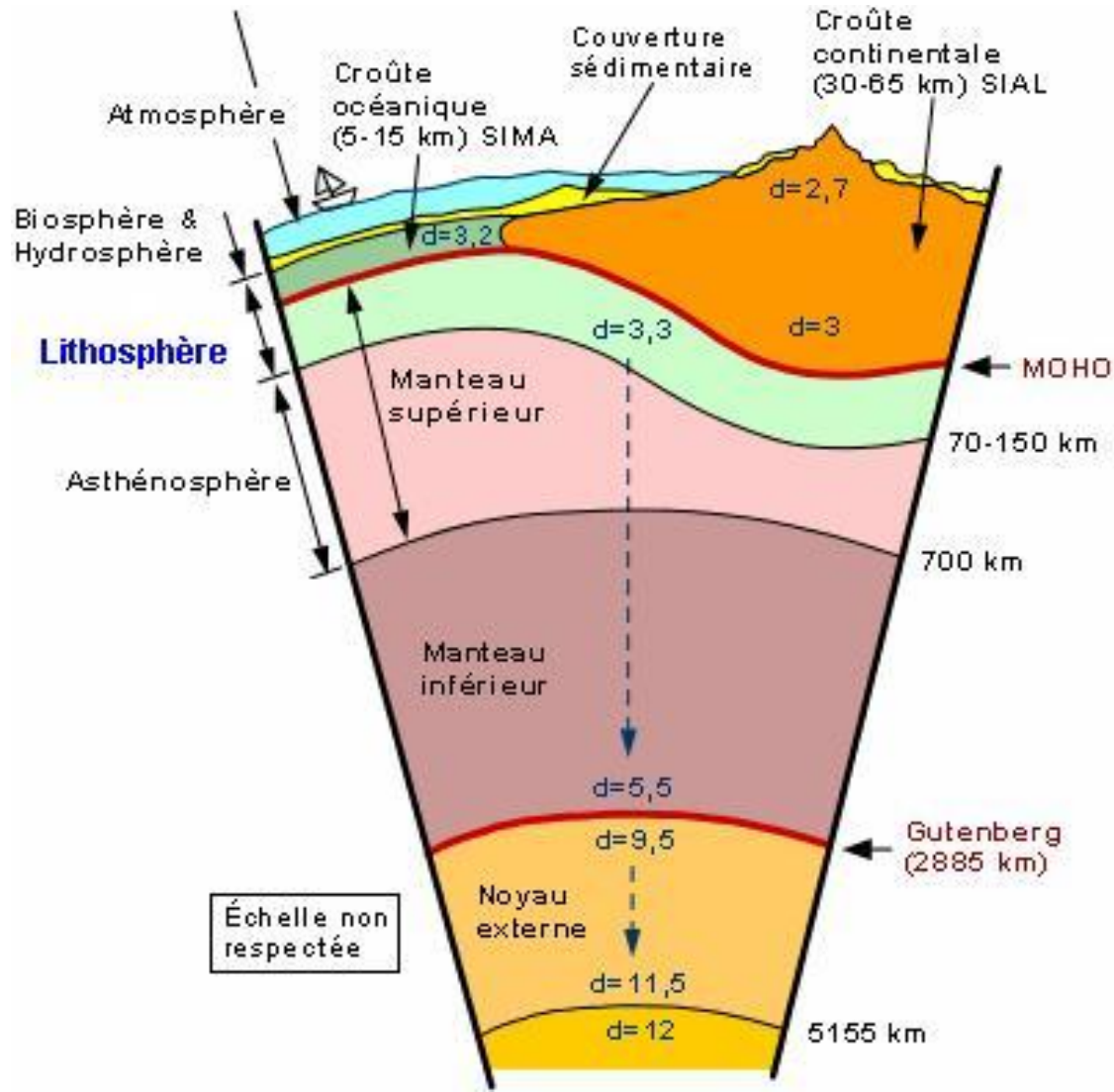
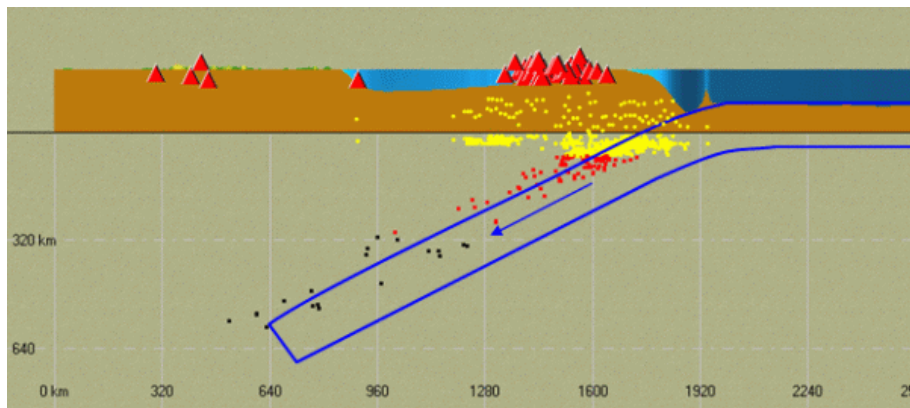


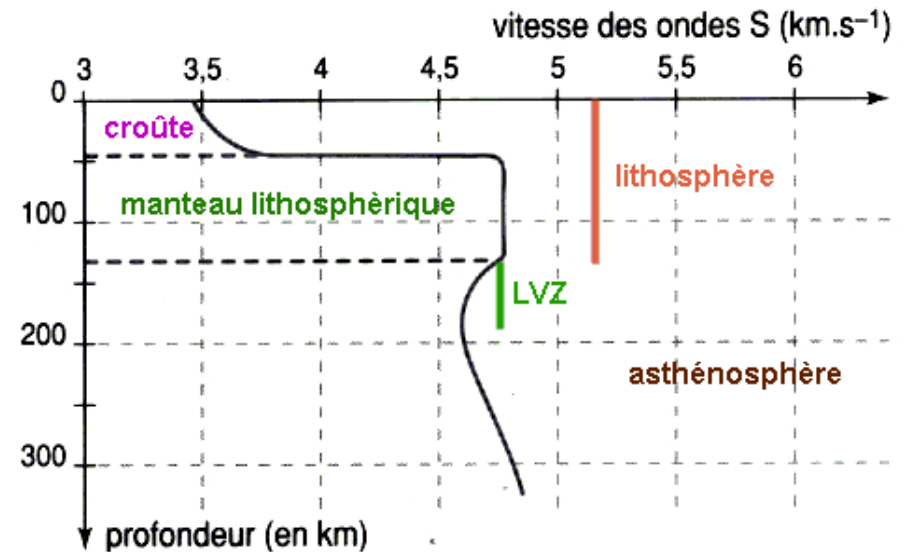
Déformations des matériaux de la lithosphère



Limite inf lithosphérique: sismique

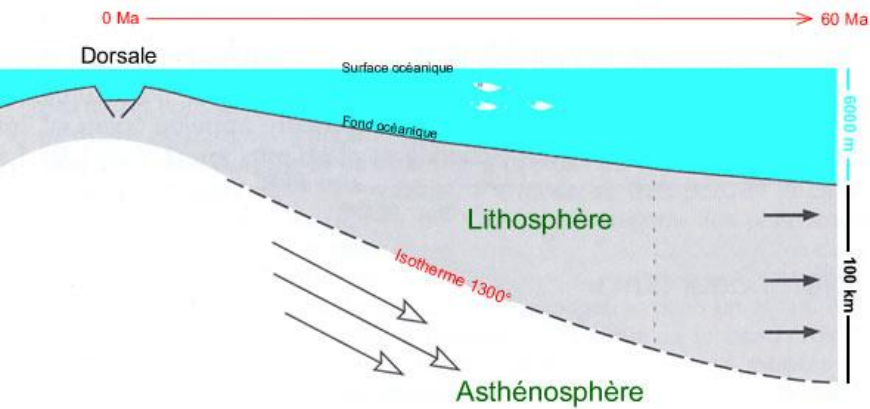


Présence de séismes

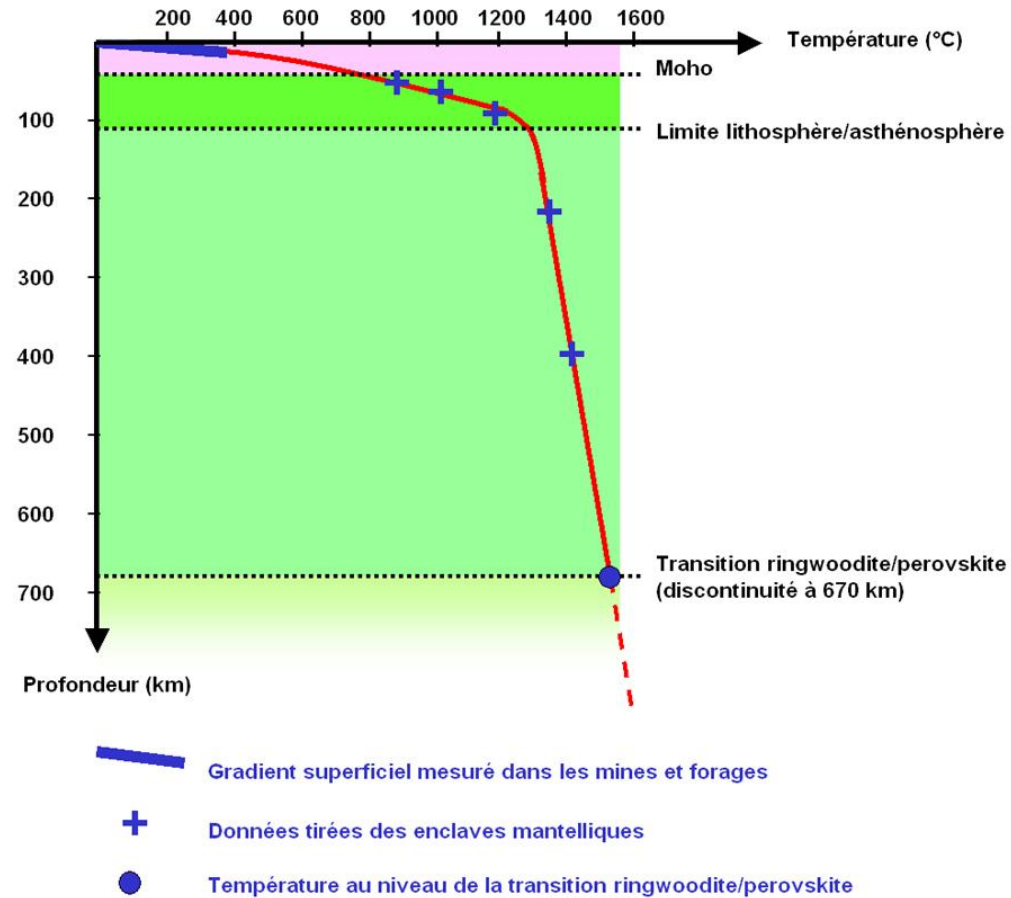


Toit de la LVZ

Limite inf lithosphérique: thermique

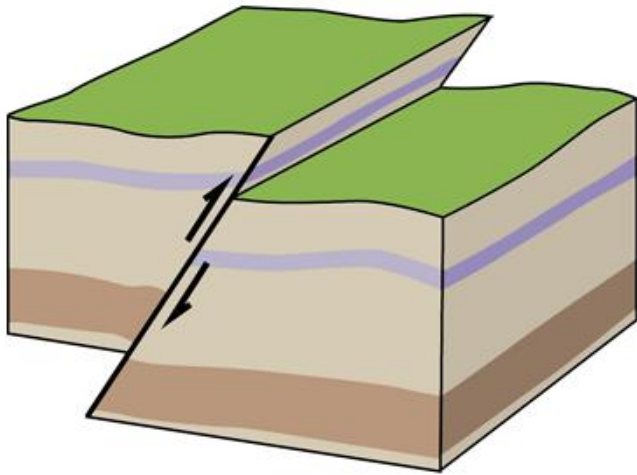


Isotherme 1300°C

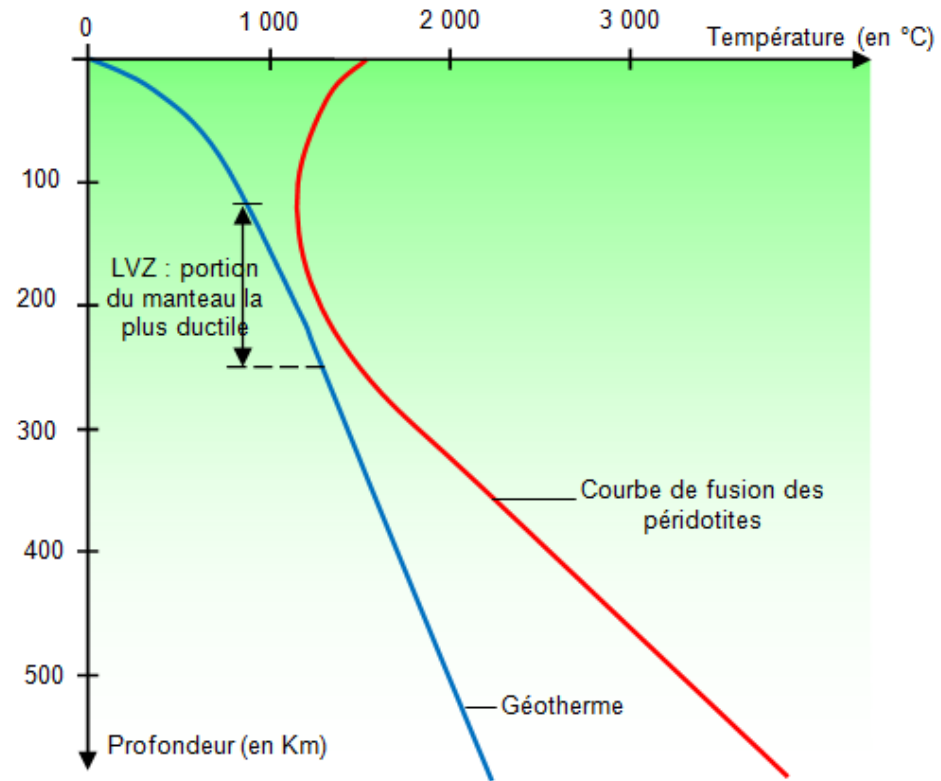


Transferts thermiques par conduction

Limite inf lithosphérique: mécanique

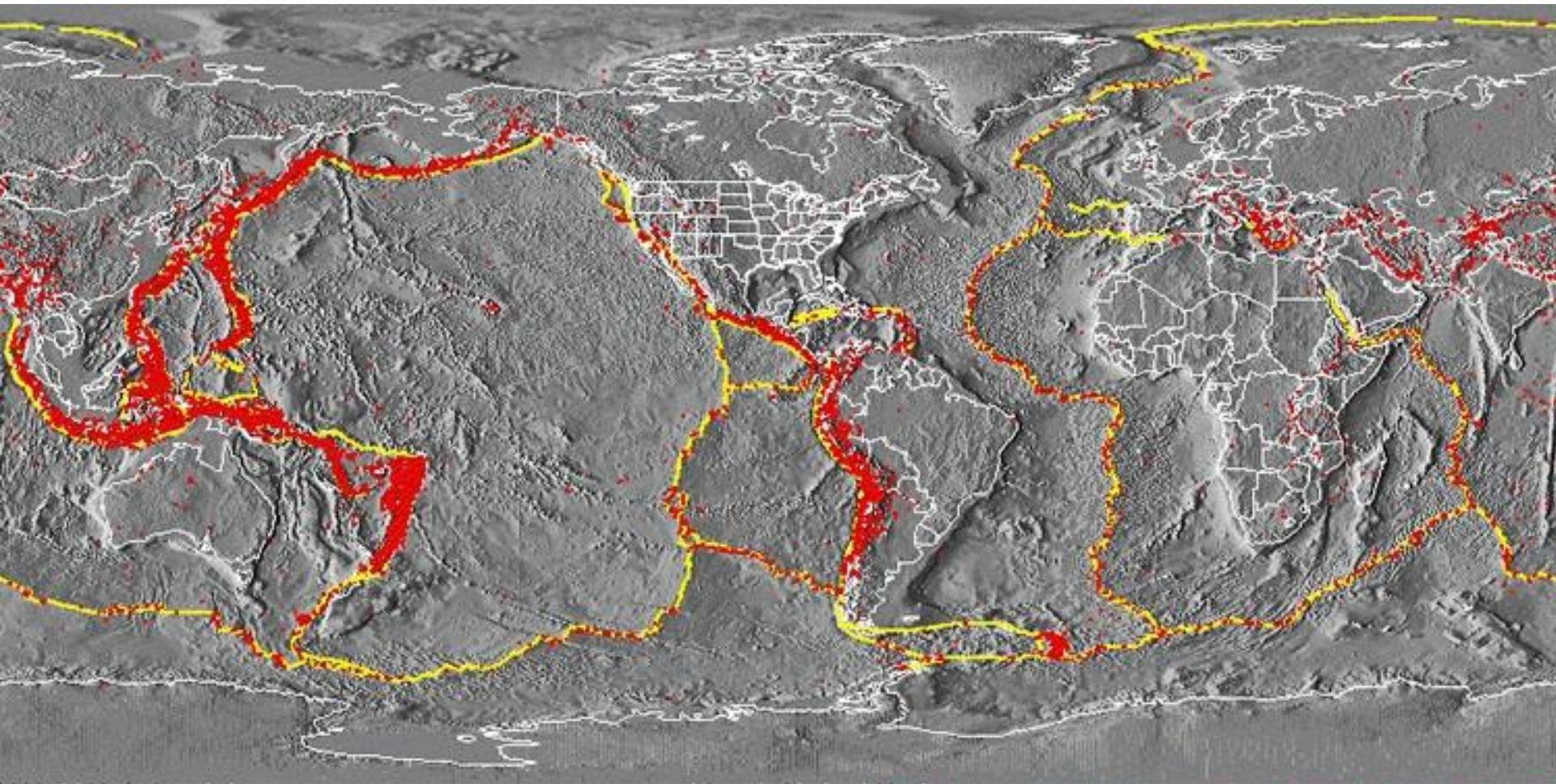


Comportement cassant



Asthénosphère plus ductile

Limites latérales lithosphériques: zones sismiques actives

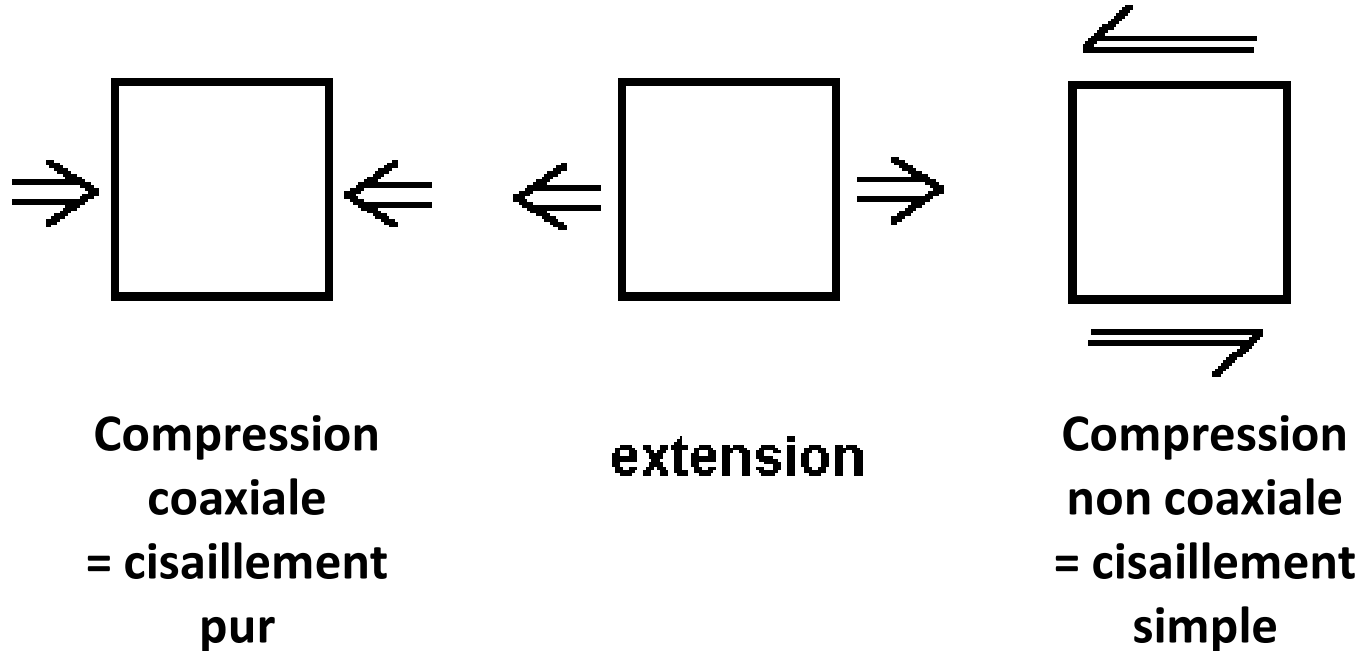


Crustal Plate Boundaries



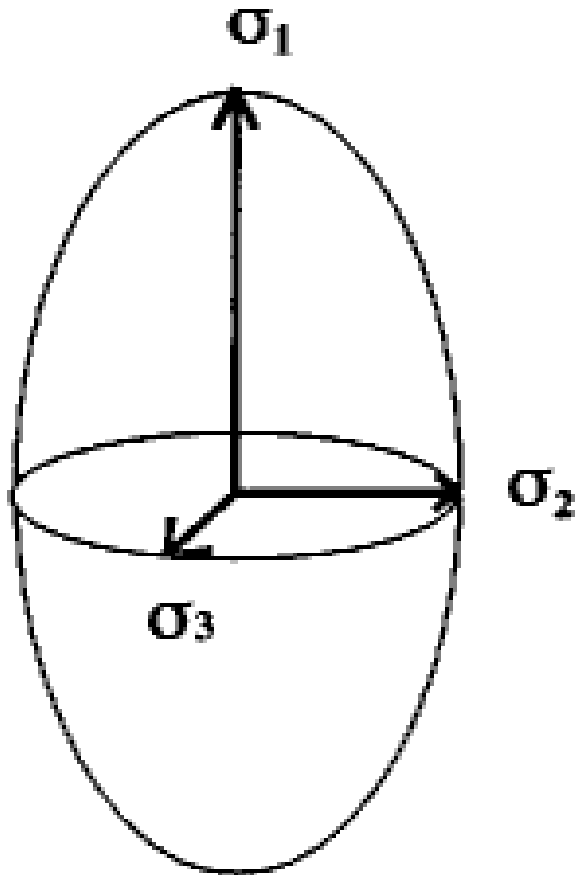
Earthquake Epicenters, $M > 5$, 1980-1990
Coastlines, Political Boundaries

Contraintes $C = dF / dS$



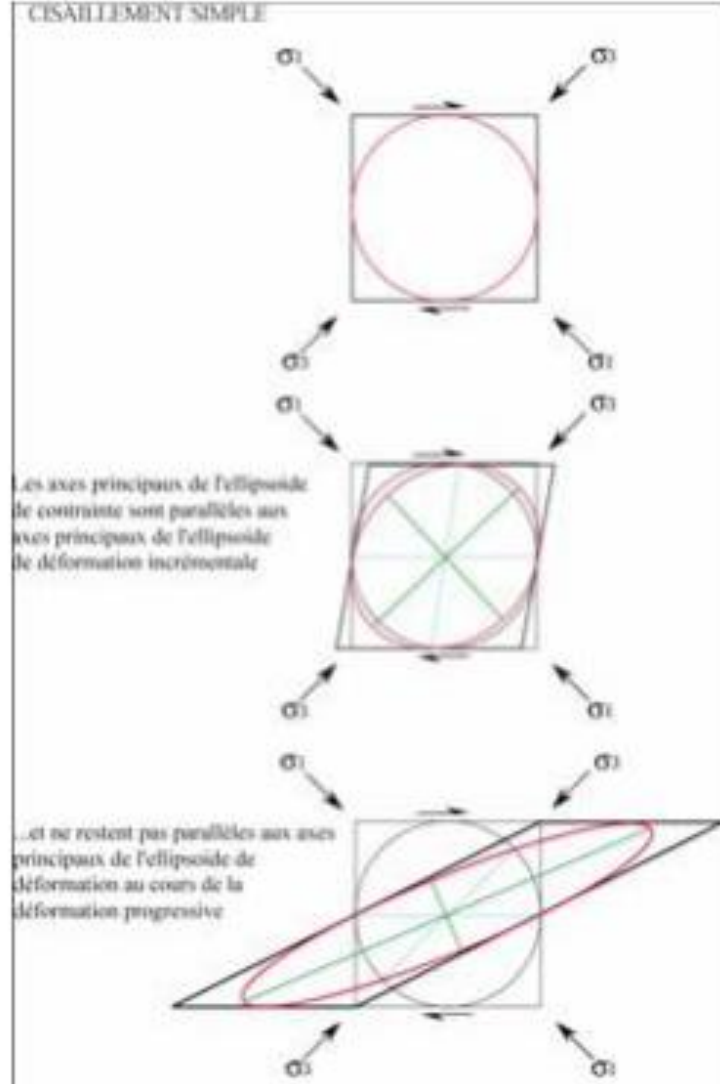
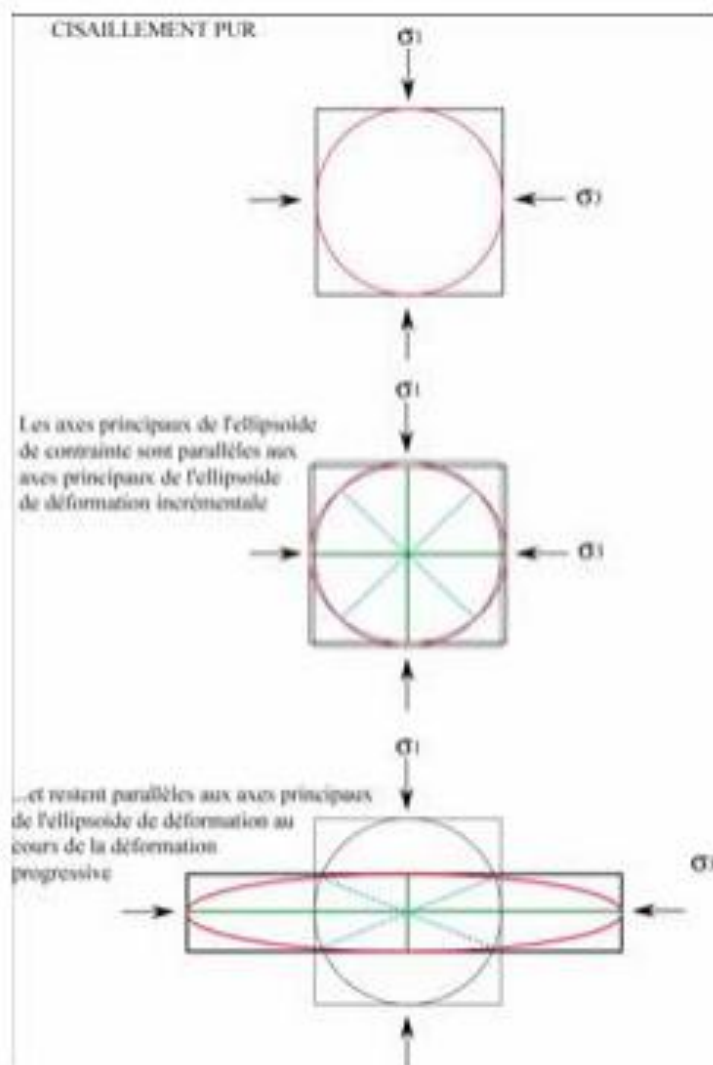
Induit une déformation par aplatissement et rotation. Ainsi, un cube deviendra un parallélépipède dont les surfaces sont parallèles 2 à 2 mais ne sont plus parallèles à celles du cube initial (cf p8)

Ellipsoïde des contraintes



Contrainte déviatorique
 $= \sigma_1 - \sigma_3$

(Contraintes lors de cisaillements pur et simple)

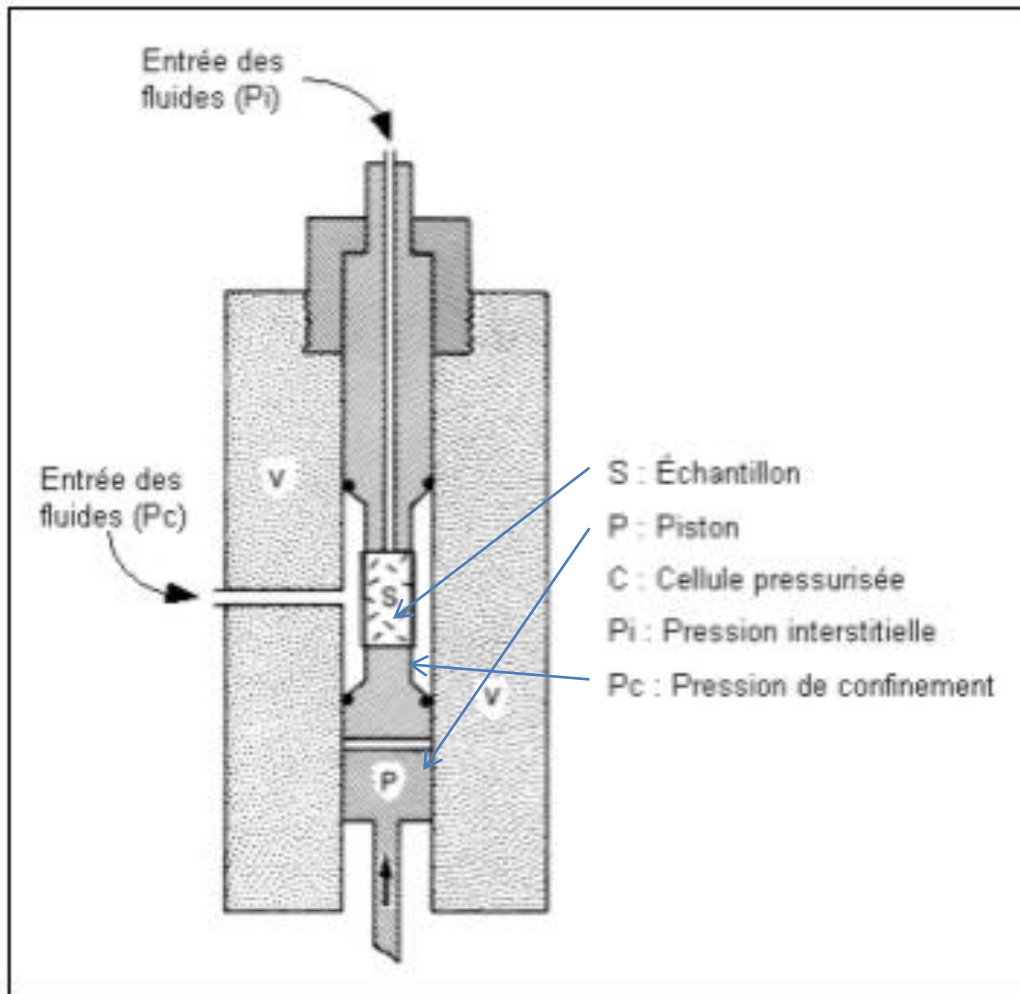


Etude expérimentale des contraintes: machine de traction

- **deux mors** serrant l'**échantillon**
(1 fixe et 1 mobile)
- moteur commandant la vitesse
du mors mobile
- **capteur de force** mesurant les
forces exercées
- éventuellement dans une étuve
permettant de faire **varier T**
- > Etude en vitesse de
déformation constante imposée
(traction simple)



Etude expérimentale des contraintes: cellule triaxiale avec P de confinement



En compression

au niveau du piston: $P = \sigma_1$
 $\sigma_2 = \sigma_3 = P_{\text{confinement}} < P$

En traction

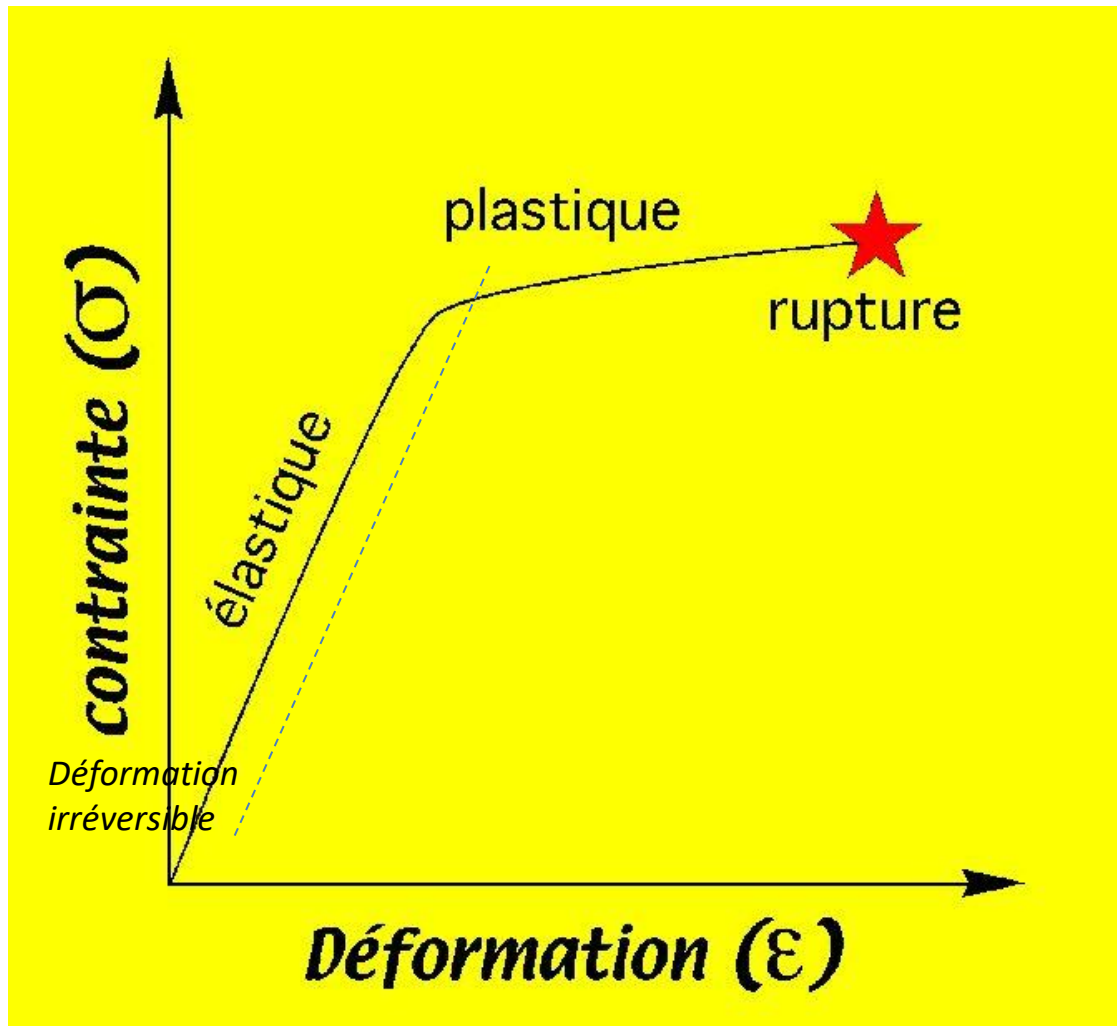
au niveau du piston: $P = \sigma_3$
 $\sigma_2 = \sigma_1 = P_{\text{confinement}} > P$

Domaines de déformation d'une roche

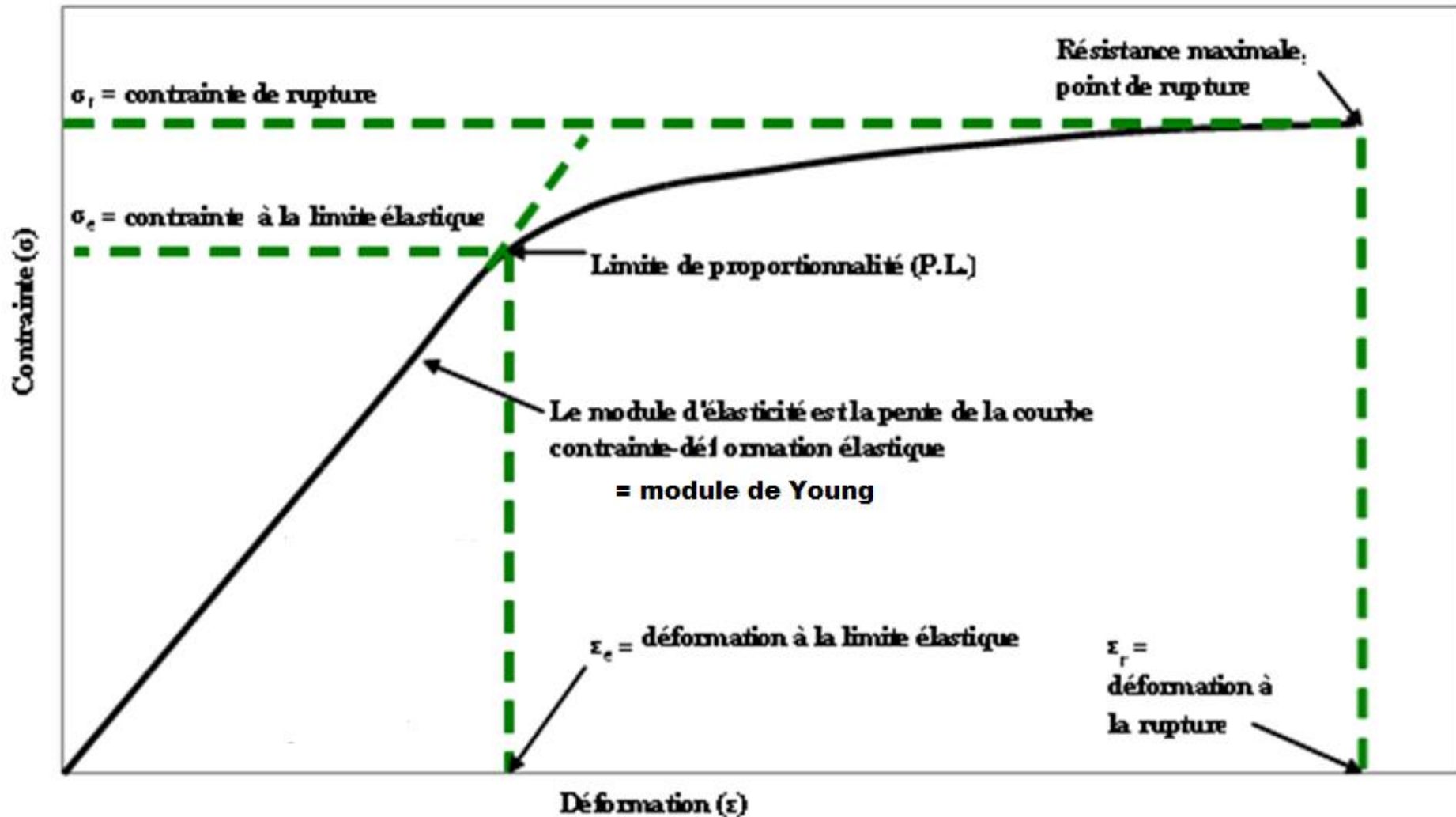
L_0 = Longueur initiale

L_f = Longueur finale

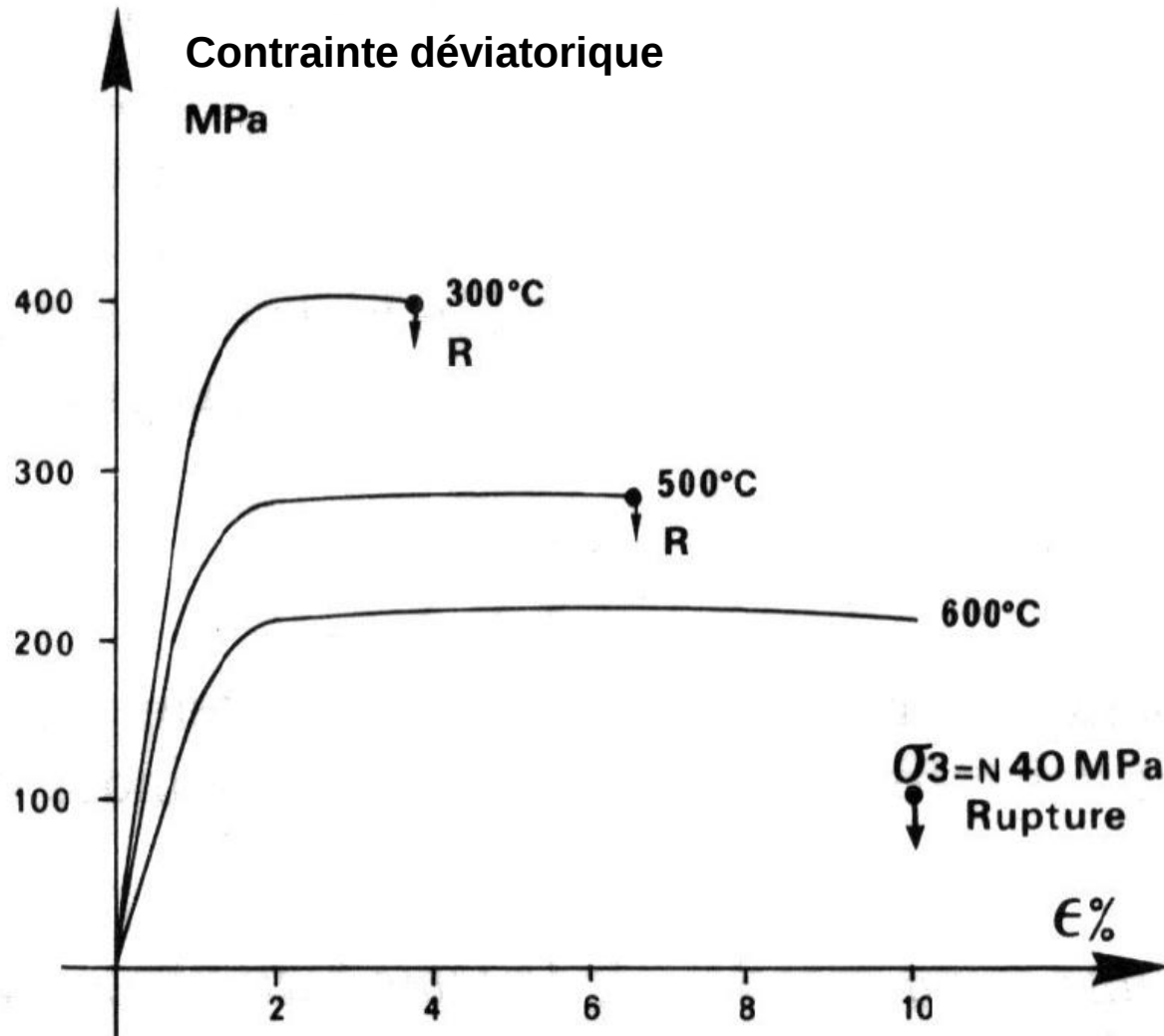
$$\varepsilon = (L_f - L_0) / L_0$$



(Domaines de déformation d'une roche)

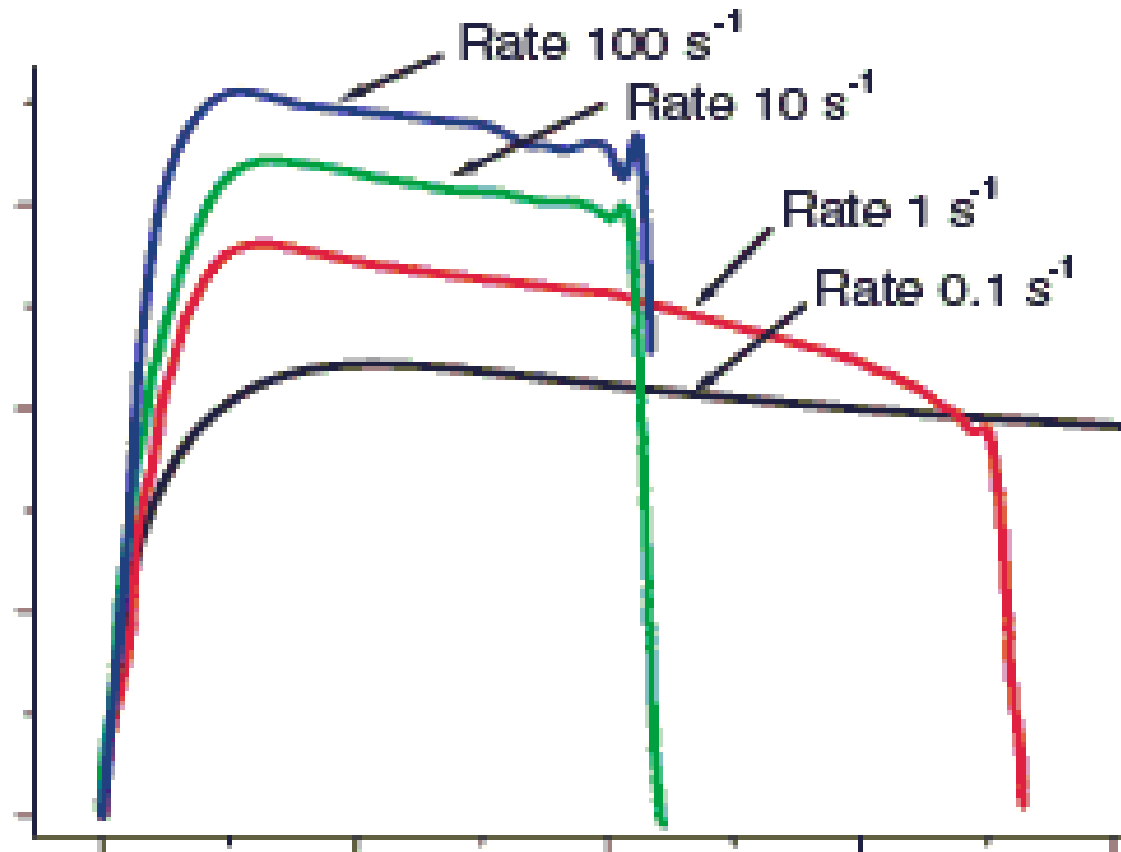


Effets de T sur la déformation



Effets de la vitesse d'application sur la déformation

Contrainte déviatorique

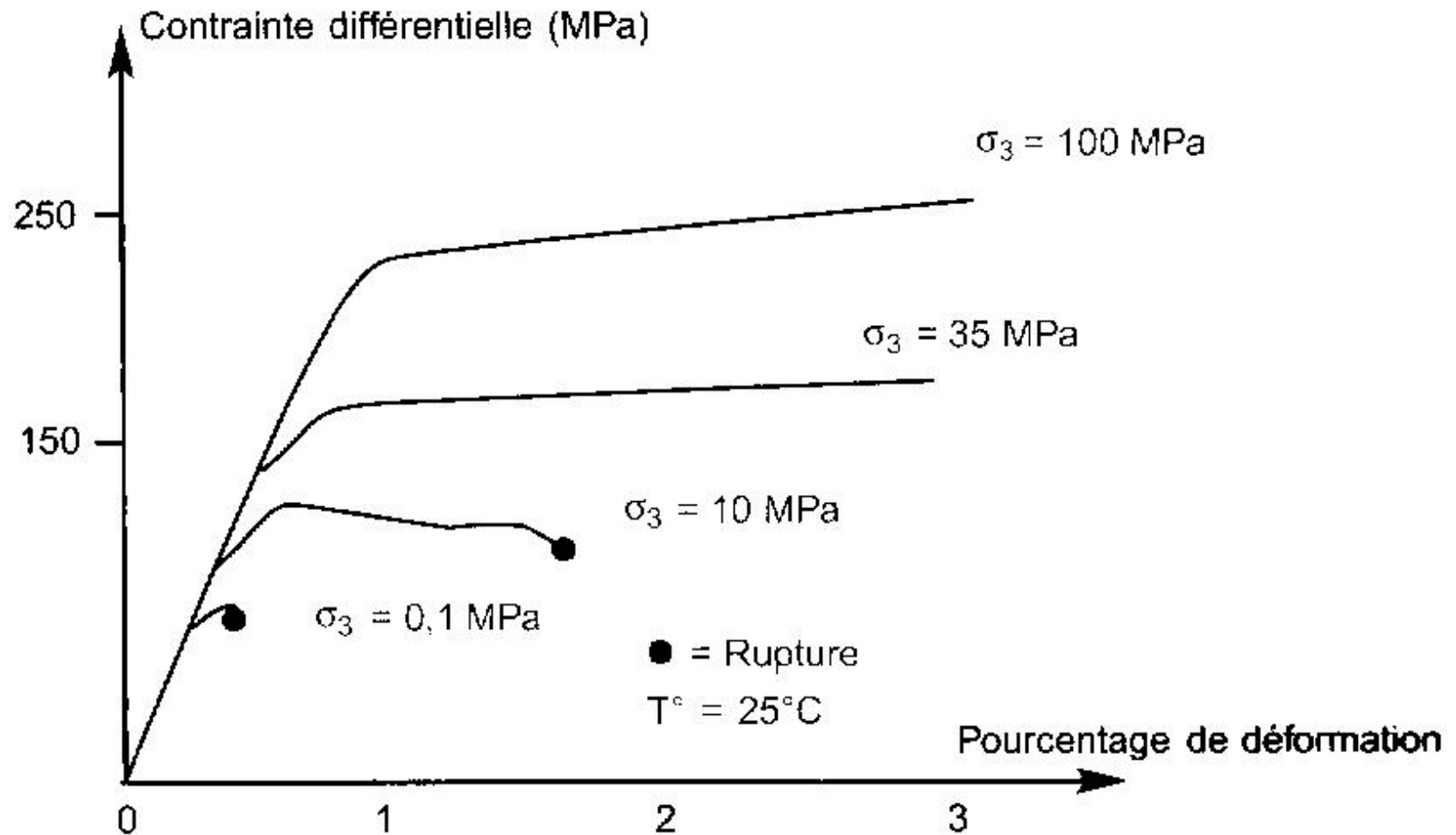


% de déformation

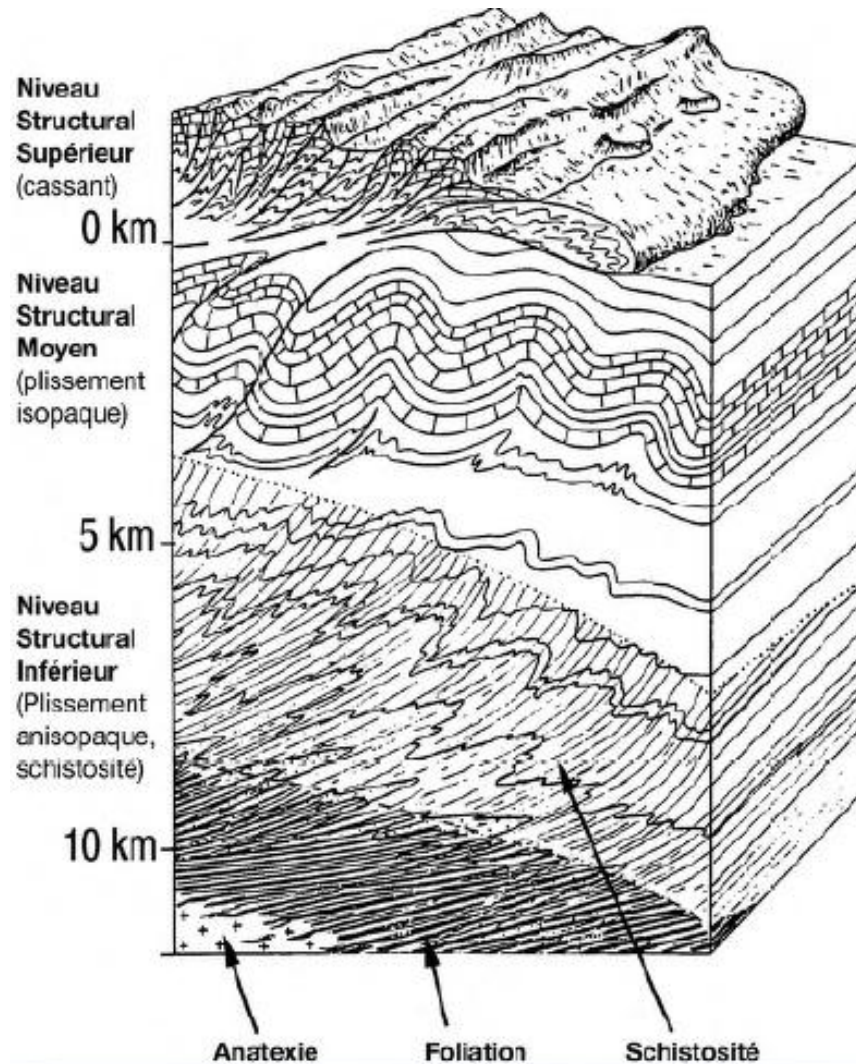
$$(E = \sigma / \varepsilon)$$

Minéral ou roche	Valeur du module de Young (Mpa)
Calcaire	20 000 à 70 000
Granite	60 000
Diamant	1 000 000

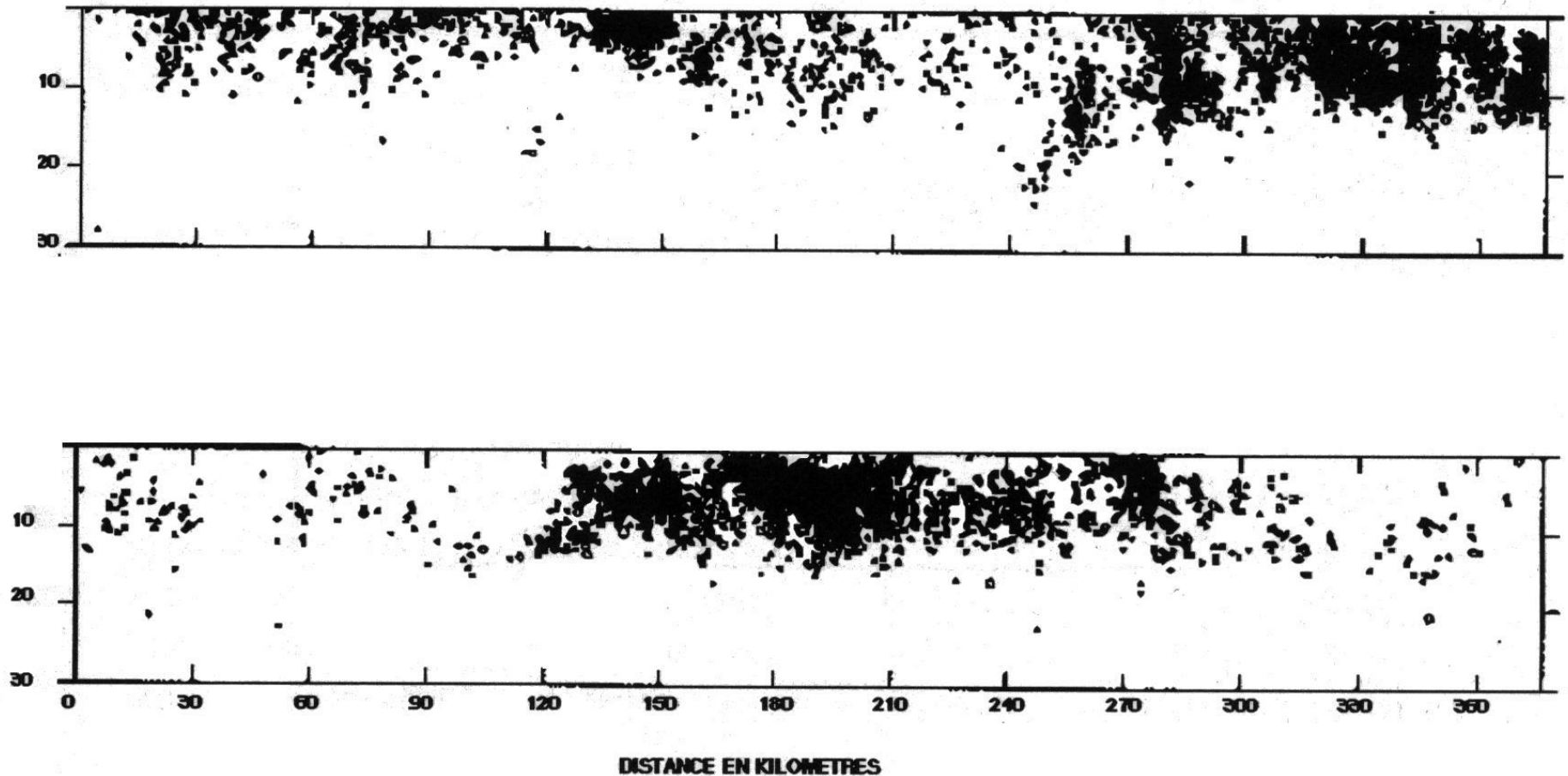
Effets de P de confinement sur la déformation



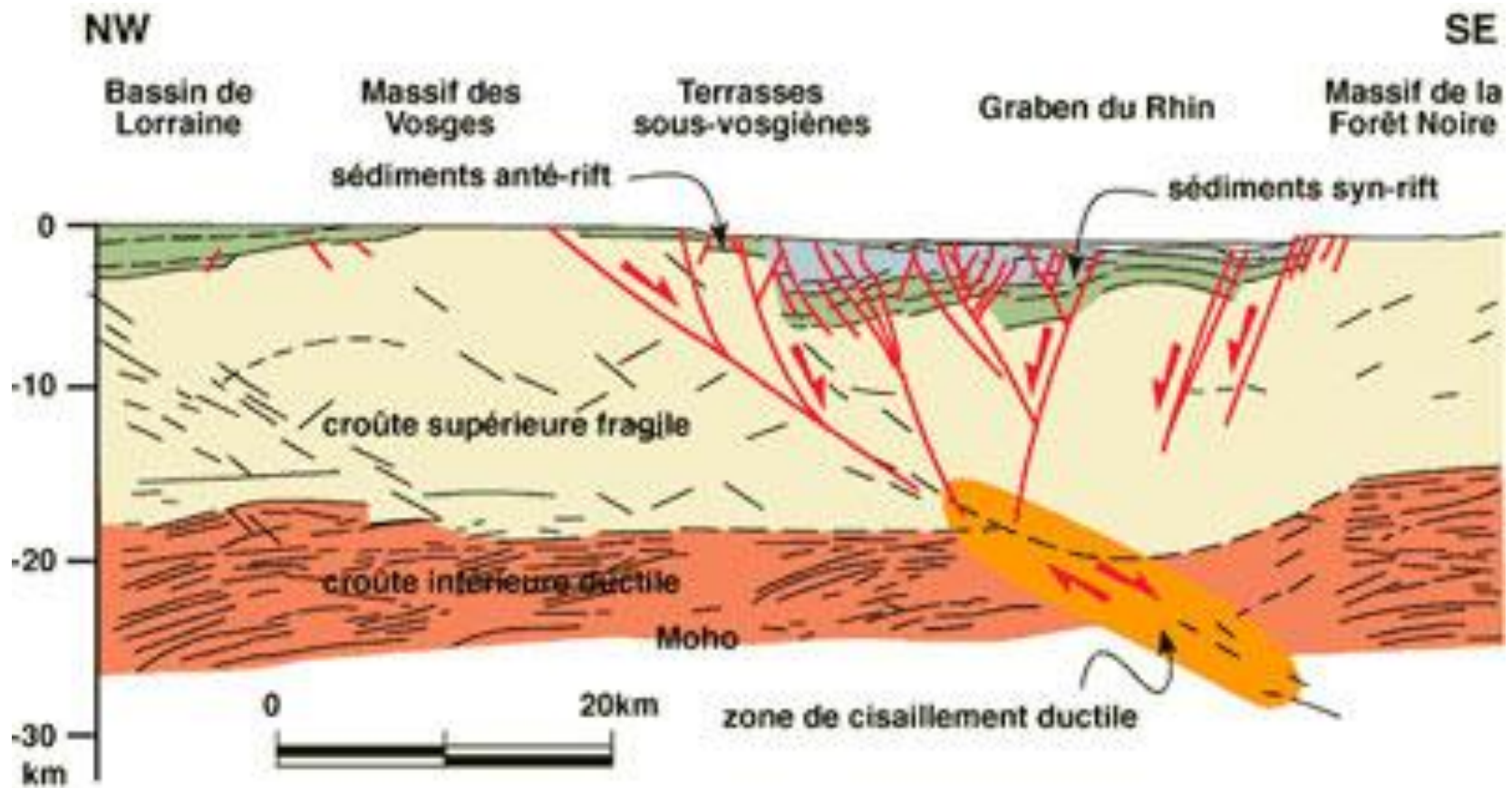
Notion de niveaux structuraux



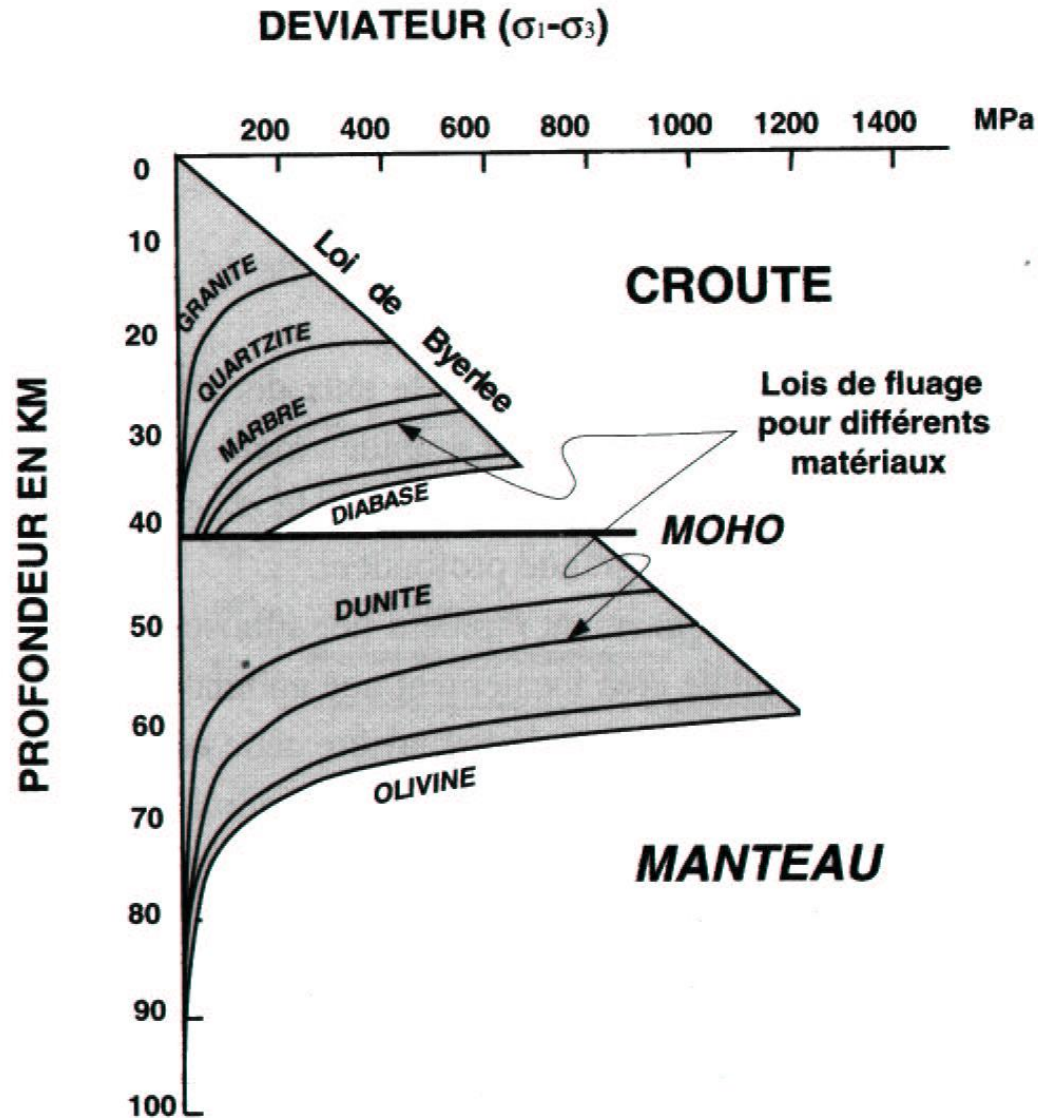
Profondeurs des foyers dans la zone de San Andreas



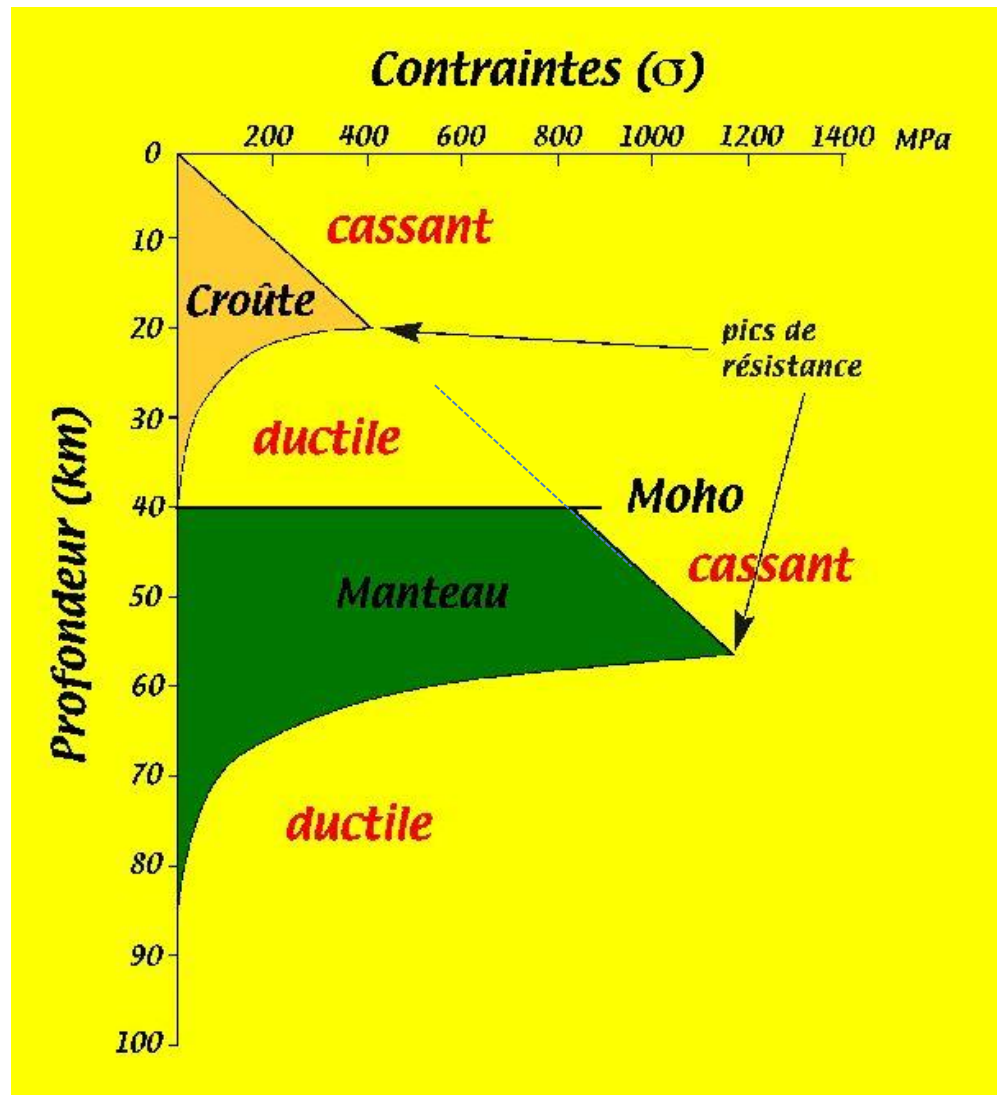
Une lithosphère stratifiée: profil Ecors



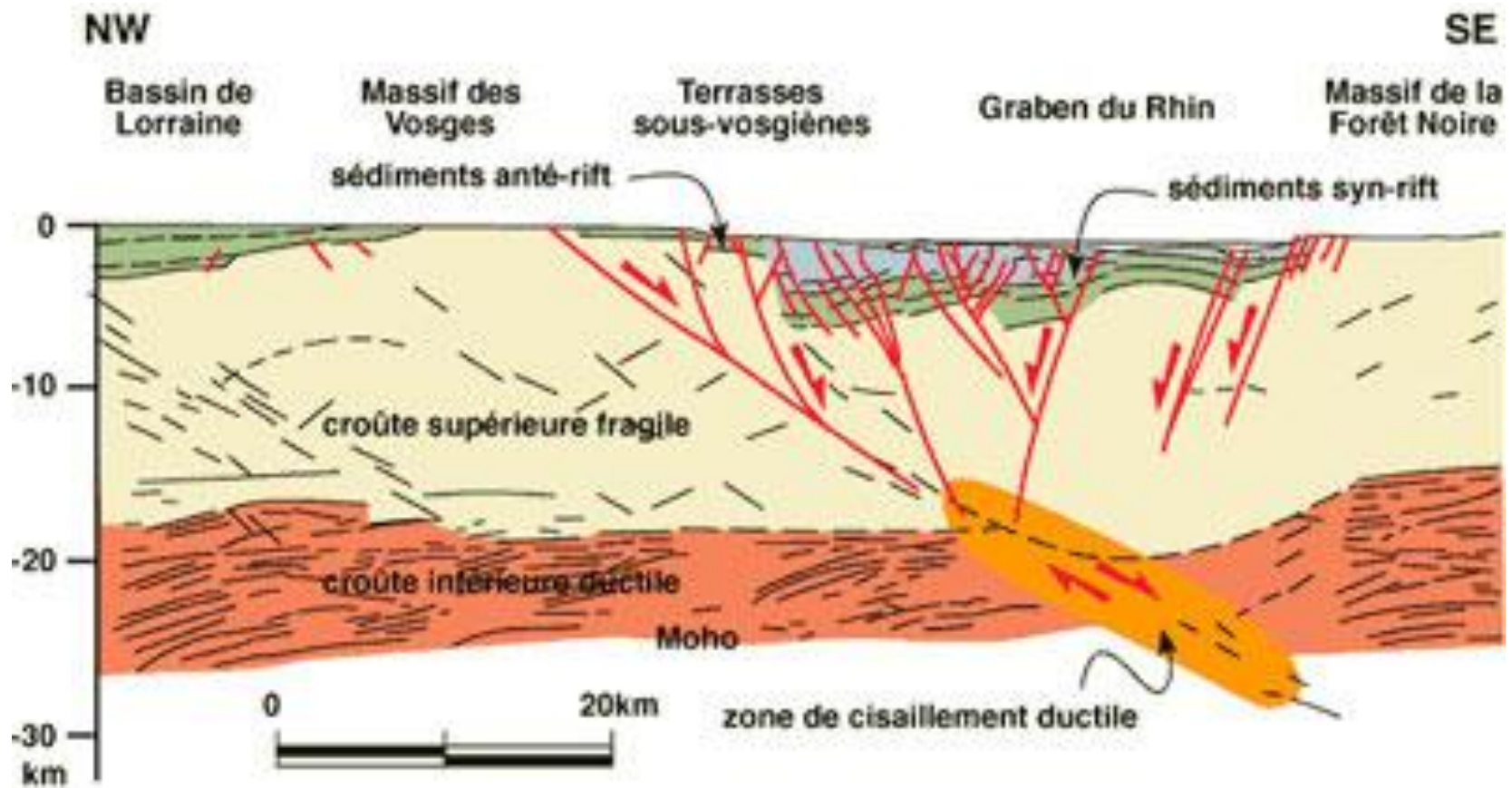
Profil rhéologique lithosphérique



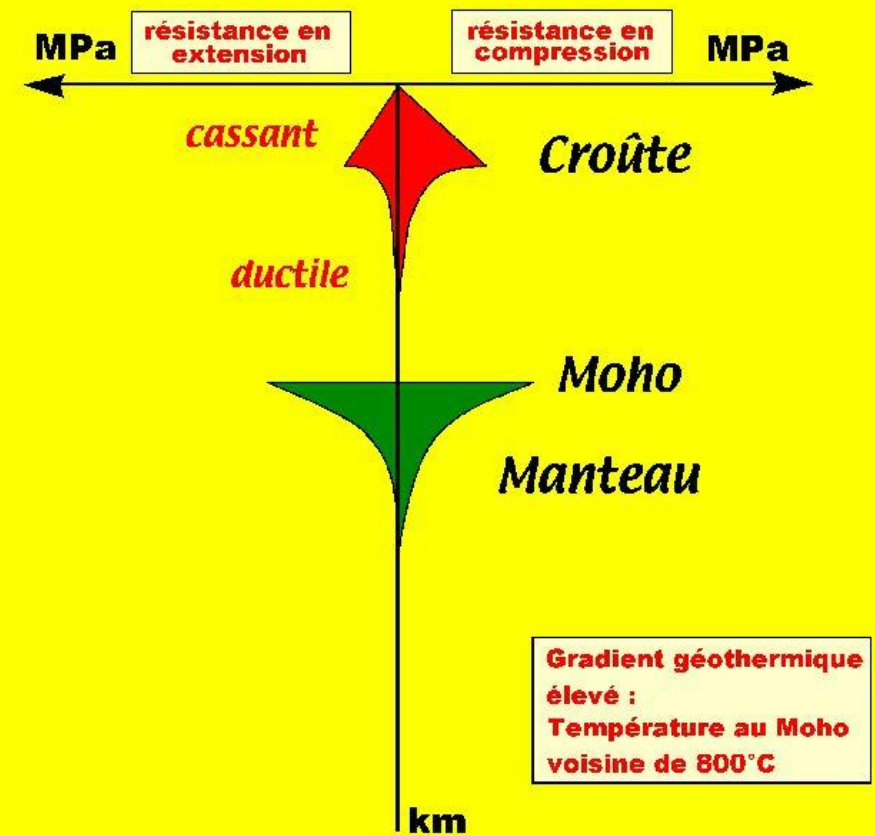
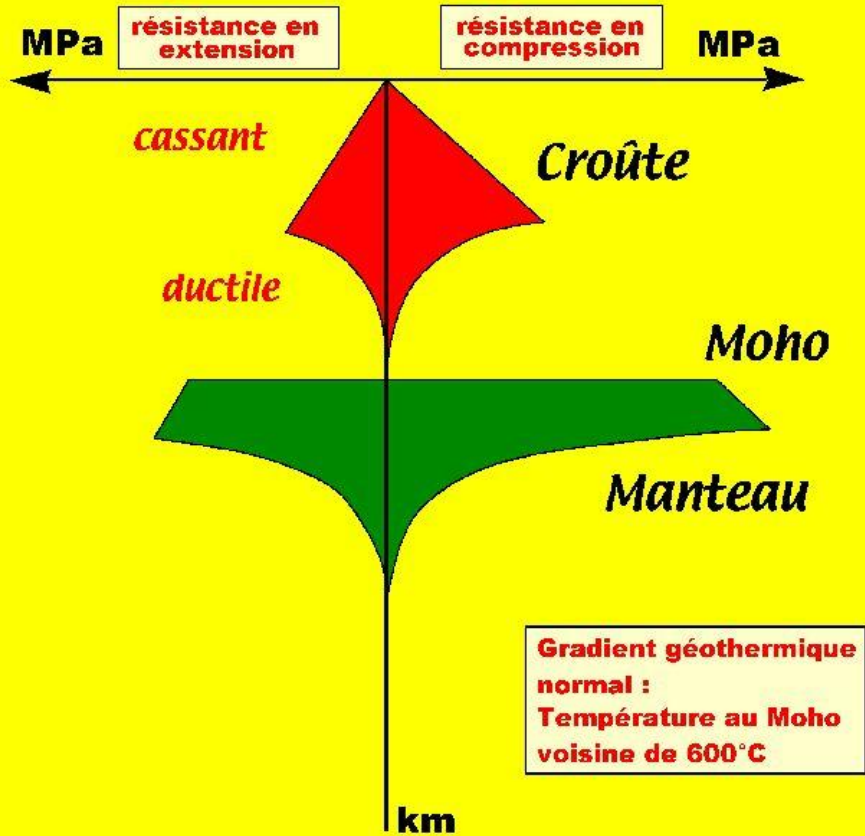
Profil rhéologique lithosphérique



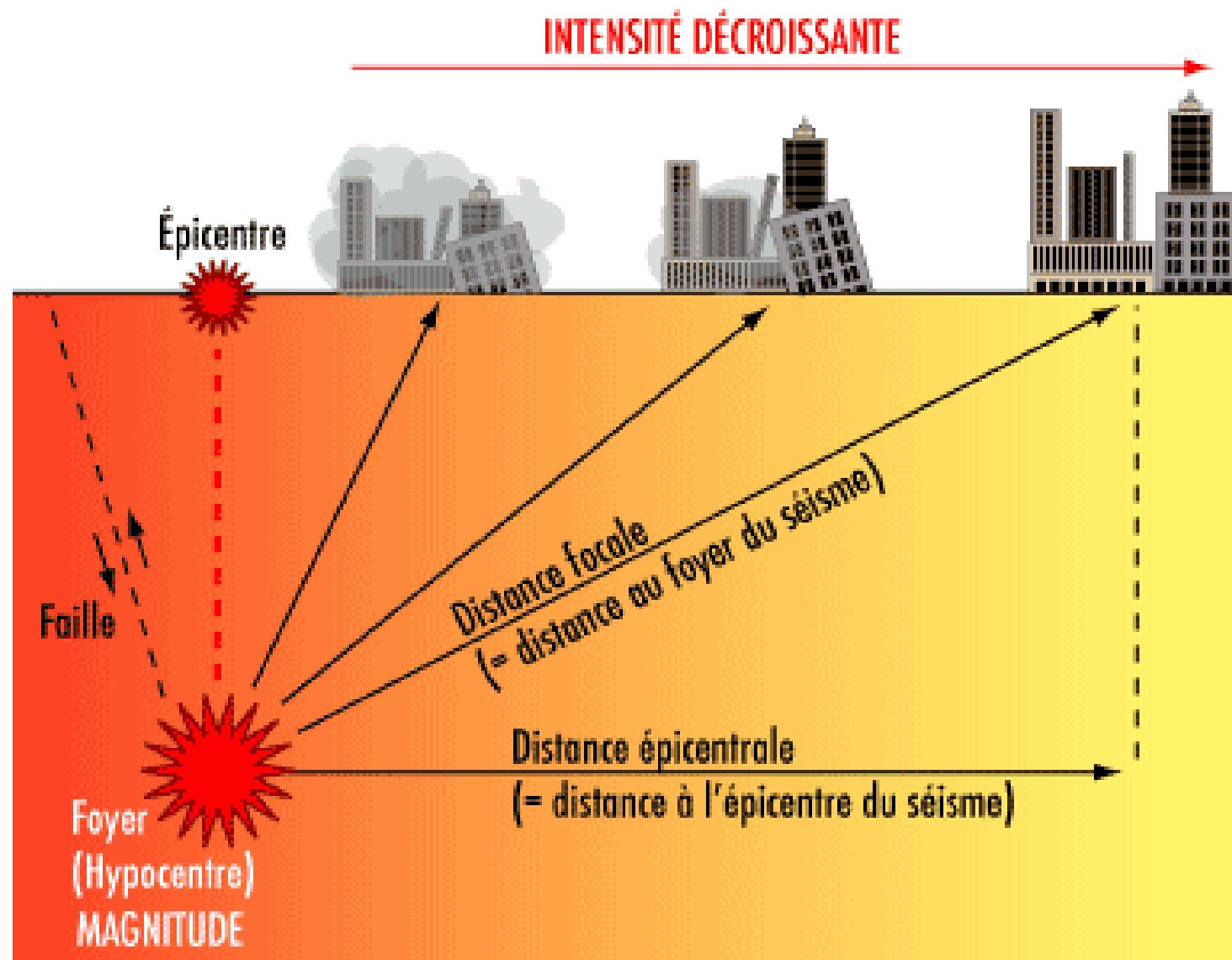
Une lithosphère stratifiée: profil Ecors



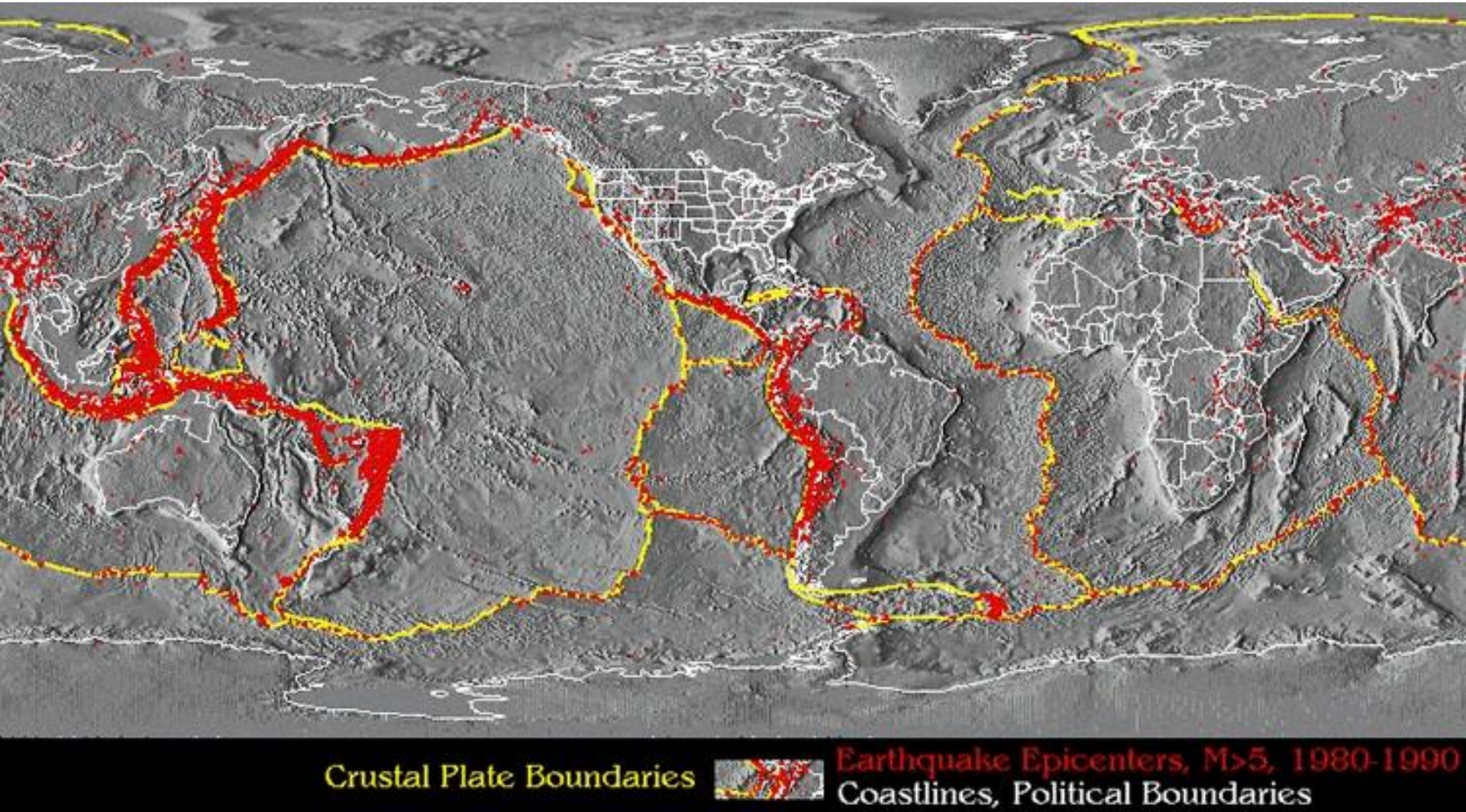
Comparer et expliquer les 2 profils rhéologiques



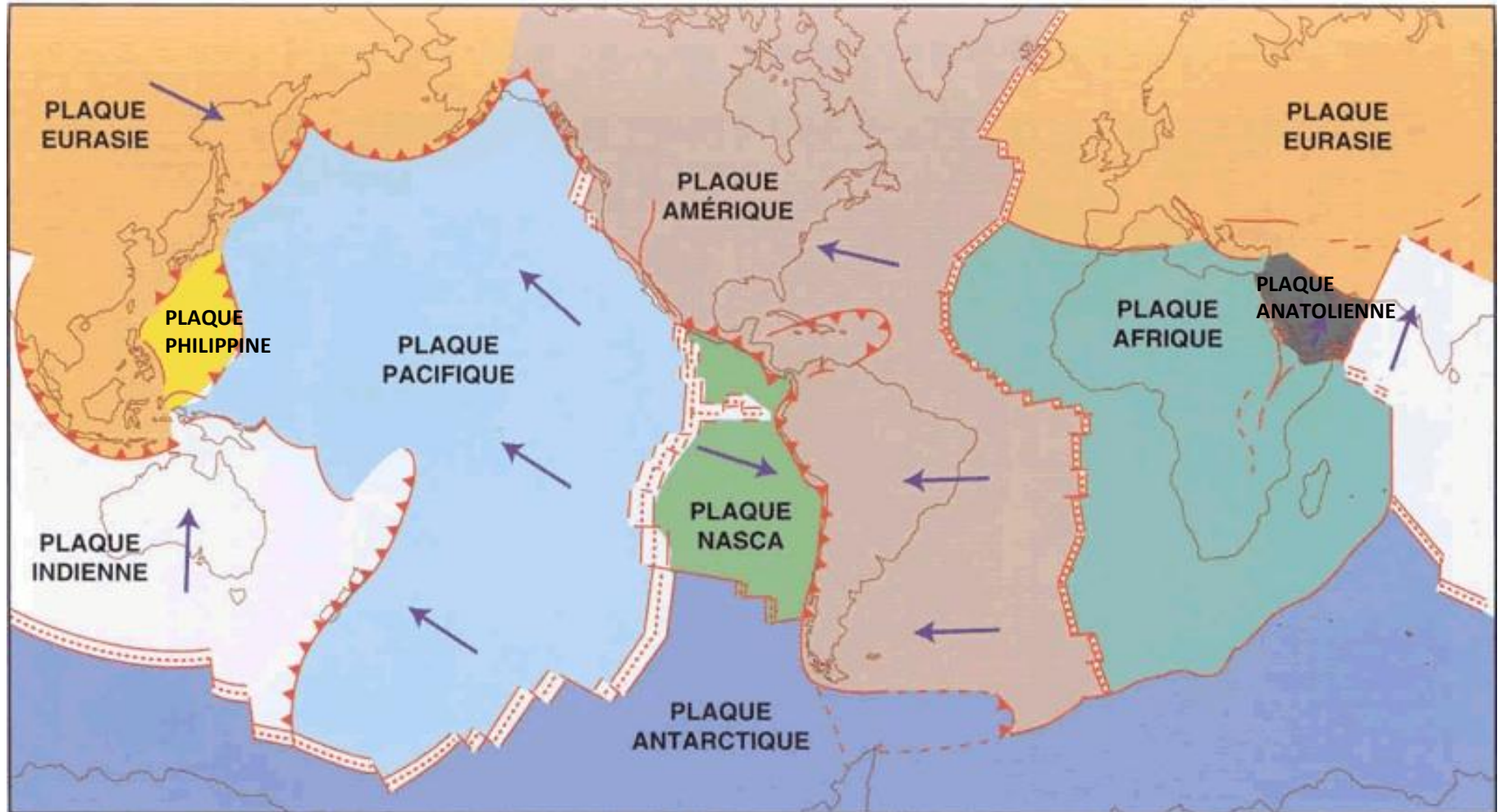
Séisme



Répartition des séismes



Plaques lithosphériques



Séisme: magnitude

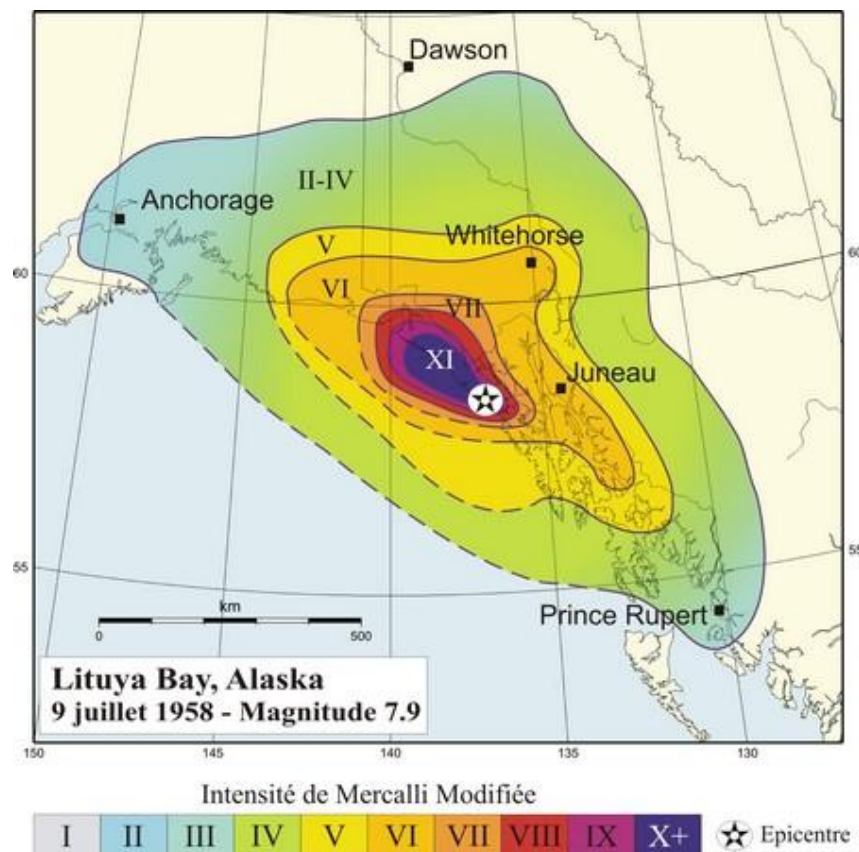
La magnitude locale de Richter M_L définie par Richter en 1935, est valable jusqu'à 600 km de distance ; elle est donnée par la relation :

$$M_L = \log A - \log A_0$$

A est le déplacement maximum du sol exprimé en millimètres,
 A_0 une valeur standard fonction de la distance d (km) entre la station sismique et l'épicentre, telle que $A_0 = (13,435/d)^{3,002}$ pour des distances allant de 200 à 600 km.

Séisme: intensité

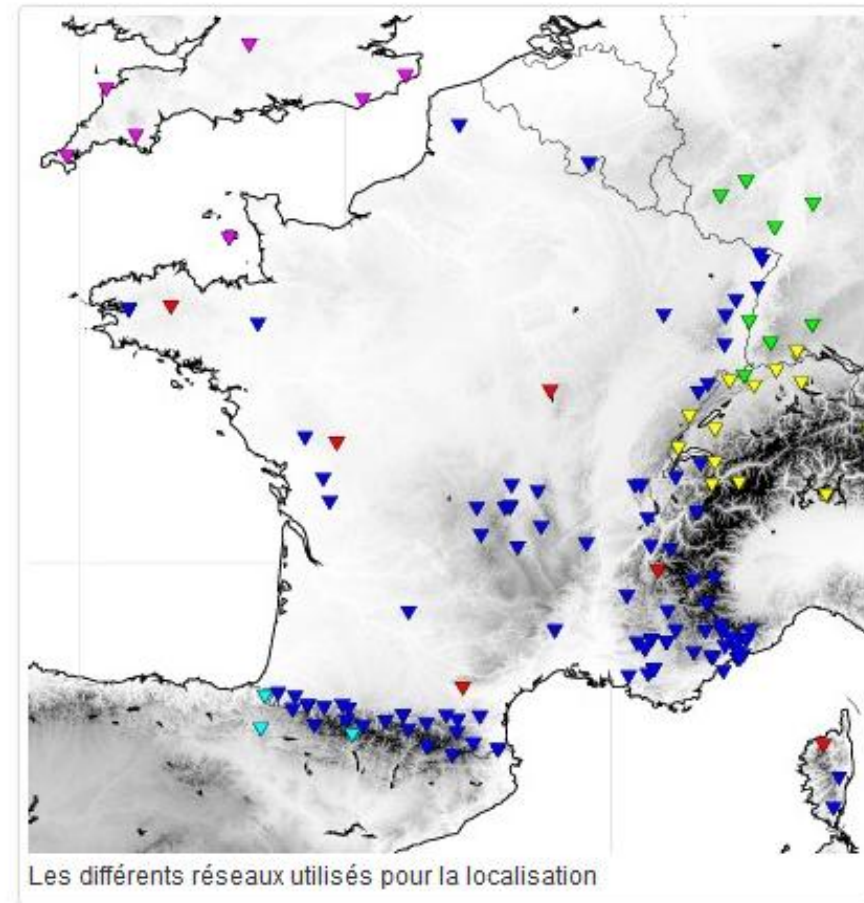
	secousse non ressentie, mais enregistrée par les instruments
II	secousse partiellement ressentie, notamment par des personnes au repos et aux étages
III	secousse faiblement ressentie, balancement des objets suspendus
IV	secousse largement ressentie dans et hors les habitations, tremblement des objets
V	secousse forte, réveil des dormeurs, chute d'objets, parfois légères fissures dans les plâtres
VI	légers dommages, parfois fissures dans les murs, frayeur de nombreuses personnes
VII	dégâts, larges lézardes dans les murs de nombreuses habitations, chûtes de cheminées
VIII	dégâts massifs, les habitations les plus vulnérables sont détruites, presque toutes subissent des dégâts importants
IX	destructions de nombreuses constructions, quelquefois de bonne qualité, chute de monuments et de colonnes
X	destruction générale des constructions, même les moins vulnérables (non parasismiques)
XI	catastrophe, toutes les constructions sont détruites (ponts, barrages, canalisations enterrées...)
XII	changement de paysage, énormes crevasses dans le sol, vallées barrées, rivières déplacées...



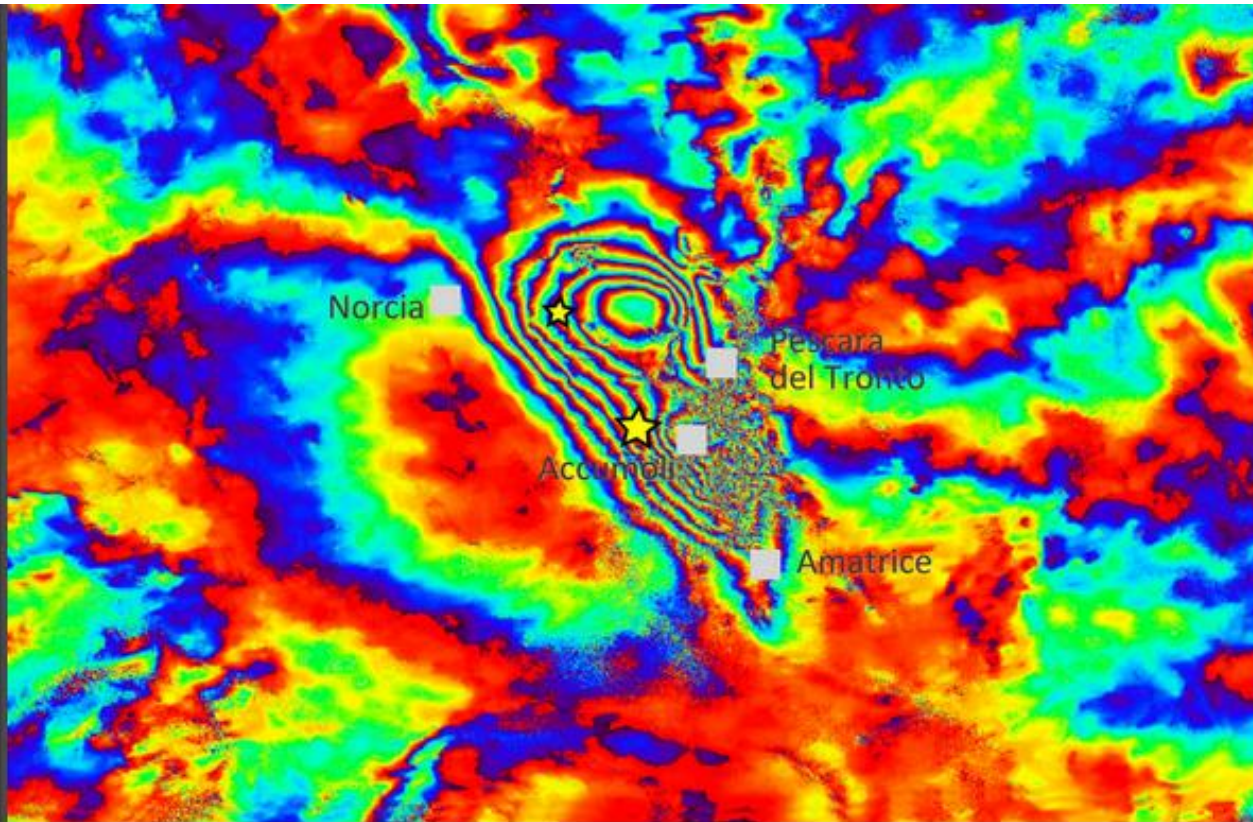
Stations de surveillance sismique de la France métropolitaine

Réseaux utilisés pour la localisation

Code réseau	Nom	Pays
CH	SED	Suisse
ES	IGN	Espagne
FR	RLBP / RéNaSS	France
GB	BGS	Angleterre
LE	LGRB	Allemagne
RD	CEA-LDG	France



Détection de déformations par interférométrie radar

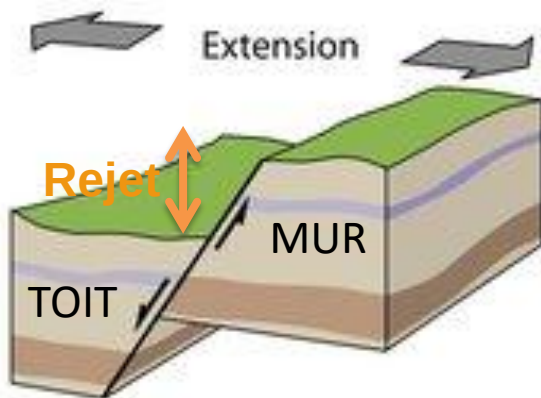


Plusieurs images du même endroit sont acquises successivement par un radar embarqué à bord d'un satellite L'analyse des différences de phase permet de déterminer les déformations.

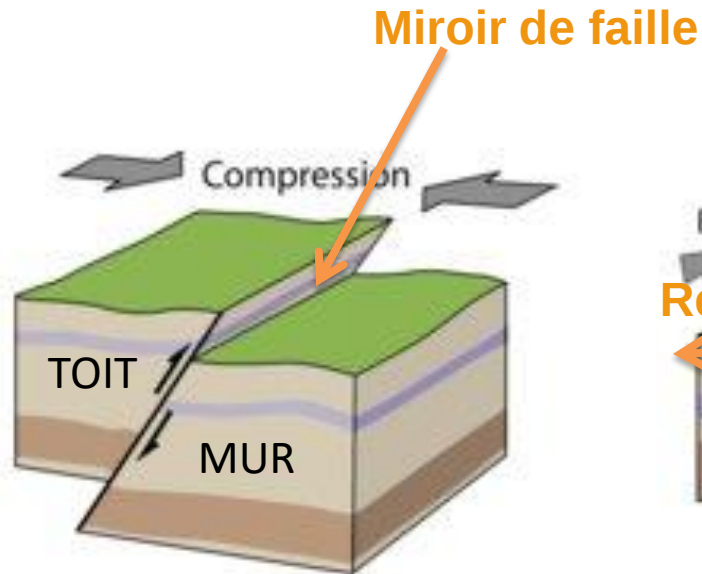
Ex du séisme italien du 24 août 2016

En Italie, déformation de la surface terrestre causée par le tremblement de Terre du 24 août. Interférogramme construit à partir de données des satellites Sentinel-1A et Sentinel-1B. Programme Copernicus. Crédit image : ESA / CNR-IREA

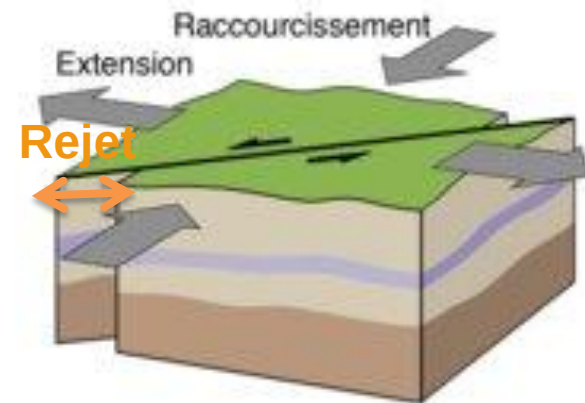
Failles



Faille normale



Faille inverse

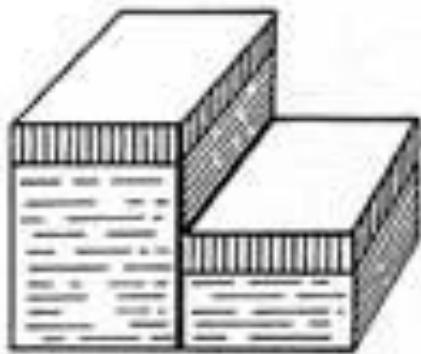


**Décrochement
(ici sénestre)**

Rejet $\neq$ Escarpement de faille

décalage tectonique
originel

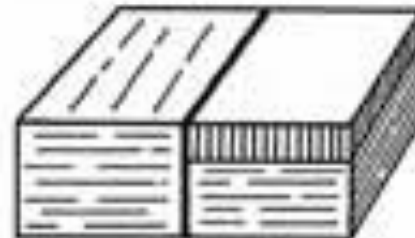
décalage topographique



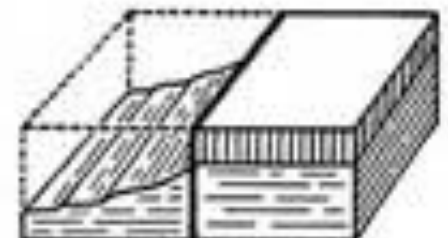
1



2



3

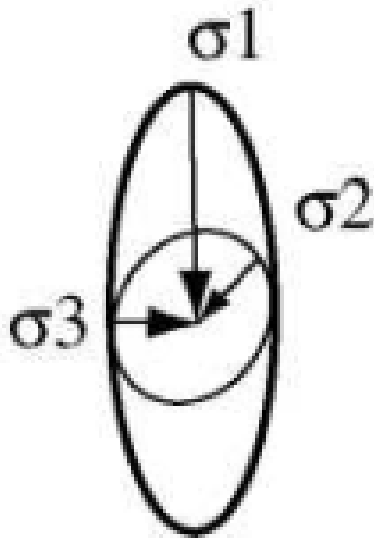


4

Failles conjuguées

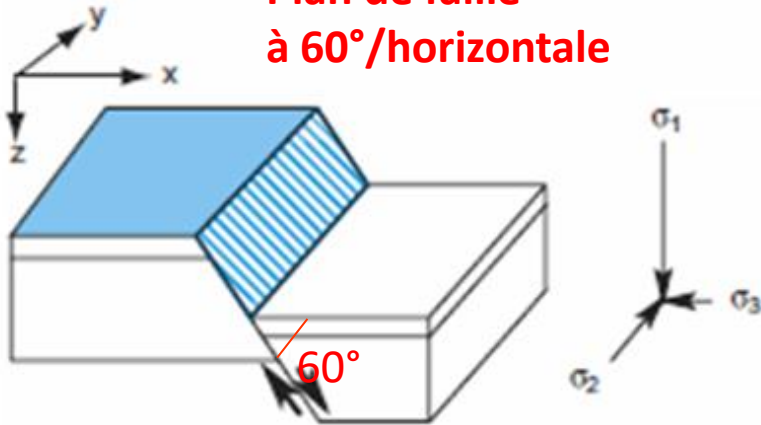


Obtention expérimentale de failles conjuguées avec une presse

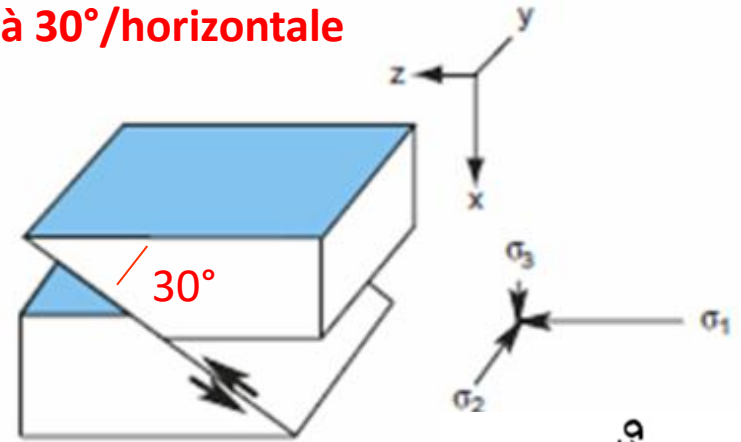


Relation entre type de failles et contraintes

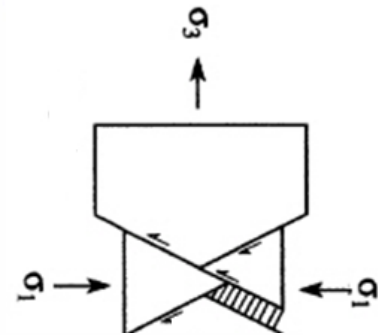
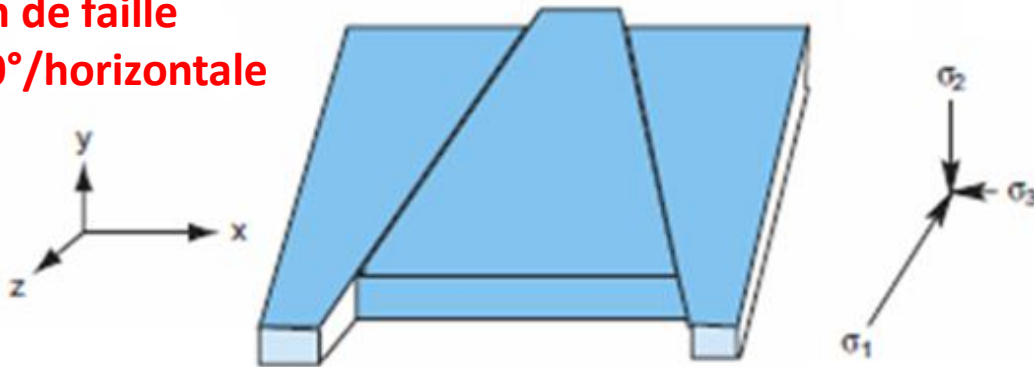
Plan de faille
à 60°/horizontale



Plan de faille
à 30°/horizontale

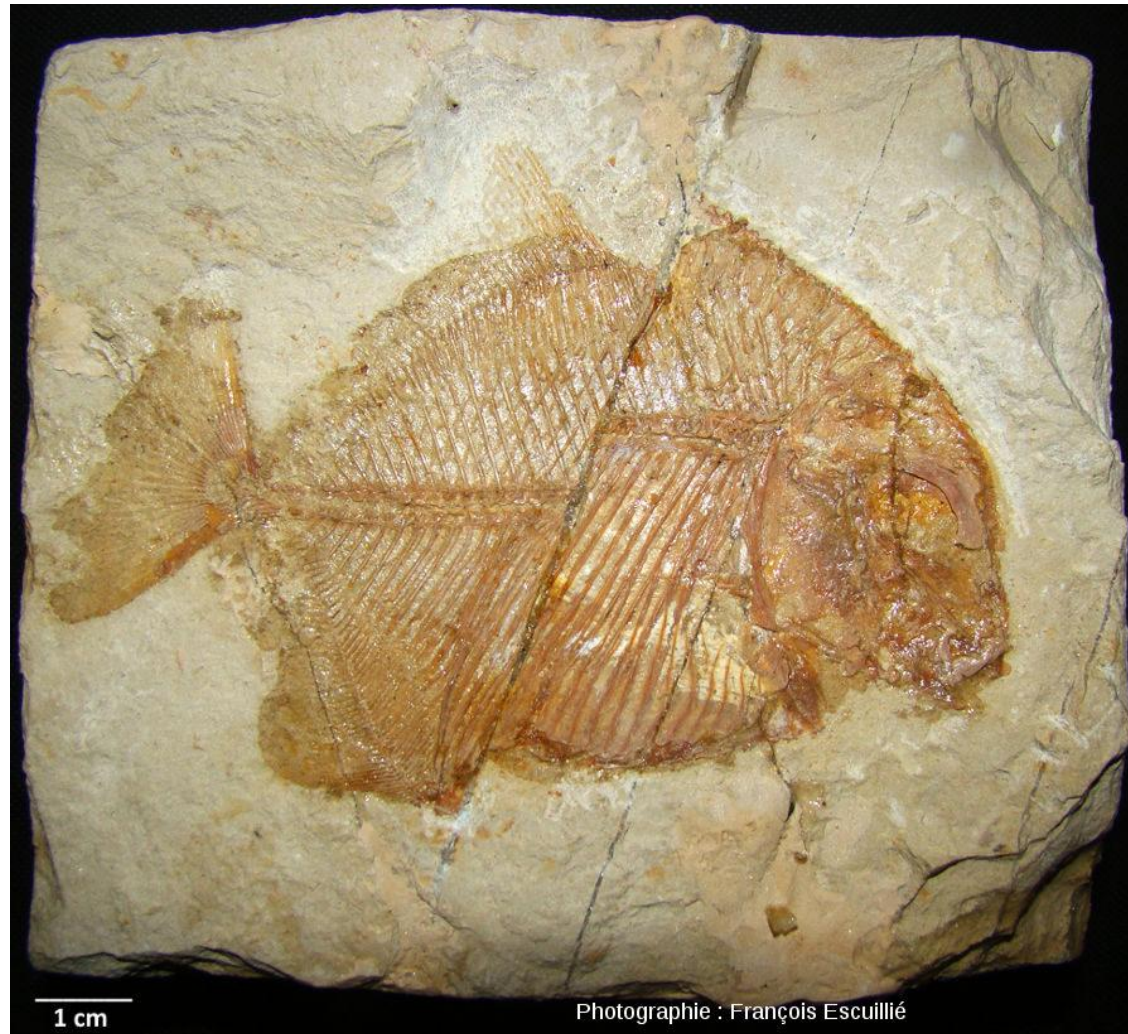


Plan de faille
à 90°/horizontale

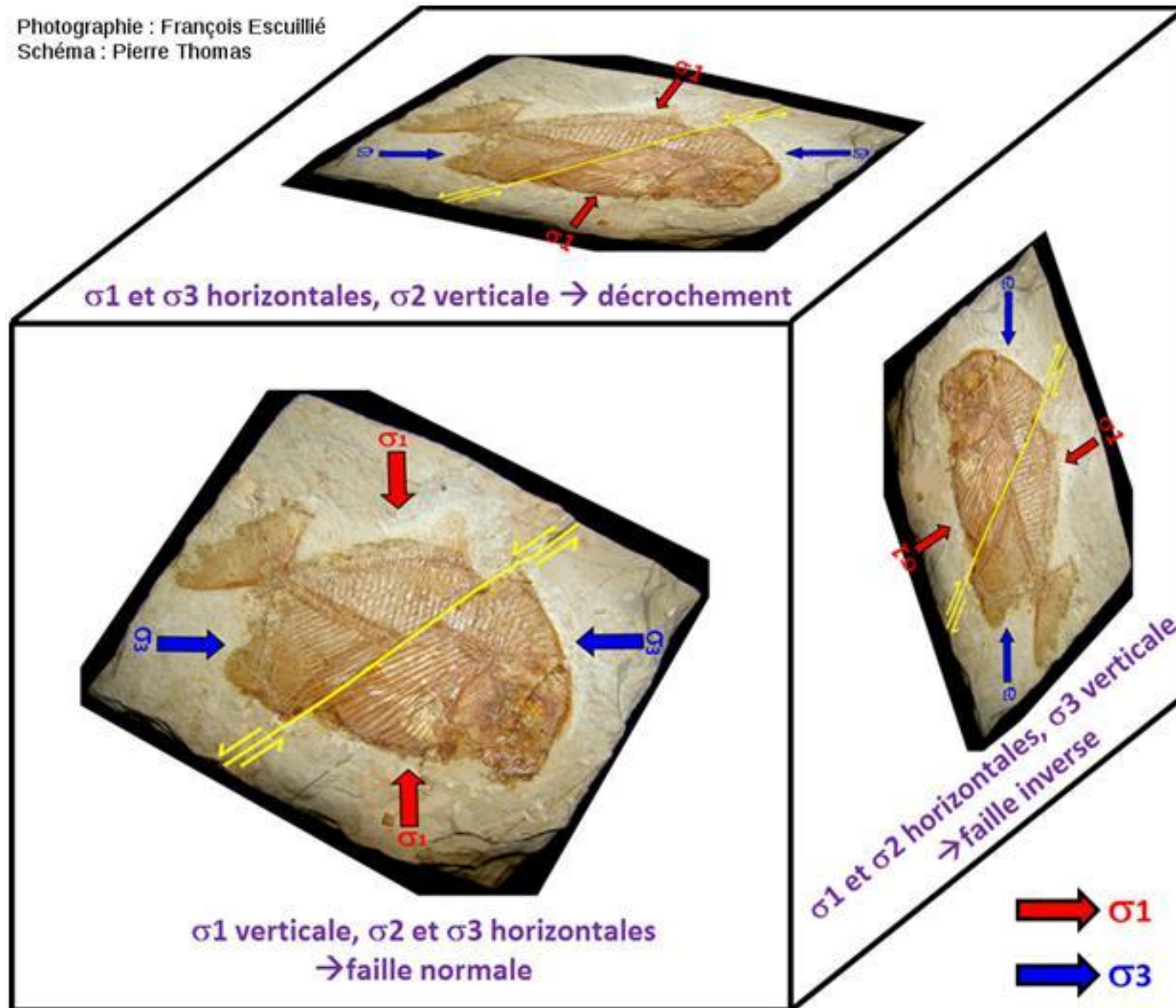


→ σ_1 à 30°/faille dans les 3 cas

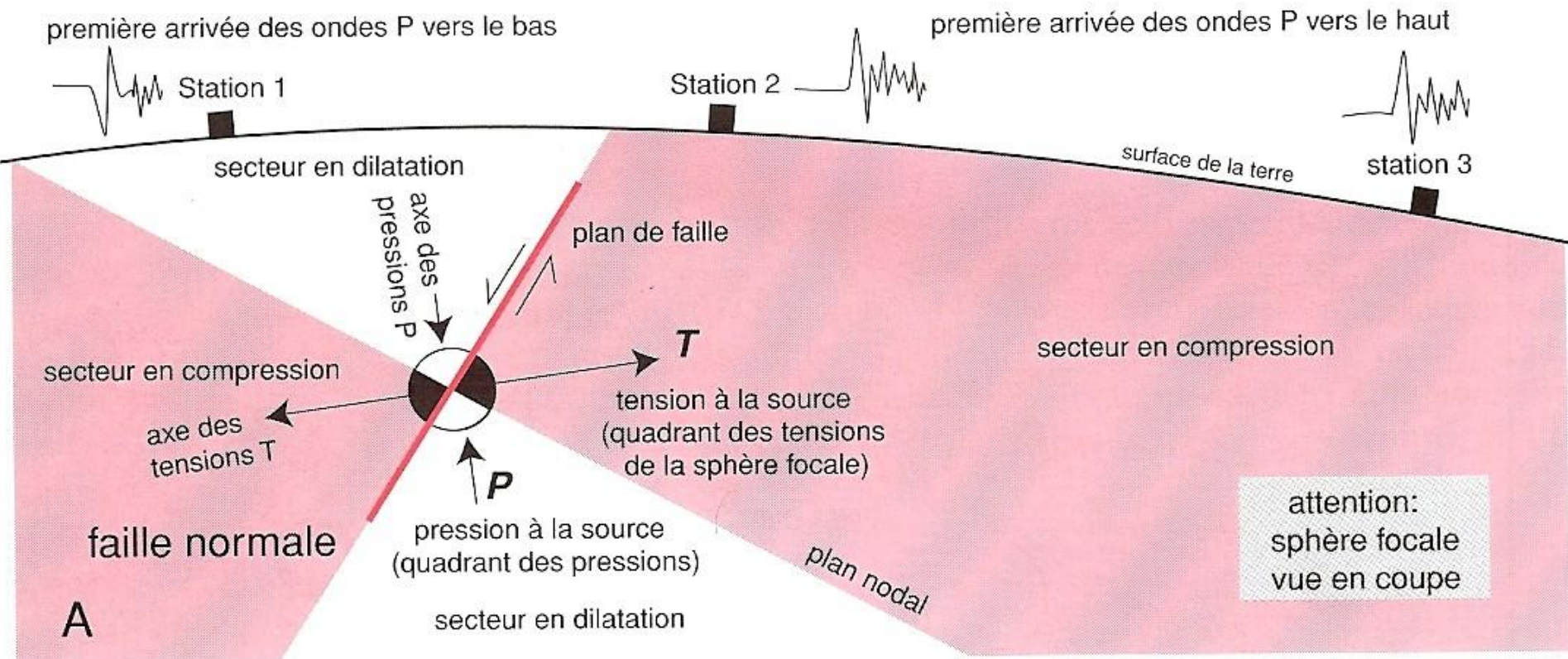
Déterminer, si c'est possible, les déformations, les contraintes et le type de faille.



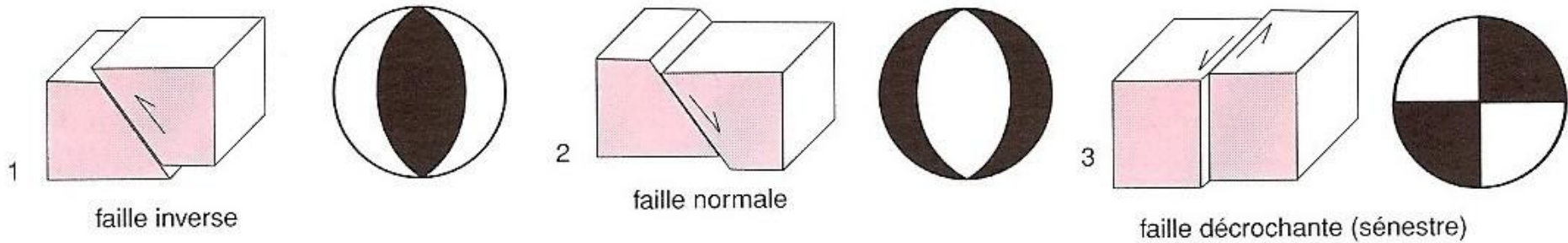
Photographie : François Escuillé
Schéma : Pierre Thomas



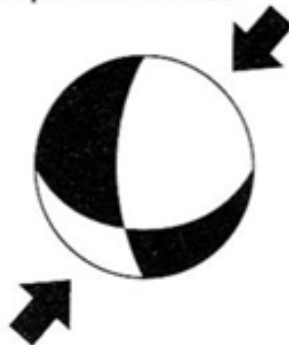
Mécanisme au foyer: établissement



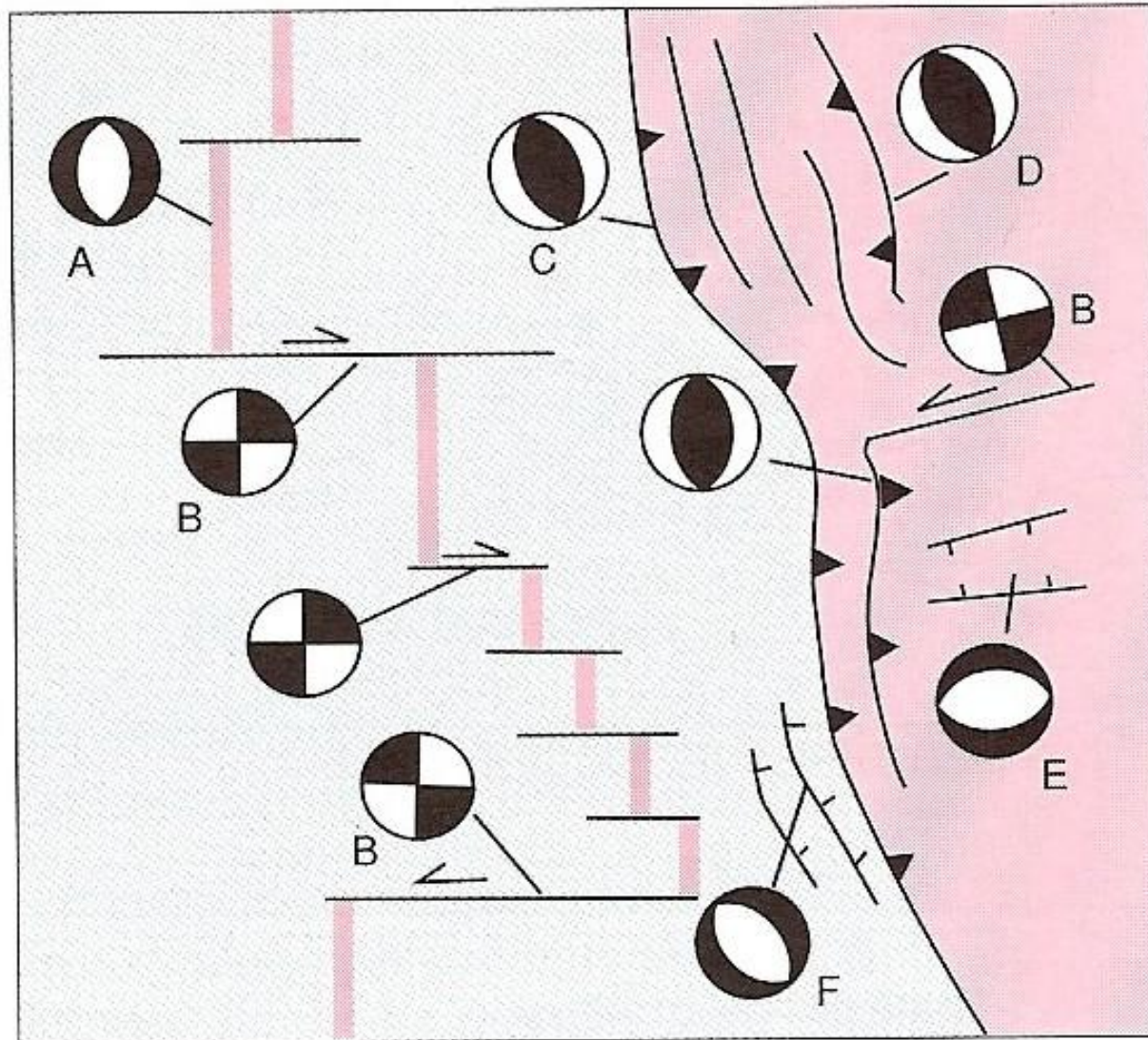
Mécanisme au foyer: traduction



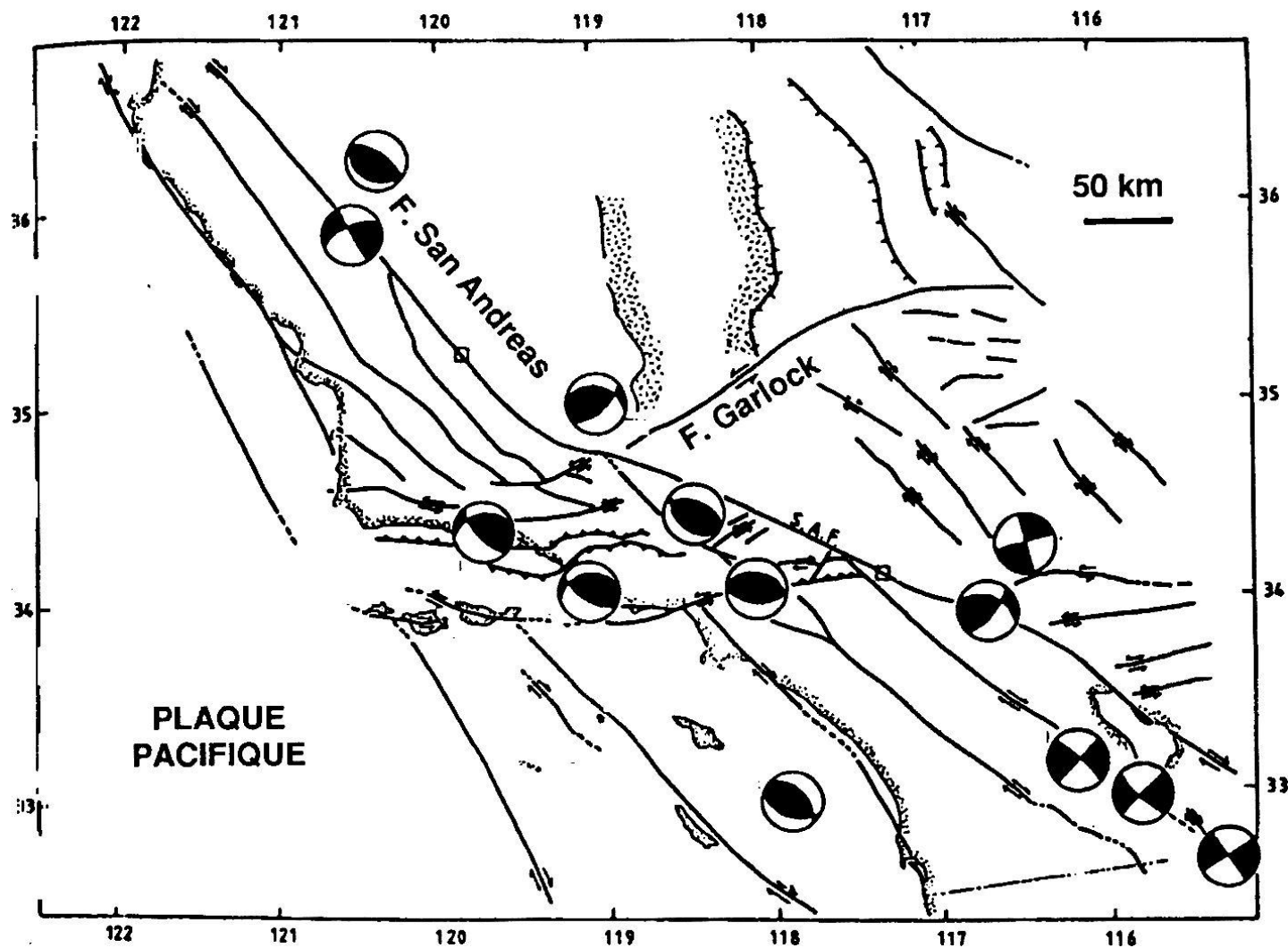
décrochement à
composante inverse



Mécanisme au foyer et contexte tectonique - ex1



Mécanisme au foyer et contexte tectonique - ex2



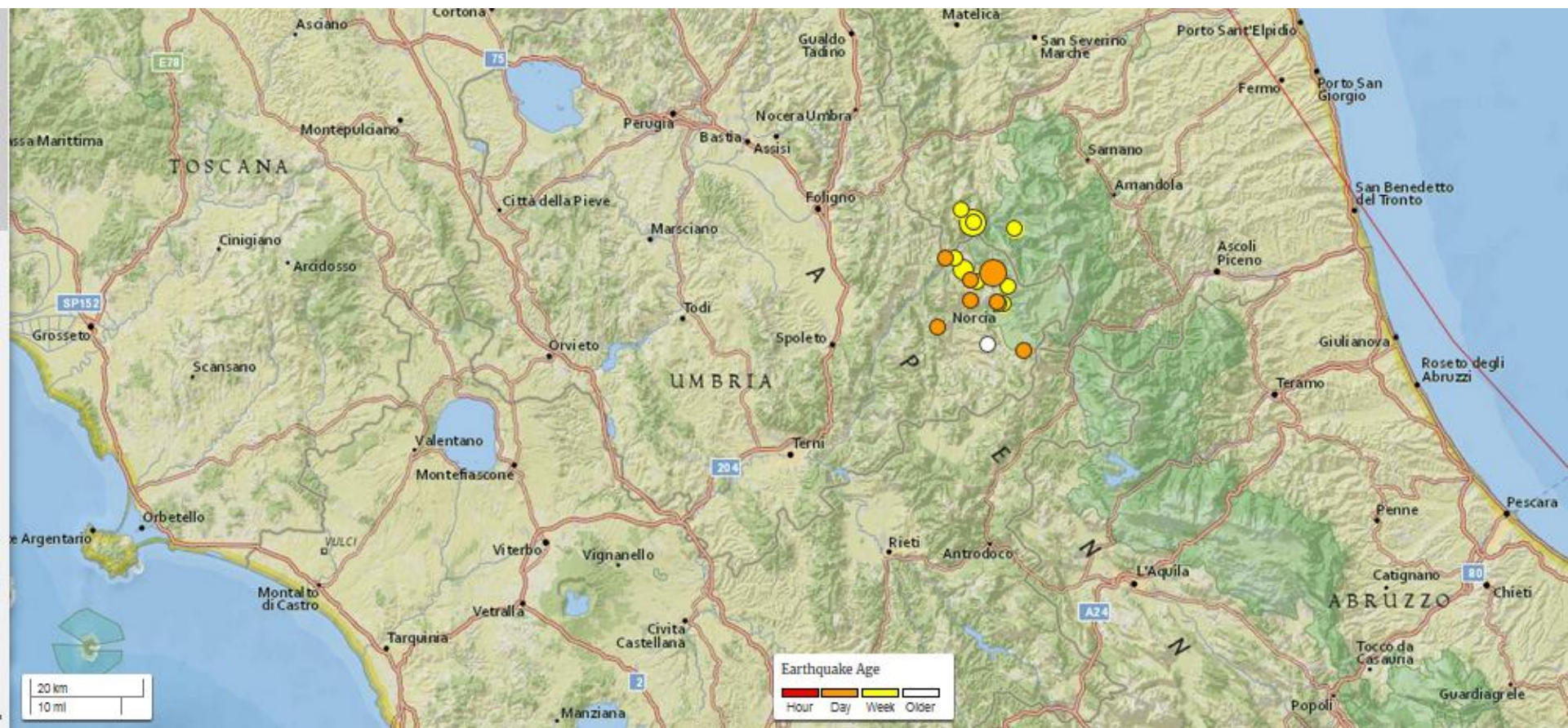
Ex du séisme italien du 26/10/2016 (site USGS): localisation/datation

Magnitude	6.1 mww
Location uncertainty	42.934°N 13.043°E ± 4.9 km
Depth uncertainty	10.0 km ± 1.7
Origin Time	2016-10-26 19:18:08.320 UTC

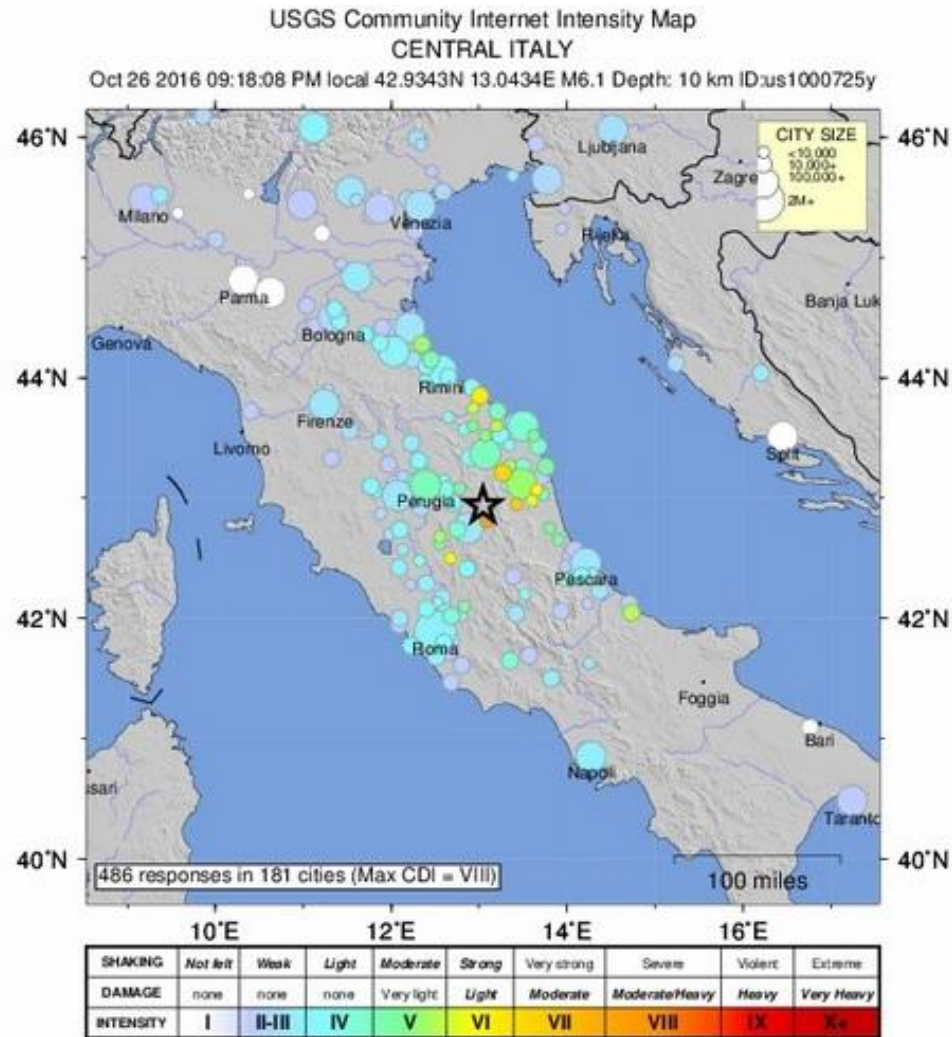
M 6.6 le 30.10.2016



Localisation intraplaque des séismes italiens fin oct 2016 (site USGS)

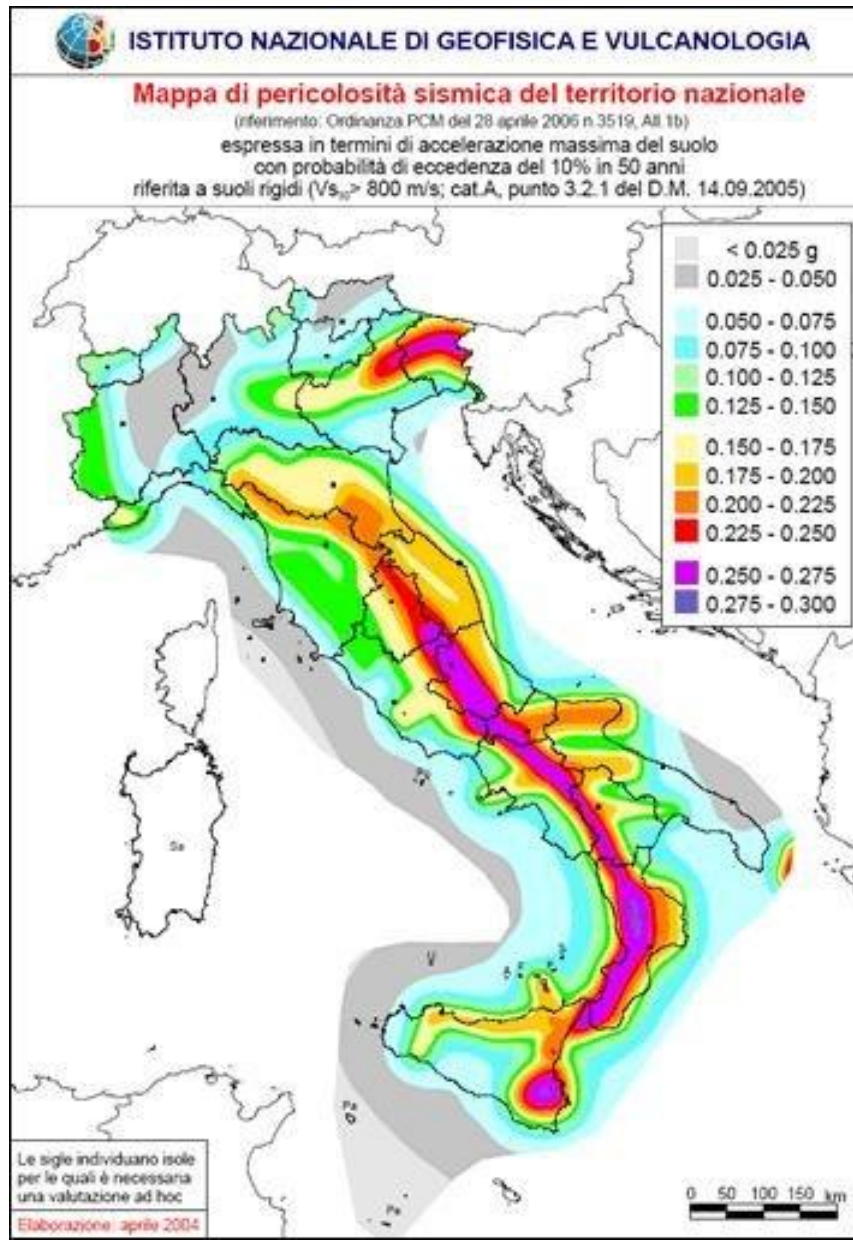


Ex du séisme italien du 26/10/2016 (site USGS): analyse des dégâts pour la détermination de l'intensité



Processed: Thu Oct 27 14:43:15 2016 vmdyfl

Carte de l'aléa sismique en Italie



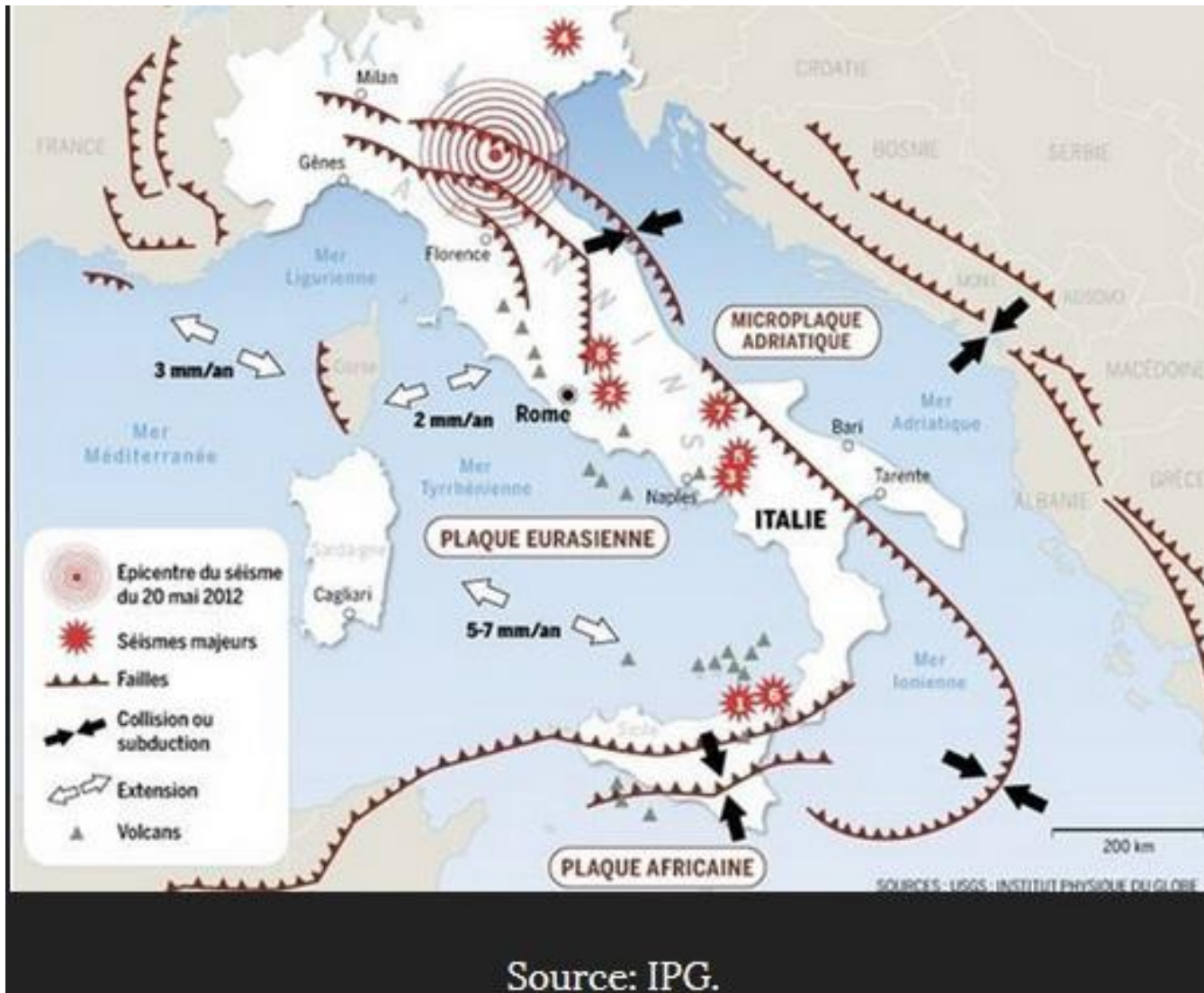
**Estimée par l'accélération
maximale du sol ayant une
probabilité de 10% en 50 ans**

Données INGV 2004

Ex du séisme italien du 26/10/2016 (site USGS): carte des séismes régionaux



Ex du séisme italien du 26/10/2016: contexte tectonique



Ex du séisme italien du 26/10/2016 (site USGS): mécanisme au foyer

Moment Tensor

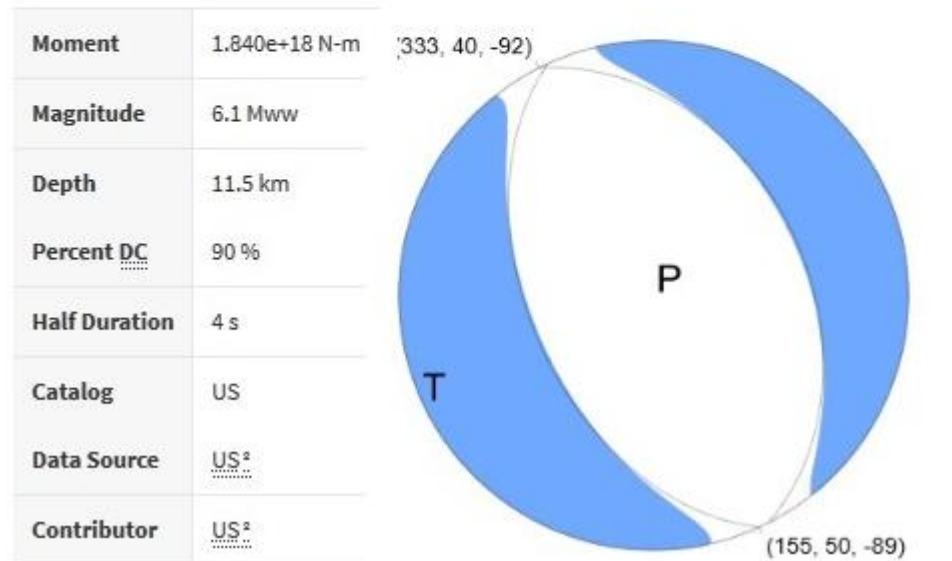
[View alternative moment tensors \(4 total\)](#)

Contributed by [US²](#) last updated 2016-10-26 21:57:16 (UTC)

✓ The data below are the most preferred data available

✓ The data below have been reviewed by a scientist

W-phase Moment Tensor (M_{ww})

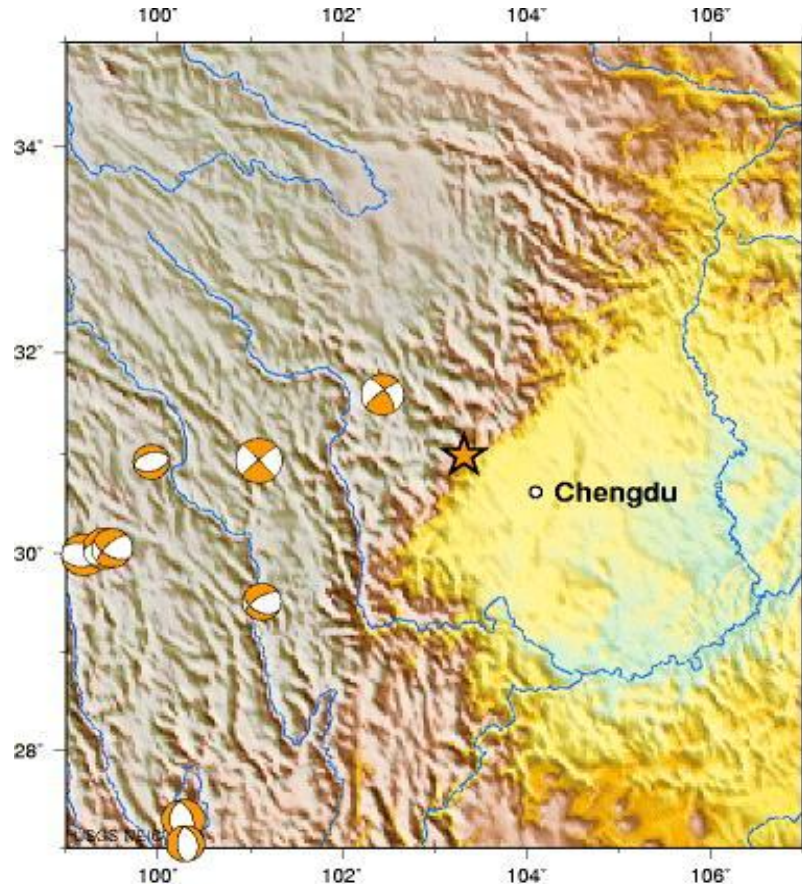


Par exemple, le [mécanisme au foyer](#) (Global CMT Project Moment Tensor Solution) pour le séisme de L'Aquila (Italie) du 6 avril 2009 (magnitude 6.3, jeu sur une faille normale) :

#####	April 6, 2009, CENTRAL ITALY, MW=6.3
-----#####	CENTROID-MOMENT-TENSOR SOLUTION
-----#####	GCMT EVENT: C200904060132A
-----#####	DATA: II IU CU G GE
#-----#####	[...]
##-----#####	PRINCIPAL AXES:
###-----#####	1. (T) VAL= 3.423; PLG= 3; AZM=231
##### P -----#####	2. (N) 0.001; 15; 140
#####	3. (P) -3.424; 75; 334
#####	
#####	
#####	
# -----#####	
T -----#####	
#####	
#####	
#####	

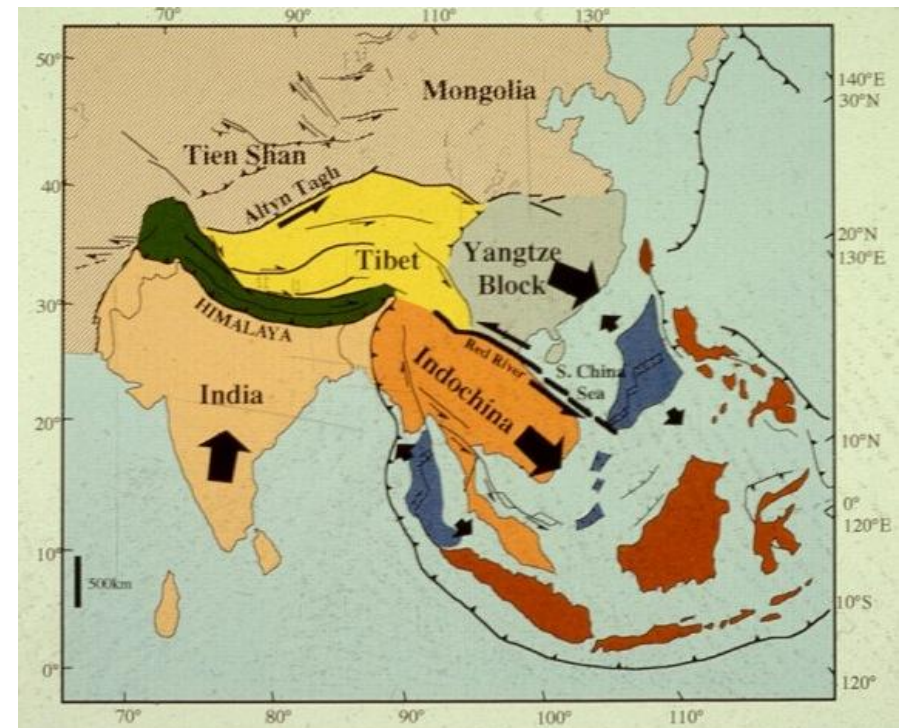


Ex du poinçonnement de l'Asie par la collision indienne

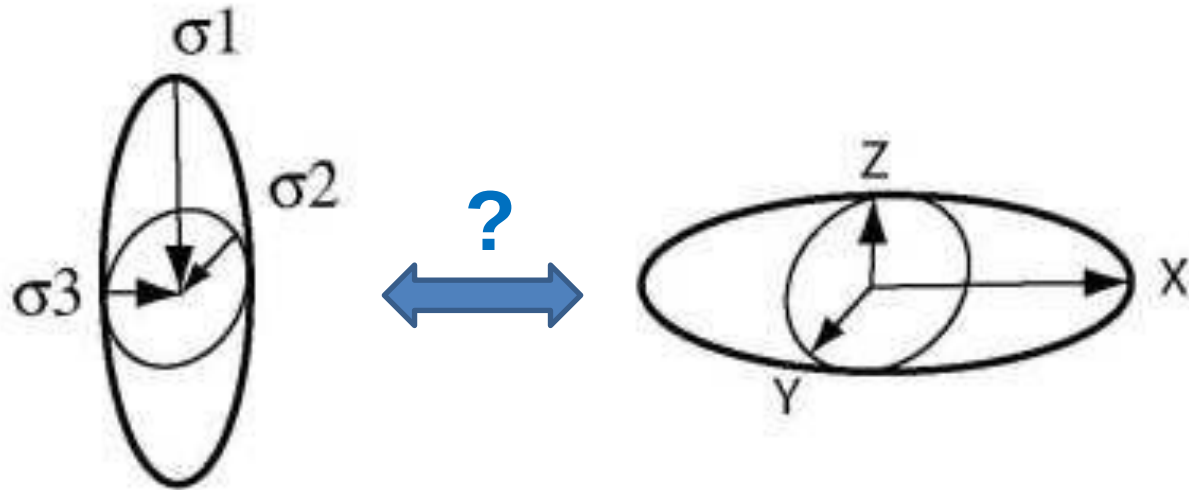


EASTERN SICHUAN, CHINA

2008 05 12 06:28:01 UTC 30.98N 103.32E Depth: 19 km, Magnitude: 7.9

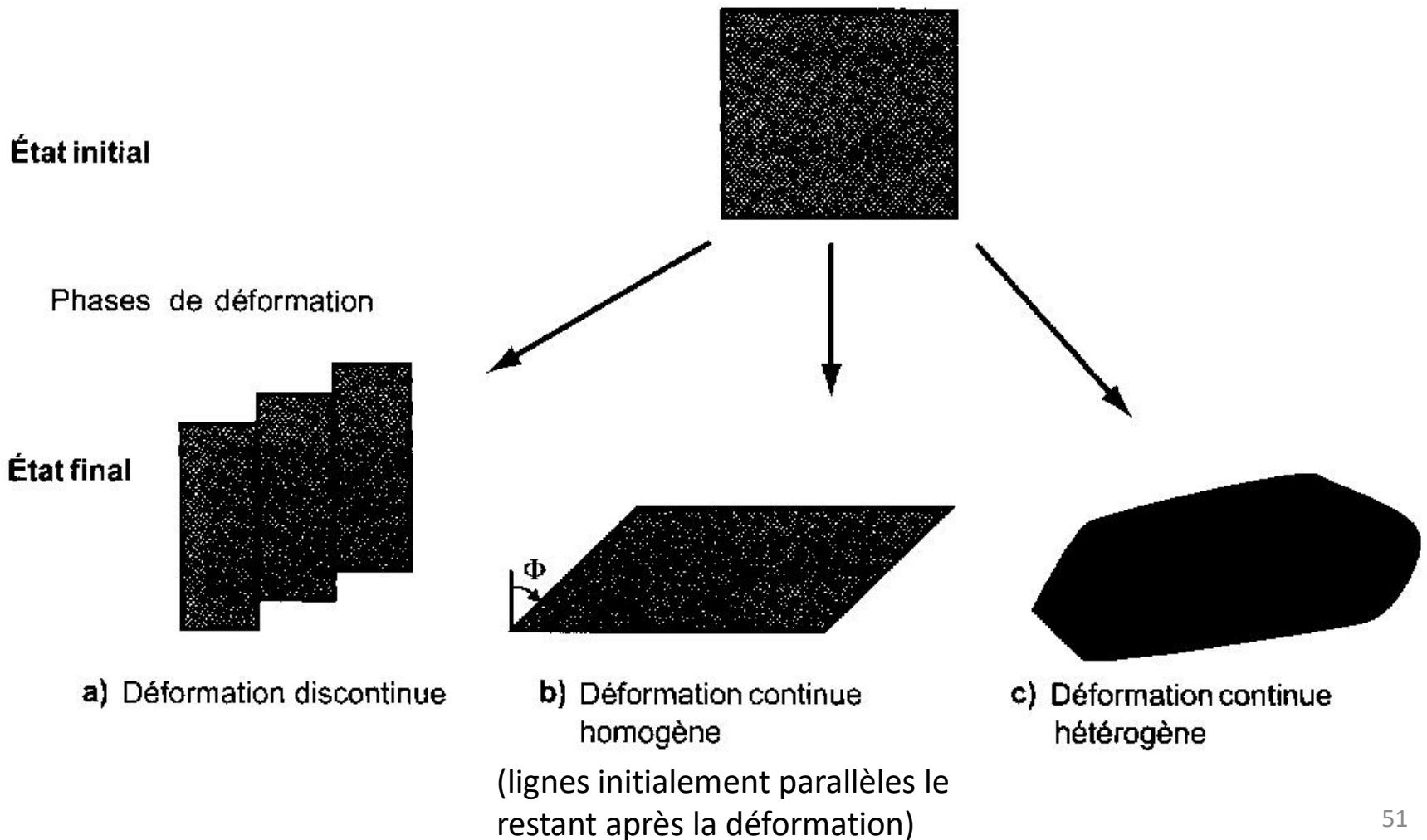


Ellipsoïde des déformations

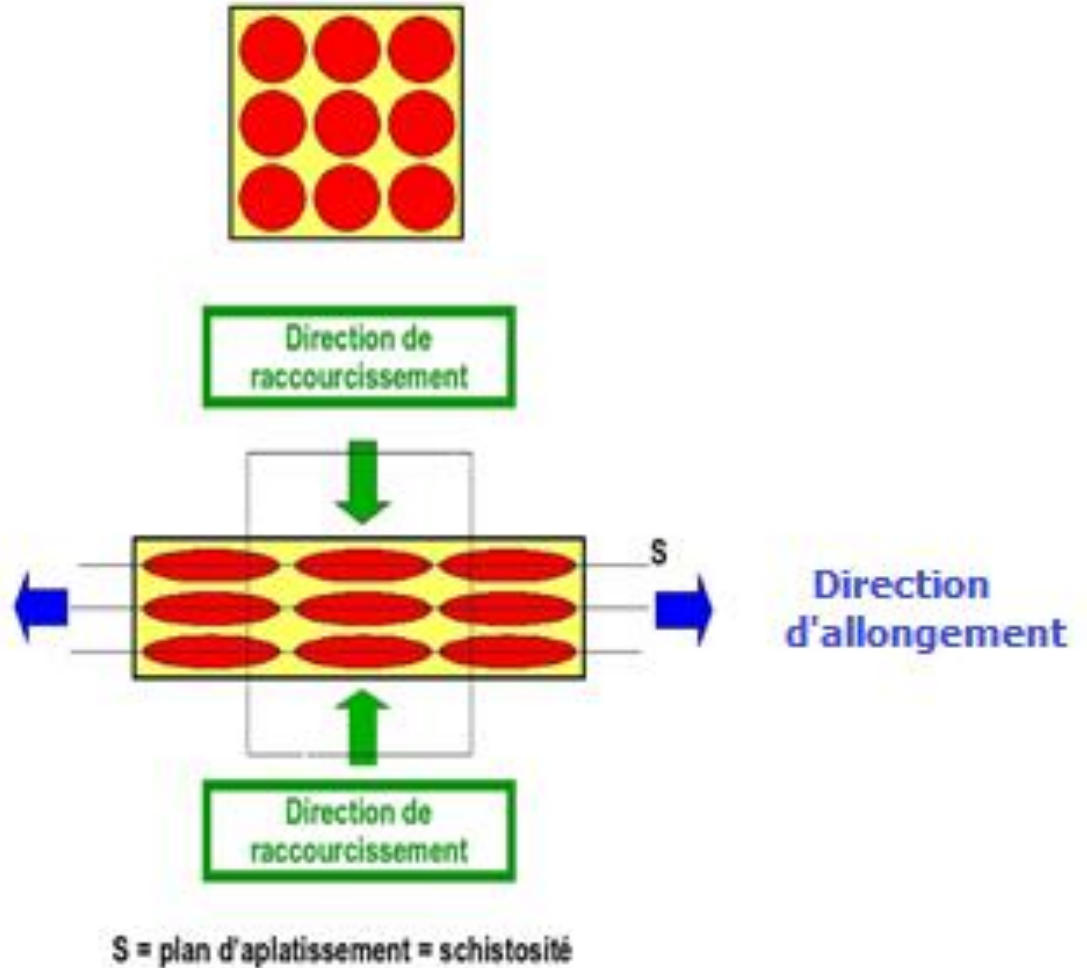
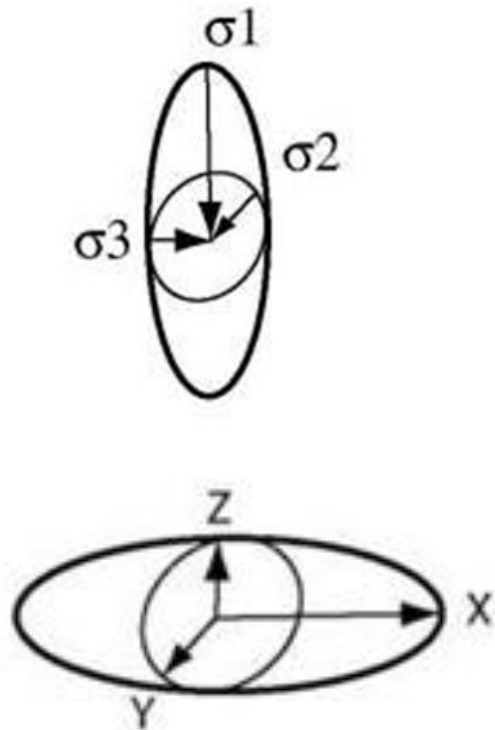


X axe d'allongement maximal
Y axe d'allongement intermédiaire
Z axe de raccourcissement maximal

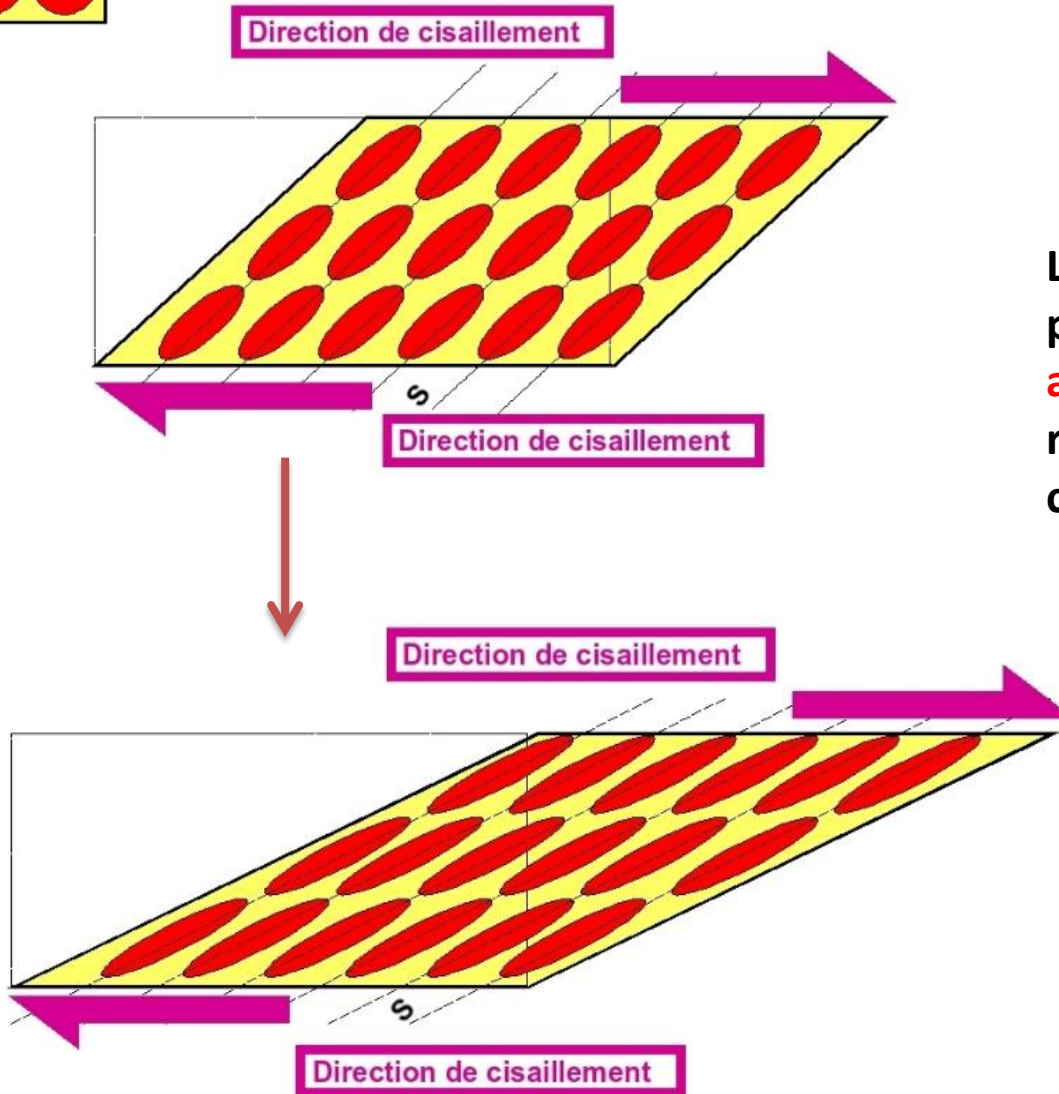
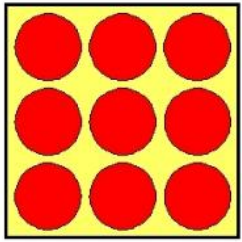
Différents types de déformation selon leur géométrie



Déformation continue par cisaillement pur

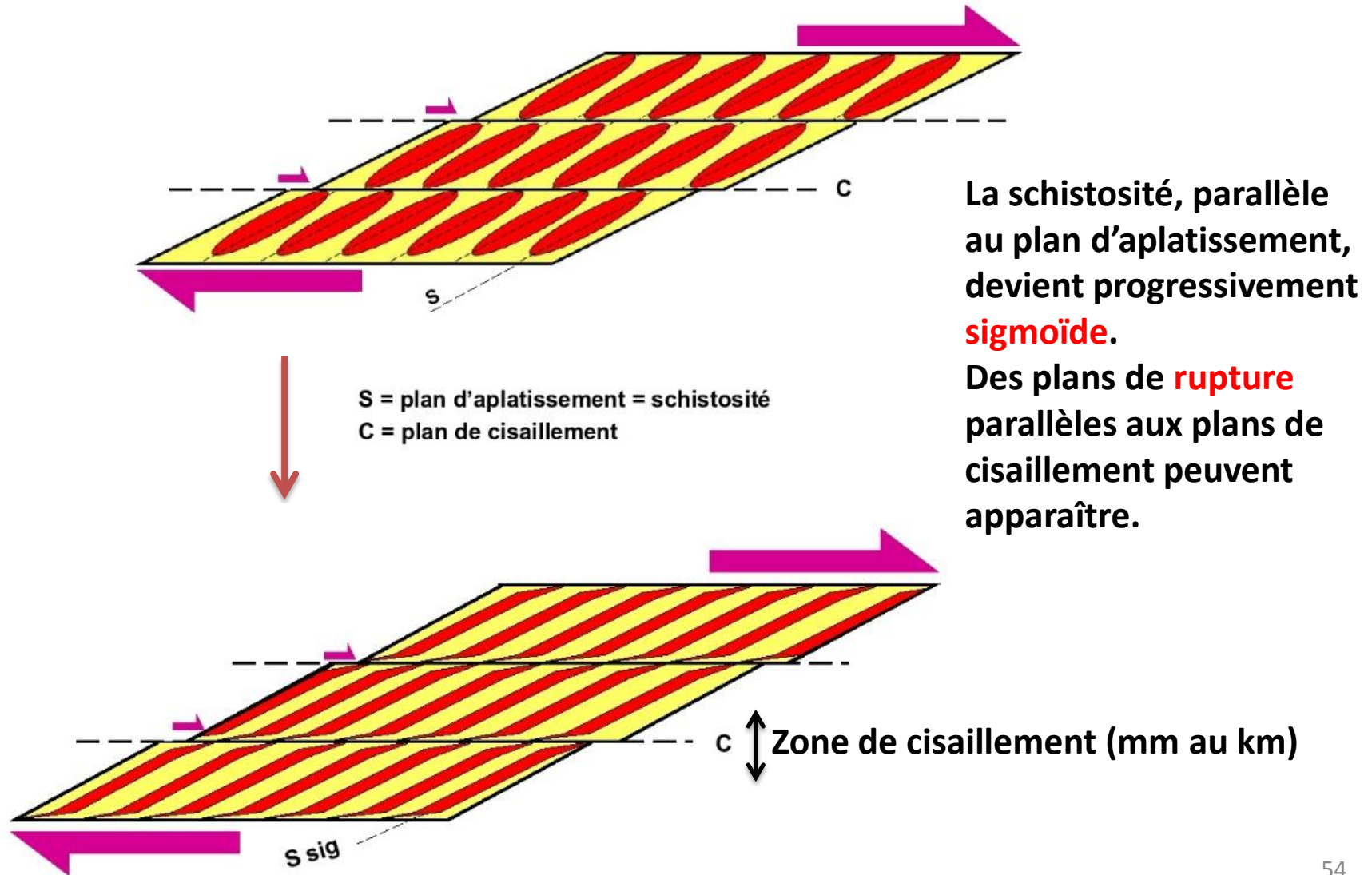


Déformation continue par cisaillement simple



La schistosité est parallèle au plan d'aplatissement et **tourne au fur et à mesure** en se rapprochant du plan de cisaillement.

Déformation par cisaillement simple et partiellement discontinue



Bande de cisaillement sans fracture

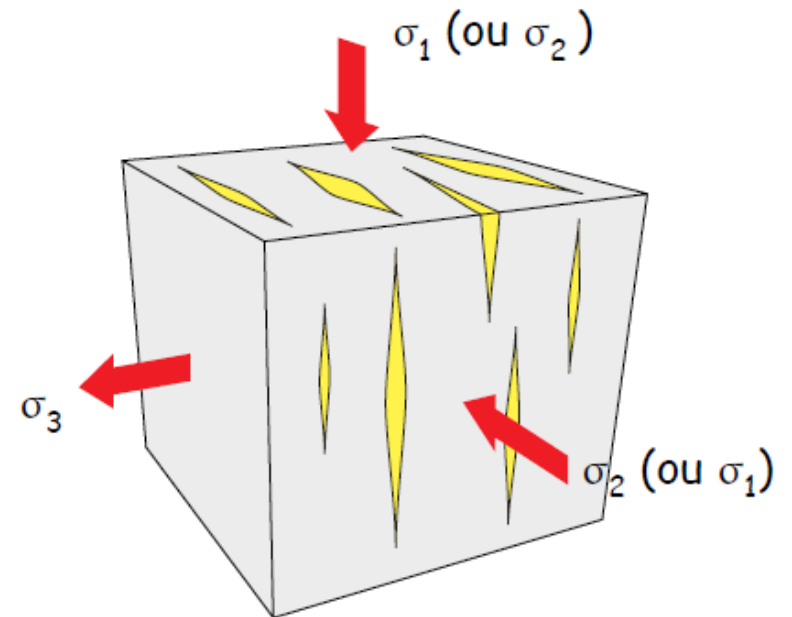
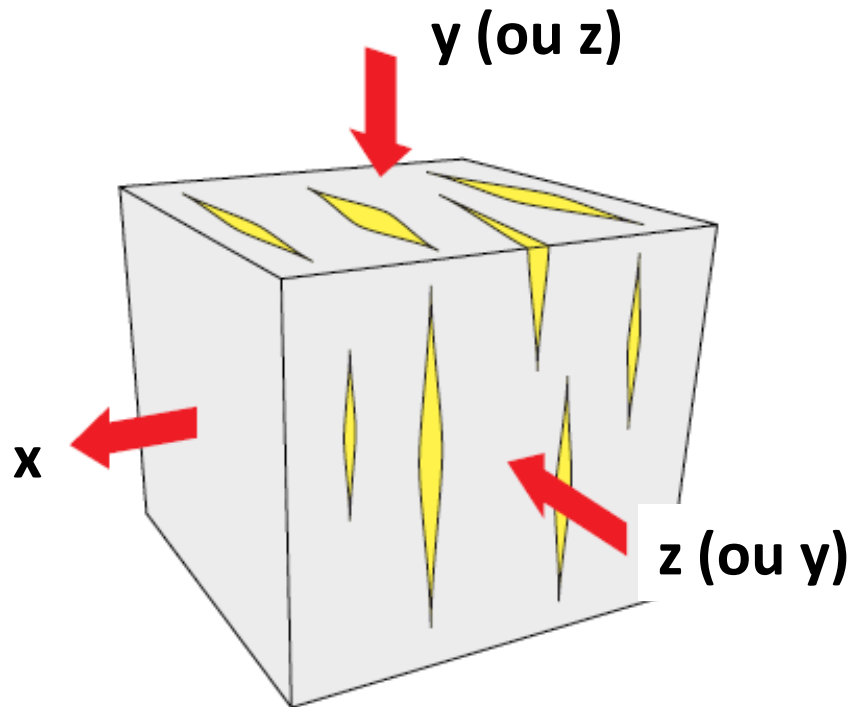


Fentes de tension: fracture sans déplacement des blocs

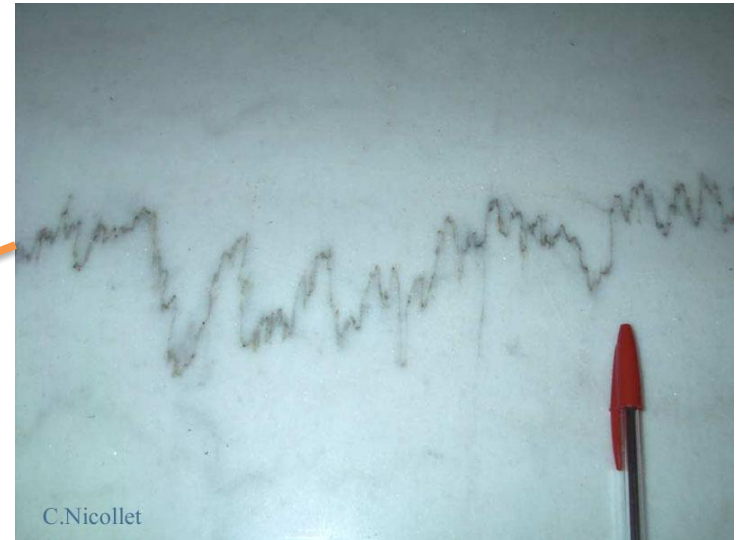
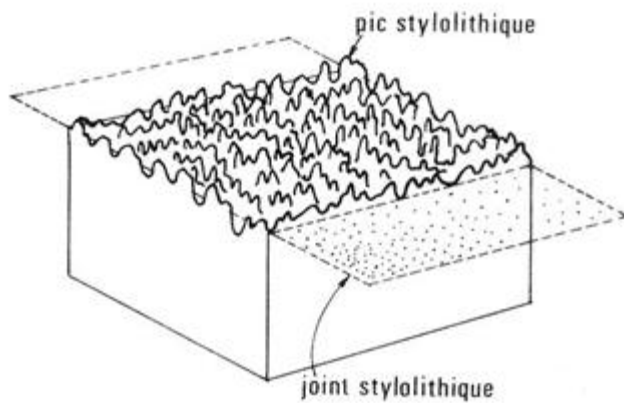
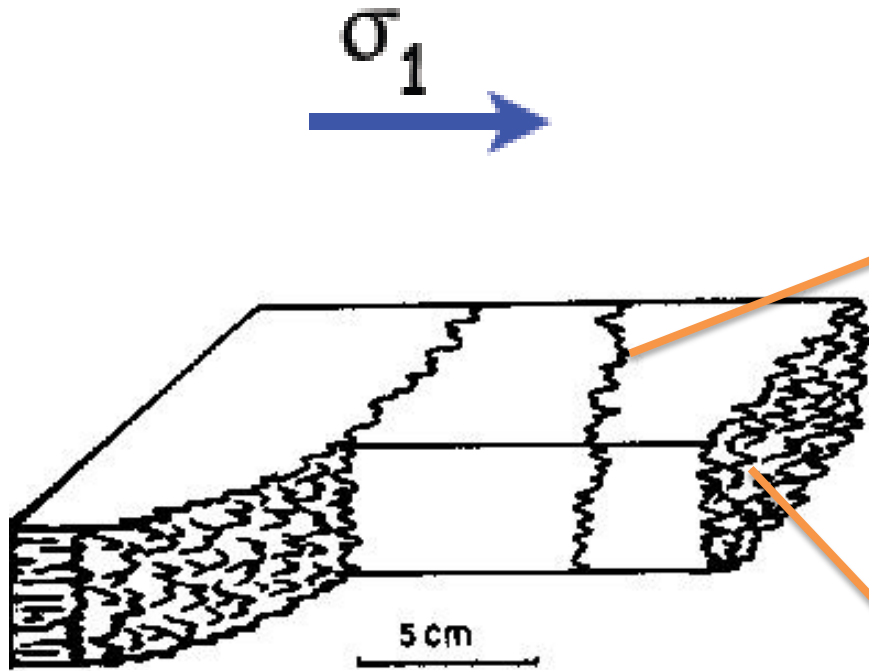


<http://christian.nicollet.free.fr/page/TectoCassante/tectocassante.html>

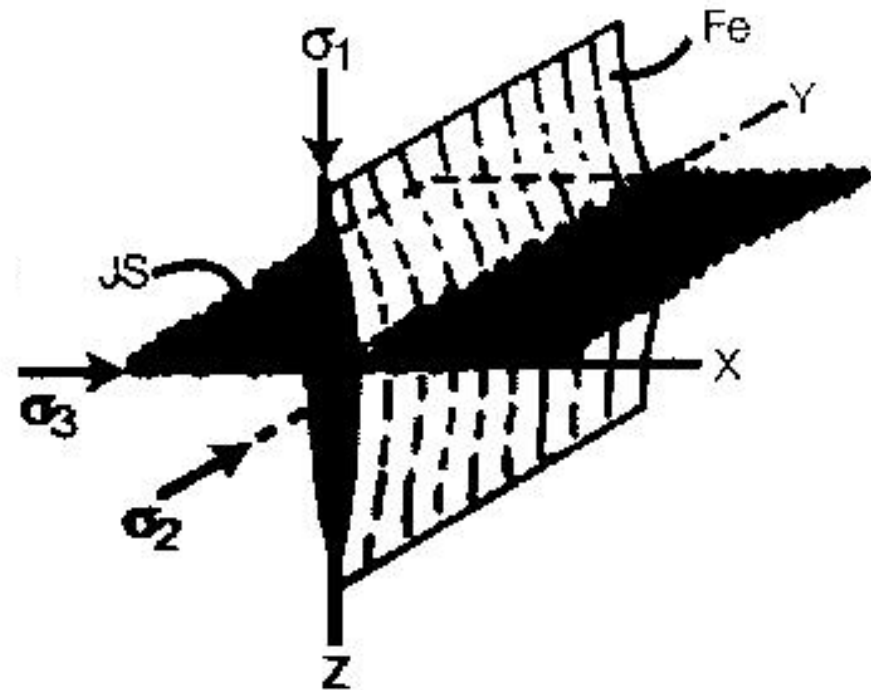
Orientation des fentes de tension: déformations finies et contraintes



Stylolithes

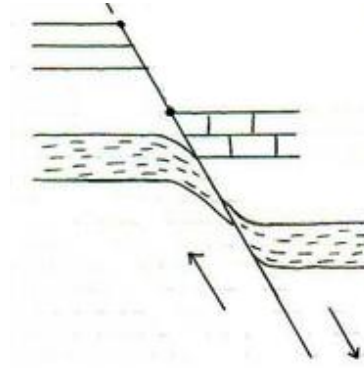


Orientation de fentes de tension + stylolithes

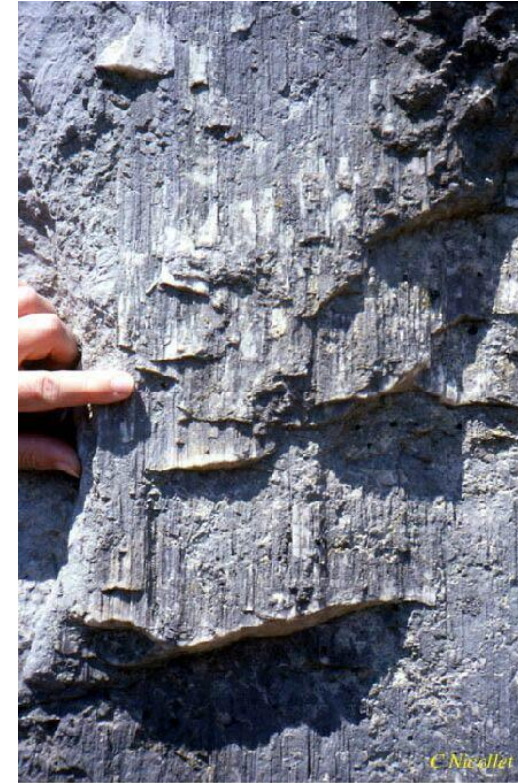
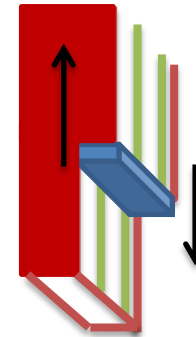


Détermination de la nature d'une faille

- **Mouvement relatif :** - âge
- torsion (crochon)



- tectoglyphes du miroir de faille:
 - stries
 - précipitations
 - stylolithes



- **Pendage du plan de faille :** observation ou V cartographique

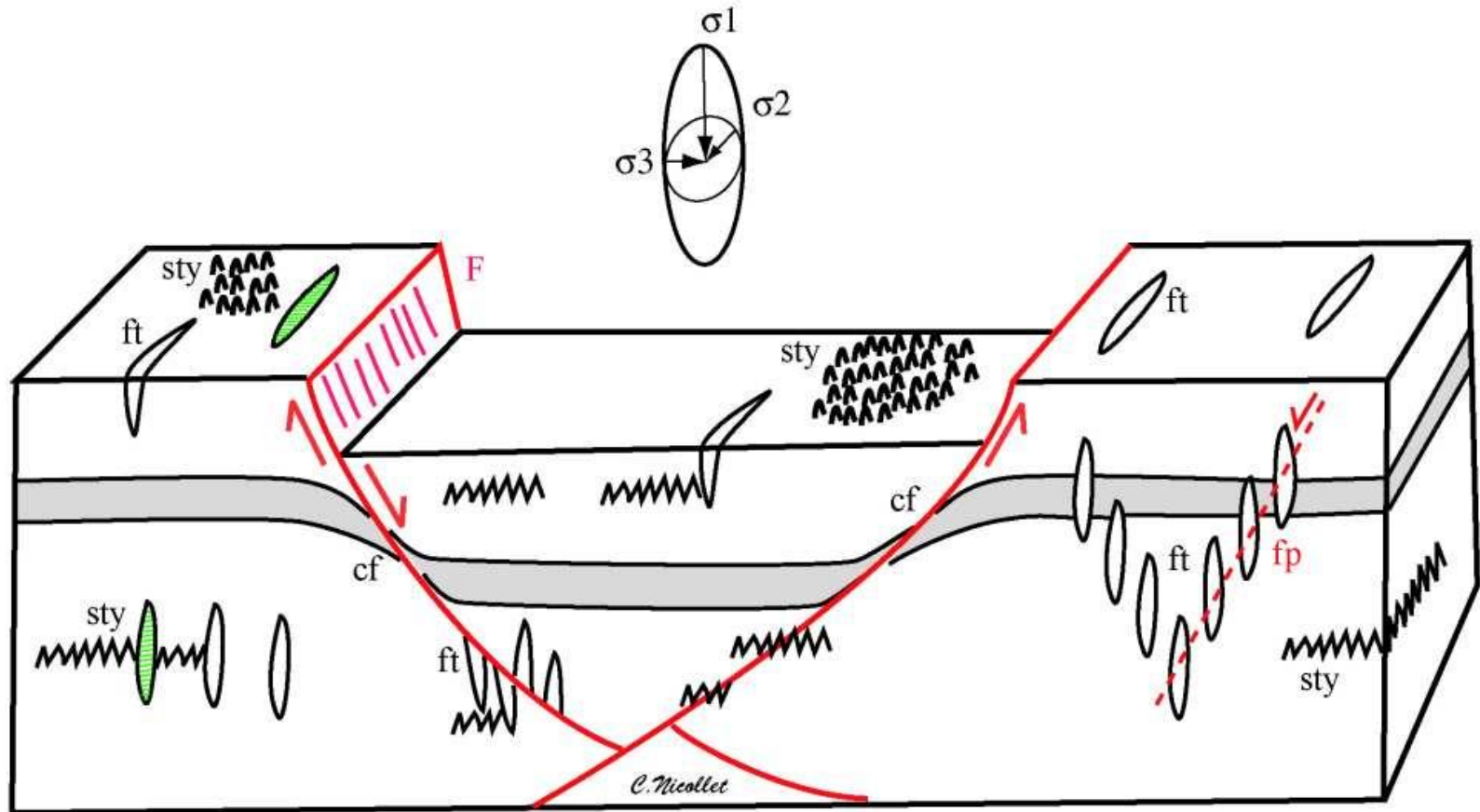
Crochon de faille

(Bourg d'Oisans)

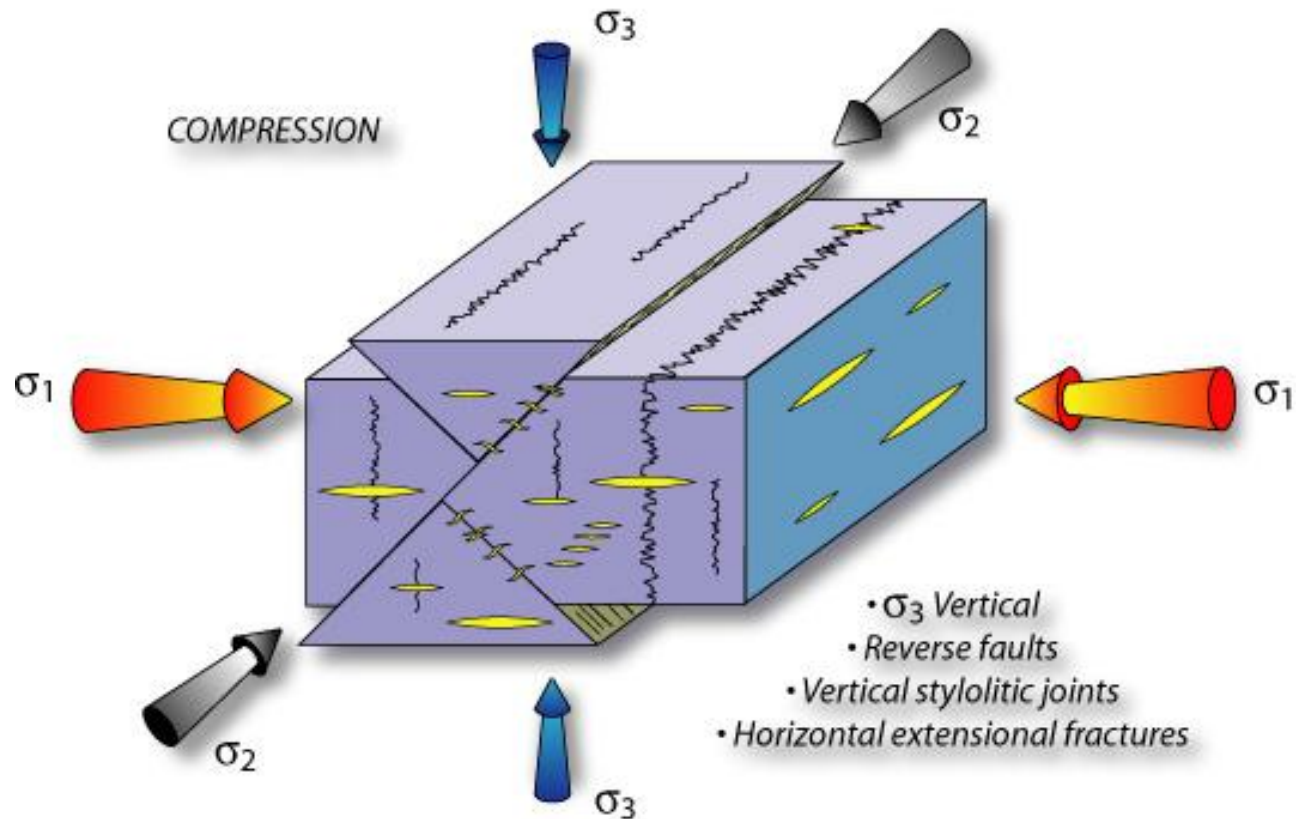


Photographie : Pierre Thomas

Directions des failles et microstructures par rapport aux contraintes: **ex d'une extension**

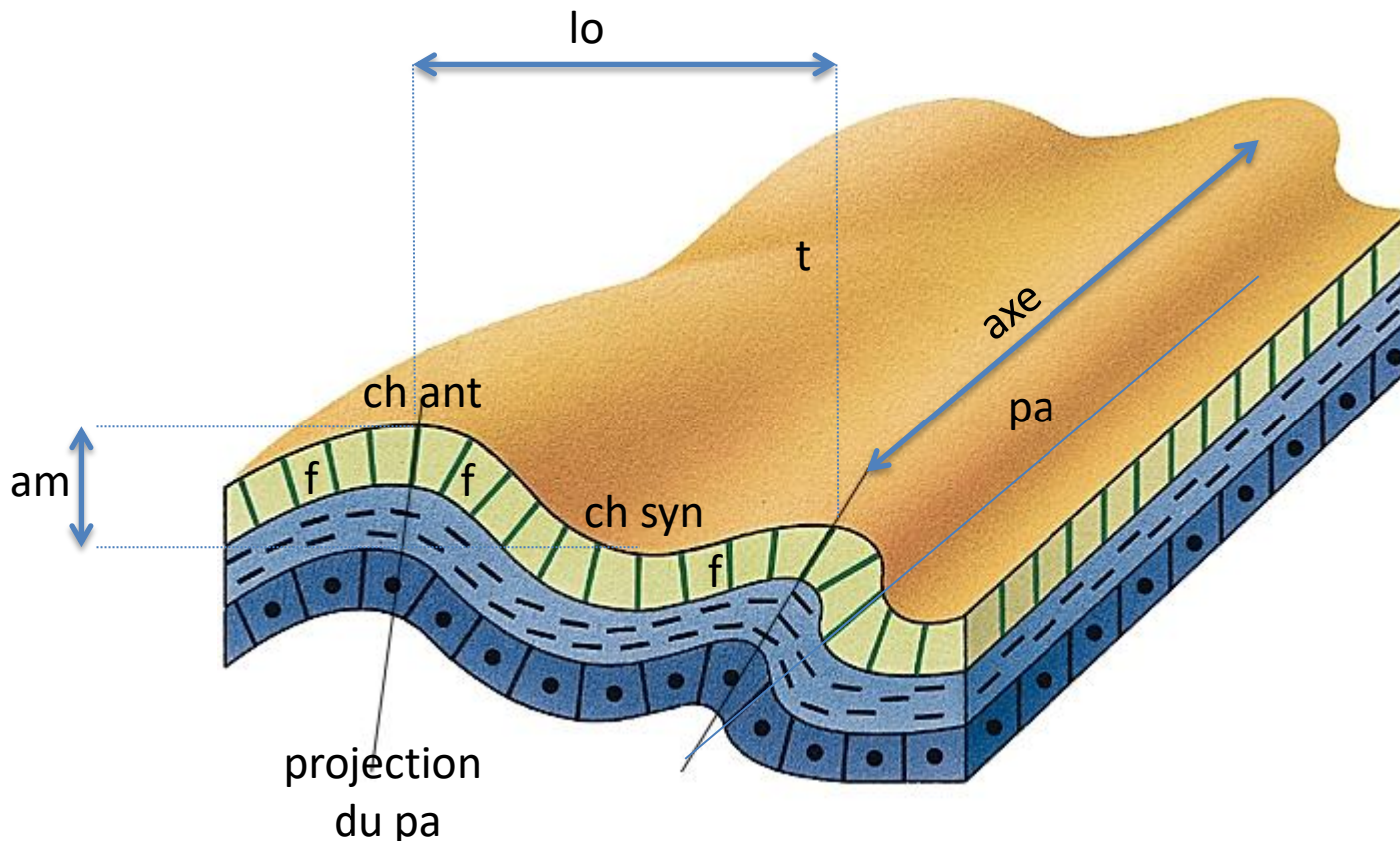


Directions des failles et microstructures par rapport aux contraintes: **ex d'une compression**

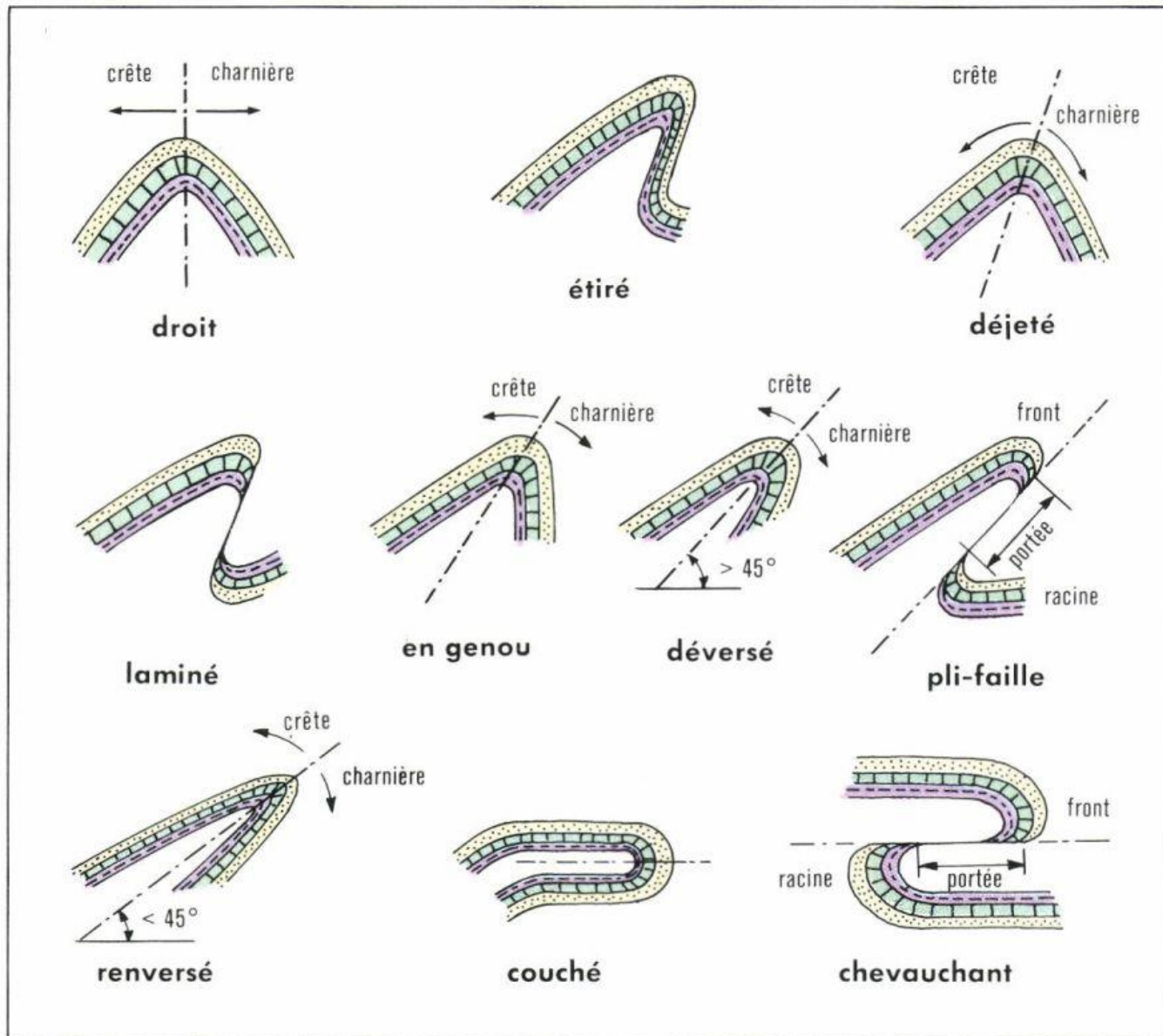


Description d'un pli

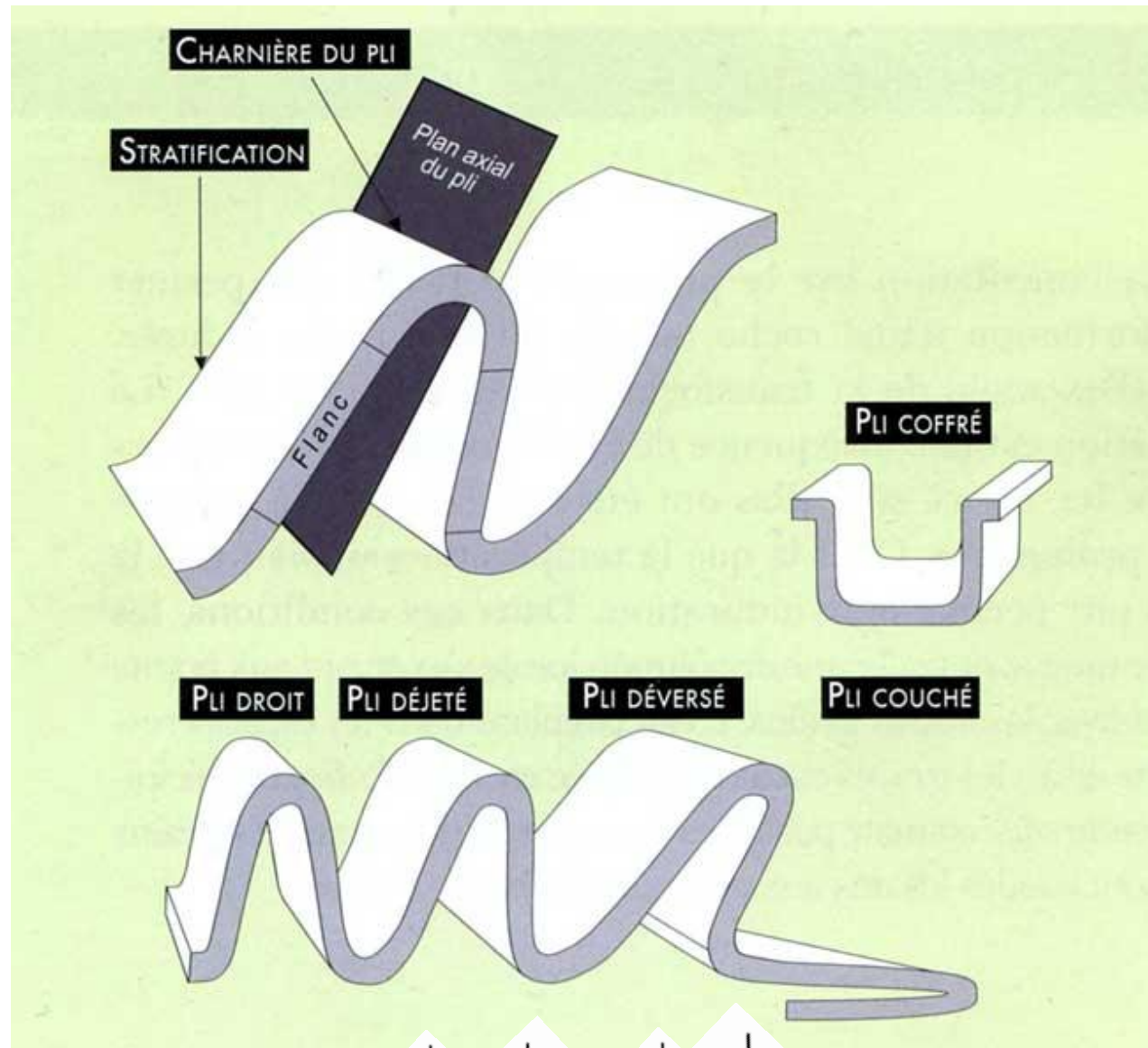
Déformation souple des couches en ondulations. L'ondulation peut être en saillie [**anticlinal**] ou en creux [**synclinal**]. La **charnière** est la zone de courbure maximale et les **flancs** relient deux charnières. La fin d'un pli est appelé **terminaison** périclinale. Un pli est caractérisé par sa direction [**axe**], le pendage des flancs, le pendage du **plan axial**, la différence de hauteur des niveaux aux charnières [**amplitude**], la distance entre 2 charnières successives de même nature [**longueur d'onde**].



(Types de plis selon leur axe)



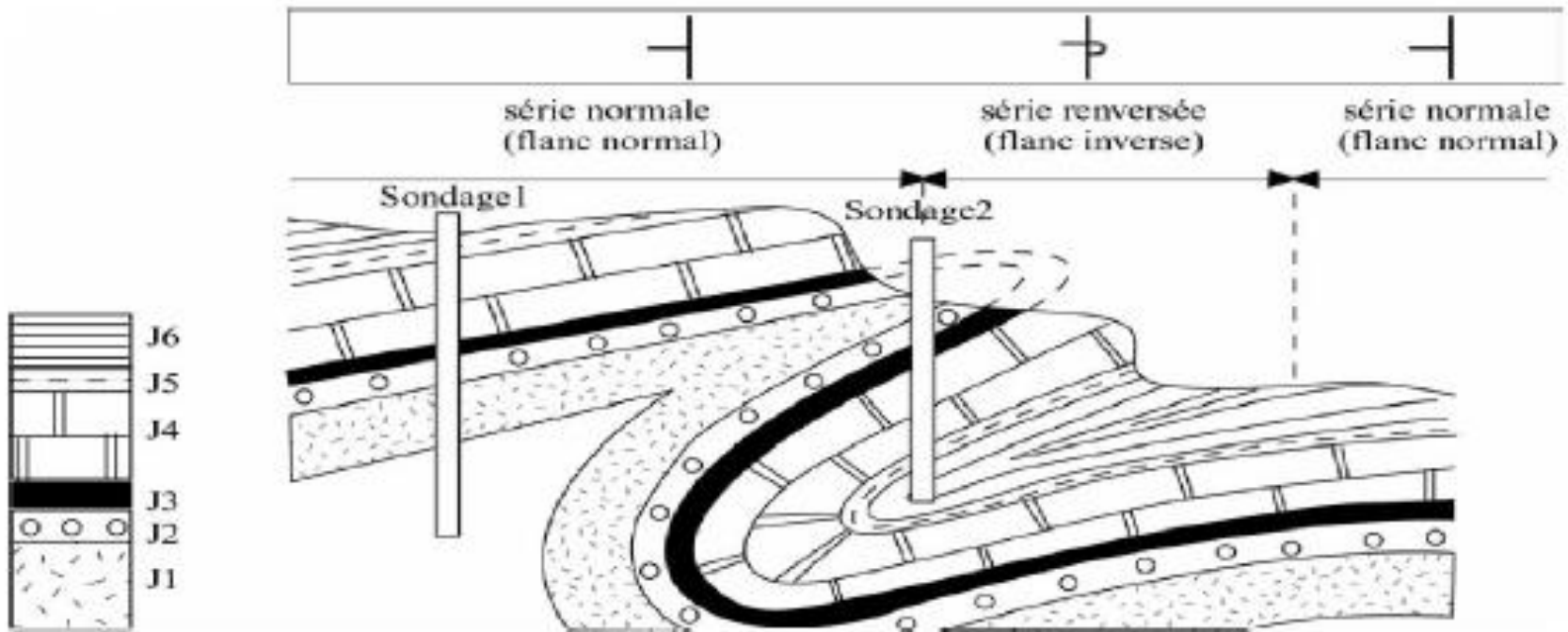
Le minimum à savoir sur les plis...



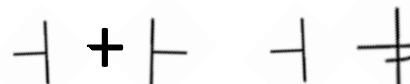
Signes de pendage en carto:



Série renversée dans un pli déjeté ou couché



Signes de pendage en carto:



Pli-faille

(St Rambert en Bugey)

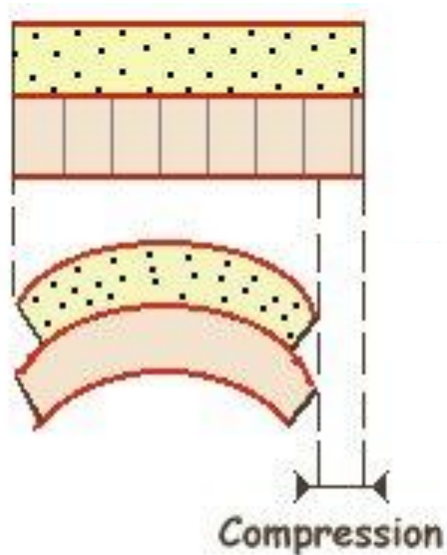


Photographie Pierre Thomas

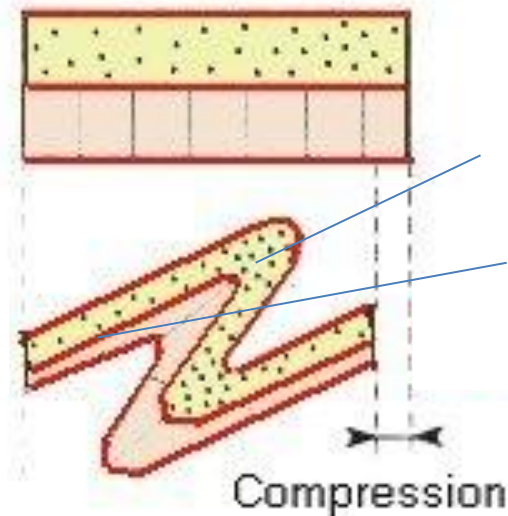
Pli déjeté ou renversé dont le flanc inverse a été laminé

Types de plis selon la constance de l'épaisseur des couches

Épaisseur constante



PLI ISOPAQUE

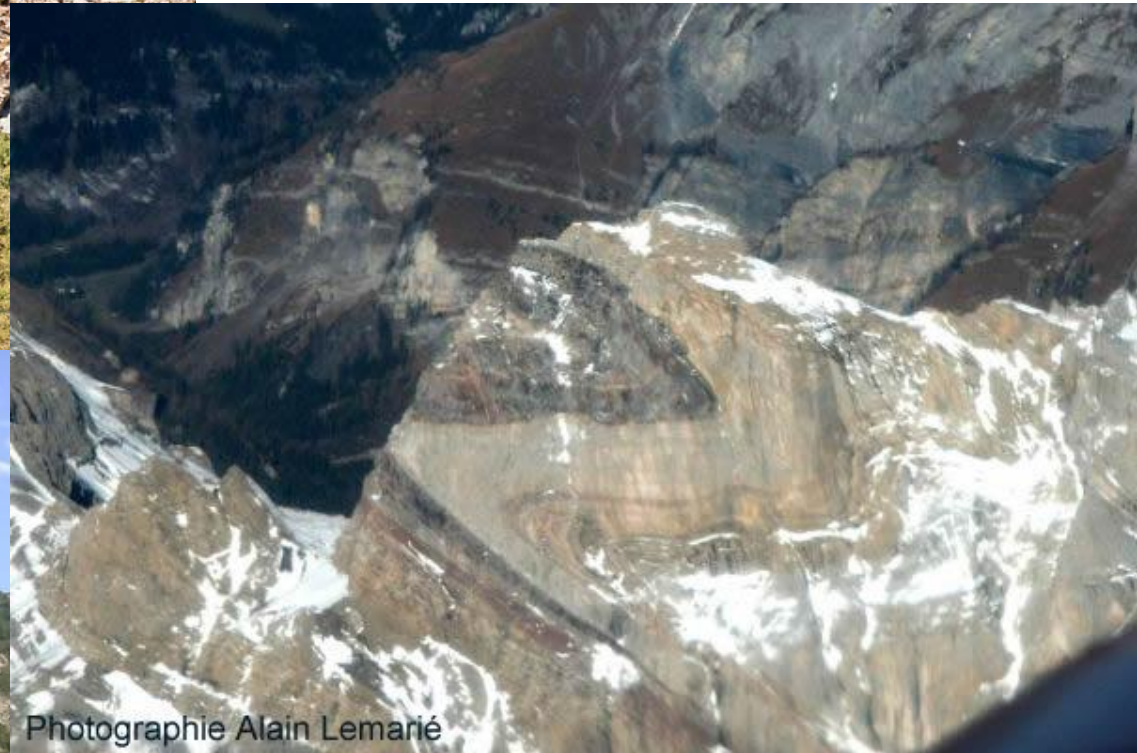
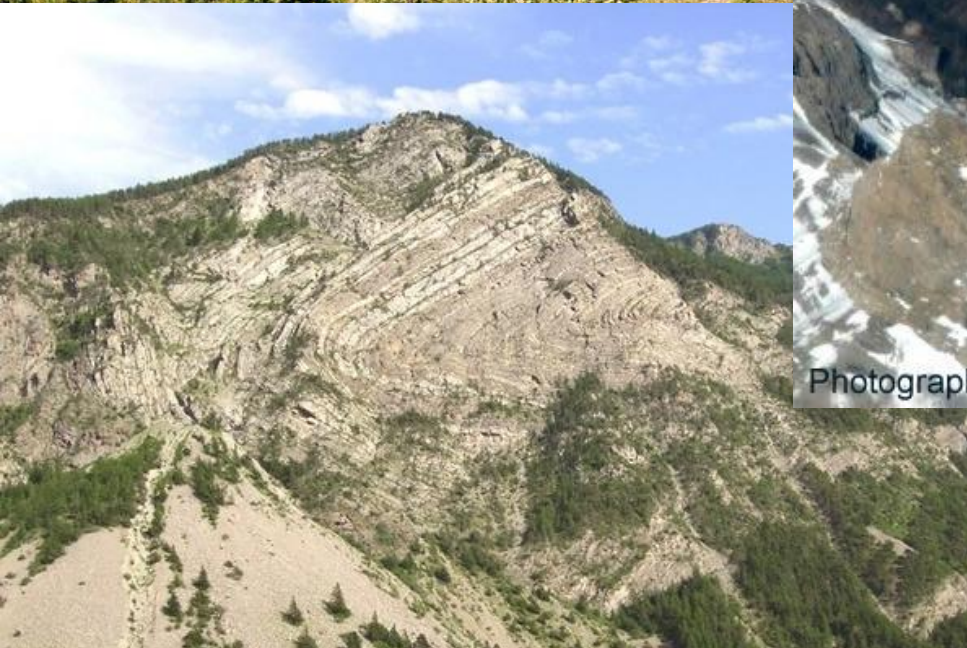
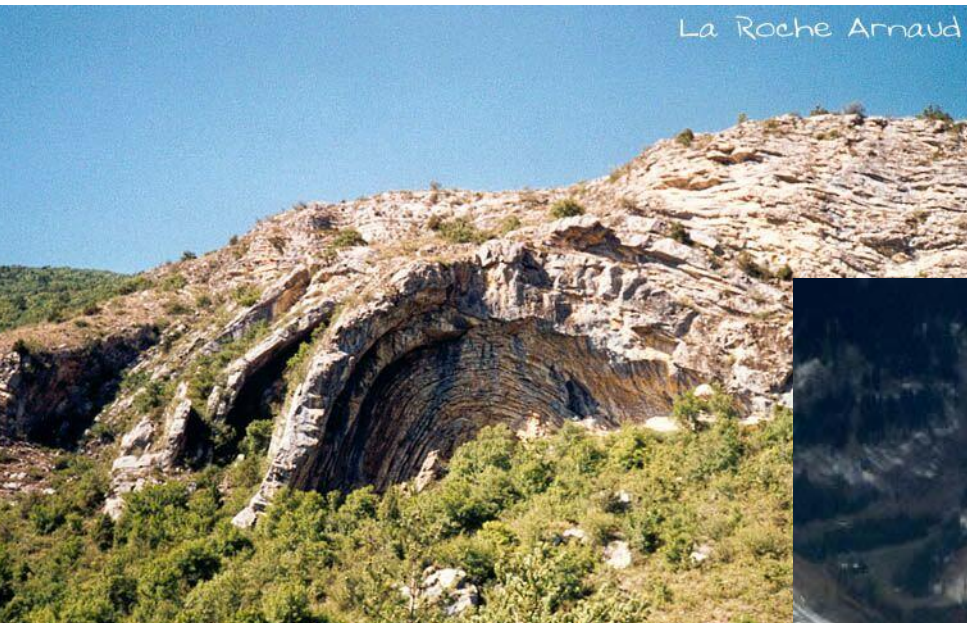


Épaisseur max à charnière

Amincissement sur les flancs

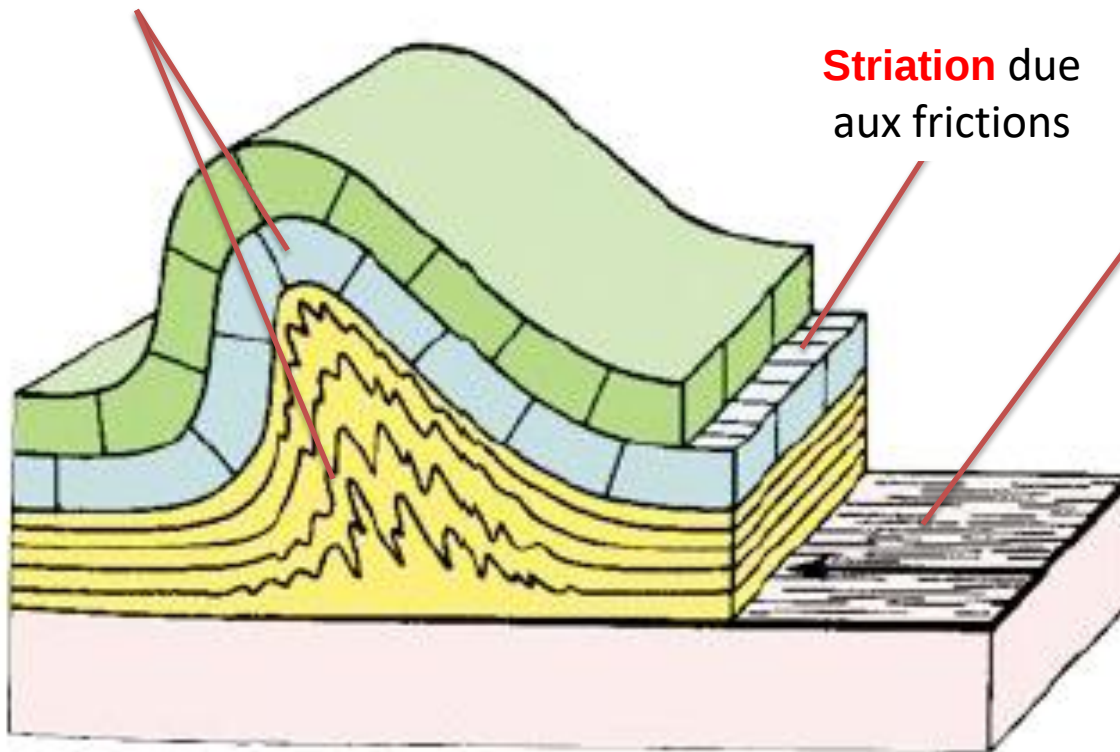
PLI ANISOPAQUE

Ex de plis isopaques/anisopaque



Disharmonie et décollement

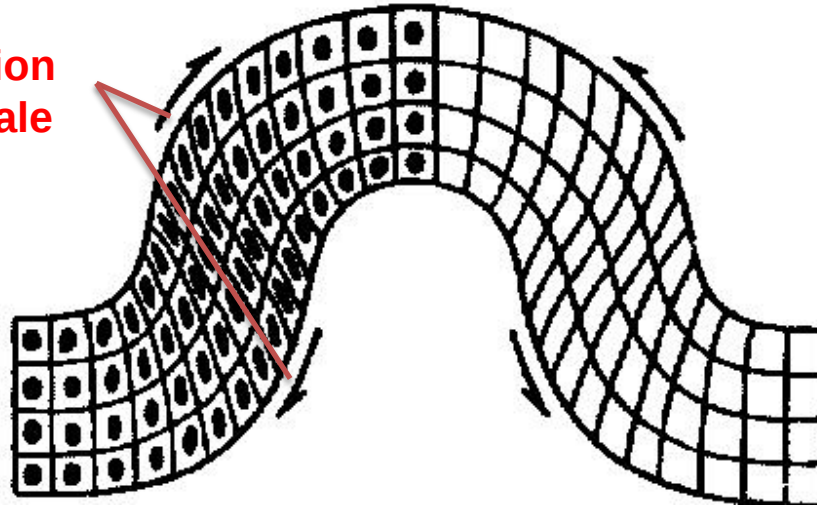
Disharmonie: les différents niveaux superposés sont plissés de manière différente, du fait de l'incompétence des niveaux argileux.



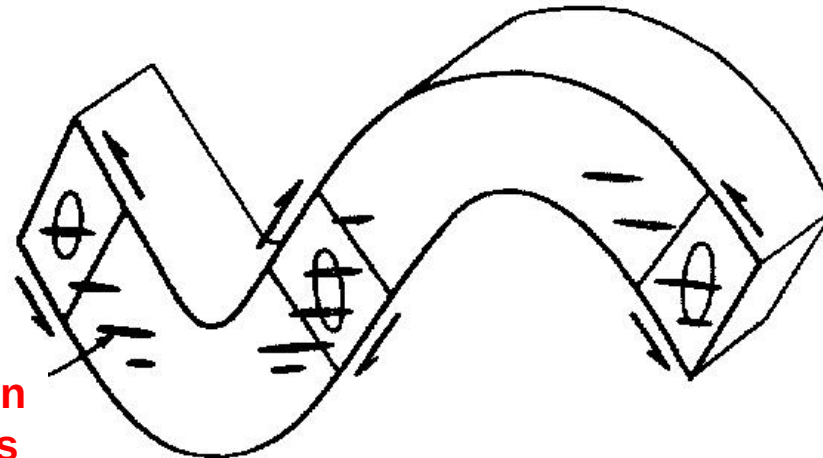
Décollement: les niveaux argileux ou évaporitiques (= « couches-savon »), peu visqueux, se comportent comme des fluides et se séparent du socle plus rigide.

Pli isopaque: (1) Déformation de flanc

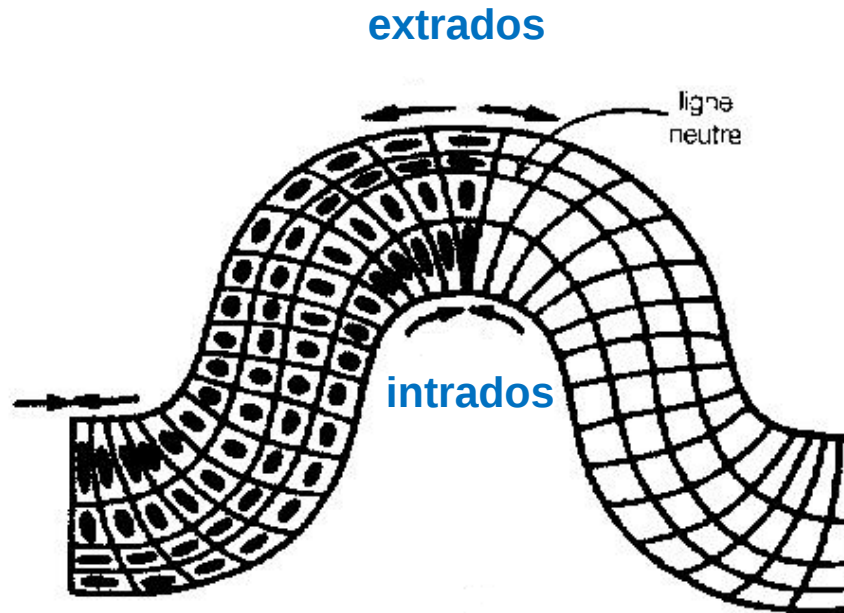
Compression
non coaxiale



Fente de tension
et/ou stylolithes

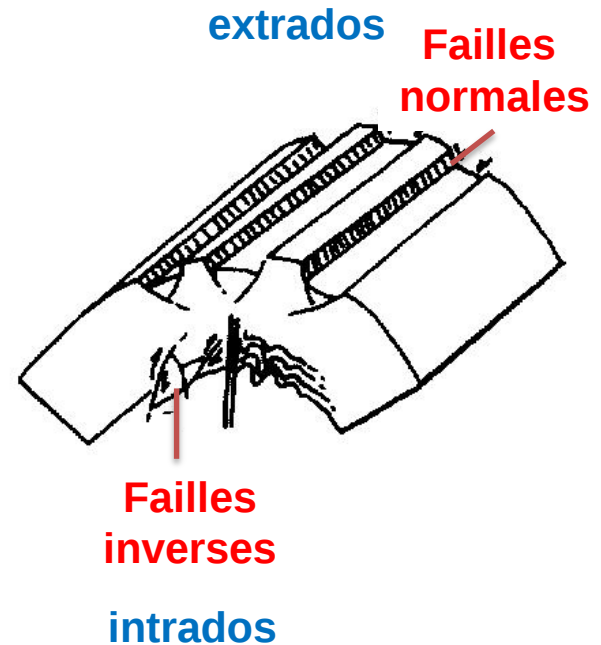
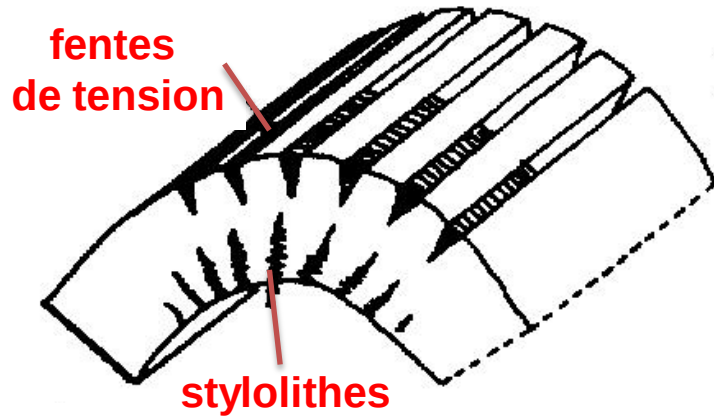


Pli isopaque: (2) Déformation de charnière

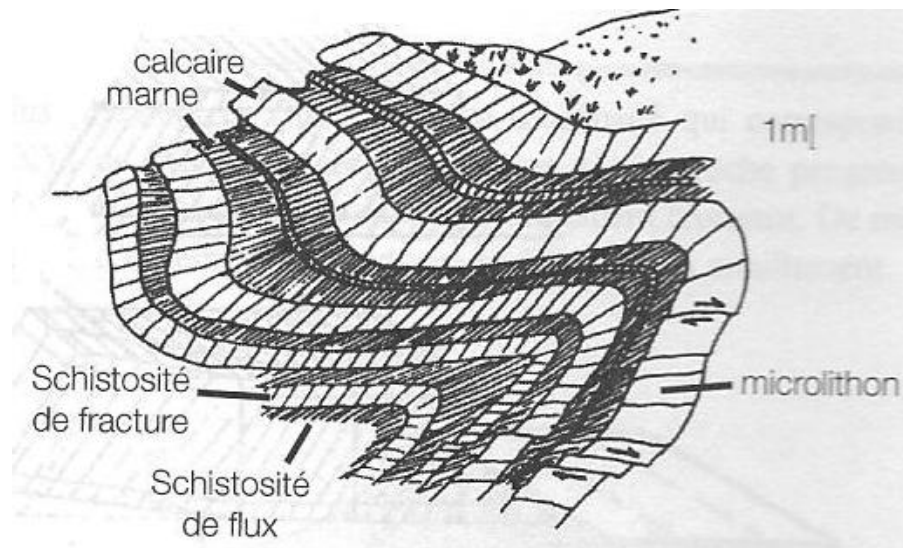
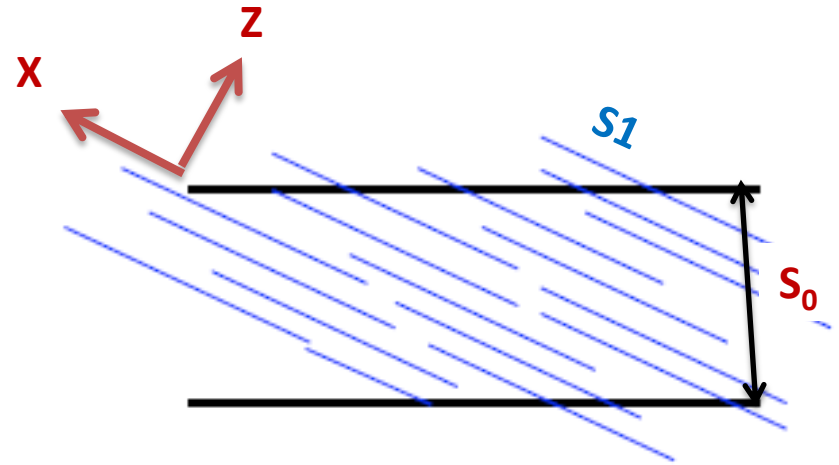
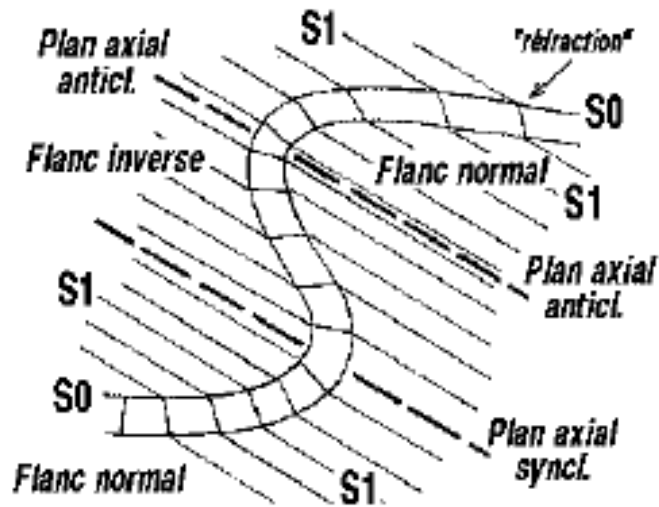


Pli isopaque: (2) Déformation de charnière

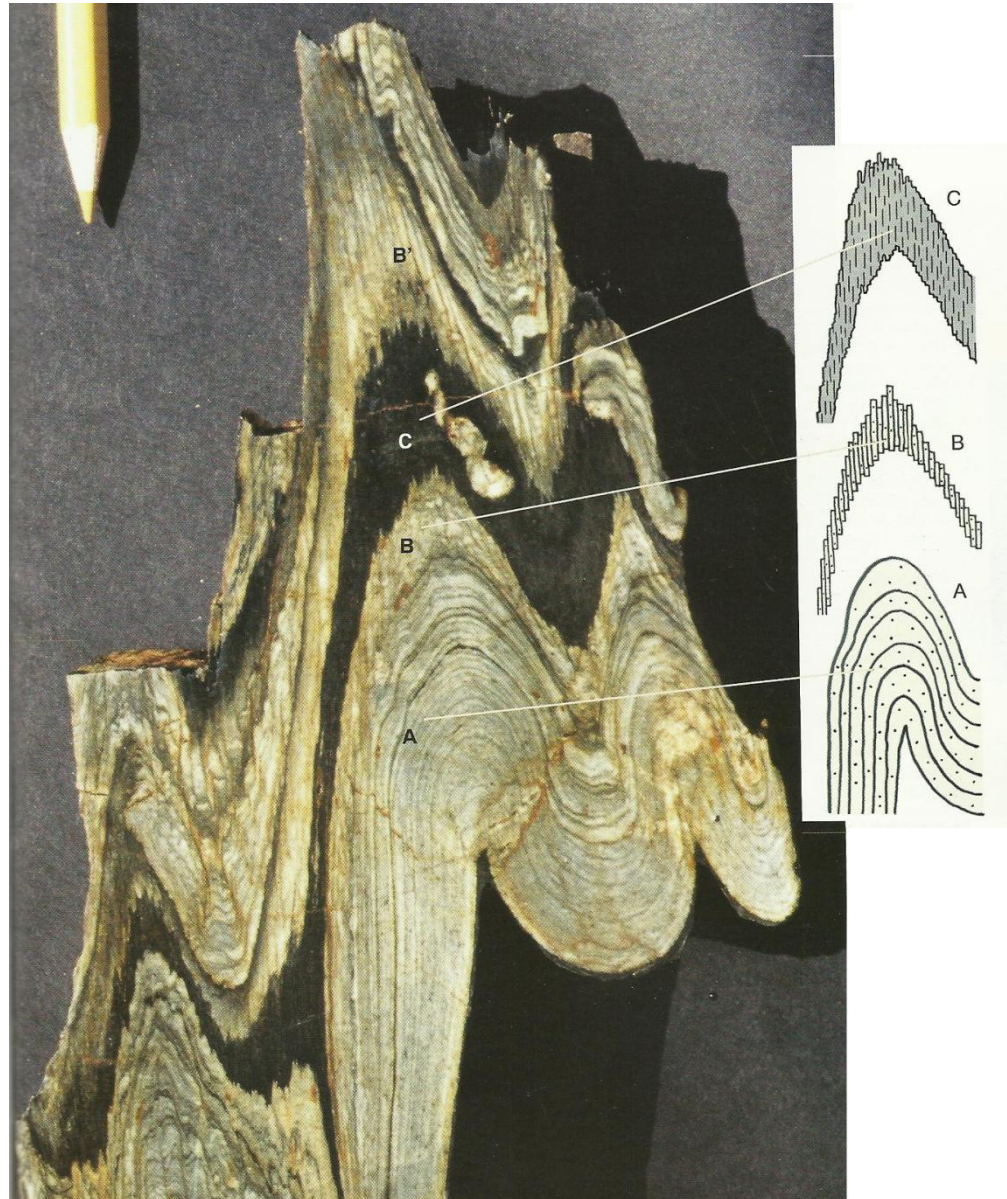
extrados



Développement d'une schistosité de plan axial



Modes de déformation selon la compétence



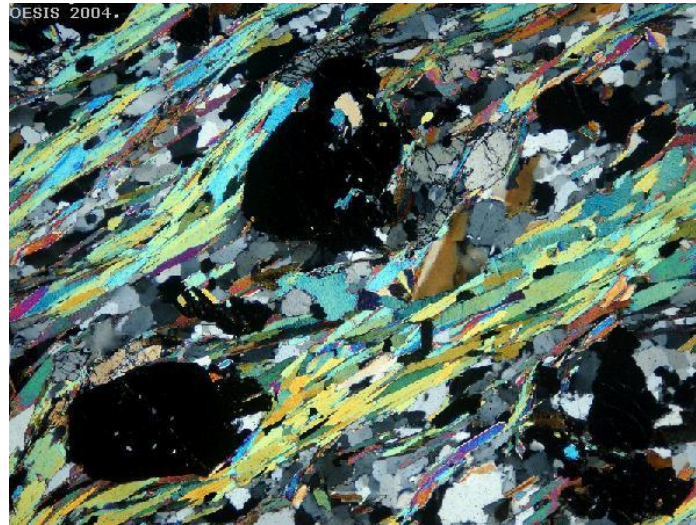
argile

grès à ciment
argileux

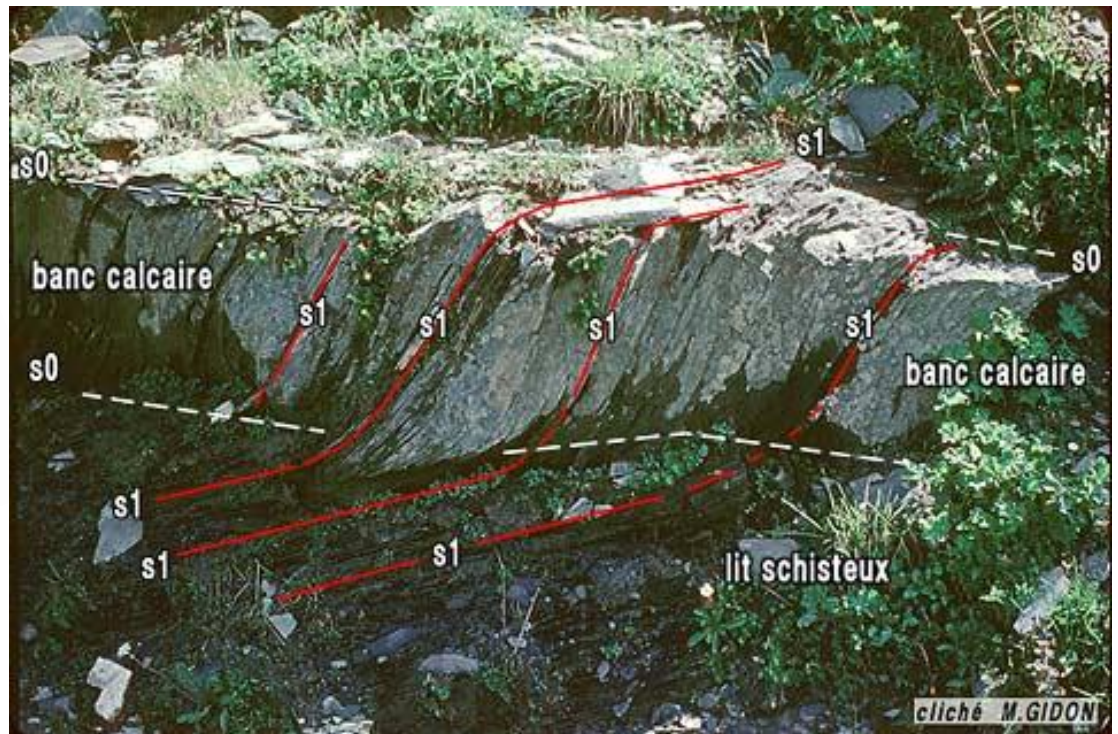
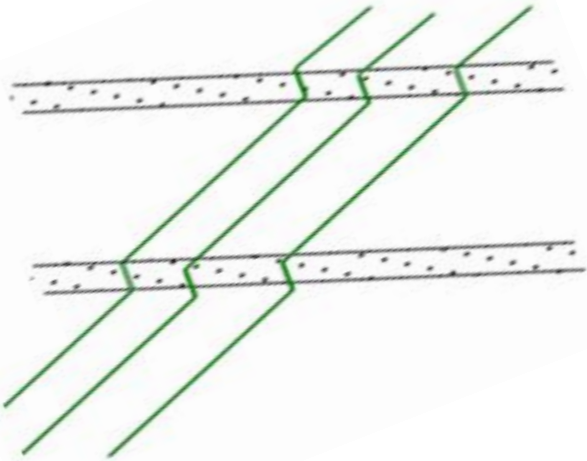
grès

Le gneiss: une roche foliée

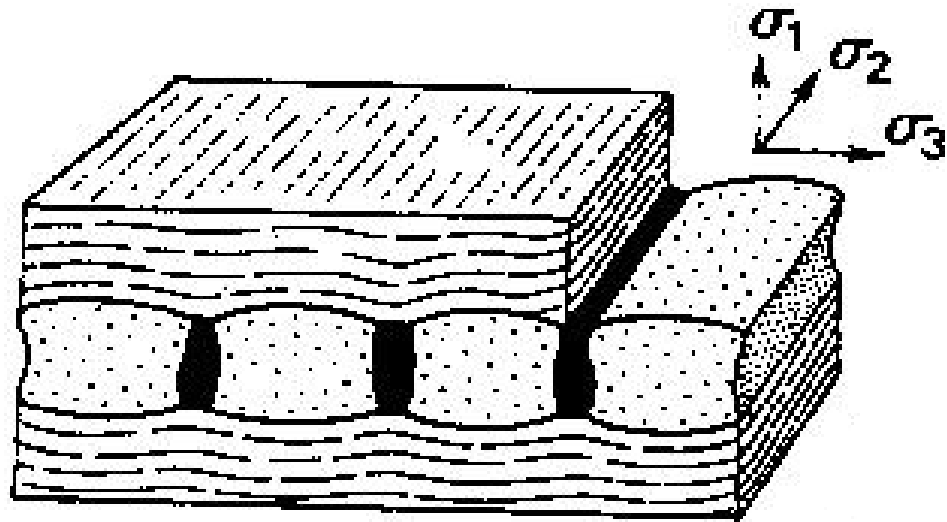
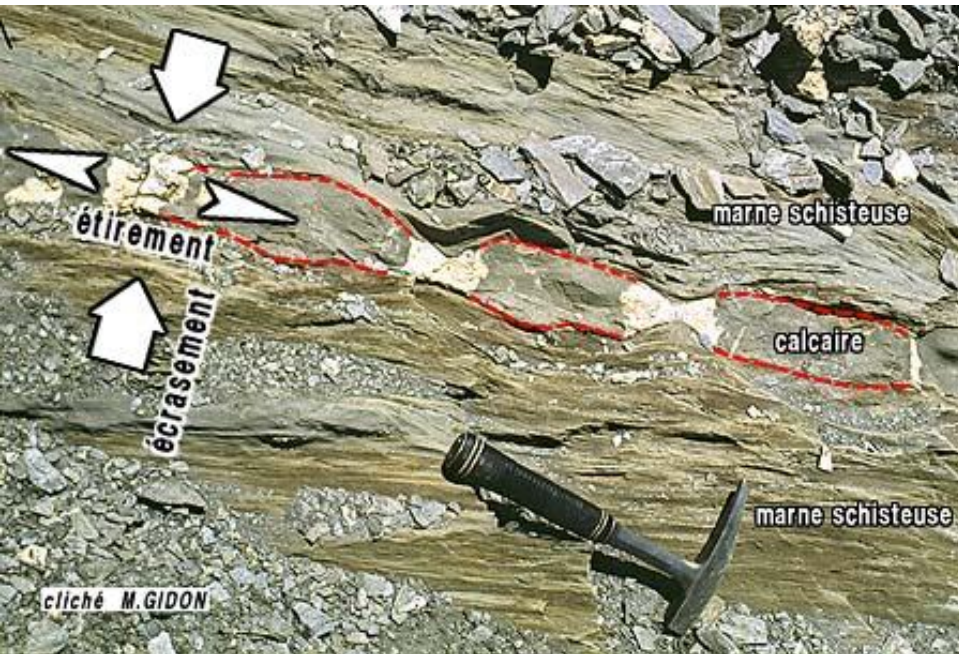
(3 échelles, mais pas le même échantillon)



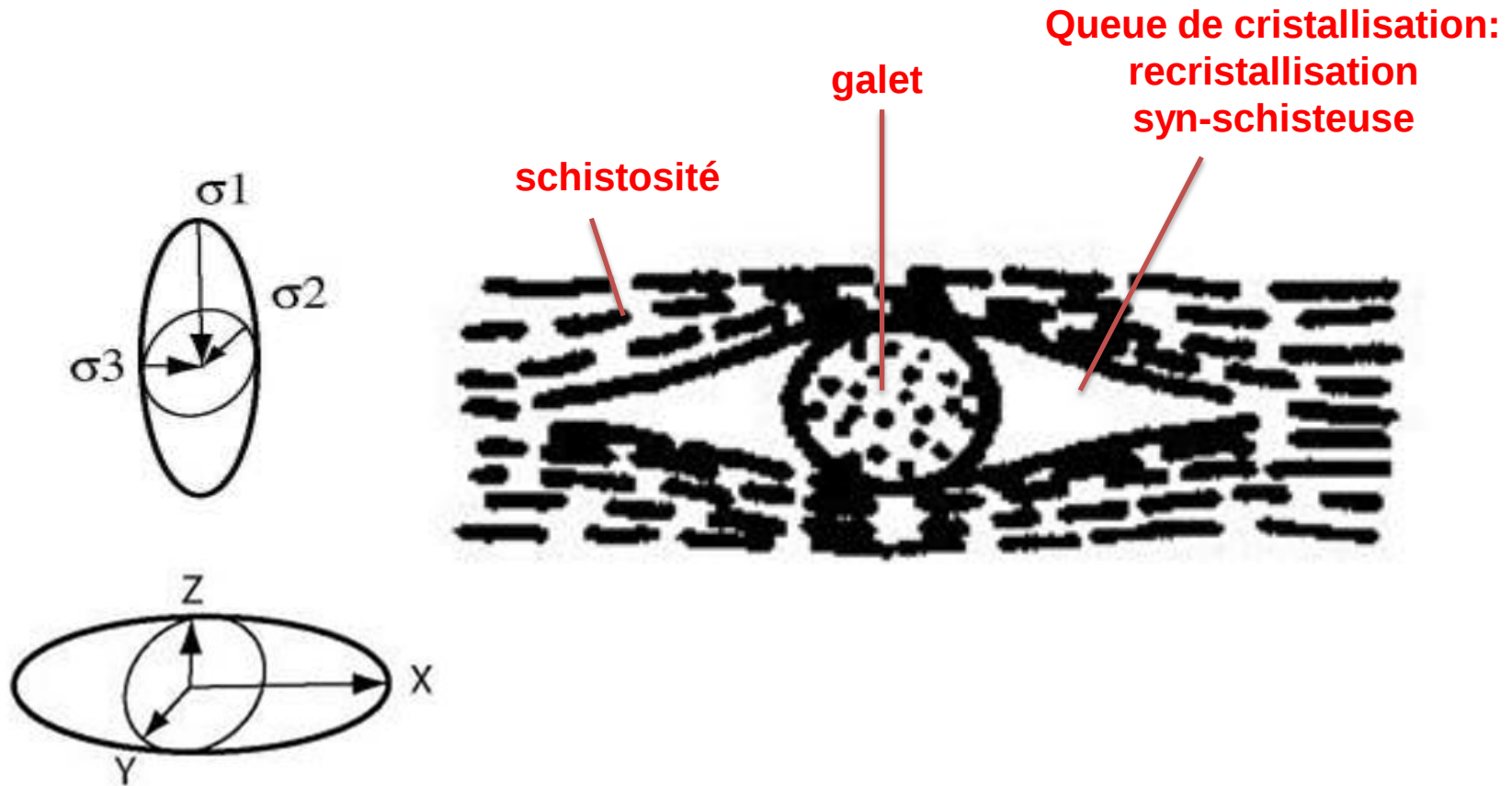
(Réfraction de schistosité)



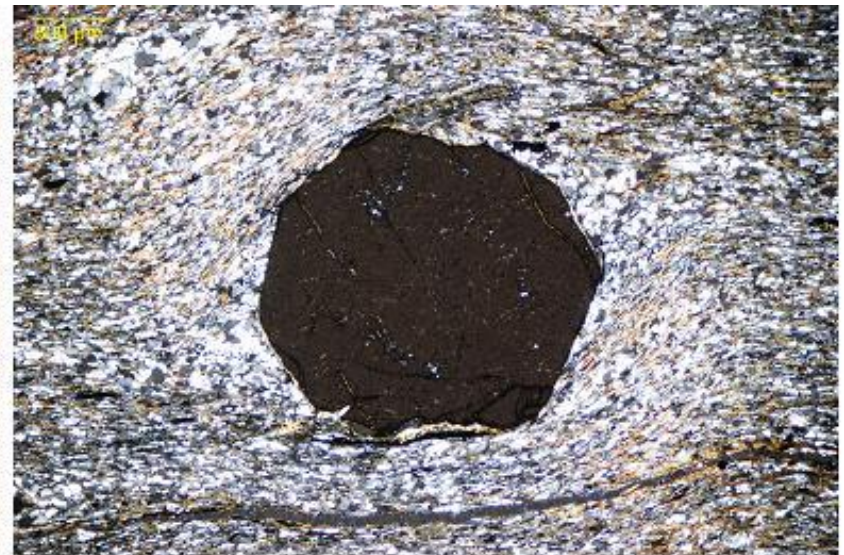
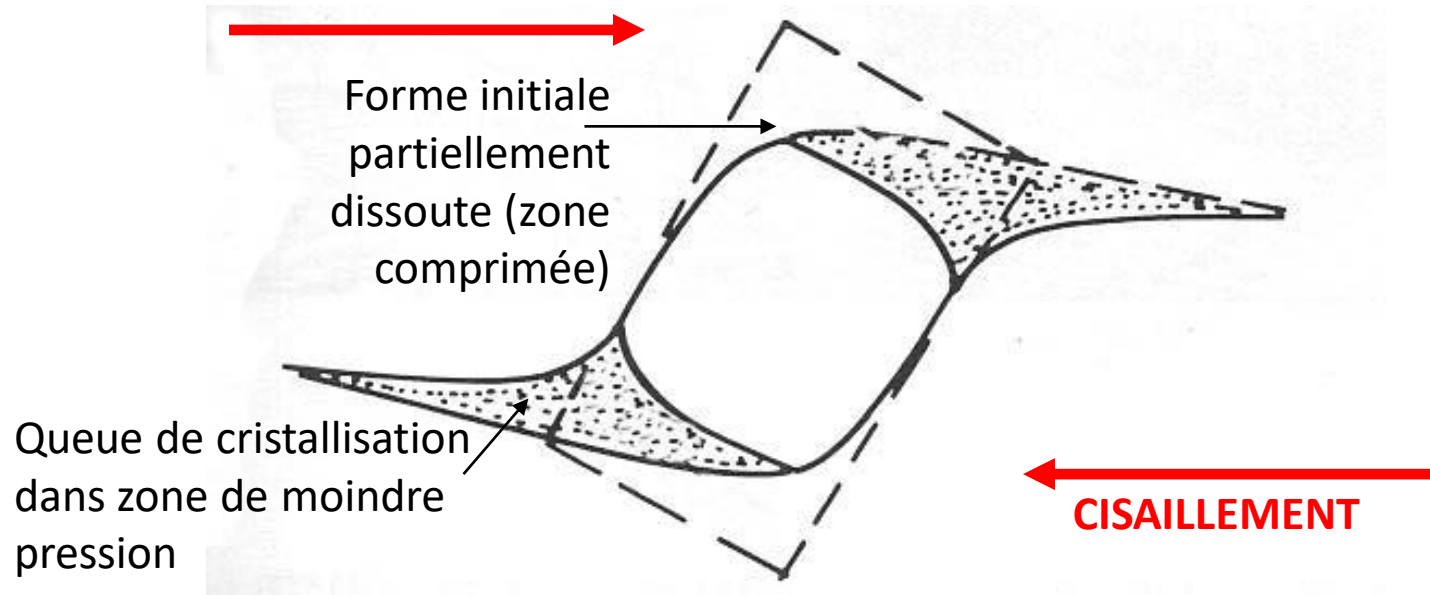
Boudinage: linéation selon y (σ_2)



Ombre de pression symétrique



Ombre de pression dissymétrique

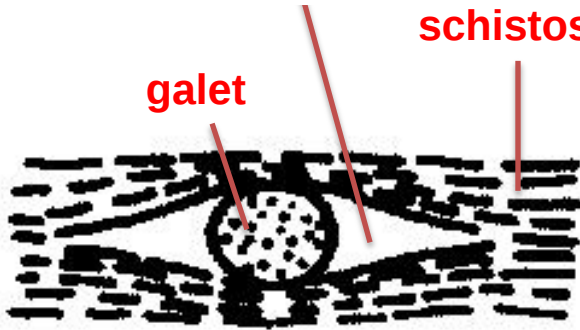


Ombres de pression: objet antecinématique

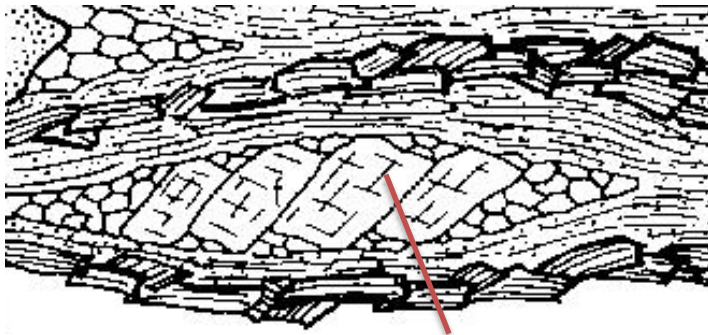
recristallisation
syn-schisteuse

schistosité

galet



Ombres symétriques:
aplatissement pur

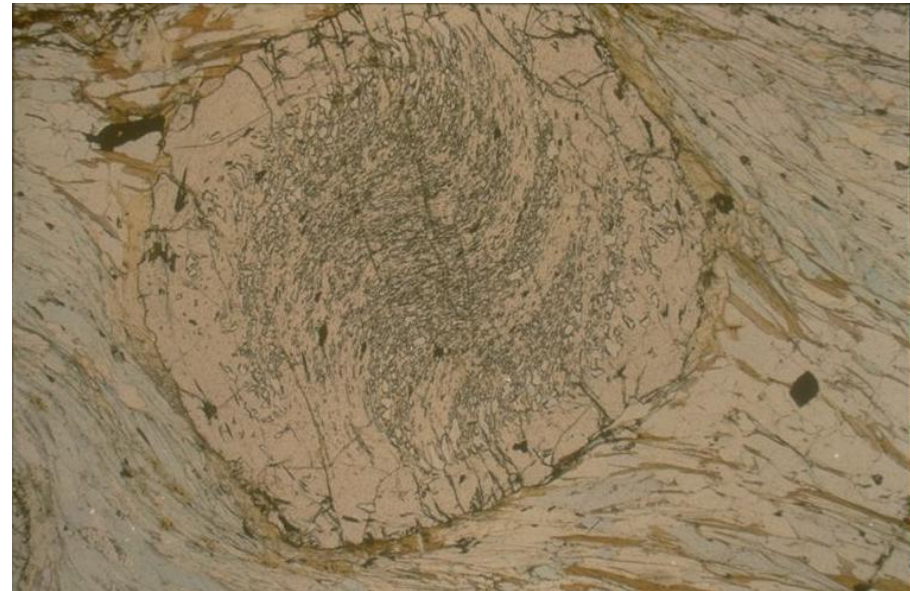
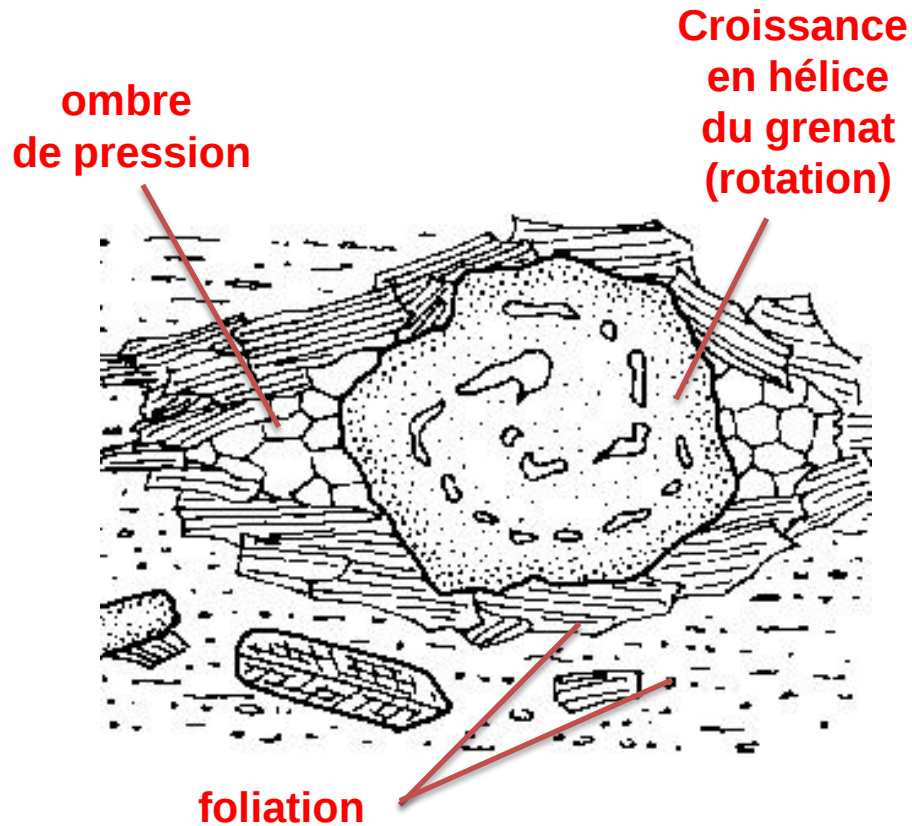


déformation cassante
du minéral



Ombres de pression sigmoïdes:
-> composante rotationnelle
-> cisaillement simple

Ombres de pression: objet synschisteux

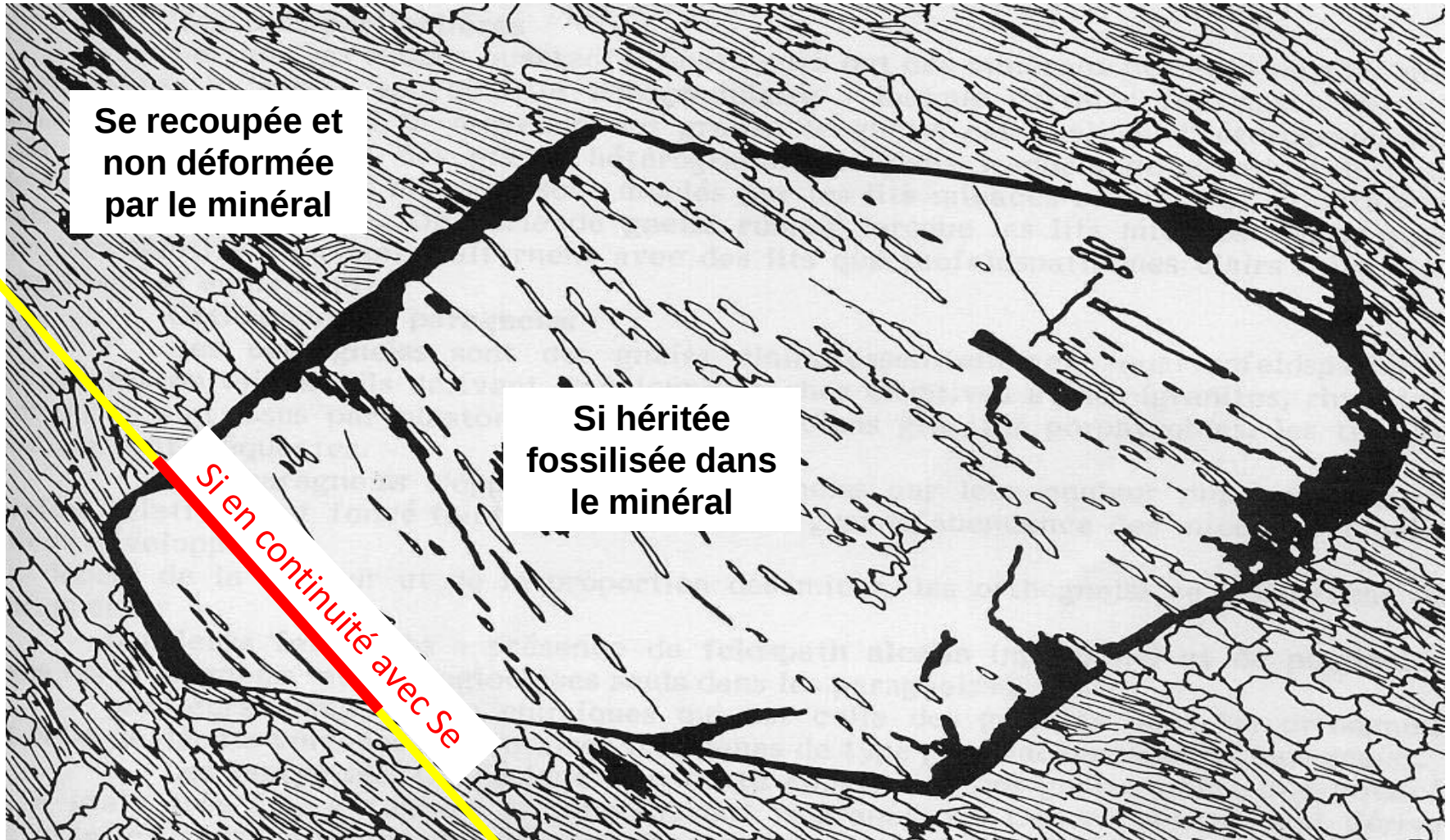


Incorporation de la foliation au fur et à mesure de la croissance du cristal en rotation. Cette foliation est fossilisée par des inclusions minéralogiques en spirale.

Minéral post-schisteux

Se: schistosité externe

Si: schistosité interne



Linéations

