

**TP ST
D****DEFORMATIONS**COURS : **ST-D, ST-B, ST-C, ST-G,** TP : **ST-A2, TERRAIN**

L'existence de contraintes au sein des formations rocheuses conduit à des déformations de ces dernières, qui peuvent être étudiées à différentes échelles :

- Microscopique (au microscope polarisant)
- Macroscopique (échelle de l'échantillon)
- A l'échelle de l'affleurement, ou dans le paysage
- A l'échelle de la région (par exemple avec des cartes, données satellitaires...)
- A l'échelle des plaques lithosphériques

Le but de ce TP est d'observer et d'interpréter des objets tectoniques à toutes les échelles.

Programme officiel :

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 des contraintes.
 Analyser des microstructures associées aux structures d'échelle supérieure.
 Analyser un style structural régional.
 Savoir relier observations de terrain et déformation.

Compétences :

Caractériser des déformations et y associer, lorsque cela est possible, des contraintes : ellipsoïde des déformations et des contraintes.
 Exploiter des données utilisant des approches géophysiques :
 Mécanisme au foyer, courbes rhéologiques
 données GPS, interférométrie radar, corrélation optique
 Analyser un paysage ou un affleurement.
 Utiliser une carte géologique.
 Réaliser une observation au microscope optique.

Plan du TP :**1. Les grands types de déformation : (1) déformations cassantes = discontinues**

- 1.1. Déformations cassantes avec déplacement : failles, chevauchements, charriages
- 1.2. Déformations cassantes sans déplacement des blocs : fracture, joint stylolitique

2. Les grands types de déformation : (2) déformations continues = ductiles

- 2.1. Déformations continues homogènes
- 2.2. Déformations continues hétérogènes
- 2.3. Déformations mixtes : associations de failles et de plis
- 2.4. Zones de cisaillement
- 2.5. Résumé

3. Observations

- 3.1. Diversité des déformations
- 3.2. Observations d'échantillons
- 3.3. Observation d'un paysage
- 3.4. Observations à l'échelle régionale

4. Une étude à l'échelle lithosphérique : la diversité des subductions

- 4.1. Rappel : des marqueurs de subduction, au niveau des marges océaniques actives
- 4.2. Comparaison de la subduction chilienne et de la subduction des Mariannes
- 4.3. Éléments de correction de la comparaison

Travail préparatoire :

 Lecture attentive des notions générales sur les déformations (parties 1 et 2) et des rappels sur les marqueurs de subduction (partie 4.1)

1. Les grands types de déformation : (1) déformations cassantes = discontinues

Une déformation est dite discontinue s'il y a présence de rupture. L'objet (roche, minéral...) est fracturé en deux ou plusieurs fragments qui se déplacent éventuellement l'un par rapport à l'autre le long d'une surface de discontinuité. Ce n'est pas une déformation qui concerne tout l'objet. On l'appelle donc aussi déformation non pénétrative. Elle est associée à un comportement fragile ou cassant du matériau.

1.1. Déformations cassantes avec déplacement : failles, chevauchements, charriages

⇒ Diversité des failles (rappel)

Faille (n.f.) : Cassure avec déplacement relatif des blocs.

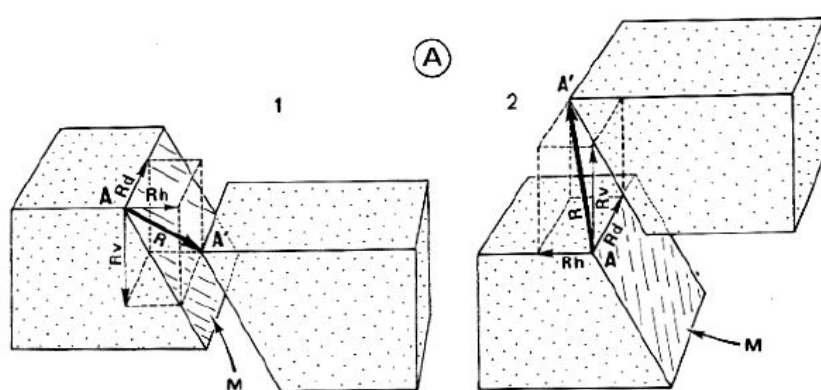
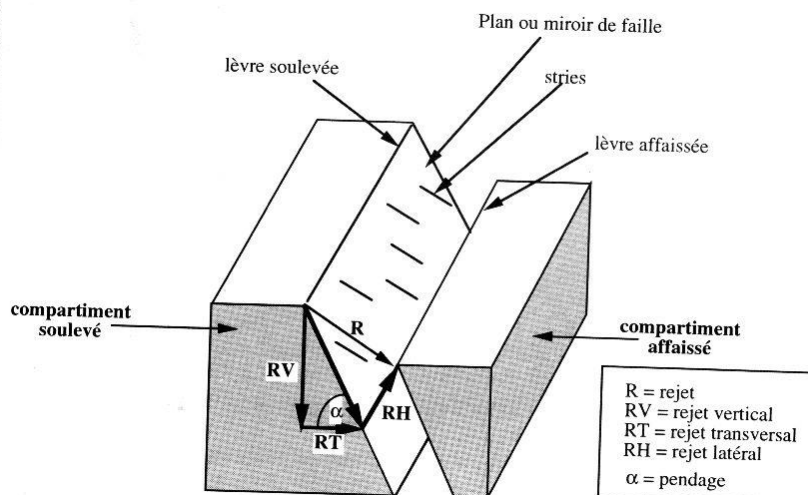
Le **plan de faille** est parfois appelé **miroir**, car il peut être poli par frottement entre les 2 blocs de part et d'autre de la faille. Ce frottement génère souvent des stries qui marquent la direction de déplacement relatif des 2 plans.

Faille **normale** = rejet horizontal positif donc allongement horizontal ; toit effondré.

Faille **inverse** = rejet horizontal négatif donc raccourcissement horizontal ; toit soulevé.

Décrochement = rejet vertical nul ; dextre ou senestre.

Figure 1 : Les éléments de définition de la faille



M : miroir de la faille (plan de faille), avec stries

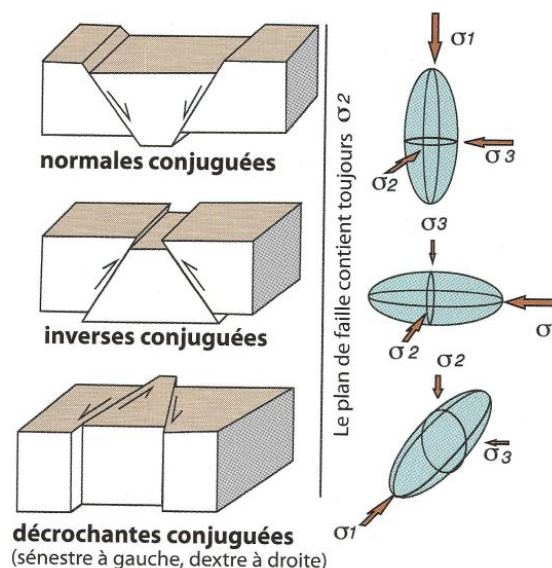
Rd : décrochement

Rh : rejet horizontal

Rv : rejet vertical

1 : faille normal, regard vers la droite

2 : faille inverse, regard vers la gauche

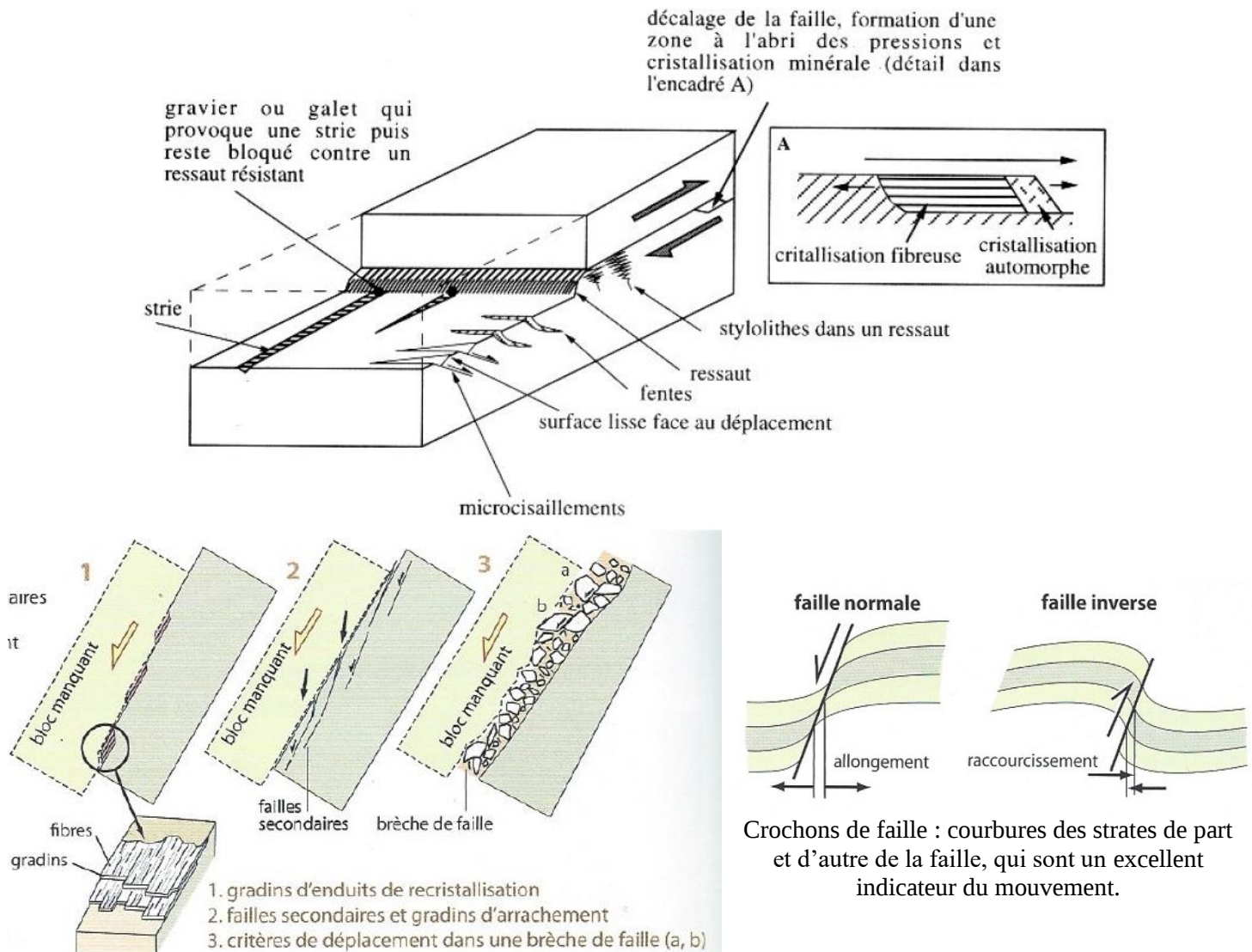


Les trois types de failles et les ellipsoïdes des contraintes correspondants

⇒ Indices pour repérer le mouvement

Des microstructures sont associées aux failles : stylolithes, fentes de tension, fibres dans ces fentes, crochon de faille, stries sur le plan de faille. Toutes ces structures permettent de caractériser le régime des contraintes et l'ellipsoïde de la déformation.

Figure 3 : Indices du sens du mouvement des failles



⇒ Chevauchement et charriage

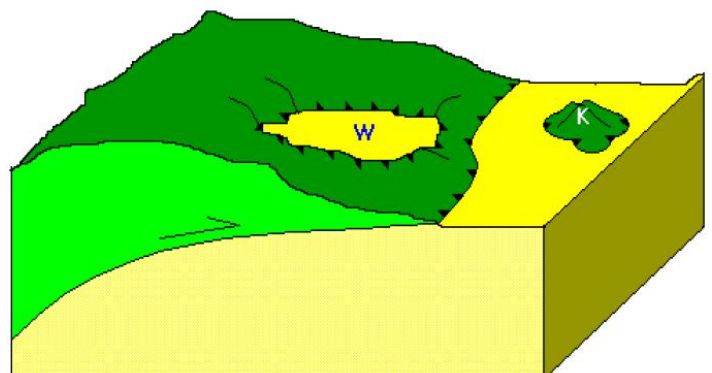
Dans le cas de nappes de chevauchement et de charriage, on observe la superposition verticale tectonique via une faille subhorizontale de 2 unités, avec un rejet horizontal très important : de quelques km à quelques centaines de km.

Chevauchement (n.m.) : Mouvement tectonique conduisant un ensemble de terrains à en recouvrir un autre par l'intermédiaire d'un contact anormal peu incliné. Le rejet horizontal est limité. Le terrain recouvrant est une **nappe** = l'**allochtone**. Le terrain recouvert forme l'**autochtone**.

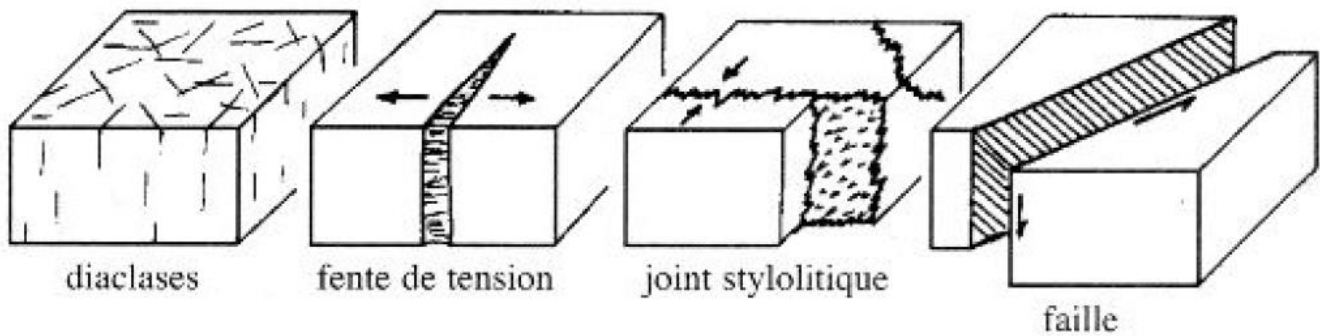
Charriage (n.m.) : Chevauchement de **grande amplitude** (de la dizaine à la centaine de km et au-delà). On considère généralement qu'il y a charriage à partir du moment où les séries mises en contact par le chevauchement ont, à âge égal, des caractères très différents – pas d'identité entre allochtone et autochtone.

Klippe (n.f.) : Portion d'une unité tectonique allochtone (ex nappe de charriage) isolée du corps principal de celle-ci. Cet isolement est généralement le fait de l'érosion.

Fenêtre (n.f.) : Zone où affleure le substratum d'une unité allochtone, et qui, en plan (sur une carte) est complètement entouré par cette dernière. C'est le plus souvent l'érosion qui est responsable.



1.2. Déformations cassantes sans déplacement des blocs : fracture, joint stylolitique



⇒ Diaclasses

Il s'agit de fracture sans déplacement des lèvres : Cassure de roche ou de terrain sans déplacement relatif des parties séparées.

⇒ Fentes de tension = fissures

Il s'agit de fracture avec écartement des lèvres.

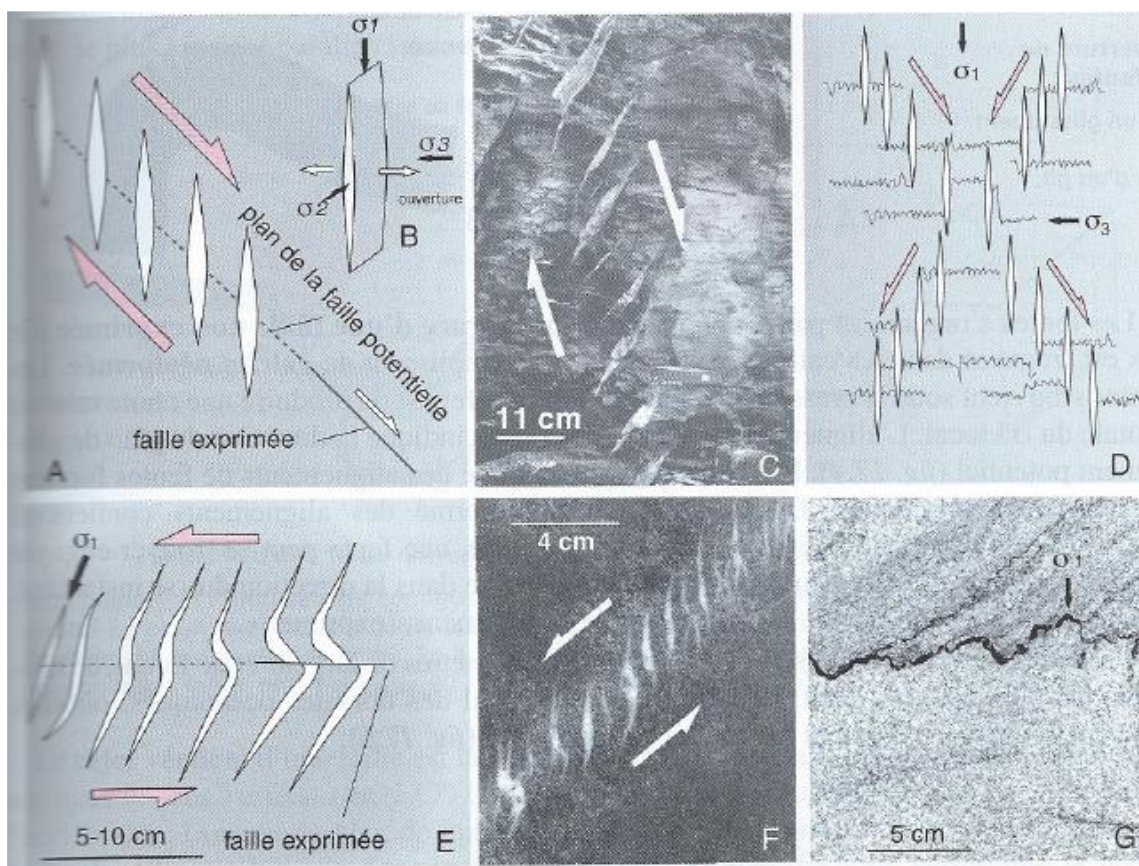
Les fentes peuvent rester béantes ou, plus souvent, être remplies par des cristallisations de calcite, quartz, zéolites (tectosilicates), ...

⇒ Joints stylolitiques

Il s'agit de fracture avec resserrement des lèvres : On observe une surface de dissolution sous l'effet de la pression due à la contrainte.

⇒ Relations aux contraintes

La disposition géométrique des fentes de tension et des stylolithes permet, pour une phase cassante donnée, d'estimer l'orientation des contraintes locales.



Les fentes de tension et les stylolithes.

- 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 le complexe de base du flysch à Helminthoïdes (Alpes, cliché P. Geste).
- D – Répartition le long de deux cisaillements conjugués et association avec des joints stylolitiques.
- E – Origine des fentes sigmoïdes par déformation et rotation progressives.
- F – Exemple réel.
- G – Un exemple de stylolithe dans un grès charbonneux. La matière organique se concentre sur le joint stylolitique en raison de la dissolution des grains de quartz avoisinants.

2. Les grands types de déformation : (2) déformations continues = ductiles

Une déformation **continue** correspond à une expression du comportement souple ou ductile : Deux points de la roche se sont déplacés l'un par rapport à l'autre sans qu'il y ait rupture.

On distingue les déformations **homogènes** et les déformations **hétérogènes**.

2.1. Déformations continues homogènes

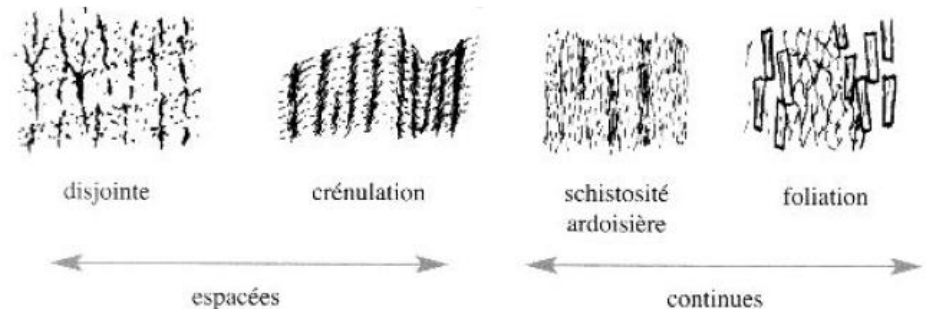
Une déformation continue homogène est une déformation continue dans laquelle toute droite est transformée en une autre droite, des droites parallèles restent parallèles, les autres basculent.

⇒ schistosité

Structures planaires (2 dimensions) d'origine tectonique, suivant lesquelles, les roches se débitent en feuillet parallèle sans perte de cohésion apparente de la roche.

La schistosité ne résulte pas d'un processus de fracturation mais du développement d'une anisotropie dans la roche au cours d'une déformation. C'est le résultat d'un aplatissement.

Il existe divers types de schistosités :



Schistosité de fracture – disjointe :

Clivages espacés, limitant des microlitons bien visibles à l'oeil nu.

Microlitons : zone dépourvu de clivage.

Ces clivages peuvent être imparfaitement parallèles.

Schistosité de crénulation :

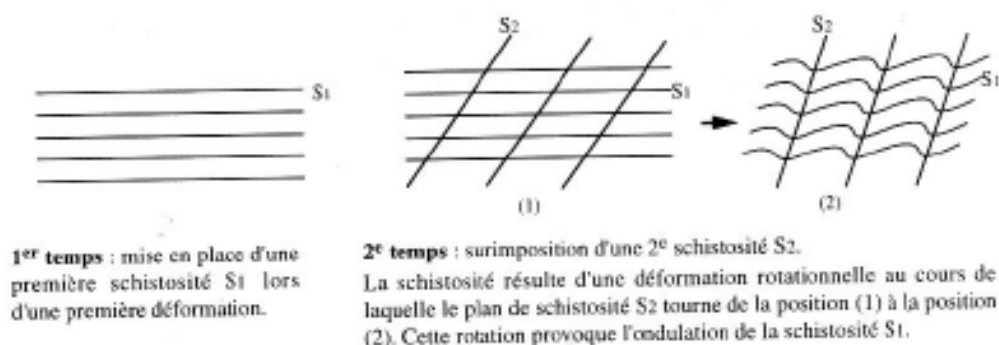
Se présente comme la succession rythmique de microplis.

Son origine est purement mécanique, elle résulte de la compression d'une roche qui possède déjà une bonne schistosité.

C'est donc la superposition de deux schistosités différentes qui se sont développées au cours de deux phases tectoniques successives, chacune ayant ses propres directions principales de contraintes. Au cours de la seconde phase tectonique, le plan de la nouvelle schistosité pivote progressivement pendant la déformation, tout en provoquant la compression et l'ondulation de la première schistosité.

A l'aspect mécanique s'ajoute aussi la possibilité de dissolution-cristallisation qui tend à dissoudre le quartz dans les flancs des microplis, où la pression est forte, pour le laisser cristalliser dans les charnières où la pression est moindre.

Figure 11 : Schistosité de crénulation



Schistosité de flux ou schistosité ardoisière :

Clivages parfaitement plans, parallèles, qui affectent très finement l'ensemble de la roche.

L'espacement entre les clivages est de l'ordre du mm ou moins.

Elle se développe préférentiellement dans les argiles ou autres roches capables de fluer, à partir de profondeurs comprises entre 4000 et 5000 m.

Schistosité cristallophyllienne ou foliation :

Schistosité de flux accompagnée de recrystallisation minéralogique.

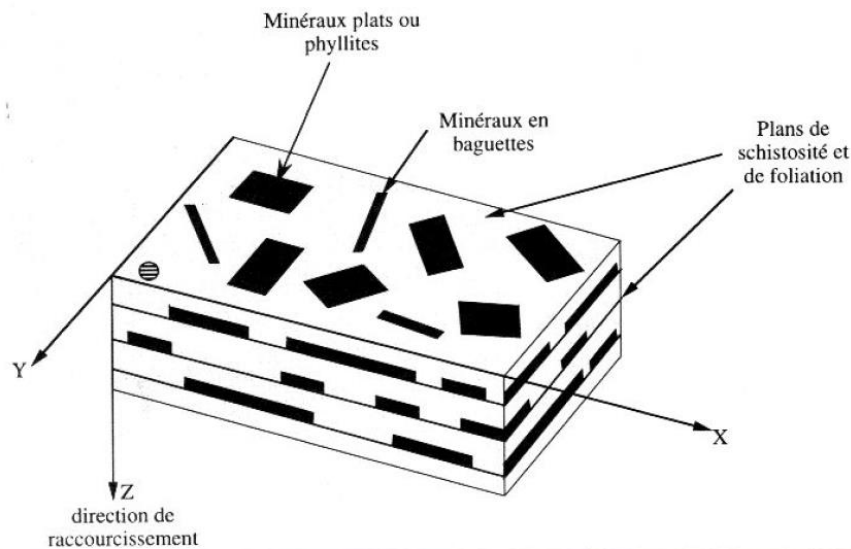
Les minéraux phylliteux (= phyllosilicates = plats) nouveaux, disposés sur le plan de schistosité, définissent la foliation.

Schistosité et foliation caractérisent les **micaschistes** (roche métamorphique).

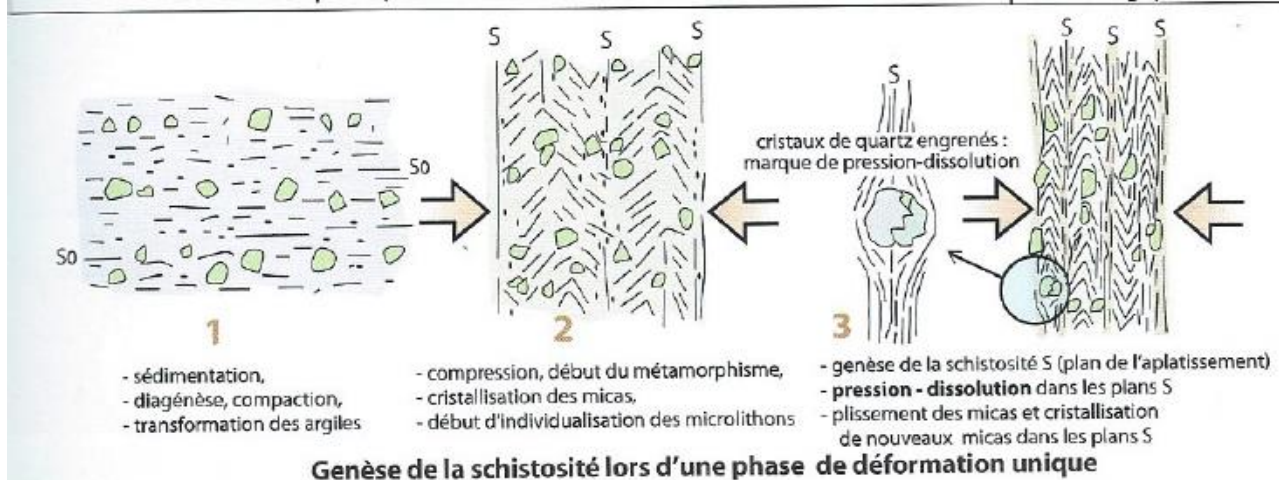
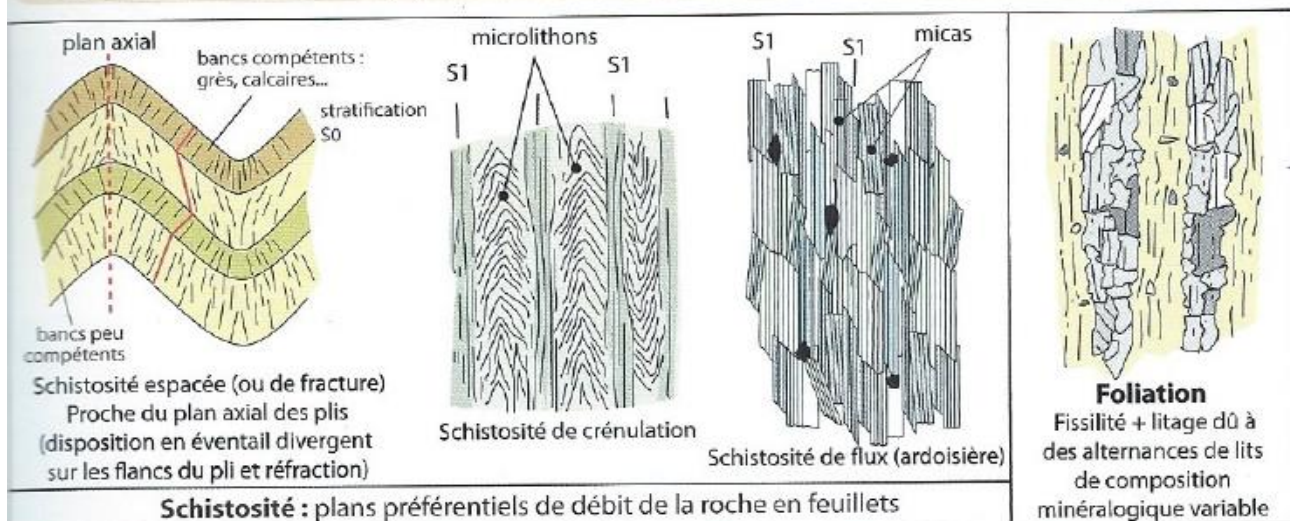
Dans les **gneiss** (roche métamorphique), il n'y a pas de schistosité mais un **litage** avec alternance de lits clairs et de lits sombres.

Le rassemblement des micas dans les lits sombres matérialise la **foliation**. Le front de foliation apparaît entre 7000 et 8000 m de profondeur.

Figure 10 : Définition de la foliation



Lors de la déformation, les roches métamorphiques acquièrent des structures planaires pénétratives d'origine purement mécanique (fissilité) ou liées à des recrystallisations métamorphiques conduisant à une différenciation minéralogique.

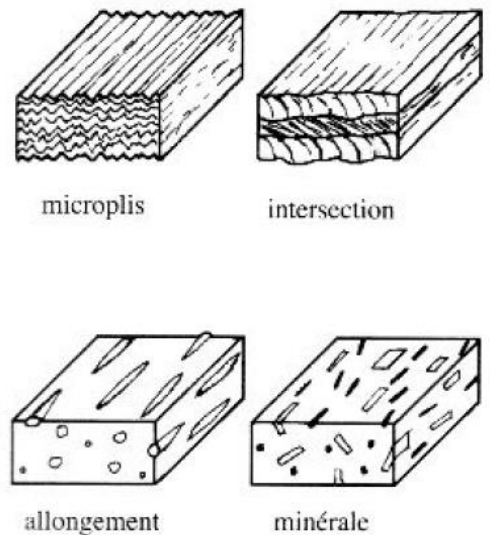
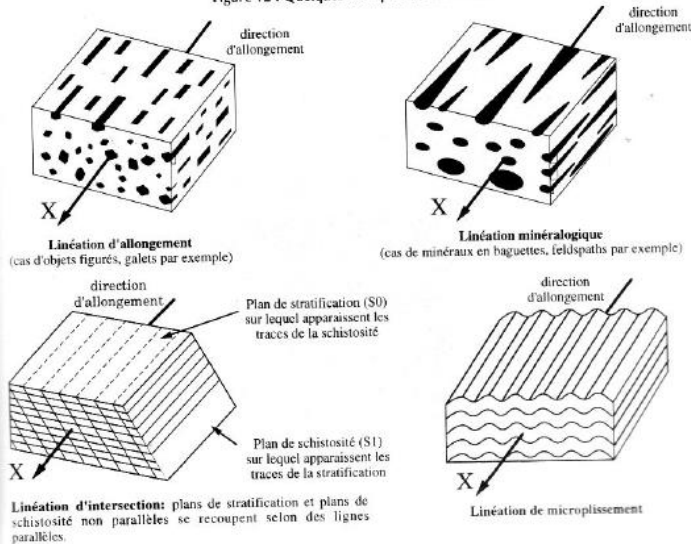


Linéations :

Structures linéaires, parallèles entre elles.

NB : L'origine est variable, elle peut être sédimentaire, tectonique ou magmatique...

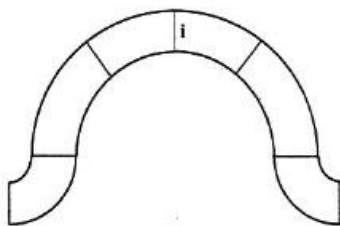
Figure 12 : Quelques exemples de linéations

**2.2. Déformations continues hétérogènes**

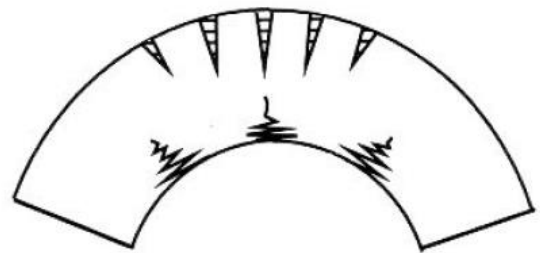
Il s'agit en particulier des plis.

⇒ Plis concentriques = « isopaques »

- ➔ Conservation de l'épaisseur de chaque banc → pas de fluage de matière au sein des bancs
- ➔ Figures de déformation cassante à l'extrados et l'intrados



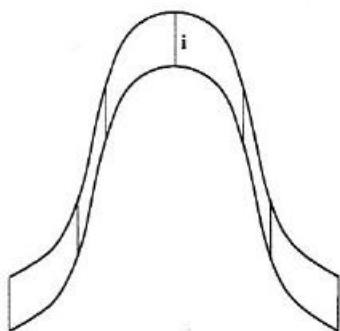
Épaisseur constante, isogones (i) convergents



Déformations de la charnière :
Fentes de tension à l'extrados, stylolithes à l'intrados

⇒ Plis semblables = « anisopaques »

- ➔ Épaisseur non constante : charnière épaissie et flancs amincis car fluage au sein des bancs



Strates plus épaisses dans les charnières que sur les flancs
Si les isogones sont parallèles : pli anisopaque semblable

2.3. Déformations mixtes : associations de failles et de plis

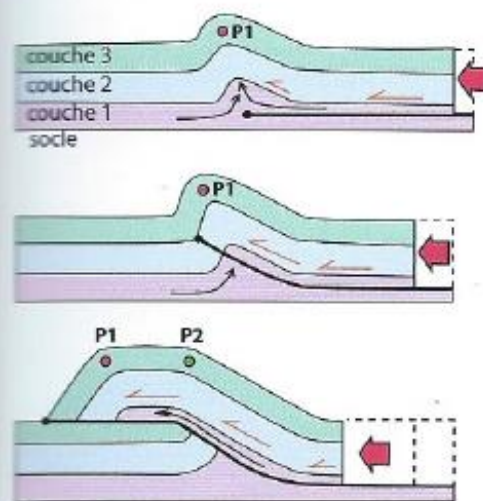
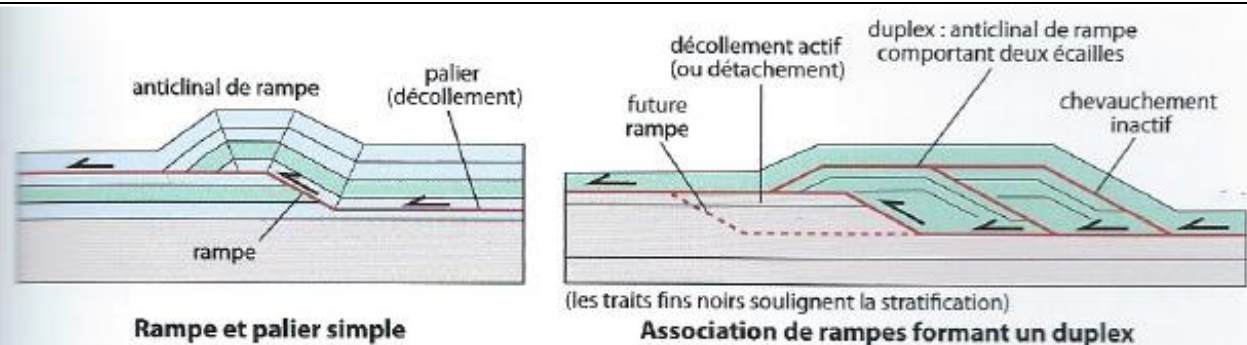
⇒ Pli-faille

Pli associé à une faille

⇒ Pli de rampe

Lorsque les chevauchements sont intra-sédimentaires (prisme d'accrétion, front des chaînes de montagne), la surface de séparation est souvent horizontale et sur de grandes distances → surface de glissement ou de décollement (NB : souvent empruntée par les fluides)

On appelle palier le plan horizontal de glissement. Le palier est connecté à une rampe le long de laquelle le décollement monte dans l'empilement sédimentaire. La rampe est l'endroit où les séries sont plissées = plis de rampe



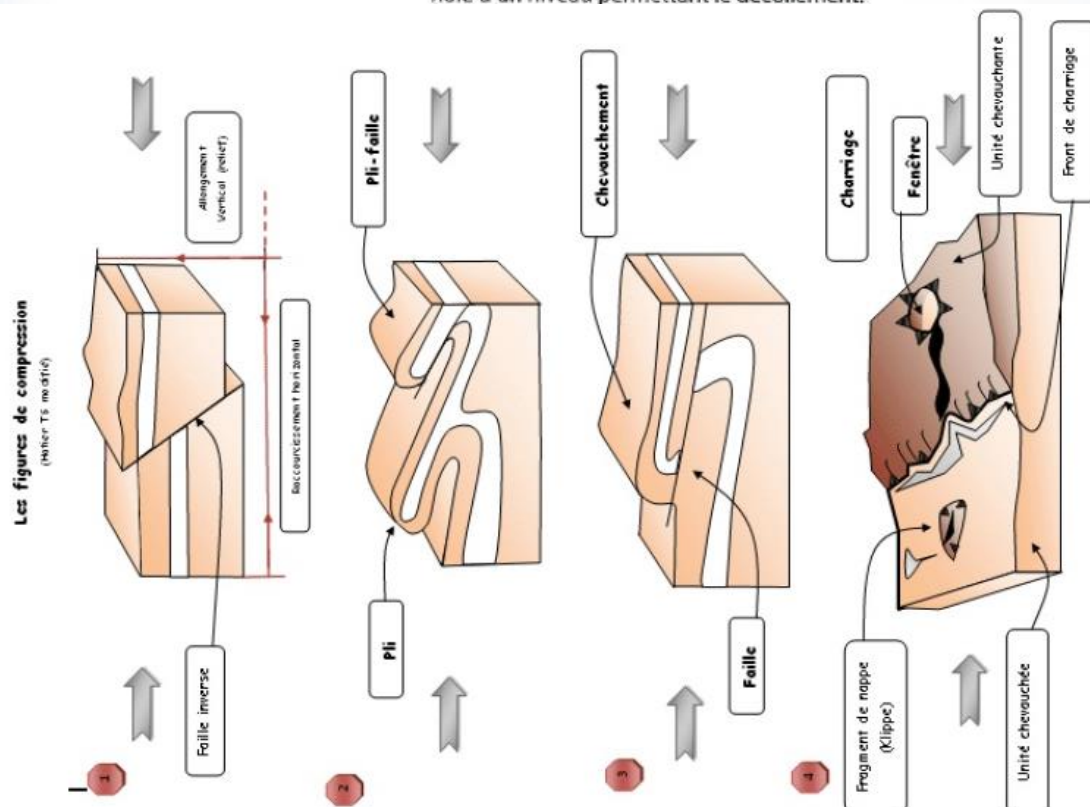
stade 1. Pli au-dessus d'un détachement (ou décollement horizontal) (*detachment fold*). Les couches 2 et 3, compétentes, se déforiment par flambage (*buckling*). La couche 1 est incompétente ; sa viscosité est faible. Elle se comporte comme un fluide (flèches noires). Ce niveau permet le décollement des couches sur le socle plus rigide.

stade 2. Pli au-dessus d'une rampe en croissance (*fault-propagation fold*). Le détachement continue de fonctionner et le plissement s'accroît, mais en raison d'un blocage imposé par le plissement, le détachement monte dans la pile sédimentaire. De palier, il devient rampe.

stade 3. Pli de palier (*fault-bend fold*). À la surface, le chevauchement s'aplatit et redevient palier. P2 prend naissance au-dessus du point de passage rampe - palier par flambage imposé par la courbure du plan de chevauchement, en arrière de P1. L'épaisseur des sédiments est doublée au droit du dernier palier.

Évolution du plissement d'un ensemble de trois couches en relation avec le fonctionnement d'un détachement

Rôle d'un niveau permettant le décollement.



2.4. Zones de cisaillement

⇒ La notion de cisaillement

Une zone de cisaillement est une zone marquée par une étonnante concentration de la déformation par rapport aux zones adjacentes. Elle peut s'observer à l'échelle d'une roche, mais aussi à l'échelle de la croûte (avec dans ce cas à la fois des segments cassants et des segments ductiles).

Une faille est ainsi une zone de cisaillement, en régime cassant.

En régime ductile, une zone de cisaillement, souvent associée au métamorphisme, peut associer plissements, schistosité, foliation et linéation.

L'existence d'une zone de cisaillement est la signature d'une distribution hétérogène de la déformation : la déformation est maximale au centre de la zone et décroissante vers les bordures.

⇒ Les indicateurs du sens de cisaillement

Il est possible de déterminer le sens du déplacement d'un bloc par rapport à l'autre en s'appuyant sur l'analyse d'un certain nombre d'indicateurs de sens de cisaillement :

- Les inclusions
- Les ombres de pression
- Les porphyroclastes ou porphyroblastes (= fragments ou minéraux de grande taille)
- Les fabriques C-S

Ombres et franges de pression, queues, inclusions orientées

Nous ne décrivons ici que quelques fabriques de forme typiques de la déformation hétérogène.

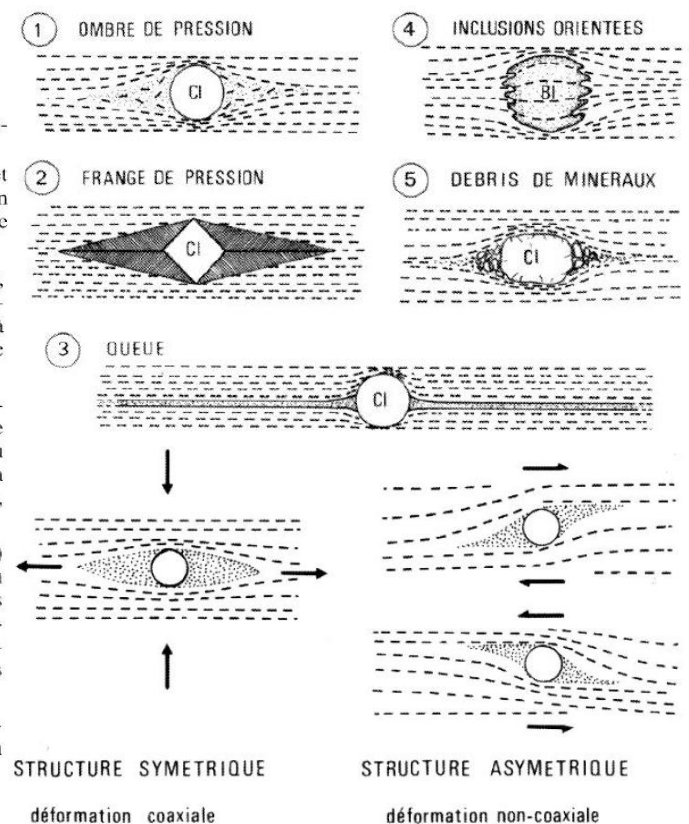
– Les *ombres de pression* (1, Fig. 7.19) sont des zones triangulaires, situées de part et d'autre d'un objet résistant où la déformation de la matrice est perturbée : l'orientation des minéraux recrystallisés y est différente de celle qui définit le plan de schistosité de la matrice.

– Les *franges de pression* (2, Fig. 7.19) résultent de cristallisations fibreuses (quartz, calcite) ou lamellaires (phyllites) dans des zones qui s'ouvrent à l'interface objet-matrice ; les premières cristallisent perpendiculairement, les secondes parallèlement à cet interface. La forme de ces fibres peut témoigner de l'histoire de la déformation de la roche.

– Les «*queues*» des *porphyroclastes* (tails), (3, Fig. 7.19) sont beaucoup plus allongées que les ombres de pression. Elles sont d'origine variée, souvent mal définie, et se forment dans des zones protégées au sein des plans de schistosité, de foliation ou même de stratification. Entraînées et déformées au voisinage d'objets inclus dans la matrice, elles peuvent être de bons indicateurs du sens de cisaillement (2 et 3, Fig. 7.21).

– Les *inclusions dans les porphyroblastes* (grenats, chloritoïdes, albites...) (4, Fig. 7.19) correspondent à des minéraux ou agrégats de minéraux soulignant la trace d'anciens plans de stratification, de schistosité ou de foliation, inclus dans ces porphyroblastes lors de leur croissance. Si le porphyroblaste subit une rotation pendant sa croissance, les inclusions prennent une forme sigmoïdale ou spirale qui indique le sens du cisaillement ; les grenats dits *hélicoïtiques* en sont les exemples les plus remarquables.

– Des *débris de minéraux* (5, Fig. 7.19), peuvent être aussi arrachés à des porphyroclastes. Ils sont ensuite entraînés et piégés à leur voisinage lors de l'écoulement de la matrice.



Les **fabriques C-S** sont les indicateurs les plus utilisés lors de l'analyse structurale des zones de cisaillements. Elles consistent en deux familles de plans :

- Les plans S : de schistosité
- Les plans C : de cisaillement

Les plans C sont des surfaces discrètes de forte déformation : 2 à 20 cm de long sur quelques mm d'épaisseur, parallèles à la zone de cisaillement.

Entre deux plans C adjacents, les plans S présentent des surfaces sigmoïdales à pendage opposé au déplacement.

NB : une troisième foliation est susceptible de se développer dans les mylonites fortement foliées, une foliation oblique dite *foliation C'*.

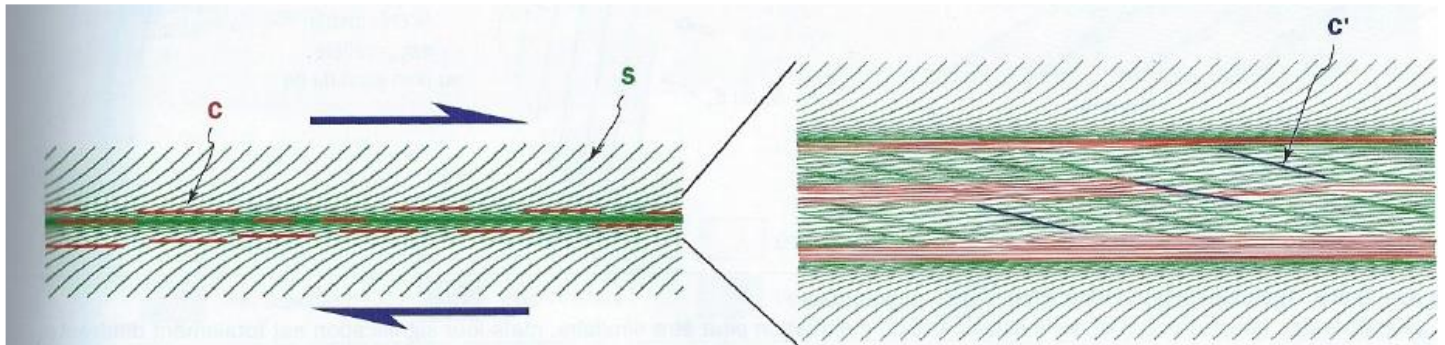
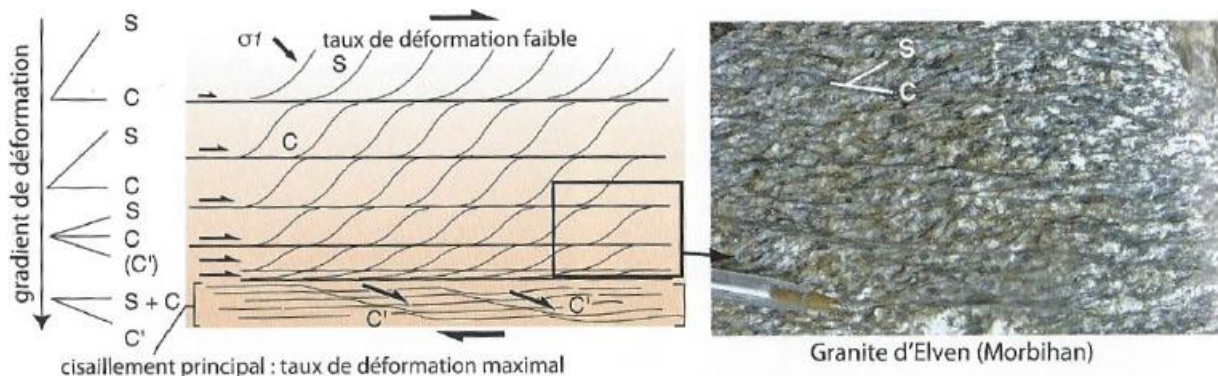


Figure 9.55.A. Caractéristiques géométriques des structures C-S et C-C' dans une zone de cisaillement dextre
(D'après Fossen, 2010)



Les structures C/S dans les granites soumis à une déformation lors de leur refroidissement

La fabrique comporte d'abord des plans de schistosité (S) correspondant au plan d'aplatissement de la matière. Puis, apparaissent des plans de glissement ou de cisaillement (C). Les plans S se rapprochent des plans C à déformation croissante. Dans la zone de cisaillement principale, S et C sont confondus, des plans C' apparaissent.

⇒ Un exemple à l'échelle régionale : la zone broyée sud armoricaine

Voir sur la carte de France au 1/1 000 000.

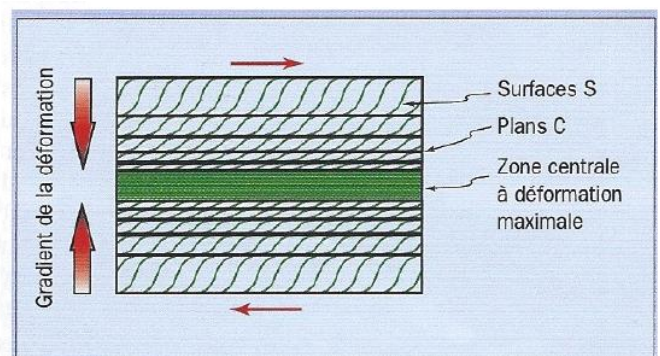
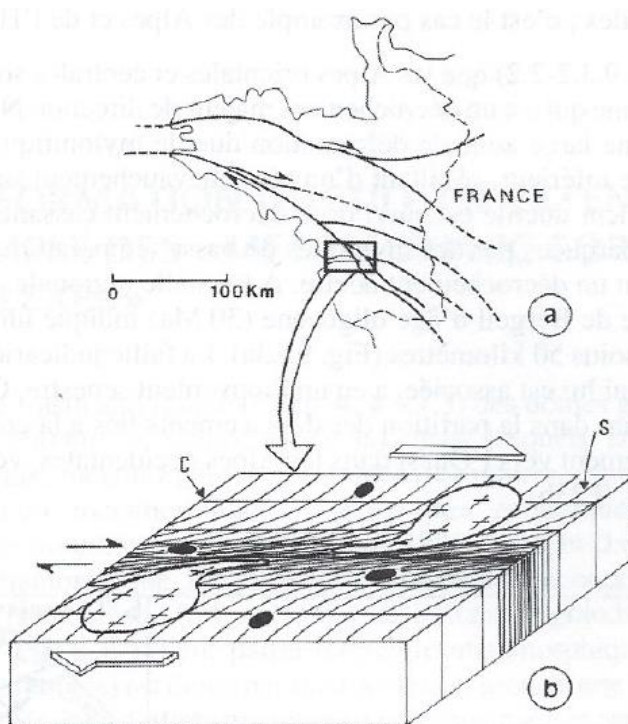


Figure 9.60.A. La représentation de la déformation dans la zone de cisaillement sud-armoricain (D'après Berthé et al., 1979)

Figure 9.22 a) Les décrochements ductiles dextres sud-armoricains (France),
b) les déformations liées au décrochement ductile (voir texte),
d'après Berthé et al., 1979, *J. Struct. Geol.*, 1 (1), 31-42.

2.5. Résumé

Déformations discontinues

Avec déplacement

Faïlles
Chevauchements et charriages

Sans déplacement

Diaclases
Fentes de tensions = fissures
Joints stylolithiques

Déformations continues

Homogènes

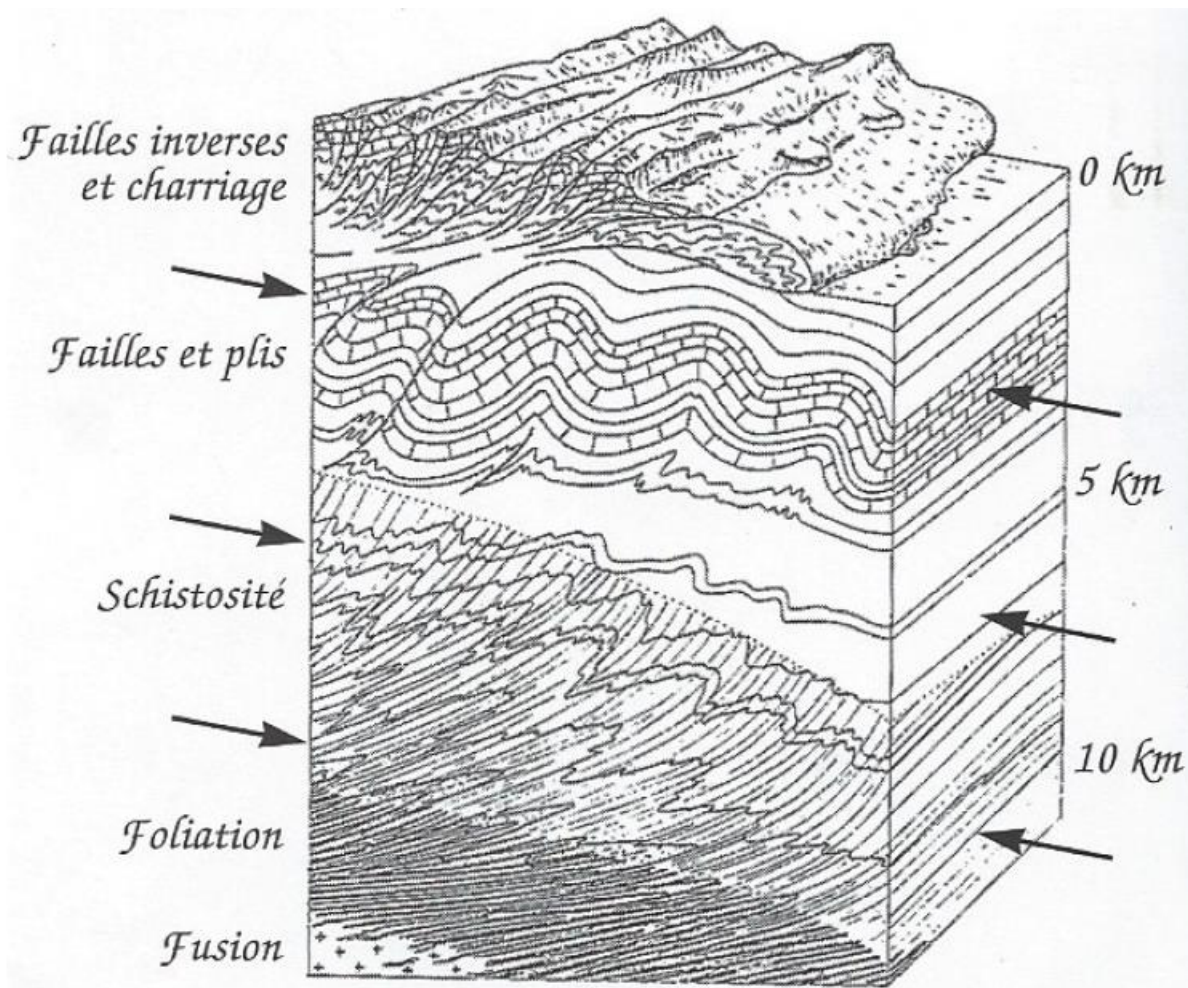
Schistosité de fracture
Schistosité de crénulation
Schistosité de flux = ardoisière
Foliation
Linéation

Hétérogènes

Pli isopaque
Pli anisopaque

Mixtes

Pli-faille
Pli de rampe

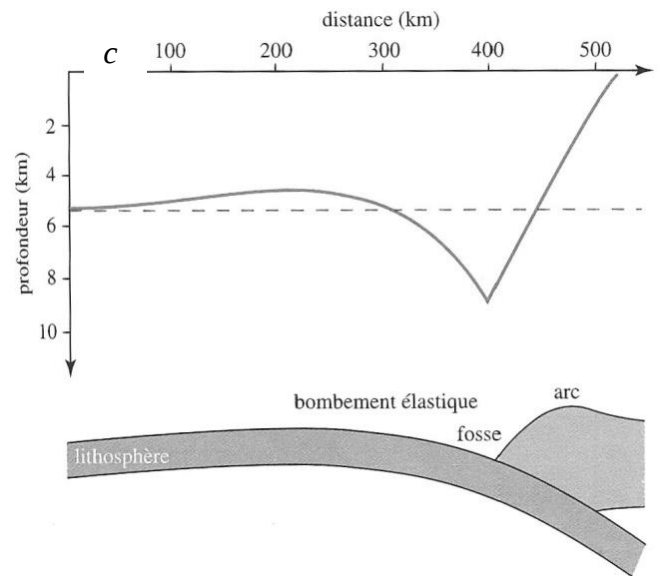
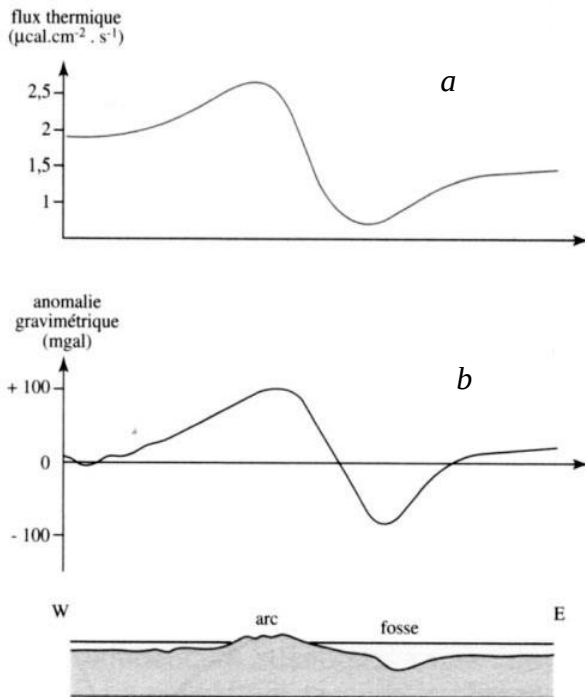


3. Observations

Voir poly 2 - séance

4. Une étude à l'échelle lithosphérique : la diversité des subductions

4.1. Rappel : des marqueurs de subduction, au niveau des marges océaniques actives



- a. Variations du flux thermique à travers l'arc du Japon
- b. Variations de l'anomalie de Bouguer à travers l'arc du Japon
- c. Bathymétrie au niveau d'une zone de subduction

➤ **Profil morphologique** : bombement élastique, fosse, arc

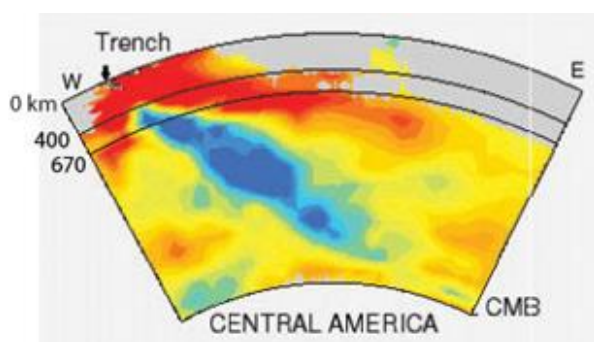
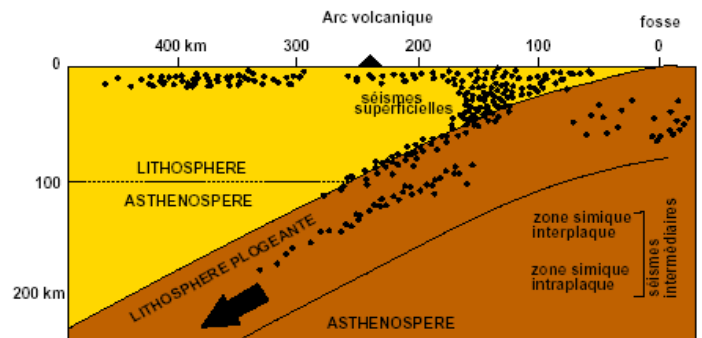
➤ **Profil sismique** : alignement de séismes sur un plan = plan de Wadatti-Benioff

➤ **Profil gravimétrique** :

- anomalie positive due au bombement élastique (effet du relief topographique)
- anomalie négative due à la fosse (effet du relief topographique)
- anomalie positive due à la présence d'un panneau subducté froid et dense.

➤ **Profil thermique** :

- anomalie négative à l'aplomb de la fosse correspondant à l'enfoncement de la plaque plongeante froide
- anomalie positive à l'aplomb de l'arc du au magmatisme mis en place dans la plaque chevauchante.



← **Tomographie sismique** : on observe une anomalie de vitesse positive, montrant l'enfoncement de la plaque océanique, froide et dense, dans le manteau, sous la plaque sud-américaine.
(exemple du Pérou)

Suite de la séance : Voir poly 2 - séance