

Déformation ductile, continue



Pli du chapeau de gendarme (Jura, France)

Déformation cassante, discontinue



Faïlle normale (Vallée de la Mort, Californie)

Fig. 1. Déformation continue et déformation discontinue. ★★ [2]

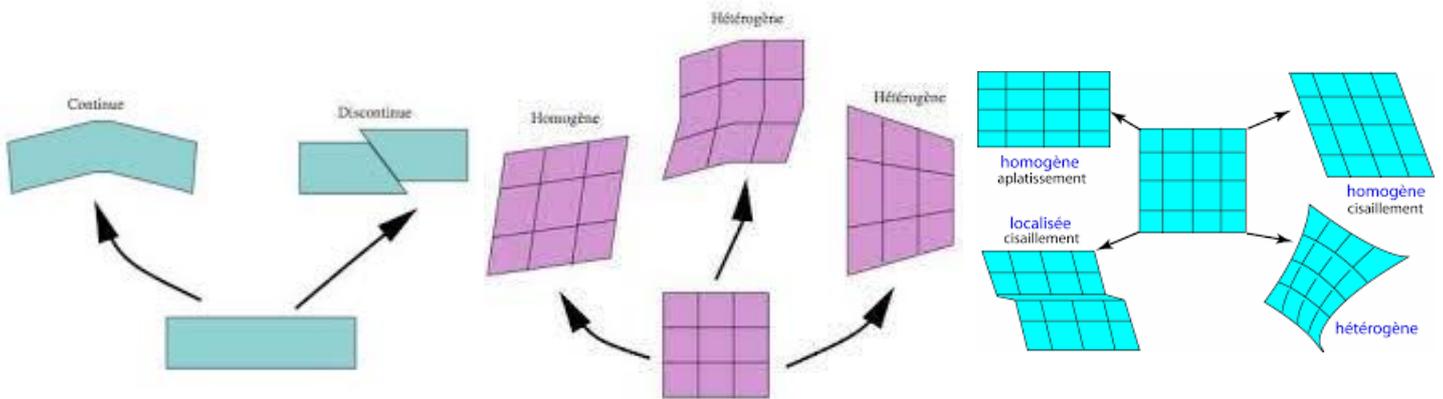
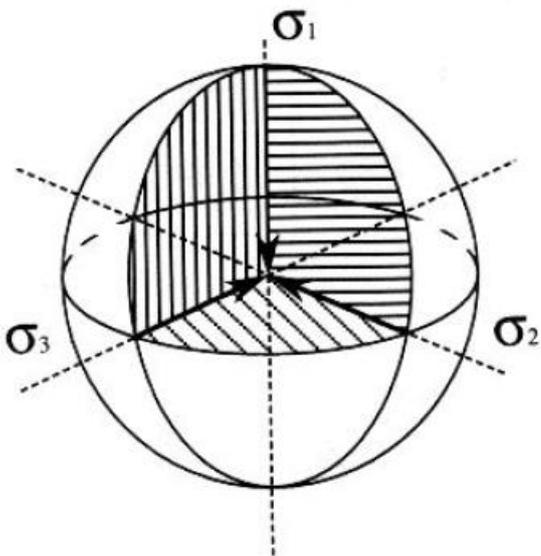
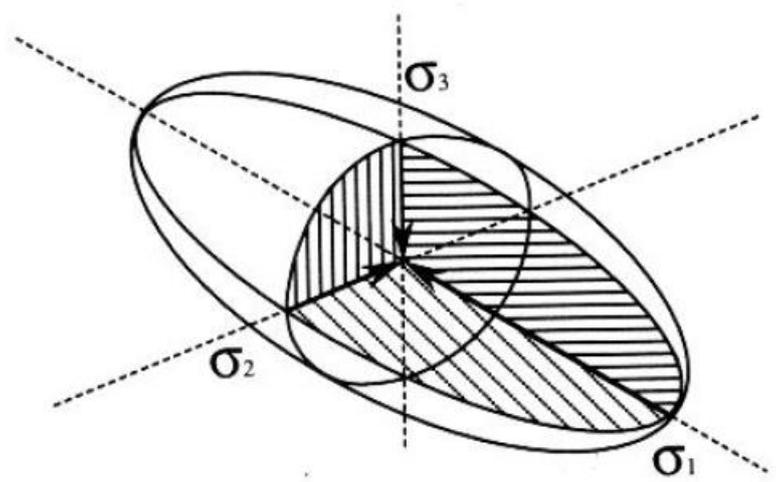


Fig. 2. Différents types de déformation. ★★★ [4][5]

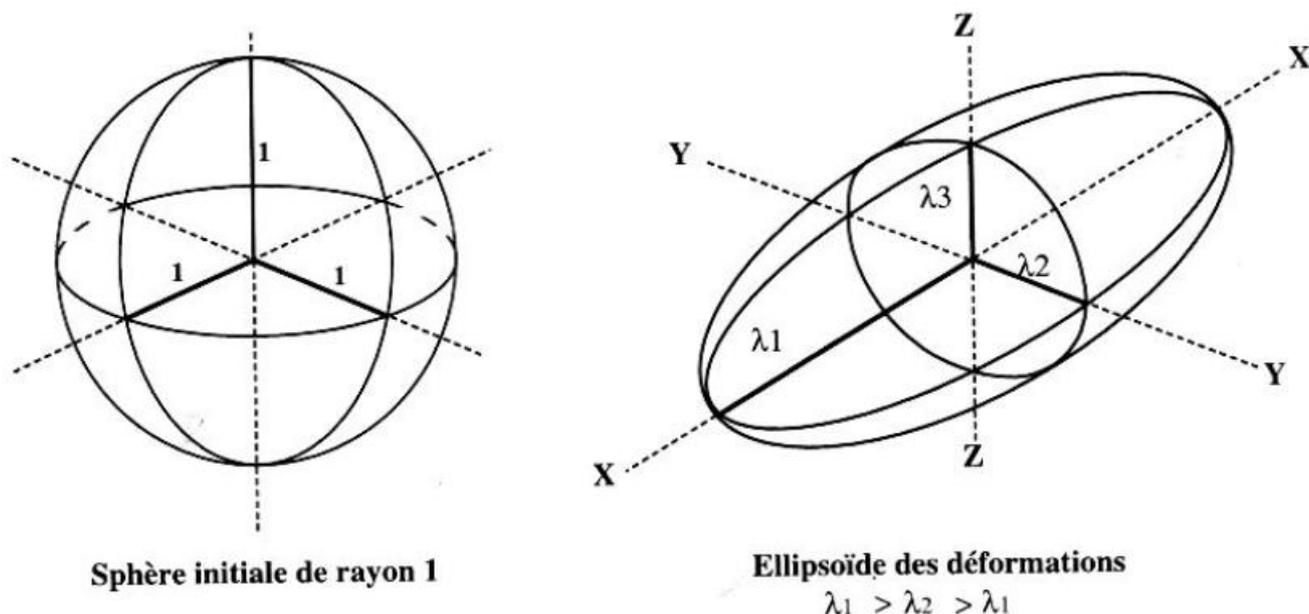


Sphère des contraintes : $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$
État de contraintes isotropes dans un massif rocheux soumis au seul enfouissement.



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.

Fig 3. Représentation des contraintes dans l'espace. ★★★ [6]



Sphère initiale de rayon 1

Ellipsoïde des déformations

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$$

Fig. 4. Ellipsoïde des déformations. ★★★ [6]

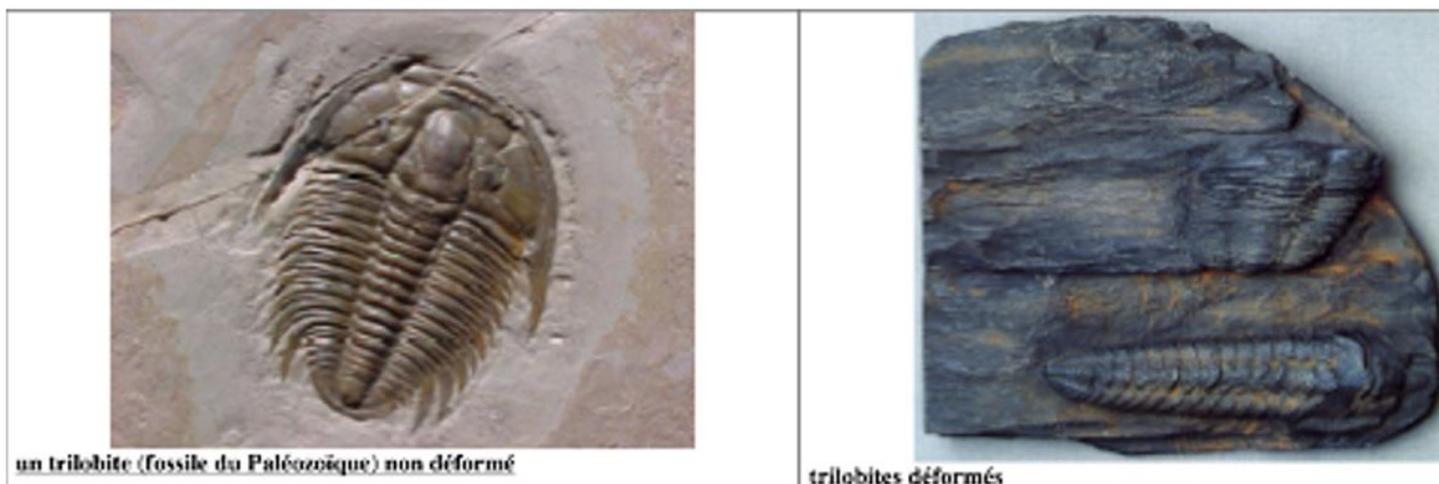
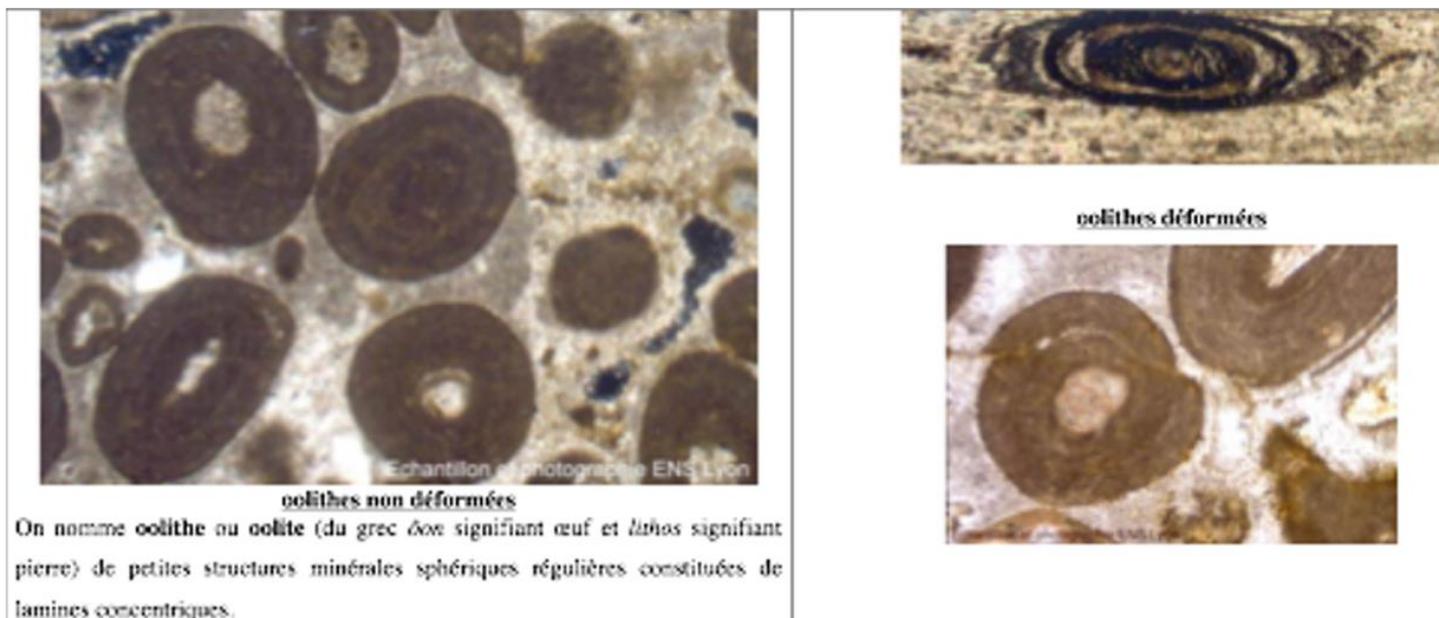


Fig. 5. Exemples de déformations : (1) trilobites. ★



On nomme oolithe ou oolite (du grec *oolos* signifiant œuf et *lithos* signifiant pierre) de petites structures minérales sphériques régulières constituées de lamines concentriques.

Fig. 6. Exemples de déformations : (1) oolithes. ★

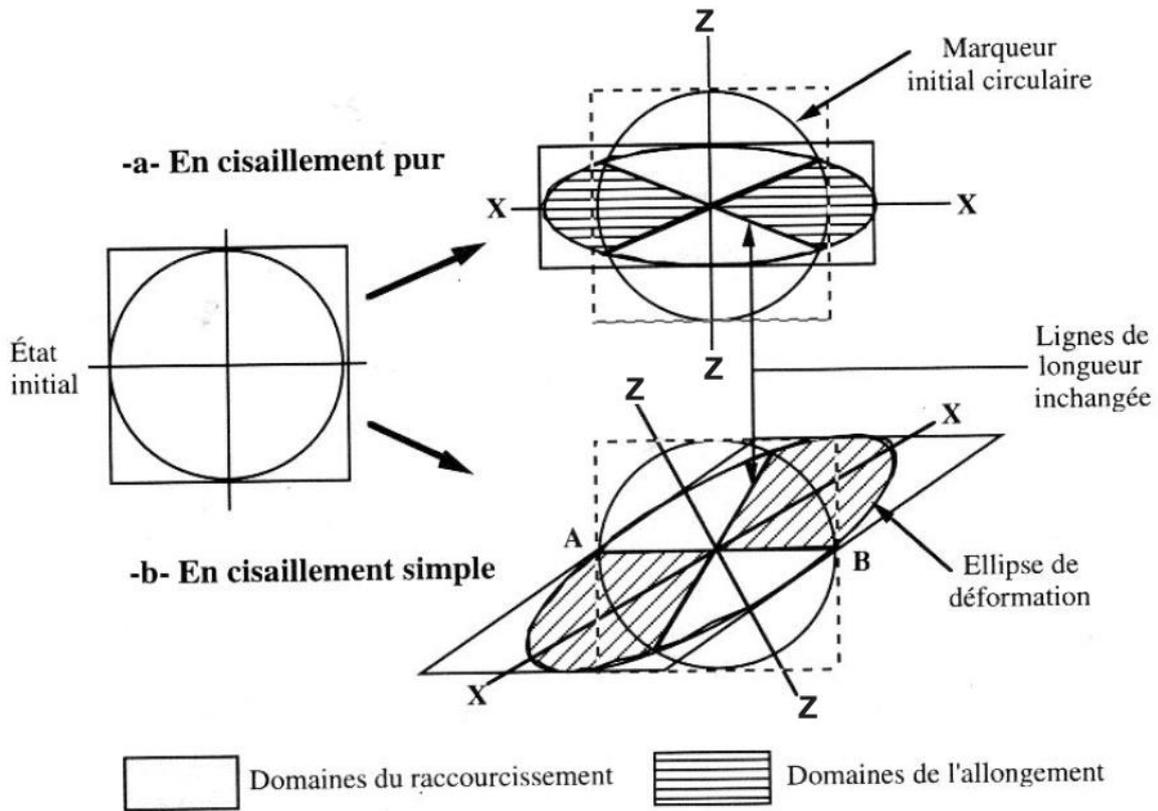


Fig. 7. Ellipsoïdes de déformation dans le cas d'un cisaillement pur et d'un cisaillement simple. ★★★ [6]



Fig. 8. Un exemple de cisaillement. ★

↓
Déterminer l'ellipsoïde de déformation ainsi que le type de cisaillement

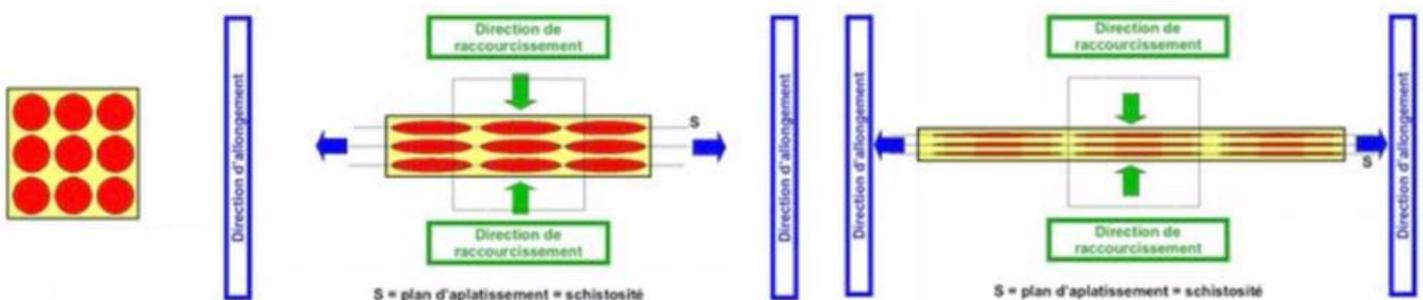


Fig. 9. Cisaillement pur et schistosité. ★★

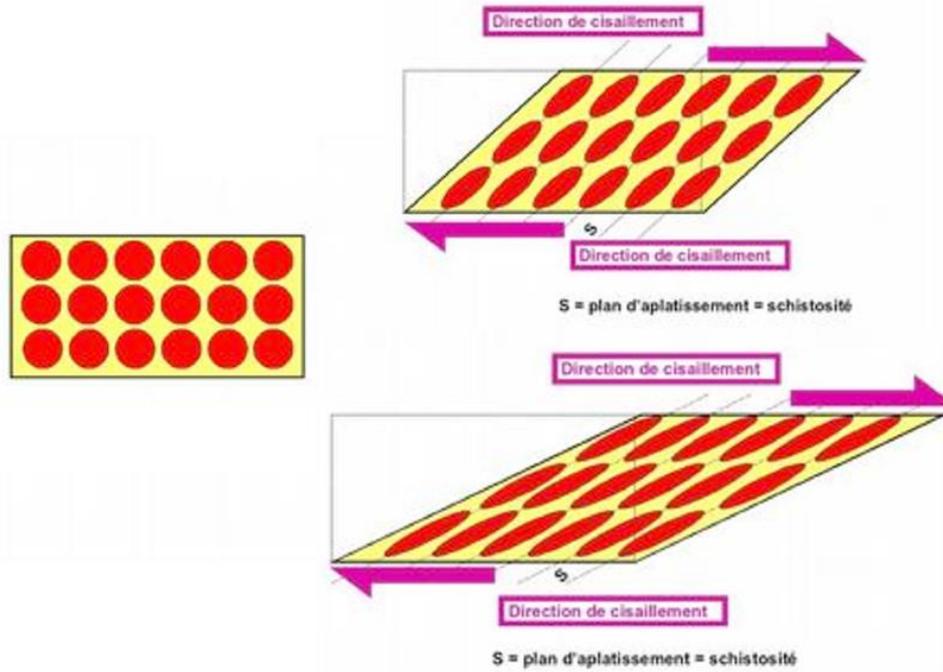


Fig. 10. Cisaillement simple et schistosité. ★★

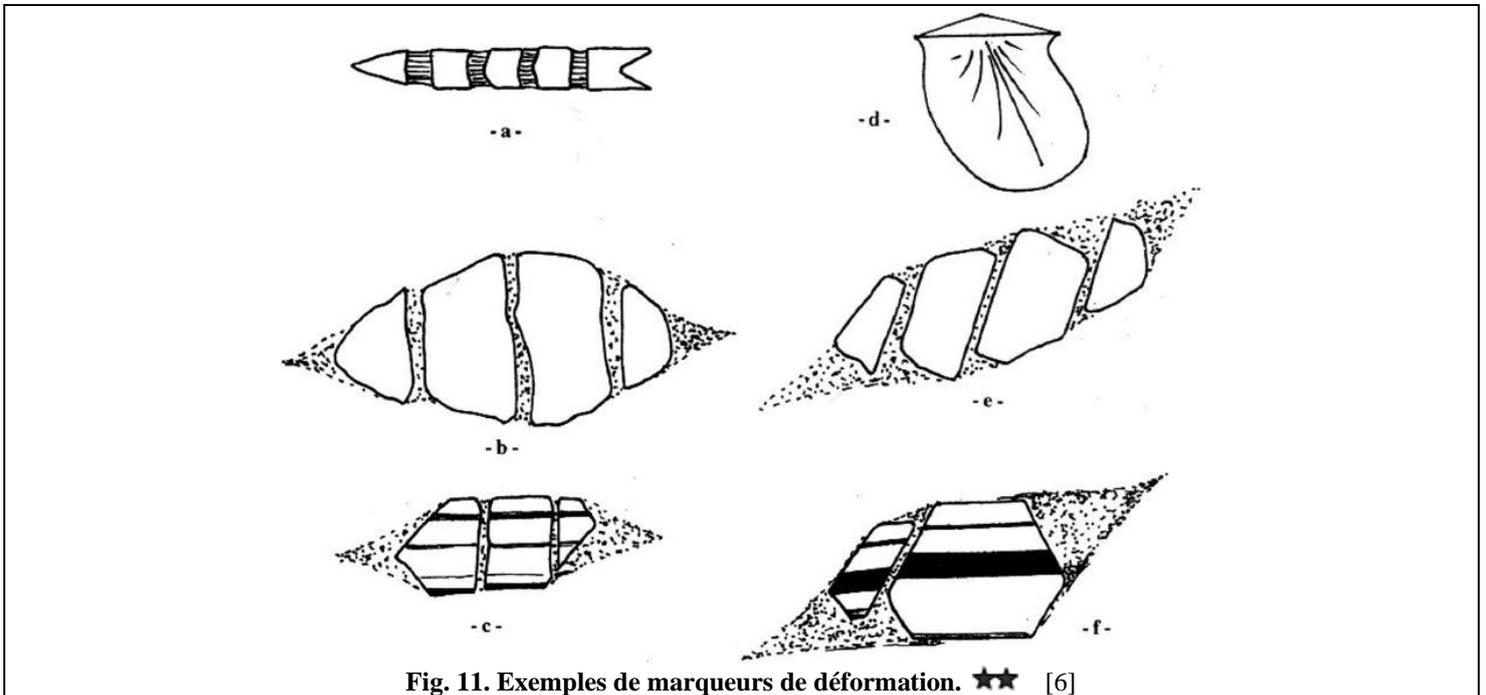


Fig. 11. Exemples de marqueurs de déformation. ★★ [6]

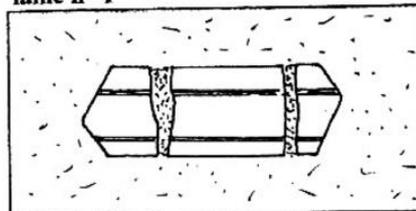
Fig. 12. Un même cristal de feldspath observé dans deux plans différents.

★ [6]



Déterminer l'ellipsoïde de déformation ainsi que le type de cisaillement

lame n° 1



lame n° 2

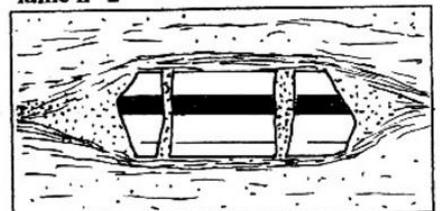


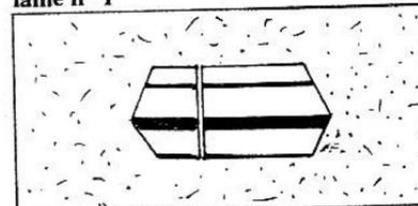
Fig. 13. Un même cristal de feldspath observé dans deux plans différents.

★ [6]



Déterminer l'ellipsoïde de déformation ainsi que le type de cisaillement

lame n° 1



lame n° 2

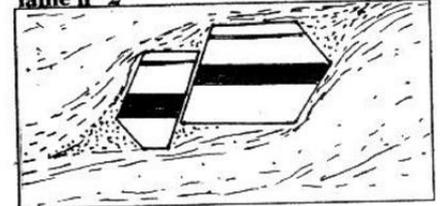
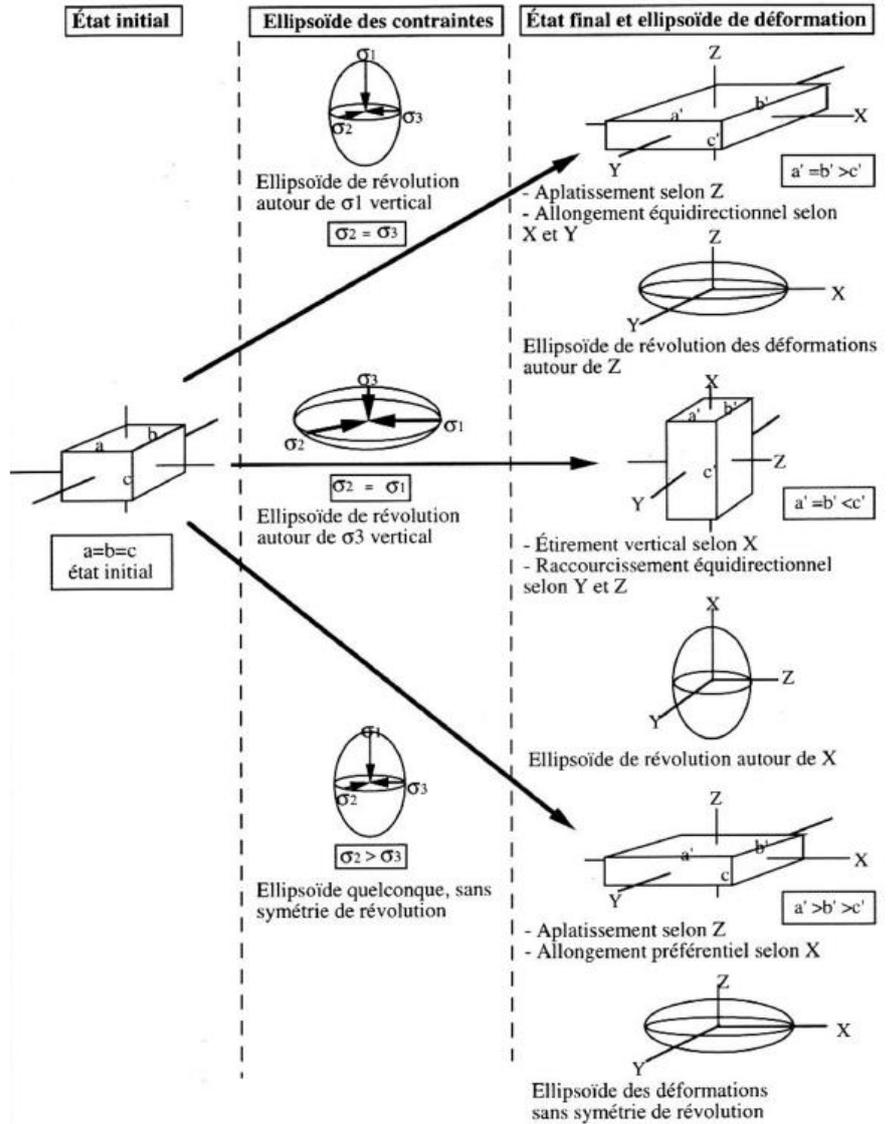


Fig. 14. Relation entre ellipsoïde des contraintes et ellipsoïde de déformation, dans le cas d'un cisaillement simple. ★★



	Cisaillement pur (« pure shear ») (aplatissement-étirement)	Cisaillement simple (« simple shear »)
Explication	La déformation finie peut se décomposer en étapes (ou incréments) pendant lesquelles le matériau est aplati dans la direction de raccourcissement, étiré dans la direction d'allongement. Il n'y a pas de rotation au cours de la déformation progressive : les axes d'allongement et de raccourcissement conservent une direction constante. La déformation par aplatissement/étirement est dite coaxiale	La déformation finie peut se décomposer en incréments pendant lesquels le matériau est cisailé en gardant une épaisseur constante : ses côtés parallèles au cisaillement ne sont pas déformés et les côtés non-parallèles au cisaillement s'étirent. Il y a rotation au cours de la déformation progressive : les axes d'allongement tournent. La déformation par aplatissement/étirement est dite non coaxiale
Peut-on caractériser un ellipsoïde de la déformation finale ?	Oui. X = sens de l'allongement maximal, Z = sens du raccourcissement maximal, Y perpendiculaire à X et Z (dans les deux représentations, Y est perpendiculaire au plan du dessin)	
Peut-on caractériser un ellipsoïde des contraintes ?	Oui. La déformation est non-rotationnelle (coaxiale) : $\sigma_1 // Z, \sigma_2 // Y, \sigma_3 // X$ Par convention, on suppose que les contraintes s'exercent au centre de l'objet, donc on oriente les vecteurs vers le centre.	Non. La déformation étant rotationnelle (non coaxiale), il n'est pas possible d'associer la déformation finie à un unique ellipsoïde des contraintes (l'orientation des contraintes ayant varié pendant la déformation).

Fig. 15. Bilan cisaillement pur – cisaillement simple. ★★ ★ [3]

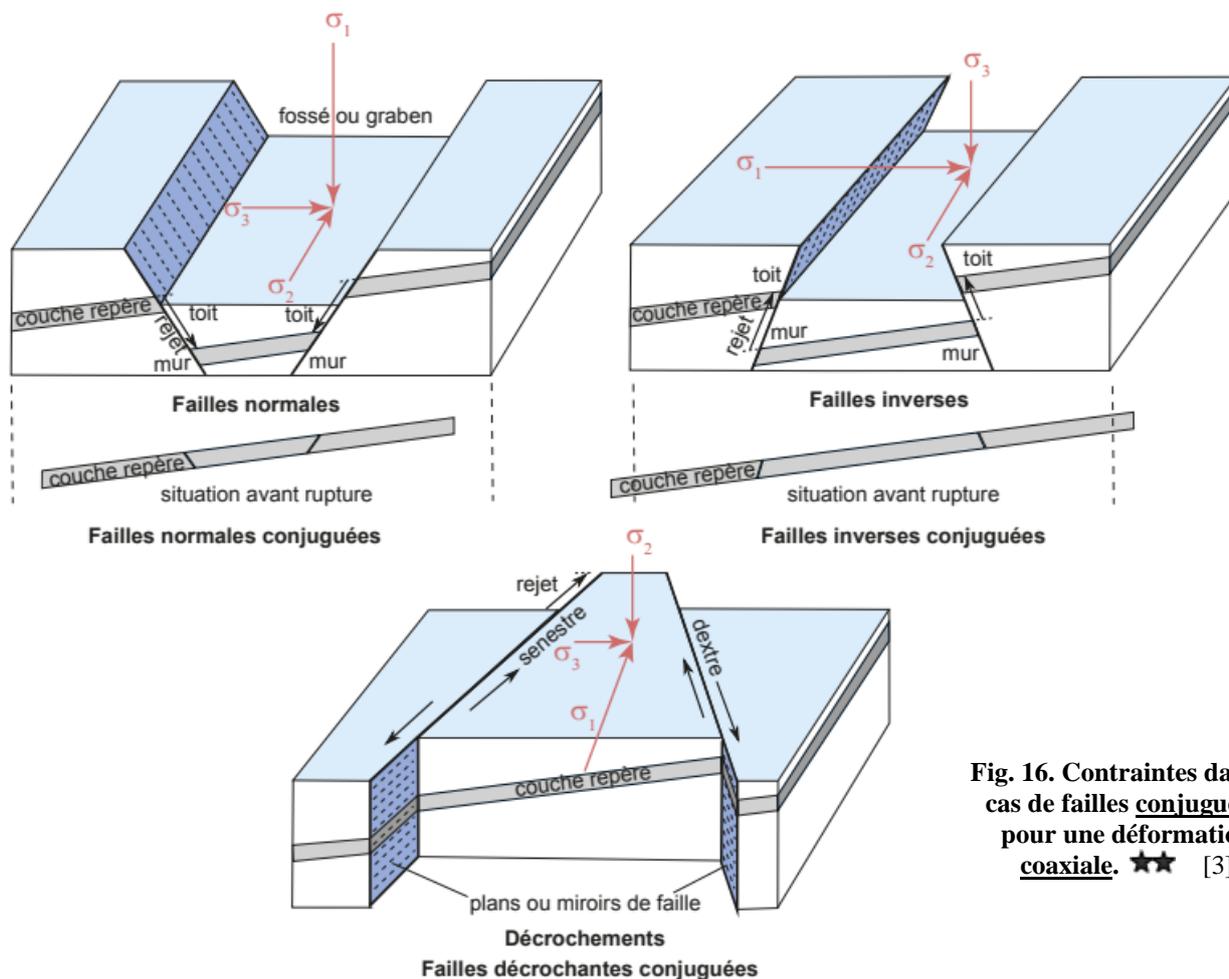


Fig. 16. Contraintes dans le cas de failles conjuguées, pour une déformation coaxiale. ★★ [3]

Les failles normales	Les failles inverses	Les failles décrochantes
<ul style="list-style-type: none"> - la composante principale du rejet est verticale ; - le toit est descendu par rapport au mur ; - résultent d'un régime d'extension (étirement horizontal), donc avec $\vec{\sigma}_3$ et $\vec{\sigma}_2$ horizontales, et $\vec{\sigma}_1$ verticale ; - pendage fort (entre 45 - 60°) : un pendage de 60° correspond à une position de la faille à 30° de $\vec{\sigma}_1$. 	<ul style="list-style-type: none"> - la composante principale du rejet est verticale ; - le toit est monté par rapport au mur ; - résultent d'un régime de compression horizontal, avec $\vec{\sigma}_1$ et $\vec{\sigma}_2$ horizontales (respectivement perpendiculaire et parallèle au plan de faille), et $\vec{\sigma}_3$ verticale. - pendage plus faible (à environ 30° de $\vec{\sigma}_1$ horizontale). 	<ul style="list-style-type: none"> - verticales ; - rejet horizontal sénestre (si chaque bloc se déplace vers la gauche d'un observateur situé sur l'autre bloc) ou dextre (si le déplacement relatif est vers la droite de l'observateur) ; - comme pour la faille inverse, $\vec{\sigma}_1$ et $\vec{\sigma}_2$ sont horizontales (mais obliques par rapport au plan de faille), et $\vec{\sigma}_3$ est verticale.

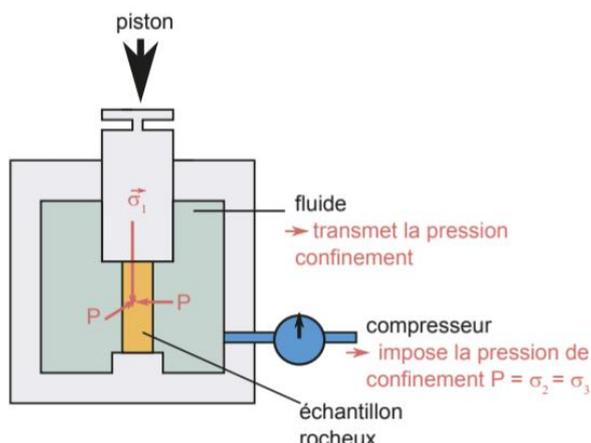


Fig. 17. Presse triaxiale. ★★ [3][7]

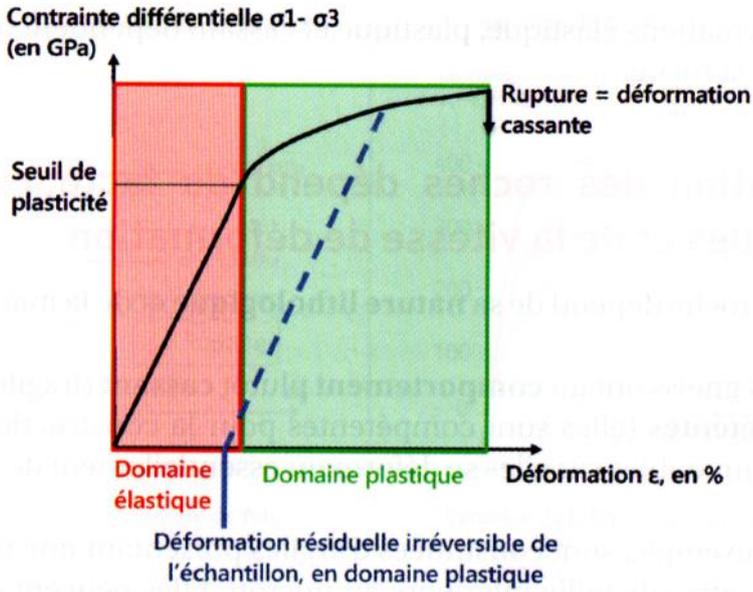


Fig. 18. Résultat d'un essai en compression réalisé avec une presse triaxiale jusqu'à rupture de l'échantillon. ★★★ [2]

Fig. 19. Comparaison entre compression et traction sur du béton

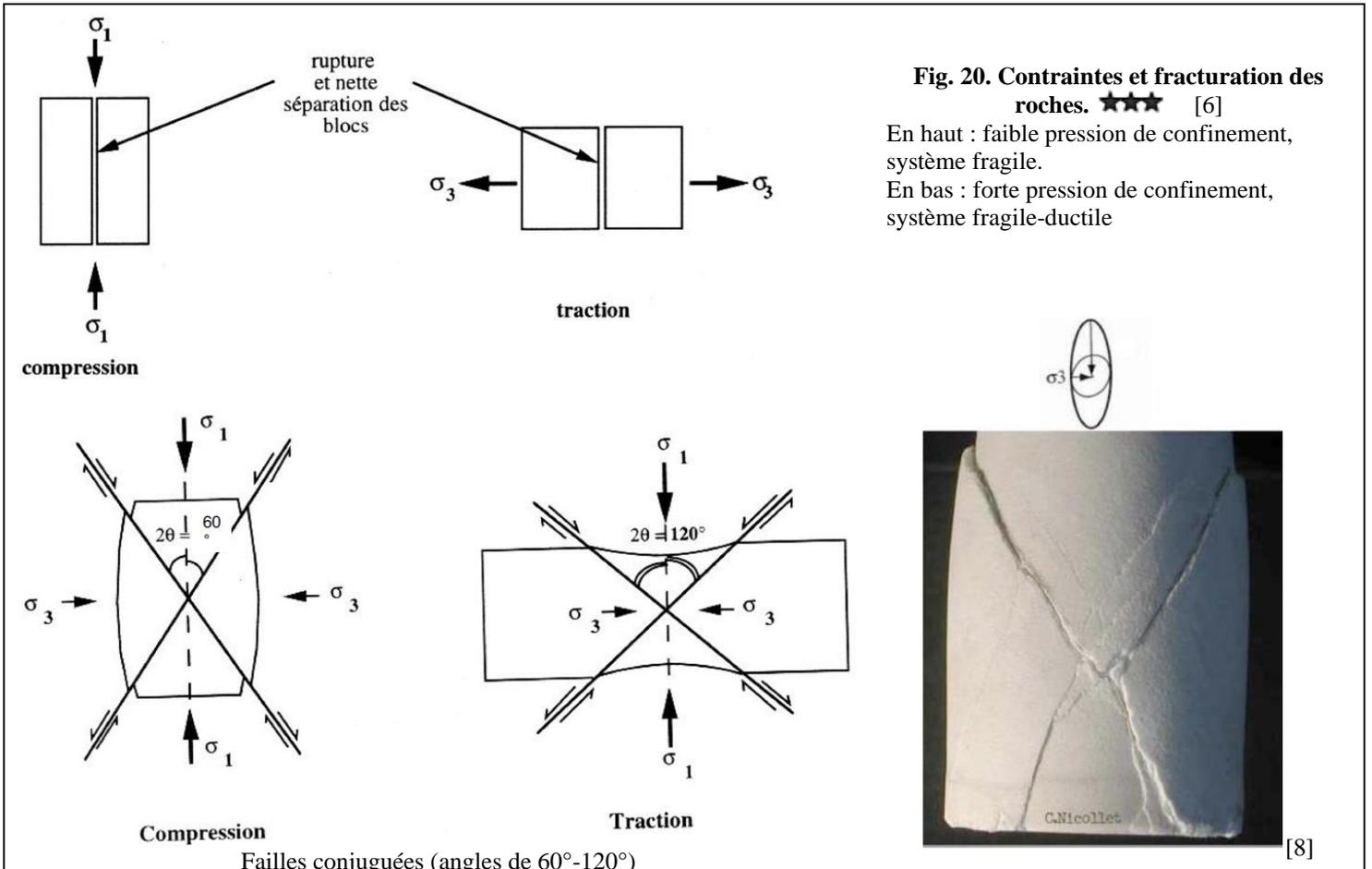
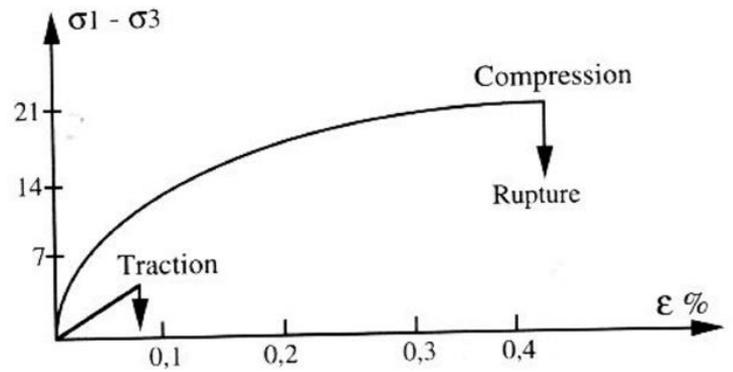


Fig. 20. Contraintes et fracturation des roches. ★★★ [6]

En haut : faible pression de confinement, système fragile.

En bas : forte pression de confinement, système fragile-ductile

Fig. 21. Influence de la pression de confinement. ★★★ [6]

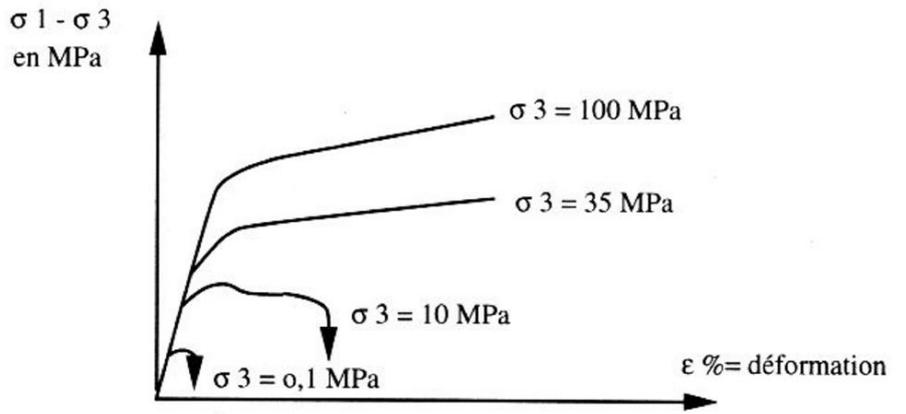
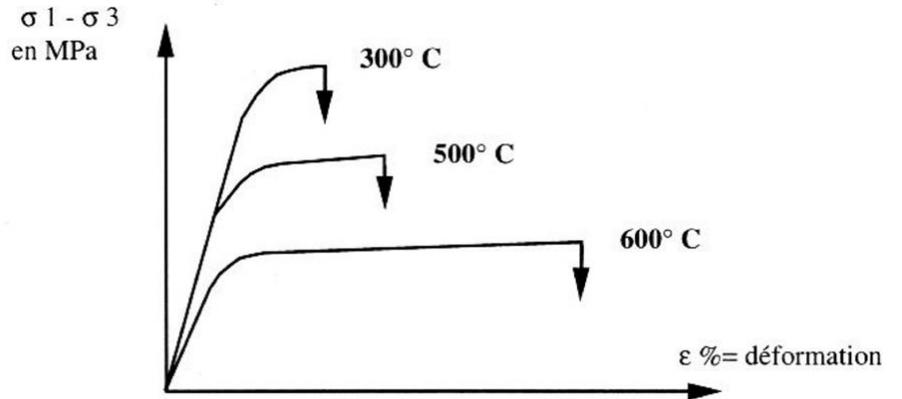
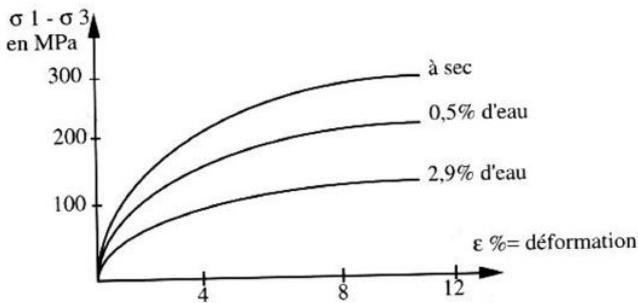


Fig. 22. Influence de la température. ★★★ [6]



-a- : Présence d'un fluide qui mouille les joints des grains.
 - température élevée : 300°
 - $\sigma_3 = 110$ MPa



-b- : Présence d'eau dans les pores de la roche.
 - pression d'eau dans les pores en MPa
 - température basse : 150°
 - $\sigma_3 = 110$ MPa

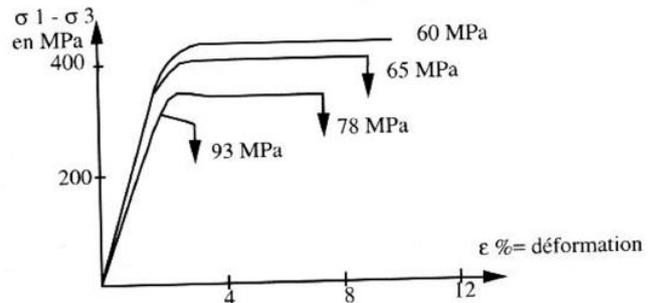


Fig. 23. Influence de la teneur en fluide, mesurée sur un marbre. ★★ [6]

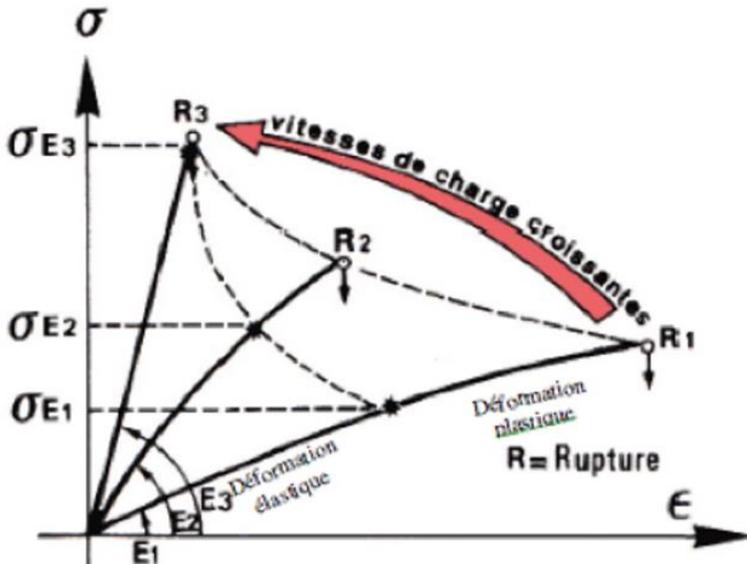


Fig. 24. Influence de la vitesse de déformation. ★★★

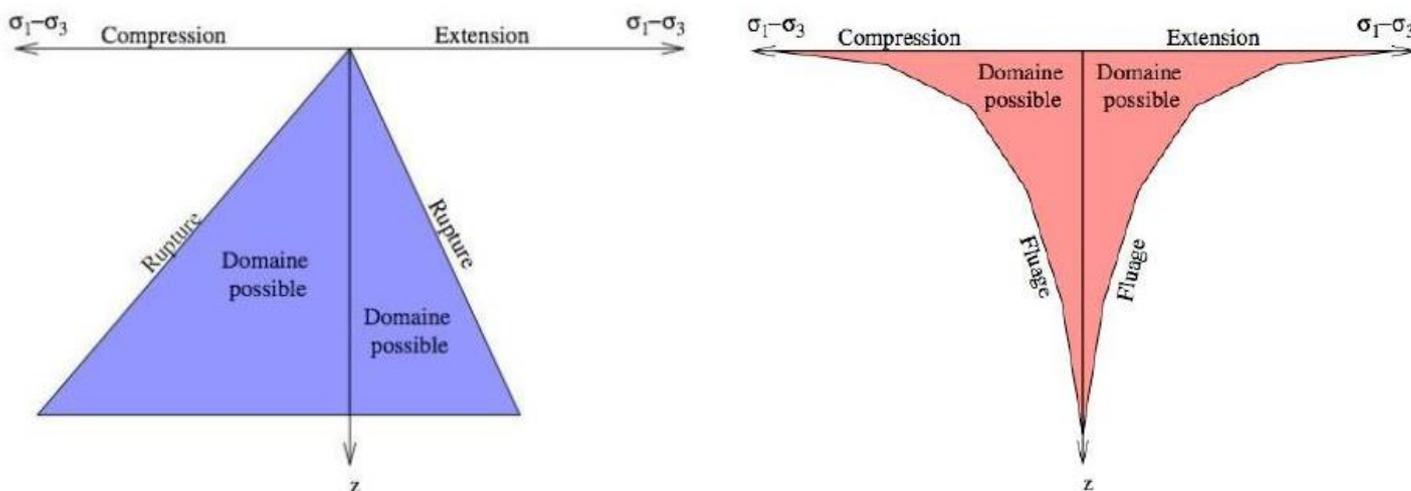
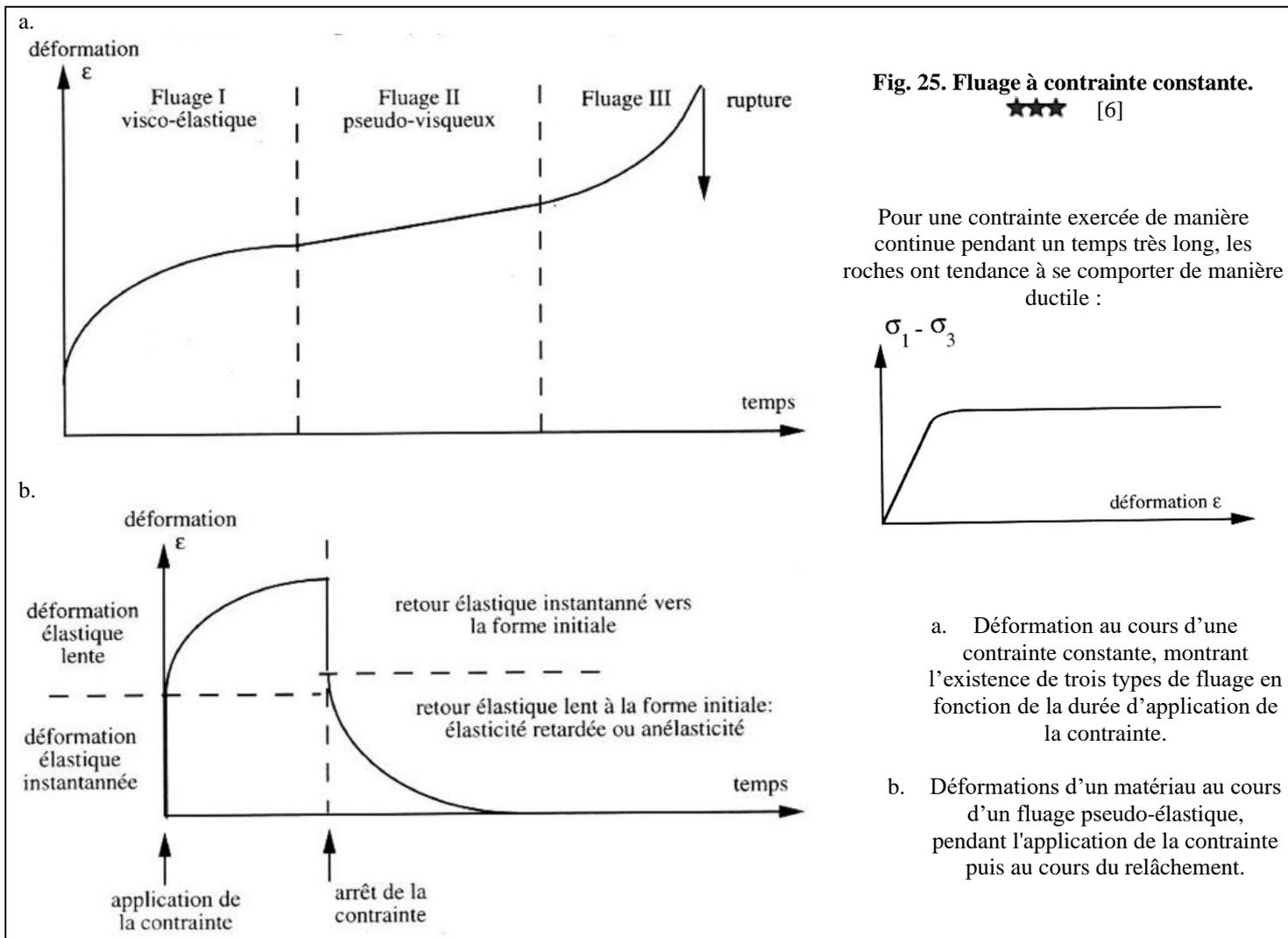


Fig. 26. Déformation fragile (à gauche) et déformation ductile (à droite), en fonction de la profondeur ($z \equiv$ pression de confinement, pression lithostatique) et de la contrainte exercée. ★★ [4]

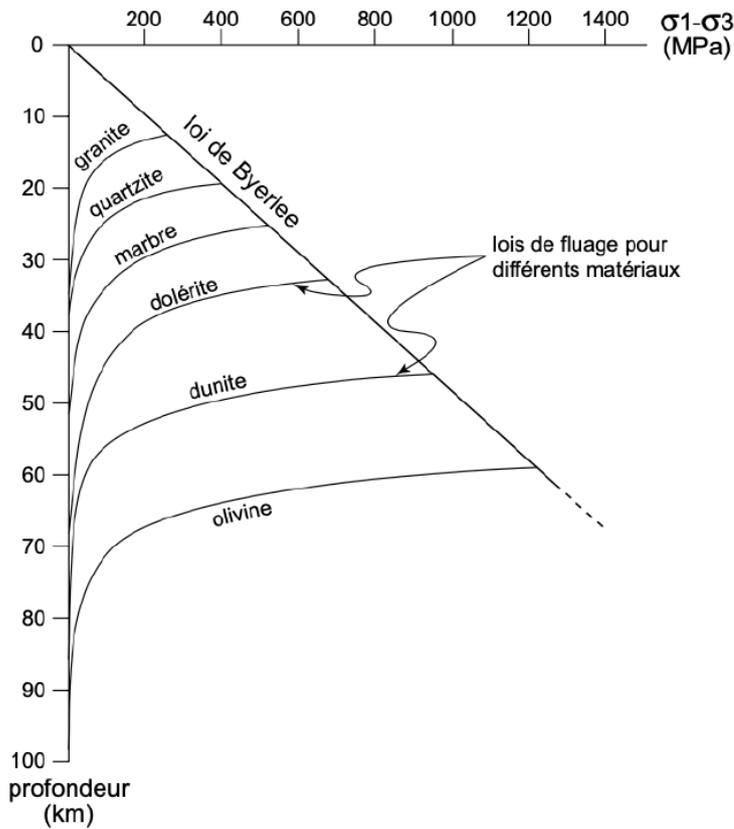


Fig. 27. Droite de Byerlee et courbe de fluage pour différents matériaux. ★★

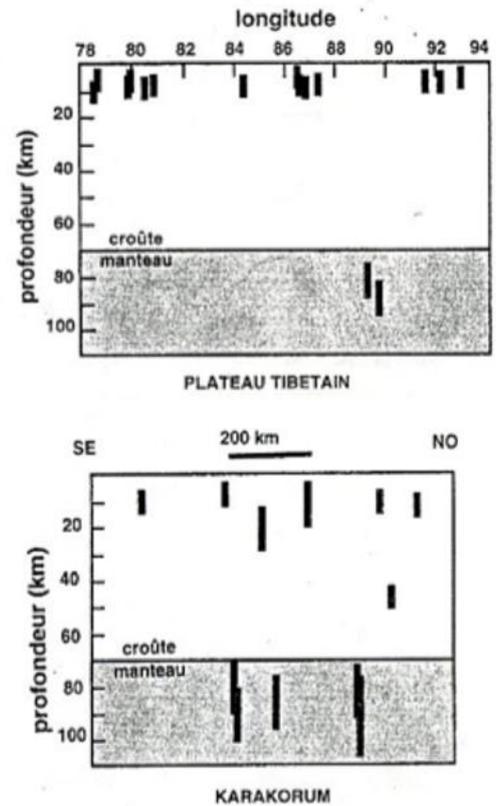


Fig. 28. Localisation des foyers sismiques dans l'Himalaya. ★

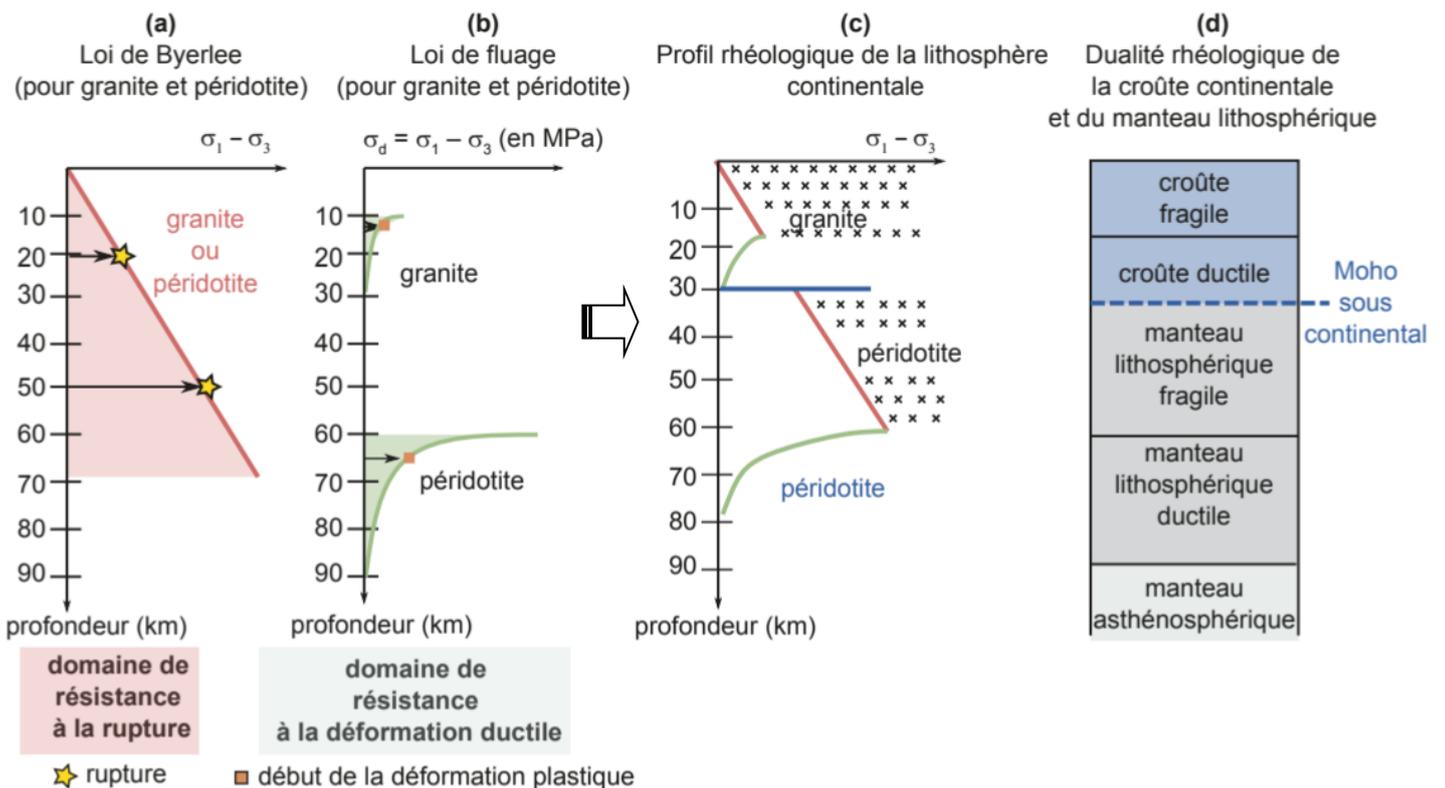


Fig. 29. Modélisation rhéologique d'une lithosphère continentale. ★★★ [3]

(a) courbe de résistance à la rupture (loi de Byerlee)
 (b) courbes de résistance à la déformation ductile pour différents matériaux
 (c) et (d) profil rhéologique de la lithosphère continentale

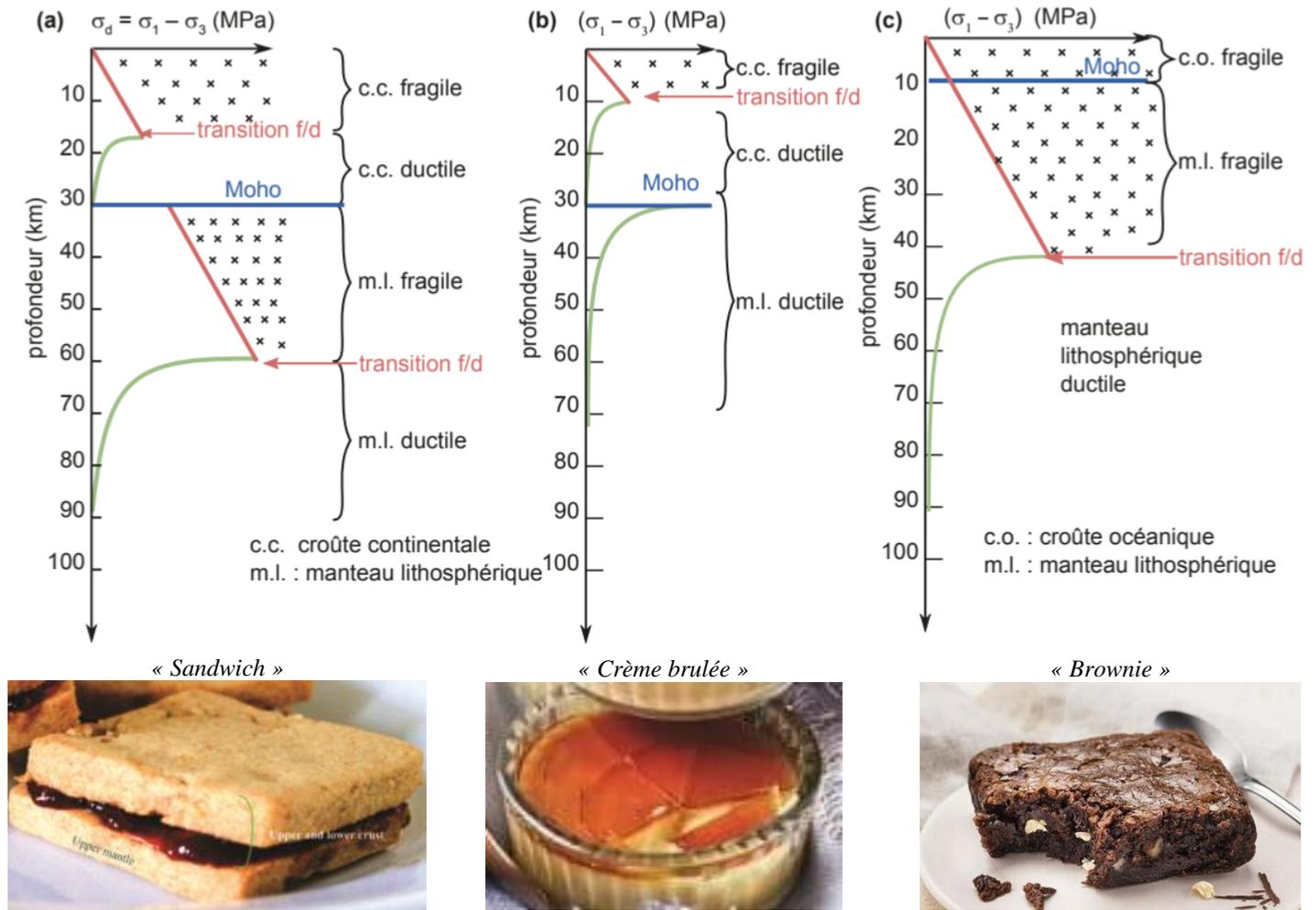


Fig. 30. Diversité de profils rhéologiques. ★★★ [3]

- (a) Lithosphère continentale avec un gradient géothermique faible – Moho à 500 °C soit 17°.km⁻¹
- (b) lithosphère continentale avec un gradient géothermique plus fort – Moho à 900 °C soit 30°.km⁻¹
- (c) lithosphère océanique avec un gradient géothermique faible

Interprétation « culinaire » en termes de comportement ★

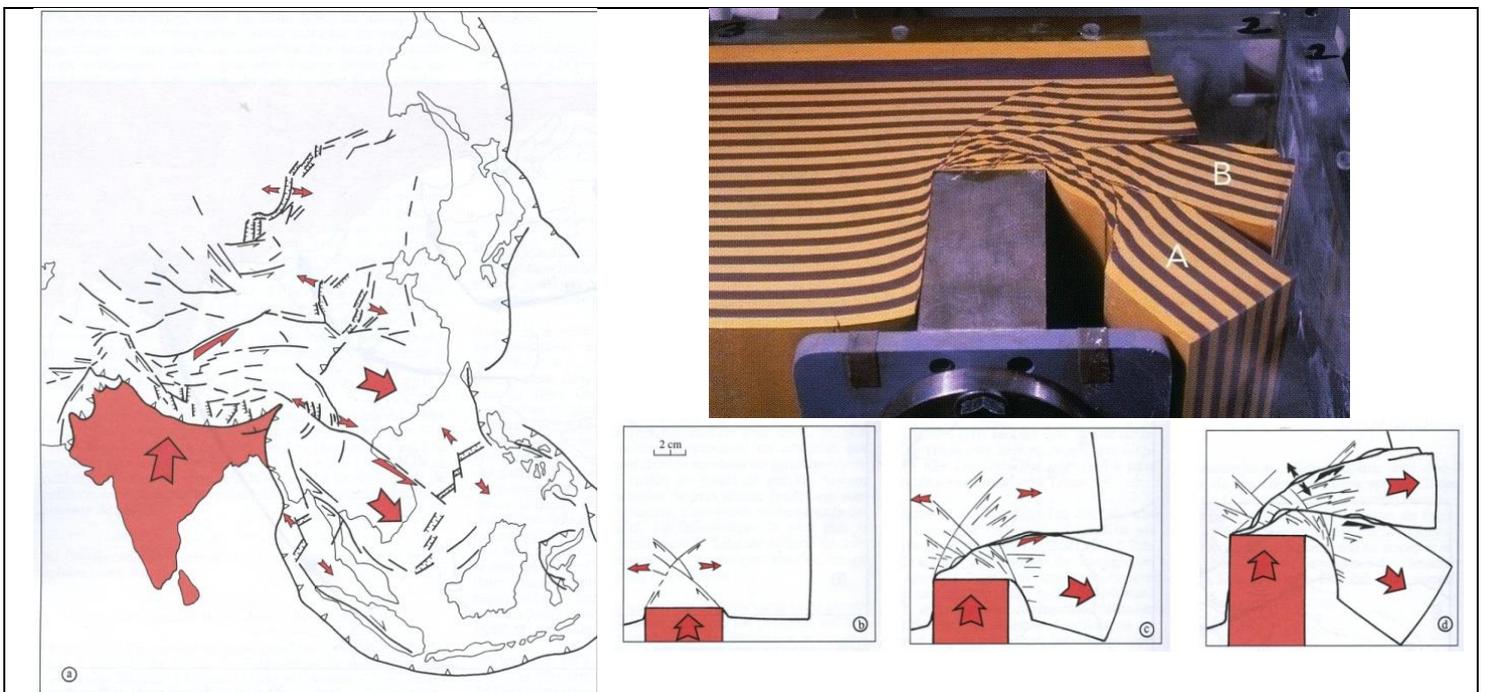


Fig. 31. La collision Inde-Asie illustre la variété de comportement rhéologique des lithosphères, ainsi que l'existence de déformations à grande échelle des lithosphères. ★★★

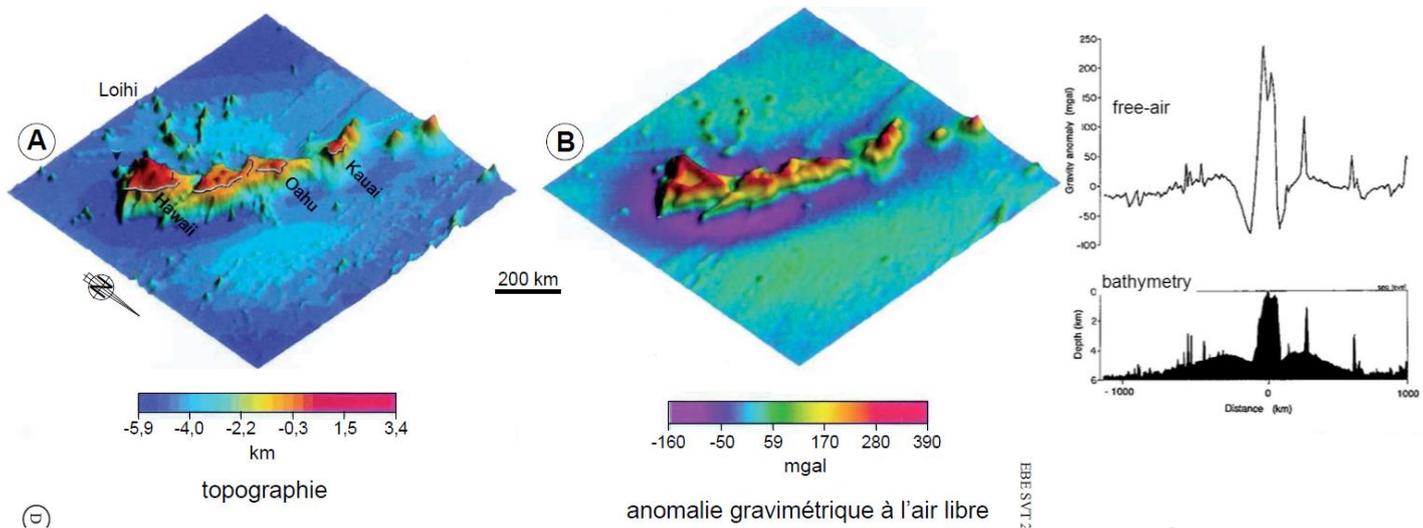


Fig. 32. Topographie et anomalie à l'air libre au niveau de l'archipel Hawaïien. ★

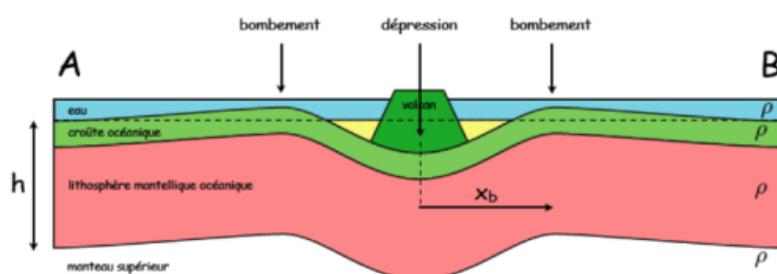


Fig. 33. Courbure lithosphérique au niveau d'une île océanique de point chaud. ★★

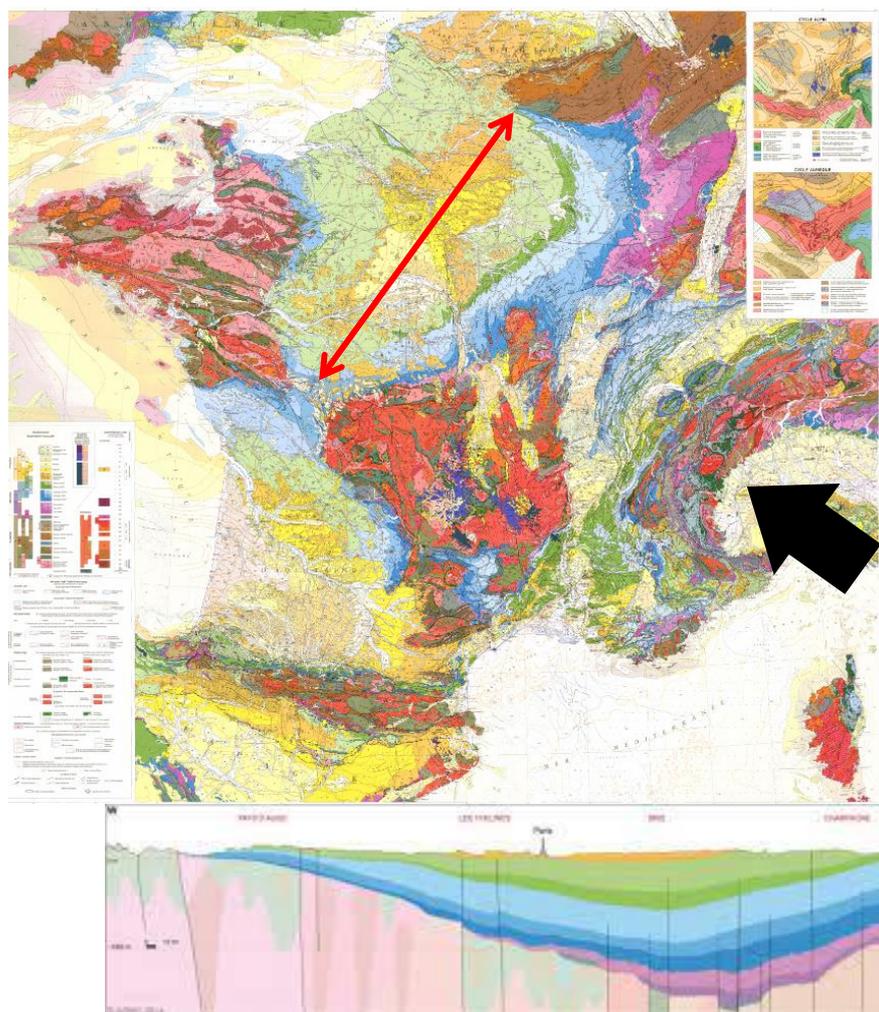


Fig. 34. Flambage lithosphérique du Bassin Parisien. ★

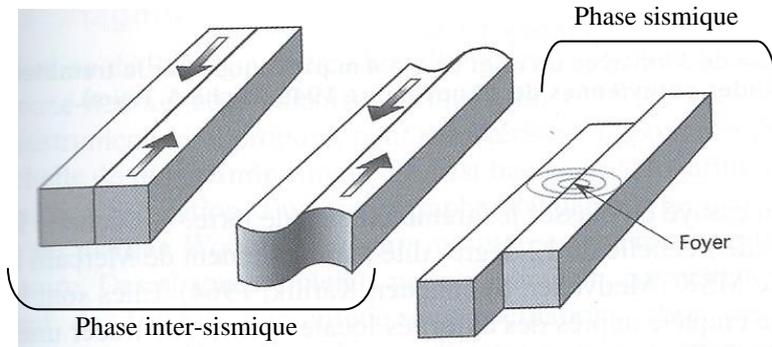


Figure 12.3
La théorie du rebond sismique.

Au début du cycle sismique, les contraintes augmentent jusqu'à la rupture où les roches se détendent et vibrent.

Fig. 35. Cycle sismique et rebond élastique. ★★★

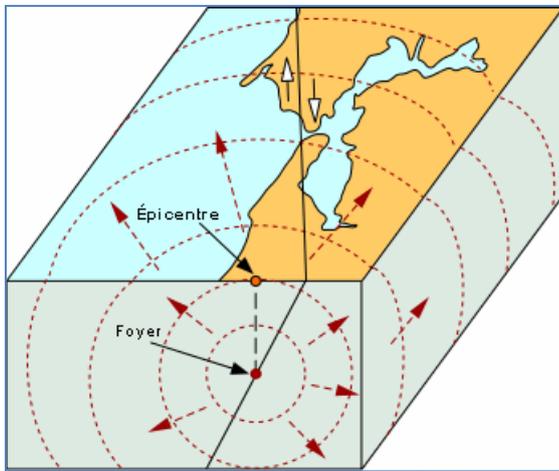


Fig. 36. Foyer et épicentre. ★★★

M _w	Energie libérée (Joules)	Équivalence en TNT (Tonnes)	Équivalence en bombes d'Hiroshima (12,5 kT TNT)
4	6,3 · 10 ¹⁰	15	0,0012
5	2,0 · 10 ¹²	475	0,038
6	6,3 · 10 ¹³	15.000	1,2
7	2,0 · 10 ¹⁵	475.000	38
8	6,3 · 10 ¹⁶	15.000.000	1.200
9	2,0 · 10 ¹⁸	475.000.000	38.000

Fig. 37. M_w et énergie libérée. ★ [9]

Fig. 38. M_w et surface de rupture. ★

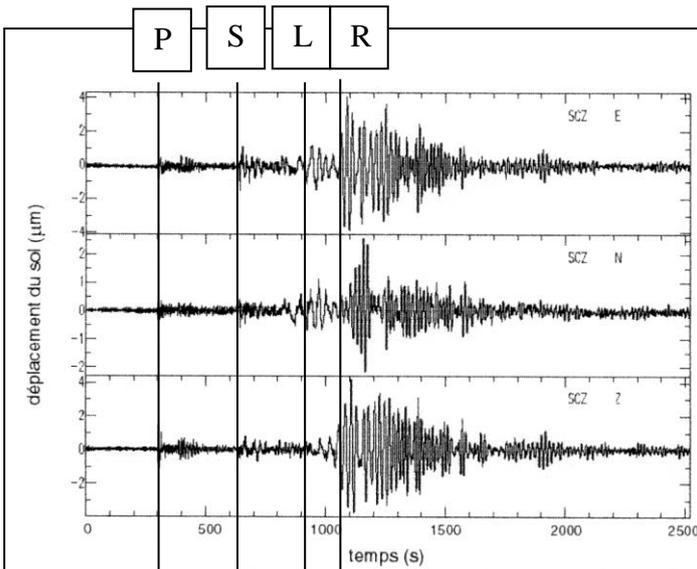
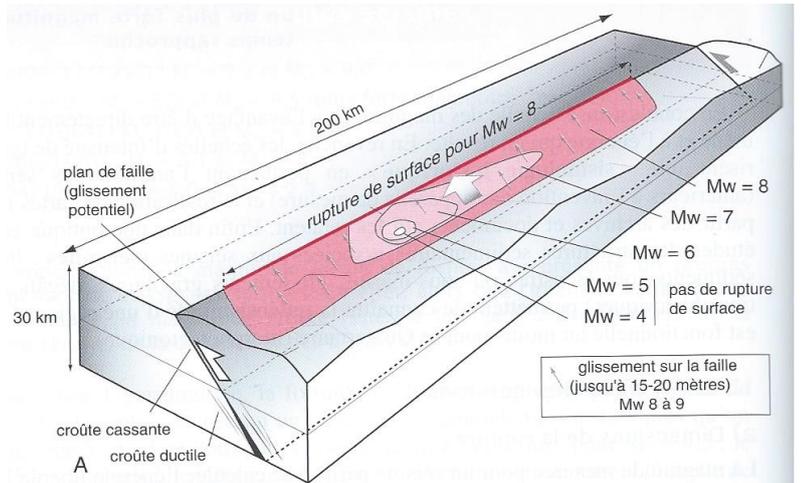


Fig. 39. Rappel : Un enregistrement sismique complet : on observe ici les trois enregistrements réalisés en même temps au niveau d'une station sismique, dans les trois axes de l'espace.

★★★

En haut (E) : mouvement **Est-Ouest** (déplacement vers l'Est vers le haut).

Au milieu (N) : mouvement **Nord-Sud** (déplacement vers le Nord vers le haut)

En bas (Z) : variations **d'altitude**.

L'instant d'arrivée des quatre types d'onde a été précisé :

- Ondes P ; ondes de compression P+S : ondes de volume
- Ondes S ; cisailantes L+R : ondes de surface
- Ondes L ; cisailantes
- Ondes R ; de plus forte intensité.

ÉCHELLE D'INTENSITÉ MACROSISMQUES (EMS-98)

Intensités EMS98	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+
Dégâts potentiels bâtiments vulnérables	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	Très léger	Modérés	Quelques effondrements partiels	Nombreux effondrements partiels	Nombreux effondrements	Effondrements généralisés
Dégâts potentiels bâtiments peu vulnérables	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	Très léger	Modérés	Effondrements partiels	Nombreux effondrements
Perception humaine	non ressenti	Très faible	Faible	Modérés	Forte	Brutale	Très brutale	Sévère	Violente	Extrême

I	Imperceptible	
II	À peine ressenti	Ressenti seulement par quelques rares personnes au repos dans leurs habitations.
III	Faible	Ressenti par quelques personnes à l'intérieur des bâtiments. Les personnes au repos ressentent une oscillation ou un léger tremblement.
IV	Largement ressenti	Ressenti par de nombreuses personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques rares personnes à l'extérieur. Quelques personnes endormies sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle font un bruit de tremblement.
V	Fort	Ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques personnes à l'extérieur. De nombreux dormeurs sont réveillés. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans toute leur structure. Les objets suspendus oscillent nettement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
VI	Dégâts légers	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Quelques objets tombent. Quelques maisons subissent de légers dégâts non structuraux (légères fissures, chute de petits morceaux de plâtre).
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Le mobilier est déplacé et les objets tombent des étagères en grand nombre. De nombreux bâtiments bien construits subissent des dégâts modérés (petites fissures dans les murs, chutes de plâtre, chutes partielles de cheminées). Des bâtiments plus anciens présentent des fissures dans les murs et des désordres au niveau des cloisons.
VIII	Dégâts importants	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout. De nombreuses maisons présentent des crevasses dans les murs. Quelques bâtiments bien construits présentent des désordres au niveau des murs, tandis que d'autres bâtiments plus anciens s'effondrent partiellement.
IX	Destructeur	Panique générale. De nombreuses constructions s'effondrent. Même les bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants (désordres au niveau des murs et effondrement partiel des structures).
X	Très destructeur	De nombreux bâtiments pourtant bien construits s'effondrent.
XI	Catastrophe	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent. Quelques bâtiments construits selon les règles parasismiques sont détruits.
XII	Catastrophe complète	Presque tous les bâtiments sont détruits.

Fig. 40. Intensité sismique : Les grandes lignes de l'échelle EMS98. ★★

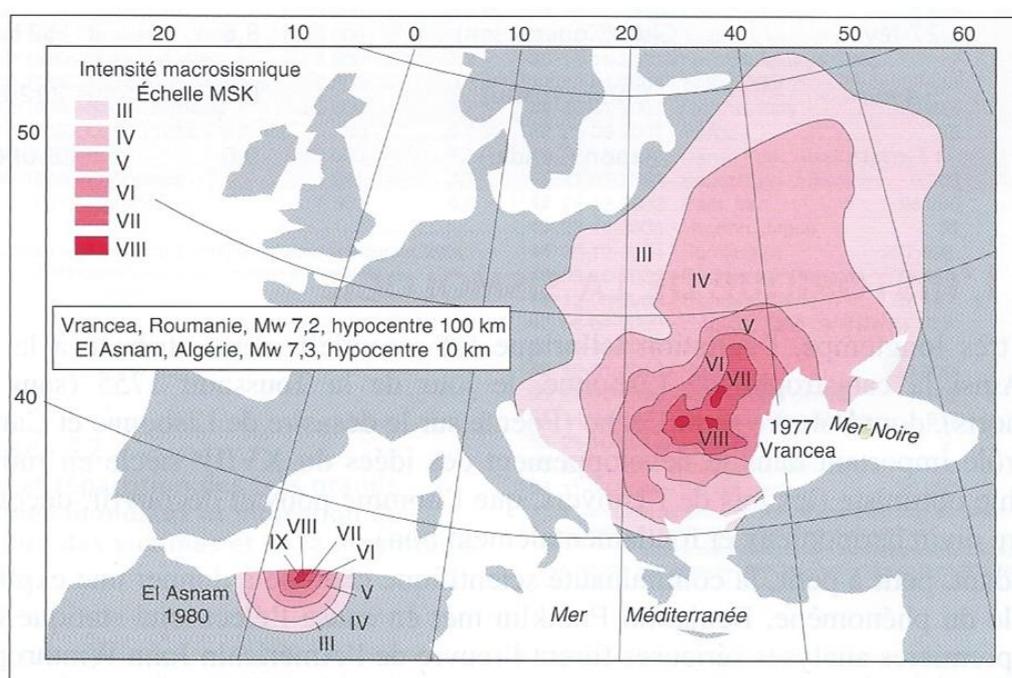


Fig. 41. Exemple de courbes isoséismiques pour deux séismes de magnitude similaire. ★

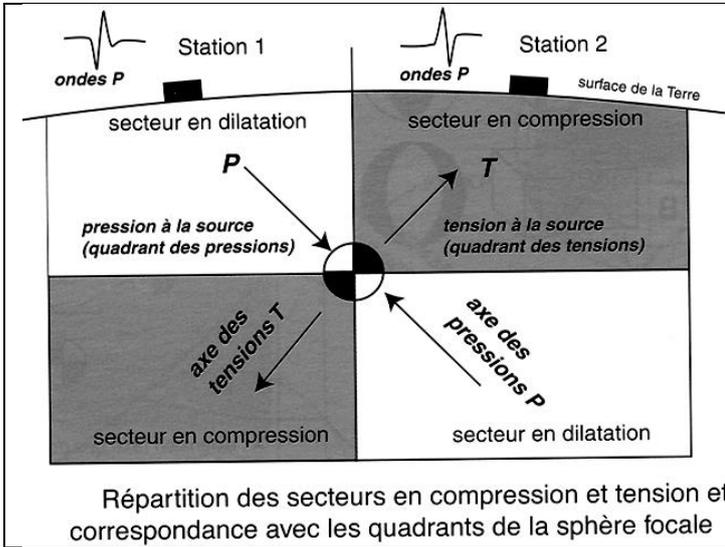


fig. 42. Construction d'un stéréogramme (« peach-ball ») représentant un mécanisme au foyer (pour information)



- L'arrivée des ondes P peut donner deux types de tracés :
- Les premiers mouvements montrent un déplacement des particules vers la source du séisme. La région subit donc une **dilatation**, qui correspond à un **déplacement vers la source**, c'est-à-dire une compression à la source.
 - Les premiers mouvements montrent un déplacement des particules en sens opposé: s'éloignant de la source. La région subit une **compression**, qui traduit **l'éloignement** des particules de la source, c'est-à-dire une dilatation à la source.

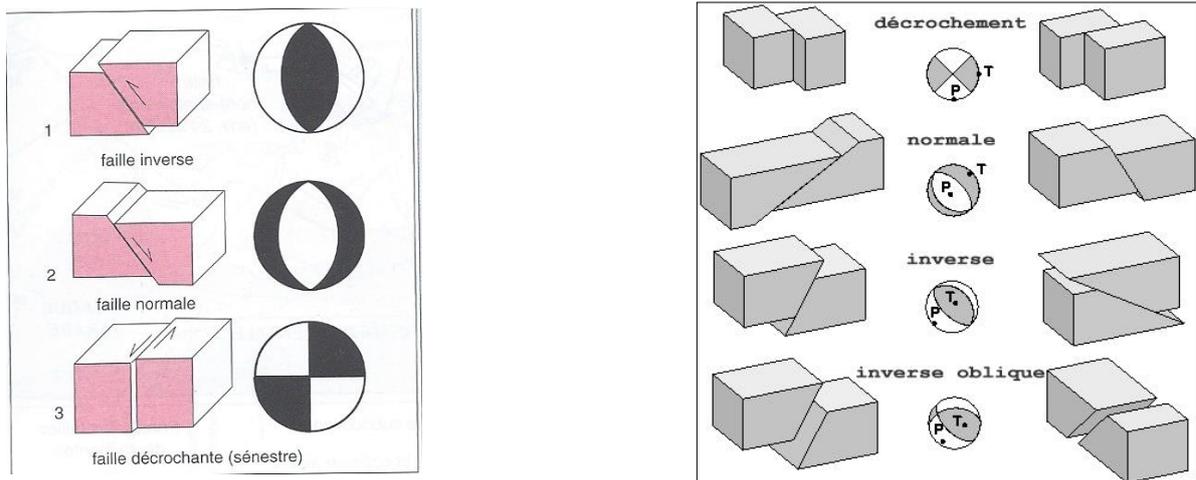


Fig. 43. Stéréogrammes des grands types de failles. ★★★

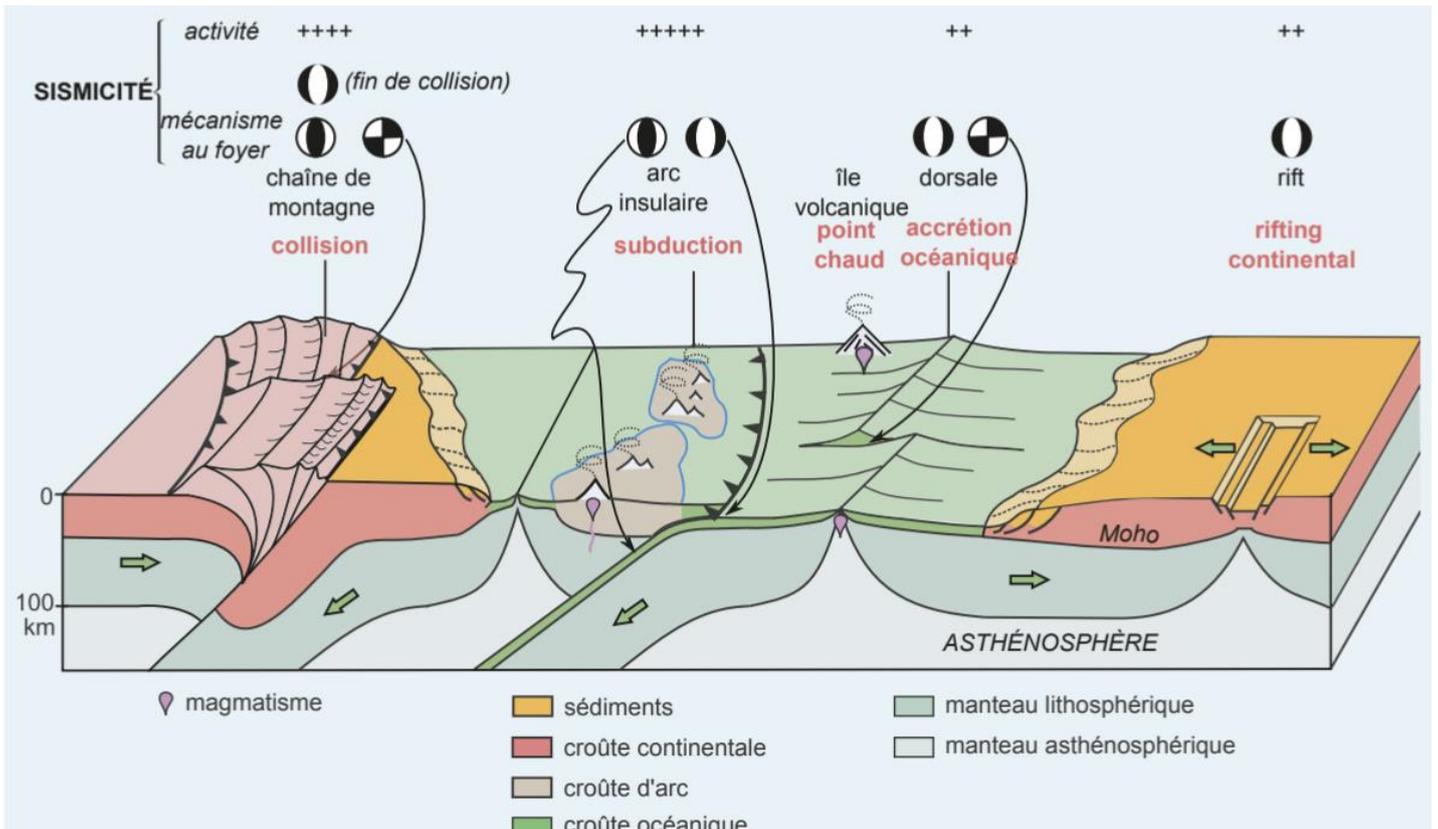


Fig. 44. Contextes géodynamiques et mécanismes au foyer. ★★★ [3]

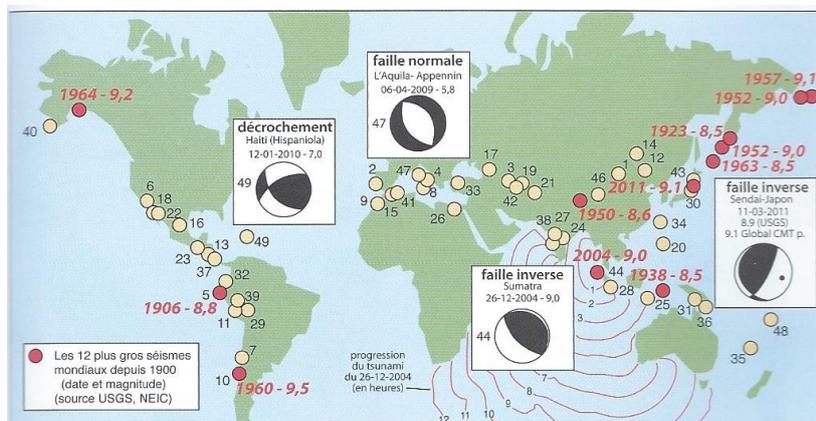


Fig. 45. Les plus gros séismes mondiaux 1900-2011. ★

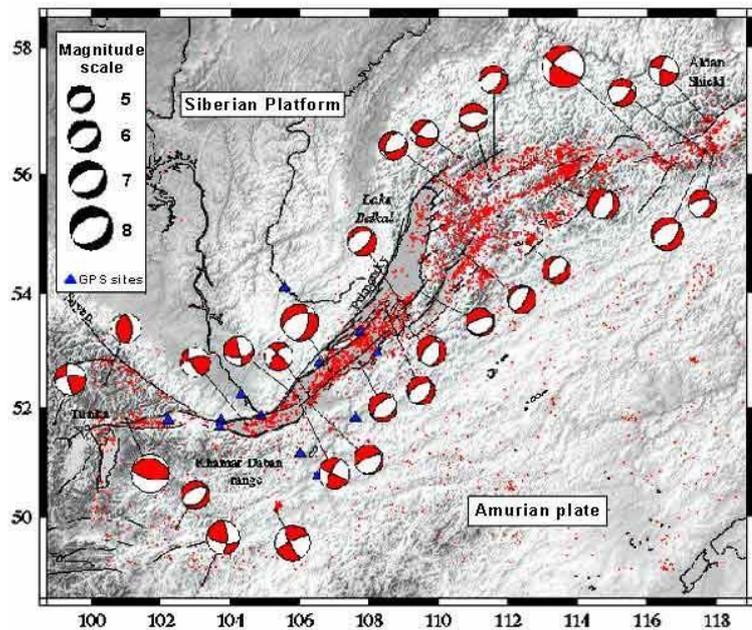
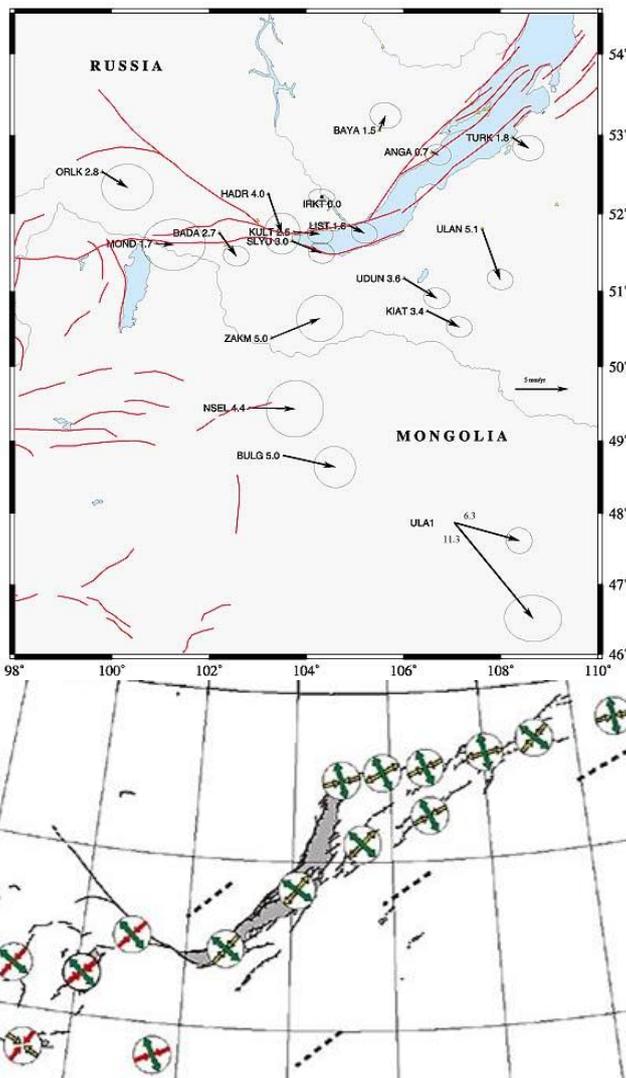


Fig. 46. Un exemple de suivi par GPS et de mécanismes au foyer : la région du lac Baïkal. ★

Situation géographique	Mouvements GPS
Mécanismes au foyer	Bilan : contraintes

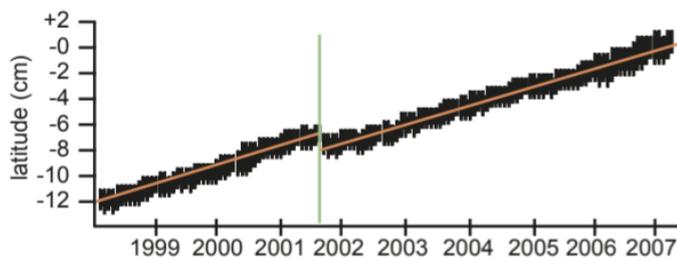


Fig. 47. Relevé GPS de la latitude de la station islandaise Höfn entre 1998 et 2008, montrant le déplacement vers le sud induit par un séisme en 2001. ★ [3]

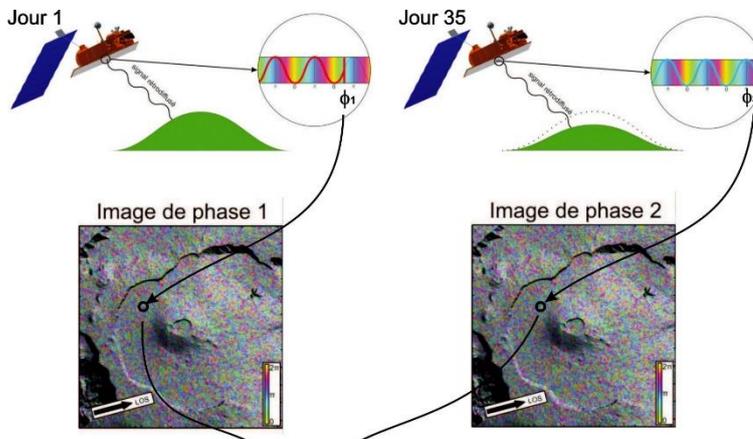


Fig. 48. Principe de l'interférométrie radar InSAR. ★★★ [10]

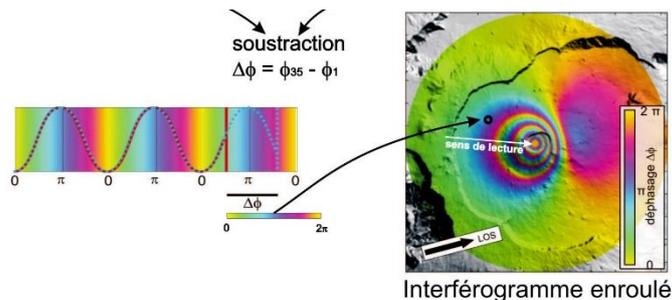


Fig. 49. Un exemple d'interprétation d'une image InSAR. ★★ [10]

- L'éruption d'avril 2007 du Piton de la Fournaise (île de la Réunion), vue par le satellite ALOS-PALSAR.
- La longueur d'onde utilisée est de 23,6 cm.
- On compte 6 franges, le déplacement est donc de 70,8 cm environ.
 - La phase augmente ('bleu' → 'violet' → 'jaune') donc la distance sol-satellite a augmenté : le sol s'est abaissé.

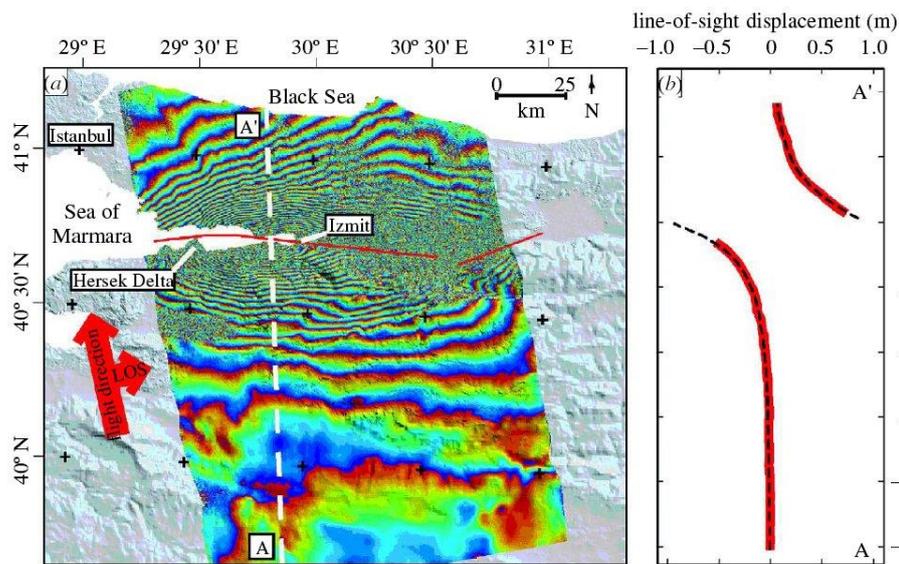
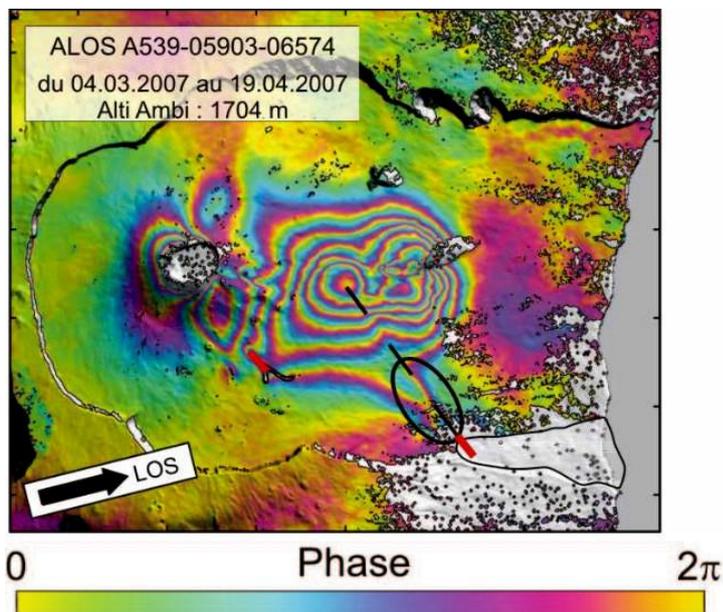
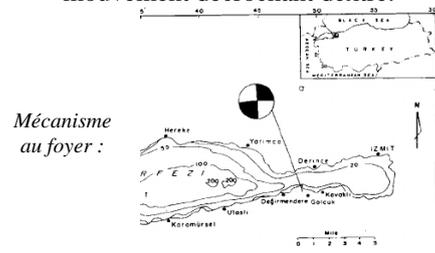


Fig. 50. Un exemple d'interprétation d'une image InSAR. ★★

Le séisme d'Izmit (Turquie, 17 août 1999, magnitude 7,2-7,9) : interféromètre et déplacement calculé, montrant un mouvement décrochant dextre.



Références	<p>[1] ou absence de numéro : Ouvrage ou page Internet non précisé</p> <p>[2] O. Dautel <i>et al.</i> Biologie Géologie BCPST1. Vuibert</p> <p>[3] C. Perrier <i>et al.</i> Biologie BCPST1 tout-en-un. Dunod</p> <p>[4] L. Bourgeois. Cours ST3 ; http://laurie.bougeois.free.fr/polytech/Deformation.pdf</p> <p>[5] https://www.cap-terre.org/</p> <p>[6] P. Nougier. Déformation des roches et transformation de leurs minéraux - Initiation à la tectonique. Ellipses</p> <p>[7] https://www.geologie.ens.fr/</p> <p>[8] http://christian.nicollet.free.fr/</p> <p>[9] wikipedia.fr</p> <p>[10] Planet-Terre ; https://planet-terre.ens-lyon.fr/</p>
-------------------	---