

# La déformation ductile des roches

## 1. Introduction Générale

Décrire et **interpréter** les structures des roches à toutes les échelles pour comprendre la tectonique des continents et des océans:

Formation et disparition des chaînes de montagnes,

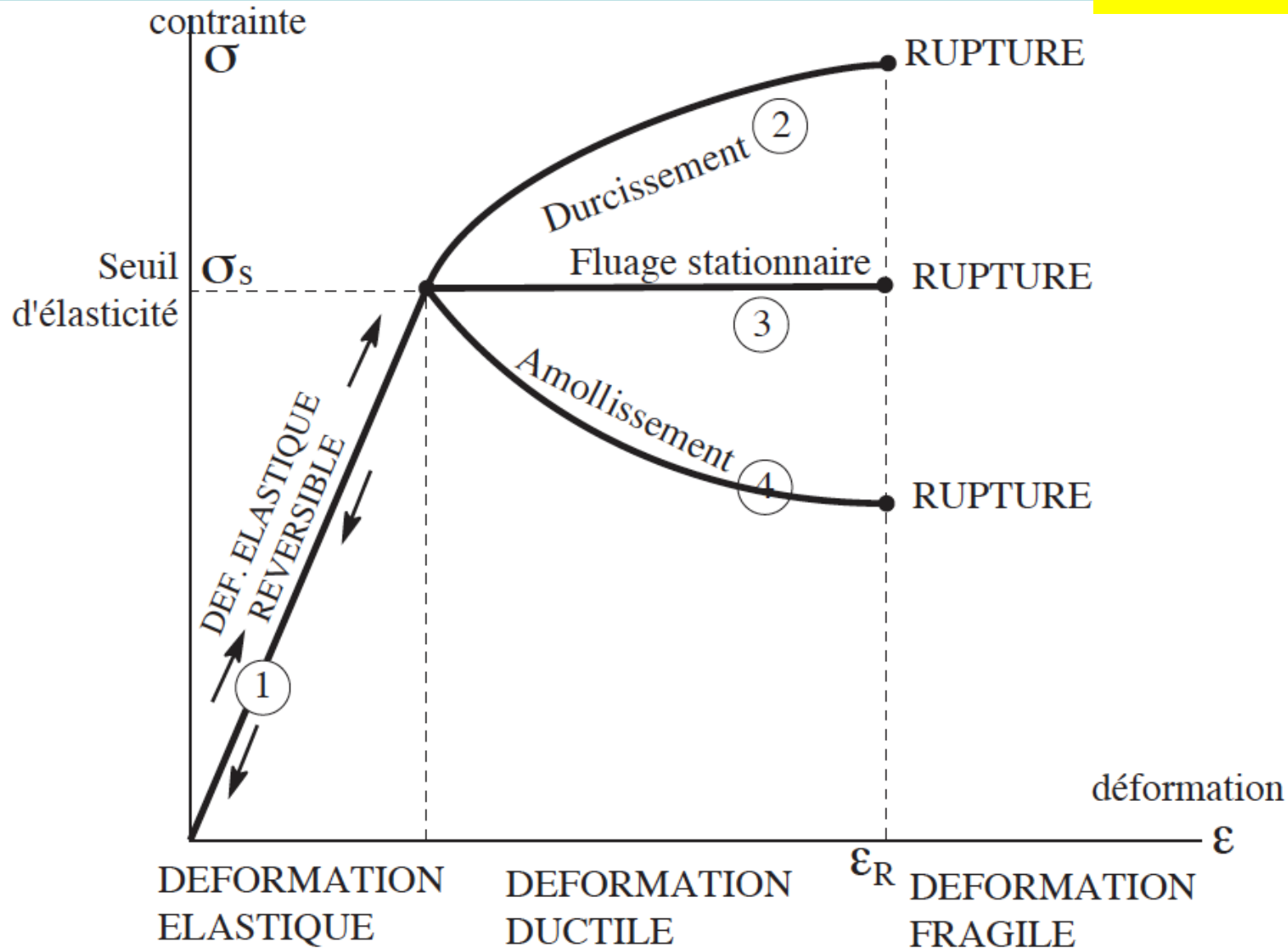
Cassure des continents (rifting),

Mise en place des plutons granitiques, etc...



# Le comportement mécanique des roches: modes de déformation

Relations scalaires  
contrainte-déformation



# Le comportement mécanique des roches

Ne pas confondre **ductilité** : déformation continue et irréversible et *plasticité* : un des mécanismes de la ductilité (il y en a d'autres : pression dissolution, diffusion, etc...).

Les facteurs de la déformation:

**Facteurs physiques** : Température

Vitesse de déformation  $\epsilon/t = \%/s^{-1}$

**Facteurs chimiques ou minéralogiques liés au matériau:**

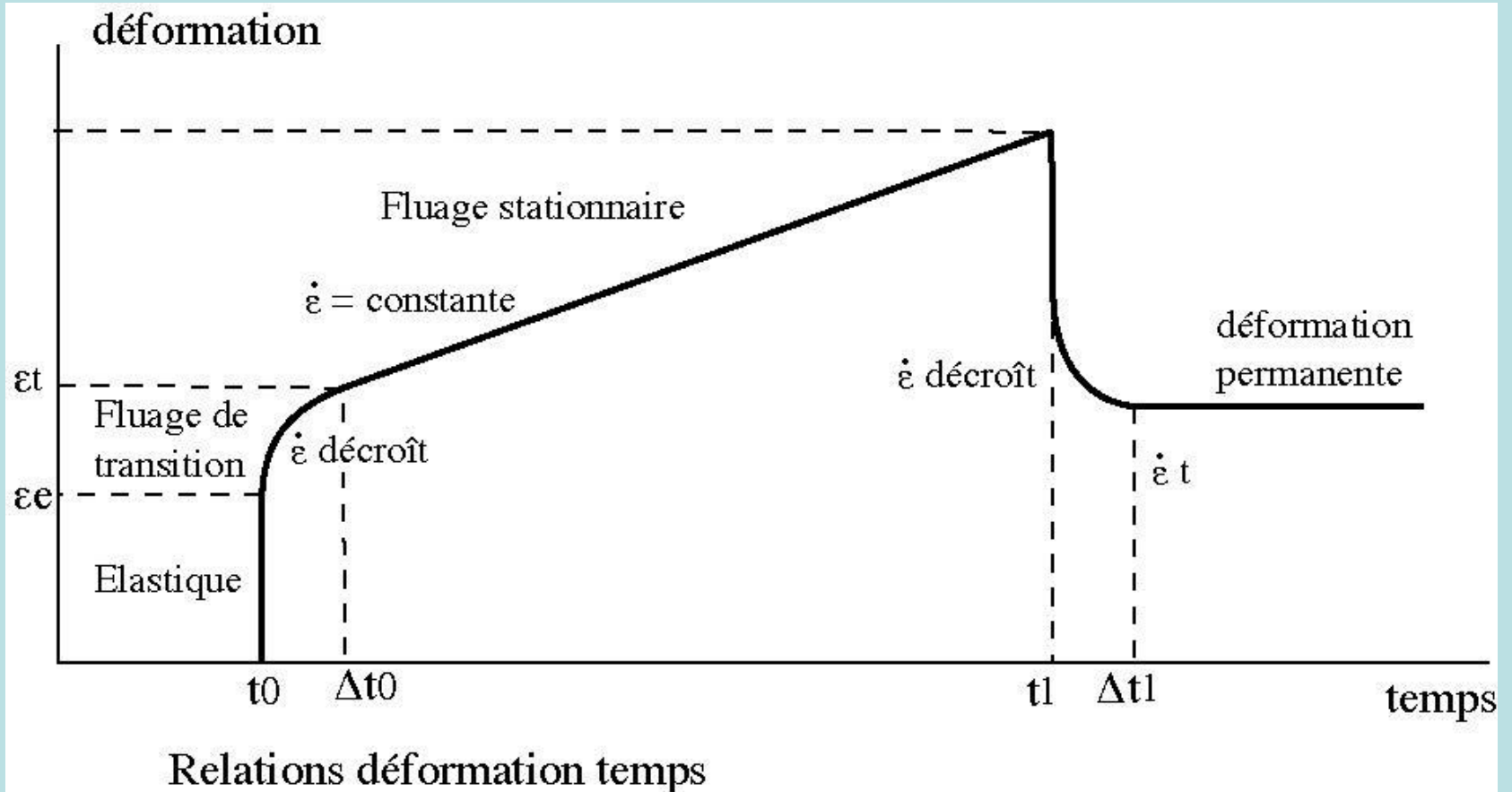
Taille de grain

Texture: orientations préférentielles (anisotropie)

Porosité

Présence fluides (nature et quantité)

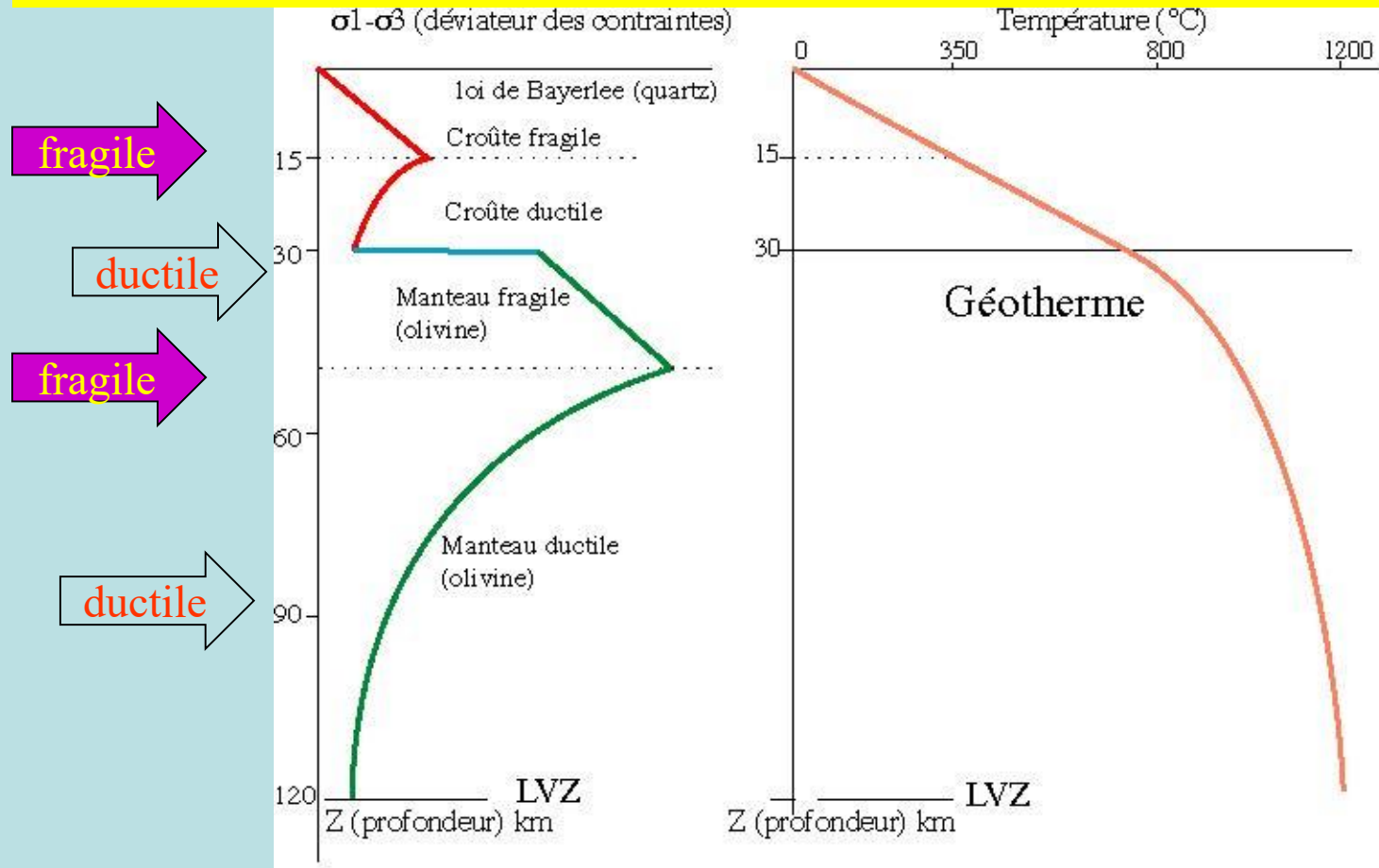
## Relation déformation-temps



Le fluage stationnaire est le cas le plus fréquent dans la lithosphère.  
Les roches se déforment comme des **fluides visqueux**.



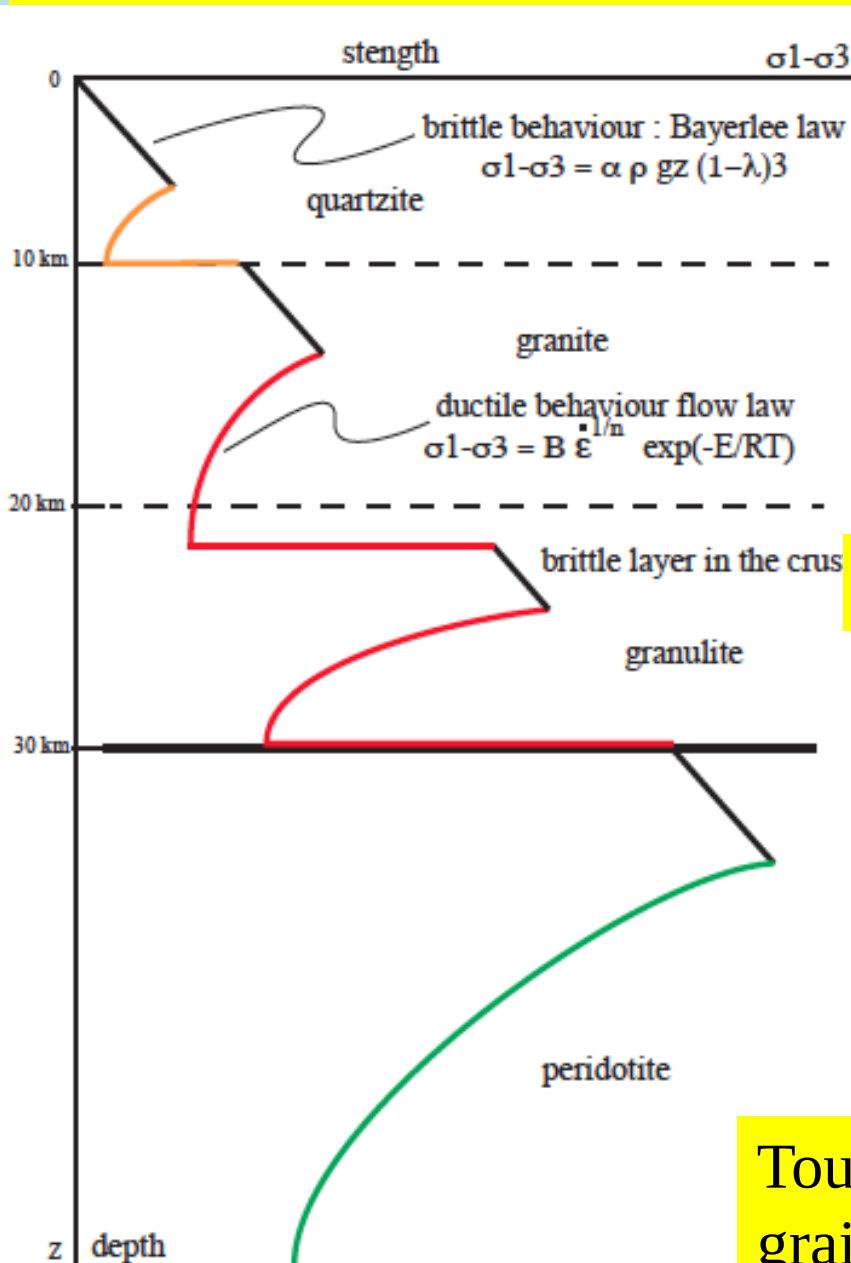
# Comportement rhéologique de la lithosphere



Ce profil rhéologique (arbre de Noël) simplifié et le géotherme correspondent à une lithosphère continentale composée de quartz (croûte) et olivine (manteau). La déformation est contrôlée par la température et la vitesse de déformation.

**La contrainte n'est pas un paramètre très important.**

# Comment lire un profil rhéologique de la lithosphère?



$\lambda$ : pression de fluide

$\alpha=3$  reverse fault

$\alpha= 1.2$  strike-slip fault

$\alpha: 0.75$  normal fault

$\eta$ : viscosité  $\eta = \sigma / \dot{\epsilon}$   
 (strain rate)

**Question: où est  $z$  dans la formule?**

Vitesses de deformation en  $\% s^{-1}$

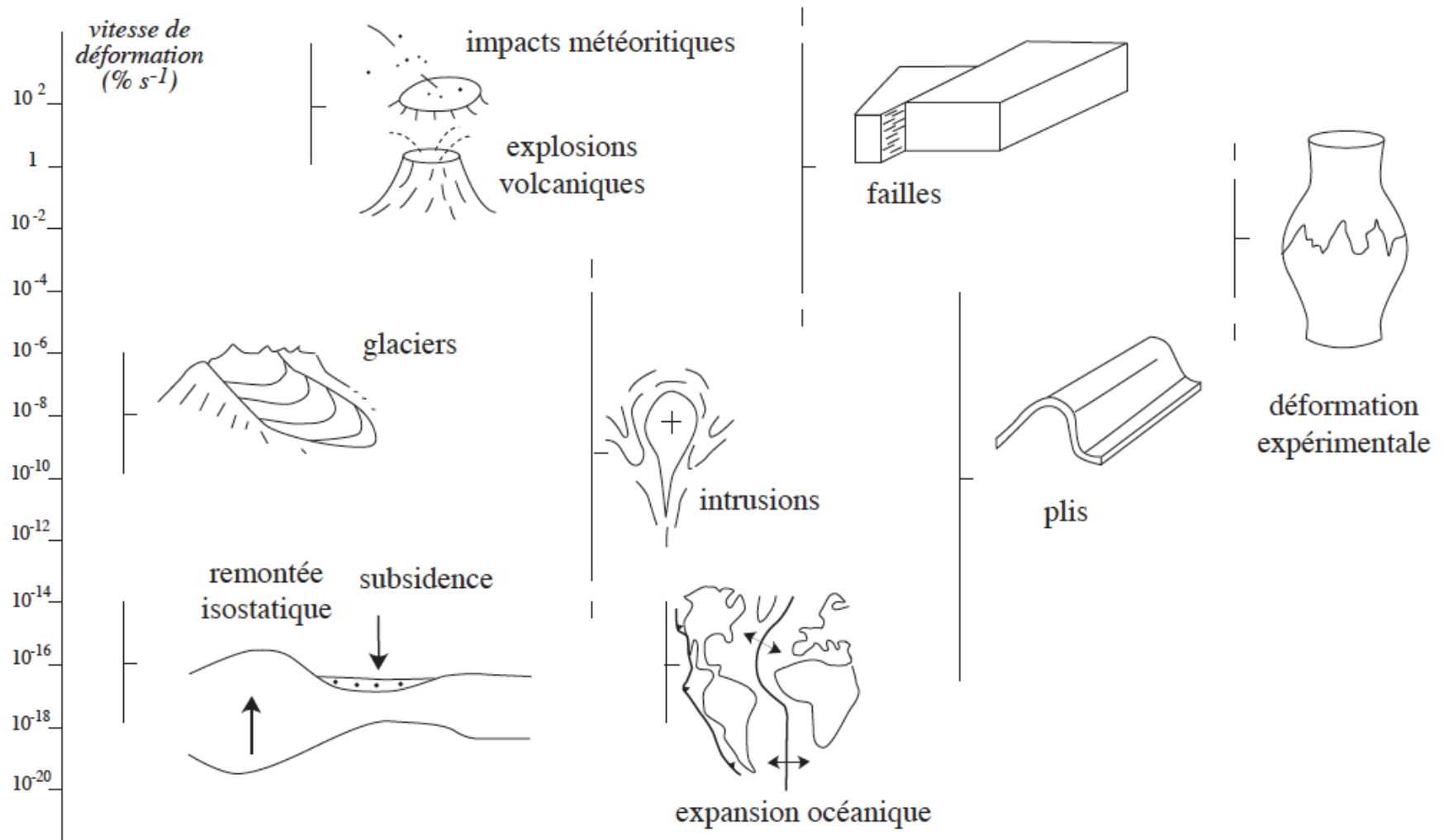
$10^2 - 10^{-2}$ : faille, séisme

$10^{-4} - 10^{-12}$ : pli, intrusion

$10^{-14} - 10^{-20}$  cisaillement ductile

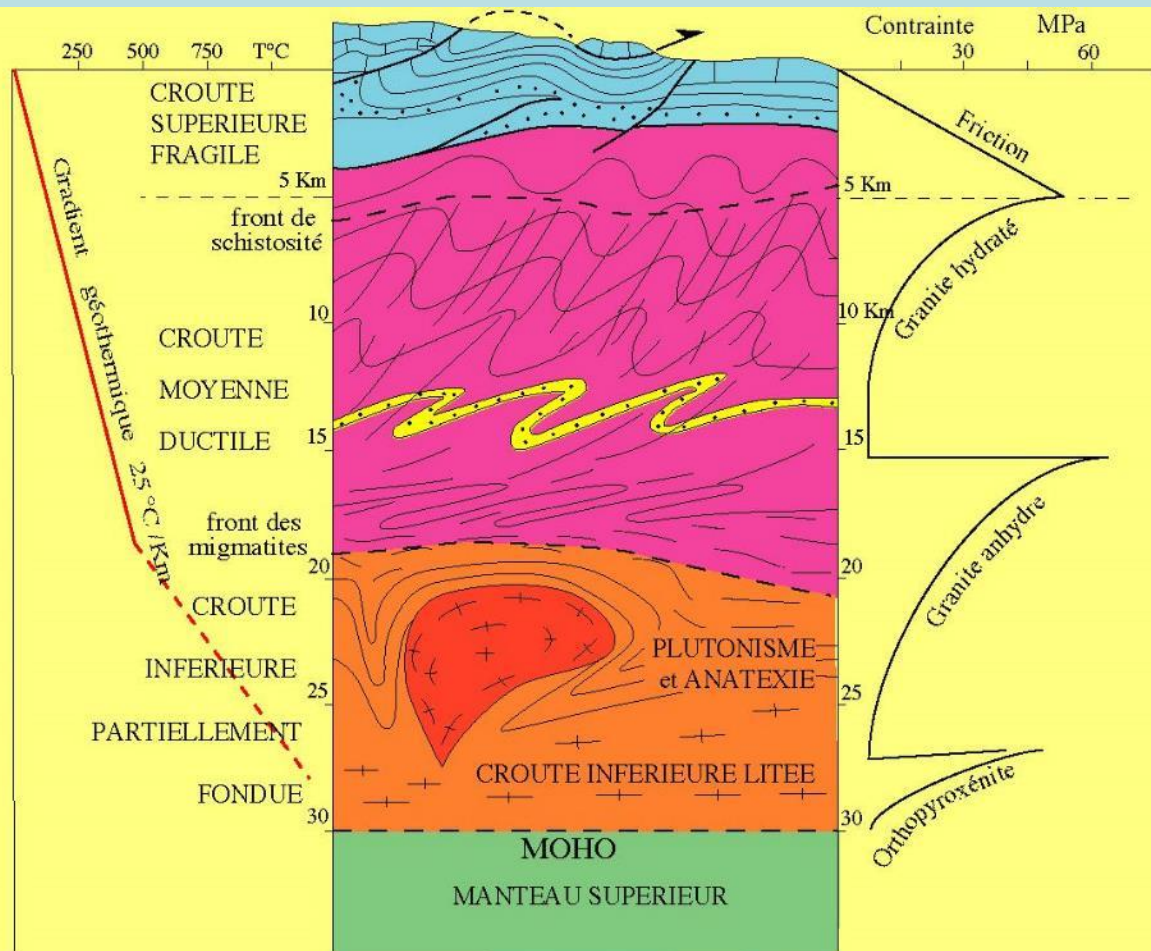
Tout profil dépend de la lithologie, taille de grain, (in B) et le géotherme  $T = f(z)$

# Quelques ordres de grandeur des vitesses de déformation



# Notion de niveau structural: une approche qualitative

Il est difficile de quantifier les paramètres de la déformation. La notion de niveau structural (Mattauer) permet une approche qualitative.



Niveau structural supérieur. Déformation fragile (failles), plis et chevauchements

Niveau structural moyen. Déformation ductile + métamorphisme

Niveau structural inférieur + Anatexie

Déformation et magmatisme

# La méthodologie de l'analyse structurale

Concerne autant les déformations ductiles que fragiles

1- décrire les **éléments structuraux** aux différentes échelles

2- quantifier la **déformation finie** à partir de la géométrie

3- caractériser l'histoire de la déformation (facteur temps)

**analyse cinématique**

4- relier les structures avec les **forces (contraintes)** responsables des structures

**analyse dynamique**

**On se limitera ici à la déformation ductile**



# La fabrique de forme des roches

Au cours d'une déformation ductile, les minéraux, ou les autres éléments constitutifs d'une roche (p. ex. galets, fossiles, filons, etc...) vont pouvoir acquérir des orientations préférentielles, ou encore des anisotropies planaires, et parfois, linéaires.

On parle de « **fabrique** » de la roche, terme équivalent à ***orientation préférentielle de forme***.

A l'échelle macroscopique, ces orientations préférentielles se manifestent par un débit « facile » de la roche. Ce phénomène est bien connu des carriers qui l'utilisent pour l'exploitation de certaines roches (ardoises, granites, etc...). La fabrique est **pénétrative**.

On reconnaît:

- 1) des orientations préférentielles planaires, appelées **schistosité ou foliation**,
- 2) des orientations linéaires, appelées **linéations**.

# Anisotropies planaires: Schistosités et foliations

Ces 2 termes sont souvent employés sans distinction. Si on considère les mécanismes de formation des anisotropies planaires, on peut distinguer 2 catégories d' anisotropie planaires.

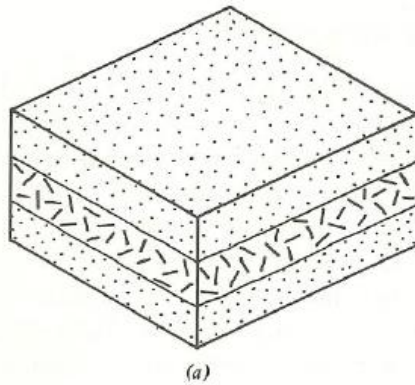
La **schistosité** est une surface mécanique qui résulte de la réorientation par rotation des particules pré-existantes: grains de quartz, micas détriques, etc;

La **foliation** est une surface matérialisée par des minéraux métamorphiques (micas, quartz) cristallisés au cours de la déformation. Les minéraux à habitus lamellaire cristallisant dans un champ de déformation se disposeront selon des plans.

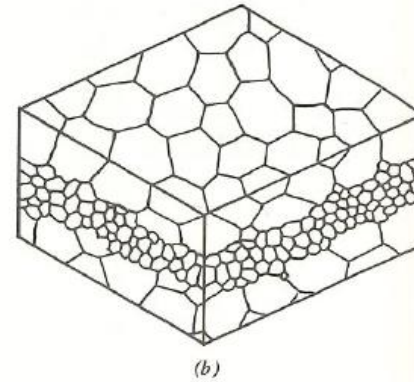
Cette distinction est parfois trop schématique car même dans des plans de schistosité il peut y avoir l'apparition de minéraux métamorphiques (phyllosilicates), le plus souvent de très petite taille.

# Anisotropie planaires: Schistosités et foliations

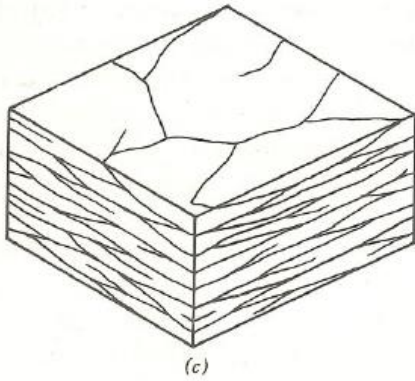
Litage de  
composition



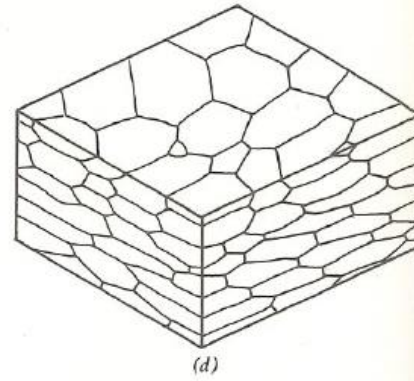
Variation de  
taille de grain



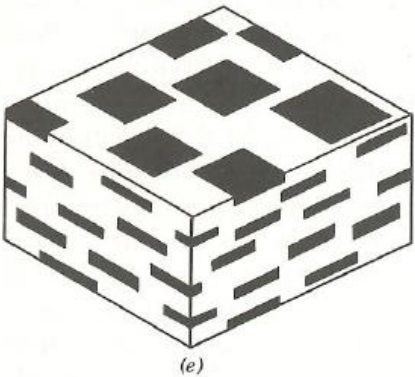
débit dû à  
des cassures



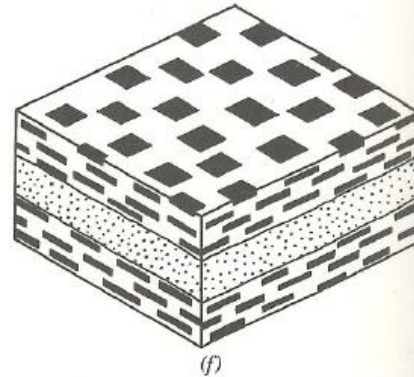
Orientation  
préférentielle  
des grains



Orientation  
de minéraux  
à habitus  
planaire



Combinaison  
des types  
a et e



## Schistosité de fracture dans un grès



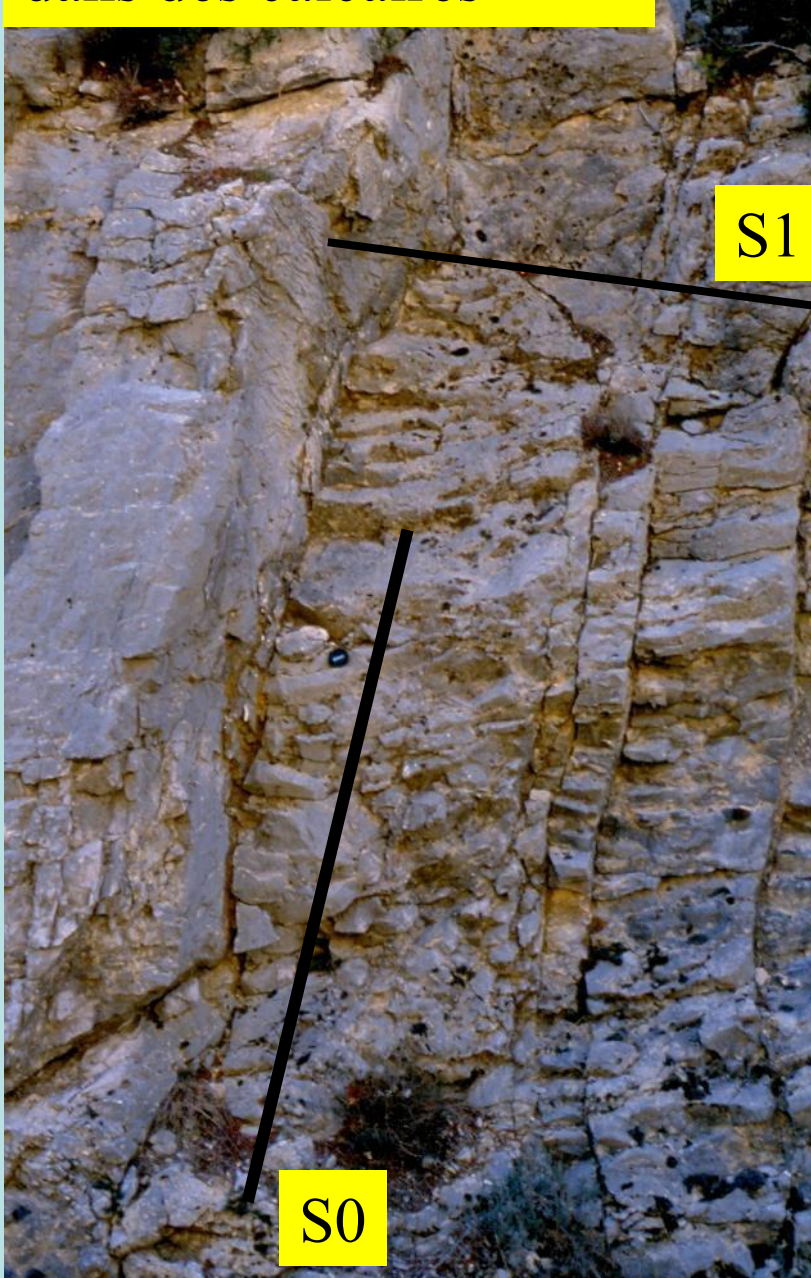
S1

S0

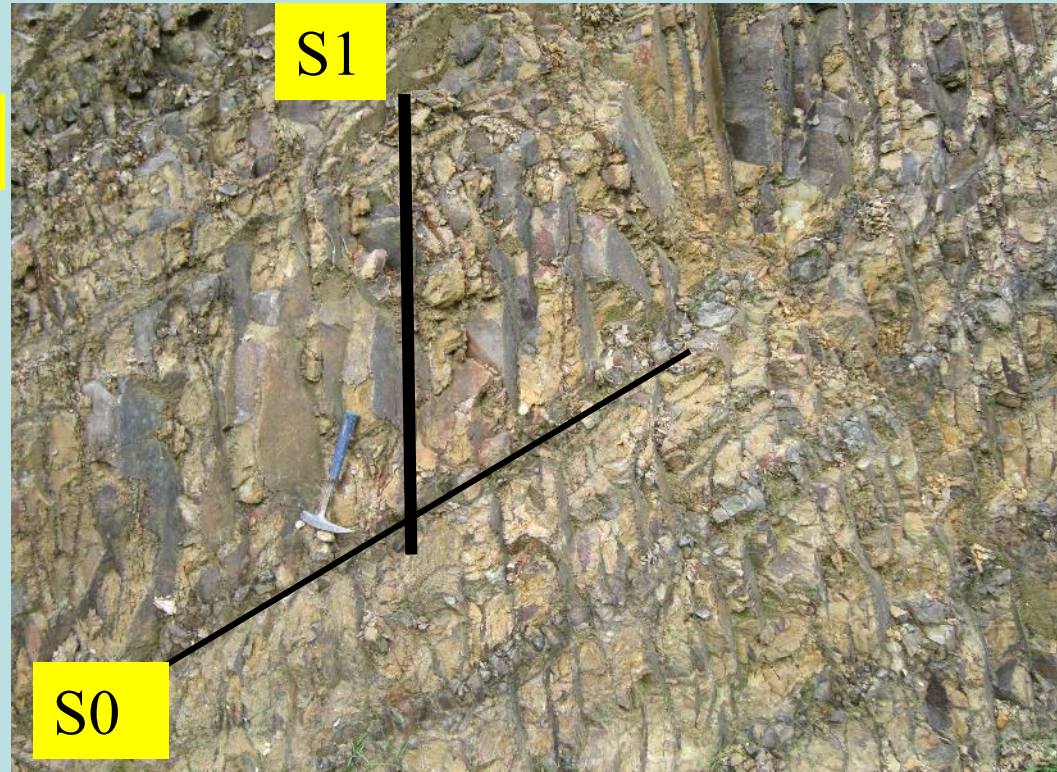
S0: surface (souvent un plan) de stratification



## Schistosité de fracture dans des calcaires

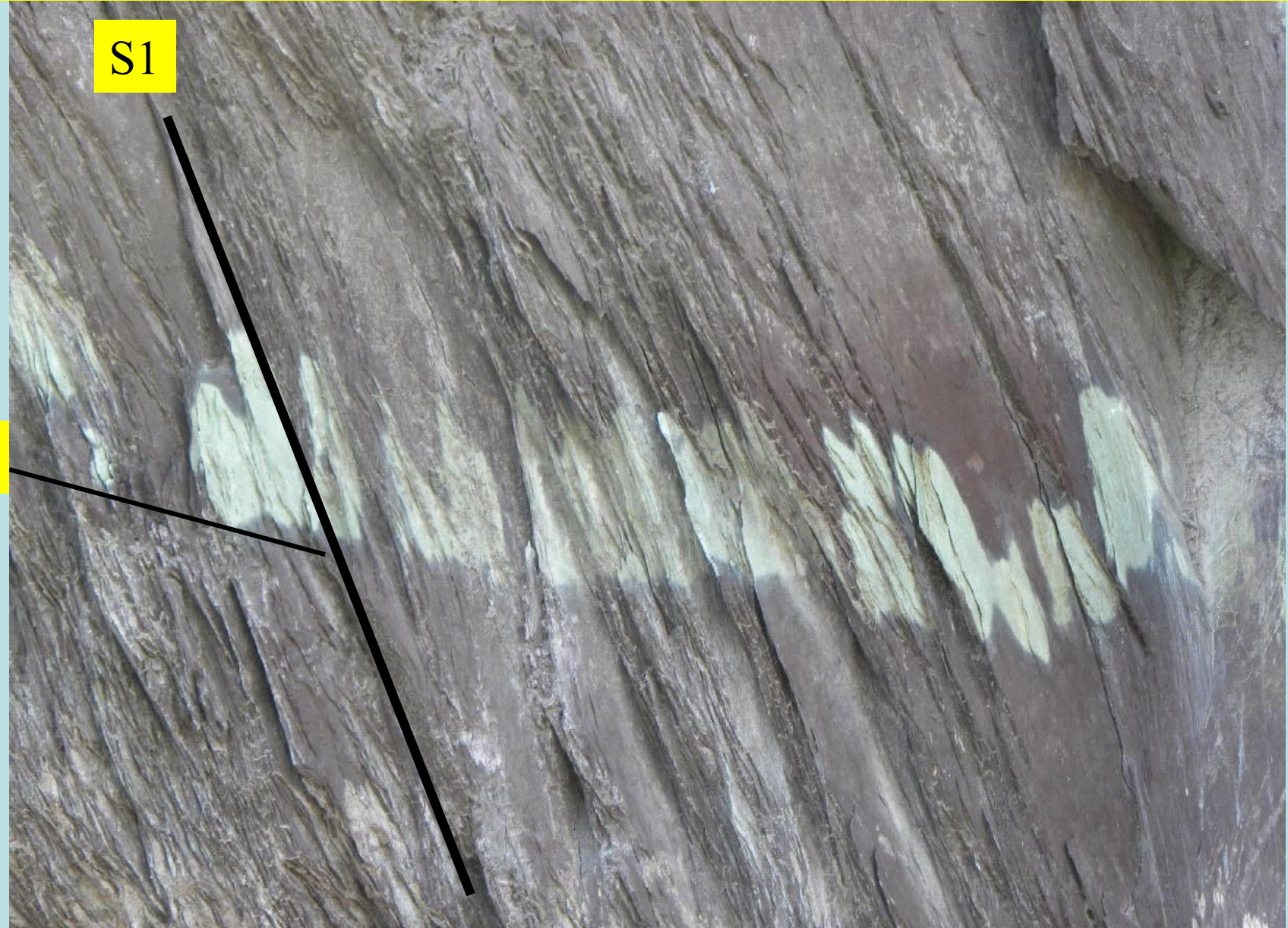


## Schistosité de fracture dans un silt





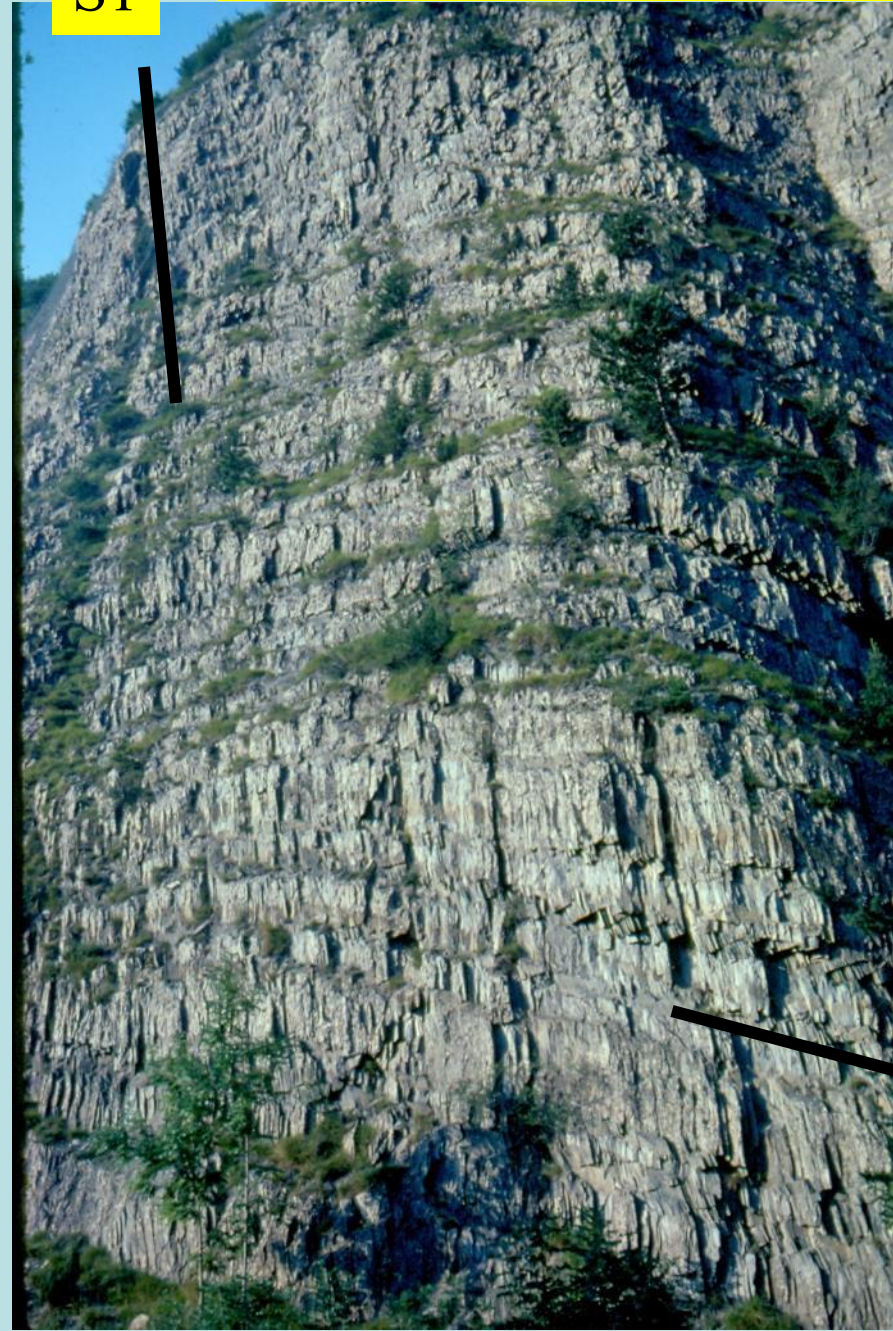
# Schistosité de flux (ardoisière) dans des pélites (Permien de la Vallée de la Tinée)





# Schistosité de flux dans les pélites liasiques de Bourg d'Oisans

S1



S1



S0



Plan de **schistosité de crénulation** (S2) parallèle au plan axial de plis déformant une foliation antérieure (S1)



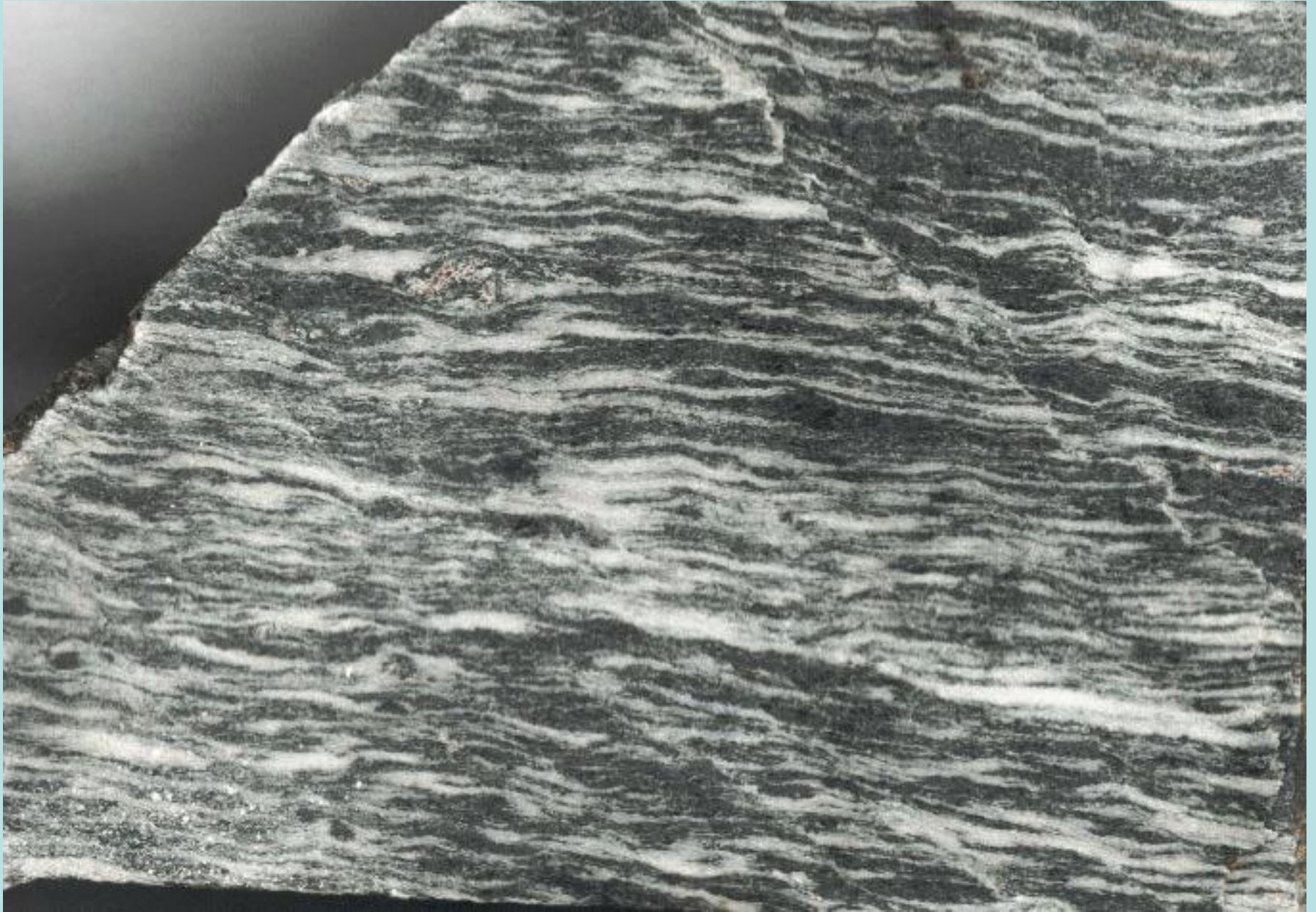


## Réfraction de schistosité au passage pélite-grès





## **Foliation** dans un méta<sup>g</sup>abbro (ophiolite varisque de Nort/Erdre)

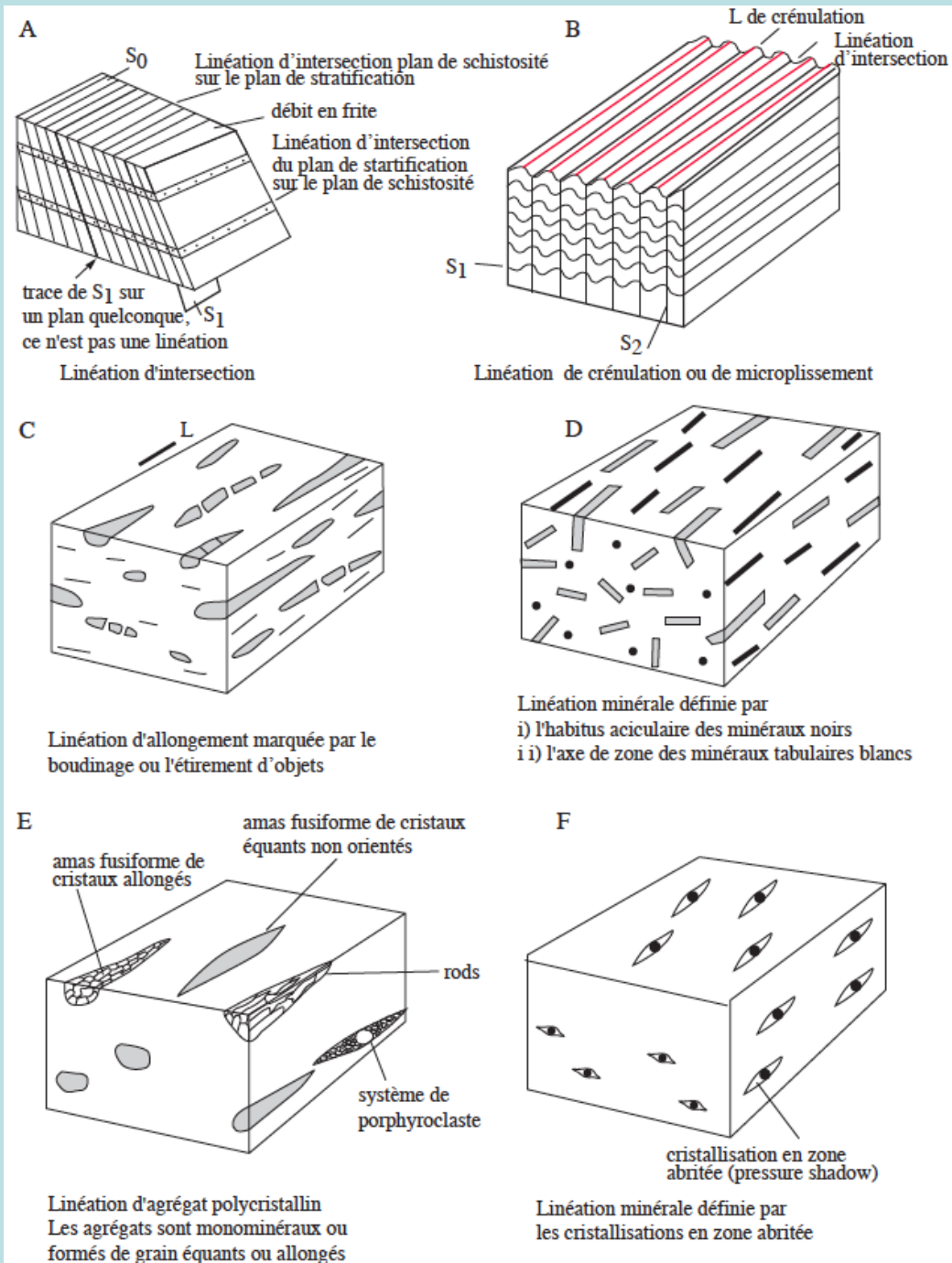


# Anisotropie linéaires: Linéations

- Intersection
- Crénulation (ou microplissement)
- Allongement (ou étirement)
- Cristallisation orientée (linéation minérale)

Une linéation est toujours contenue dans un plan de foliation ou de schistosité.

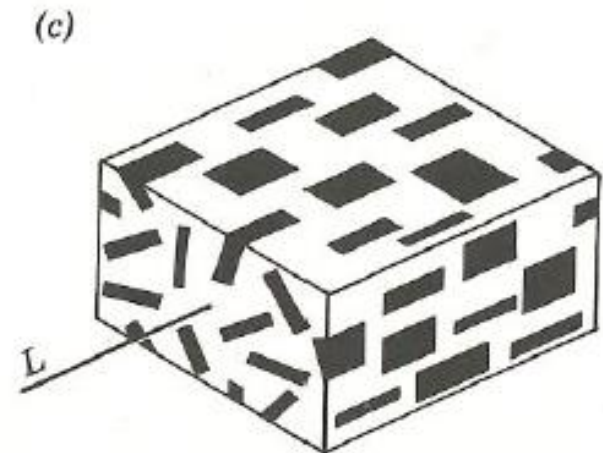
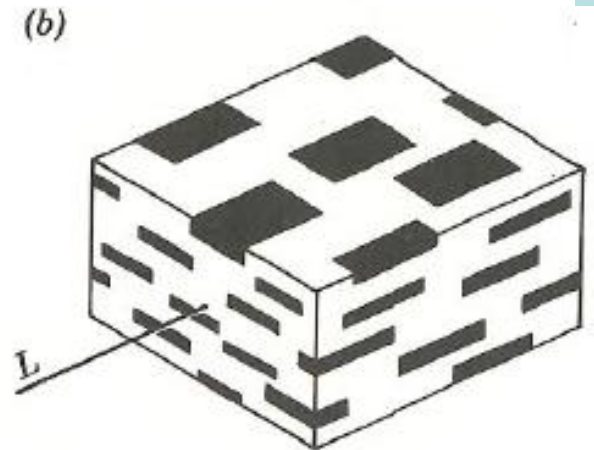
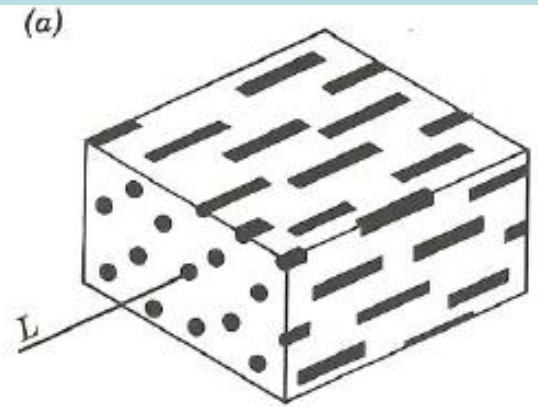
Il ne faut pas confondre les linéations (structures pénétratives) avec les stries de failles (structures localisées)



# Anisotropie linéaires: Linéations

## Orientations préférentielles de minéraux

- Fabrique définie par des minéraux aciculaires
- Fabrique définie par des minéraux rectangulaires
- Fabrique définie par la disposition « en zone » de minéraux rectangulaires





## Linéation d'allongement



## Conglomérat à galets de quartz étirés



Galets allongés dans un conglomérat polygénique.

Tous les galets ne s'allongent pas de la même quantité à cause de leur lithologie différente.



Galets allongés dans un métaconglomérat. Plateau d'Aigurande (Ordovicien inférieur?)



Galets allongés dans le métaconglomérat. Section XZ

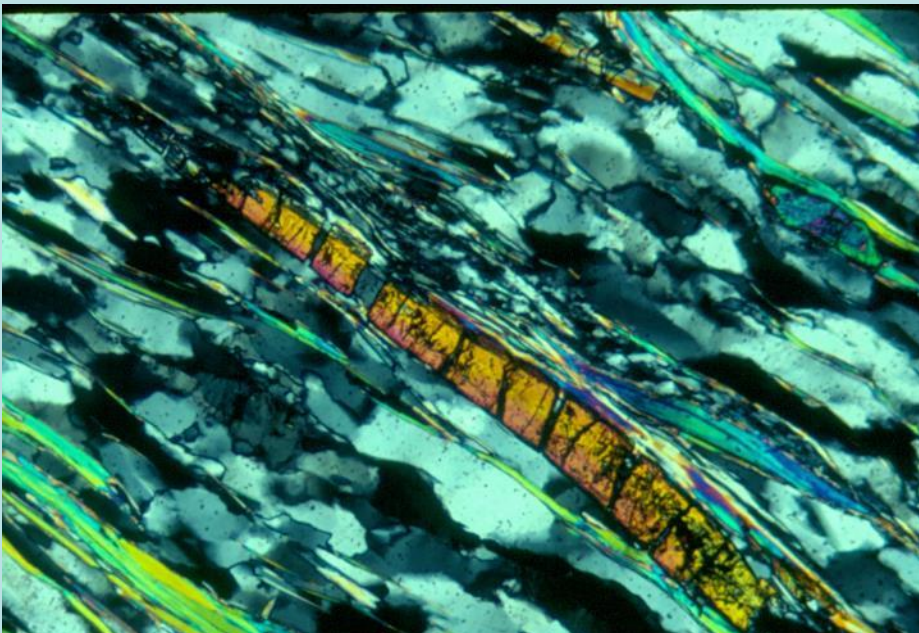


Galet tronçonné, les vides sont remplis de quartz



Linéation minérale et  
d'allongement dans des quartzites  
et schistes bleus.  
Unité de haute pression  
(Japon SW)

Lame mince (section XZ)  
montrant un grain de piemontite  
(épidote de haute pression) boudiné.

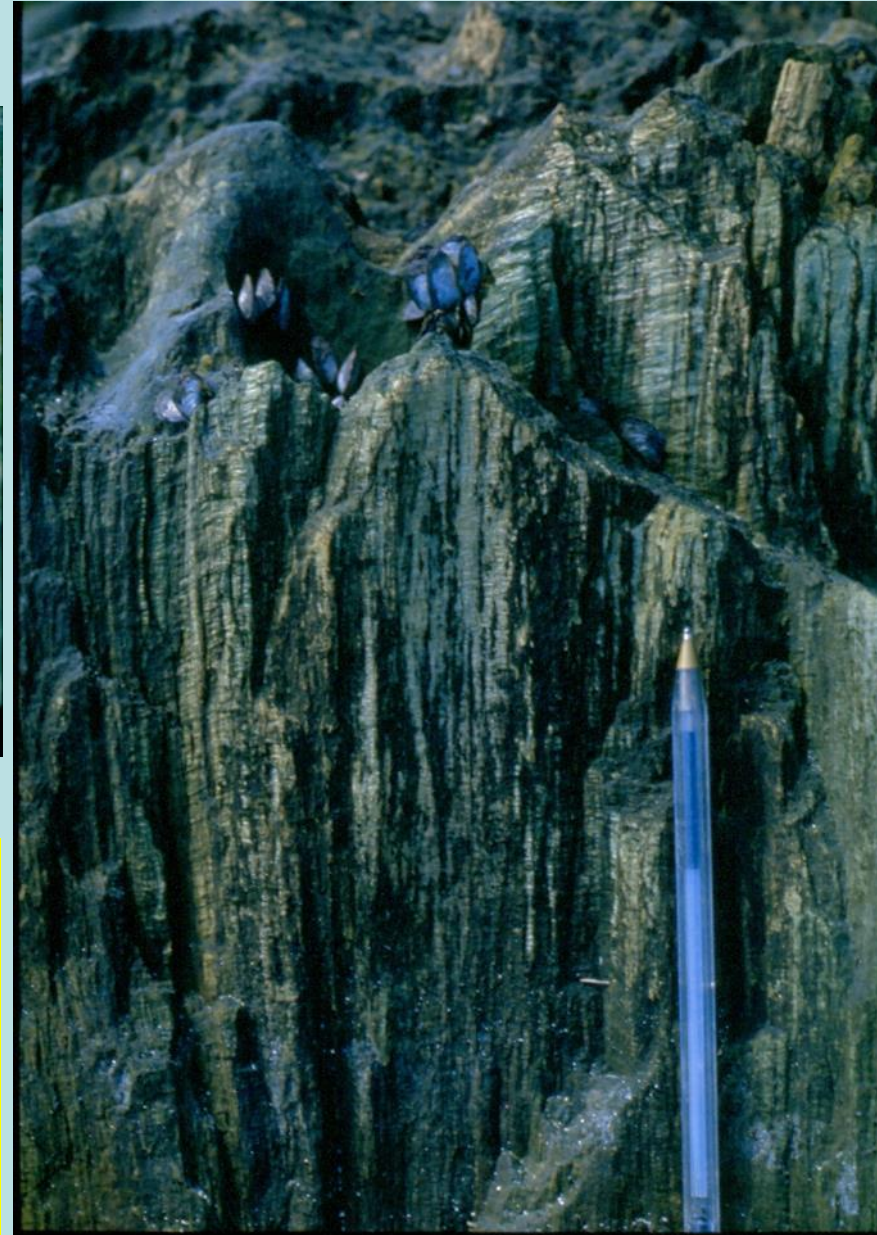




Linéation d'allongement:  
feldspaths étirés dans  
une roche volcano-sédimentaire



Linéation d'allongement  
(verticale, parallèle au stylo)  
déformée par une linéation  
de crénulation  
horizontale





## Linéation minérale

Micaschiste contenant des cubes de pyrite. Des fibres de quartz se développent dans des « ombres de pression » (ou « pressure shadows » ou cristallisations en zones abritées) sur certaines des faces.

La direction moyenne des fibres



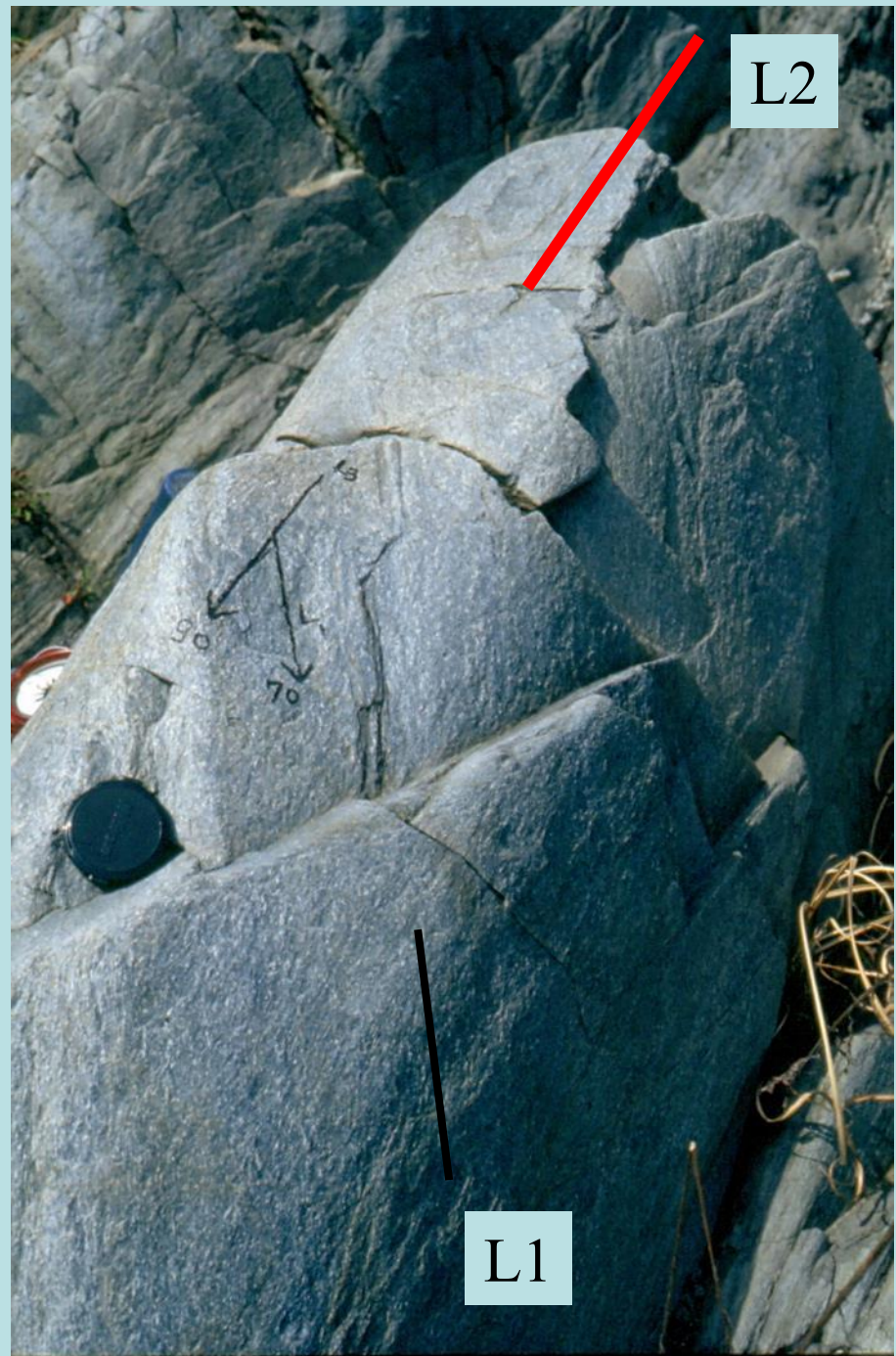


Linéation minérale marquée par  
des aiguilles de glaucophane (L1)  
Déformée par un microplissement.  
Les axes des microplis correspondent  
à une linéation de crénulation (L2)



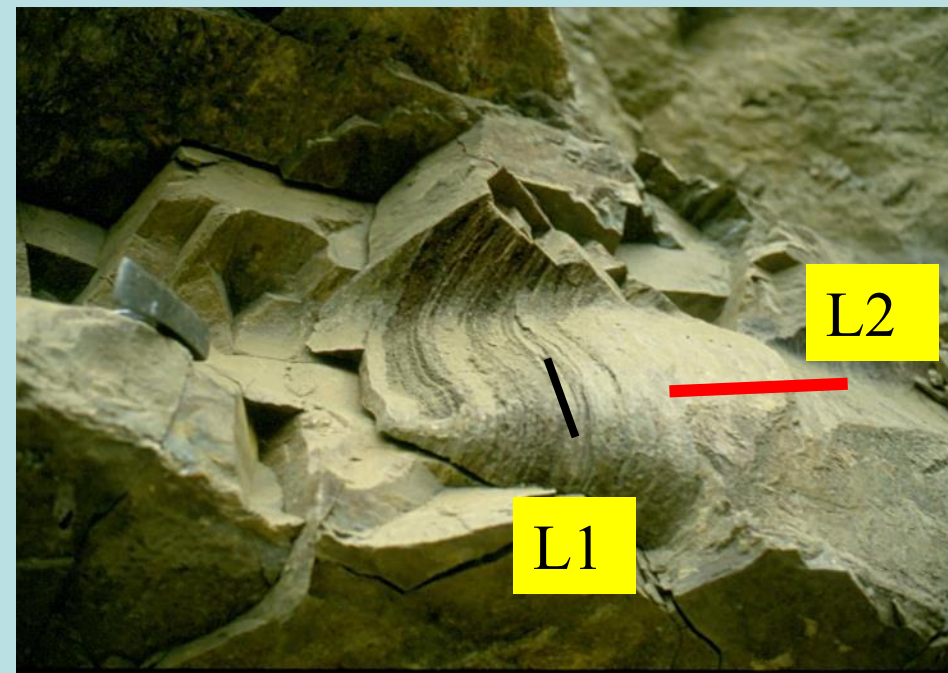
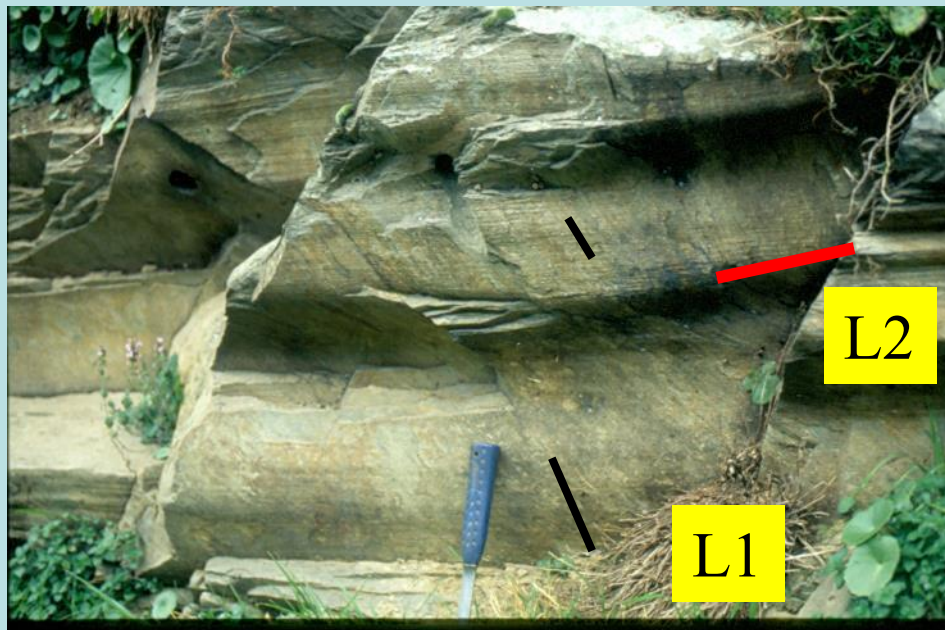
## Linéation et plis

Linéation d'allongement (L1)  
replissée par un pli droit  
d'axe horizontal (L2)





# Linéation d'allongement (L1) replissée par des plis d'axe (L2)

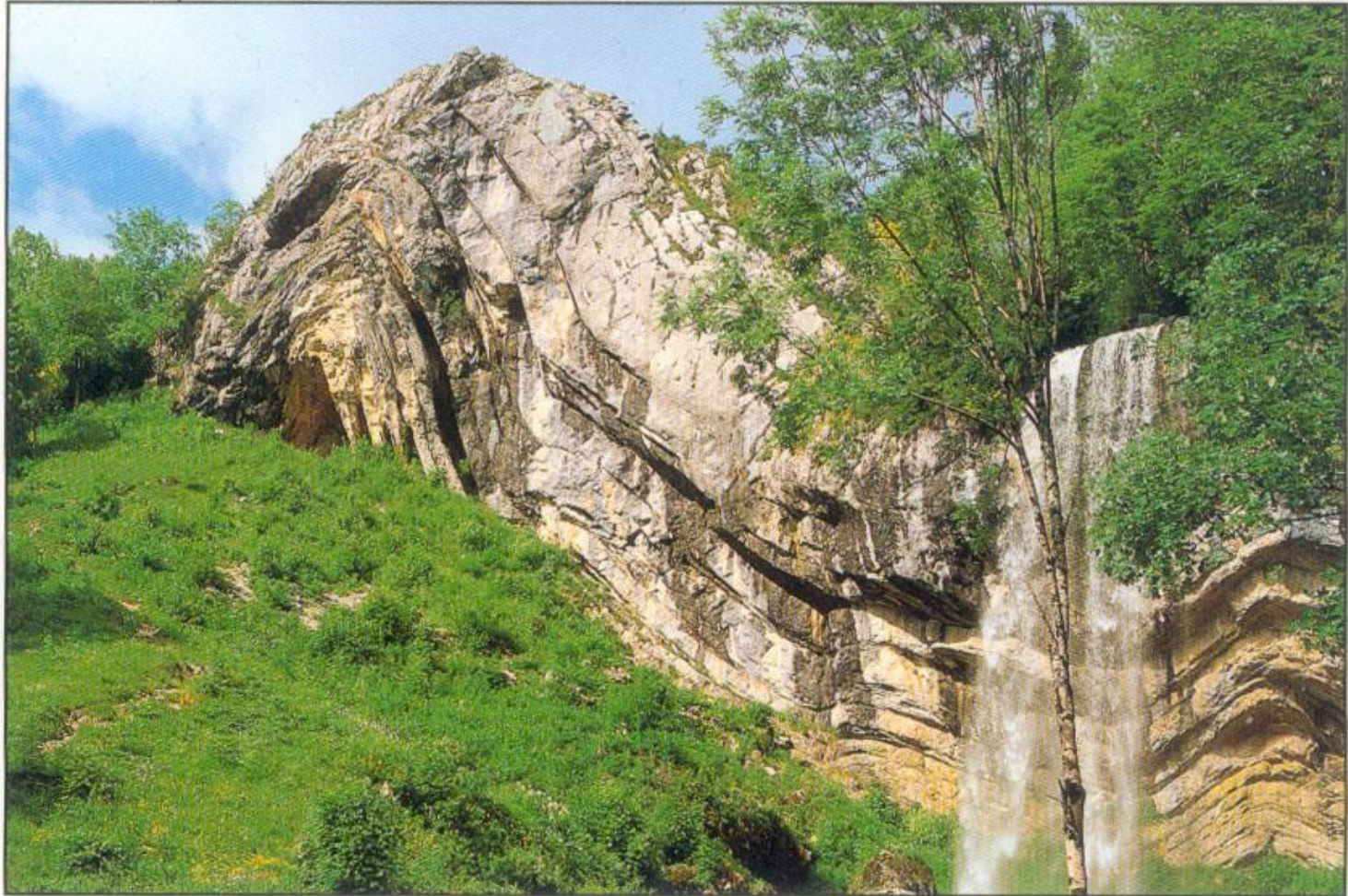




# Structures tridimensionnelles: Plis

Les plis sont des structures continues résultant d'une déformation hétérogène

*Le Chapeau de Gendarme*







Plis coiffés



Pli isopaque dans des grès

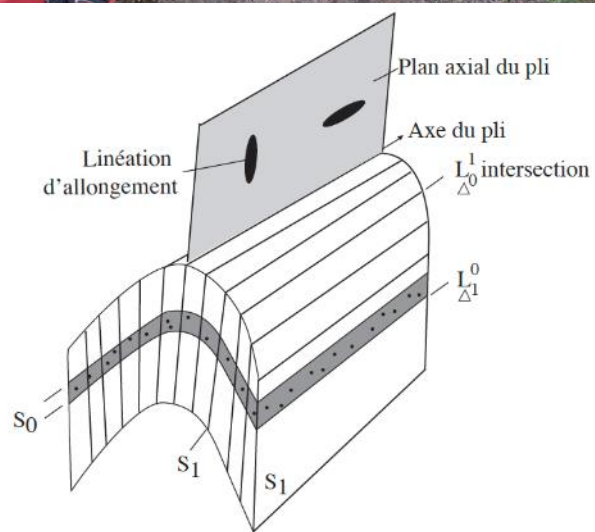


Plis droits dans des micaschistes  
et schistes quartzeux





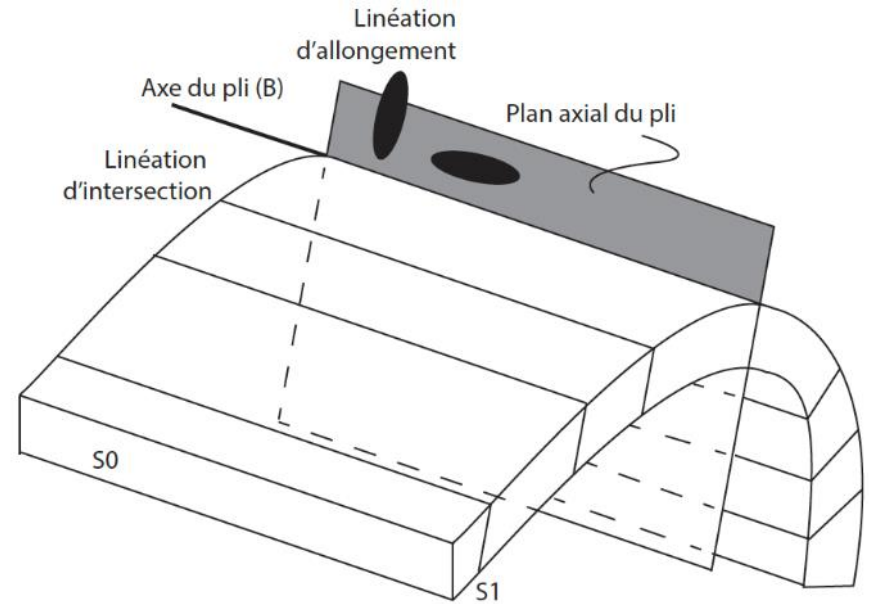
## Pli droit synschisteux



Relations  
pli  
schistosité  
et  
linéations



# Pli synschisteux - relation avec les linéations



Pli synschisteux  
déversé vers la droite



Pli couché synschisteux

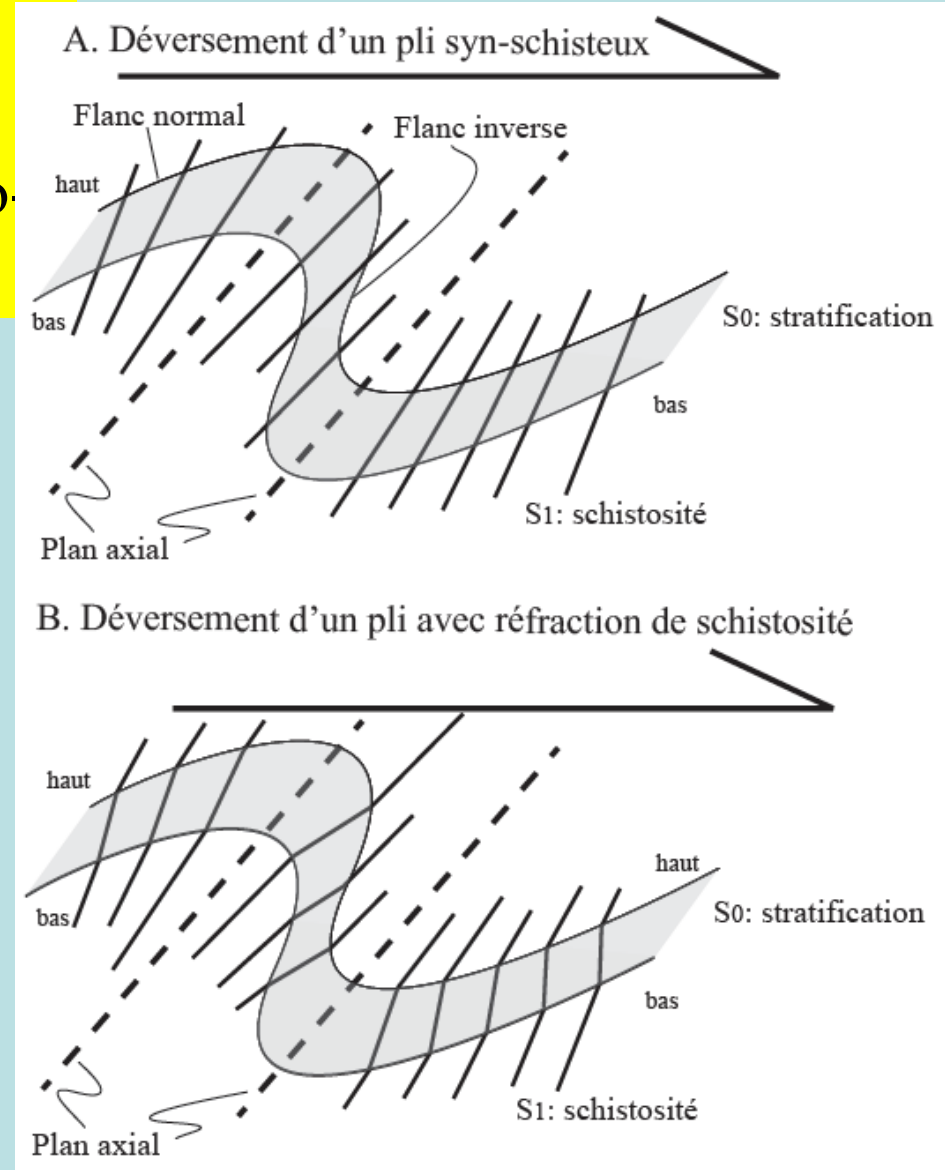
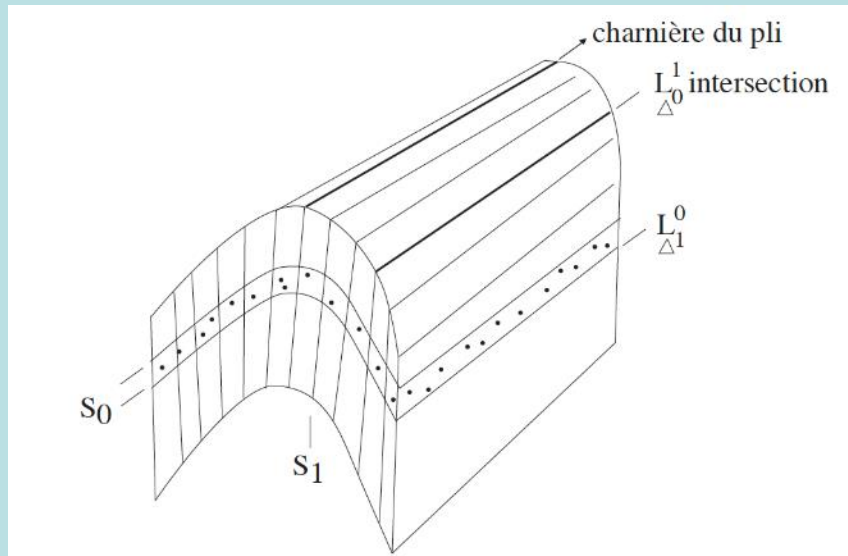


## Plis et schistosité.

## Déversement d'un pli syn-schisteux.

Relations stratification-schistosité-  
polarité stratigraphique.

S'applique à une déformation mono-  
phasée.



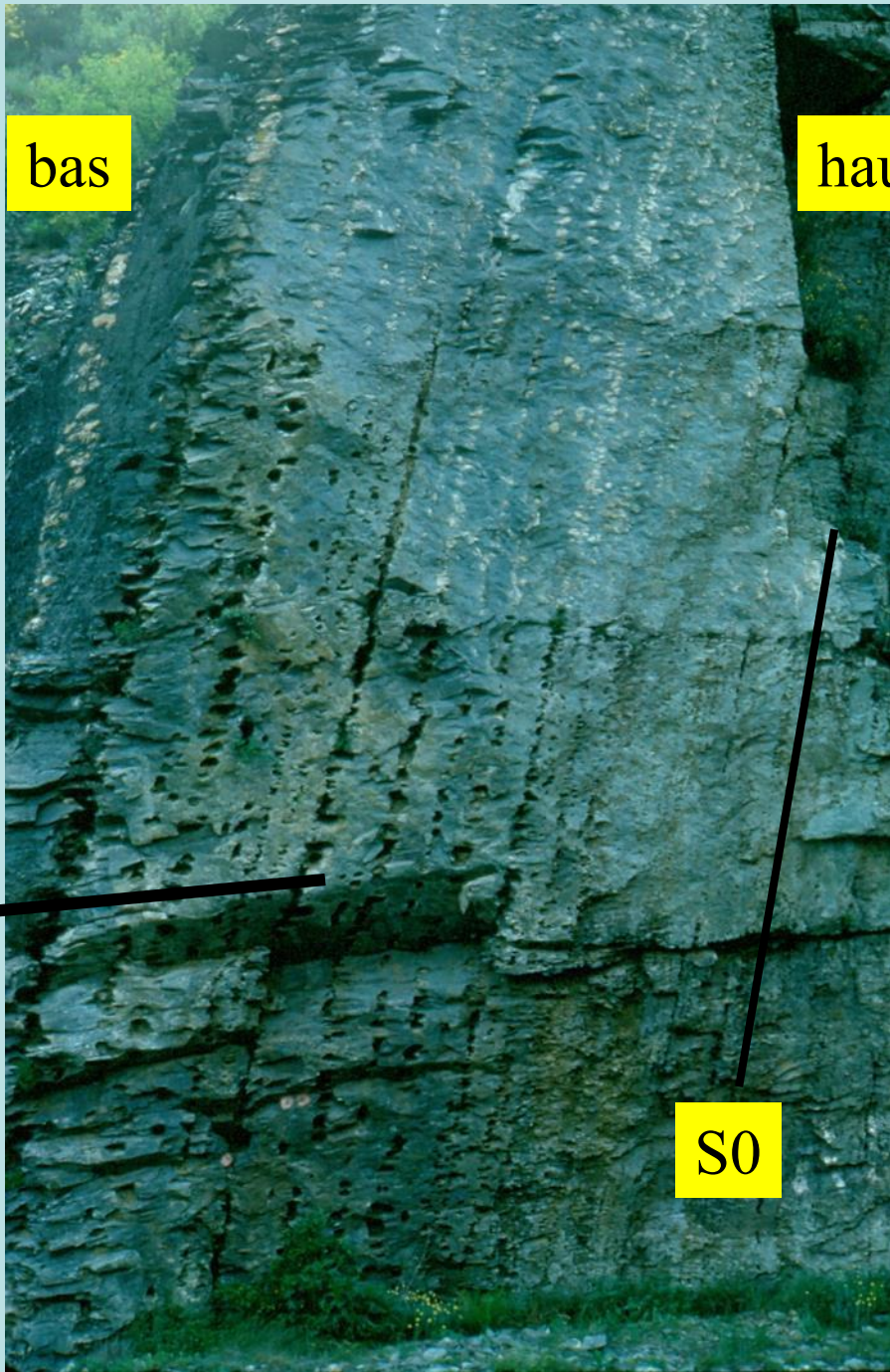
bas

haut

Flanc inverse déversé à droite. Cambrien de la Montagne Noire, le plissement est d'âge carbonifère

S1

S0

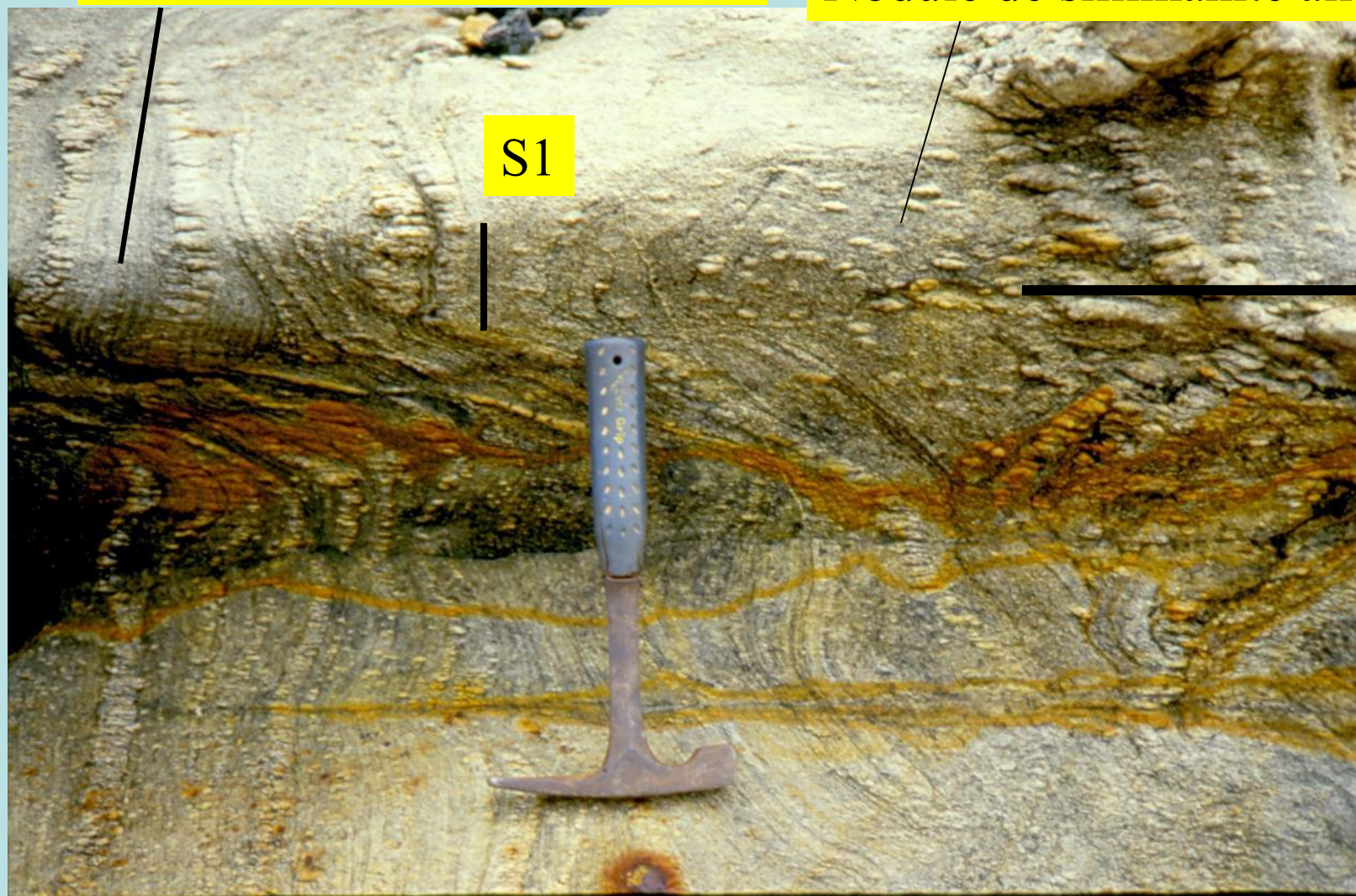




Paragneiss à biotite-sillimanite, la foliation (S1) est plissée par un pli synschisteux, la foliation S2 est marquée par des nodules de sillimanite

Linéation d'intersection S1/S2

Nodule de sillimanite allongé





Pli isoclinal dans les schistes bleus du Japon SW

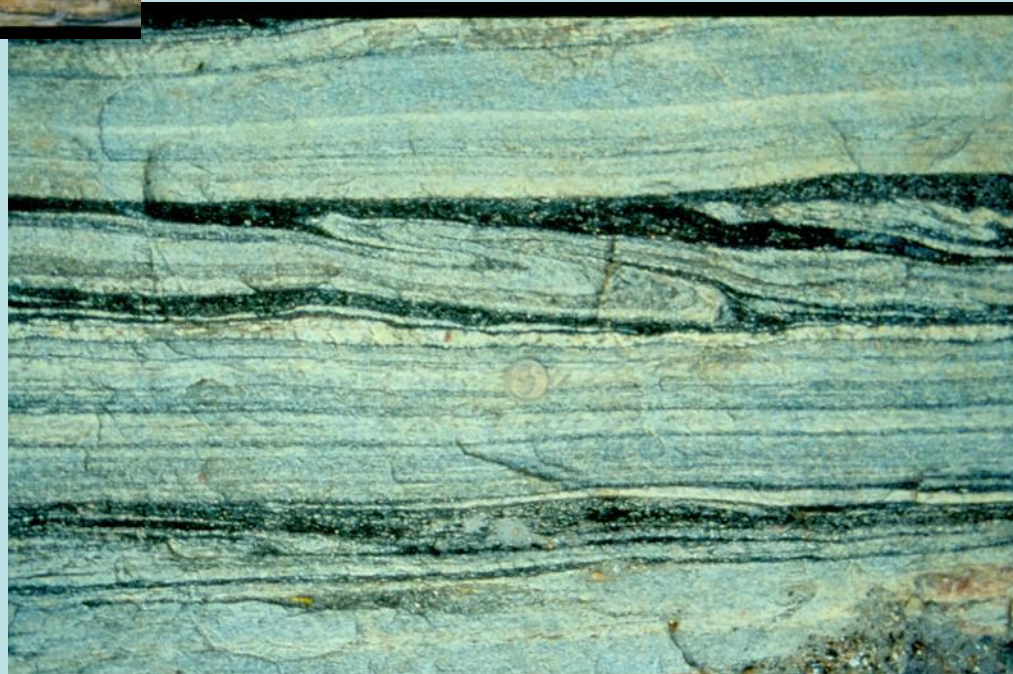
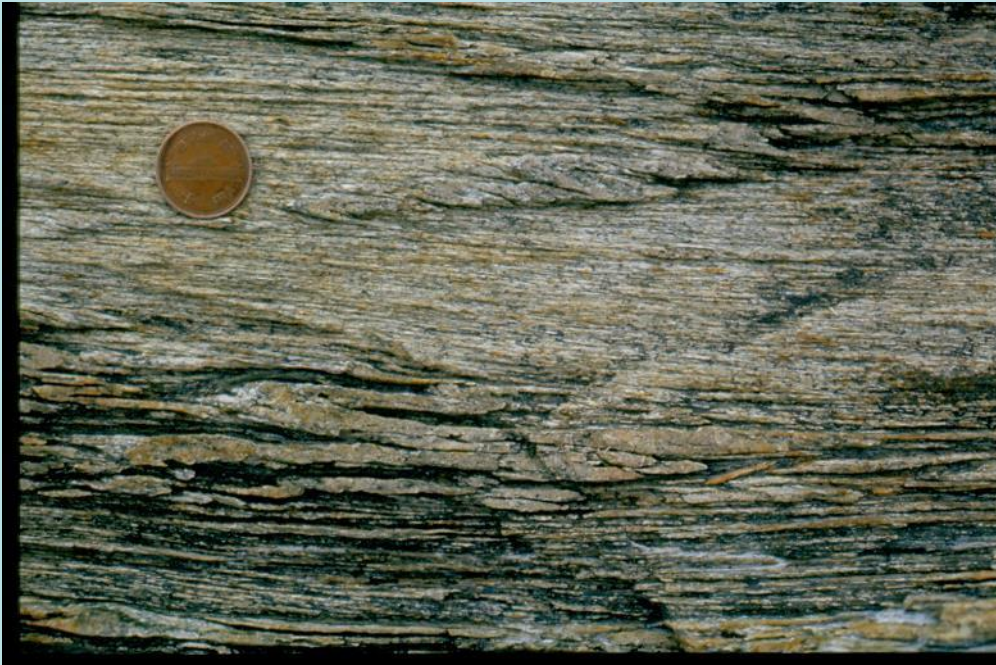


Pli isoclinal ou intrafolial dans des marbres de haute pression du Japon SW

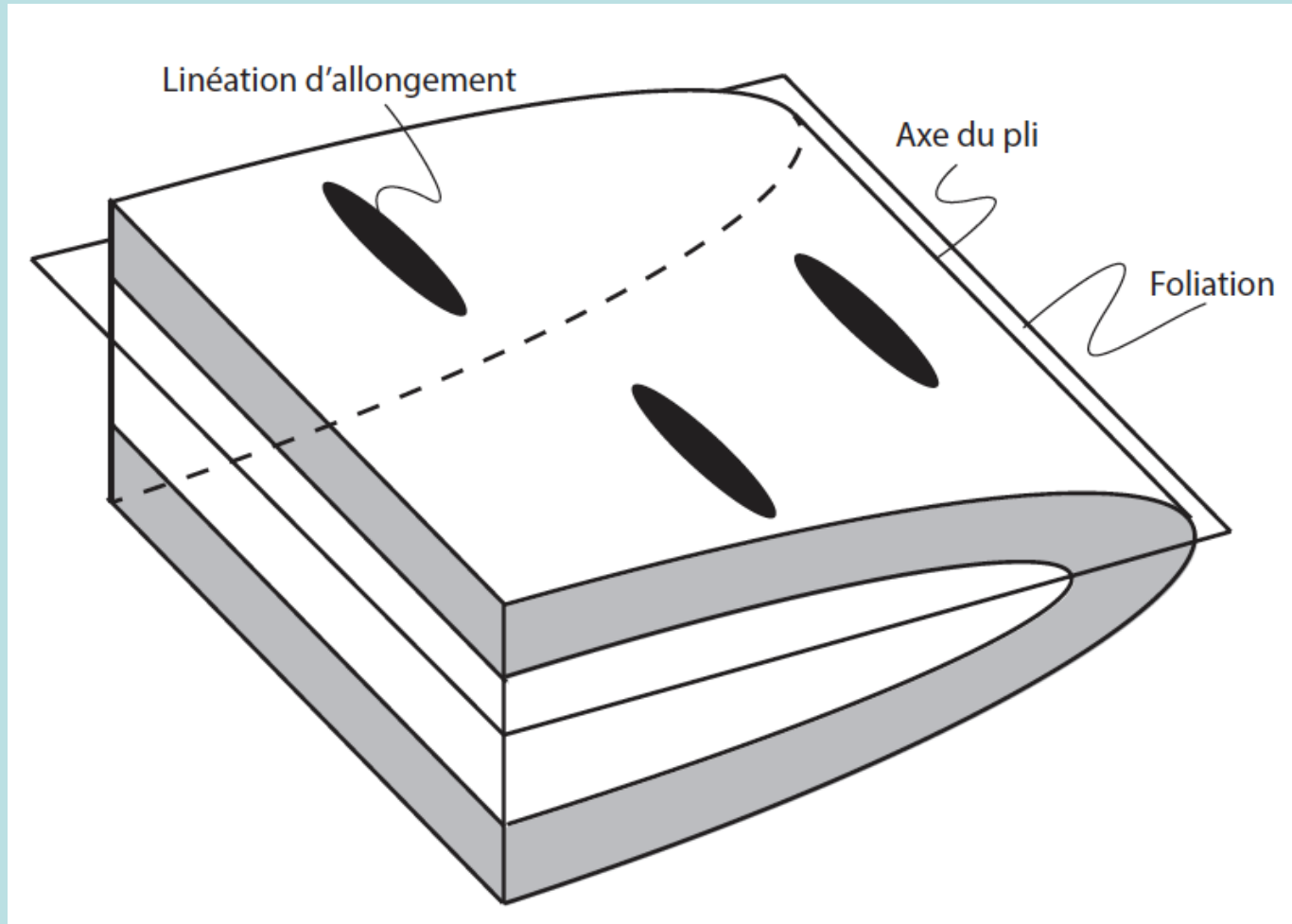




## Pli isoclinal dans des grès (Japon SW)



## Pli intrafolial ou isoclinal - relation avec la linéation d'allongement



Dans un pli intrafolial, la linéation est généralement parallèle à l'axe du pli. On parle de « pli a ».

La linéation d'allongement est appelée parfois « linéation a »



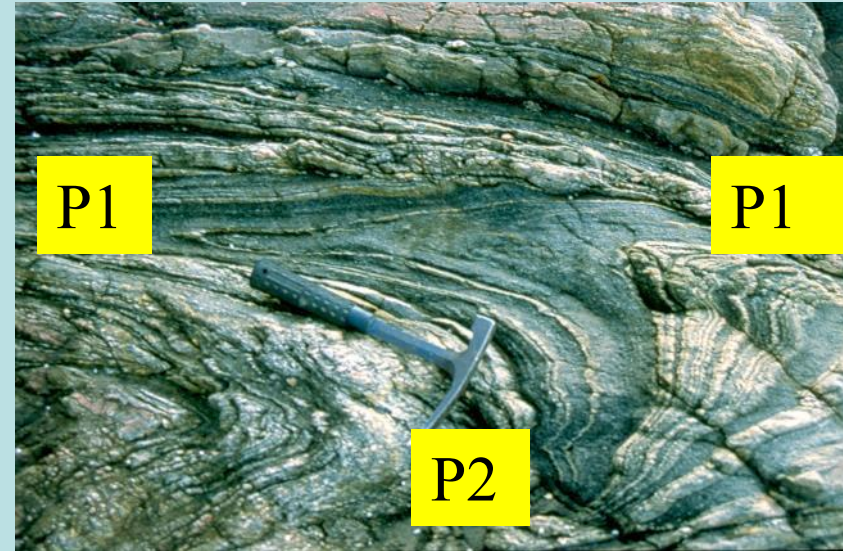
## Pli isoclinal dans des schistes quartzeux du Japon



## Pli isoclinal replissé dans les micaschistes des Cévennes



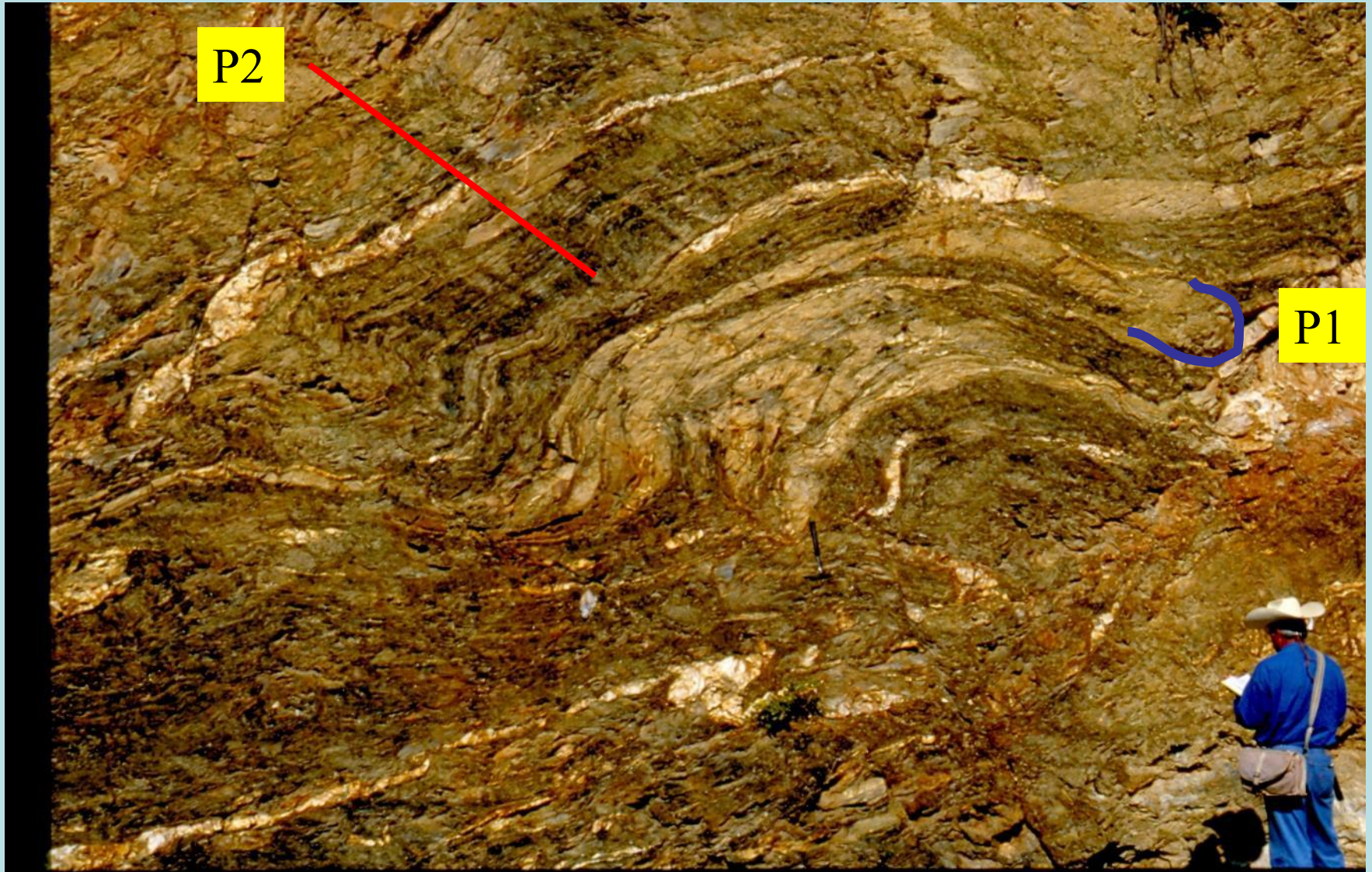
## Pli isoclinal replissé dans des gneiss de haute pression de Chine



Pli isoclinal replissé dans des micaschistes paléozoïques, massif des Maures



# Pli isoclinal P1 replissé par des pli synschisteux P2





## Pli antéschisteux

Pli à axe vertical recoupé par  
une schistosité subhorizontale  
postérieure au plissement





Plis hectométriques  
Helanshan  
(Chine du Nord)



Les plis permettent de déterminer la direction de raccourcissement perpendiculaire au plan axial, mais ne résultent **pas nécessairement d'une compression**

# 3. La déformation finie des roches

## Généralités-Définitions

L'objet étudié est considéré comme un “système” dont on examine ses changements de **forme extérieure**

On ne se préoccupe pas des trajets des particules

Relève de la mécanique du solide

1. On examine les déformations sans considérer les forces et les contraintes à l'origine du phénomène.

2. On parle d'étirement/raccourcissement et pas de compression/extension.

3. Ne pas confondre les DEFORMATIONS (strain) avec les CONTRAINTES (stress)



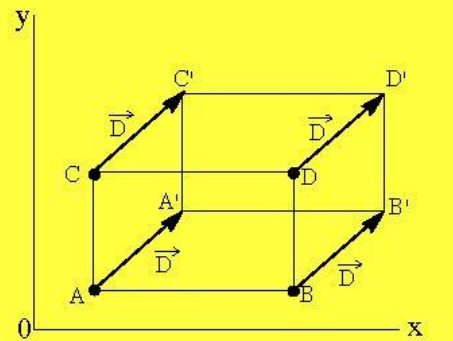
# Les transformations :

3 types

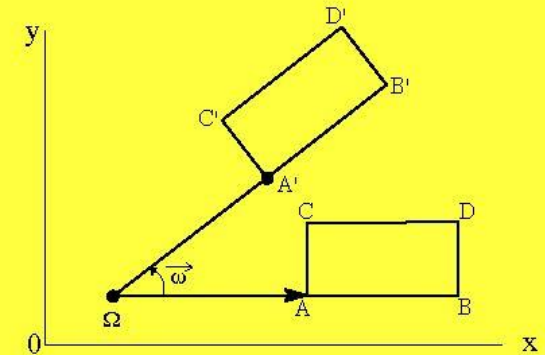
- Translation rigide

- Rotation rigide

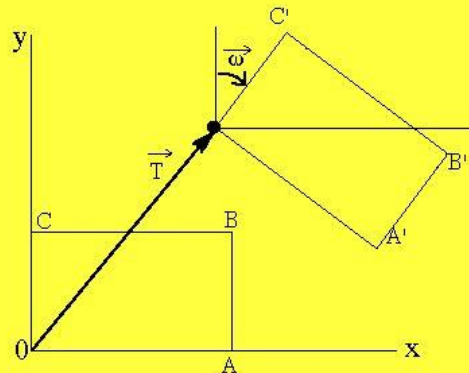
**-Distorsion :**  
véritable déformation



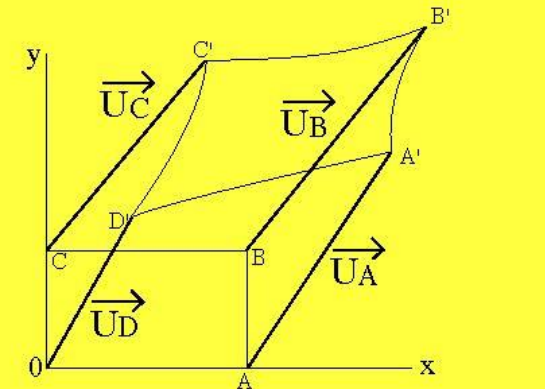
Translation rigide de vecteur  $\vec{D}$



Rotation rigide d'angle  $\vec{\omega}$  et de centre  $\Omega$



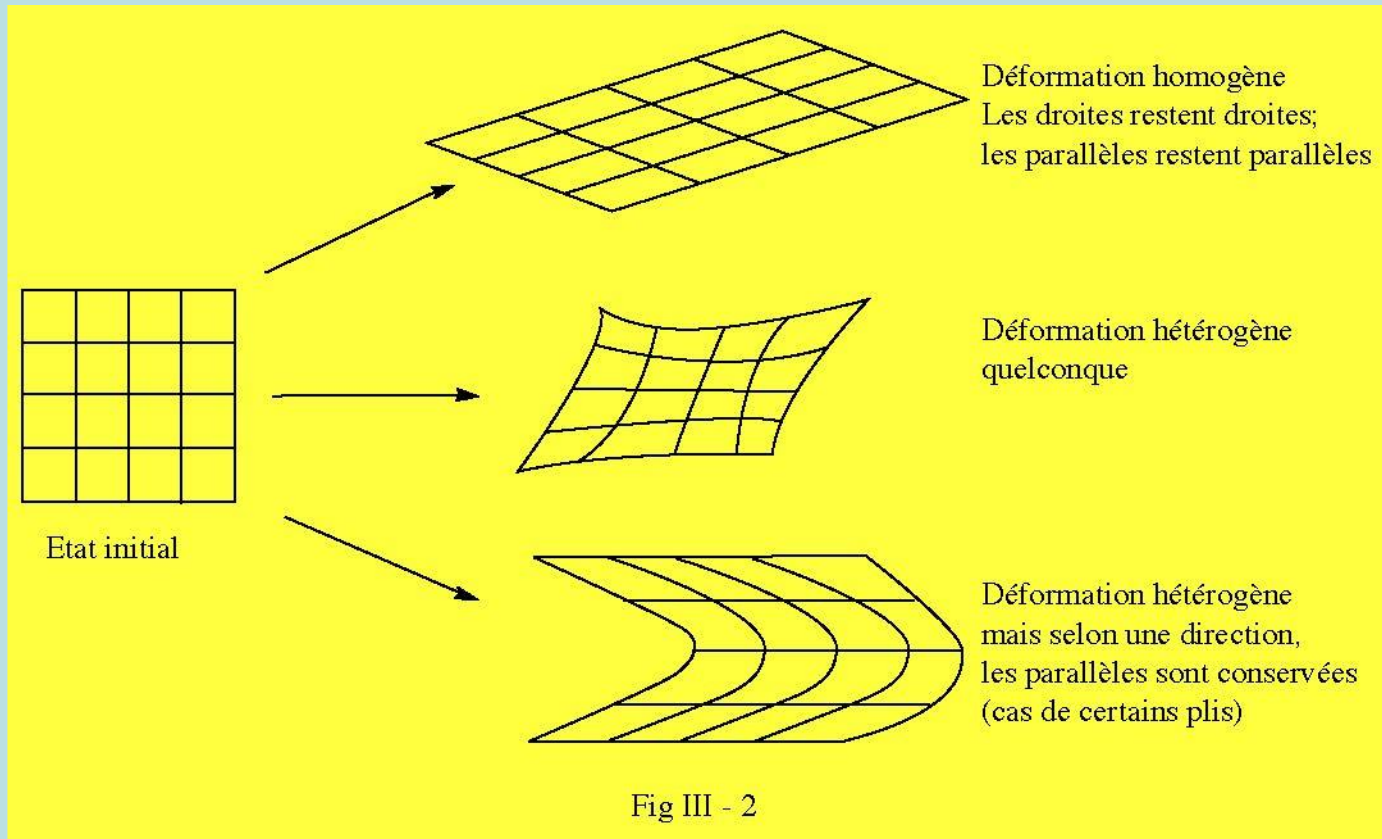
Combinaison d'une translation rigide  $\vec{T}$  et d'une rotation  $\vec{\omega}$



Distorsion ou Déformation vraie:  
champ des vecteurs déplacement  $\vec{U}_x$

Fig III - 1

# Deformation homogène ou hétérogène



- Une droite reste une droite
- Des droites parallèles restent parallèles



# Les paramètres de la déformation finie

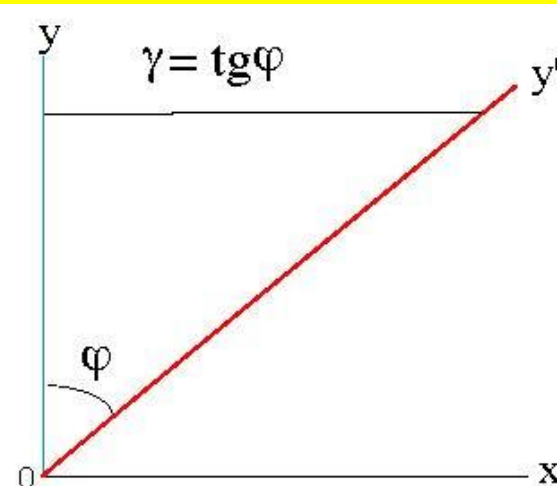
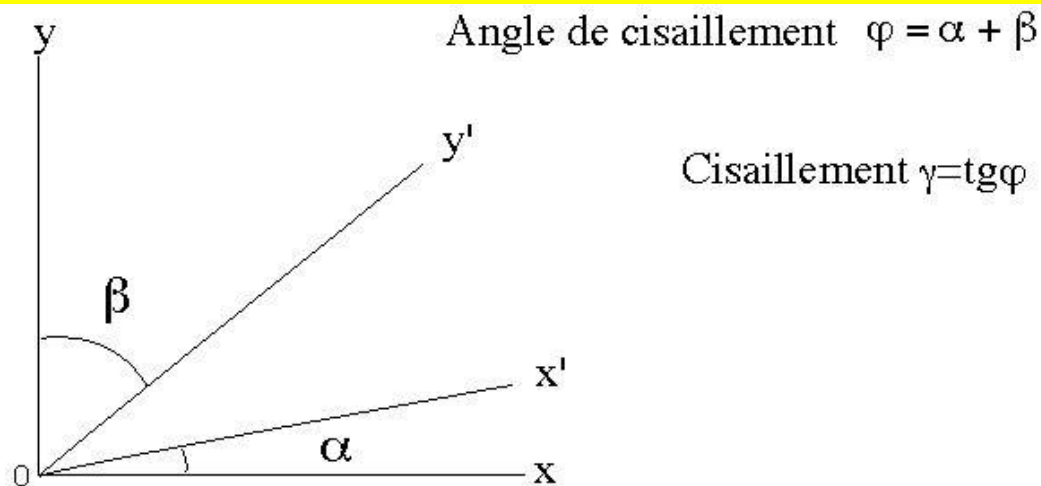
1. Variations de longueur allongement peut être aussi raccourcissement

Allongement linéaire :  $e = l_1 - l_0 / l_0$

$$\text{Ou: } l_1 / l_0 = 1 + e$$

Déformation logarithmique:  $\varepsilon = \text{Log} (1 + e)$

2. Variations angulaires:  $\gamma = \text{tg } \varphi$



A : Les axes Oy et Ox sont transformés en Ox' et Oy'

B : L'axe Ox ne tourne pas

## Déformation finie à 2 dimensions

On montre que pour une déformation **homogène**, un cercle se transforme en ellipse.

Ellipse de déformation finie X (ou  $1+e_1$ ) : axe d'étirement maximum

Y (ou  $1+e_2$ ) : axe de raccourcissement maximum

Toute ellipse de déformation finie, possède deux lignes ayant la longueur du diamètre initial. Ce sont les lignes de nulle déformation finie

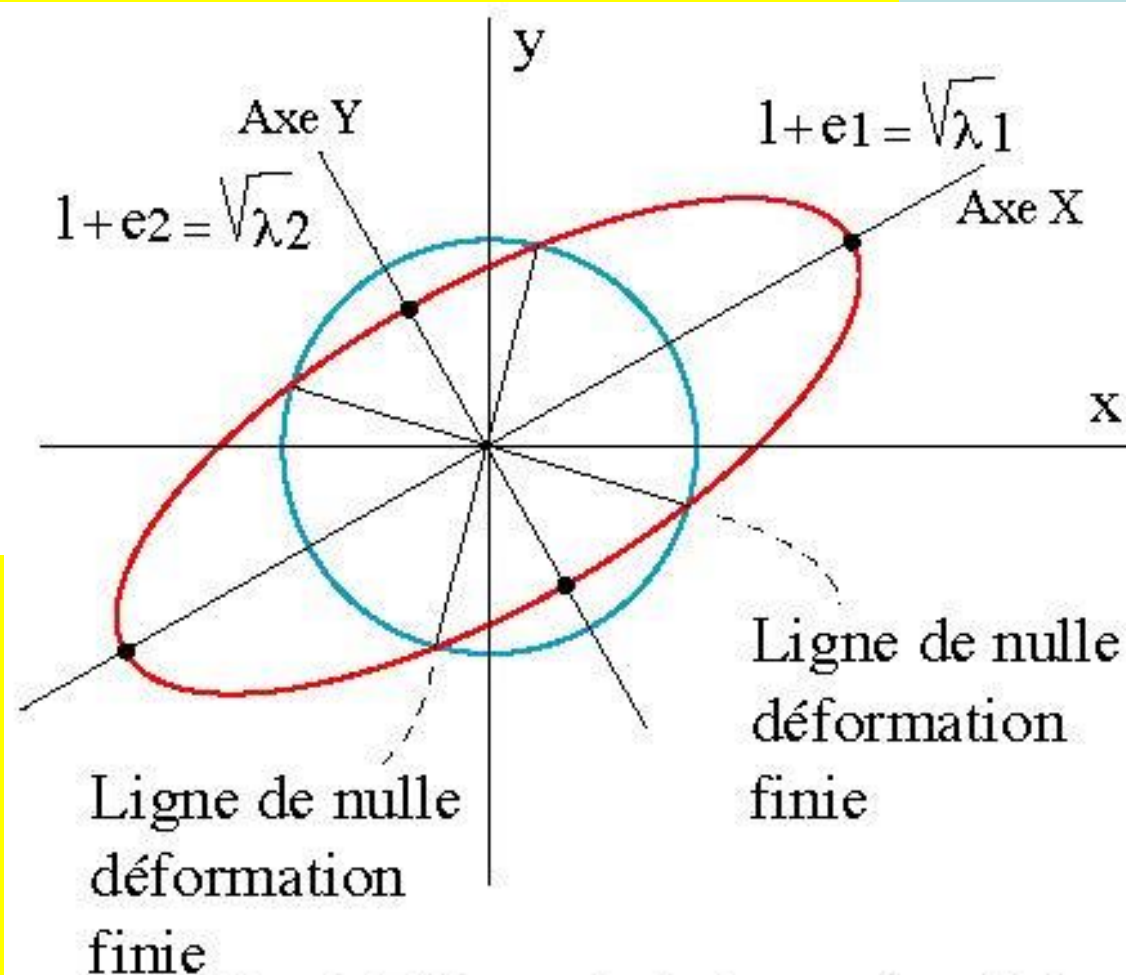


Fig III - 4 Ellipse de déformation finie



## Déformation finie à 3 dimensions

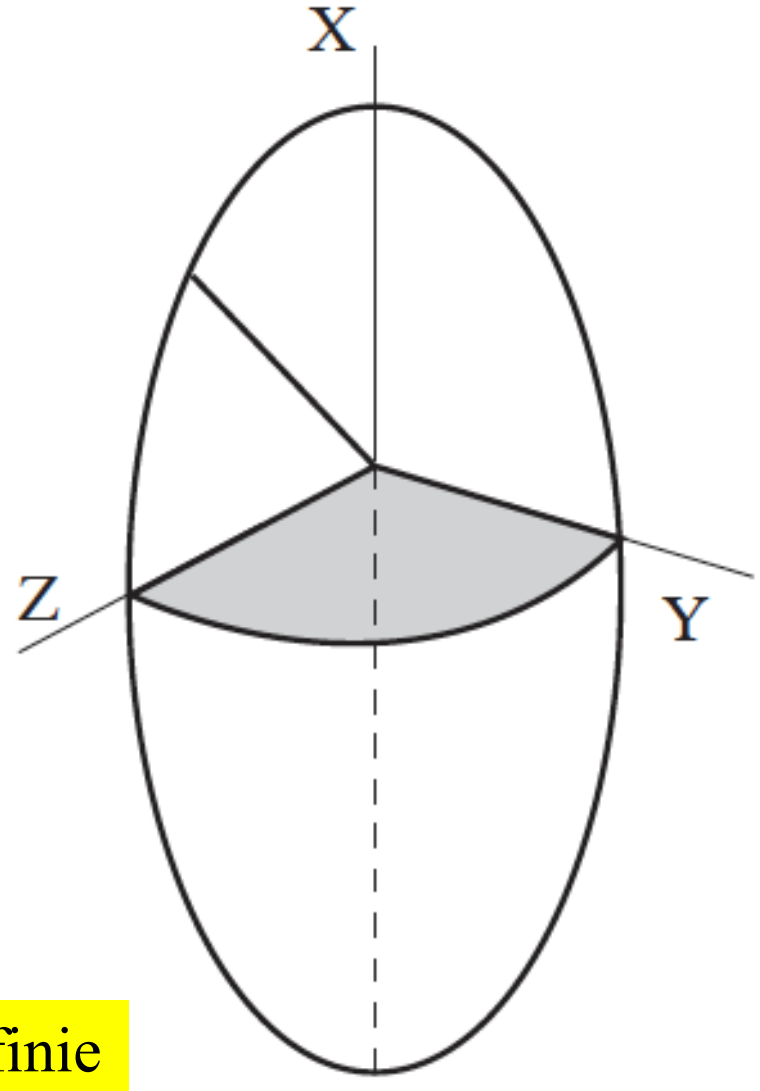
On montre que pour une déformation **homogène**, une sphère se transforme en ellipsoïde de révolution possédant trois axes de symétrie.

Par définition:  $X > Y > Z$

X: axe d'étirement ou d'allongement maximum

Y: axes intermédiaire peut être allongement ou raccourcissement

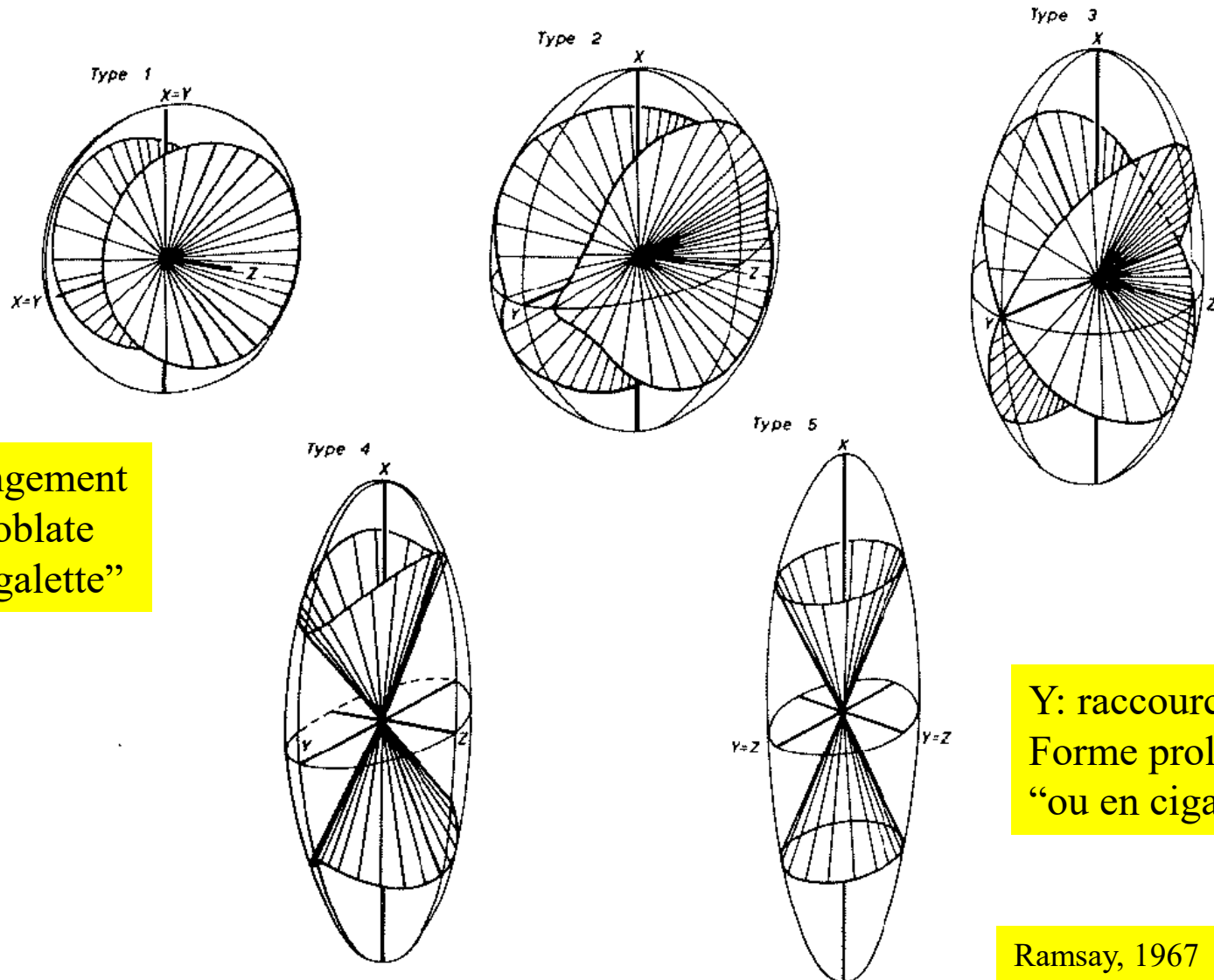
Z: axe de raccourcissement maximum



L'ellipsoïde de déformation finie

# Déformation finie en 3 D - Forme de l'ellipsoïde de déformation

Selon la déformation sur Y: l'ellipsoïde de déformation finie aura une forme différente montrée par les surfaces de nulle déformation finie



Y: allongement  
Forme oblate  
ou “en galette”

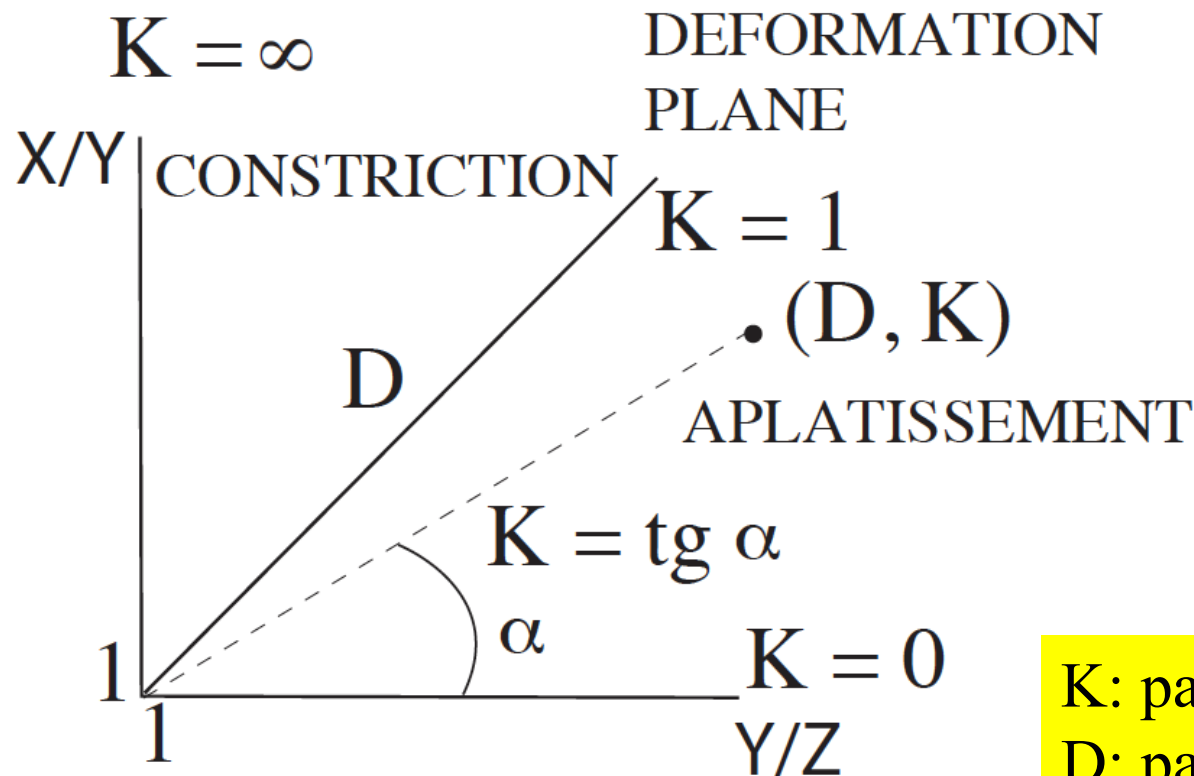
Y: invariant  
Deformation  
plane

Y: raccourcissement  
Forme prolate  
“ou en cigare”



# Déformation finie à 3 dimensions

Représentation graphique de l'ellipsoïde de déformation finie:  
le Diagramme de Flinn.



K: paramètre de forme  
D: paramètre d'intensité

$$K = \frac{(X/Y) - 1}{(Y/Z) - 1}$$

$$D = \left[ (X/Y - 1)^2 + (Y/Z - 1)^2 \right]^{1/2}$$

# Signification géologique du diagramme de Flinn

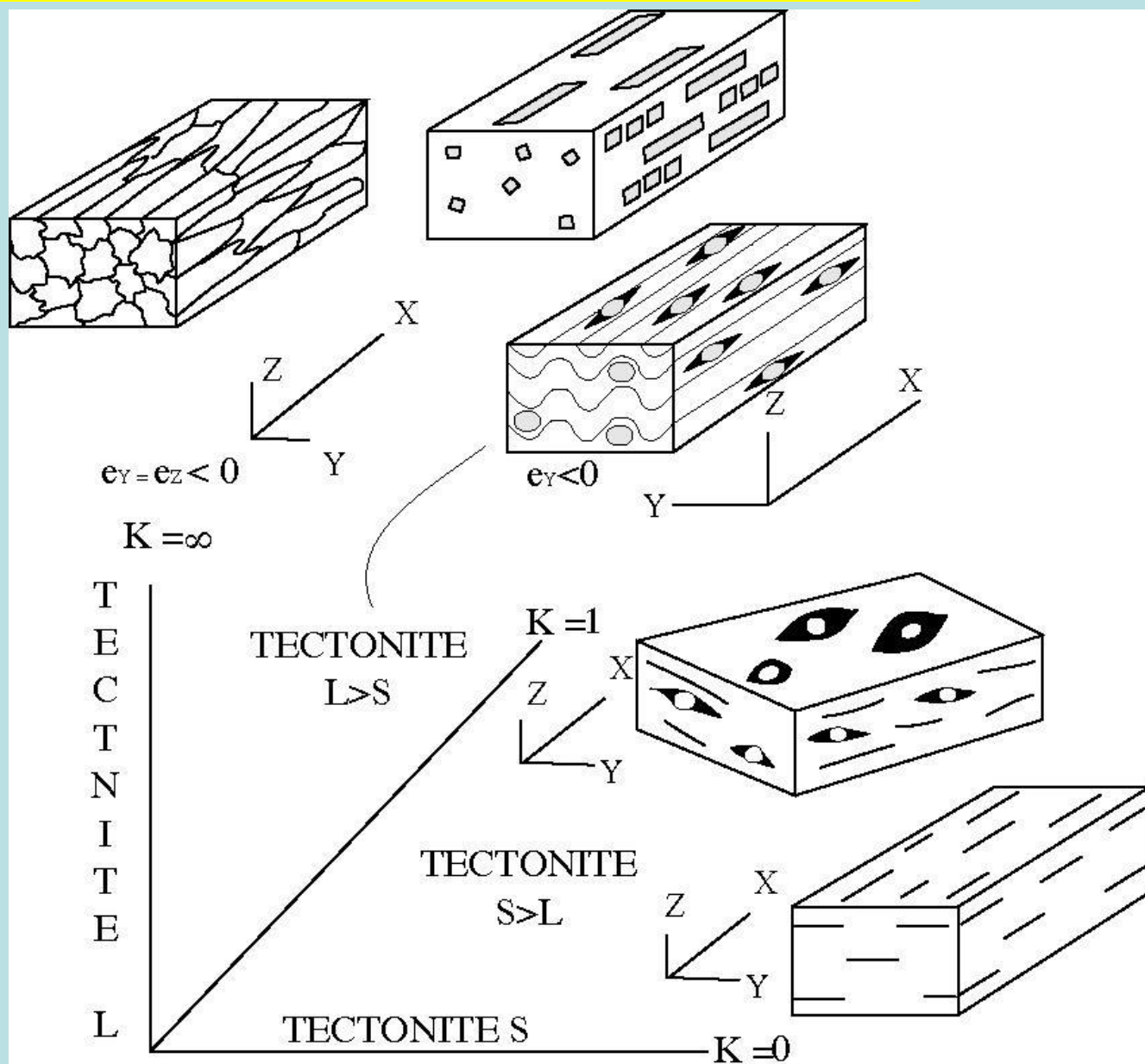
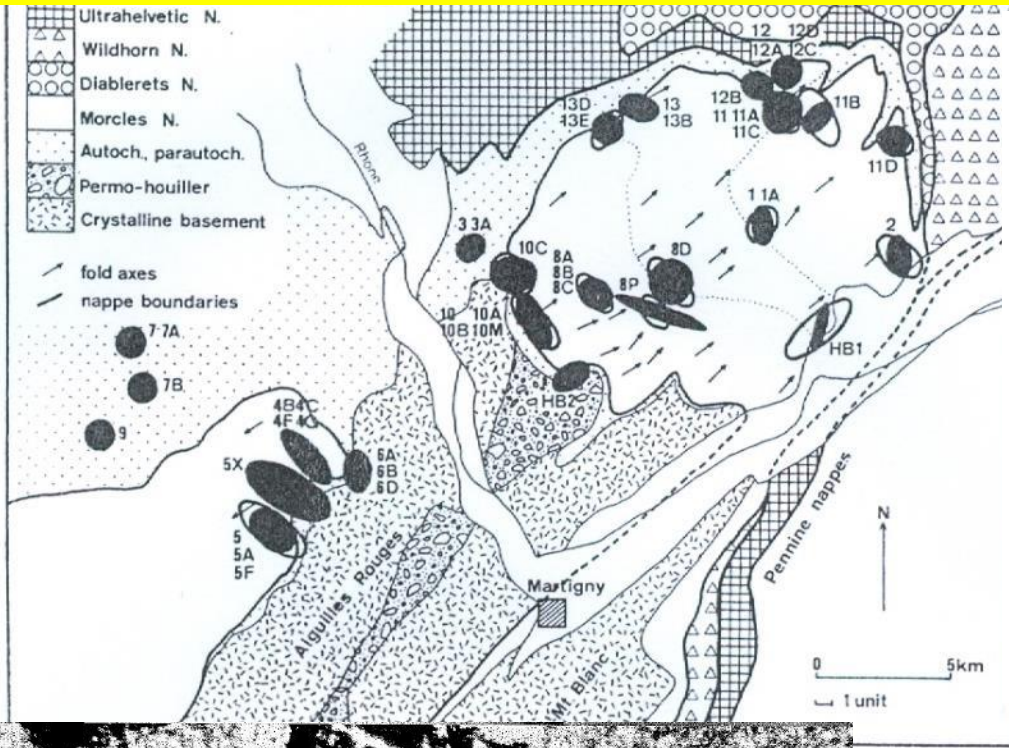


Fig III - 12 Position des tectonites S et L dans le diagramme de Flinn



# Un exemple d'étude de la déformation finie dans le pli couché de Morcles à partir d'oolithes déformées (Ramsay)





Exemple d'objets  
utilisés pour  
calculer  
des ellipsoïdes  
de déformation



Conglomérats  
déformés





trilobites déformés



bélemnites déformés

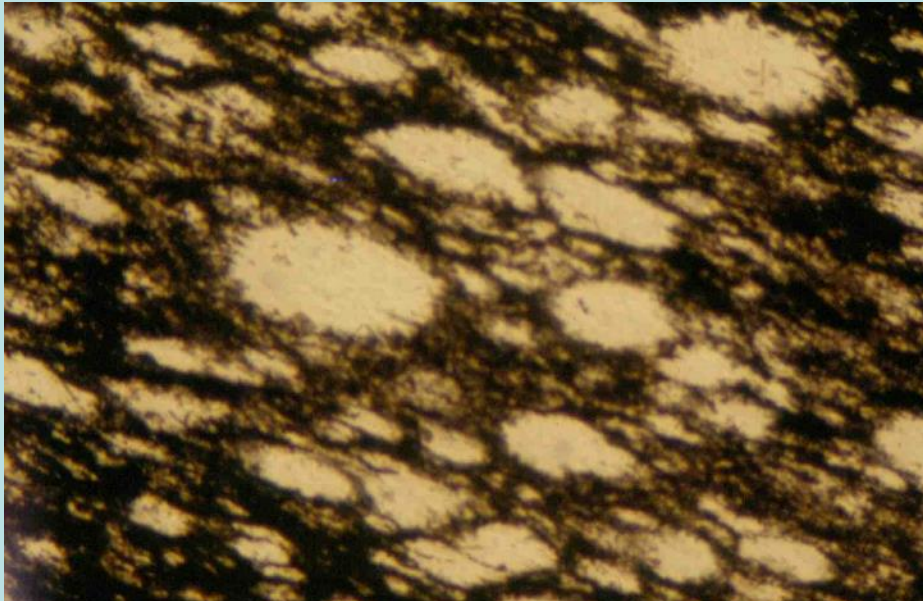


Photographie Pierre Thomas

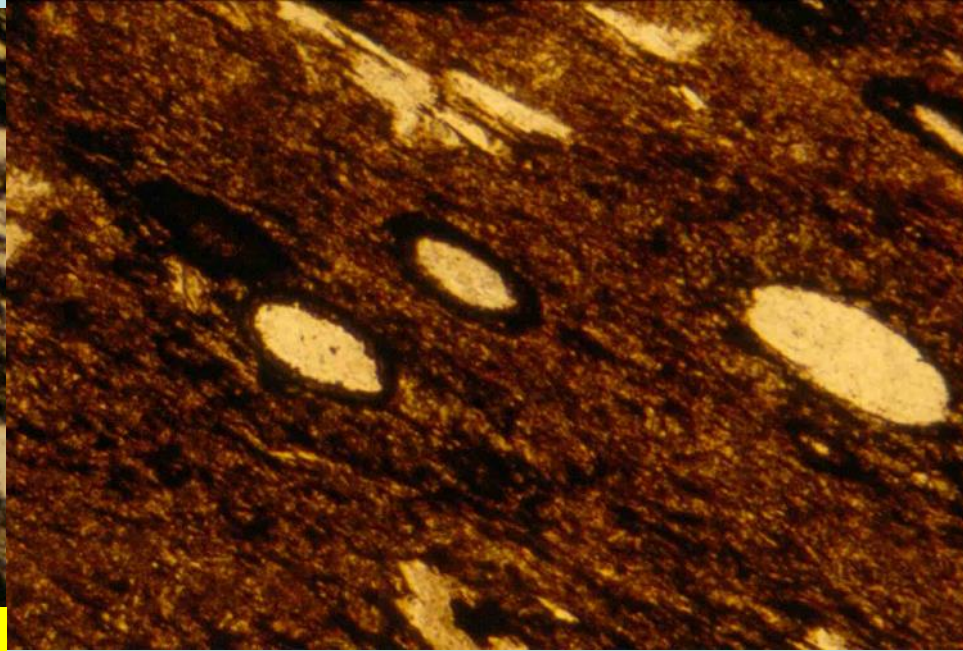




Exemple de radiolaires déformés



Exemple de vésicules volcaniques



Exemple de taches d'oxydation circulaires



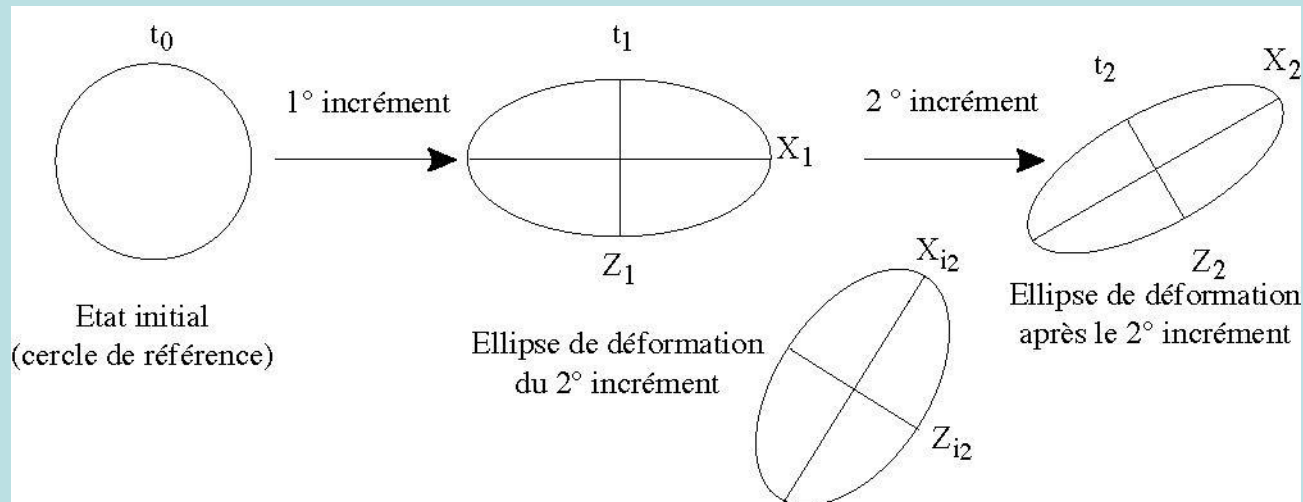


# 4. L'analyse cinématique ou incrémentale des roches

On s'intéresse ici à l'**histoire** de la déformation.  
Le temps est donc un facteur à considérer

La vitesse de déformation  $\epsilon/t$  ou la vitesse de cisaillement  $\gamma/t$  sont les paramètres importants

La déformation incrémentale. Pour chaque incrément on définit les axes incrémentaux de la déformation:  $X_i, Y_i, Z_i$



## Régime de déformation

Au cours de la déformation incrémentale, les axes incrémentaux de la déformation:  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$  peuvent avoir deux types de comportements.

- Les axes ne tournent pas  $\rightarrow$  *régime coaxial*
- Les axes tournent  $\rightarrow$  *régime non-coaxial*

Ne pas confondre ces deux régimes avec les mots de déformation rotationnelle ou irrotationnelle.

Dépend du référentiel

interne : régimes coaxiaux ou non coaxiaux

externe: déformation rotationnelle ou irrotationnelle.

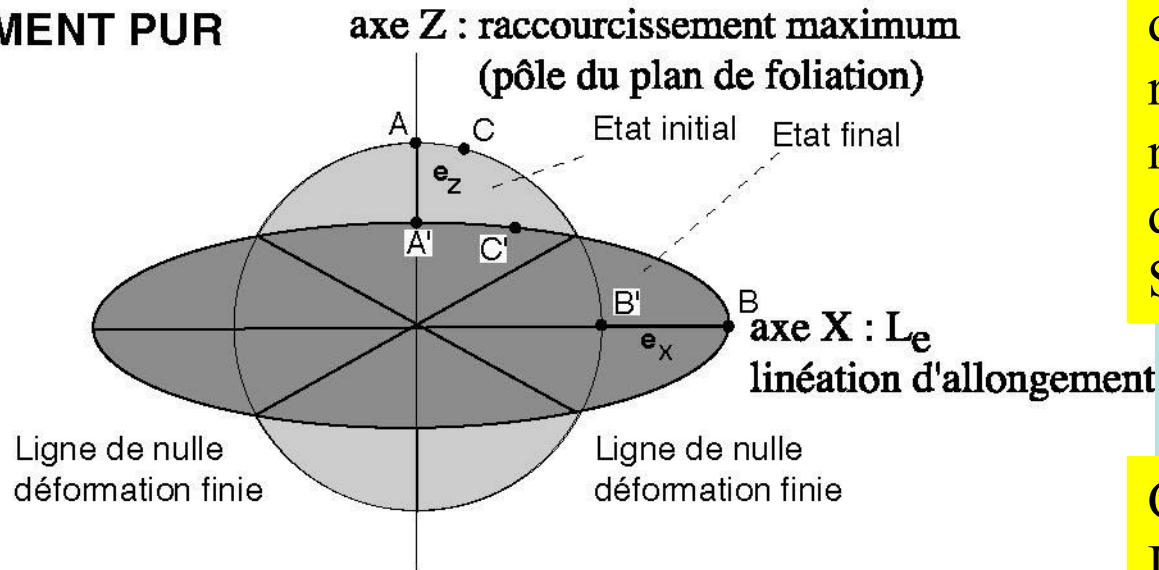
Si, en outre, la déformation est plane ( $K=1$ ), on a deux régimes particuliers:

**Ecrasement pur** (pure shear) et **cisaillement simple** (simple shear)

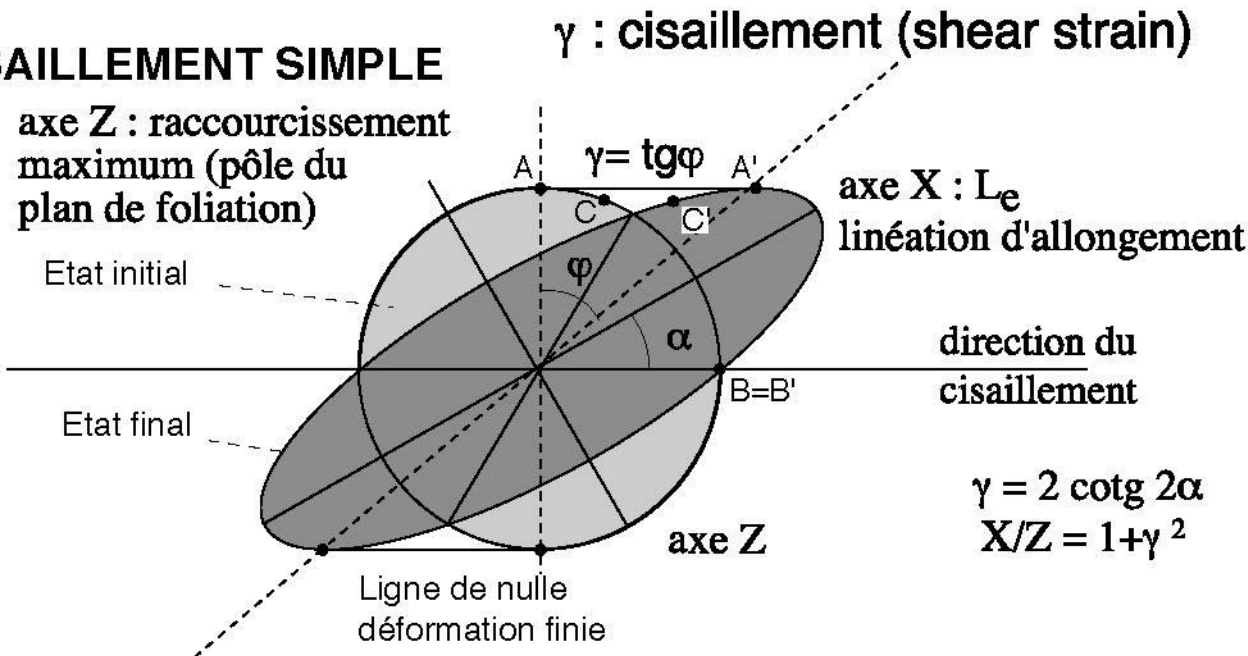


# Les deux régimes de déformation plane

## ECRASEMENT PUR



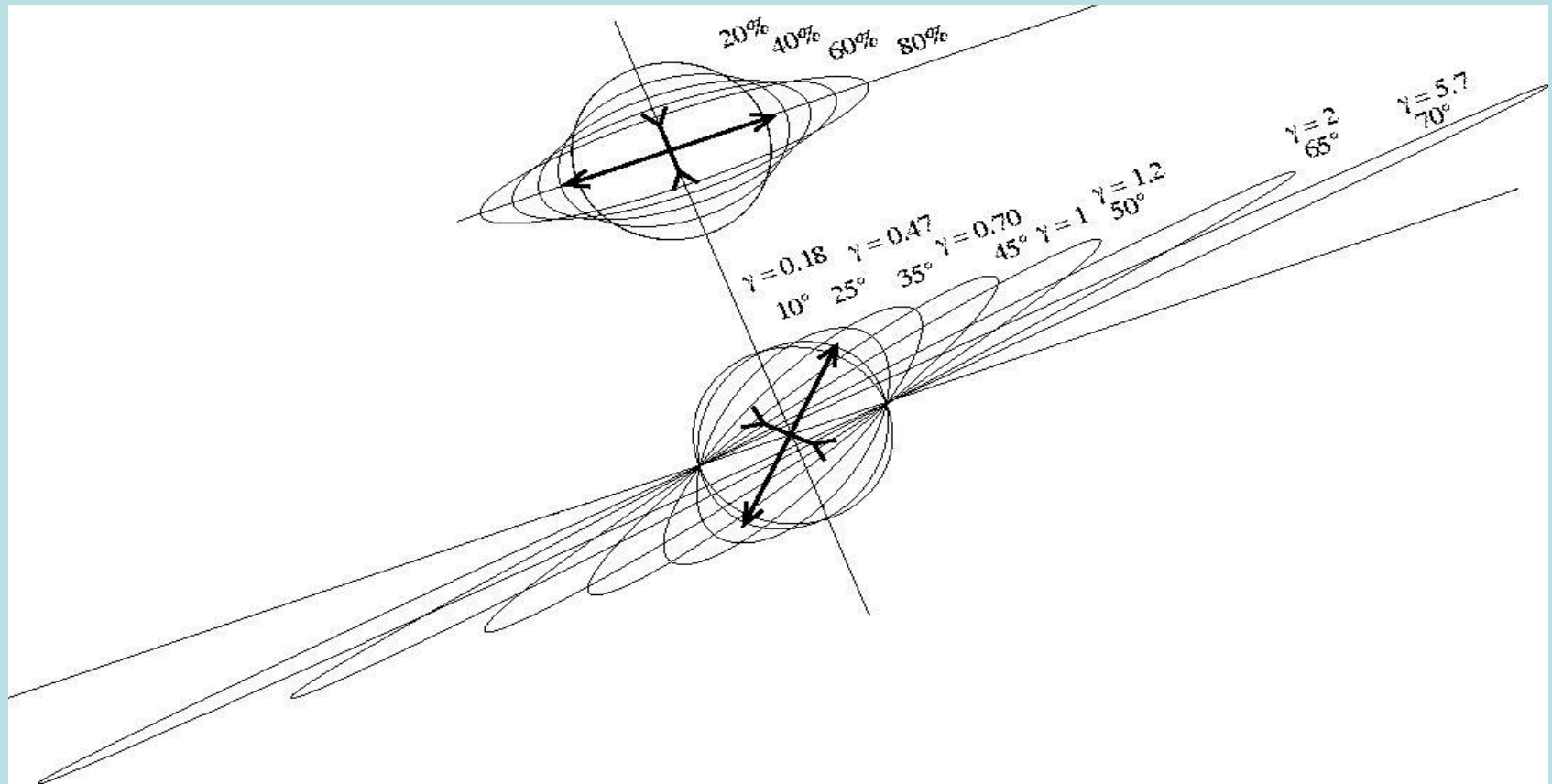
## CISAILLEMENT SIMPLE



Ecrasement pur:  
Les points s'éloignent de l'axe de raccourcissement Z et se rapprochent l'axe d'allongement (X).  
Symétrie

Cisaillement simple  
Le grand axe de l'ellipsoïde de déformation (X) représente la linéation d'allongement (L).  
Quand le cisaillement (shear strain  $\gamma$ ) augmente, L indique la direction de cisaillement et de déplacement.  
Asymétrie

# Régime de déformation coaxiale et non-coaxiale



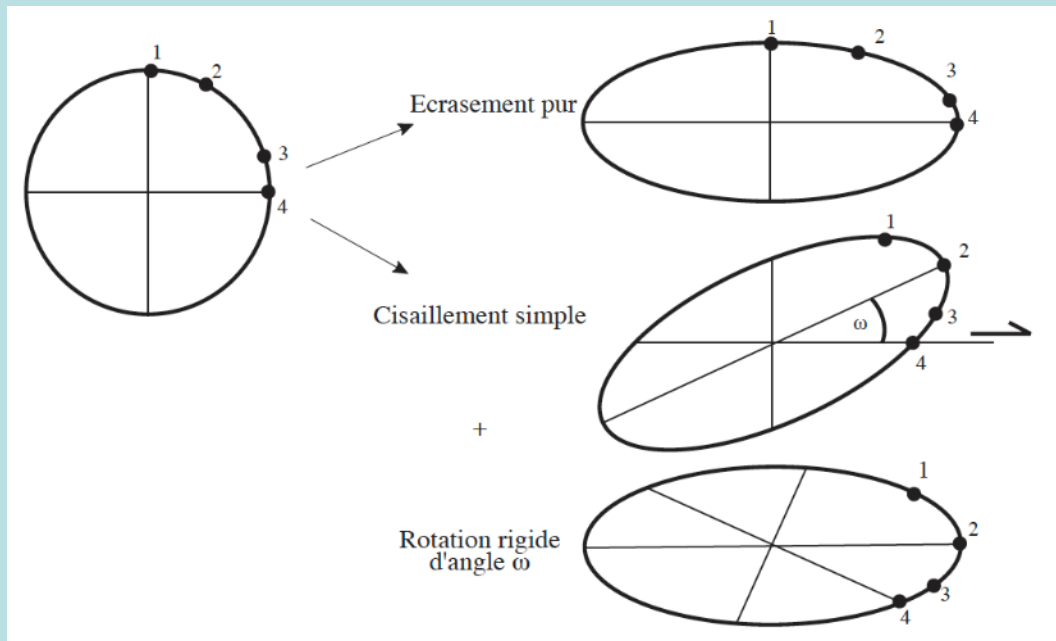
## Cisaillement simple

Le grand axe de l'ellipsoïde de déformation ( $X$ ) représente la linéation d'allongement ( $L$ ).

Quand le cisaillement (shear strain  $\gamma$ ) augmente,  $L$  indique la direction de cisaillement et de déplacement.



# Comparaison entre un écrasement pur et un cisaillement simple



La forme externe de l'objet est la même dans les deux cas, **(déformation finie)**. Mais les trajets des particules sont différents **(déformation incrémentale)**.

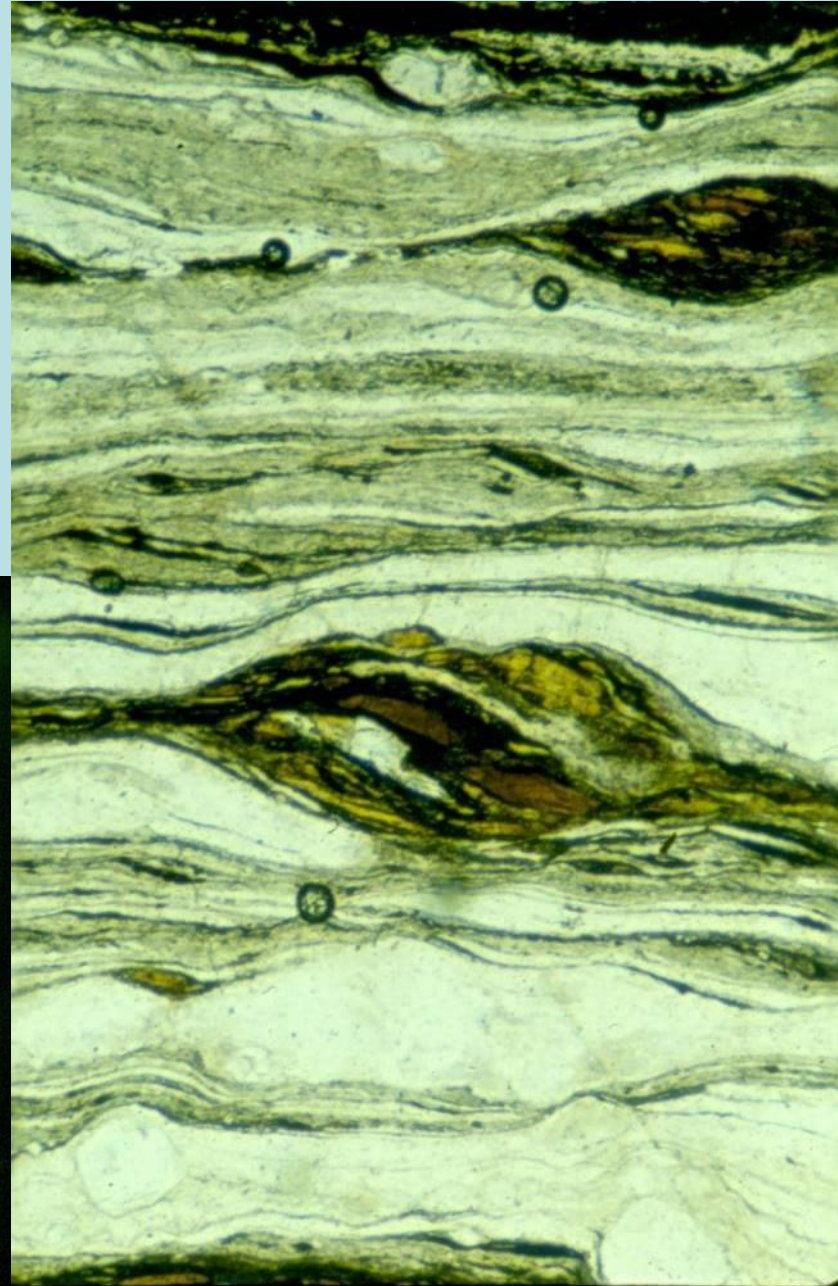
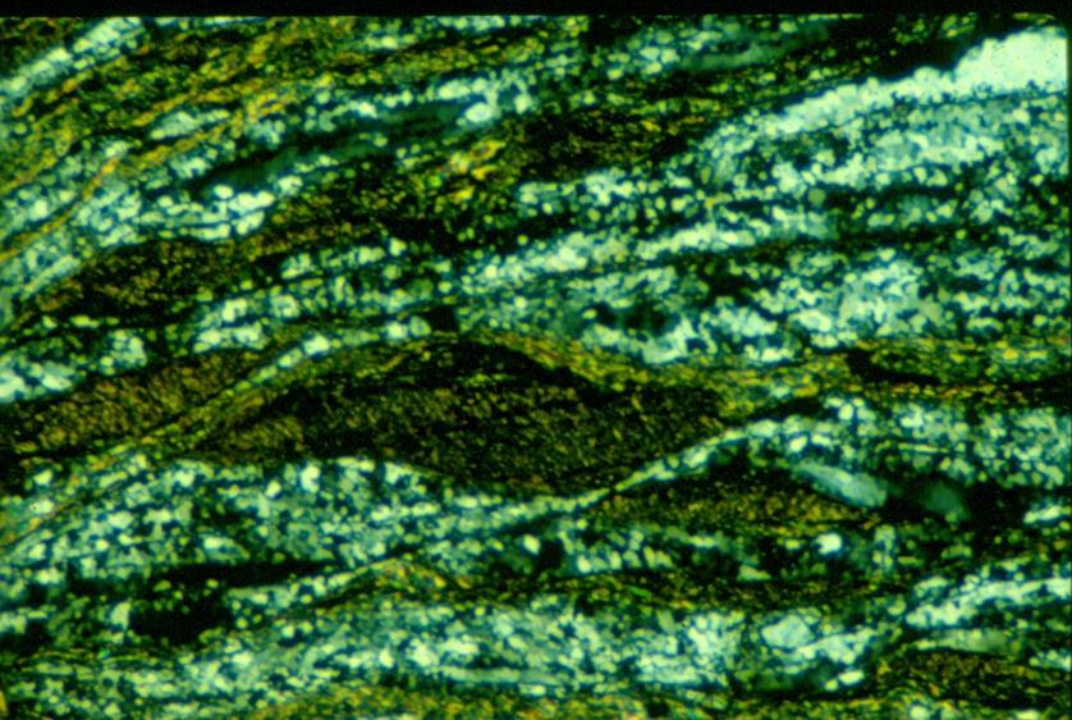
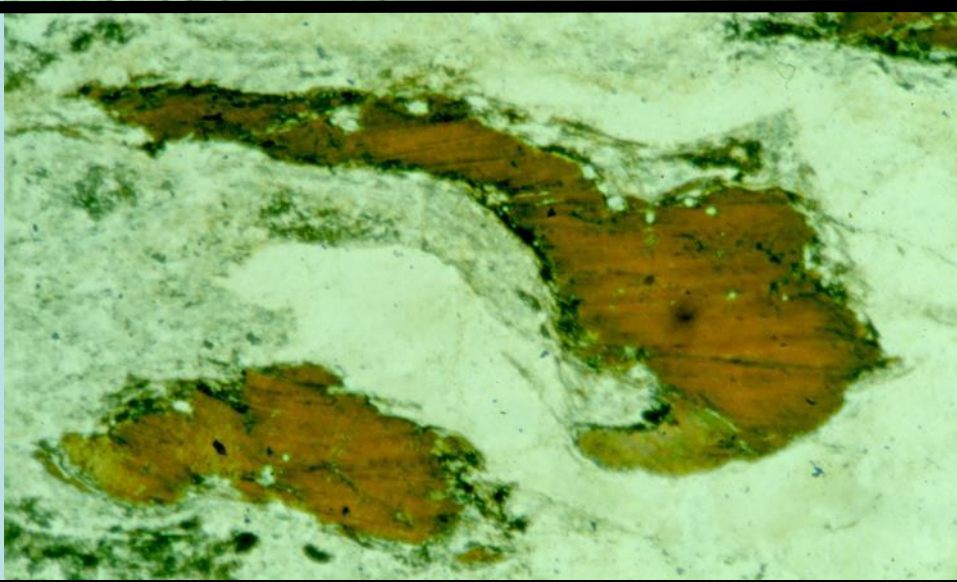
## Les indicateurs cinématiques ou critères de cisaillement

Ils sont fondés sur le « principe de Curie ».

*La symétrie des effets reflète la symétrie des causes*

Ils doivent être observés dans le plan XZ: perpendiculaire à la foliation et parallèle à la linéation d'allongement.

# 1. Micas sigmoïdes (haut-vers-la gauche)





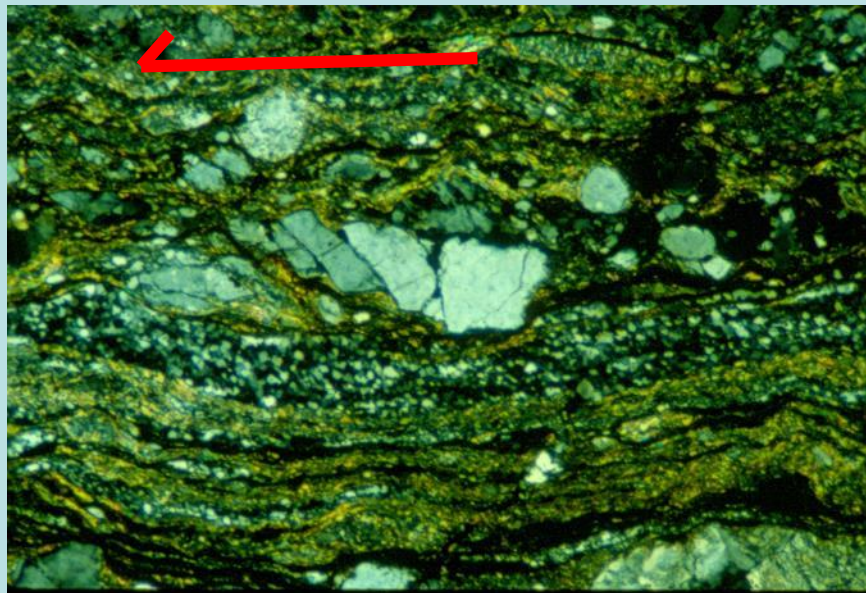
## 2. Dominos basculés



Niveau dolomitique boudiné dans un marbre. La déformation dépend de la lithologie. Le calcaire se déforme de façon continue, alors que la dolomie se tronçonne.



Niveau de quartzite boudiné. Les fragments ont subi une rotation antihoraire, le cisaillement est vers la gauche



Feldspath cassé et cisailé en «pile de livres»



## 2. Dominos basculés

Niveau de grès boudiné dans une série sédimentaire. Les fragments ont subi une rotation antihoraire, le cisaillement global est vers la gauche

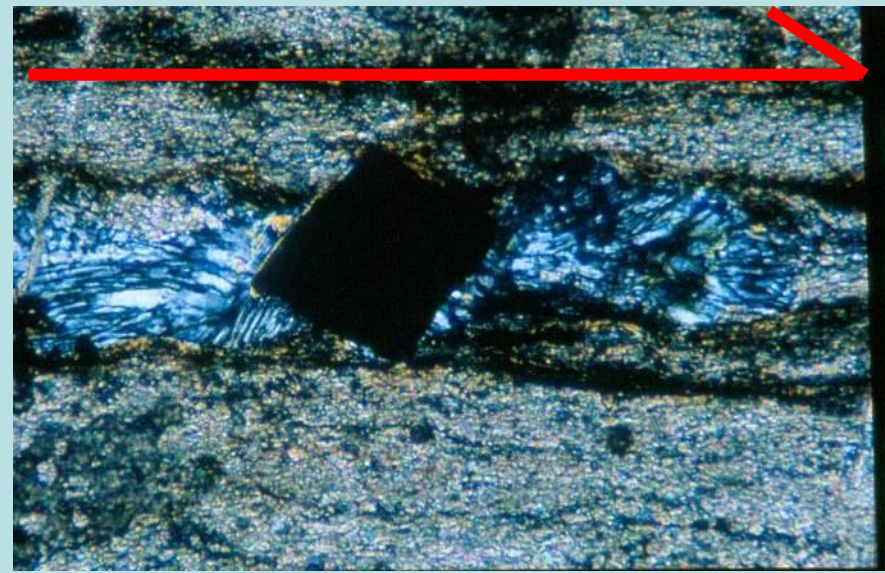




### 3. Pressure shadows

« ombres de pression » ou  
cristallisations en zones abritées

Fibre de quartz (pressure shadow)  
autour de pyrite



Modélisation de la formation de pressure shadow dans un cisaillement simple. Les fibres sont rigides et tournent au cours de la déformation

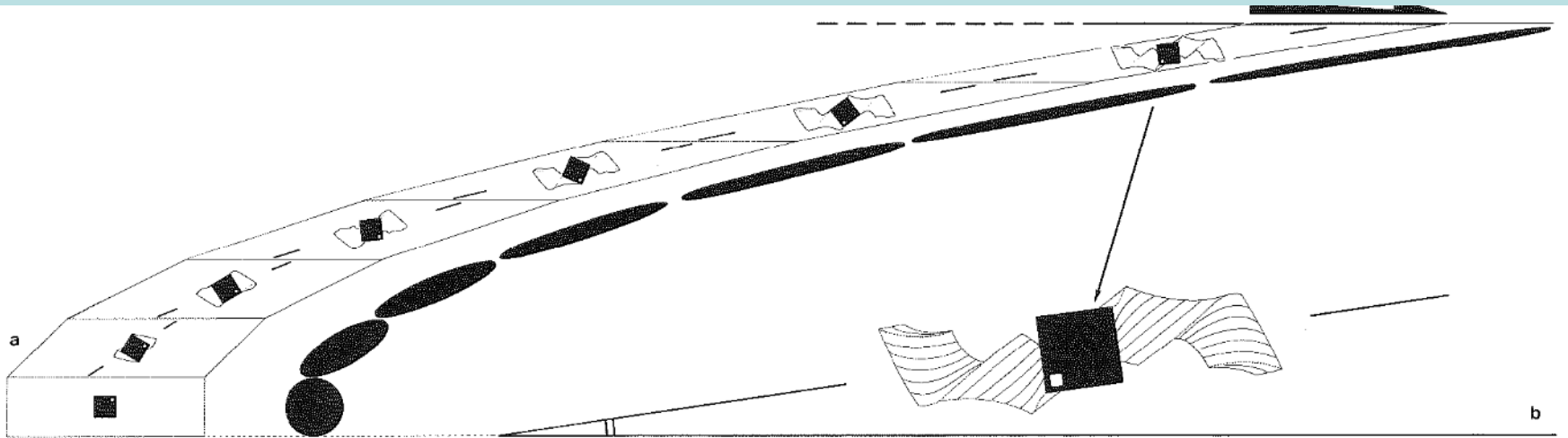
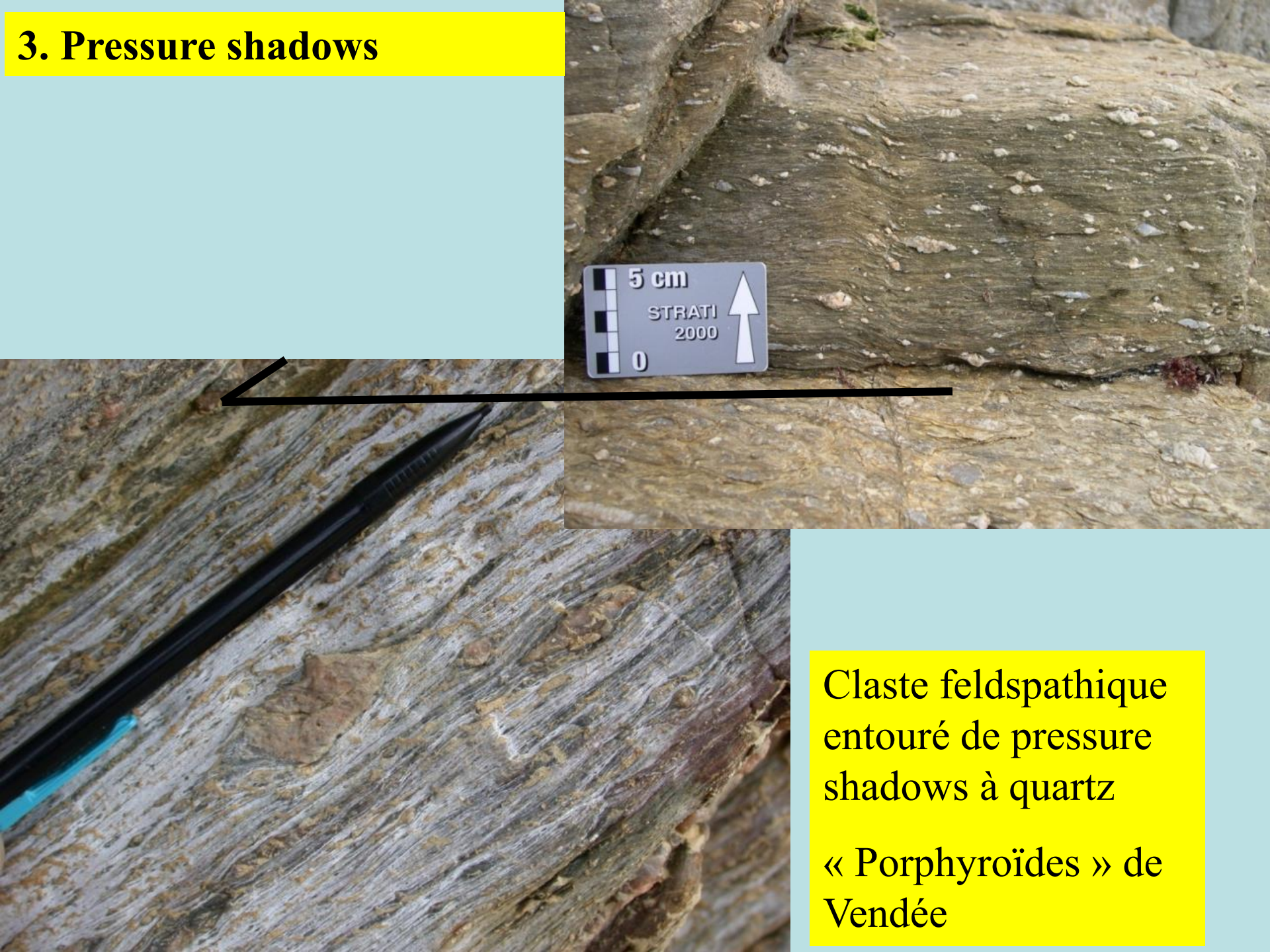


Fig. 6. Computer model for simple shear, where pressure-shadow fibres are rigid and displacement-controlled (a) Results for successive amounts of shear ( $\gamma = 0-6$ ) shown distributed across a dextral shear zone. Strain ellipses shown in black. (b) Detail of pressure shadow ( $\gamma = 6$ ) showing fibres and suture lines.



### 3. Pressure shadows



Claste feldspathique  
entouré de pressure  
shadows à quartz

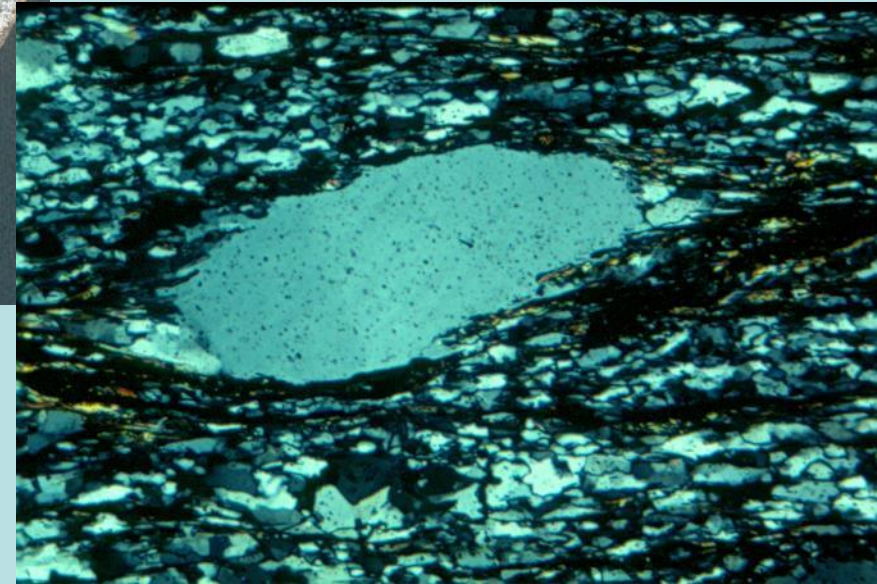
« Porphyroïdes » de  
Vendée



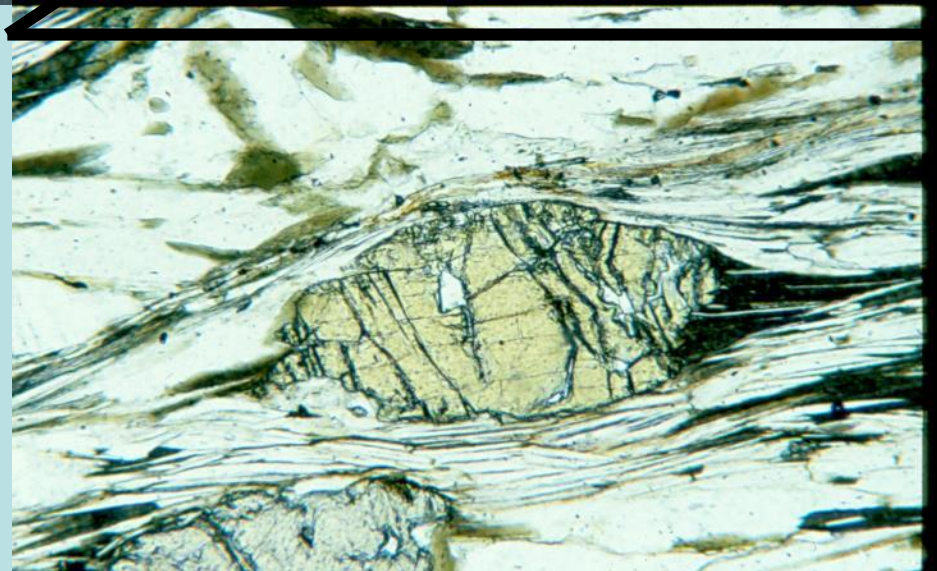
### 3. Pressure shadows

« ombres de pression » ou  
cristallisations en zones abritées

Grenat entouré de pressure  
shadows asymétriques de quartz



Grain de quartz asymétrique  
entouré de pressure shadows

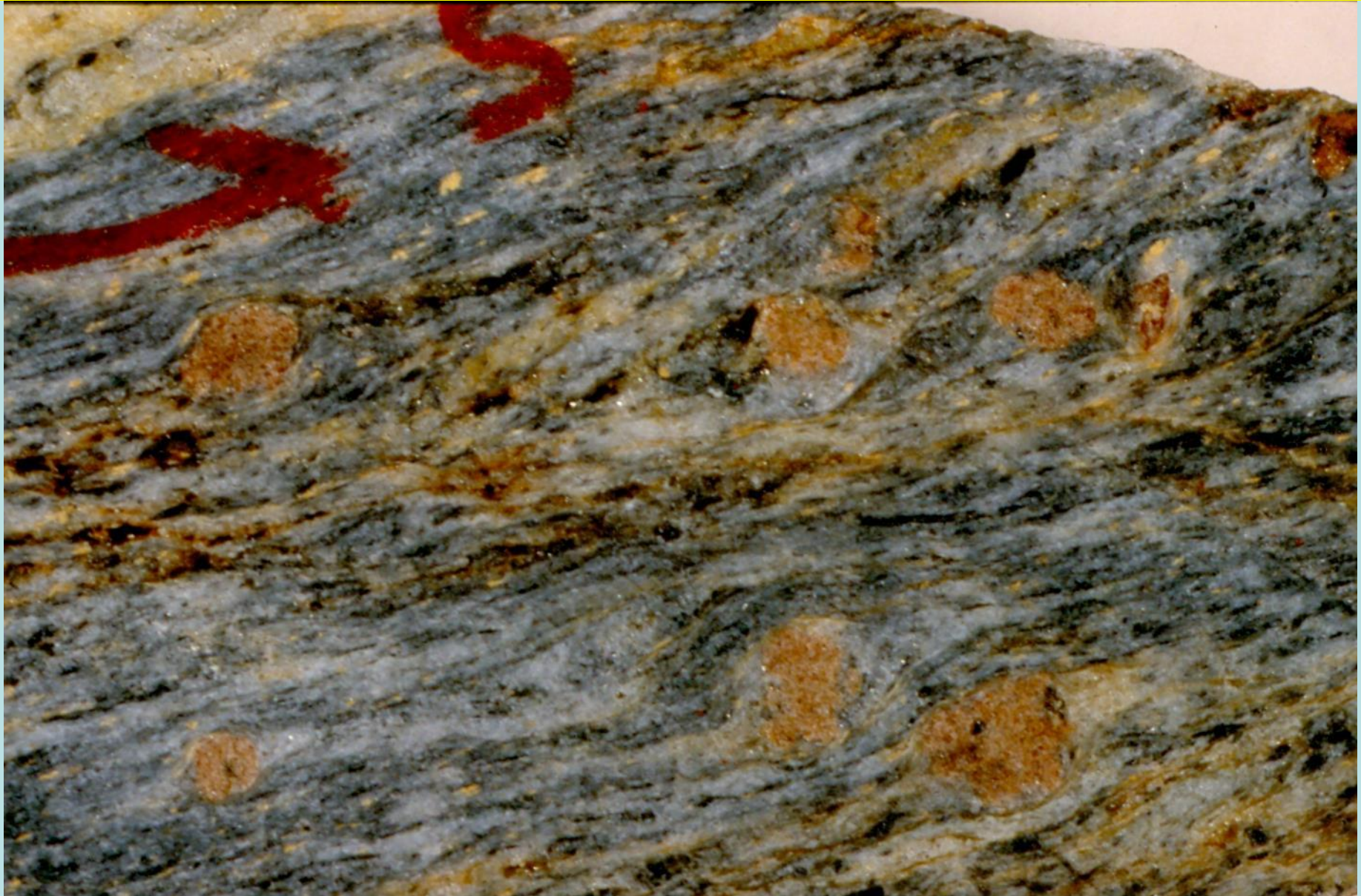


Staurotide entourée de pressure shadows asymétriques de biotite



### 3. Pressure shadows

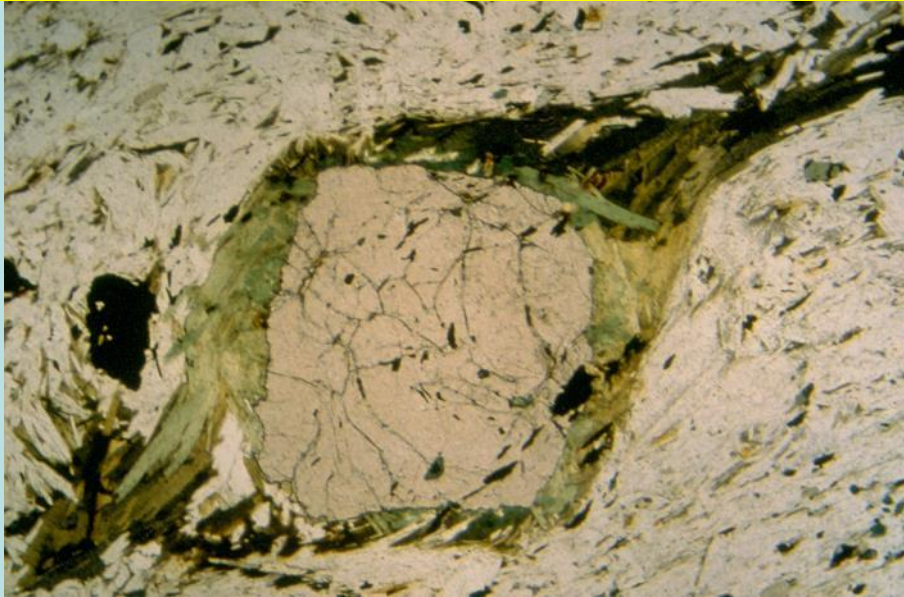
Pressure shadows à quartz autour de grenats dans un schiste bleu





### 3. Pressure shadows

### Déformation et métamorphisme



Pressure shadow à chlorite autour d'un grenat cristallisé lors d'un épisode métamorphique antérieur



Pressure shadow à quartz-mica autour d'un staurotide



Pressure shadow à quartz-mica autour d'un disthène cristallisé lors d'un épisode métamorphique antérieur



### 3. Pressure shadows Déformation et métamorphisme

Pressure shadow à quartz autour de biotite post-foliale

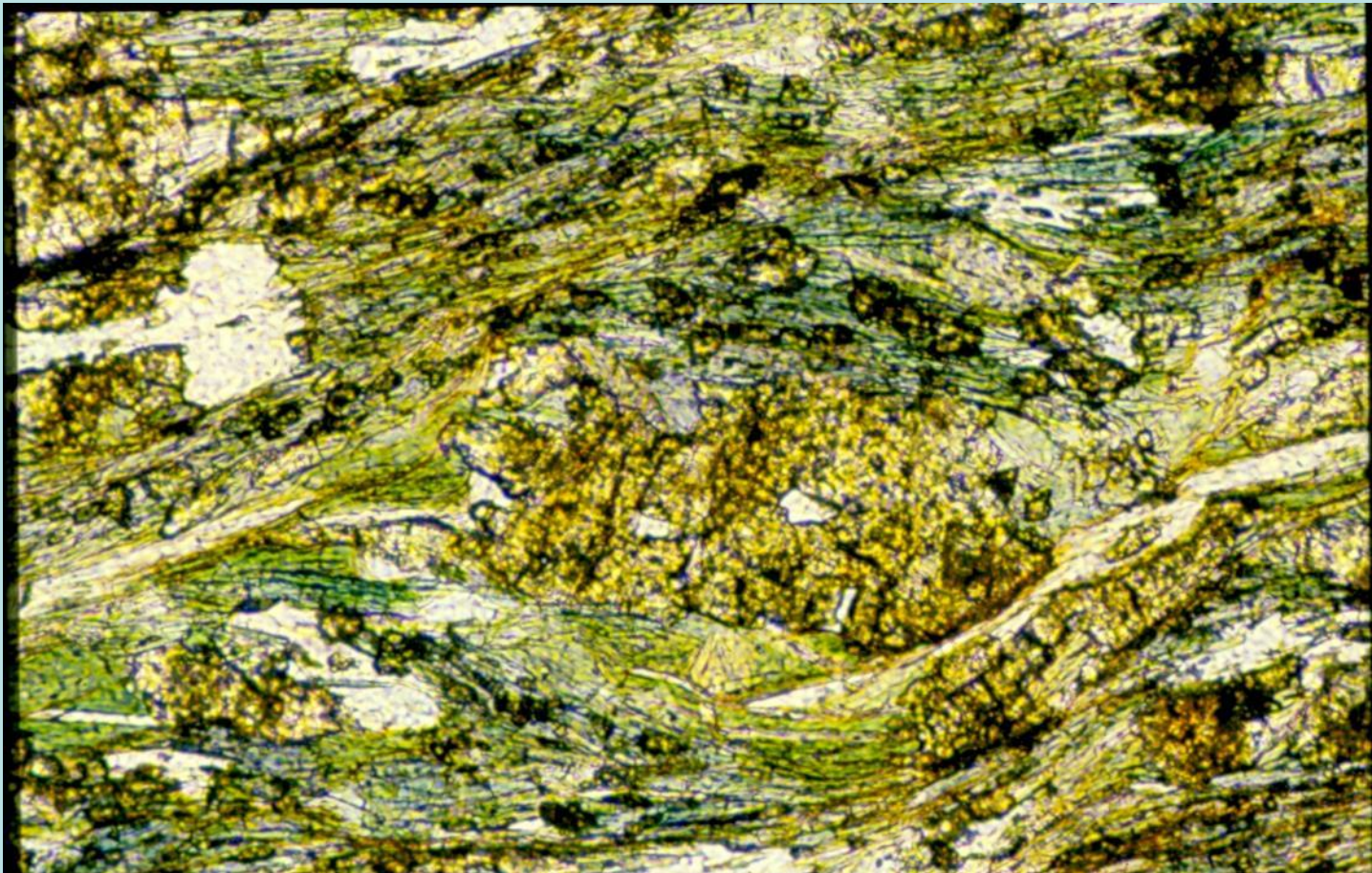




### 3. Pressure shadows

### Déformation et métamorphisme

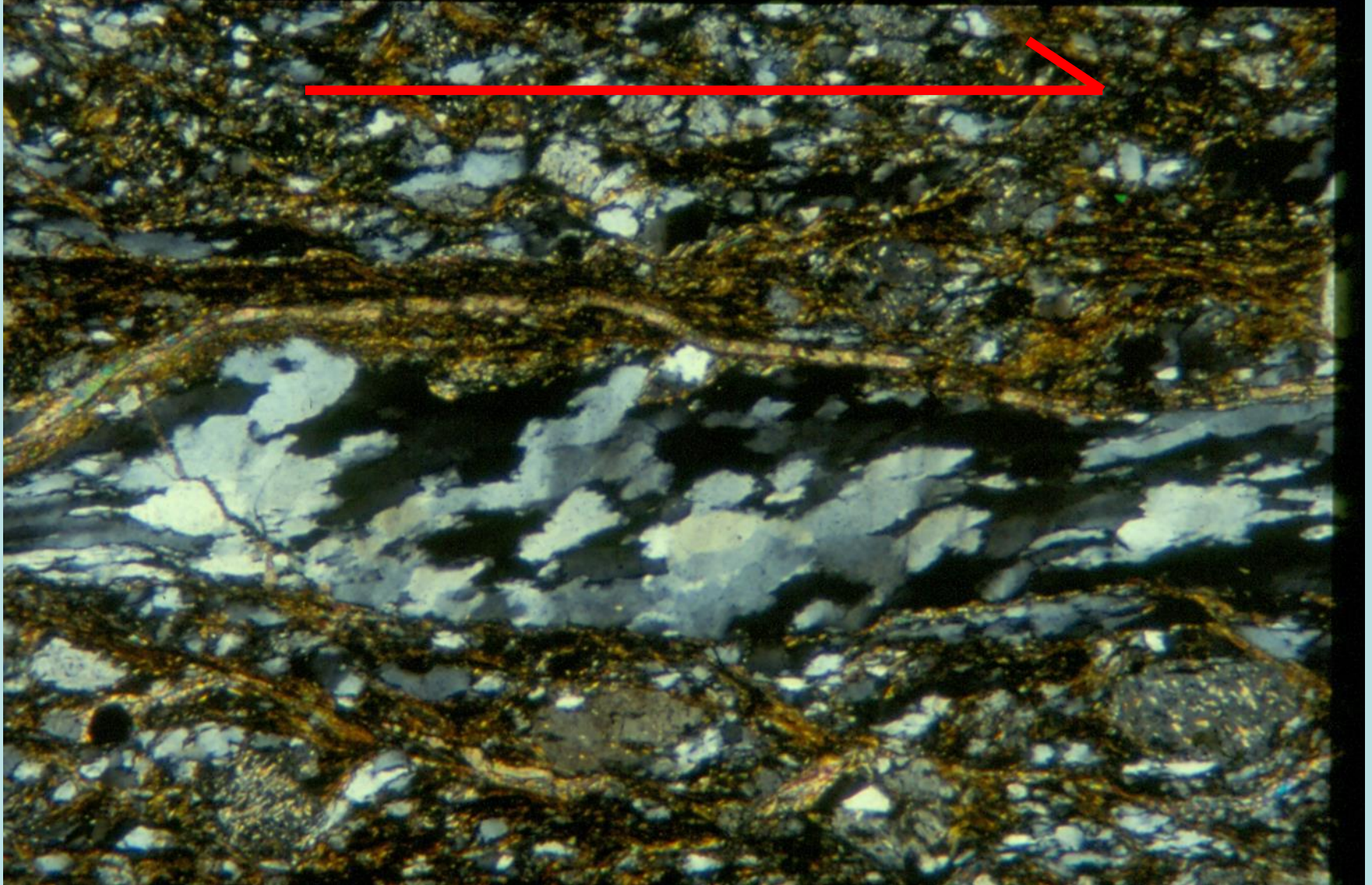
Pressure shadow à quartz-actinote autour d'un feldspath.  
Noter aussi la présence d'amphibole bleue (glaucophane)  
témoignant d'un événement tectono-métamorphique plus ancien





## 4. Fabrique de forme oblique

La recristallisation dynamique d'un claste de quartz produit des néograins allongés, obliques sur le cisaillement





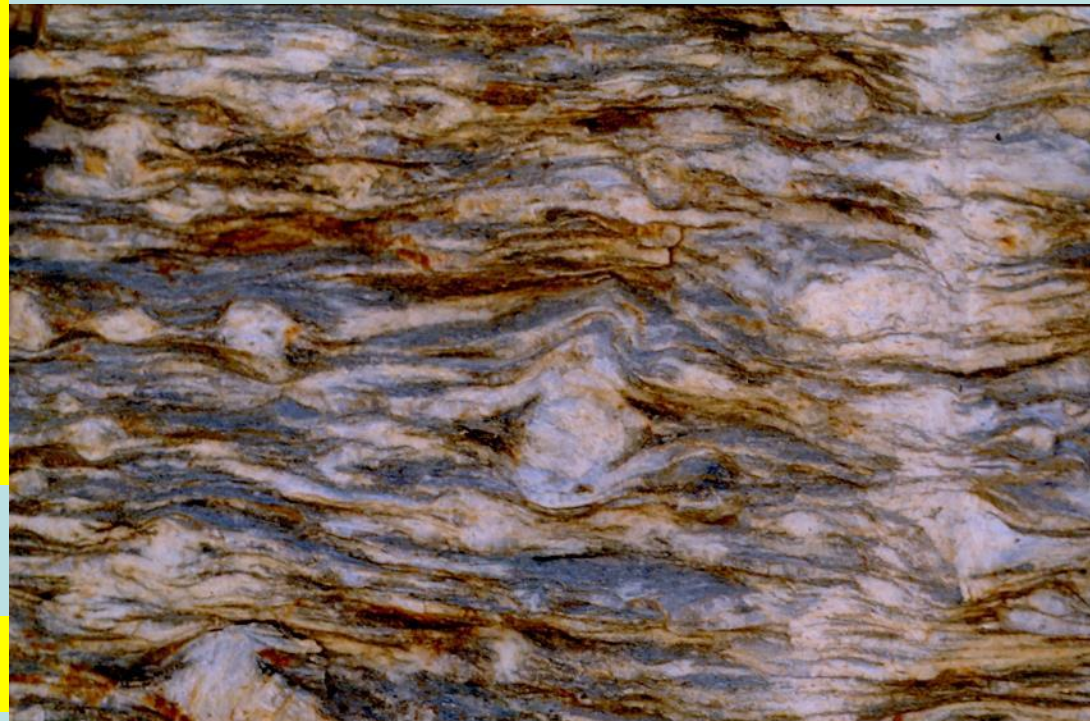
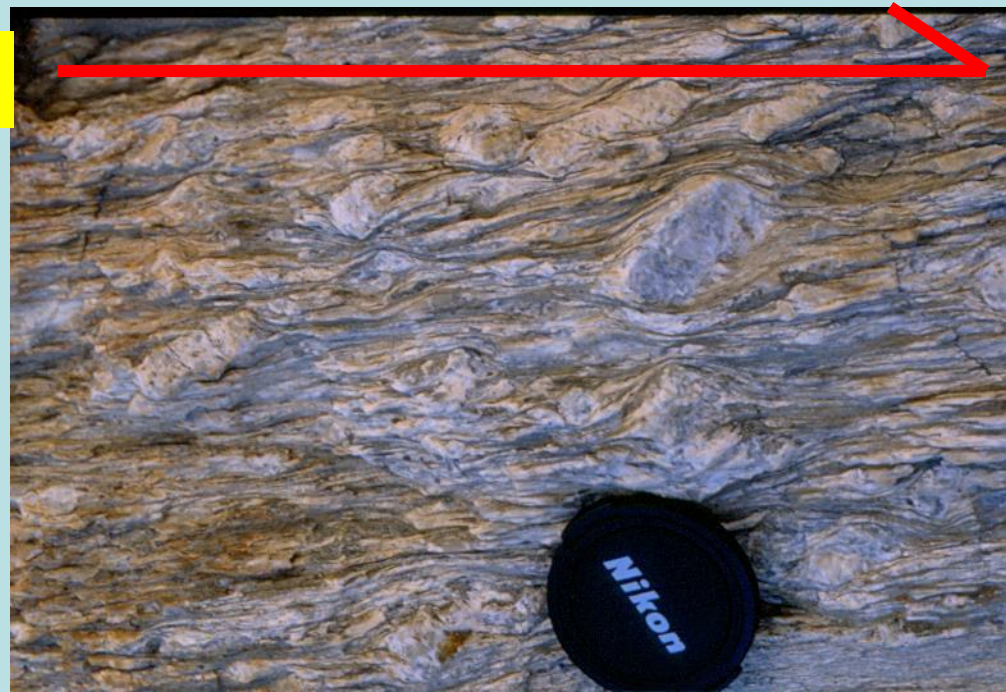
## 5. Systèmes de porphyroclastes

### Type sigma

Dans cet orthogneiss, les queues de recristallisation sont formées du même matériel (feldspath potassique) que le claste central.

Il ne s'agit pas de «pressure shadows».

2 types:  $\sigma$  et  $\delta$  dus à la différence de vitesses de cristallisation et de rotation



### Type delta

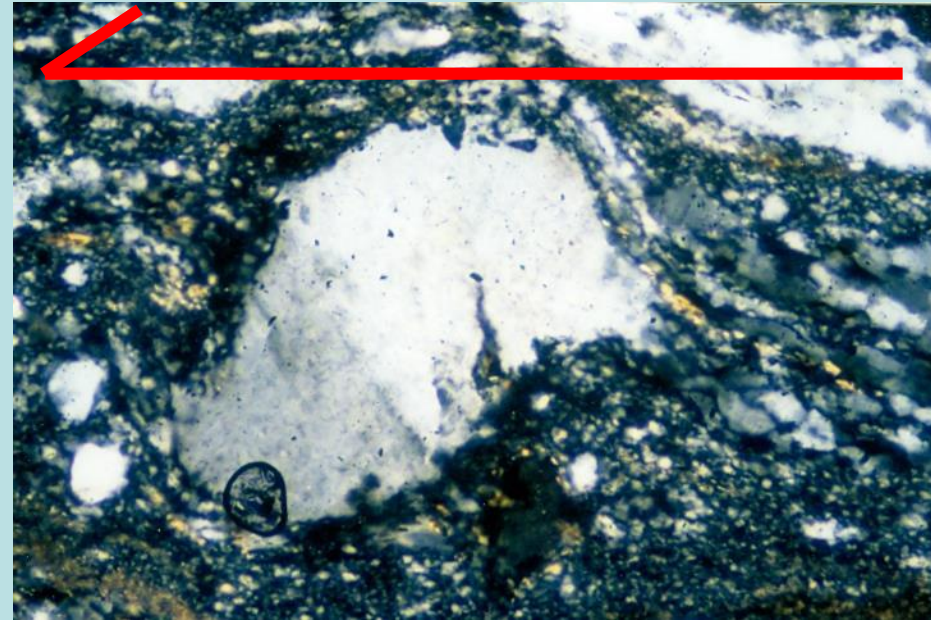


## 5. Systèmes de porphyroclastes

Porphyroclaste de type sigma



Porphyroclaste de type delta

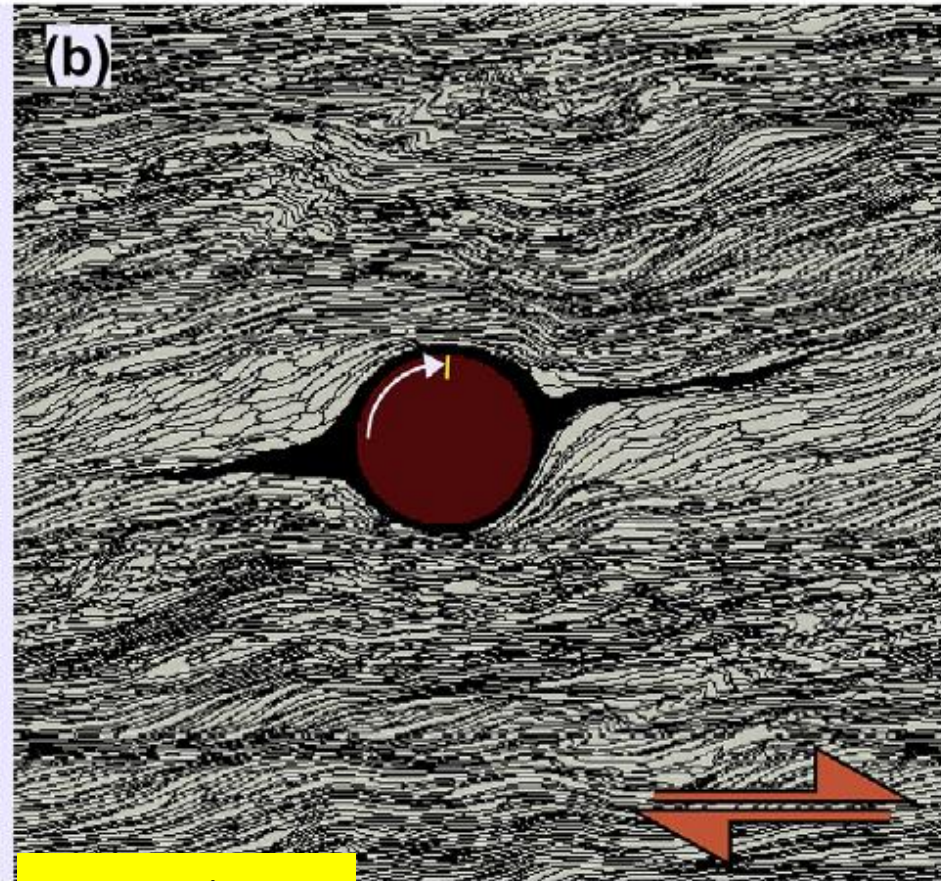




## 5. Systèmes de porphyroclastes



Type delta

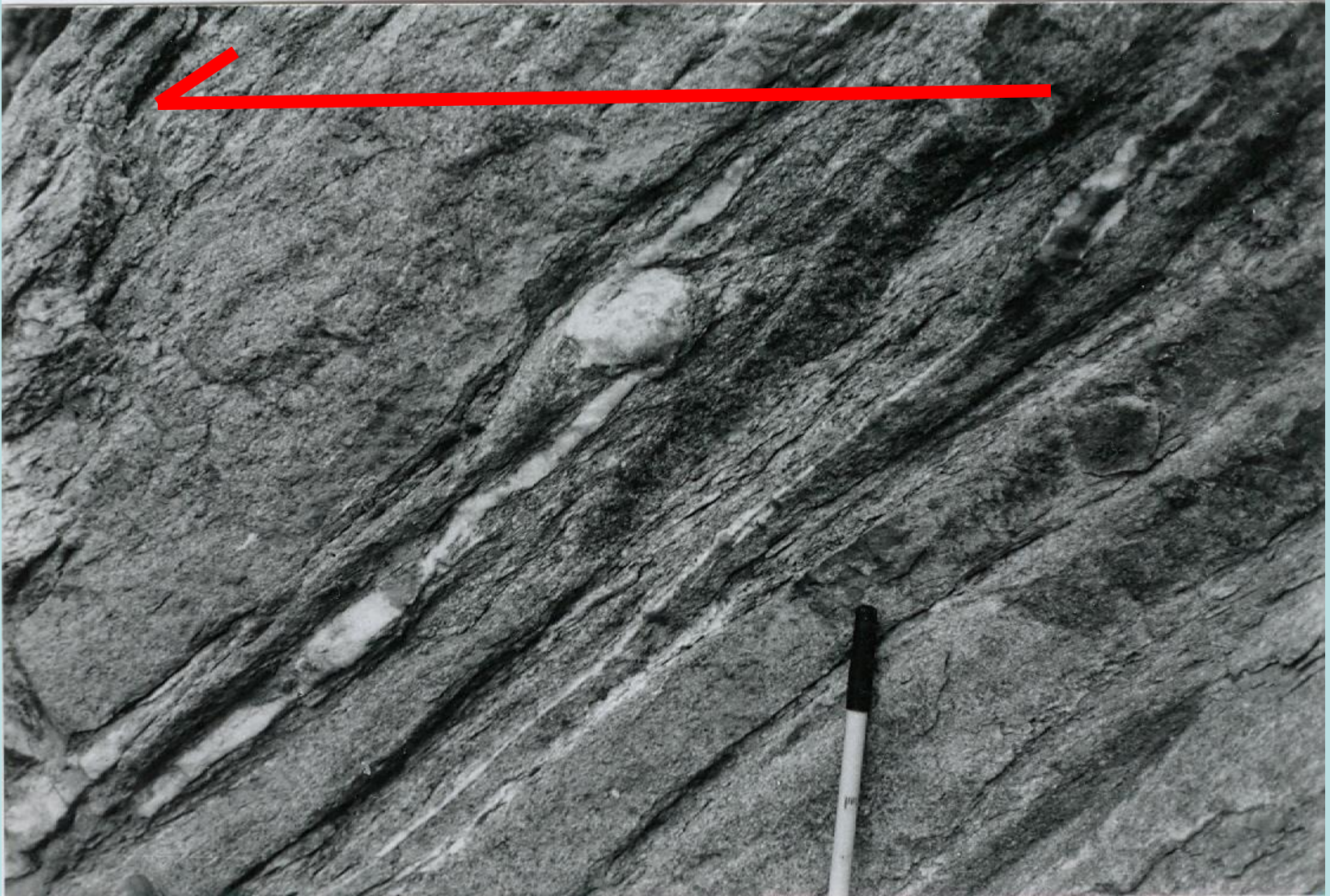


Type sigma

Modélisation numérique de systèmes de porphyroclastes. Les queues de recristallisation sont formées du même matériel (feldspath potassique) que le claste central. Ces 2 types:  $\sigma$  et  $\delta$  dus à la différence de vitesses de cristallisation et de rotation



## 5. Systèmes de porphyroclastes



Filon de quartz « enroulé » au cours d'un cisaillement vers la gauche.  
figure « delta » d'échelle centimétrique



## 5. Systèmes de porphyroclastes



Filon d'aplite déformé

Structures sigmoïdes traduisant un cisaillement vers la gauche

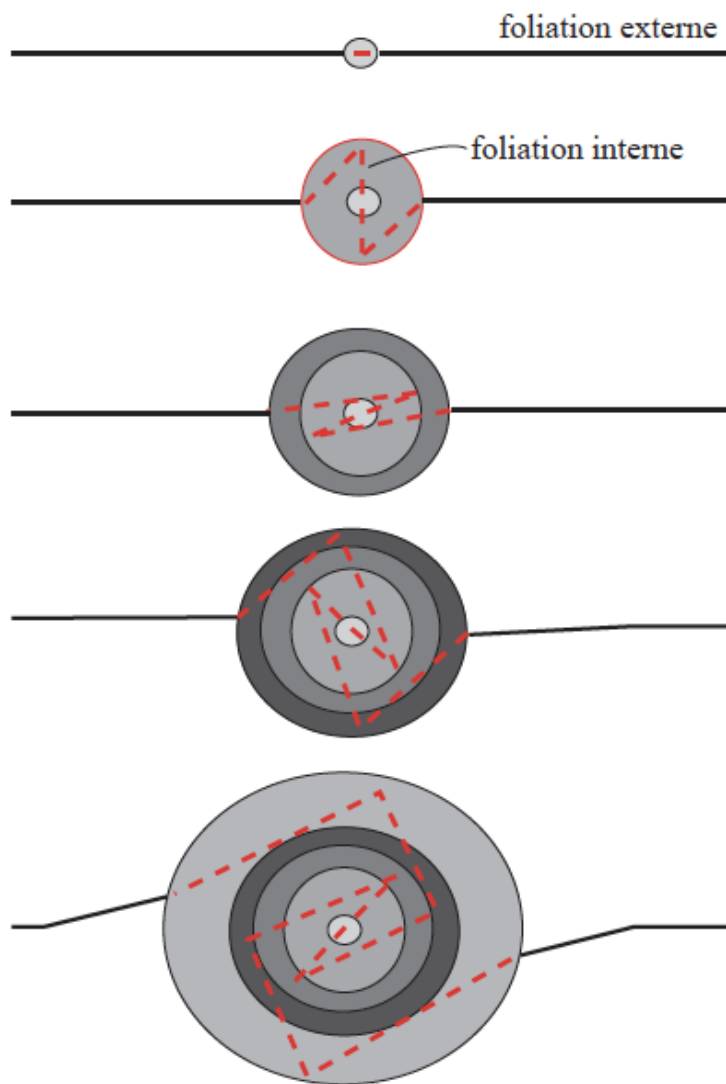


Veine de quartz



## 6. Inclusions minérales

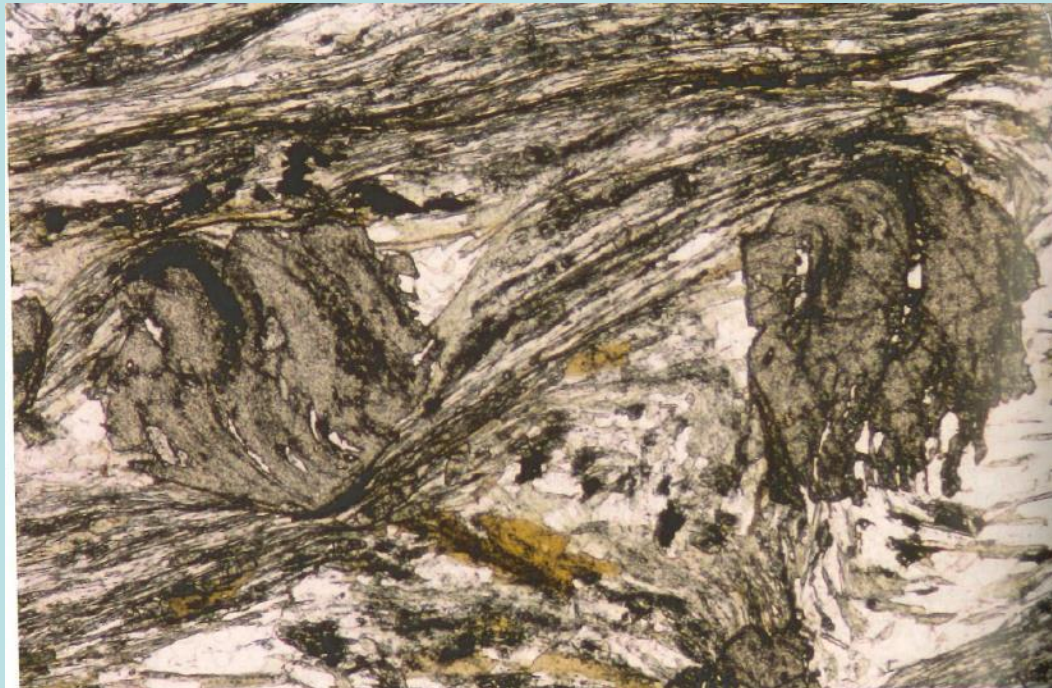
cisaillement et rotation d'un porphyroblaste



## Déformation et métamorphisme syn-cinématique



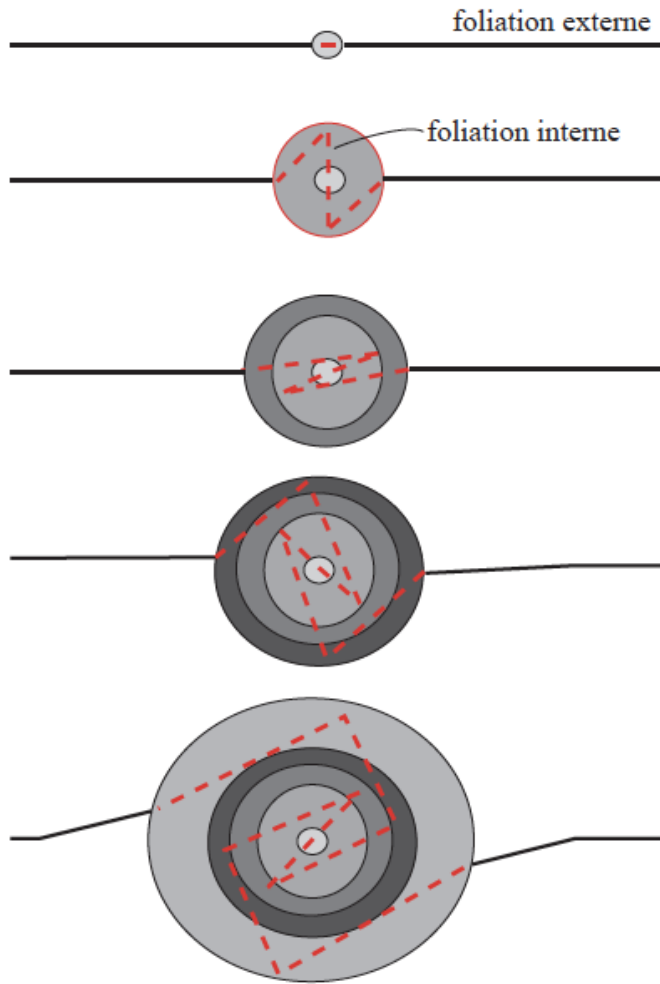
## Grenats hélicitiques





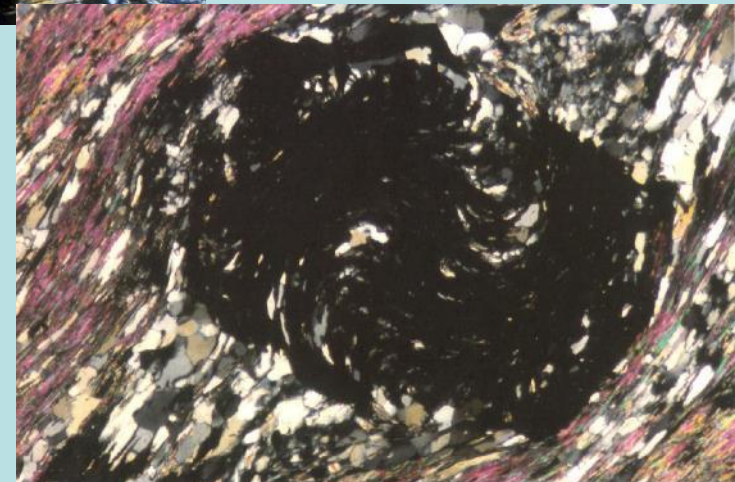
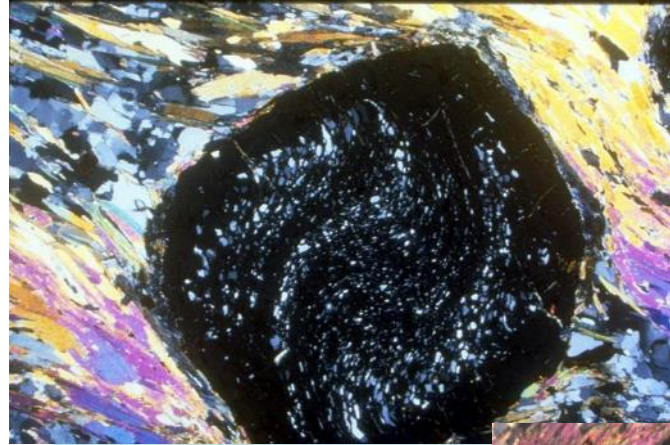
## 6. Inclusions minérales

cisaillement et rotation d'un porphyroblaste



## Déformation et métamorphisme syn-cinématique

### Grenat hélicitiques



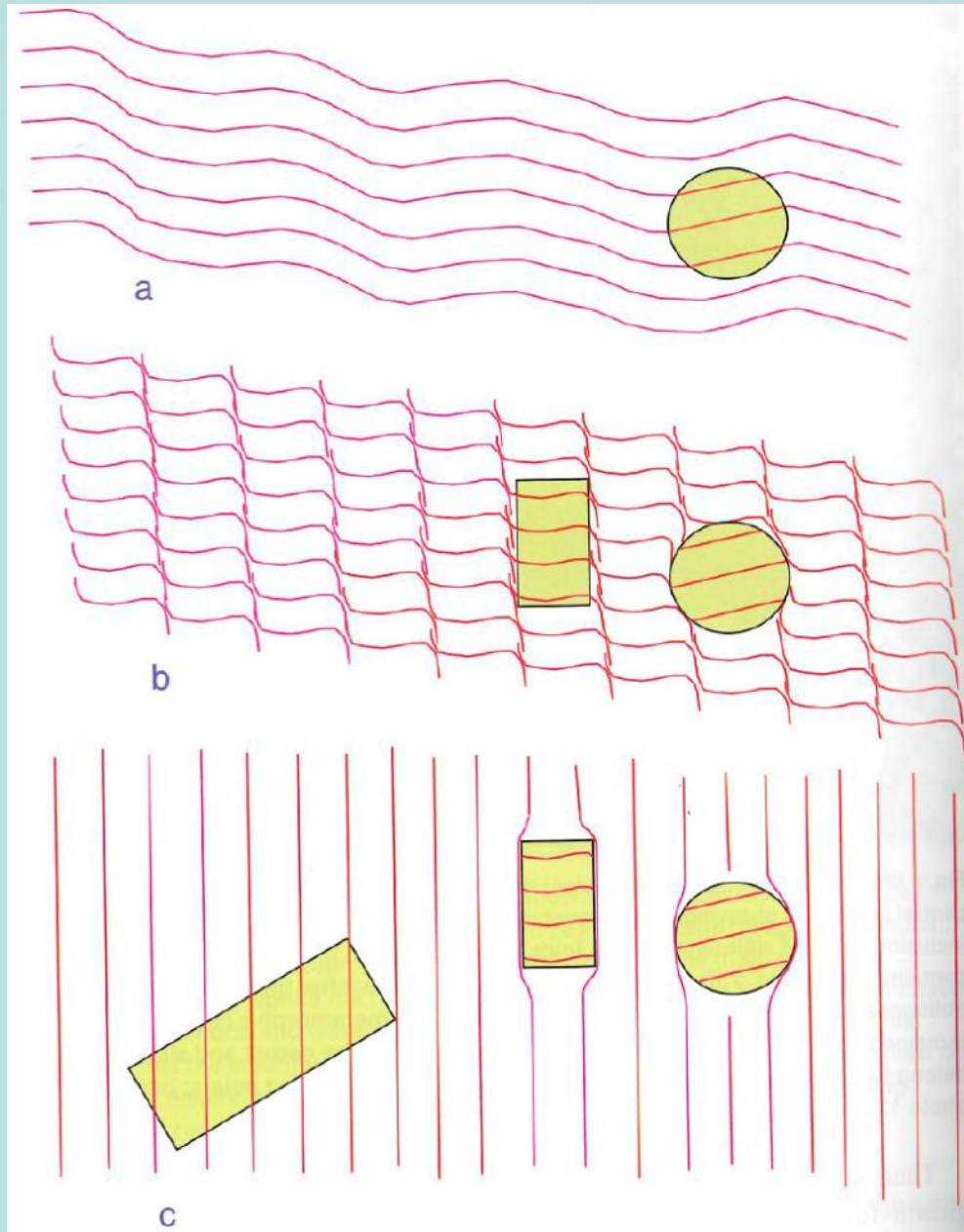
## 6. Inclusions minérales

## Déformation et métamorphisme

Porphyroblaste syn-cinématique  
S1

Porphyroblaste ante-cinématique  
et syn-cinématique par rapport à  
S2

Porphyroblastes post-  
cinématiques par rapport à S2





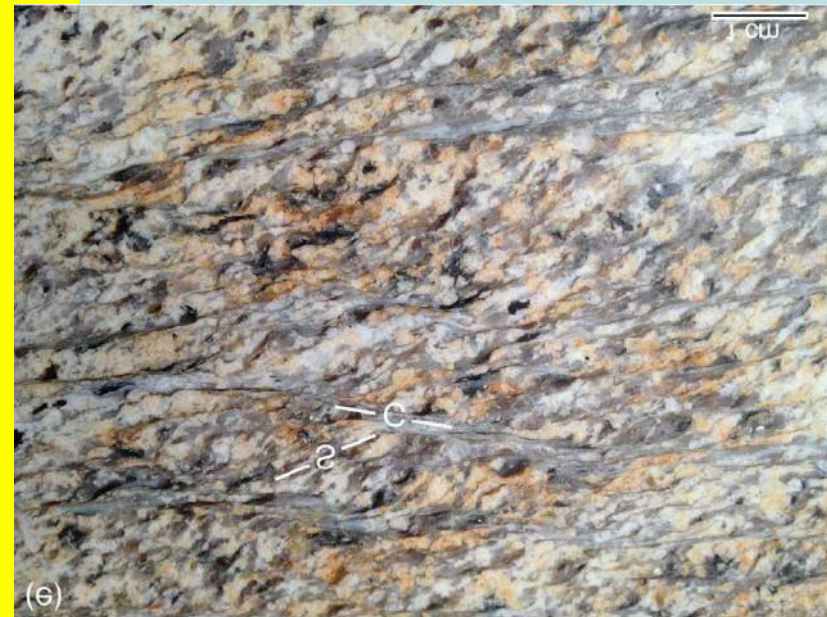
## 7. Structures S-C



Mise en évidence le long du cisaillement Sud Armoricain (Berthé & Choukroune, 1979).

En carte, les plutons granitiques ont une forme en «goutte d'eau».

Sur le terrain on observe des plans de cisaillement C et ses surfaces sigmoïdes de foliation S. Les surfaces de cristallisation du granite (S) et la déformation ductile C ont le même âge.

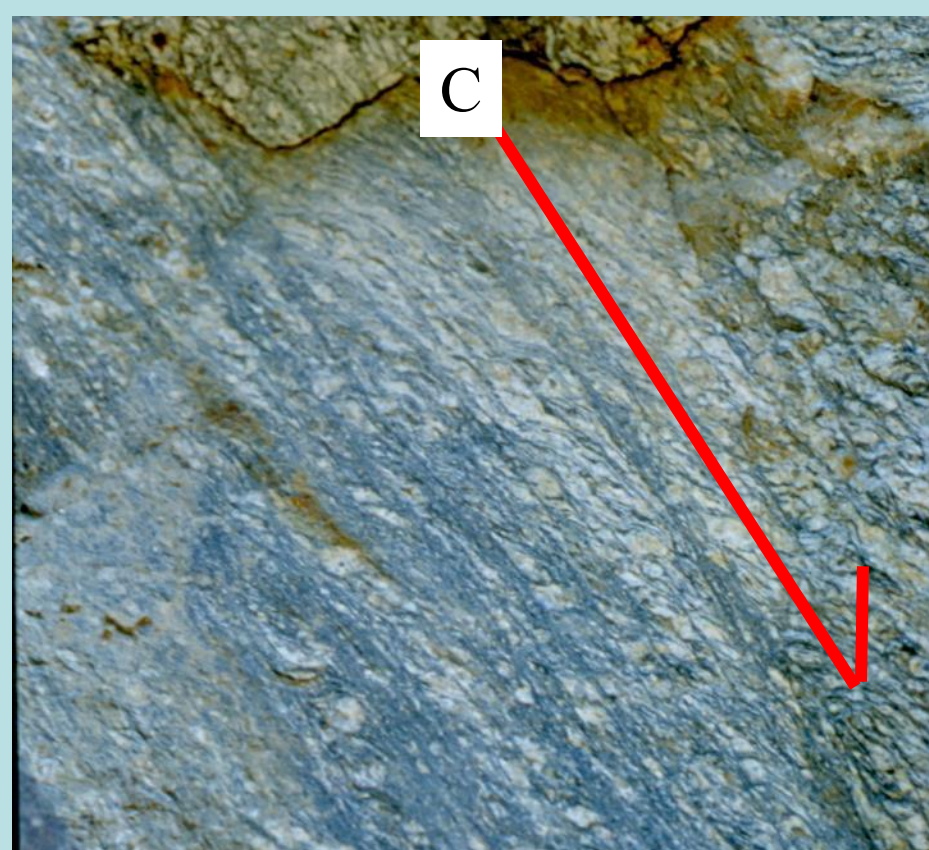




## 7. Structure S-C

Les plans C et les surfaces sigmoïdes S ont une cinématique en faille normale dans un granite porphyrique crétacé de Chine (à gauche) et dans la faille normale de Quiberon (en bas).

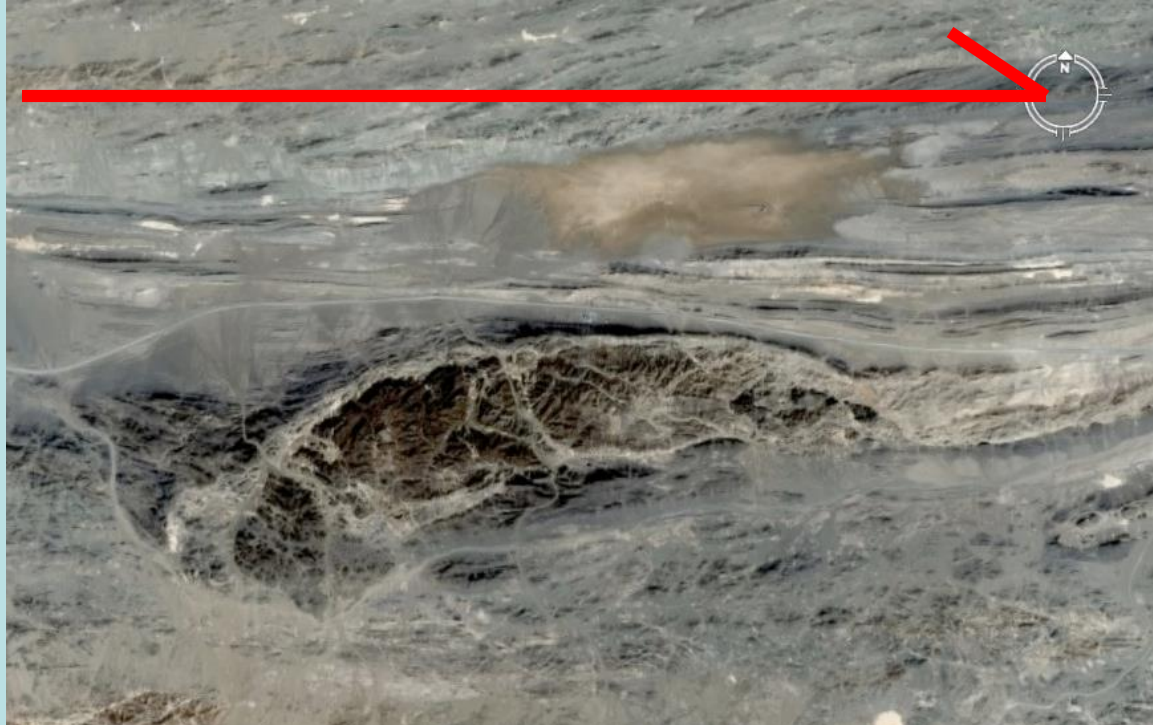
Dans les deux cas, la cristallisation du granite et la déformation ductile ont le même âge.





Plutons de gabbros de taille kilométrique déformés dans un cisaillement dextre.

En l'absence de donnée sur la texture du gabbro, il est impossible de décider s'il s'agit de plutons syn- ou anté-tectoniques



## 8. Bandes de cisaillement

Bande de cisaillement développée dans un orthogneiss.

A cette échelle et en l'absence d'autre information, il est difficile de décider s'il s'agit de structures S-C ou de bande de cisaillement.

Mais on sait par ailleurs que le protolithe est daté vers 600 Ma et que la déformation est d'âge crétacé.





## 8. Bandes de cisaillement



La foliation d'un orthogneiss est déformée par des bandes de cisaillement en faille normale. Au cours de la déformation les micas de l'orthogneiss sont chloritisés.

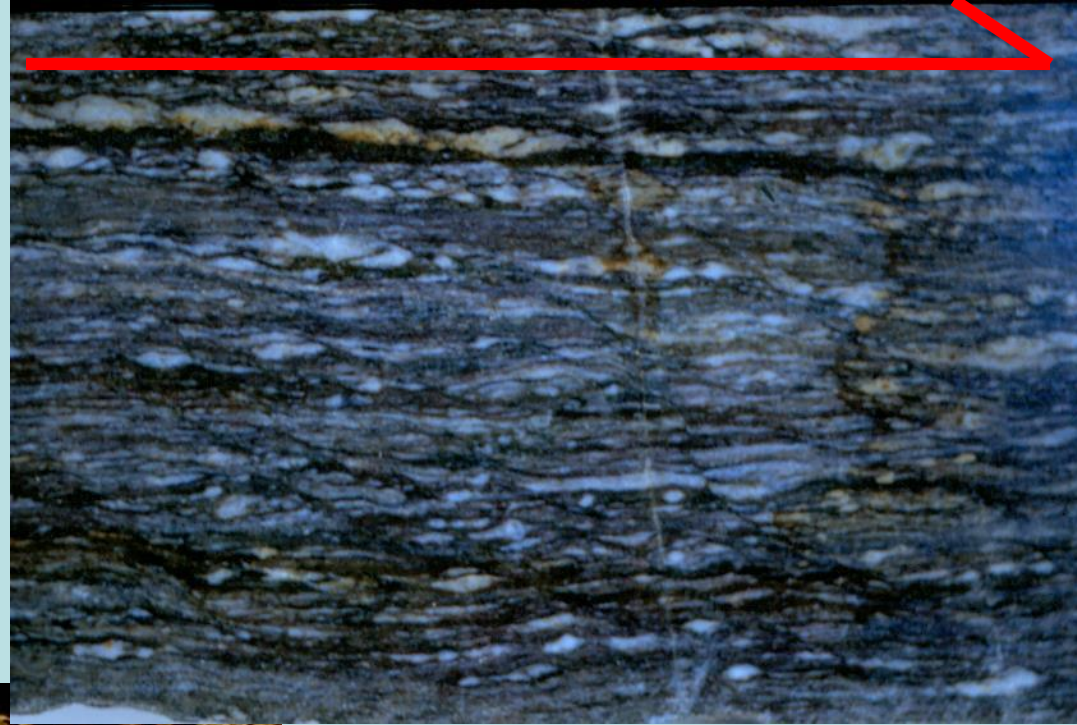
Orthogneiss d'Argentat

**Il ne s'agit pas de structures S-C**



## 8. Bandes de cisaillement

Bandes de cisaillement dans des roches métamorphiques. La foliation est recoupée par un réseau de microfailles ductiles qui abaissent le compartiment de droite.



Il ne s'agit pas de structures S-C



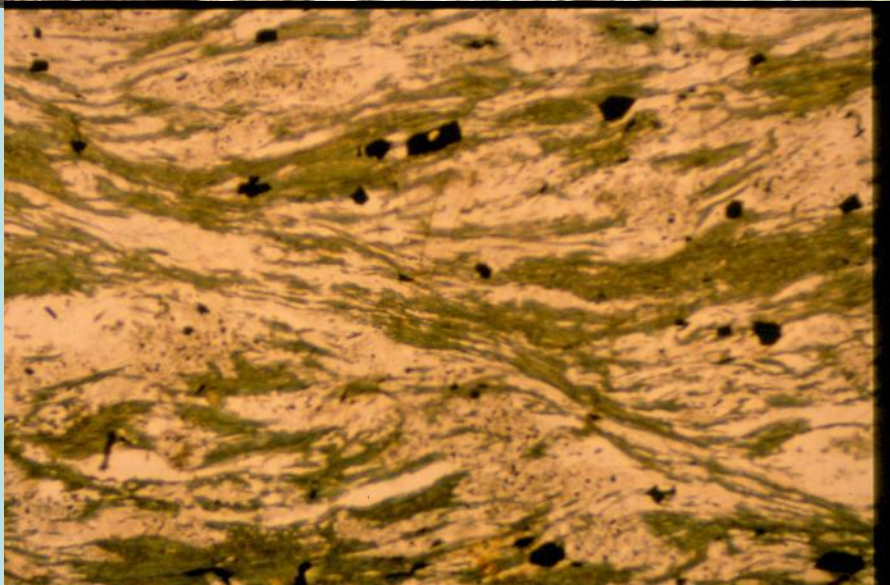


## 8. Bandes de cisaillement

Migmatite déformée  
postérieurement par un  
cisaillement senestre.  
La foliation migmatitique  
forme des figures sigmoïdes.

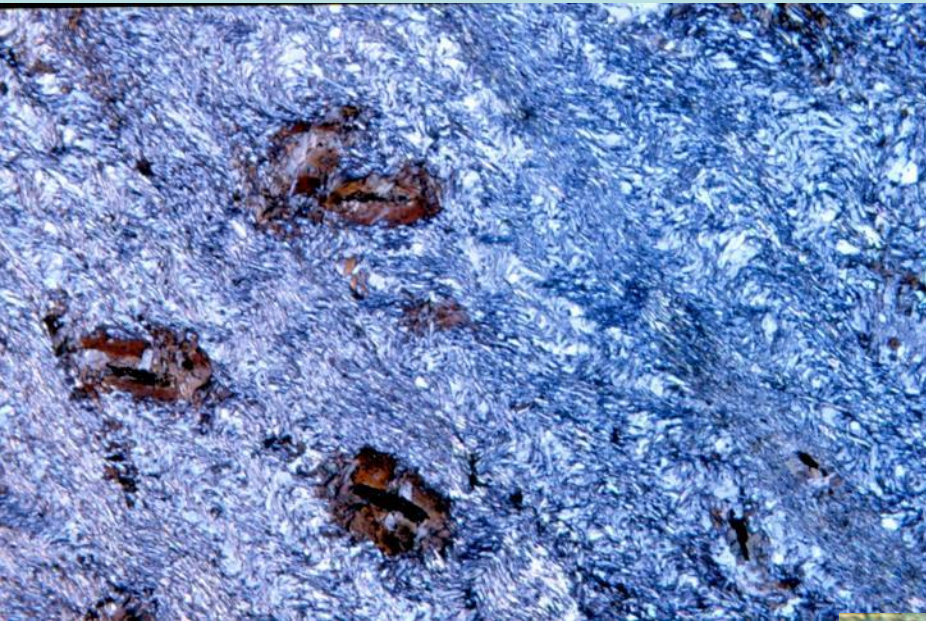


Bande de cisaillement dextre à  
chlorite.



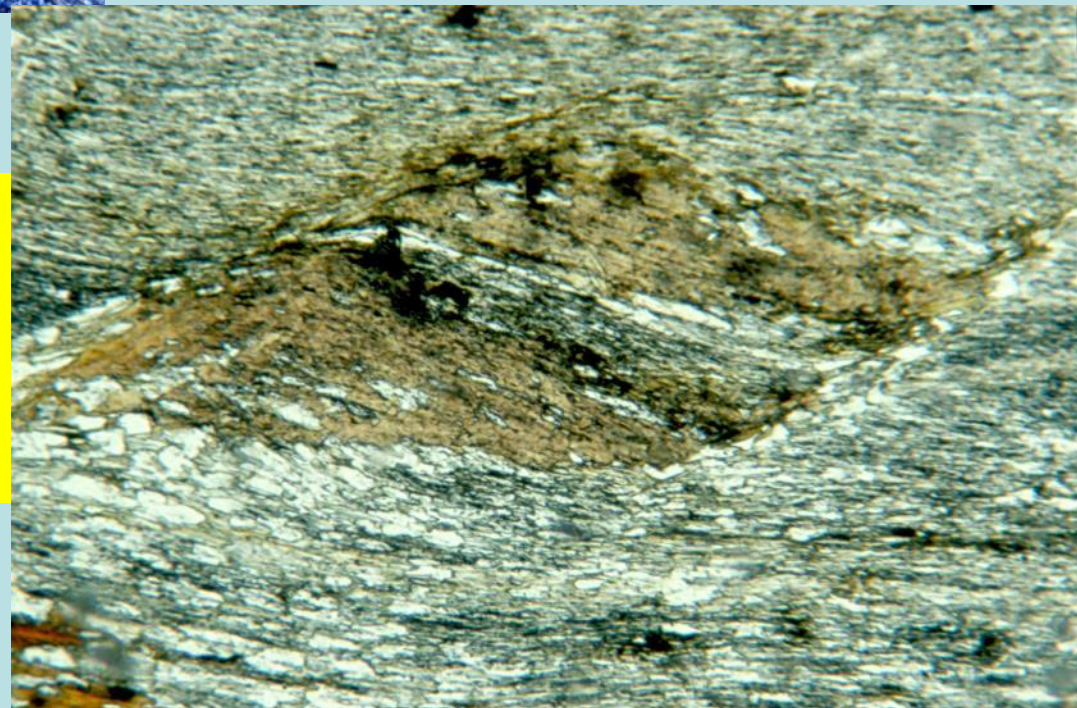


# Métamorphisme et déformation



Biotite post-tectonique superposée  
à une schistosité de crénulation.

Biotite post-foliale déformée  
postérieurement par un  
cisaillement  
vers la gauche.





# 5. La déformation hétérogène

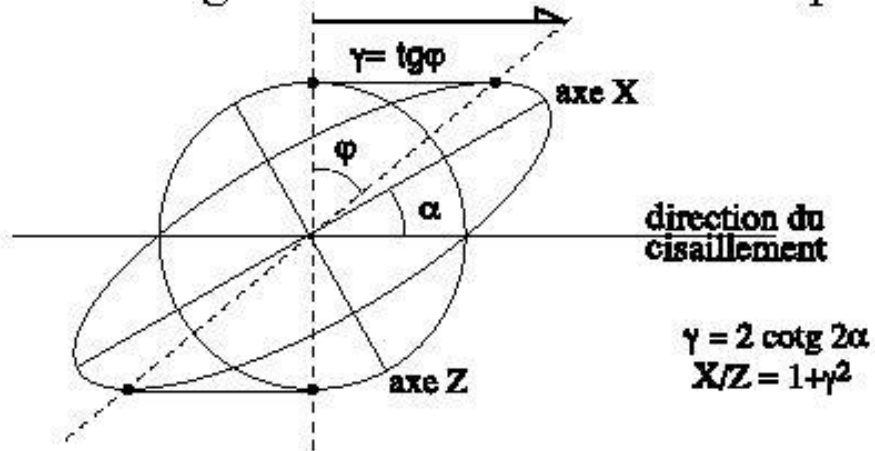
Dans la nature, la déformation homogène est rare. C'est une simplification. En réalité, la déformation hétérogène est la règle, en particulier à cause des variations lithologiques, mais aussi des particularités locales de la déformation.

On examinera ici 3 cas:

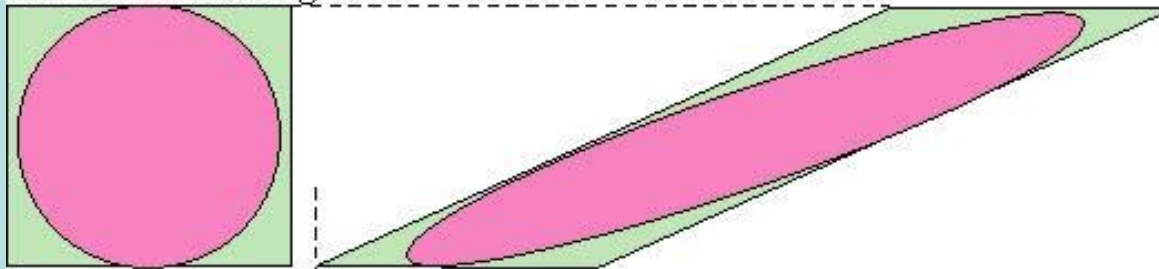
- a) Zones de cisaillement ductiles
- b) Plis curviplanaires et plis en fourreau
- c) Boudins et plis

# Déformation homogène et hétérogène

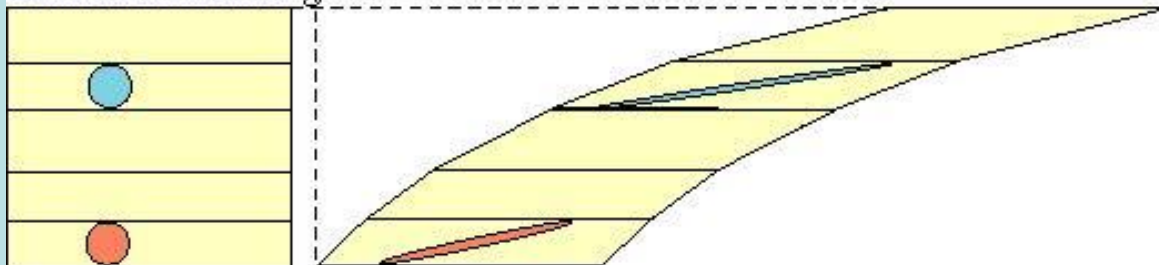
Schéma général du cisaillement simple



Déformation homogène



Déformation hétérogène

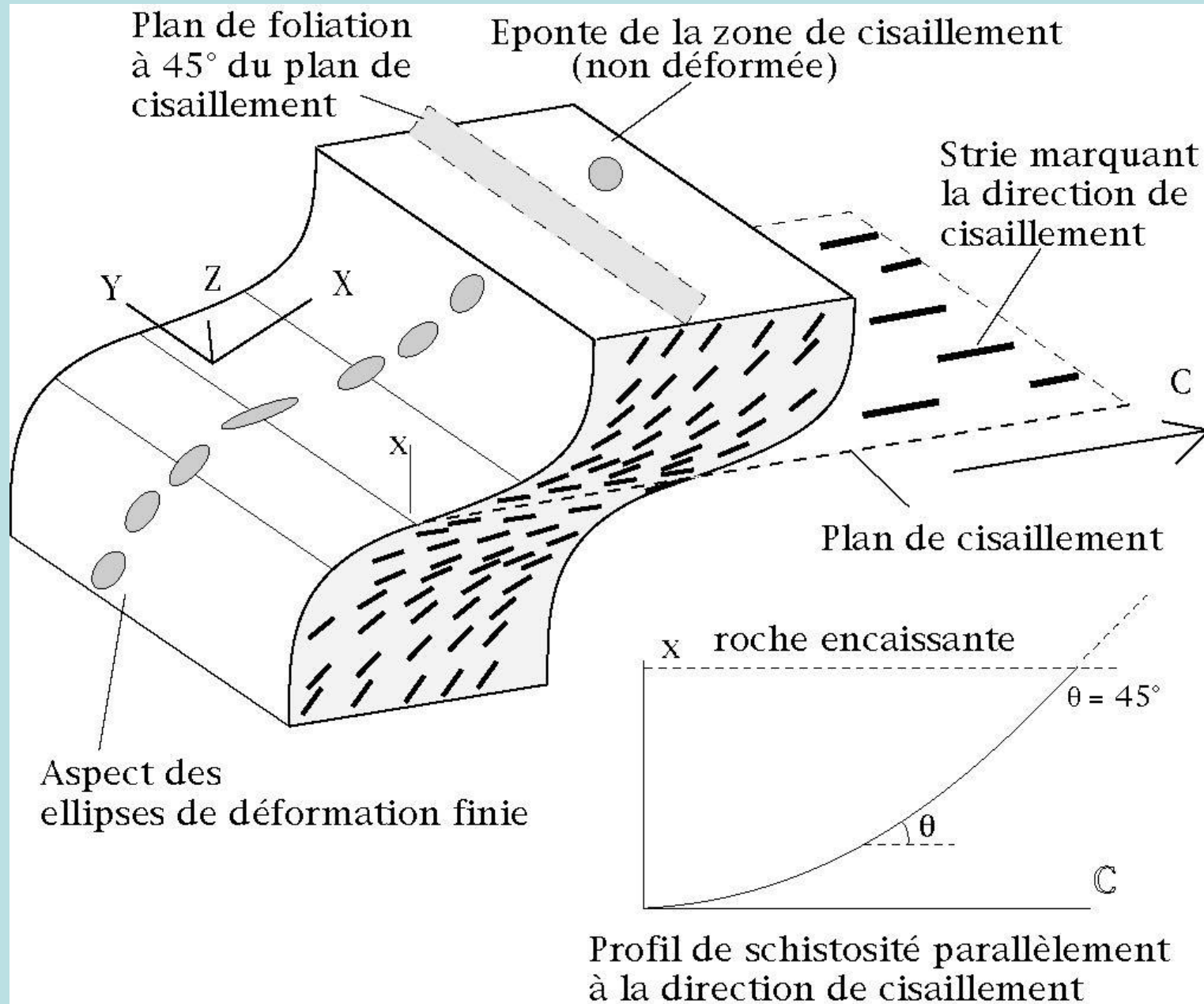


Dans une déformation hétérogène, les unités tectoniques peuvent se déformer avec des caractéristiques différentes.

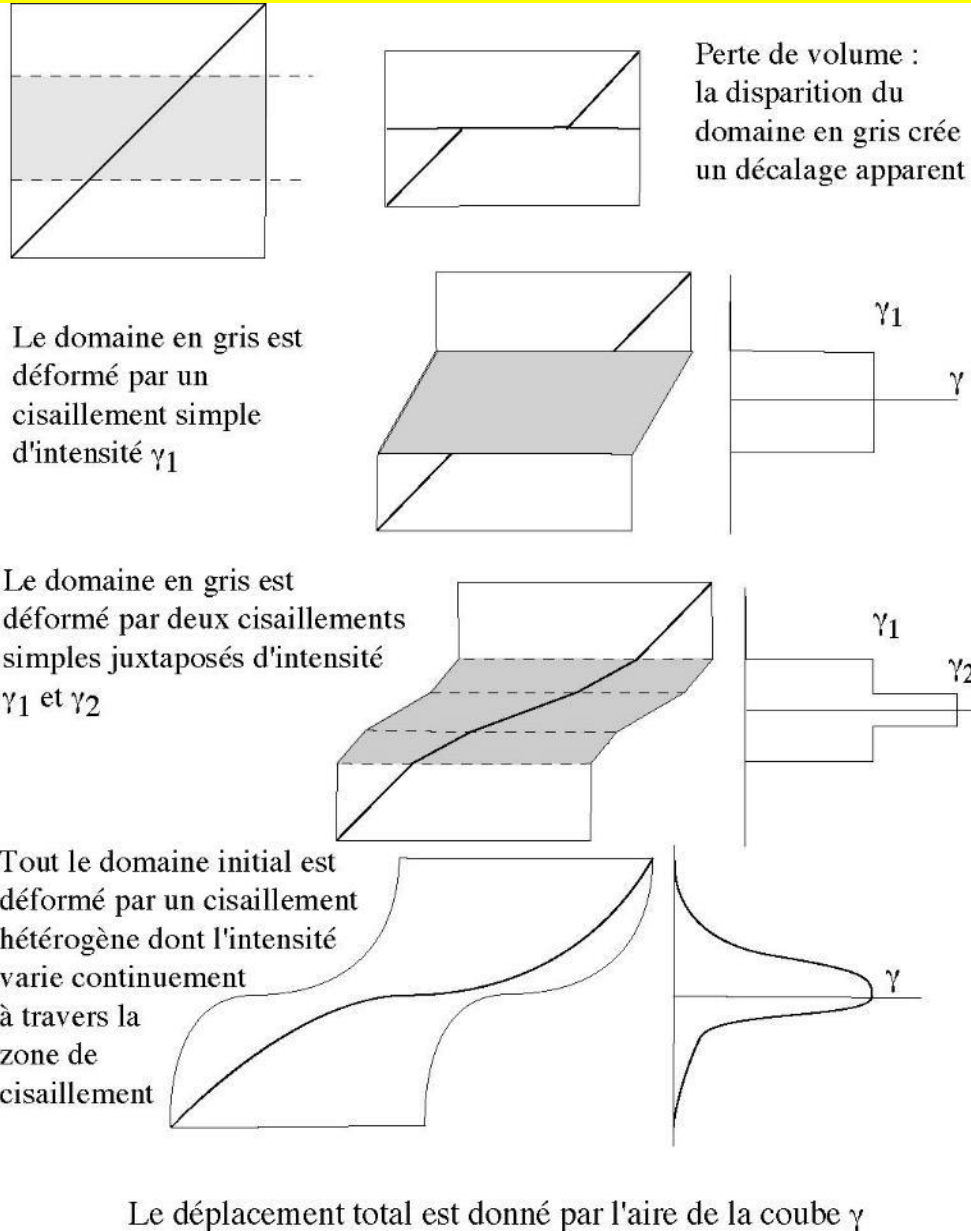
Les unités sont séparées par des **discontinuités**



## a) Zones de cisaillement ductiles (shear zones)



# Les zones de cisaillement ductiles ne doivent pas être confondues avec d'autres phénomènes



Perte de volume



Granite et filon déformés  
de manière ductile et  
hétérogène (Chine du sud)





Zone de cisaillement ductile  
dans un granite



Zones de cisaillement  
conjuguées



## b) Plis curviplanaires et plis en fourreau

La quantité de cisaillement varie le long du plan de cisaillement.  
Certains domaines vont plus vite que d'autres.

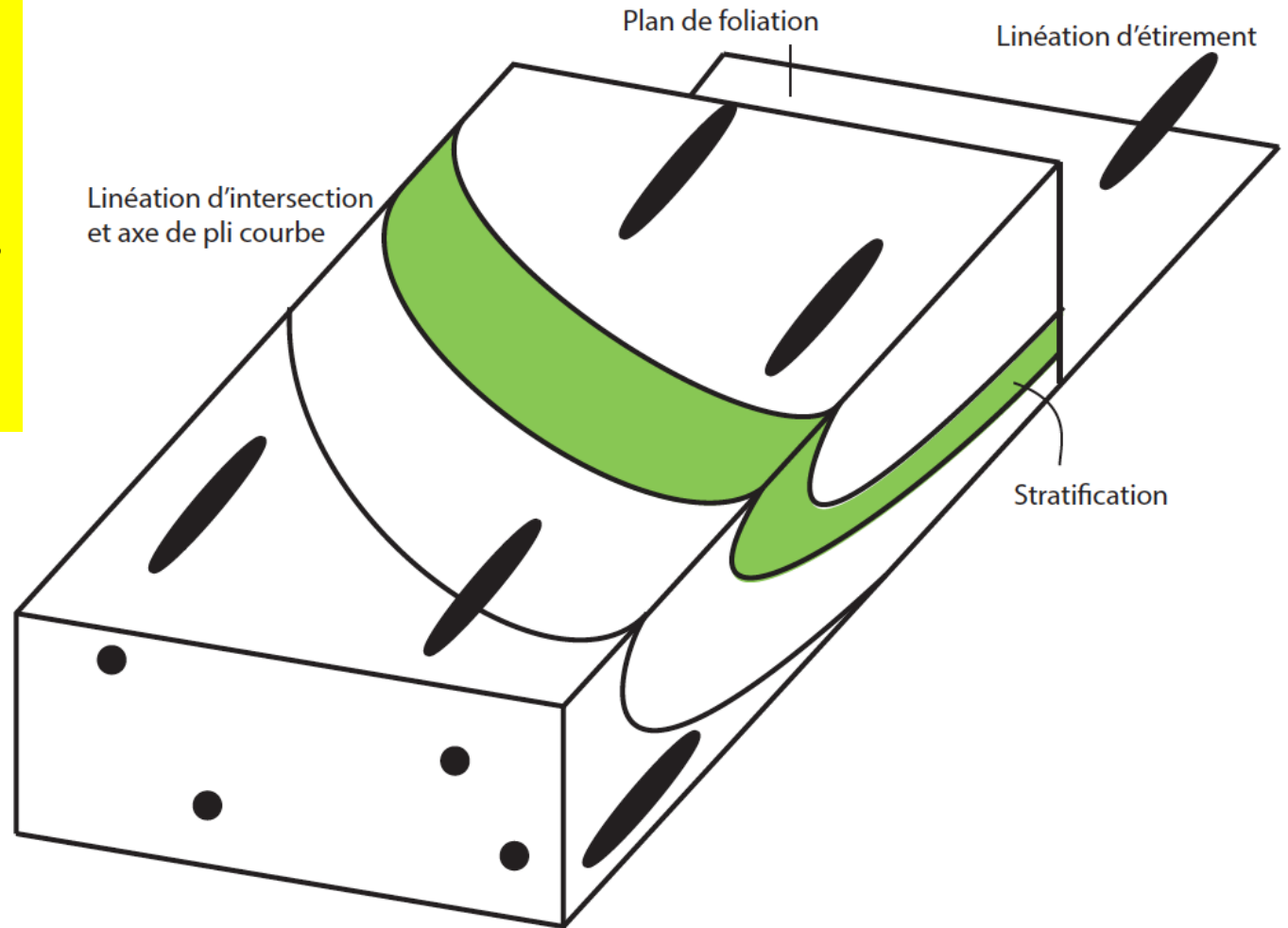
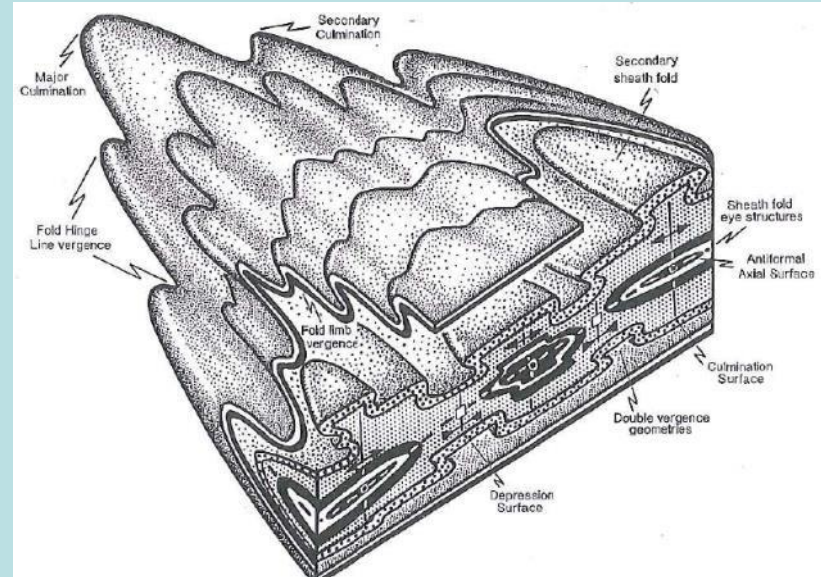
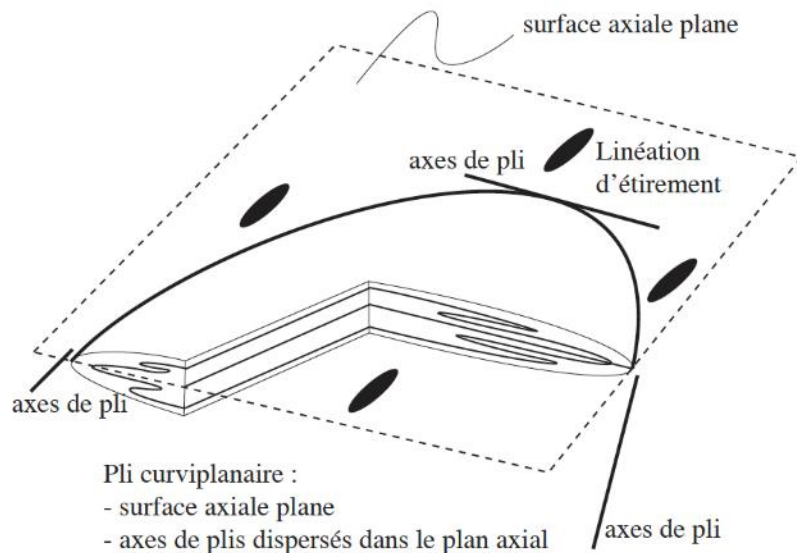


Schéma de linéation d'intersection entre les surfaces de stratification et de foliation.  
La linéation d'intersection courbe indique que le pli est à axe courbe.  
La linéation d'étirement garde une direction constante

## b) Plis curviplanaires et plis en fourreau



Dans un pli curviplanaire, l'axe est dispersé dans le plan axial .

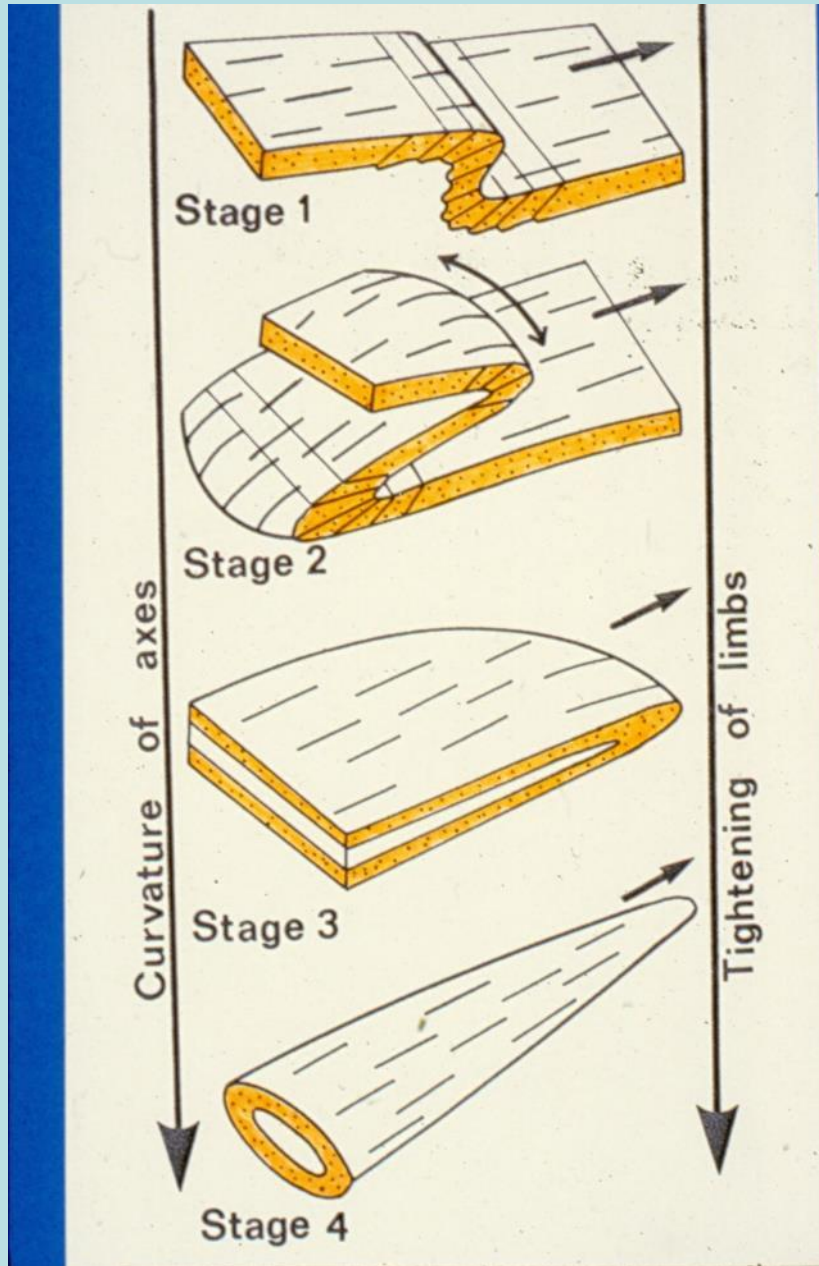
Un pli en fourreau forme une structure fermée.

Vue 3D d'un pli curviplanaire  
Néoprotérozoïque de Chine du S





# Modèle d'évolution d'un pli curviplanaire



Pli en fourreau dans un marbre  
mésozoïque du Japon SW



# Plis en fourreau formés pendant le cisaillement ductile dans la nappe des schistes lustrés de Corse.

Section XY



Section YZ



Coupes sériees à  
travers un pli  
en fourreau

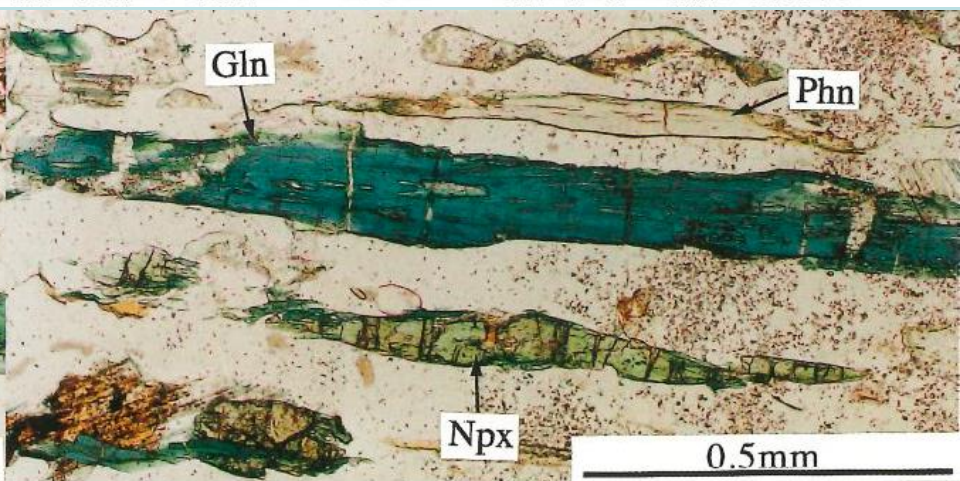
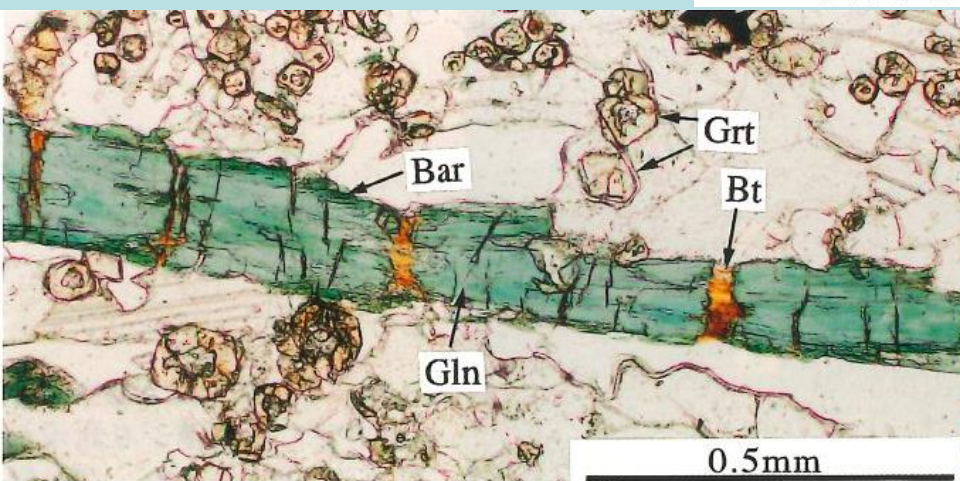




Plis en fourreau dans  
les schistes bleus  
mésozoïques du Japon  
SW.



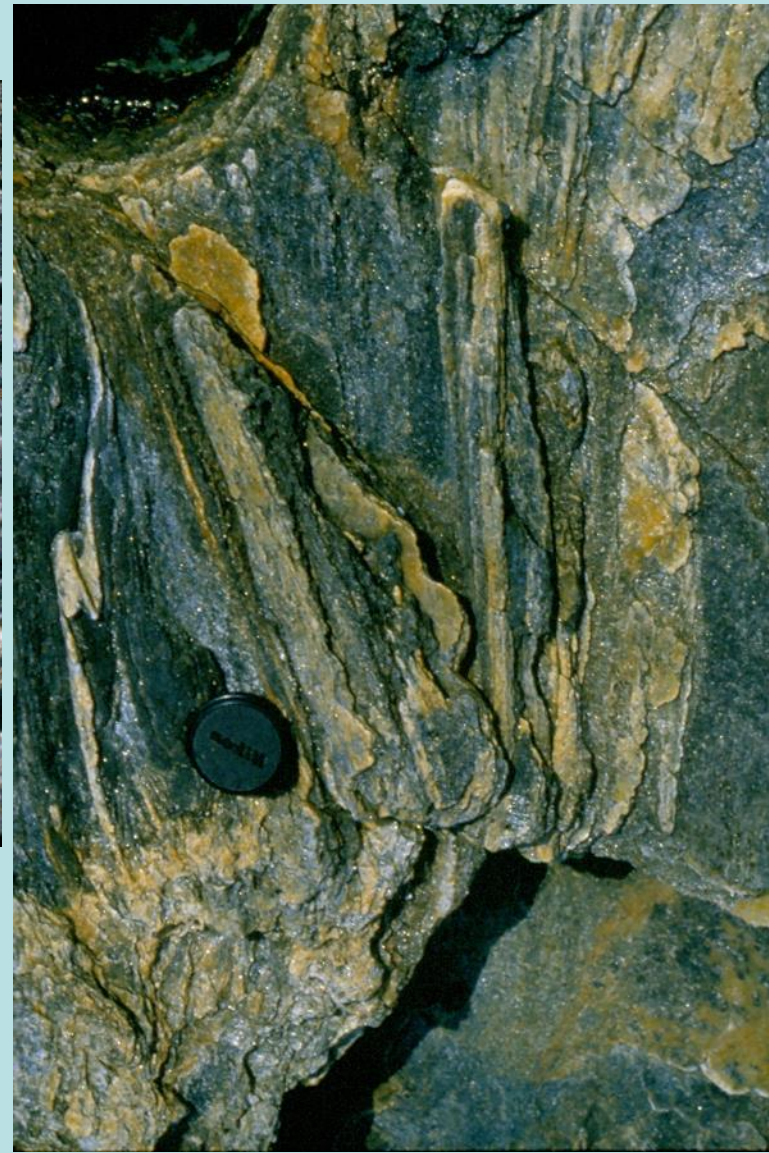
第3図. 第2図の露頭の中央部のさや状褶曲のクローズアップ。ペンの方向は引き伸ばし線構造の方向を示す。







Pli en fourreau. Chaîne mésozoïque  
du Japon SW. Section YZ



Vue 3D d'un pli en fourreau  
dégagé par l'érosion ( Japon SW)

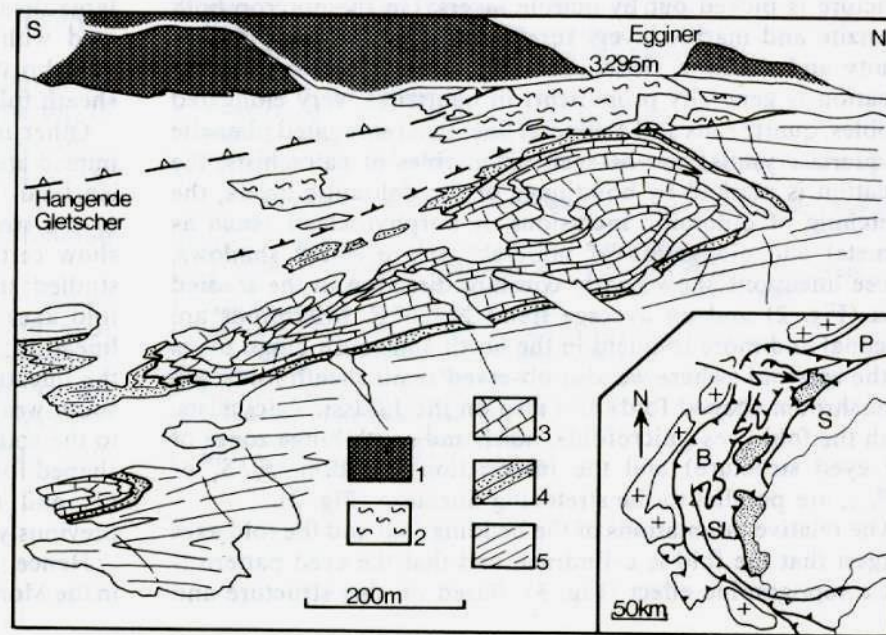


# nature

INTERNATIONAL WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE  
ISSN 0028-280X

ALPINE FOLDING  
AND DUCTILITY

Pli en fourreau de taille  
kilométrique dans la nappe du  
Mont Rose (Alpes suisses)



1: ophiolite, 2: calcshistes, 3: marbres  
4: quartzites, 5: micaschistes



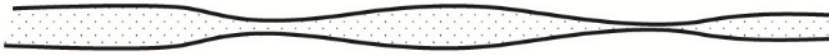
## c) Boudins

La déformation devient discontinue à cause de la lithologie



①

couches non boudinées (sans contraste rhéologique avec la matrice)



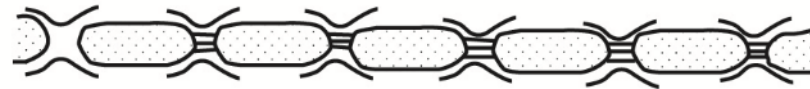
②

structure «pinch-and-swell»  
(en chapelet)



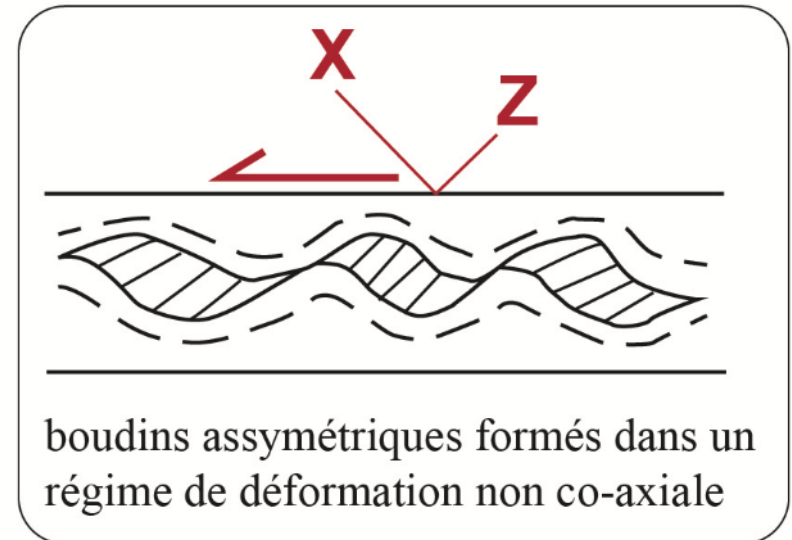
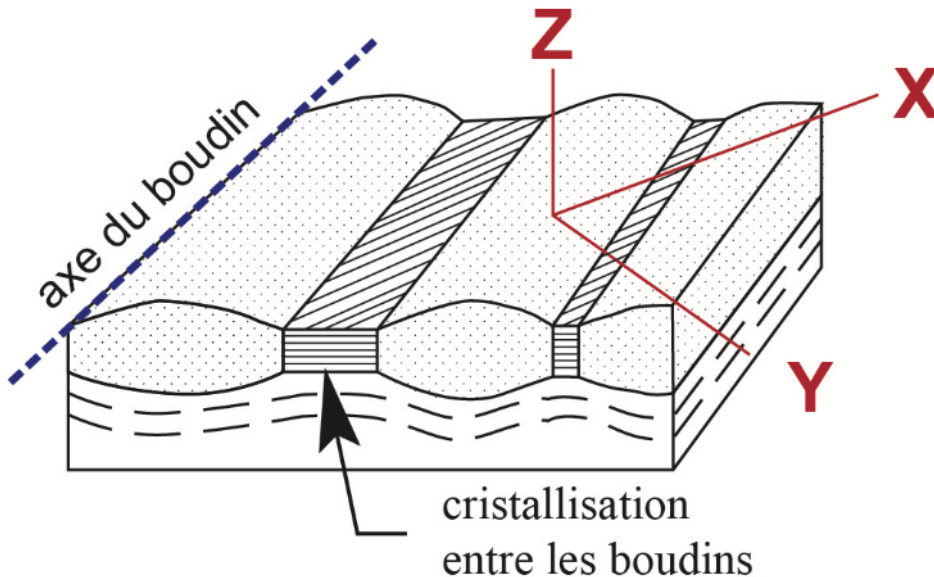
③

boudins lenticulaires séparés ou encore jointifs



④

boudins séparés par des cristallisations fibreuses







Boudins plurimétriques  
dans des marbres de haute  
pression (Syros, Cyclades)

Niveau de quartz boudiné  
dans des micaschistes,  
section XZ.  
Micaschistes du Japon SW





# Niveaux de stilpnomélane boudiné dans des micaschistes du Japon.

L



section oblique par  
rapport aux axes X, Y, Z  
de la déformation finie

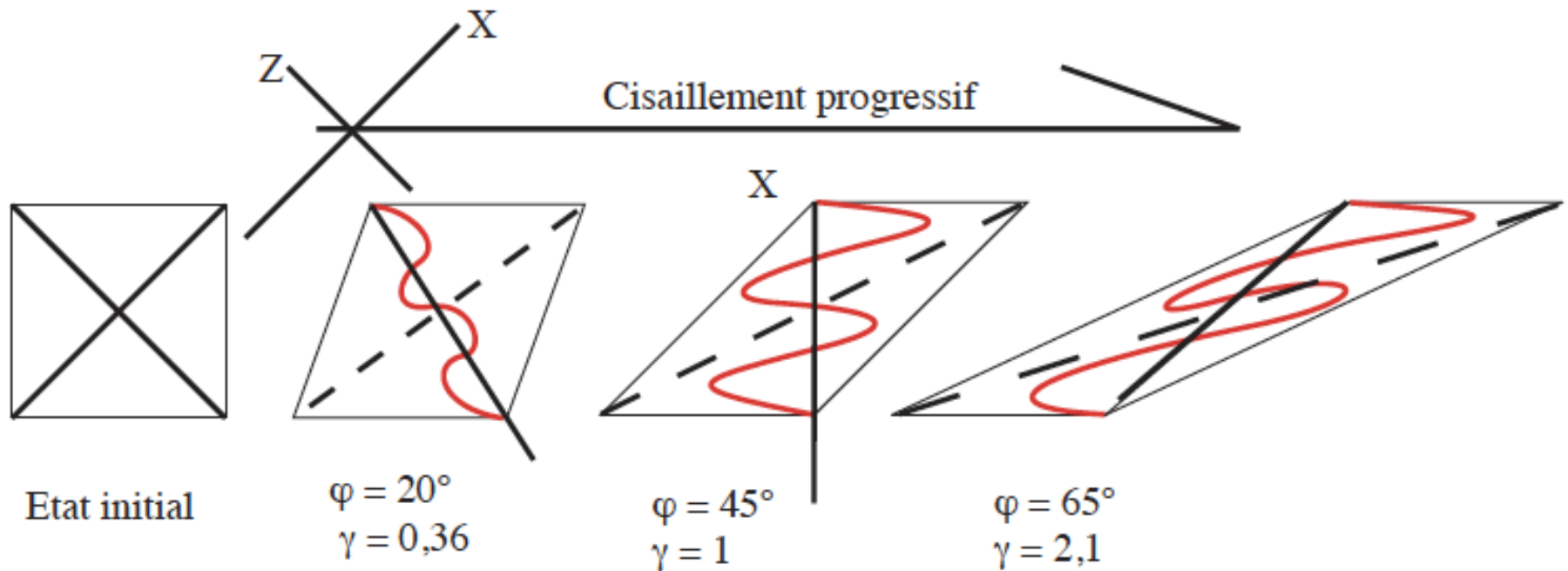


Section XY de la  
déformation finie.  
Plan de foliation



**plis et boudins** résultent d'un contraste rhéologique avec leur encaissant

Déformation hétérogène de filons lors d'un cisaillement simple. Un filon dans le secteur en raccourcissement (Z) se plisse. Un filon dans le secteur en allongement (X) se boudine.



Le style de plissement dépend aussi du contraste rhéologique entre des roches de lithologie et de minéralogie variée.

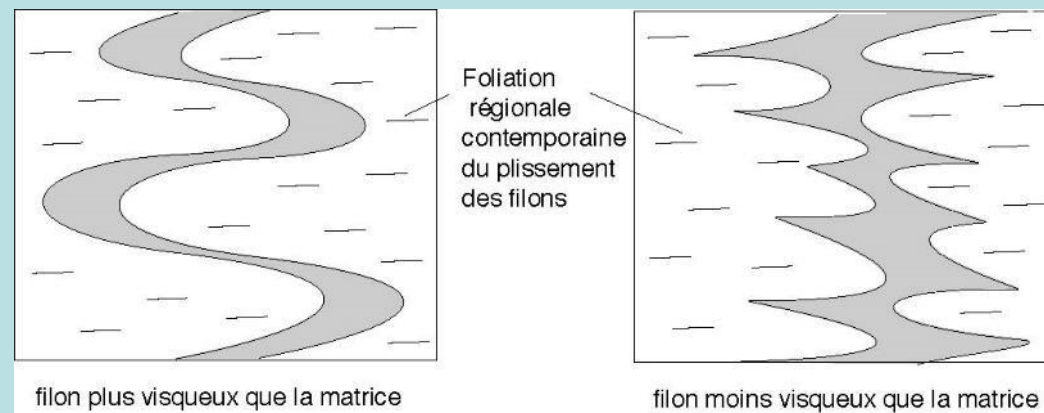


Fig V-2 Allures de filons plissés en fonction du contraste de viscosité avec leur encaissant.

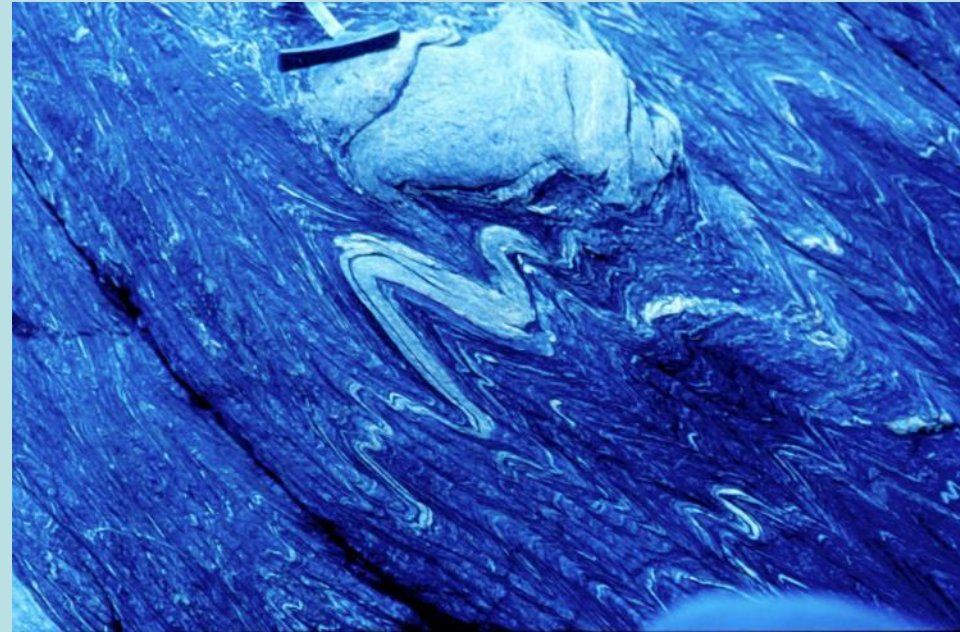
Exemple de filons plissés et boudinés recoupant des gneiss. (Chine du sud).







Filon granitique plissé dans un Gneiss, Ce type de pli est parfois appelé « pli ptygmatique » (Montagne Noire, S du Massif Central)



Déformation hétérogène dans un conglomérat. Noter la différence de comportement entre les deux galets. Chaîne miocène de Taiwan

## 6. L'analyse dynamique des roches

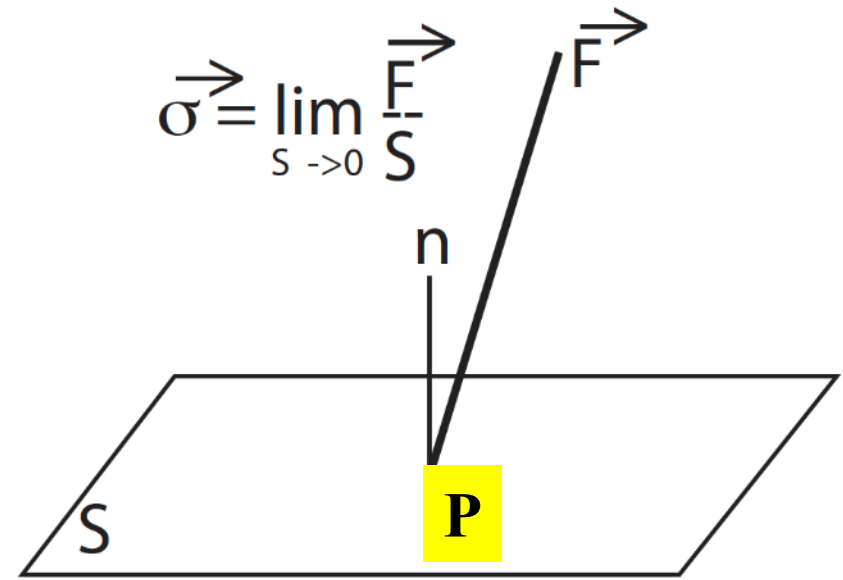
**Et la contrainte dans tout ça?**

Comment à partir de structures géométriques et de mouvements peut on déterminer les **forces** responsables de la déformation?



# Vecteur contrainte et tenseur des contraintes

## 1. Vecteur contrainte en un point P



## 2. Tenseur des contraintes en un point P

En un point  $P$ , on peut définir un vecteur contrainte relatif à un plan  $S$ . Or, il existe une infinité de plans passant par le point  $P$ , donc on définit une infinité de vecteurs contrainte en  $P$ . Cet ensemble de vecteurs contrainte est appelé « **tenseur des contraintes en  $P$**  ».

### 3. Tenseur des contraintes en un point et ellipsoïde des contraintes

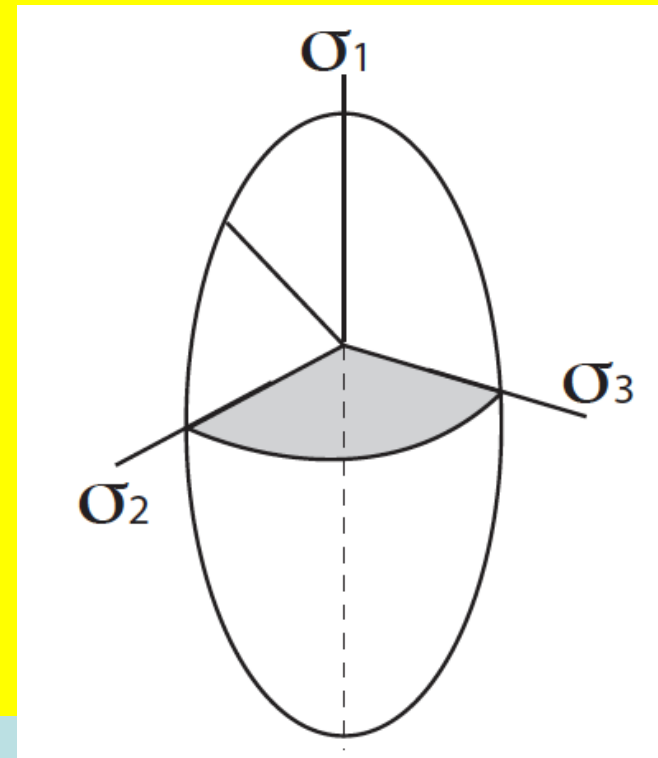
Le tenseur des contraintes peut être représenté par un ellipsoïde de révolution possédant 3 axes des symétrie dits « **axes principaux** ».

Ils possèdent la propriété de ne pas avoir de composante cisailante  $\tau=0$

Les 3 vecteurs principaux:

- $\sigma_1$ : contrainte principale maximum
- $\sigma_2$ : contrainte principale intermédiaire
- $\sigma_3$ : contrainte principale minimum

*Ne pas confondre ellipsoïde des contraintes  
et  
ellipsoïde des déformations.*

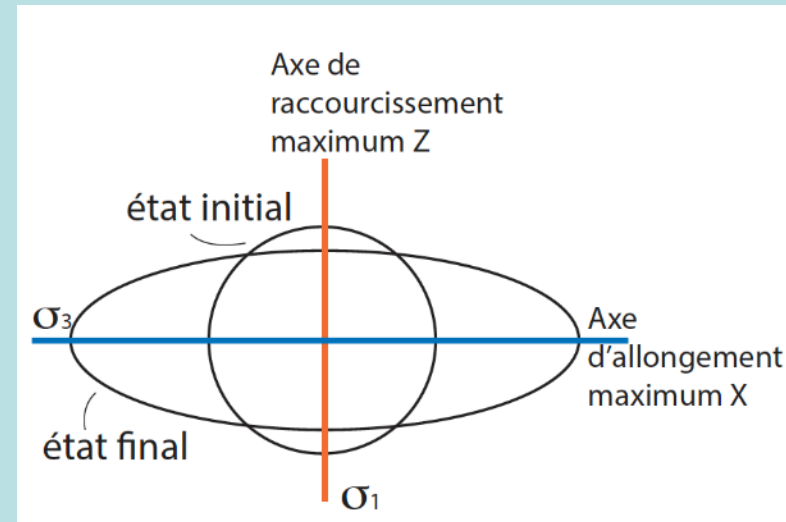




# Relations géométriques entre contrainte et déformation

## *Regime coaxial*

Les axes de déformation X et Z sont respectivement parallèles aux axes des contraintes principales  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$

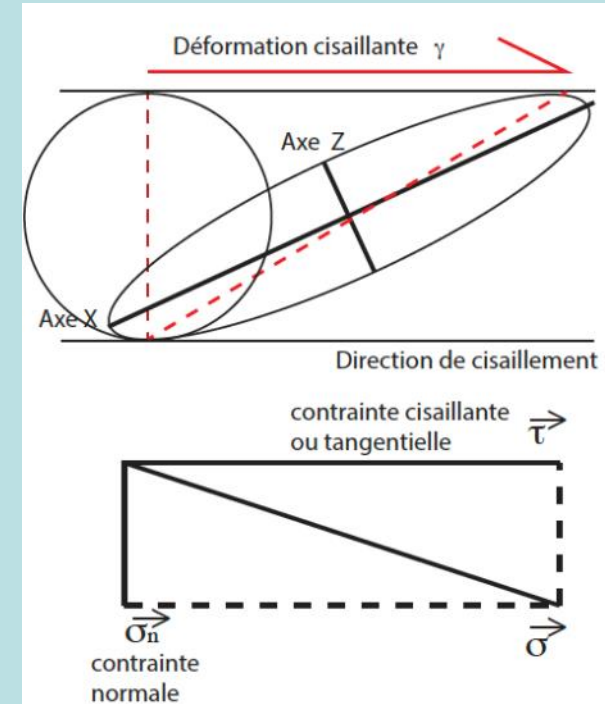
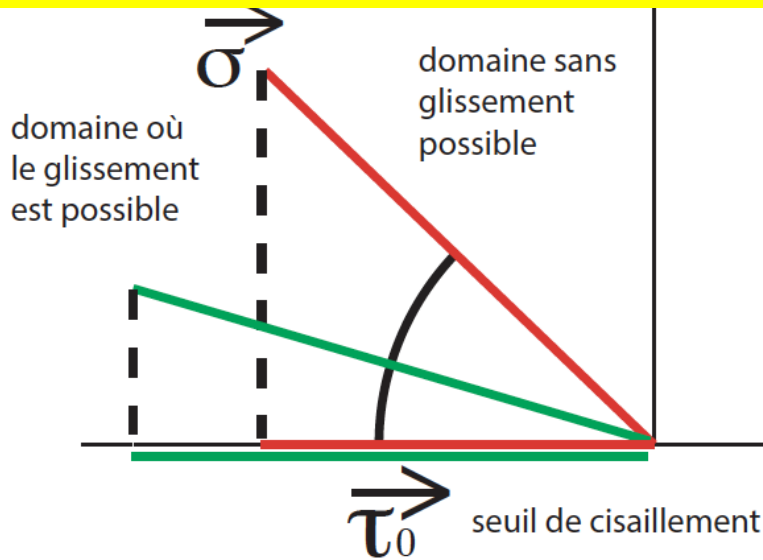


# Relations géométriques entre contrainte et déformation

## *Regime non-coaxial*

Pour qu'une déformation non-coaxiale puisse se produire, il faut que la composante cisailante  $\tau$  de la contrainte soit supérieure à une valeur  $\tau_0$  dit « seuil de contrainte ».

$$\tau > \tau_0$$

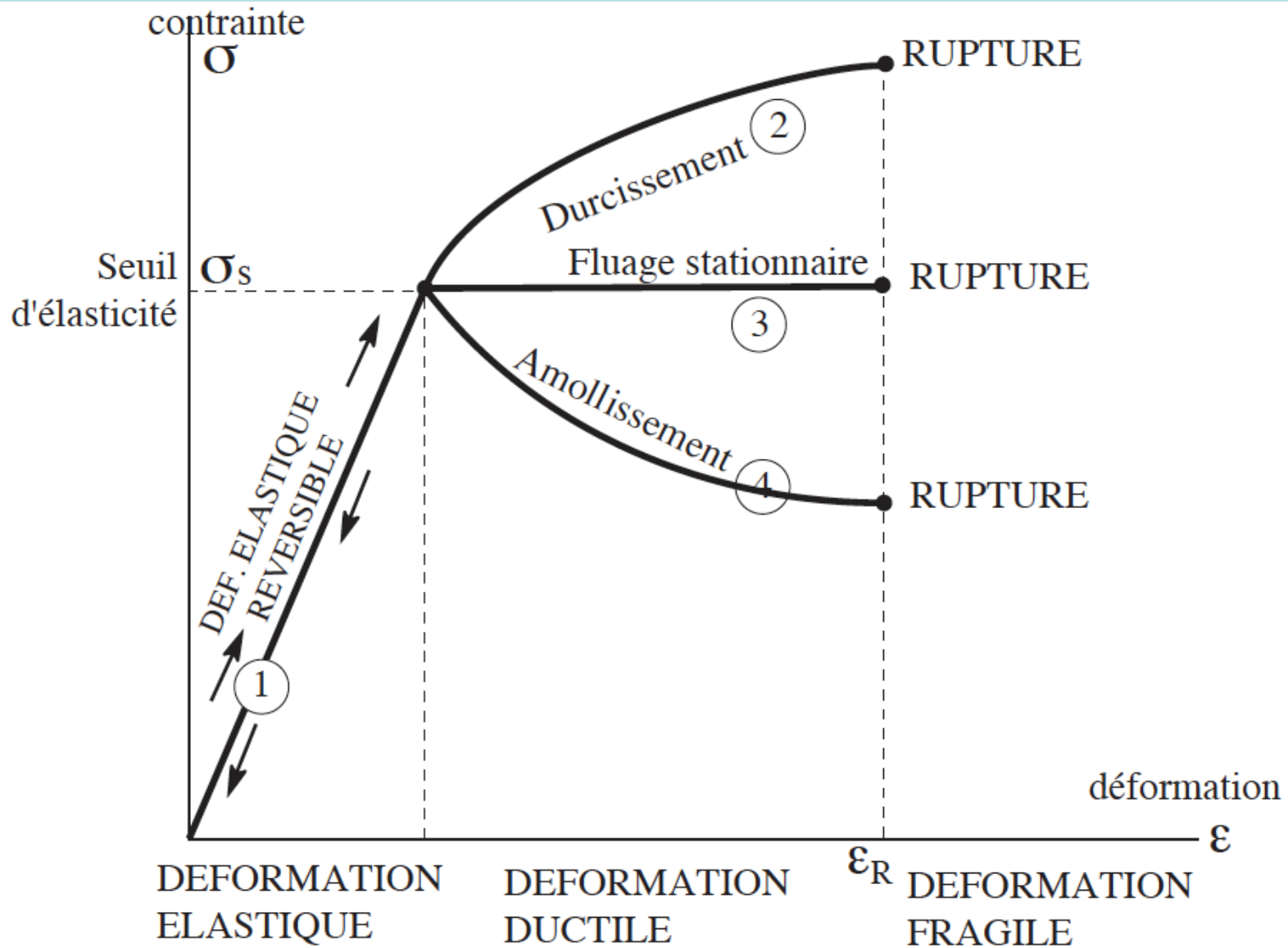


Si la composante cisailante  $\tau$  de la contrainte est inférieure au seuil de contrainte  $\tau$ ,  $\tau < \tau_0$  il n'y a pas de glissement possible.

***Il existe donc une indétermination sur l'orientation des axes de contrainte***



# Relations scalaires entre contrainte et déformation



# Exemple d'application



Microtectonique et  
Grande tectonique en Montagne Noire

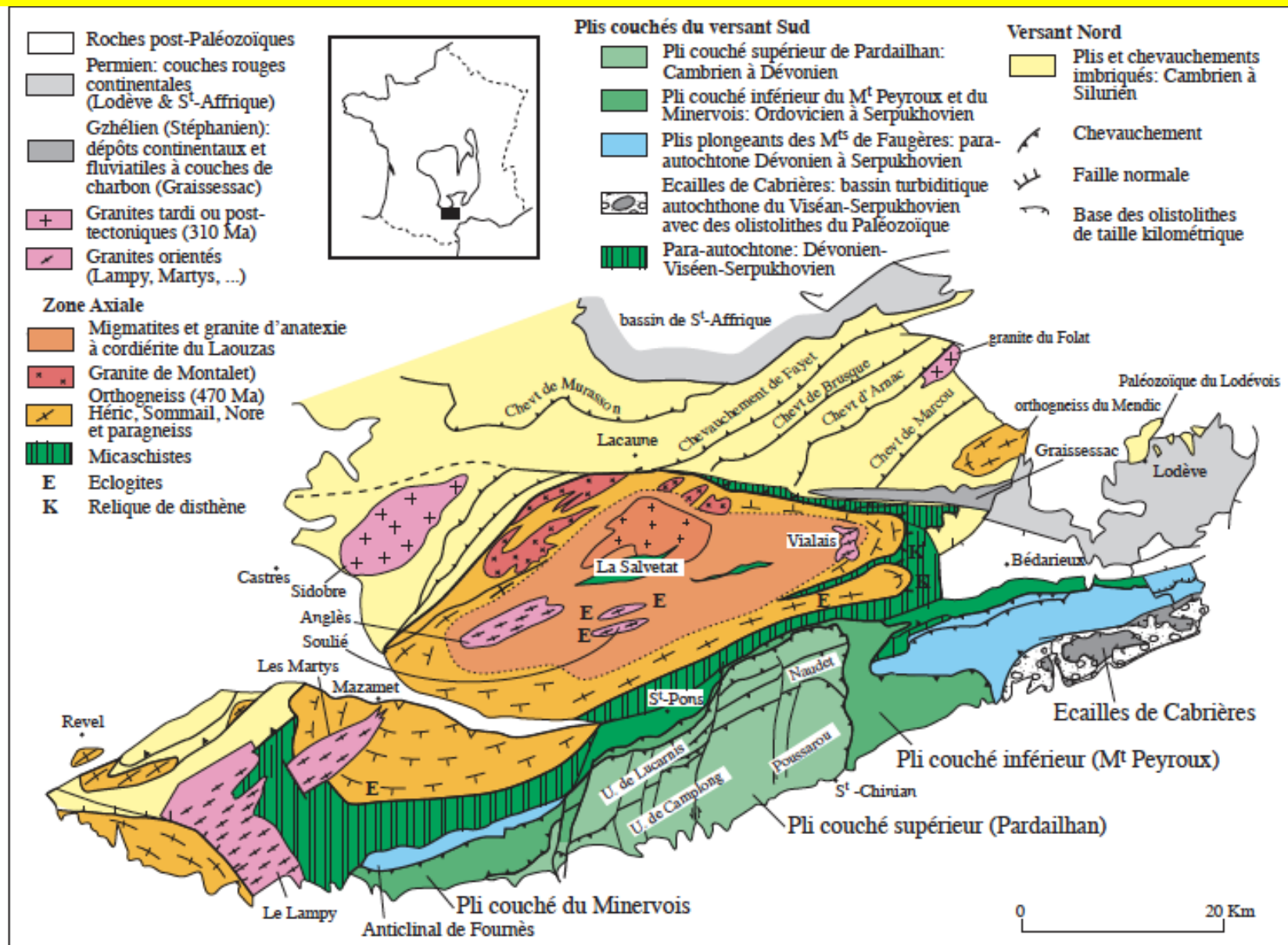


# La Montagne Noire appartient à la marge nord gondwanienne du Massif central



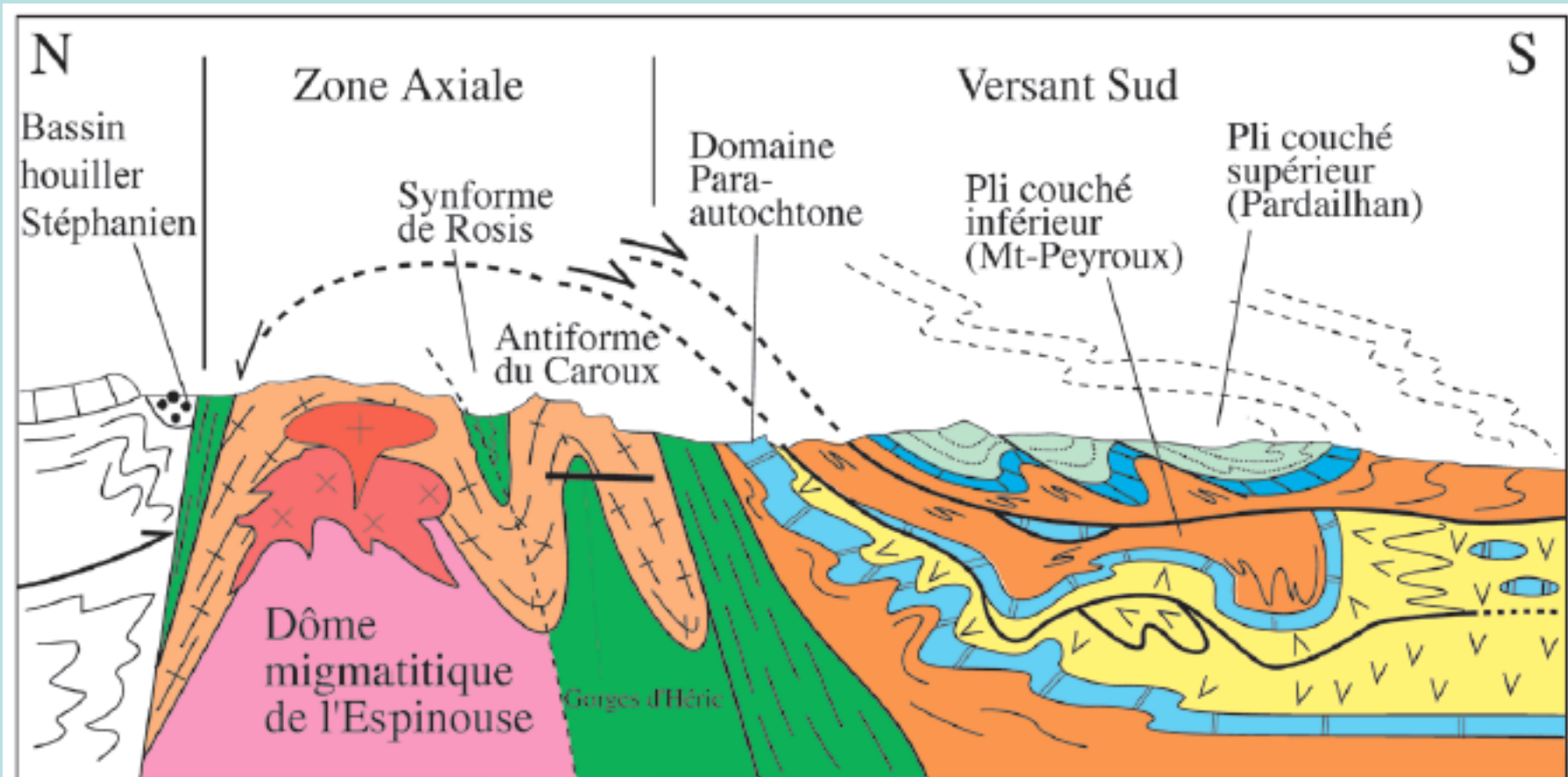


En Montagne Noire, le versant sud est structuré en plis couchés et la zone axiale est un dôme migmatitique surimposé au plissement. Les deux ensembles présentent plusieurs phases de déformation ductile successives superposées.





# Coupe des plis couchés du versant Sud et de la zone axiale de la Montagne Noire



Zone Axiale

Southern and Northern Sides





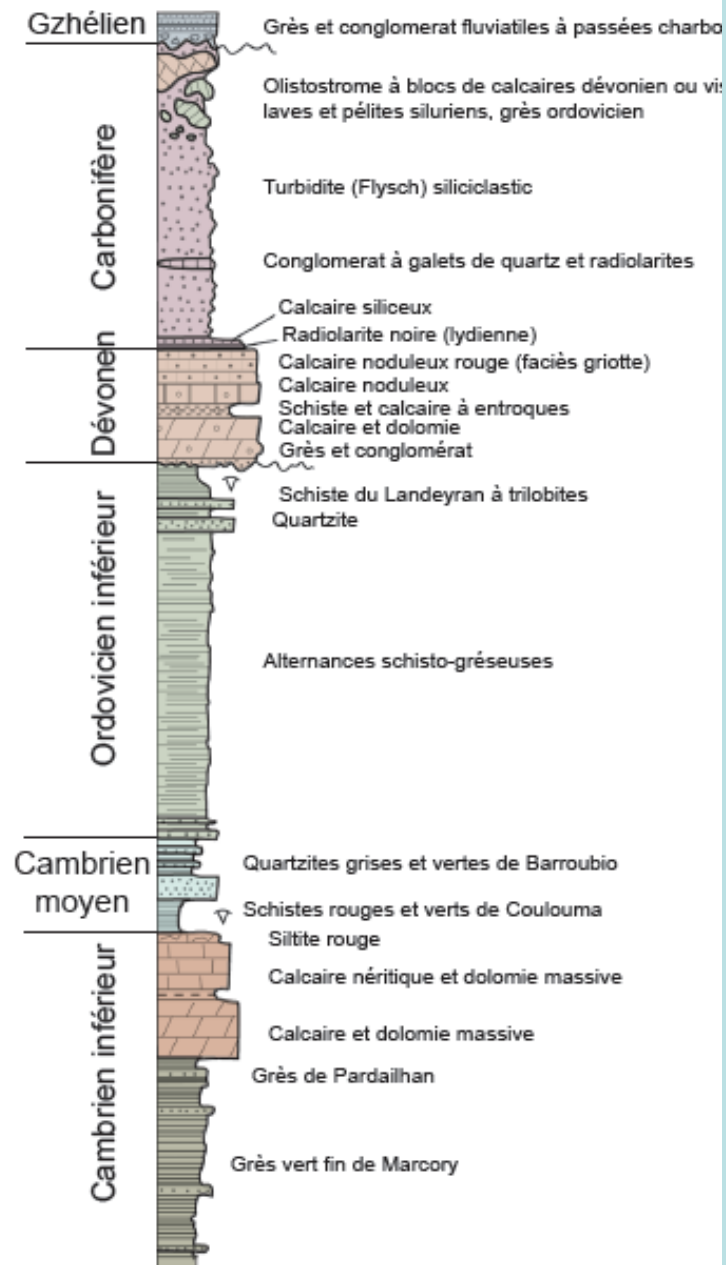
# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur-Serpukhovien





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur-Serpukhovien

La lithologie contrôle partiellement la déformation

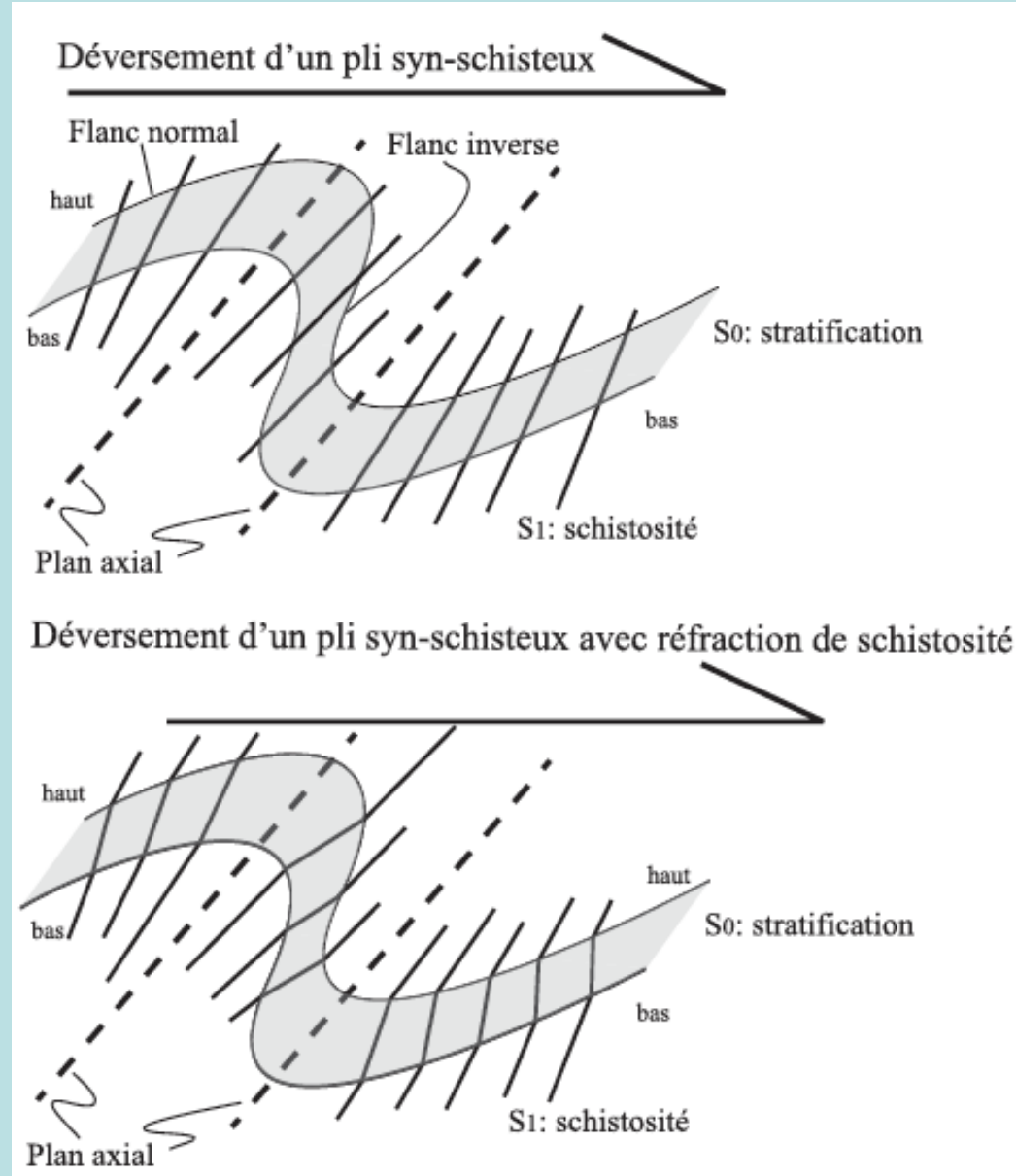


# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur-Serpukhovien

**La question:**  
**Quel est le sens de déversement des plis couchés?**

Le principe de base: relations stratification (S0) - schistosité (S1) dans une série sédimentaire dont on connaît la polarité stratigraphique.

NB: ne vaut que pour une déformation monophasée.





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

Le pli classique du Moulin de Graïs



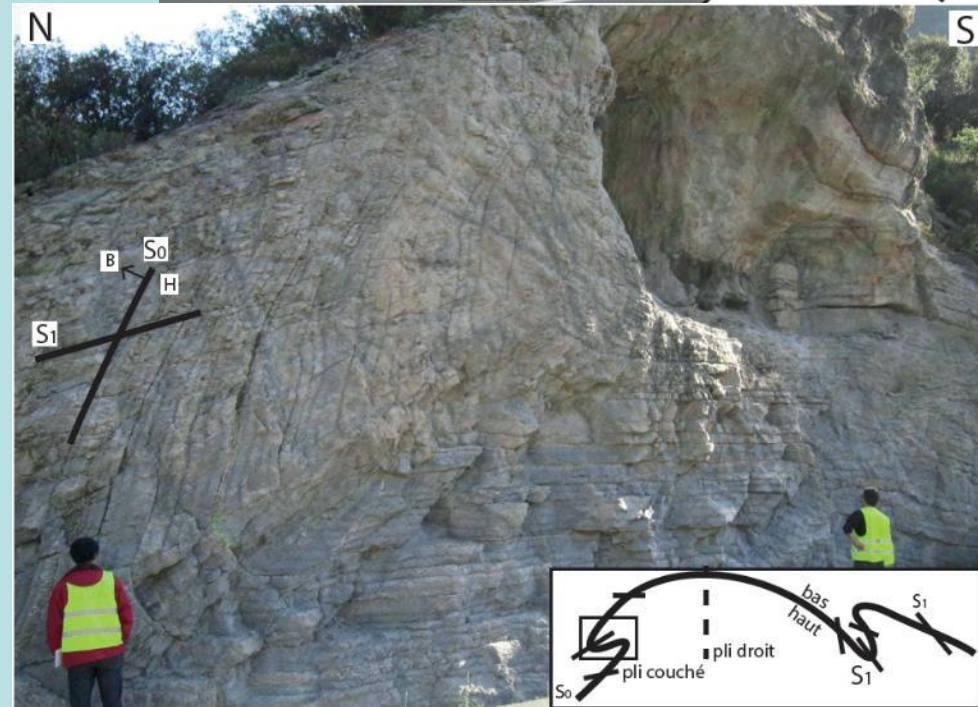
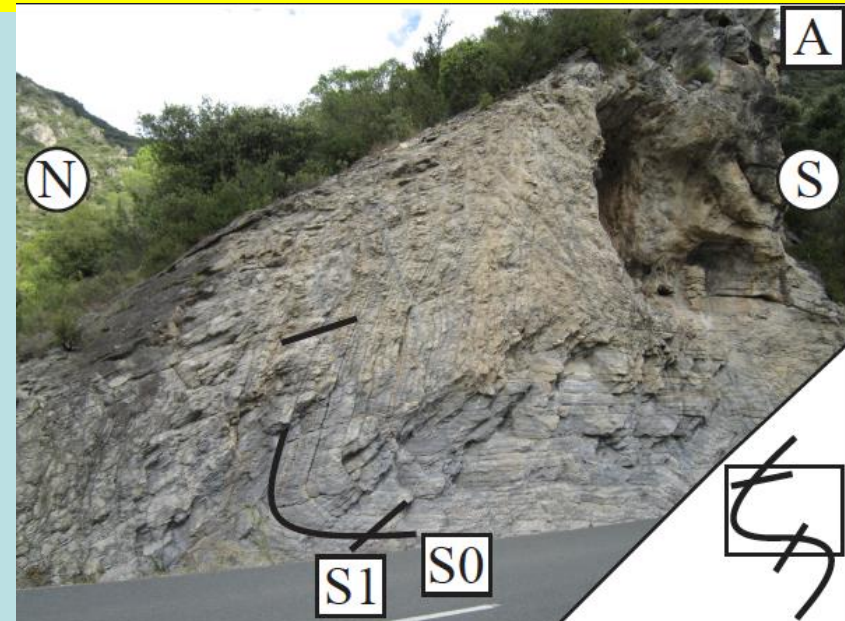


# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

Le pli classique du Moulin de Graïs

Interprétation locale

Interprétation régionale





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

Le pli classique du Pont de Poussarou

N

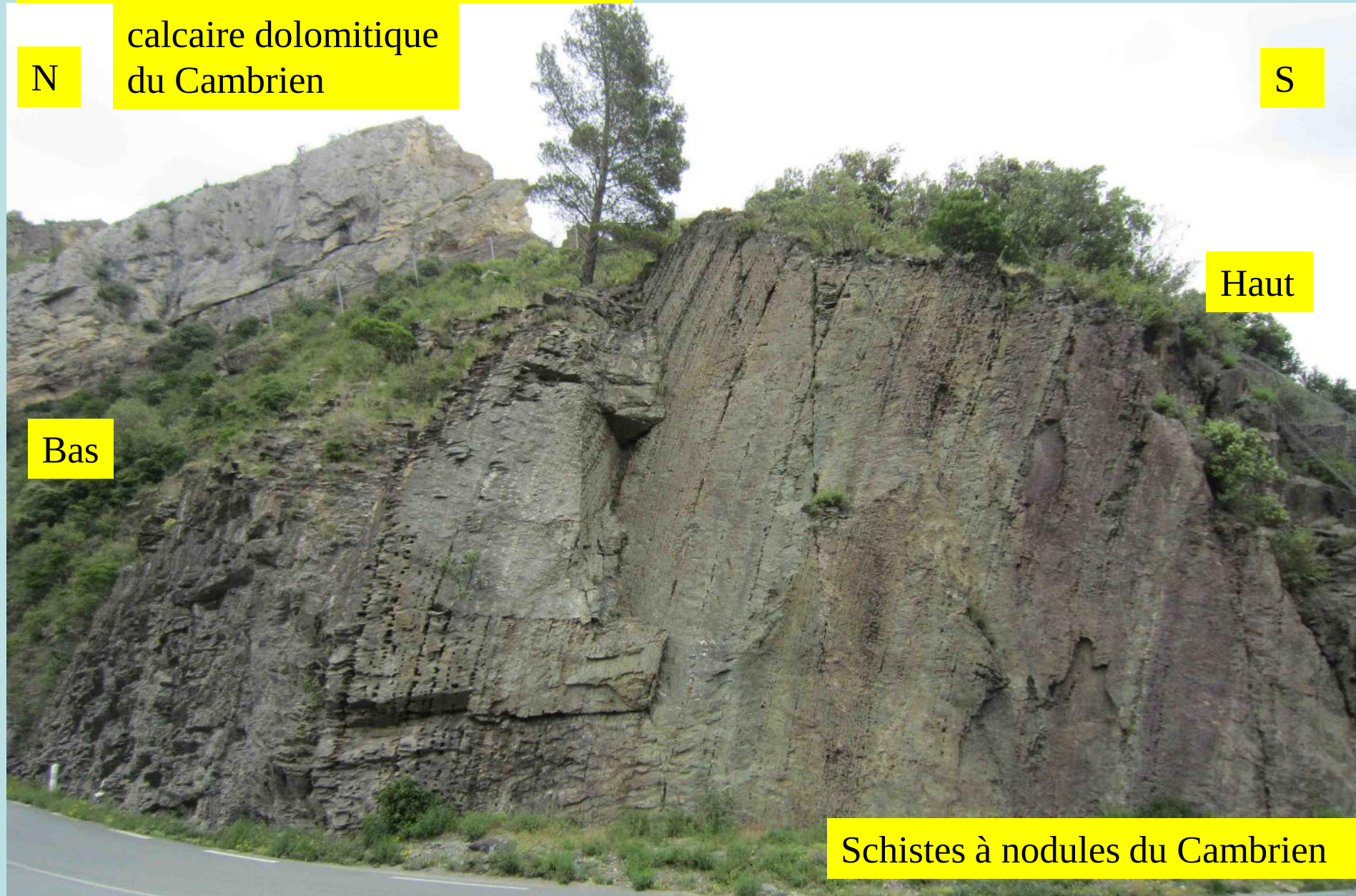
calcaire dolomitique  
du Cambrien

S

Haut

Bas

Schistes à nodules du Cambrien





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

Le pli classique du Pont de Poussarou

Interprétation locale





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

Le pli classique du Moulin de Graïs



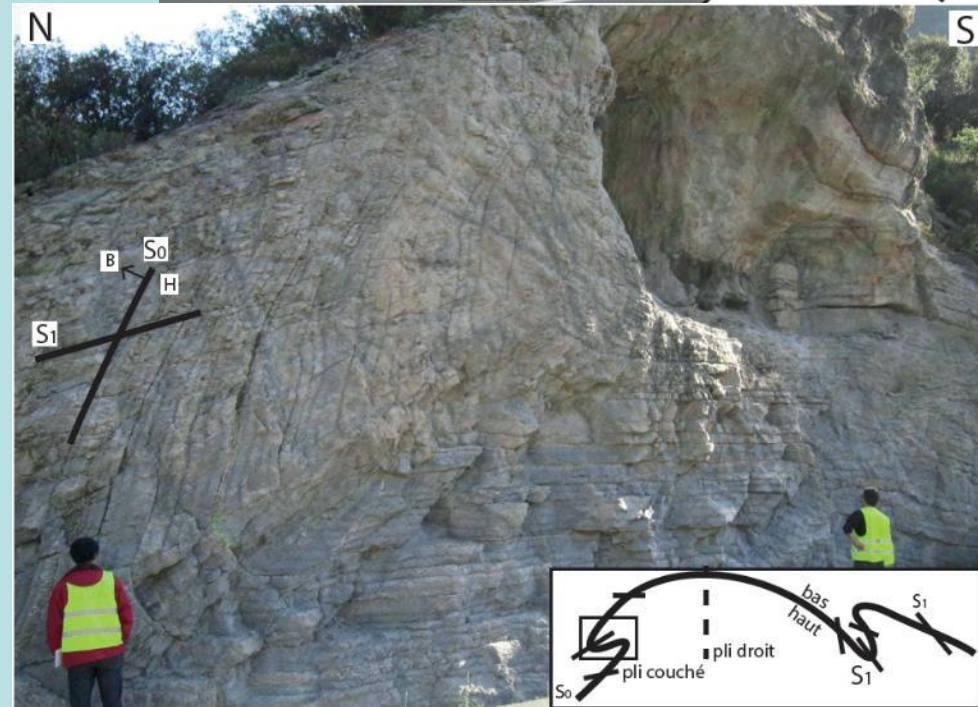
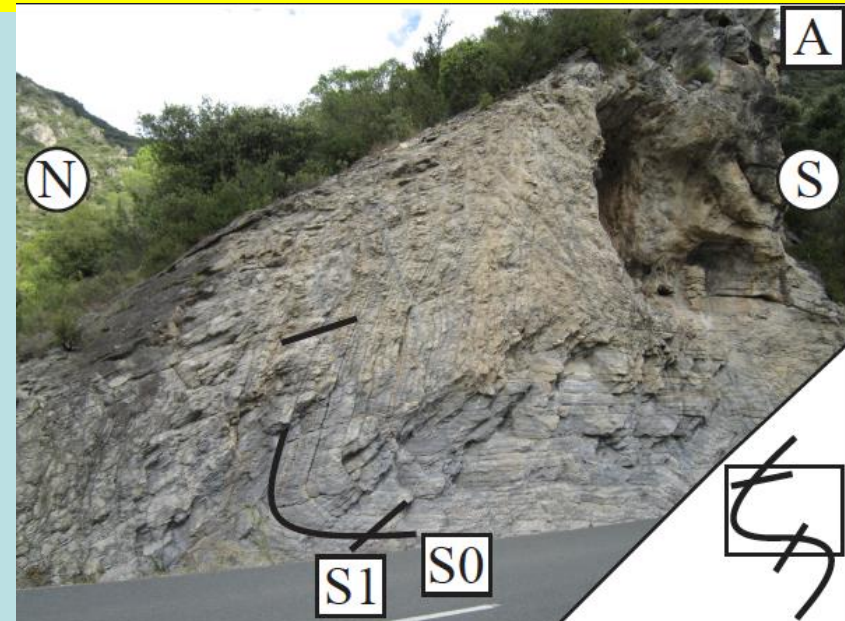


# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

Le pli classique du Moulin de Graïs

Interprétation locale

Interprétation régionale





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

Le pli classique du Pont de Poussarou

N

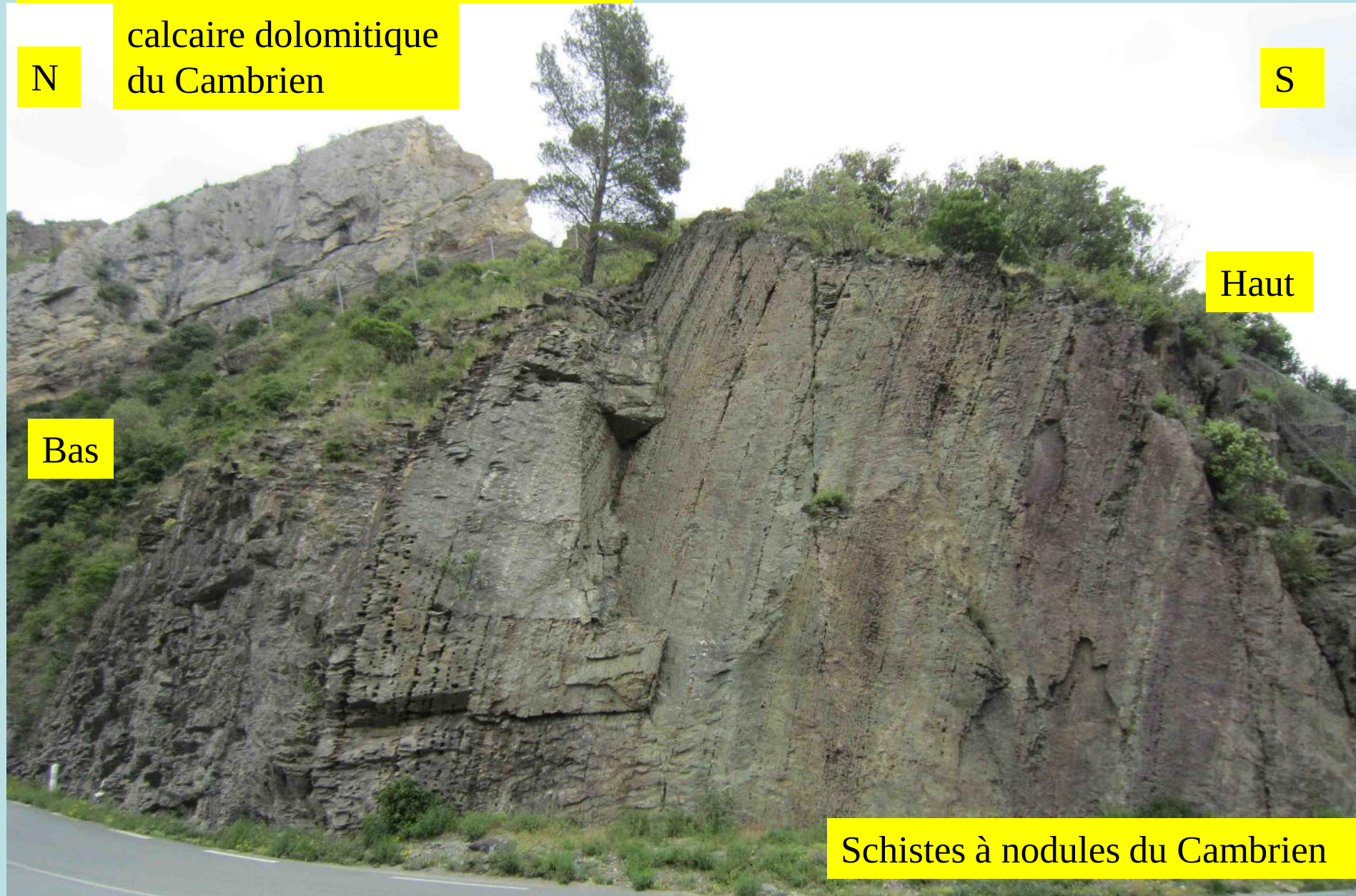
calcaire dolomitique  
du Cambrien

S

Haut

Bas

Schistes à nodules du Cambrien





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

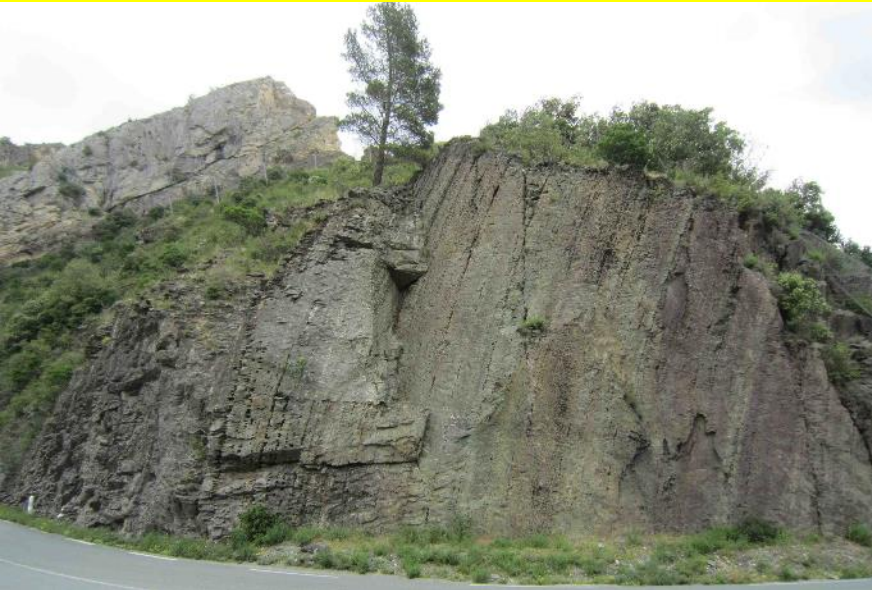
Le pli classique du Pont de Poussarou

Interprétation locale

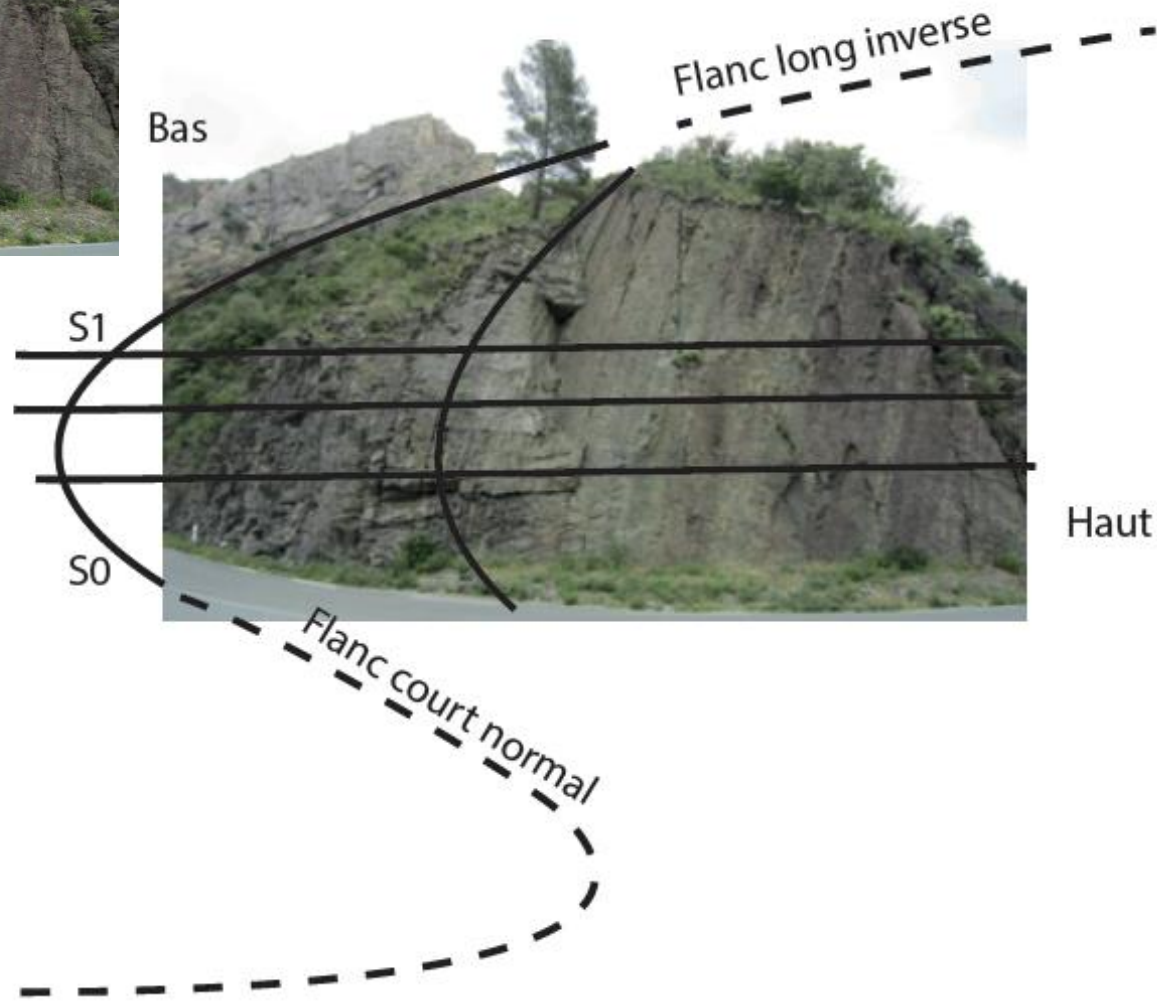




# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur



Le pli classique du Pont de Poussarou  
Interprétation à grande échelle.





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

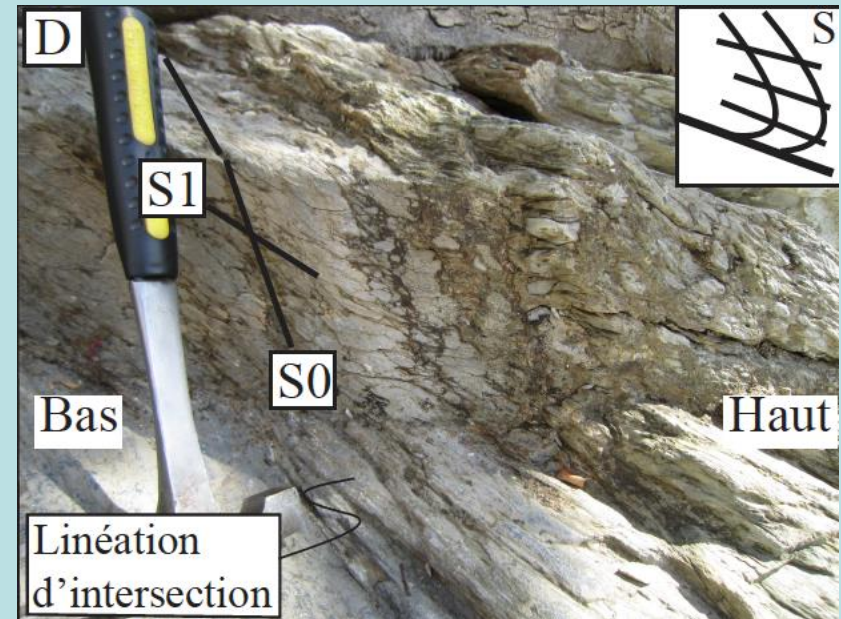


Exemple de pli « en tête plongeante » dans les calcaires dévoniens des Mont de Faugères



# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

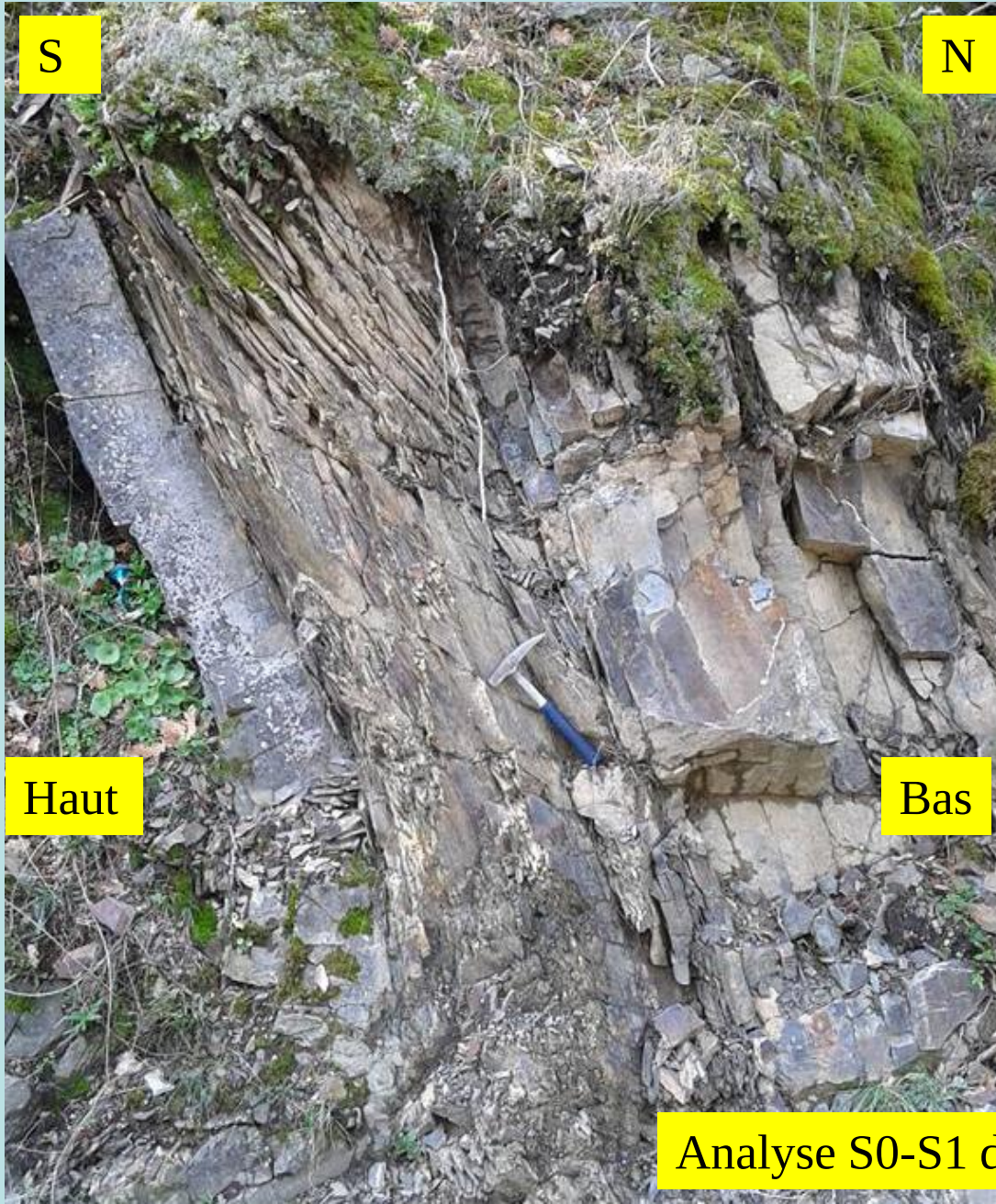
## Interprétation locale



Exemple de pli « en tête plongeante » dans les calcaires dévoniens des Mont de Faugères



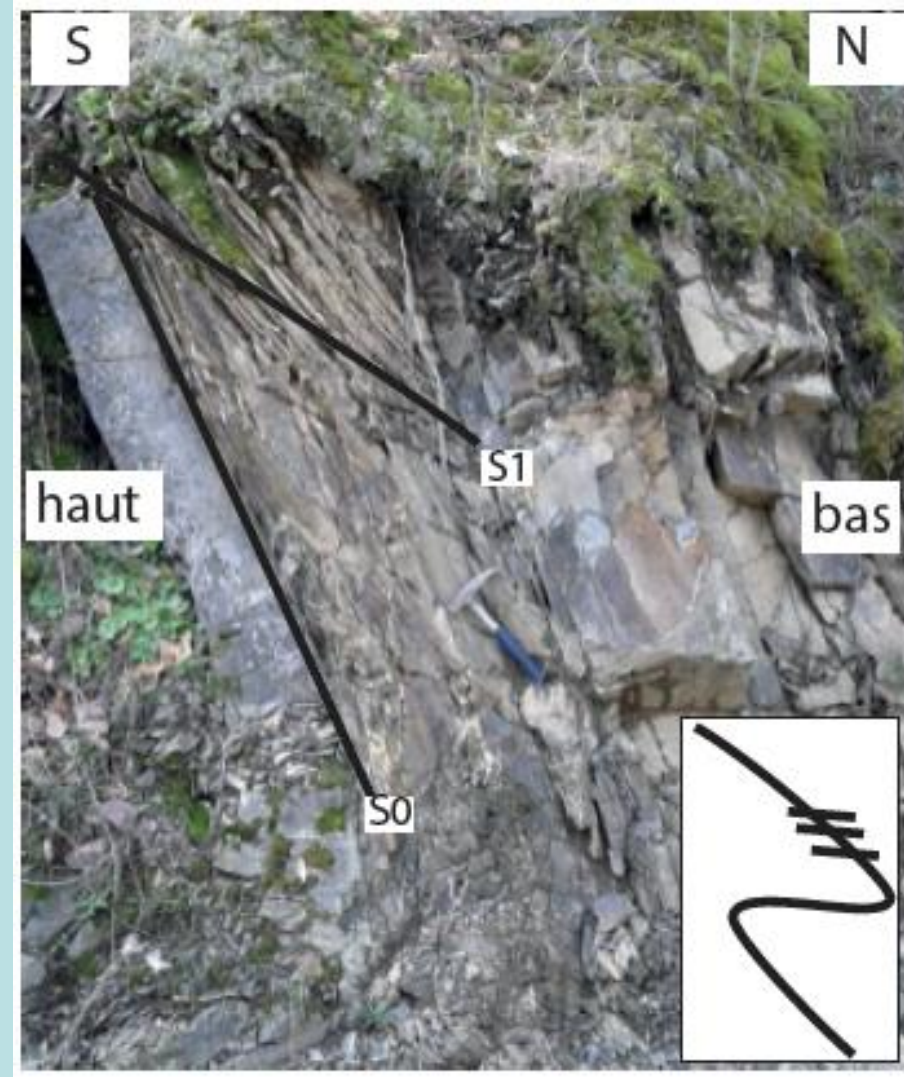
# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur



Analyse S0-S1 dans le pli couché du Minervois

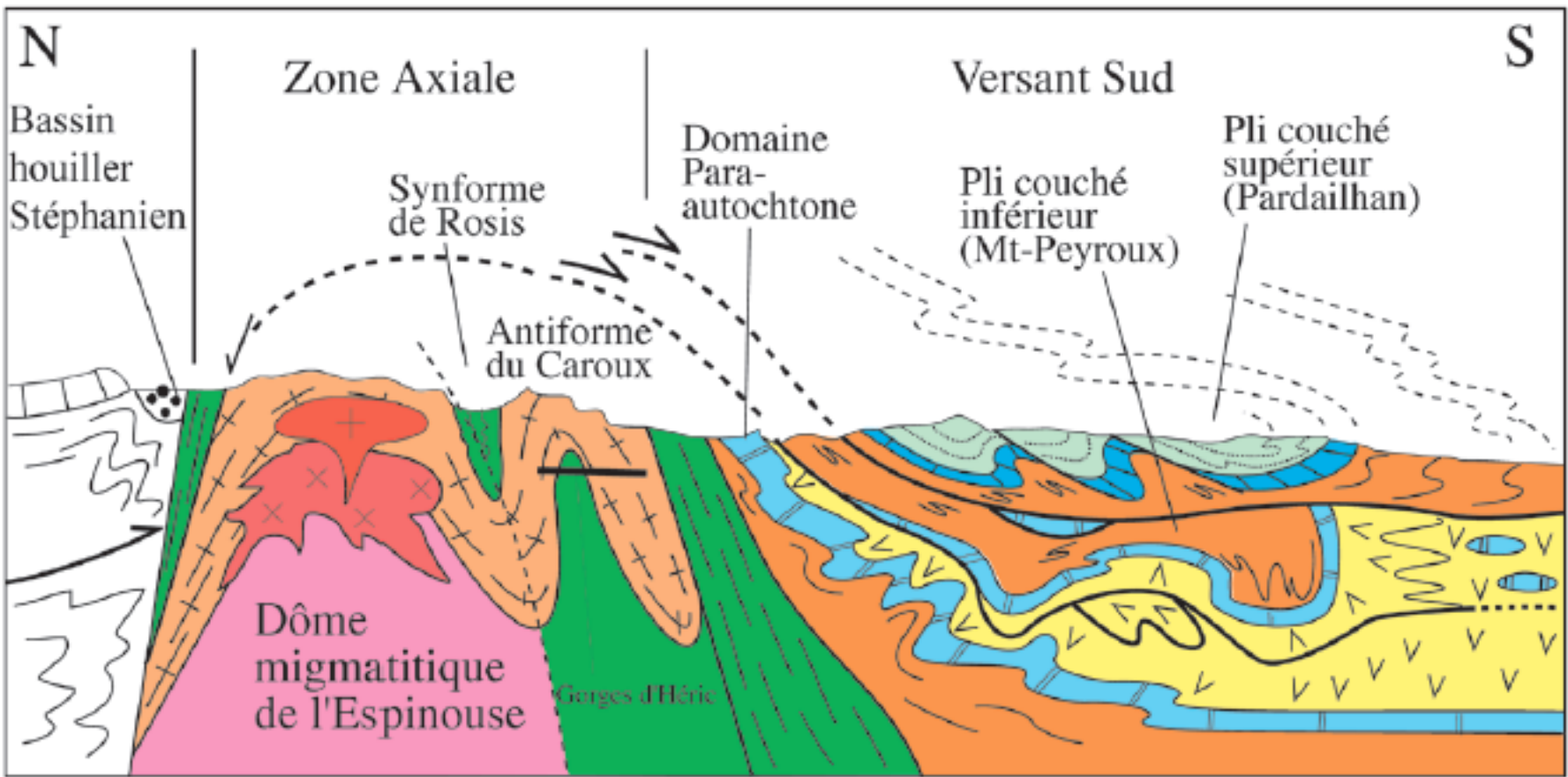


# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur



Analyse S0-S1 dans le pli couché du Minervois

# Coupe des plis couchés du versant Sud et de la zone axiale de la Montagne Noire



Zone Axiale

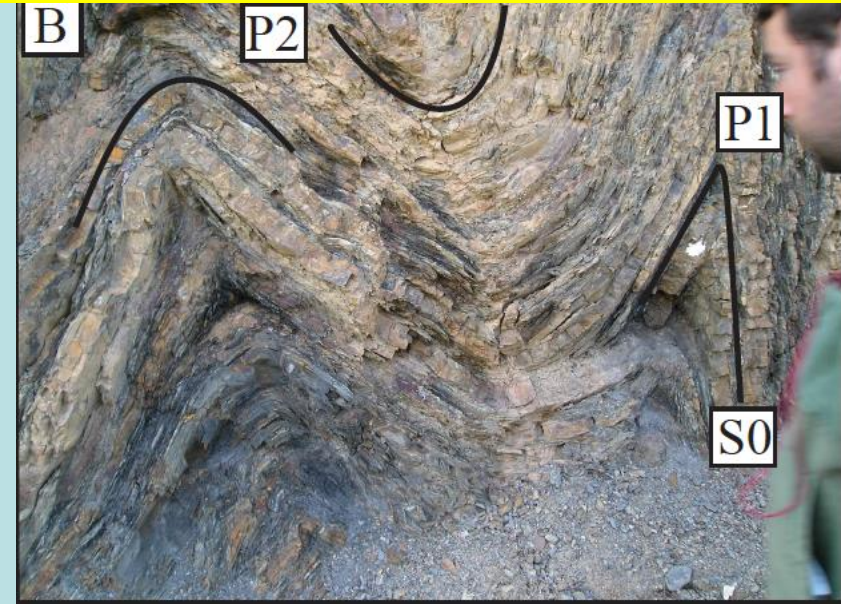
Southern and Northern Sides





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

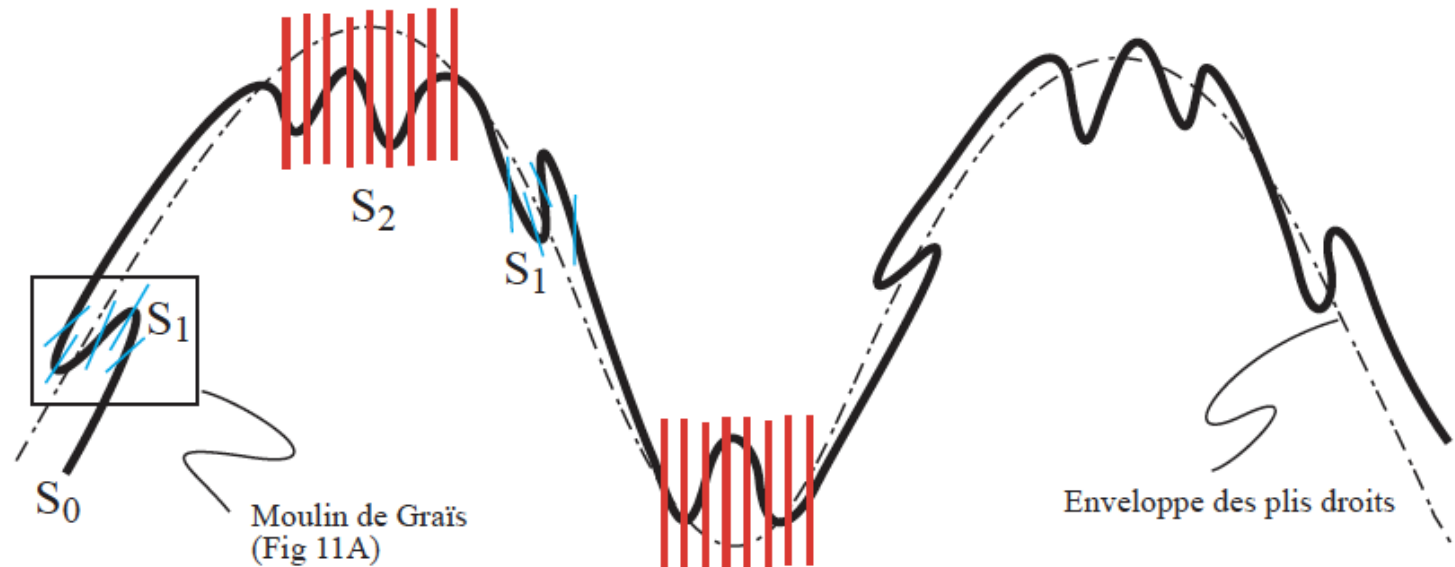
## Déformation polyphasée



### Interprétation

Plis couchés P1:  
syn-schisteux  
ou non

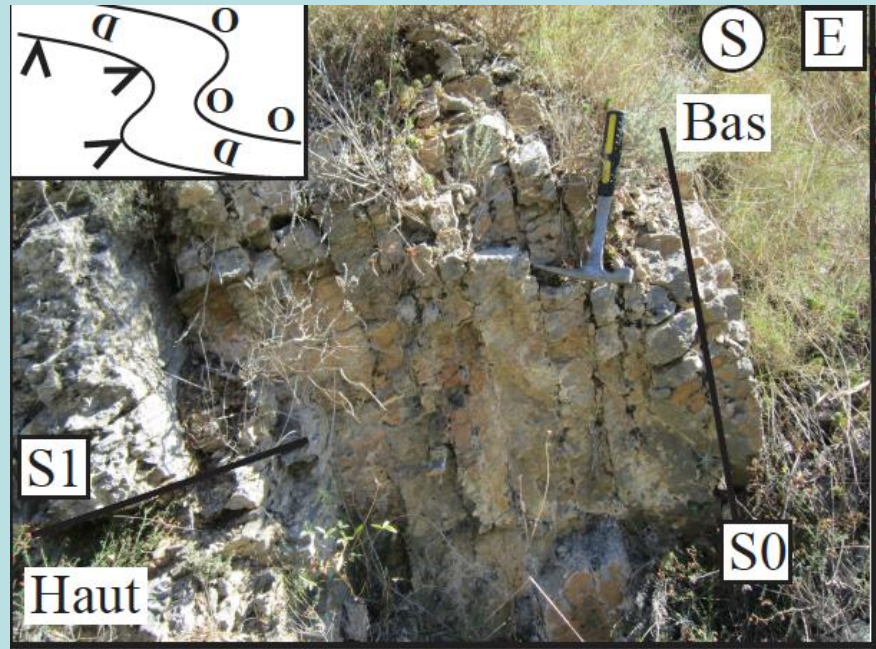
Plis droits P2:  
syn-schisteux  
ou non





# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

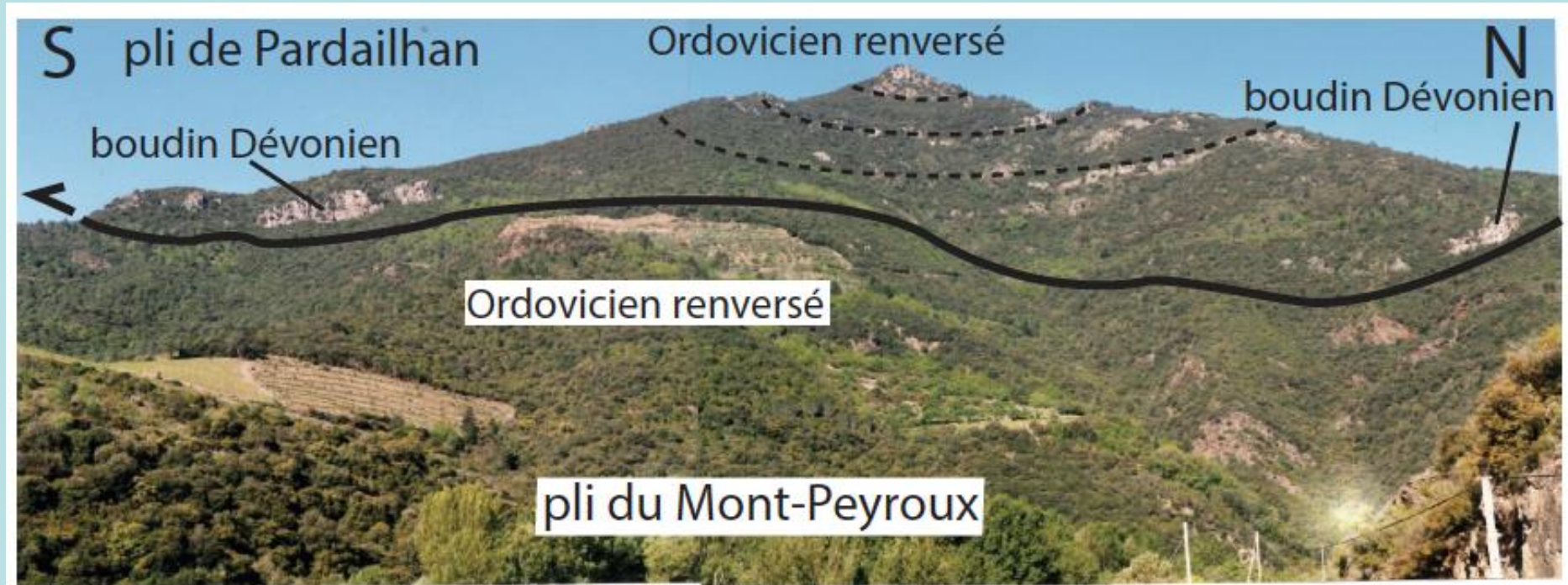
## Déformation polyphasée



Cas du pli surdéversé dans le flanc Nord du synforme de Roquebrun: pli de flanc normal dans la série déjà renversée



# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

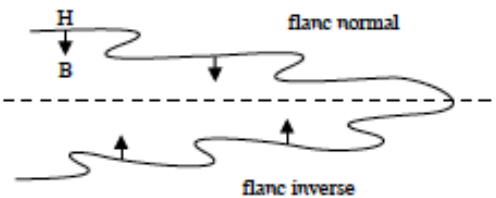


On reconnaît deux plis couchés kilométriques superposés représentés par deux flancs inverses d'environ 15 km de flèche.  
La géométrie et le déversement des plis sont bien établis, mais il reste des questions mal comprises:

1. Mécanismes de formation
2. Signification de la linéation d'allongement parallèle aux axes des plis

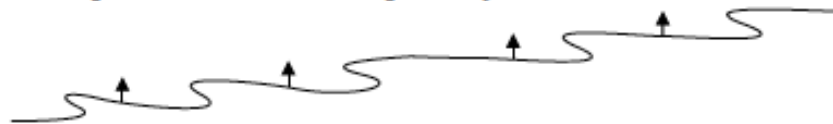
# 1. Les plis couchés du Viséen Supérieur

## 1- Formation du pli couché inférieur

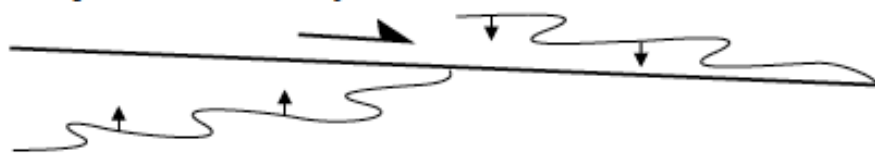


## 2- Disparition du flanc normal

*A : par renversement complet du flanc normal*



*B : par cisaillement du flanc normal*



## 3- Mise en place du pli couché supérieur

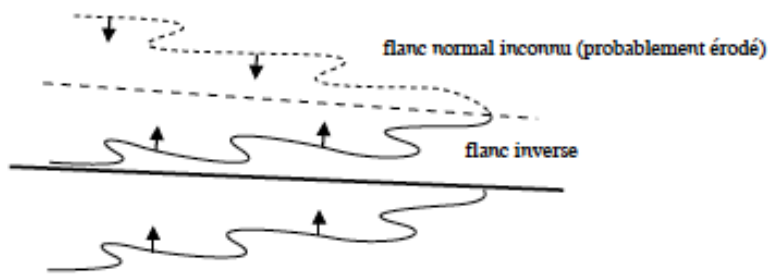


Fig. 15 Schémas théoriques explicatifs de la formation des plis couchés du versant sud de la Montagne Noire

## Mécanismes de formation

- Enroulement des charnières
- Devenir des flancs inverses



## 2. Le problème de la linéation d'allongement perpendiculaire au déversement des plis couchés

Souvent la linéation d'allongement est perpendiculaire à l'axe des plis et parallèle à la direction du déversement. Par exemple le pli couché (ou nappe) de Morcles en Suisse (Ramsay, )

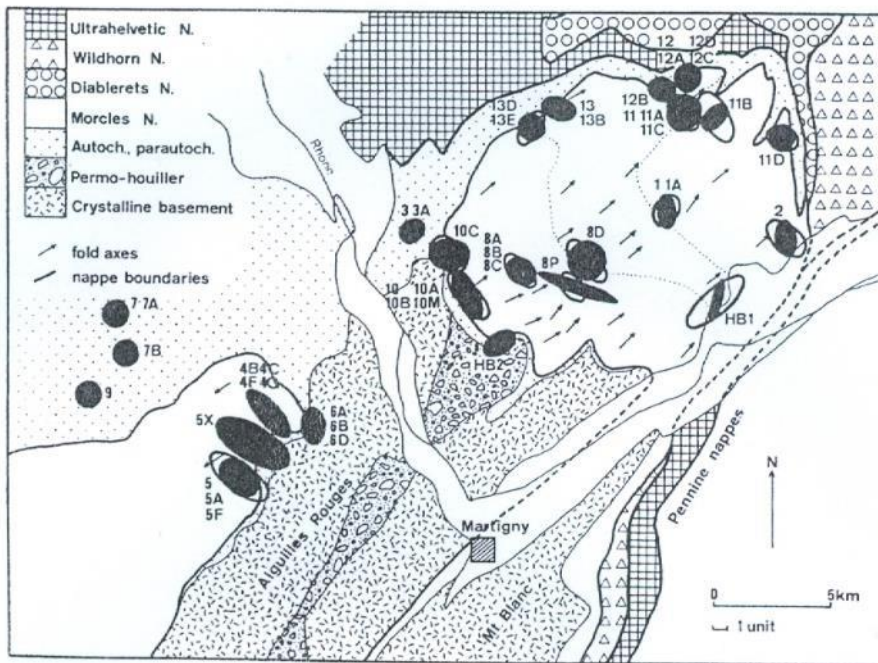


Fig. 2. Outline structural map of the Morcles Nappe region showing the sites of finite strain analyses. Dotted line the Morcles Nappe delimit the map extent of, from SW to NE: the inverted limb, the hinge zone, the normal limb (Atlas Géologique de la Suisse, 1:25000, sheet 1305 Dt. de Morcles). Solid ellipses represent horizontal sections: finite strain ellipsoids, open ellipses correspond to XY plane sections, with X correctly oriented. The scale bar represents the radius of an original sphere of equivalent volume.

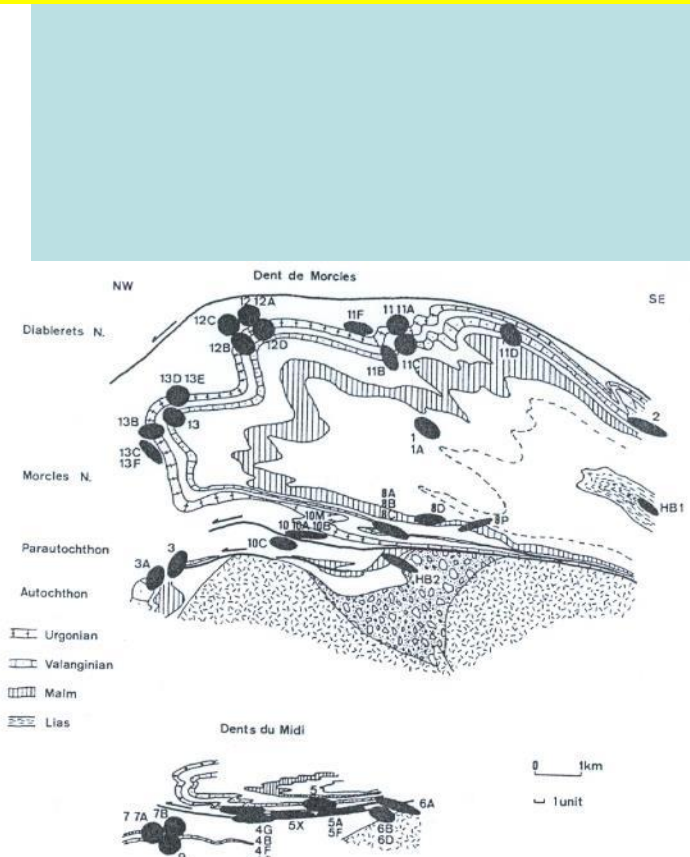


Fig. 3. NW-SE cross sections through the Morcles Nappe region showing sites of finite strain analyses. Solid ellipses represent vertical sections through the finite strain ellipsoids. The one-unit scale bar represents the radius of an original sphere of equivalent volume.



## 2. Le problème de la linéation d'allongement

### 2.1 Perpendiculaire au déversement des plis couchés





## 2. Le problème de la linéation d'allongement

### 2.1 Perpendiculaire au déversement des plis couchés



En Montagne Noire, l'allongement est parallèle à l'axe des plis (NE-SW, N70E). Comment expliquer ce paradoxe?



## 2. Le problème de la linéation d'allongement

### 2.2 Dans la zone axiale



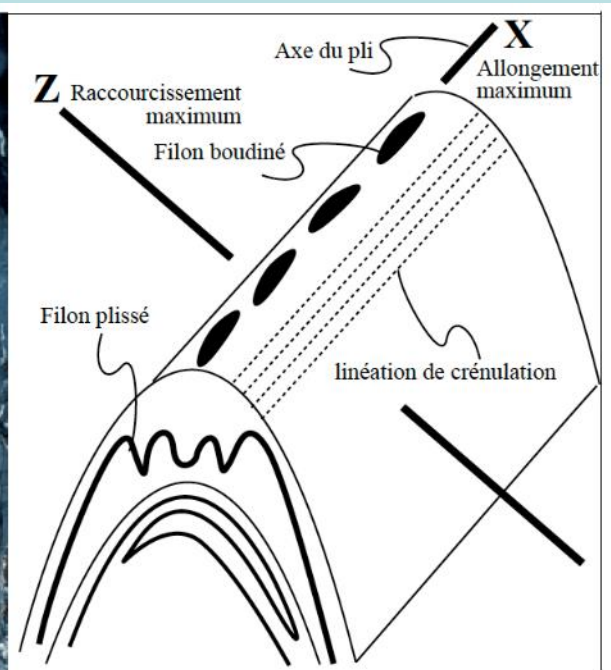
La linéation minérale et d'allongement est E-W (N50-70E) dans les gneiss de la zone axiale



## 2. Le problème de la linéation d'allongement

### 2.2 Dans la zone axiale

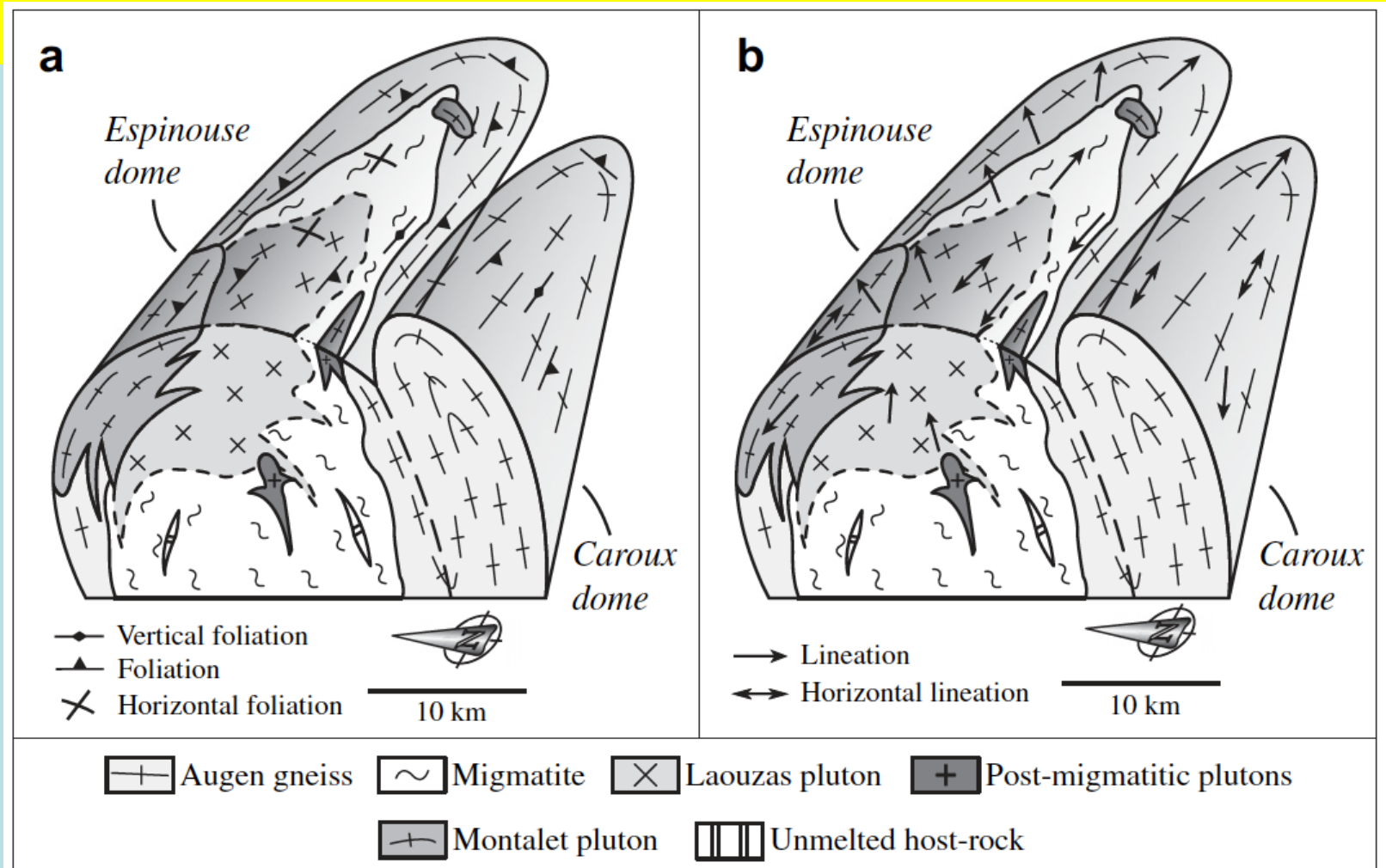
**Allongement et raccourcissement sont contemporains**



## 2. Le problème de la linéation d'allongement

### 2.2 Dans la zone axiale

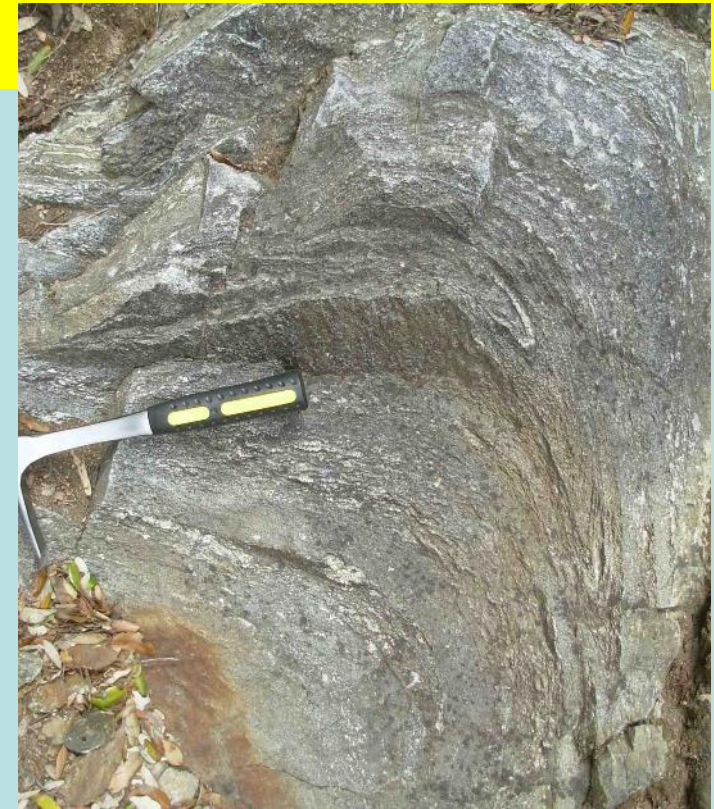
## Synthèse des foliations linéations dans le dôme de la zone axiale





## 2. Le problème de la linéation d'allongement

### 2.2 Dans la zone axiale



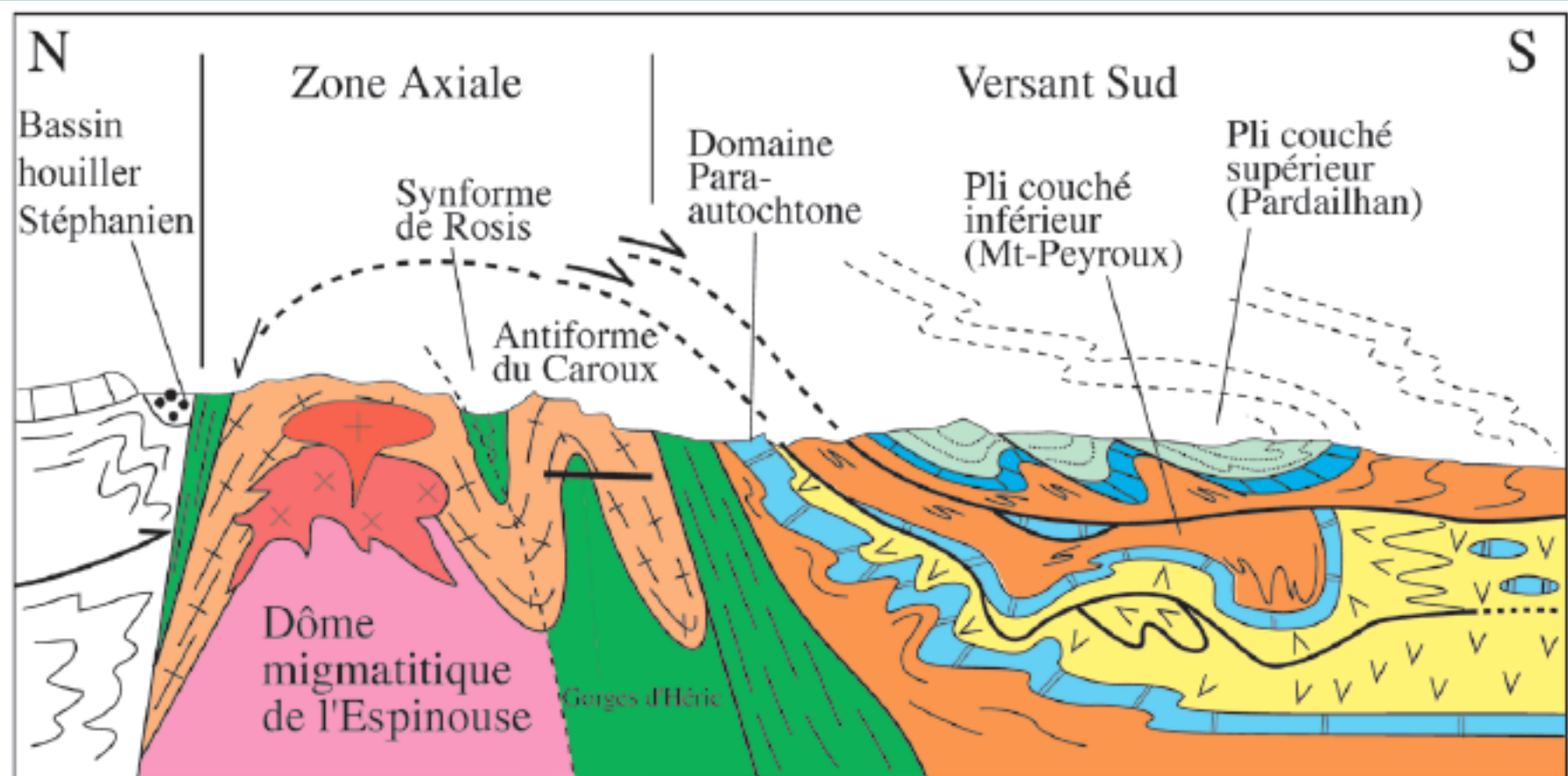
#### Interprétation

1. Des plis isoclinaux (ou intrafoliaux) sont équivalents aux plis couchés P1 dans le versant
2. Des plis droits P2 replissent les plis P1 contemporains de la formation du dôme et sont équivalents des plis P2 dans le versant sud.

**Dans les plis couchés, la linéation d'allongement n'est pas liée au déversement des plis couchés, mais au « doming »**

# 3. L'extension post-orogénique d'allongement

## La faille de Graissessac zone axiale



Zone Axiale

Southern and Northern Sides





### 3. L'extension post-orogénique d'allongement: La faille des Monts-de-Lacaune au Nord de la zone axiale





# 3. L'extension post-orogénique d'allongement

## La faille de Graissessac au Nord de la zone axiale

Structures S-C ou  
bandes de cisaillement?

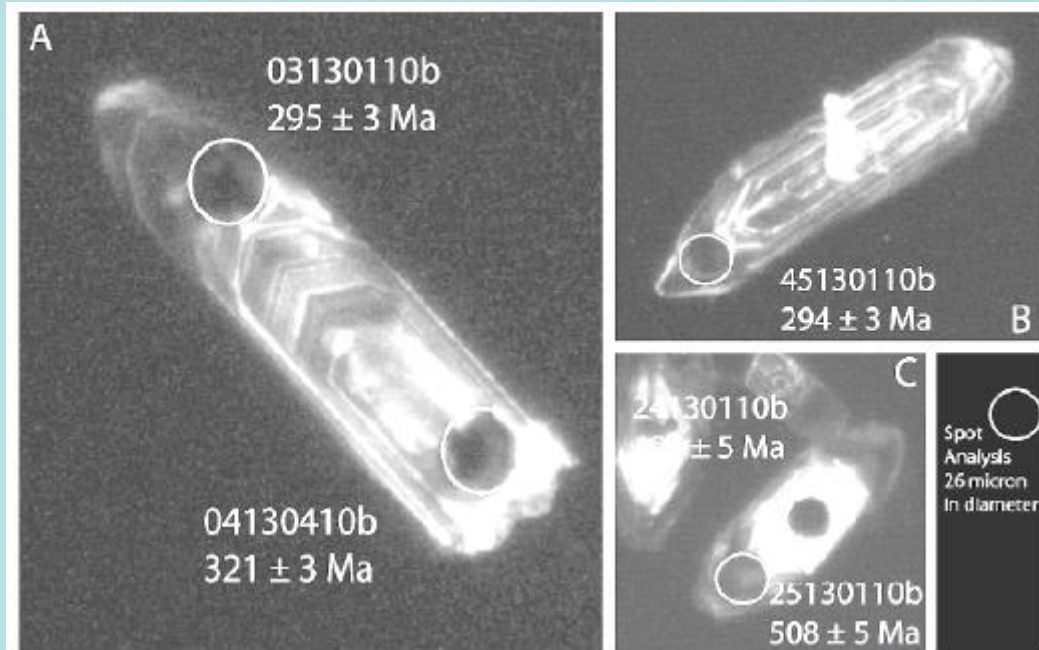


Fig. 3. Cathodoluminescence images of some of the zircon grains dated in this study.

Fig. 3. Photos en cathodoluminescence de certains des zircons datés lors de cette étude.

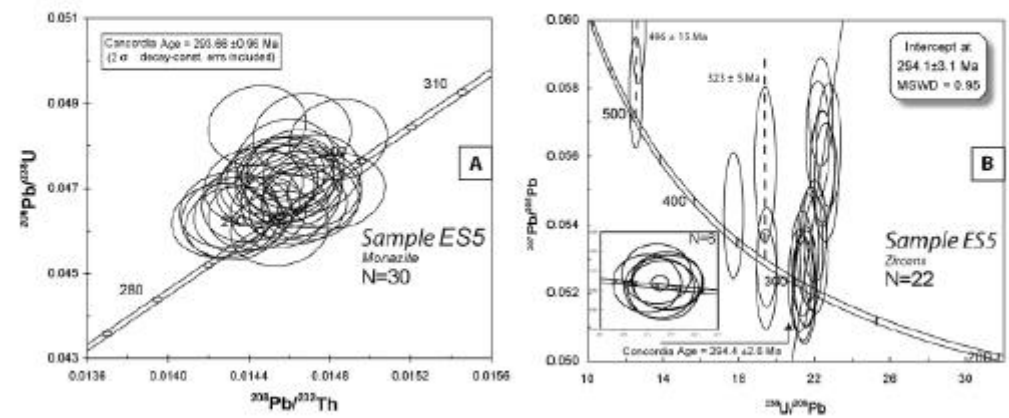
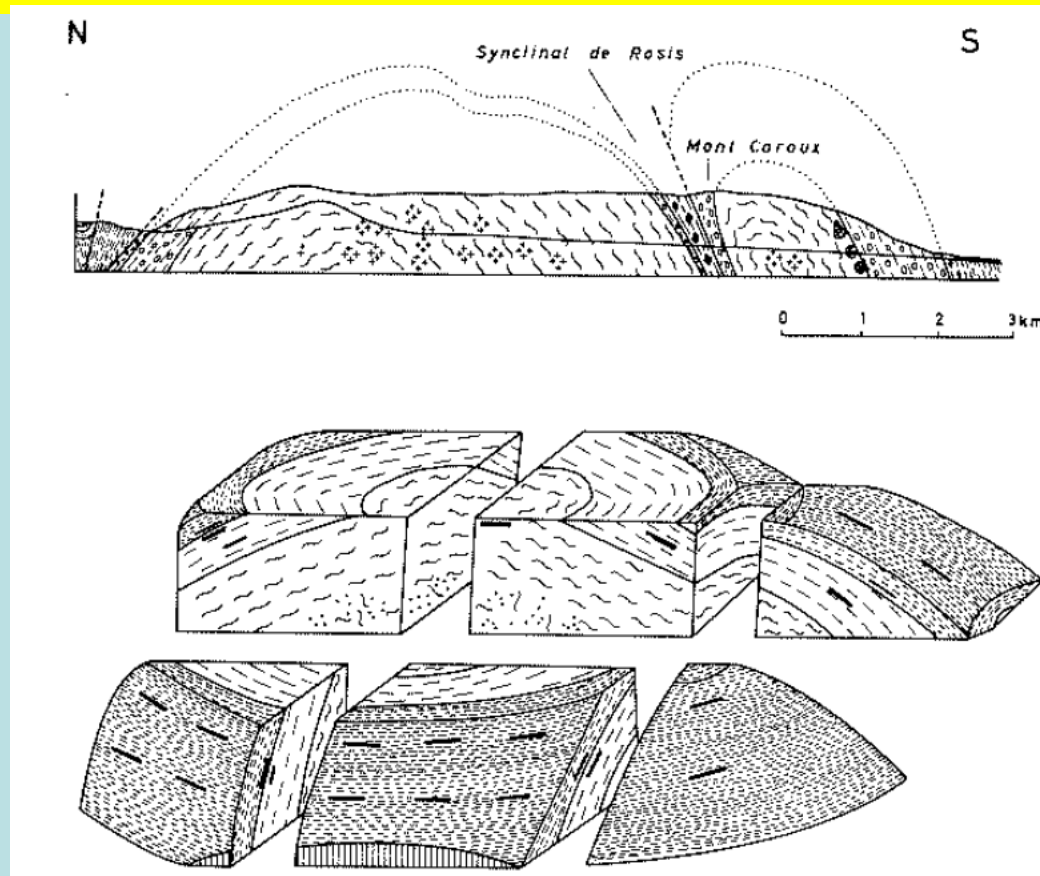


Fig. 4.  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  versus  $^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  Concordia diagram for monazites (A) and Terra-Wasserburg diagram (B) for zircons from sample ES5. All ellipses are represented at 1 sigma level. All ages are quoted at 2 sigma level.



## 4. De l'analyse structurale à l'interprétation tectonique

### La signification du dôme de la zone axiale

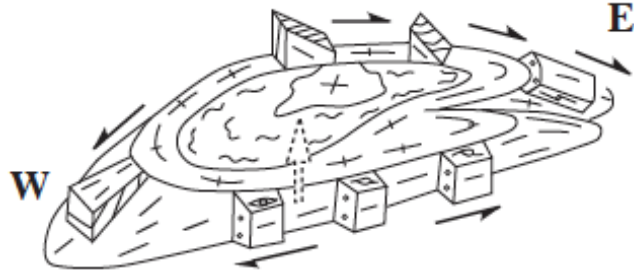


La zone axiale n'est pas un « socle » précambrien mais un dôme migmatitique et granitique d'âge Carbonifère supérieur. Schuiling (1960) a proposé une mise en place du dôme par **diapirisme**.

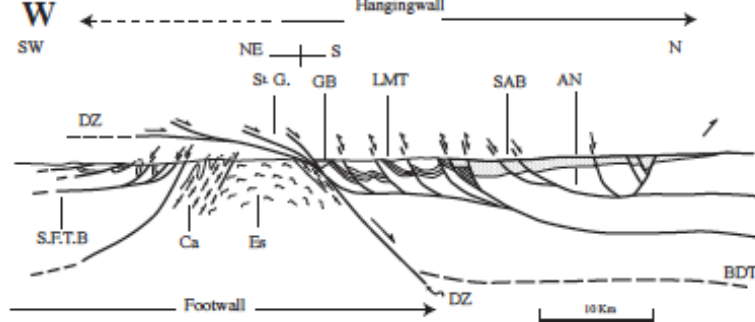
# 4. De l'analyse structurale à l'interprétation tectonique

## Une variété de modèles

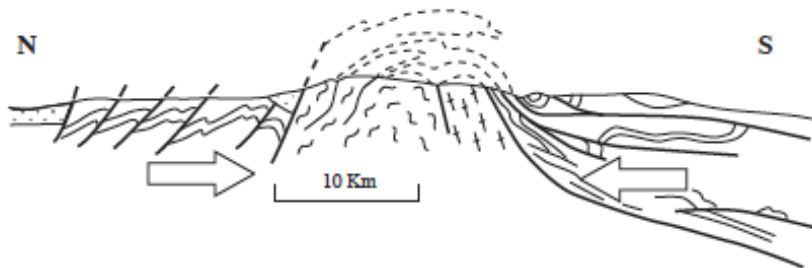
A modèle diapirique



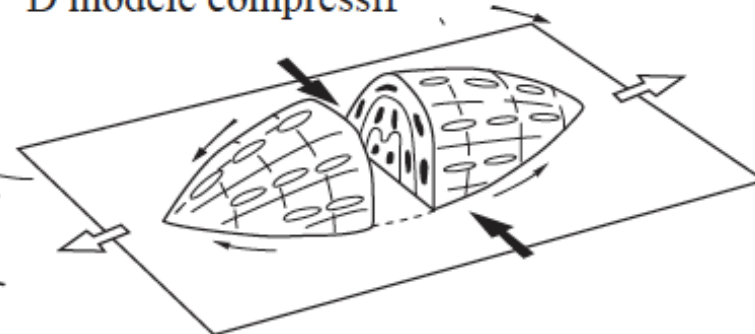
B modèle extensif



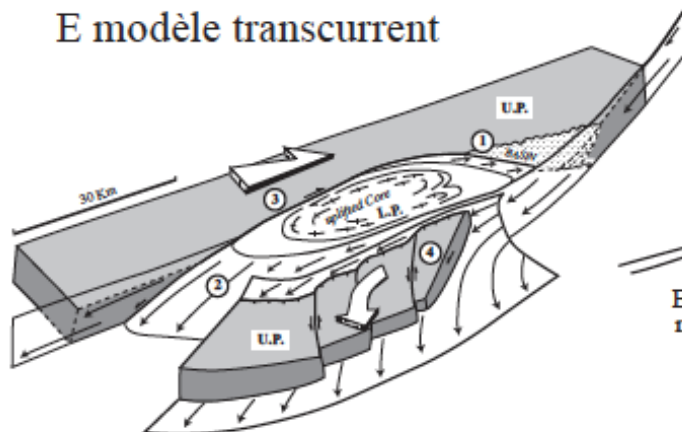
C modèle compressif



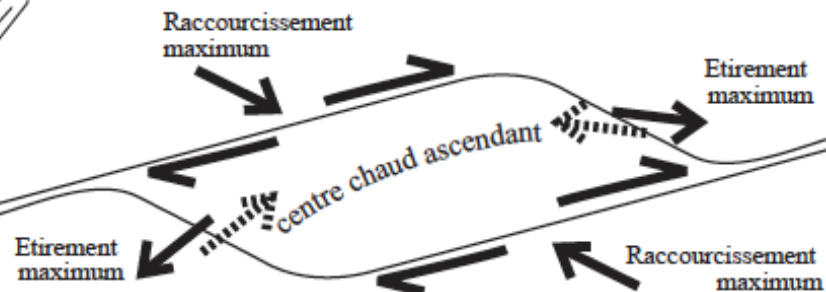
D modèle compressif



E modèle transcurrent



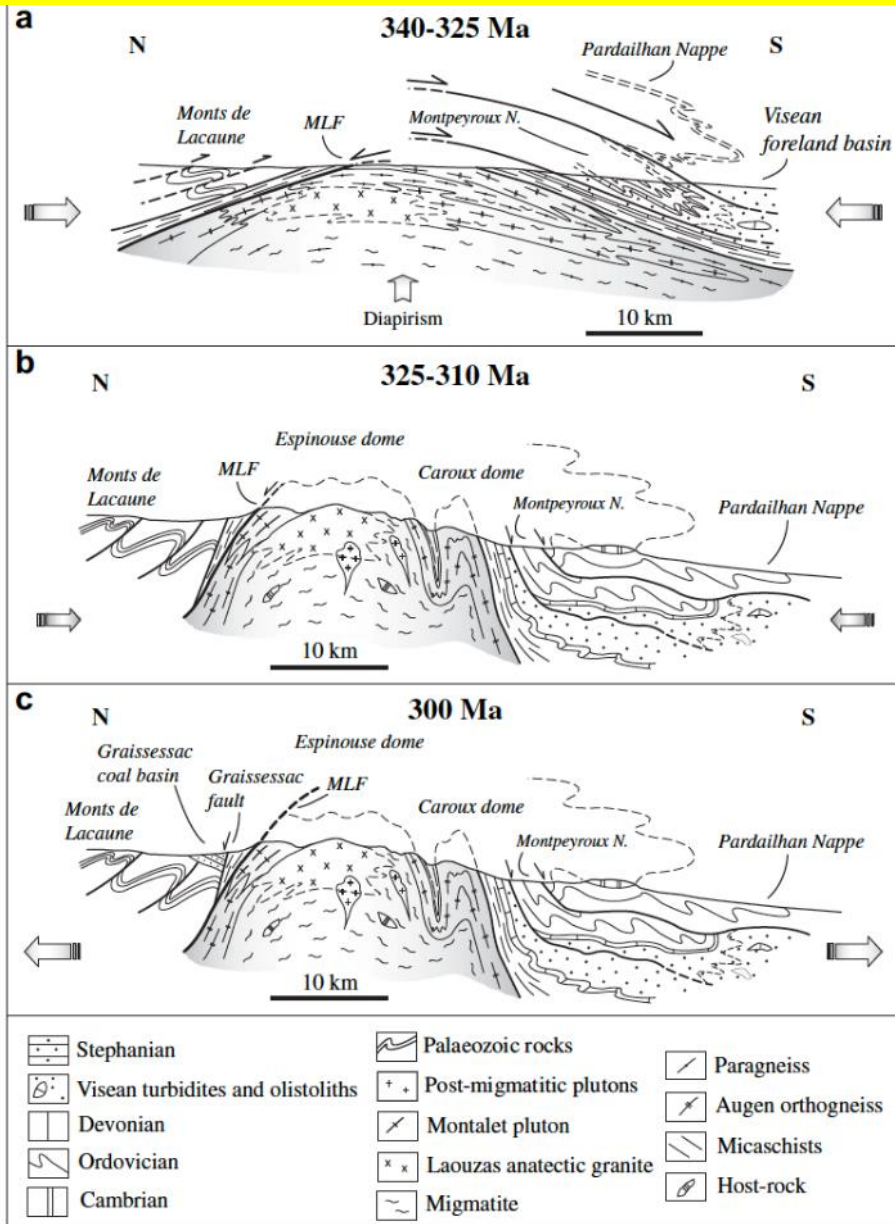
F modèle transcurrent





# 4. De l'analyse structurale à l'interprétation tectonique

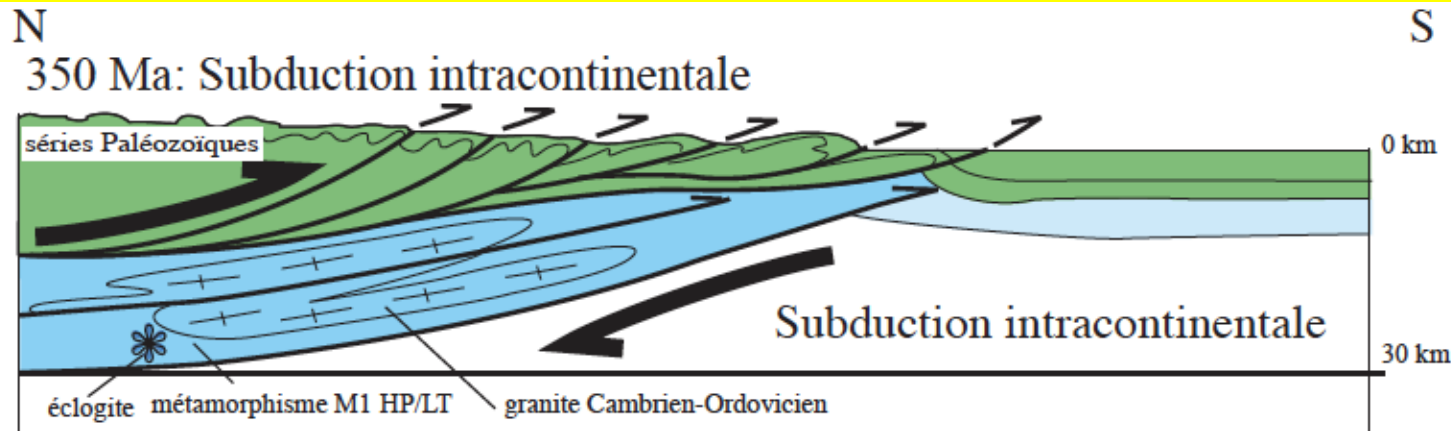
## La signification du dôme de la zone axiale



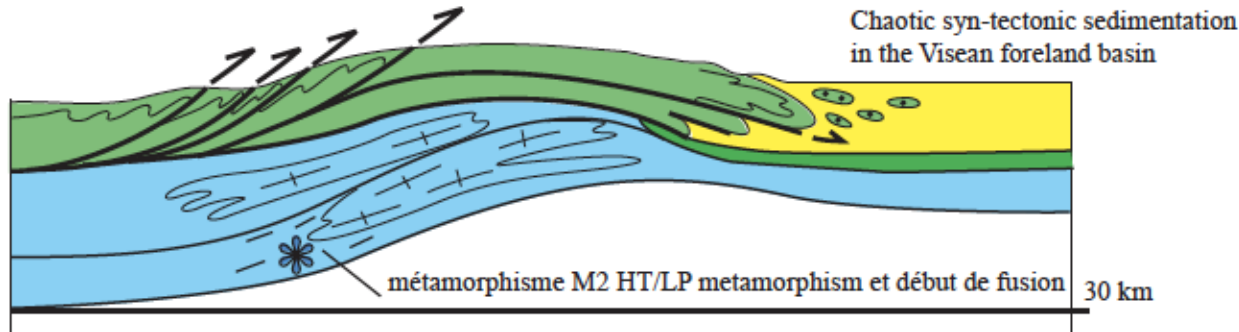
Un modèle associant diapirisme et compression. L'extension sur le flanc nord du dôme est tardive et localisée.  
(Charles et al. 2009, *J. Struct. Geology*)

# 4. De l'analyse structurale à l'interprétation tectonique

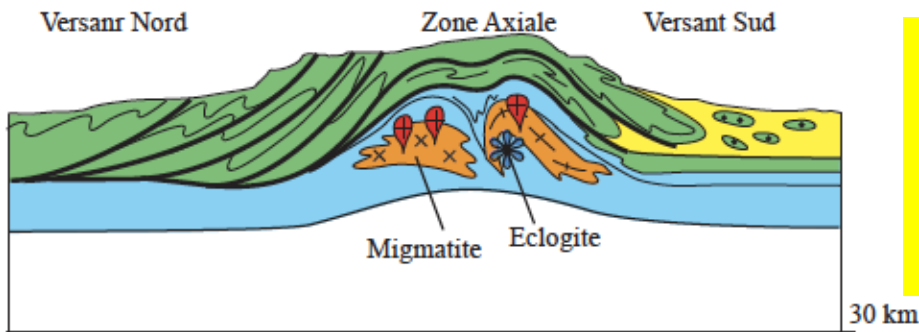
## Un modèle parmi d'autres



340-325 Ma: Plis couchés



320-315 Ma: Fusion crustale, doming, exhumation des eclogites



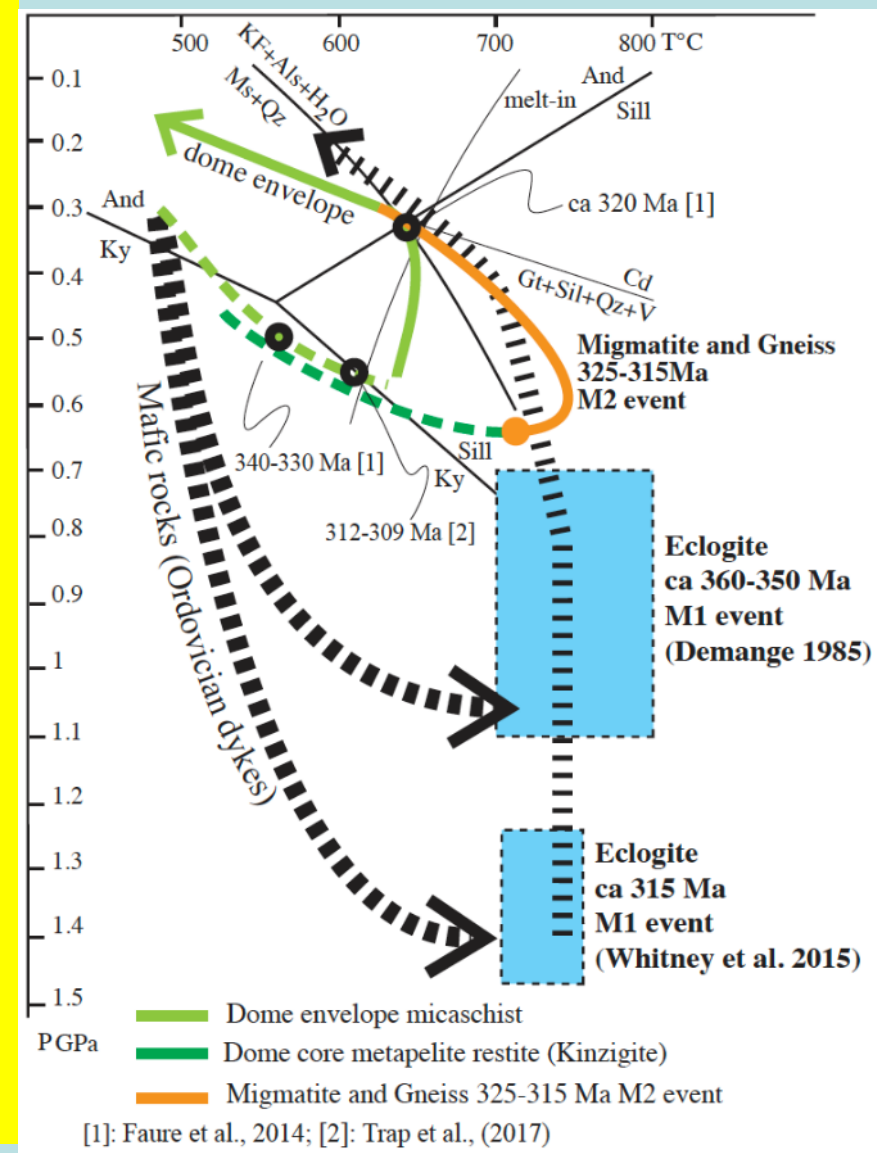
**Le modèle extensif n'est pas étayé par les faits.**  
**Le modèle compressif est assez attractif.**  
**Une composante diapirique est possible**



# Conclusion

L'analyse géométrique et cinématique permet d'établir les caractères de la déformation ductile et des phases superposées.

Elle doit être associée à des études métamorphiques et à des datations géochronologiques multi-méthodes.





Merci pour  
votre attention

Calcaire dévonien renversé dans un pli couché kilométrique



Réunion de l'AGSO en Montagne Noire (2019).  
La faille ductile des Monts de Lacaune