

COURS DE TECTONIQUE: MODULE: G-244

CHAPITRE: IV

**TECTONIQUE DUCTILE
(DEFORMATION CONTINUE)**

Introduction

Qu'est-ce que la déformation ductile?

Ce sont les structures ductiles les plus spectaculaires. D'une manière très générale, **un pli** est une structure **courbe** issue d'une **déformation ductile** des roches, sous l'effet d'une **contrainte compressive**, par **flexion** ou **torsion**. Le cas le plus simple est le pli de roches sédimentaires dont la structure et les marqueurs sont planaires avant la déformation.

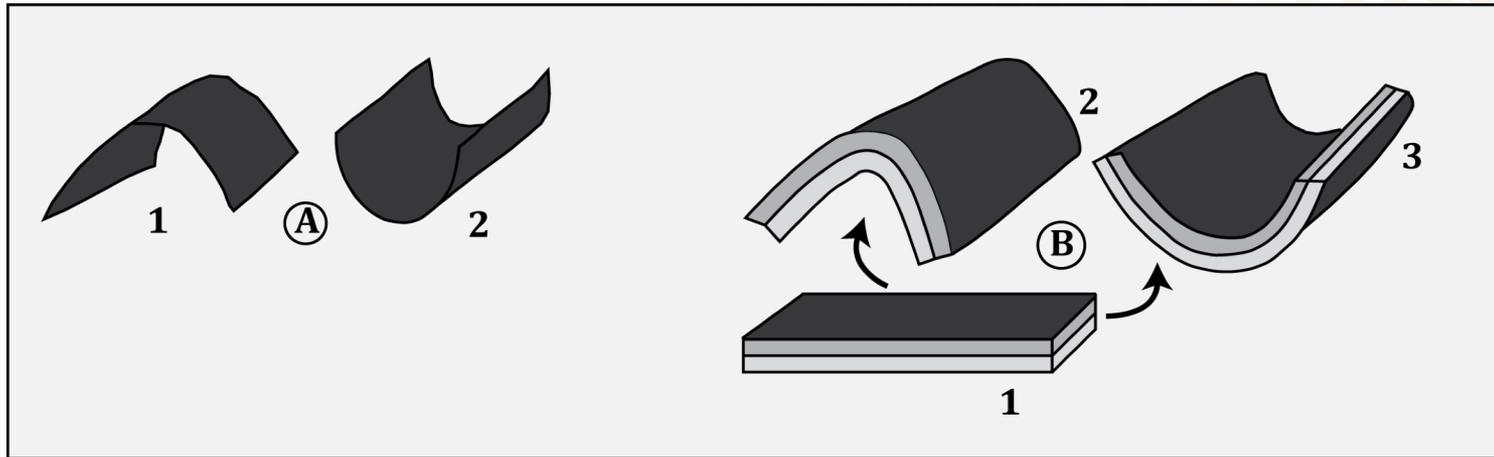
Echelle d'observation:

Les structures qui caractérisent **la tectonique ductile** s'observent à toutes les échelles, **plurikilométrique** à **millimétrique**.

Eléments d'un pli

Anticlinal

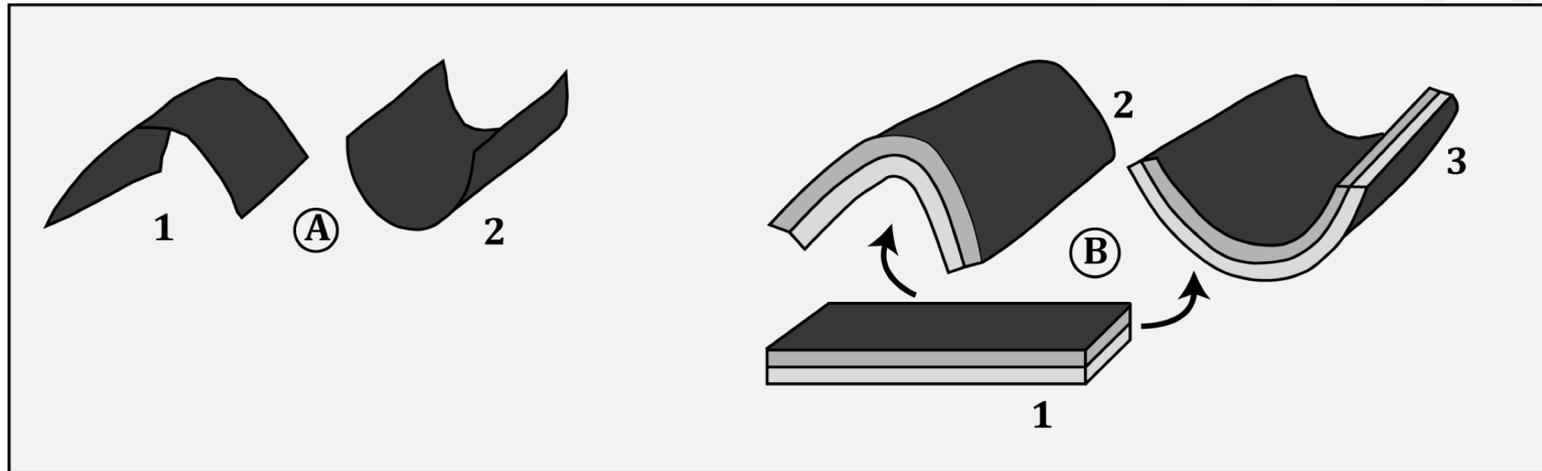
Anticlinal : On appelle anticlinal : un pli dans lequel **le pendage (les plongements)** des couches **divergent à partir de la charnière**. **Le centre de courbure se trouve dans les couches les plus anciennes**. C'est une structure **convexe vers le haut**.



Eléments d'un pli

Synclinal

Synclinal : On appelle synclinal : un pli dans lequel **le pendage** (les plongements) des couches **convergent vers la charnière**. **Le centre de courbure** se trouve dans **les couches les plus récentes**. C'est une structure **concave vers le haut**.



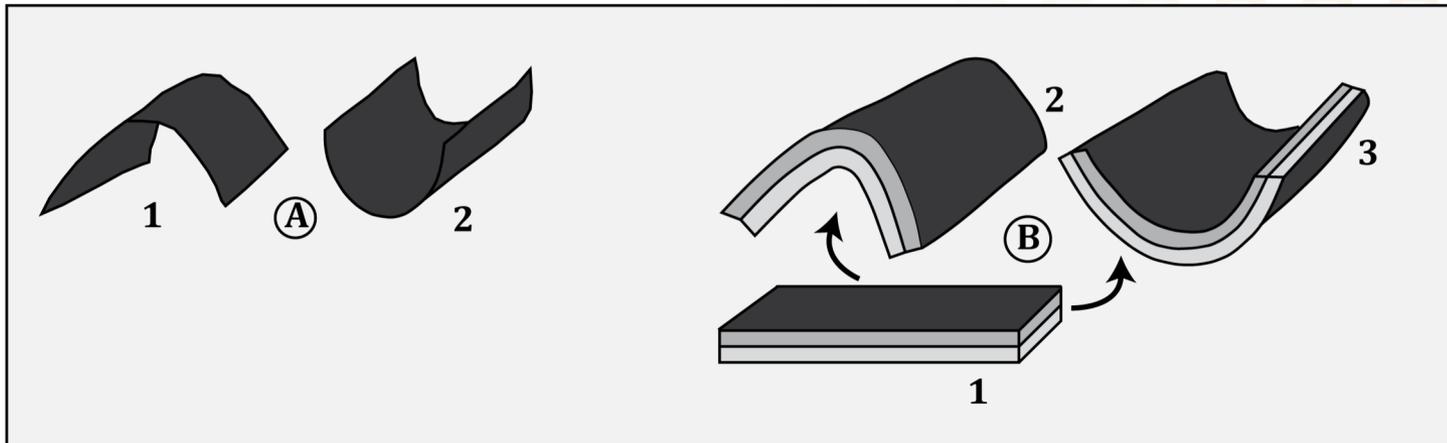
Eléments d'un pli

Antiforme et Synforme

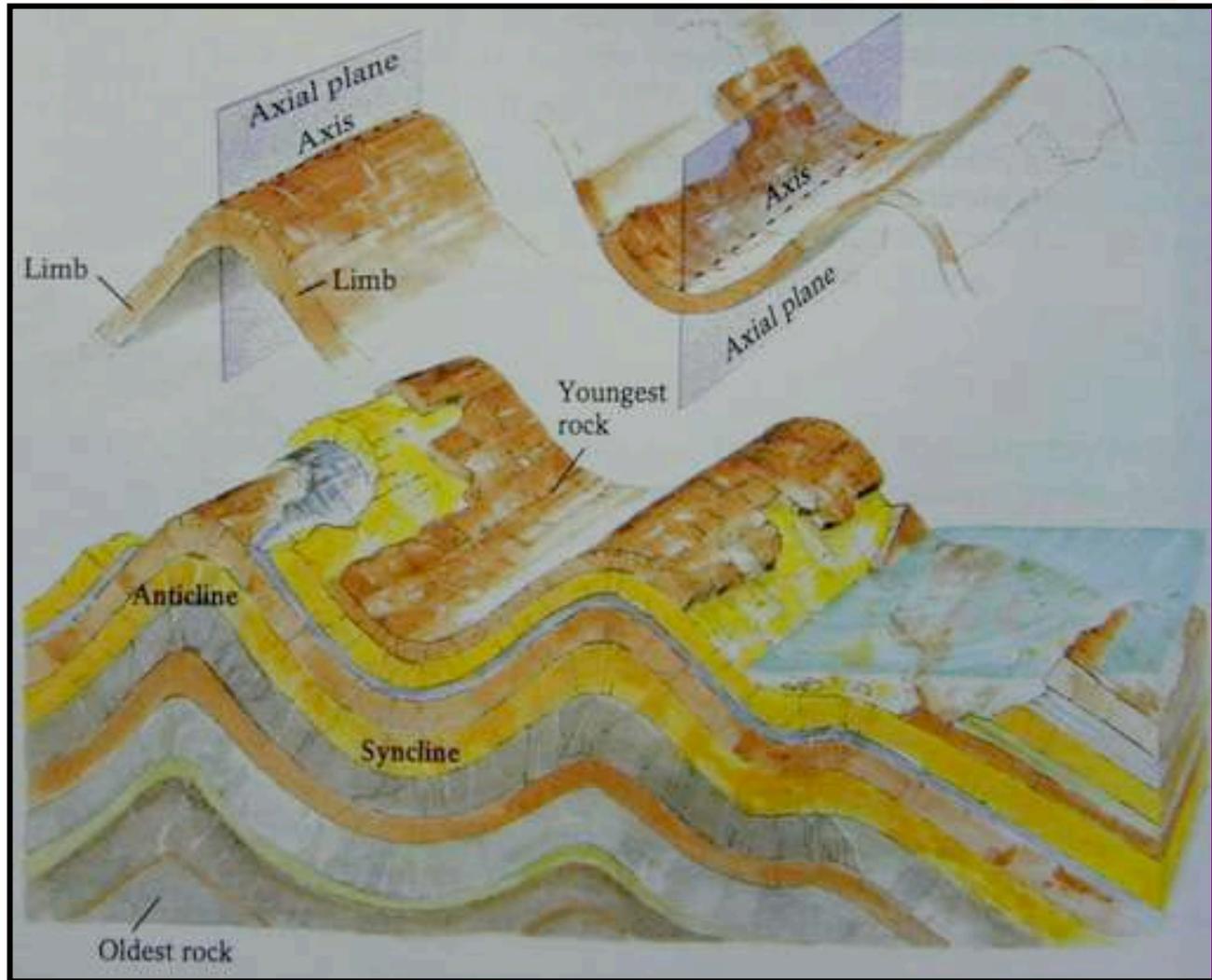
Lorsqu'on ne sait pas **la polarité** (ou **l'âge relatif**) des couches

Antiforme (1): Dans le cas d'un pli **convexe vers le ciel**

Synforme (2): Dans le cas d'un **pli concave vers le haut**



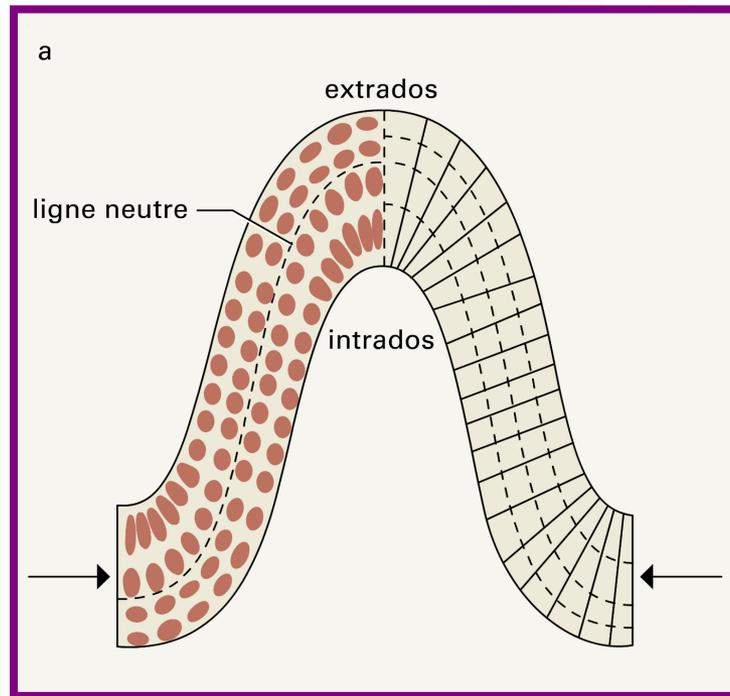
Eléments d'un pli



Eléments d'un pli

Extrados et intrados du pli

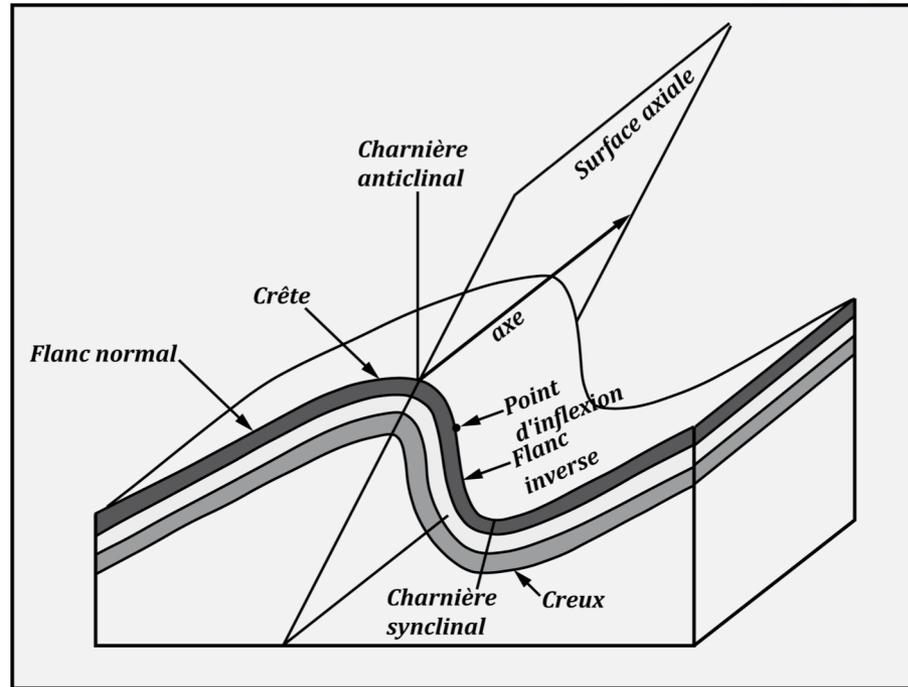
Par rapport à la courbure on distingue l'**intrados** et l'**extrados** du pli. L'**extrados** (partie convexe) : C'est la partie plissée du pli situé à l'extérieur de la courbure et l'**intrados** (partie concave) : C'est la partie plissée du pli situé à l'intérieur de la courbure.



Compression

Eléments d'un pli

Eléments géométriques d'un pli



- **La charnière**: C'est un point ou une petite zone de la surface plissée où la courbure est maximale.
- **L'axe**: C'est la ligne qui contient les points charnières portés par une même surface. Il correspond à l'intersection du plan axial et d'un plan horizontal. Dans les cas simples, c'est une droite que l'on peut caractériser par sa direction et son plongement.

Eléments d'un pli

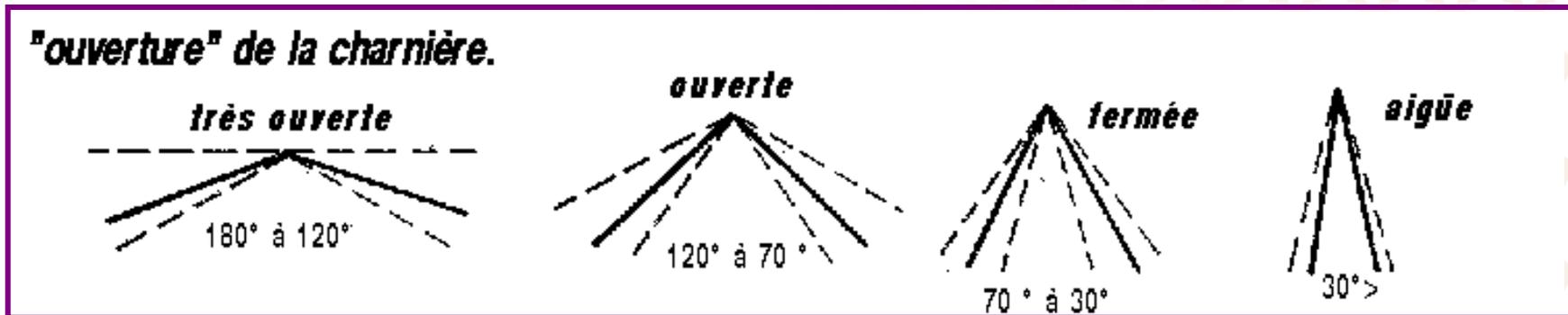
Eléments géométriques d'un pli

- **Les flancs**: Situés de part et d'autre de la charnière, sont les régions où **la courbure est minimale**. Ils correspondent donc à la partie comprise entre **deux charnières consécutives**.
- **La ligne** ou **le point d'inflexion** correspond au passage entre antiforme et synforme;
- **Le creux**: Est le lieu d'altitude minimum du pli, **la crête** est le lieu d'altitude maximum. Ces deux zones ne coïncident pas forcément avec les charnières;
- **La surface axiale** (ou **plan axial**): Est le plan qui passe par tous les points (ou le milieu) des charnières de toutes les couches du pli. Il contient tous les axes portés par l'ensemble des couches plissées. C'est un plan que l'on peut caractériser par **sa direction** et **son pendage**.

Eléments d'un pli

Eléments géométriques d'un pli

- **L'angle d'ouverture**, angle formé par les tangentes aux flancs passant par les lignes d'inflexion.
- Le pli est **ouvert** si l'angle est très important, **serré** si l'angle est faible et **isoclinal** si ses flancs sont parallèles (**Fig.**).



Angle d'ouverture d'un pli.

Eléments d'un pli

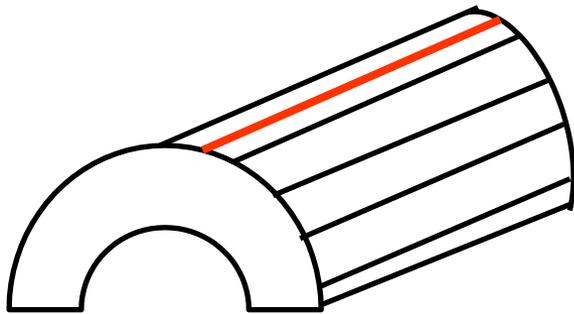
Remarque

Dans le cas des plis dissymétriques (*déversés* ou *couchés*) qui présentent un flanc normal et un flanc inverse ayant le même sens du pendage :

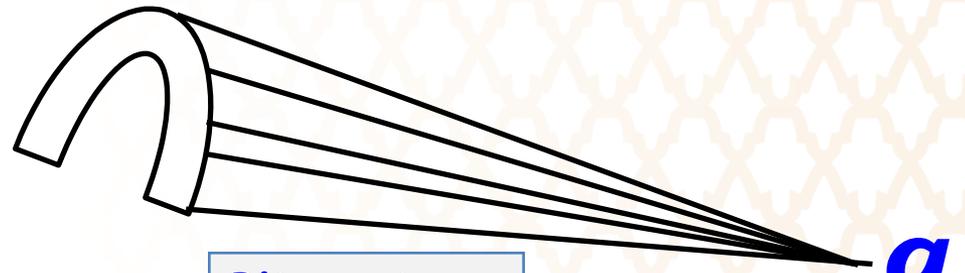
- On appelle flanc normal (ou flanc long) la partie du pli constituée des couches en position stratigraphique normale.
- On appelle flanc inverse (ou flanc court) l'autre partie du pli formée des couches en position stratigraphique inverse (ou renversée).

Classification des plis

a - les différents types de plis définis par leur géométrie



Pli cylindrique



Pli conique

Pli cylindrique : dont la surface plissée est engendrée par la **translation** de lignes génératrices (**Lg**) parallèlement à elles-mêmes et à l'axe du pli.

Pli conique : dont la surface peut être engendrée par des **Lg** qui partent d'un point '**a**' qui se déplacent pour être parallèles à l'axe du pli une seule fois.

Classification des plis

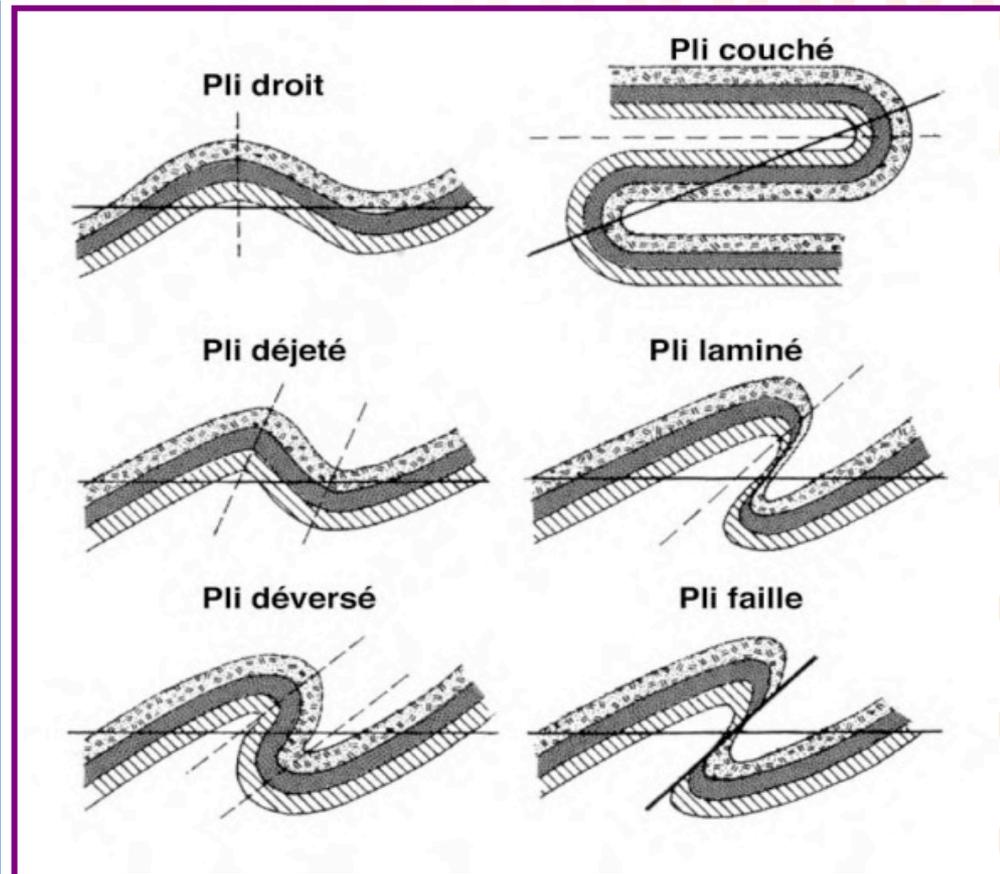
a - les différents types de plis définis par leur géométrie

- **Pli droit** (ou **symétrique**):

Lorsque les deux flancs d'un pli ont **le même pendage** mais de **sens opposé**, on a affaire à un pli droit, dans ce cas le **plan axial est vertical** et **perpendiculaire** aux **contraintes de compression**.

- **Pli déjeté** (ou **dissymétrique**) : C'est un pli avec un **plan axial légèrement incliné** de telle manière que les **deux flancs ont un pendage différent**.

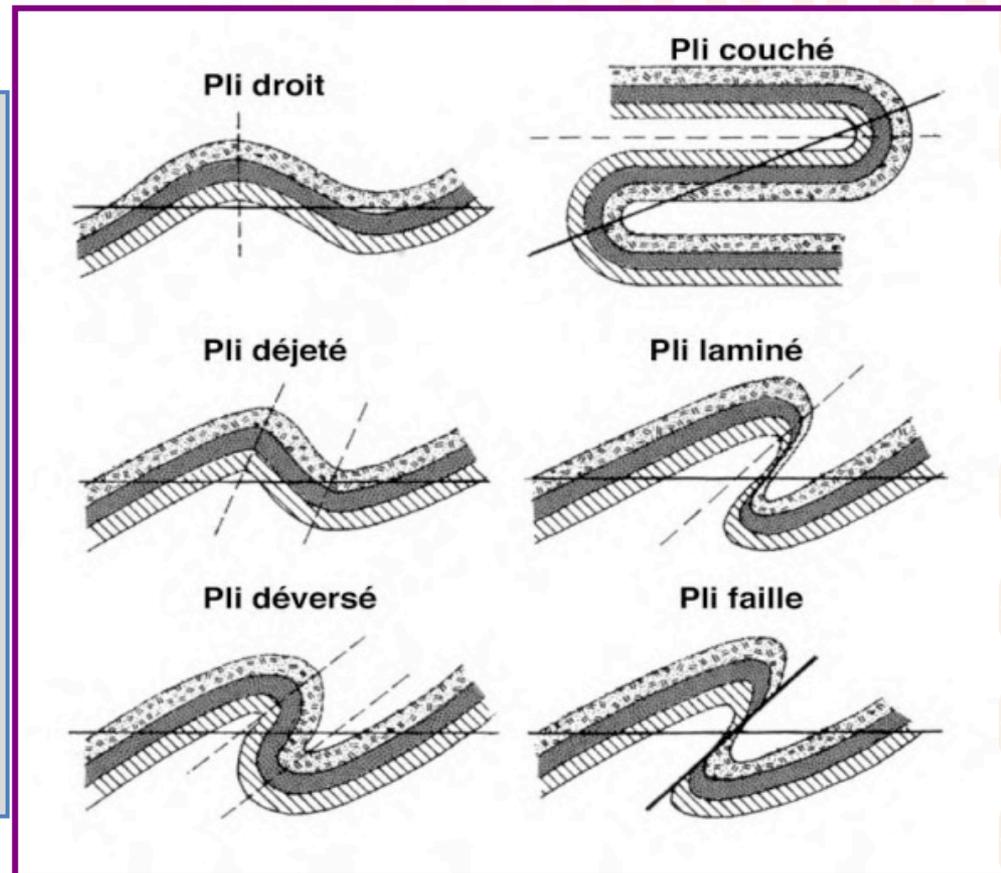
- **Pli déversé** ou **oblique** : **surface axiale inclinée** et **pendages des flancs, tous trois dans le même sens**. L'inclinaison du flanc le plus incliné ne dépasse pas **90°**.



Classification des plis

a - les différents types de plis définis par leur géométrie

- **Pli Couché** : Le plan axial est presque horizontal et les flancs sont presque horizontaux.
- **Pli Etiré** : Lorsque l'épaisseur des couches d'un flanc étiré diminue.
- **Pli Laminé** : Lorsque l'épaisseur des couches d'un flanc étiré devient nulle.
- **Pli-faille**: Lorsque la détermination des couches géologiques, de part et d'autre de la zone de laminage sont séparées.



Classification des plis

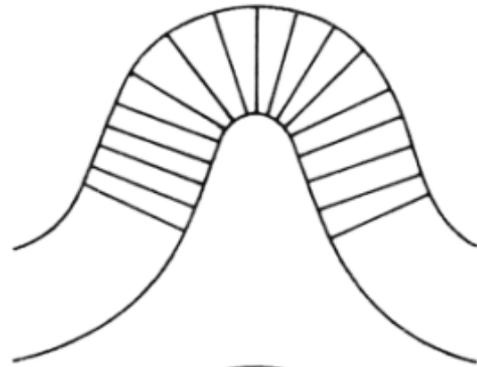
b-classification géométrique des plis par isogones de pendage (d'après Ramsay)

Définition d'isogone de pendage

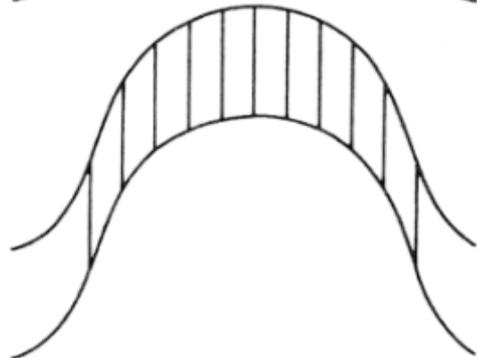
Les isogones sont les lieux à valeur de pendage identique (isopendage) sur les différentes couches plissées. De façon plus générale, on peut tracer les isogones d'un pli en reliant **les points** qui ont **le même pendage** sur les surfaces supérieures et inférieures d'une couche. On peut alors classer les plis en **3 classes** (et des **sous-classes**) selon que **les isogones** sont **convergentes**, **parallèles** ou **divergentes**.

b-classification géométrique des plis par isogones de pendage (d'après Ramsay)

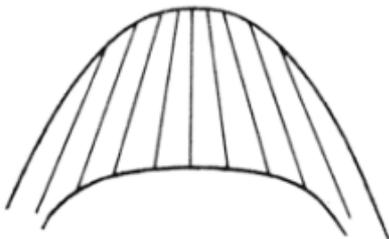
Selon les plis, les isogones sont **parallèles**, **convergentes** ou **divergentes**. En se basant sur ce critère on a :



des isogones **divergentes** vers le haut dans les anticlinaux (**plis isopaques**).



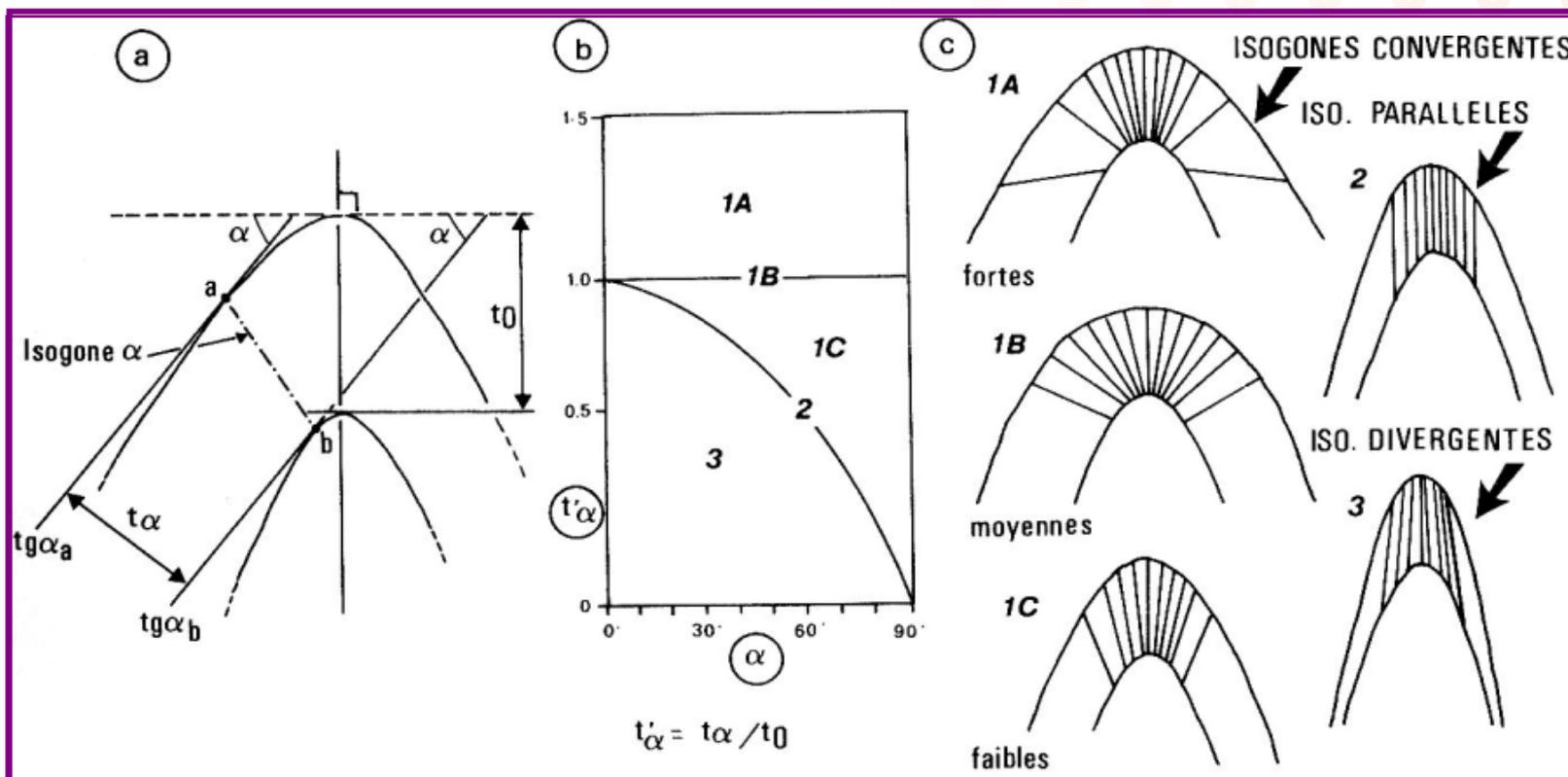
des isogones **parallèles** (**plis semblables**)



des isogones **convergentes** vers le haut dans les anticlinaux (**plis anisopaques**).

Classification des plis

b-classification géométrique des plis par isogones de pendage (d'après Ramsay):



Classification des plis en fonction de la géométrie des isogones.

Classification des plis

b-classification géométrique des plis par isogones de pendage (d'après Ramsay):

Plis de classe I :

Ce sont des plis **divergents sur l'extrados**. Les rayons de courbure de l'intrados sont plus petits que ceux de l'extrados. Cette classe se subdivise en **3 sous classes (Fig.)** :

Classe IA :

L'épaisseur n'est pas constante (**plis anisopaques**). La charnière est moins épaisse que **les flancs**. Ce sont des plis rares dans la nature.

Classe IB :

L'épaisseur de la couche est **constante (plis isopaques ou concentriques)**. Les isogones restent perpendiculaires aux couches, mais elles sont moins divergentes par rapport au classe IA.

Classe IC (ex : Grès) :

La charnière est **plus épaisse** que **les flancs**. **Les isogones** sont **peu divergentes**.

Classification des plis

b-classification géométrique des plis par isogones de pendage (d'après Ramsay):

Classe II :

La charnière est **plus épaisse** que les flancs. Le rayon de courbure de l'intrados est **le même** que le rayon de courbure de l'extrados. Ce sont des **plis anisopaques** : plis semblables. Les isogones sont **parallèles**.

Classe III (ex : Schistes) :

La charnière est **plus épaisse** que les flancs (**plis anisopaques**). Le rayon de courbure de l'intrados est **plus grand** que celui de l'extrados. Les isogones sont **convergentes**.

Donc grâce à cette classification, on peut faire ce qu'on appelle : **une zonéographie des plis par les isogones** en fonction du **niveau structural** :

On peut dire par exemple :

- **Zone 1 (NSM)** = on a **classe IB**.
- **Zone 2 (NSI)** = on a **classe III**.

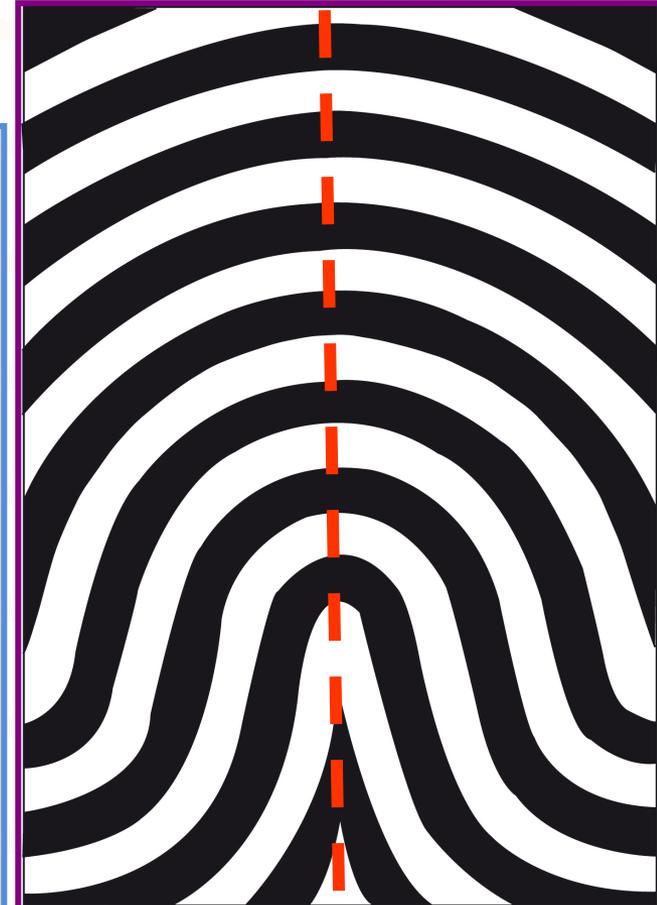
Cette comparaison est valable à condition qu'on utilise les roches de même nature.

Classification des plis

c- les différents types de plis définis par leur déformation: (isopaques, anisopaques)

Pli isopaque

- Pli où chaque couche garde **son épaisseur** dans les zones **de flanc** et **de charnière**.
- Un groupe d'arcs de cercle sont dits **concentriques** s'ils se rapportent **tous au même centre**.
- Un pli est **concentrique**, dans une roche sédimentaire, si **les couches sont toutes plissées** autour du **même centre**.
- Dans un **pli concentrique** les **épaisseurs** des couches mesurées perpendiculairement à leur surface de séparation restent **constantes**. Les rayons de courbure varient d'une couche à l'autre.



Plis isopaques

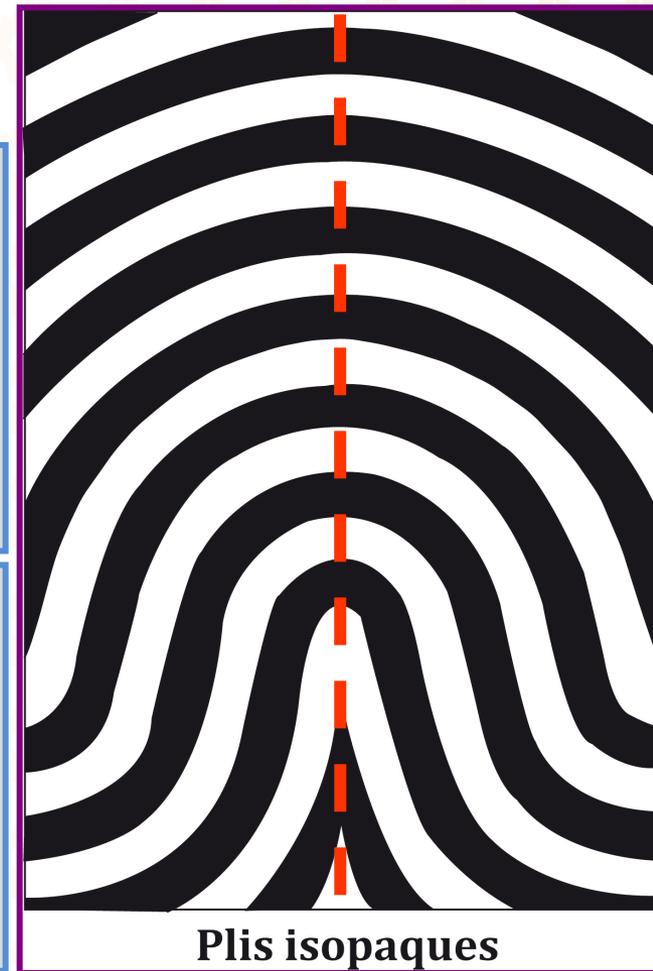
Classification des plis

c- les différents types de plis définis par leur déformation: (isopaques, anisopaques)

Pli isopaque

- Dans le cas des **plis concentriques**, les **rayons de courbure** des surfaces emboîtées change d'une couche à l'autre;
- A l'**extrados** du pli le **rayon de courbure** est **grand** et la forme **arrondie**. A l'**intrados**, le pli peut devenir **anguleux**.

- De part et d'autre du plan axial, les **couches externes** (à l'**extrados**) sont en **tension** et se fracturent en **diaclasses** ou en **failles normales**; celles à l'**intrados** sont en **compression**, elles ont parfois **fortement plissées** ou sont affectées de **failles inverses**.



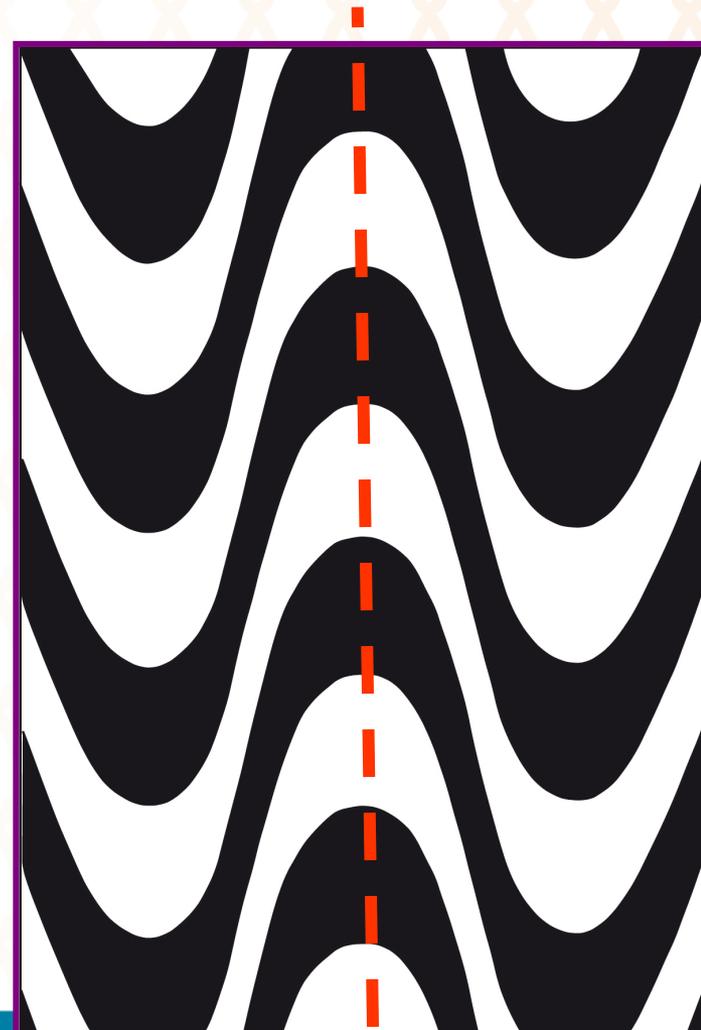
Classification des plis

c- les différents types de plis définis par leur déformation: (isopaques, anisopaques)

Pli anisopaque

• Pli où les couches ont subi des modifications d'épaisseur, soit dans un des flancs, soit dans les deux flancs, soit dans les deux flancs et à la charnière.

Un pli anisopaque est dit semblable, si les épaisseurs des couches sédimentaires définies par le plan axial sont constantes pour chaque couche, c'est-à-dire si la courbure des strates reste identique le long de la médiane du pli. Une simple translation permettrait de faire coïncider les différentes courbes. L'épaisseur au sens stratigraphique varie donc d'un point à un autre du pli, il y a étirement sur les flancs.



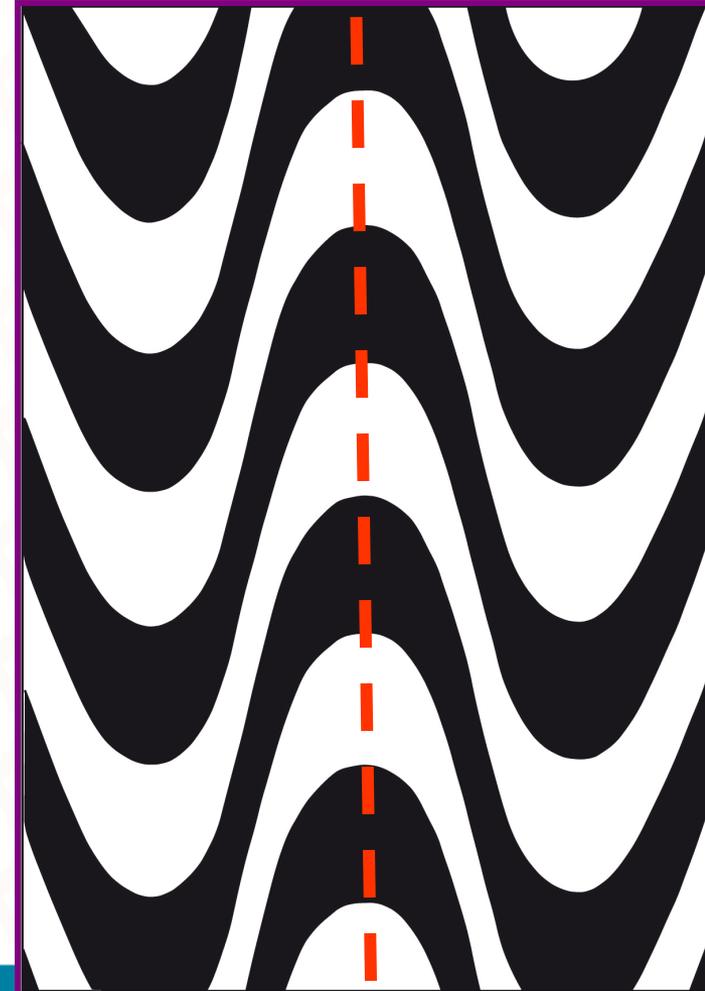
Plis semblables

Classification des plis

c- les différents types de plis définis par leur déformation: (isopaques, anisopaques)

Pli anisopaque

- Dans le cas **des plis semblables**, les **limites de couche** sont *toutes identiques* et se déduisent l'une de l'autre par simple translation.
- Un épaissement ou un amincissement des couches est visible d'une partie à l'autre du pli. Ces plis sont dits **anisopaques**.



Plis semblables

Microstructures associées au plissement

Schistosité et foliation

Schistosité

La **schistosité** est une **structure planaire** d'origine tectonique. Elle exprime l'**aplatissement** de la roche qui **se débite en feuillets** parallèles dont l'orientation est généralement différente du litage initial comme la **stratification** (S_0).

Foliation

Une **structure minéralogique**, où les plans sont marqués par des niveaux de **composition minéralogique contrastée**, ou par l'arrangement des minéraux individuels : c'est une **foliation**.

Remarque

Il est tout à fait possible d'observer plusieurs éléments planaires dans une roche; on les numérote alors en ordre chronologique, $S_0, S_1 \dots S_n$ (S_0 désigne habituellement le litage d'origine (stratification) de la roche)).

Microstructures associées au plissement

Mécanismes de formation des éléments planaires

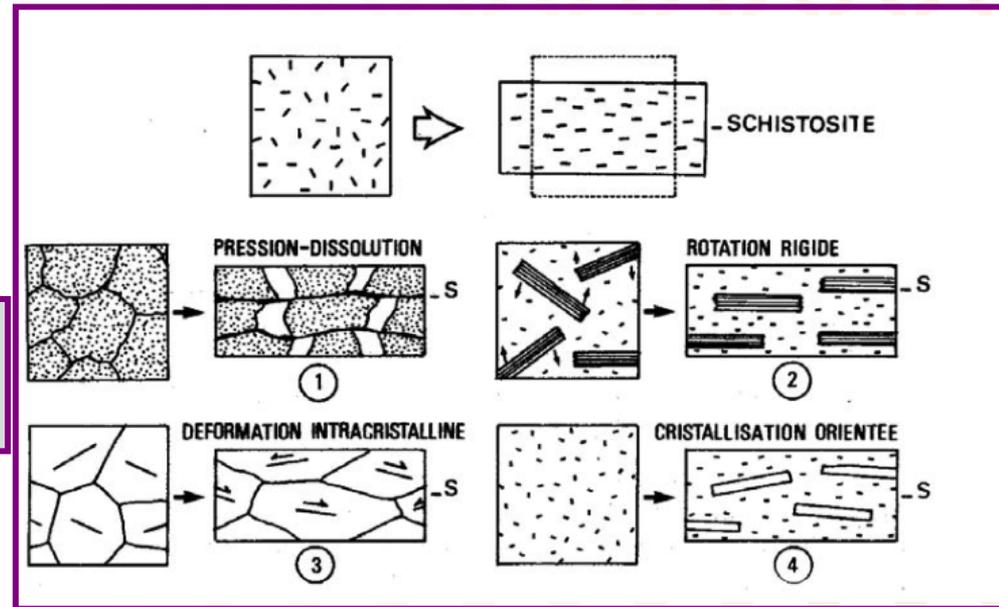


Fig. : Mécanismes de formation des schistosités et foliations.

On peut distinguer plusieurs mécanismes à **l'échelle microscopique** :

- Par **micro-fracturation**, parallèle et régulièrement espacée;
- Par **pression-dissolution**;
- Par **rotation rigide** d'objets préexistants;
- Par **déformation des cristaux**;
- Par **cristallisation orientée** de nouveaux minéraux.

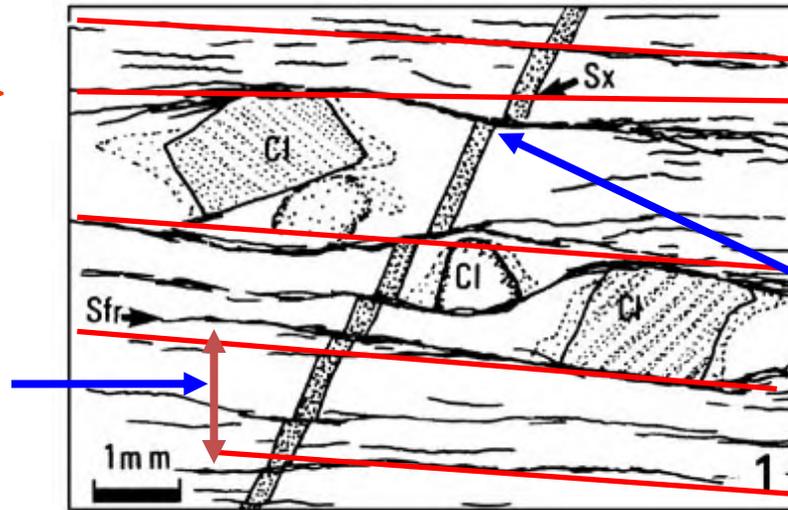
Microstructures associées au plissement

Quelques exemples de schistosités, le litage tectonique

Selon l'intensité de la déformation, on distingue plusieurs types de schistosités reconnaissables à l'œil nu sur l'affleurement et l'échantillon mais surtout au microscope.

Schistosité =>

Microlithon
(sans clivage)



Décalage du à
la dissolution

La schistosité espacée ou **schistosité de fracture** : Lorsque le matériau se déforme de façon cassante, les plans de fractures sont tous orientés parallèlement. Il en résulte un débit de la roche qui définit ainsi une schistosité. Les surfaces de schistosité sont irrégulières, espacées de quelques mm voire quelques cm.

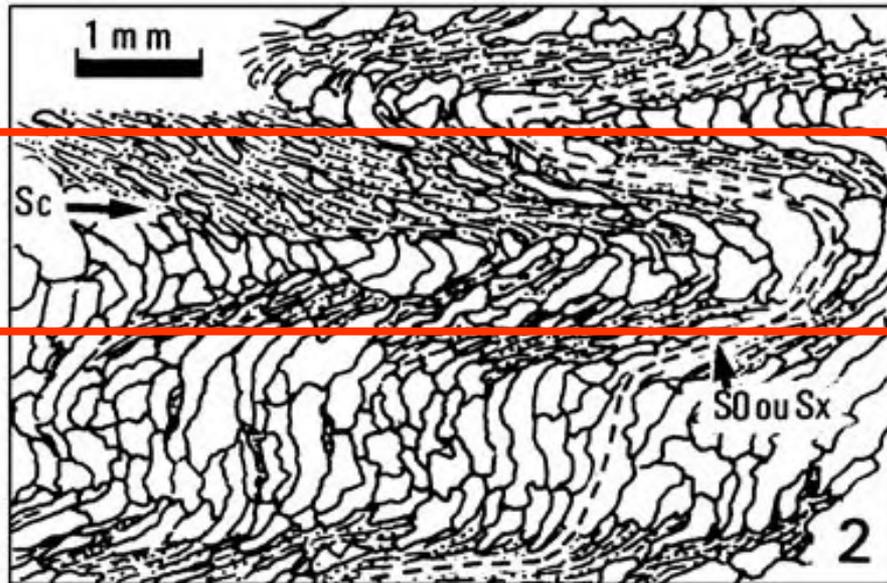
Schistosité de fracture



Microstructures associées au plissement

Quelques exemples de schistosités, le litage tectonique

La schistosité de crénulation

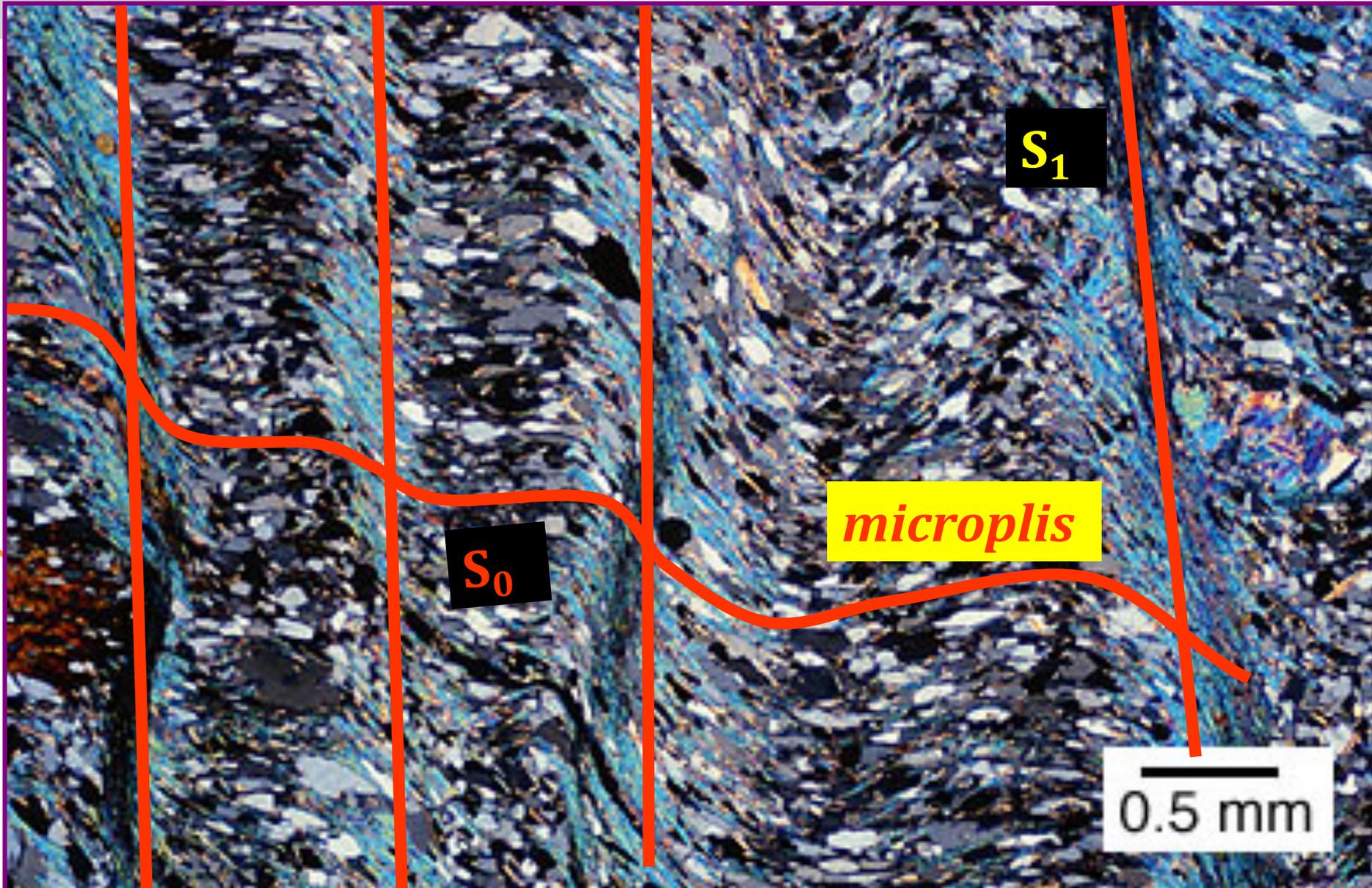


La schistosité de crénulation

La schistosité de crénulation:

Un plissement semblable intense (**millimétrique** ou **centimétrique**) définit une schistosité de crénulation selon **les flancs des plis**, domaine où toutes les structures sont parallèles.

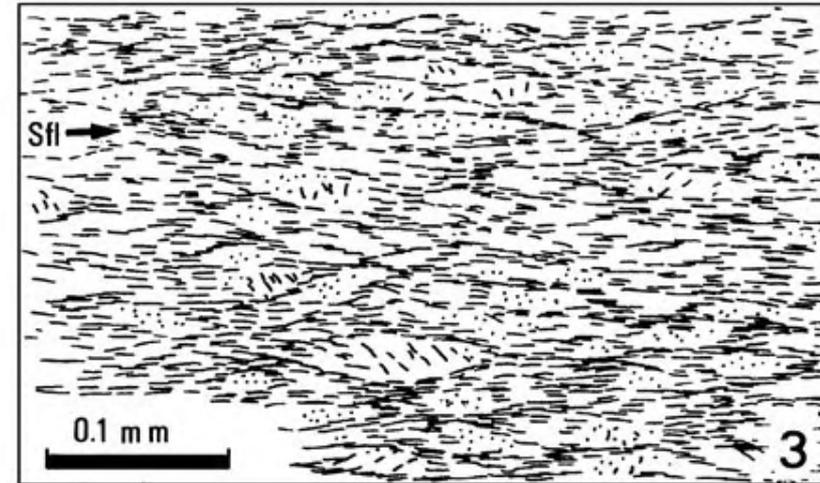
La schistosité de crénelation



Microstructures associées au plissement

Quelques exemples de schistosités, le litage tectonique

La schistosité continue ou schistosité de flux



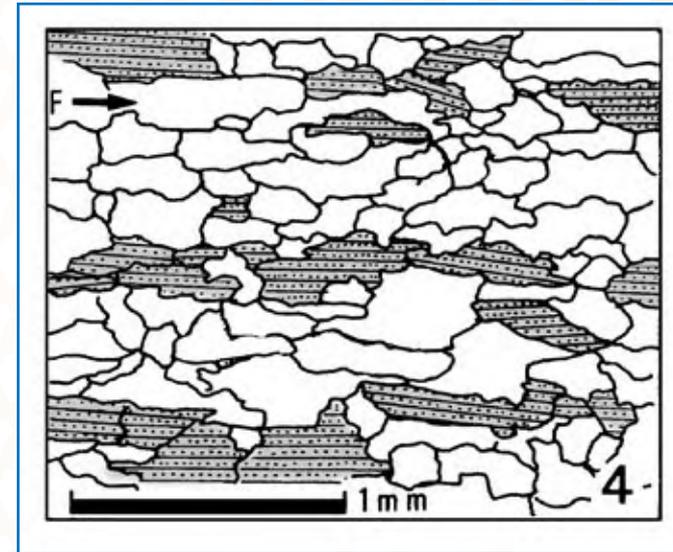
La schistosité continue ou **schistosité de flux**: Dans une roche déformée, les minéraux en feuillets ou en aiguilles ont naturellement tendance à **se re-orienter**. Les surfaces de schistosité sont régulières, l'espace entre deux plans est inférieur au **mm** et n'est en général plus visible à l'œil nu, il correspond à la taille moyenne des grains constituant la roche (quelques μ m). La schistosité de flux apparaît avec le métamorphisme. La **stratification d'origine** est en général **effacée** presque totalement. Un exemple classique est la **schistosité ardoisière**.

Microstructures associées au plissement

Quelques exemples de schistosités, le litage tectonique

La foliation

La **foliation** est une **schistosité continue**, les feuilletts ont une **composition minéralogique différente**, les minéraux métamorphiques sont visibles à l'œil nu, la roche est **rubanée**. Généralement, il y a alternance de bancs (**millimétriques** ou **centimétriques**) de **minéralogie différente** (alternance minéraux clairs, **minéraux sombres**, par exemple).



La schistosité permet de connaître la position du **plan d'aplatissement** : défini par **les axes X et Y de l'ellipsoïde**. C'est donc un marqueur important dans l'analyse de **la déformation ductile**.

Microstructures associées au plissement

Les Linéations

Les linéations sont des **structures linéaires parallèles entre elles** imprimées dans la roche, surtout visibles à l'échelle de **l'affleurement** et de **l'échantillon**.

- *Linéation d'intersection,*
- *Linéation de crénulation,*
- *Linéation minérale,*
- *Linéation d'étirement,*
- *Linéation de boudinage*

Microstructures associées au plissement

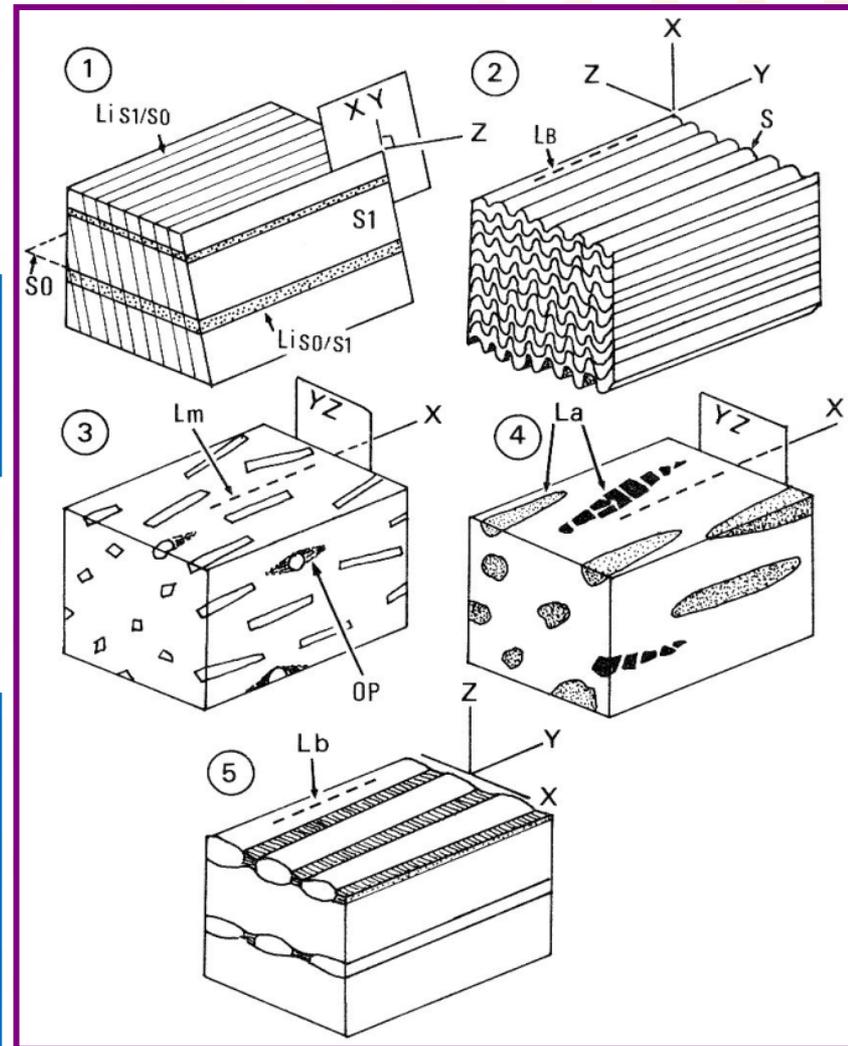
Les Linéations

Linéation d'intersection

La linéation d'intersection résulte de l'intersection de deux surfaces, en général la stratification S_0 et la schistosité S_1 .

Linéation de crénelation

La linéation de microplissement (crénelation) correspond aux axes de microplis déformant une surface de stratification ou le plus souvent une schistosité antérieure au microplissement. Elle est souvent associée à la schistosité de crénelation.



Microstructures associées au plissement

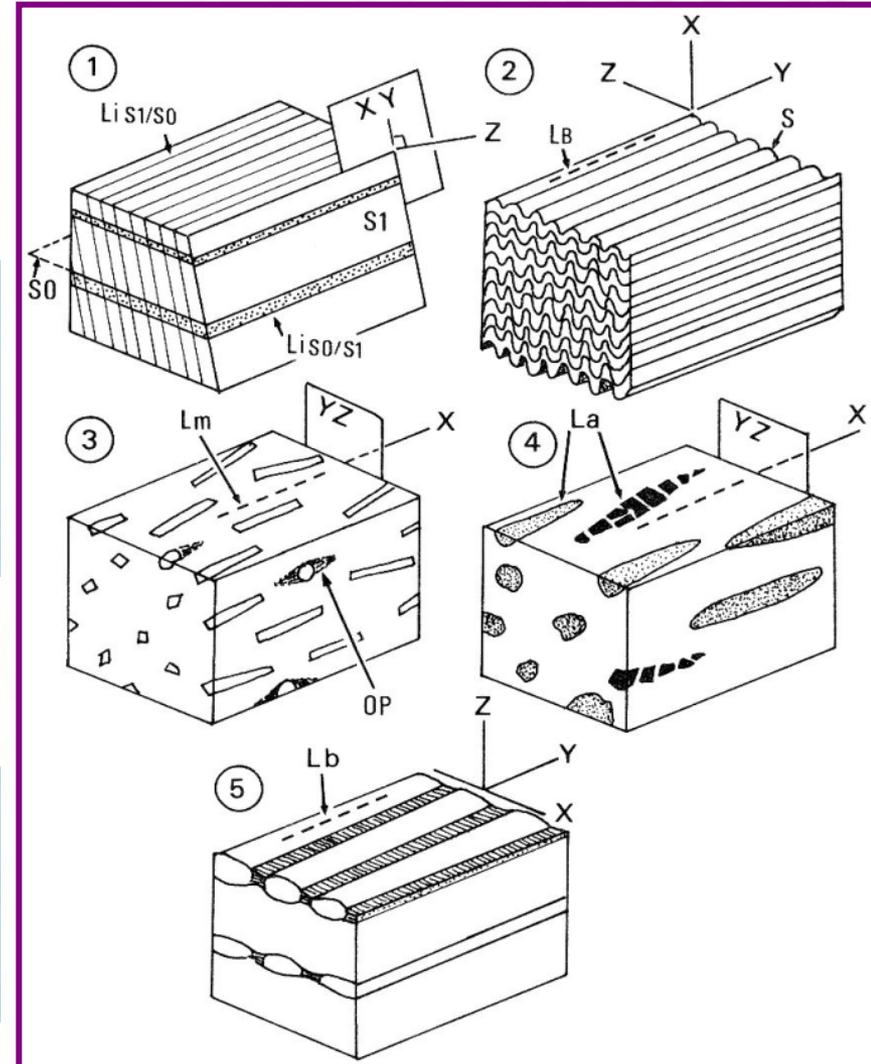
Les Linéations

Linéation minérale

La linéation minérale correspond à **des minéraux alignés** suivant une **direction préférentielle**, soit des **minéraux métamorphiques néoformés**, soit des **minéraux anciens réorientés**.

Linéation d'étirement

La linéation d'allongement ou d'étirement correspond à des **objets** (galets, fossiles, minéraux, etc...) **étirés** de façon **continue** ou **discontinue** (fragments alignés).



Microstructures associées au plissement

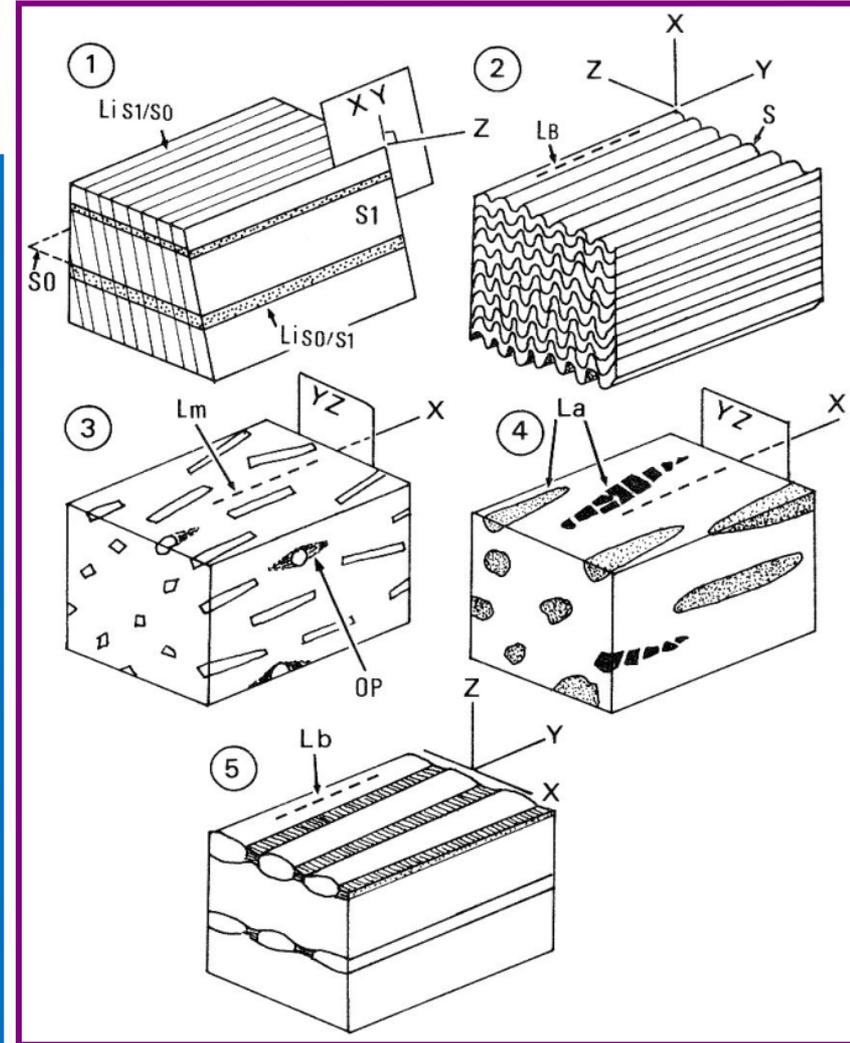
Les Linéations

Linéation de boudinage

Le boudinage correspond au **découpage régulier** de **bancs résistants** entourés d'une **matrice plus ductile**. Les **baguettes parallèles** définissent la **linéation de boudinage**, l'étirement ductile puis la rupture des baguettes définit la **direction d'allongement**.

N.B:

Les **linéations minérales**, **d'allongement** et **le boudinage** donnent avec précision la **direction** de **l'axe X** de **l'ellipsoïde de déformation**.

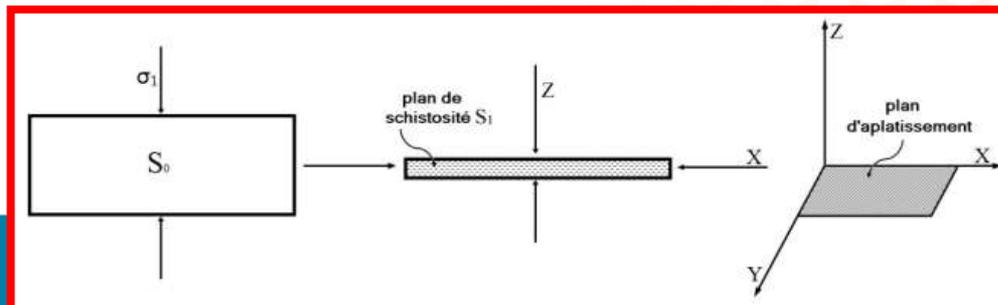


Fabrique et orientation de l'ellipsoïde de déformation

De façon générale, tous les types d'éléments planaires (schistosité) sont dans le plan XY de l'ellipsoïde de déformation; Z (raccourcissement principal) est perpendiculaire à la foliation. La schistosité renseigne aussi sur les conditions de P et de T de la déformation.

La reconnaissance des différents types de la schistosité: de fractures, flux, foliation, permet de se situer approximativement dans le niveau structural inférieur. La schistosité permet de mettre en évidence les phénomènes de tectonique superposés qui sont très fréquent dans le niveau structural inférieur, une schistosité plissée indique indirectement l'existence de deux épisodes de déformation.

La relation est moins nette pour les linéations. Des linéations d'étirement, des linéations minérales et les linéations de boudinage sont dans l'axe X (étirement). Mais pour tout autre type de linéation, la relation n'est pas claire et il faut réfléchir à son origine pour replacer l'ellipsoïde de déformation !



Les mécanismes du plissement

1 - le plissement isopaque par flexion-glisement

Ces plis apparaissent dans les niveaux structuraux supérieur et moyen de la chaîne de montagne. La température et la pression sont peu intenses. Selon leur nature lithologique, les roches auront des comportements mécaniques différents. Les roches compétentes se déforment difficilement (grès, calcaires,...), les roches incompétentes se déforment facilement (argiles, marnes,...).

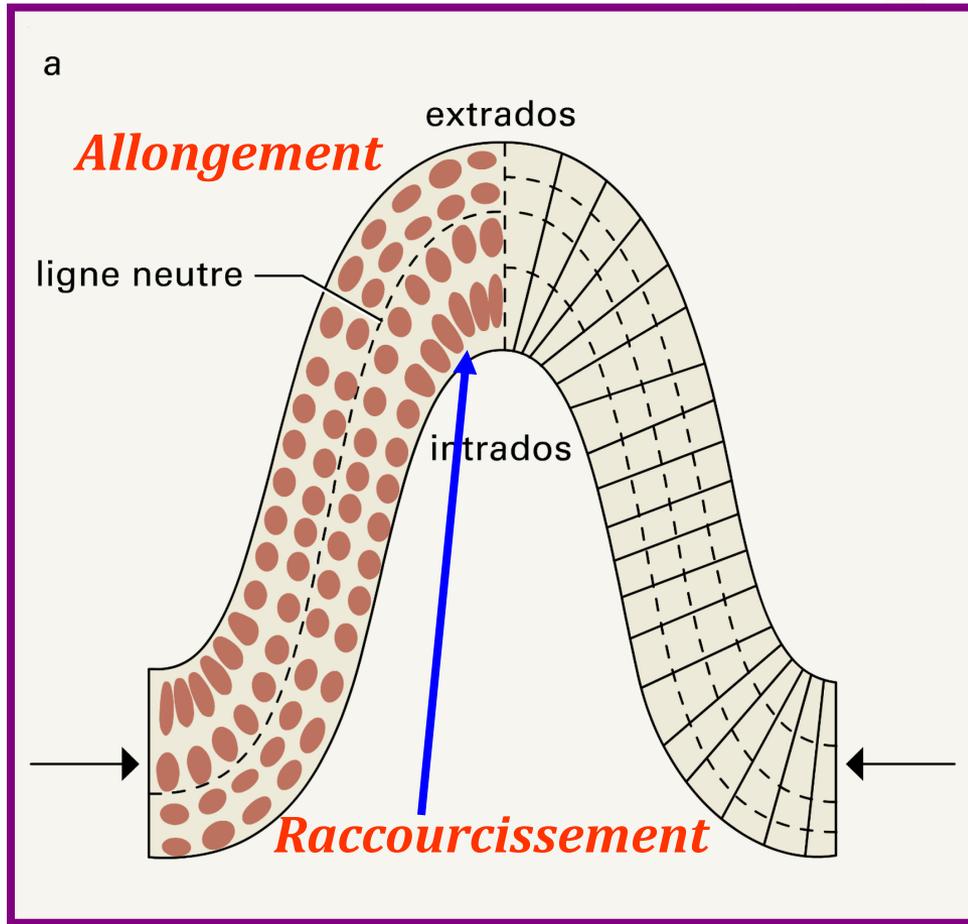
Dans des roches compétentes, les températures et les pressions plus élevées sont favorables au développement, par flexion et glissement banc sur banc, de plis isopagues ou parallèles et de failles.

Les mécanismes qui interviennent sont la flexion et le glissement banc sur banc.

Deux modèles simples illustrent ces mécanismes.

Les mécanismes du plissement

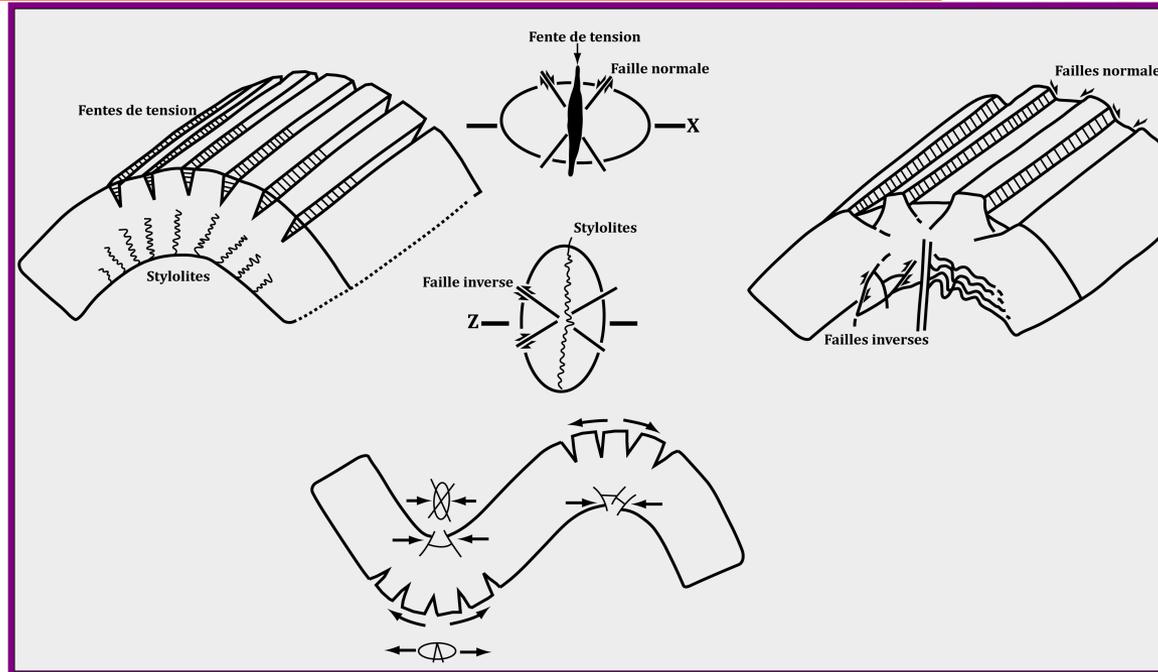
Les plis à déformation de charnière



Barre flexible

Les mécanismes du plissement

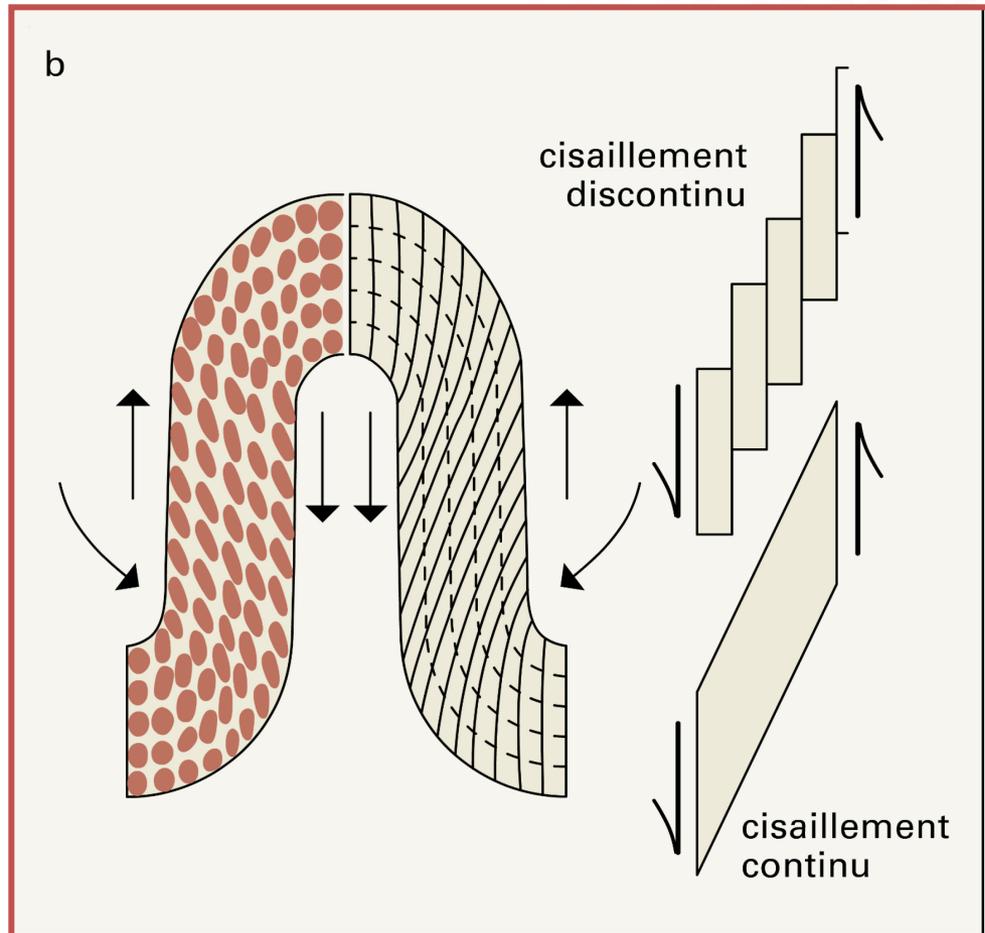
Les plis à déformation de charnière



La **distorsion** est localisée dans la **charnière**, elle est **hétérogène** avec une extension dans l'**extrados** et une compression dans l'**intrados** (modèle de la torsion d'une barre rigide). Les microstructures associées peuvent être: à l'**extrados** des **fentes de tension** ou des **microfailles normales**, à l'**intrados** des **joints stylolithiques**, des **microplis** ou des **microfailles inverses**.

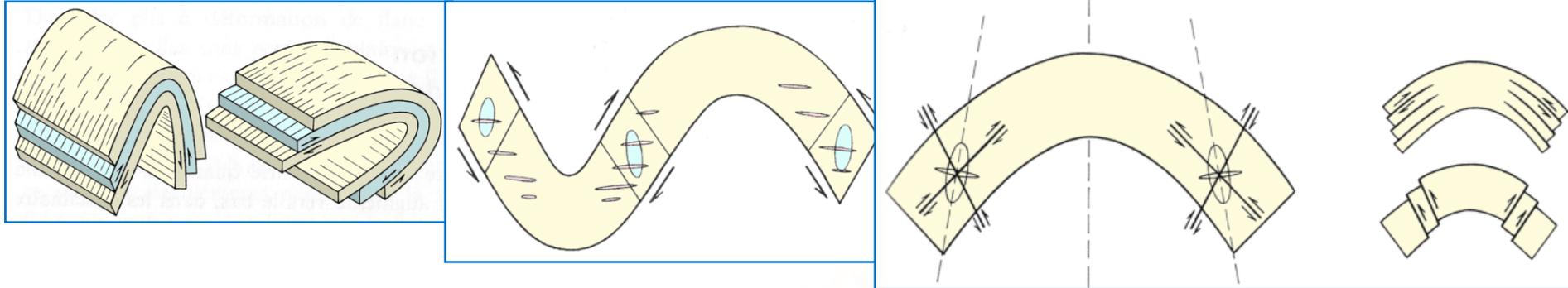
Les mécanismes du plissement

Les plis à déformation de flanc



Les mécanismes du plissement

Les plis à déformation de flanc



La distorsion est localisée dans **les flancs**. C'est un **cisaillement interne** du banc qui se fait par glissement de surfaces les unes sur les autres (**modèle de la courbure d'une pile de feuilles**). Les microstructures associées sont **des fentes en échelon** dans les flancs, souvent **sigmoïdes**, la **forme en S ou Z** donne le sens du **cisaillement interne**. On peut aussi observer **des plans de cisaillement de Riedel** et **des stries** banc sur banc dans le cas d'un empilement de couches les unes sur les autres. Dans tous ces types de plis il y a coexistence d'une **déformation ductile** qui donne le **pli** et de **déformations cassantes** (**microfailles, fentes, etc...**). C'est la conséquence de conditions physiques (T° et P) correspondant aux **niveaux structuraux supérieur** de la chaîne. **La déformation** est **d'intensité modérée, hétérogène**, et **non pénétrative**.

Les mécanismes du plissement

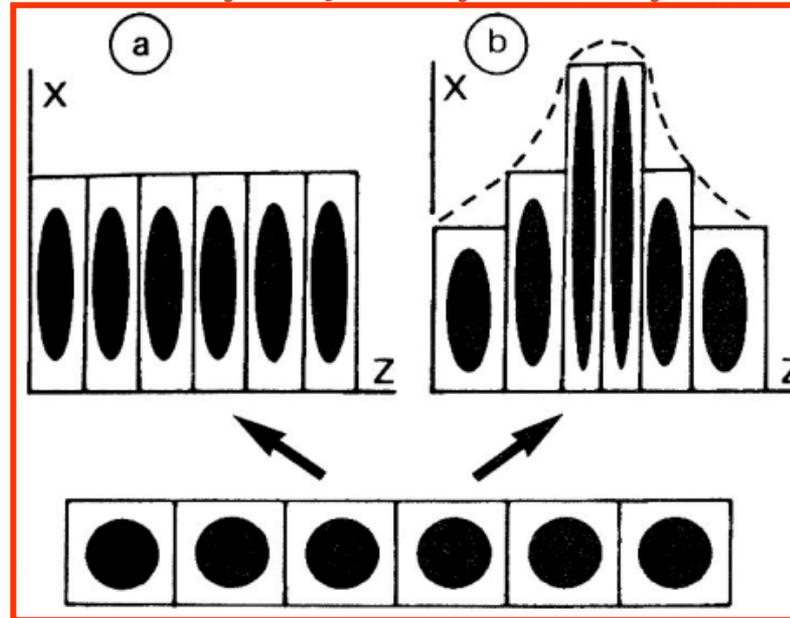
2- le plissement anisopaque par aplatissement

Ces plis caractérisent **le niveau structural inférieur** de la chaîne de montagne. Ils apparaissent alors quelque soit la lithologie des roches déformées.

Les niveaux structuraux inférieurs sont caractérisés par **des valeurs de T° et P de plus en plus fortes**. La déformation est de **plus en plus ductile et de plus en plus intense**. Elle s'imprime dans la roche à **toutes les échelles**, on dit qu'elle est **pénétrative**. Le marqueur caractéristique est **la schistosité** qui est l'expression de ***l'aplatissement*** des roches. La schistosité est associée aux plis, les 2 structures apparaissent en **même temps**, on dit que les plis sont ***synschisteux***.

Les mécanismes du plissement

2- le plissement anisopaque par aplatissage

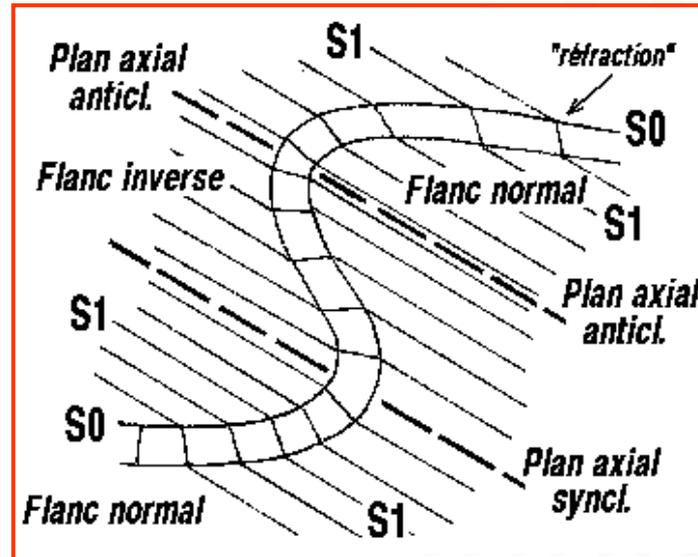


L'aplatissement homogène ne donne pas de plis. Par contre il donne des plans de schistosité, parallèles au plan d'aplatissement **XY** (Fig. a).

L'aplatissement hétérogène dans le plan **XZ** conduit à l'apparition de plis anisopaques **synschisteux**. Les plans de schistosité sont parallèles au plan axial du pli (Fig. b).

Les mécanismes du plissement

2- le plissement anisopaque par aplatissement



En général, l'**aplatissement homogène** ou **hétérogène** se produit après un **premier stade de flexion** des niveaux compétents. La **schistosité** prend des dispositions différentes: **en éventail** dans les **bancs compétents**, **parallèle au plan axial** dans les **niveaux incompétents** au début de la déformation (*Fig.*). Avec la généralisation de l'aplatissement, la schistosité est pratiquement parallèle au plan axial quelle que soit la lithologie.

Les mécanismes du plissement

3-le plissement anisopaque par cisaillement simple

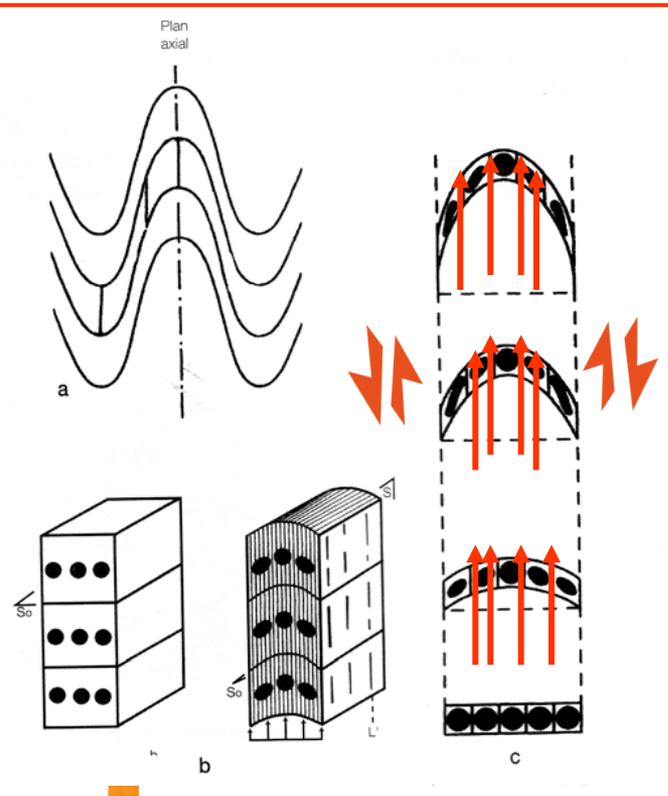
Ces plis assez particuliers apparaissent par **glissement** le long de surfaces planes qui sont des plans de transport de la matière ou **plans de cisaillement** (plans C). Les niveaux repères se déforment par simple translation, il n'y a pas de raccourcissement comme dans le cas des **plis isopaques** formés par **flexion** ou des **plis** formés par **aplatissement**. Le modèle analogique simple est un paquet de cartes glissant les unes sur les autres.

Les mécanismes du plissement

3-le plissement anisopaque par cisaillement simple

Un cisaillement homogène ne donne pas de plis. Par contre **un glissement différentiel** le long des plans de transport va engendrer **des plis anisopaques** dont la géométrie est un peu particulière: l'épaisseur mesurée parallèlement au plan axial est constante. Ce sont **les plis semblables**. Si **le cisaillement est hétérogène** dans le plan C, le niveau repère va donner des plis à axes courbes (**plis en fourreau**).

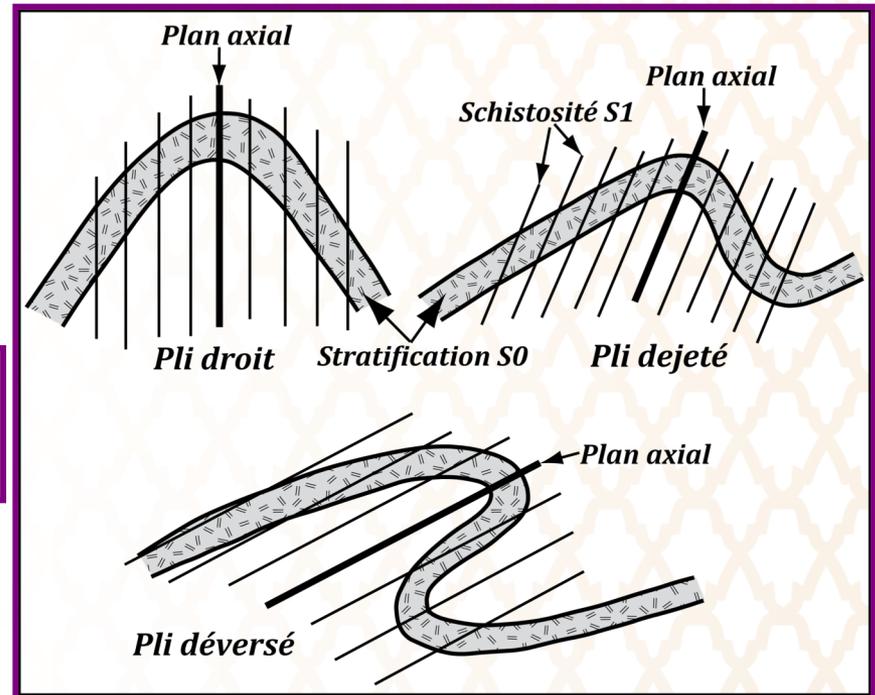
Comme les plis par aplatissement, ces plis sont toujours **synschisteux** (schistosité continue, de flux ou foliation). Ils présentent aussi **une linéation d'étirement** parallèle à la direction de transport ou de cisaillement, mais différente (un peu) de l'axe X d'allongement de l'ellipsoïde.



Relations géométriques plissement – microstructures

Plis et schistosité

Association de plis et schistosités dans le cas d'un cisaillement hétérogène.



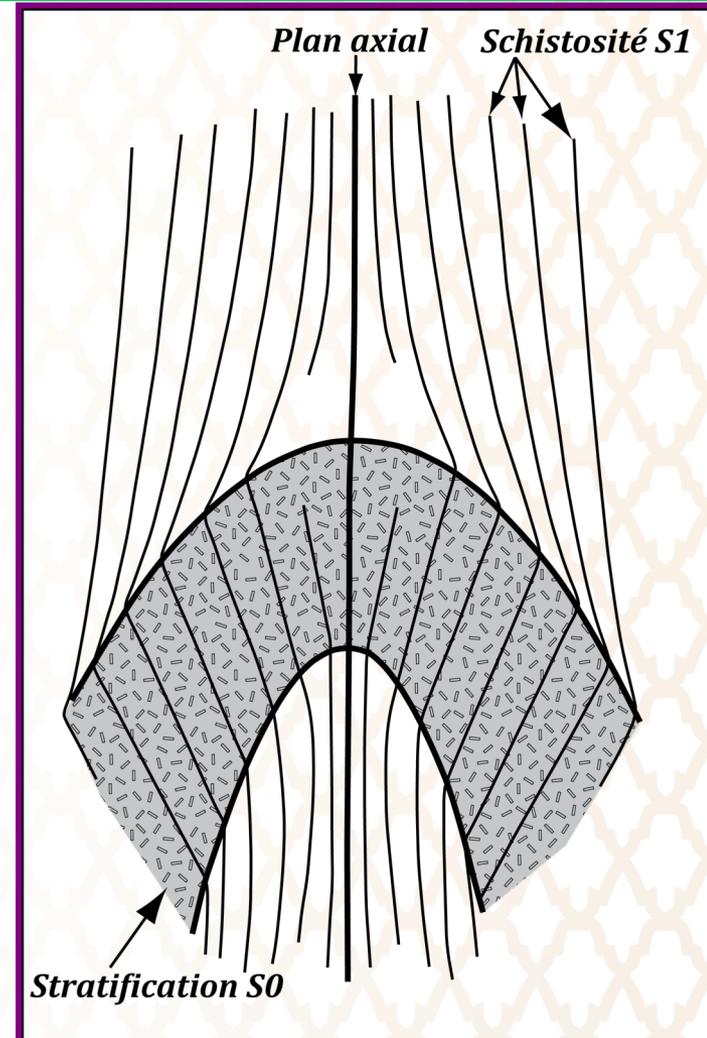
La **schistosité** et le **plissement** sont 2 types de structures liées à un **raccourcissement**. Donc la schistosité et le plissement apparaissent **en même temps**. Ce sont des structures **synchrones** : **Plis synschisteux**. La schistosité correspond donc au plan axial du pli; et tous les plans de schistosité sont parallèles au plan axial du pli. Donc dans le cas d'un pli synschisteux, la schistosité est toujours parallèle au plan axial.

Relations géométriques plissement – microstructures

Réfraction de la schistosité

Dans les bancs compétents, les plans auront tendance à se disposer perpendiculairement aux surfaces de bancs, alors que dans les lits **incompétents** ils auront plutôt tendance à s'aplatir. On parlera de **réfraction de la schistosité**.

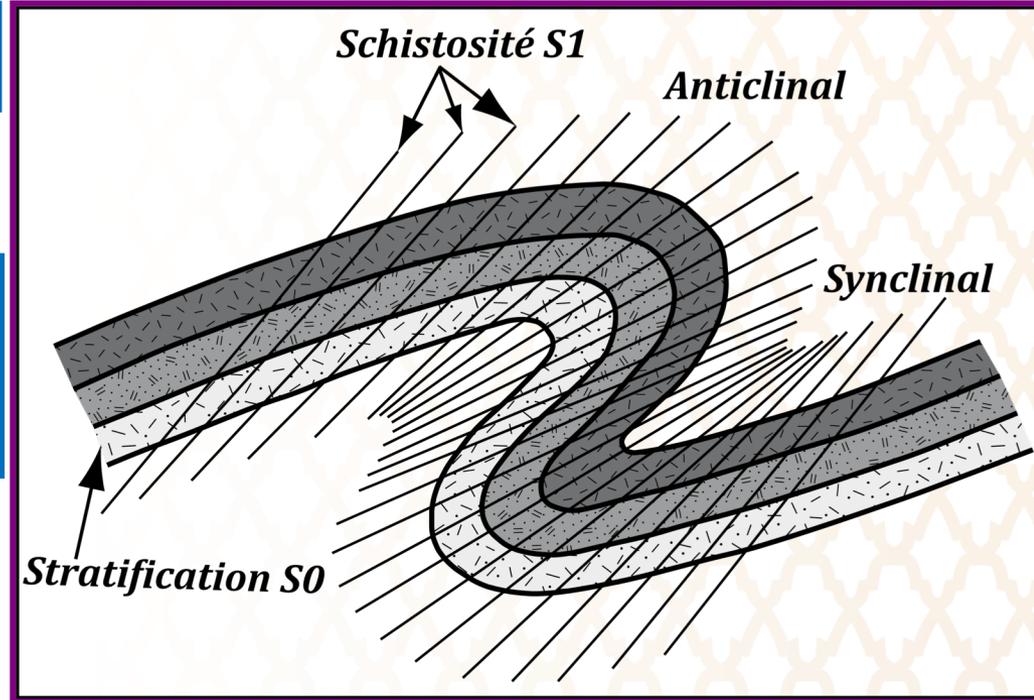
Par rapport au pli, la schistosité dessinera **un éventail** centré sur le plan axial du pli. Si l'aplatissement est très important l'éventail sera peu ouvert.



Relations géométriques plissement – microstructures

Schistosité en éventail

La schistosité S_1 **converge** vers l'axe du synclinal et **diverge** vers l'axe de l'anticlinal.



Relation entre **le pendage** de **la schistosité** et celui de **la stratification**. Le pendage de la schistosité est supérieur à celui de la stratification dans **le flanc normal** et inférieur dans **le flanc inverse**.

COURS DE TECTONIQUE: MODULE: G-244

CHAPITRE: V

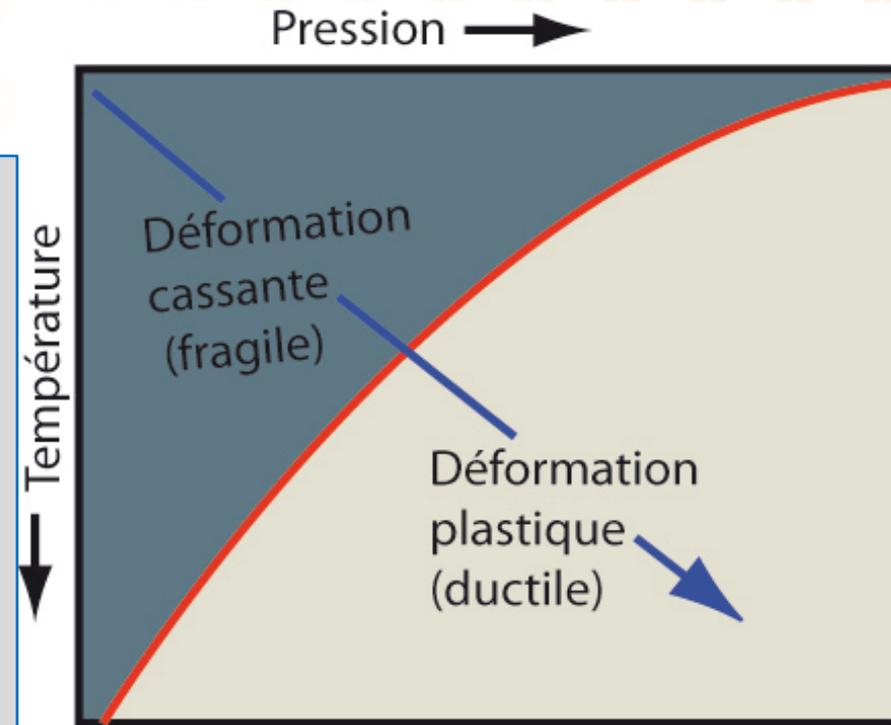
**NOTION DE NIVEAU
STRUCTURAL**

Rappels

Déformation des roches

Les facteurs qui influent sur le couple contrainte / déformation

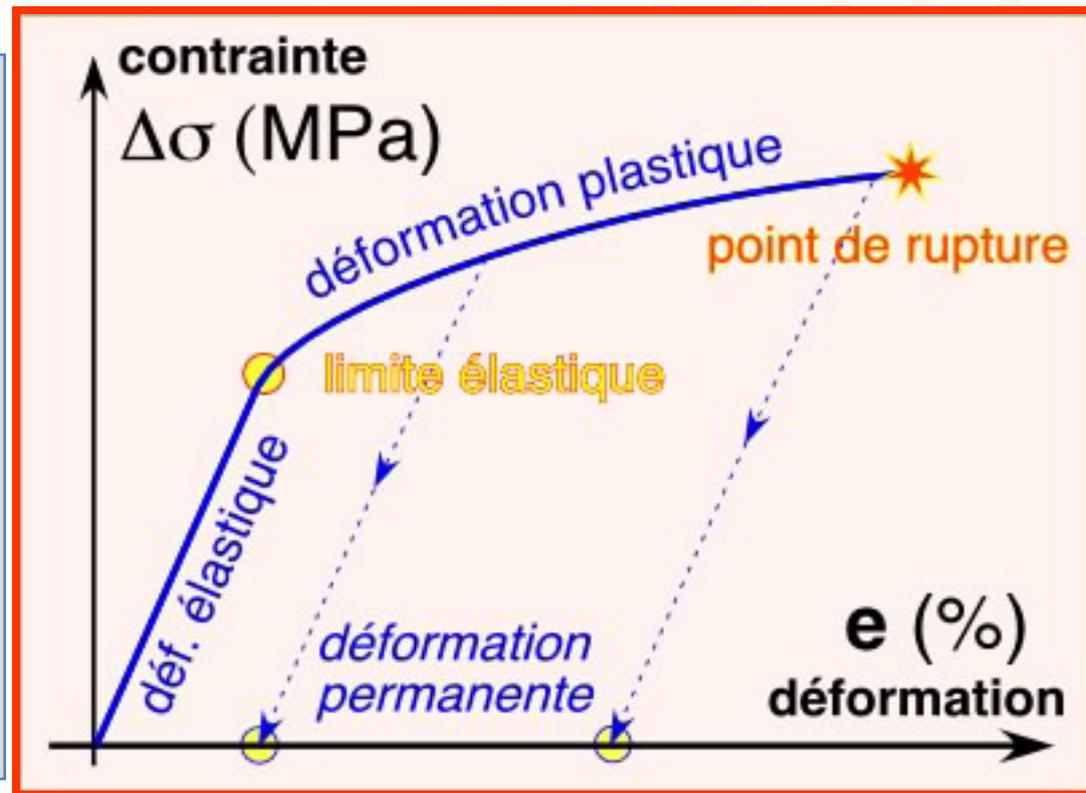
- **Température et Pression** = augmentent avec la profondeur dans la croûte terrestre (surface = cassante, en profondeur = plastique)
- **Temps** = si temps court = casse; si temps long = plastique (notion de fluage).
- **Composition chimique de la roche** = **R. cassantes** de nature (**calcaires**, les **grès**, les **granites**), d'autres plutôt **plastiques** (**r. argileuses**).



Les courbes contrainte/déformation (**Fig**) montrent que **l'augmentation** de la température et de **la pression de confinement** (donc de la profondeur dans l'écorce) favorise la **déformation ductile** (le **comportement plastique**) et **retarde** la **rupture** (**chapitre II**).

Modes de déformations

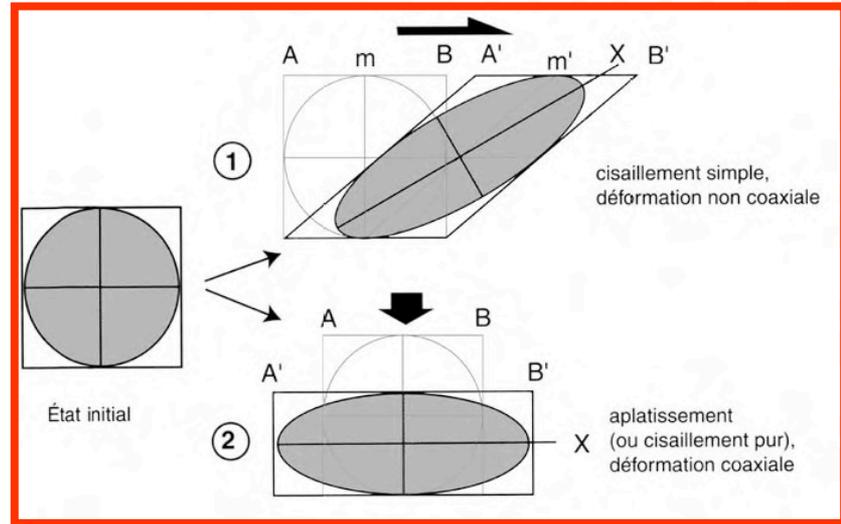
- 1- **déformation élastique** réversible qui disparaît lorsque la contrainte s'arrête;
- 2- **déformation plastique** qui apparaît à partir d'un certain seuil de plasticité ou limite d'élasticité. La déformation devient permanente et proportionnelle à la pression;
- 3- **déformation cassante** lorsque le seuil de rupture est atteint. On passe à la dislocation discontinue.



Comportement cassant : les roches ne subissent peu ou pas de déformation plastique avant la rupture.

Comportement ductile : les roches subissent de grandes déformations plastique.

Mécanismes de déformation



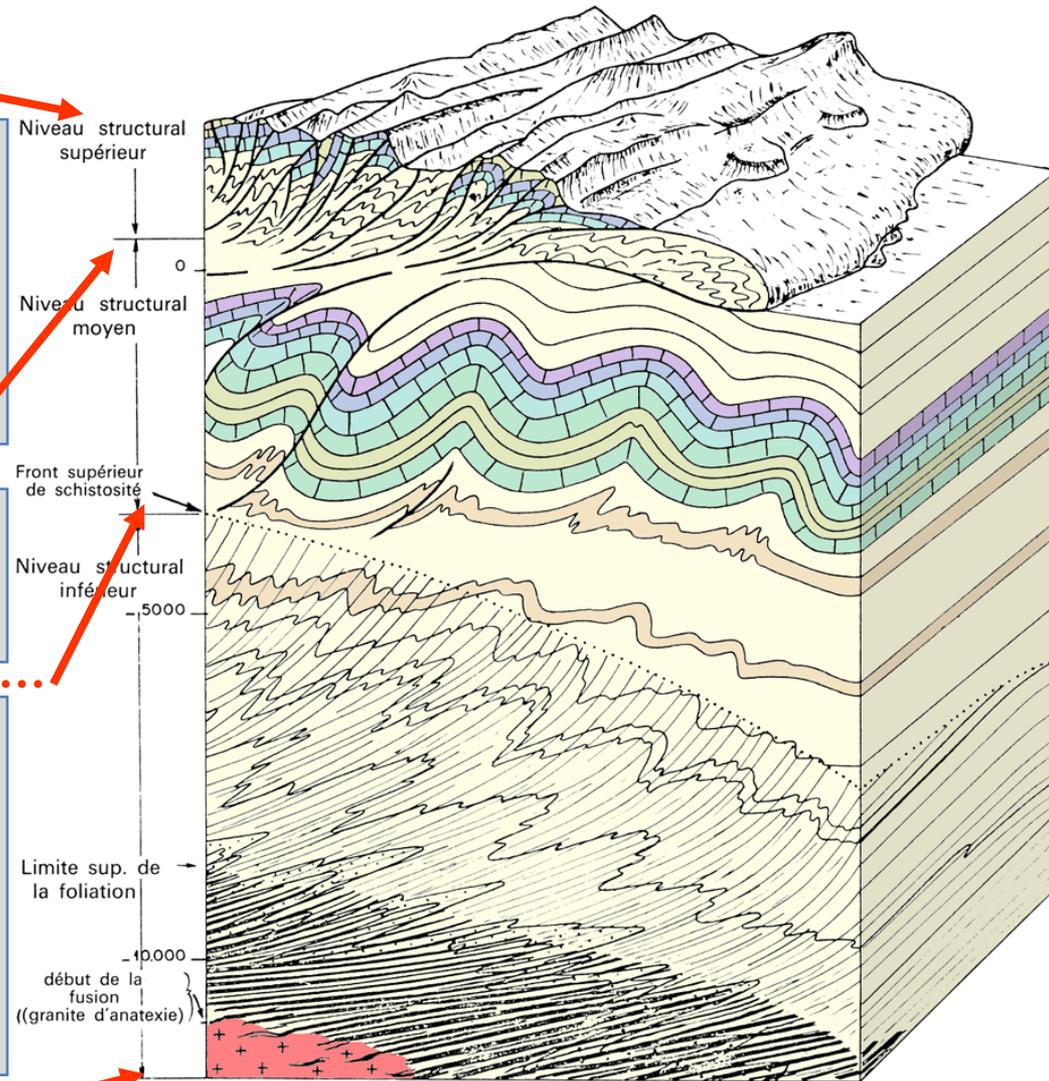
- **L'aplatissement** : Dans ce cas, *la pression principale maximale est la plus forte*. Si l'on considère un **cube**, celui-ci sera transformé en **parallélépipède** rectangle, c'est à-dire *aplatissement* grâce à la *pression principale maximale* et *étirement* parallèlement à *la pression principale faible*. Exemples : fossiles ou galets aplatis.
- **La flexion** : **Déformation continue** des roches au cours de laquelle une strate est *plissée* de telle manière que *son épaisseur mesurée perpendiculairement* aux points de stratification *reste constante*.
- **Le cisaillement** : Déformation par *aplatissement* et *rotation*. Ainsi, un **cube** deviendra un **parallélépipède** dont les surfaces ne sont plus parallèles à celles du cube initial.

Les niveaux structuraux

1. *Niveau structural supérieur*, pelliculaire, domaine des glissements superficiels localisés ou régionaux. Si les massifs sont rigides, les contraintes engendrent **des ruptures ou failles** ; **plis isopaques**

2. *Niveau structural moyen*, caractérisé par **des plis isopaques parallèles** ainsi que par **des failles**;

3. *Niveau structural inférieur*, caractérisé par **des plis anisopaques et des plis semblables**. La déformation plastique débute par **la schistosité** qui disparaît, en profondeur, en faveur de **la foliation** et **des recristallisations métamorphiques**.



Les niveaux structuraux

1. Niveau structural supérieur :

Déformation = Failles

Mécanisme dominant =

Cisaillement

2. Niveau structural moyen :

Déformation = Plis isopaques

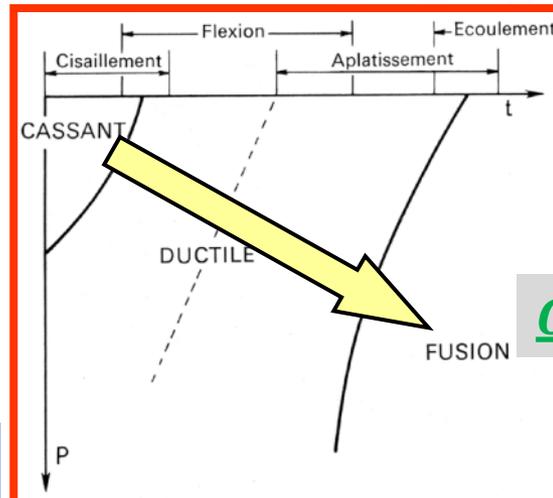
Mécanisme dominant = Flexion

3. Niveau structural inférieur :

Déformation = Plis avec schistosité + plis d'écoulement

Mécanisme dominant =

Aplatissement

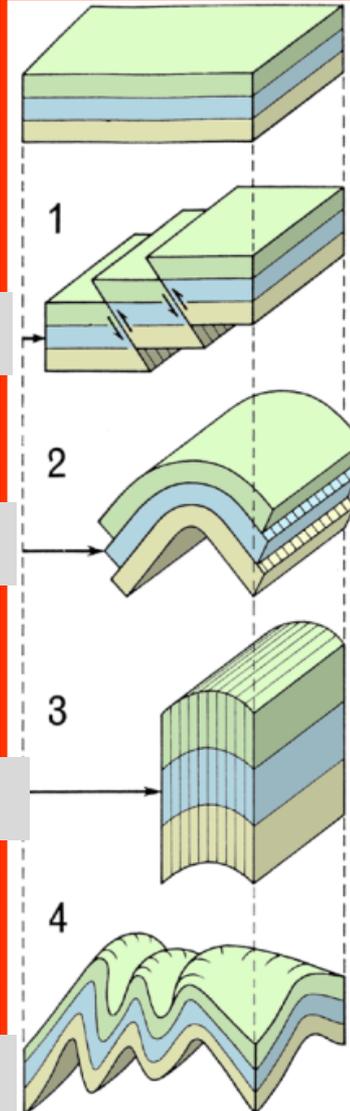
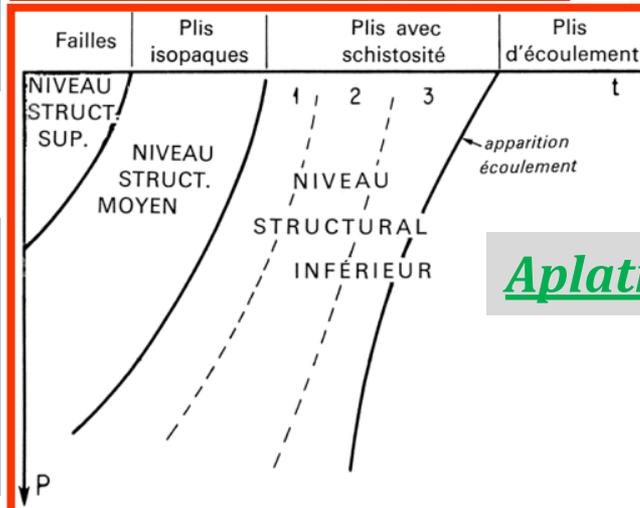


Cisaillement

Flexion

Aplatissement

Ecoulement



Les niveaux structuraux

À l'échelle d'une chaîne de montagnes et après érosion, le niveau structural inférieur forme le cœur de l'édifice : il est entouré par le niveau structural moyen et par le niveau structural supérieur.

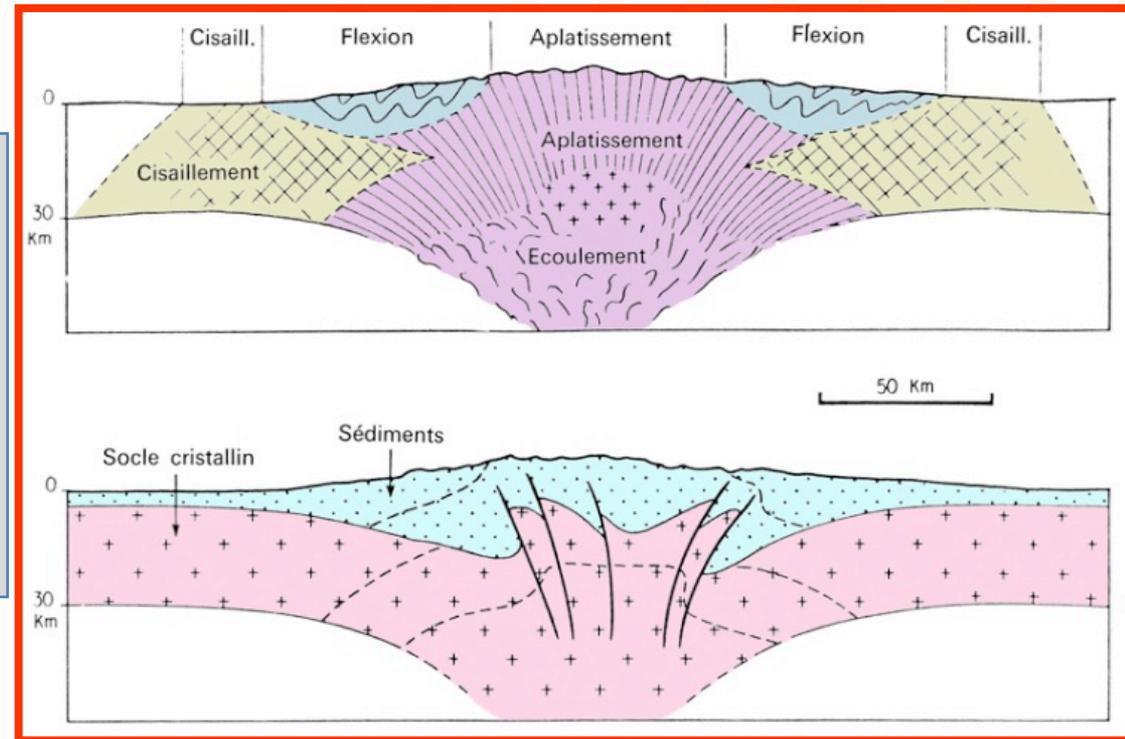


Fig : Coupe théorique d'une chaîne symétrique à raccourcissement faible et allure des niveaux structuraux correspondants.

On remarque que par suite du **contraste lithologique** entre les sédiments et leur substratum cristallin, la fracturation peut apparaître sous la flexion (d'après M. Mattauer, 1972).