

G1 : Déformation des matériaux de la lithosphère





PROBLEMATIQUE

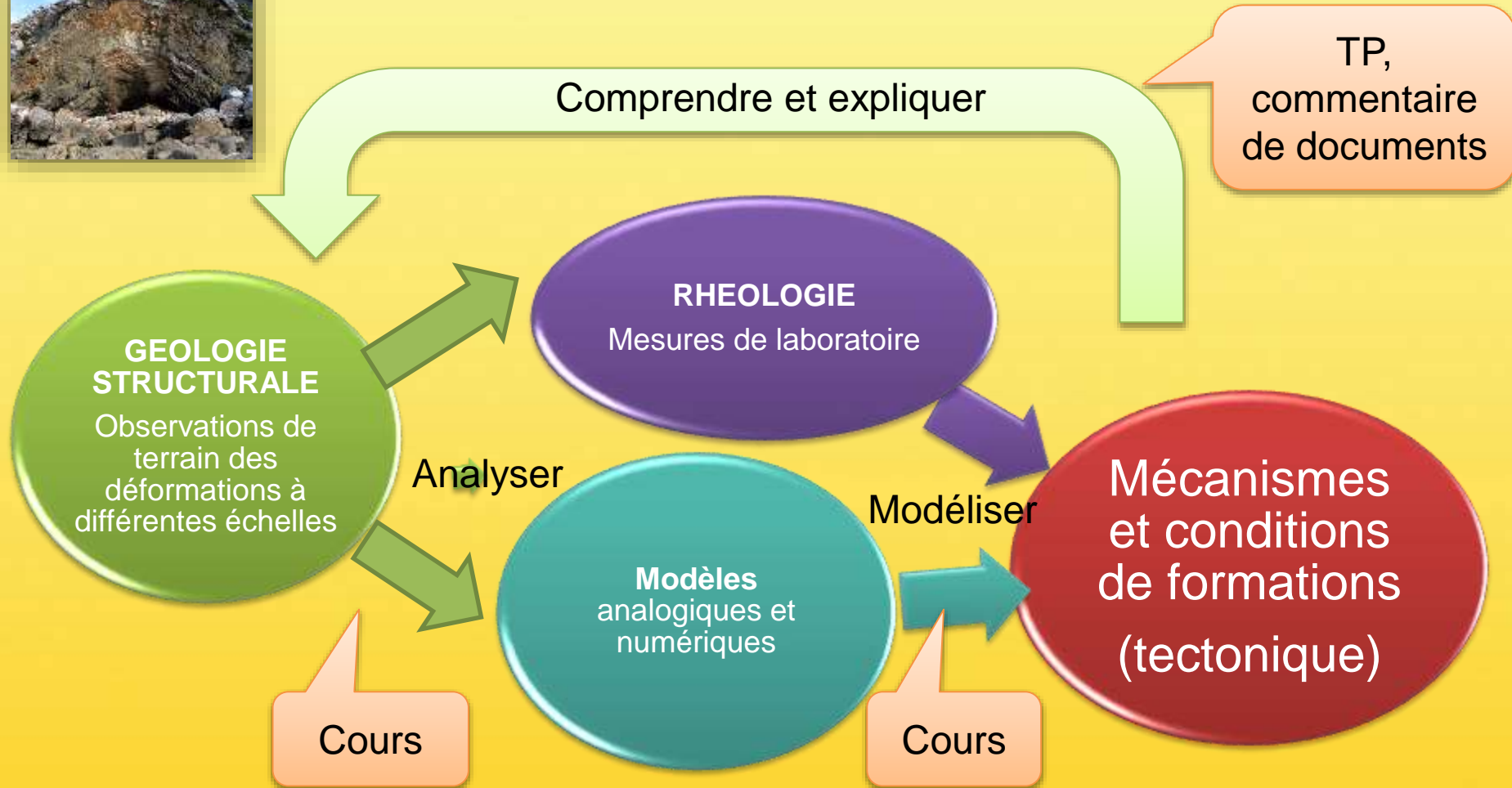
- Comment les études de labos peuvent-elles nous permettre de comprendre les déformations observées sur le terrain? (partie 1 et 3, TP)
- Ces connaissances peuvent-elles nous permettre de mieux comprendre les séismes et de les prévoir? (partie 2)



Toute roche déformée n'est pas forcément métamorphique!



L'étude des déformations est un aller-retour entre les données de terrain et les modèles



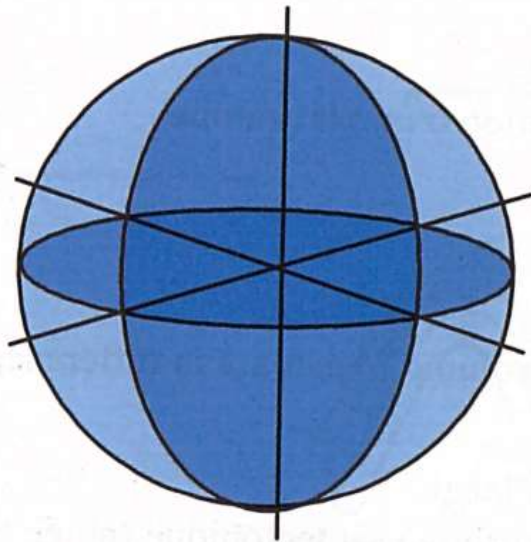
1. Rhéologie de la lithosphère

1.1. Les matériaux de la lithosphère se déforment sous l'effet de la contrainte de façon élastique, cassante ou plastique

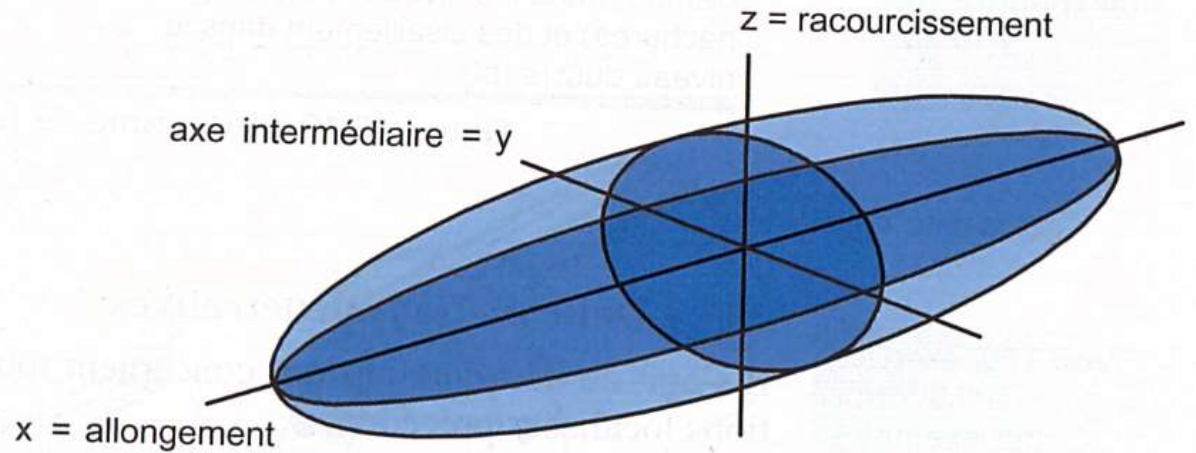
11.1. Une déformation est un changement de géométrie d'un objet

La **déformation** est un terme qui décrit les changements de forme, d'orientation ou de texture d'un objet, à toutes les échelles (du minéral à la lithosphère) **soumis à des contraintes**

Définir les axes de déformations et les représenter par un ellipsoïde



Sphère initiale



Ellipsoïde de déformation

Figure 10.12 Ellipsoïde de déformation.

$$\varepsilon \text{ (en \%)} = (l_1 - l_0) / l_0 * 100$$

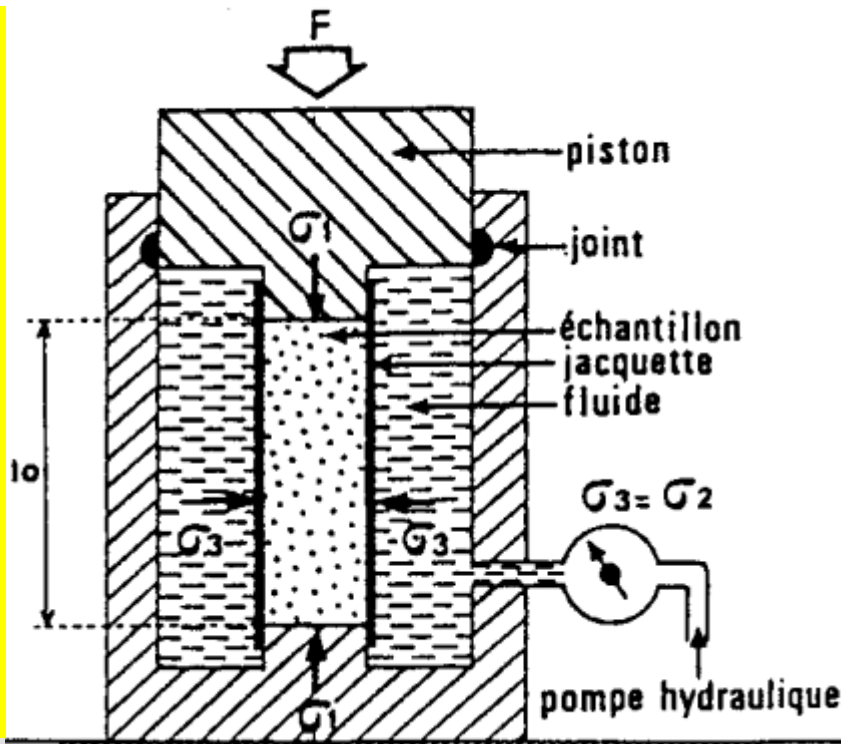
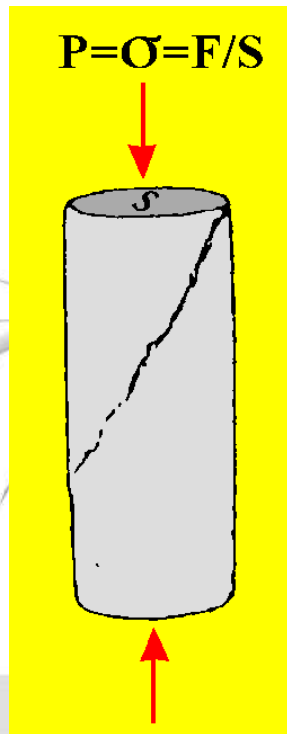


11.2. Une contrainte est une force appliquée par unité de surface

La **contrainte** est une force appliquée par unité de surface.

Elle est équivalente à une pression (1bar =0,1 Mpa)

Lorsque la contrainte dépasse la résistance du matériel, l'objet est déformé.

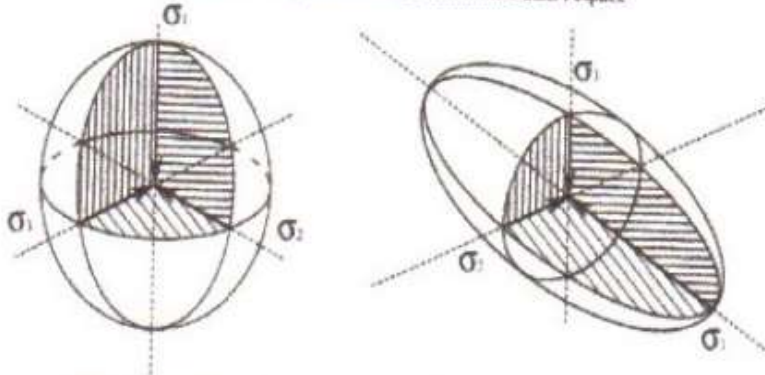


- Par définition, la contrainte est :

La contrainte équivaut donc à **une pression** et est exprimée en **pascal ou en bars** (ancienne unité). $1 \text{ kbar} = 0,1 \text{ GPa}$
 La contrainte est donc définie par : sa direction, sens et intensité, et l'orientation de la surface où elle agit.

- Ellipsoïde des contraintes

Figure 13 : Représentation des contraintes dans l'espace



Sphère des contraintes : $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$
 État de contraintes isotropes dans un massif rocheux soumis au seul enfouissement

Ellipsoïde des contraintes : $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$
 État de contraintes anisotropes dans un massif rocheux soumis à l'enfouissement et à des forces tectoniques

CONTRAINTES
ISOTROPES

CONTRAINTES
ANISOTROPES



Matrice des contraintes



Calcul matriciel en écoles G2E

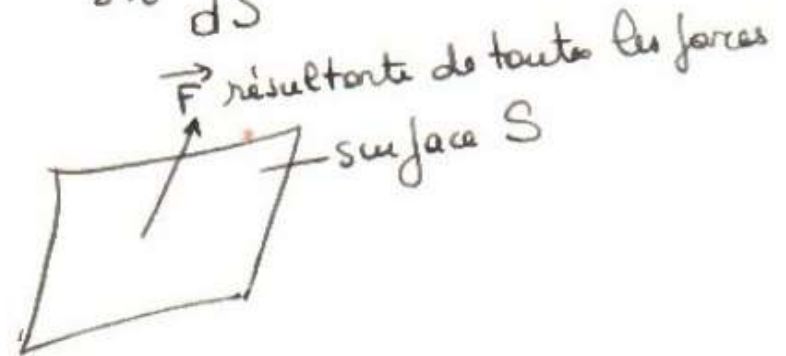
On appelle **ellipsoïde des contraintes**, la surface formée par les **extrémités de tous les vecteurs contraintes**.

Les 3 axes portent les contraintes principales. Par convention on note σ_1 la contrainte maximale et σ_3 la contrainte minimale.

En physique, l'ellipsoïdes des contraintes décrit parfaitement les contraintes appliquées à la roche, mais il n'est pas facilement utilisable en géologie. On le décompose en contraintes plus significatives pour la géologie.

contrainte $\vec{c} = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{dF}{dS}$

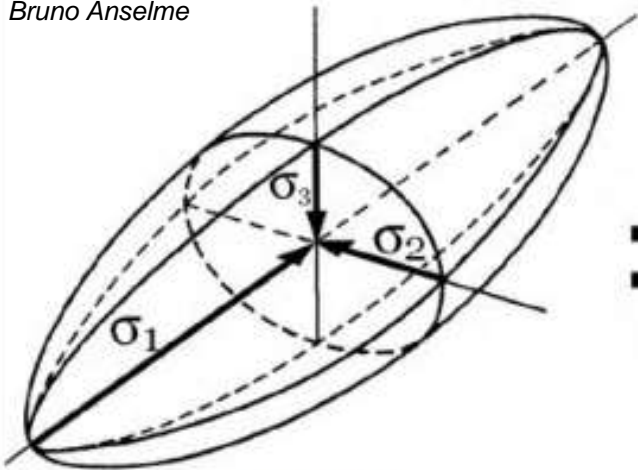
APPROFONDIR



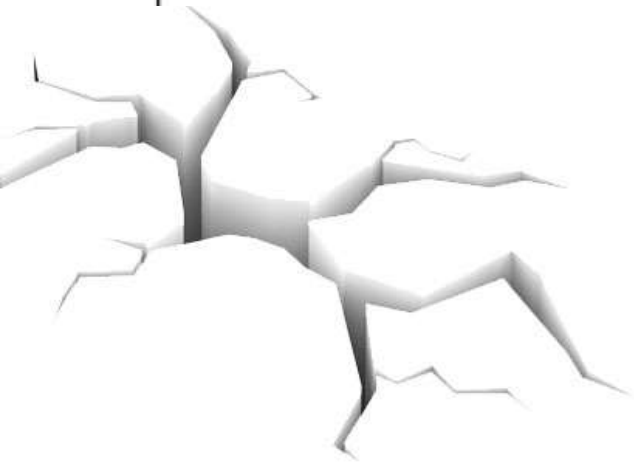
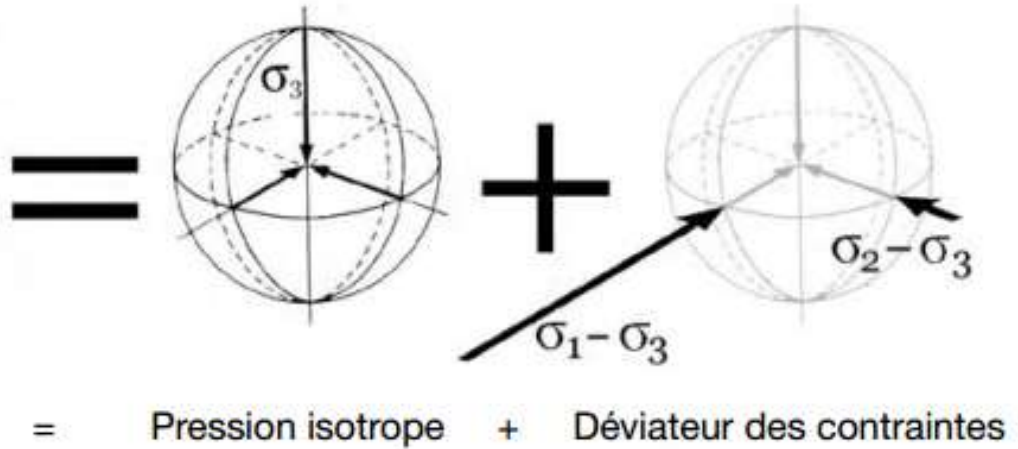


Une contrainte est composé d'un terme qui représente la profondeur et d'un terme qui représente la contrainte tectonique éventuelle

Bruno Anselme



Etat de contrainte



Profondeur

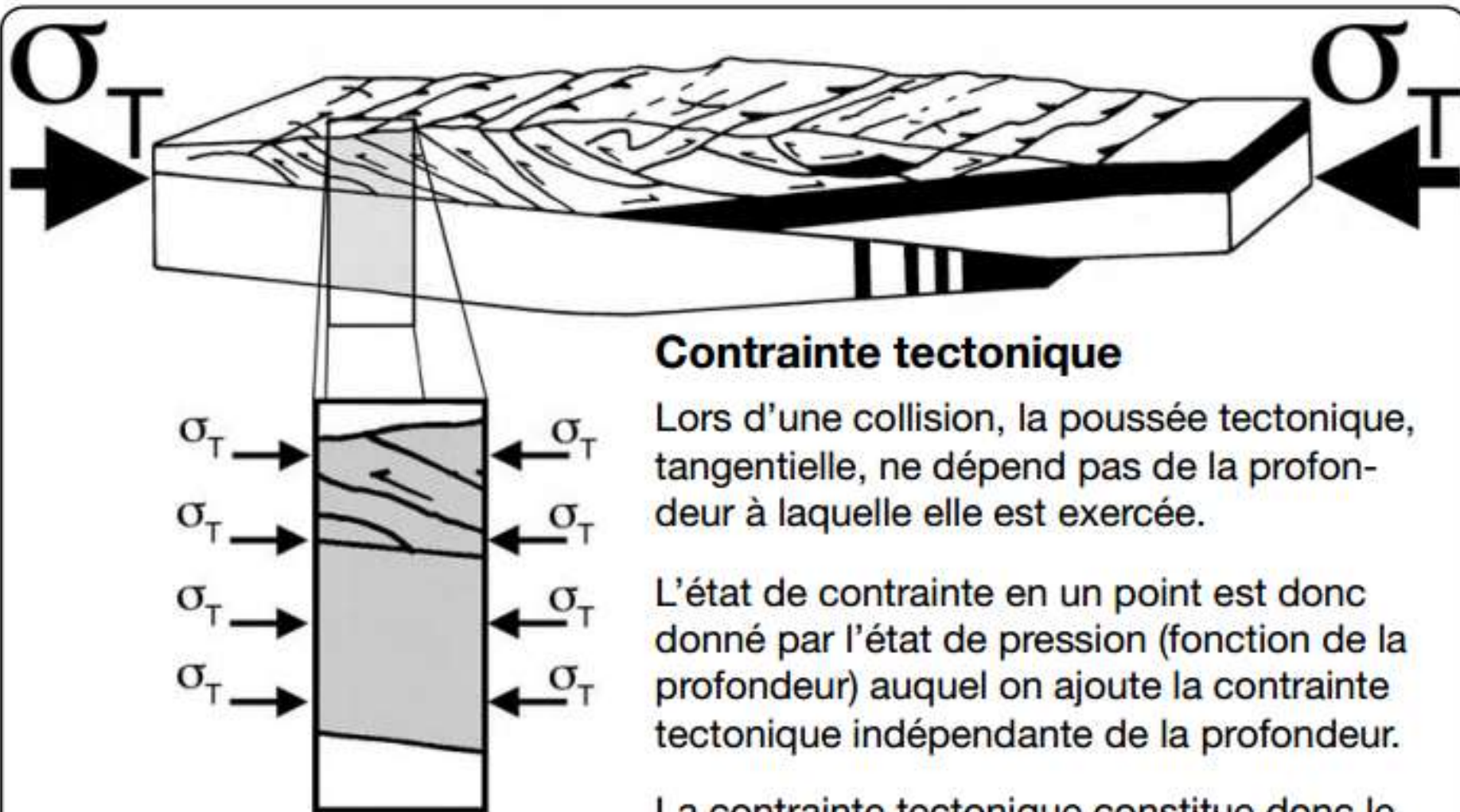
Facilite les déformations ductiles

Contrainte tectonique

Détermine le type et l'ampleur des déformations



Le déviateur des contraintes et sa signification

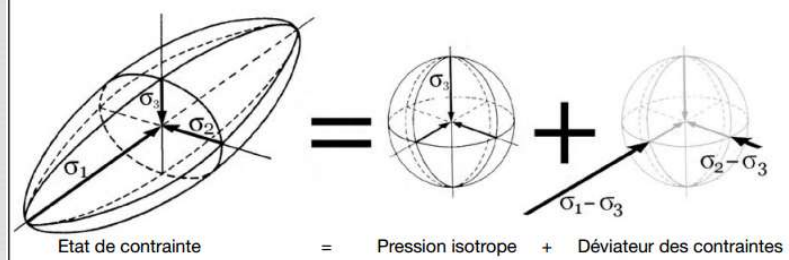


Contrainte tectonique

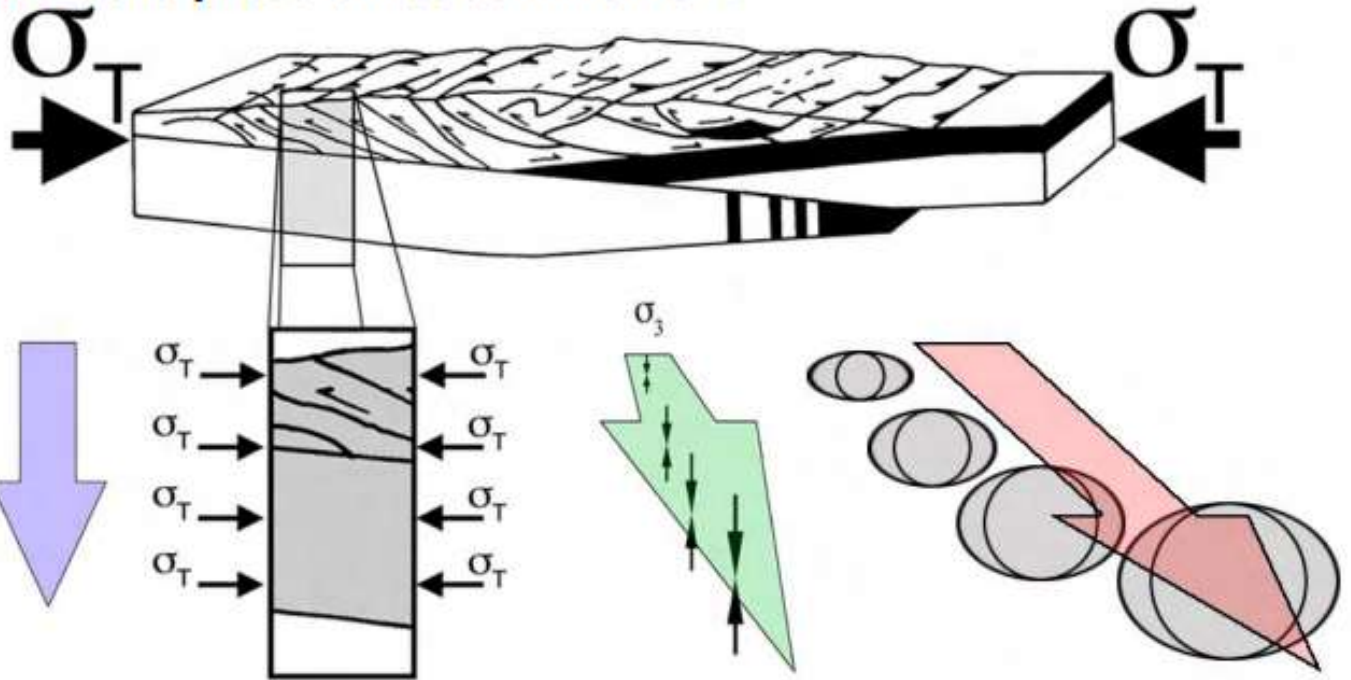
Lors d'une collision, la poussée tectonique, tangentielle, ne dépend pas de la profondeur à laquelle elle est exercée.

L'état de contrainte en un point est donc donné par l'état de pression (fonction de la profondeur) auquel on ajoute la contrainte tectonique indépendante de la profondeur.

La contrainte tectonique constitue donc le déviateur des contraintes.



Effets de la pression de confinement



Le déviateur est indépendant de la profondeur : il correspond à la contrainte tectonique

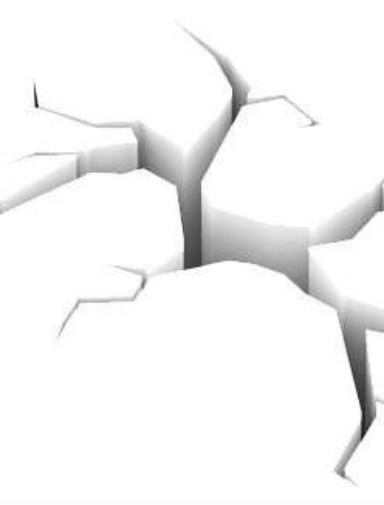
σ_T constant

La pression lithostatique augmente avec la profondeur

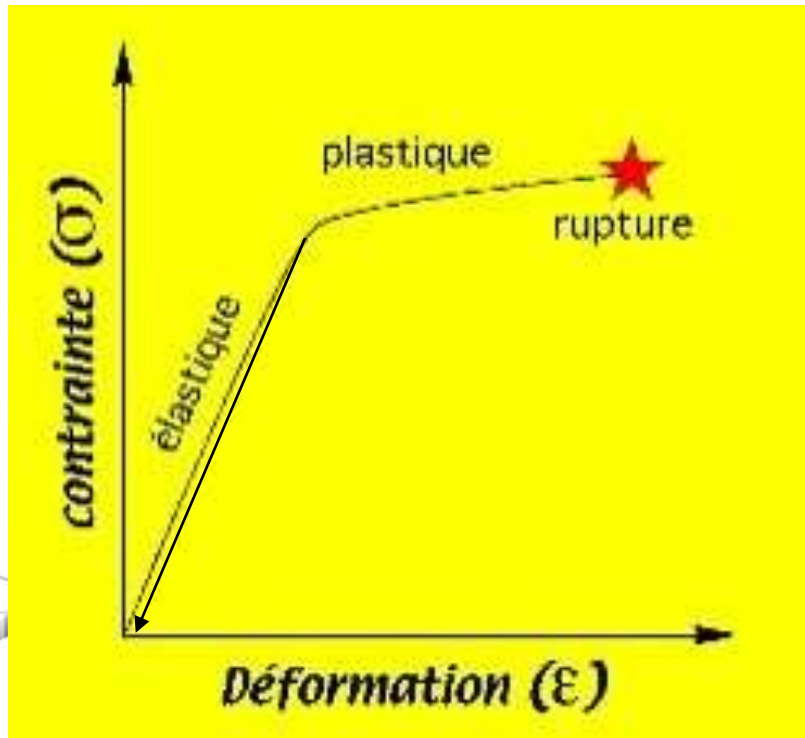
σ_3 croissant

La "part" du déviateur dans la contrainte diminue avec la profondeur.

Ellipsoïde de moins en moins anisotrope



11.3. Les trois étapes de la déformation d'une roche sont la déformation élastique, déformation plastique puis la rupture.



Une déformation élastique **disparaît** quand les contraintes se relâchent.

Comme un élastique qui reprend sa longueur!

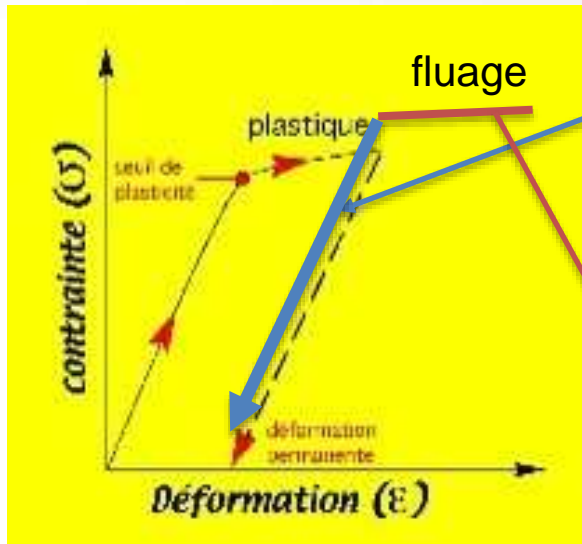
Ce sont des déformations **INVISIBLES** dans les zones anciennes



Une déformation plastique est continue et irréversible



Application : modelage sur argile = arts plastiques



Une déformation plastique est une déformation **continue**, qui **persiste définitivement**, même quand les contraintes se relâchent

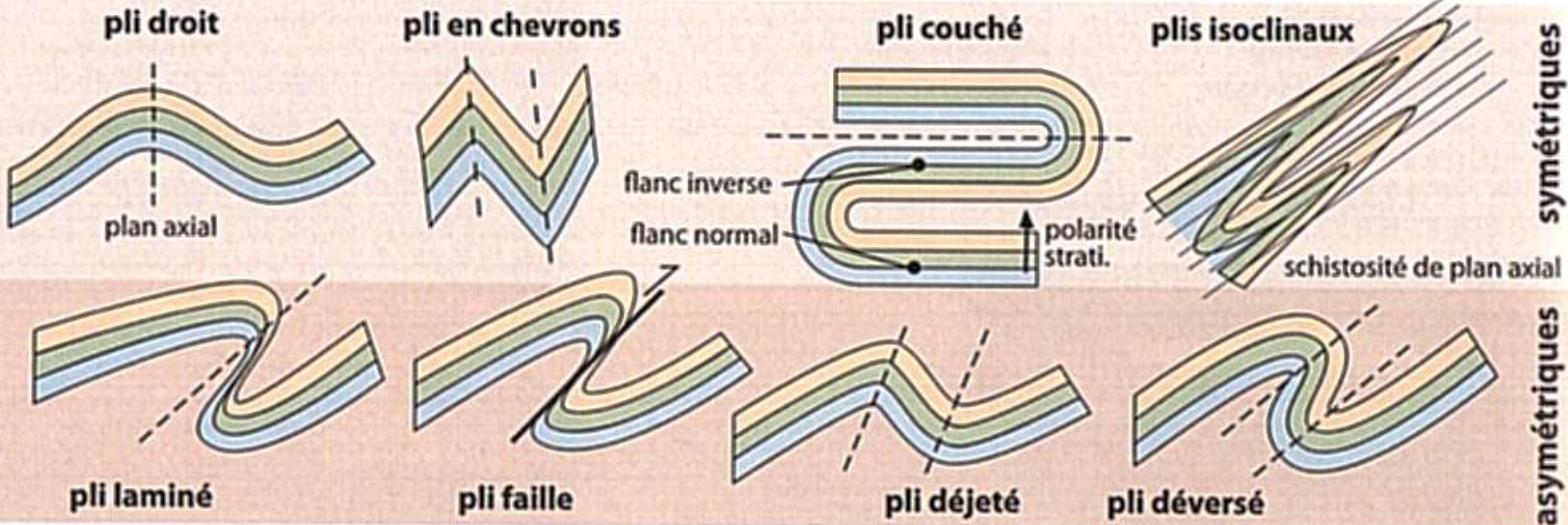
Une roche qui se déforme facilement de façon plastique est dite INCOMPETENTE (pour la construction)



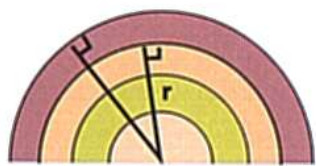
Salvador Dalí

En géologie, la déformation plastique augmente avec le **temps**, malgré des contraintes stables, c'est le **fluage**!

Dans le fluage, ce qui détermine l'ampleur de la déformation plastique, ce n'est pas l'intensité des pressions (il suffit qu'elles dépassent le seuil de plasticité), mais le TEMPS!



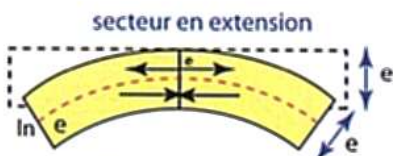
Nomenclature des plis selon leur géométrie



e est conservée constante, le rayon de courbure (r) varie



e variable, flancs étirés, charnière épaissie



secteur en extension

secteur en compression

In = ligne neutre = longueur conservée

Plis concentriques



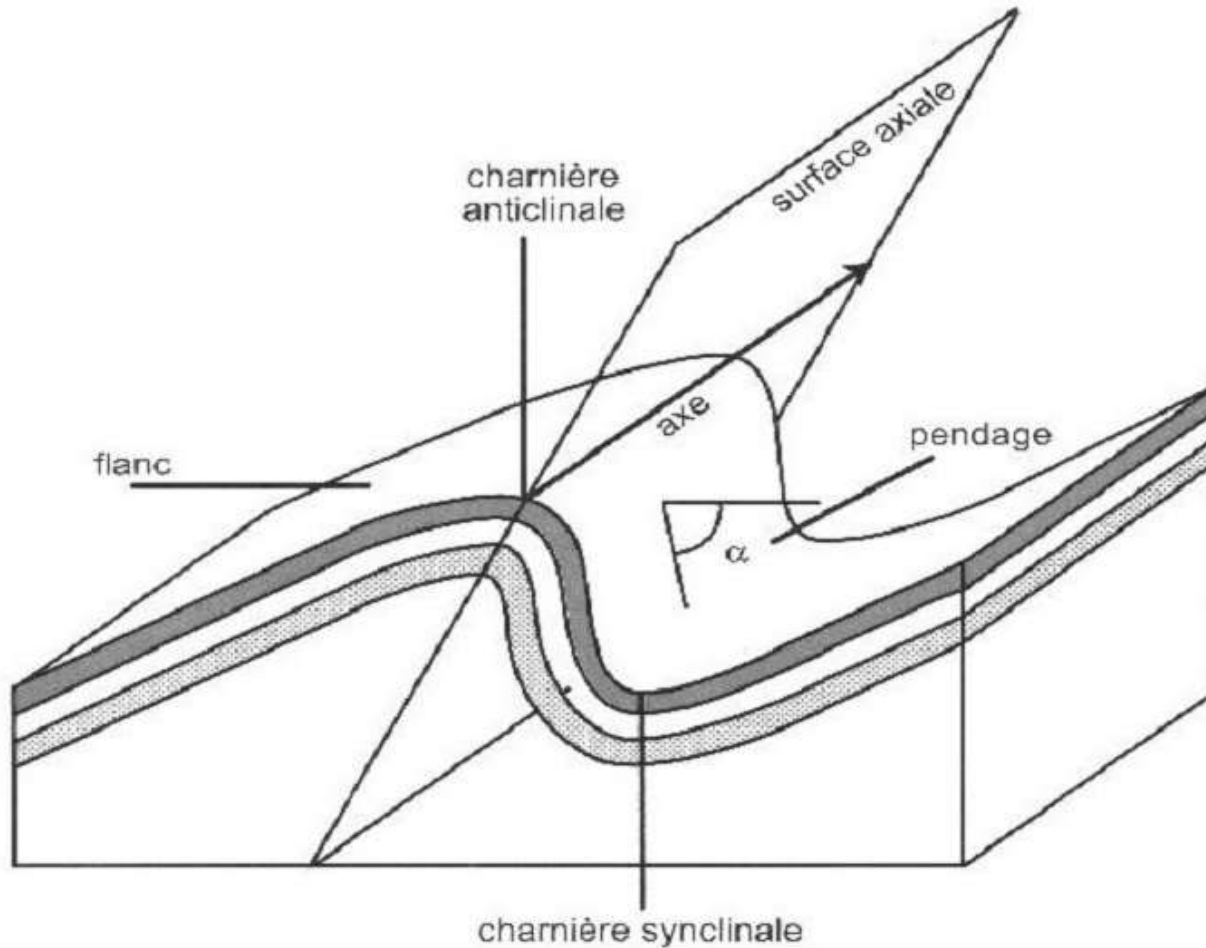
Les plis semblables sont reproduits par translation simple. L'empilement est parfait, sans vides. Ce sont les plis des domaines profonds

Plis semblables



Plis concentriques (en haut), plis semblables (en bas)
(radiolarites de Grèce)

Décrire un pli



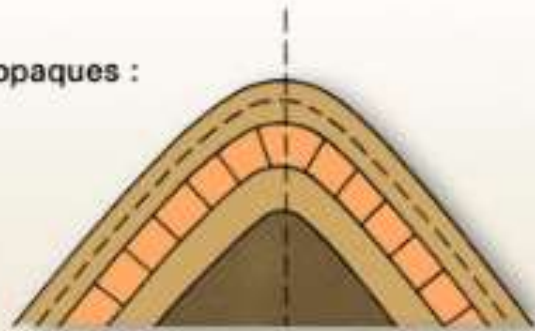
synforme/antiforme
- synclinal/anticlinal
- axe du pli,
charnière, flanc,
pendage
- pli droit, déjeté,
déversé (= en
genou), couché

-isopaque, anisopaque,
semblable
-déformation de flancs,
de charnière

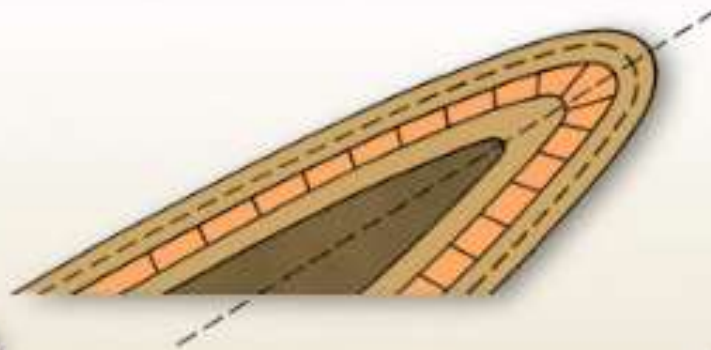
Les différents types de plis isopaques

Les déformations dans un pli isopaques sont concentrés dans la charnière

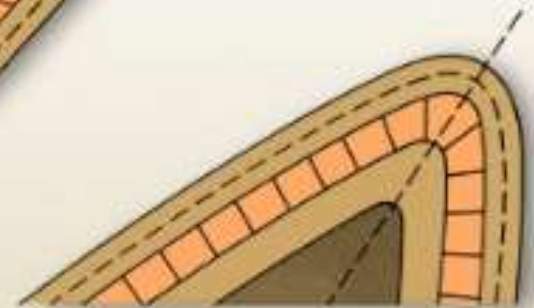
plis isopaques :



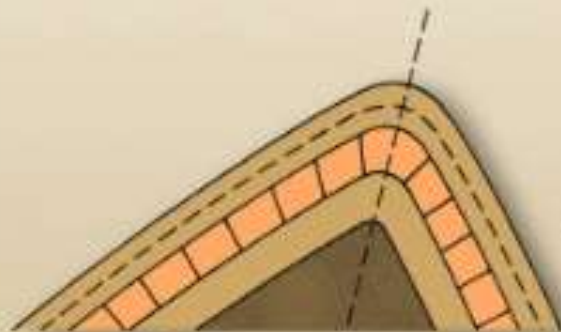
droit : le plan axial est vertical



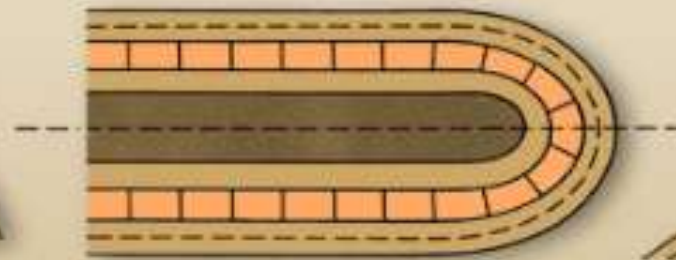
renversé



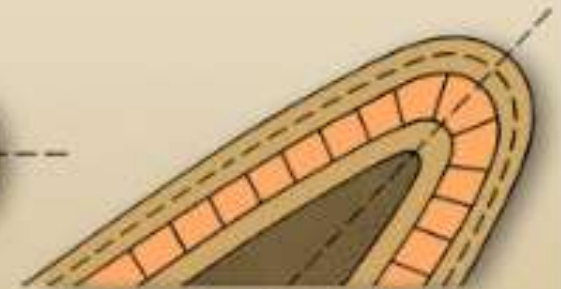
en genou



déjeté



couché : les deux flancs
et le plan axial sont horizontaux

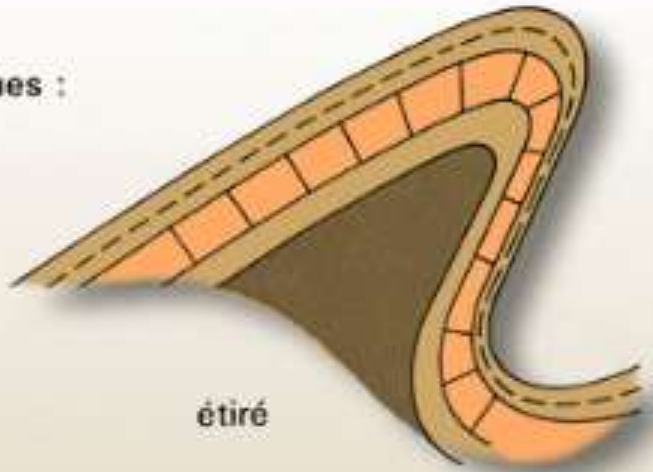


déversé

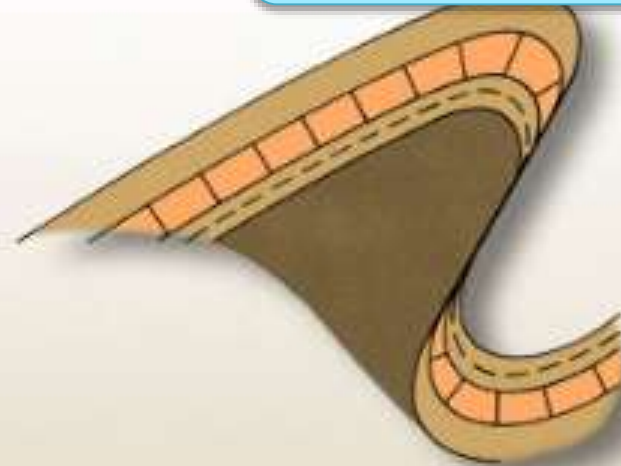
Plis anisopaques

Les déformations dans un pli anisopaques sont concentrés dans les flancs

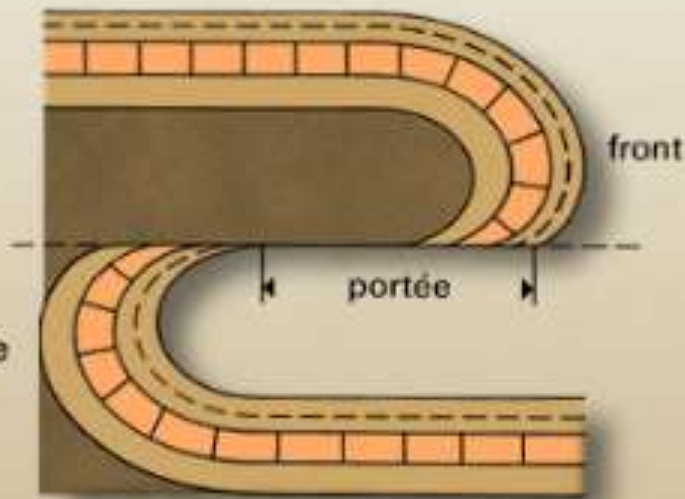
plis anisopaques :



étiré



laminé

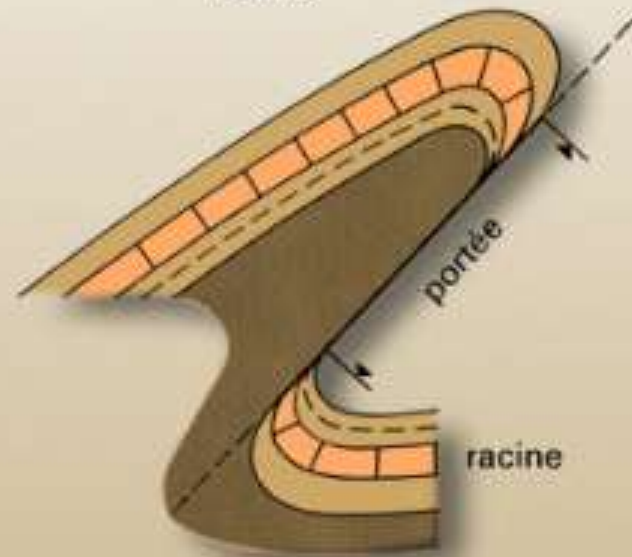


racine

front

portée

chevauchant



portée

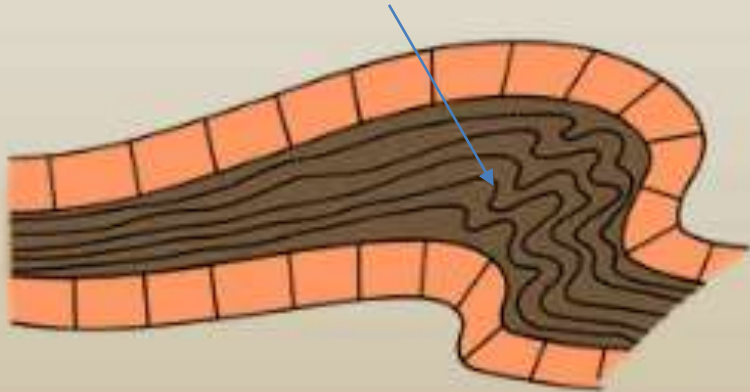
racine

pli-faille

Disharmonies

a

Plissements,
boudinage



disharmonie élémentaire à l'échelle d'un pli

b



disharmonie fondamentale
entre socle et couverture sédimentaire;
on notera l'indépendance des plis de couverture
par rapport au socle (comparer avec c)

Pli avec dysharmonie et boudinage

Où a été prise
cette photo?

Quelle est la
cause de la
dysharmonie?



ANALYSER UN OBJET DÉFORMÉ



Objet en déformation finie

Reconstitution de l'état initial
(objet de forme connue, strates sédimentaires horizontales, etc).

des indices de rotation

cisaillement simple

-> impossible de remonter aux contraintes
On cherche les plans de cisaillement

Pas d'indice de rotation

Ellipsoïde des déformation (Ox Oz)

Ellipsoïde des contraintes (σ_1 selon oz, σ_3 selon Ox)



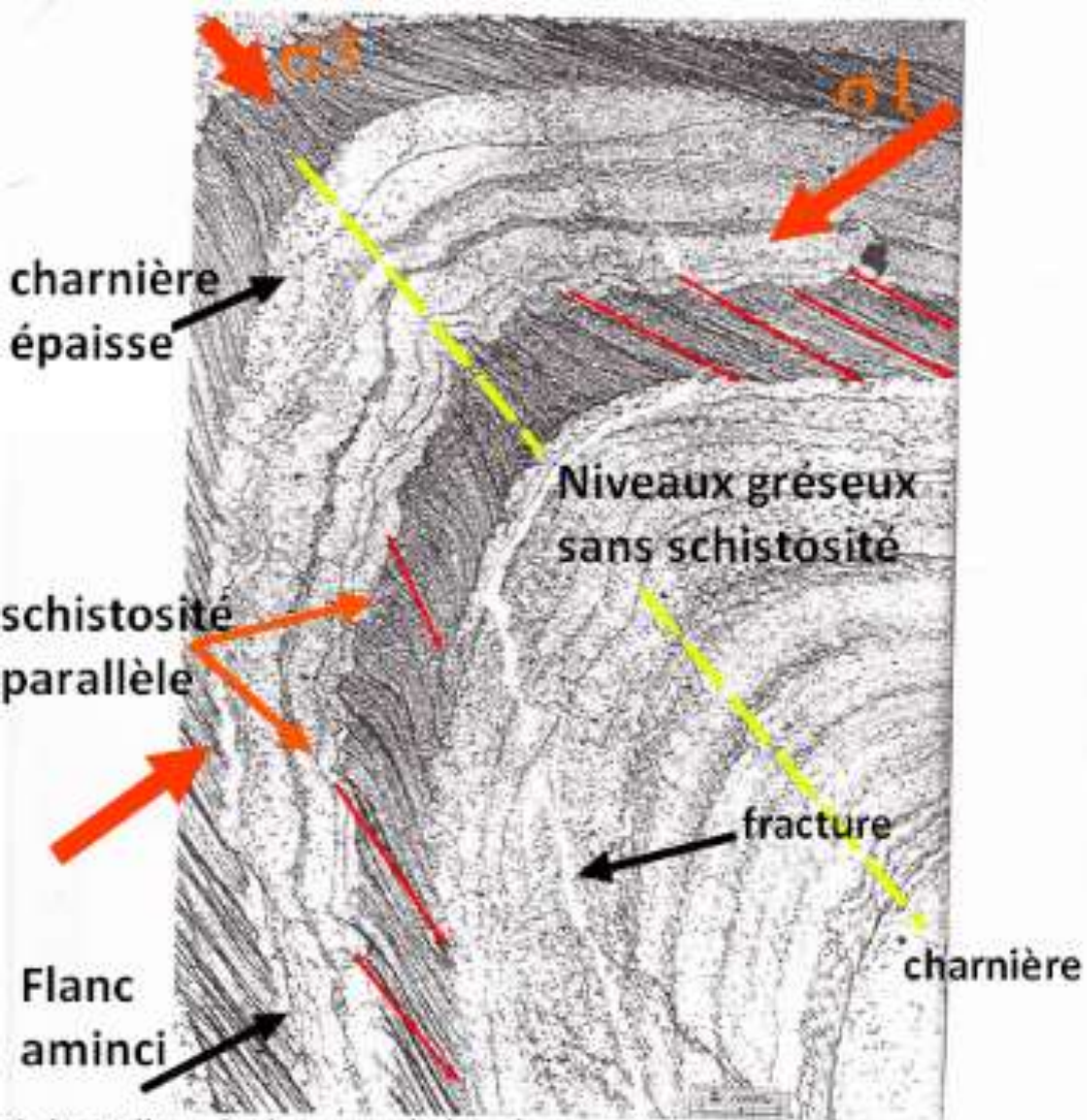
Exercice concours

Analysez cette lame
mince.

Couches géseuses

Couches micacées





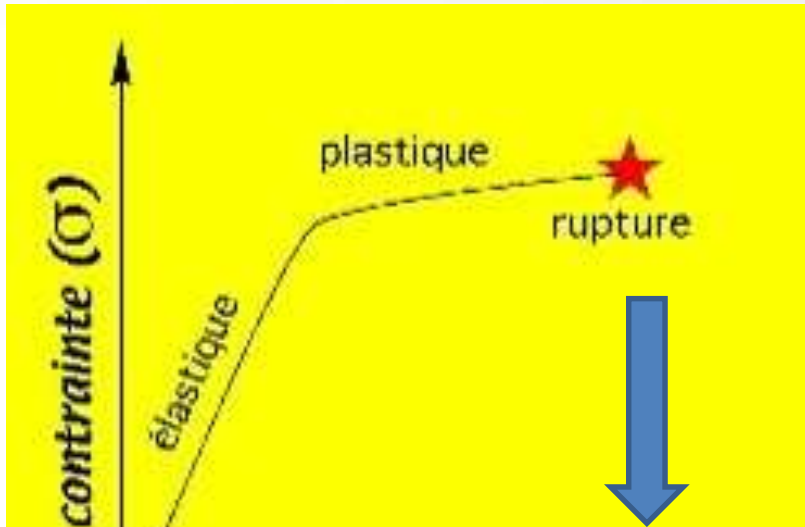
Il s'agit d'un pli photographié en lame mince.
 Le pli est anisopaque, car les flancs sont amincis. C'est même un pli semblable car la schistosité est parallèle, et non en éventail. Ce type de pli se forme par aplatissement, avec des glissements le long des flancs. Il se forme en domaine ductile. La différence de compétence des strates explique l'absence de schistosité dans les strates gréseuses



Quand les strates sont de compétence différente, il peut y avoir réfraction de la schistosité ou même non apparition de schistosité dans certaines strates

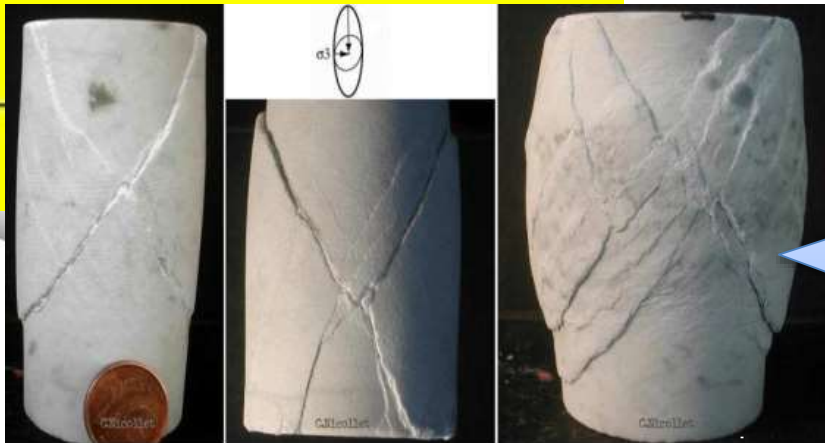


Une rupture est une déformation discontinue irréversible



Une rupture fait apparaître une discontinuité dans l'objet, avec des possibilités de glissement des éléments le long de cette surface de discontinuité.

Il peut s'agir de fracture de minéraux, d'une roche, d'une faille visible sur un affleurement ou à l'échelle de la planète



Plus la contrainte lithostatique est forte (=la profondeur augmente), et plus les microfractures se multiplient.



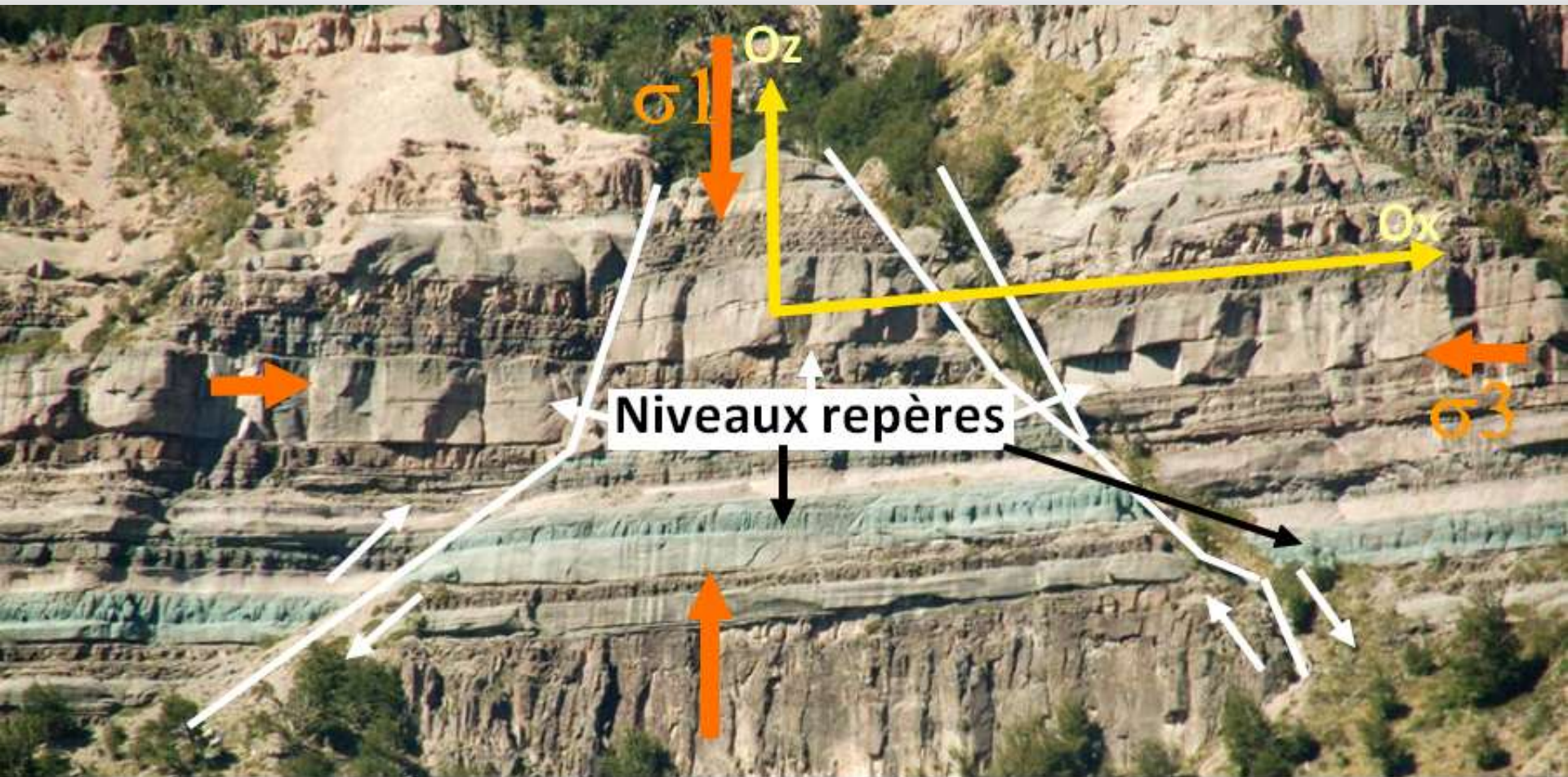
Analysez ce paysage en l'annotant.



**Exercice
concours**



Photographie : Pierre Thomas



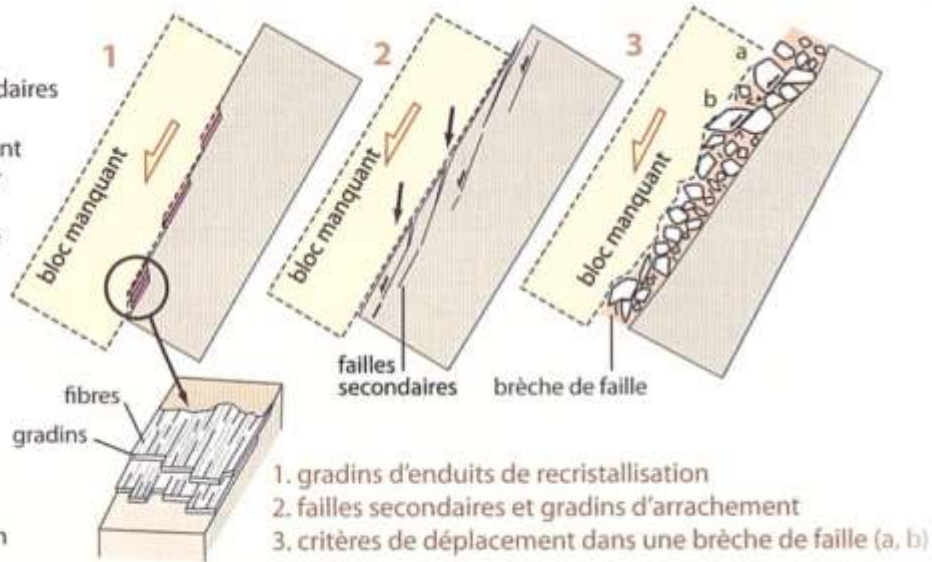
Niveaux repères

Il s'agit d'un système de 2 failles normales conjuguées, donc un contexte distensif. On reconnaît des failles normales car c'est comme si les blocs "glissaient" selon la gravité. Ces failles ont un pendage de 60° , ce qui est attendu. L'extension est d'environ 7%. Il n'y a pas d'indice de rotation, donc on peut reconstituer les directions des pressions, parallèlement aux directions d'allongement maximum (Ox) et de raccourcissement max (Oz).



Stries, failles secondaires et gradins d'arrachement sur un miroir de faille décrochante (sénestre)

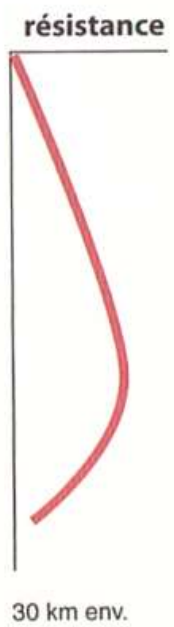
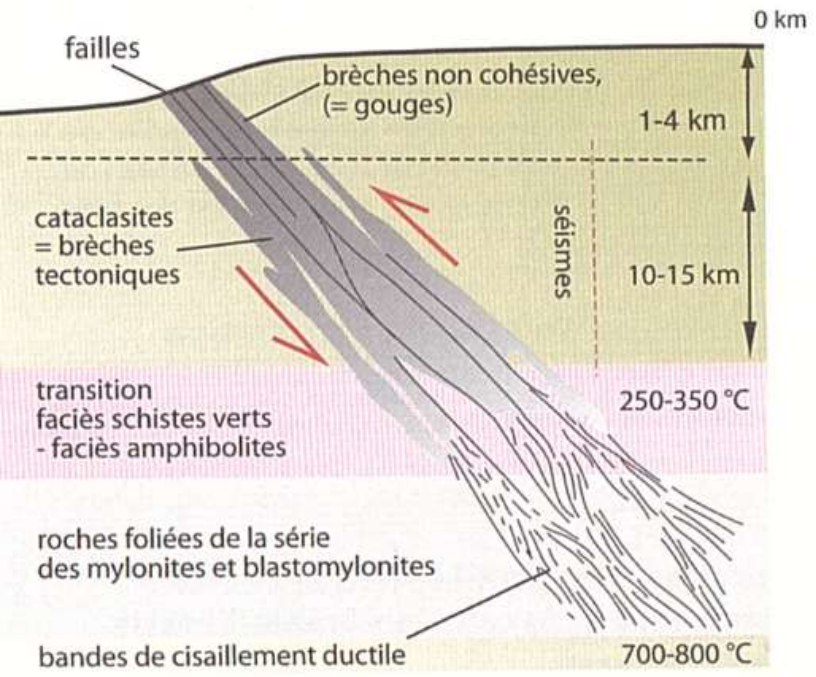
Gradins de cristallisation de calcite



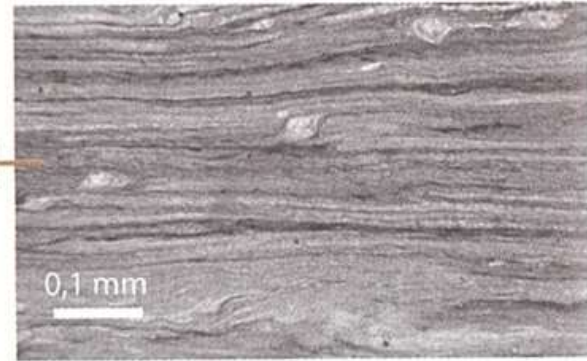
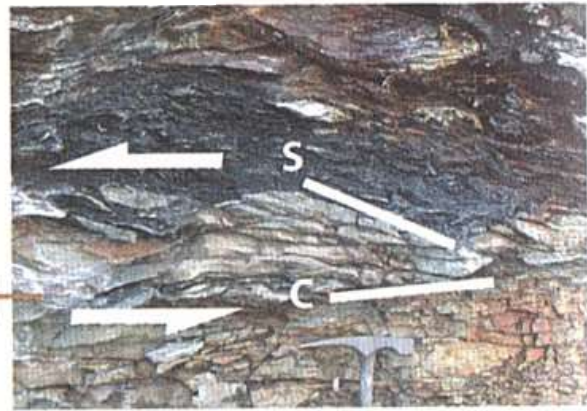
1. gradins d'enduits de recristallisation
2. failles secondaires et gradins d'arrachement
3. critères de déplacement dans une brèche de faille (a, b)

Principaux tectoglyphes sur les plans de failles

← Faille en surface



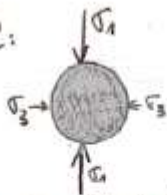
régime cassant
régime ductile



0,1 mm



état initial:

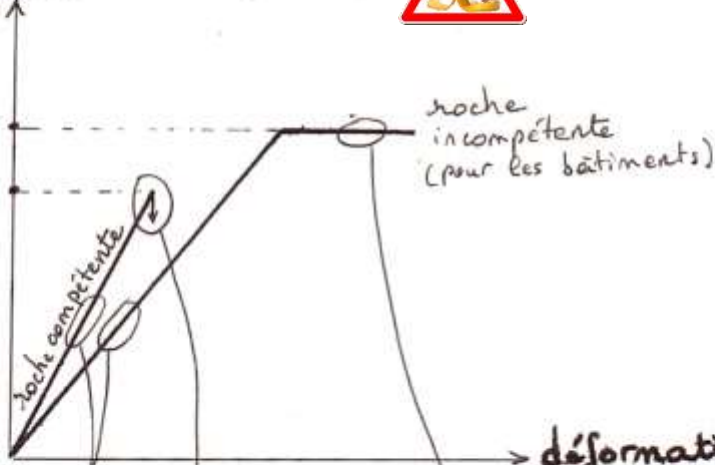


LES ROCHES SE DÉFORMENT SOUS L'EFFET DE LA CONTRAINTE

déviateur des contraintes = $\sigma_1 - \sigma_3$ (cause)



déviateur des contraintes ayant induit le fluage
déviateur des contraintes ayant induit la rupture



roche compétente
roche incompétente (pour les bâtiments)

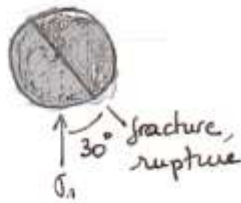
déformation (effet) = % raccourcissement



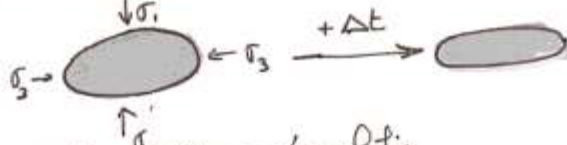
déformation élastique = disparaît dès que la contrainte se relâche



déformation cassante



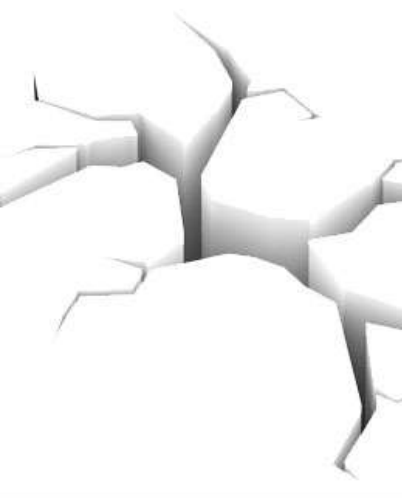
fluage plastique



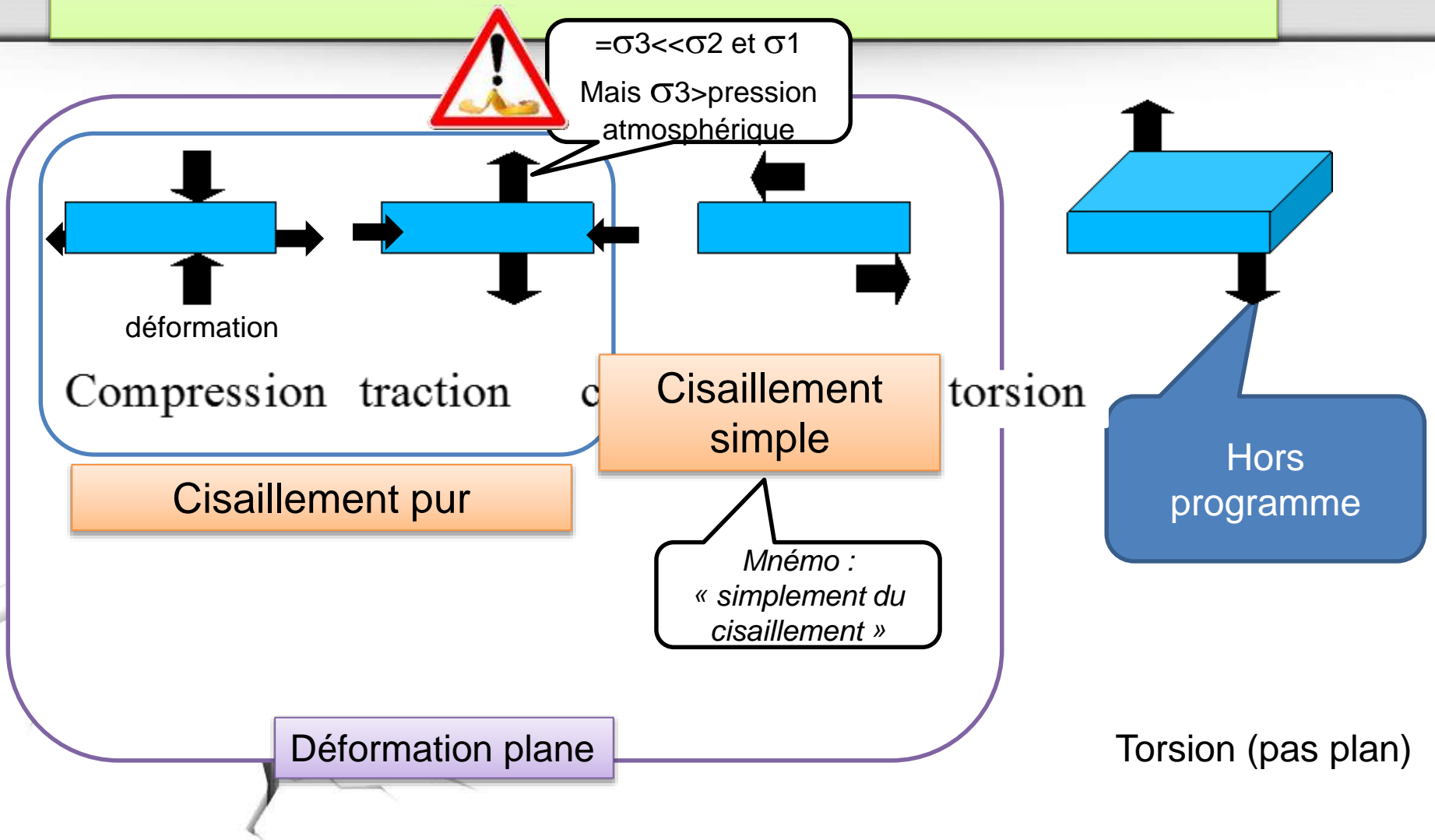
La déformation s'amplifie avec le temps et reste continue

ex: grès à matrice siliceuse, granite à faible profondeur
ROCHE COMPÉTENTE - apte à la construction

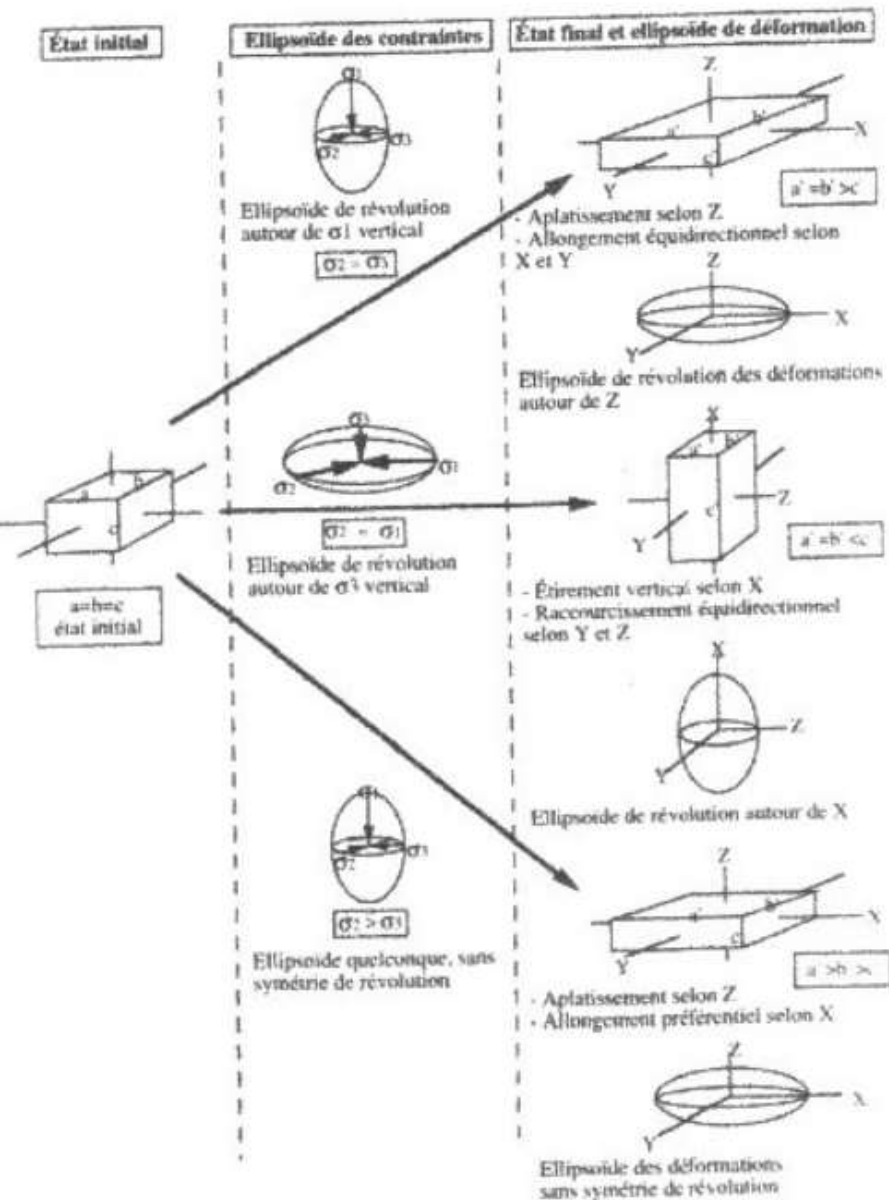
ex: roche contenant des argiles ou des micas* ou toute roche en profondeur ou en présence de fluides
*ROCHE INCOMPÉTENTE (en surface)



1.2. Les mécanismes de la déformation plane sont le cisaillement pur et le cisaillement simple.



12.1. Seul le cisaillement pur permet de reconstituer les contraintes



Si l'ellipsoïde des déformations a les mêmes axes que celui des contraintes, on dit que la déformation est **coaxiale**. (sinon non-coaxiale, ce qui se produit si la roche possède des fragilités situées dans une autre direction). **Il n'y a que dans le cas d'une déformation coaxiale que l'étude de la déformation donne directement accès aux contraintes** (sauf cas particuliers : schistosité et linéation d'étirement)

Il y a deux mécanismes de déformation plane, mais un seul permet de reconstituer les contraintes

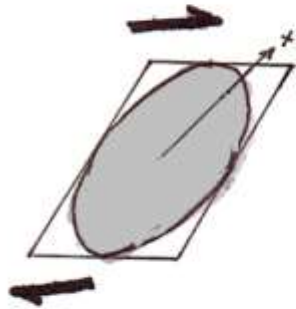
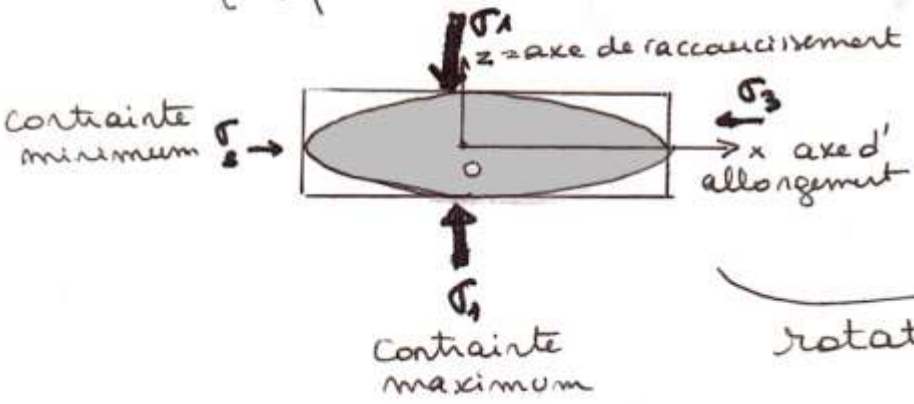


Etat initial à reconstituer



Cisaillement pur (=aplatissement-étirement)

Cisaillement simple



Indices de rotation: plus à flancs dissymétriques queues de cristallisation décalés

En géologie, on ne connaît que la déformation finie !

12.2. On peut identifier un cisaillement simple à l'échelle de l'affleurement par des plis d'entraînement ou des fentes de tension en échelon

1) Plis d'entraînement

- Plis asymétriques à flanc long et flanc court
- Plis en fourreau (forte déformation ductile, île de Groix)

Mnémono : jambon entre 2 tranches de pain!

L'asymétrie des plis semblables, **en Z ou en S**, comme les plis d'ordre 2 de la photo précédente, donne des indications sur le sens de transport de l'unité plissée. Evidemment, on considère au préalable que l'axe des plis est perpendiculaire à la direction de transport.

L'enchaînement des flancs longs et flancs courts dans une série de plis semblables est un bon indicateur du sens du cisaillement local ou du sens de déplacement de l'unité considérée. Ceci est valable à toutes les échelles.

Dans le cas de plis situés au dessus d'un contact de nappe, on utilise le terme de **plis d'entraînement**.



Radiolarites de Grèce

sens du transport →



Géométrie en Z



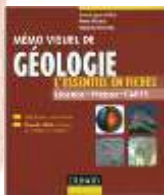
Schistes de la Zone Centrale, Taïwan

← sens du transport



Géométrie en S

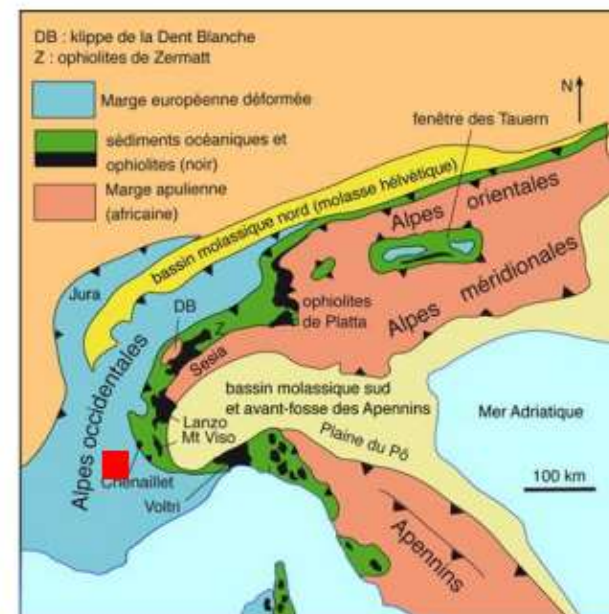
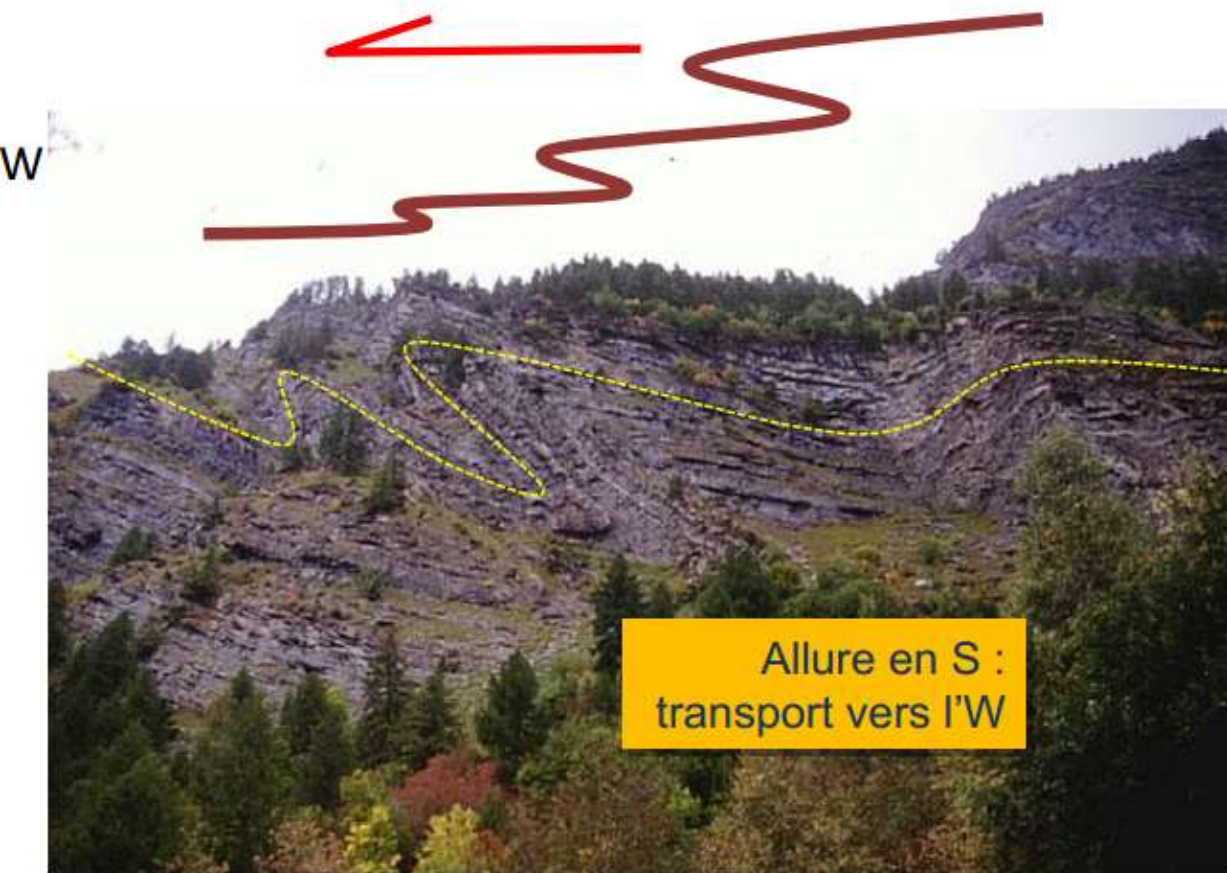
Lors du déplacement tectonique, dans les nappes de charriage par exemple, les roches se plissent selon des motifs géométriques caractéristiques. Les plis formés, dits **plis d'entraînement** sont asymétriques, avec des enchaînements de flancs longs et courts en allure de S ou de Z en lien avec le sens du transport.

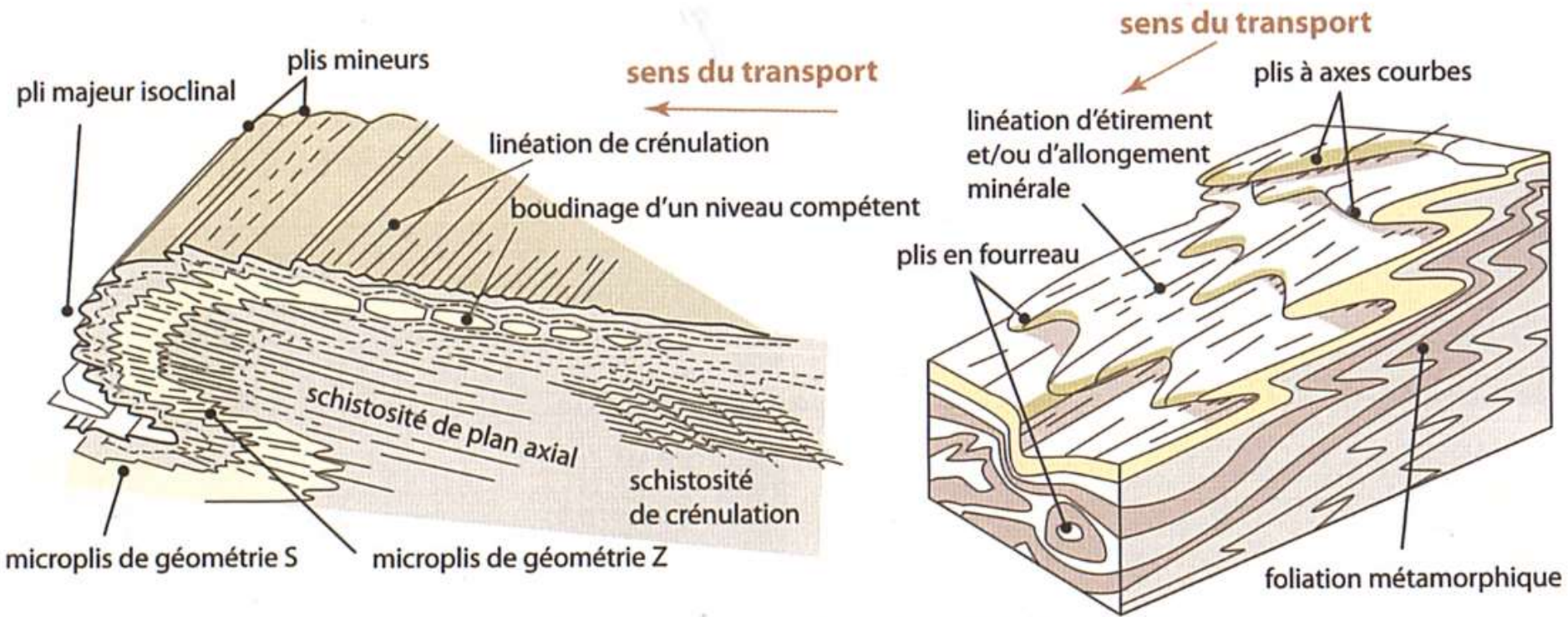


6 . EXEMPLE DES GRÈS DU CHAMPSAUR

Succession de flancs longs et courts dans les grès du Champsaur, couches plissées d'âge Eocène supérieur-Oligocène de la couverture du massif du Pelvoux, **en position normale**.

Les enchaînements en S dans cette série **en position normale** indiquent un sens du déplacement vers l'W lors du raccourcissement.





Microstructures des roches plissées

À gauche, déformation modérée typique du niveau structural où se développe la schistosité. Axes de plis perpendiculaires au sens du transport.

À droite, déformation plus intense dans le domaine des nappes de socle à déformation ductile. Axes courbes, parfois parallèles au sens du transport.

Interprétez ces déformations en annotant la photo, et reconstituez, le cas échéant, les contraintes

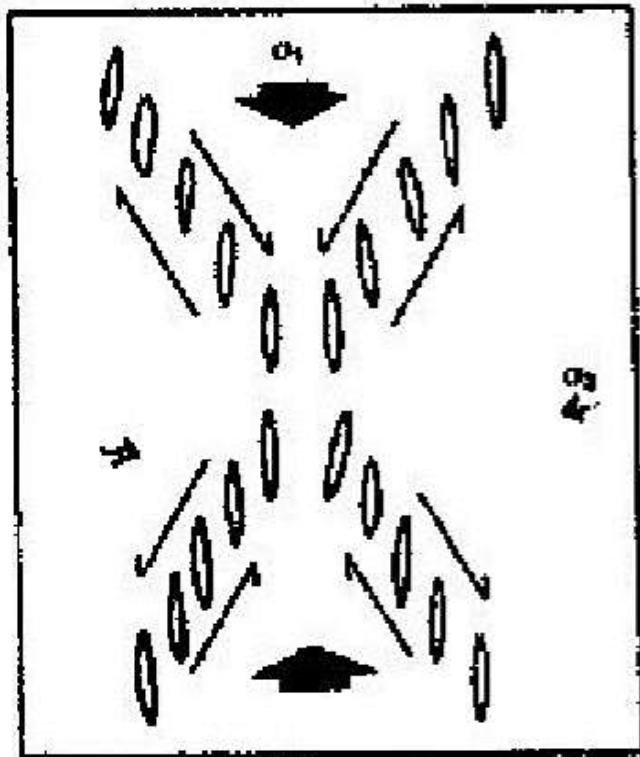
Exercice concou

*Vendée, sud des
sables d'Olonne,
Anse de Chaillé,
Puits de l'enfer
(Hendrik Vreken)*

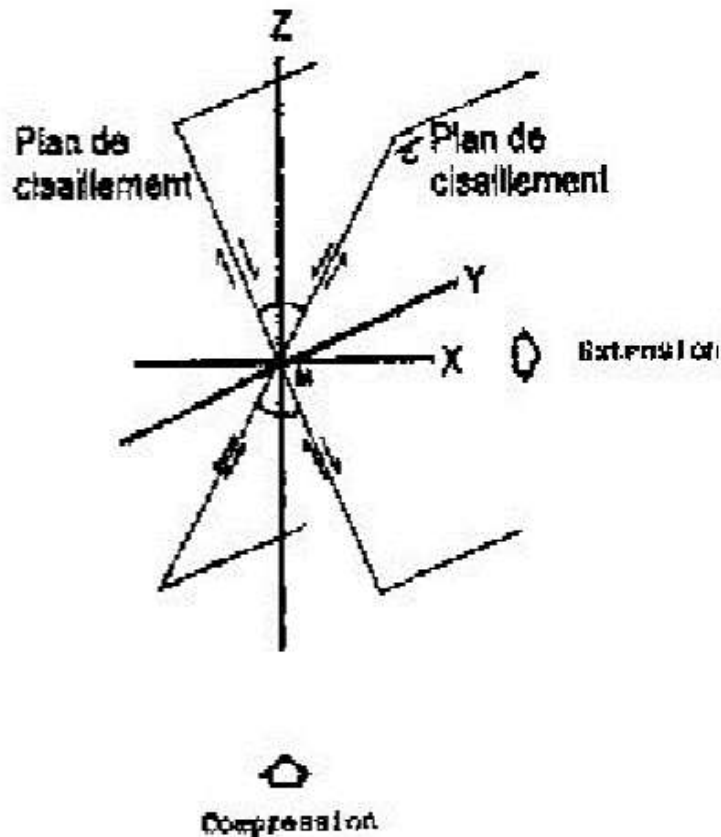


observés dans le bloc d'orthogneiss

Cas des fentes de tension en échelon* :



*Fentes d'extensions
disposées en échelon.*



Si les fentes de tension forment une croix (on parle d'échelon, dessiné à gauche), c'est que le mécanisme de leur formation n'est pas un aplatissement mais un **cisaillement** (ellipsoïde à droite).

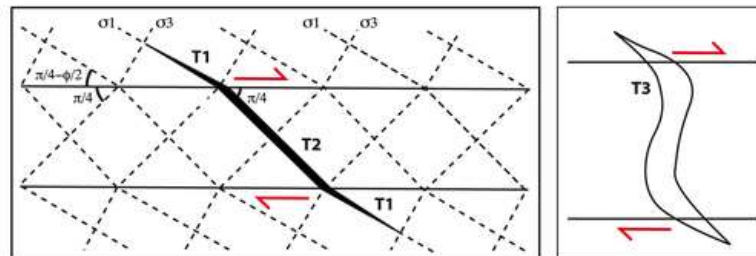


Où est le « plan » de cisaillement?

Où est le
« plan » de
cisaillement?

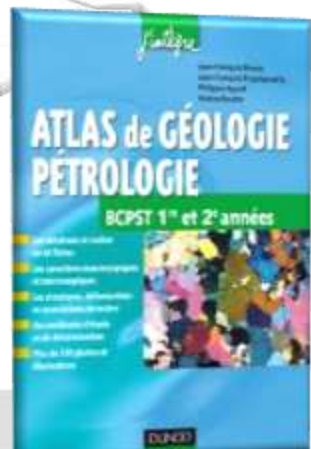
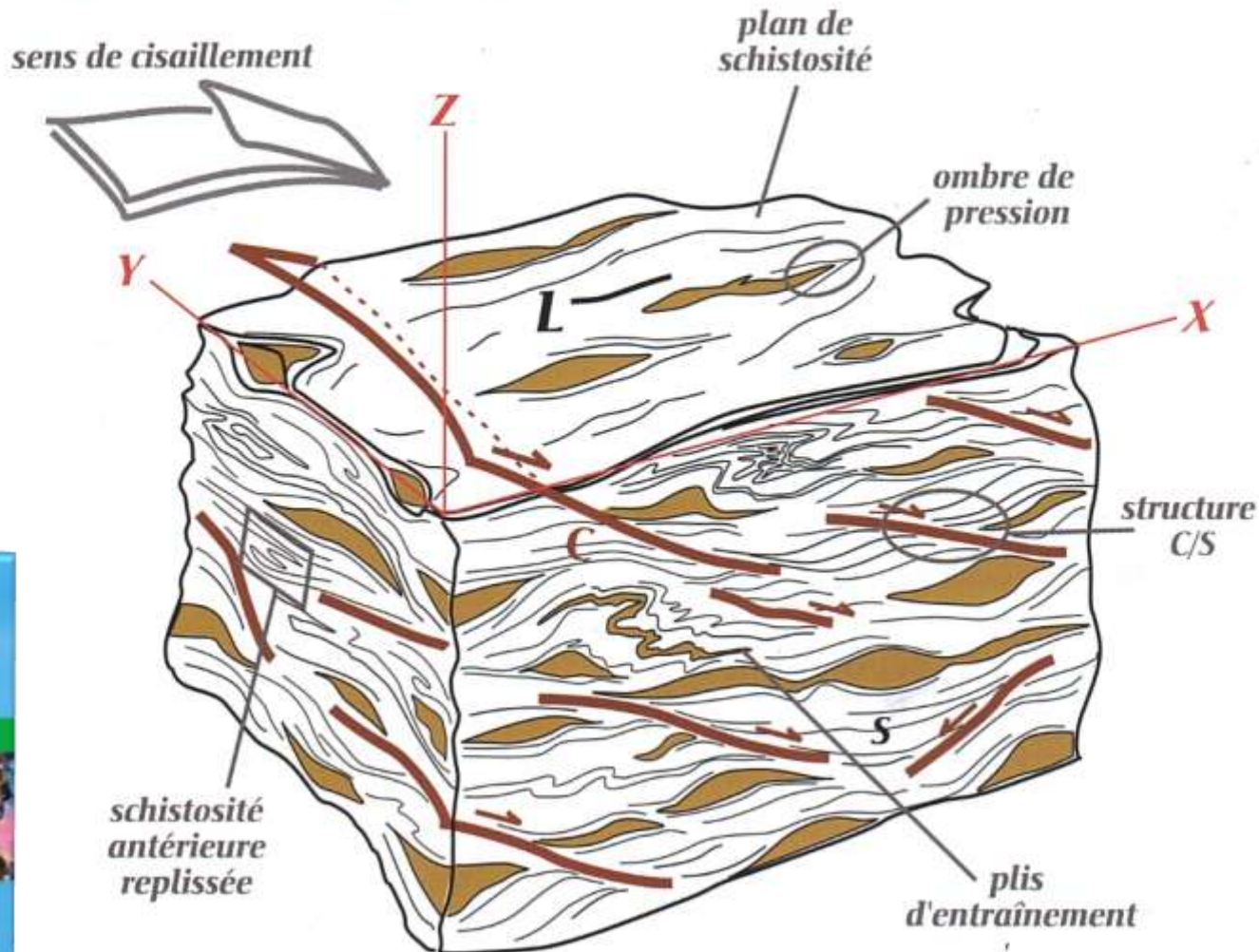


Fractures de Riedel



12.3. On peut identifier un cisaillement simple à l'échelle de la roche par des structures C/S

1 Bloc-diagramme illustrant les principales déformations ductiles associées au cisaillement



Annotez cette photo de calcaire oolithique, afin de montrer les déformations subies. Reconstituez, si c'est possible, les contraintes.

2 Déformations enregistrées par un calcaire oolithique (2a) et leur interprétation (2b)



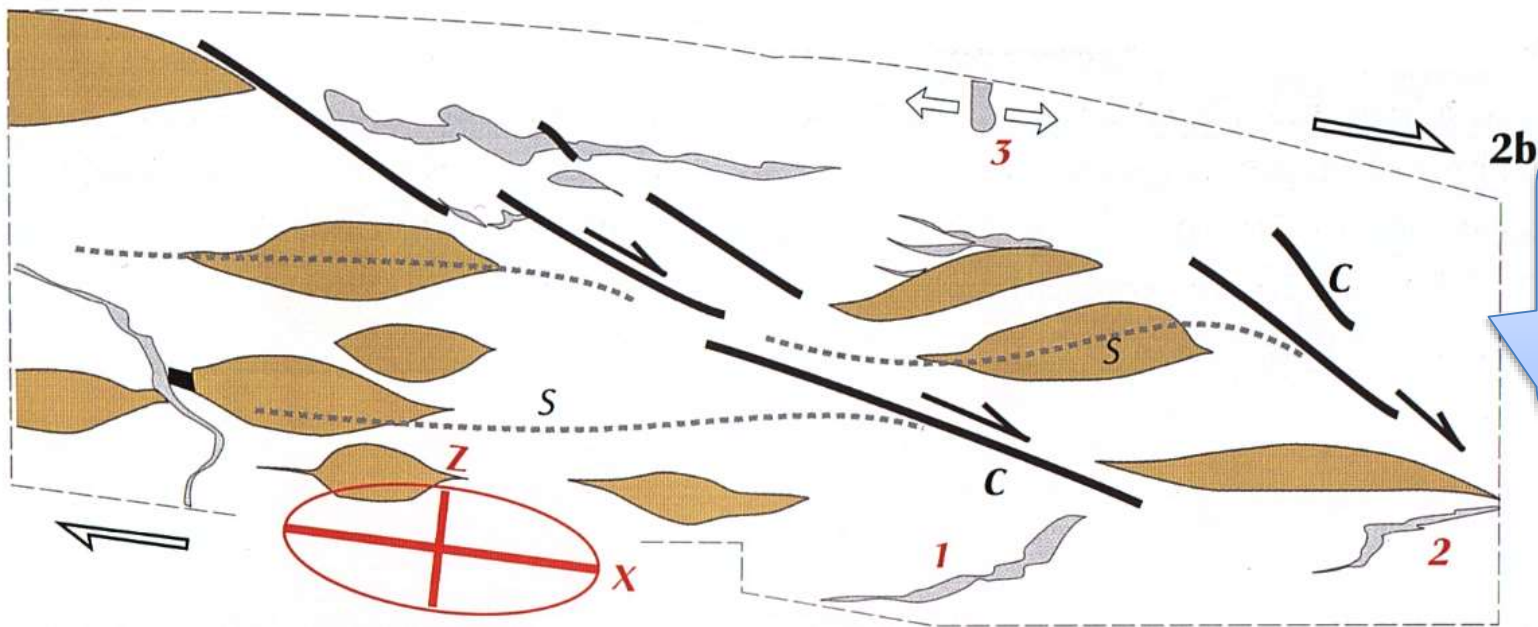
Atlas de pétrologie Dunod

**Exercice
concours**

2 Déformations enregistrées par un calcaire oolithique (2a) et leur interprétation (2b)



Atlas de pétrologie Dunod



Notez qu'il n'y a pas d'indication de contrainte

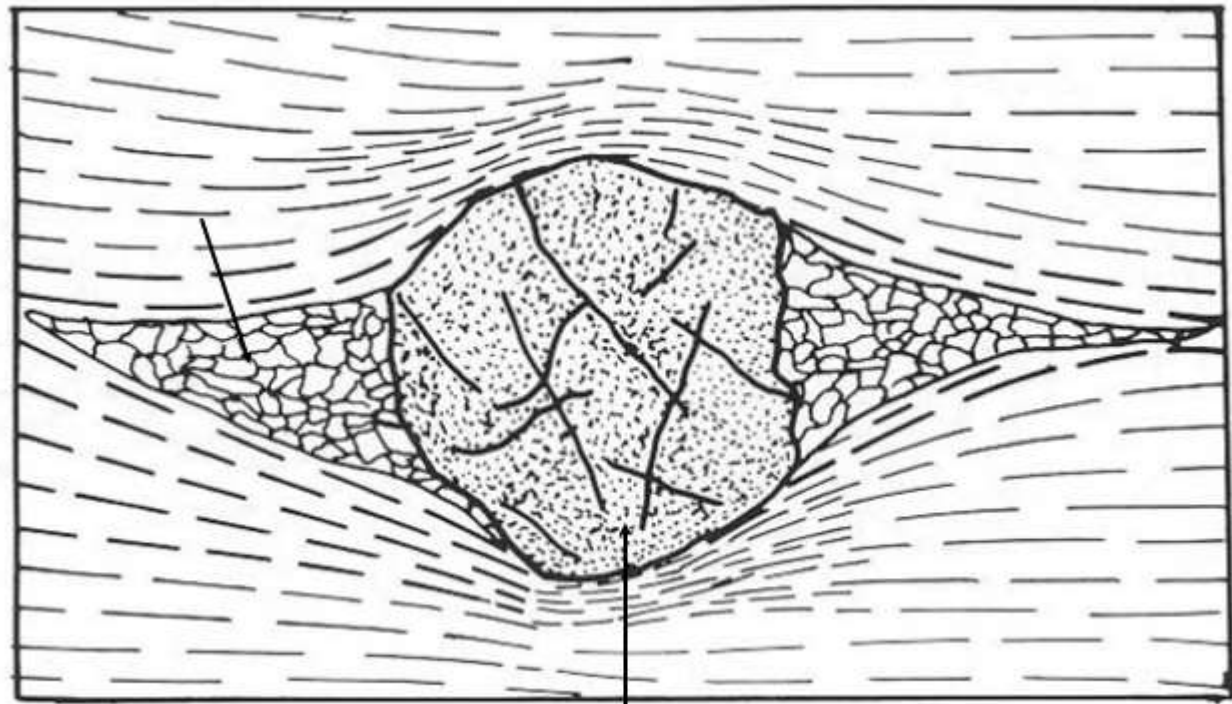
12.4. On peut identifier un cisaillement simple à l'échelle de la lame par des ombres de pression asymétriques

Une ombre de pression se forme quand un minéral antétectonique est résistant à la déformation (peu/pas de dissolution recristallisation).

Annotez ce schéma et reconstituez, le cas échéant, les contraintes



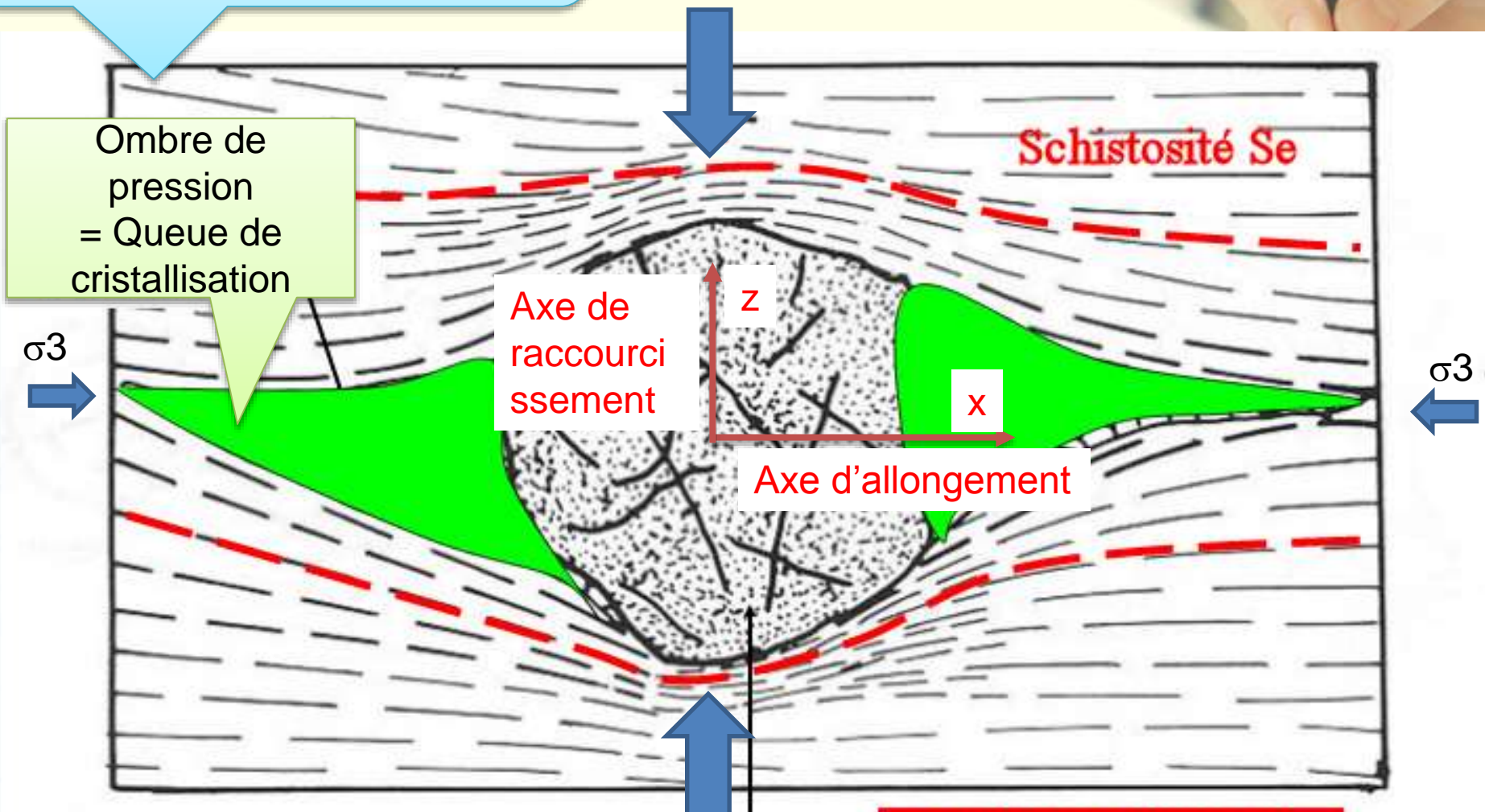
**Exercice
concours**



ŒIL DE GRENAT, DE FELDSPATH

Aucune rotation ici, c'est un cisaillement pur. On peut donc reconstituer les contraintes.

Solution



Ombre de pression = Queue de cristallisation

Axe de raccourcissement

x

Axe d'allongement

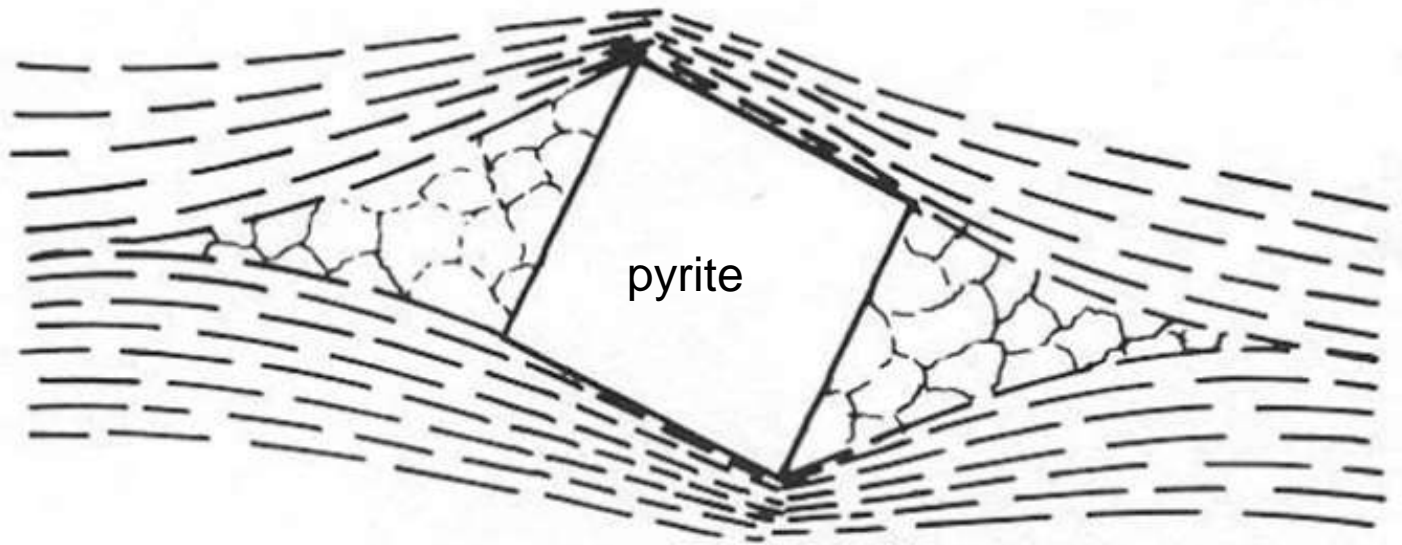
ŒIL DE GRENAT, DE FELDSPATH

ANTESCHISTEUX

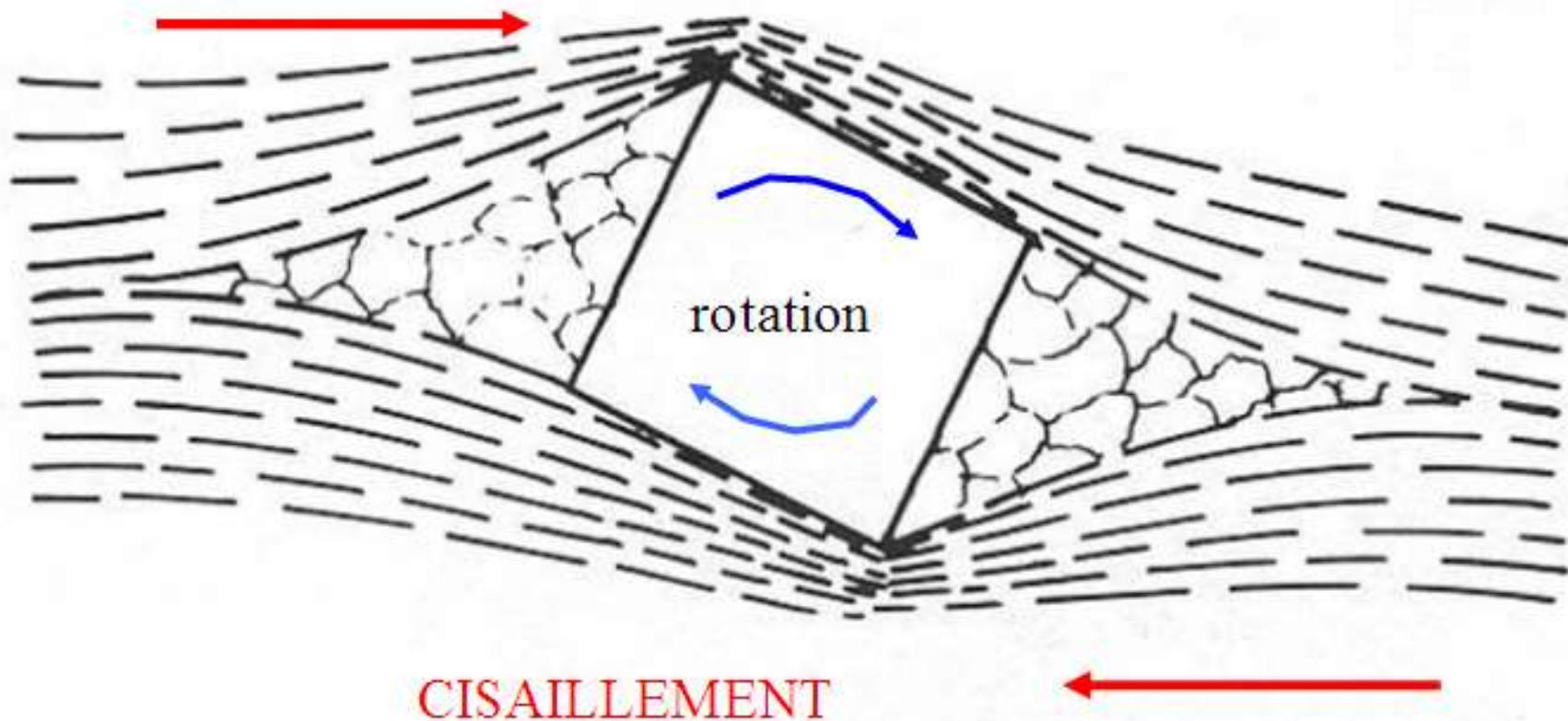
ŒIL +/- SYMETRIQUE => +/- APLATISSEMENT

Annotez ce schéma et reconstituez,
le cas échéant, les contraintes

Exercice concours



Solution



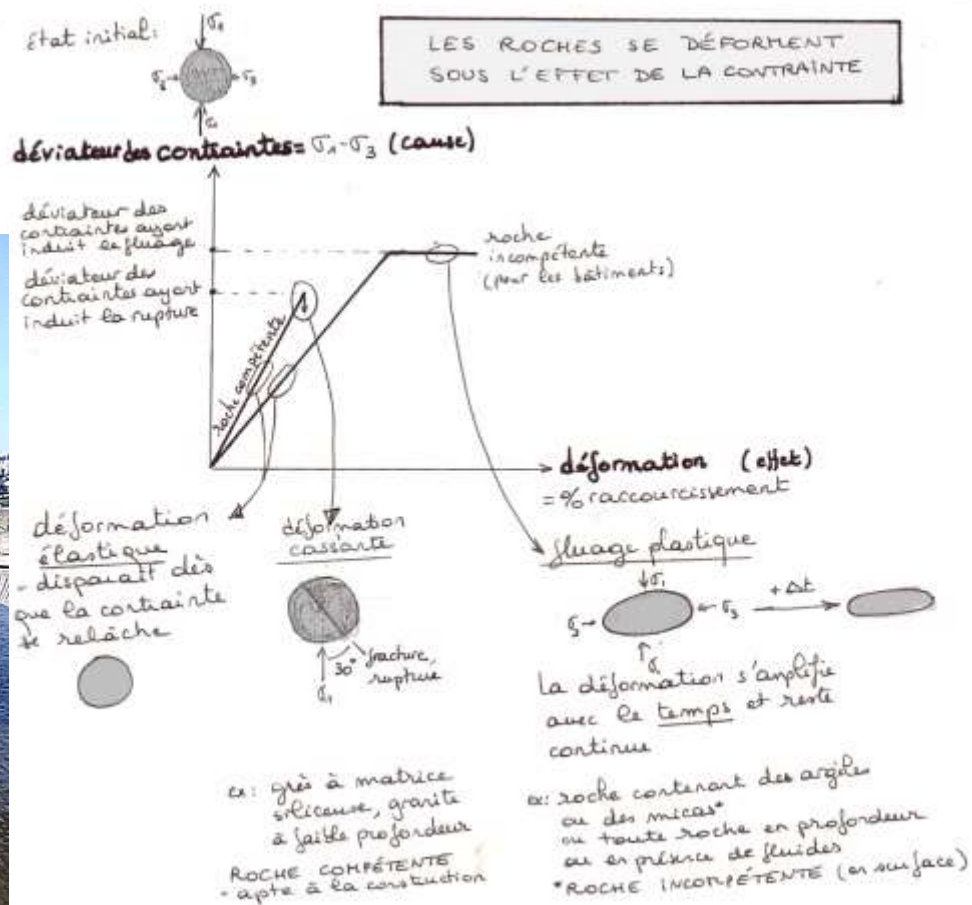
ŒIL DISSYMETRIQUE \Rightarrow APLATISSEMENT ROTATIONNEL

MODELE : La fourchette en rotation
dans l'assiette de spaghetti !!!

1.3. Les propriétés mécaniques des roches dépendent de leur compétence, de P et T, et de la vitesse de déformation

13.1. Une roche compétente ne fait pas de déformation plastique, à moins d'être imprégnée de fluides ou d'être portée à grande profondeur

Une roche qui dans un édifice ne se déforme que de façon élastique est dite compétente... pour la construction!



Les roches compétentes ne contiennent pas de minéraux en feuillet, et ont des grains jointifs

Les roches compétentes sont souvent:

- des roches magmatiques car les grains sont jointifs
- des roches sédimentaires sans matrice argileuse (calcaire ou siliceuse), ni micas
- des roches métamorphiques qui proviennent des 2 types de roches précédent et qu'elles ne contiennent pas de minéraux en feuillets

Citez des roches compétentes de la région

$$P = \sigma = F/S$$



Culture générale



Bécon les granits



Collectif E. B. 26 - BÉCON (M.-el-L.) - Carrières de Granit, Tailleurs de pierre

Culture générale



Ressources

Ardoises et calcaires



Tuffeau, hôtel Pincé, Angers



Tuffeau, Chenonceau





Imaginez comment un gneiss métamorphisé peut former des plis

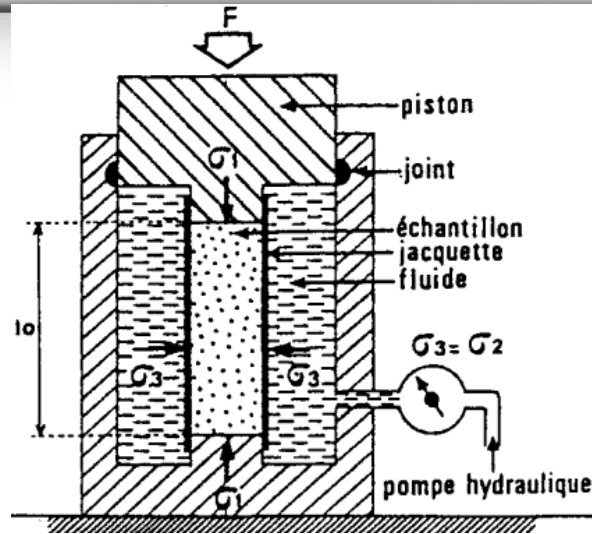
Vendée, sud des sables d'Olonne, Anse de Chaillé, Puits de l'enfer (Hendrik Vreken)



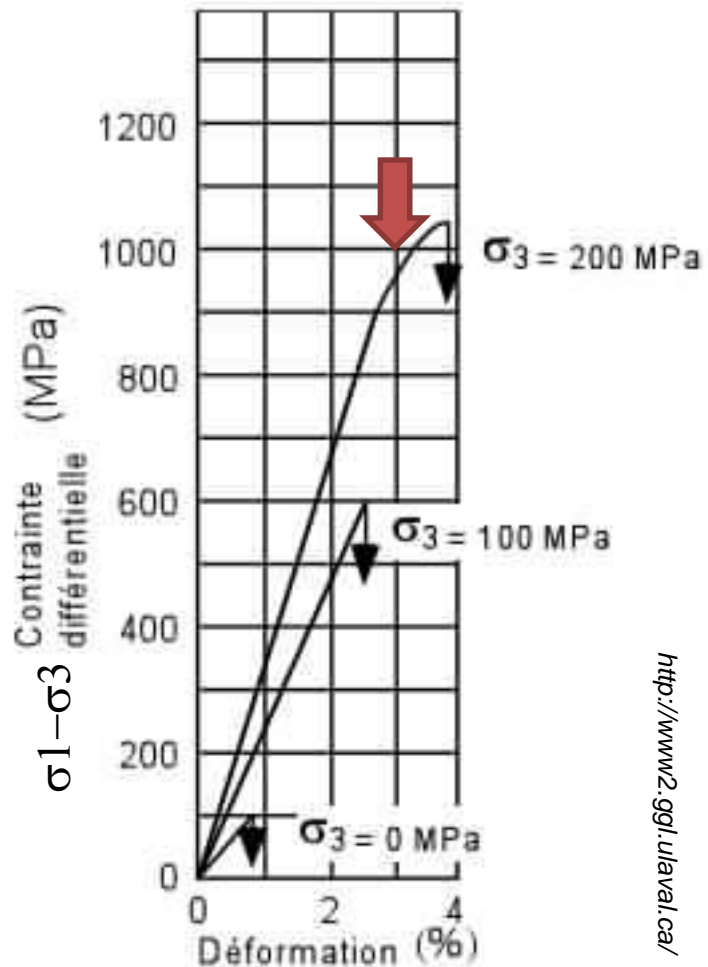
Autre exemple de plis dissymétriques d'entraînement observés dans le bloc d'orthogneiss

13.2. À grande profondeur, toute roche finit par fluer

Cette roche est-elle compétente* ou incompétente?
Que se passe-t-il dans la zone fléchée?



Grès bien cimenté et trié



*si oui, connaissez-vous un édifice en France construit en grès?



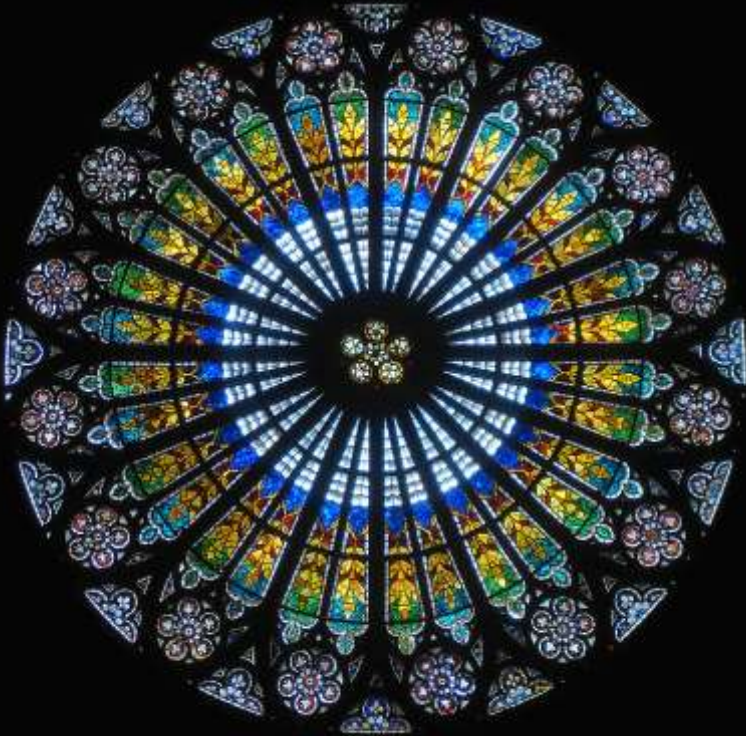
Photographie EC pour monumens.com

Culture générale



La cathédrale de Strasbourg!

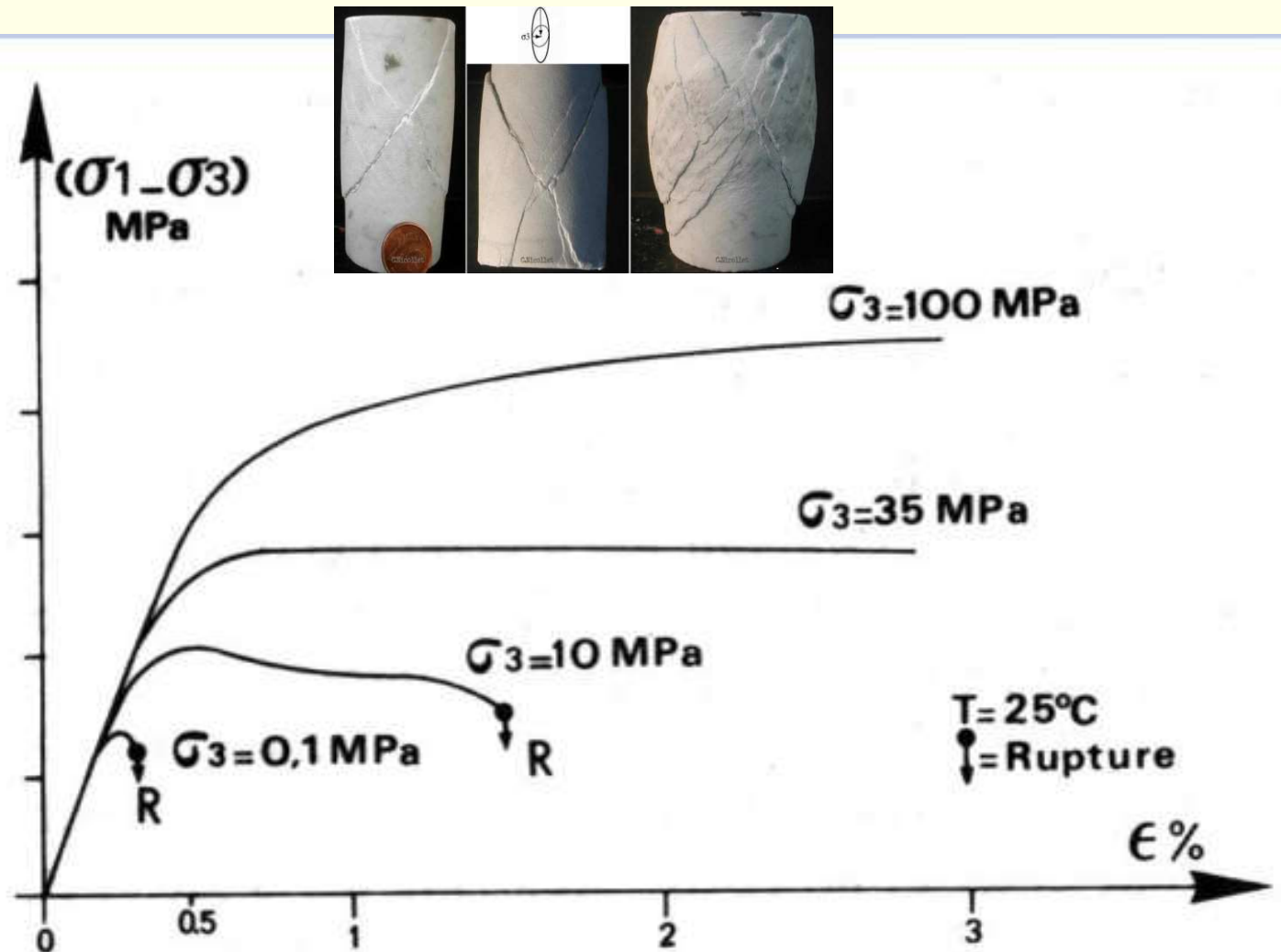
142 m! « Prodige du
gigantesque et du délicat »
selon Victor Hugo
Grès rouge des Vosges



Interprétez l'effet d'une augmentation de pression sur le comportement mécanique de ce calcaire à grain fin.

Exercice concours

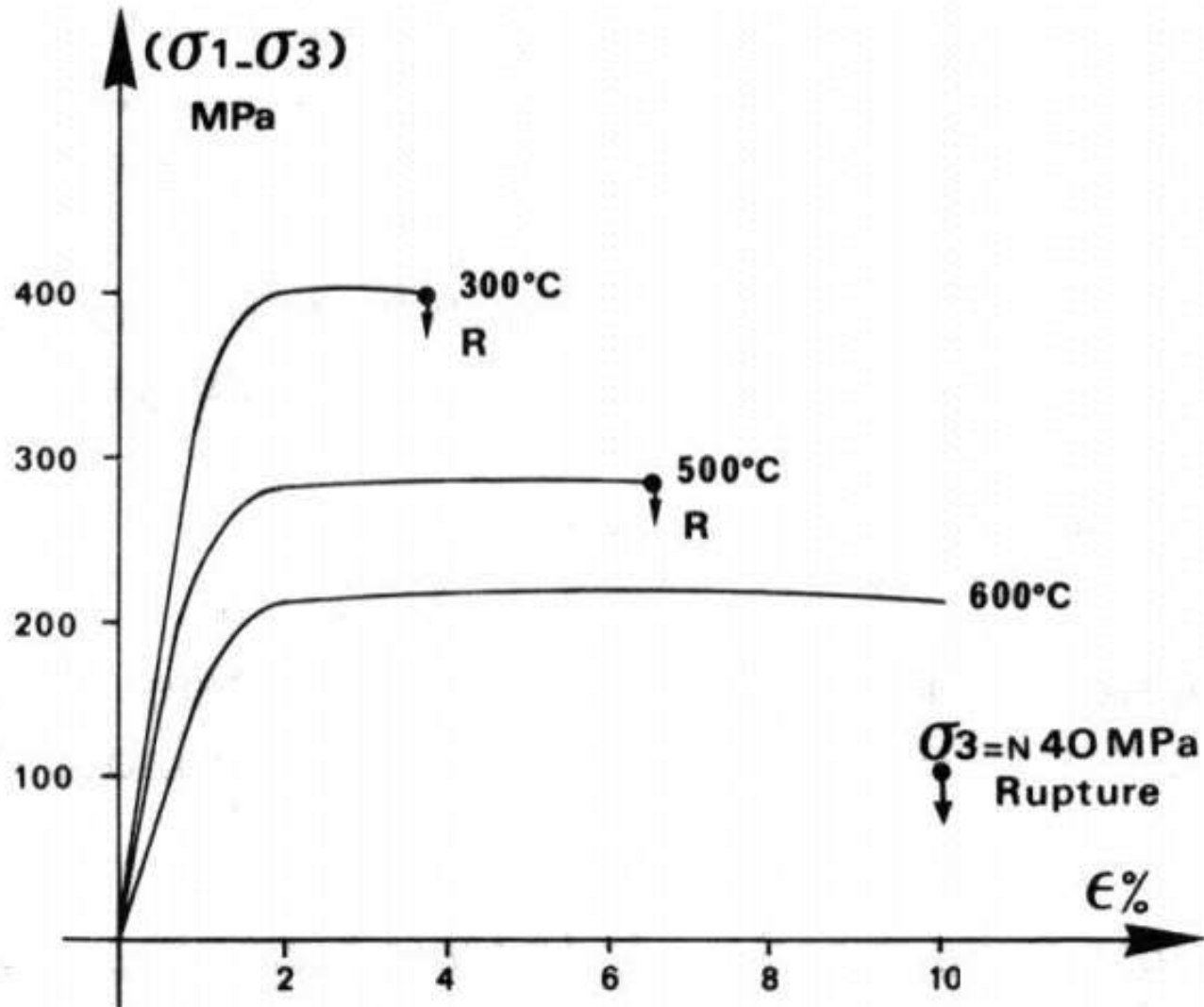
1/2



Interprétez l'effet d'une augmentation de température sur le comportement mécanique de ce calcaire à grain fin.
Qu'est-ce que ces deux études en labo apportent à la tectonique?

Exercice concours

2/2



Solution

Avec la profondeur, les roches acquièrent un comportement ductile

Roche sédimentaire :

- Comportement élastique et cassant jusqu'à 4 km de profondeur avec $T \approx 150^\circ\text{C}$ et $P \approx 100\text{ MPa}$
- Comportement ductile si gradient géothermique normal à 9 km et $T \approx 300^\circ\text{C}$

Pour une roche constituée essentiellement de Q et F (gneiss, granitoïde), la transition du domaine élastique vers le domaine plastique dépend essentiellement de la température : Pour le Quartz, la transition se fait vers 350°C , alors que pour les Feldspaths c'est vers 500°C

Gneiss

globalement cassant

350°C

zone de transition

500°C

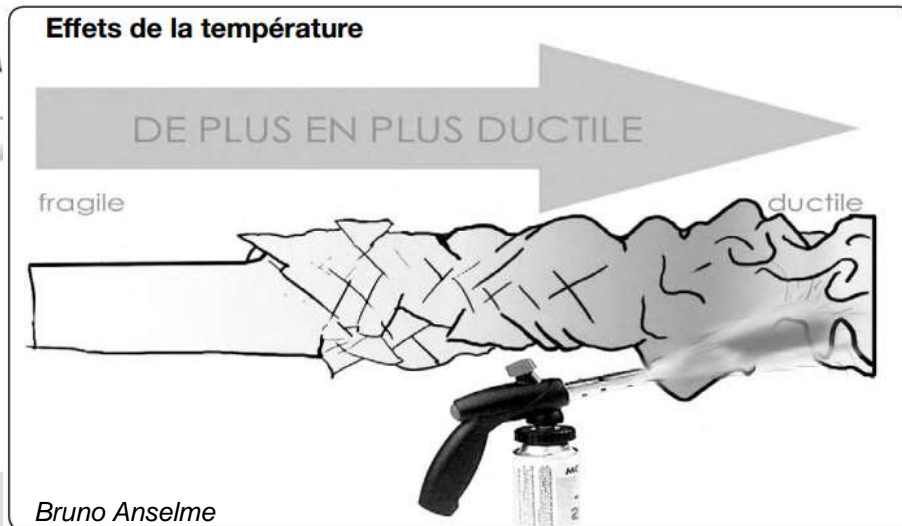
globalement ductile



À retenir!

Même la roche la plus compétente, si elle est portée en profondeur, commence par acquérir un domaine plastique, puis devient capable de fluer.

La profondeur à laquelle il y a un changement de comportement mécanique dépend du gradient géothermique et de la présence de fluides (H₂O et CO₂)



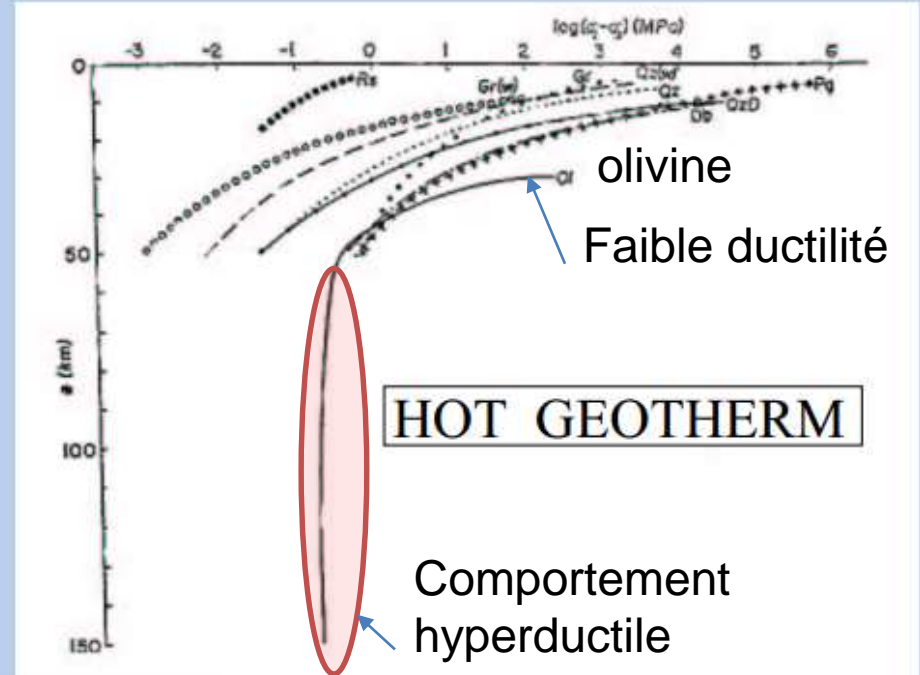
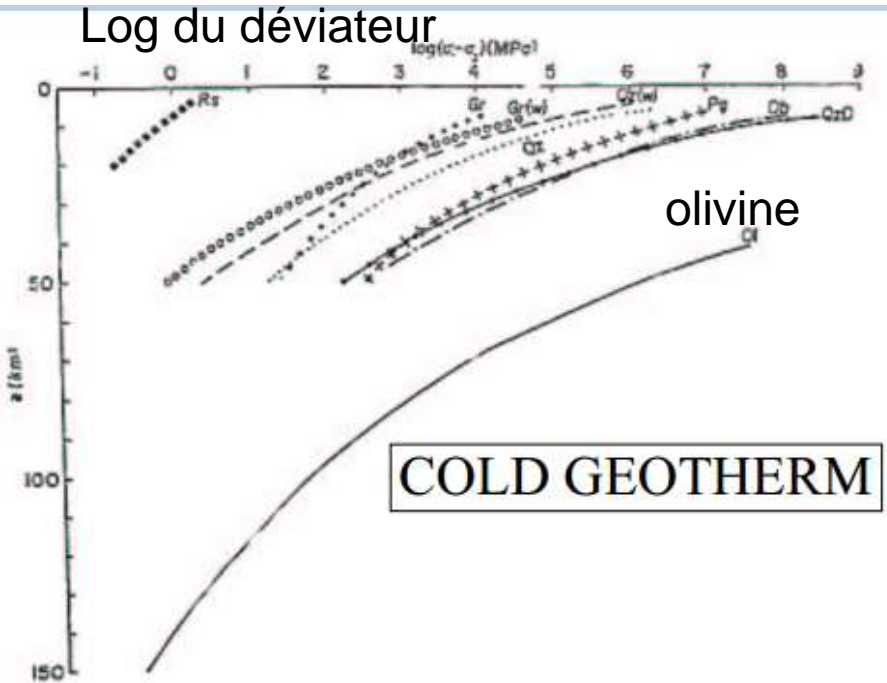
Pli dans les gneiss/migmatites, Sables d'Olonne

Fluage en fonction du géotherme



Expliquez l'effet de la température sur le comportement mécanique des roches en profondeur

Log du déviateur



profondeur

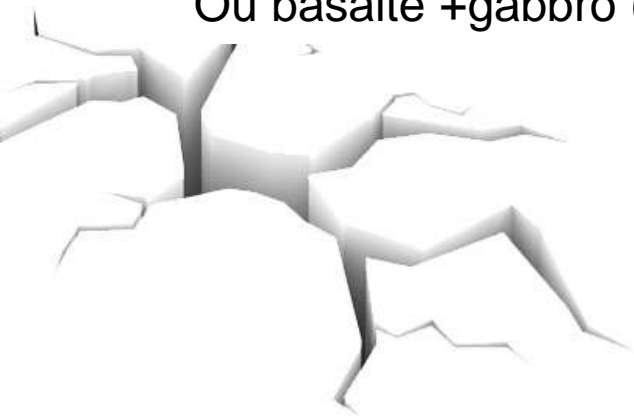


géotherme normal =
30 °C/km

Effets des conditions thermodynamiques sur les déformations de la croute

Couverture sédimentaire

Socle :
Granite + gneiss
Ou basalte + gabbro (8km)



Les niveaux structuraux

Niveau Structural Supérieur (cassant)

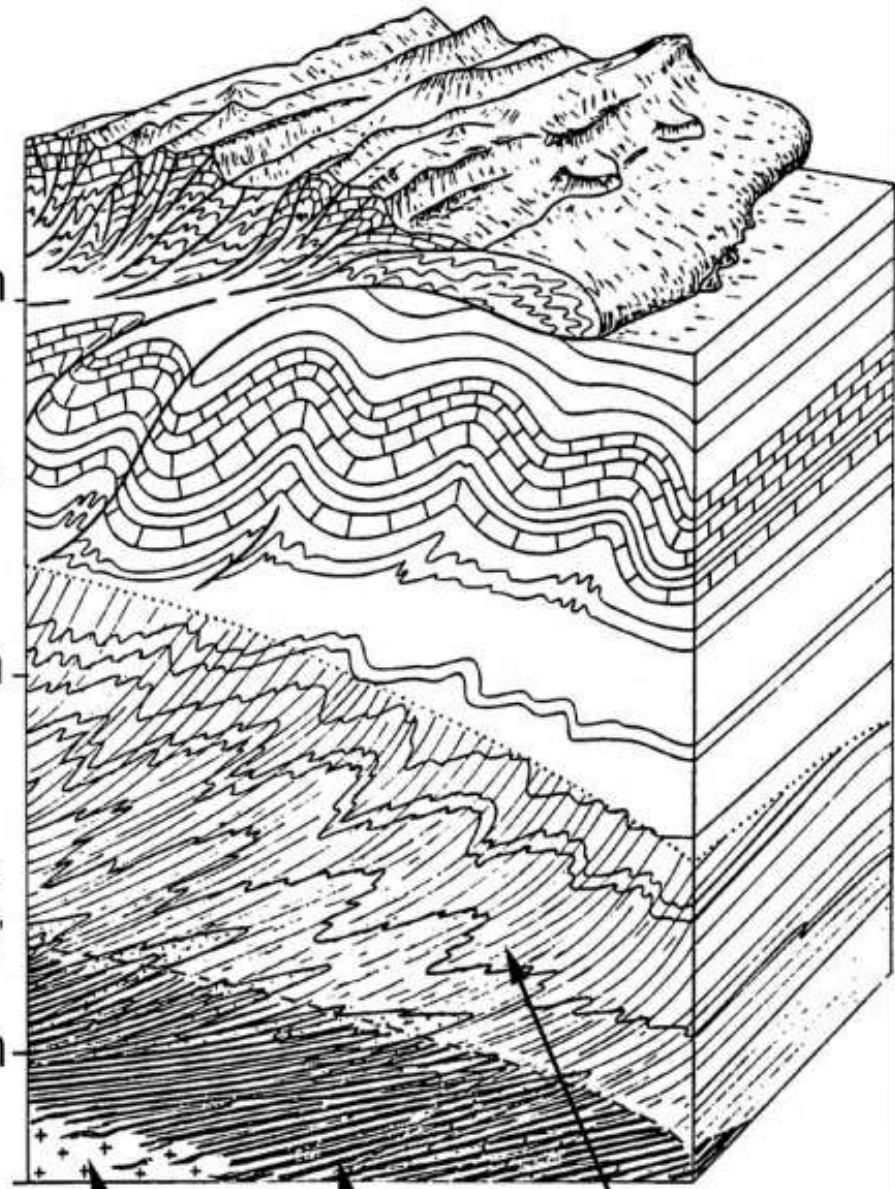
0 km

Niveau Structural Moyen (plissement isopaque)

5 km

Niveau Structural Inférieur (Plissement anisopaque, schistosité)

10 km



13.3. Les fluides facilitent la fracture en surface et le fluage en profondeur

En surface

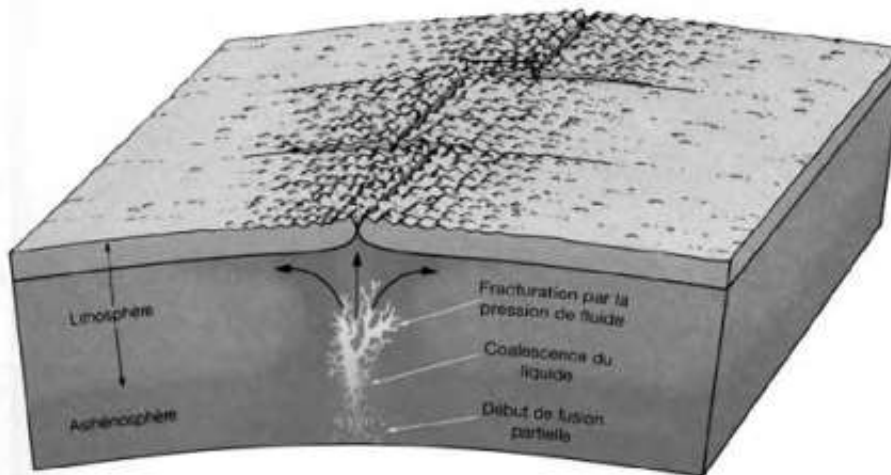
Complexe
filonien
dans les
gabbros

BCPST1

Effets d'une pression de fluide circulant.

Lorsqu'un fluide sous pression remplit les pores de la roche, sa pression (isotrope !) s'oppose (à l'interface avec le solide) aux contraintes ou pressions de la roche, dans toutes les directions.

Les contraintes effectives se trouvent donc toutes diminuées de la même valeur : la valeur de cette pression de fluide. Il en résulte que le déviateur est inchangé, tandis que la pression de confinement se trouve diminuée. L'ellipsoïde se rapproche donc des conditions de la rupture.



C'est ce qui se produit, par exemple, sous les dorsales, où le magma sous pression peut fracturer le sommet de la lithosphère et se frayer ainsi un chemin jusqu'à la surface



Expliquez pourquoi ce gabbro métamorphisé est aussi hétérogène. Diriez-vous que cette roche est compétente ou incompétente?

Exercice concours

Ophiolite primaire de Chamrousse (Alpes)



Métamorphisme



Les fluides circulent de façon hétérogène dans les roches, et induisent une déformation ductile dans les chenaux où ils passent

Effet des fluides (CO₂ H₂O)

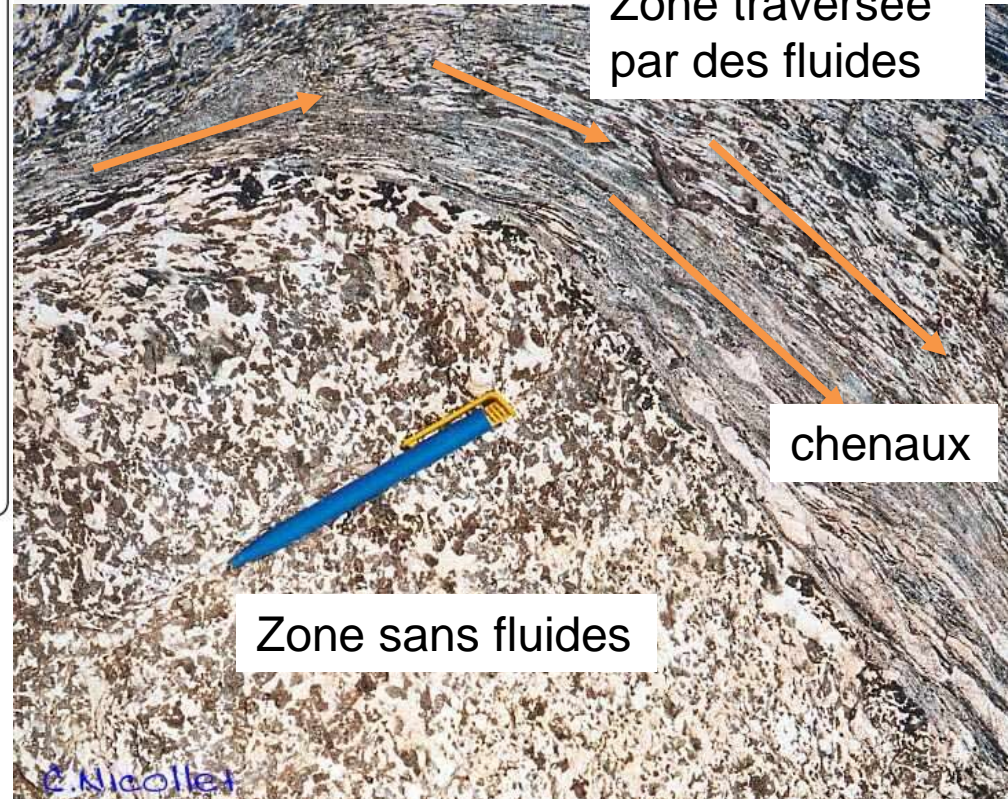
DE PLUS EN PLUS DUCTILE

fragile

ductile



Bruno Anselme

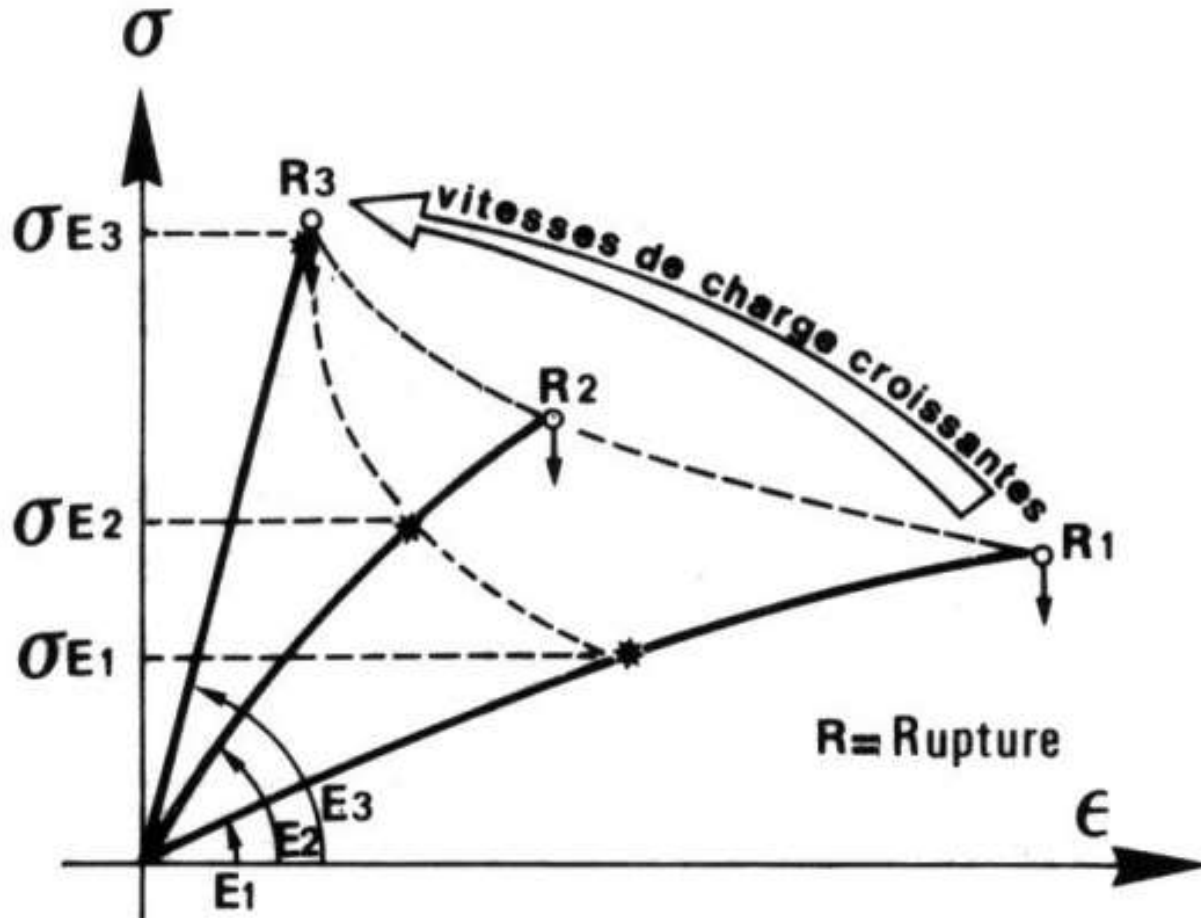


Bien sûr toute la roche est dans les mêmes conditions thermodynamiques!



13.4. Une déformation rapide tend à être cassante, une déformation lente tend à être ductile

Figure à 90° par rapport à d'habitude!



Le comportement mécanique des roches dépend de leur compétence, mais aussi du contexte tectonique

Facteurs déterminant le comportement mécanique

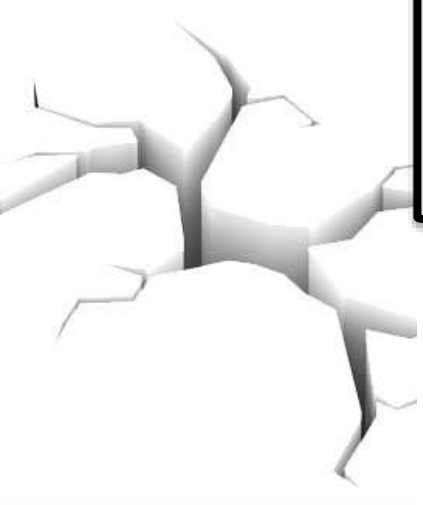
roche à gros grains
sans matrice argileuse
↓
roche compétente

roche à minéraux en feuillets
(argiles, micas, etc.)
↓
glissement des minéraux
les uns sur les autres → roche incompétente
forte température
forte pression

faible température
faible pression
déformation rapide

déformation lente par fluage
fluides (H_2O , CO_2)

↓
Comportement cassant



↓
Comportement ductile



Contexte tectonique



Une roche est qualifiée de "compétente" si


- a. elle est utilisable pour la construction, car dans les édifices, elle n'a qu'un comportement élastique
- b. lors d'une augmentation du tenseur des contraintes, elle ne présente que peu de déformations plastiques, puis casse
- c. lors d'une augmentation du tenseur des contraintes, elle ne casse jamais
- d. elle est incapable de fluer

2. la présence de fluides

- a. ramollit la roche en l'humidifiant
- b. facilite les déformations plastiques irréversibles
- c. fait fluer des roches dans des conditions de pression et température où elles devraient casser

3. Pour reconstituer les causes des déformations, il faut

- a. avant toute chose, vérifier qu'il y a des indices de rotation dans la roche
- b. trouver l'axe d'allongement et placer la pression maximum selon cet axe
- c. placer l'axe de raccourcissement maximum perpendiculairement à la pression maximum
- d. mettre un angle de 30° entre le plan de faille et la pression maximum (σ_1)



4. les indices de cisaillement sont

- a. des plis disymétriques
- b. des plans de schistosité espacés, avec une schistosité qui part du plan de schistosité inférieur pour rejoindre le plan supérieur
- c. des fentes de tensions en échelon
- d. des zones de roche broyées
- e. des queues de cristallisation qui ne sont pas alignées

5. Pour reconstituer sigma 1, on peut utiliser

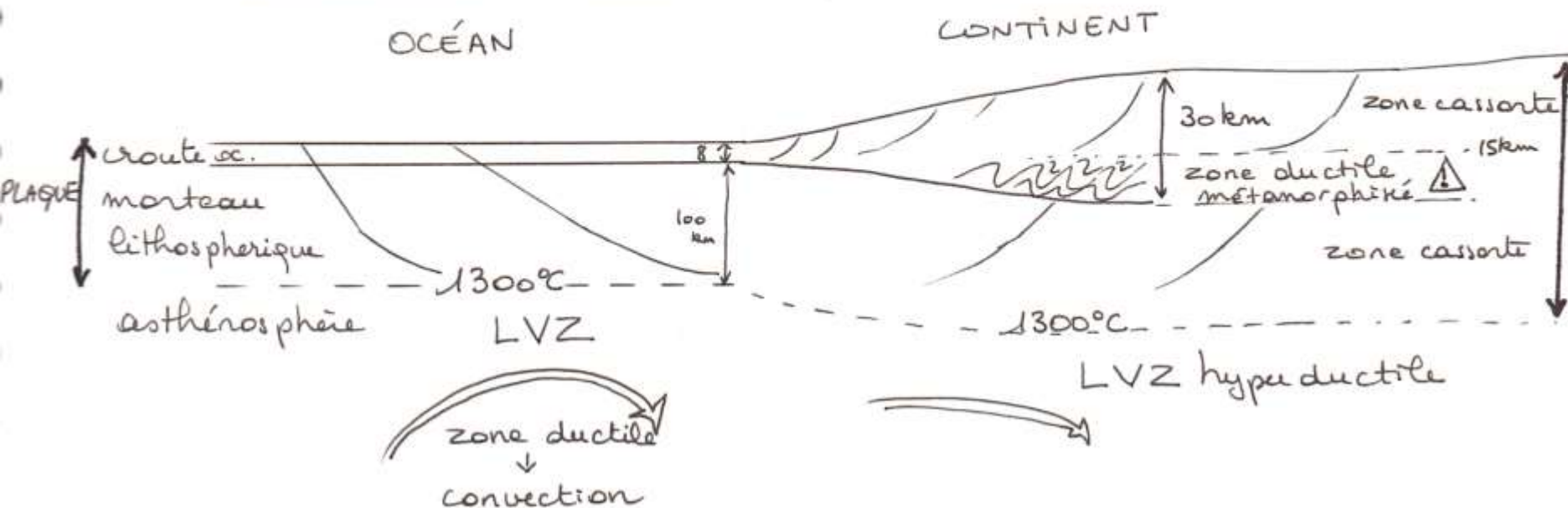
- a. le plan de faille, car sigma 1 fait un angle de 60° avec lui
- b. la fracturation d'un minéral ou d'un fossile car sigma 1 lui est perpendiculaire
- c. les fentes de tension, car sigma 1 est dans le même plan
- d. la schistosité, car sigma 1 est perpendiculaire à ce plan



1.4. Les propriétés thermo-mécaniques des roches permettent de définir la lithosphère



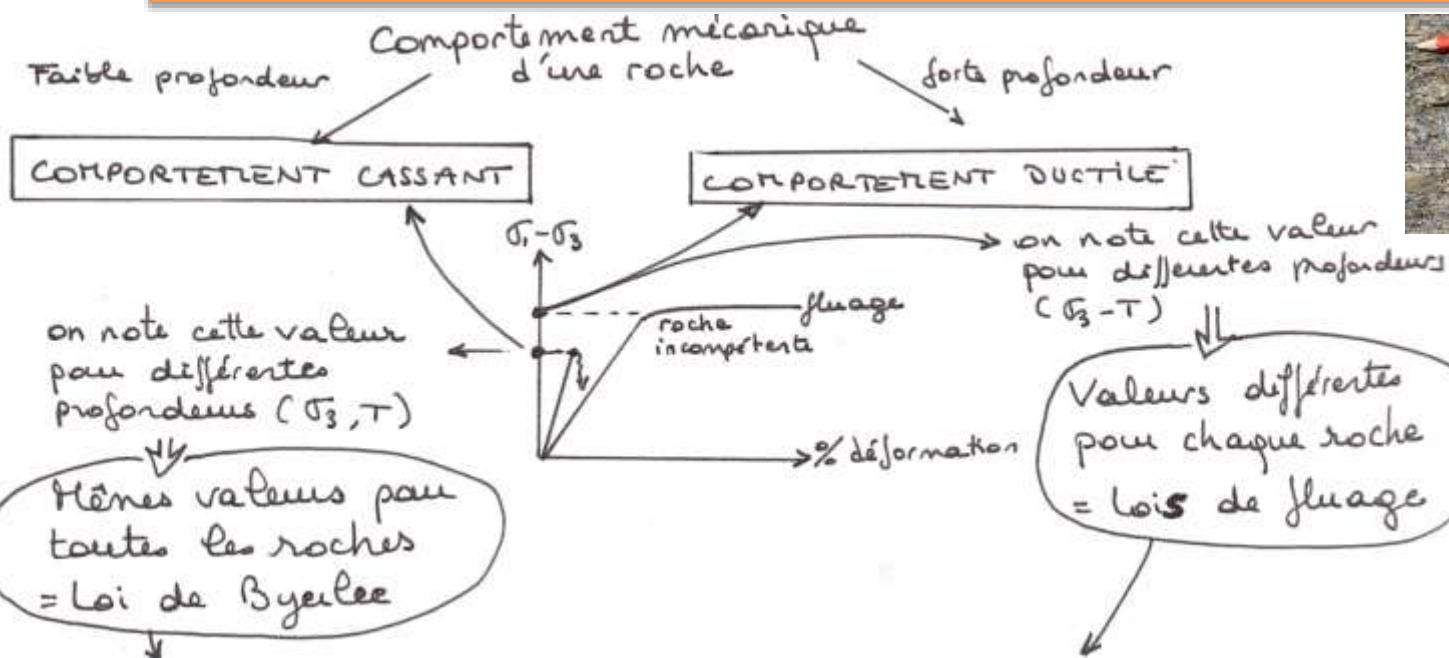
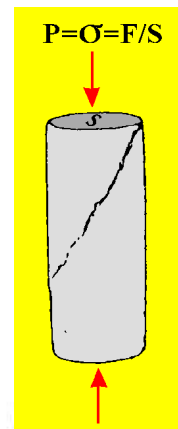
La lithosphère est un ensemble de roches à comportement cassant, posé sur une asthénosphère ductile



1.5. Le comportement mécanique de la lithosphère est déterminé par son enveloppe rhéologique

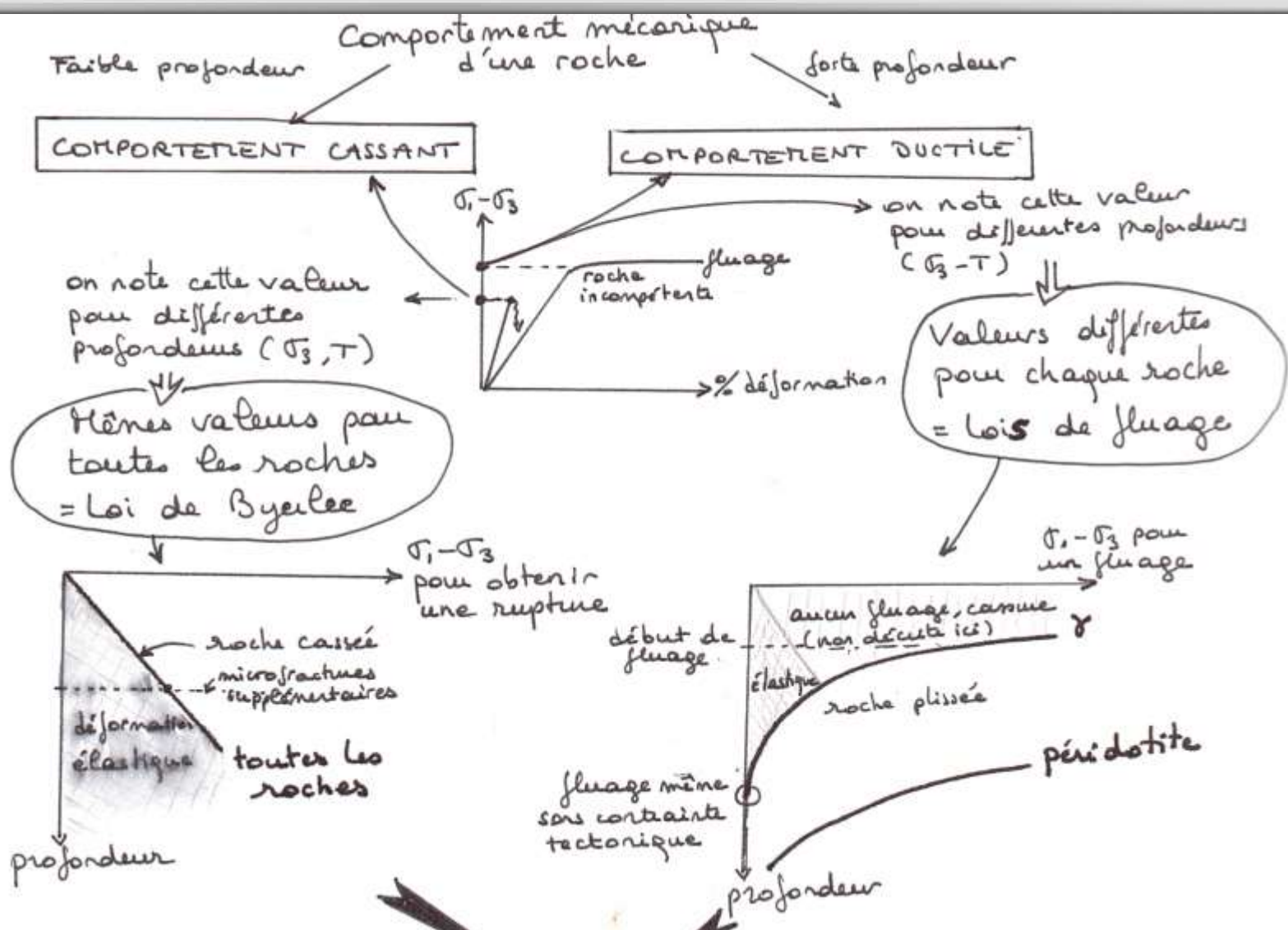
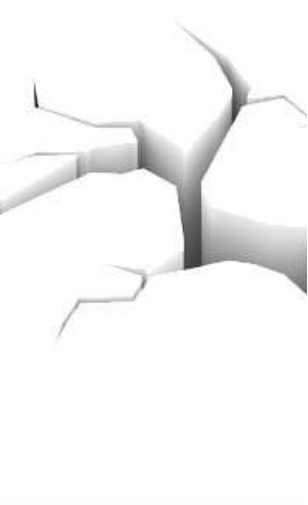
15.1. Deux lois physiques suffisent pour décrire le comportement cassant et ductile

En labo, on recherche les lois physiques qui décrivent la rupture des roches; et celles qui décrivent le fluage



Rappel : Toute roche portée en profondeur finit par fluer!
Même les roches compétentes ont un comportement qui doit être décrit par une loi de fluage

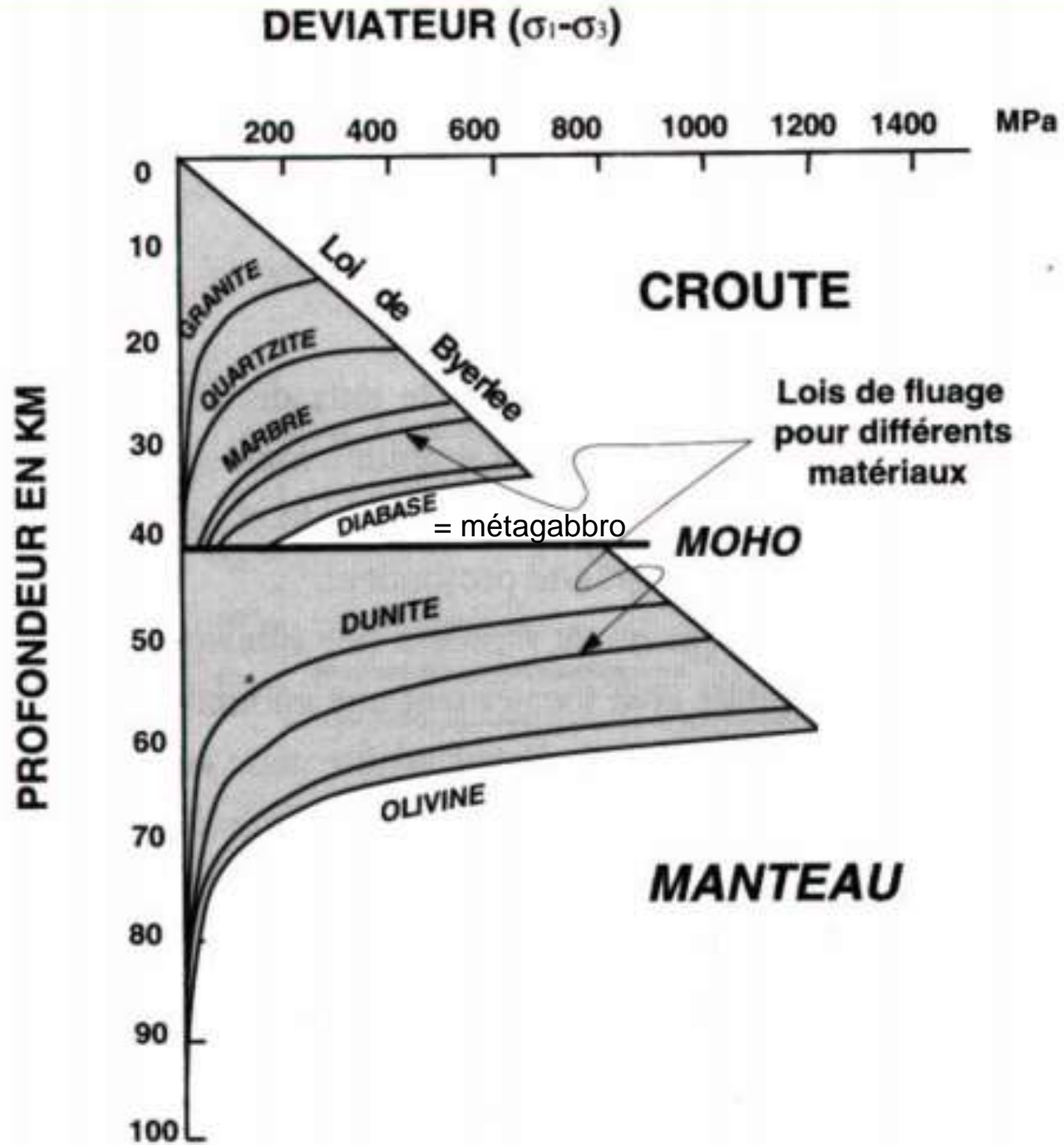
15.2. Toutes les roches ont le même comportement cassant, mais le comportement ductile de fluage est propre à chaque roche



Notez sur ce graphique que chaque matériau a sa propre loi de fluage.

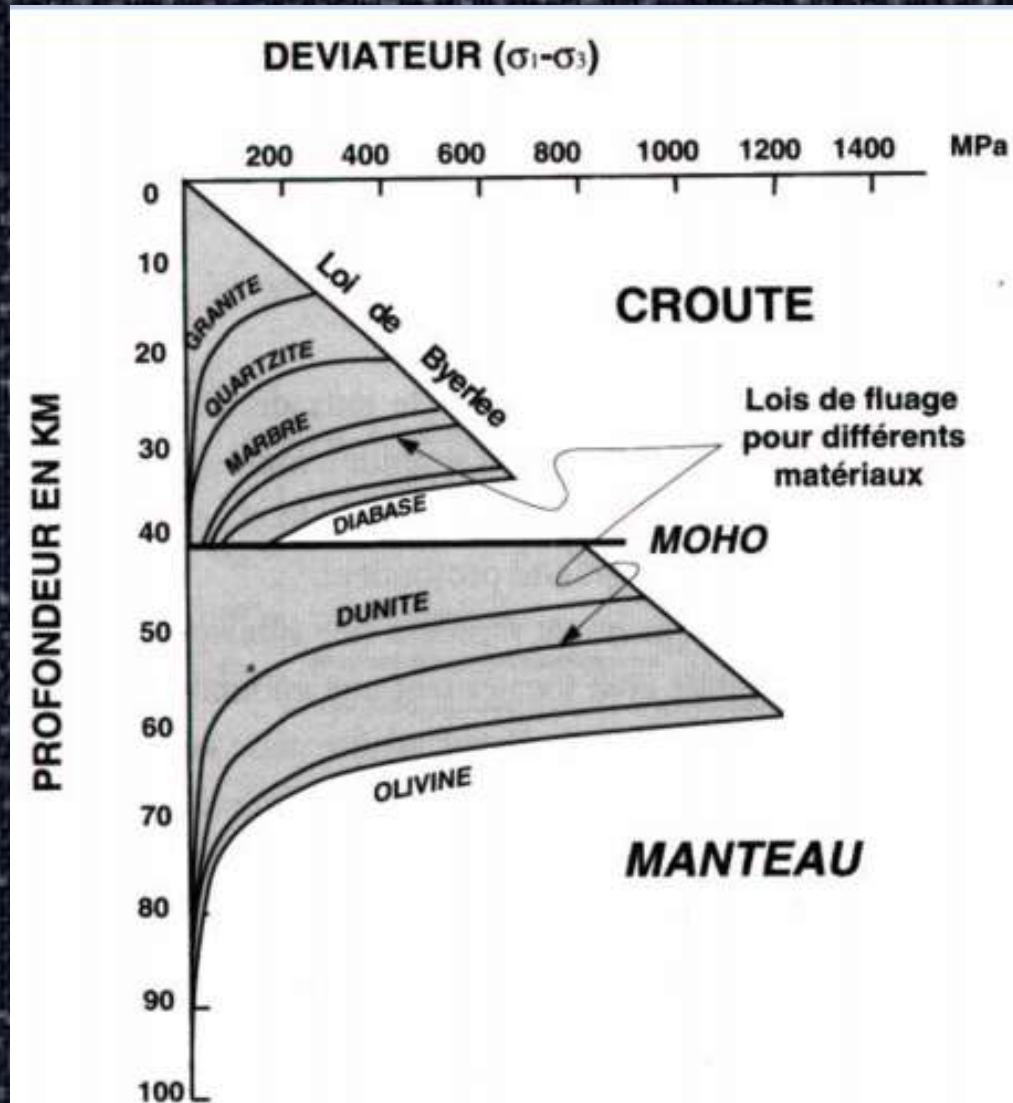
Dans 5 min, vous pourrez dire pourquoi ce graphe est faux!

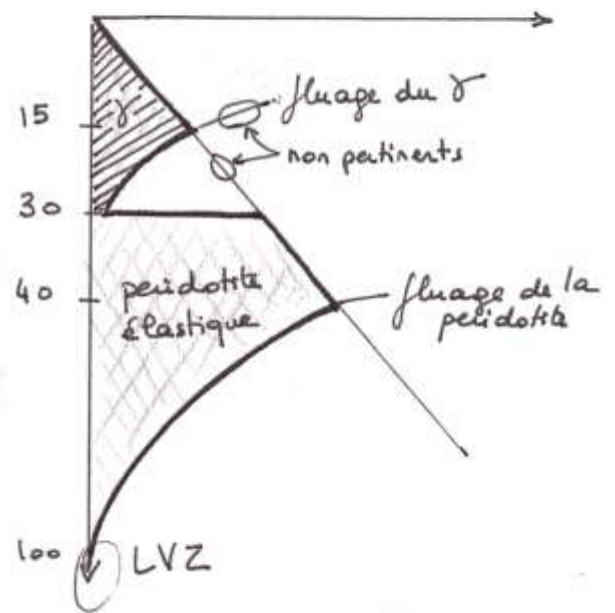
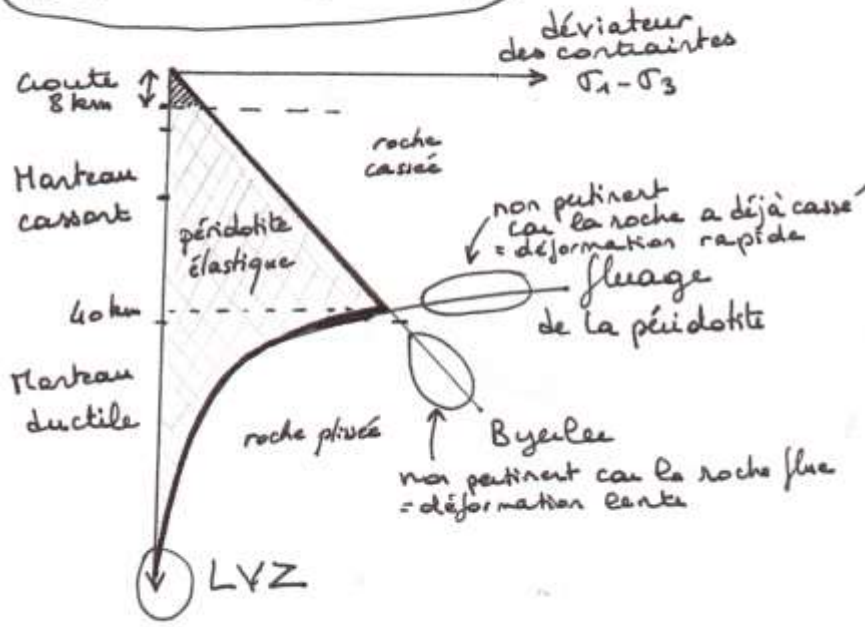
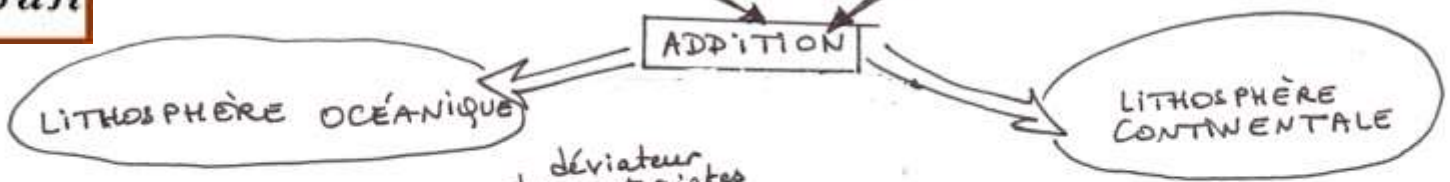
Recul critique



15.3. En superposant les deux lois pour des roches appropriées, on définit l'enveloppe rhéologique d'une lithosphère

Tracez le profil rhéologique de la lithosphère océanique Pacifique. Vous justifierez toutes les étapes. On considèrera que les basalte et les gabbros ont le même comportement mécanique qu'une « diabase »; et que la péridotite se comporte comme l'olivine.



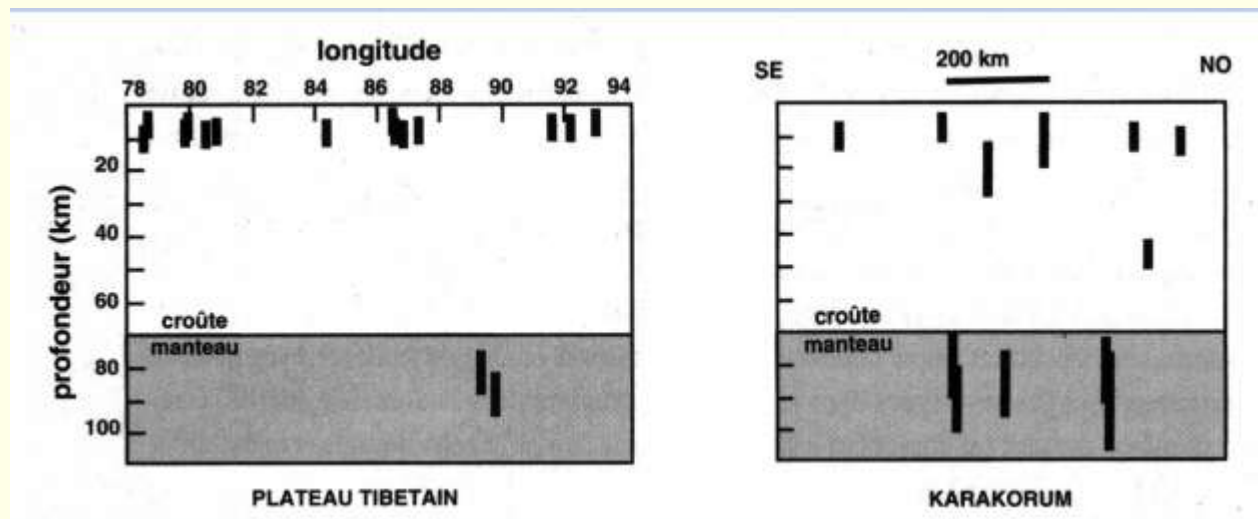
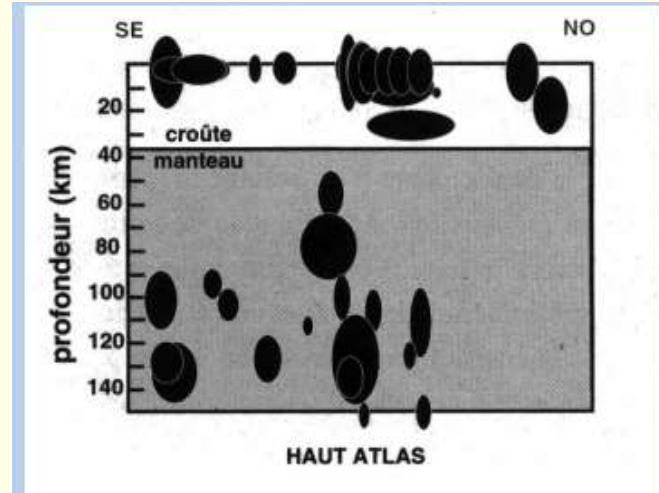


ENVELOPPES RHÉOLOGIQUES DES LITHOSPHERES

La localisation des hypocentres est en accord avec l'enveloppe rhéologique de la lithosphère continentale

Exercice concours

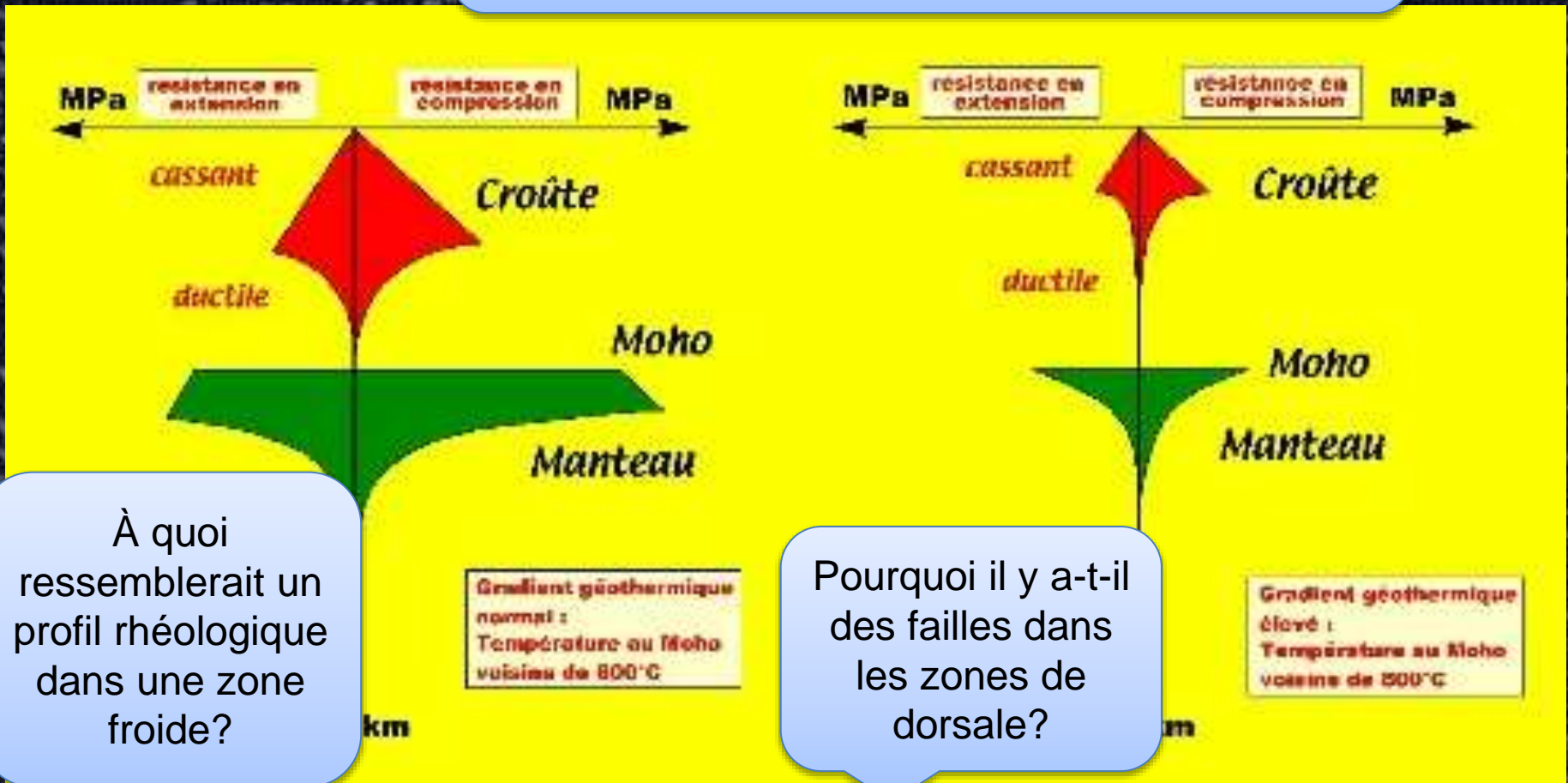
Expliquez la localisation des séismes dans ces lithosphères continentales de chaînes de montagne. Vous expliquerez à la fois leur distribution verticale et horizontale.



15.4. Le profil rhéologique de la lithosphère est modifié par le gradient géothermique local



Expliquez pourquoi le gradient géothermique modifie le profil rhéologique. Qu'est-ce que cela change du point de vue sismique et tectonique?

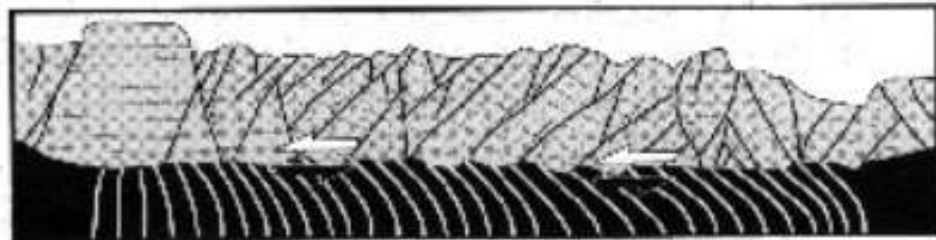
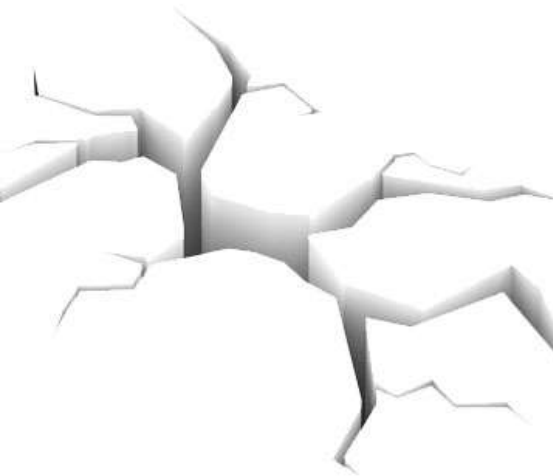
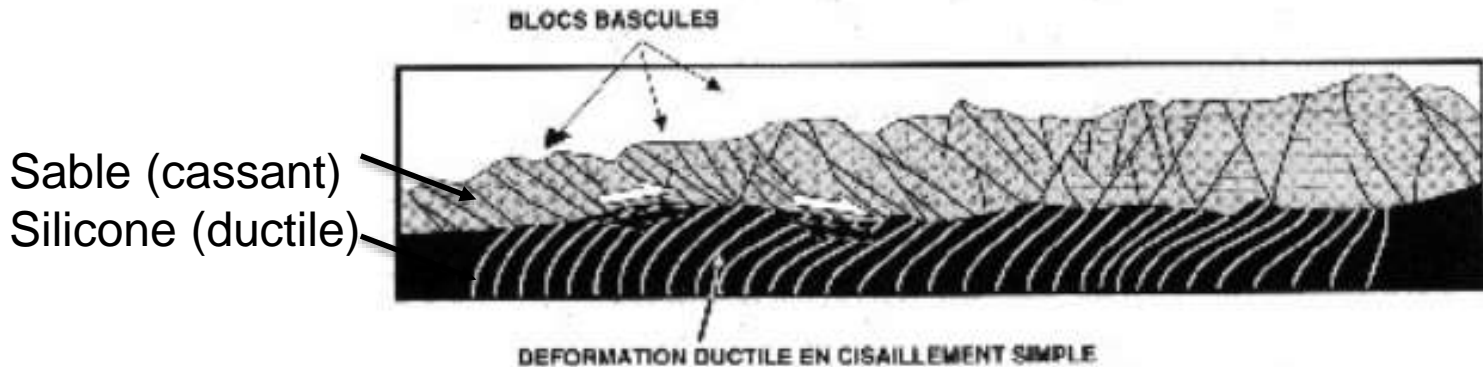


À quoi ressemblerait un profil rhéologique dans une zone froide?

Pourquoi il y a-t-il des failles dans les zones dorsales?

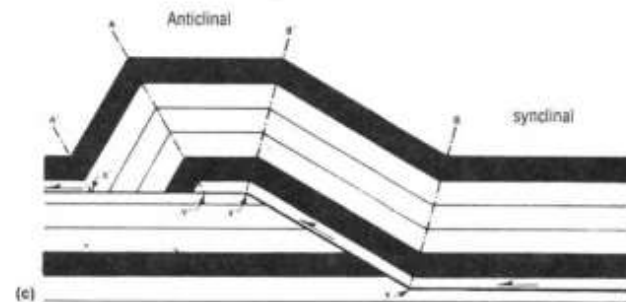
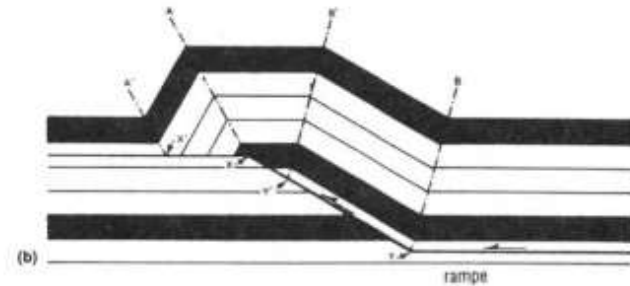
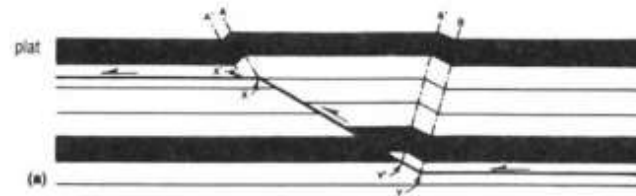
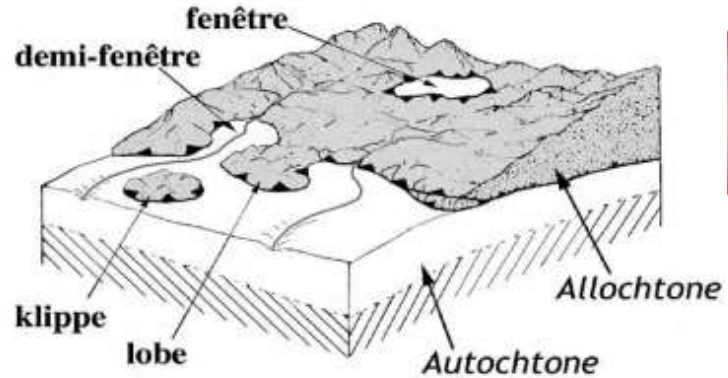
15.5. L'hétérogénéité verticale du comportement mécanique de la lithosphère continentale peut déterminer des niveaux de découplage.

1) Des modèles analogiques montrent des découplages



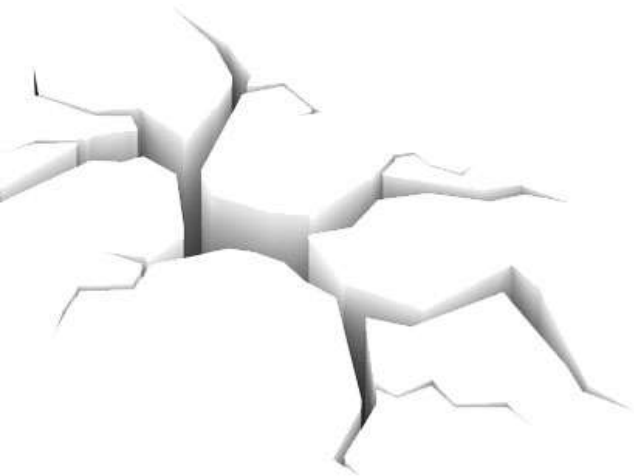
2) La tectonique de couverture est basée sur le décollement

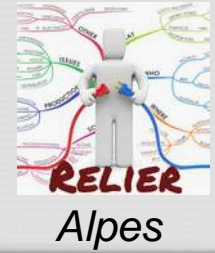
Chevauchements et charriages -1-



Description d'un chevauchement en termes de plat et de rampe.

L'objectif est de dessiner le chevauchement en définissant des rampes à 30° environ et des plats qui accommodent le raccourcissement. Cette simplification permet de réaliser des dessins qui tiennent compte de la conservation de la matière

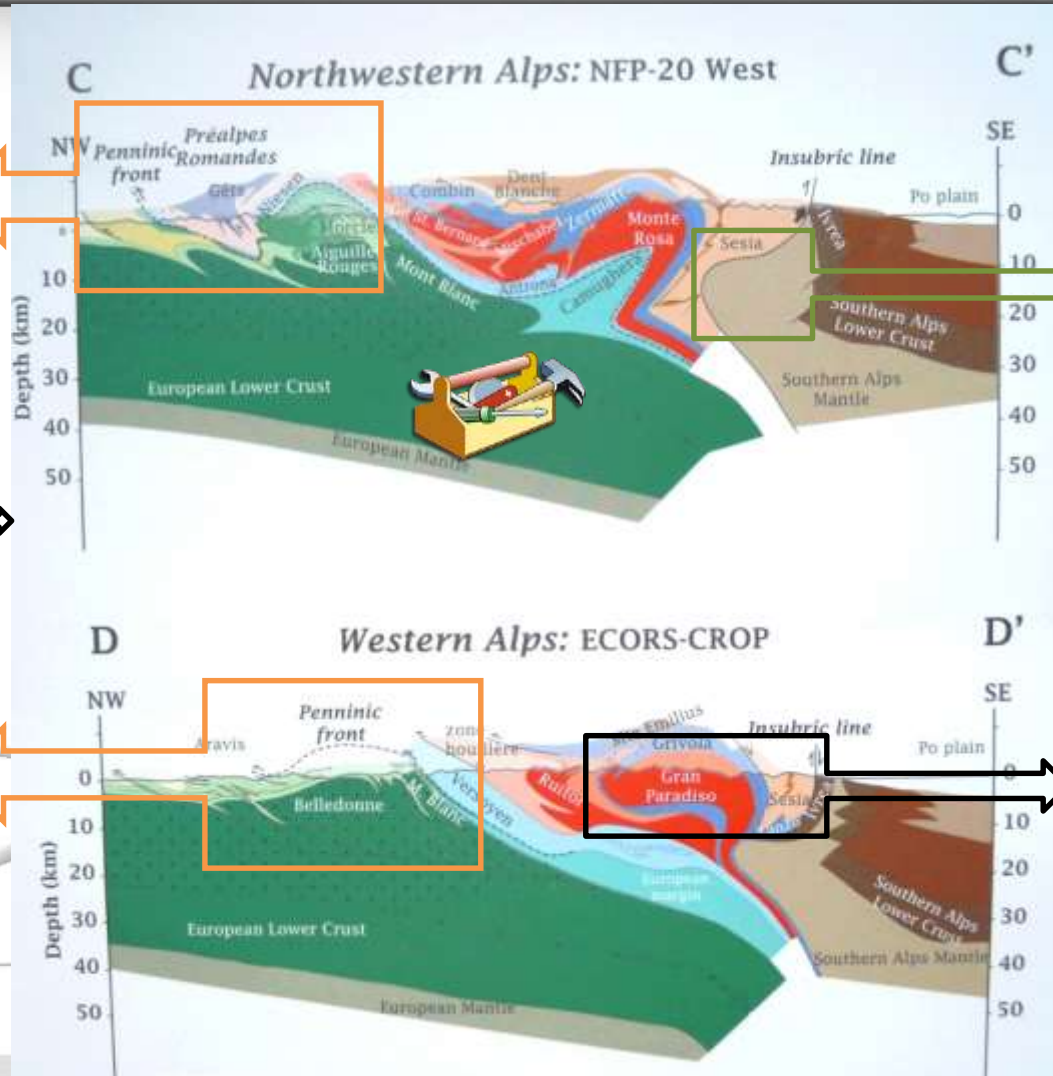




3) Les chaînes de montagne montrent plusieurs niveaux de décollements (et empilements)

Décollement de la couverture sédimentaire (plis et nappes)

Écaille de manteau



Écailles de croute



Nappes de charriage



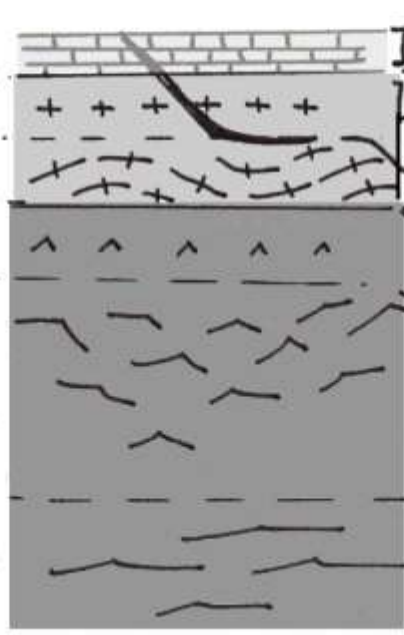
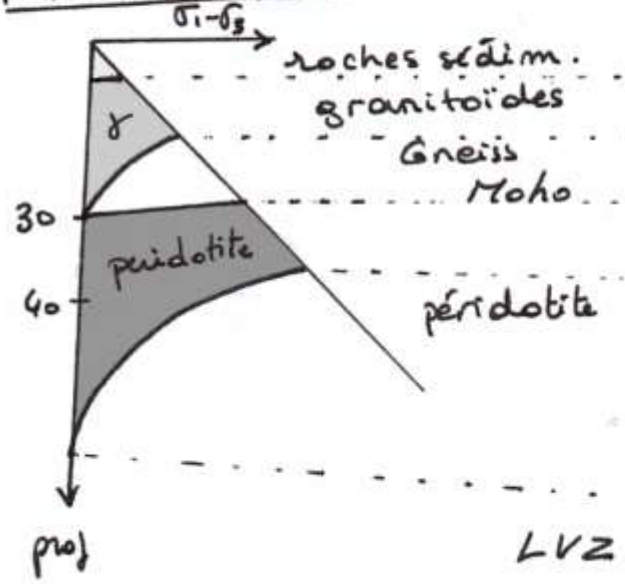
L'hétérogénéité verticale du comportement mécanique d'une lithosphère peut faire apparaître des niveaux de découplage

CPT MÉCANIQUE

ROCHES

MODÈLE

DÉCOUPLAGES



- décollement de la couverture \Rightarrow plis \Rightarrow nappes
- écaillage du socle \Rightarrow blocs de socle
- grande faille de détachement dans les rifts
- décollement de la croûte \Rightarrow empiétement des arêtes
- écaillage du marteau \Rightarrow ophiolites
- découplage mécanique (incomplet) \Rightarrow notion de plaque lithosphérique



**iDEE
FORTE**

A RETENIR

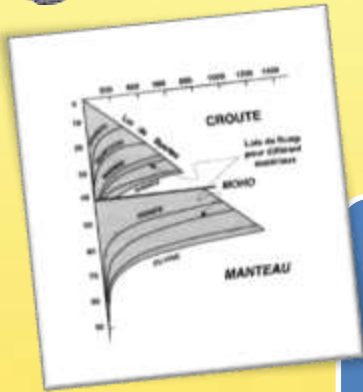
1. Les matériaux de la lithosphère se déforment sous l'effet de la contrainte de façon élastique, cassante ou plastique
2. Les mécanismes de la déformation plane sont le cisaillement pur et le cisaillement simple.
3. Les propriétés mécaniques des roches dépendent de leur compétence, de P et T , et de la vitesse de déformation





À RETENIR

La définition des plaques lithosphériques est une définition mécanique



Les propriétés mécaniques de la lithosphère sont déterminées par son enveloppe rhéologique, qui elle-même dépend du gradient géothermique, et du contexte (extension ou compression)

Une lithosphère est globalement cassante, sur un manteau solide hyperductile (LVZ). (= se déforme même quand les contraintes sont quasiment isotropes)

Une lithosphère continentale présente plusieurs niveaux de décollement en cas de collision

6. Le comportement mécanique de la lithosphère océanique est

- a. entièrement cassant
- b. seule la croute océanique est cassante, alors que le manteau est ductile
- c. toute la croute océanique et une partie du manteau sont cassants
- d. la croute océanique supérieure est cassante, alors que la portion inférieure est ductile

7. Le comportement mécanique de la lithosphère continentale est

- a. entièrement cassant
- b. seule la croute continentale est cassante, le manteau est ductile
- c. toute la croute continentale et une partie du manteau sont cassants
- d. la croute continentale supérieure est cassante, alors que la portion inférieure est ductile

8. Une plaque lithosphérique est appelée ainsi car

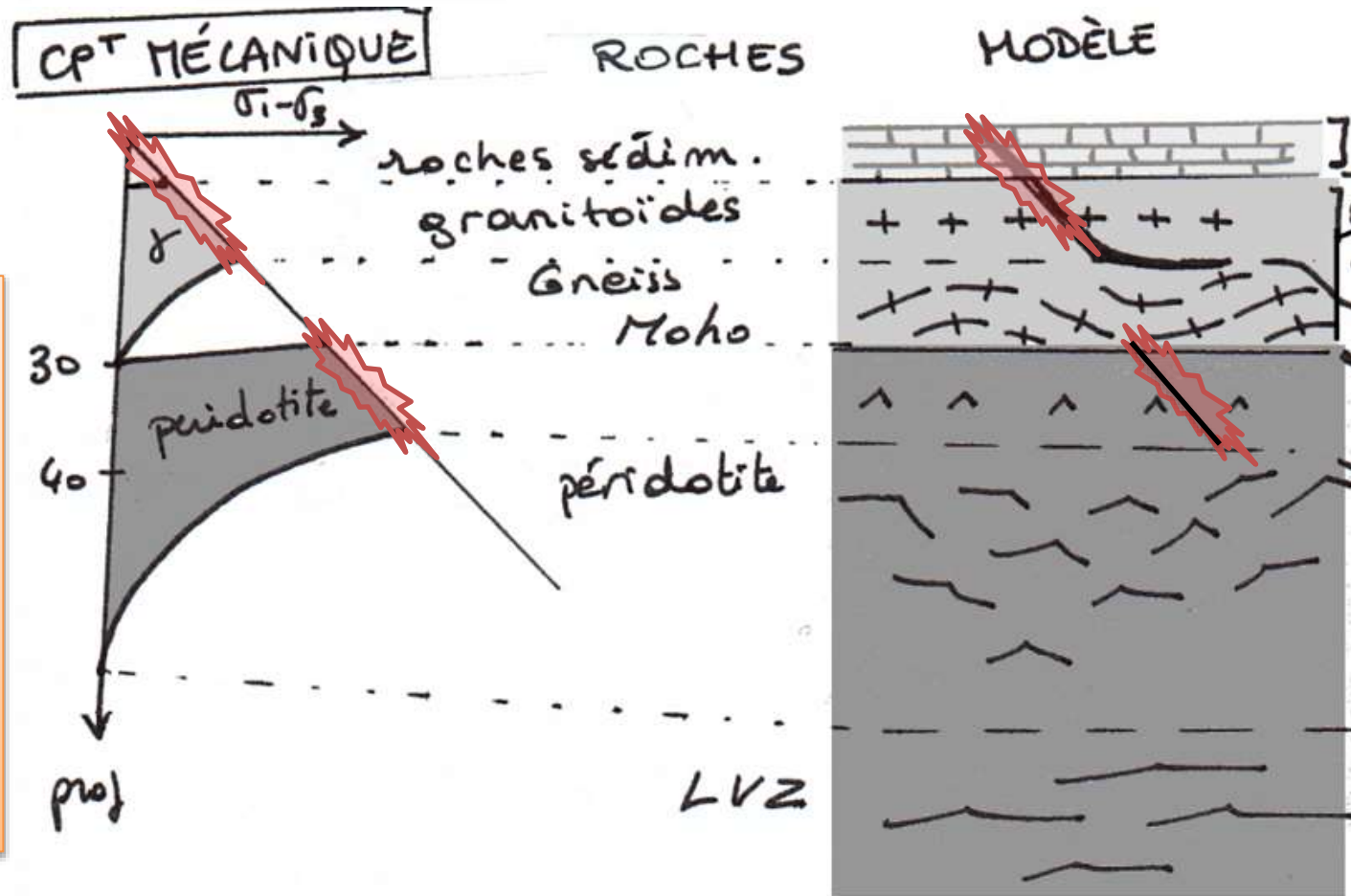
- a. elle est entièrement cassante sur une zone de manteau très ductile
- b. sa portion supérieure est globalement cassante sur une zone de manteau ductile, lui-même sur du manteau très ductile

2. Sismogenèse

Problématique



Les déformations cassantes créent des séismes :
Peut-on les prévoir pour réduire le risque et les utiliser pour la connaissance géologique?



2.1. Des observations de divers types sont nécessaires pour étudier les séismes et prédire le risque



Donnez la définition d'un risque

L'objectif est de voir la diversité des mesures possibles, pas de connaître le mécanisme de ce séisme.

Exemple : Japon 11 mars 2011
Documents sur
<http://prepaangers.weebly.com>

Sismographes actuels et passés

- Magnitude
- Profondeur
- Mécanisme
- Répliques
- Récurrence

Analyse d'un séisme

Satellites

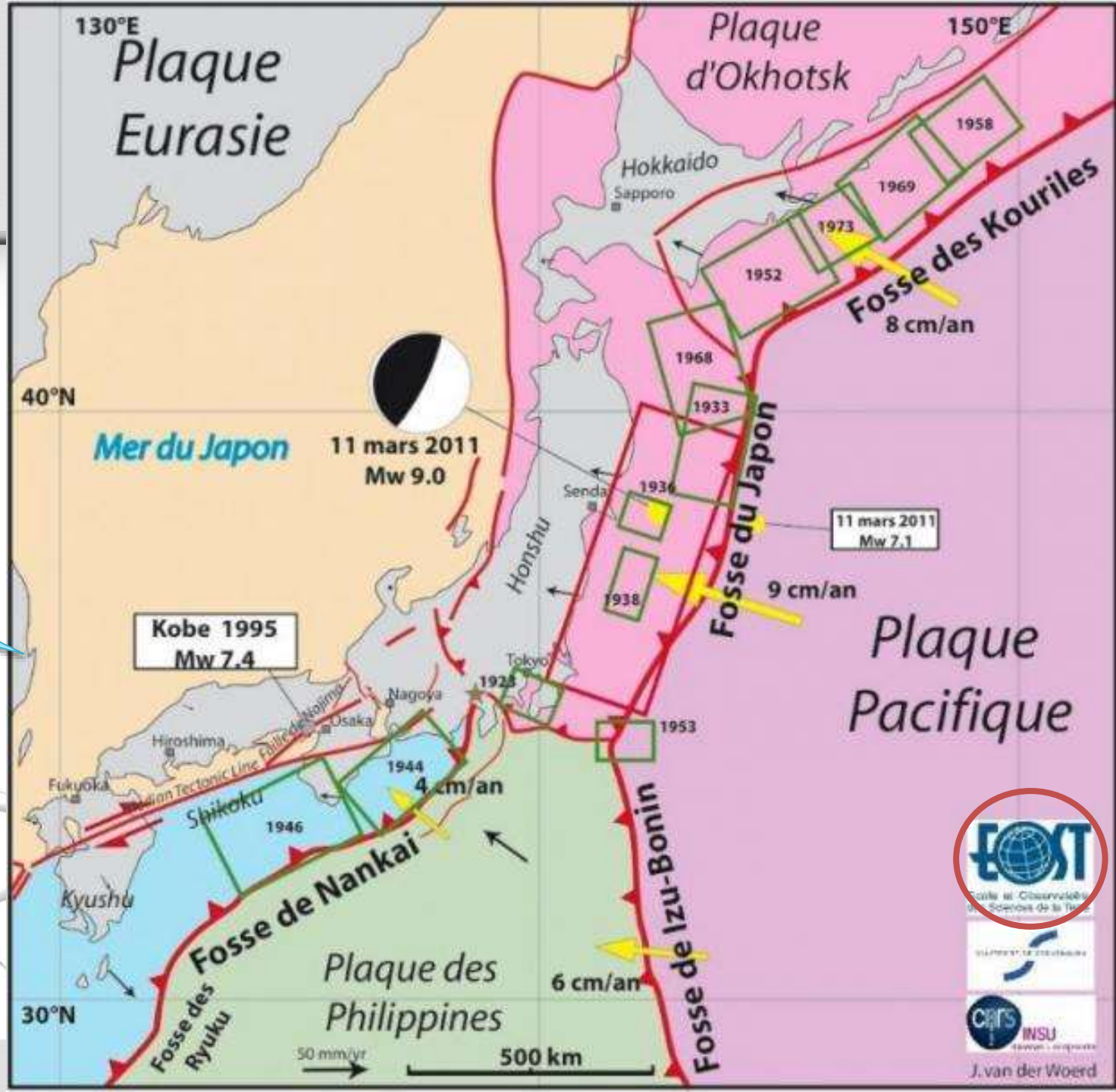
- Interférométrie : déformation du sol
- GPS : déplacement des plaques, couplages entre zones

Dégâts

Sources :
Méridiennes géo,
CNRS, Planet-Terre

Contexte

Pourquoi le Japon est-elle une zone à fort aléa sismique et Tokyo en particulier?



J. van der Woerd

Les sismographes enregistrent en direct les ondes produites par le séisme et ses répliques

Où sont les ondes S, P et L?

Enregistrements du séisme par les stations du réseau mondial français GEOSCOPE. Les ondes émises par le séisme arrivent plus tardivement aux stations les plus éloignées du séisme. © GEOSCOPE.

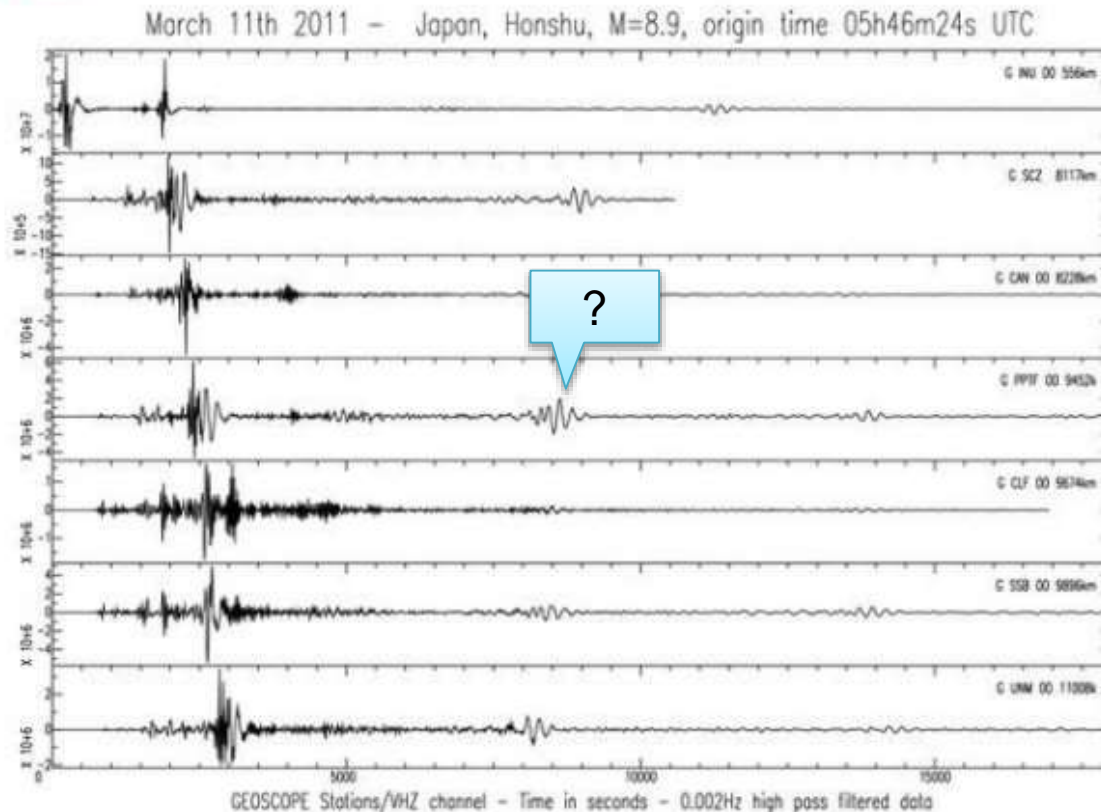
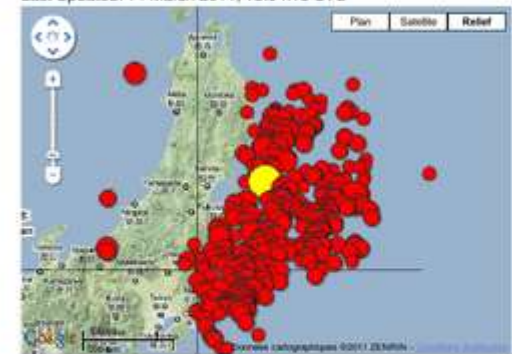


Figure 4. Les répliques du séisme de Sendai

Altershock Map - Mainshock and 405 Altershocks
Last Updated: 14 March 2011, 15:04:13 UTC



Legend

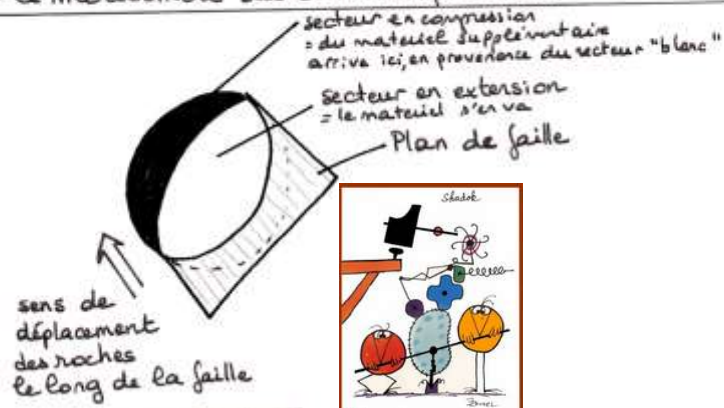


Droits réservés - © 2009 US Geological Survey

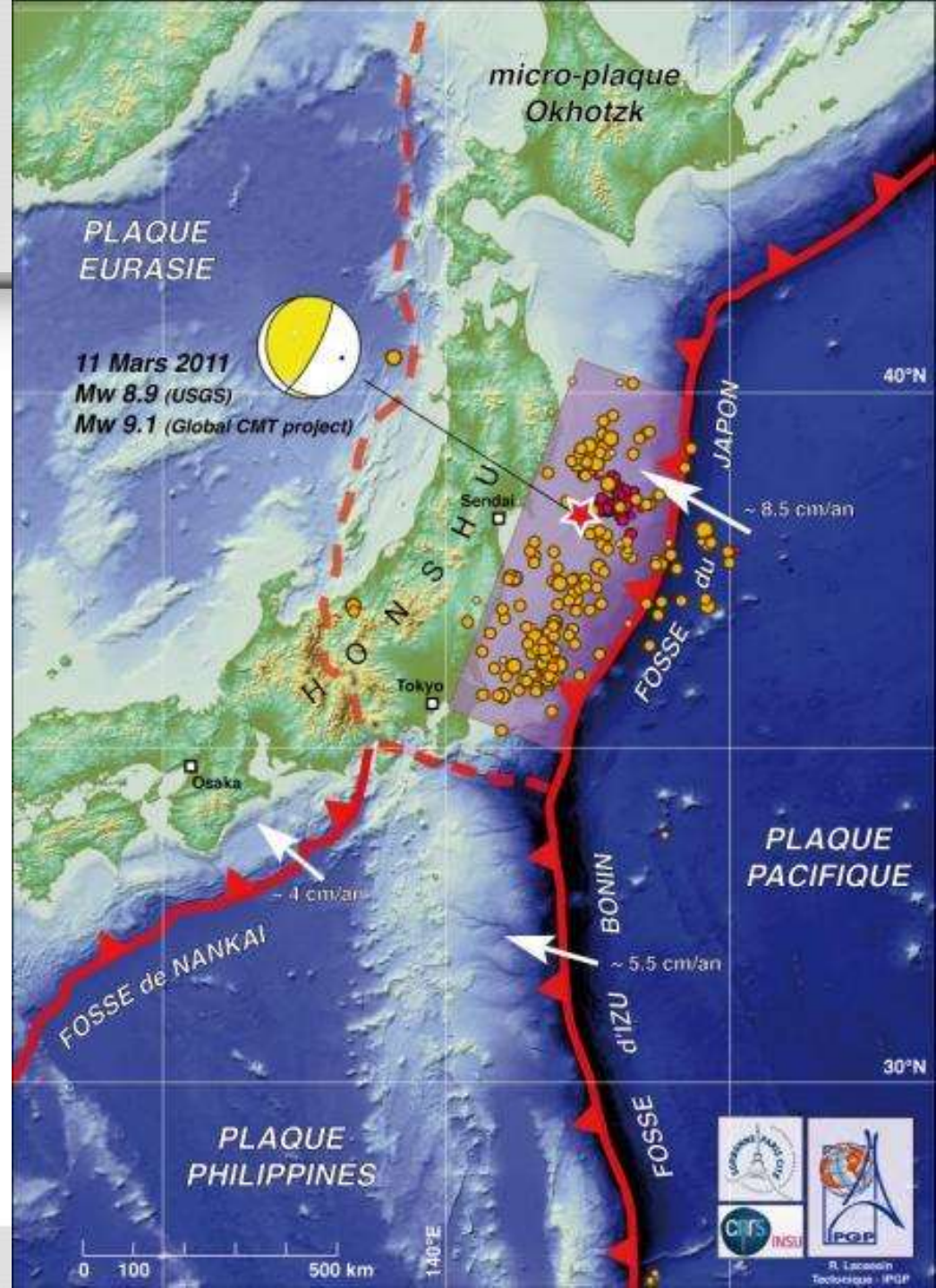
En 3 jours, 405 répliques ont été enregistrées.

Un réseau de sismographes permet de reconstituer le mécanisme au foyer du séisme

Le mécanisme au foyer donne la géométrie de la faille et le mouvement des deux compartiments



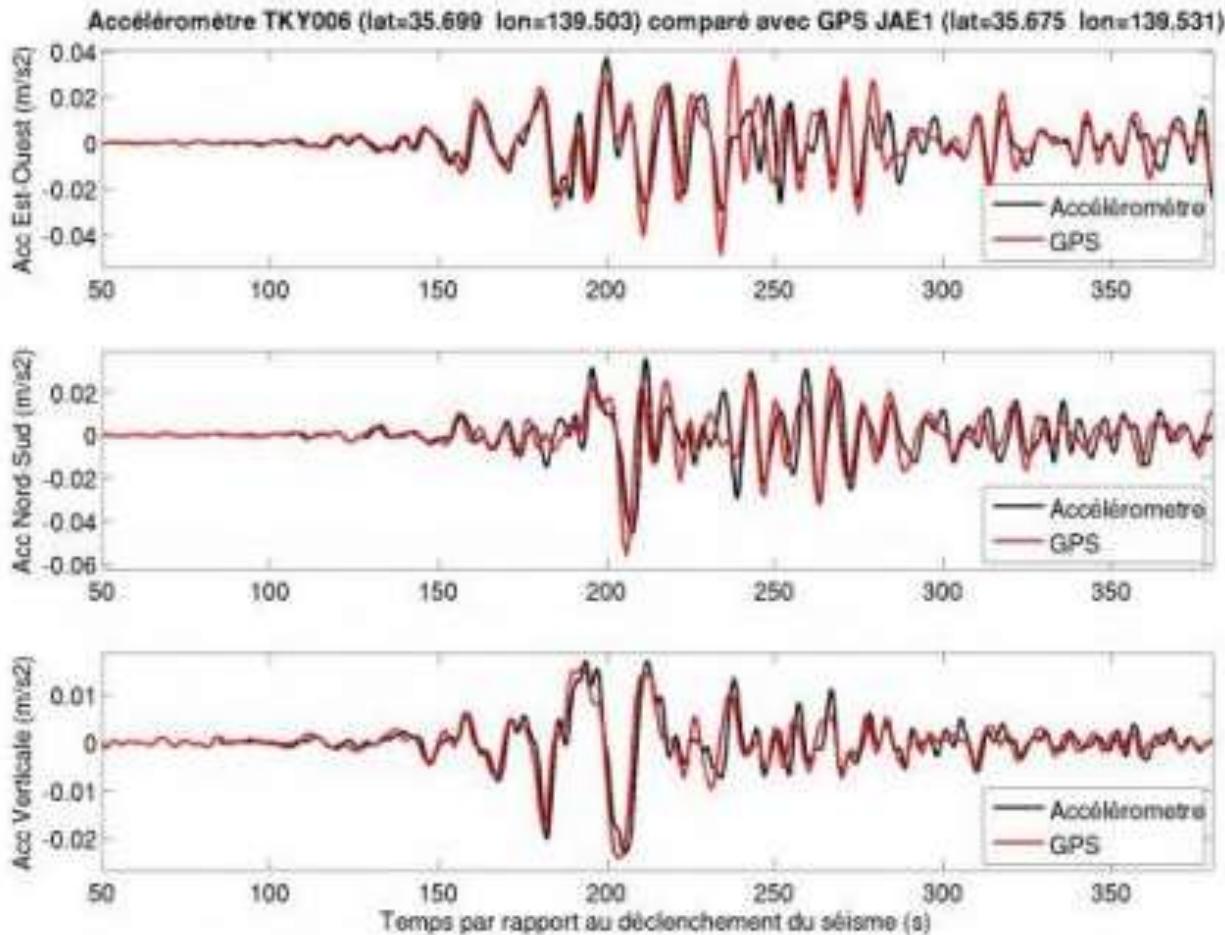
De quel type de faille s'agit-il?



Les accéléromètres au sol et les balises GPS satellitaires mesurent les mêmes déplacements du sol



8- L'information apportée par les accéléromètres et les capteurs GPS



Un **accéléromètre** est un capteur qui, fixé à un mobile ou tout autre objet, permet de mesurer l'accélération linéaire de ce dernier. On parle encore d'accéléromètre même s'il s'agit en fait de 3 accéléromètres qui calculent les 3 accélérations linéaires selon 3 axes orthogonaux.

Figure 8. Déplacements horizontaux liés au séisme de Sendai

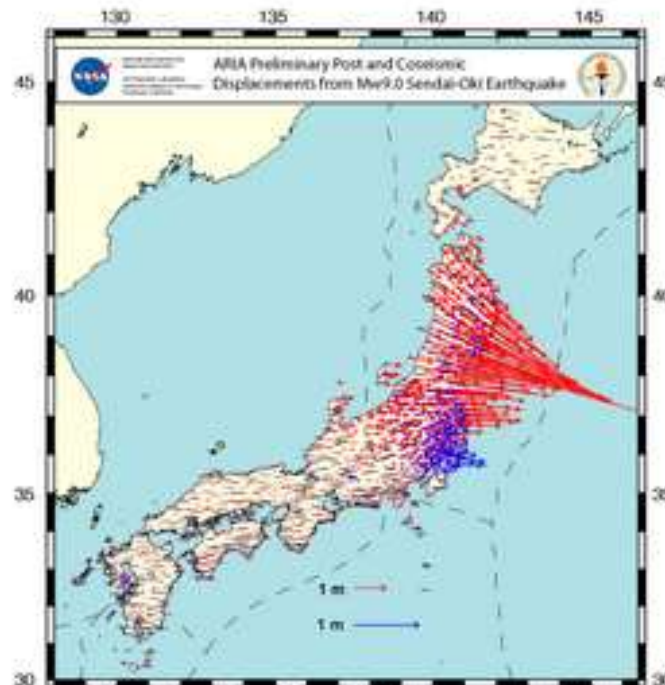


Figure shows horizontal displacements based on ARIA version 0.3 position estimates for GEONET stations. Cosismic displacement is shown in red, and first 8 hours of postseismic motion is shown in blue, including motion caused by aftershocks. Bars at end of vector show 95% error estimate. Solutions courtesy of ARIA team at JPL and Caltech (email aria@jpl.nasa.gov or aria@caltech.edu). All original GEONET RINEX data provided to Caltech by the Geospatial Information Authority (GSI) of Japan.

Droits réservés - © 2009 JPL / Caltech / GSI (Japan)

Les déplacements horizontaux, par rapport à la plaque Pacifique sont calculés à partir de calculs des positions de stations GPS : en rouge, les déplacements co-sismiques (pendant le séisme), en bleu, les déplacements post-sismiques (ici, pendant les 8 heures après le séisme).

Il ne s'agit pas d'un déplacement d'ensemble du Japon vers l'Est, mais localement des déplacement de plusieurs mètres sont observés.

Source : GEO (Group on Earth Observation) données de JPL / Caltech / GSI (Japan)

Figure 9. Déplacements verticaux liés au séisme de Sendai

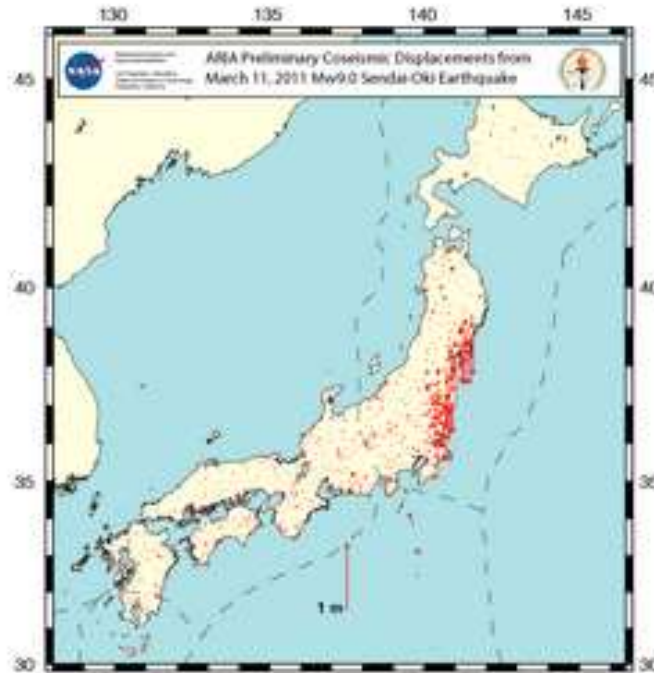


Figure shows version 0.2 vertical displacements based on difference between estimated positions of GEONET stations at 05:00 and 06:30 UTC on March 11, using JPL's Rapid orbit solution and using JPL's GPSY-OASIS software. Solutions courtesy of ARA teams at JPL and Caltech. All original GEONET RINEX data provided to Caltech by the Geospatial Information Authority (GSI) of Japan.

Droits réservés - © 2009 JPL / Caltech / GSI (Japan)

Avant
Sendai



Les déplacements verticaux calculés à partir de la différence des altitudes mesurées 3/4 h avant et 3/4 h après le séisme.

Des abaissements de l'ordre du mètre sont observés sur une large portion de la côte Nord-Est de l'île de Honshu. Cet affaissement explique le retrait incomplet de l'eau après le tsunami, certaines zones côtières s'étant affaissées.

Figure 6. Cartes des iso-intensités, séisme de Sendai, 11 mars 2011

RISQUE



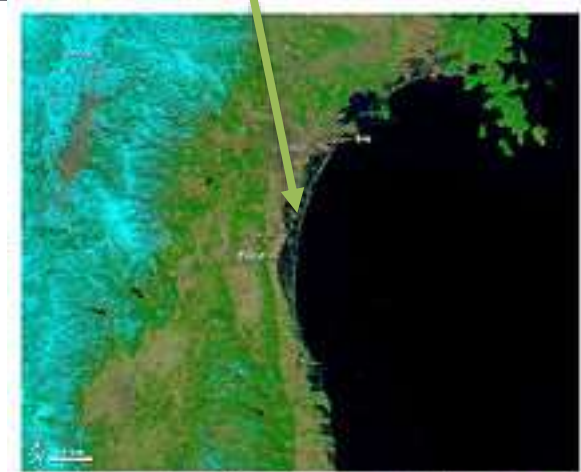
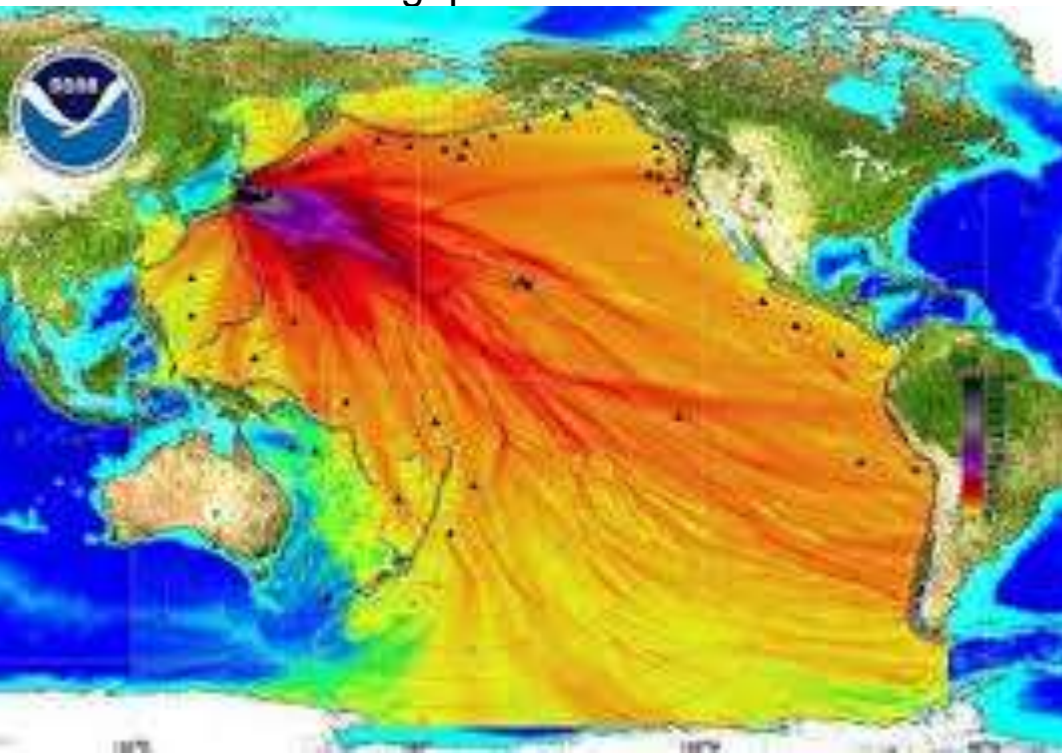
Droits réservés - © 2009 US Geological Survey

La côte Nord-Est de Honshu est à un niveau de VIII sur l'échelle MSK (Mercalli modifiée).



RISQUE

- séisme responsable que de peu de victimes et dégâts grâce à la qualité des constructions parasismiques japonaises.
- tsunami est à l'origine de plus de 90 % des 18 079 morts et disparus, des destructions et des blessés.
- Ce tsunami a également entraîné l'accident nucléaire de Fukushima placé au niveau 7, le plus élevé sur l'échelle internationale des accidents nucléaires et radiologiques.



Avant
Sendai

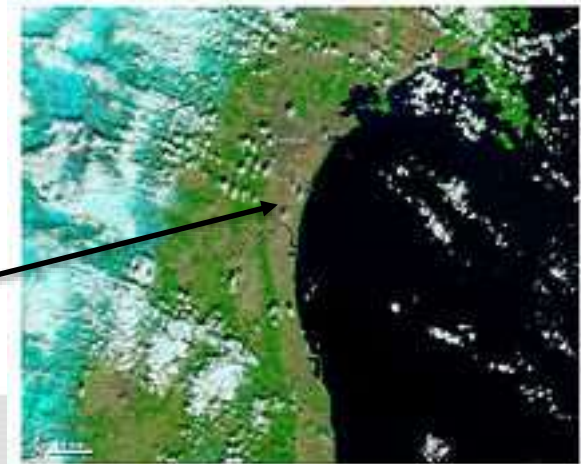
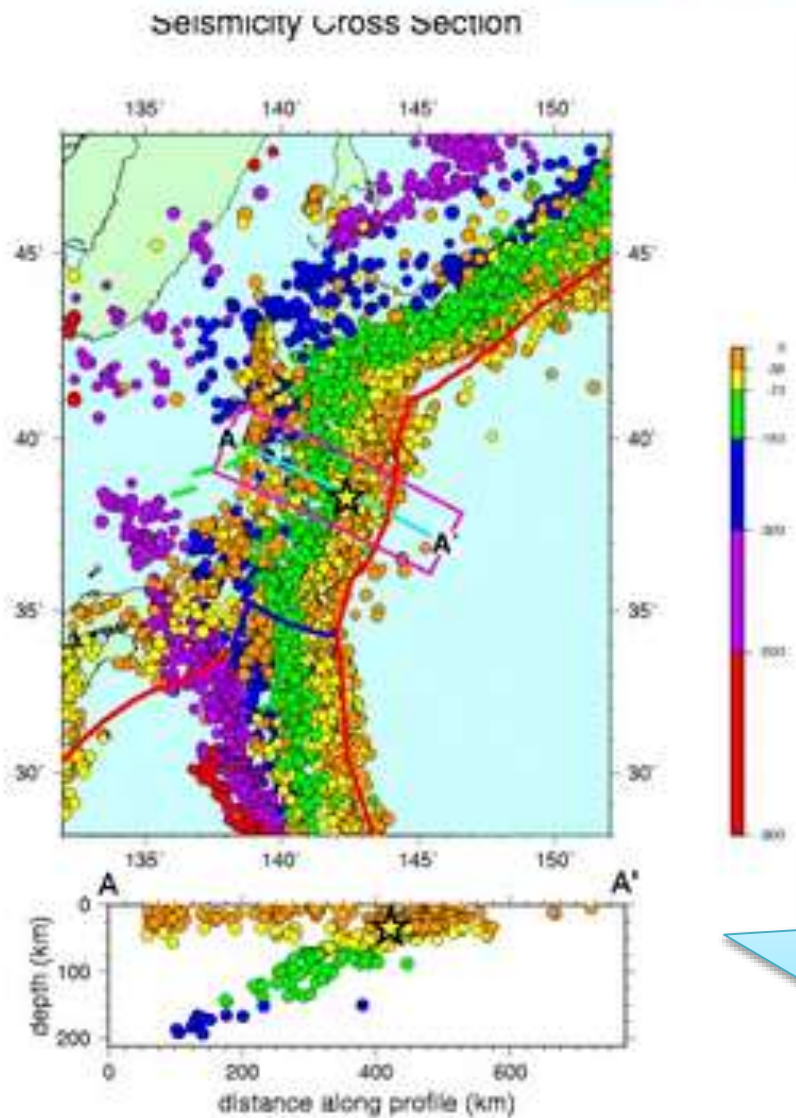


Figure 3. Sismicité au Japon, carte et coupe



Comment peut-on calculer la profondeur du foyer?

Un séisme plus profond est-il plus ou moins dangereux?

Droits réservés - © 2009 US Geological Survey

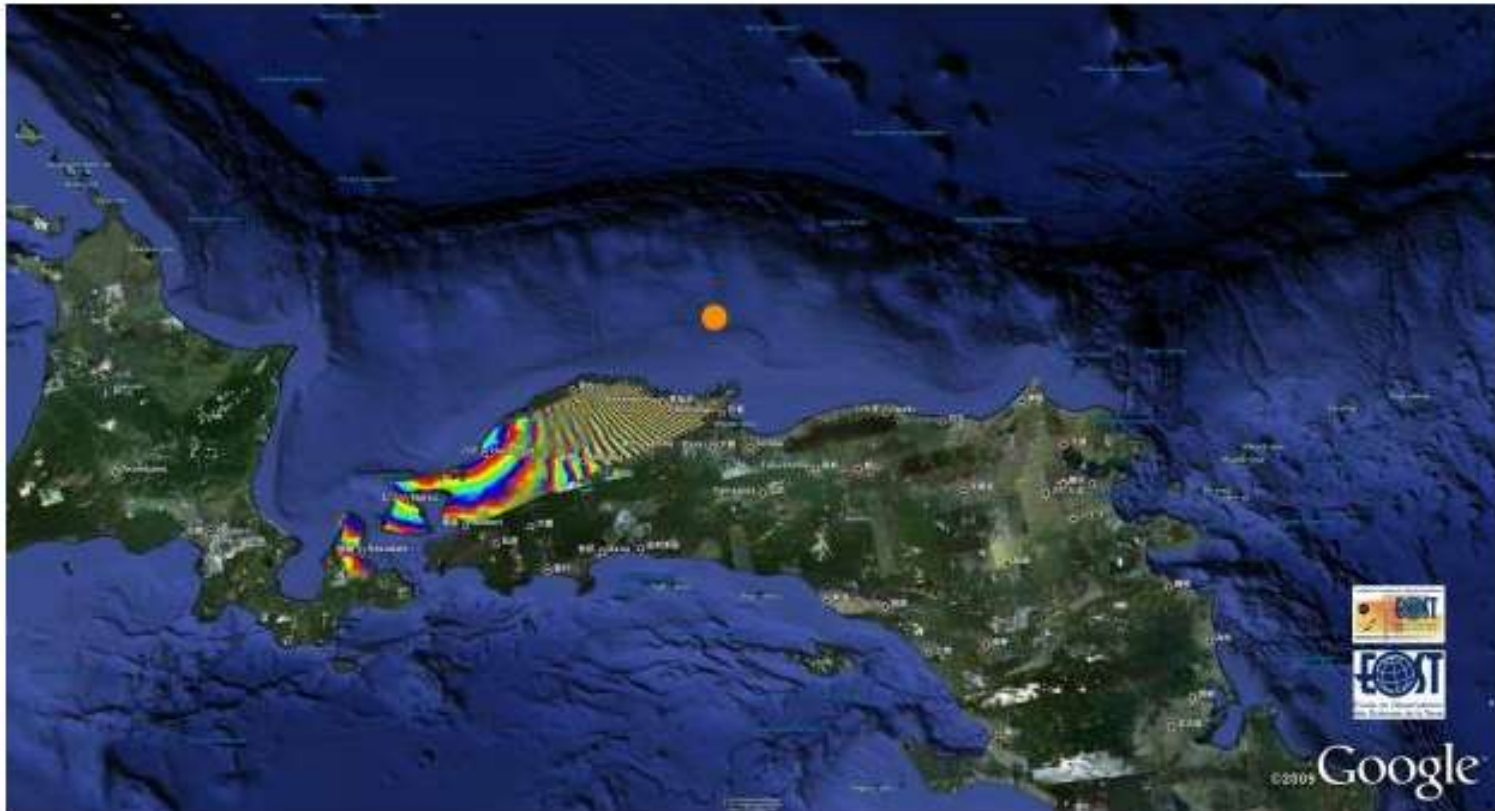
L'épicentre du séisme du 11 mars 2011 est indiqué par une croix. Il est situé en base de croûte.

L'interférométrie radar :

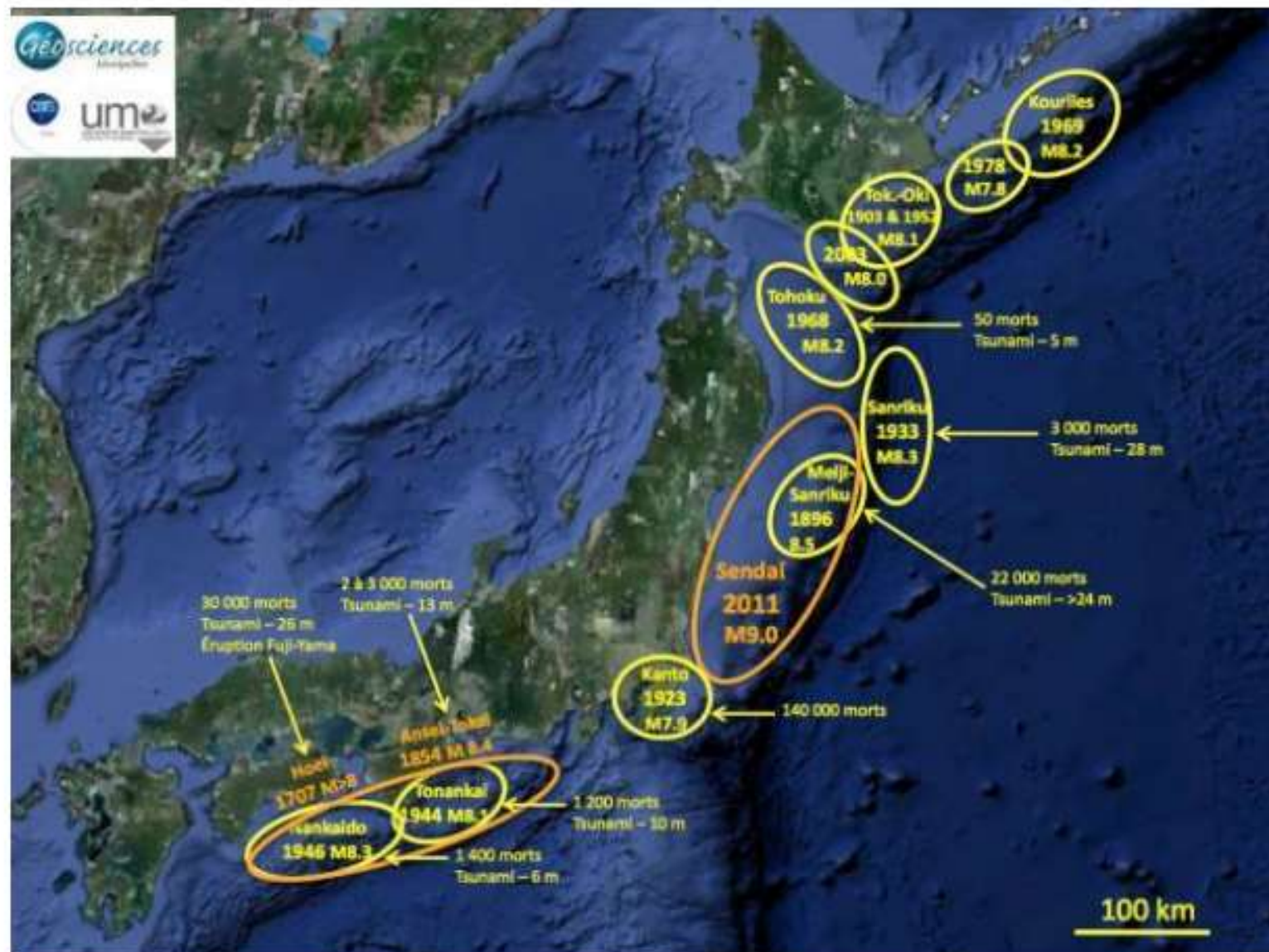
À bord d'un satellite, le radar enregistre deux images de la même région à des moments différents. En comparant les images, il est alors possible de détecter les déformations du sol susceptibles de s'être produites dans l'intervalle.

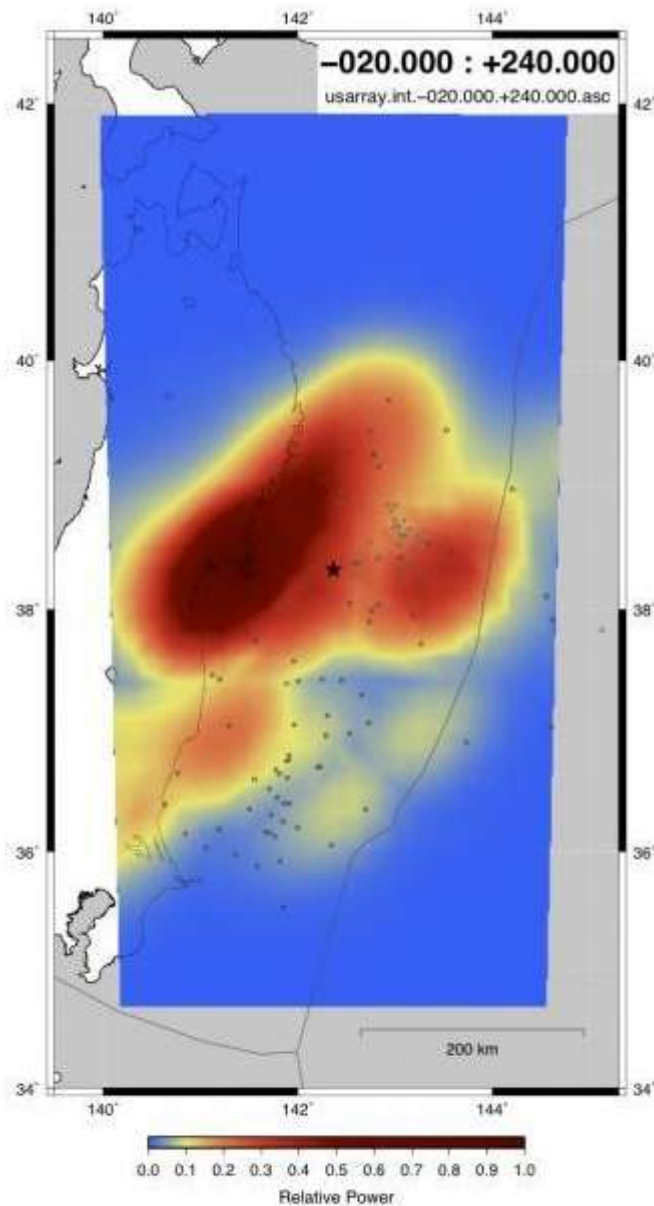
A SUIVRE

Déplacement co-sismique calculé à partir de données satellitaires ALOS PALSAR. Chaque frange représente 12 cm de déplacement vers le satellite. Ce type d'interferogramme nécessite deux images de la même région prises avant et après l'événement, ici le séisme du 11 mars 2011. Le point orange localise l'épicentre. © EOST Strasbourg
Une frange correspond ici à un déplacement de 12cm
[Séisme de Tohoku-Oki \(Japon 11 mars 2011\)](#)



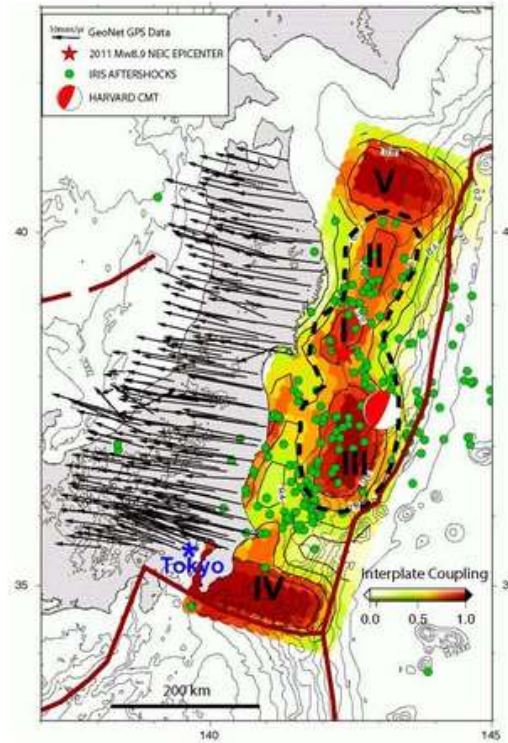
Zones de ruptures et magnitudes des séismes historiques au Japon rassemblées sur la base de nombreux travaux. Seuls les séismes de la façade est du Japon sont signalés. Le fond topo-bathymétrique est extrait de Google Earth. © S. Lallemand, Géosciences Montpellier (CNRS-INSU, UM2)





Première modélisation de la source par rétro-propagation des ondes P (Claudio Satriano – Sismologie IPGP). Les couleurs allant vers le violet soulignent les zones de la faille ayant généré le plus d'énergie sismique. Autres modélisations sismologiques de la source par Martin Vallée (GeoAzur) et Gavin Hayes (USGS). © IPGP.

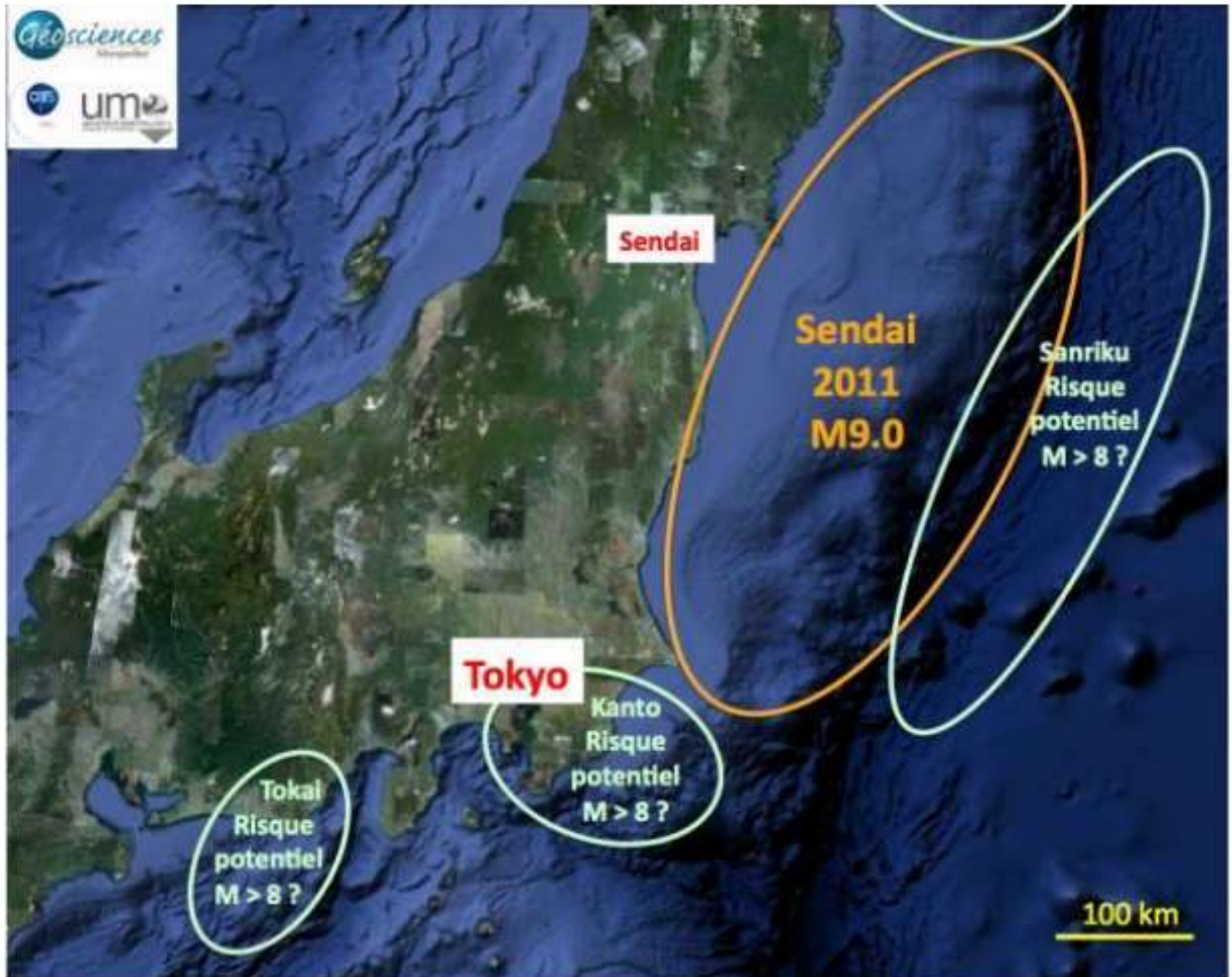
Figure 10. Cartographie de l'intensité du couplage entre la lithosphère Pacifique et la lithosphère « japonaise » avant le séisme du 11 mars 2011



Droits réservés - © 2009 Mohamed Chlieh

Les flèches indiquent la moyenne annuelle du déplacement du Japon vers l'Ouest, déplacements donnés par le très dense réseau de balises GPS. La différence entre cette valeur et la vitesse de la plaque Pacifique permet de calculer le degré de couplage entre les 2 plaques. Un couplage de 0 indique une absence totale de couplage : la plaque Pacifique glisse librement sous le Japon sans l'entraîner. Un couplage de 1 indique le couplage maximal : la plaque Pacifique est complètement « collée » au Japon et la pousse dans son mouvement vers l'Ouest. Dans la zone au large du Japon, on voit qu'il y avait 5 zones de fort couplage, numérotées de I à V. Les cercles verts indiquent la position des répliques. Toute la zone affectée par les répliques correspond au plan de faille qui a rompu le 11 mars 2011. L'étoile rouge indique la position du foyer, point où a commencé la rupture. Ce sont les zones I, II et III qui se sont rompu ce 11 mars 2011. Les zones IV et V n'ont pas bougé... Ce sera pour une prochaine fois ! L'astérisque bleu indique la position de l'agglomération de Tokyo, au niveau de la zone IV, ce qui est extrêmement inquiétant.

Ce modèle, utilisant des données pré-sismiques, a été calculé dans les heures suivant le séisme. Il est donc susceptible d'améliorations dans les jours / semaines qui viennent.



Zones de ruptures potentielles suite au séisme de Sendai d'après Serge Lallemand. Le fond topobathymétrique est extrait de Google Earth. © Géosciences Montpellier (CNRS-INSU, UM2)

Des séismes précurseurs permettent de mettre la population en alerte (prédictif que pour certains volcans)

Sismographes actuels et passés

- Magnitude
- Profondeur
- Mécanisme
- Répliques
- Récurrence

Ne pas négliger les indices de tsunamis millénaires. Une zone stable depuis plusieurs siècles peut être très dangereuse!

SUR-ACCIDENT
Problème de la localisation de la centrale de Fukushima et son abaissement

PREVENTION
Fusion du réacteur évitable avec une meilleure formation du personnel

Les leçons du séisme de 2011 au Japon

On peut suivre l'accumulation des déformations élastiques

Satellites

- Interférométrie : déformation du sol
- GPS : déplacement des plaques, couplages entre zones

Le couplage entre zones bloquées est un énorme facteur d'aléa jusqu'ici pas imaginé!

Nouveaux modèles

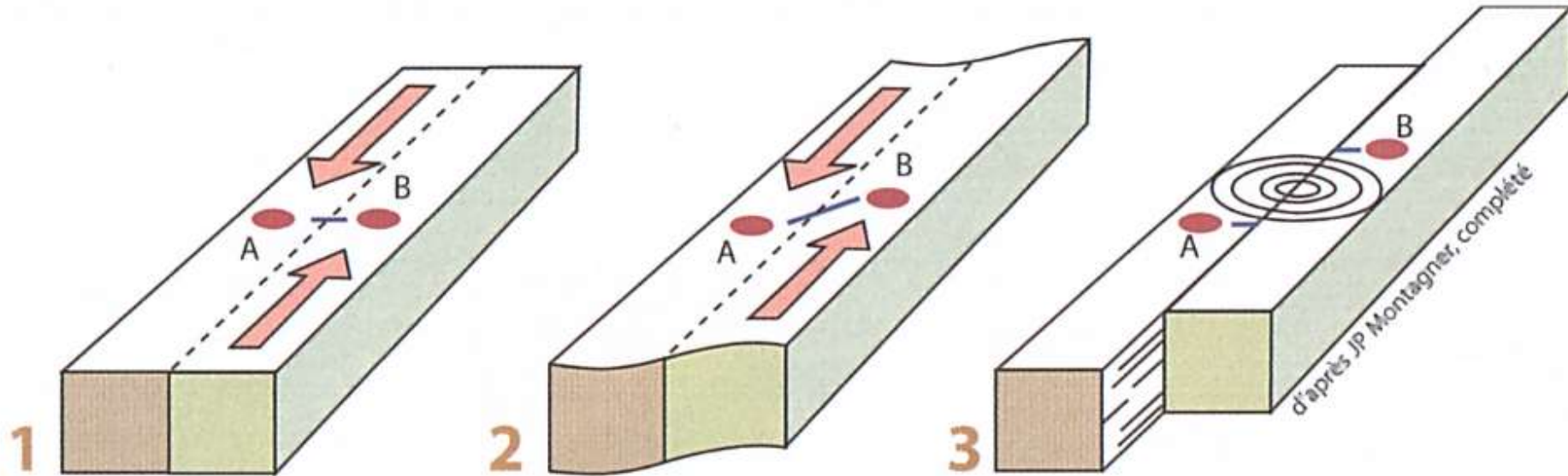
Dégâts

Efficacité des constructions parasismiques

La plupart des dégâts proviennent du tsunami

Prévention difficile, côtes très habitées

2.2. Un séisme est une relaxation rapide de l'énergie accumulée par les déformations élasto-plastiques



1

- faille potentielle au début du cycle sismique

2

- accumulation des contraintes
- déplacement des points A et B
- déformation élastique au voisinage de la faille

3

- glissement brutal le long de la faille
- libération de l'énergie élastique
- les roches vibrent



Comment mesurer l'intensité d'un séisme?

1. Pour les impacts sur les activités humaines : échelle des intensités (type échelle de Mercalli ou échelle MSK avec des intensités allant de I à XII). -> nombreuses limitations pour l'étude scientifique des séismes
2. La magnitude dite de Richter (1935) est le logarithme décimal de l'amplitude maximale des ondes sismiques sur un sismogramme, ou l'appelle aujourd'hui la magnitude locale M_L . Échelle très appréciée des médias mais variable d'une station sismique à l'autre, uniquement adaptée aux tremblements de terre californiens.
3. Les magnitudes habituellement citées de nos jours sont en fait des **magnitudes de moment** (notées M_w).



La magnitude de moment (notée M_w) mesure l'énergie libérée par un séisme en caractérisant son mécanisme

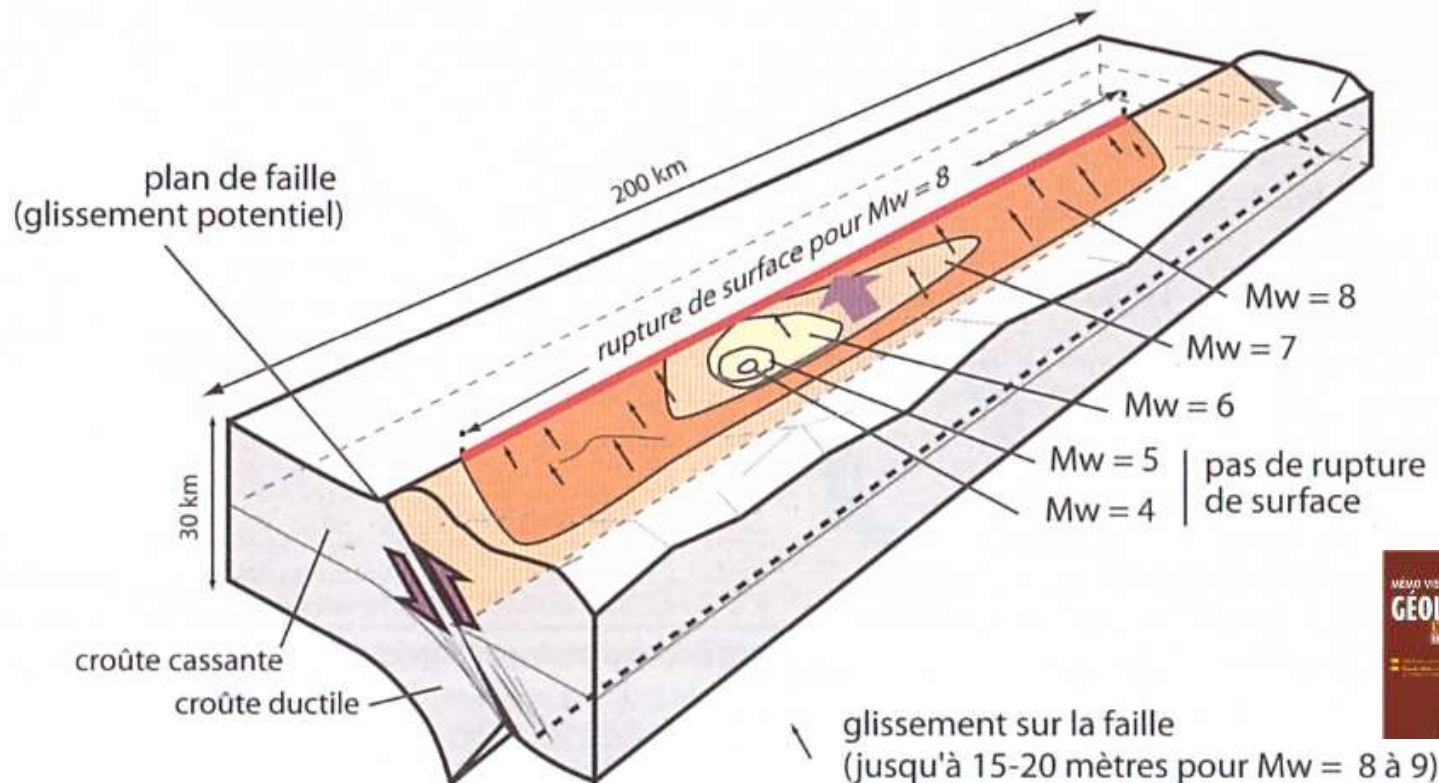
La magnitude de moment d'un séisme, M_w , permet de caractériser l'énergie libérée par un séisme. L'échelle est logarithmique.

$$M_w = 2/3 (\log M_0) - 6 \text{ où } M_0 \text{ est le moment sismique.}$$

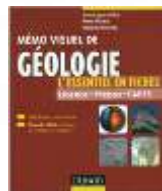
M_0 dépend directement de la surface de la faille S , du déplacement D sur le plan de faille et de μ , la rigidité du milieu :

$$M_0 = \mu S D \text{ (en dyne}\cdot\text{cm}^{-1}\text{)}$$

Les ruptures de surface ne seront possibles que pour des M_w élevées.



Taille des plans de failles sismiques et magnitude des séismes (cas d'une faille inverse)





Magnitudes de moment d'un séisme (M_w)

1956, méthode actuelle

- Principe : Un tremblement de terre observé à grande distance (foyer assimilé à un point) a une émission d'énergie comparable à celui d'un double couple de forces. Il a donc un moment, souvent noté M_0 .
- Intérêt : **Le moment sismique est une mesure de l'énergie d'un séisme, directement lié aux paramètres de la source sismique.**

Ce moment est relié à la source par la relation : $M_0 = \mu S D_u$

μ : rigidité du milieu, S : surface rompue durant le séisme D_u : déplacement moyen ayant eu lieu sur la faille.

L'unité de mesure est donc le newton-mètre (N.m) USI. Souvent, principalement dans les pays anglophones, cette mesure est donnée en dyn.cm (1 N.m = 10^7 dyn.cm).

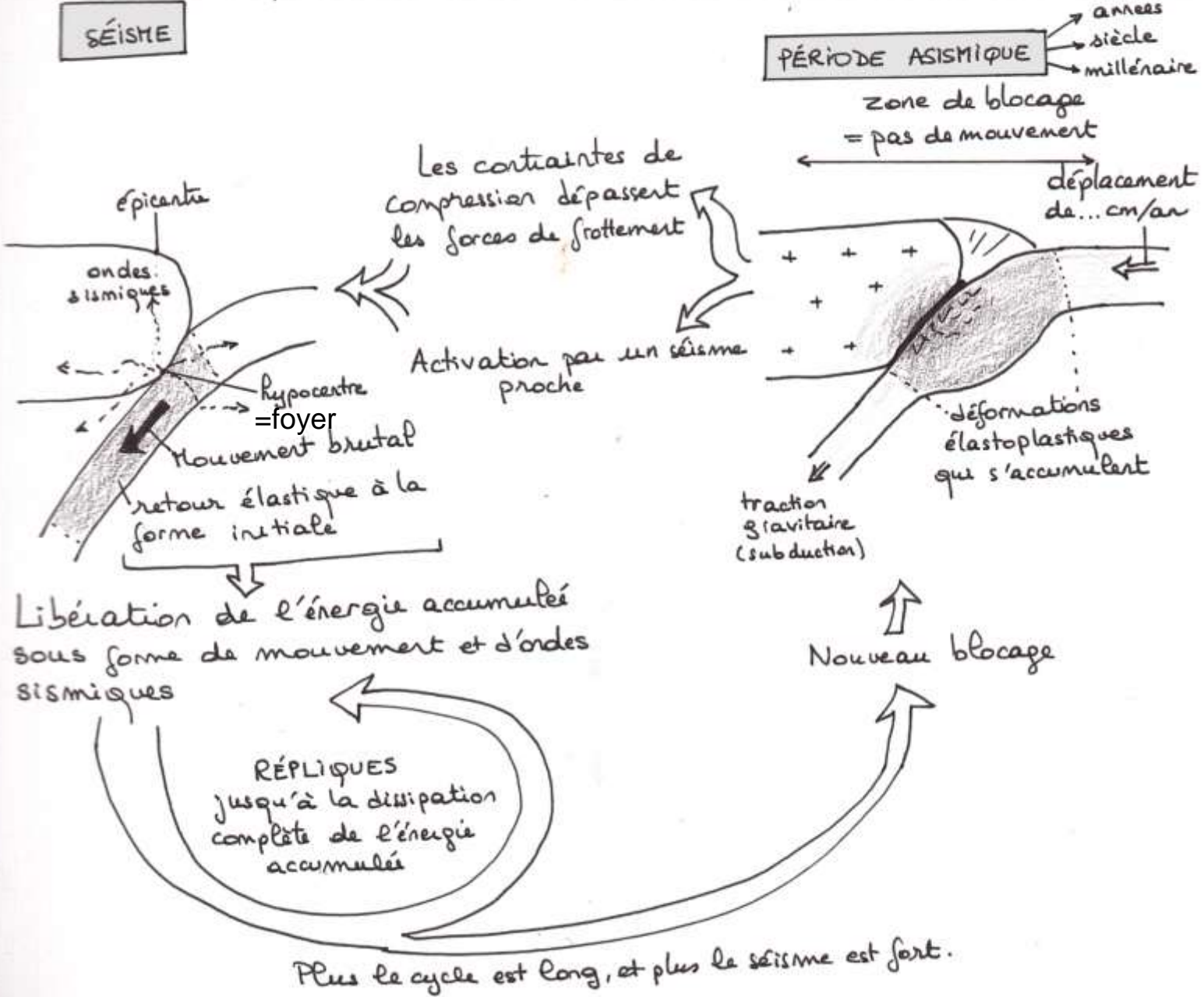
En 1977, Hiroo Kanamori établit la relation empirique entre magnitude et moment sismique : $\log_{10}(M_0) = 1.5M_w + 6.07$ (le moment est exprimé en N.m).

Lorsque la magnitude du séisme est déduite du moment, on parle de magnitude de moment.



La relaxation rapide de l'énergie accumulée par les déformations élasto-plastique est responsable de la formation des séismes.

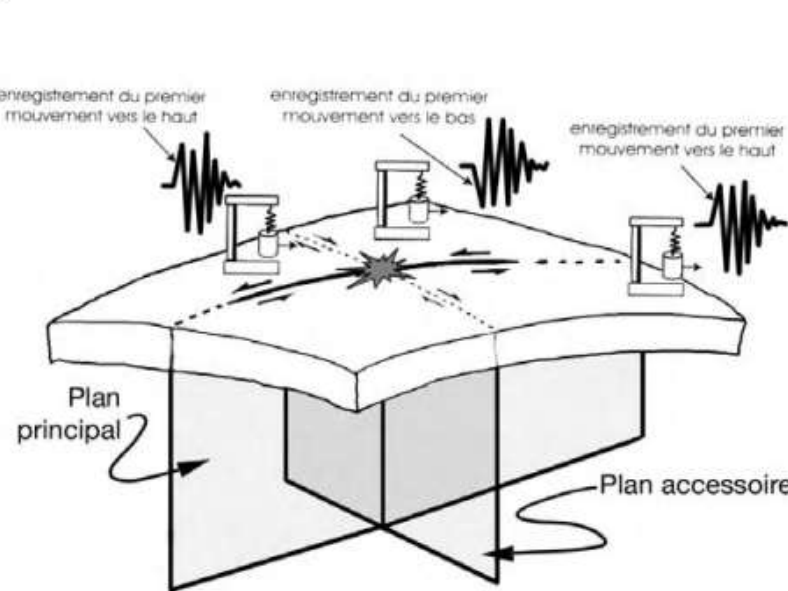
SÉISME



Rebond élastique

2.3. Le mécanisme au foyer d'un séisme permet l'analyse de la géométrie de la faille et de son mouvement

Les mécanismes au foyer -1-



enregistrement du premier mouvement vers le haut

enregistrement du premier mouvement vers le bas

enregistrement du premier mouvement vers le haut

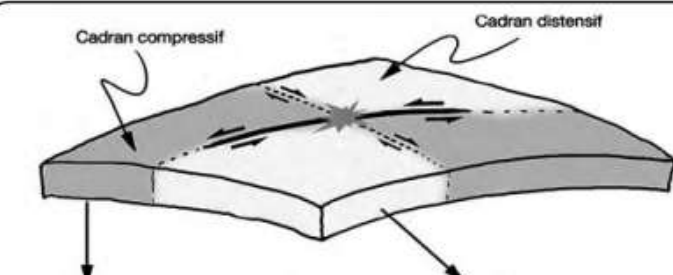
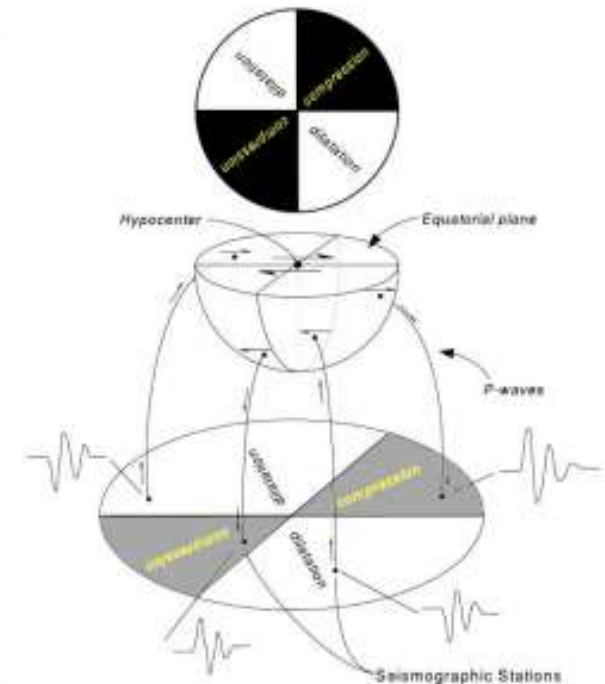
Plan principal

Plan accessoire

Premier mouvement enregistré

Lorsqu'une faille fonctionne, l'espace peut être partagé en quatre domaines séparés par le plan de faille et un plan accessoire qui lui est orthogonal.

L'*impetus* enregistré par les sismographes n'est pas le même selon le cadran où il se trouve.



Cadran compressif

Cadran distensif

Le sismographe se prend un coup dans la figure : il enregistre une compression

Le sismographe est aspiré par le foyer : il enregistre une distension

Contraintes et séisme

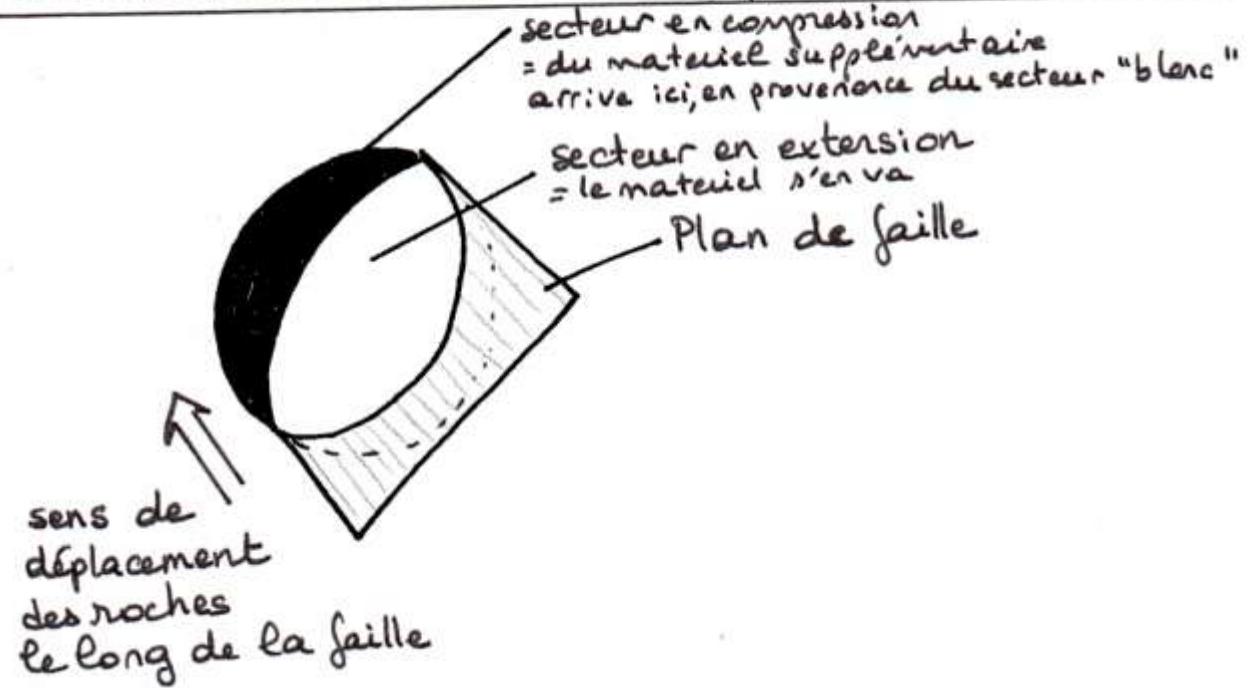
La connaissance des contraintes à l'origine du séisme permet de comprendre le partage en quatre cadrans.

Inversement, La connaissance des cadrans permet de connaître l'orientation des contraintes.

Mécanisme au foyer?



Le mécanisme au foyer donne la géométrie de la faille et le mouvement des deux compartiments



2.4. L'étude des mécanismes au foyer des séismes permet de caractériser le contexte tectonique



Faïlle normale



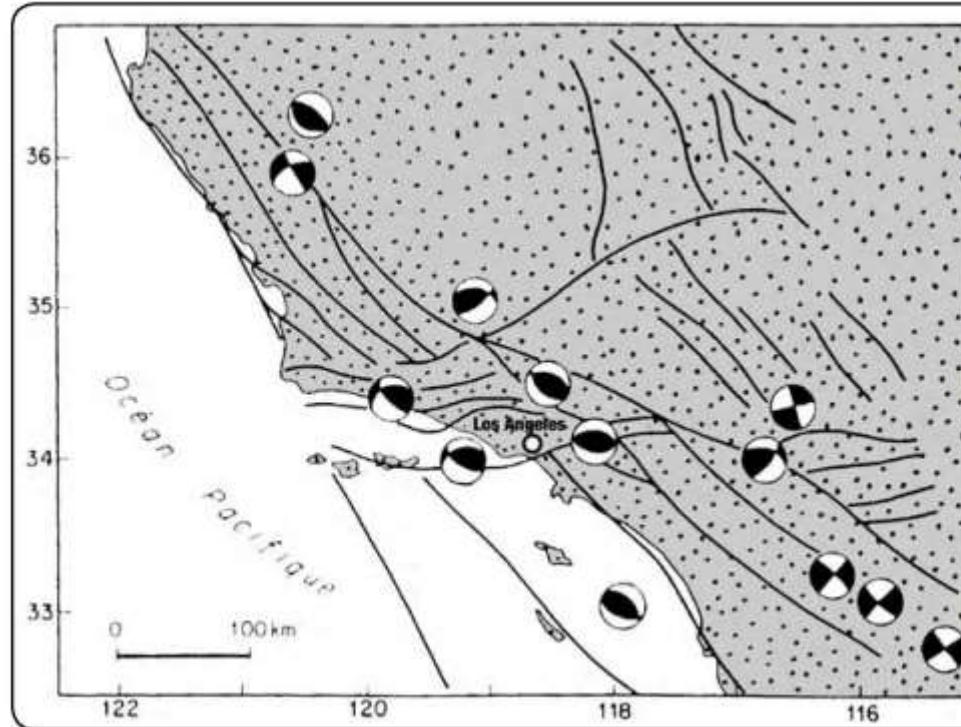
Faïlle inverse



Décrochement



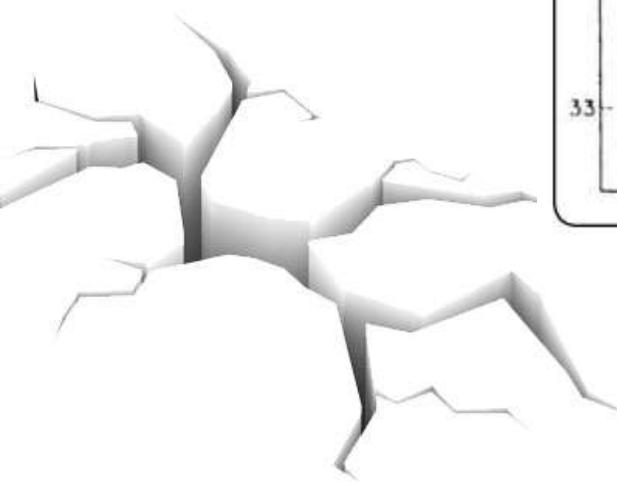
Décrochement à composante normale



La faille de San Andreas

Le long de la faille, les mécanismes sont de décrochement.

L'alignement des séismes donne l'alignement du plan de faille. Le décrochement est donc dextre (placer «les flèches» du blanc vers le noir).

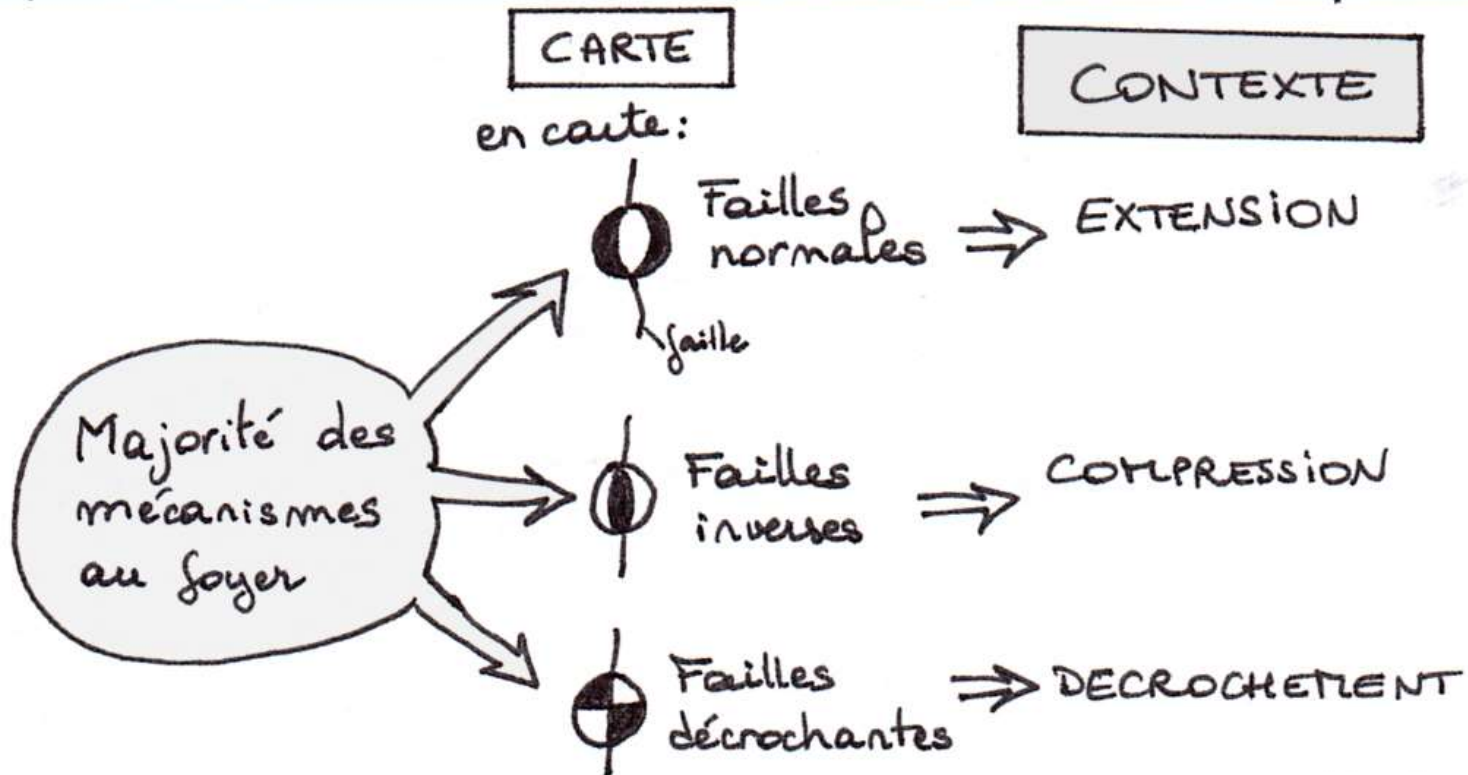


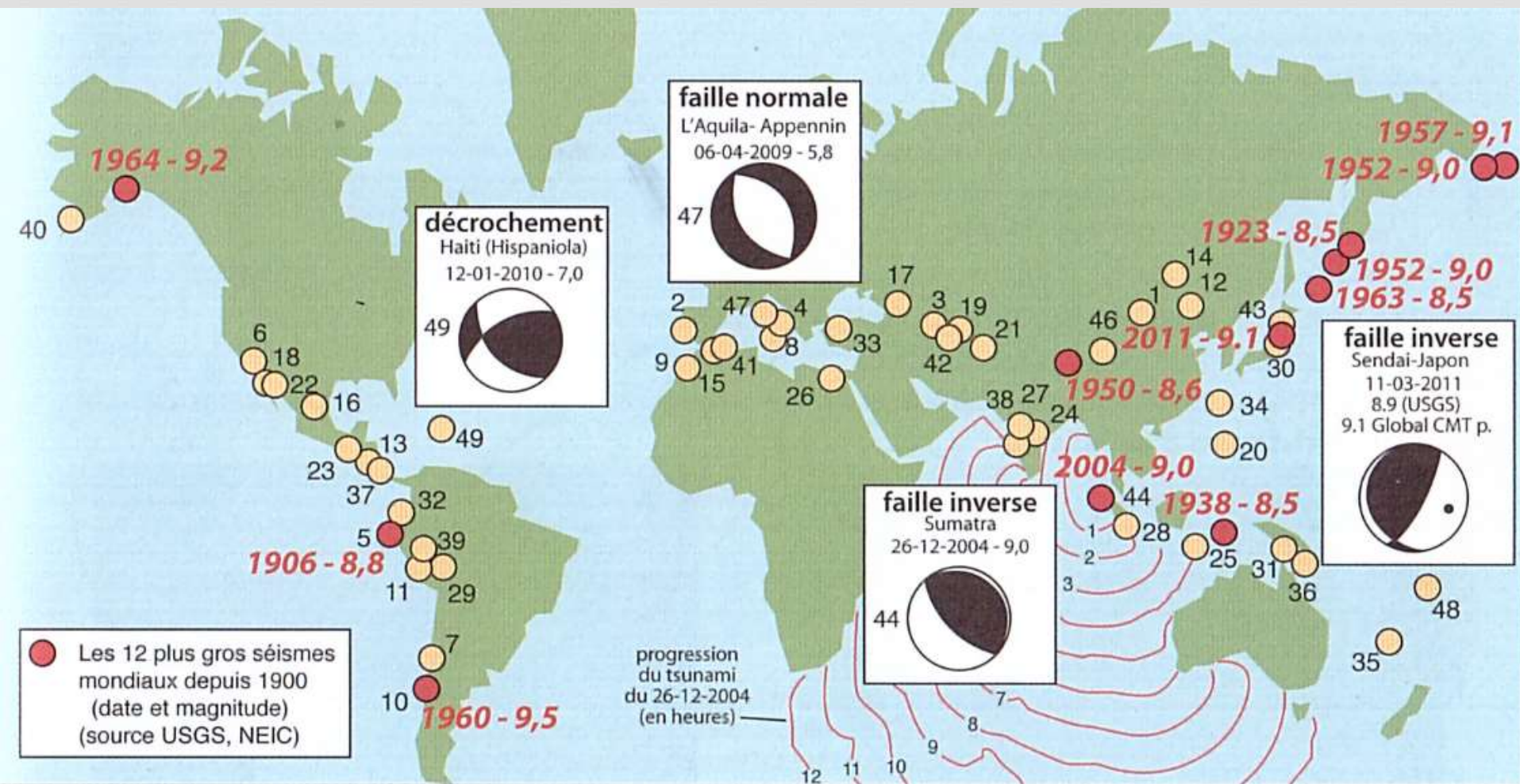
Notez que dans un secteur, toutes les failles ne sont pas de même type. Pour déterminer un contexte tectonique on regarde quel type de faille est **majoritaire**.



Mécanisme au foyer et contexte tectonique?

L'ensemble des mécanismes au foyer d'une région permet de caractériser le contexte tectonique

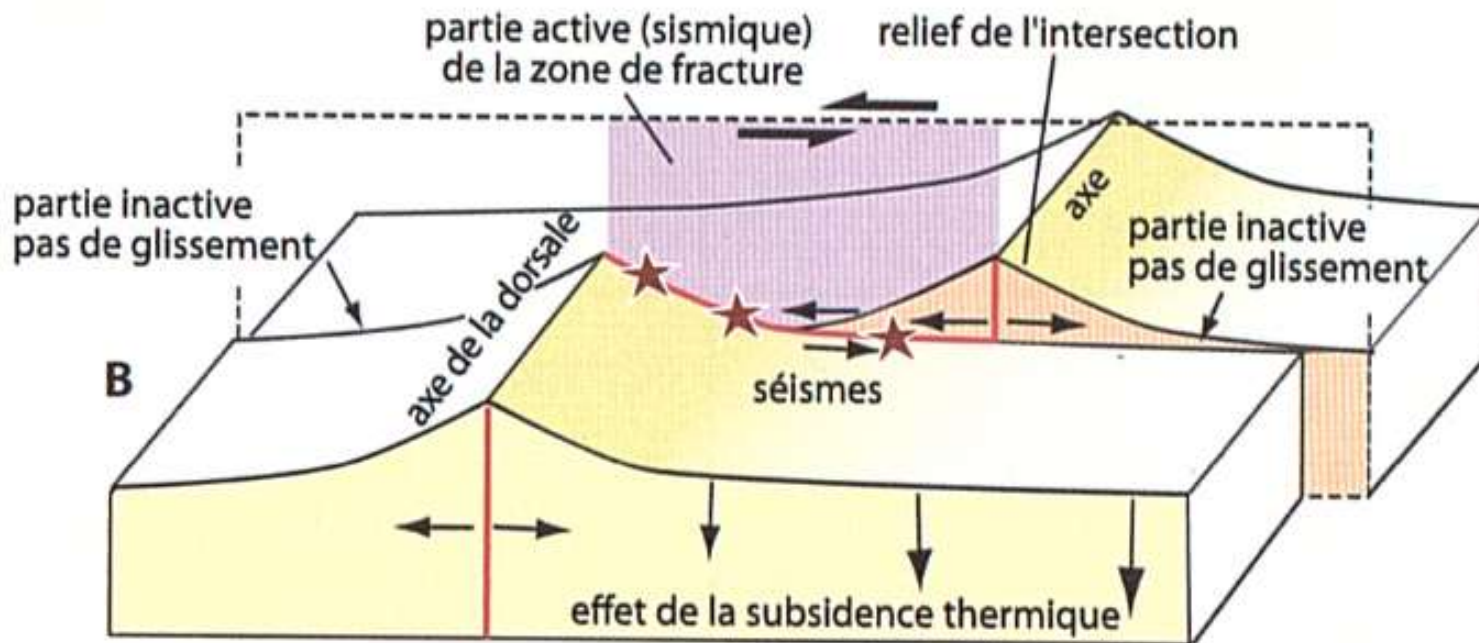
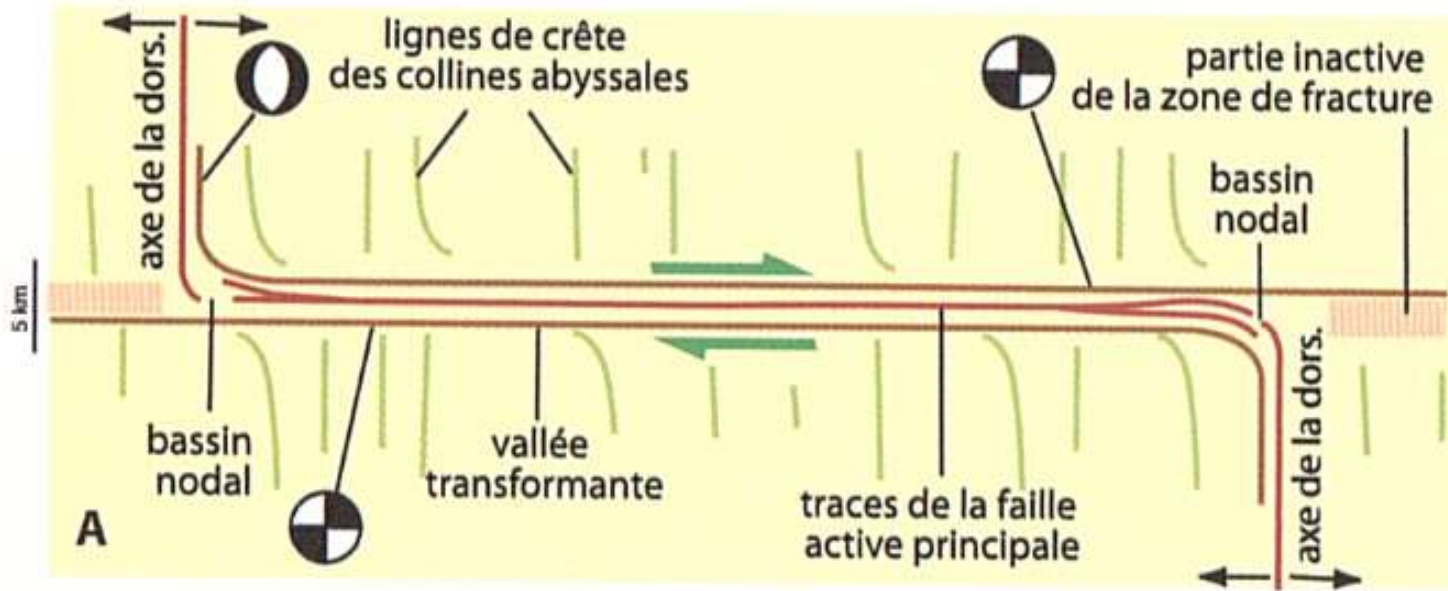




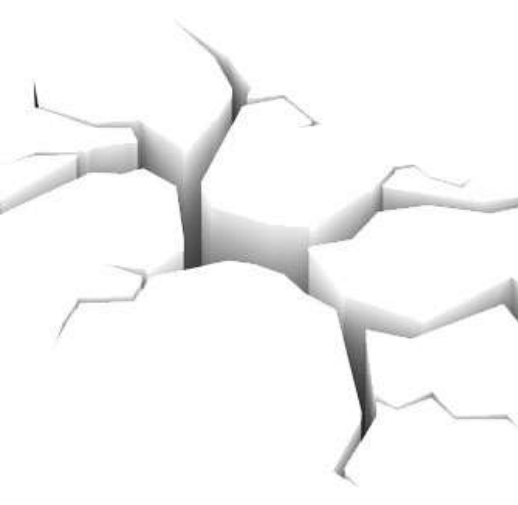
Répartition des plus grands séismes mondiaux

Les plus forts séismes sont liés à la subduction péri-Pacifique et à la collision himalayenne. Les chiffres se rapportent à la caractérisation des séismes donnée dans *Éléments de géologie* (Dunod, 2011).

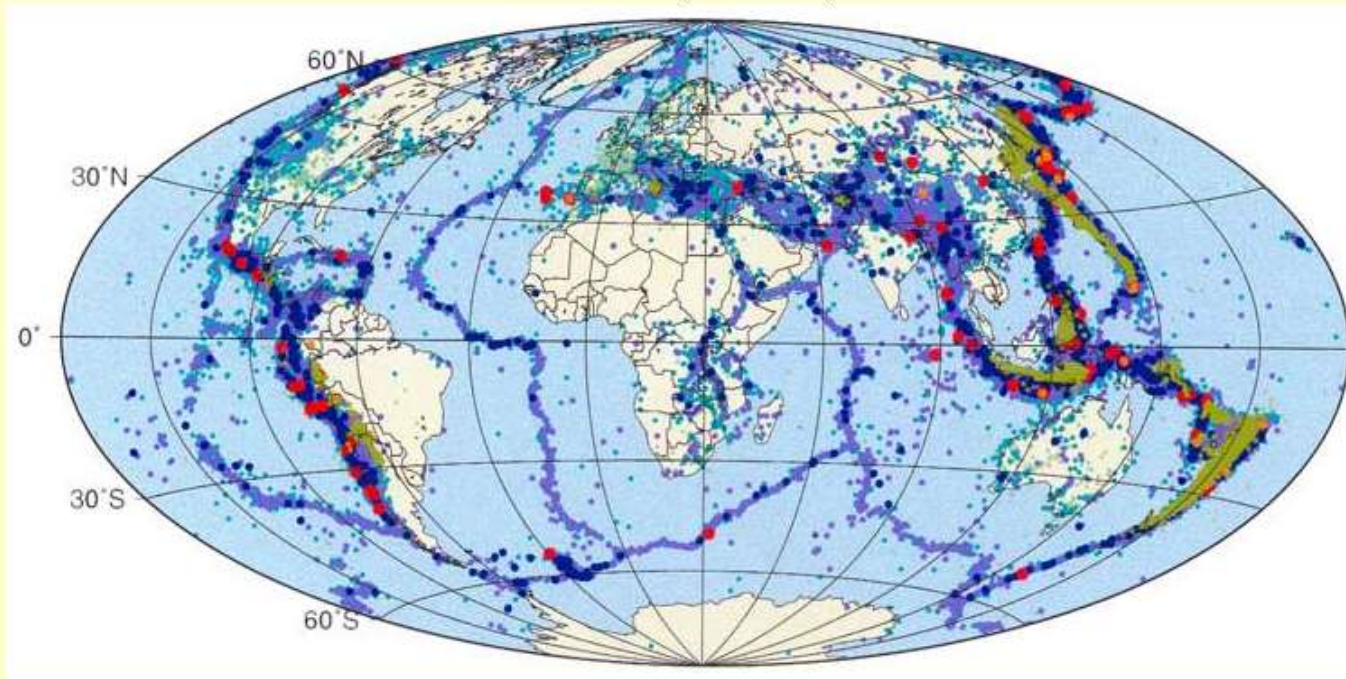




2.5. La distribution mondiale des séismes et leur mécanisme au foyer renseignent sur la géodynamique globale

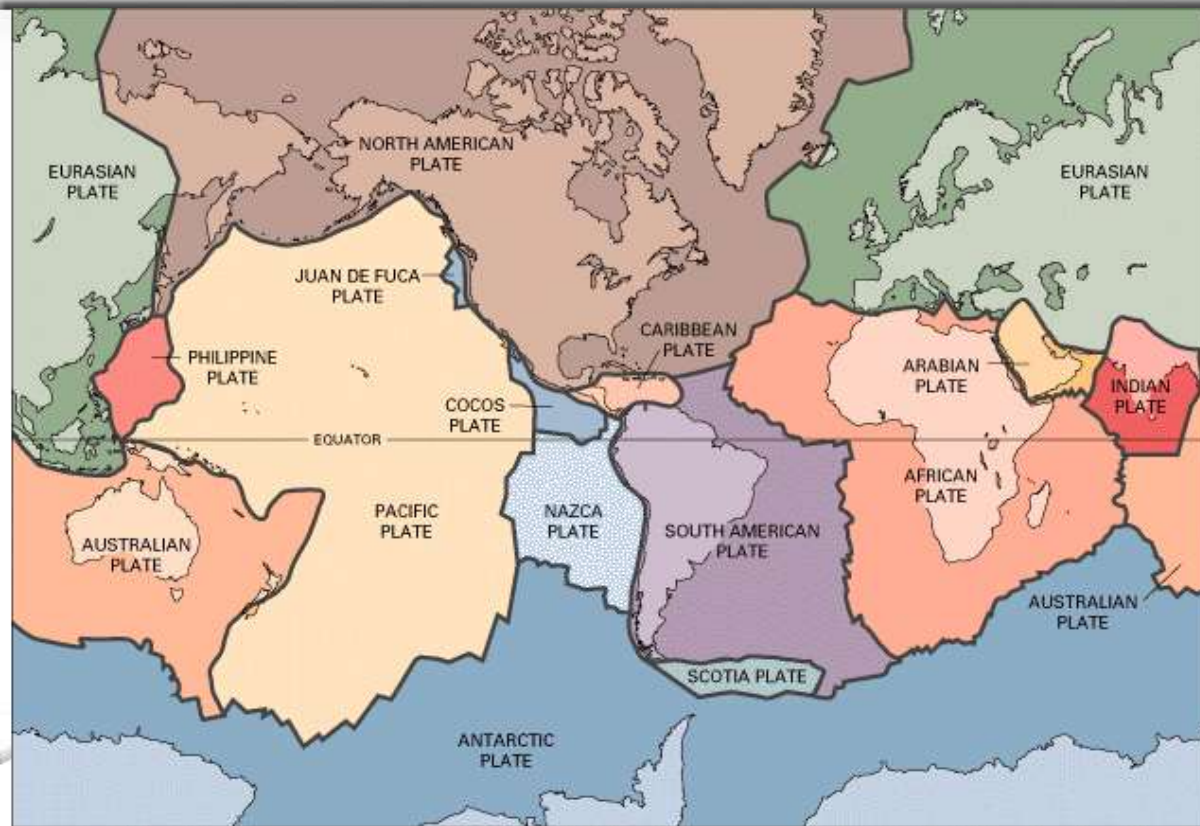


Sismicité Mondiale (NEIC) 1928 - 1998

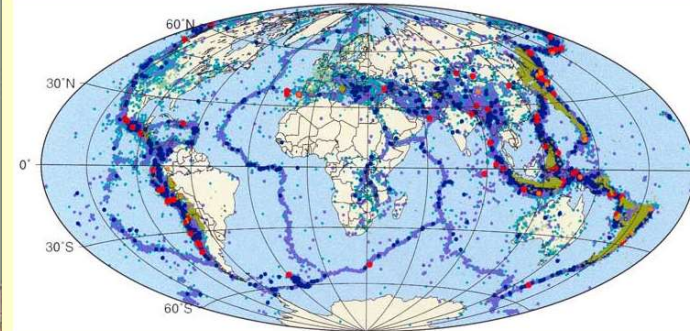


| Légende | |
|---------|---------------------|
| • | Magnitude < 3 |
| • | 3 ≤ Magnitude < 5 |
| • | 5 ≤ Magnitude < 6 |
| • | 6 ≤ Magnitude < 7 |
| • | 7 ≤ Magnitude < 8 |
| • | Magnitude ≥ 8 |
| ★ | Profondeur > 300 km |

La sismicité délimite les plaques lithosphériques



Sismicité Mondiale (NEIC) 1928 - 1998



| Légende | |
|---------|---------------------|
| • | Magnitude < 3 |
| • | 3 ≤ Magnitude < 5 |
| • | 5 ≤ Magnitude < 6 |
| • | 6 ≤ Magnitude < 7 |
| • | 7 ≤ Magnitude < 8 |
| • | Magnitude ≥ 8 |
| ★ | Profondeur > 300 km |



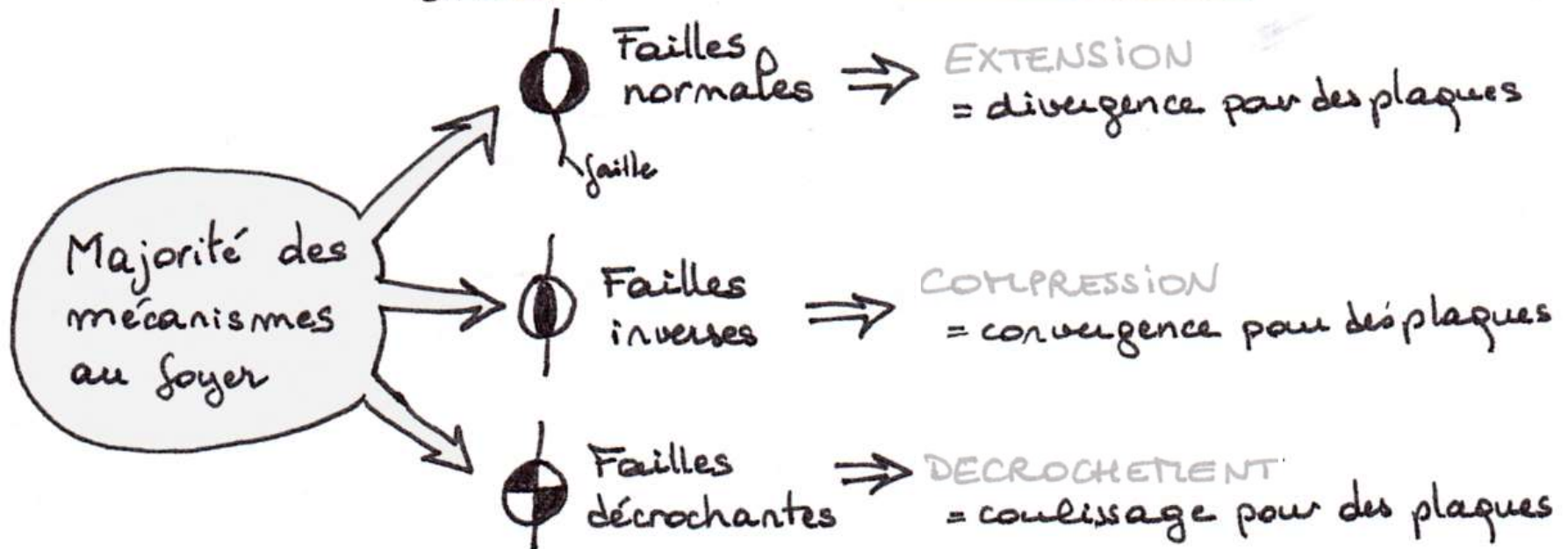
Mécanisme au foyer et géodynamique?

L'ensemble des mécanismes au foyer d'une région permet de caractériser le contexte tectonique

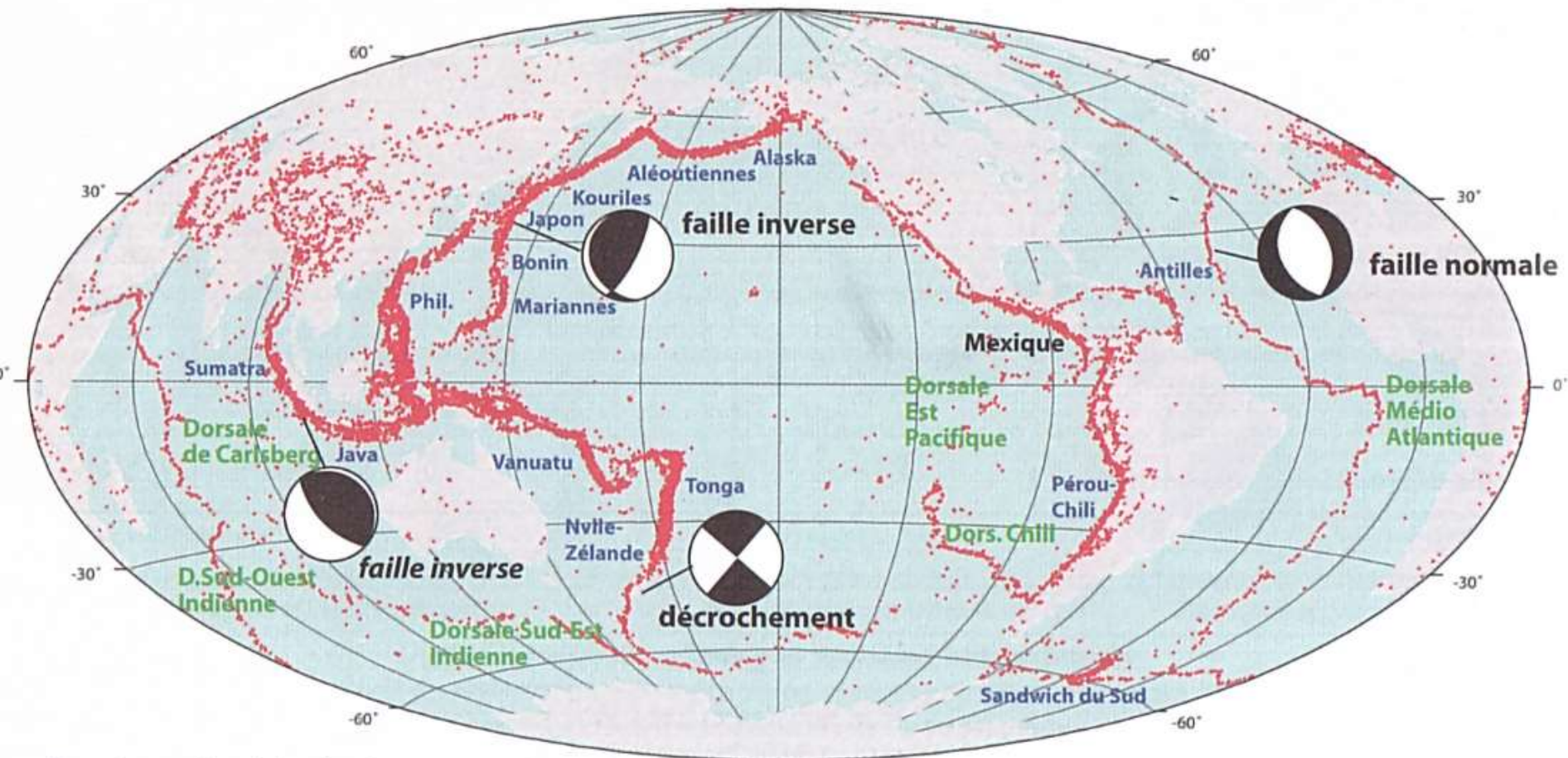
CARTE

en carte:

CONTEXTE



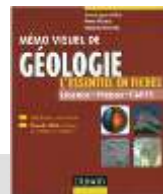
La **sismicité globale** se distribue le long des frontières de plaques où se concentre l'essentiel de la déformation de la lithosphère. Les mécanismes au foyer des séismes permettent de définir les trois types de frontières de plaques : en **convergence**, en **divergence** ou en **coulissage**.



bleu : fosses de subduction (convergence)

vert : dorsales océaniques (divergence)

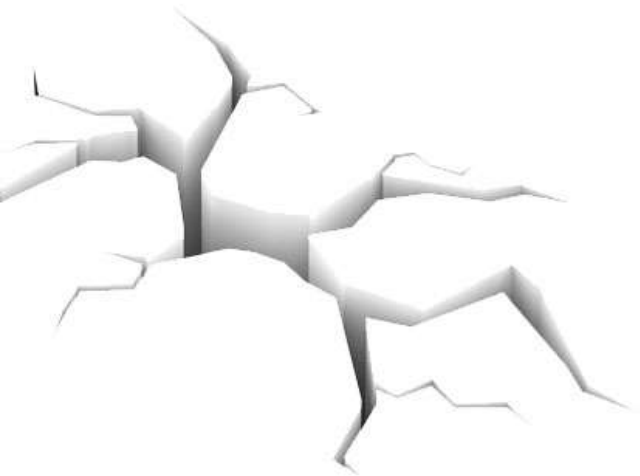
Mécanismes au foyer caractéristiques des trois types de frontières de plaques



2.6. La géodésie spatiale, en évaluant les déplacements instantanés permet de préciser l'aléa

Il n'y a de séisme que si le glissement entre plaques est bloqué temporairement. On parle de déficit de glissement.

Comment savoir
si c'est le cas?

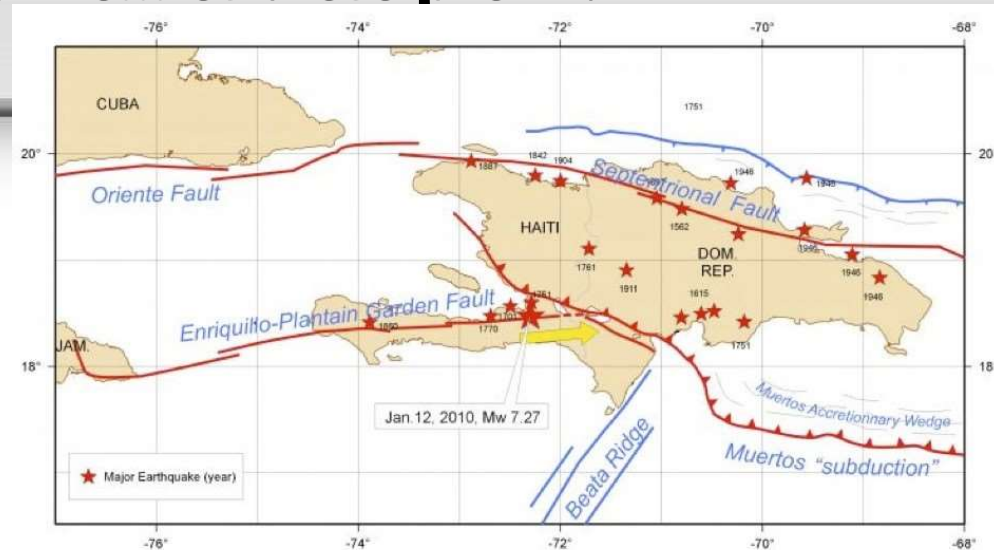


26.1. le GPS permet d'identifier les failles ayant un déficit de glissement

Le séisme d'haiti était prévisible... et a été prévu!

par Daniel Mathurin

Pourquoi, à magnitude égale, le risque est-il plus élevé en Haïti qu'au Japon?



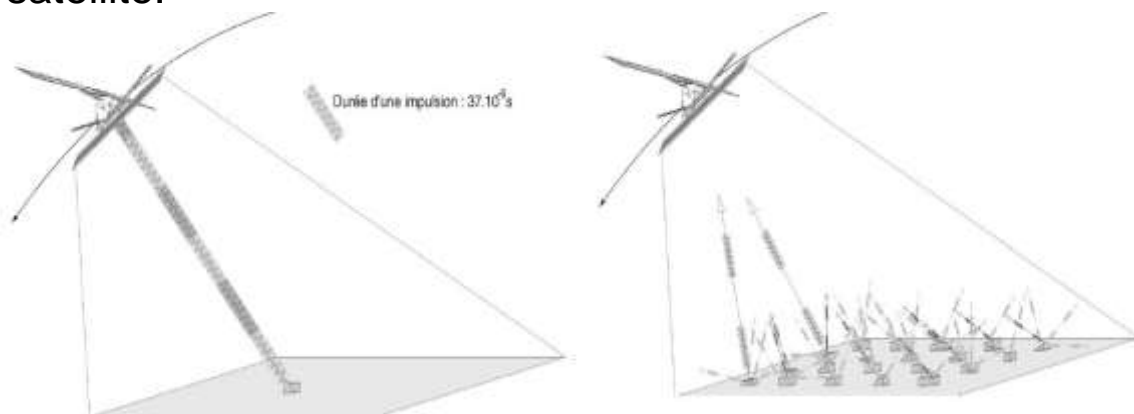
- depuis 2003 le blocage des failles,
- une déformation élastique s'accumulait alentours. C'est à dire que l'île d'Hispaniola subissait un cisaillement à la vitesse d'environ 17 mm/an, dont 7 mm/an le long de la faille d'Enriquillo-Plantain Garden.
- Le dernier séisme majeur dans sur cette faille dans la région de Port au Prince ayant eu lieu en 1751, elle avait donc accumulé un **déficit de mouvement total d'environ 1,8 mètres** (7 mm/an pendant 250 ans) depuis ce séisme. Il avait été estimé que si ce déficit était rattrapé par un séisme, cela correspondrait à un événement de magnitude de l'ordre de 7.2. (=magnitude réelle du séisme de 2010)

Sur cette carte de la tectonique des plaques mondiales (GPS),
déterminez le type de faille à Haiti

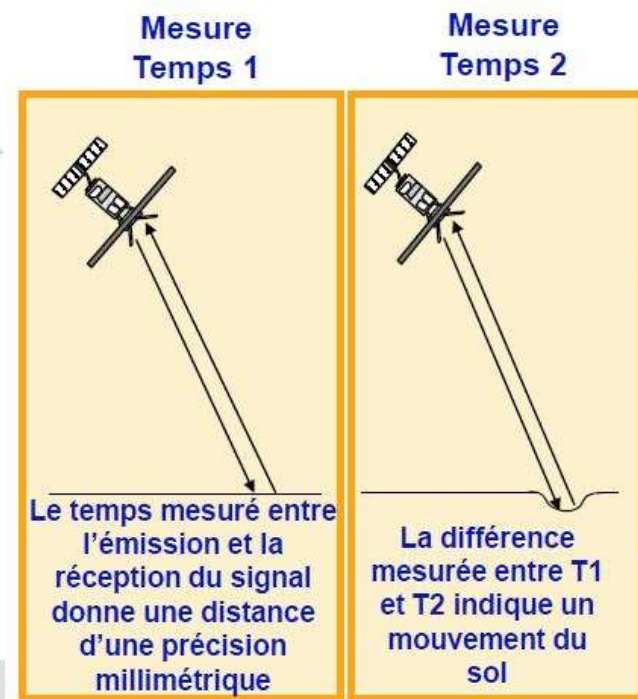


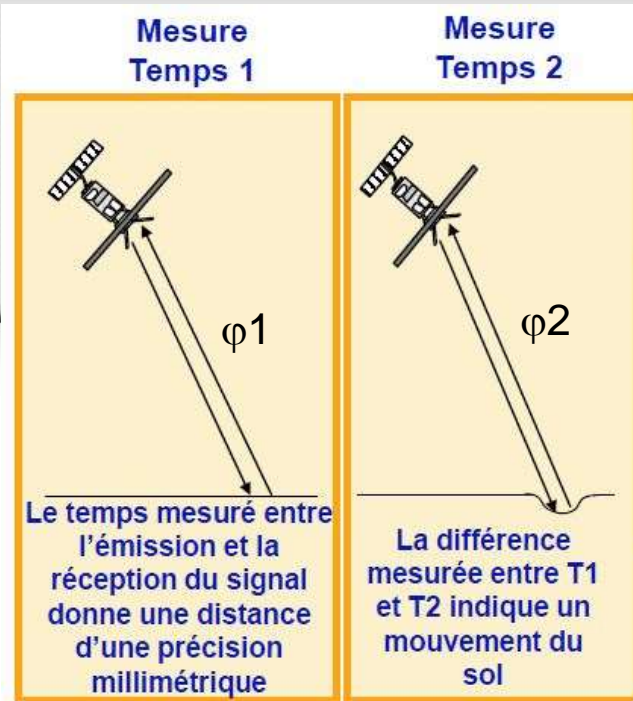
26.2. L'interférométrie radar mesure les microglissements et toutes les déformations du sol

- Le principe de base de l'imagerie RADAR repose sur l'émission vers une cible (le sol) d'une onde RADAR artificielle ($F=5.3$ GHz, $\lambda = 5.66$ cm dans le cas d'ERS), sa rétrodiffusion par le sol (avec décalage de phase du signal), puis sa réception par le satellite.

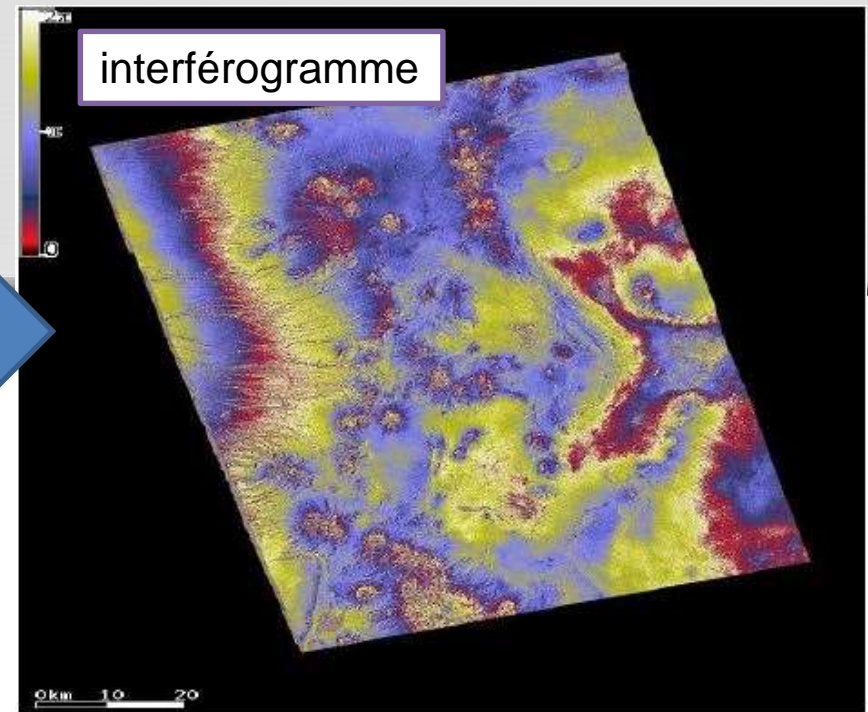
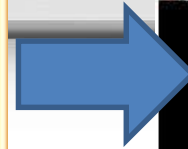


- Le radar enregistre deux images de la même région à des moments différents.
- En superposant les images, si il y a eu des changements d'altitude du sol, il y a des **franges d'interférence**.





$\varphi_1 - \varphi_2$



En pratique, pour que l'interférence radar soit utilisable, il faut

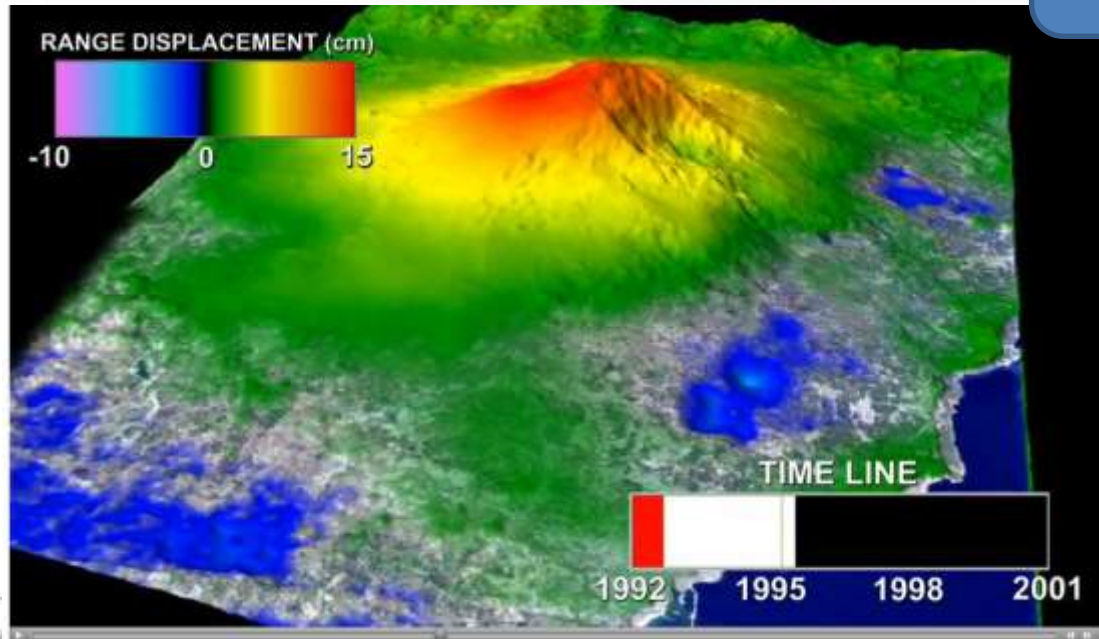
1. que le **sol soit nu** (sans végétation, car la croissance de la végétation cause une interférence)
2. qu'il n'y ait **aucune couverture nuageuse** (qui renvoie le signal radar) lors des 2 passages
3. Que **la zone soit couverte** par un satellite radar (d'où l'intérêt de l'avion). Le satellite doit passer juste au dessus de la zone d'intérêt car la résolution latérale est très mauvaise!
4. Que quelqu'un pense à étudier la zone = **qu'il ait déjà eu un aléa géologique** dans la zone, ou qu'on soit sur le prolongement d'une faille qui est sismique ailleurs.

Voir simultanément les déformations et l'interférométrie radar



(NASA en avion sur l'Etna)

Pour comprendre le principe



vidéo

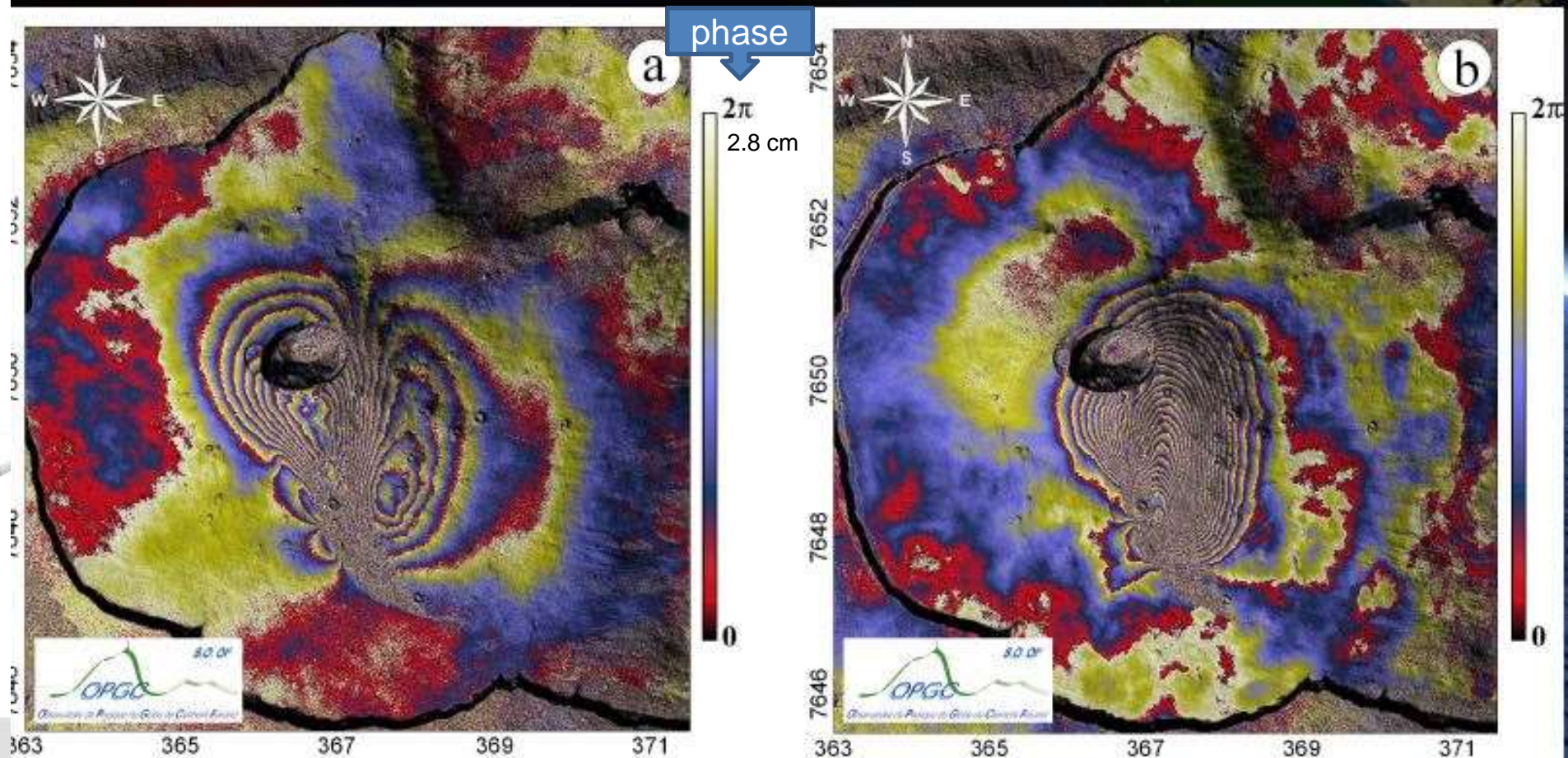
http://photojournal.jpl.nasa.gov/archive/visualizations/PIA13201_Etna_INSAR.mov

L'interférométrie radar est une analyse quantitative des déformations



Chaque frange interférométrique représente $\lambda/2$ cm de changement de distance entre le satellite et le sol, soit pour ERS = 2.8 cm.

Déformations liées à l'éruption d'octobre 2010 du Piton de la Fournaise, données TSX

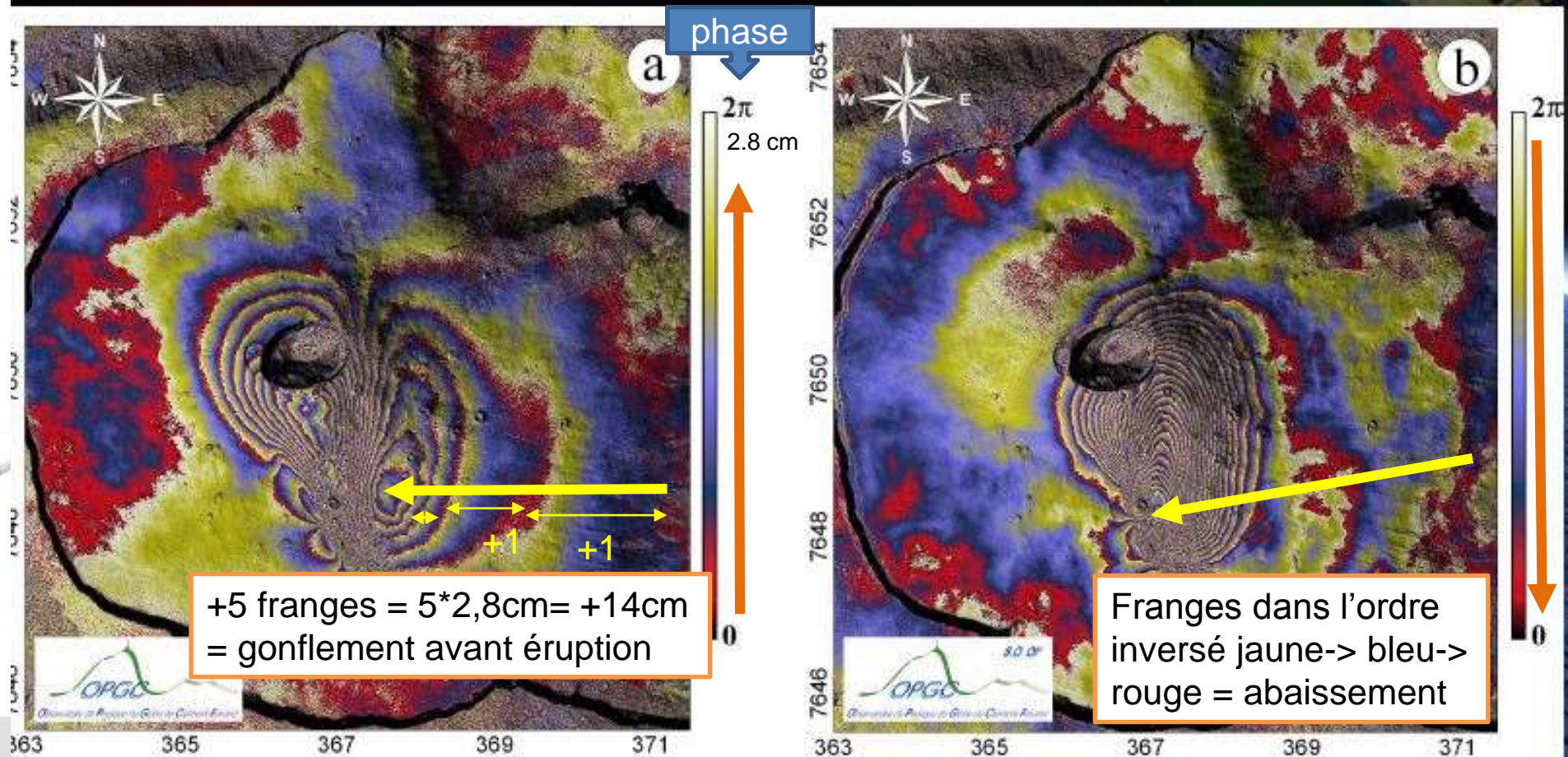


L'interférométrie radar est une analyse quantitative des déformations



Chaque frange interférométrique représente $\lambda/2$ cm de changement de distance entre le satellite et le sol, soit pour ERS = 2.8 cm.

Déformations liées à l'éruption d'octobre 2010 du Piton de la Fournaise, données TSX



Et dans le cas d'une faille?

- Si la faille a joué :
 1. Faille à rejet vertical -> décelé
 2. Faille décrochante -> comme le sol n'est pas plat, on voit le déplacement des bosses et des creux
- => **on peut mesurer des petits déplacements, de l'ordre de centimètre, si on est dans l'axe de déplacement du satellite**
- Même si la faille n'a pas joué, le sol se déforme, et on peut détecter des mouvements lents -> si leur amplitude est la même que celle des plaques -> pas de risque

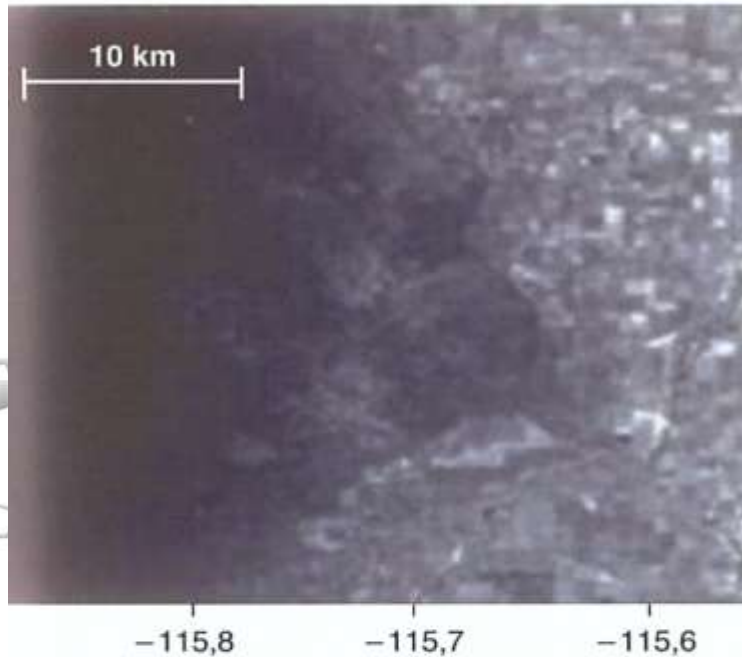
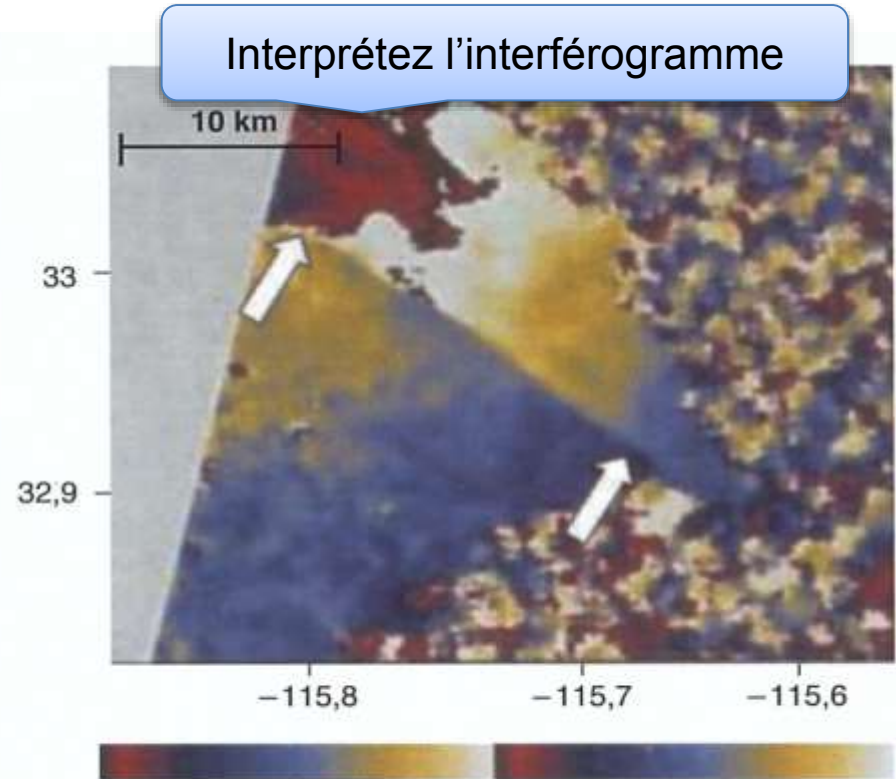


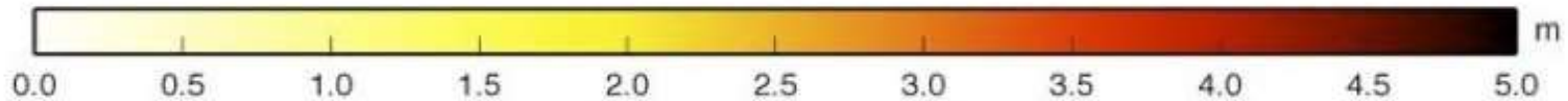
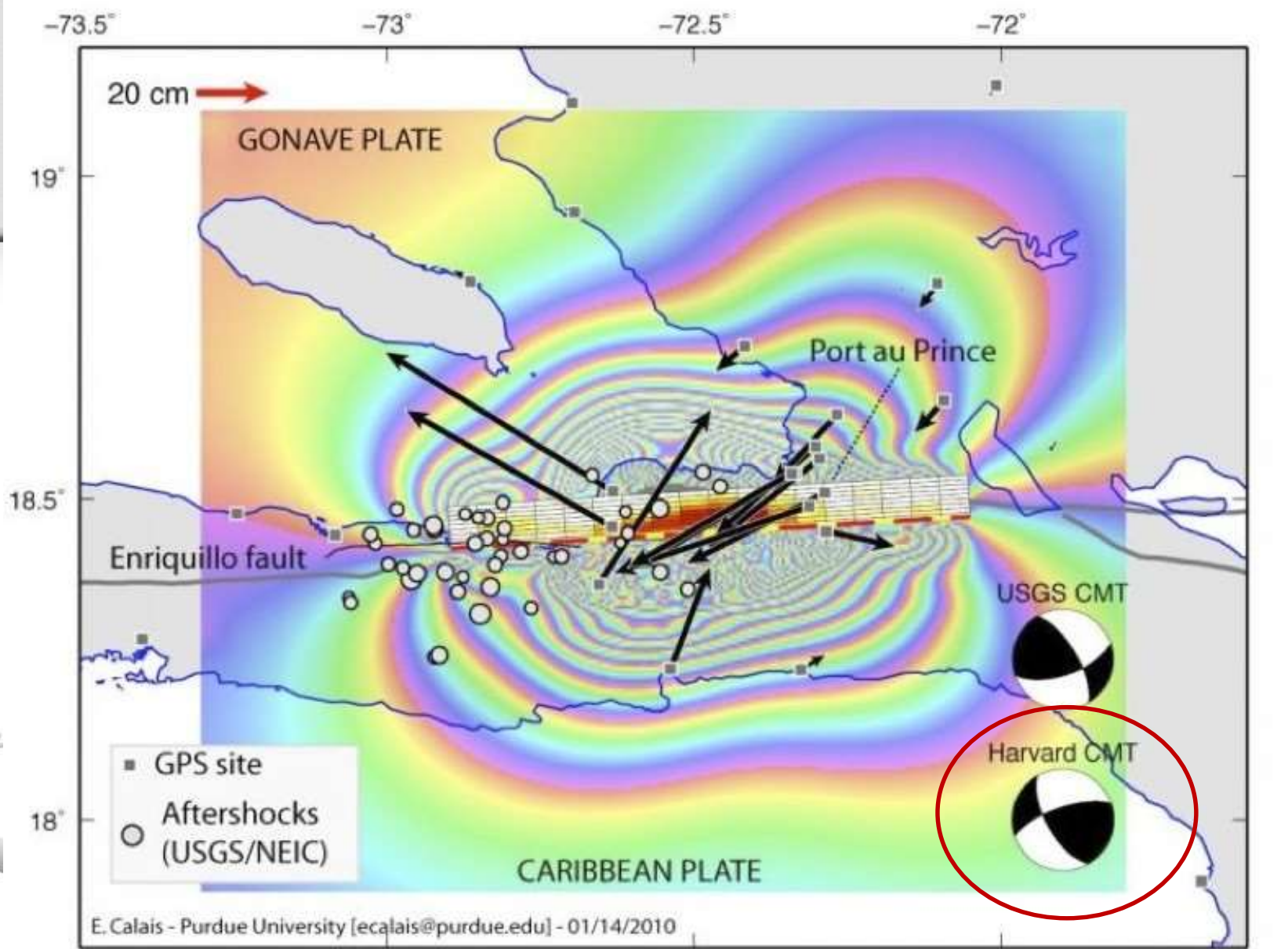
Image radar simple



Interprétez l'interférogramme

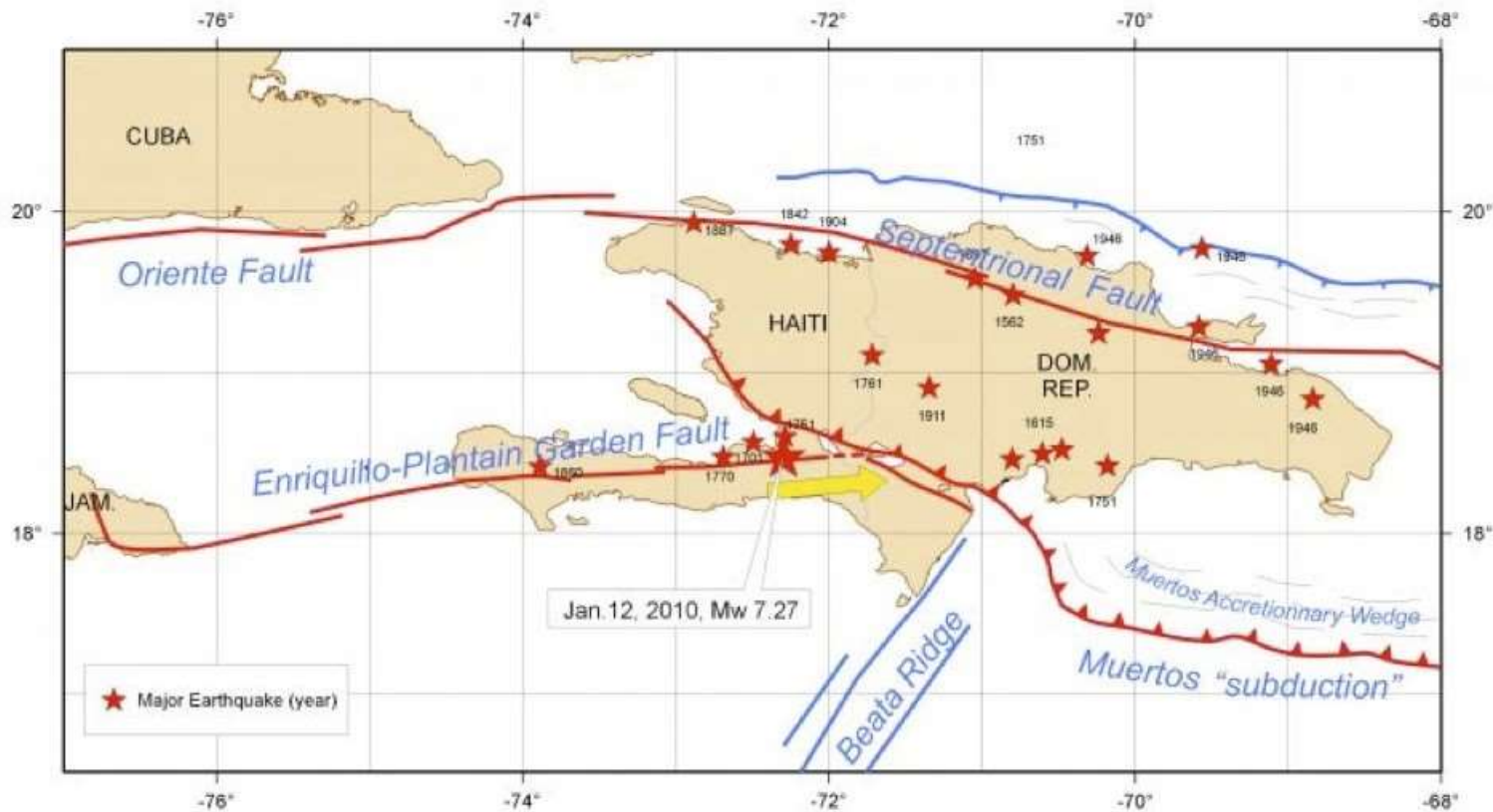
Mise en évidence d'une rupture sur un interférogramme.

Haiti



Slip distribution from G. Hayes (USGS/NEIC)

Un fort séisme ne fait pas toujours disparaître l'aléa



Si le récent séisme (2010) a libéré une grande partie de la tension accumulée sur cette partie de la faille Enriquillo, il semble qu'une autre portion, à l'est de l'épicentre et directement adjacente à Port-au-Prince, n'ait que peu bougé, selon l'USGS (GPS).

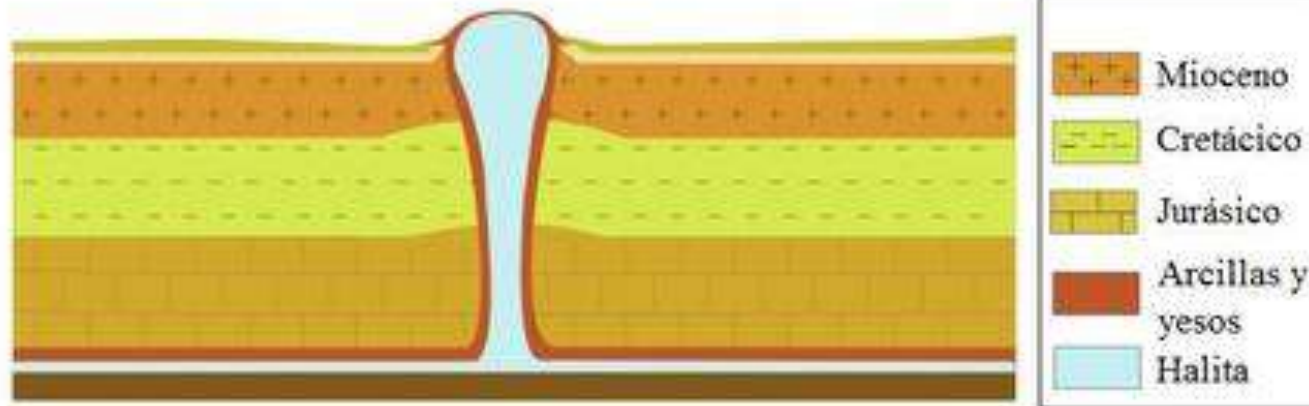


L'interférométrie radar peut permettre de prévoir l'aléa



Le problème : L'agrandissement de la doline*de Bayou Corne, située dans une zone de marais en Louisiane

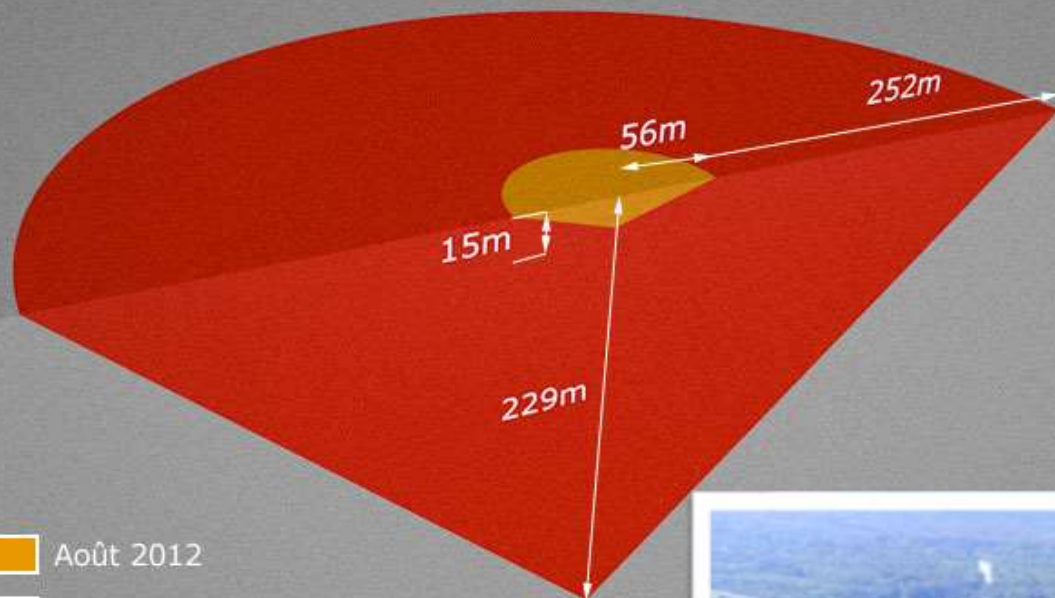
- causée par l'effondrement d'une des parois latérales d'un dôme salin exploité pour fabriquer de la saumure par une compagnie texane (injection d'eau pour dissoudre le sel + puits d'extraction de gaz abandonné en 2011).



- Le gouffre, comblé par de l'eau boueuse, s'est progressivement. Il mesure aujourd'hui près de 20 hectares et continue de s'agrandir, ce qui oblige les populations locales à se déplacer.

Vidéo d'un affaissement :

<http://youtu.be/yRhesBaRCME>



■ Août 2012

■ Fin 2013

- Effondrement le 3 août 2012, après plusieurs semaines de tremblements de terre mineurs et d'émanation de bulles de gaz naturel dans la zone.
- 350 personnes ont été évacuées
- **Prévisible ou pas?**

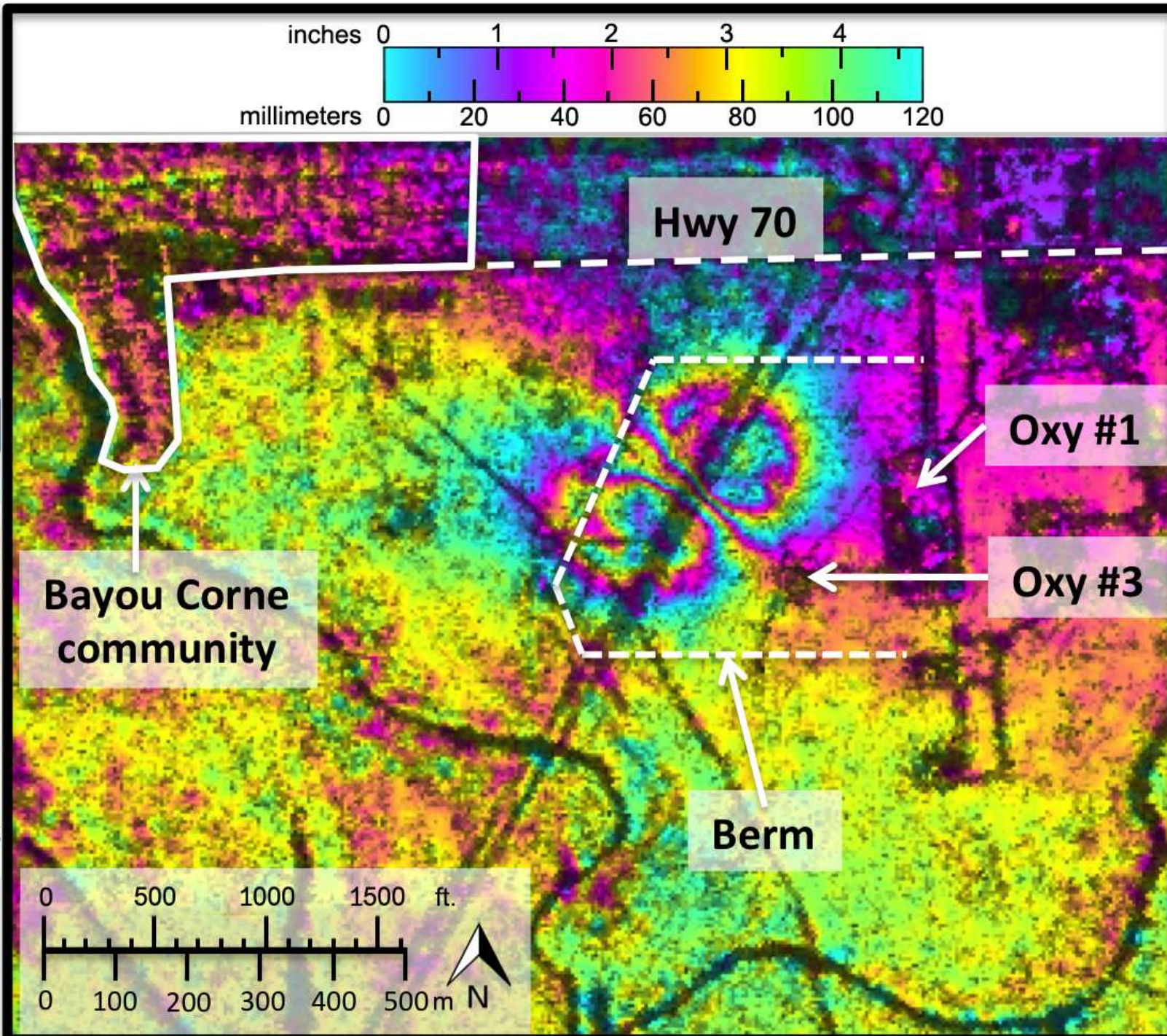


images radar prises entre juin 2011 et juillet 2012 par un radar dit "à synthèse d'ouverture" (InSAR) sur un avion de la NASA.

interprétez



Exercice concours



images radar prises entre juin 2011 et juillet 2012 par un radar dit "à synthèse d'ouverture" (InSAR) sur un avion de la NASA.

interprétez



Exercice concours

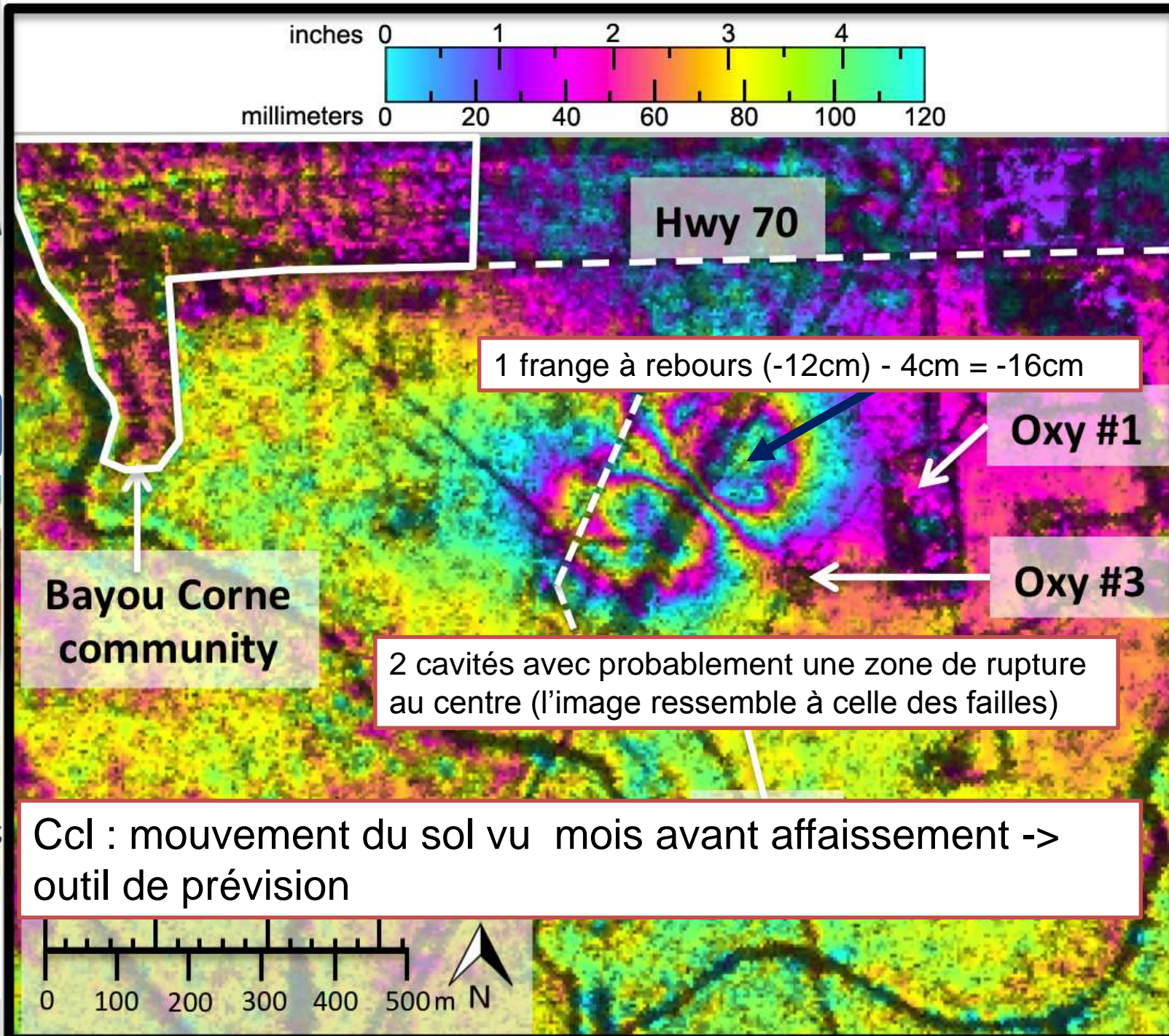
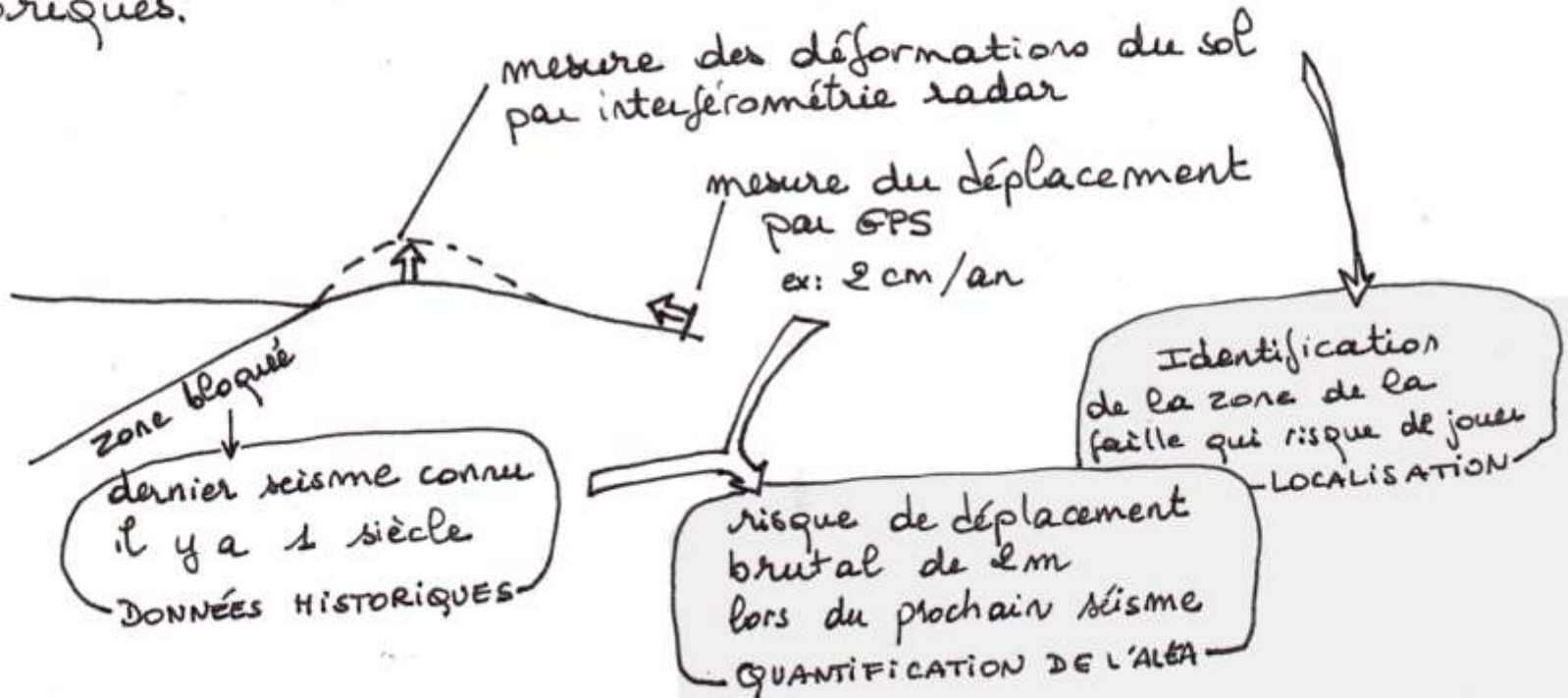




Schéma bilan

La géodésie spatiale mesure les déplacements instantanés du sol, et précise l'aléa par comparaison avec les données historiques.



9. L'interférométrie radar permet de

- a. mesurer la magnitude d'un séisme en temps réel
- b. évaluer les petits glissements le long des failles
- c. tracer précisément le trajet d'une faille

10. Les séismes sont

- a. la cause d'autres aléas comme des coulées de boues ou des tsunamis
- b. la libération soudaine de l'énergie accumulée dans une zone de convergence ou de coulissement où le mouvement est bloqué depuis longtemps
- c. totalement imprévisibles
- d. toujours un risque pour les populations



Vous n'avez pas eu 10/10 au quizz du 1^{er} coup?
C'est normal, la mémoire immédiate est imparfaite.
Le quizz est un support de la mémoire et de la motivation
(pas une évaluation)
L'objectif est d'avoir 10 après avoir appris ce cours

À RETENIR



Libération
de l'énergie
accumulée

- Magnitude
- Accumulation de déformations élastiques entre deux séismes
- Dégâts par ondes L, tsunamis et glissements de terrain

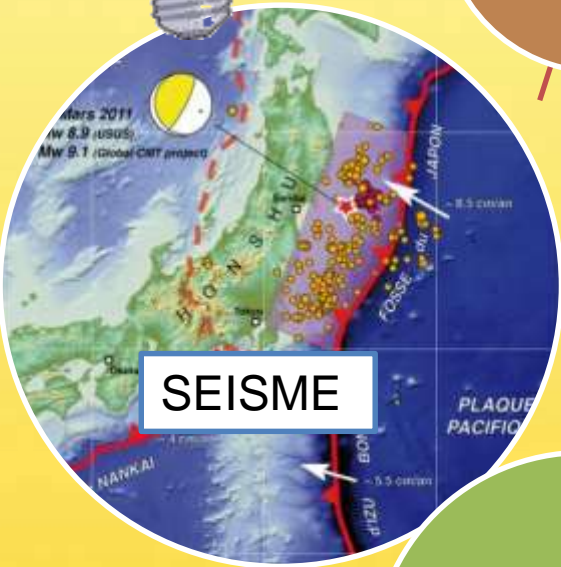
Mécanisme
au foyer

- Permet de déterminer le type de faille,
- Avec beaucoup de mécanismes, le contexte tectonique
- À l'échelle mondiale, donne la nature de la frontière des plaques

SEISME

Risque

- Un aléa qui en entraîne d'autres plus graves (tsunamis, glissements de terrains, lahars)
- Nombreuses études pour prévoir l'aléa (géodésie spatiale, sismographes, géographie, délai depuis le dernier séisme)
- Difficulté de prévoir le moment -> évacuations



3. Les objets de la déformation



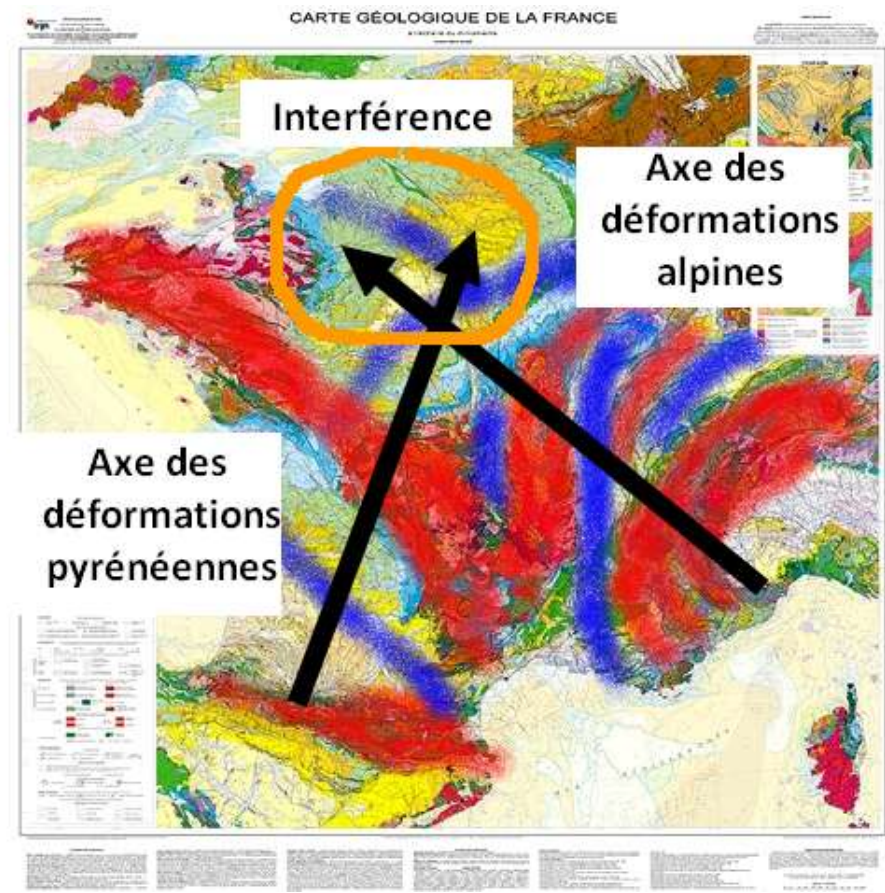
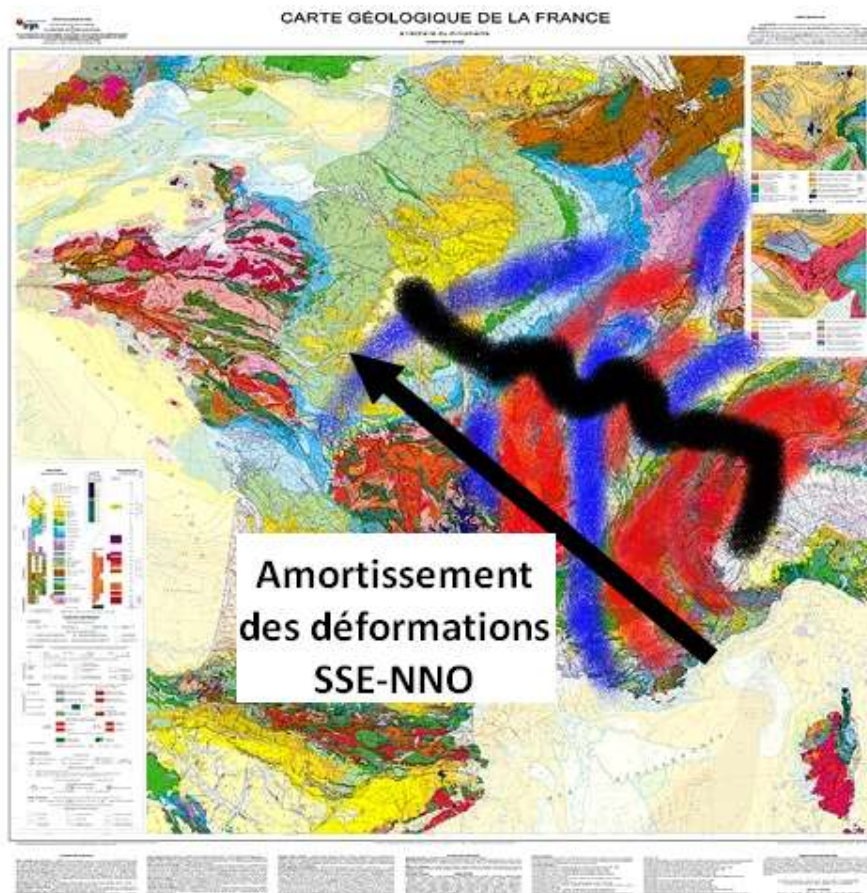
La lithosphère présente des déformations à différentes échelles, qui ont chacun une interprétation tectonique.



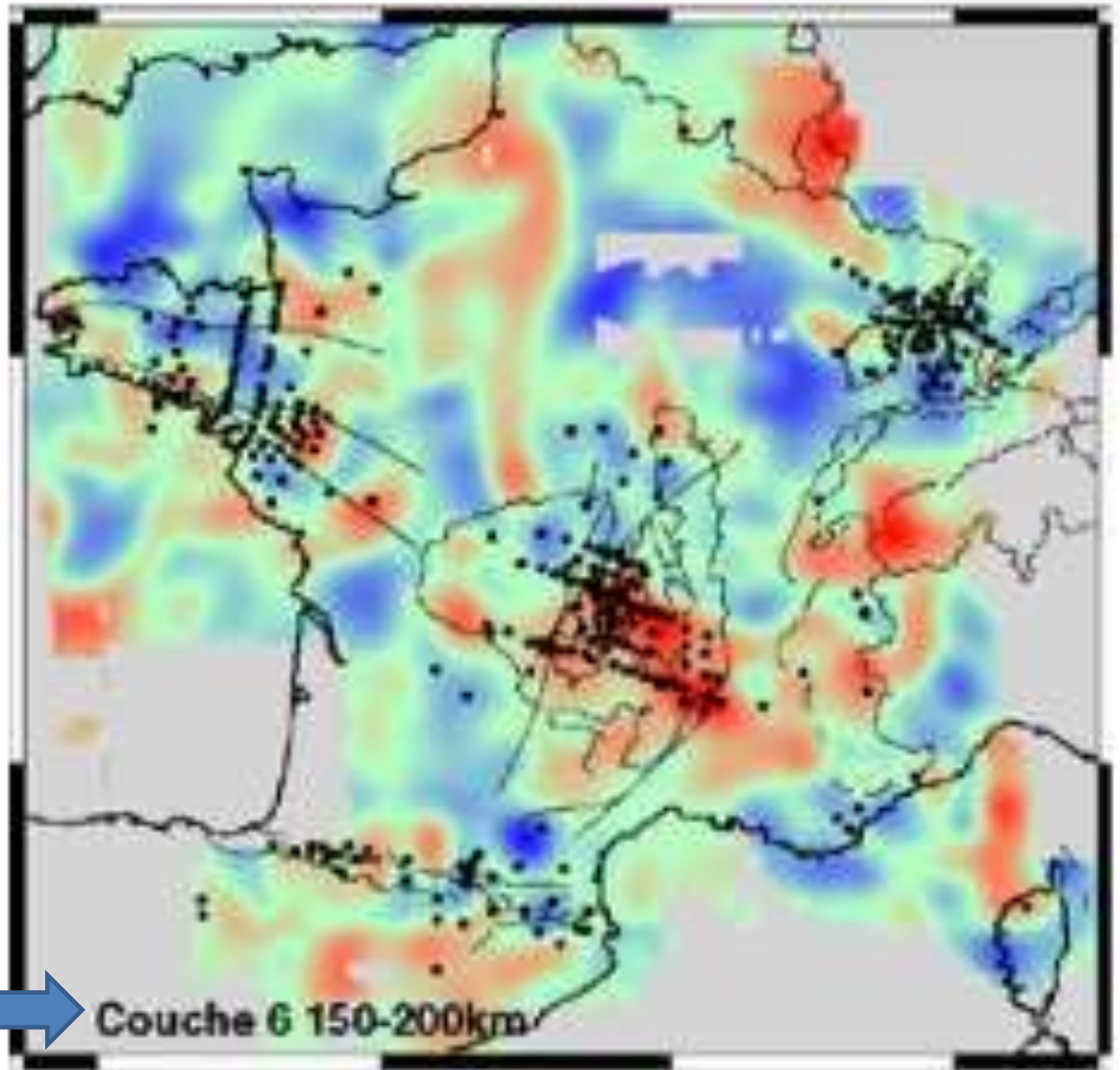
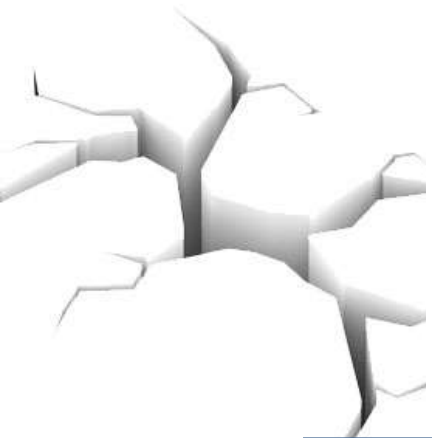
Comment interpréter les déformations de la lithosphère à différentes les échelles?
Y at-il des relations entre des déformations de 2 échelles différentes?

3.1. À l'échelle de la lithosphère, on peut observer un bombement ou une flexuration

Les Alpes et les Pyrénées, par leur formation, ont déformé la lithosphère



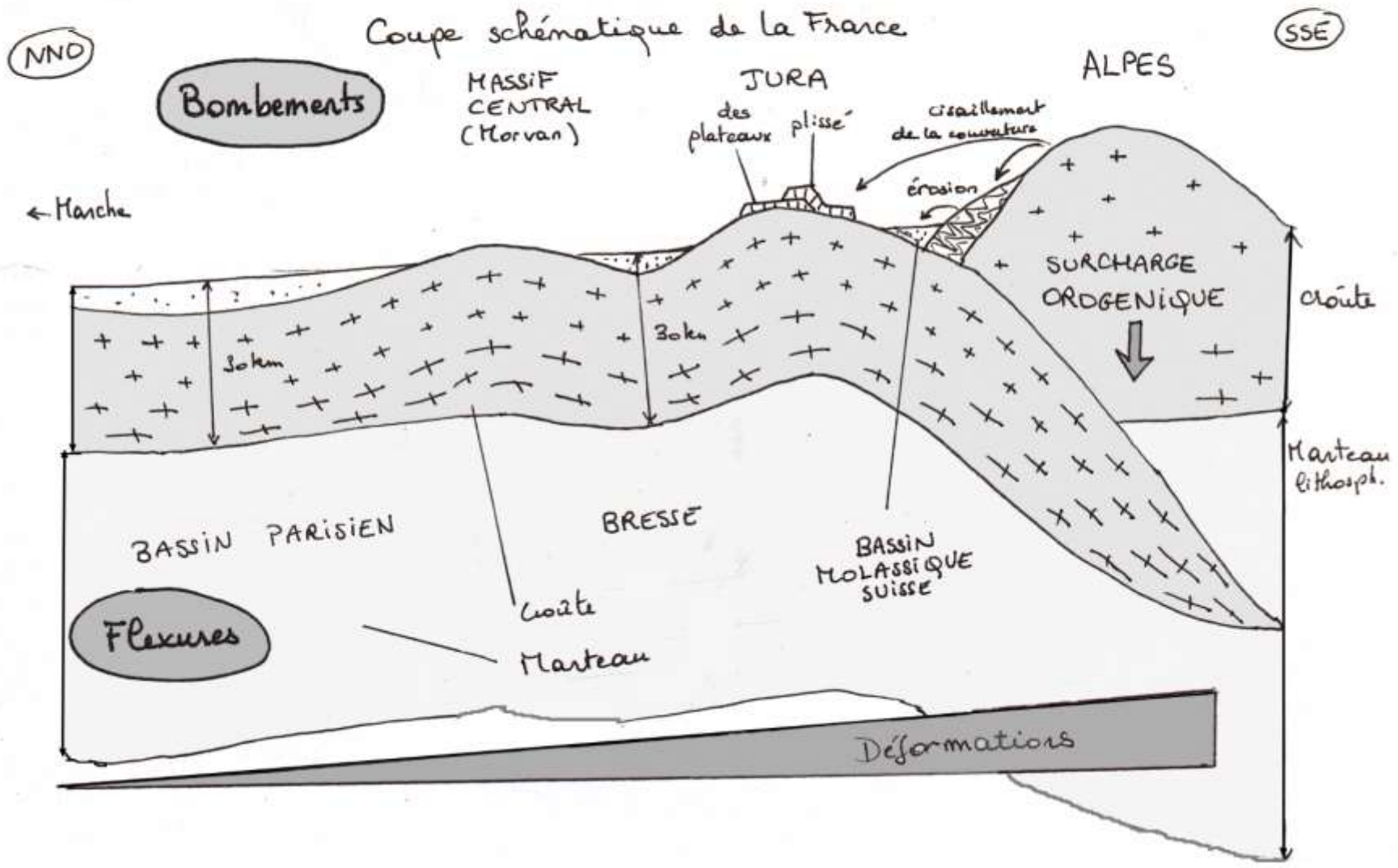
Flambage lithosphérique



Couche 6 150-200km



La lithosphère n'est pas complètement rigide et présente à grande échelle des bombements et des flexures



3.2. à l'échelle de la région, on peut voir des chevauchements, charriages, fossés



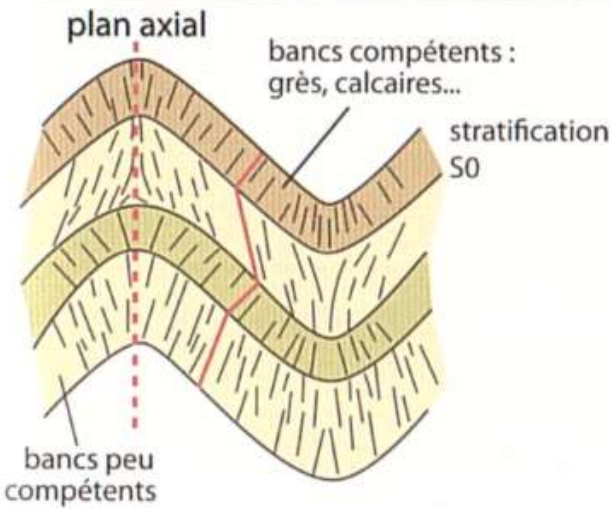
3.3. à l'échelle de l'affleurement,
on peut observer des failles et des plis



3.4. A l'échelle des roches, on peut observer de la schistosité, des figures C-S et des linéations, des fentes de tension et des joints stylolithiques,



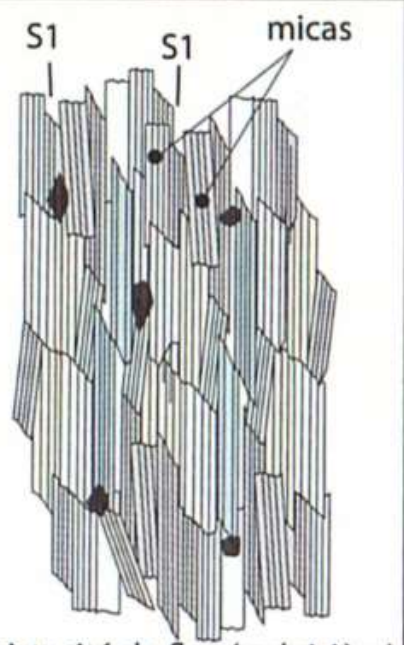
Lors de la déformation, les roches métamorphiques acquièrent des structures planaires pénétratives d'origine purement mécanique (fissilité) ou liées à des recristallisations métamorphiques conduisant à une différenciation minéralogique.



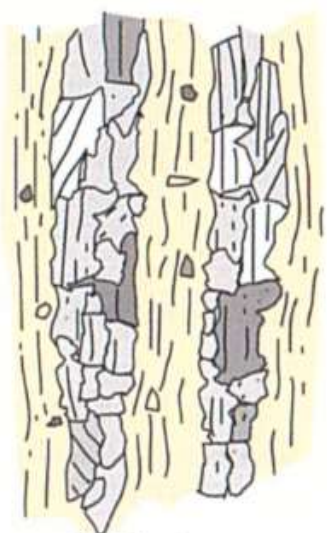
Schistosité espacée (ou de fracture)
Proche du plan axial des plis
(disposition en éventail divergent
sur les flancs du pli et réfraction)



Schistosité de crénulation



Schistosité de flux (ardoisière)



Foliation
Fissilité + litage dû à
des alternances de lits
de composition
minéralogique variable

Schistosité : plans préférentiels de débit de la roche en feuillets

3.4. à l'échelle des minéraux, on peut observer la schistosité, des ombres de pression et des microplis



DES DÉFORMATIONS EXISTENT À TOUTES LES ÉCHELLES

Minéraux (lame)

Fracture de minéraux

Schistosité

Ombre de pression

Microplis

Roche (objet)

Fentes de tension

Jointes stylolithiques

Schistosité

Linéations

Figures C-S

Affleurement (photo & carte)

Faille (mylonite et miroir de faille)

Plis

Région (carte)

Chevauchement

Fossé d'effondrement


Charriage (nappe)

Lithosphère

Grandes failles

Bombement

Flexuration



Savoir reconnaître et interpréter ces déformations

En italique, les déformations continues (plastiques)



**iDEE
FORTE**

A RETENIR

Mécanismes



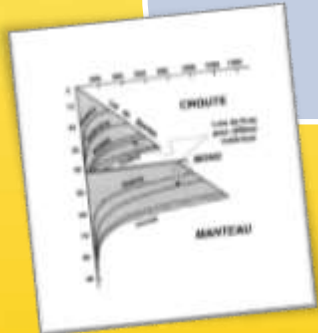
Rhéologie de labo

- + on voit la déformation se faire
- + on connaît tous les paramètres
- > lois physiques de déformation des roches et/ou modèles
- fluage, où le temps est prépondérant (Ma et non mois!)
- Hypothèses simplificatrices

Tectonique de terrain

- + observation des déformations réelles:
- sur des objets complexes qui sont des associations de roches différentes, traversées de façon hétérogène par des fluides
- À grande échelle de temps
- Mécanismes inconnus car la déformation est finie (sauf séismes)

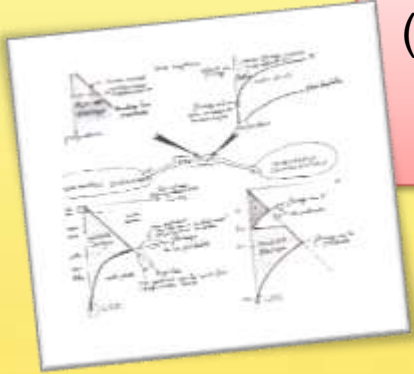
Modélisation plus réaliste





À RETENIR

Une roche a en surface un comportement cassant (sauf les roches très riches en minéraux en feuilletés), mais en profondeur elle se déforme de façon continue et proportionnelle au temps (fluage).



Le comportement cassant de toutes les roches est décrite par la même loi (de Byerlee), mais chacune a sa loi de fluage.

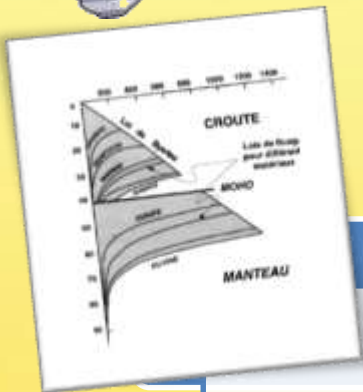
Cela fait que la croûte océanique a un comportement homogène cassant, alors que la croûte continentale supérieure est cassante et l'inférieure ductile.

Au sein d'une lithosphère, on distingue des niveaux cassants et des niveaux ductiles, qui peuvent se dissocier (découplages), notamment lors de la formation des chaînes de montagnes.

À RETENIR



La définition des plaques lithosphériques est une définition mécanique



Verticalement

Horizontalement :

Une lithosphère est globalement cassante, sur un manteau solide hyperductile (LVZ). (= se déforme même quand les contraintes sont quasiment isotropes)

Les limites de plaque sont les zones sismiques, il n'y a quasiment pas de déformation sismique au sein de la plaque, mais il peut y avoir des déformations élastico-plastiques (bombements et flexure).