformation à la seule vue de l'objet déformé, mais néanmoins deux cas possibles:
  - axes des ellipsoïdes ne restent pas parallèles au cours de la déformation progressive => déformation progressive **non-coaxiale** = **cisaillement simple** (un cube devient un parallélépipède quelconque)
    - ✓ La déformation est dite **rotationnelle**
    - ✓ **structures asymétriques dans le plan XZ** (yeux, boudinage, sigmoïdes...)
  - axes des ellipsoïdes restent parallèles au cours de la déformation progressive => déformation **coaxiale** = **cisaillement pur** (un cube devient un parallélépipède rectangle)

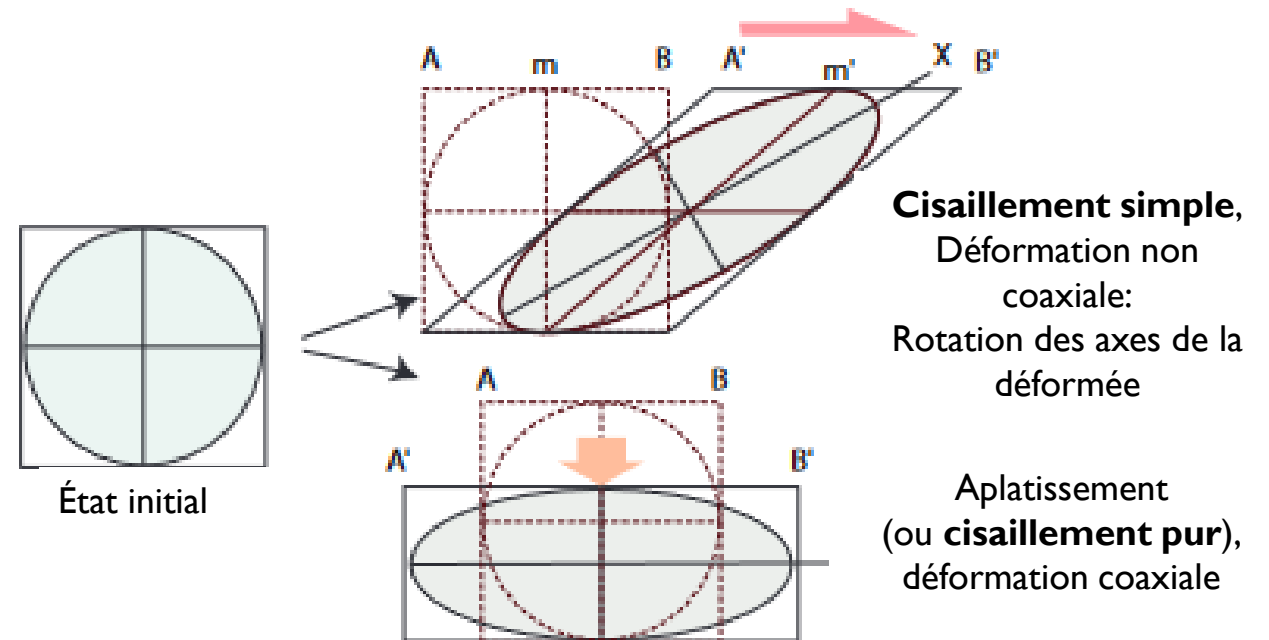


Figure 21 : cisaillement pur/simple (dans Renard et al. 2016)

# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

## 2. Déformation instantanée: coaxiale/cisillante (=rotationnelle)



! PLAN XZ

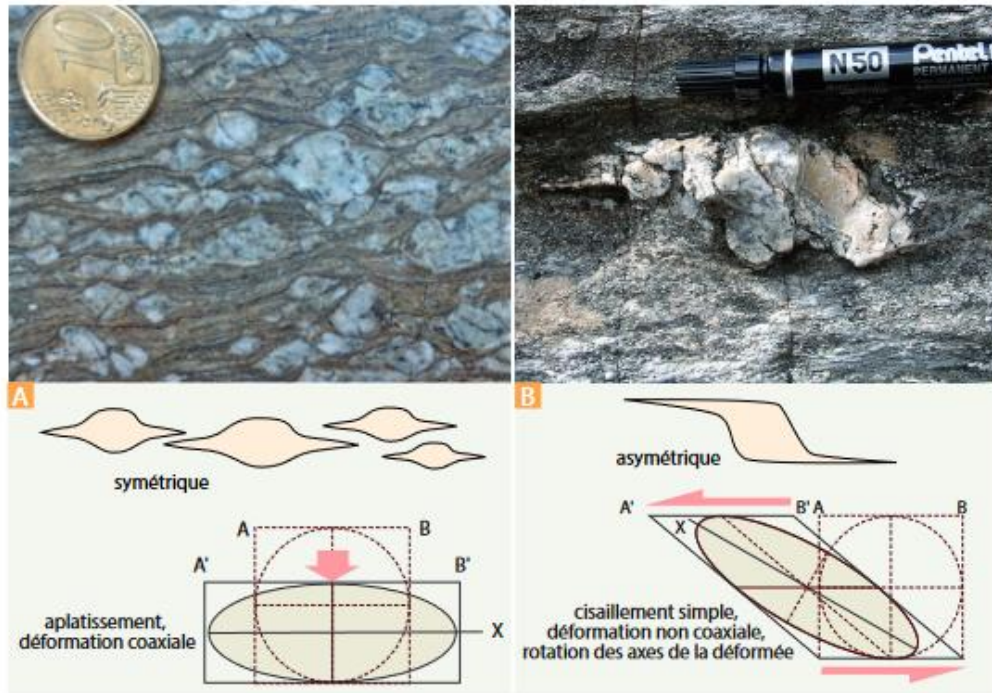





Figure 21 : cisaillement pur/simple (dans Renard et al. 2016)

<p>Peut-on caractériser un ellipsoïde de la déformation finale ?</p>	<p>Oui. X = sens de l'allongement maximal, Z = sens du raccourcissement maximal, Y perpendiculaire à X et Z (dans les deux représentations, Y est perpendiculaire au plan du dessin)</p> 	<p>Oui.</p> 
<p>Peut-on caractériser un ellipsoïde des contraintes ?</p>	<p>Oui. La déformation est non-rotationnelle (coaxiale) : <math>\sigma_1 // Z, \sigma_2 // Y, \sigma_3 // X</math></p>  <p>Par convention, on suppose que les contraintes s'exercent au centre de l'objet, donc on oriente les vecteurs vers le centre.</p>	<p>Non. La déformation étant rotationnelle (non coaxiale), il n'est pas possible d'associer la déformation finie à un unique ellipsoïde des contraintes (l'orientation des contraintes ayant varié pendant la déformation).</p>

Cisaillement pur

Cisaillement simple

Déformation coaxiale

Déformation rotationnelle

Ellipsoïde des contraintes

Ellipsoïde des contraintes



# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

## 2. Déformation instantanée: coaxiale/cisillante (=rotationnelle)



### ■ Dans le cas d'un cisaillement simple

- **Schistosité S** = plan d'aplatissement
- **Cisaillement C** = plan de cisaillement, ils sont nombreux

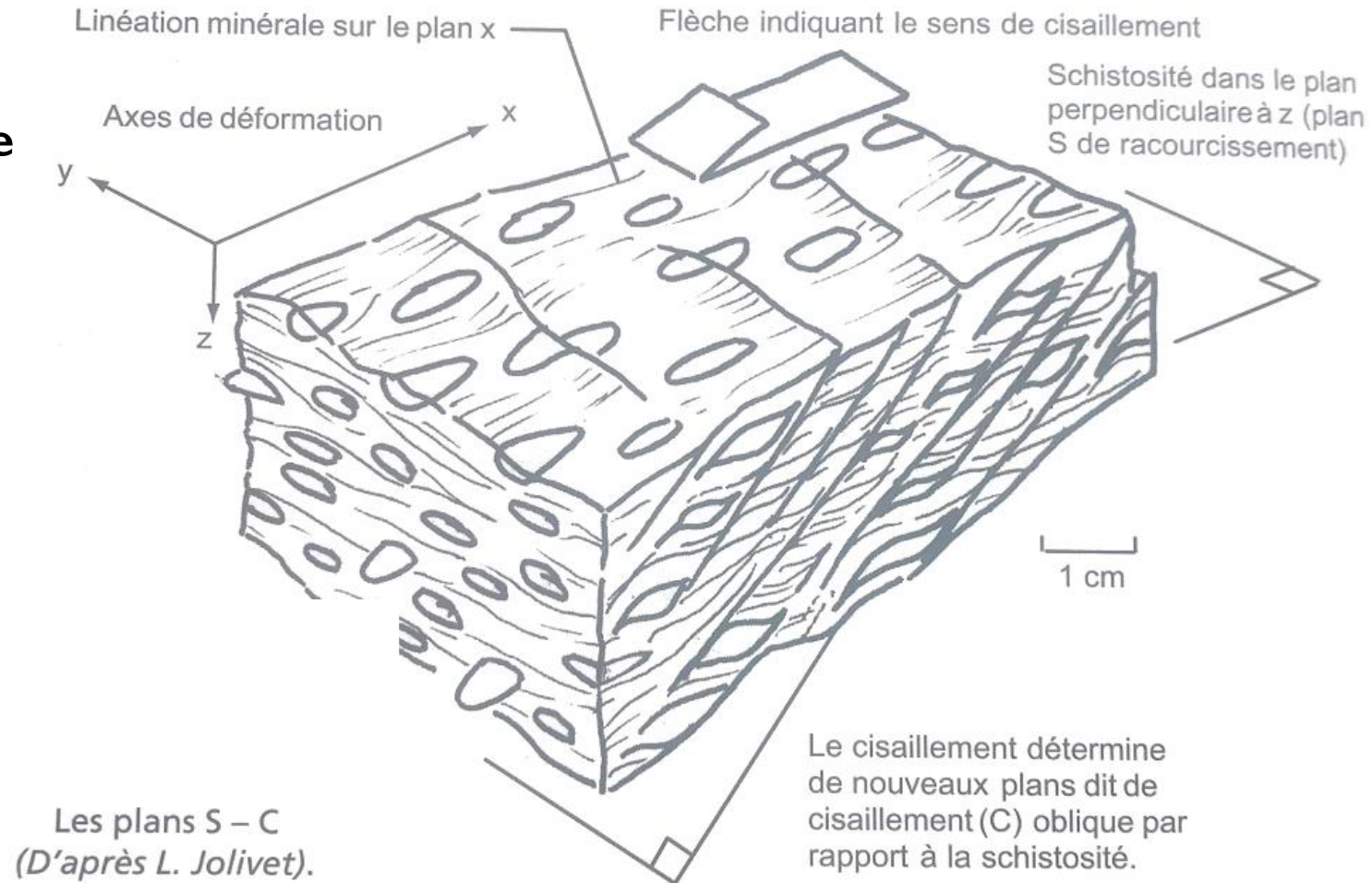
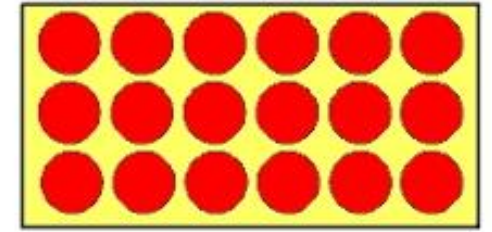


Figure 21 les plans S-C (d'après L. Jolivet)

# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

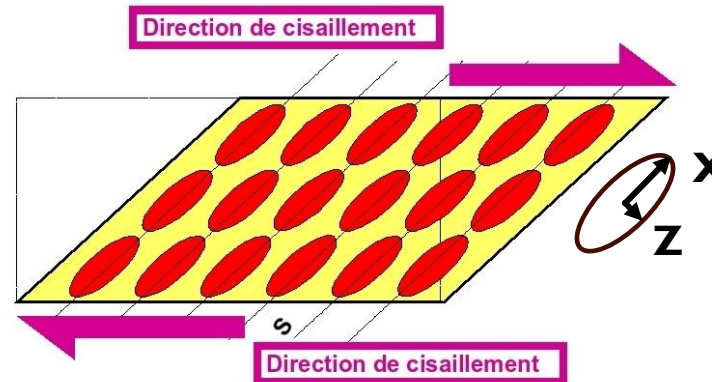
## 2. Déformation instantanée: coaxiale/cisillante (=rotationnelle)



Source - © 2007 Pierre Thomas  
état initial

- **Déformation continue** aboutissant à l'identification d'un plan d'aplatissement = schistosité **S**
  - Plan **XY** de l'ellipsoïde de déformation
- Une seconde structure planaire apparaît = plan de cisaillement = **C**
  - ⇒ plan de cisaillement **C** est postérieur au plan de schistosité
- Si déformation continue poussée alors: plan de schistosité **S** devient parallèle au plan de cisaillement **C**

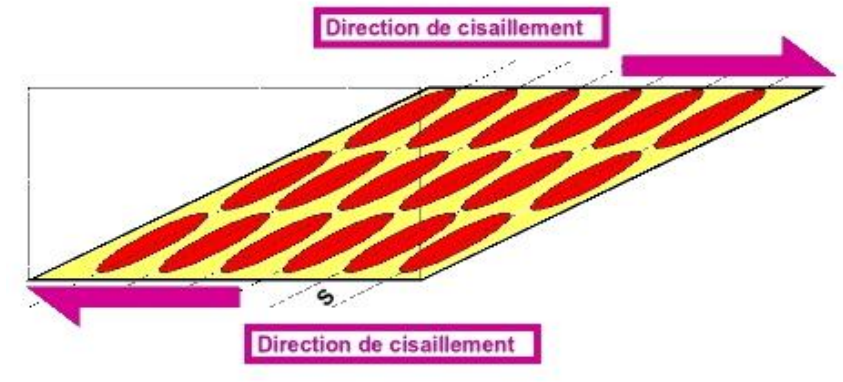
Déformation par cisaillement simple  
Déformation continue modérée



S = plan d'aplatissement = schistosité

Source - © 2007 Pierre Thomas  
*Déformation continue par cisaillement  
Déformation continue modérée. Une schistosité se développe selon le plan d'aplatissement.*

Déformation par cisaillement simple  
Déformation continue importante



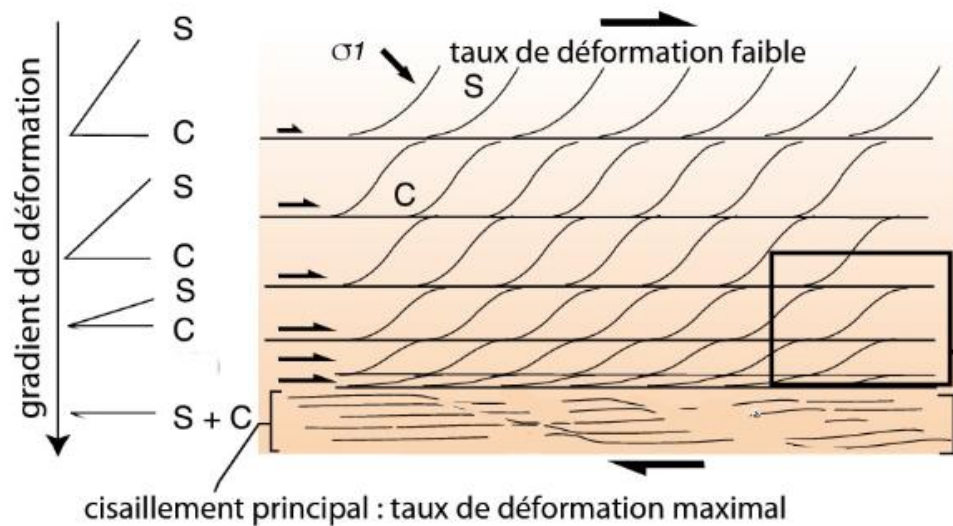
S = plan d'aplatissement = schistosité

Source - © 2007 Pierre Thomas  
*Déformation continue par cisaillement  
Déformation continue importante. Une schistosité se développe selon le plan d'aplatissement qui se rapproche de la direction (du plan, en 3D) de cisaillement*

# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

## 2. Déformation instantanée: coaxiale/cisailante (=rotationnelle)

- Distinguez plan de schistosité (=plan d'aplatissement= S) et plan de cisaillement (C)
- Le plan de schistosité se rapproche du plan de cisaillement



# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

## 2. Déformation instantanée: coaxiale/cisillante (=rotationnelle)



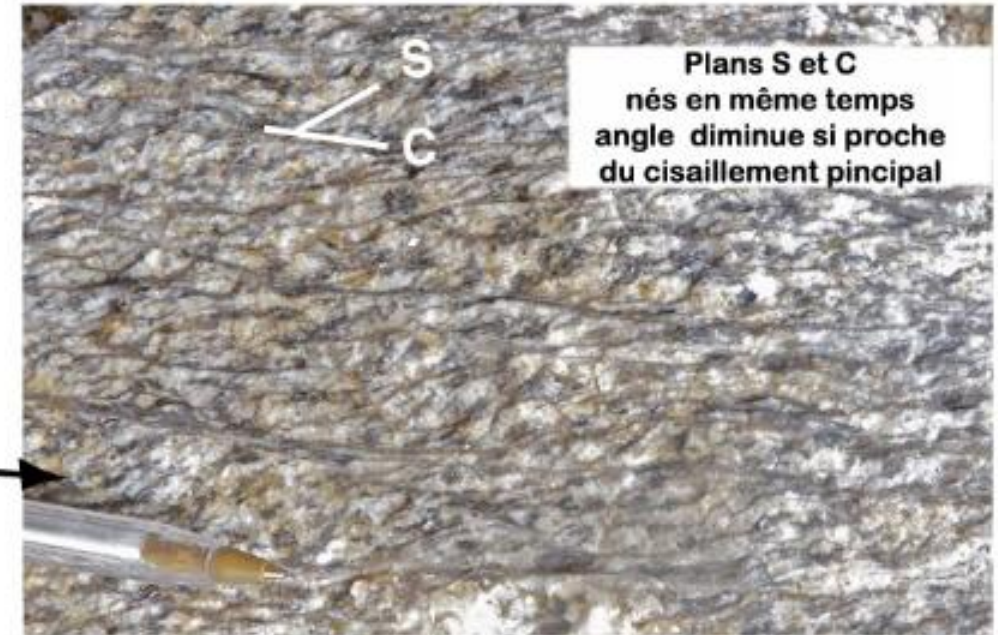
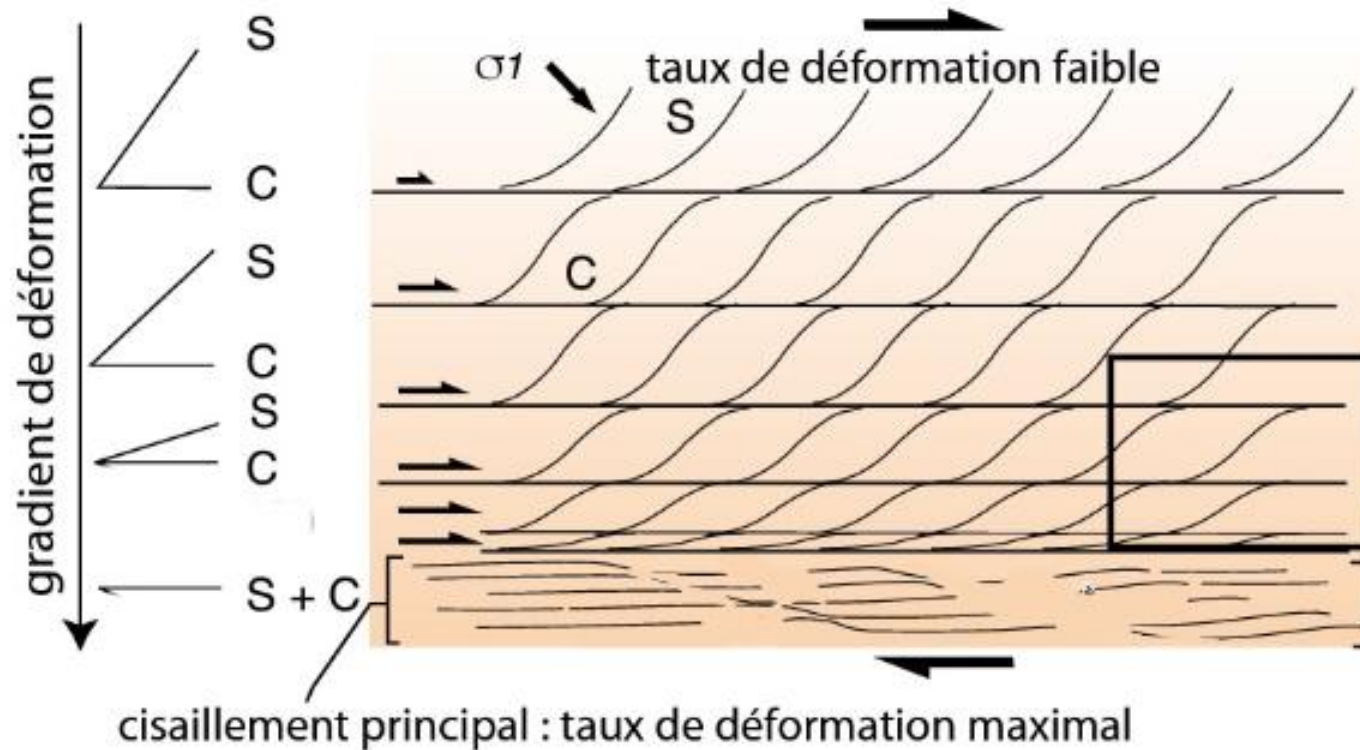
Figure 22 : cisaillement pur/simple (ENS Lyon)



- **Notion de bandes de cisaillement : plans de cisaillement C.**
  - Lorsque la **déformation est rotationnelle** (cisillante) = cisaillement simple, un plan de cisaillement C peut s'exprimer formant des bandes de cisaillement qui recoupent le plan S.
- ⇒ **le plan de cisaillement est postérieur au plan de schistosité**

# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

## 2. Déformation instantanée: coaxiale/cisillante (=rotationnelle)



Granite d'Elven (Morbihan)

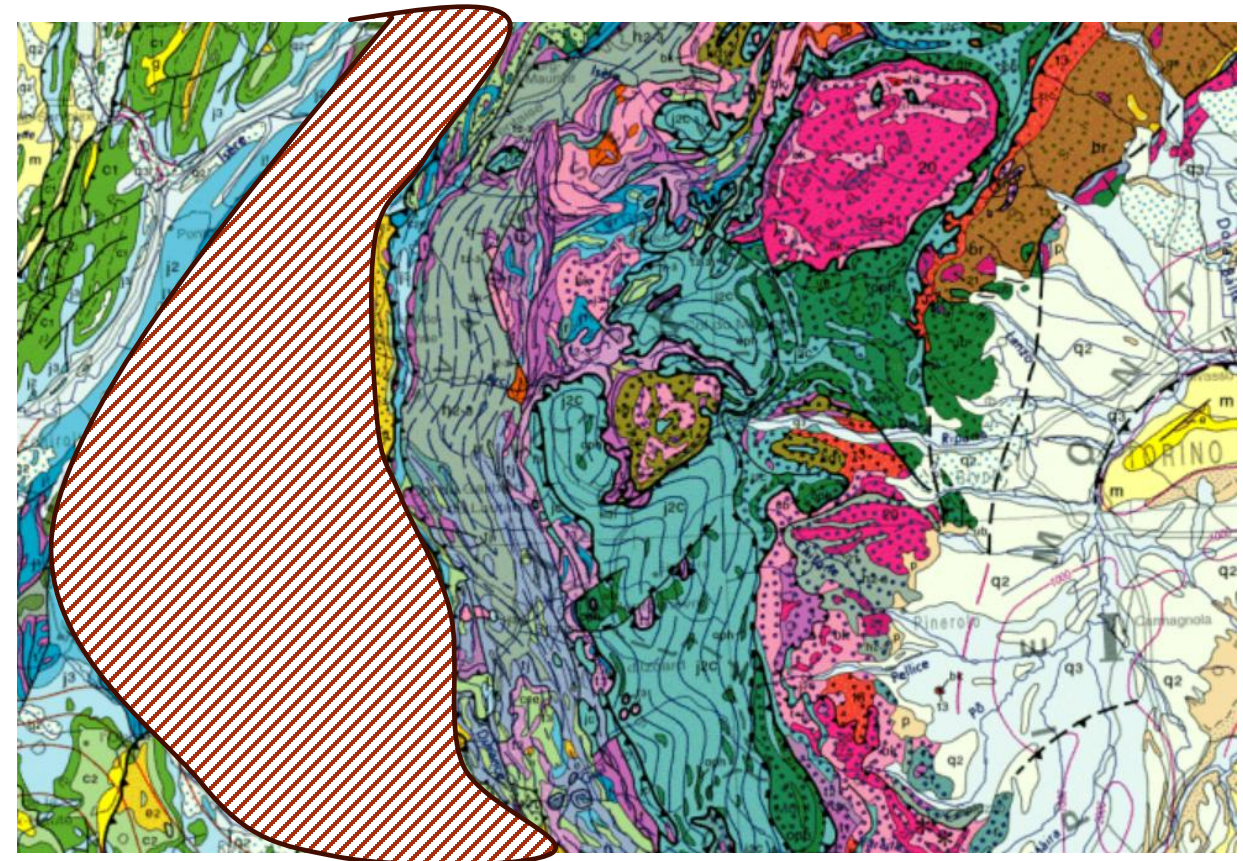
- **Notion de bandes de cisaillement : plans de cisaillement C.**
- Lorsque la déformation est rotationnelle (cisillante), un plan de cisaillement C peut s'exprimer formant des bandes de cisaillement qui recoupent le plan S.

# C. DEFINITIONS : ELLIPSOÏDE DES DEFORMATIONS

## 3. Bilan



- **zones internes** des chaînes de montagnes: souvent roches avec **déformations continues = ductiles** (plis)
- **zones externes des chaînes de montagnes**: souvent roches avec **déformations cassantes (failles)**.
- Souvent déformations ductiles recoupées par des déformations cassantes
  - ⇒ **déformations cassantes plus tardives**
  - ⇒ lien entre le type de déformation et les variations de profondeur, autrement dit les variations de P et T.
- Nécessité de réaliser des expériences en laboratoire pour évaluer les rôles de P et T et établir des liens entre déformations et contraintes, qui ne sont pas observables dans la nature.



Zones externes (riches en déformations discontinues)

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# II- ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES ROCHES

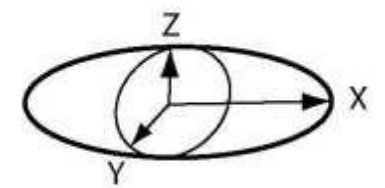
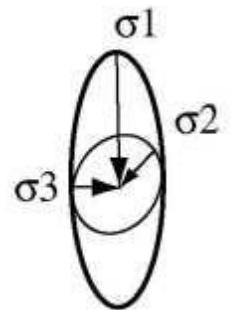
## A. DEFINITION DE L'ELLIPSOÏDE DES CONTRAINTES : $\sigma_1$ , $\sigma_2$ ET $\sigma_3$



- État de contrainte représenté par un **ellipsoïde**
- contraintes normales principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ ,
- avec  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$
- Contrainte = résultante de toutes les forces qui s'exercent sur une surface

centripète

centrifuge



Ellipsoïde des contraintes

Ellipsoïde des déformations

Les failles normales	Les failles inverses	Les failles décrochantes
<ul style="list-style-type: none"> <li>- la composante principale du rejet est verticale ;</li> <li>- le toit est descendu par rapport au mur ;</li> <li>- résultent d'un <b>régime d'extension</b> (étirement horizontal), donc avec <math>\vec{\sigma}_3</math> et <math>\vec{\sigma}_2</math> horizontales, et <math>\vec{\sigma}_1</math> verticale</li> <li>- pendage fort (entre 45 - 60°) : un pendage de 60° correspond à une position la faille à 30° de <math>\vec{\sigma}_1</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la composante principale du rejet est verticale ;</li> <li>- le toit est monté par rapport au mur ;</li> <li>- résultent d'un <b>régime de compression horizontal</b>, avec <math>\vec{\sigma}_1</math> et <math>\vec{\sigma}_2</math> horizontales (respectivement perpendiculaire et parallèle au plan de faille), et <math>\vec{\sigma}_3</math> verticale. pendage plus faible (à environ 30° de <math>\vec{\sigma}_1</math> horizontale).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verticales ;</li> <li>- rejet horizontal sénestre (si chaque bloc se déplace vers la gauche d'un observateur situé sur l'autre bloc) ou dextre (si le déplacement relatif est vers la droite de l'observateur) ;</li> <li>- comme pour la faille inverse, <math>\vec{\sigma}_1</math> et <math>\vec{\sigma}_2</math> sont horizontales (mais obliques par rapport au plan de faille), et <math>\vec{\sigma}_3</math> est verticale.</li> </ul>

Figure 24 : lien entre type de faille et ellipsoïde des contraintes (dans Dunod, 2021)

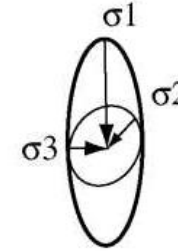
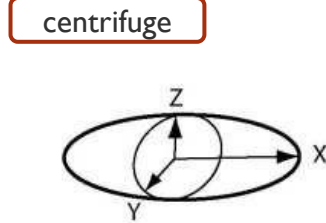
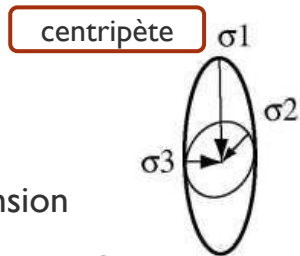
# II- ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES ROCHES

## A. DEFINITION DE L'ELLIPSOÏDE DES CONTRAINTES : $\sigma_1$ , $\sigma_2$ ET $\sigma_3$

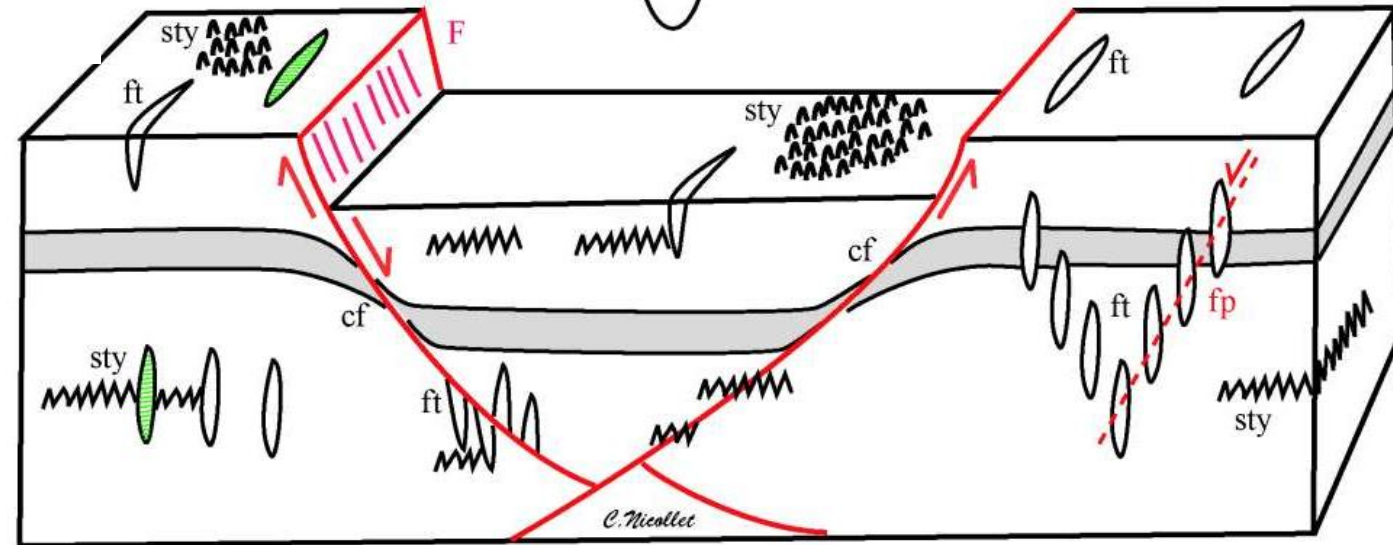


### ■ Cas de faille normale

- ⇒ Régime de distension
- ⇒ forces aux limites < force de gravité
- ⇒  $\sigma_1$  vertical



Tectonique en distension carrière de Gandaillat, à l'Est de Clermont Ferrand  
(C. Nicollet)



Graben ou rift délimité par un système de failles normales conjugués (F). Des microstructures sont associées ; il s'agit de stylolithes (sty), de fentes de tension (ft), crochons de faille (cf), faille potentielle (fp).

- Objectif de l'**ellipsoïde des contraintes**:

1. orienter les contraintes (max, min, intermédiaires)
2. identifier les facteurs de contrôle de la déformation



- **Contrainte**: pression (donc une force sur une surface) **anisotrope**.

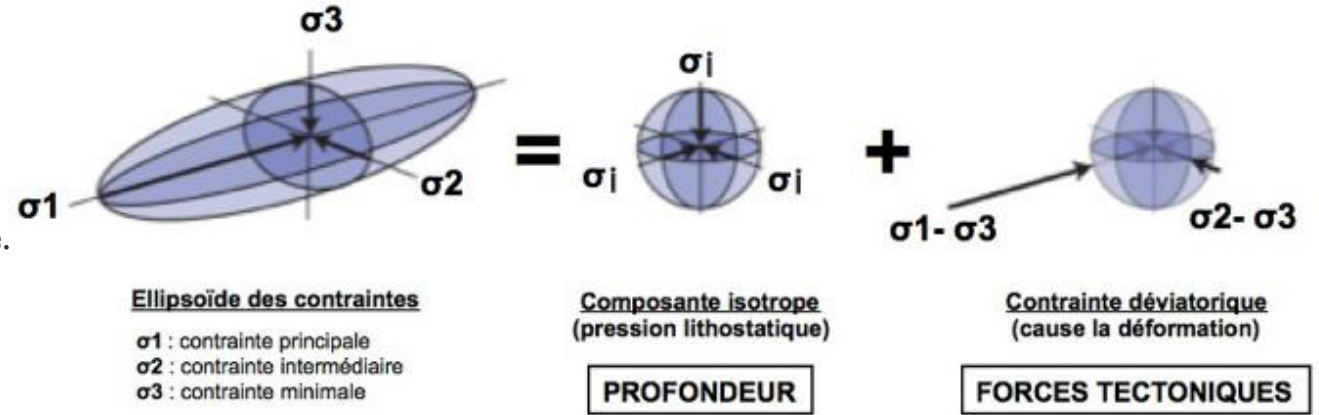
- **Ellipsoïde des contraintes**: 3 axes orthogonaux avec  $\sigma_1$  maximale,  $\sigma_3$  minimale,  $\sigma_2$  intermédiaire ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ),
- Contrainte moyenne  $\sigma_i$  = partie **isotrope** du champ qui ne donne pas de déformation (sauf changement de volume dû à pression) = **pression lithostatique (mais en valeur absolue, très importante dans le métamorphisme)**

$$PL = \sigma_i = \sigma_3 = \rho gh \text{ (Pa)}$$

- **Contrainte déviatorique**  $\sigma_1 - \sigma_i$  soit  $\sigma_1 - \sigma_3$  (dans une moindre mesure  $\sigma_2 - \sigma_i$ ) : cette contrainte déviatorique est fixée expérimentalement et engendre une **déformation**

- Puisque  $\sigma_1$  est la contrainte maximale, la **contrainte déviatorique** est majoritairement due à  $\sigma_1 - \sigma_i$  causant la majorité de la déformation

- Cln: La déformation ne résulte pas des valeurs absolues des contraintes  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$ , mais de **leurs différences par rapport à la pression lithostatique**, liée au poids des matériaux environnants. **La contrainte déviatorique  $\sigma_1 - \sigma_i$  est réellement responsable de la déformation.**



$\rho$  = masse volumique environ  $3\text{g/cm}^3$  ( $3000\text{ kg/m}^3$ )

$g \approx 10\text{ m.s}^{-2}$

$h$  = hauteur de la colonne de roche surmontant le point considéré

$1\text{ m de roches} = 30\text{ kPa}$   
 $1\text{ km de roches} = 30\text{ MPa}$   
 $10\text{ m de roches} = 300\text{ kPa} = 0,3\text{ MPa} = 3\text{ bar}$

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

## B. METHODE D'ETUDE DU COMPORTEMENT DES ROCHES

### I. Presse Paterson : BP/BT



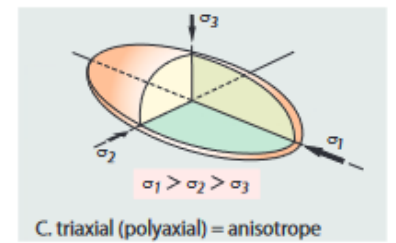
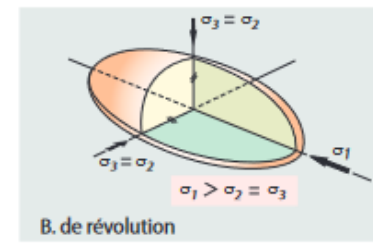
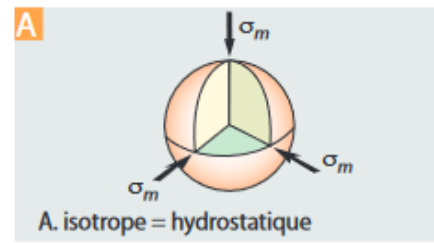
La presse "Paterson" est une presse triaxiale :

- un **piston** s'enfonce et génère la **contrainte  $\sigma_1$**
- un compresseur génère une **pression de confinement isotrope (mimant profondeur de échantillon) :  $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_i$  (presse uniaxiale)**
- l'ensemble est contenu dans une autoclave à chauffage interne ( $T < 1400^\circ C$ )
- En augmentant  $\sigma_1$ , on fait agir la contrainte déviatorique  $\sigma_1 - \sigma_i$  (approximée à  $\sigma_1 - \sigma_3$  qui est la contrainte différentielle)

Déformation des échantillons cylindriques de roche ( $8 < \text{diamètre} < 15 \text{mm}$ ,  $l < 30 \text{mm}$ ) en **co-axial** (aplatissement) ou en **torsion** (cisaillement simple).

Une cellule interne **mesure** en continu (avec un extensomètre = ressort) et en temps réel la **contrainte** appliquée à l'échantillon ainsi que sa **déformation**.

On obtient ainsi une **courbe** présentant **chaque contrainte déviatorique ( $\sigma_1 - \sigma_i$ ) imposée en fonction de  $\epsilon$  (en % de variation des dimensions par rapport à l'état initial)**.



presse uniaxiale (laboratoire)

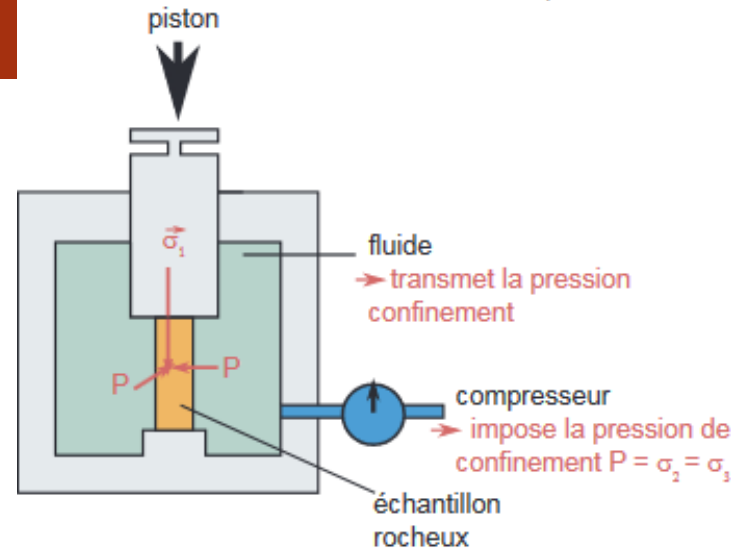


Figure 25 : presse uniaxiale (dans le Dunod, 2021)

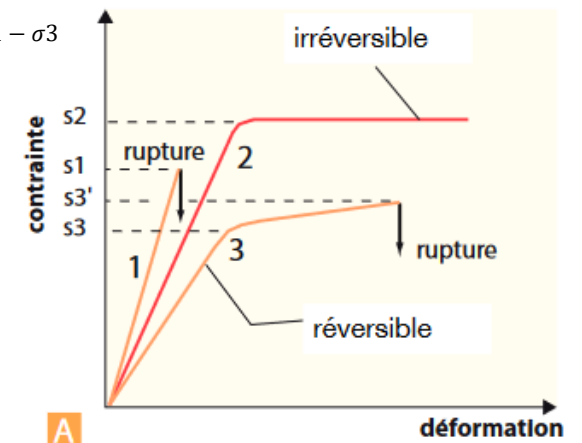
On place un petit cylindre de roche dans une **presse**. L'enfoncement progressif du **piston** permet de générer une contrainte maximale  $\sigma_1$ . Le **compresseur** engendre la pression de confinement  $P$ , qui est égale à  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ , perpendiculaires à  $\sigma_1$ . La pression de confinement modélise donc la pression lithostatique.

La contrainte déviatorique, dans ce cas égale à  $\sigma_1 - \sigma_3$  ou  $\sigma_1 - \sigma_2$ , est notée  $\sigma_d$  par la suite.

On mesure la déformation  $\epsilon$  (en % de variation des dimensions par rapport à l'état initial) pour chaque  $\sigma_d$  imposée : c'est le fondement de l'étude rhéologique des roches.

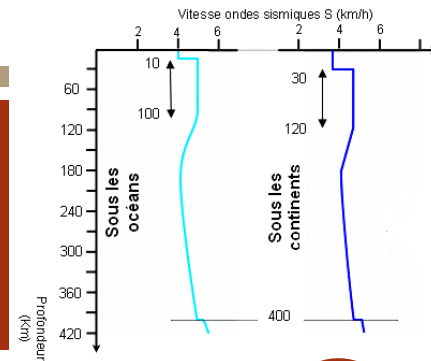
déviateur de contraintes  $\sigma_1 - \sigma_3$

Essais sur 3 types d'échantillons à **vitesse constante**.  
 1. Roche cassante  
 2 et 3 : Roches ductiles  
 Déformation réversible -> comportement élastique  
 Déformation irréversible -> comportement plastique ou visqueux.

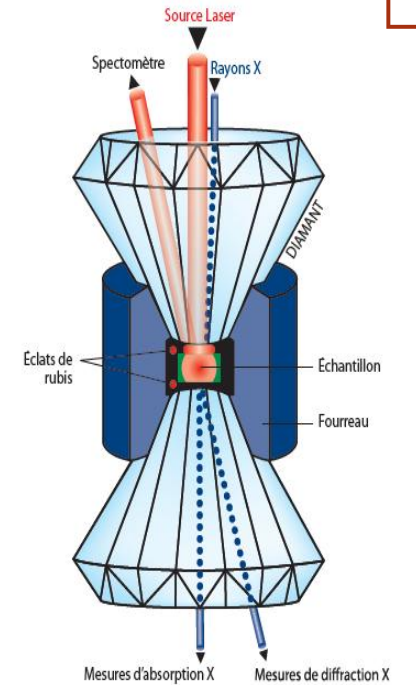
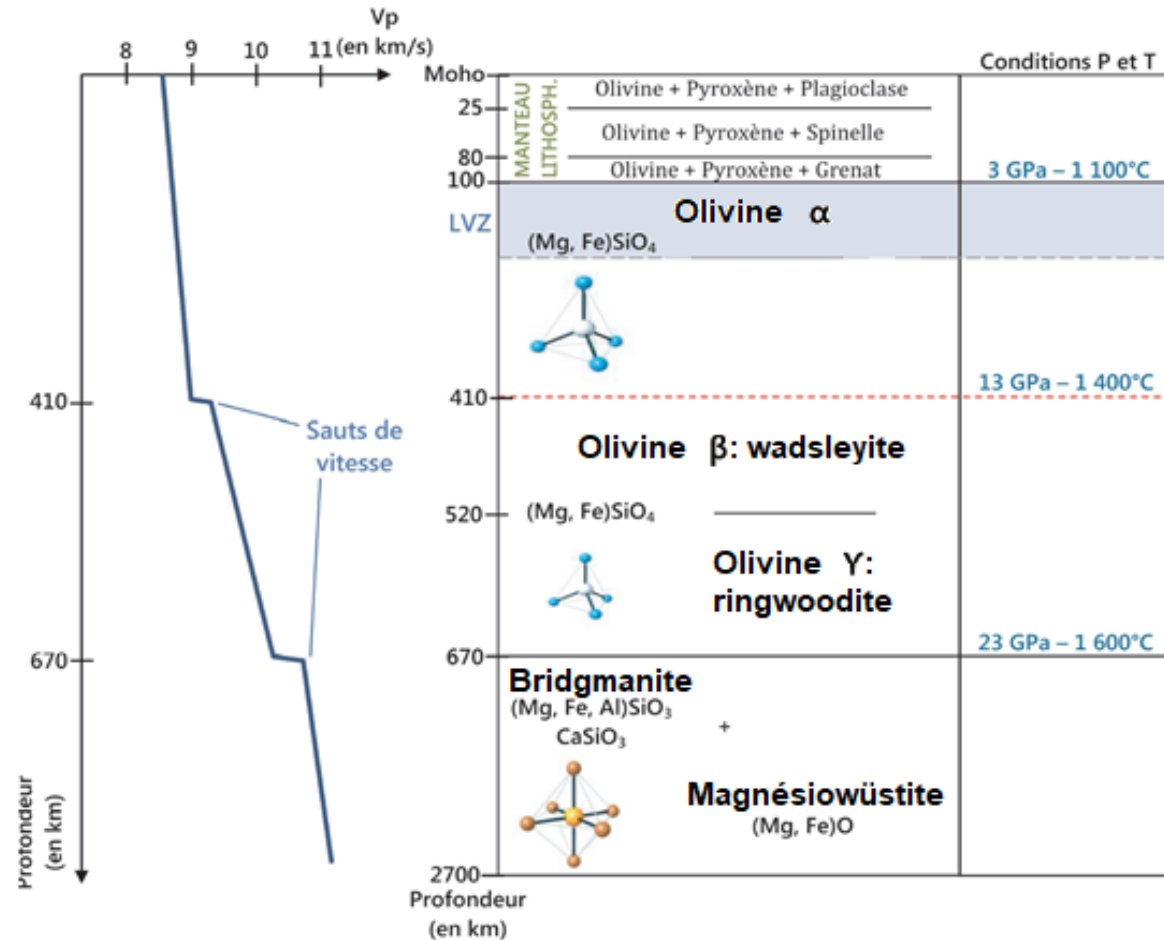


# B. METHODE D'ETUDE DU COMPORTEMENT DES ROCHES

## 2. Enclume de diamant



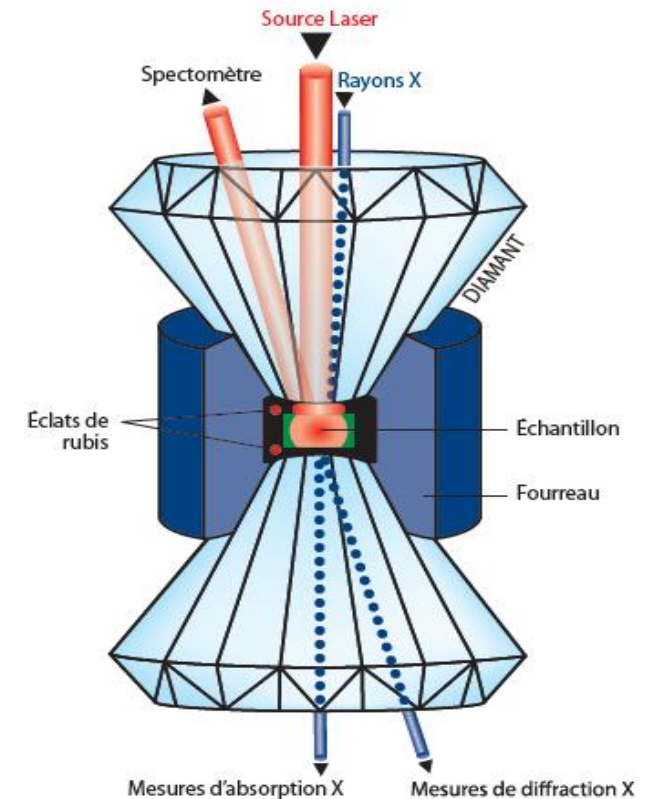
- 400 et 520 km: ↗ de vP et vS à 400 et 520 km de profondeur
  - Transition de phase à 410 km  $\alpha \rightarrow \beta$
  - Transition de phase à 520 km  $\beta \rightarrow \gamma$
- Une rupture de pente entre ces deux discontinuités à 670 km.
  - Métamorphisme:  $\gamma \rightarrow$  bridgmanite et magnésiwüstite



# B. METHODE D'ETUDE DU COMPORTEMENT DES ROCHES

## 2. Enclume de diamant

- instrument fondamental pour l'étude expérimentale des matériaux du manteau et du noyau terrestre (pression jusqu'à 500 GPa = 5 millions d'atmosphères et température jusqu'à 5000 K).
- La transparence du diamant permet de mesurer *in situ* les propriétés des matériaux à haute pression et température variable.
- Pour atteindre des pressions élevées il faut appliquer une force importante sur une surface la plus réduite possible.
- Le diamant présente des caractéristiques de résistance à la compression exceptionnelles.
- L'échantillon à étudier sous pression est placé dans un trou (de 50 à 300  $\mu\text{m}$  de diamètre) percé dans une feuille d'acier de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur que l'on serre entre deux diamants. Les deux diamants sont taillés et présentent une surface plane. Pour être poussés en opposition, les deux diamants sont placés respectivement sur un cylindre et un piston coulissant l'un dans l'autre.



# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# C. QUELS SONT LES RESULTATS OBTENUS ?

## I. Observations

- **Essais en conditions isotropes** : on soumet l'échantillon à une contrainte  $\sigma_i$  (=avec des déviateurs nuls).
  - Pour tout  $\sigma_i$ , les seules déformations observées correspondent à des **changements de volume** de l'échantillon.
- **Essais en compression** :  $\nearrow \sigma_1$  sur les zones circulaires de l'éprouvette (verticalement)
  - Résultats : apparition d'un **raccourcissement** de l'échantillon et de déformations (fentes, sigmoïdes) puis d'une **faille normale avec un angle de  $30^\circ$  entre  $\sigma_1$  et le plan de faille**
- **Bilan** : la déformation résulte donc du **déviateur de contrainte (contrainte déviatorique)**: une forte contrainte isotrope n'entraîne pas de déformation alors qu'une faible composante anisotrope entraîne une déformation

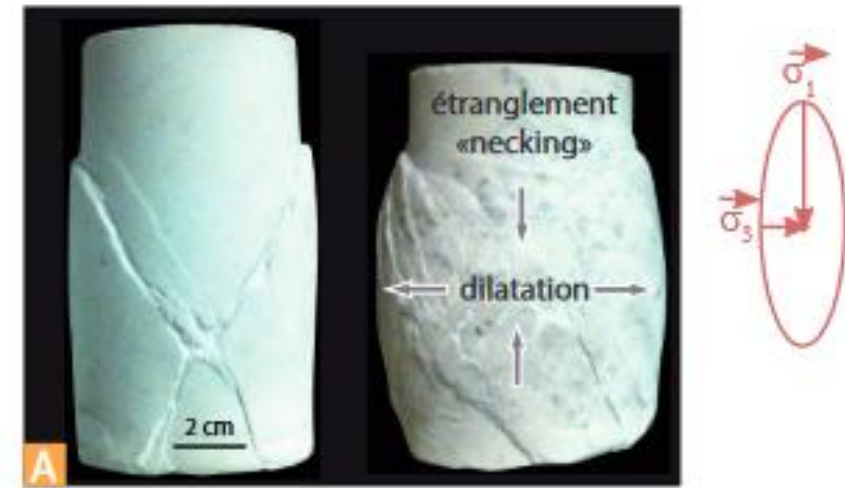
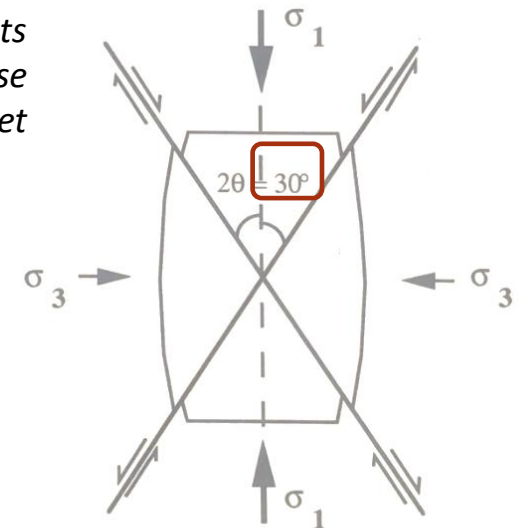
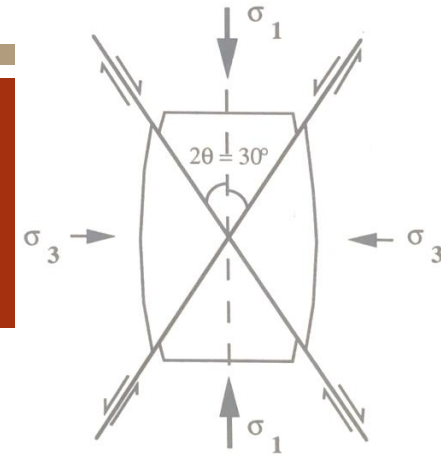


Figure 26 : résultats d'expériences de presse uniaxiale (dans Renard et al, Paul Nougier ellipses)

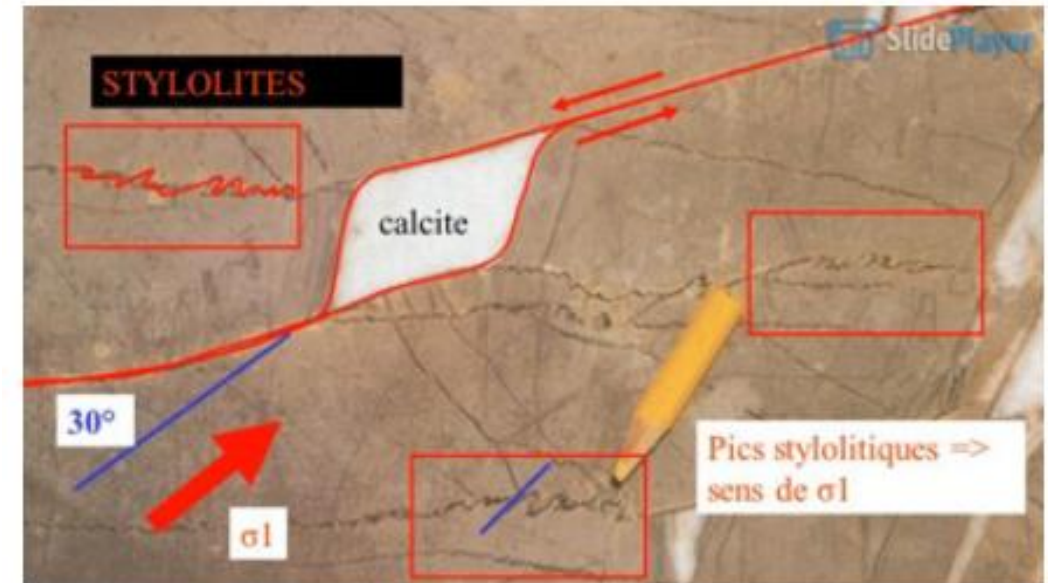
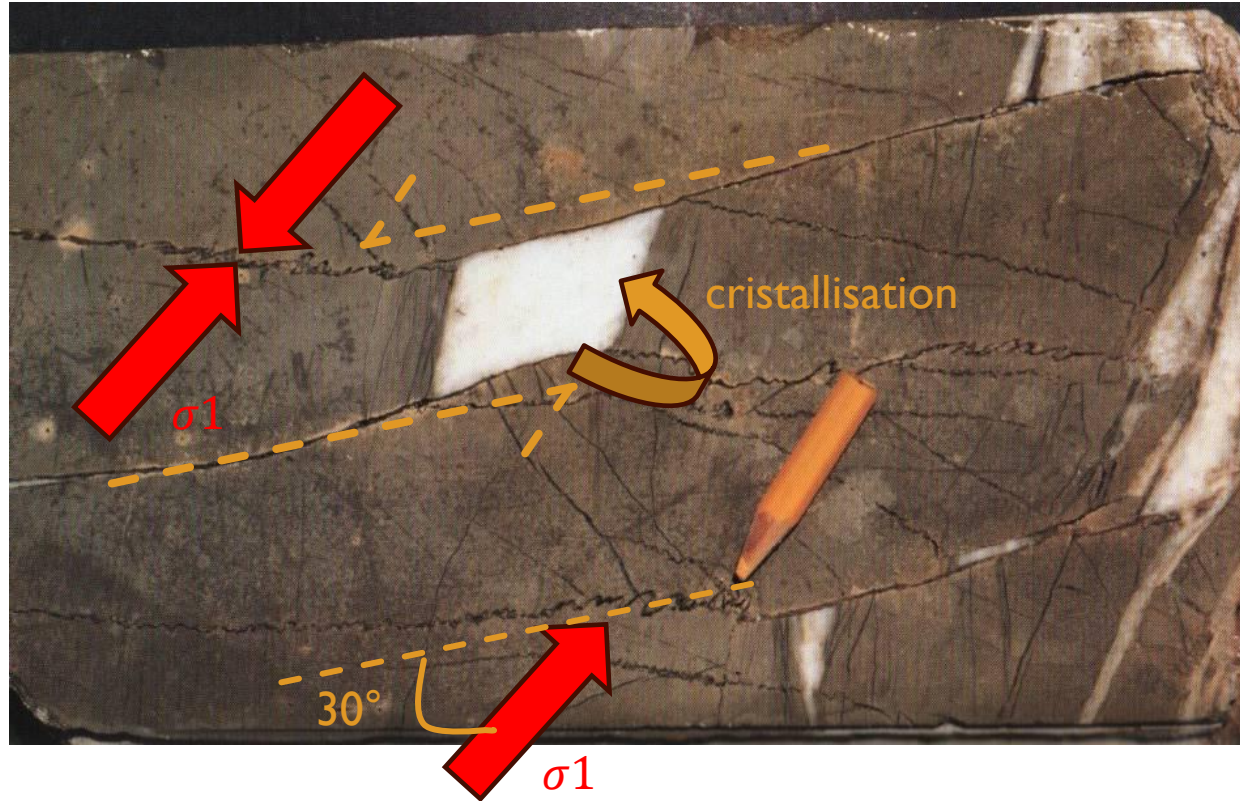


# C. QUELS SONT LES RESULTATS OBTENUS ?

## I. Observations et interprétations



Compression



# C. QUELS SONT LES RESULTATS OBTENUS ?

## 2. Déformation réversible, irréversible, rupture



- On étudie le comportement d'un échantillon en appliquant une contrainte croissante à **vitesse constante** et en mesurant la déformation
- NB: pour un **solide plastique**, la résistance de l'échantillon ne dépend pas de la vitesse de la contrainte
- NB: pour un solide visqueux, la résistance de l'échantillon dépend de la vitesse de déformation (la résistance de l'échantillon augmente avec la vitesse de la contrainte)

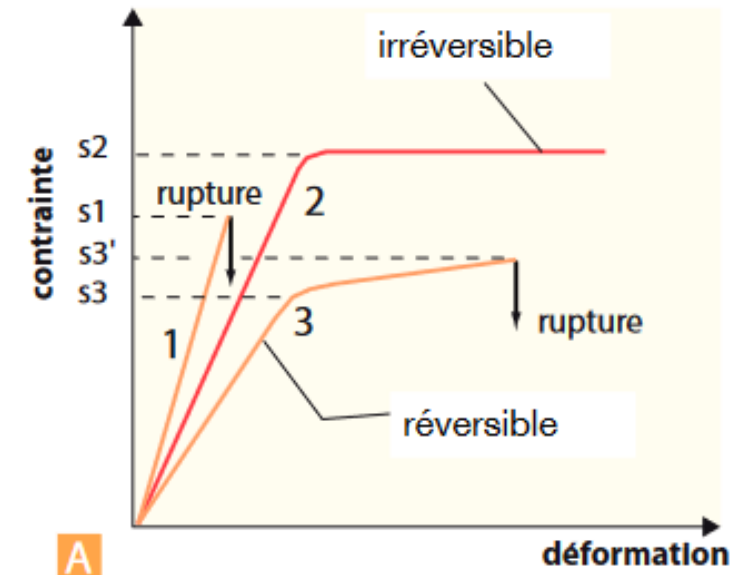
Essais sur 3 types d'échantillons à **vitesse constante**.

1. Roche cassante

2 et 3 : Roches ductiles

Déformation réversible -> comportement élastique

Déformation irréversible -> comportement plastique ou visqueux.



relation contrainte-déformation (dans Renard et al. 2016)

# C. QUELS SONT LES RESULTATS OBTENUS ?

## 2. Déformation réversible, irréversible, rupture

**Fluage:** écoulement de la matière solide en réponse à une contrainte présentant une déformation croissante sans augmentation de contrainte



- Domaine ① : la **déformation** est très faible (le matériau est résistant) mais est **continue** et **réversible**. La roche a un **comportement élastique**.
- Domaine ② : pour  $\sigma_d$  croissante, la **déformation continue** est plus importante (la pente de la courbe s'infléchit) et **en partie irréversible**. La roche a un **comportement ductile et plastique**, elle a franchi un seuil de plasticité (limite ① – ②). Si on arrête l'essai dans la phase ②, l'échantillon reste déformé : la quantité (a) mesurée en abscisses est la part de **déformation irréversible (plastique)**, la quantité (b) est la part élastique
- Domaine ③ : la déformation augmente alors que  $\sigma_d$  est constante. Ce **comportement plastique** particulier est appelé **fluage** et traduit l'écoulement de la matière (toujours solide pourtant !) en réponse à une contrainte.
- Point ★ : l'échantillon se fracture. La déformation est alors **discontinue**, ou cassante et traduit un comportement fragile de la roche. Le comportement ductile correspond donc à l'ensemble de la courbe (domaines ① – ② - ③)

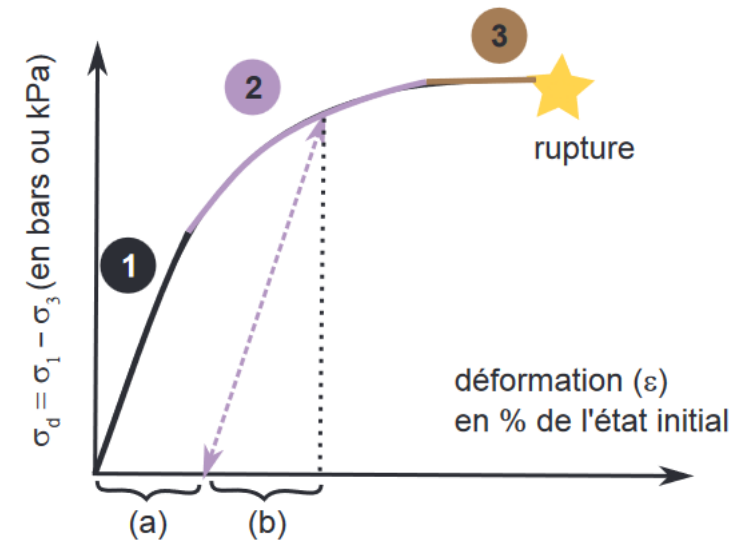


Figure 27 : Résultats d'un essai en compression réalisé avec une presse triaxiale jusqu'à rupture de l'échantillon.(Dunod p.748)

Lorsque la **résistance** est **INDEPENDANTE** de la **vitesse de déformation**, on dit que le comportement est **plastique**.

# C. QUELS SONT LES RESULTATS OBTENUS ?

## 2. Déformation réversible, irréversible, rupture

- **Notion de déformation réversible ou irréversible**
  - déformation réversible = comportement **élastique** (1)
  - déformation irréversible = comportement **plastique** si et seulement si la résistance est indépendante de la vitesse de déformation → **Notion de roche ductile / cassante**
- Roche ductile : une roche ductile présente un domaine de déformation irréversible
- Roche cassante : elle n'a pas de domaine de déformation irréversible.
- ⚠ Une roche qui présente un domaine de déformation irréversible n'est pas cassante même si, *in fine*, elle finit par casser.

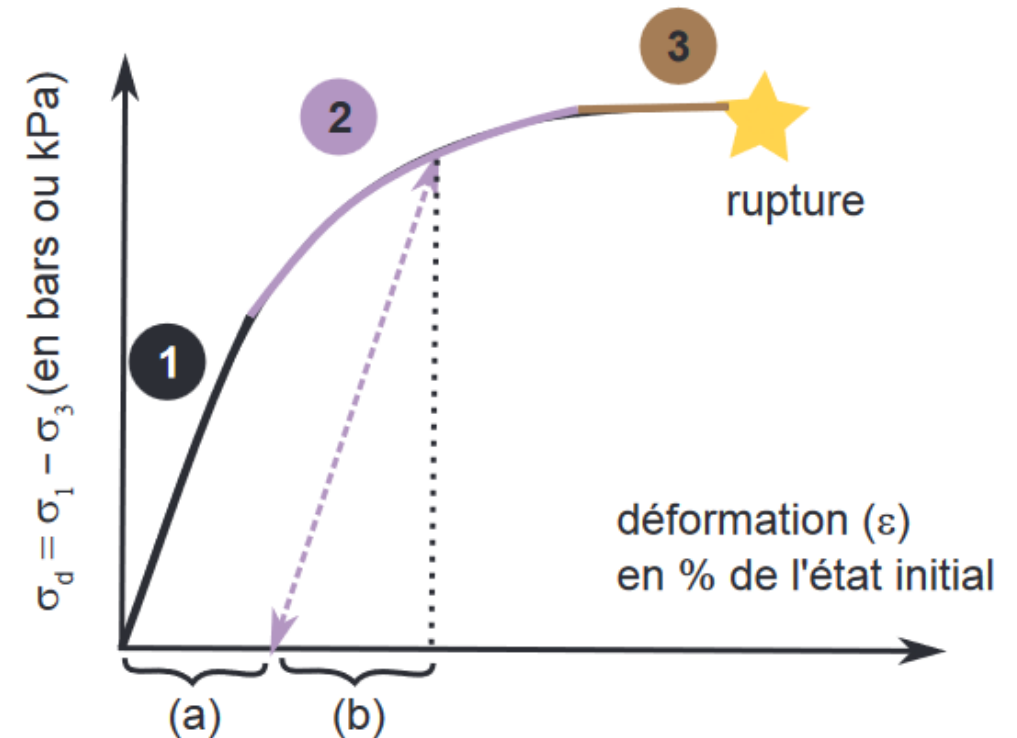


Figure 27 : Résultats d'un essai en compression réalisé avec une presse triaxiale jusqu'à rupture de l'échantillon. (Dunod p.748)

Lorsque la **résistance** est **INDEPENDANTE** de la **vitesse de déformation**, on dit que le comportement est **plastique**.

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

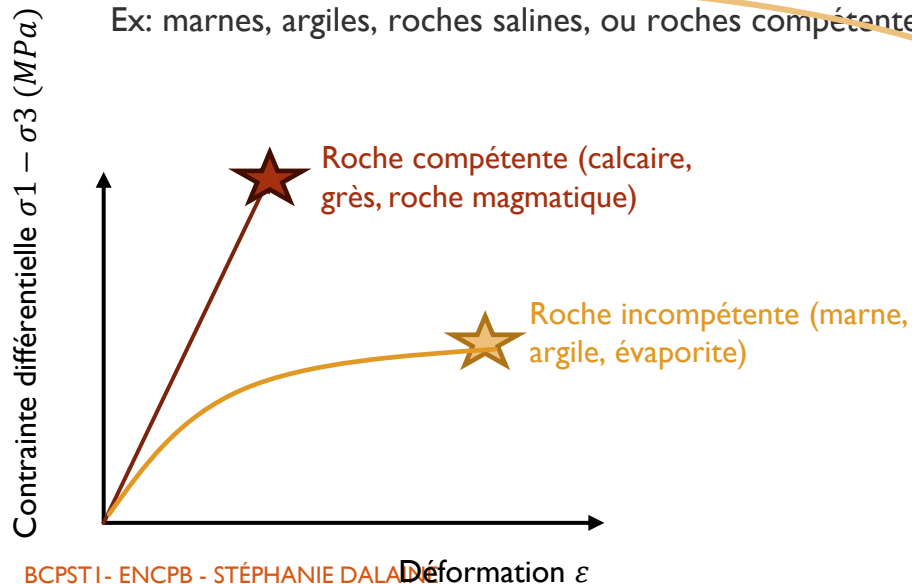
# D. LES PARAMETRES QUI CONTROLENT LE COMPORTEMENT DES ROCHES

## I. Minéralogie



Fente de tension remplie de calcite

- La nature des minéraux constitutifs de la roche influence son comportement.
- Compétence / incompétence** des roches sédimentaires:
  - **Roche compétente = peut casser** car sans domaine de déformation plastique = roche cassante  
Ex: calcaire, grès
  - **Roche incompétente:** faciles à déformer, fluage possible  
Ex: marnes, argiles, roches salines, ou roches compétentes chauffées



Photographie - Pierre Thomas

Source - © 2007 Pierre Thomas

Couche de calcaire tronçonnée des photos précédentes

# D. LES PARAMETRES QUI CONTROLENT LE COMPORTEMENT DES ROCHES

## 2. État de contraintes



- La résistance des roches est plus importante en compression qu'en distension
- ⇒ nombreuses failles inverses correspondent à des réactivations de failles normales



Bassin de Lodève (S. Dalaine)



Failles normales en blanc de pendage  $60^\circ$   
Faille inverse en vert de pendage  $55^\circ$ : un peu trop pour une faille inverse et de plus décale faille normale en blanc  $\Rightarrow$  faille inverse verte est une ancienne faille normale qui a joué à la faveur d'un nouvel événement tectonique

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/pdf/lieudealary.pdf>

# D. LES PARAMETRES QUI CONTROLENT LE COMPORTEMENT DES ROCHES

## 3. Pression de confinement

- Plus la **pression de confinement**  $\sigma_3$  (donc plus profondeur  $\nearrow$ ) et plus la **résistance** de la roche  $\nearrow$
- Plus la pression de confinement  $\nearrow$  (donc plus profondeur  $\nearrow$ ) et plus la roche acquiert un **comportement ductile**
- Plus la pression de confinement  $\nearrow$  (donc plus profondeur  $\nearrow$ ) et plus le seuil de rupture est atteint avec une contrainte déviatorique forte

Cln: L'augmentation de pression lithostatique (donc confinement) ie  $\nearrow$  de profondeur, favorise donc le comportement **ductile**.

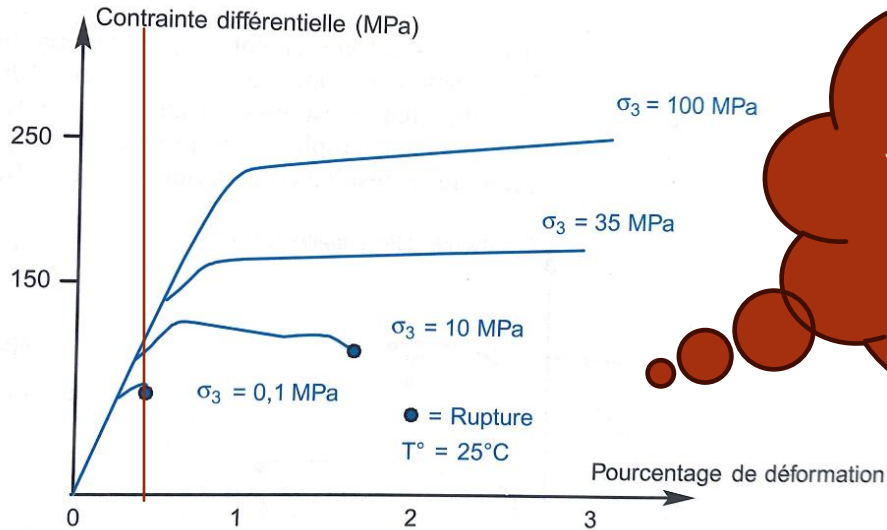


Figure 10.23 Graphe contrainte différentielle – déformation pour des marbres de Wombeyan déformés à vitesse 2000 par an. Source J Intègre 2008, Danod

Ainsi un marbre peut supporter un raccourcissement de 3 à 20% sans rupture dès que profondeur dépasse 35 MPa. Or 35 MPa est la pression à 1,05 km de profondeur  $\Rightarrow$  un marbre passe progressivement d'un comportement fragile à un comportement ductile lorsque la pression lithostatique augmente

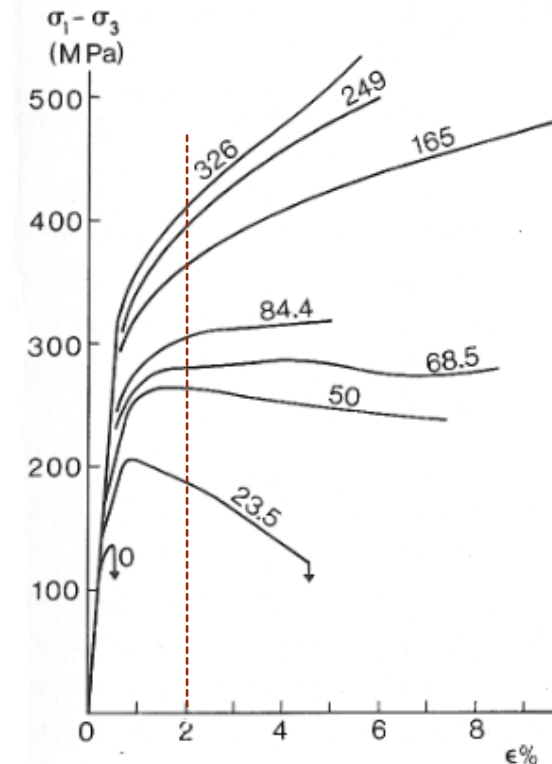


Figure Effects of pressure (left: Carrara marble) and temperature (right: granite) on the stress-strain behaviour of rocks. Numbers on curves give confining pressure (in MPa) and temperature (in  $^\circ\text{C}$ ), respectively (from Jaeger and Cook 1979).

Figure 28 : influence de la pression de confinement sur la déformation

# D. LES PARAMETRES QUI CONTROLENT LE COMPORTEMENT DES ROCHES

## 4. Température



- Plus la température  $\nearrow$  et plus la **résistance** de la roche  $\searrow$ , contrairement à P.
  - ⇒ La quantité de déformation que peut encaisser la roche augmente : elle devient **ductile, comme pour P**. En effet l'énergie est utilisée pour rompre les liaisons
  - ⇒ les déformations sont favorisées.
- L'effet de T sur la résistance est plus important que l'effet de P donc globalement la résistance diminue avec la profondeur (lithosphère devient Asthénosphère = sans résistance)
- Les hautes températures repoussent le seuil de rupture => la roche est plus ductile
- À  $T^{\circ}\text{C} > 500^{\circ}\text{C}$ , la déformation augmente malgré l'arrêt d'augmentation de contrainte déviatorique => **fluage**

Fluage: déformation à contrainte constante, conséquence de l'écoulement des particules.

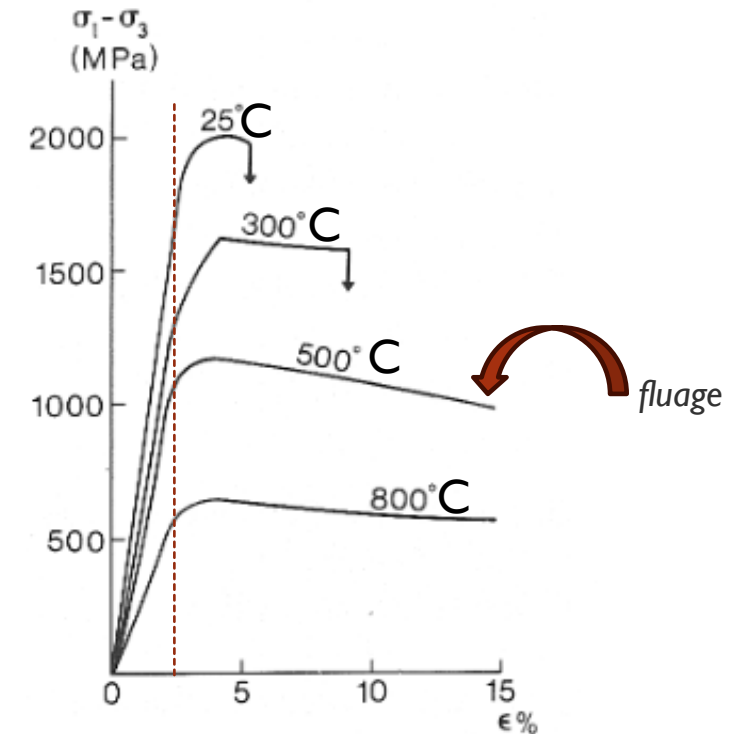


Figure Effects of pressure (left: Carrara marble) and temperature (right: granite) on the stress-strain behaviour of rocks. Numbers on curves give confining pressure (in MPa) and temperature (in °C), respectively (from Jaeger and Cook 1979).

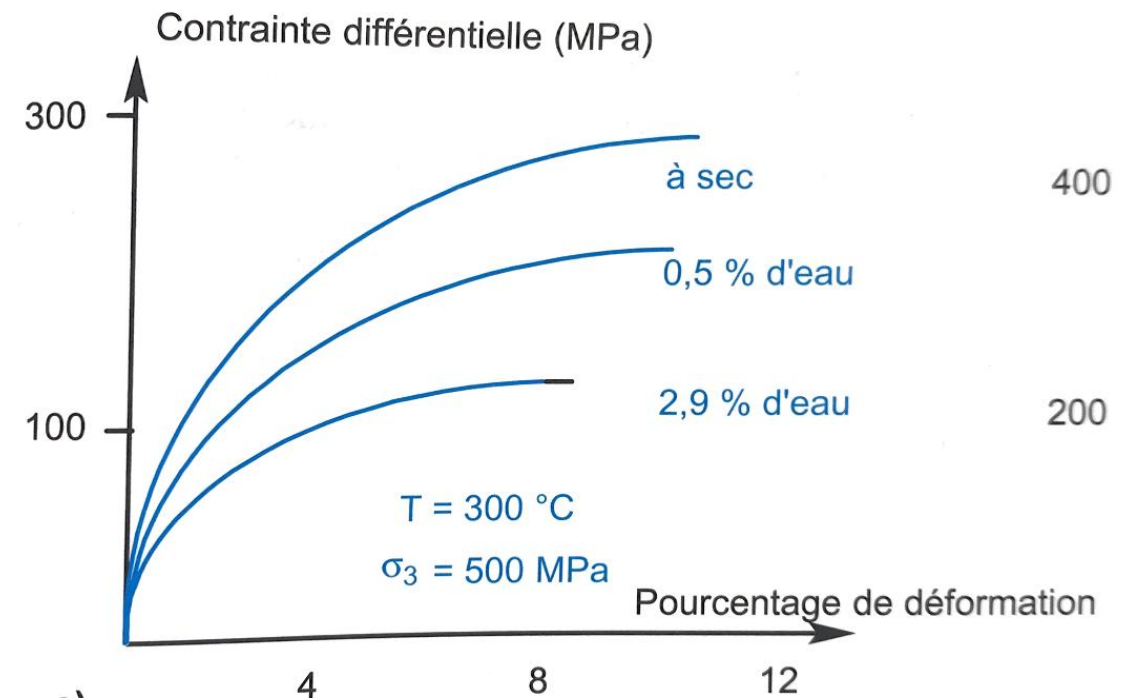
Figure 28 : influence de la température sur la déformation

## D. LES PARAMETRES QUI CONTROLENT LE COMPORTEMENT DES ROCHES

### 5. Présence de fluides



- L'eau diminue la résistance à la déformation (pour une contrainte déviatorique donnée, la déformation sera d'autant plus grande que la roche sera hydratée)
  - ⇒ la présence de fluide rend la roche plus ductile



Effet de la teneur en fluide sur la déformation des roches (J'intègre 2008, Dunod)

# D. LES PARAMETRES QUI CONTROLENT LE COMPORTEMENT DES ROCHES

## 6. Vitesse de déformation : uniquement pour les matériaux visqueux



Un Carambar a donc un comportement visqueux

- **Définition matériau visqueux** : pour un matériau visqueux, la **résistance dans le domaine de déformation irréversible dépend de la vitesse de contrainte** (mais si on impose une vitesse de contrainte, la résistance est fixe).
  - **⚠ Pour un matériau visqueux, la déformation irréversible ne correspond pas à un comportement plastique mais à un comportement visqueux.**
  - Lorsque la **vitesse de la contrainte augmente**, on observe que la **résistance de la roche augmente**
  - il existe un seuil = seuil cassant = la contrainte maximale que peut encaisser la roche avant de casser. Ce seuil dépend uniquement de la pression de confinement.
  - Ainsi, lorsque la **vitesse augmente**, on peut **passer d'un comportement ductile à la rupture**.
- ⇒ ceci explique que les roches se fracturent lors d'un séisme alors qu'elles peuvent présenter un comportement ductile sur des échelles de temps bcp plus longues (orogénèse par ex.).

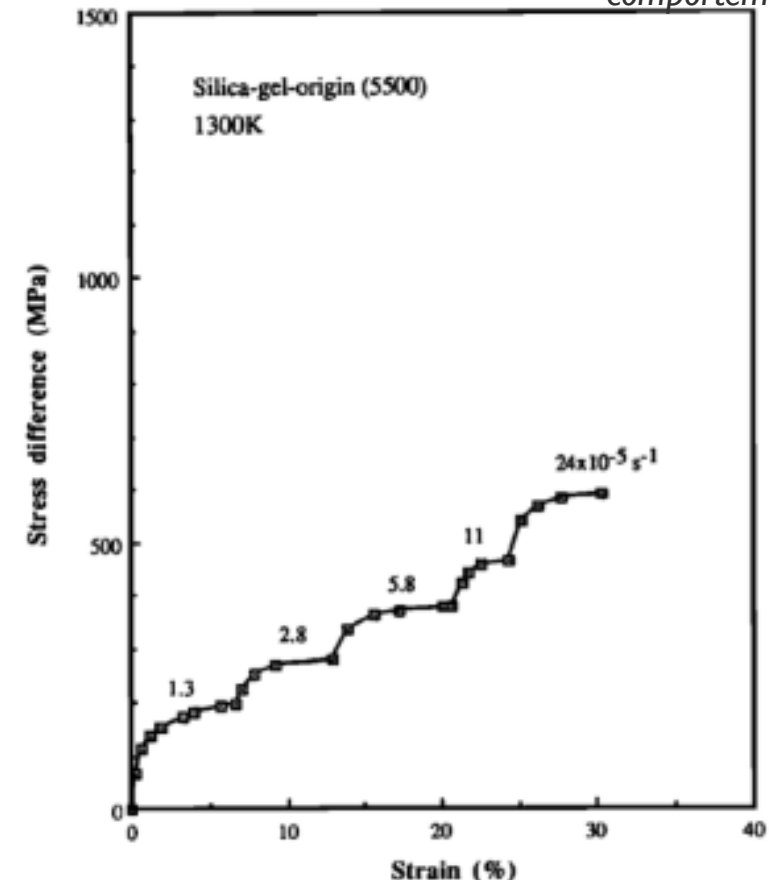


Figure 29 : influence de la vitesse de déformation (Les expériences sont réalisées avec des vitesses croissantes) 68

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# E. MÉCANISMES MIS EN JEU À L'ÉCHELLE CRISTALLINE

## I. Pression-dissolution : T basse



- La **pression-dissolution** : mécanisme qui repose sur la présence de fluides entre les grains de la roche et qui correspond à une dissolution des grains.
  - au niveau des **zones de contact** entre grains, la contrainte est maximale
    - ⇒ **Dissolution** (favorisée par la présence du fluide).
  - Les matériaux dissous se déposent au niveau des zones de **moindre contrainte** (ex: ombres de pression)
    - ⇒ **Recristallisation**
  - Les matériaux dissous peuvent migrer sur une longue distance et se déposer au niveau des fentes de tension

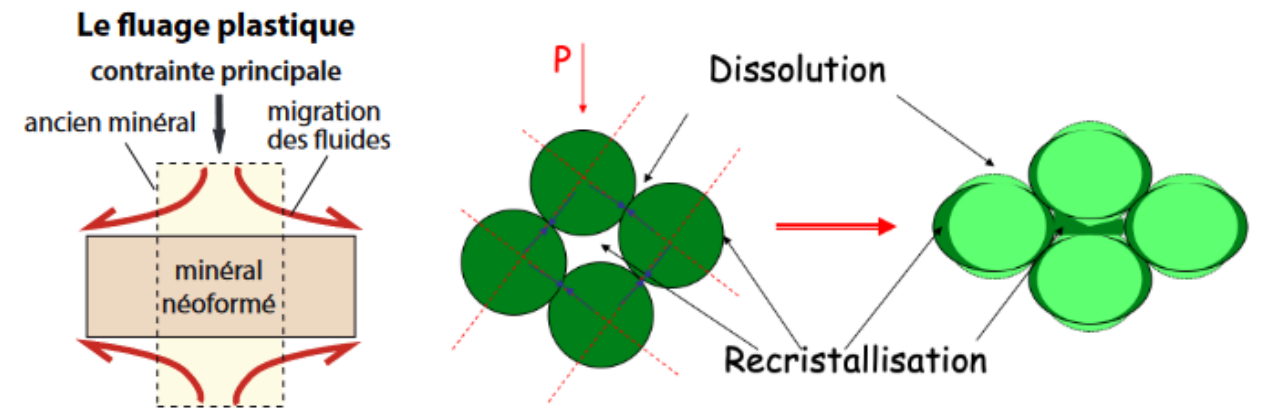
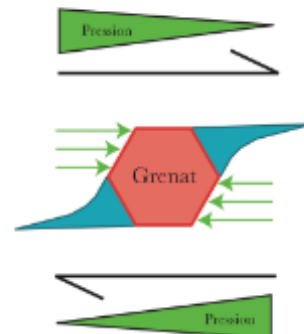
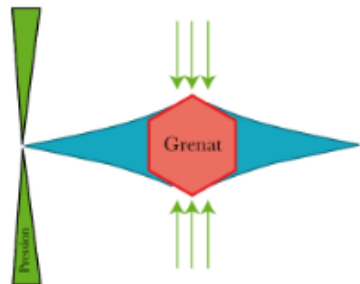


Figure 30 : pression – dissolution (dans Renard et al. 2016)

- Ce mécanisme est caractéristique d'un faible métamorphisme
- Cisaillement pur                      Cisaillement simple



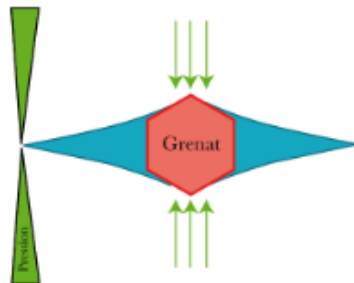
Ombres de pression sur une glaucophanite de faciès éclogetes de l'île de Groix.

# E. MÉCANISMES MIS EN JEU À L'ÉCHELLE CRISTALLINE

## I. Pression-dissolution : T basse

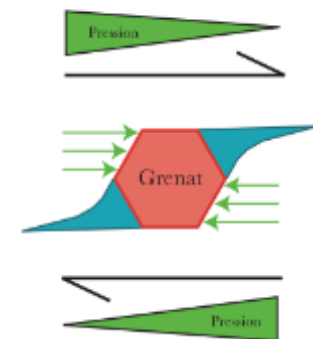


Cisaillement pur



Ombres de pression dissymétriques => déformation de type cisaillement simple

Cisaillement simple

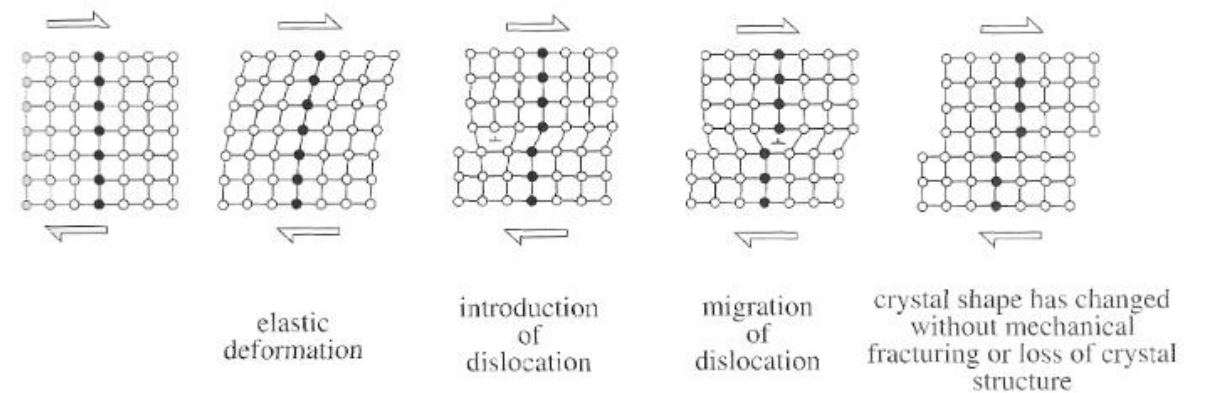


# E. MÉCANISMES MIS EN JEU À L'ÉCHELLE CRISTALLINE

## 2. Déformation intracrystalline



- Les cristaux contiennent naturellement des lacunes, des défauts. Sous l'effet des contraintes, les atomes voisins vont se déplacer et occuper ces lacunes, formant ainsi une nouvelle lacune. Les lacunes se déplacent ainsi de proche en proche et la forme du cristal change en permanence.
- La **déformation ductile** des roches repose en grande partie sur ce mécanisme : on parle de **fluage-dislocation**.
- **À haute température : déplacement des ions dans les cristaux: fluage-diffusion**



**Fig.** Deformation of a crystal by movement of an edge dislocation; the top half of the crystal is translated over one lattice unit to the *right* as a result of the passage of a single dislocation *from left to right*. View normal to the edge dislocation. One lattice plane is marked in *black* to show the relative displacement of the upper part of the crystal with respect to the lower part

Figure 31 : déformation intracrystalline (G2E/ENS)

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# III-TRANSFERT D'ECHELLE : LE COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA LITHOSPHERE

## A. COMPORTEMENT DE LA LITHOSPHERE SUR DIFFERENTES ECHELLES DE TEMPS

### I. Sur de courtes échelles de temps : déformation cassante

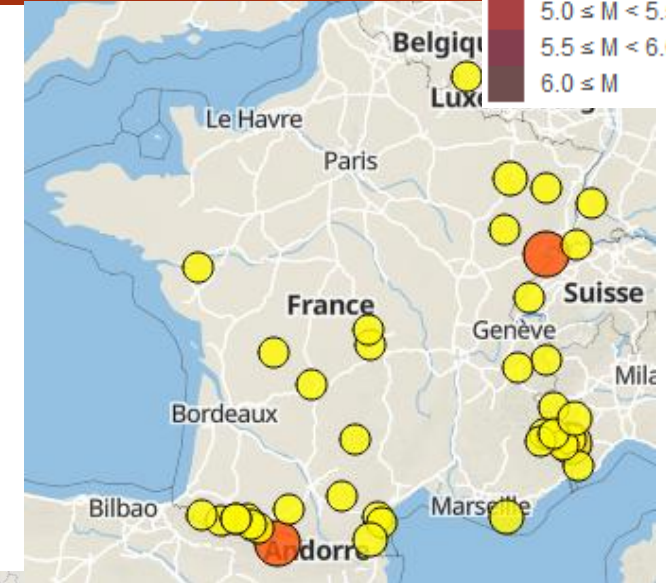
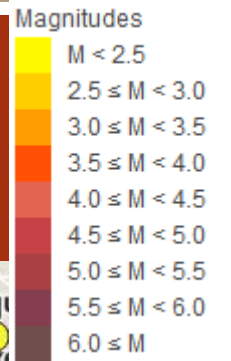
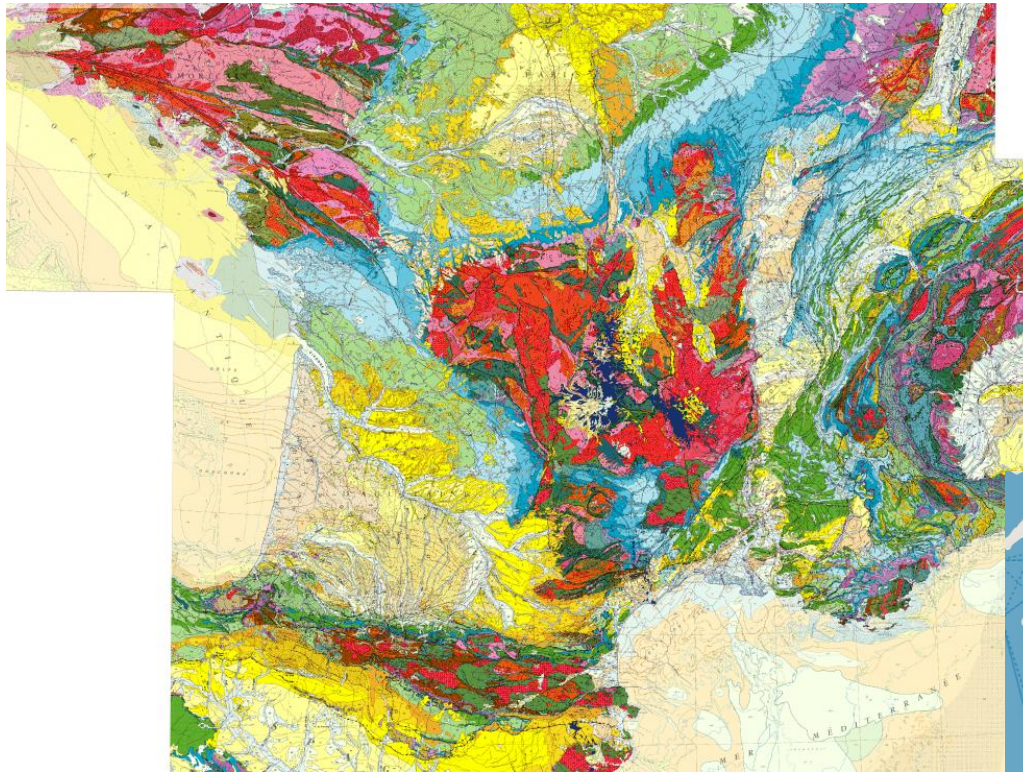
- Cycle sismique : dans une région soumise à des contraintes, les séismes (périodes cosismiques) alternent avec des périodes intersismiques cf chapitre STD-2
- Période intersismique : les roches se déforment de façon **élastique** puis **plastique**, la contrainte déviatorique s'accumule
- Séisme : il se produit lorsque les contraintes accumulées dépassent la capacité de résistance. Lors de la rupture, l'énergie élastique emmagasinée est libérée.
  
- Cf TD rhéologie/séismes: Exemple : faille de San Francisco : dans certaines parties, elle glisse régulièrement de 1 à 2 cm par an. Au voisinage de San Francisco, elle est bloquée : en 1906, date du dernier séisme, le déplacement fut d'environ 5m

# III- TRANSFERT D'ECHELLE : LE COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA LITHOSPHERE

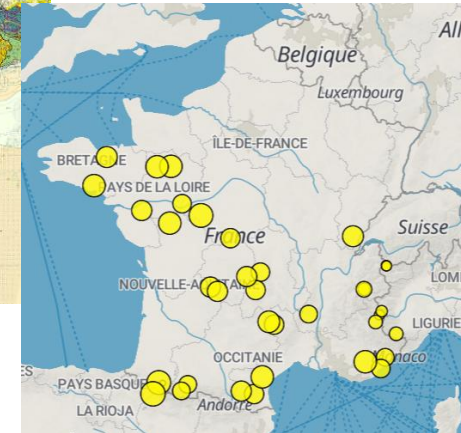
## A. COMPORTEMENT DE LA LITHOSPHERE SUR DIFFERENTES ECHELLES DE TEMPS

### 2. Sur des échelles de temps plus longues : déformation ductile

- Observation de déformations ductiles au niveau des chaînes de montagne par exemple



Derniers évènements sismiques survenus en France hexagonale ou à proximité (mardi 27/02/24)  
<https://renass.unistra.fr/fr/zones/france/>



Derniers évènements sismiques survenus en France hexagonale ou à proximité (lundi 16/02/26)  
<https://renass.unistra.fr/fr/zones/france/>

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# B. CONSTRUCTION DES ENVELOPPES RHEOLOGIQUES

## I. Résultats de laboratoire

### I.1. Etude du comportement fragile (cassant) : travaux de Byerlee

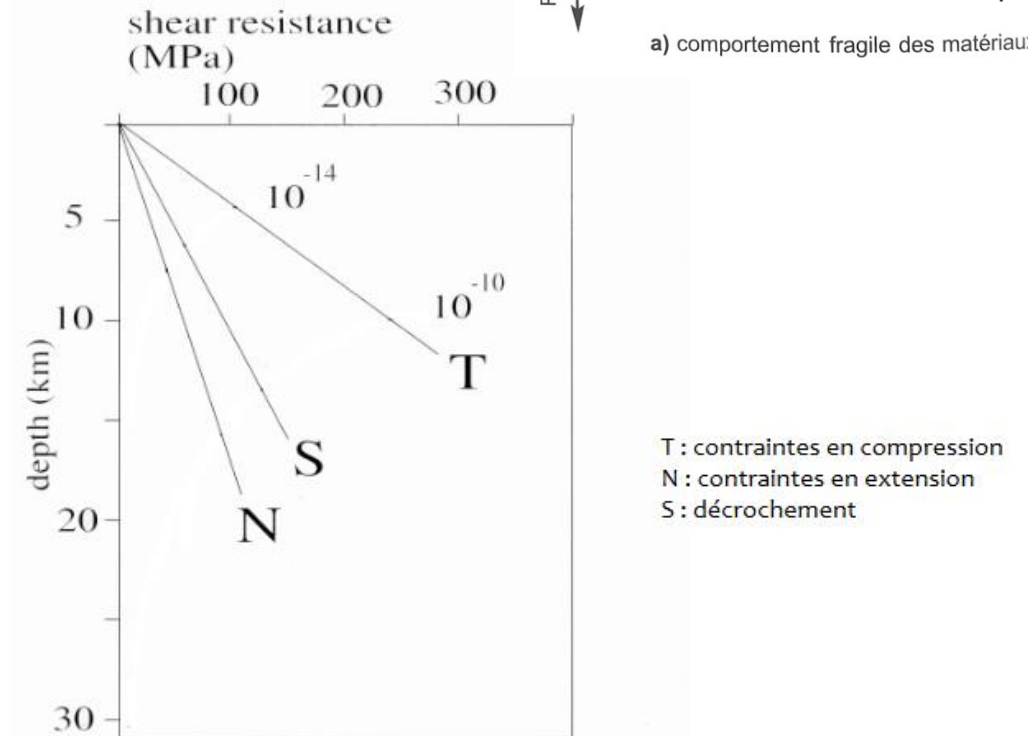
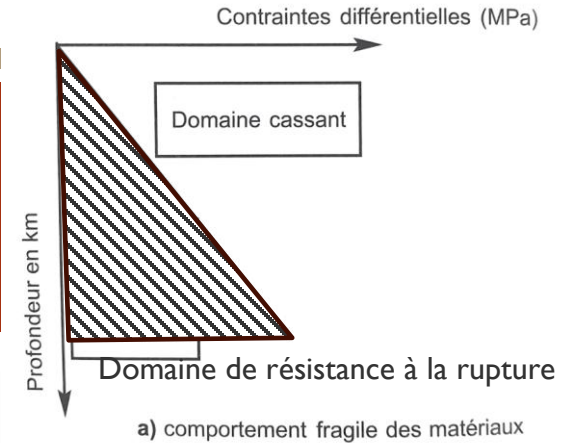
- En 1978, le géophysicien James **Byerlee** : utilisation de **roches préfracturées** (gabbros, calcaires, granites, péridotites...) et recherche la contrainte différentielle nécessaire pour provoquer glissement sur plans de faille
  - à **T ambiante**, il mesure la valeur de  $\sigma$  déviatorique nécessaire au glissement sur les plans de failles (=friction).

- la fonction qui relie la valeur du déviateur nécessaire et la profondeur est une **droite!**
- le seul **paramètre** qui influence la pente de cette droite est la présence de **fluides**.

cette loi (loi de Byerlee) est **indépendante du minéral ou de la roche choisie**

- seule la pente de la droite change suivant le contexte compressif ou extensif, ce qui revient à dire qu'une **roche casse plus vite en extension qu'en compression. Cette droite dépend donc du contexte géodynamique.**

En définitive, la **résistance au mouvement** sur un plan de faille préexistant obéit à une **loi unique indépendante du gradient géothermique et indépendante du matériel** : la loi de Byerlee. Elle dépend cependant du **contexte géodynamique**.

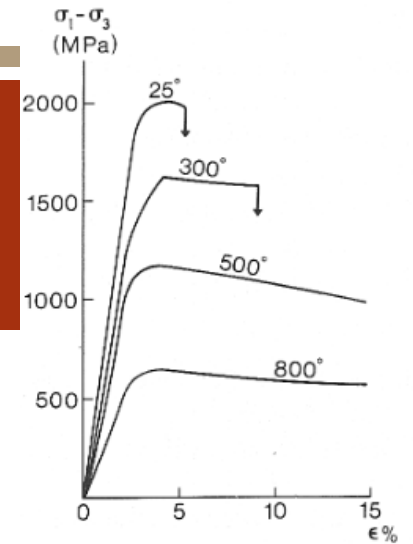


Depth-strength diagram for quartz at a geothermal gradient of 30 °C/km and hydrostatic fluid pressure in brittle faults (based on Sibson 1983). *Straight lines* are strength of brittle fracturing for thrust (*T*), strike-slip (*S*) and normal faults (*N*). *Curved lines* are for dislocation creep at strain rates of  $10^{-14}$  and  $10^{-10} \text{ s}^{-1}$

# B. CONSTRUCTION DES ENVELOPPES RHEOLOGIQUES

## I. Résultats de laboratoire

### I.2. Etude du comportement ductile : travaux de BYERLEE



L'étude de la résistance de matériaux de la lithosphère en domaine ductile s'effectue à **plus haute température**

**Rappel: le fluage est atteint à plus faible contrainte quand T°C ↗, or T°C ↗ quand P ↗**

la **résistance en domaine ductile** correspond à une **courbe**

- à gauche de la courbe: il ne se passe rien (résistance à la déformation ductile)
- sur la courbe: le fluage commence
- à droite : domaine qui n'existe pas puisqu'une fois que le fluage commence, la déformation se poursuit sans augmentation de contrainte

La roche flue pour la même contrainte déviatorique en compression ou en extension;

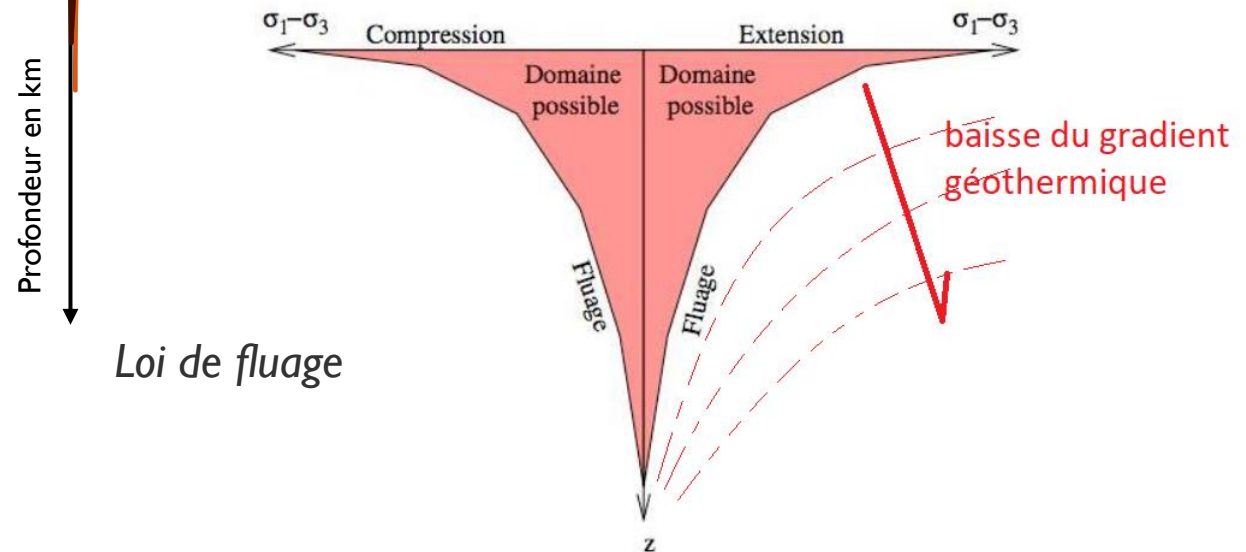
Courbe de fluage **dépend:**

- **du gradient géothermique ;**
- Du **minéral** ou de la roche choisie
- de la **vitesse** de déformation puisqu'on regarde ici la résistance visqueuse.

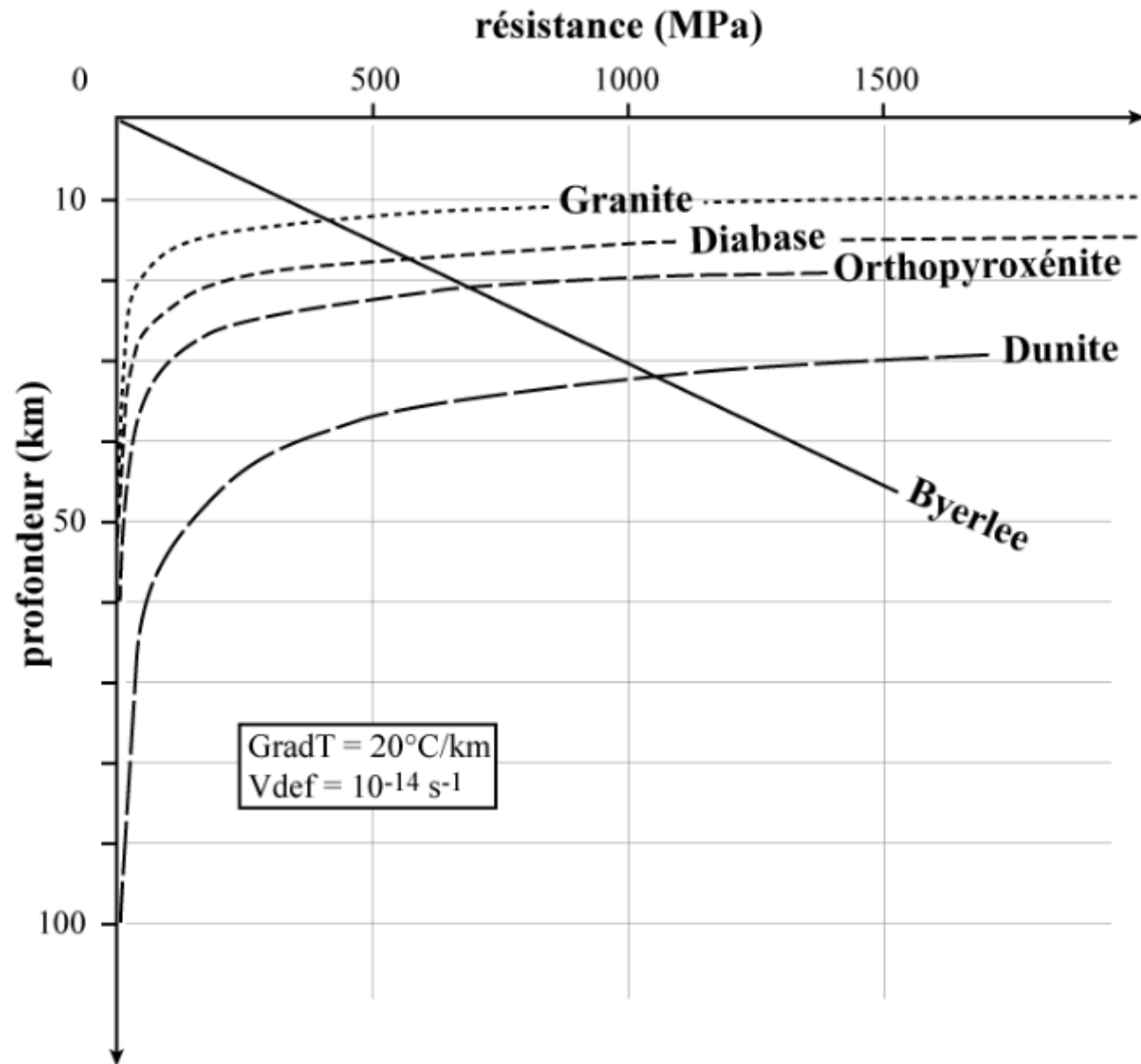
Domaine de résistance à la déformation ductile

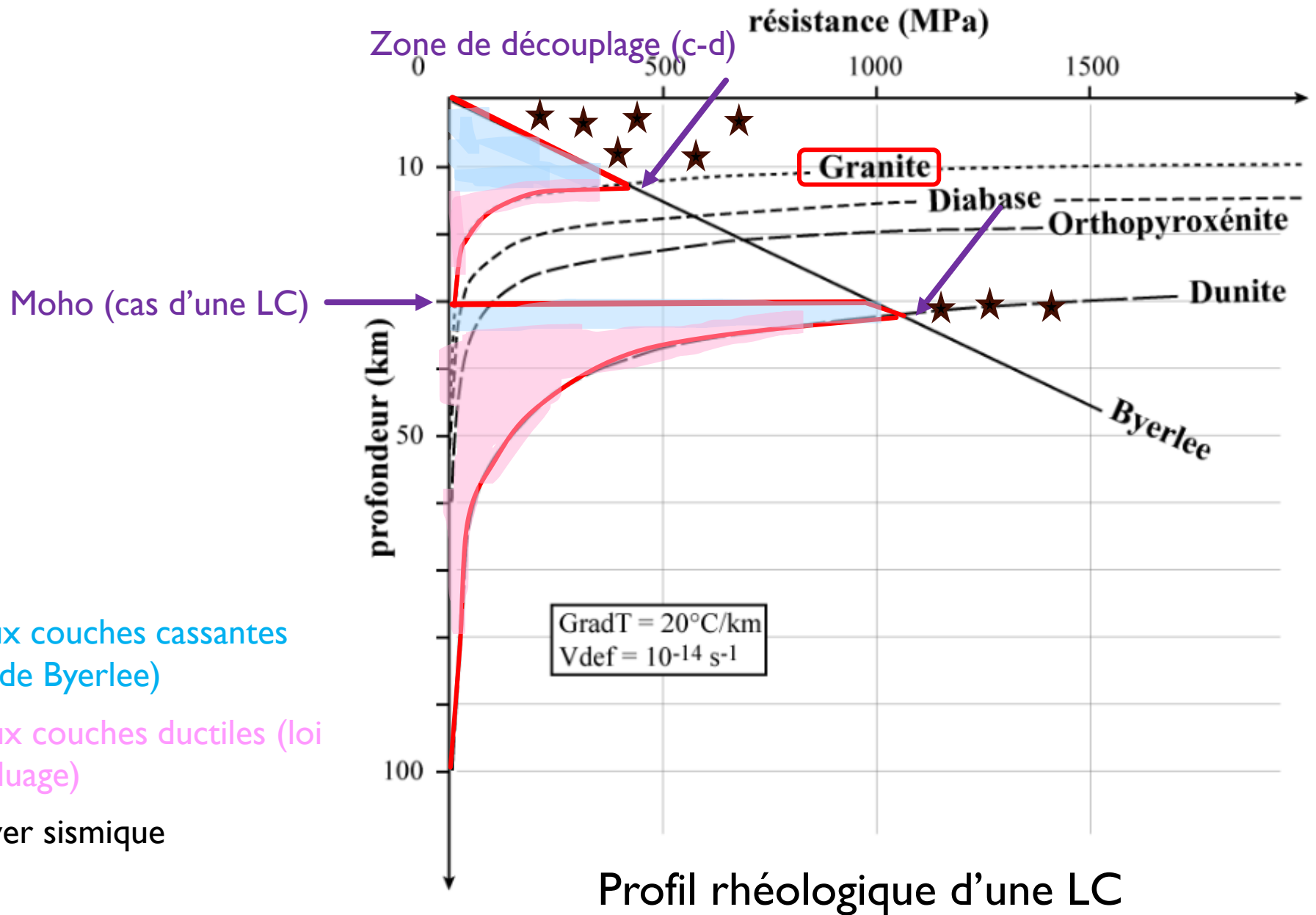
Contrainte différentielle  $\sigma_1 - \sigma_3$  (MPa)

Courbe de déformation ductile



Loi de fluage



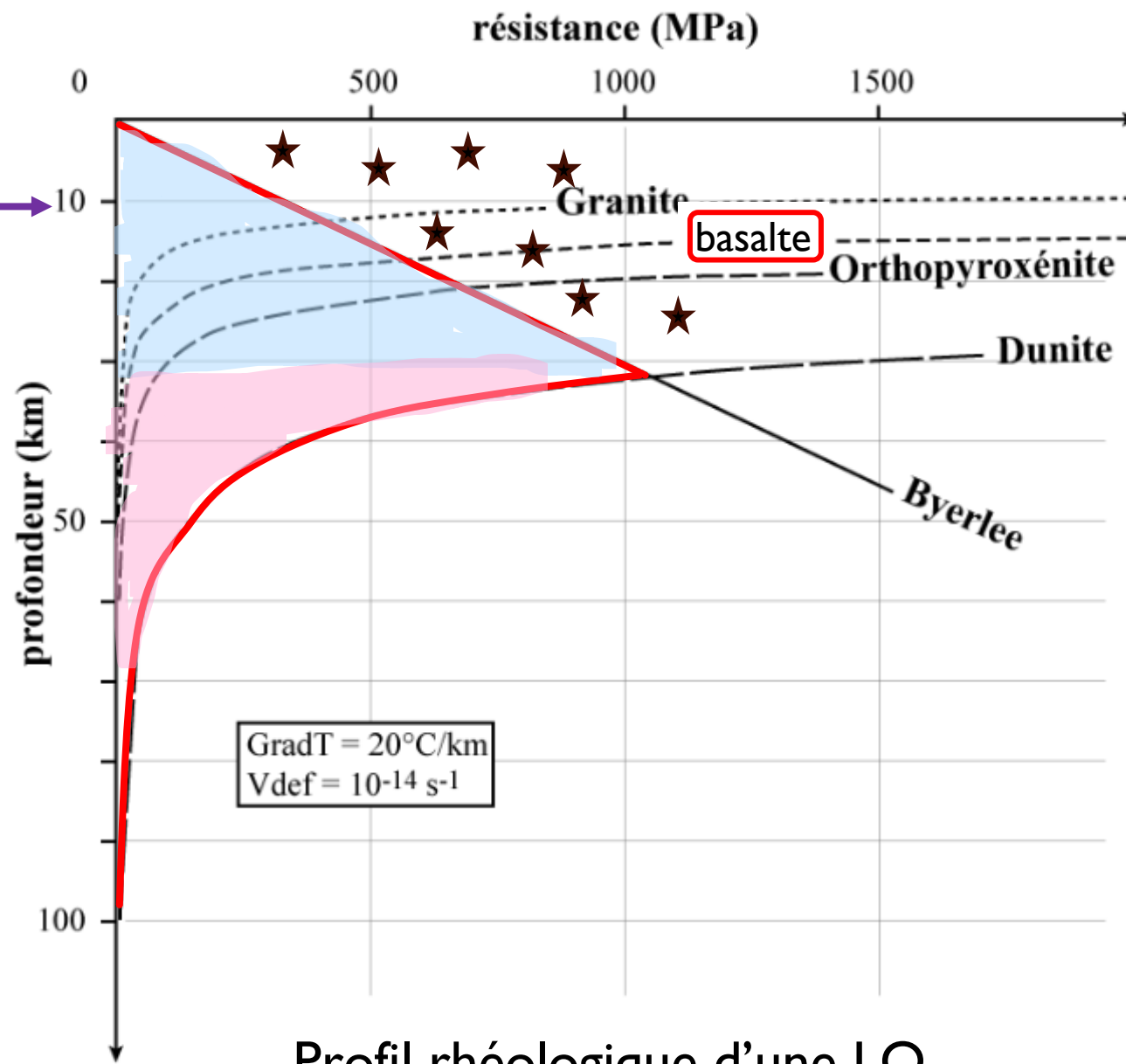


Structure « jelly sandwich »

- Deux couches cassantes (loi de Byerlee)
- Deux couches ductiles (loi de fluage)
- ★ Foyer sismique

Profil rhéologique d'une LC

Moho (cas d'une LO) →



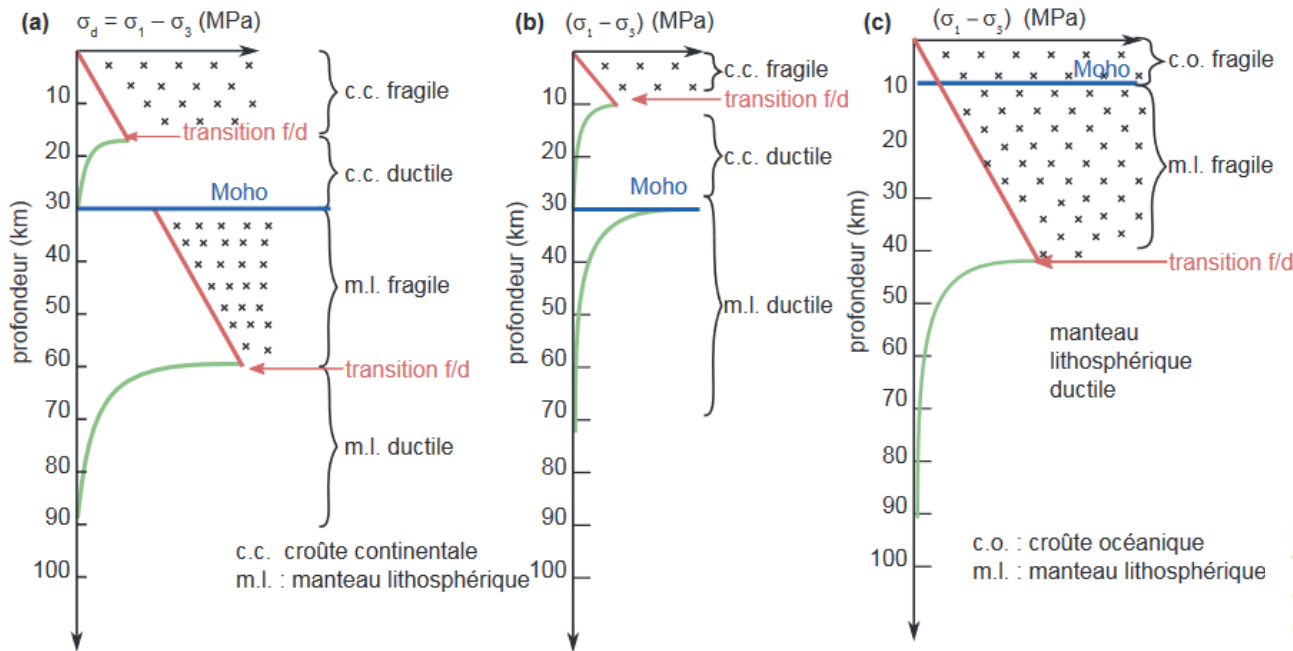
Structure « crème brûlée »

# B. CONSTRUCTION DES ENVELOPPES RHEOLOGIQUES

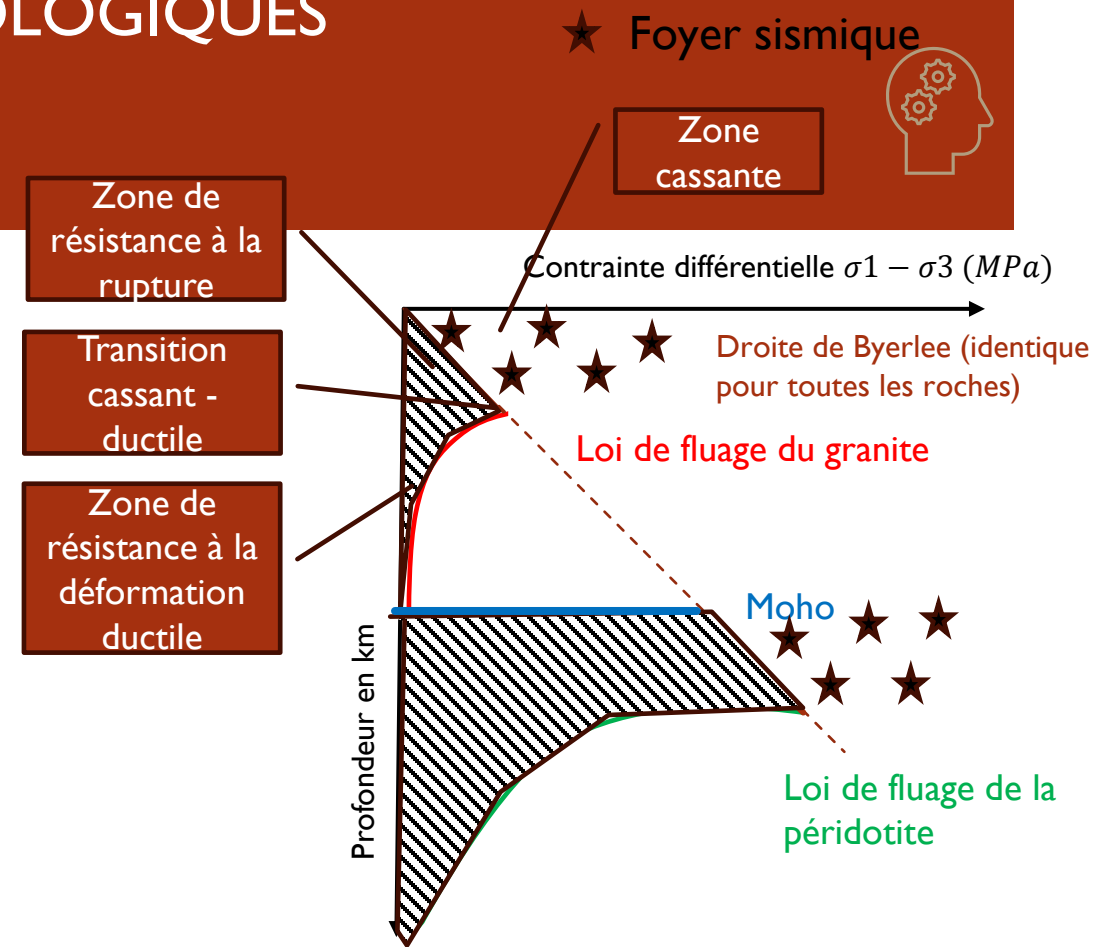
## I. Résultats de laboratoire

### I.2. Bilan

- Ainsi, quand la profondeur augmente, on passe d'un comportement cassant à un comportement ductile. Par exemple, la croûte supérieure se fracture alors que la croûte inférieure se déforme plastiquement.
- A partir des études de laboratoire sur des roches représentatives des différentes enveloppes, il est possible de **représenter** un profil de résistance de la lithosphère = les enveloppes rhéologiques



Profils rhéologiques. (Dunod 2021)



Les croix indiquent la localisation possible des foyers sismiques. (a) Lithosphère continentale avec un gradient géothermique faible - Moho à 500 °C soit 17°.km<sup>-1</sup>; (b) lithosphère continentale avec un gradient géothermique plus fort - Moho à 900 °C soit 30°.km<sup>-1</sup> et (c) lithosphère océanique avec un gradient géothermique faible.

Transition f/d: fragile /ductile

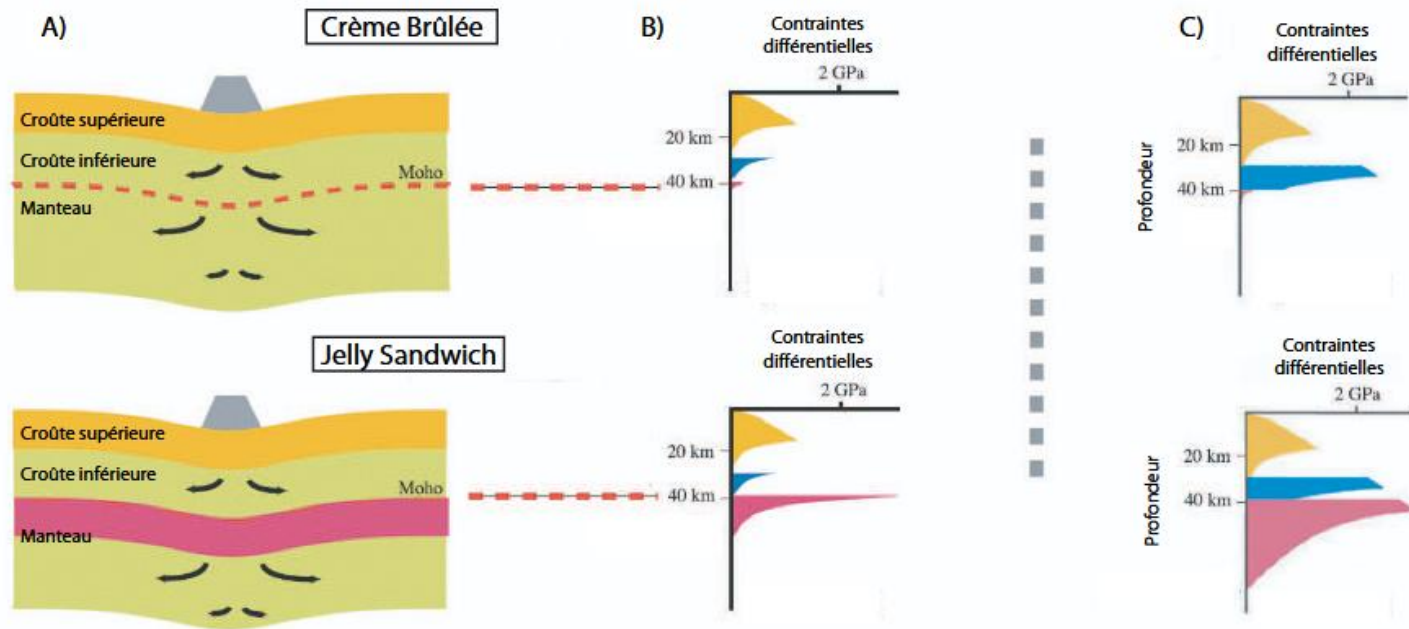


FIG. 3.2 Représentation des deux types de structure pour la lithosphère. Dans la structure « crème brûlée », la croûte supérieure est fragile alors que la croûte inférieure et le manteau sont ductiles. Pour la structure « jelly sandwich », une partie du manteau est également résistante et la croûte inférieure est comme de la confiture prise entre les deux parties solides. (A) Schéma des deux structures. Les flèches indiquent le flux de matière sous l'action d'une charge se situant en surface de la lithosphère. (B) Rhéologie d'une lithosphère âgée d'environ 150 Ma, ce qui correspond à une lithosphère océanique. Bien que le manteau soit un peu plus résistant dans la structure « jelly sandwich », la partie fragile est constituée de la croûte supérieure dans les deux cas. (C) Pour une lithosphère plus vieille (environ 500 Ma) correspondant à une partie continentale, la première structure n'est résistante qu'au niveau de la croûte, alors que dans la deuxième une partie du manteau l'est également. Figure d'après [Burov & Watts \(2006\)](#).

Étude mécanique de la crise sismique sud-islandaise de juin 2000 par modélisation numérique tridimensionnelle : effets rhéologiques et géométriques  
Thèse de Loïc Dubois, Mars 2008

# B. CONSTRUCTION DES ENVELOPPES RHEOLOGIQUES

## 2. MODÈLE DE LA LITHOSPHERE

- La déformation de la roche (cassante ou ductile) sera celle correspondant à la **résistance minimale** : c'est le **mécanisme de déformation de plus faible résistance qui gouverne le comportement de la roche**.
- Pour un matériau donné et un gradient géothermique donné, le point **d'intersection** entre la loi de Byerlee et la loi de fluage correspond à la **transition fragile-ductile**.
- Les domaines possibles sont à gauche des courbes de fluage et de la droite de Byerlee.

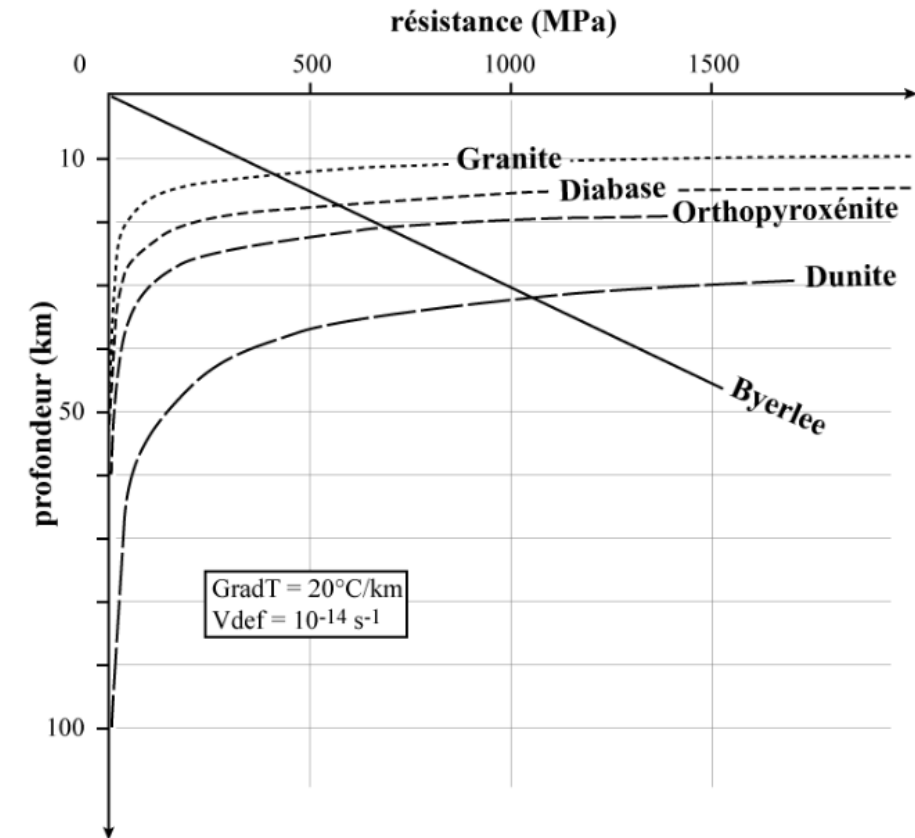
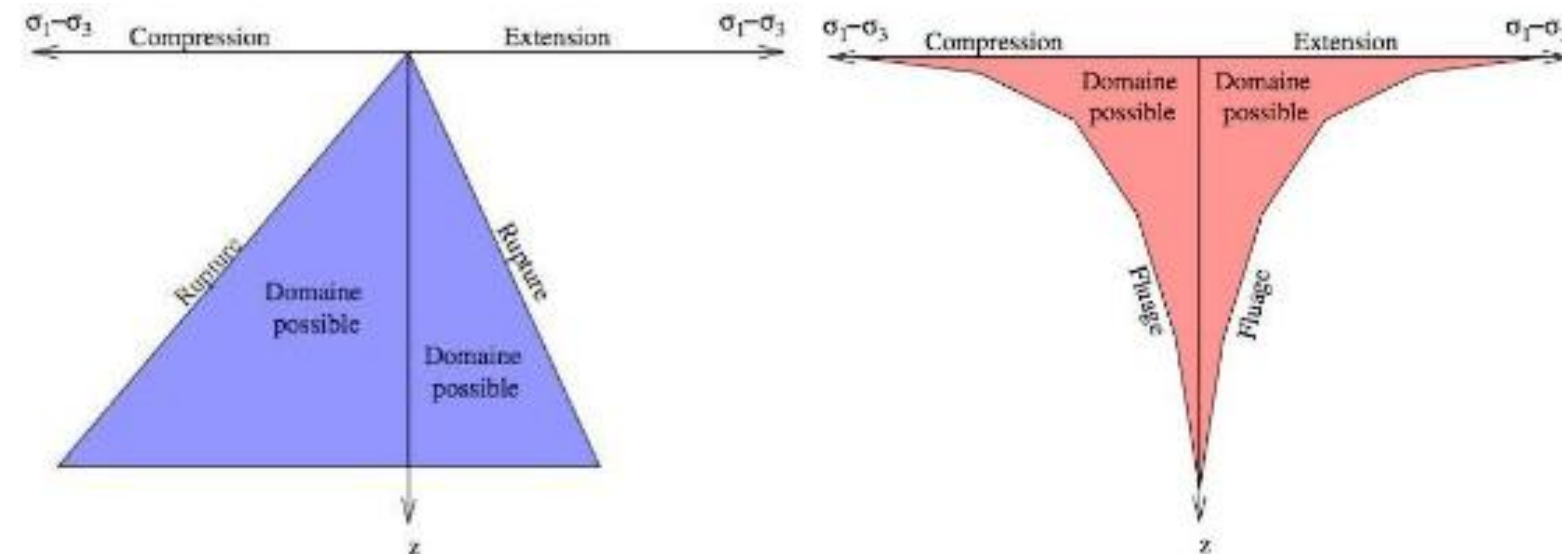


Figure 33 : association de la loi de Byerlee et de la loi de fluage



# B. CONSTRUCTION DES ENVELOPPES RHEOLOGIQUES

## 2. Modèle de la lithosphère

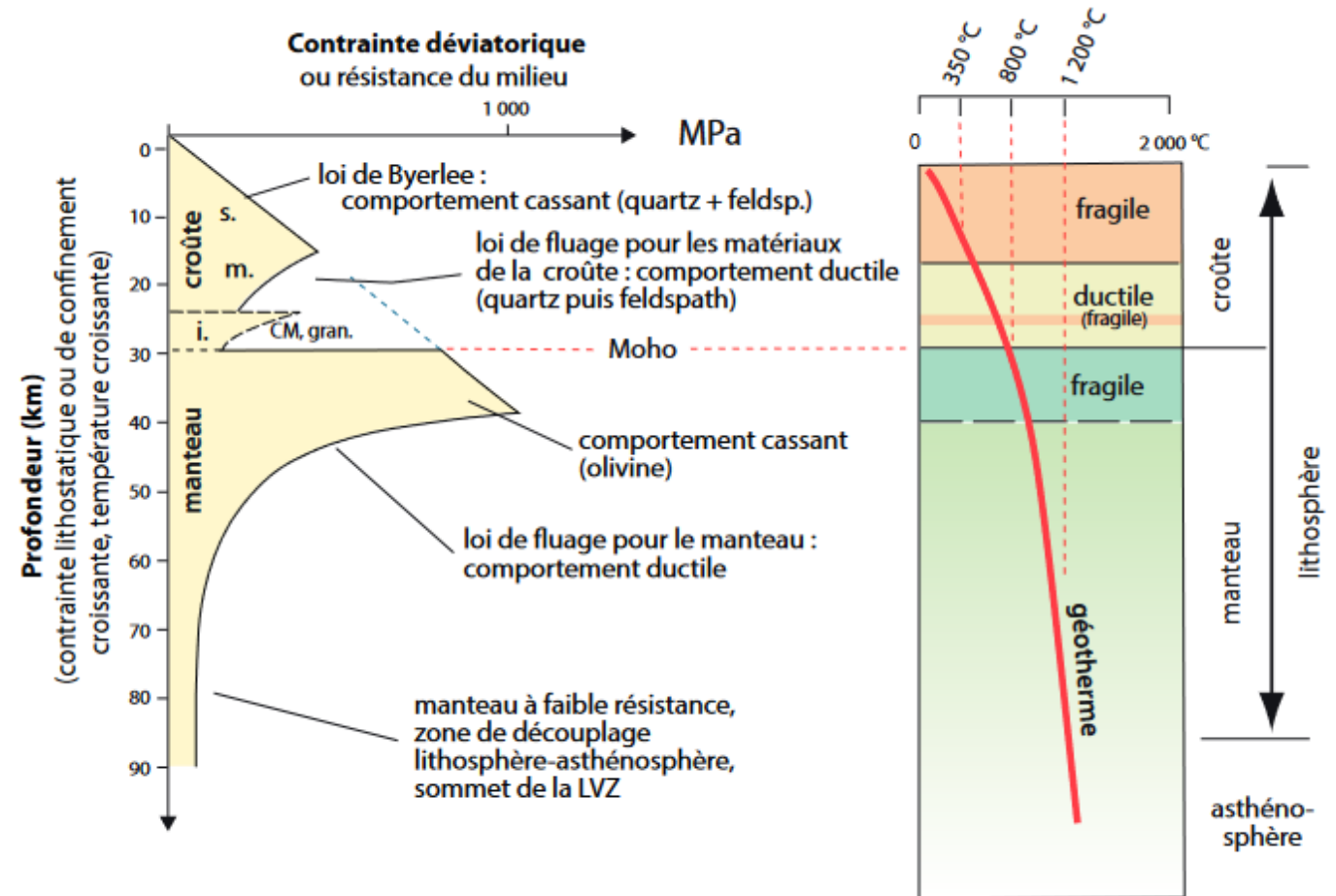
### ■ Profil de lithosphère continentale :

- **Croûte** : croûte supérieure = comportement fragile (cassant, elle suit la loi de Byerlee)
- croûte moyenne et inférieure = comportement ductile (elle suit une loi de fluage).

=> au cours de collisions, la croûte inférieure peut constituer un **niveau de découplage** entre la croûte supérieure et le manteau

### ■ Manteau :

- manteau lithosphérique = comportement fragile dans sa partie supérieure
- Manteau inférieur = comportement ductile → découplage lithosphère- asthénosphère (sommet de la LVZ)
- Asthénosphère proche du point de fusion → très peu résistante (Asthénosphère = sans résistance)



# B. CONSTRUCTION DES ENVELOPPES RHEOLOGIQUES

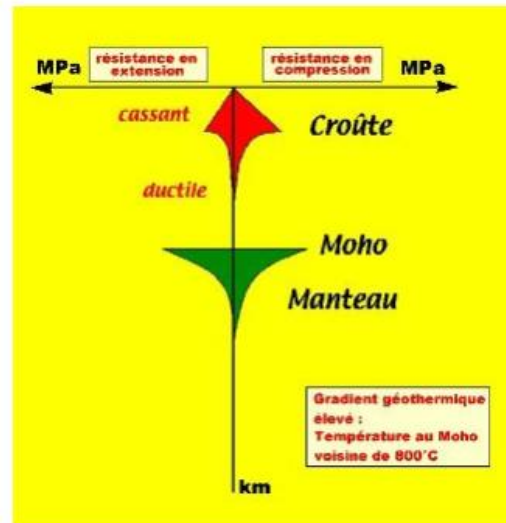
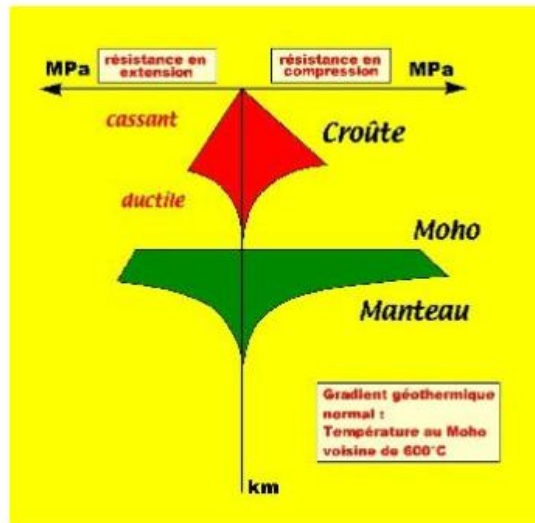
## 2. Modèle de la lithosphère

### ■ Profil de lithosphère océanique

Elle est totalement fragile ce qui a 2 conséquences :

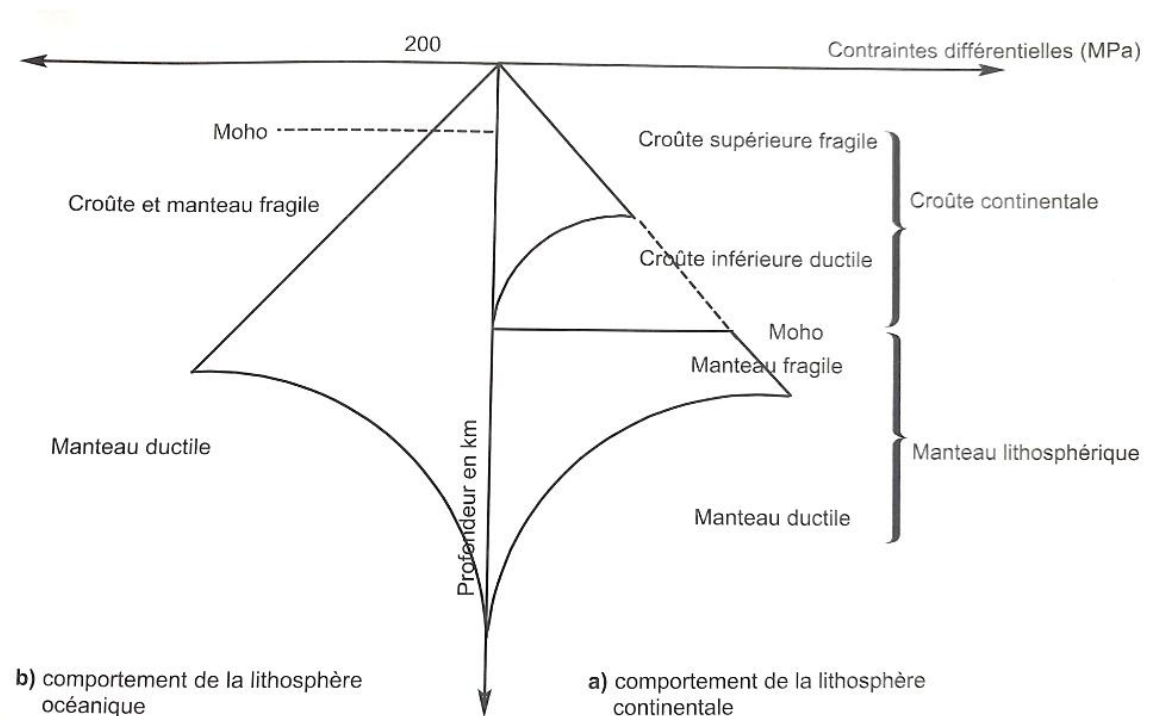
- la LO se fracture sur toute la hauteur de la croûte et l'eau peut donc aller jusqu'au manteau pour l'hydrater (metam hydrothermal)
- il n'y a pas de découplage au niveau de la LO qui passe en subduction

### ■ le gradient géothermique modifie le profil



Profil rhéologique en extension et en compression pour un gradient géothermique normal.

Profil rhéologique en extension et en compression pour un gradient géothermique élevé.



b) comportement de la lithosphère océanique  
a) comportement de la lithosphère continentale  
Figure 10.30 Profils rhéologiques de la lithosphère continentale (a) et de la lithosphère océanique (b).

Figure 35 : profils rhéologiques de la lithosphère continentale (a) et de la lithosphère océanique (b) (dans J'intègre 2008, Dunod)

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# C.VALIDATIONS ET INTERROGATIONS DU MODELE PAR LES DONNEES DE TERRAIN

## I. Distribution verticale des séismes en profondeur

- Lien entre profil rhéologique et distribution des séismes en profondeur

Exemple de la faille San Andreas : on n'observe pas de séisme à plus de 20km de profondeur, cohérent avec l'enveloppe rhéologique

- La **distribution verticale** des séismes est :
  - **Exclusivement lithosphérique** (car seule la litho peut accumuler l'énergie élastique).
  - **En domaine continental : en sandwich**, les séismes sont localisés, comme on l'attend d'après l'enveloppe rhéologique (*croûte supérieure sismique fragile / croûte inférieure asismique ductile / manteau supérieur sismique fragile*) :
    - ✓ dans la **croûte supérieure** : moins de 20 km de profondeur,
    - ✓ dans le **manteau lithosphérique supérieur** : entre Moho et LVZ.

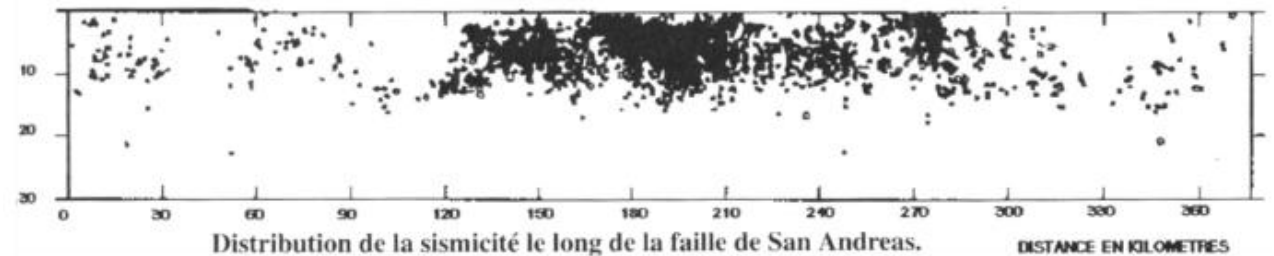


Figure 35 : profondeur des séismes au niveau de la faille de San Andreas

- **Limite d'application des enveloppes rhéologiques**

Au niveau des zones de subduction, on a des séismes entre 50 et 300 km de profondeur pour la plaque plongeante. La loi de Byerlee montre qu'il faudrait des contraintes déviatoriques énormes pour que la lithosphère casse... il y a donc d'autres mécanismes mis en jeu. En cours d'étude.

# C.VALIDATIONS ET INTERROGATIONS DU MODELE PAR LES DONNEES DE TERRAIN

## 2. Transition fragile/ductile et niveaux de découplage de la lithosphère

- Le modèle rhéologique de la lithosphère prévoit que la croûte continentale supérieure a un comportement fragile alors que la croûte inférieure a un comportement ductile
  - ⇒ On s'attend à des **niveaux de décollement possibles** (= *niveaux de découplage*) à différentes discontinuités :
  - à la **base de la croûte supérieure** : elle devrait, sous contrainte, glisser sur la croûte inférieure ductile.
  - au niveau du **Moho** : le manteau lithosphérique supérieur devrait pouvoir être subduit sous la croûte inférieure ductile.
  - on s'attend à des déformations parfois très éloignées des lieux d'origine des mouvements tectoniques.

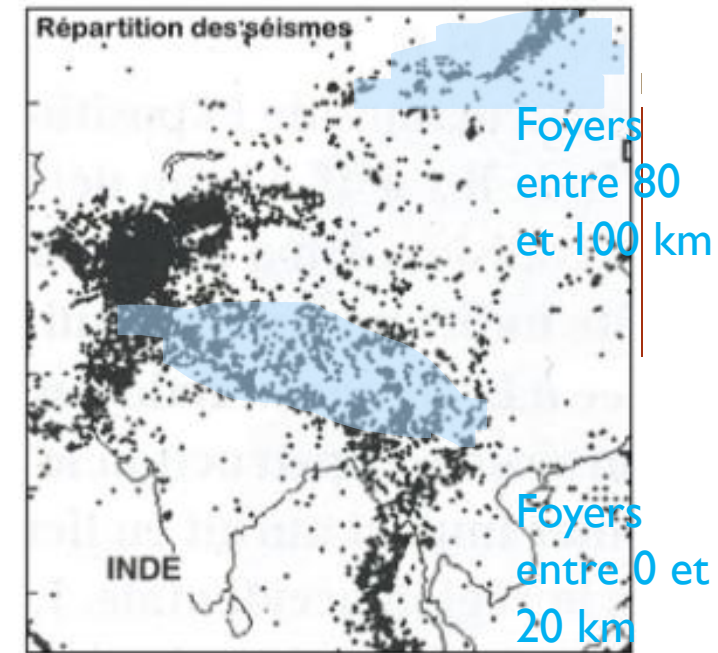
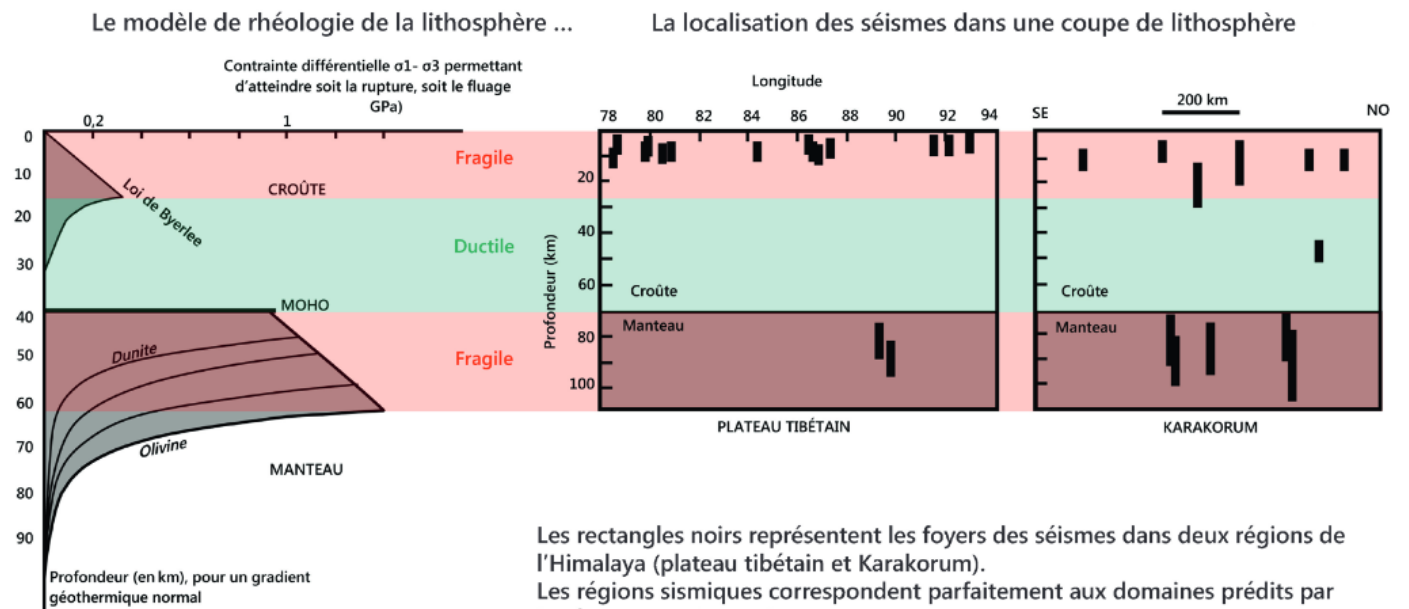


Figure 36 : répartition des séismes au niveau de l'Himalaya



Les rectangles noirs représentent les foyers des séismes dans deux régions de l'Himalaya (plateau tibétain et Karakorum). Les régions sismiques correspondent parfaitement aux domaines prédits par les études en laboratoire.

► Figure 21.13. La localisation des foyers sismiques est en adéquation avec le comportement rhéologique théorique déduit des études par presse.

# C.VALIDATIONS ET INTERROGATIONS DU MODELE PAR LES DONNEES DE TERRAIN

## 2. Transition fragile/ductile et niveaux de découplage de la lithosphère

- Le modèle rhéologique de la lithosphère prévoit que la croûte continentale supérieure a un comportement fragile alors que la croûte inférieure a un comportement ductile

=> On s'attend à des **niveaux de décollement possible** (= *niveaux de découplage*) à différentes discontinuités :

- à la **base de la croûte supérieure** : elle devrait, sous contrainte, glisser sur la croûte inférieure ductile.
- au niveau du **Moho** : le manteau lithosphérique supérieur devrait pouvoir être subduit sous la croûte inférieure ductile.

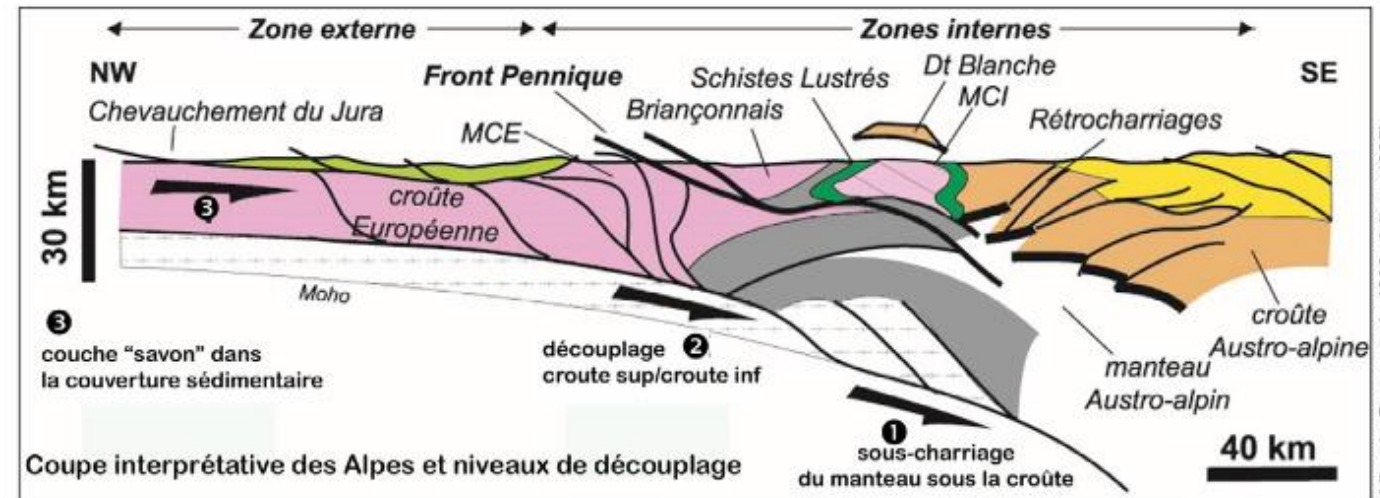


Figure 37 : coupe interprétative des Alpes et niveaux de découplage

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

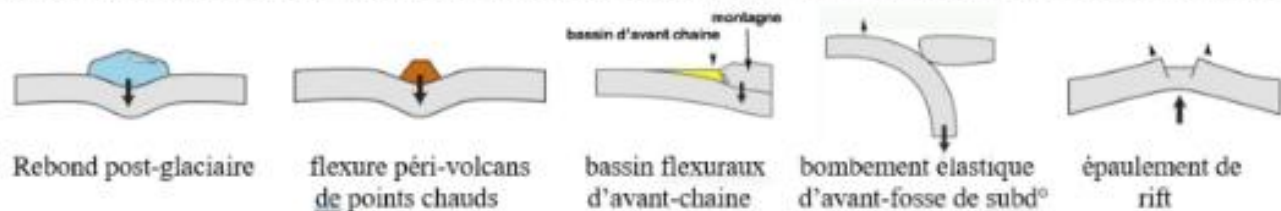
## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

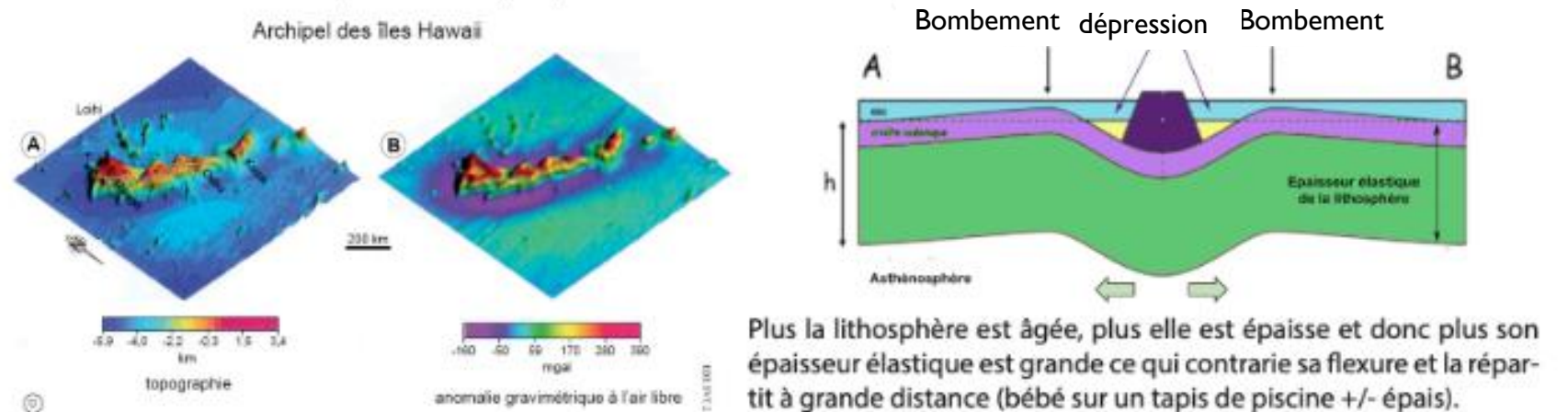
# D. COMPORTEMENT GLOBAL ELASTIQUE DE LA LITHOSPHERE

- Le modèle rhéologique ne prévoit pas un comportement élastique de la lithosphère à grande échelle, pourtant détecté par différents moyens (anomalies gravimétriques, topographie, sismique réflexion, suivi GPS, localisation du Moho) dans différents contextes : **rebond post-glaciaire**, **flexure** (volcans, chaines de montagnes, bombement avant-fosse, épaulement de rift...)

Le modèle rhéologique ne prévoit pas un comportement élastique de la lithosphère à grande échelle, pourtant détecté par différents moyens (anomalies gravimétriques, topographie, sismique réflexion, suivi GPS, localisation du Moho) dans différents contextes :



**Ex.** : le creux topographique et le déficit de masse observé de part et d'autre des alignements d'îles volcaniques est interprété comme la flexure de la lithosphère océanique qui s'enfonce dans l'asthénosphère sous le poids de l'édifice et flue latéralement.



Plus la lithosphère est âgée, plus elle est épaisse et donc plus son épaisseur élastique est grande ce qui contrarie sa flexure et la répartit à grande distance (bébé sur un tapis de piscine +/- épais).

Figure 38 : comportement global élastique de la lithosphère

# PLAN

## I. Mise en évidence des différents types de déformation

- A. Déformations à l'échelle régionale
- B. Déformations à l'échelle de la roche
- C. Définitions: ellipsoïde des déformations

## II. Etude expérimentale du comportement mécanique des roches

- A. Définition de l'ellipsoïde des contraintes:  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$
- B. Méthode d'étude du comportement des roches
- C. Quels sont les résultats obtenus
- D. Les paramètres qui contrôlent le comportement des roches
- E. Mécanismes mis en jeu à l'échelle cristalline

## III. Transfert d'échelle: le comportement mécanique de la lithosphère

- A. Comportement de la lithosphère sur différentes échelles de temps
- B. Construction des enveloppes rhéologiques
- C. Validations et interrogations du modèle par les données de terrain
- D. Comportement global élastique de la lithosphère
- E. Déformations en champ lointain et flambage de la lithosphère

# E. DEFORMATIONS EN CHAMP LOINTAIN ET FLAMBAGE DE LA LITHOSPHERE

- Des Alpes au bassin de Londres, deux séries de plis aux axes perpendiculaires sont identifiables :
  - **plis d'axes NO-SE** → raccourcissement imposé par l'orogénèse pyrénéenne (Crétacé sup à Eocène)
  - **plis d'axes NE-SO** → raccourcissement imposé par l'orogénèse alpine (Oligocène à actuel).
- Au centre, on trouve des **massifs anciens** (Massif Armoricain, Massif Central), des **bassins** (Bassin Aquitain, Bassin Parisien) et des **seuils** (seuil du Poitou, entre MA et MC et qui sépare BA et BP, seuil du Morvan, qui sépare BP et bassin du sud-est)
- Toutes ces structures peuvent être interprétées comme des **interférences de plis** d'axes perpendiculaires :
  - **interférence d'anticlinaux** = **dômes** (MA, MC)
  - **interférence de synclinaux** = **bassins** (BA, BP)
  - **interférence antisyndinal** = **seuil** (Poitou, Morvan).

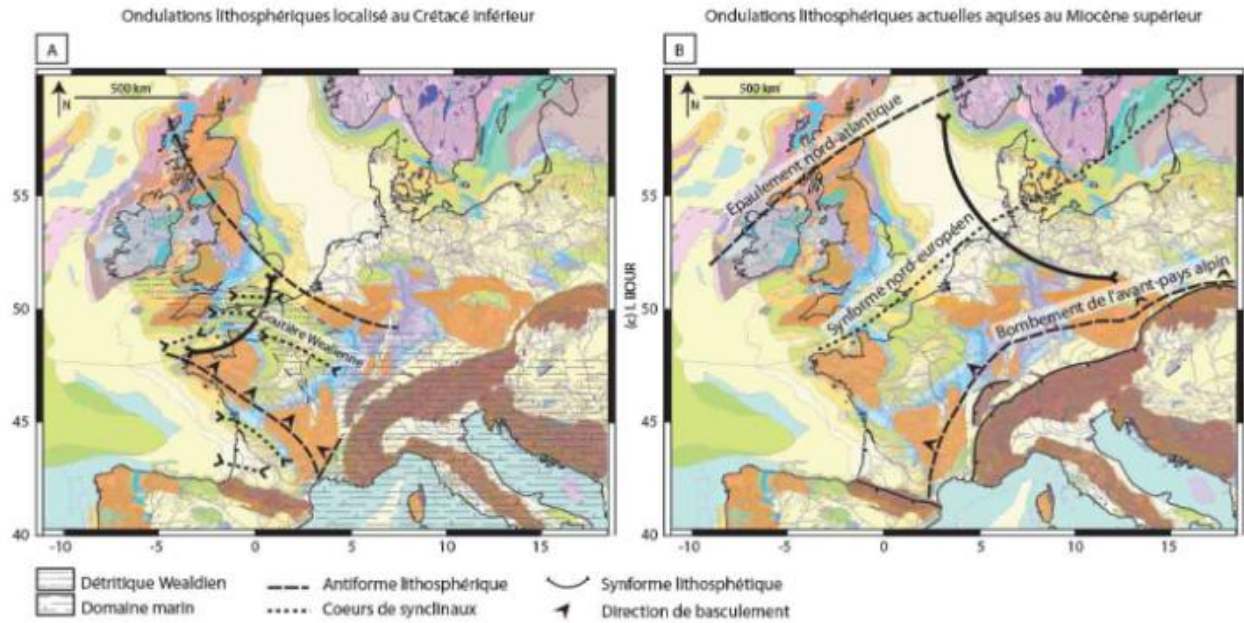
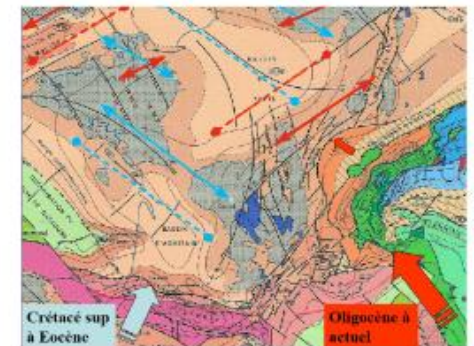
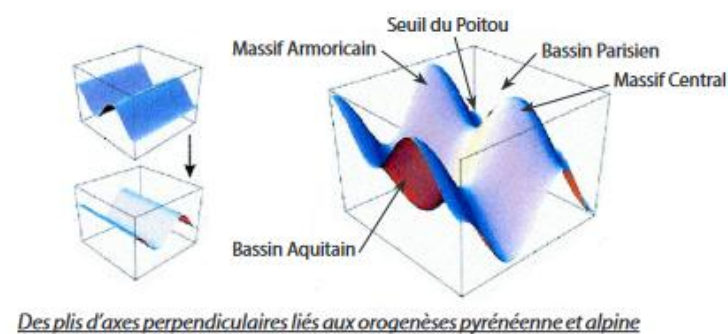


Fig. 161: Organisation des déformations de grande longueur d'onde au niveau de la marge Nord européenne : (A) Ondulations lithosphériques localisées au Crétacé inférieur (d'après Wyns, 1996 ; De Wever et al., 2002). (B) Ondulations lithosphériques actuelles acquises au Miocène supérieur (d'après Wyns, 1996).

Figure 39 : flambage de la lithosphère en France



Toute la géologie de la France traduit un phénomène de **déformations à très grandes longueurs d'ondes = en champ lointain** (car loin des zones de collision) appelé **flambage** de la lithosphère