



Lycée François-René DE CHATEAUBRIAND
136 BOULEVARD DE VITRÉ, CS 10637
35706 RENNES CEDEX 7
CLASSE PRÉPARATOIRE BCPST 1
Biologie Chimie Physique Sciences de la Terre

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
°° SCIENCES DE LA TERRE °°
>> Cours <<

Chapitre 23

Les déformations de la lithosphère

PROPOSITION DE FICHE A COMPLÉTER

Introduction

Lithosphère :

- Définition sismique :

LVZ (*low velocity zone*) :

- Définition thermique :

- Définition rhéologique :

La **profondeur (variable) de la LVZ délimitant lithosphère et asthénosphère sous-jacente** est parfois appelée **LAB** pour *Lithosphere-Asthenosphere Boundary* (= limite lithosphère-asthénosphère).
▪ Plutôt **superficielle** sous les **océans** (en général entre 60 et 100 km)
▪ Plutôt **profonde** sous les **continents** (en général entre 100 km et jusqu'à 300 km !)

Rhéologie :

Tectonique ≈ géologie structurale :

(!) Les **Anglo-Saxons** ont une **petite distinction**

Structures géologiques :

≠ texture :

Fabrique d'une roche = pétrofabrication :

1.

Le mot se rapproche alors de ce qu'il convient plutôt d'appeler **texture** de roche, quand il fait référence qu'à **autre chose qu'une roche déformée**.

2.

Au sein du sens 1 :

- **Fabrique primaire** :

- **Fabrique secondaire** :

- **Tectonique régionale** :

- **Microtectonique** :

> **Pétrologie structurale** :

- **Tectonique globale** :

- **Tectonophysique** :

Ne pas confondre :

Tectonique des plaques :

Comment les objets géologiques réagissent-ils à des contraintes mécaniques ?

I. Caractérisation géométrique, physique et expérimentale de la déformation des objets géologiques

| | |
|----------------------------|--|
| Capacités exigibles | <ul style="list-style-type: none">✓ Distinguer déformation et contrainte.✓ Construire une ellipse (2D) ou un ellipsoïde (3D) de déformations, dans le but d'établir, lorsque cela est possible, l'orientation des contraintes.✓ Exploiter des courbes rhéologiques pour distinguer déformation élastique, déformation plastique, phénomène de fluage et la notion de rupture.✓ Distinguer un comportement ductile et un comportement cassant (ou fragile).✓ Relier les différents types de comportement à la compétence des roches et aux conditions thermodynamiques.✓ Illustrer l'importance de la vitesse de déformation dans la rhéologie.✓ Établir un profil rhéologique de la lithosphère continentale à l'aide de la loi de BYERLEE et des lois de fluage.✓ Relier le profil rhéologique avec la distribution des séismes en profondeur.✓ Comparer les profils rhéologiques des lithosphères continentale et océanique.✓ Discuter l'allure de ces profils en fonction du gradient géothermique local.✓ Discuter des limites d'application des enveloppes rhéologiques à partir d'observations. |
|----------------------------|--|

A. Les aspects géométriques et dynamiques fondamentaux de la déformation

1. La déformation, une modification géométrique des objets

a. La déformation : un changement de forme (← distorsion), orientation (← rotation) et/ou localisation (← translation) d'un objet

Déformation (s. l.) :

Il y a donc **trois composantes possibles** (mais **une suffit**) dans la **déformation**.
On notera bien que les **aspects géométriques et organisationnels non dus à des contraintes** ne relèvent pas du champ d'étude des structures tectoniques car ils ne relèvent pas de la **déformation**.

Vision simple

▲ FIGURE 1. Les trois composantes de la déformation. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013)

b. Typologies de la déformation

a. La rupture ou le fluage : déformation discontinue (= discrète = cassante = fragile) vs. continue (ductile = souple)

| |
|---|
| Déformation discontinue = discrète = cassante = fragile : |
| → rupture |
| Déformation continue = ductile = souple : |
| → fluage : |

▲ FIGURE 3. Déformation discontinue vs. continue (homogène vs. hétérogène).
D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021).

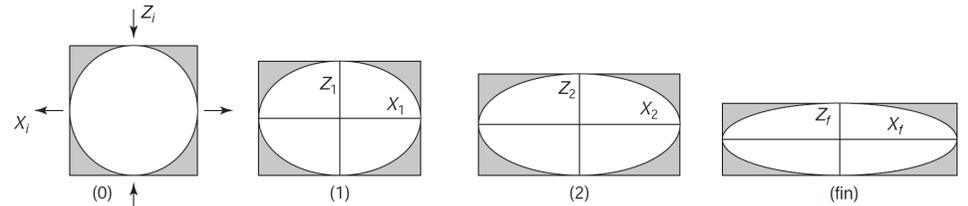
β. Parallélisme des droites ou courbure : déformation homogène (cisaillement homogène au sens large) vs. hétérogène

| |
|--|
| Déformation homogène = cisaillement homogène au sens large : |
| Déformation hétérogène : |

γ. Focus sur le cisaillement homogène : cisaillement pur (aplatissement-étirement sans rotation : déformation coaxiale) et cisaillement simple [cisaillement au sens le plus strict] (rotation : déformation non coaxiale)

| |
|---|
| Cisaillement pur (<i>pure shear</i>) : |
| Cisaillement simple (<i>simple shear</i>) : |

NB **Superposition des deux cisaillements** : cisaillement mixte (*subsimple shear*)



Ellipse de la déformation finie

▲ FIGURE 6. De l'état initial à l'état final dans un cisaillement pur (déformation coaxiale : aplatissement = compression). D'après VAN DER PLUIJM & MARSHAK (2004), adapté

▲ FIGURE 4. Cisaillement pur vs. simple : cas d'une déformation homogène. D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021), modifié.



(!) Contrairement à ce que laissent supposer certains manuels de BCPST, les cisaillements peuvent tout à fait être hétérogènes (NOUGIER, 2000a ; MERCIER *et al.*, 2004...) ou s'appliquer à la déformation discontinue (voir f → page 6).

c. Une déformation modélisable dans un repère orthonormé par un ellipsoïde (3D) ou une ellipse (2D) des déformations

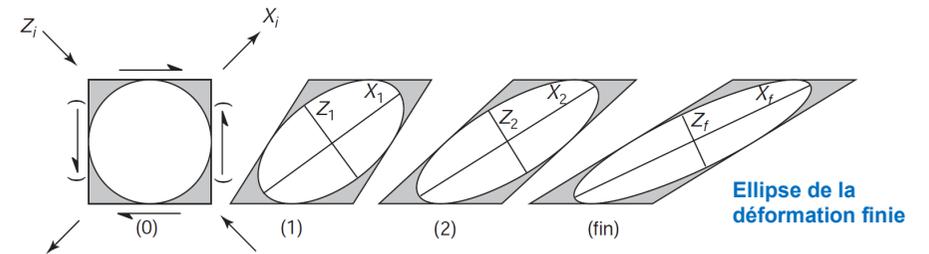
α. Des ellipsoïdes de déformation comprenant un axe de plus grand allongement (X), un axe de plus grand raccourcissement (souvent Z) et, en 3D, un axe intermédiaire (souvent Y)

Ellipsoïde de / de la / des déformation(s) :

On peut faire une ellipse (X, Z) en 2D

Axes :

-
-
-



Ellipse de la déformation finie

▲ FIGURE 7. De l'état initial à l'état final dans un cisaillement simple (déformation rotationnelle : « vrai » cisaillement). D'après VAN DER PLUIJM & MARSHAK (2004), adapté

d. De la déformation incrémentale à la déformation finie

α. Notions de déformation incrémentale et déformation finie (= totale)

Incréments :

Déformation finie = totale :

β. Un chemin de déformation souvent difficile à reconstituer en cas de déformation complexe (déformation hétérogène)

Chemin de déformation :

Vision simplifiée. Document C. NICOLLET
▲ FIGURE 5. Ellipsoïdes des déformations.

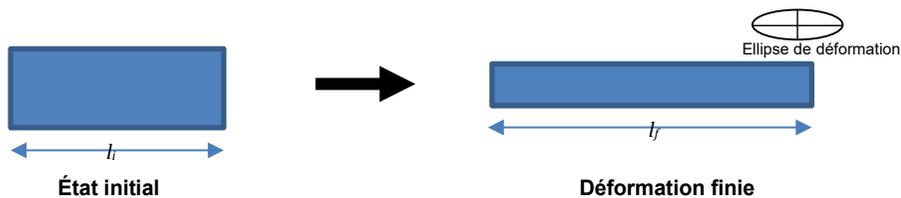
β. Application à la déformation ductile homogène : cisaillements purs et simples
Voir figure 6

e. La quantification de la déformation homogène

α. La quantification de la déformation linéaire (typiquement applicable dans le cas d'un cisaillement pur... mais aussi simple) : extension (e ou ε), étirement (S) et élongation quadratique (λ)

- On peut quantifier une déformation linéaire, selon l'axe X, par les paramètres suivants [tous sans dimension] (figure 9) :

| |
|--|
| Allongement relatif = extension (<i>extension</i>) : |
| Étirement (<i>stretch</i>) : |
| Elongation quadratique (<i>shear strain</i>) : |



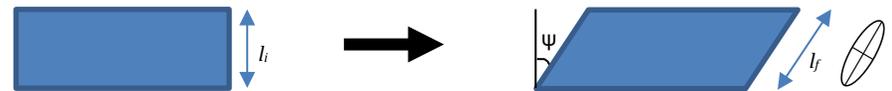
▲ FIGURE 9. Paramètres utilisés dans la quantification d'une déformation finie selon l'axe d'allongement maximal (X) dans le cadre d'une déformation coaxiale (cisaillement pur = sans rotation). Original. L'ellipse représentée est l'ellipse de déformation.

Remarque logique :

- Pour un allongement, $\epsilon > 0$ (valeur positive)
- Pour un raccourcissement, $\epsilon < 0$ (valeur négative)

β. La quantification de la déformation cisillante au sens strict (= par cisaillement simple) : angle de déformation ψ et déformation cisillante γ

| |
|-----------------------------------|
| Angle de déformation ψ : |
| Déformation cisillante γ : |



▲ FIGURE 10. Paramètres utilisés dans la quantification d'une déformation finie selon l'axe d'allongement maximal (X) dans le cadre d'un cisaillement simple (= avec rotation), situation de non coaxialité. Original.

L'ellipse représentée est l'ellipse de déformation.

γ. La quantification de la déformation avec une composante linéaire et une composante cisillante : toutes les quantifications précédentes

f. L'étude des situations hors de la déformation continue homogène

Notons que les deux mécanismes basiques vus précédemment, le cisaillement pur et le cisaillement simple, provoquent aussi de la déformation hétérogène et de la déformation discontinue.

α. L'étude de la déformation continue hétérogène

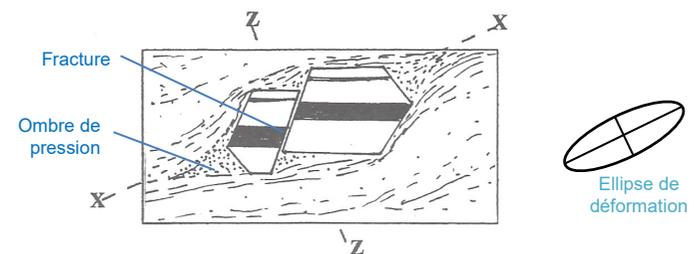
Outils utilisables :

- 1.
- 2.
- 3.

β. L'étude de la déformation discontinue

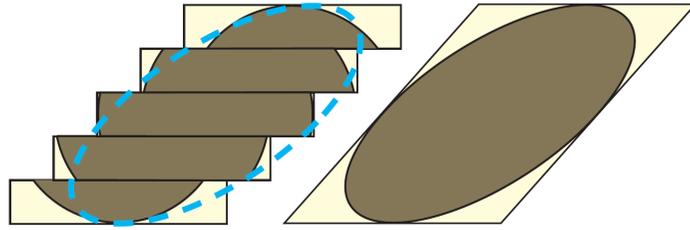
Assez aisé (le plus souvent) :

- 1.
- 2.



Une rupture minérale et des ombres de pression dans un cas de cisaillement simple

▲ FIGURE 15. Exemple d'analyse de déformations microstructurales cassantes. D'après NOUGIER (2000a).



A FIGURE 16. Approximation d'une déformation discontinue à une déformation continue.
D'après FOSSEN (2016).

g. Déformation distribuée (= diffuse) ou localisée

Déformation distribuée = diffuse :

Déformation localisée :

Notons que la frontière entre ces deux termes est très floue et dépend beaucoup du contexte. En fait, ce concept a un intérêt s'il est employé de manière relative, pour comparer des zones tectonisées : on dira alors de la déformation d'une région qu'elle est plus diffuse ou au contraire plus distribuée qu'une autre.

h. Notion de tectonite : une roche « tectonisée » (= notoirement déformée)

Tectonites = roches tectonisées :

Roches métamorphiques et tectonites : ne pas confondre

On appelle métamorphisme l'ensemble des modifications minéralogiques d'une roche à l'état solide qui interviennent dans une roche soumise à une modification importante des conditions de pression, température et/ou hydratation.

Très souvent, les roches métamorphiques sont formées par enfouissement : elles sont alors fortement déformées et sont donc des tectonites.

Néanmoins, il est également possible de former des roches métamorphiques par :

- Hydrothermalisme (circulation d'eaux chaudes associée au volcanisme)
- Métamorphisme de contact (modifications métamorphiques d'une roche par chauffage sans enfouissement, suite à l'intrusion proche d'une masse chaude comme un pluton) ; on forme alors des roches nommées cornéennes.

Dans ces deux cas, les roches métamorphiques formées ne sont pas tectonisées.

En résumé :

- Beaucoup de roches métamorphiques sont des tectonites ;
- Toutes les roches métamorphiques ne sont néanmoins pas des tectonites (cas des cornéennes) ;
- De nombreuses tectonites ne sont pas des roches métamorphiques : il y a alors eu déformation à faible profondeur, sans enfouissement et sans modification de l'assemblage minéral.

2. La déformation, une réponse dynamique à des contraintes

a. Notion de contrainte σ : la résultante des forces appliquées en un point

Contrainte mécanique σ :

Ainsi, c'est une force appliquée sur une surface, donc homogène à une pression (exprimable en pascals **Pa** ou en **bars***) mais une pression orientée, généralement oblique à la surface considérée (figure 18).
* 1 bar = 10^5 Pa

La notion de force

On appelle force F une action mécanique exercée par un objet sur un autre. Elle s'exprime en newtons N.

Modélisable par un vecteur, elle est définie par :

- sa direction (orientation de la force),
- son sens (vers où la force agit),
- son intensité appelée norme (mesurée en newtons N),
- son point d'application (endroit où la force s'exerce).

Une force non compensée peut avoir deux actions mécaniques notoires (l'une, ou l'autre, ou les deux) :

- Déplacer l'objet
- Déformer l'objet

En zone stable isostatiquement, une roche est classiquement soumise à deux forces verticales réciproques (= qui se compensent) (figure 18, gauche) :

- La force de pesanteur F_P qui, en un point, dépend de la section S , la hauteur h de la colonne rocheuse, la masse volumique ρ de la roche et l'accélération de la pesanteur g : $F_P = S h \rho g$
- La poûssée d'ARCHIMÈDE F_{Zz} , de même norme que la précédente (à l'équilibre) qui s'exerce vers le haut.

La notion de pression

On appelle pression P l'intensité d'une force qu'exerce un corps sur un autre par unité de surface S du second. Elle s'exprime en pascals Pa dans le système international (mais peut être exprimée en bars, en atmosphères...).
 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$

$$P = \frac{F}{S}$$

Par exemple, la pression lithostatique P_l qui s'exerce sur la base d'une colonne de roches est égale à :

$$P_l = \frac{F_P}{S}$$

b. La décomposition d'une contrainte dans un plan : contrainte normale σ_N (composante compressive) et contrainte tangentielle (composante cisailante s. str.) $\sigma_T = \tau$

| |
|--|
| Composante normale σ_N : |
| Composante tangentielle σ_T σ_T (ou τ) : |

En trois dimensions :

-
-
-

| |
|------------------------------|
| Ellipsoïde des contraintes : |
|------------------------------|

On peut faire une **ellipse** (σ_1, σ_3) en 2D

β . Contraintes isotropes (\rightarrow compaction) vs. anisotropes (\rightarrow compaction + déformation)

| |
|---------------------------|
| Contraintes isotropes : |
| Contraintes anisotropes : |

- On rencontre des **contraintes isotropes** :
 - En l'absence de contraintes géodynamiques et à partir d'une certaine profondeur (en moyenne et environ 3000 m).
- On rencontre des **contraintes anisotropes** :
 - En l'absence de contraintes géodynamiques mais au-dessus d'une certaine profondeur (en moyenne et environ 3000 m) où la pression lithostatique l'emporte sur la poussée d'ARCHIMÈDE (figure 20).

Pour information, elle est d'environ 0,1 GPa à 3 km (3000 m).

- Bien évidemment, dès lors qu'il y a des **contraintes géodynamiques** !

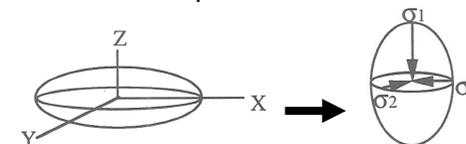
Notons que les **contraintes**, même **isotropes**, peuvent entraîner (selon la **profondeur**) :

- Une **compaction**, comme nous venons de le voir : il y a alors notamment **réduction de la porosité** et la possibilité de **recristallisations** dans les **zones de moindre contrainte** (voir C) ;
- Une **modification de la maille cristalline** dans le sens d'une **diminution de volume** pouvant conduire à l'apparition de **nouveaux minéraux** à l'état solide (cas du **métamorphisme**) ;
- Un **changement d'état** : fusion ou cristallisation, selon le diagramme de phase des minéraux incriminés.

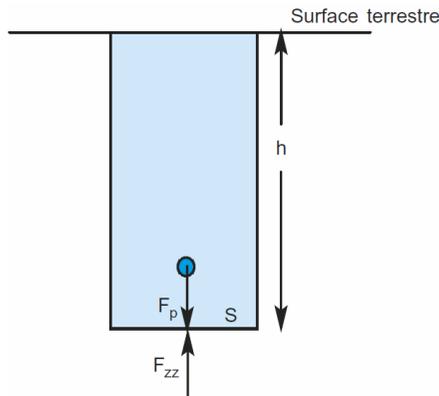
(!) La **distorsion** n'est possible qu'en cas de **contraintes anisotropes** mais les **processus ci-dessus** peuvent s'y **superposer** (selon la profondeur)

γ . De l'ellipsoïde des déformations à l'ellipsoïde des contraintes

- Dans le cas d'un **cisaillement pur**, on peut reconstituer l'**ellipsoïde des contraintes** qui est **perpendiculaire** à l'**ellipsoïde des déformations** (figure 21) :
 - σ_1 est dans la **même direction** que **Z**, direction de la **compaction** ;
 - σ_3 est dans la **même direction** que **X**, direction de l'**allongement** ;
 - σ_2 est dans la **même direction** que **Y**.



▲ FIGURE 21. **Les domaines d'anisotropie et d'isotropie des contraintes (hors contraintes géodynamiques) dans le manteau.** D'après NOUGIER (2000a).



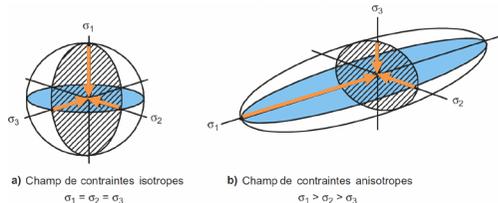
La force de pesanteur F_p et la poussée d'ARCHIMÈDE F_{zz} , deux forces qui s'exercent en tout point de la Terre interne (et qui se compensent en cas d'équilibre isostatique).

Une **contrainte mécanique** σ , une **pression** souvent **oblique** qui s'exerce en un point d'un objet géologique et tend à le déformer. Une **contrainte oblique** se décompose en une **composante tangentielle** σ_T (ou τ) **projection de la contrainte oblique sur l'objet**, et une **composante normale** σ_N , **orthogonale à la précédente**.

▲ FIGURE 18. **Forces et contraintes.** D'après PEYCRU *et al.* (2008)

c. Les ellipsoïdes (3D) de contraintes (ou ellipses en 2D), un outil de compréhension de la compression-étirement (cisaillement pur)

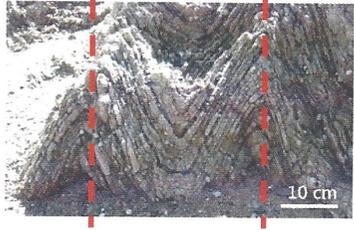
α . Trois composantes en 3D formant un ellipsoïde des contraintes : σ_1 (contrainte maximale), σ_2 (contrainte intermédiaire) et σ_3 (contrainte minimale)



▲ FIGURE 19. **Ellipsoïdes des contraintes.** D'après PEYCRU *et al.* (2008), modifié légèrement.

δ. La nécessité de vérifier la coaxialité d'une déformation avant d'inférer un ellipsoïde de contrainte, adapté aux seules situations de cisaillement pur

=> Si déformation de type cisaillement pur : allure symétrique de l'objet déformé...

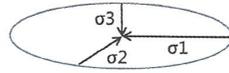


... on retrouve l'ellipsoïde des déformations...



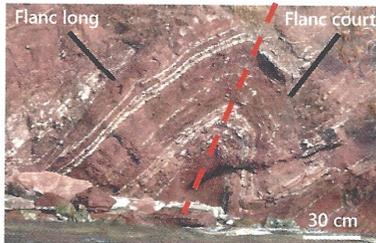
Discutable...

... et on peut retrouver l'ellipsoïde des contraintes.



Encore plus discutable...

=> Si déformation de type cisaillement simple : allure non symétrique de l'objet déformé...



... on retrouve l'ellipsoïde des déformations...



Discutable...

... mais on ne peut pas retrouver l'ellipsoïde des contraintes !

Ce cisaillement ne rend compte que de l'extension, mais pas de la compression pourtant existante !

On se contente de donner les plans de cisaillement

▲ FIGURE 22. Ellipsoïde de déformation ou pas ? D'après DAUTEL *et al.* (2021).

Ci-dessus, il s'agit d'un pli, donc d'une **déformation hétérogène (droites transformées en courbes)**, ce qui pourrait rendre **hasardeux voire impossible la production d'ellipsoïdes a priori**. Toutefois, les auteurs ont probablement ici considéré que l'axe du pli était une droite qui restait une droite et ont utilisé cette dimension « homogène » (axe X d'étirement maximal) pour inférer leurs **ellipsoïdes qui ne sont en fait valables qu'à l'intrados** ; la perpendiculaire est alors l'axe Z (manifestant un « raccourcissement global »), même si – dans les faits et dans le détail – les droites le long de Z sont devenues des courbes. Quant au fait de passer à l'ellipsoïde des contraintes, il est **encore plus hasardeux** et nombre de collègues s'y refusent. Prudence donc !

ε. Contrainte moyenne, contrainte déviatorique (= déviateur), contrainte différentielle

Contrainte moyenne $\bar{\sigma}$:

Contrainte déviatorique = déviateur σ' :

Contrainte différentielle σ_a (ou $\Delta\sigma$) :

d. Bilan sur le lien déformation-contrainte dans le cadre des cisaillements pur et simple

▼ TABLEAU I. La déformation continue homogène : cisaillement pur et cisaillement simple. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

| | Cisaillement pur (« pure shear ») (aplatissement-étirement) | Cisaillement simple (« simple shear ») |
|---|---|--|
| Explication | La déformation finie peut se décomposer en étapes (ou incréments) pendant lesquelles le matériau est aplati dans la direction de raccourcissement, étiré dans la direction d'allongement. Il n'y a pas de rotation au cours de la déformation progressive : les axes d'allongement et de raccourcissement conservent une direction constante. La déformation par aplatissement/étirement est dite coaxiale | La déformation finie peut se décomposer en incréments pendant lesquels le matériau est cisailé en gardant une épaisseur constante : ses côtés parallèles au cisaillement ne sont pas déformés et les côtés non-parallèles au cisaillement s'étirent. Il y a rotation au cours de la déformation progressive : les axes d'allongement tournent. La déformation par aplatissement/étirement est dite non coaxiale |
| | | |
| Peut-on caractériser un ellipsoïde de la déformation finale ? | 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) | Oui. |
| Peut-on caractériser un ellipsoïde des contraintes ? | Oui. La déformation est non-rotationnelle (coaxiale) : $\sigma_1 // Z, \sigma_2 // Y, \sigma_3 // X$ Par convention, on suppose que les contraintes s'exercent au centre de l'objet, donc on oriente les vecteurs vers le centre. | 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). |

B. L'apport des données expérimentales à la compréhension de la déformation

1. Modalités de l'étude expérimentale de la déformation rocheuse

a. L'étude de la réponse à la compression : des cylindres de roches placés dans des presses triaxiales

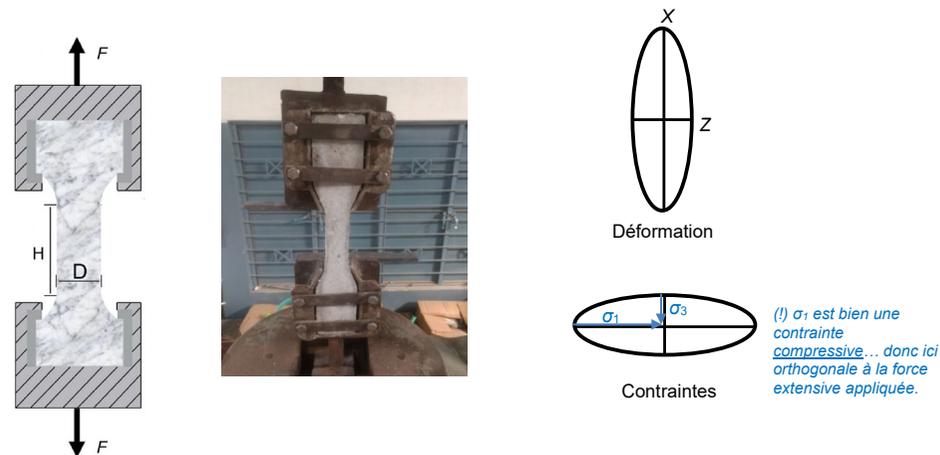
Presses mécaniques triaxiales :

Contraintes appliquées :

-
-

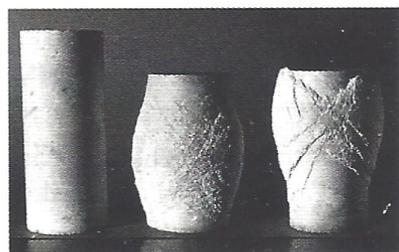


▲ FIGURE 23. **Presse triaxiale.** D'après DAUTEL *et al.* (2021) et PERRIER, BEAUX *et al.* (2008).



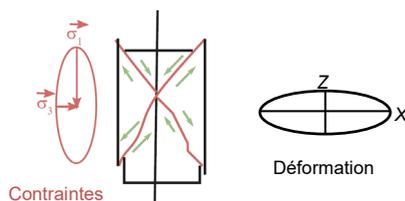
▲ FIGURE 25. **Test de traction uniaxial sur un matériau : une modalité simple.** D'après PERRAS & DIEDERICHS (2014) et KRISHNARAJA *et al.* (2018)

2. Une réponse typique en trois temps : fluage élastique, fluage plastique, rupture



État initial

État final



Échantillon final cassé (montrant des failles conjuguées) et ses ellipses

▲ FIGURE 24. **Déformation progressive d'un échantillon (« éprouvette ») dans la presse.** D'après DAUTEL *et al.* (2021) et PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

Il s'agit ici d'un cas de **réponse en compression**, à une **pression de confinement** proche de 1 kbar (~ 3 km de profondeur). L'angle entre les **failles conjuguées** est compris entre 30 et 45 °.

b. L'étude la réponse à la traction : des cylindres ou des parallélépipèdes de roches soumis à un test de traction

Notez qu'une **presse triaxiale de compression** peut aussi être utilisée en **extension**, en appliquant une **pression de confinement plus élevée** que la **contrainte verticale**. Il existe aussi des **presses triaxiales** qui appliquent des **contraintes latérales orientées**.

▲ FIGURE 26. **Diagramme contrainte-déformation typique d'un échantillon rocheux (en compression).** D'après DAUTEL *et al.* (2021)

a. L'absence de réponse déformationnelle aux faibles contraintes

b. Une déformation réversible : le domaine ductile élastique

Déformation élastique :

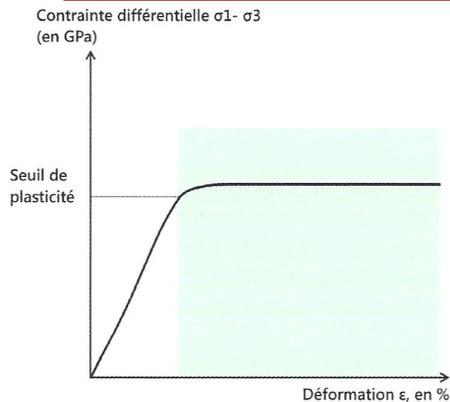
c. Une déformation irréversible (= définitive) : le domaine ductile plastique ; notions de déformation résiduelle et de fluage à contrainte constante

Déformation plastique :

Déformation résiduelle :

- Certains matériaux continuent de fluer sans jamais rompre.

Dans un certain nombre de cas, notamment pour des roches incompetentes, si la contrainte est maintenue constante, alors le fluage se poursuit (figure 27) : c'est le fluage à contrainte constante. On l'observe notamment à forte pression de confinement (modélisant une forte pression lithostatique, donc une profondeur importante). Ce phénomène traduit le fait que le matériau accommode la contrainte au fur et à mesure du temps par ses transformations internes (voir C).



Fluage : cas particulier de déformation plastique. La courbe s'horizontalise : la déformation augmente au cours du temps même si la contrainte ne varie pas.



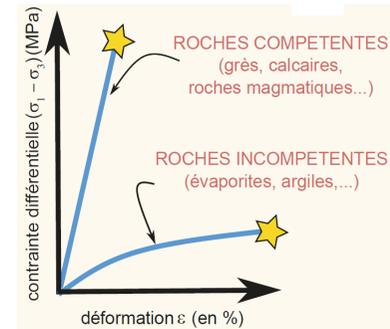
Plaque commémorative en calcaire lithographique ayant subi, en raison de son poids, un fluage plastique (abbaye des Récollets de Saverne, cliché A. Lardon).

▲ FIGURE 27. Diagramme contrainte-déformation dans le cas d'un fluage à contrainte constante et cliché d'une plaque calcaire fluante. D'après DAUTEL et al. (2021)

d. Une déformation cassante : la rupture

3. L'influence de divers paramètres physico-chimiques sur la déformation

a. Le facteur lithologique et minéralogique (la composition de la roche) et la notion de compétence des roches



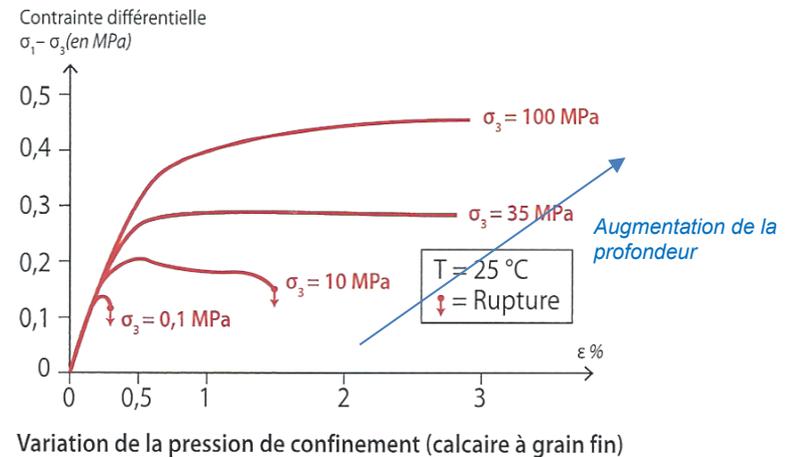
▲ FIGURE 28. Compétence des roches et déformation. D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021). L'étoile correspond à la rupture.

Compétence d'une roche :

→ roches « compétentes » : cassantes, mais demeurant non déformées ou avec un comportement élastique pour des contraintes élevées (= résistantes)

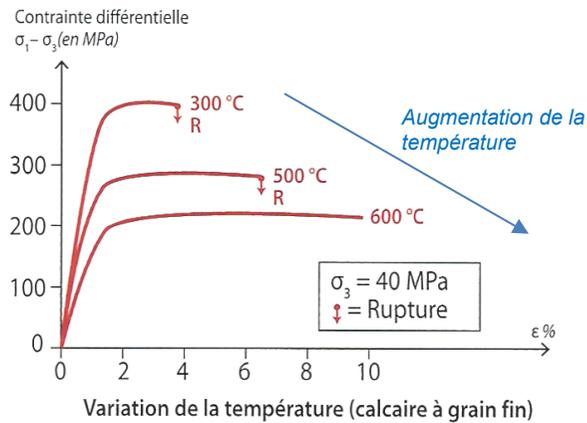
→ roches « incompetentes » : plutôt « fluantes »

b. Le facteur pression lithostatique (et donc profondeur)



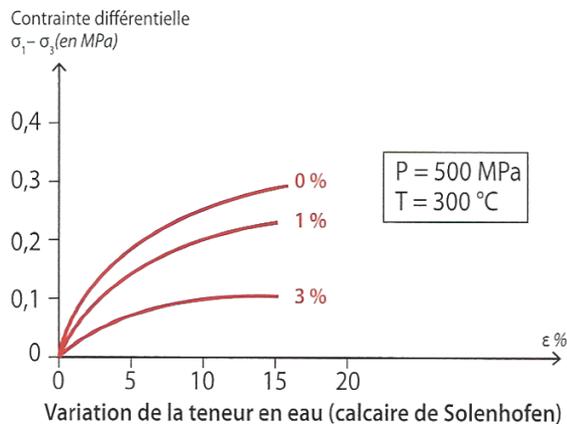
▲ FIGURE 29. Diagramme contrainte-déformation et variation de la pression lithostatique. D'après DAUTEL et al. (2021)

c. Le facteur température (qui augmente également souvent avec la profondeur, mais pas seulement)



▲ FIGURE 30. Diagramme contrainte-déformation et variation de la température.
D'après DAUTEL *et al.* (2021)

d. Le facteur fluides (pressions des fluides) : une action variable qui dépend de la pression lithostatique



▲ FIGURE 31. Diagramme contrainte-déformation et variation de la pression en fluide à HAUTE pression de confinement (modélisant une haute pression lithostatique).
D'après DAUTEL *et al.* (2021)

e. Le facteur temps : la vitesse de charge

a. Un paramètre expérimental loin des valeurs réelles

Vitesse de charge = vitesse de déformation :

Cisaillement pur (cas pour les presses utilisées) voire simple [vitesse d'allongement] :

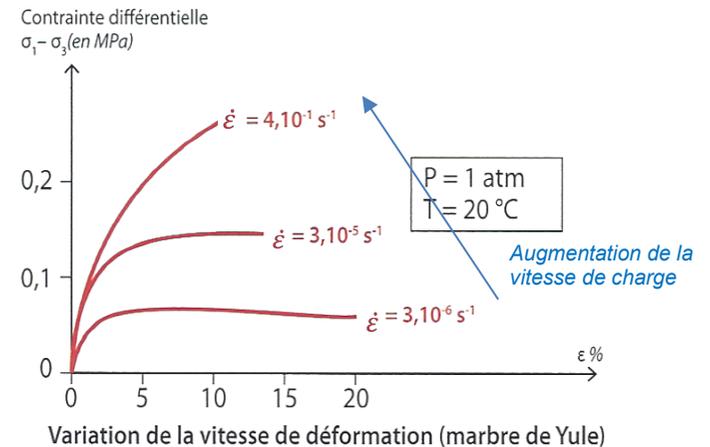
Cisaillement simple [vitesse de rotation] :

- Vitesses de charges en labo :

- Vitesses des phénomènes géologiques :

β. Une lenteur qui favorise la ductilité

- Plus la **vitesse de déformation diminue**, plus le **matériau** aura un **comportement ductile**, alors que la **déformation rapide** favorise la **fragilité** (figure 32).



▲ FIGURE 32. Diagramme contrainte-déformation et variation de la vitesse de déformation.
D'après DAUTEL *et al.* (2021)

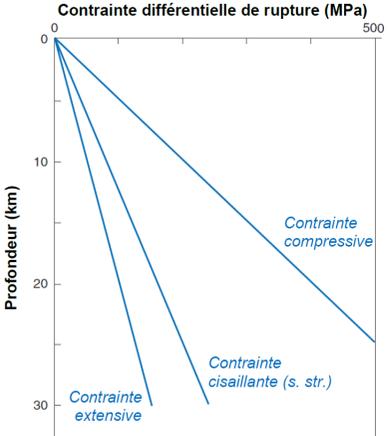
| |
|--|
| Loi de BYERLEE (= loi de friction = de frottement) : |
| Contrainte de rupture σ_r : |

b. Une loi, propre à chaque matériau, exprimant la limite d'élasticité d'un matériau en fonction de la profondeur : la loi de fluage

| |
|----------------------------------|
| Loi de fluage : |
| Seuil de plasticité σ_r : |

▲ FIGURE 36. La loi de BYERLEE et son obtention. D'après DAUTEL *et al.* (2021), adapté.

- (!) Même loi pour tous les matériaux
- (!) Pente modifiée si régime de contraintes modifié



▲ FIGURE 37. Loi de BYERLEE en fonction du régime de contrainte. D'après FOSSEN (2016), adapté / traduit.

▲ FIGURE 39. Les lois de fluage (propres à chaque matériau) et leur obtention (à T fixée par rapport à un géotherme choisi, en compression). D'après DAUTEL *et al.* (2021).

- (!) Dépend du matériau, de la température, de l'hydratation... (et bien sûr de la pression lithostatique)

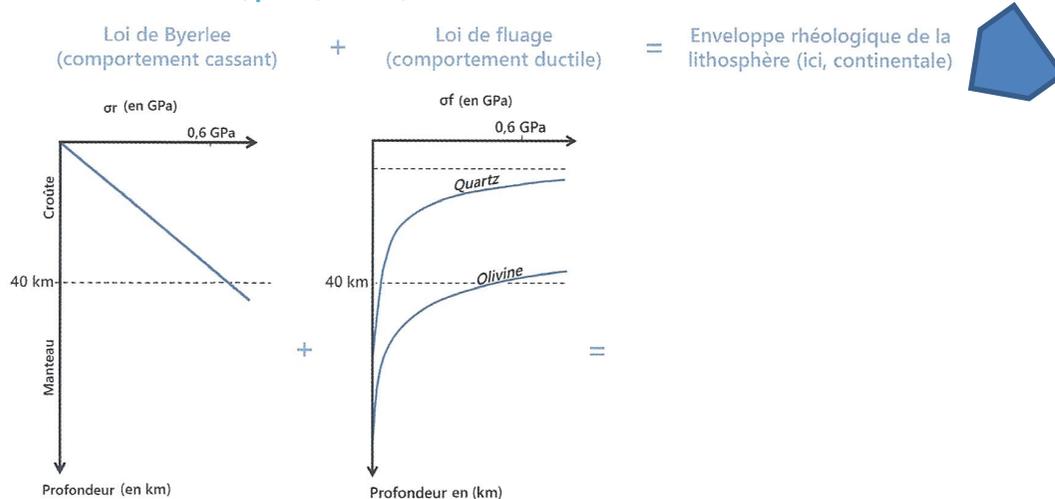
2. La combinaison de ces deux lois physiques, une opération à l'origine des profils rhéologiques de la lithosphère

| |
|--|
| Modèles = profils rhéologiques de la lithosphère : |
| Enveloppes rhéologiques : |

Eu égard à leur forme, ces profils sont parfois présentés informellement comme des « diagrammes en arbre de Noël ».

a. Les enveloppes rhéologiques de la lithosphère continentale (en compression) : deux modèles principaux

a. Une enveloppe rhéologique à quatre niveaux modélisés par deux minéraux dominants (quartz, olivine)



▲ FIGURE 41. Enveloppes rhéologiques de la lithosphère continentale (en compression) : modèle à deux couches cassantes et deux couches ductiles. D'après DAUTEL *et al.* (2021).

β. Une enveloppe rhéologique à (cinq-)six niveaux modélisés par trois minéraux dominants (quartz, feldspath, olivine) [pour information ?]

Voir cours

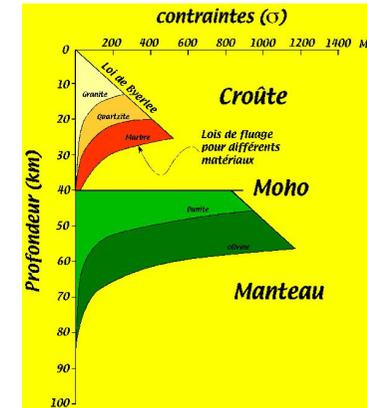
b. Les enveloppes rhéologiques de la lithosphère océanique (en compression)

▲ FIGURE 43. Enveloppes rhéologiques de la lithosphère océanique (en compression).

D'après DAUTEL *et al.* (2021).

3. Limites et variations (spatiales et temporelle) des enveloppes rhéologiques : une réalité plus complexe et diverse que le modèle

a. L'importance des matériaux retenus (impact sur les lois de fluage)



▲ FIGURE 44. L'importance du matériau modèle retenu, chacun ayant sa propre loi de fluage (profil rhéologique de lithosphère continentale en compression).

D'après S. SCHWARTZ (2001), sur *planet-terre* (consultation mai 2022)

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/profils-rheologiques.xml>

b. L'importance de l'hydratation et des fluides (impact sur les lois de fluage)

Hausse de l'hydratation → hausse de la fluidité (en profondeur)

c. L'importance du gradient géothermique (impact sur les lois de fluage)

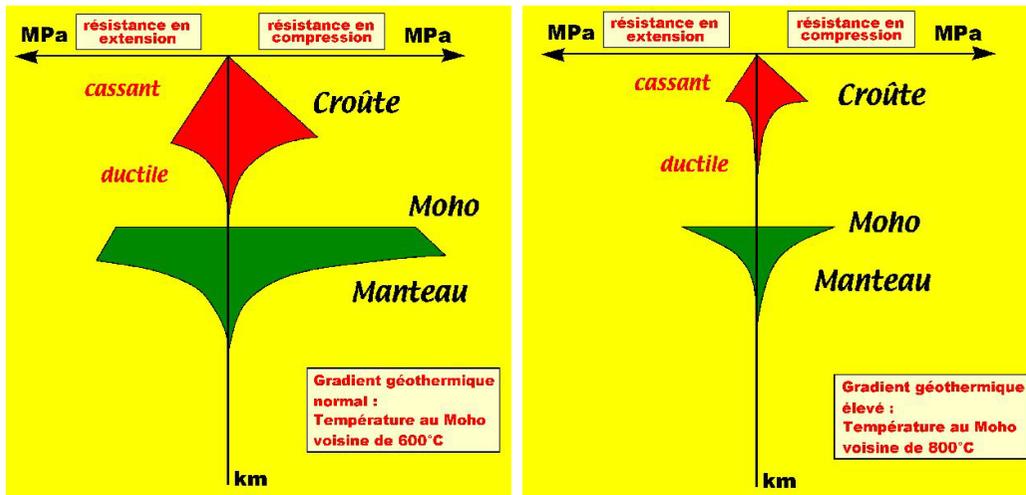
Hausse de la température → hausse de la fluidité

d. L'importance du régime de contraintes compressif vs. extensif (impact surtout sur la loi de BYERLEE)

Extension → roche plus cassante et moins résistante / compression

Pour information ? Trois modèles de lithosphère continentale

- le modèle *jelly sandwich* (« sandwich à la gelée ») :
 - croûte inférieure peu résistante et plutôt ductile coincée entre
 - une croûte supérieure cassante et résistante
 - et un manteau supérieur ductile mais résistant à la déformation.
 Dans ce modèle, une grande partie de la résistance à long terme des plaques tectoniques réside dans le manteau lithosphérique. Ce modèle est surtout valable dans les reliefs stables. C'est le modèle lithosphérique général.
- le modèle *crème brûlée* :
 - croûte globalement résistante et cassante avec une croûte inférieure peu hydratée,
 - et un manteau fluant en raison d'une température élevée et d'une hydratation importante. [Concernant l'hydratation, le texte et la figure s'opposent dans la publication...].
 Ce modèle est plutôt adapté à des rifts jeunes.
- le modèle *banana split* : résistance de la lithosphère considérablement réduite le long des limites des plaques en raison de divers processus d'affaiblissement impliquant des effets thermiques, de fluide et de vitesse de déformation. Comme ce modèle n'est valable qu'en limites de plaques, une telle réduction de la résistance latérale est transcrite dans l'expression « banana split ».

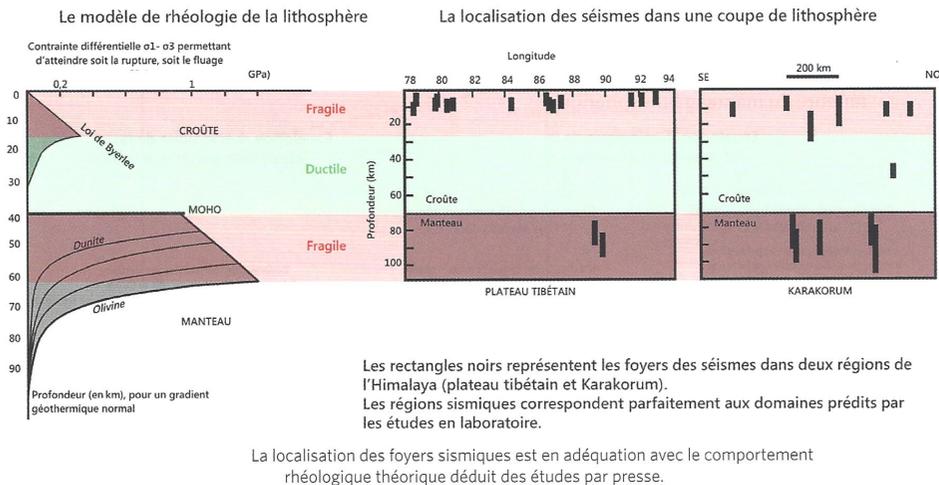


▲ FIGURE 45. L'importance régime de contrainte et du gradient géothermique retenus dans la construction du profil rhéologique de la lithosphère continentale.

D'après S. SCHWARTZ (2001), sur *planet-terre* (consultation mai 2022), URL citée plus haut

4. Des découplages sismiques et mécaniques au sein de la lithosphère

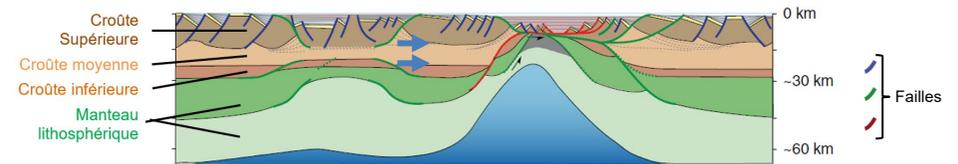
a. Un découplage sismique profond entre croûtes supérieure et inférieure : des foyers dans les zones cassantes (= zone sismogénique)



▲ FIGURE 47. Enveloppes rhéologiques de la lithosphère continentale et profondeur des foyers de séismes. D'après DAUTEL *et al.* (2021).

b. Un découplage mécanique profond entre niveaux de la croûte ou entre croûte et manteau

Zone de découplage mécanique :



▲ FIGURE 48. Système de failles dans une zone de rifting. D'après NALIBOFF *et al.* (2017).

Notez la quasi-absence de faillage de la croûte moyenne matérialisant des niveaux de découplage mécanique (→) au-dessus et au-dessous de cette couche.

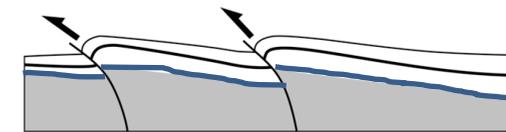
c. Éléments de tectonique superficielle : les niveaux de décollement ou couches-savon (transition socle-sédiments, couches sédimentaires particulières)

On peut appeler **socle** une *formation géologique, avec sa propre histoire tectonique, sur laquelle repose une formation plus récente*. La *formation plus récente qui repose sur un socle, si elle est de nature sédimentaire*, peut être appelée **couverture sédimentaire**.

- **Tectonique de socle** lorsque la couverture et le socle se déforment de manière indépendante, ce qui implique un découplage mécanique entre les deux entités.
- **Tectonique de couverture** lorsque le socle et la couverture sont déformés conjointement.



Tectonique de couverture



Tectonique de socle

▲ FIGURE 49. Système de failles dans une zone de rifting. Document B. ANSELME (BCPST2, Lycée Fénélon, Paris).

Niveau de décollement = couche savon :

D. Les causes et les mécanismes de la déformation

1. L'origine des contraintes générant la déformation

a. L'origine principale et majeure : la géodynamique et le déplacement horizontal des plaques lithosphériques

- Zones de **convergence lithosphérique** : zones de subduction, zones de collision
→ épaissement / raccourcissement lithosphérique, plissements, failles (plutôt inverses), chevauchements et charriages...
- Zones de **divergence lithosphérique** : zones de rifting, dorsales
→ amincissement lithosphérique, peu de plissements, failles (plutôt normales)...
- + **Extension tardi-orogénique** : *phénomène gravitaire d'affaissement des chaînes de montagne à cause de la remonté gravitaire de la racine crustale, lorsque les forces de compression aux limites cessent de s'exercer.*

Des failles normales se forment en nombre et les failles inverses de la collision peuvent rejouer de manière normale.

- Zone de **coulissage** : failles décrochantes, failles transformantes
→ décrochements, bassins en pull-apart...

b. La déformation gravitaire (extension tardi-orogénique, rebond post-glaciaire, tectonique salifère...)

2. Les mécanismes de la déformation : focus sur la dynamique du réseau cristallin

a. La présence de zones de fragilité dans le réseau cristallin

b. Les mécanismes associés à la déformation cassante : fracturation, cataclase, mylonitisation ; existence d'une possibilité de recristallisations

La nomenclature et la frontière entre les termes qui suivent varie notablement selon les auteurs...

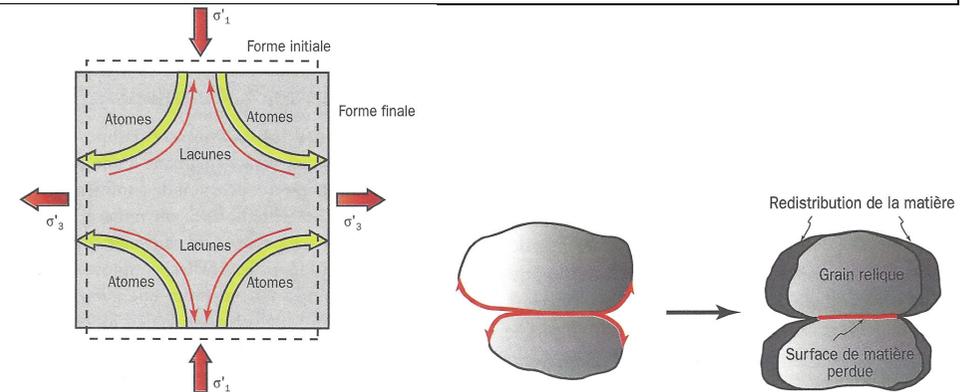
| |
|--|
| Fracturation : |
| Cataclase : |
| → cataclasites non cohésives, cohésives... |
| Mylonites : |

c. Les mécanismes permettant le fluage : fluage par diffusion, fluage par pression-dissolution (→ ombres de pression), fluage-dislocation

Fluage par diffusion :

Fluage par pression-dissolution = dissolution-recristallisation :

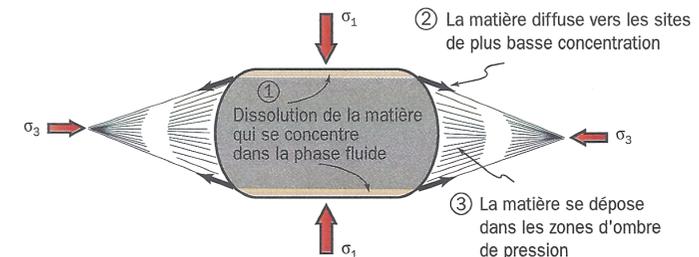
Fluage dislocation :



Fluage par diffusion (fluage de Nabarro-Herring). Les atomes migrent vers les surfaces soumises à la contrainte différentielle la plus faible; les lacunes migrent vers les surfaces soumises à la contrainte différentielle la plus forte.

Fluage par diffusion le long des frontières de grains (fluage de Coble). La matière diffuse des surfaces à fortes contraintes compressives vers les surfaces à faibles contraintes compressives.

▲ FIGURE 52. **Fluage par diffusion.** D'après ROBERT & BOUSQUET (2013).



Le fluage par pression-dissolution

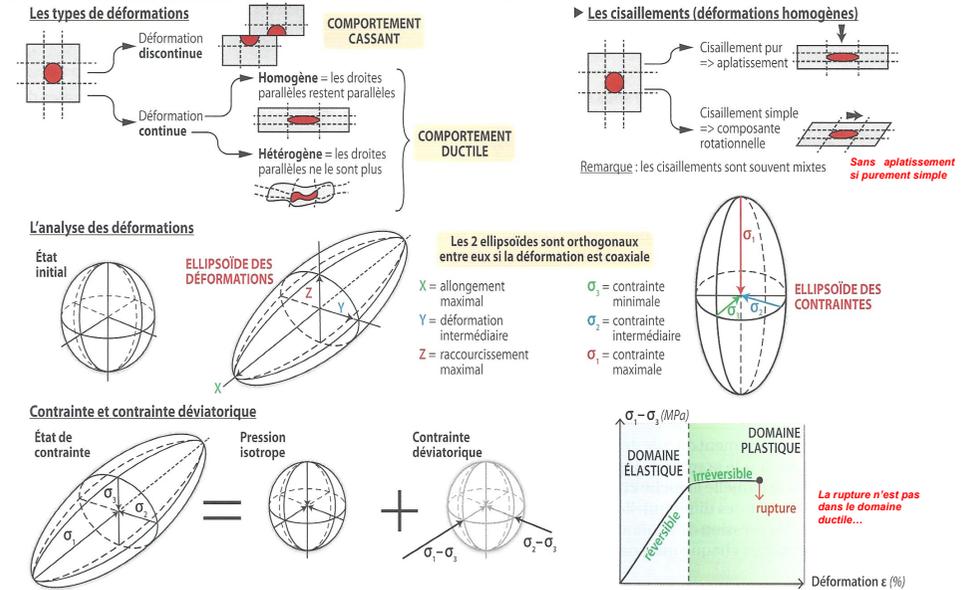
La matière est dissoute dans les surfaces soumises à forte pression et diffuse vers les sites de plus basse pression.

▲ FIGURE 53. **Fluage par pression-dissolution = dissolution-recristallisation.** D'après ROBERT & BOUSQUET (2013).

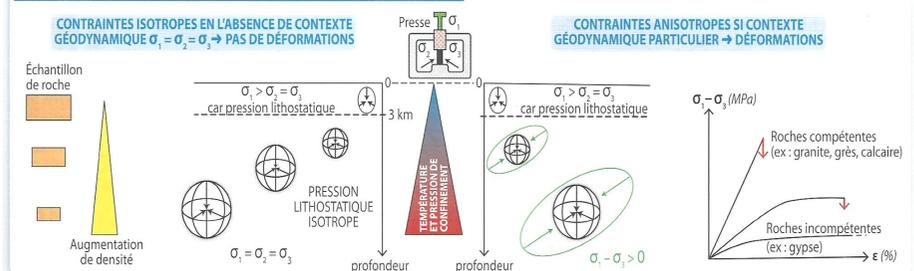
Bilan (adapté du programme)

- ✓ Les **matériaux lithosphériques** se déforment sous l'effet de **contraintes** : la **déformation** est **réversible** ou **irréversible**.
- ✓ La **déformation finie** peut se décomposer en **étapes** (ou **incrément**s) 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**. Ces **propriétés mécaniques** mènent à la **définition thermomécanique** de la **lithosphère** abordée précédemment.
- ✓ 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**. L'**hétérogénéité verticale** de **comportement mécanique** de la **lithosphère** peut déterminer des **niveaux de découplage**.

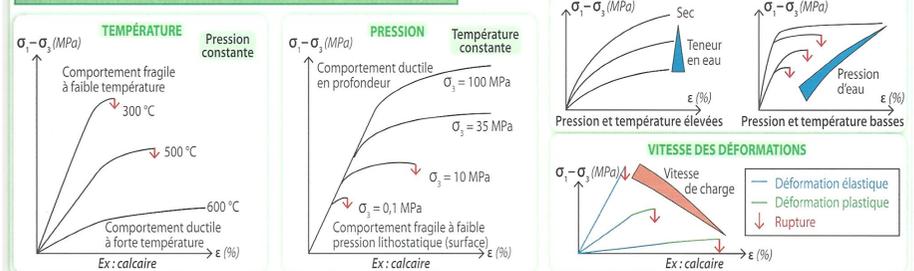
RHÉOLOGIE : DESCRIPTION ET ANALYSE DES DÉFORMATIONS DES ROCHES



LES DÉFORMATIONS EN FONCTION DU RÉGIME DES CONTRAINTES



LES DÉFORMATIONS EN FONCTION DES PARAMÈTRES PHYSIQUES

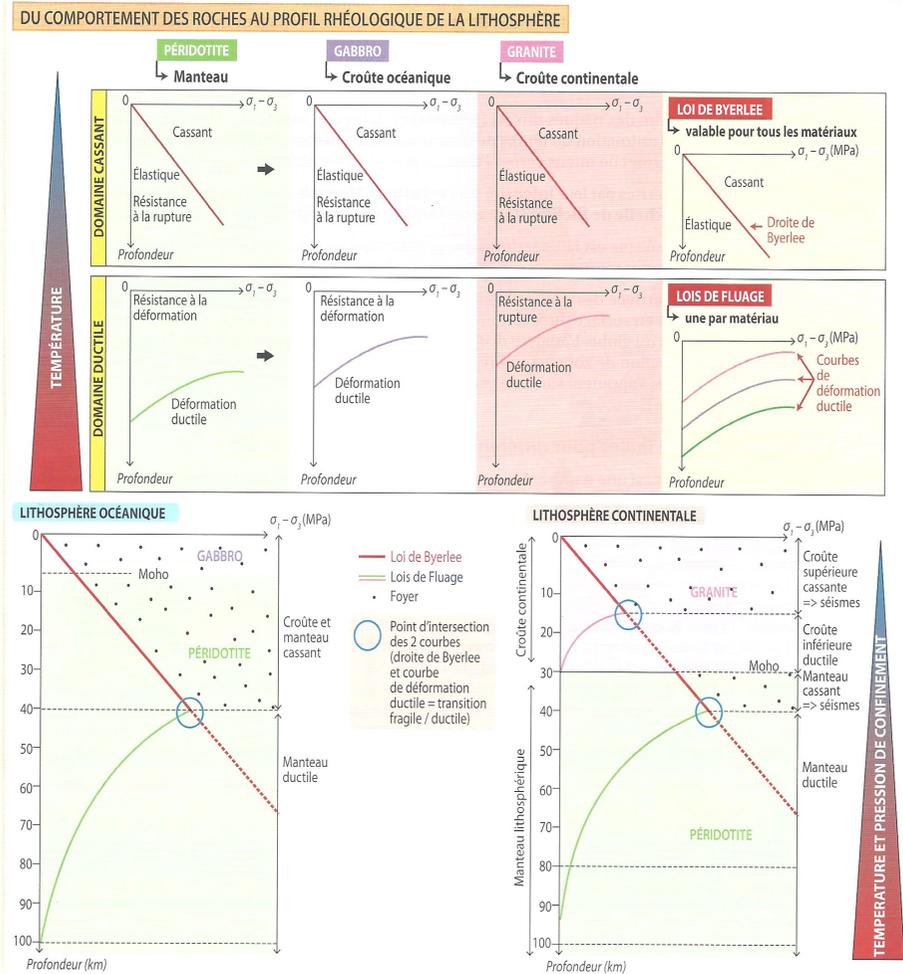
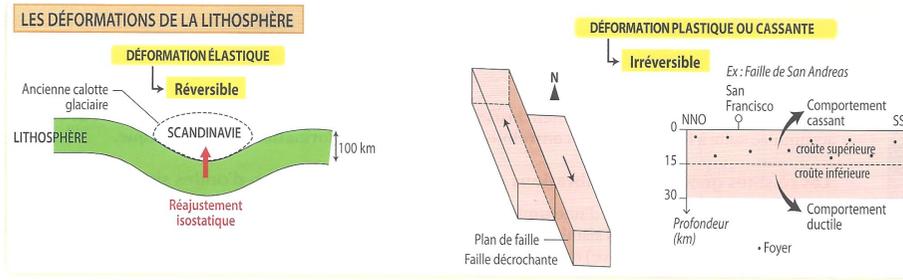


▲ FIGURE 55. La déformation des roches : un synopsis des bases. D'après BORDI, SAINTPIERRE et al. (2021).

II. Les objets géologiques déformés : les manifestations et les marqueurs de la déformation aux différentes échelles

Capacités exigibles

- ✓ Analyser des objets tectoniques à partir de différents supports à différentes échelles (cartes géologiques, photographies, échantillons).
- ✓ Analyser des objets tectoniques, en termes d'ellipsoïde des déformations finies et, lorsque c'est possible, faire le lien avec le régime de contraintes.
- ✓ Analyser des microstructures associées aux structures d'échelle supérieure.
- ✓ Analyser un style structural régional.
- ✓ Savoir relier observations de terrain et déformation.



▲ **FIGURE 56. La rhéologie de la lithosphère.**
D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021).

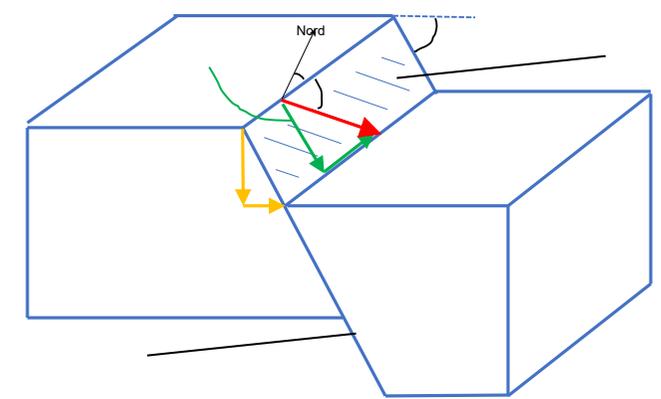
A. La déformation cassante (= fragile = discontinue = discrète)

1. La faille, déformation élémentaire du domaine fragile

a. La faille et son organisation : une fracture avec glissement le long d'un miroir de faille

| |
|---------------------------|
| Faille : |
| Miroir de faille : |
| Mur de faille : |
| Toit de faille : |
| Diaclase : |

b. La caractérisation géométrique d'une faille : pendage, rejet, azimut

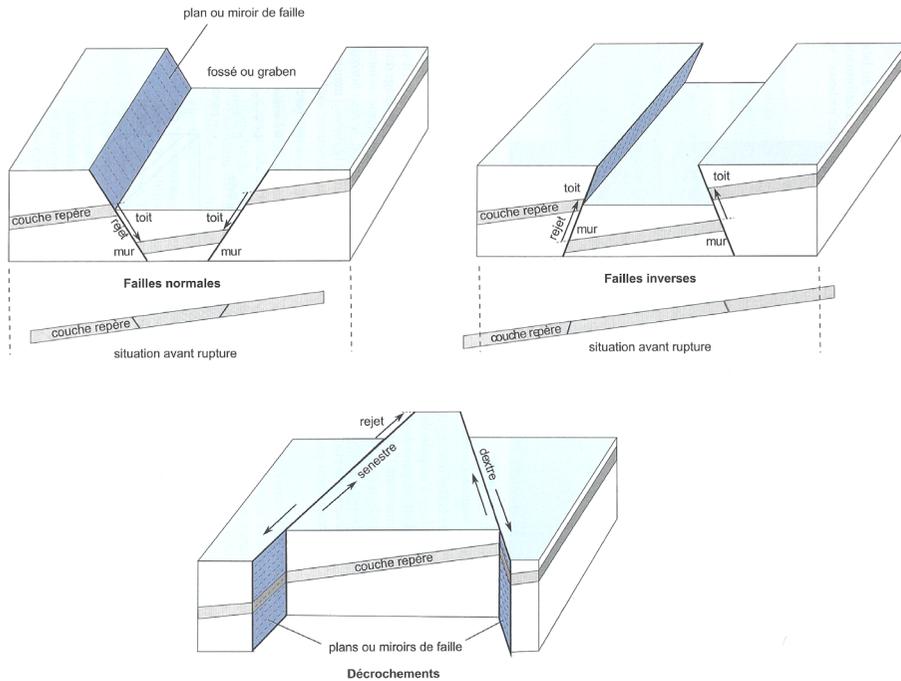


▲ **FIGURE 58. Une faille (ici normale) : organisation et vocabulaire associé.** Original 2022.

c. La typologie des failles en lien avec le régime de contraintes (et donc souvent le contexte géodynamique)

Conséquence (visible en cartographie) : les **terrains au-dessus** du miroir de faille sont **plus jeunes** que les **terrains au-dessous**.

Couches repères :



▲ FIGURE 59. **Typologie des failles.** D'après EMMANUEL *et al.* (2007)

▼ TABLEAU II. **Caractères des principaux types de failles.** D'après PEYCRU *et al.* (2015)

| Type | Faille verticale | Faille décrochante | Faille normale | Faille inverse | Chevauchement |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Pendage | vertical | vertical | < 90° | < 90° | horizontal |
| Rejet repérable | vertical (plus ancien soulevé) | horizontal (dextre ou sénestre) | vertical (mur soulevé, toit effondré) | vertical (mur affaissé, toit soulevé) | vertical (mur affaissé, toit soulevé) |

α. Des failles normales (affaissement du toit) plutôt en régime extensif

Failles normales :

β. Des failles inverses (soulèvement du toit) plutôt en régime compressif

Failles inverses :

Conséquence (visible en cartographie) : les **terrains au-dessus** du miroir de faille sont **plus vieux** que les **terrains au-dessous**.

γ. Des failles décrochantes plutôt en régime transtensif (coulissage)

Failles décrochantes (dextre / sénestre) :

Indice cartographique : les terrains de part et d'autre ont le **même âge**.

d. Remarque : la notion de failles conjuguées

Failles conjuguées :

2. Les microstructures cassantes

a. Les tectoglyphes associés aux miroirs de failles

Tectoglyphes :

Stries, cristallisations en gradins, failles secondaires... (!) orientation → direction du rejet

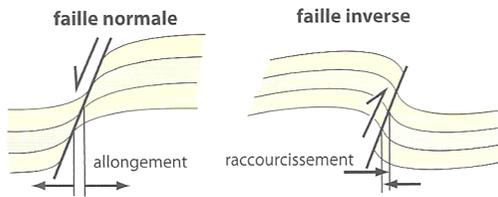
b. Dans les roches carbonatées : des joints stylolithiques (← compression), des fentes de tension (← extension) et les écailles (← coulissage)

Joints stylolithiques = stylolithes :

Fentes de tension (= d'extension) :

Écailles (de calcite) :

c. Les crochons de faille [pas forcément toujours une microstructure]



Les **crochons de faille** dessinés par la courbure des bancs de part et d'autre d'un plan de faille sont d'excellents indicateurs cinématiques.

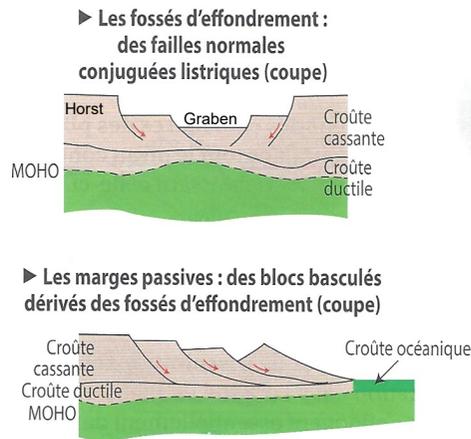
▲ FIGURE 66. **Crochons de failles.** D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013)

Bien que j'aie ici classé les **crochons** dans les **microstructures**, ceux-ci peuvent être de **taille très variable** : cm, dm, m, dam...

3. La tectonique cassante à l'échelle régionale

a. En contexte extensif

α. Une prépondérance des failles normales listriques (= incurvées), formant des blocs basculés lors du rifting et perdurant dans les marges passives



▲ FIGURE 67. **Rifting (en haut) et marge passive (en bas).** D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021)

Failles listriques :

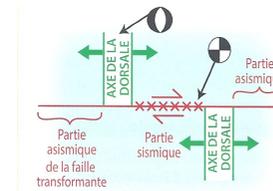
β. Une variété de failles (dont normales) dans les montagnes en effondrement gravitaire

b. En contexte compressif : un faillage varié (notamment inverse), des écailles, des chevauchements, du charriage et des écailles tectoniques

| |
|---|
| Chevauchements : |
| Nappes de charriage [allochtone sur autochtone] : |
| Klippes : |
| Écailles tectoniques : |

c. En contexte transtensif (= de coulissage) : failles transformantes près des dorsales ; failles décrochantes continentales (avec possibilité de bassin en pull-apart)

| |
|---|
| Failles transformantes : |
| Bassins en pull-apart = bassins transtensifs = rhombochasmes: |



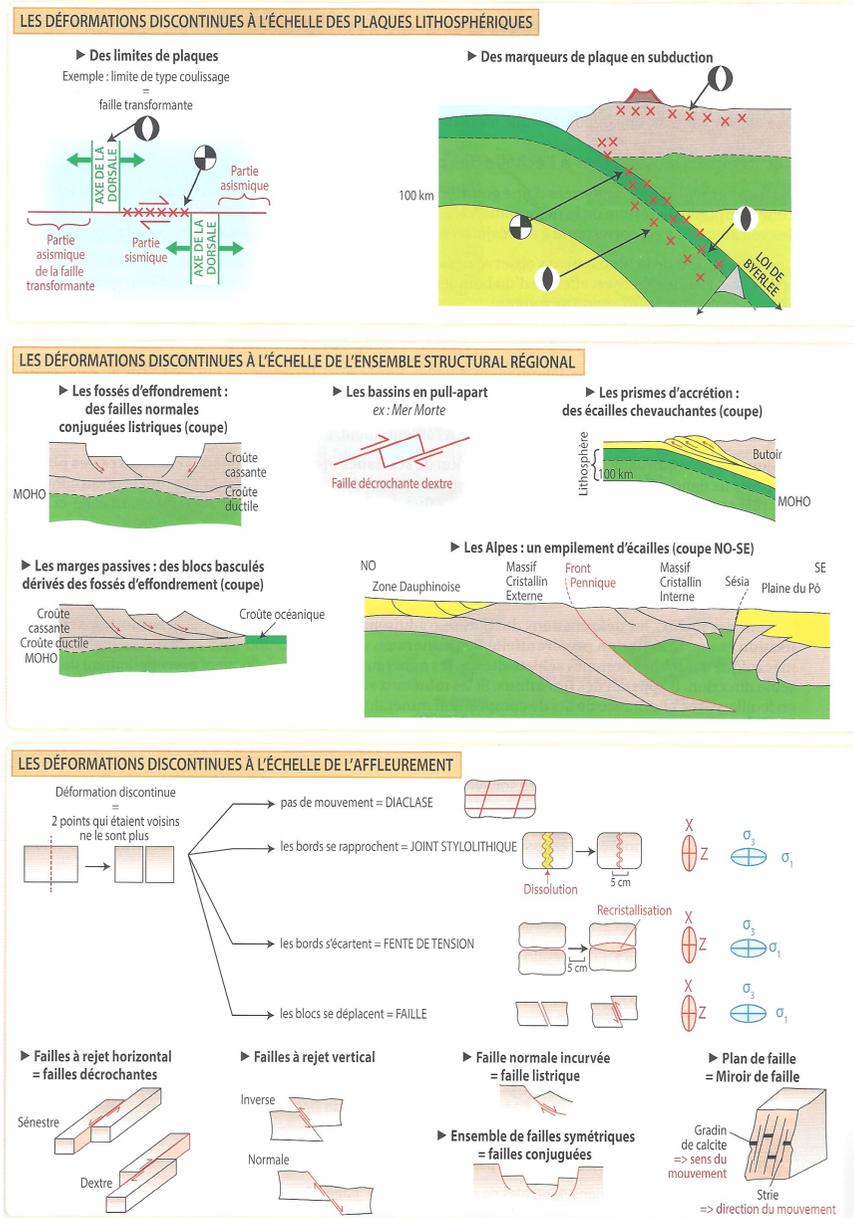
▲ FIGURE 70. **Faillle transformante.** D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021)

► Les bassins en pull-apart ex : Mer Morte



▲ FIGURE 71. **Bassin en pull-apart.** D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021)

4. Bilan



▲ FIGURE 72. Les déformations cassantes à toutes les échelles. D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021)

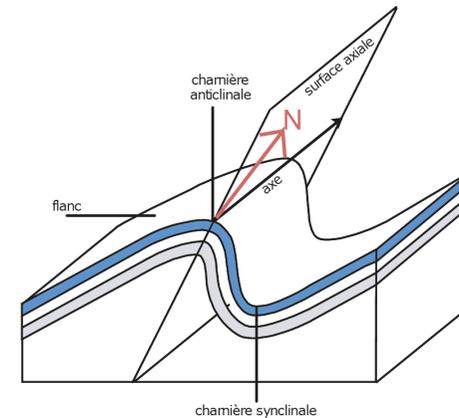
B. La déformation ductile (= souple = continue)

1. Le pli, déformation élémentaire du domaine ductile

a. Le pli et son organisation : une déformation ondulée des couches

| |
|--------------------|
| Pli : |
| Charnière du pli : |
| Axe du pli : |
| Antiforme : |
| Synforme : |

On notera qu'en coupe, un antiforme dessine un « A » et un synforme le bas d'un « S »

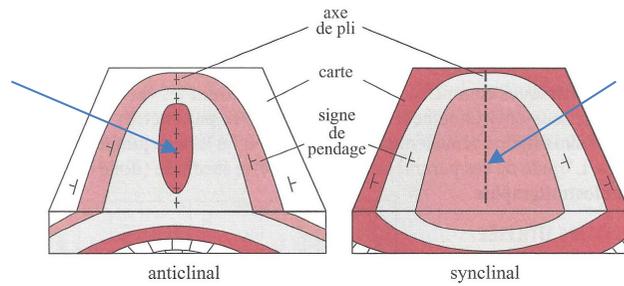


▲ FIGURE 73. Géométrie d'un pli. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

- Notons qu'un pli n'a pas de pendage général mais que, en chaque point du pli, un pendage particulier est mesurable.

b. Synclinal et anticlinal

| |
|--------------|
| Anticlinal : |
| Synclinal : |



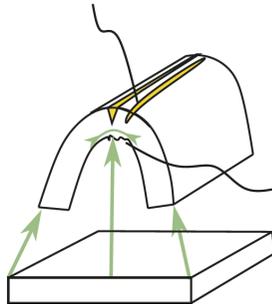
▲ FIGURE 74. **Anticlinal et synclinal en carte et coupe.** D'après EMMANUEL *et al.* (2007)

c. Pli isopaque vs. anisopaque

Pli isopaque :

Pli anisopaque :

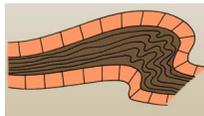
- À l'extrados du pli : des **fentes de tension** parallèles à l'axe du pli, signe d'une **extension**.
- À l'intrados du pli : des **microfailles inverses**, des **microplis**..., signes d'une **compression**.



▲ FIGURE 75. **Géométrie d'un pli.** D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

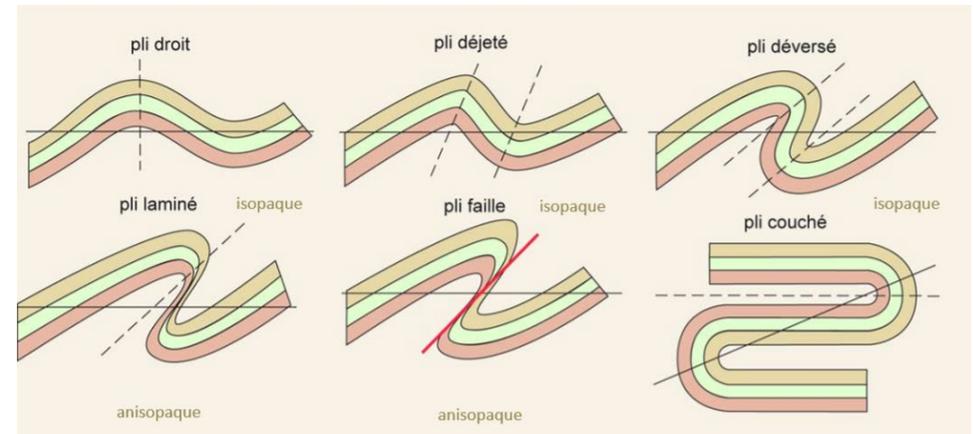
Remarque : harmonie vs. dysharmonie

Un **pli harmonique** présente **le même style de déformation sur toute son épaisseur et dans toutes ses couches**. Un **pli dysharmonique** [disharmonique ? orthographe peu usitée mais préférable ?] présente un **changement d'amplitude ou de fréquence entre les couches plissées, dessinant des plissements à l'intérieur d'un plus grand pli**.



◀ **Pli dysharmonique.**
Universalis.fr (mai 2023)

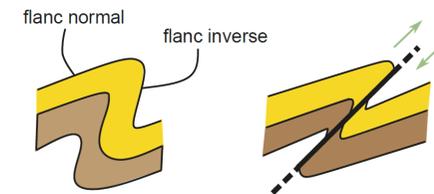
d. Orientation des plis



▲ FIGURE 77. **Quelques types de plis (plis harmonique).** D'après RENARD *et al.* (2018)

e. La notion de pli-faille : un pli associé à une faille

Pli faille :



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.

▲ FIGURE 78. **Pli faille.** D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

f. La notion de rampe : une faille inverse qui facilite le glissement et le plissement en lien avec des couches-savons

Rampe :

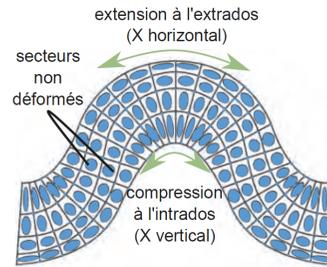
La mise en place d'écaillés tectoniques peut faire appel à ces structures.

▲ FIGURE 79. **Rampe tectonique.** D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013)

g. Des ellipsoïdes sur les plis ?

Ellipsoïdes de déformation associés à un antiforme isopaque obtenu par simple flexion.

Les secteurs de ce pli les plus déformés sont à l'extrados et à l'intrados. Il existe des secteurs non déformés.



▲ FIGURE 80. **Ellipsoïdes de déformation dans un pli isopaque.**
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

2. Les microstructures ductiles

a. Les schistosités et foliations : une répartition planaire des minéraux

Schistosité :

Foliation (schistosité cristallographique) :

- Les **plans de foliation ou de schistosité** sont souvent appelés **surfaces S**.
On peut aussi distinguer la **stratification sédimentaire**, en la notant **S0**, de la **schistosité ou foliation** qu'on note **S1**.
Dès que le **métamorphisme** est d'**intensité moyenne**, la **stratification se fond** avec la **schistosité-foliation**.
- **Déformationnellement**, les **schistosités-foliations** matérialisent le **plan XY**.

b. Les linéations : une répartition linéaire des minéraux

Linéations :

c. Les structures C/S : une interaction schistosité-cisaillement

Structures C/S :

d. Les ombres de pression (= queues de cristallisation), zones de moindre contrainte où cristallisent des minéraux

Ombres de pression = queues de cristallisation :

Note : minéraux hélicitiques (souvent des grenats) = minéraux de roches métamorphiques au sein desquels de plus petits minéraux ont cristallisé alors que le minéral principal subissait une rotation, les petits minéraux dessinant alors des structures spiralées consécutives à la rotation.

e. Une figure plissée particulière : les plis en fourreau

Pli en fourreau :

3. La déformation ductile à l'échelle lithosphérique ou régionale

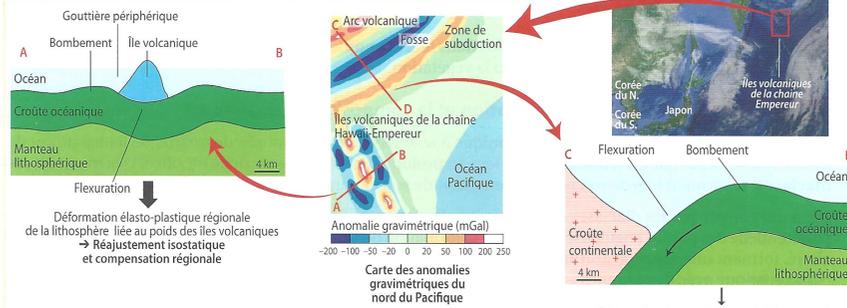
a. La flexure lithosphérique (échelle lithosphérique)

Flexure lithosphérique :

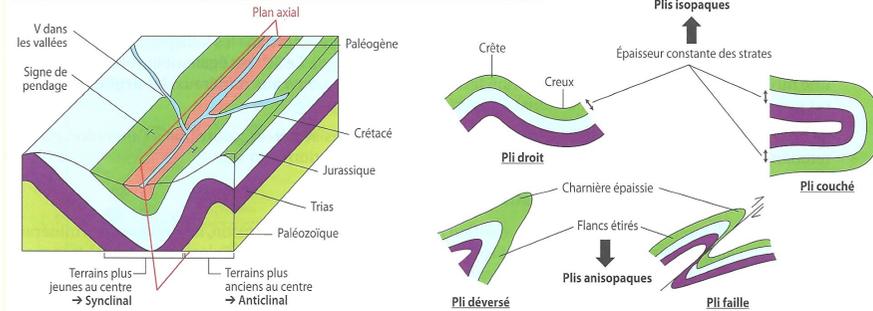
b. Les domaines plissés (échelle régionale)

4. Bilan

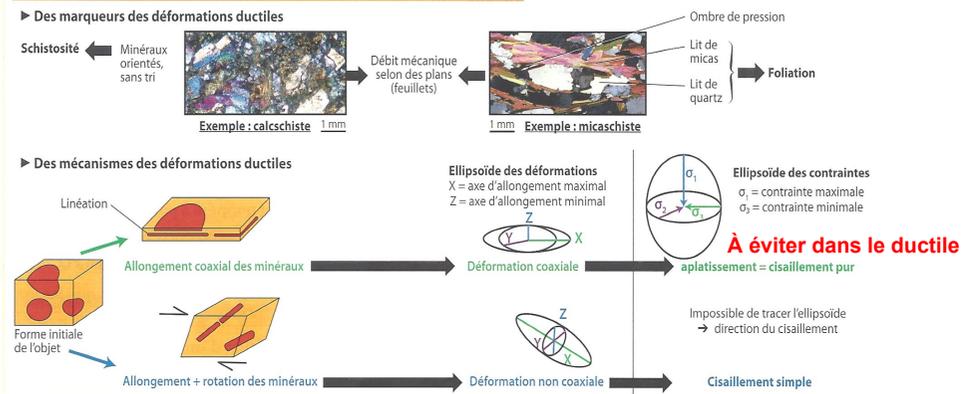
LES DÉFORMATIONS DUCTILES À L'ÉCHELLE DES PLAQUES LITHOSPHÉRIQUES



LES DÉFORMATIONS DUCTILES À L'ÉCHELLE RÉGIONALE ET DE L'AFFLEUREMENT



LES DÉFORMATIONS DUCTILES À L'ÉCHELLE DE LA ROCHE ET DES MINÉRAUX



▲ FIGURE 88. La déformation ductile. D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021)

III. Les séismes : manifestation, origine (sismogénèse) et conséquences

Voir chapitre 21
(à revoir absolument)

Capacités exigibles

- ✓ Expliquer la notion de magnitude et les ordres de grandeurs et comparer la magnitude de moment à une intensité type MSK.
- ✓ Relier les notions de magnitude et de temps de récurrence à l'évaluation de l'aléa sismique.
- ✓ Expliquer la notion de risque : distinguer les concepts d'aléa et de risque.
- ✓ Discuter la notion de cycle sismique en la confrontant avec des données géodésiques actuelles.
- ✓ Exploiter des données de mécanismes au foyer.
- ✓ Relier ces données aux contextes géodynamiques.
- ✓ Exploiter et relier des données de géodésie spatiale (GPS) permettant la surveillance des failles actives et la quantification de l'aléa par mesure de l'accumulation de déformation élastique autour de ces failles.
- ✓ Comparer en ordre de grandeur les déplacements (temps, distance, mouvement des plaques, mesures locales).

Bilan (adapté du programme)

- ✓ L'étude des séismes et l'évaluation des aléas sismiques passent par la description des événements et par des mesures et des calculs (magnitude, mécanismes au foyer, déplacement par GPS...).
- ✓ La relaxation rapide d'énergie accumulée par les déformations élastiques, mesurables par géodésie spatiale, est responsable de la formation des séismes. La notion (historique) de cycle sismique rassemble l'accumulation de déformation élastique et le rebond sismique.
- ✓ Pour un séisme donné, le mécanisme au foyer permet l'analyse de la géométrie de la faille et de son mouvement. L'étude d'un ensemble de mécanismes au foyer dans une région donnée permet de caractériser et modéliser le contexte tectonique.
- ✓ La distribution mondiale des séismes et la variabilité des mécanismes au foyer renseigne sur la géodynamique globale et sur les frontières de plaques.
- ✓ Les mesures de géodésie spatiale par GPS permettent d'évaluer les déplacements instantanés, de les comparer à ceux déterminés à l'échelle des frontières de plaque (en termes de bilan de déformation) et de préciser la connaissance de l'aléa localement.

Références

- AUBOIN, J., J. DERCOURT & B. LABESSE (1970). *Manuel de travaux pratiques de cartographie. 1^{er} cycle et maîtrise*. Dunod, Paris.
- BARD, J.-P. (1990). *Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques*. Masson, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1980).
- BARDINTZEFF, J.-M. (2006). *Volcanologie*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{er} édition 1991).
- BAROIS, P. (2004). *Guide encyclopédique des volcans*. Delachaux et Niestlé, Paris.
- BAUDE, D., Y. JUSSEURAND (dir.), A. ANDRÉ, V. CAILLAULT, A. CAILLETTE, P. CHAUVEL, A. DE QUILLACQ, F. EL AZIZ KHALIL, I. GASPERINI, V. JOYEUX, F. LABAUNE, P. DE MARCHI, A. MÉNARD-PARROD, B. MERLANT, M. PAULHIAC-PISON, P. PILLOT, S. RABOUIN, P. ROGER & R. TOURRET (2019). *Sciences de la Vie et de la Terre. 1^{re}. Enseignement de spécialité*. Bordas, Paris.
- BAUDE, D., Y. JUSSEURAND (dir.), A. ANDRÉ, X. BERTHON, A. CAILLETTE, P. CHAUVEL, P. COSENTINO, I. GASPERINI, M. GAUJOUX, V. JOYEUX, F. LABAUNE, P. DE MARCHI, A. MÉNARD-PARROD, B. MERLANT, P. PILLOT, S. RABOUIN, P. ROGER & R. TOURRET (2020). *Sciences de la Vie et de la Terre. 7^e. Enseignement de spécialité*. Bordas, Paris.
- BEAUX, J.-F. & A. MAMECIER (2012). *Les sciences de la Terre*. Nathan, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 2010).
- BEAUX, J.-F., J.-F. FOGELGESANG, P. AGARD & V. BOUTIN (2011). *Atlas de Géologie Pétrologie. BCPST 1^{re} et 2^e années*. Dunod, Paris.
- BIJU-DUVAL, B. (1999). *Géologie sédimentaire. Bassins. Environnements de dépôts. Formation du pétrole*. Technip, Paris, Institut français du pétrole (École du Pétrole et des Moteurs), Rueil-Malmaison (92).
- BISHOP, A. C., W. R. HAMILTON, A. R. WOOLEY (2001). *Guide des minéraux, roches et fossiles*. « Les Guides du naturalistes », Delachaux et Niestlé, Paris, 336 pages.
- BORDI, C., F. SAINTPIERRE (dir.), M. ALGRAIN, R. BOUDJEMAI, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2018). *Mémento Géologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- BORDI, C., F. SAINTPIERRE (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, R. BOUDJEMAI, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2021). *Mémento Géologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- BOTTINELLI, L., A. BRAHIC, L. GOUGUENHEIN, J. RIPERT & J. SERT (1993). *La Terre et l'Univers. Sciences de l'Univers*. Hachette, Paris.
- BÜRGMANN, R. & G. DRESEN (2008). Rheology of the Lower Crust and Upper Mantle: Evidence from Rock Mechanics, Geodesy and Field Observations. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **36**: 531-567. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124326>
- CAMPY, M. & J.-J. MACAIRE (2003). *Géologie de la surface*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1989).
- CARON, J.-M., A. GAUTHIER, J.-M. LARDEAUX, A. SCHAAF, J. ULYSSE & J. WOZNIAK (2003) (2^e édition, 1989). *Comprendre et enseigner la planète Terre*. Ophrys, Gap – Paris, 303 pages.
- CHAMLEY, H. (2000). *Bases de sédimentologie*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1987).
- CHANTRAINE, J., A. AUTRAN, C. CAVELIER (dir.) et collaborateurs (2003). *Carte géologique de la France à l'échelle du millionième*. Service géologique national, Bureau de Recherches géologiques et minières, Orléans, 6^e édition.
- CHEN, Z., D. LAVOIE, C. JIANG, M. J. DUCHESNE & M. MALO (2016). *Caractéristiques géologiques et évaluation des ressources pétrolières de la Formation de Macasty, Ile d'Anticosti, Québec, Canada*. Geological Survey of Canada, Open File **8019**. <https://doi.org/10.4095/297893>
- COJAN, I. & M. RENARD (2006). *Sédimentologie*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1999).
- CORBOZ, P. & W. FREI (2013). Application de la sismique hybride dans les sous-sols instables. *Mémoires de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, **25** : 331-340. https://wp.unil.ch/risrk/files/2013/11/27_Corboz_MemSVSN2013_C_Li.pdf (consultation janvier 2022)
- CORDIER, P. & H. LEROUX (2008). *Ce que disent les minéraux*. Belin, Paris.
- COUVET, D. & A. TEYSSÈDRE-COUVET (2010). *Écologie et biodiversité. Des populations aux socioécosystèmes*. Belin, Paris.
- DANIEL, J.-Y. (dir.), A. BRAHIC, M. HOFFERT, R. MAURY, A. SCHAAF & M. TARDY (2006). *Sciences de la Terre et de l'Univers*. Vuibert, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1999).
- DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1^{re} année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), C. BORDI, F. SAINTPIERRE, M. ALGRAIN-PITAVY, M. QUERTINIEZ, A. PROUST, M. VABRE A. HELME-GUIZON & B. MOLLIER (2019). *Biologie Géologie BCPST 2^e année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, B. MOLLIER, A. PROUST, M. QUERTINIEZ, F. SAINTPIERRE & M. VABRE (2021). *Prépas scientifiques BCPST 1^{re} année. Biologie Géologie. Tout-en-un*. Vuibert, Paris.
- DELMAS, R., S. CHAUZY, J.-M. VERSTRAETE & H. FERRÉ (2007). *Atmosphère, océan et climat*. Belin, Paris.
- DENCEUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENCEUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1^{re} année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENCEUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DERCOURT, J. (2002). *Géologie et géodynamique de la France. Outre-mer et européenne*. « Sciences Sup », Dunod, Paris, 3^e édition (1^{er} édition 1997), 330 pages.
- DERCOURT, J., J. PAQUET, P. THOMAS & C. LANGLOIS (2006). *Géologie. Objets, méthodes et modèles*. Dunod, Paris, 12^e édition (1^{er} édition 1974).
- DUCO, A. (dir.), A. CARPENTIER, F. CELLE, G. DAoust, N. DEWITZ, C. ETNER, H. FROISSARD, C. LAVILLE, A.-M. LE MOINE, L. LOISON, C. MÉMETEAU, B. MSHID, J.-M. PICOCHÉ, S. REBULARD, P. REY, A. TASSEL, P.-O. THÉBAULT, E. SALGUEIRO, A. SEGUIN & S. VIGIER, 2010. *Sciences de la Vie et de la Terre Seconde*. Belin, Paris.
- EMMANUEL, L., M. DE RAFÉLIS & A. PASCO (2007). *Maxi fiches Géologie*. Dunod, Paris.
- FETTES, D. & J. DESMONS (dir.) (2007). *Metamorphic Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks*. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- FOUCAULT, A. & J.-F. RAOULT (2005). *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Paris, 6^e édition (1^{er} édition 1980).
- FOSSEN, H. (2016). *Structural geology*. 2nd edition (1st edition 2010), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- FOUCAULT, A., J.-F. RAOULT, F. CECCA & B. PLATEVOET (2014). *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Paris, 8^e édition (1^{er} édition 1980).
- GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1^{re} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- GUILLERME, D., M. JUBAULT-BREGLER (dir.), O. AVISSEAU, S. BIHEL, N. BIHEL, Y. BOURVEN, V. BOUTIN, P. COMBEMOREL, P. DELHOUME, J.-M. DUPIN, A. FLORIMOND, V. GUILLI, É. LE BRIS, M. MAHÉ, A. MÉRAH, É. RAINOUARD, M. RAJCHENBACH & F. SAINTPIERRE (2019). *Sciences de la Vie et de la Terre 1^{re}. Enseignement de spécialité*. Nathan, Paris.
- HAMAI, L. (2016). *Étude thermodynamique de la zone de transition mer-continent de la marge algérienne : implication géodynamique*. Thèses de doctorat, Université Côte d'Azur, Nice.
- JAUJARD, D. (2015). *Géologie. Géodynamique. Pétrologie. Études de terrain*. Maloine, Paris.
- JOLIVET, L. & H.-C. NATAF (1998). *Géodynamique*. Dunod, Paris.
- JUNG, J. (1958). *Précis de pétrographie. Roches sédimentaires, métamorphiques et éruptives*. Masson et Cie, Paris.
- JUTEAU, T. & R. MAURY (2008). *La croûte océanique. Pétrologie et dynamique endogènes*. Vuibert, Paris.
- KRÉMEUR, A.-S., A. VINCENT & N. COLTICE (2019). *Géologie*. Dunod, Paris.
- KRISHNARAJA, A. R., S. KANDASAMY & M. KOWSALYA (2018). Influence of polymeric and non-polymeric fibers in hybrid engineered cementitious composites. *Romanian Journal of Materials*, **48** (4), 507-513.
- LACOSTE, A. & R. SALANON (1969). *Éléments de biogéographie et d'écologie*. Nathan, Paris.
- LAGABRIELLE, Y., R. MAURY & M. RENARD (2013). *Mémo visuel de Géologie. L'essentiel en fiches. Licence. Prépas. CAPES*. Dunod, Paris.
- LAY, T. (2015). Chapter 1.22. Deep Earth Structure: Lower Mantle and D". In G. SCHUBERT (dir.). *Treatise on Geophysics (Second Edition). Volume 1. Deep Earth Seismology*. Elsevier, Amsterdam, pp. 638-723. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00019-1>
- LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), V. AUDEBERT, C. BRUNET, G. GUTJAHR, Y. JUSSEURAND, A. MATHEVET, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE, 2007. *SVT Sciences de la Vie et de la Terre Première S*. Bordas, Paris.
- LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), C. BRUNET, A. CHASLEIX, B. FORESTIER, G. GUTJAHR, Y. JUSSEURAND, A. MATHEVET, P. PILLOT, S. RABOUIN & Y. VAREILLE, 2010. *Sciences de la Vie et de la Terre Seconde*. Bordas, Paris.
- LOWRIE, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics. Second Edition*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MACKENZIE, W. S. & A. E. ADAMS (2005). *Initiation à la pétrographie*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{er} édition 1992), 192 pages.
- MARSHAK, S. (2010). *Terre, portrait d'une planète*. Traduction O. ÉVRAD. De Boeck, Bruxelles (3^e édition américaine 2008).
- MASCLÉ, G. (2008). *Les roches, mémoire du temps*. EDP Sciences, Les Ulis (91).
- MATTAUER, M. (1998). *Ce que disent les pierres*. Belin – Pour la Science, Paris.
- MEHIER, B. (1995). *Magmatisme et tectonique des plaques*. Ellipses, Paris.
- MERCIER, J., P. VERGÉLY & Y. MISSENARD (2016). *Tectonique*. 4^e édition (1^{er} édition 1992), Dunod, Malakoff.
- NALIBOFF, J. B., S. J. H. SUITER, G. PÉRON-PINVIDIC, P. T. OSMUNDSEN & J. TETREAULT (2017). Complex fault interaction controls continental rifting. *Nature communications*, 1179. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00904-x>
- NOUGIER, P. (2000a). *Déformation des roches et transformation de leurs minéraux. Initiation à la tectonique*. Ellipses, Paris.
- NOUGIER, P. (2000b). *Structure et évolution du globe terrestre*. Ellipses, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1993).
- PERRAS, M. A. & M. S. DIEDERICHS (2014). A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing. *Geotechnical and Geological Engineering*, **32** (2): 525-546. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9732-0>

PERRIER, C. & J.-F. BEAUX (dir.), A. BOUFFIER, L. BOUGEOIS, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J. DÉMARET-NICOLAS, A. EMOND, S. MAURY, O. MONNIER, T. SOUBAYA, A. VERGNAUD & A. WOEHRLÉ (2021). *Biologie-Géologie BCPST 1. Tout-en-un*. Dunod, Malakoff (F).

PEYCRU, P. (dir.), J.-M. DUPIN, J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. VAN DER REST, F. CARIU, C. PERRIER & B. AUGÈRE (2008). *Géologie tout-en-un 1^{re} et 2^e années BCPST*. Dunod, Paris.

PEYCRU, P., J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, C. BECK, F. CARIU, J.-M. DUPIN, J.-L. SCHNEIDER, M. TARDY & C. VAN DER REST (2015). *Géologie tout-en-un BCPST 1^{er} et 2^e années*. Dunod, Paris.

PEYCRU, P., C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN & C. VAN DER REST (2019). *Biologie et géologie. BCPST 1 et 2. Tout-en-fiches*. Dunod, Paris.

POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE & M. RENARD (2003) (12^e édition, 1965). *Éléments de géologie*. « Masson Sciences », Dunod, Paris, 746 pages.

POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE, M. RENARD & S. GUILLOT (2011). *Éléments de géologie*. Dunod, Paris, 14^e édition (1^e édition 1965).

PLUMMER, C. C., D. H. CARLSON & L. HAMMERSLEY (2016). *Physical Geology. Fifteenth Edition*. McGraw-Hill Education, New York (NJ), USA.

PREVOT, C., S. REBULARD (dir.), A. BIELLE, C. BORDONADO, A. CARPENTIER, J. FAIVRE, S. FRAYON, G. GEHIN, B. PERIC, L. SALOMON, R. SEYED, É. TREHIOU, M. TREIBER, A. VAN PRAET & I. VELTZ (2019). *SVT 1^{re} enseignement de spécialité*. Belin, Paris.

PREVOT, C., S. REBULARD (dir.), G. BARTHOLE, C. BORDONADO, R. CADET, S. FRAYON, R. SEYED, É. TREHIOU, M. TREIBER & I. VELTZ (2020). *SVT 1^{re} enseignement de spécialité*. Belin, Paris.

PROVOST, A. & C. LANGLOIS (2011). *Mini manuel de Géologie – Roches et géochimie*. Dunod, Paris.

RENARD, M., Y. LAGABRIELLE, E. MARTIN & M. DE RAFÉLIS (2018). *Éléments de géologie. 16^e édition du « Pomerol »*. 1^{re} édition 1965 (Armand Colin). Dunod, Paris.

ROBERT, C. & R. BOUSQUET (2013). *Géosciences. La dynamique du système Terre*. Belin, Paris.

SANTOS, J. A. N. CATAPANG & E. D. REYTA (2019). Understanding the Fundamentals of Earthquakes signal Sensing Network. *AnalogDialogue*, 53(3): 11 pp.
<https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-53/number-4/understanding-the-fundamentals-of-earthquake-signal-sensing-networks.pdf> (consultation janvier 2022).

SARAO, A., M. SUGAN, G. BRESSAN, G. RENNER & A. RESTIVO (2021). A focal mechanism catalogue of earthquakes that occurred in the southeastern Alps and surrounding areas from 1928–2019. *Earth System Science Data*, 13 (5): 2245–2258. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2245-2021>

SCHUELLER, S. (2004). *Localisation de la déformation et fracturation associée. Étude expérimentale et numérique sur des analogues de la lithosphère continentale*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00009829/>

TAVERNIER, R. & J. LAMARQUE (1996). *Enseigner la biologie et la géologie à l'école élémentaire*. Bordas, Paris.

VAN DER PLUIJM, B. A. & S. MARSHAK (2004). *Earth Structure. An introduction to structural geology and tectonics*. Norton & Company, New York (NY), USA.

VIDAL, P. (1994). *Géochimie*. Dunod, Paris.

Plan du chapitre

| | |
|--|----------|
| Introduction | 1 |
| I. Caractérisation géométrique, physique et expérimentale de la déformation des objets géologiques | 2 |
| A. Les aspects géométriques et dynamiques fondamentaux de la déformation | 2 |
| 1. La déformation, une modification géométrique des objets | 2 |
| a. La déformation : un changement de forme (← distorsion), orientation (← rotation) et/ou localisation (← translation) d'un objet | 2 |
| b. Typologies de la déformation | 2 |
| α. La rupture ou le fluage : déformation discontinue (= discrète = cassante = fragile) vs. continue (ductile = souple) | 2 |
| β. Parallélisme des droites ou courbure : déformation homogène (cisaillement homogène au sens large) vs. hétérogène | 2 |
| γ. Focus sur le cisaillement homogène : cisaillement pur (aplatissement-étirement sans rotation : déformation coaxiale) et cisaillement simple [cisaillement au sens le plus strict] (rotation : déformation non coaxiale) | 2 |
| c. Une déformation modélisable dans un repère orthonormé par un ellipsoïde (3D) ou une ellipse (2D) des déformations | 3 |
| α. Des ellipsoïdes de déformation comprenant un axe de plus grand allongement (X), un axe de plus grand raccourcissement (souvent Z) et, en 3D, un axe intermédiaire (souvent Y) | 3 |
| β. Application à la déformation ductile homogène : cisaillements purs et simples | 3 |
| d. De la déformation incrémentale à la déformation finie | 3 |
| α. Notions de déformation incrémentale et déformation finie (= totale) | 3 |
| β. Un chemin de déformation souvent difficile à reconstituer en cas de déformation complexe (déformation hétérogène) | 3 |
| e. La quantification de la déformation homogène | 3 |
| α. La quantification de la déformation linéaire (typiquement applicable dans le cas d'un cisaillement pur... mais aussi simple) : extension (e ou ε), étirement (S) et élongation quadratique (λ) | 3 |
| β. La quantification de la déformation cisailante au sens strict (= par cisaillement simple) : angle de déformation ψ et déformation cisailante γ | 4 |
| γ. La quantification de la déformation avec une composante linéaire et une composante cisailante : toutes les quantifications précédentes | 4 |
| f. L'étude des situations hors de la déformation continue homogène | 4 |
| α. L'étude de la déformation continue hétérogène | 4 |
| β. L'étude de la déformation discontinue | 4 |
| g. Déformation distribuée (= diffuse) ou localisée | 5 |
| h. Notion de tectonite : une roche « tectonisée » (= notoirement déformée) | 5 |
| 2. La déformation, une réponse dynamique à des contraintes | 5 |
| a. Notion de contrainte σ : la résultante des forces appliquées en un point | 5 |
| b. La décomposition d'une contrainte dans un plan : contrainte normale σ _N (composante compressive) et contrainte tangentielle (composante cisailante s. str.) σ _T = τ | 6 |
| c. Les ellipsoïdes (3D) de contraintes (ou ellipses en 2D), un outil de compréhension de la compression-étirement (cisaillement pur) | 6 |
| α. Trois composantes en 3D formant un ellipsoïde des contraintes : σ ₁ (contrainte maximale), σ ₂ (contrainte intermédiaire) et σ ₃ (contrainte minimale) | 6 |
| β. Contraintes isotropes (→ compaction) vs. anisotropes (→ compaction + déformation) | 6 |
| γ. De l'ellipsoïde des déformations à l'ellipsoïde des contraintes | 6 |
| δ. La nécessité de vérifier la coaxialité d'une déformation avant d'inférer un ellipsoïde de contrainte, adapté aux seules situations de cisaillement pur | 7 |

| | |
|---|-----------|
| ε. Contrainte moyenne, contrainte déviatorique (= déviateur), contrainte différentielle | 7 |
| d. Bilan sur le lien déformation-contrainte dans le cadre des cisaillements pur et simple | 7 |
| B. L'apport des données expérimentales à la compréhension de la déformation | 7 |
| 1. Modalités de l'étude expérimentale de la déformation rocheuse | 7 |
| a. L'étude de la réponse à la compression : des cylindres de roches placés dans des presses triaxiales | 7 |
| b. L'étude la réponse à la traction : des cylindres ou des parallélépipèdes de roches soumis à un test de traction | 8 |
| 2. Une réponse typique en trois temps : fluage élastique, fluage plastique, rupture | 8 |
| a. L'absence de réponse déformationnelle aux faibles contraintes | 9 |
| b. Une déformation réversible : le domaine ductile élastique | 9 |
| c. Une déformation irréversible (= définitive) : le domaine ductile plastique ; notions de déformation résiduelle et de fluage à contrainte constante | 9 |
| d. Une déformation cassante : la rupture | 9 |
| 3. L'influence de divers paramètres physico-chimiques sur la déformation | 9 |
| a. Le facteur lithologique et minéralogique (la composition de la roche) et la notion de compétence des roches | 9 |
| b. Le facteur pression lithostatique (et donc profondeur) | 9 |
| c. Le facteur température (qui augmente également souvent avec la profondeur, mais pas seulement) | 10 |
| d. Le facteur fluides (pressions des fluides) : une action variable qui dépend de la pression lithostatique | 10 |
| e. Le facteur temps : la vitesse de charge | 10 |
| α. Un paramètre expérimental loin des valeurs réelles | 10 |
| β. Une lenteur qui favorise la ductilité | 10 |
| f. Remarque : une résistance généralement moindre à la traction qu'à la compression | 11 |
| g. Bilan | 11 |
| 4. La déformation rocheuse réelle sur le temps long : fluages primaire, secondaire et tertiaire | 11 |
| C. Des lois physiques des matériaux rocheux à la compréhension de la stratification rhéologique de la lithosphère | 11 |
| 1. Le recours à deux lois physiques empiriques | 11 |
| a. Une loi exprimant la contrainte de rupture de tout matériau en fonction de la profondeur : la loi de friction (= de frottement) de BYERLEE | 11 |
| b. Une loi, propre à chaque matériau, exprimant la limite d'élasticité d'un matériau en fonction de la profondeur : la loi de fluage | 12 |
| 2. La combinaison de ces deux lois physiques, une opération à l'origine des profils rhéologiques de la lithosphère | 12 |
| a. Les enveloppes rhéologiques de la lithosphère continentale (en compression) : deux modèles principaux | 13 |
| α. Une enveloppe rhéologique à quatre niveaux modélisés par deux minéraux dominants (quartz, olivine) | 13 |
| β. Une enveloppe rhéologique à (cinq-)six niveaux modélisés par trois minéraux dominants (quartz, feldspath, olivine) [pour information ?] | 13 |
| b. Les enveloppes rhéologiques de la lithosphère océanique (en compression) | 13 |
| 3. Limites et variations (spatiales et temporelle) des enveloppes rhéologiques : une réalité plus complexe et diverse que le modèle | 13 |
| a. L'importance des matériaux retenus (impact sur les lois de fluage) | 13 |
| b. L'importance de l'hydratation et des fluides (impact sur les lois de fluage) | 13 |
| c. L'importance du gradient géothermique (impact sur les lois de fluage) | 13 |
| d. L'importance du régime de contraintes compressif vs. extensif (impact surtout sur la loi de BYERLEE) | 13 |
| 4. Des découplages sismiques et mécaniques au sein de la lithosphère | 14 |
| a. Un découplage sismique profond entre croûtes supérieure et inférieure : des foyers dans les zones cassantes (= zone sismogénique) | 14 |

| | |
|---|-----------|
| b. Un découplage mécanique profond entre niveaux de la croûte ou entre croûte et manteau | 14 |
| c. Éléments de tectonique superficielle : les niveaux de décollement ou couches-savon (transition socle-sédiments, couches sédimentaires particulières) | 14 |
| D. Les causes et les mécanismes de la déformation | 15 |
| 1. L'origine des contraintes générant la déformation | 15 |
| a. L'origine principale et majeure : la géodynamique et le déplacement horizontal des plaques lithosphériques | 15 |
| b. La déformation gravitaire (extension tardi-orogénique, rebond post-glaciaire, tectonique salifère...) | 15 |
| 2. Les mécanismes de la déformation : focus sur la dynamique du réseau cristallin | 15 |
| a. La présence de zones de fragilité dans le réseau cristallin | 15 |
| b. Les mécanismes associés à la déformation cassante : fracturation, cataclase, mylonitisation ; existence d'une possibilité de recristallisations | 15 |
| c. Les mécanismes permettant le fluage : fluage par diffusion, fluage par pression-dissolution (→ ombres de pression), fluage-dislocation | 15 |
| II. Les objets géologiques déformés : les manifestations et les marqueurs de la déformation aux différents échelles | 17 |
| A. La déformation cassante (= fragile = discontinue = discrète) | 17 |
| 1. La faille, déformation élémentaire du domaine fragile | 17 |
| a. La faille et son organisation : une fracture avec glissement le long d'un miroir de faille | 17 |
| b. La caractérisation géométrique d'une faille : pendage, rejet, azimut | 17 |
| c. La typologie des failles en lien avec le régime de contraintes (et donc souvent le contexte géodynamique) | 18 |
| α. Des failles normales (affaissement du toit) plutôt en régime extensif | 18 |
| β. Des failles inverses (soulèvement du toit) plutôt en régime compressif | 18 |
| γ. Des failles décrochantes plutôt en régime transtensif (coulissage) | 18 |
| d. Remarque : la notion de failles conjuguées | 18 |
| 2. Les microstructures cassantes | 18 |
| a. Les tectoglyphes associés aux miroirs de failles | 18 |
| b. Dans les roches carbonatées : des joints stylolithiques (← compression), des fentes de tension (← extension) et les écaïlles (← coulissage) | 18 |
| c. Les crochons de faille [pas forcément toujours une microstructure] | 19 |
| 3. La tectonique cassante à l'échelle régionale | 19 |
| a. En contexte extensif | 19 |
| α. Une prépondérance des failles normales listriques (= incurvées), formant des blocs basculés lors du <i>rifting</i> et perdurant dans les marges passives | 19 |
| β. Une variété de failles (dont normales) dans les montagnes en effondrement gravitaire | 19 |
| b. En contexte compressif : un faillage varié (notamment inverse), des écaïlles, des chevauchements, du charriage et des écaïlles tectoniques | 19 |
| c. En contexte transtensif (= de coulissage) : failles transformantes près des dorsales ; failles décrochantes continentales (avec possibilité de bassin en <i>pull-apart</i>) | 19 |
| 4. Bilan | 20 |
| B. La déformation ductile (= souple = continue) | 20 |
| 1. Le pli, déformation élémentaire du domaine ductile | 20 |
| a. Le pli et son organisation : une déformation ondulée des couches | 20 |
| b. Synclinal et anticlinal | 20 |
| c. Pli isopaque vs. anisopaque | 21 |
| d. Orientation des plis | 21 |
| e. La notion de pli-faille : un pli associé à une faille | 21 |
| f. La notion de rampe : une faille inverse qui facilite le glissement et le plissement en lien avec des couches-savons | 21 |
| g. Des ellipsoïdes sur les plis ? | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 2. Les microstructures ductiles | 22 |
| a. Les schistosités et foliations : une répartition planaire des minéraux | 22 |
| b. Les linéations : une répartition linéaire des minéraux | 22 |
| c. Les structures C/S : une interaction schistosité-cisaillement | 22 |
| d. Les ombres de pression (= queues de cristallisation), zones de moindre contrainte où cristallisent des minéraux | 22 |
| e. Une figure plissée particulière : les plis en fourreau | 22 |
| 3. La déformation ductile à l'échelle lithosphérique ou régionale | 22 |
| a. La flexure lithosphérique (échelle lithosphérique) | 22 |
| b. Les domaines plissés (échelle régionale) | 22 |
| 4. Bilan | 22 |
| III. Les séismes : manifestation, origine (sismogénèse) et conséquences | 23 |
| Références | 24 |
| Plan du chapitre | 25 |
| Plan simplifié du chapitre (3 niveaux de plan) | 27 |
| Plan du chapitre (2 niveaux de plan) | 28 |

Plan simplifié du chapitre (3 niveaux de plan)

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 1 |
| I. Caractérisation géométrique, physique et expérimentale de la déformation des objets géologiques | 2 |
| A. Les aspects géométriques et dynamiques fondamentaux de la déformation | 2 |
| 1. La déformation, une modification géométrique des objets | 2 |
| 2. La déformation, une réponse dynamique à des contraintes | 5 |
| B. L'apport des données expérimentales à la compréhension de la déformation | 7 |
| 1. Modalités de l'étude expérimentale de la déformation rocheuse | 7 |
| 2. Une réponse typique en trois temps : fluage élastique, fluage plastique, rupture | 8 |
| 3. L'influence de divers paramètres physico-chimiques sur la déformation | 9 |
| 4. La déformation rocheuse réelle sur le temps long : fluages primaire, secondaire et tertiaire | 11 |
| C. Des lois physiques des matériaux rocheux à la compréhension de la stratification rhéologique de la lithosphère | 11 |
| 1. Le recours à deux lois physiques empiriques | 11 |
| 2. La combinaison de ces deux lois physiques, une opération à l'origine des profils rhéologiques de la lithosphère | 12 |
| 3. Limites et variations (spatiales et temporelle) des enveloppes rhéologiques : une réalité plus complexe et diverse que le modèle | 13 |
| 4. Des découplages sismiques et mécaniques au sein de la lithosphère | 14 |
| D. Les causes et les mécanismes de la déformation | 15 |
| 1. L'origine des contraintes générant la déformation | 15 |
| 2. Les mécanismes de la déformation : focus sur la dynamique du réseau cristallin | 15 |
| II. Les objets géologiques déformés : les manifestations et les marqueurs de la déformation aux différentes échelles | 17 |
| A. La déformation cassante (= fragile = discontinue = discrète) | 17 |
| 1. La faille, déformation élémentaire du domaine fragile | 17 |
| 2. Les microstructures cassantes | 18 |
| 3. La tectonique cassante à l'échelle régionale | 19 |
| 4. Bilan | 20 |
| B. La déformation ductile (= souple = continue) | 20 |
| 1. Le pli, déformation élémentaire du domaine ductile | 20 |
| 2. Les microstructures ductiles | 22 |
| 3. La déformation ductile à l'échelle lithosphérique ou régionale | 22 |
| 4. Bilan | 22 |
| III. Les séismes : manifestation, origine (sismogénèse) et conséquences | 23 |
| Références | 24 |
| Plan du chapitre | 25 |
| Plan simplifié du chapitre (3 niveaux de plan) | 27 |
| Plan du chapitre (2 niveaux de plan) | 28 |

Plan du chapitre (2 niveaux de plan)

| | |
|--|----|
| Introduction | 1 |
| I. Caractérisation géométrique, physique et expérimentale de la déformation des objets géologiques | 2 |
| A. Les aspects géométriques et dynamiques fondamentaux de la déformation | 2 |
| B. L'apport des données expérimentales à la compréhension de la déformation | 7 |
| C. Des lois physiques des matériaux rocheux à la compréhension de la stratification rhéologique de la lithosphère | 11 |
| D. Les causes et les mécanismes de la déformation | 15 |
| II. Les objets géologiques déformés : les manifestations et les marqueurs de la déformation aux différentes échelles | 17 |
| A. La déformation cassante (= fragile = discontinue = discrète) | 17 |
| B. La déformation ductile (= souple = continue) | 20 |
| III. Les séismes : manifestation, origine (sismogénèse) et conséquences | 23 |
| Références | 24 |
| Plan du chapitre | 25 |
| Plan simplifié du chapitre (3 niveaux de plan) | 27 |
| Plan du chapitre (2 niveaux de plan) | 28 |

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.

Document produit en avril 2021 • Dernière actualisation : mars 2024.

Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com

Adresse de téléchargement : <https://www.svt-tanguy-jean.com/>



Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.