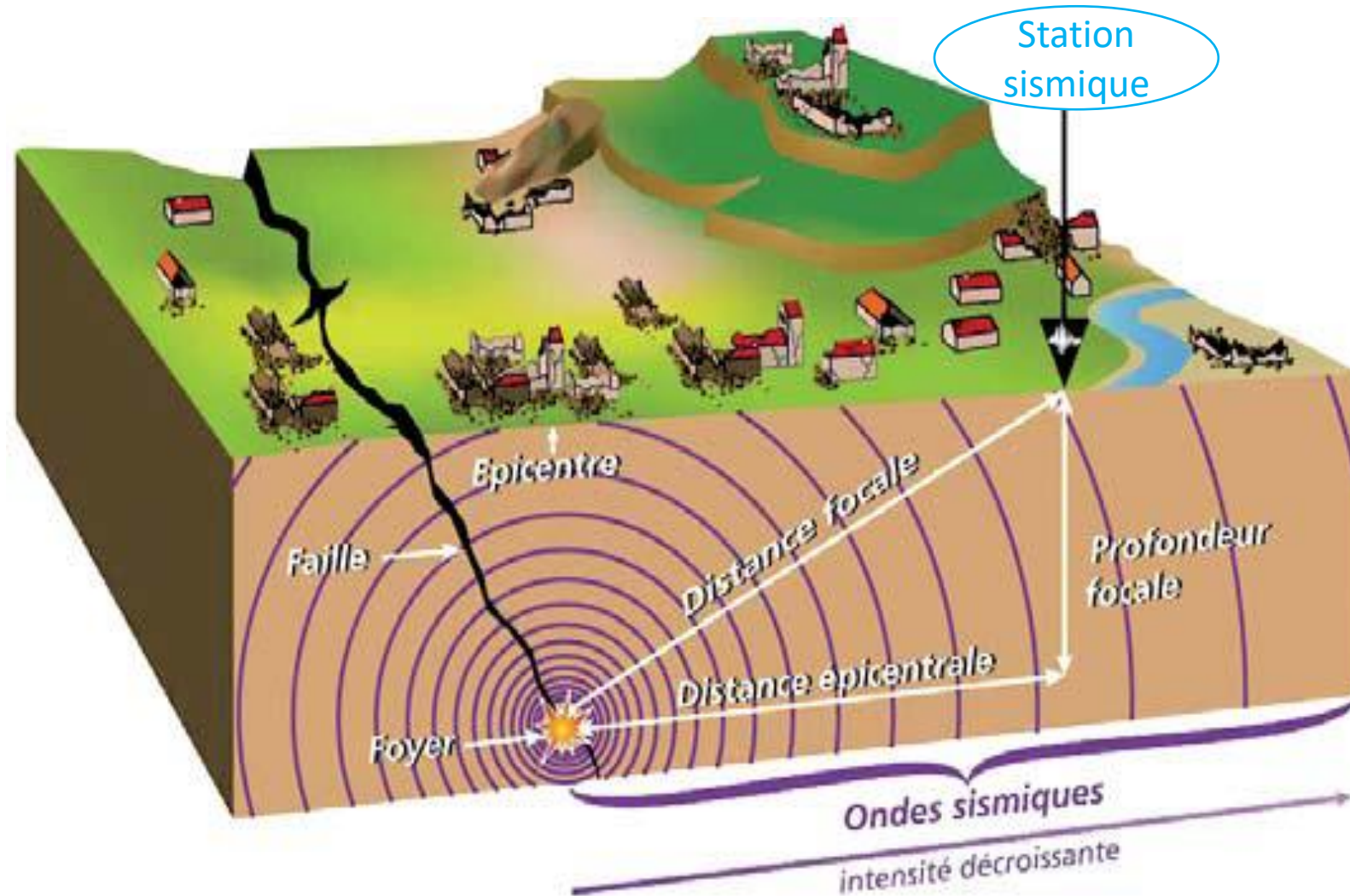
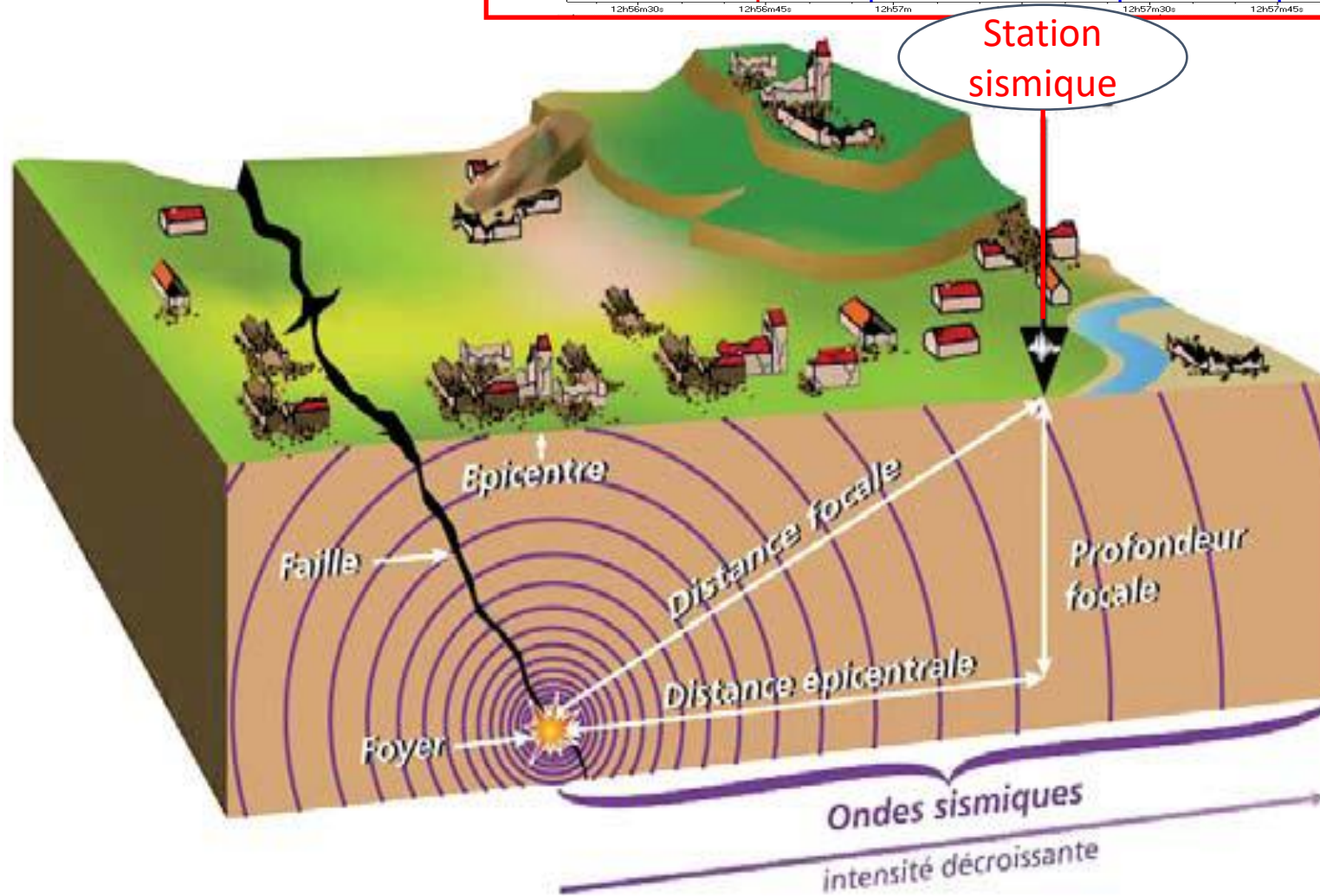
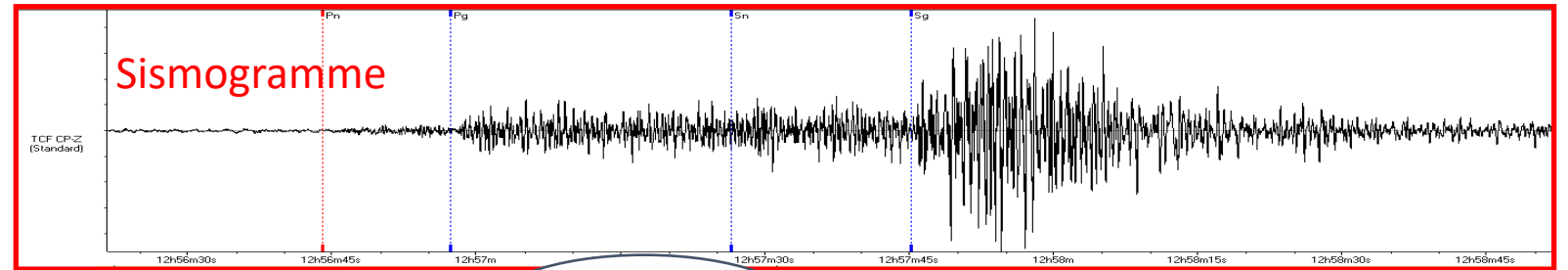


La source sismique

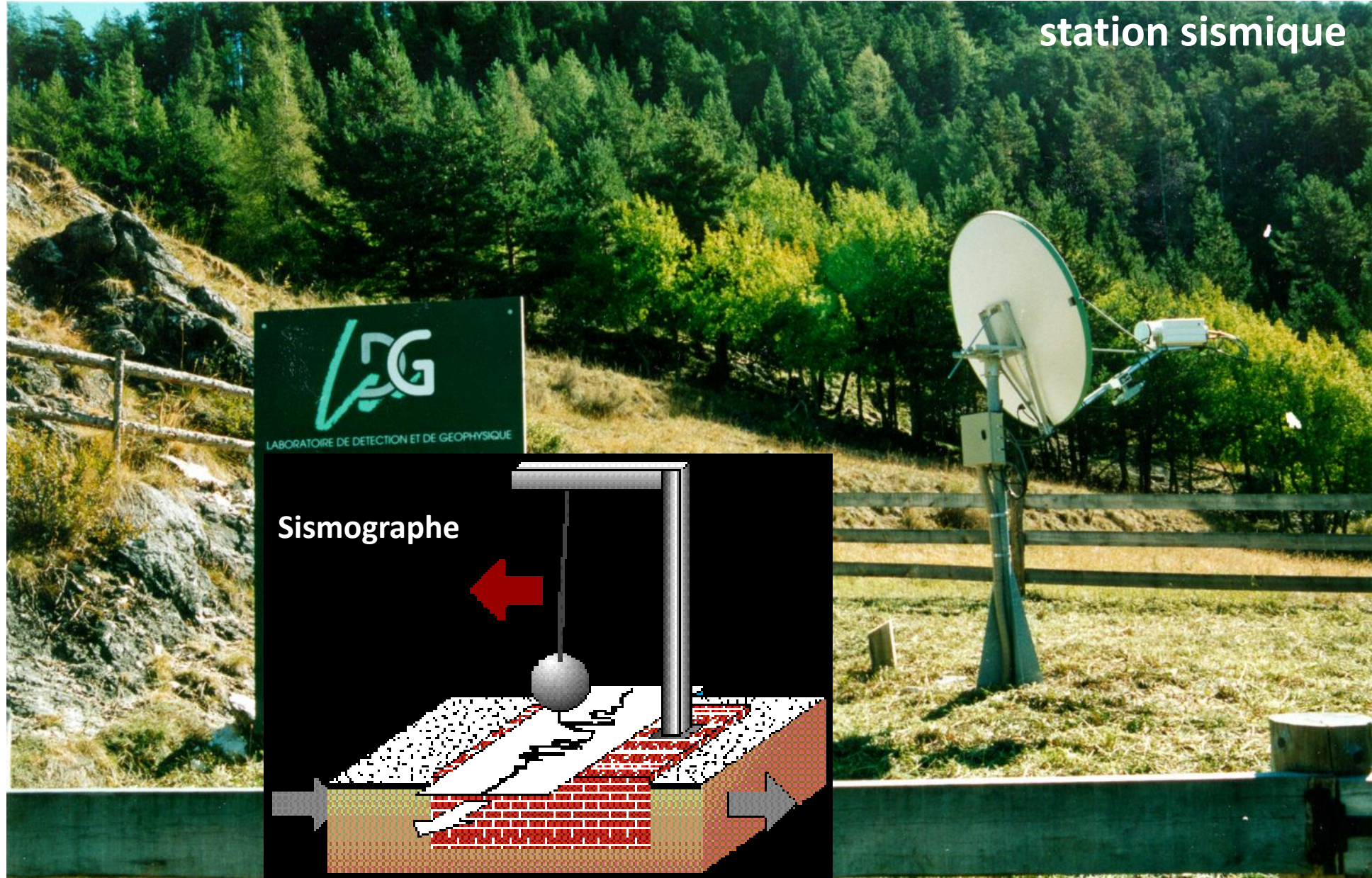


Bruno
HERNANDEZ

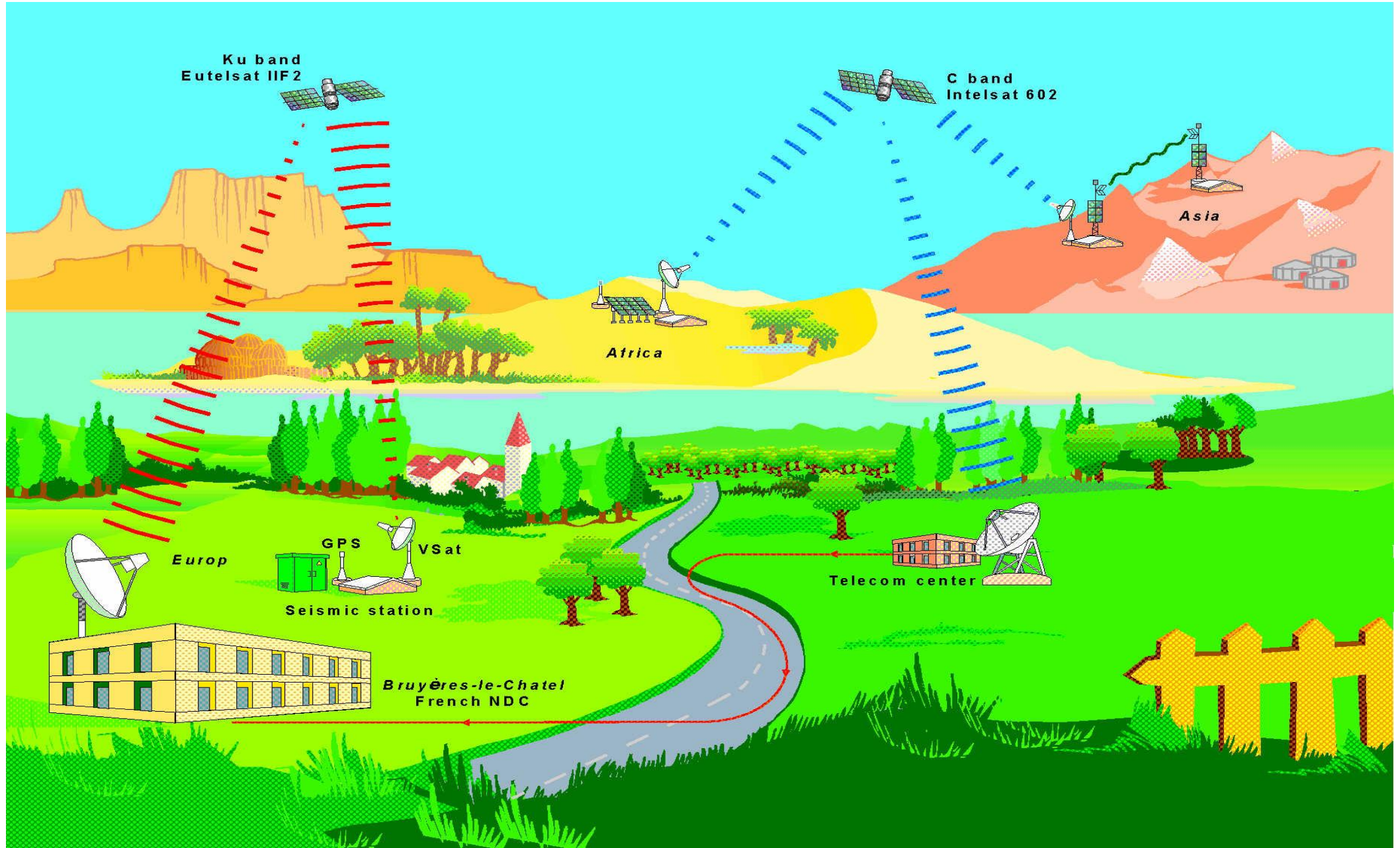
La station sismique



La surveillance des séismes



Acquisition des données géophysiques



Intérieur de la Terre

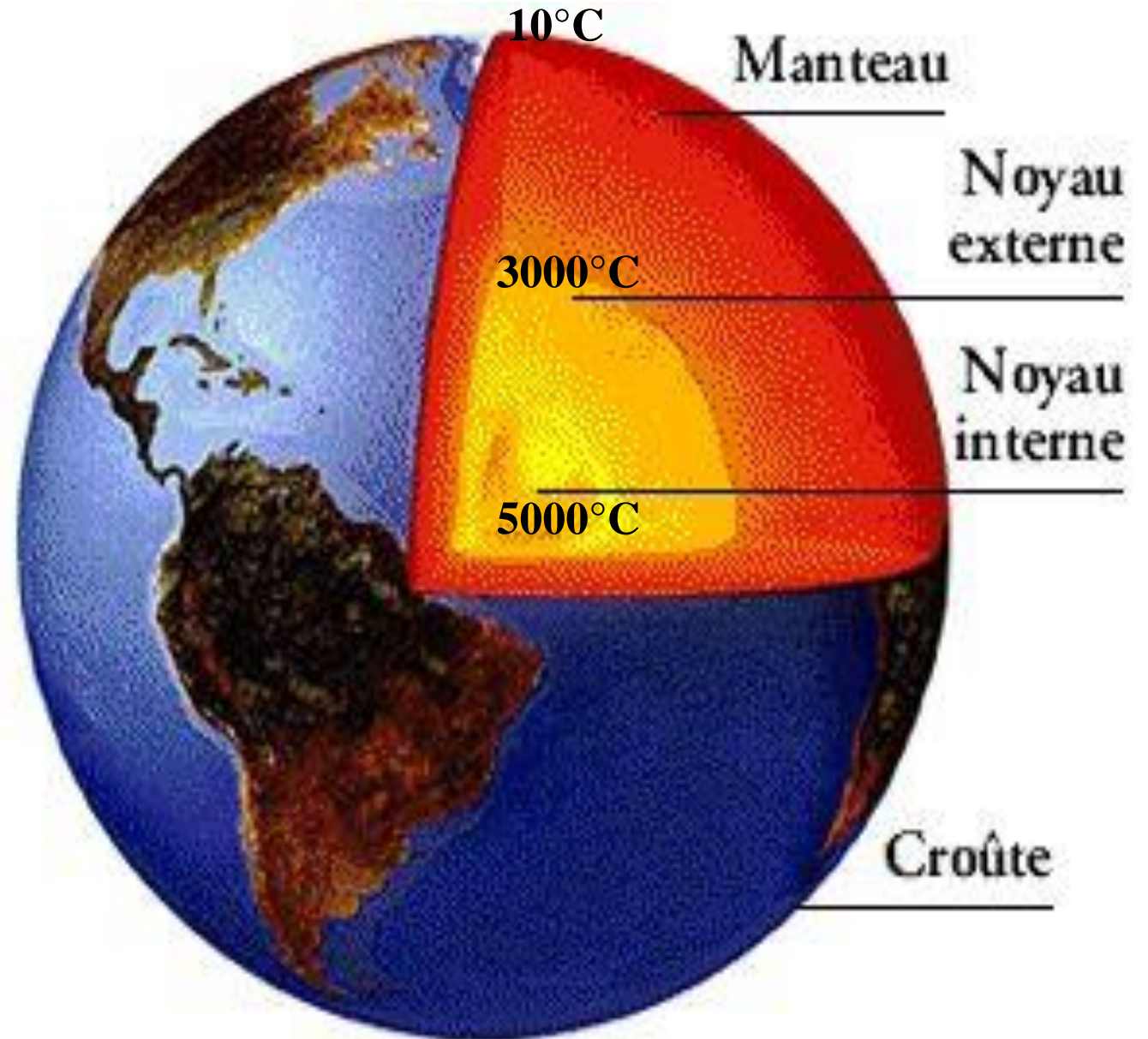
Rayon : 6370 km

Croûte (1 à 70 km)

Manteau (2900 km)

Noyau externe (2200 km)

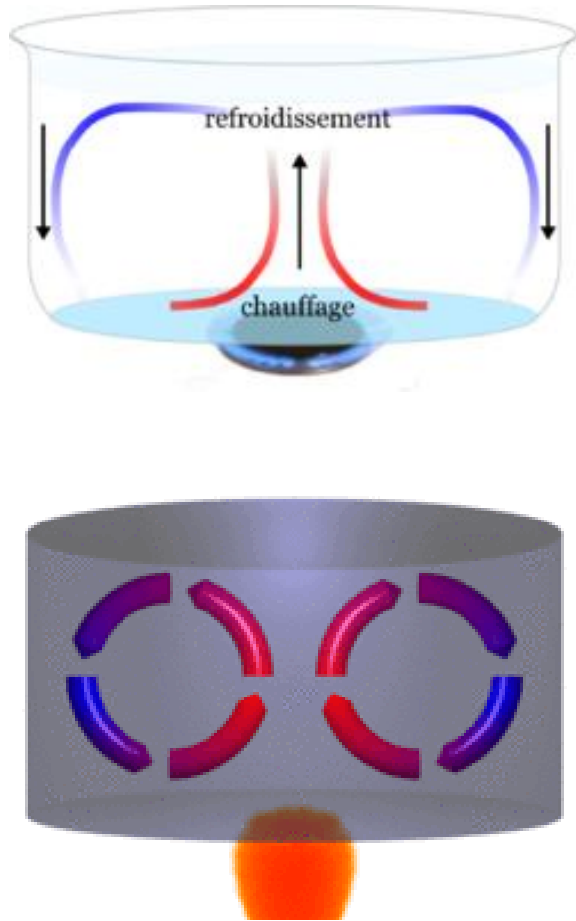
Noyau interne (1200 km)



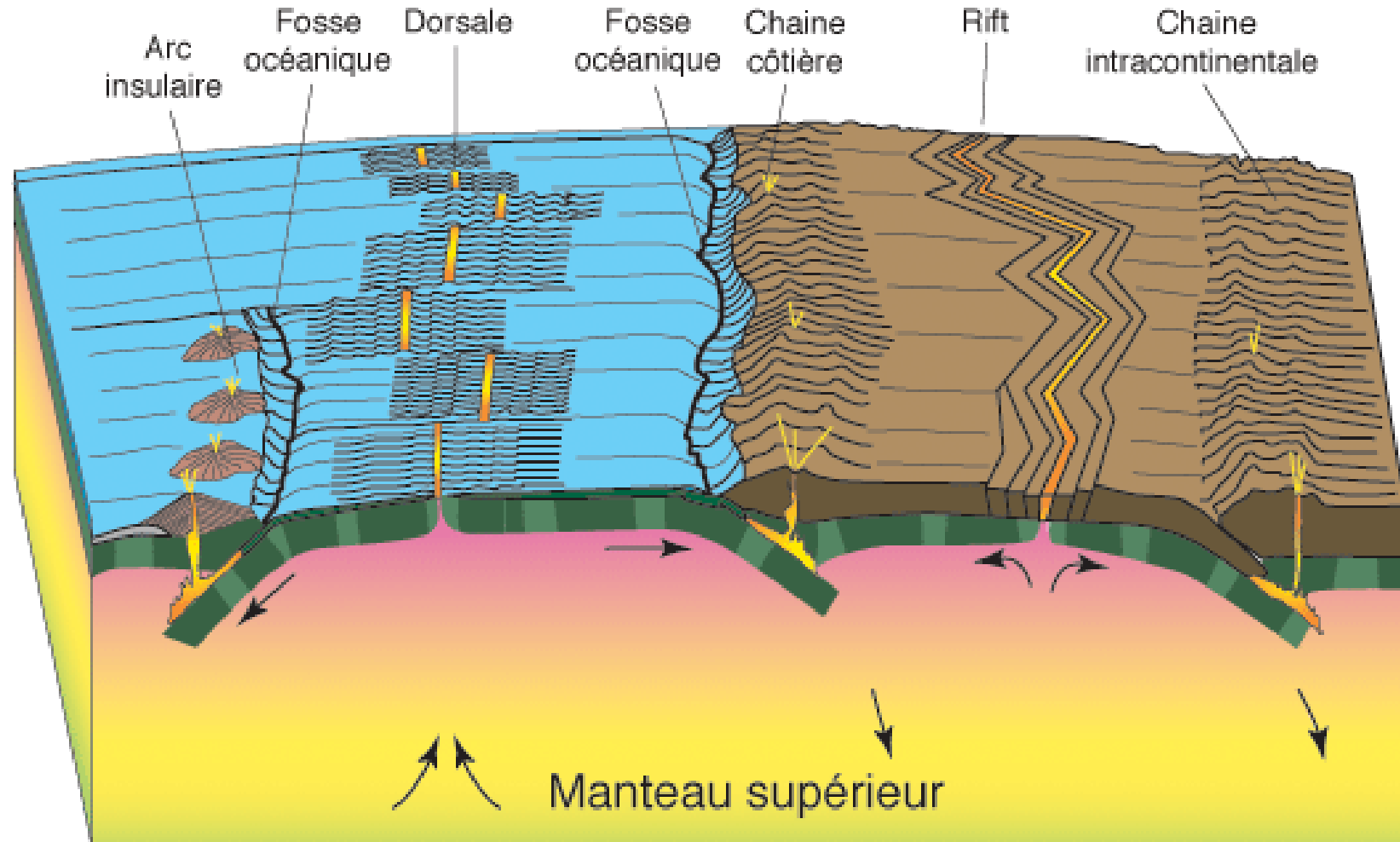
La tectonique des plaques

Convection

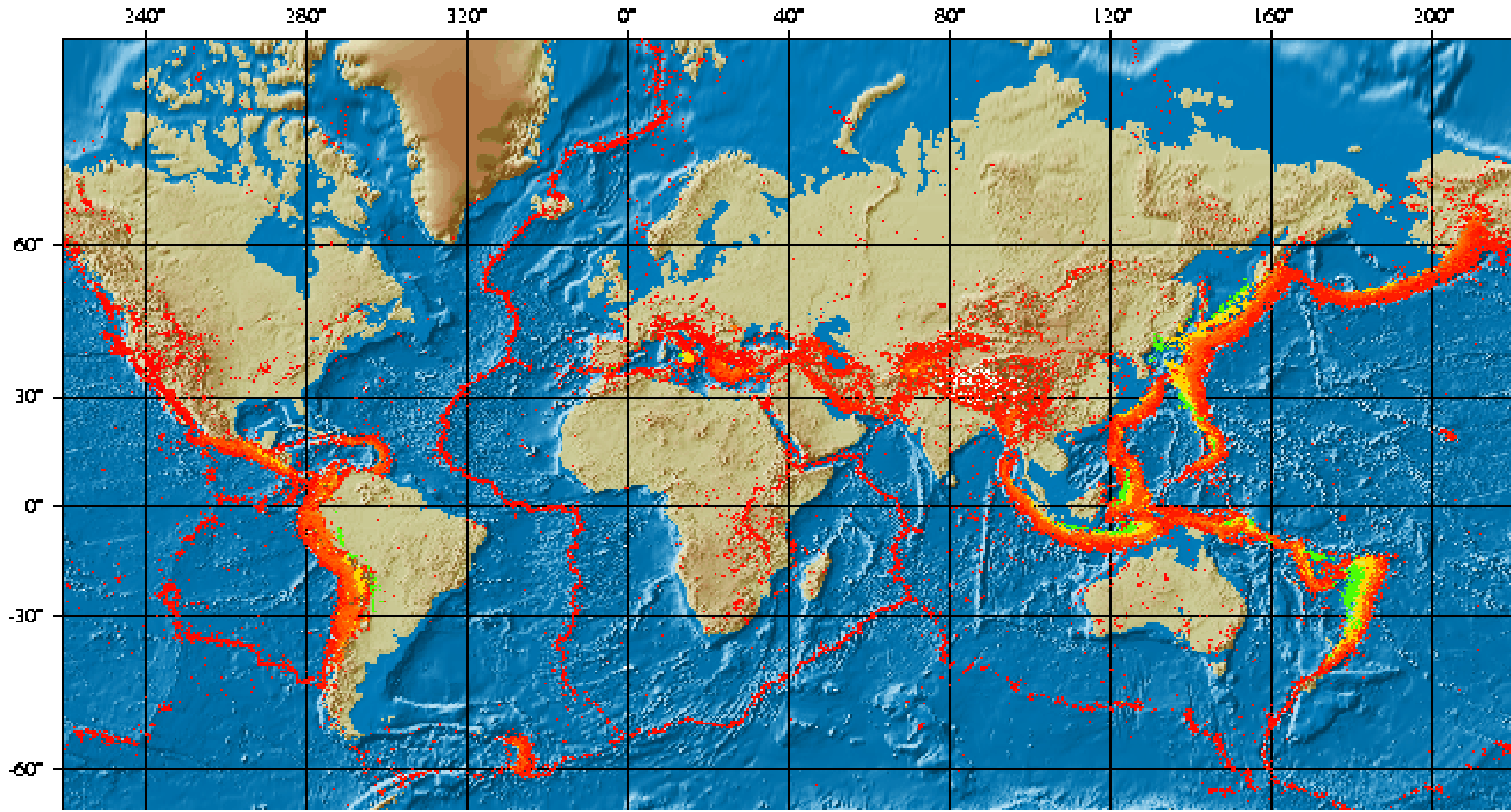
Dans une casserole



Dans le manteau terrestre



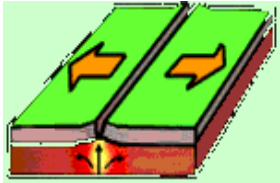
Les séismes



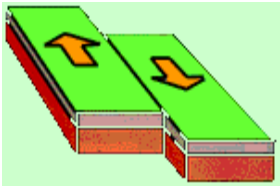
Les plaques tectoniques

Limites des plaques:

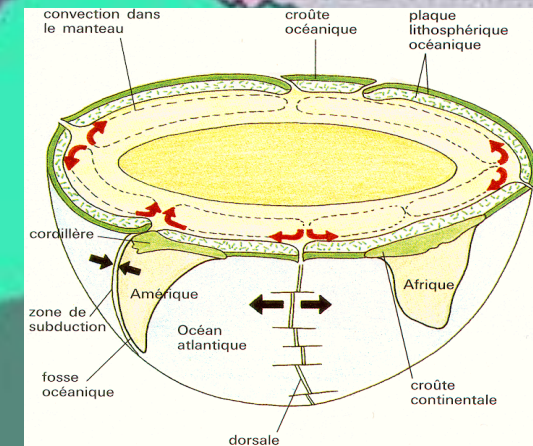
divergentes



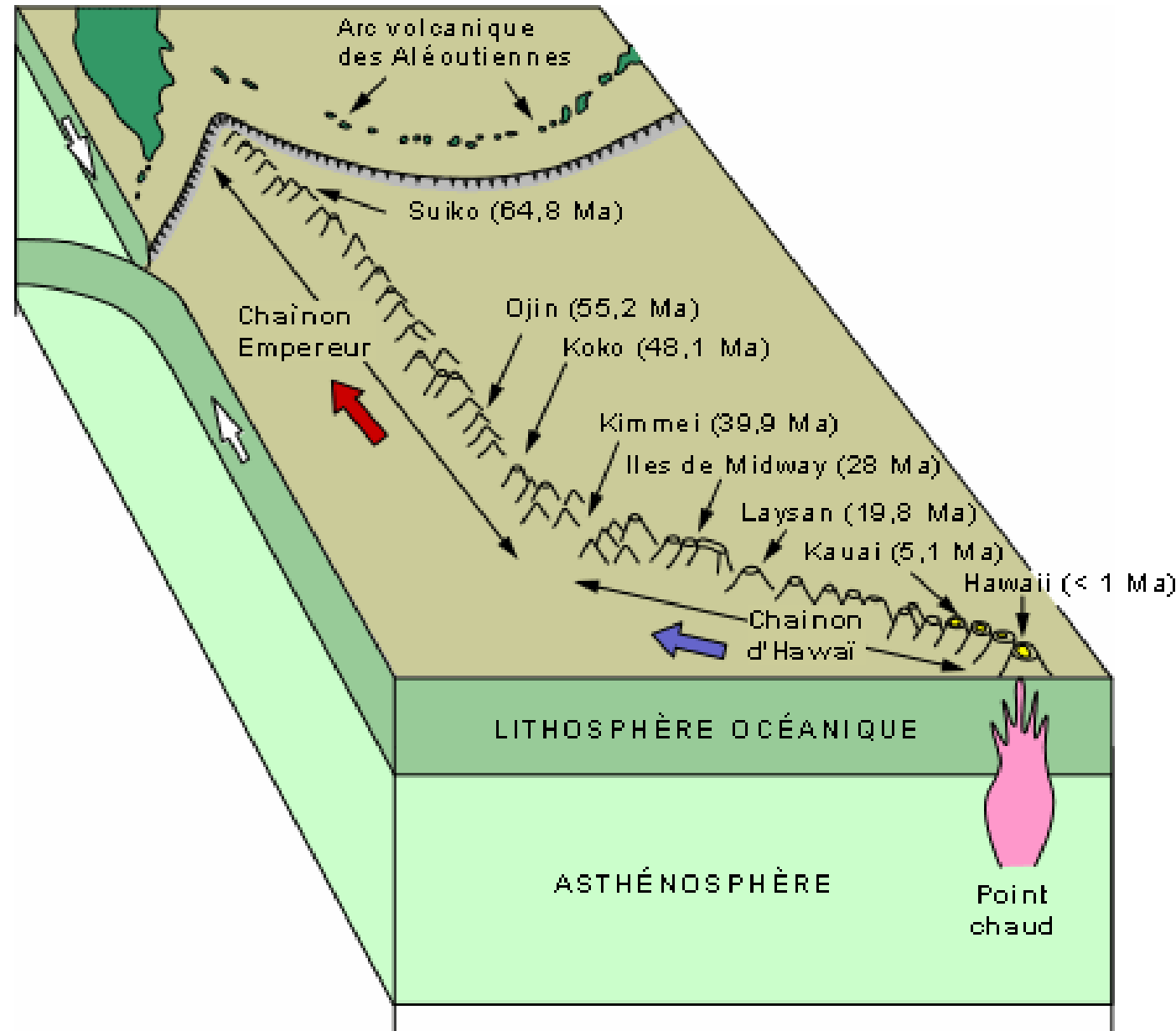
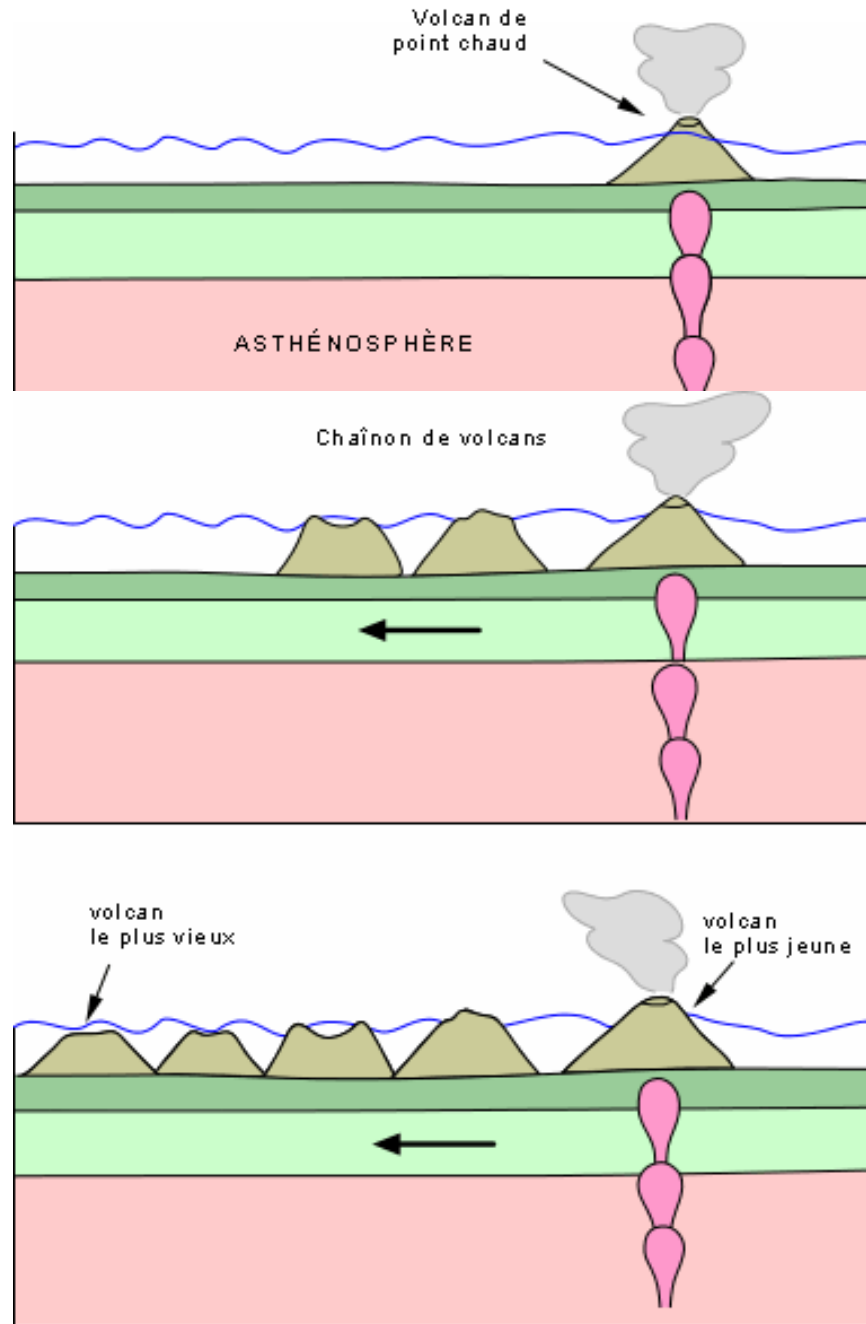
transformantes



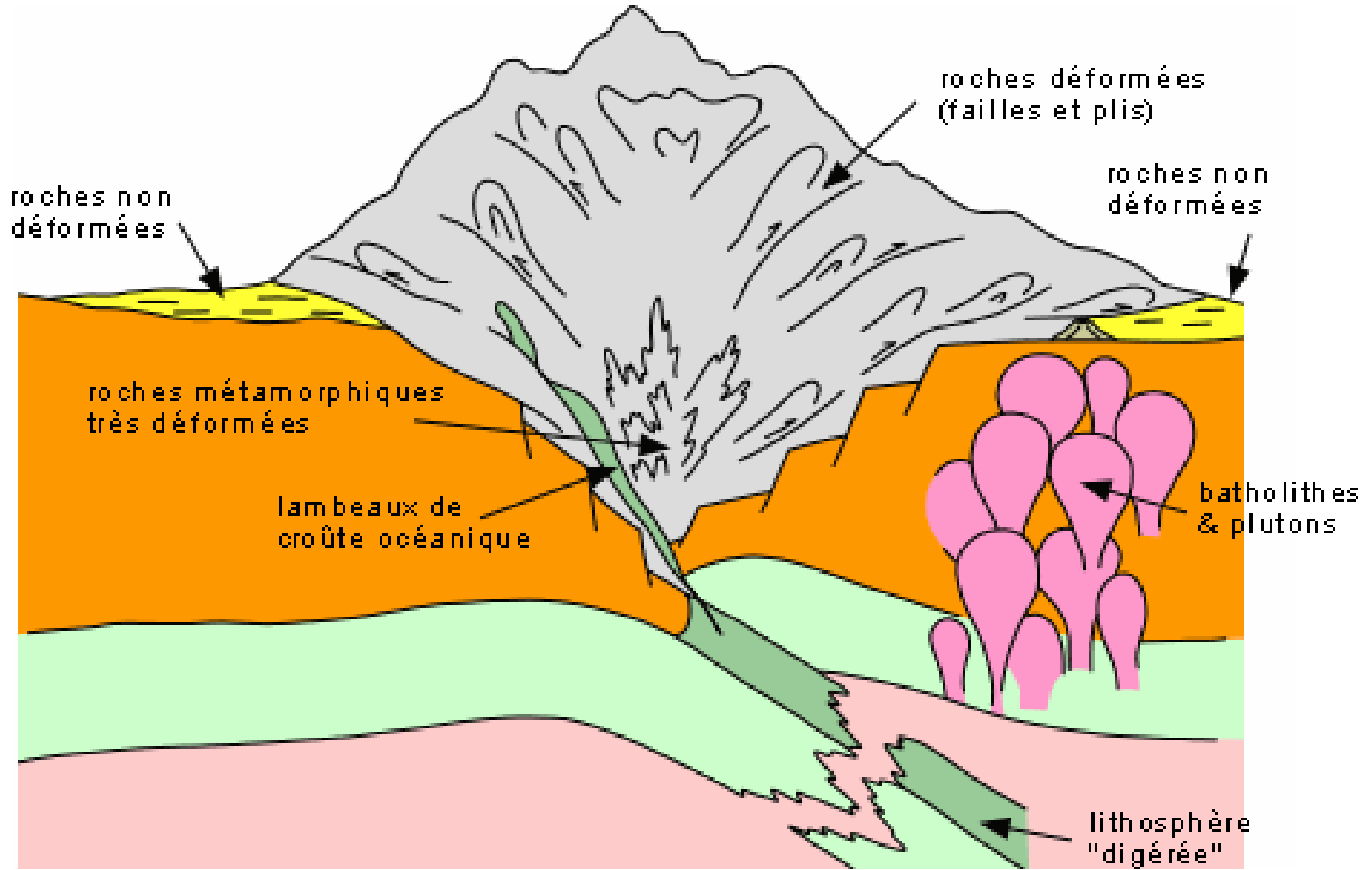
convergentes



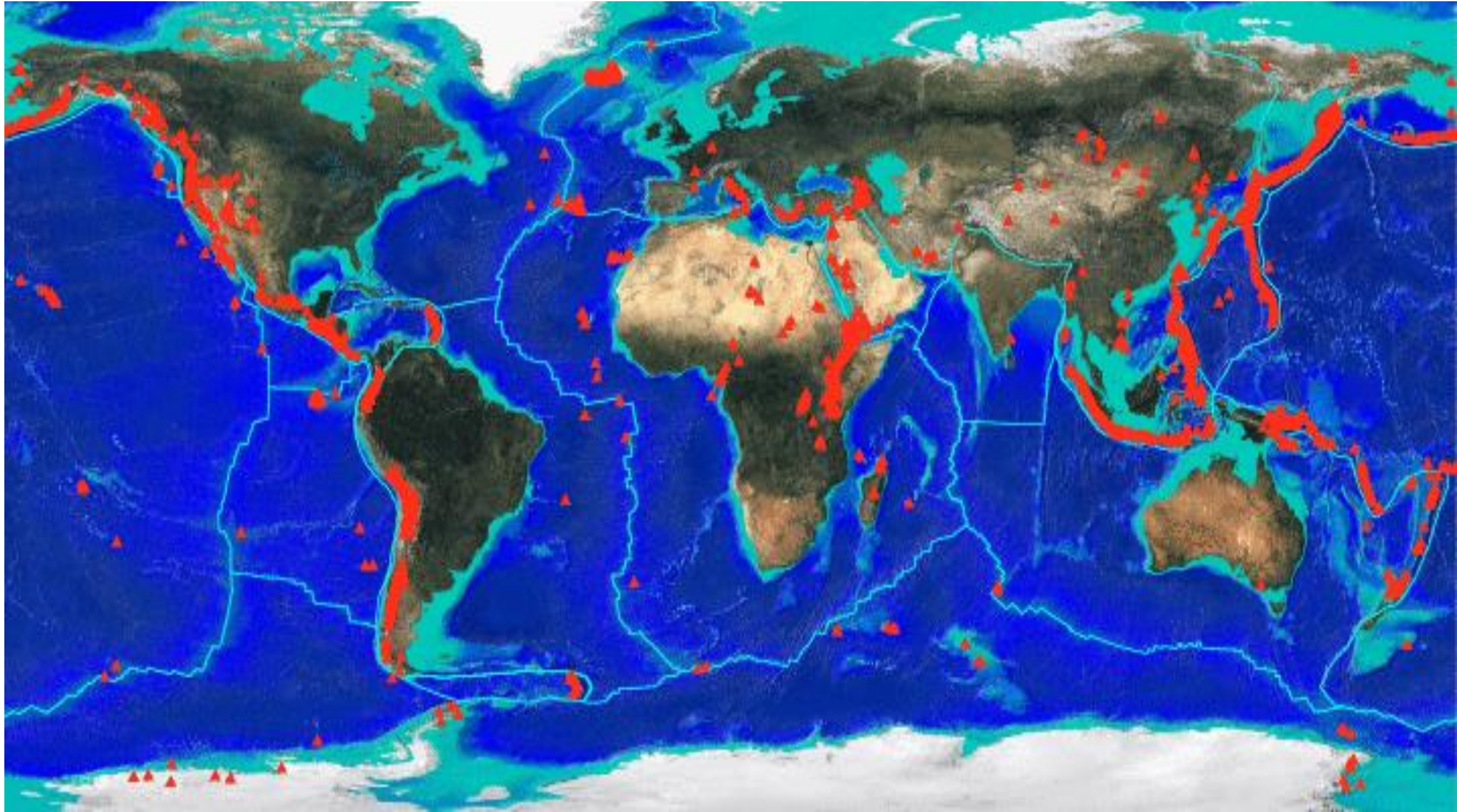
Volcanisme de point chaud



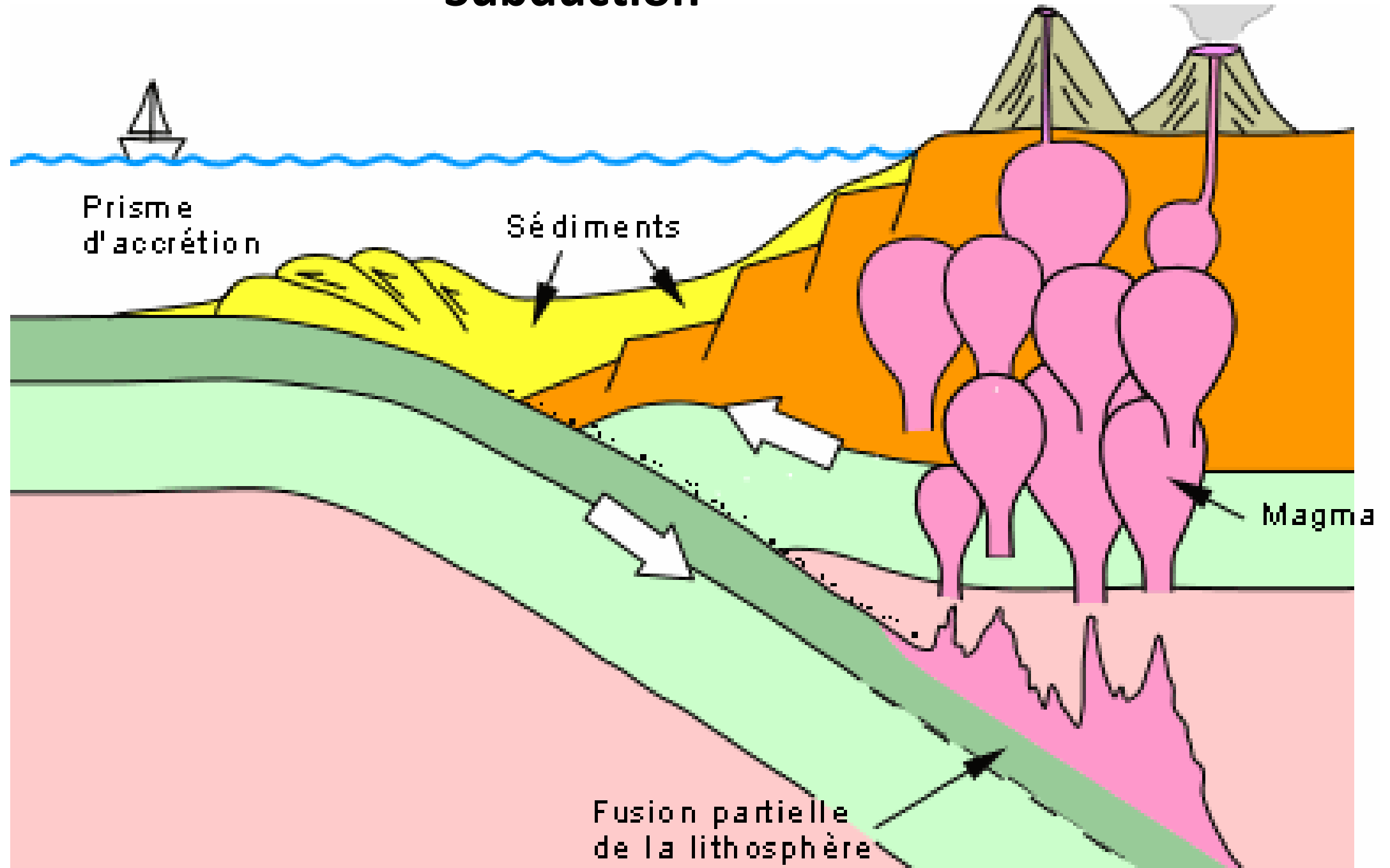
Collision continentale



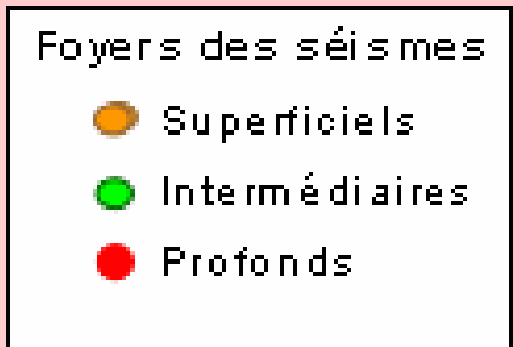
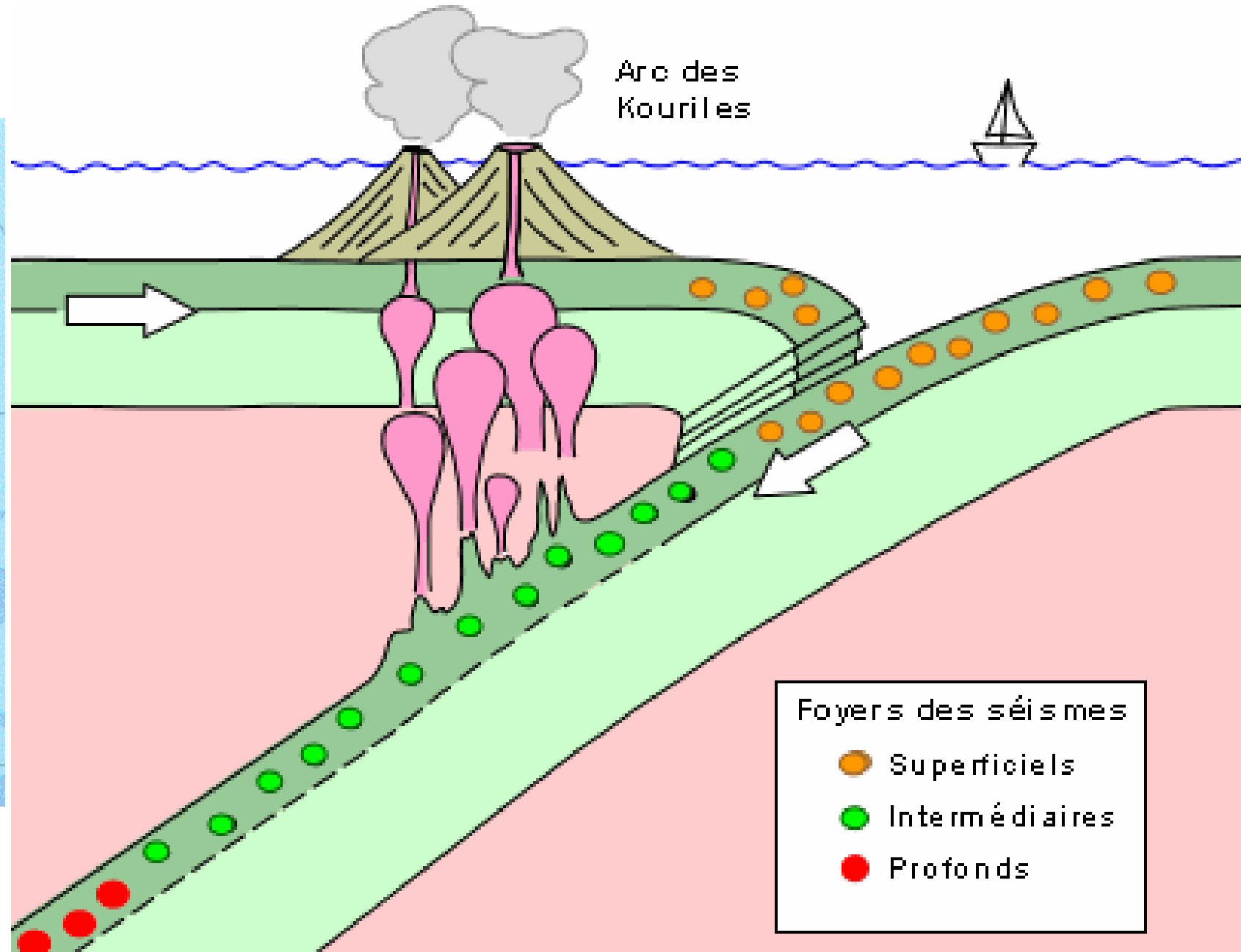
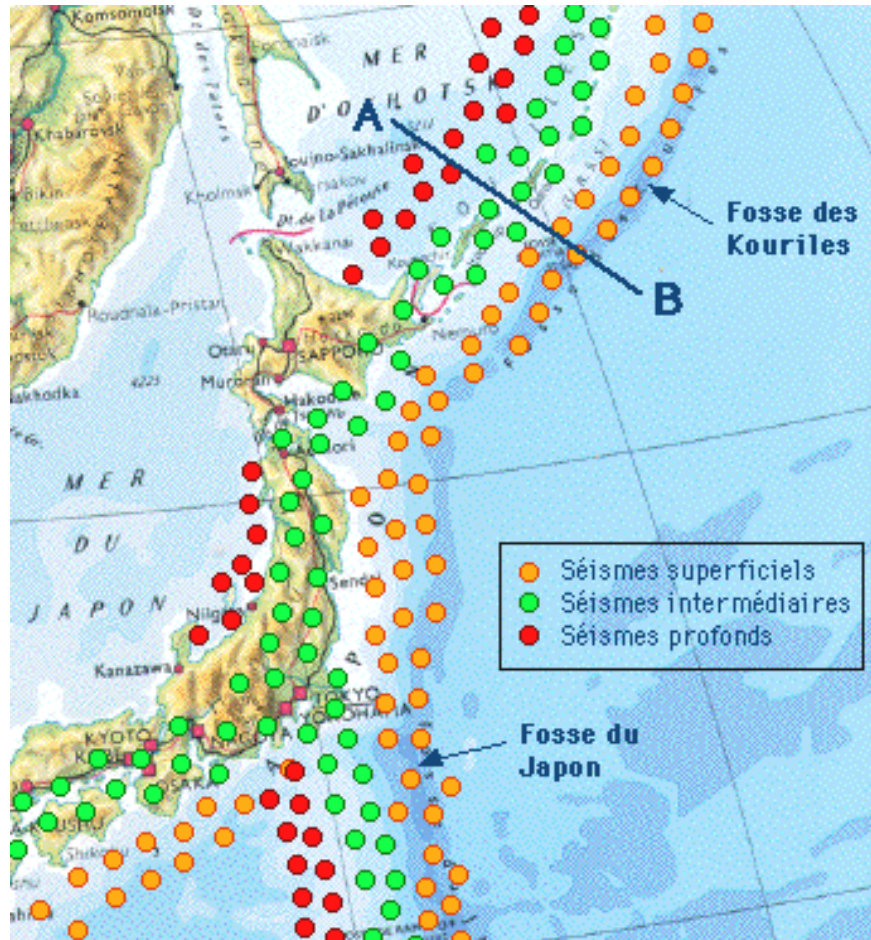
Volcans



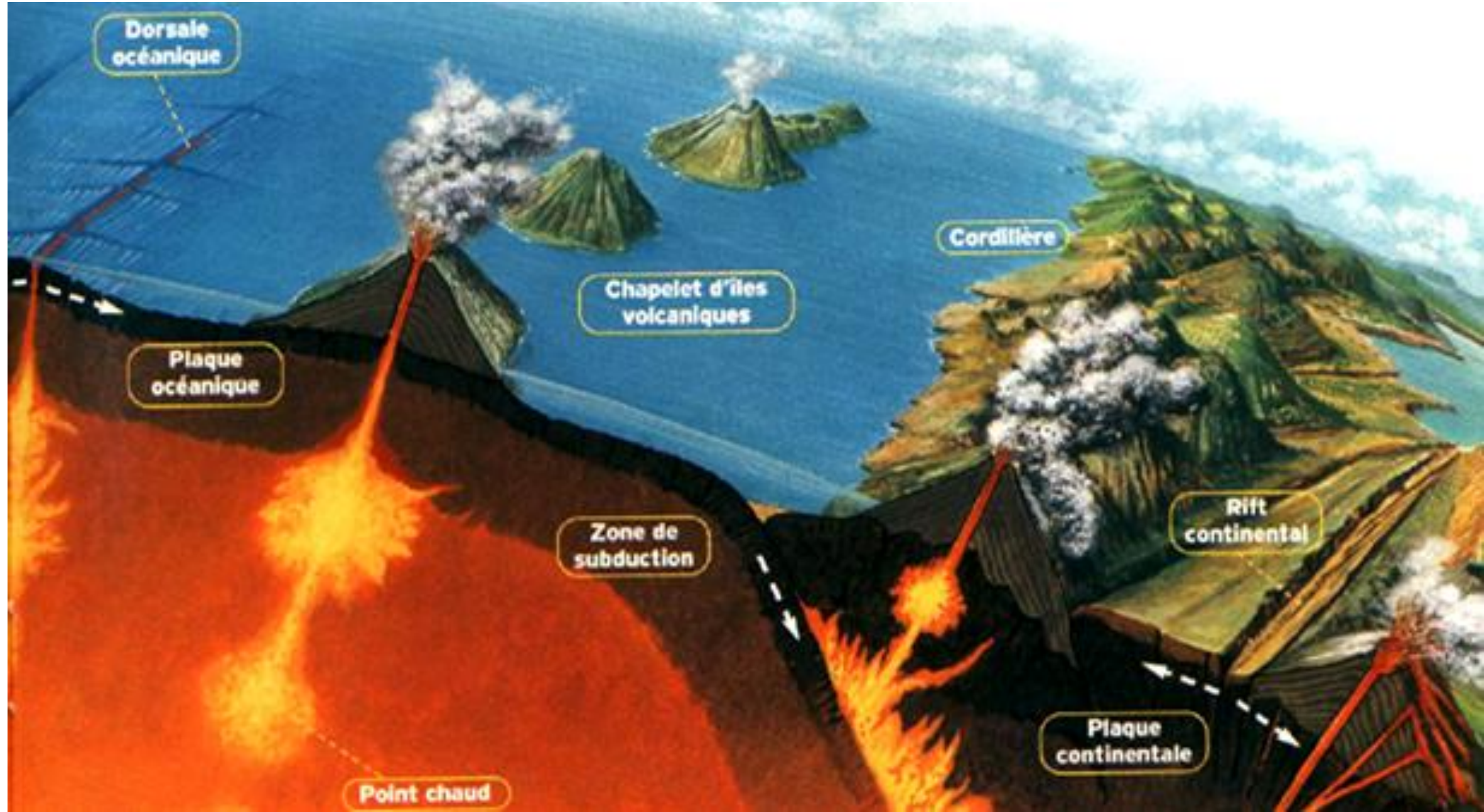
Subduction



Arc insulaire

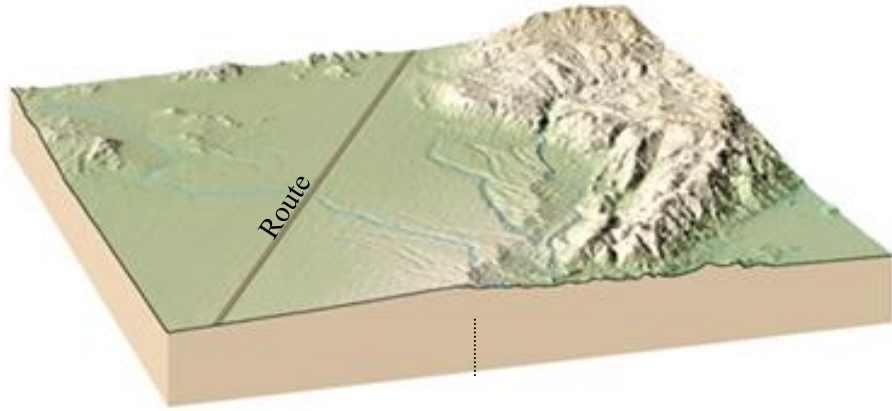


Volcanisme

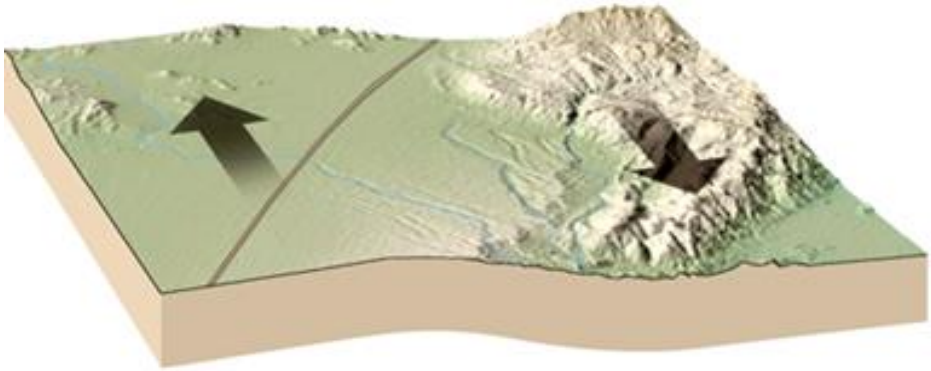


La rupture sismique

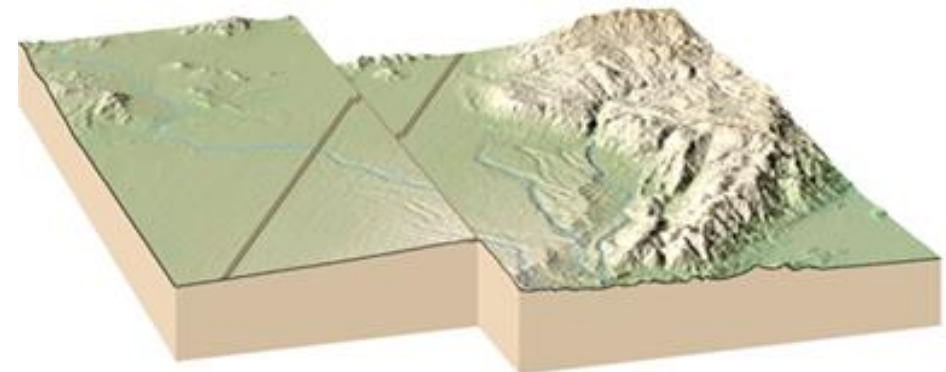
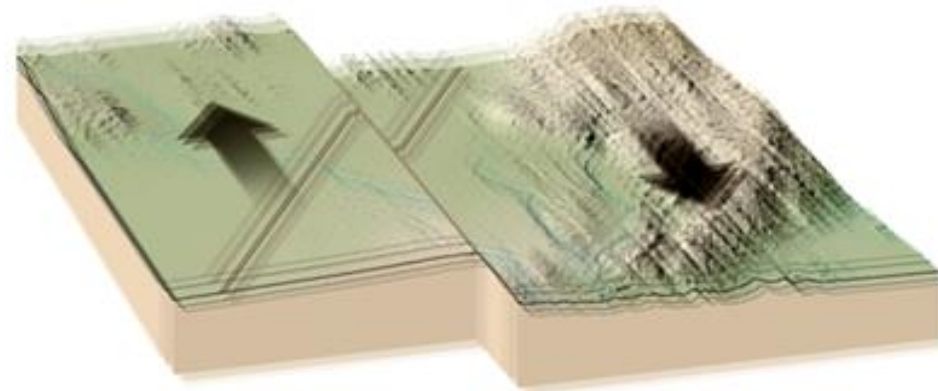
Séisme : glissement sur une faille



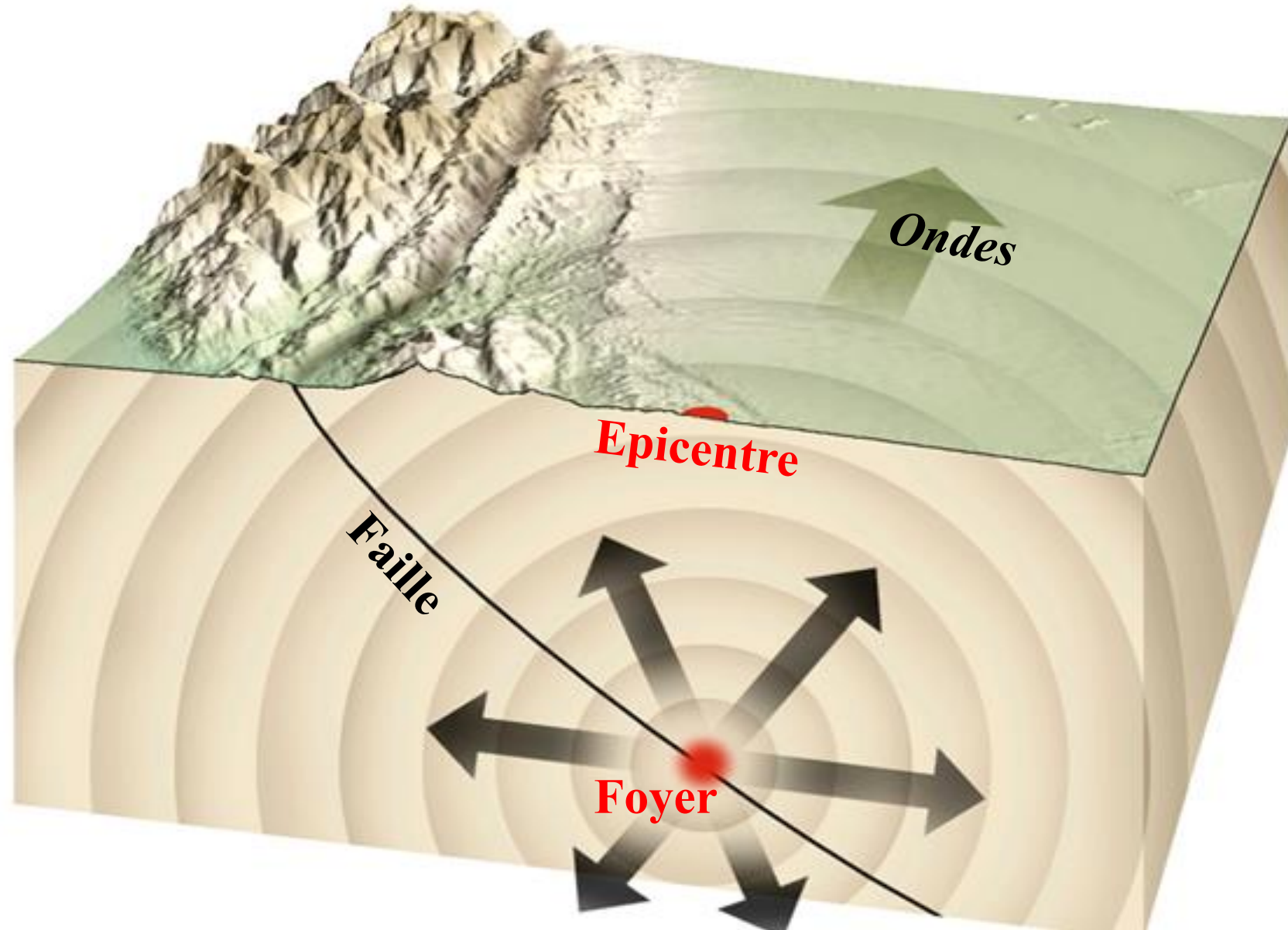
Pendant des dizaines voire des centaines ou des milliers d'années, les roches se déforment lentement sans casser.



Soudainement (pendant quelques secondes), le glissement entre les deux compartiments de la faille se produit générant des ondes sismiques.

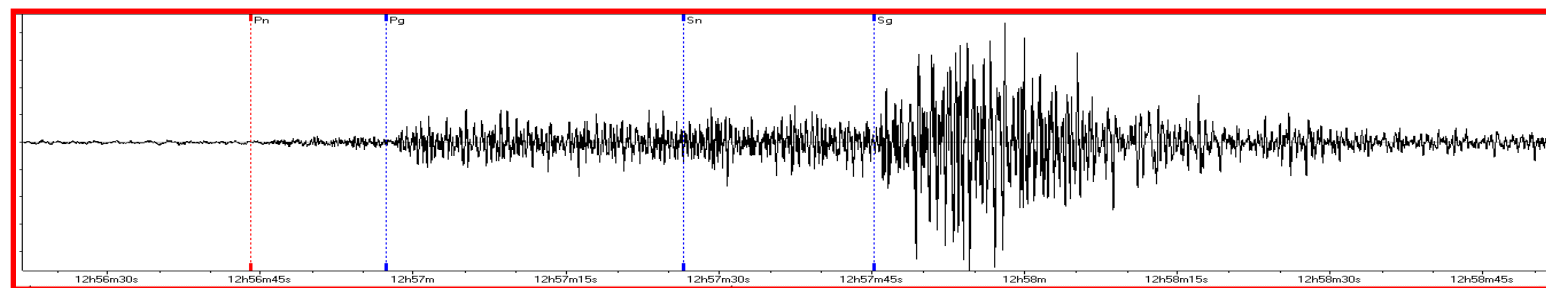
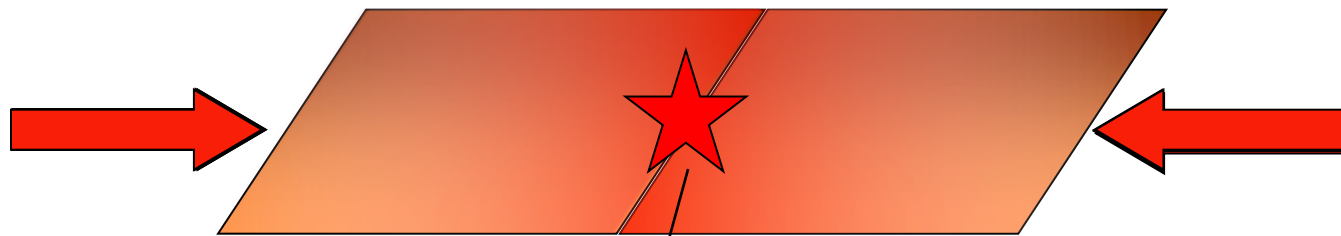


Séisme



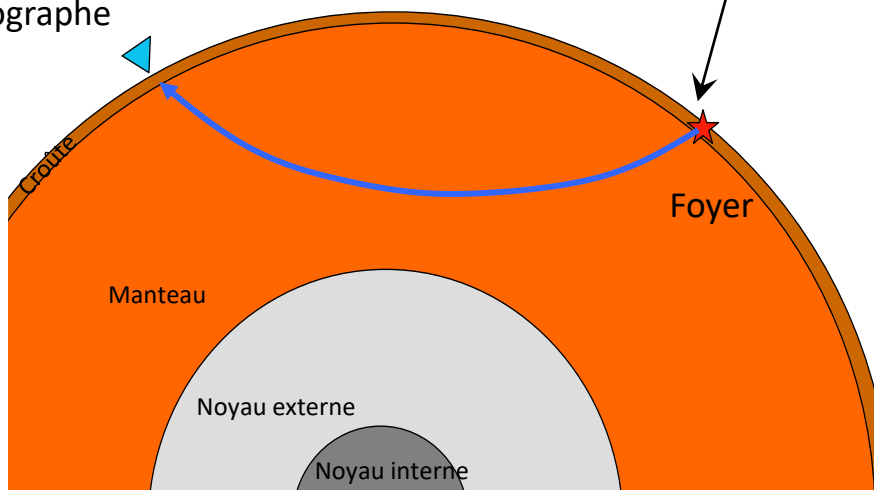
Le séisme génère des secousses

Des forces s'appliquent dans la croûte terrestre (contraintes des plaques) → déplacement de terre



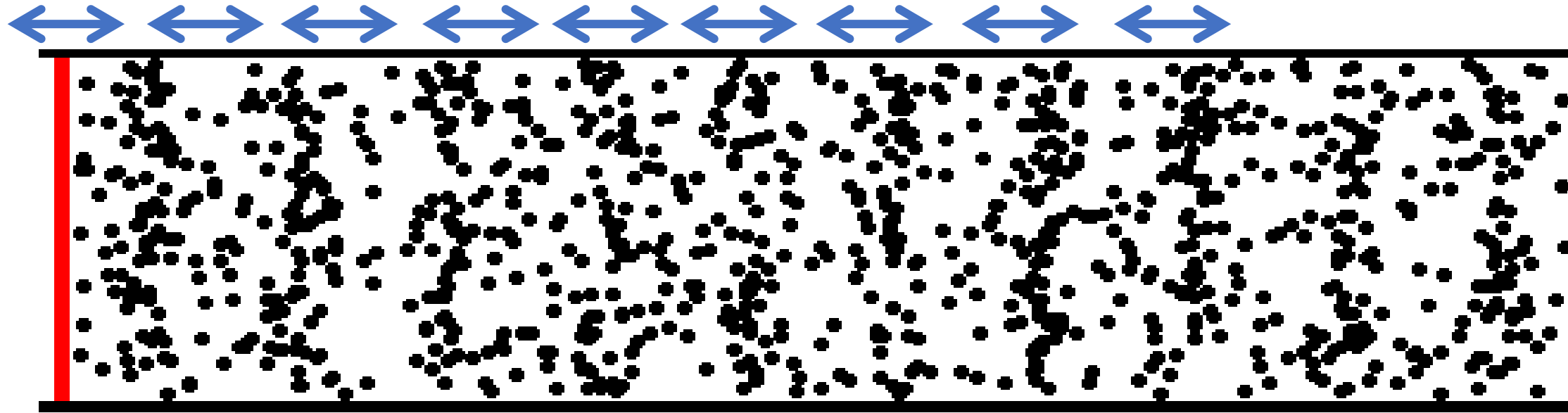
Sismographe

Les secousses générées par le séisme se propagent à l'intérieur de la Terre

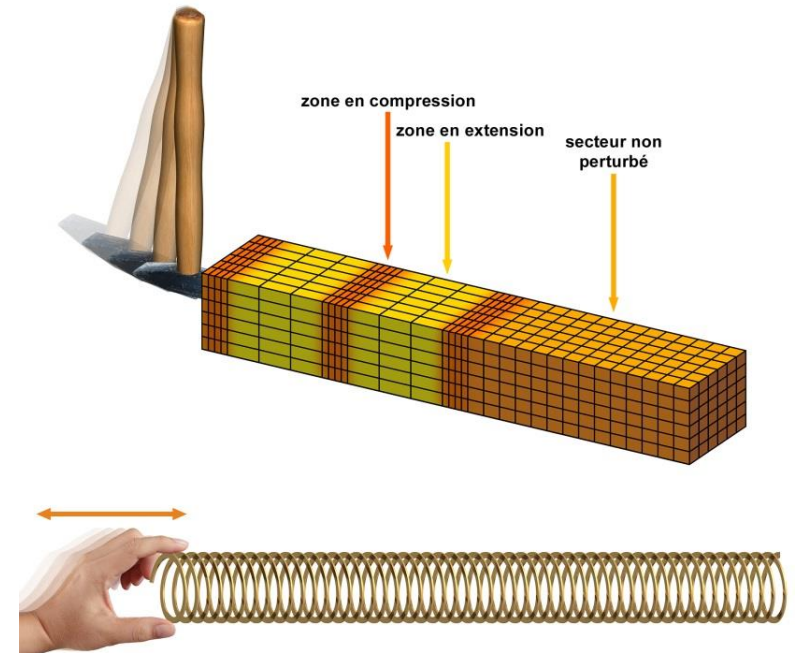


Les ondes sismiques

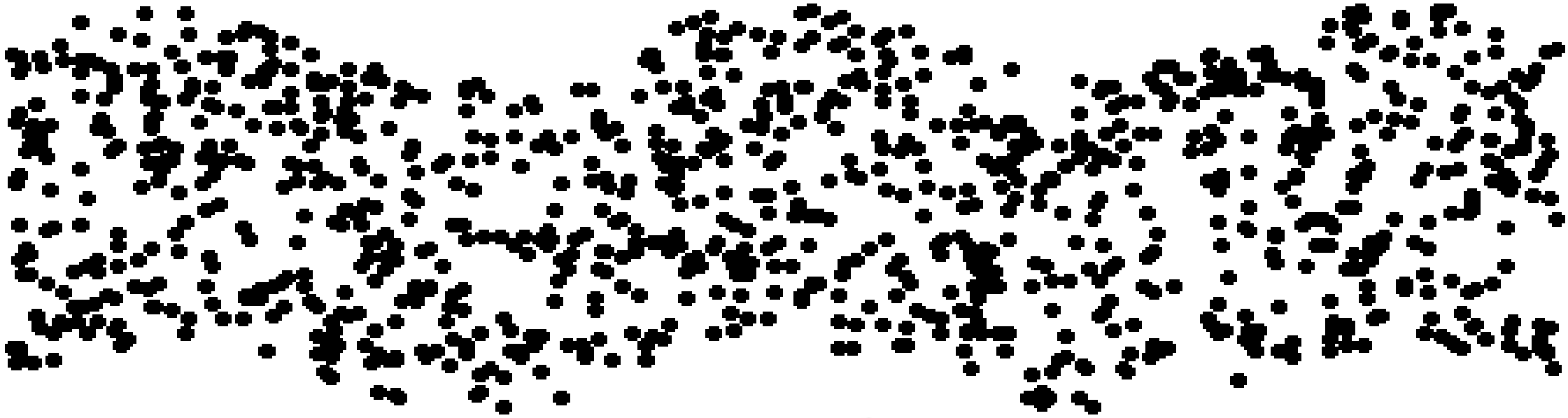
Secousses sismiques (ondes P)



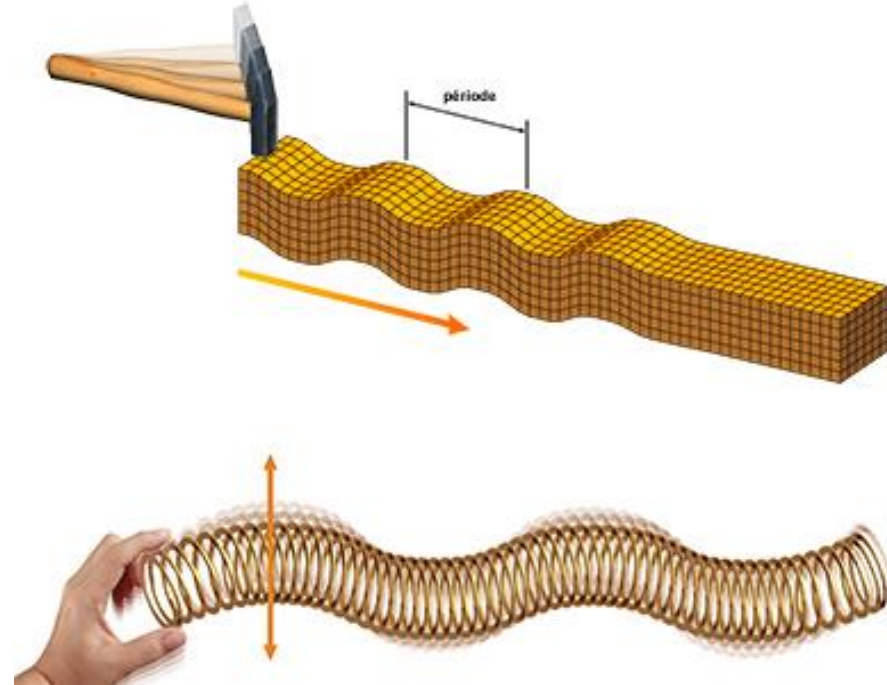
Vibrations en compression



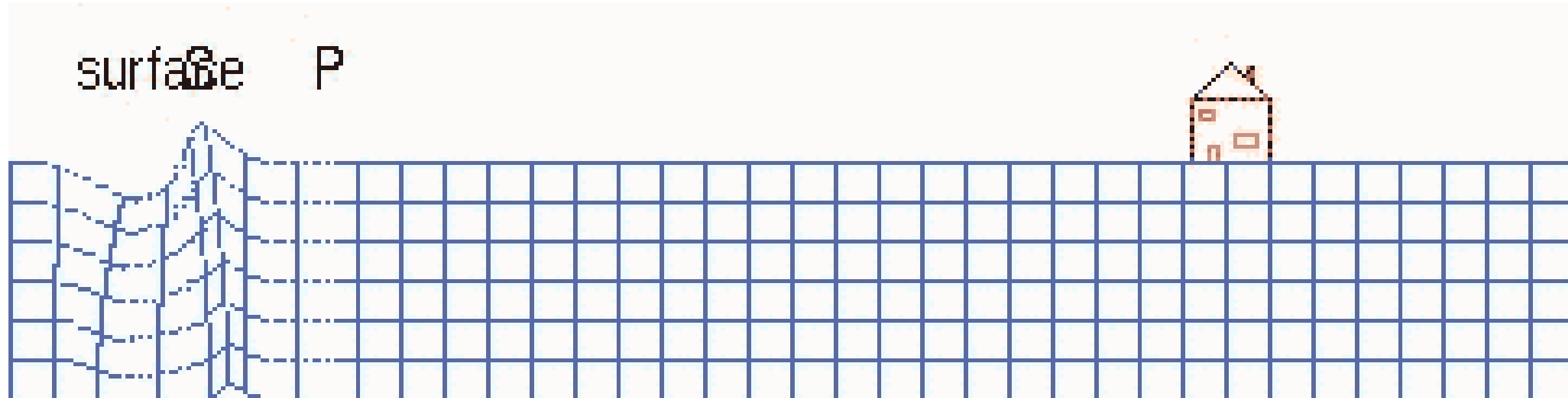
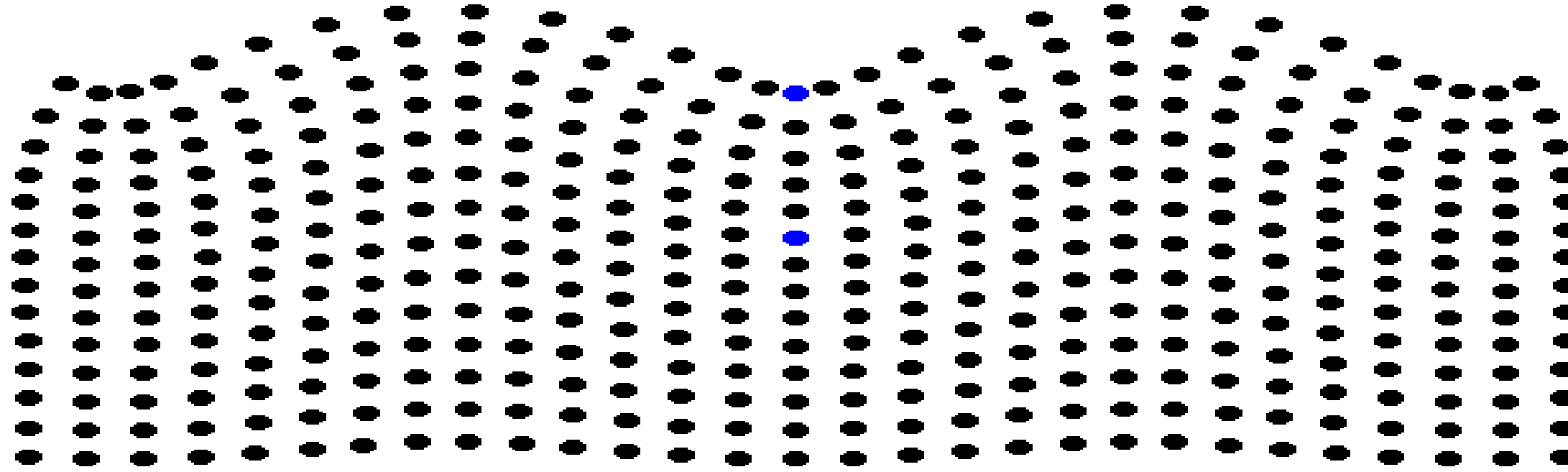
Secousses sismiques (ondes S)



Vibrations en cisaillement

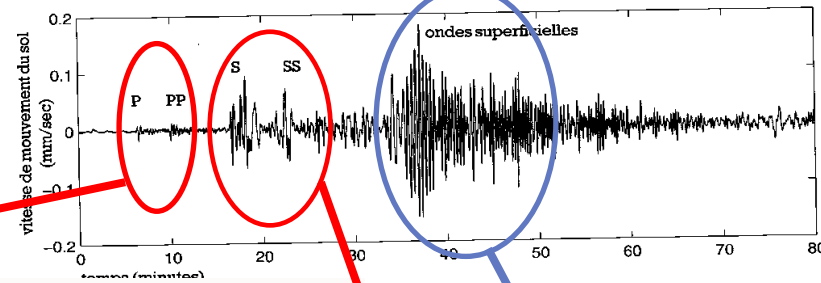


Secousses sismiques (ondes de surface)



Les ondes sismiques

ondes de volume

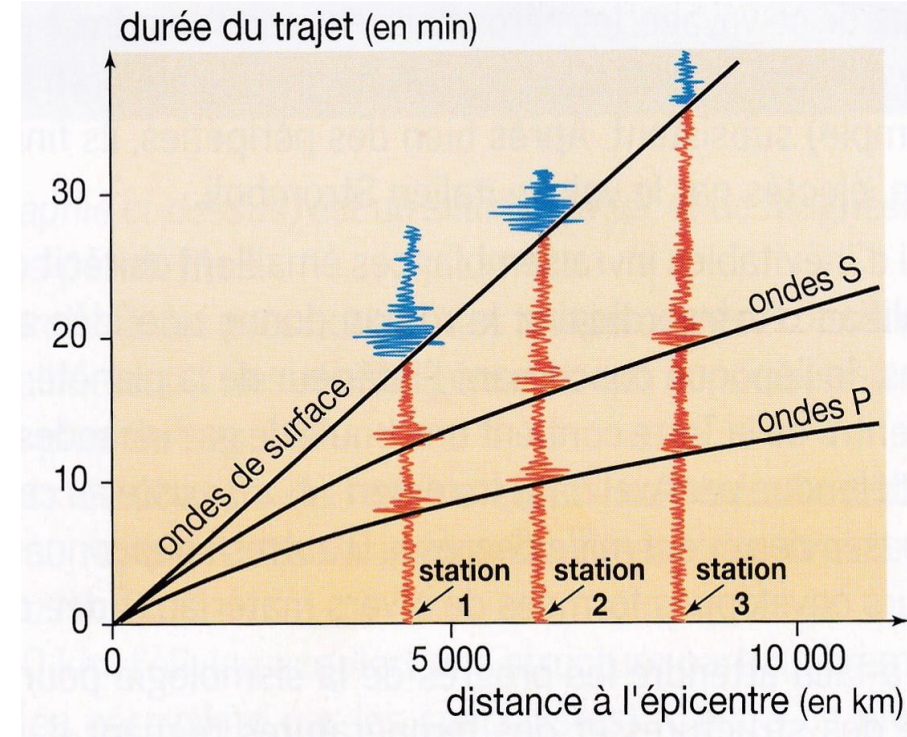


ondes P

ondes des surface

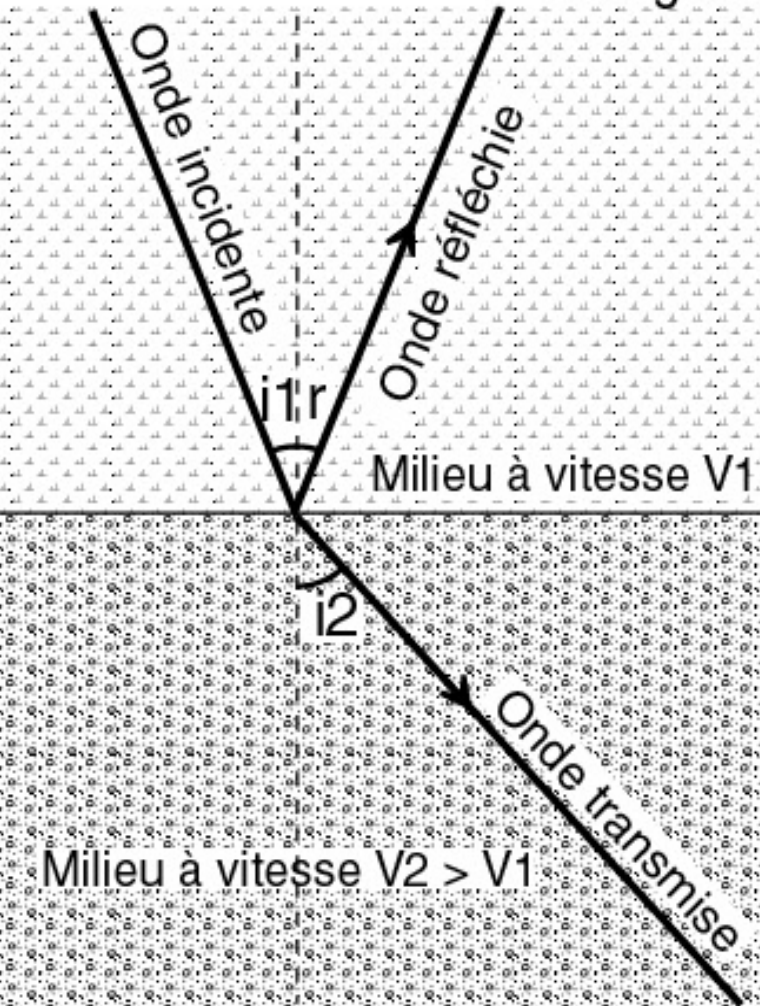
ondes S

ondes des surface

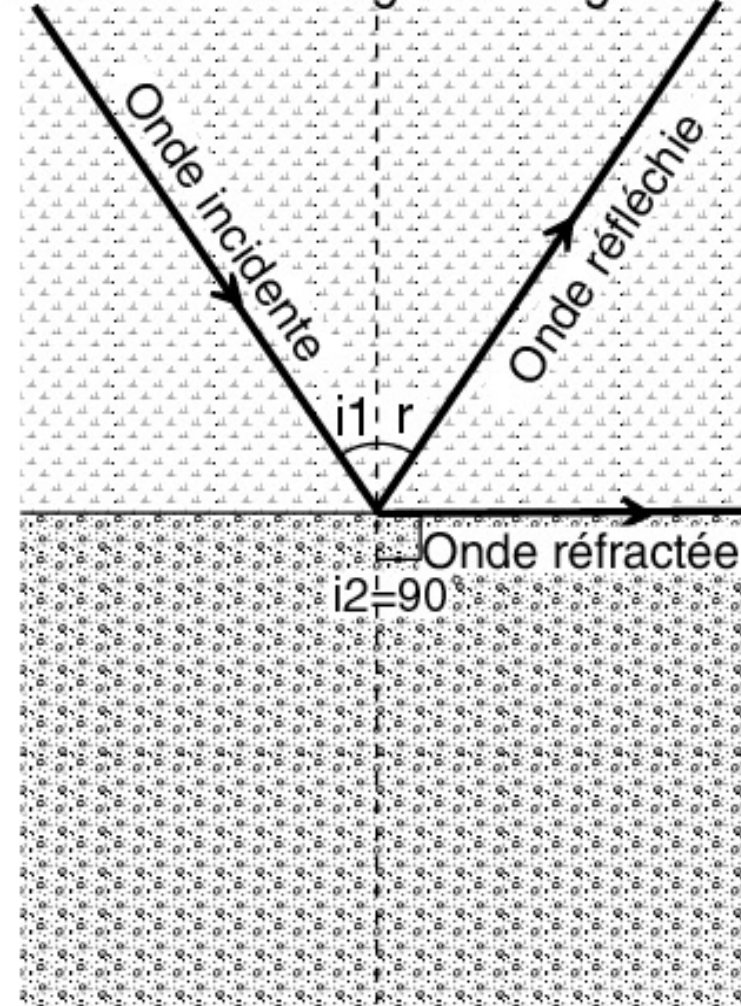


Propagation des ondes : Loi de Descartes

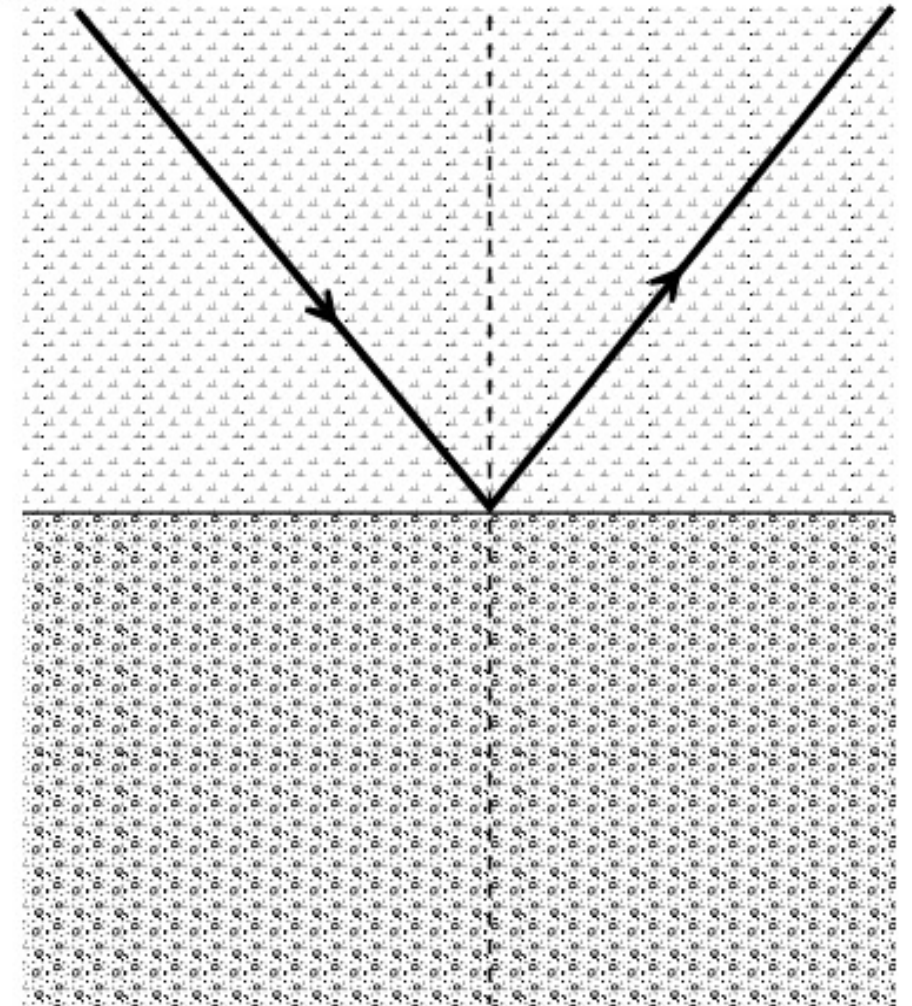
L'angle de réflexion r est égal à l'angle d'incidence i_1



Si $\sin(i_1) < (V_1/V_2)$, une onde est transmise dans le 2ème milieu;

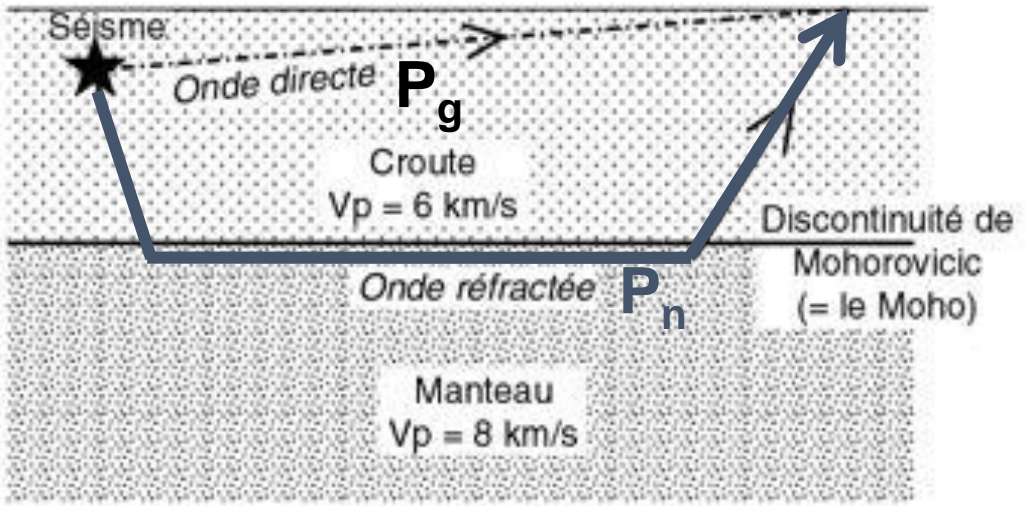
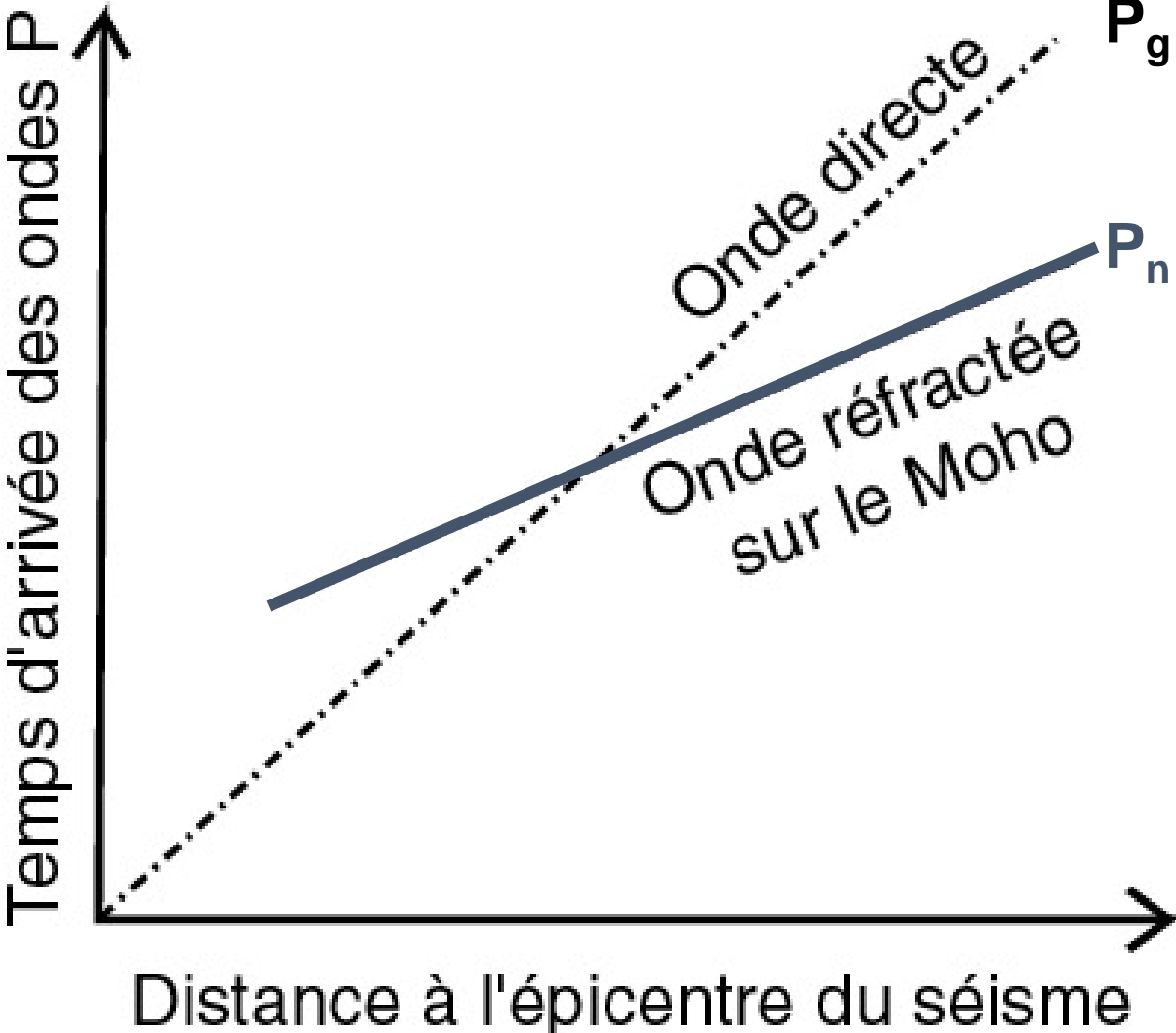


si $\sin(i_1) = (V_1/V_2)$, une onde est réfractée dans le second milieu;

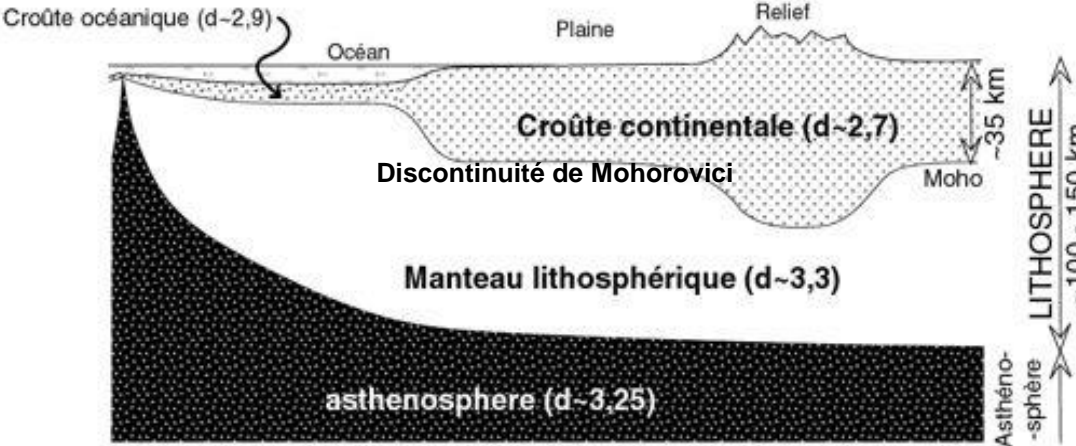


si $\sin(i_1) > (V_1/V_2)$, toute l'énergie est réfléchie dans le premier milieu.

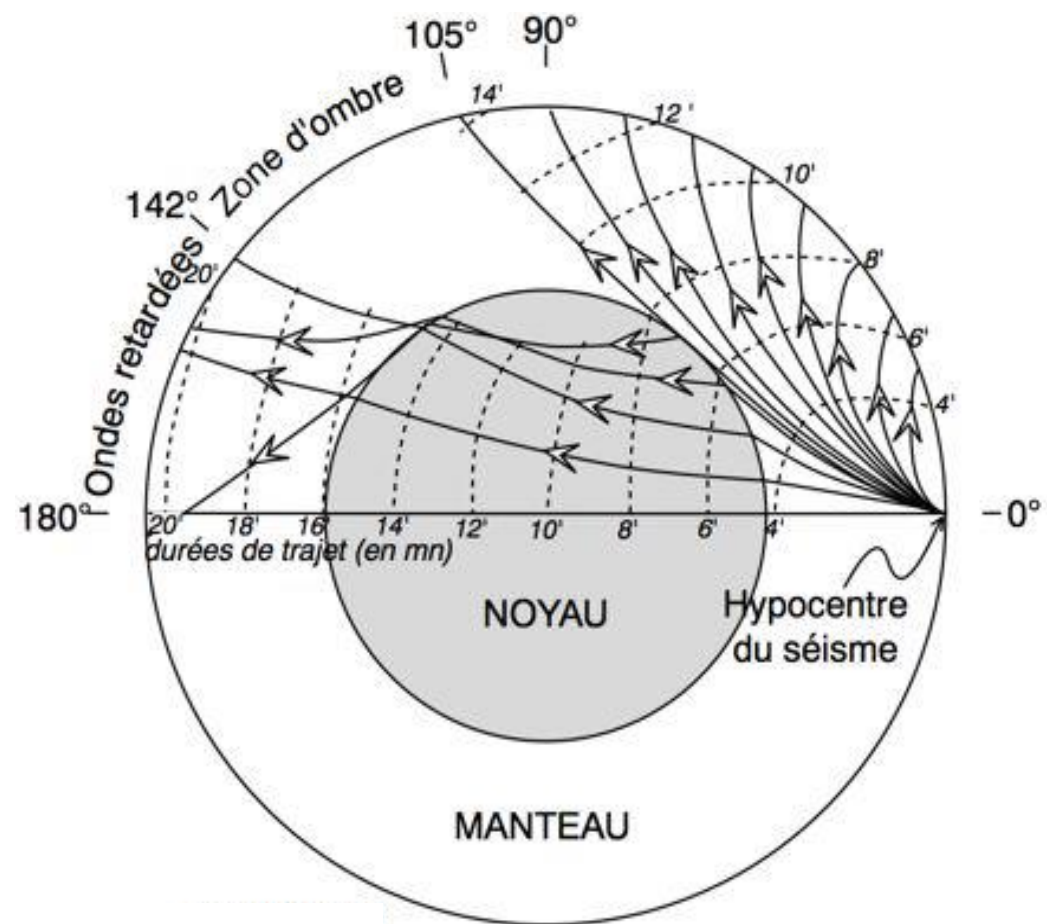
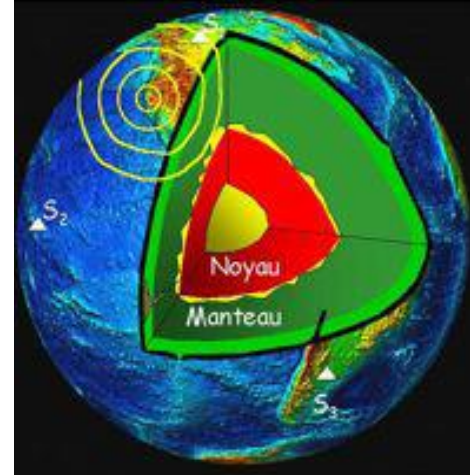
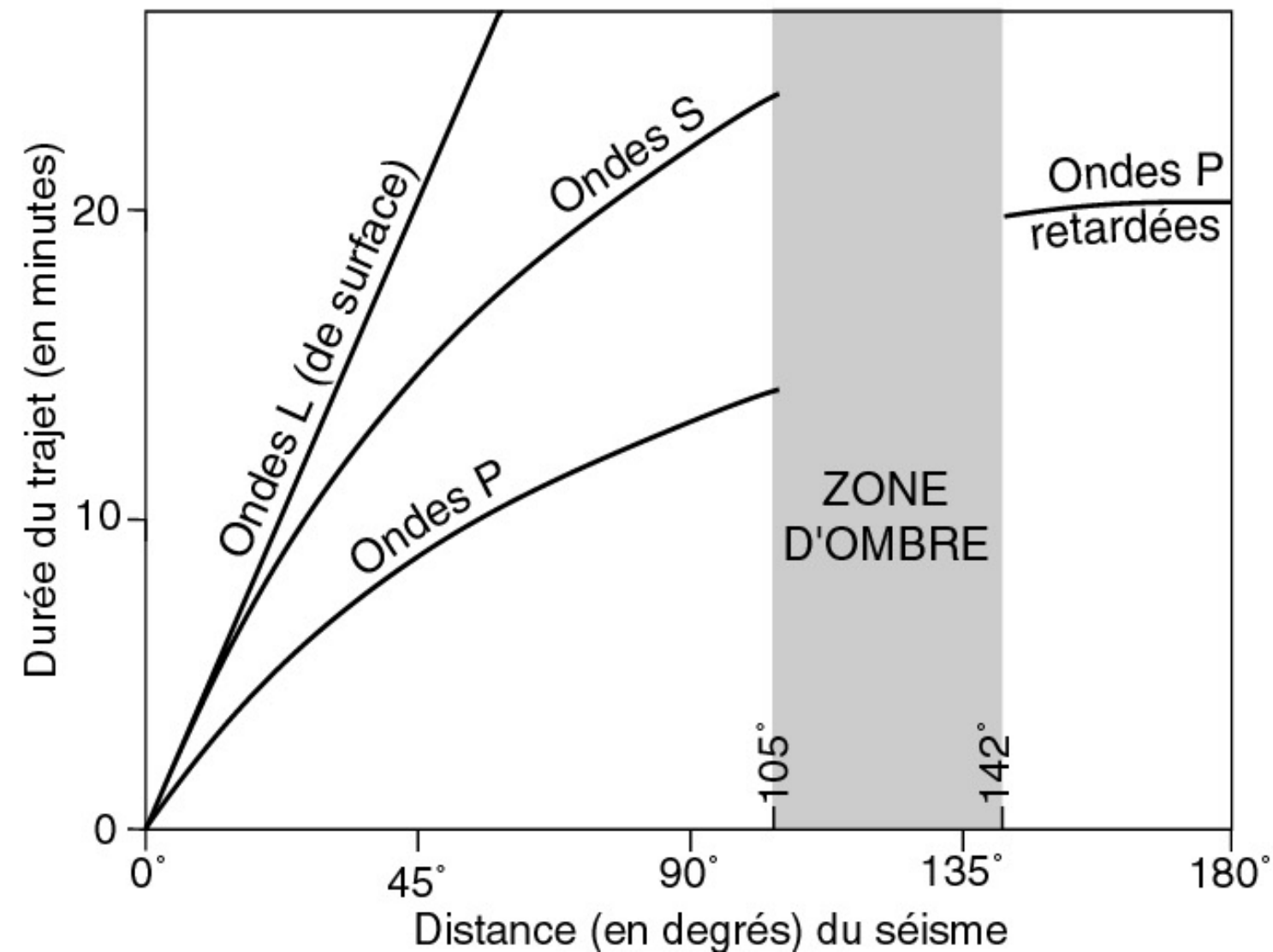
Le Moho, Les ondes directes (P_g) et réfractées (P_n)



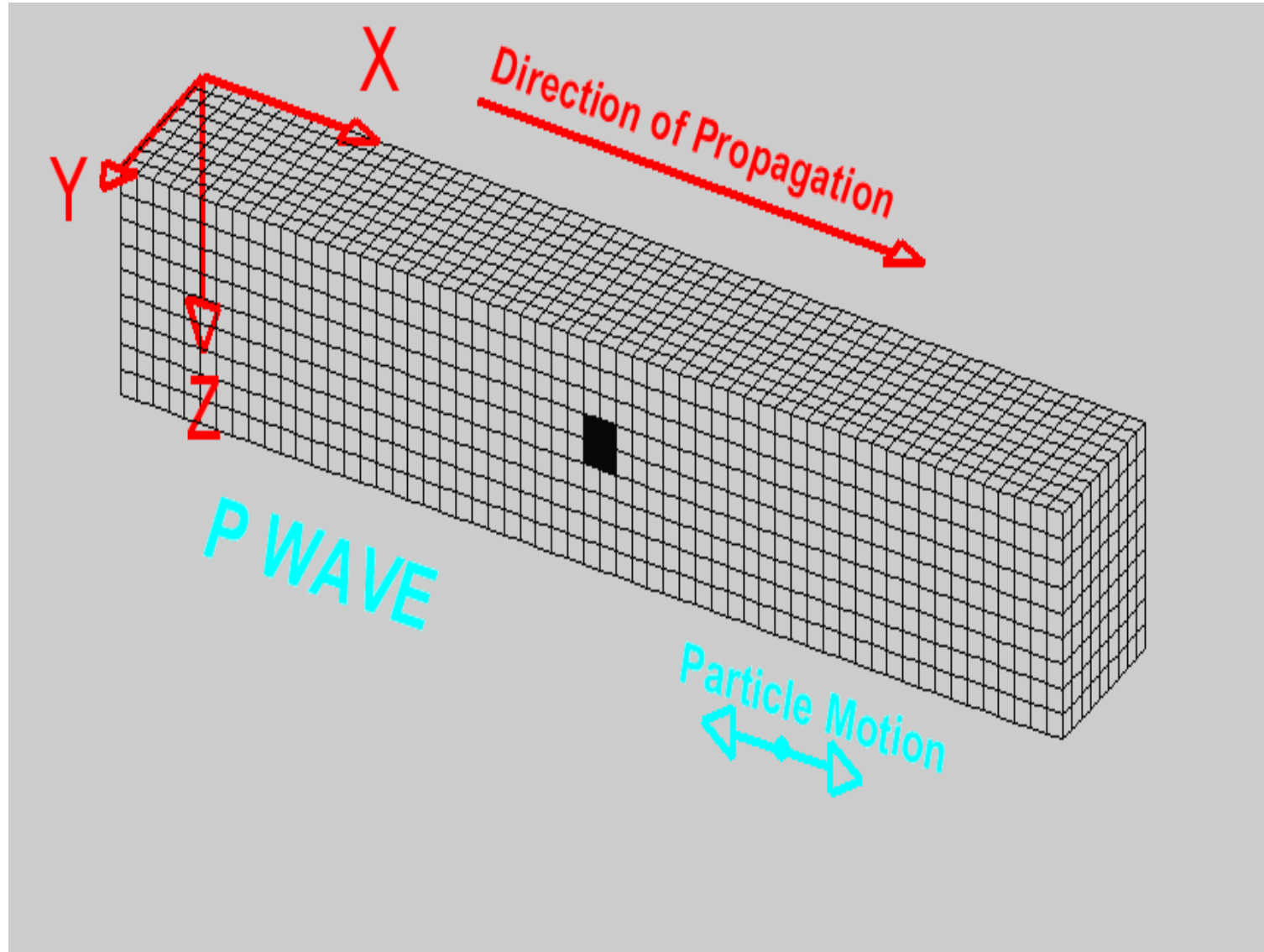
Discontinuité de Mohorovicic (Interface croûte / manteau)



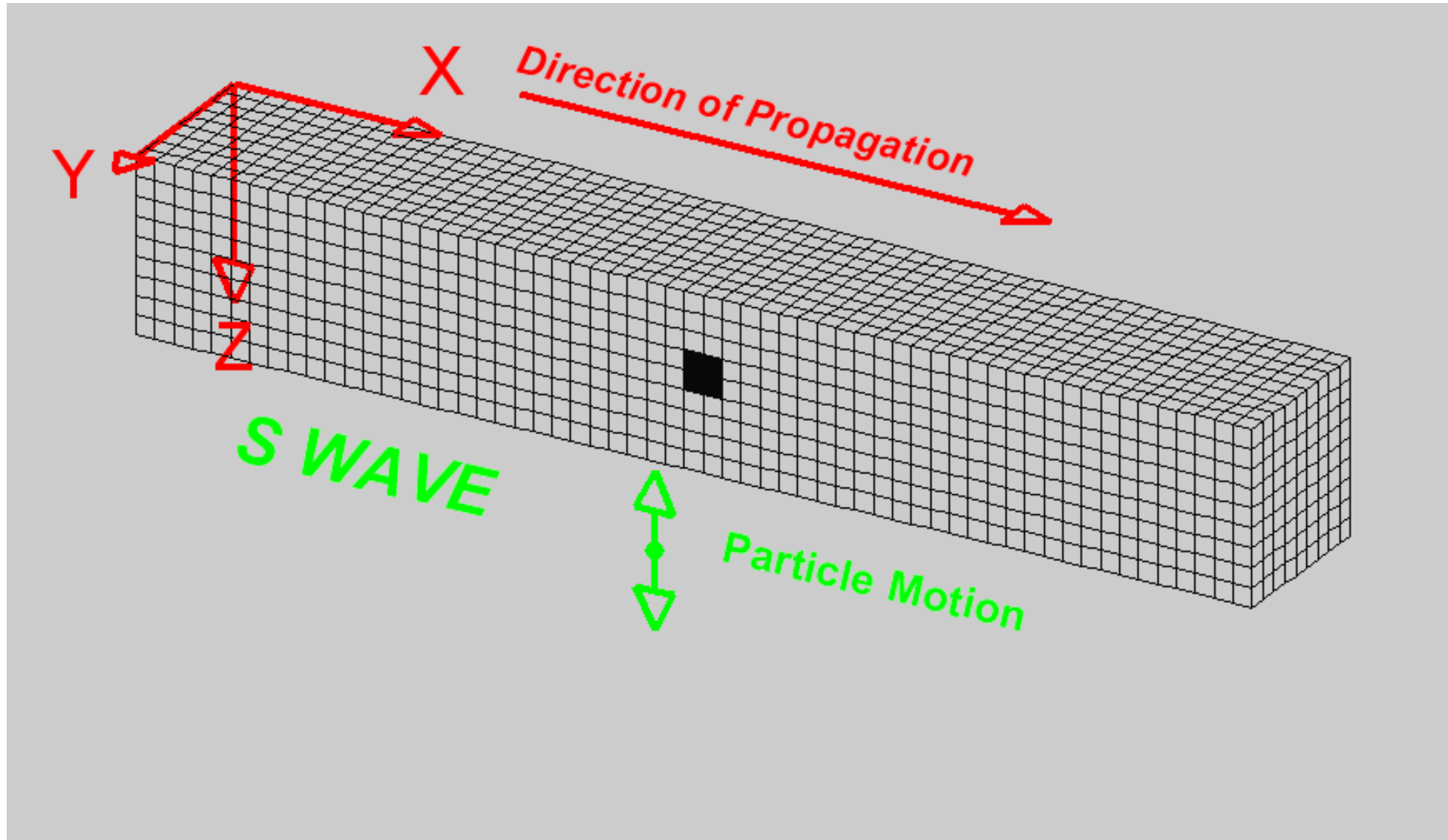
Les courbes hodochrones



Secousses sismiques (ondes P)



Secousses sismiques (ondes S)



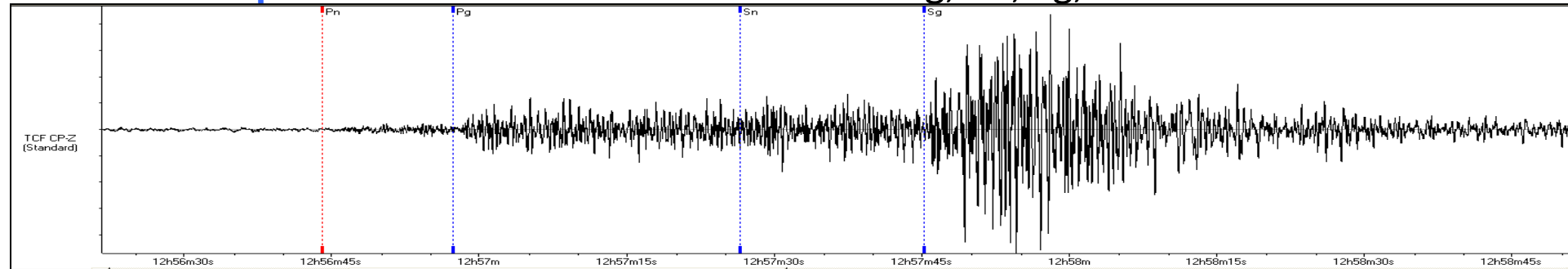
La localisation 4-D de l'hypocentre

Localisation de l'Hypocentre

Hypocentral location

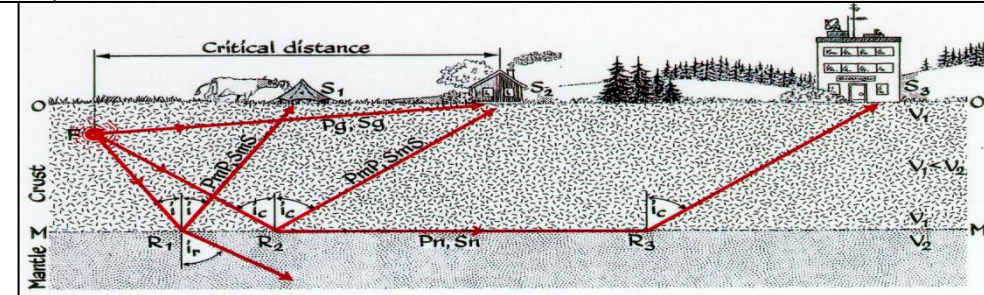
- des données :

- temps d'arrivées des ondes aux stations Pg, Pn, Sg, Sn ...



- des hypothèses :

- un modèle de terre



Avec les vitesses de propagation dans les couches géologiques pour calculer des temps d'arrivées théoriques

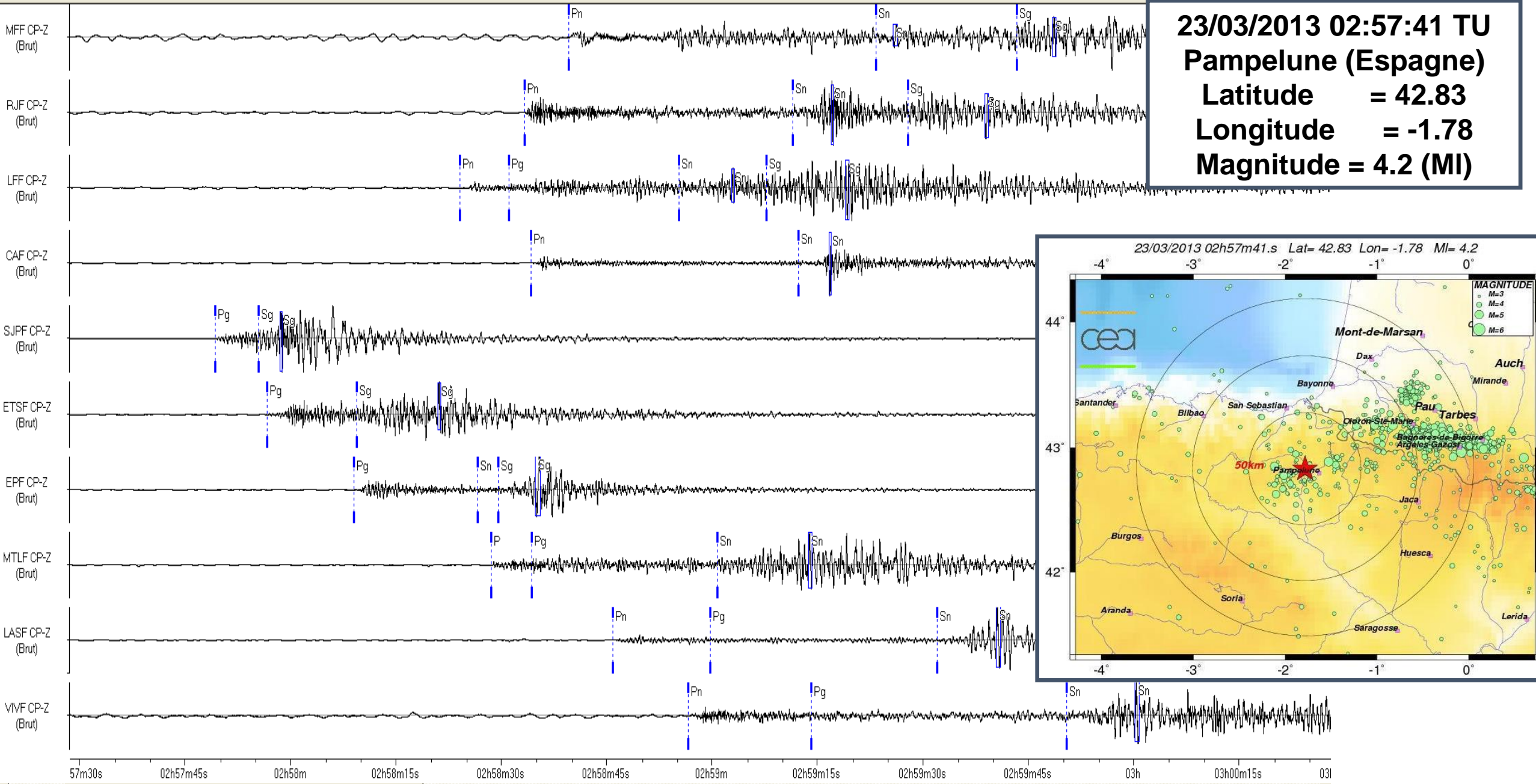
- des inconnues à estimer (**latitude, longitude, profondeur** et **t_0**)

- par un processus de convergence vers les paramètres de l'hypocentre par minimisation des résidus entre les données observées et valeurs calculées.

Localisation des hypocentres

Source location

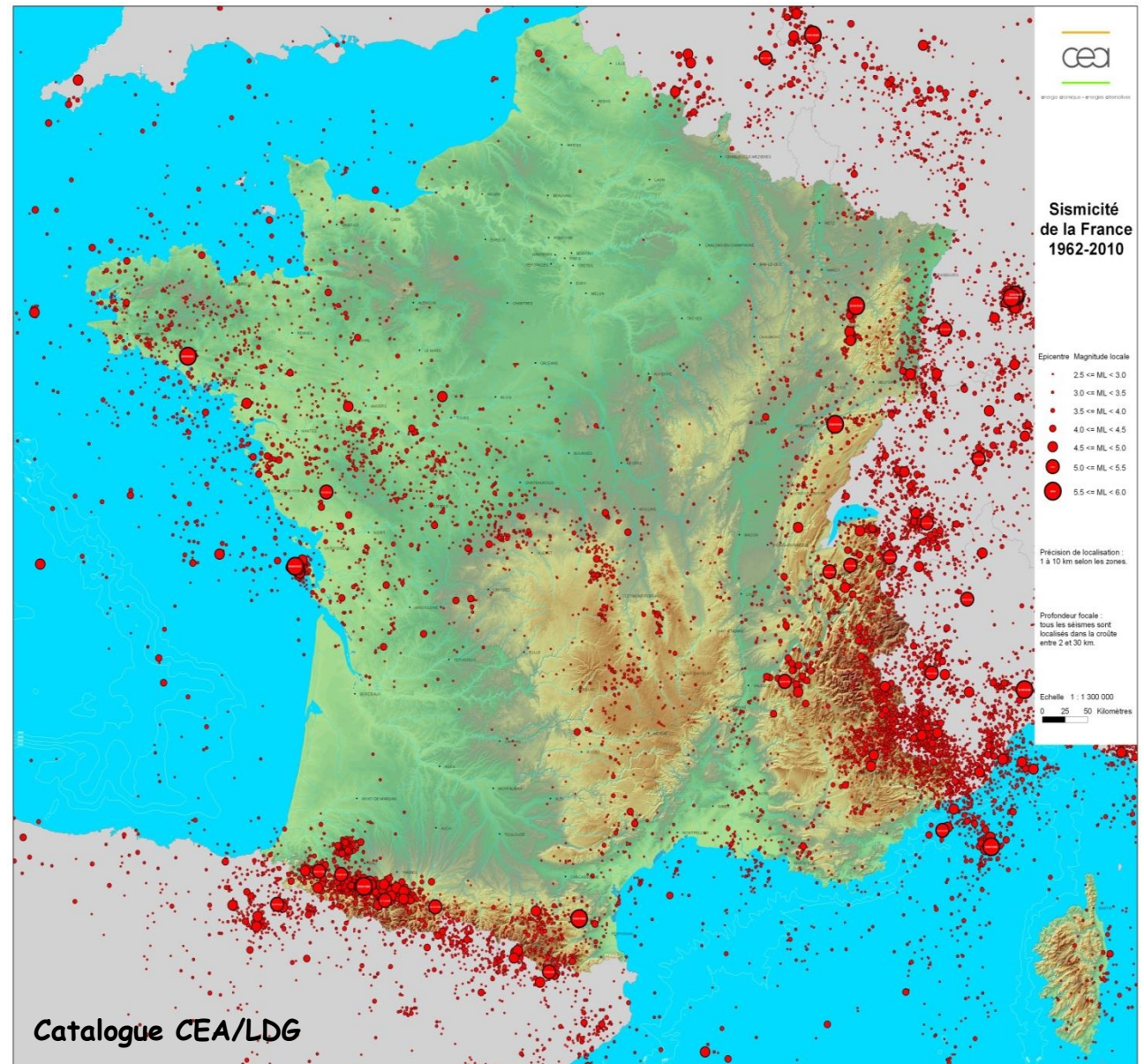
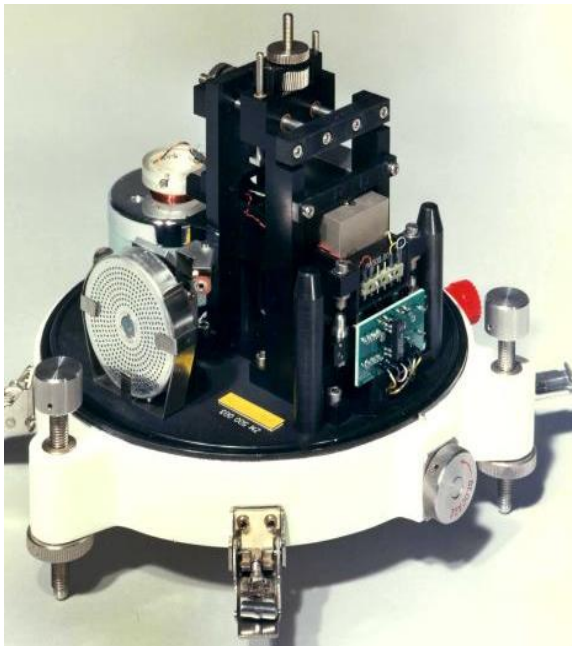
23/03/2013 02:57:41 TU
Pampelune (Espagne)
Latitude = 42.83
Longitude = -1.78
Magnitude = 4.2 (MI)



Aujourd'hui : La période instrumentale

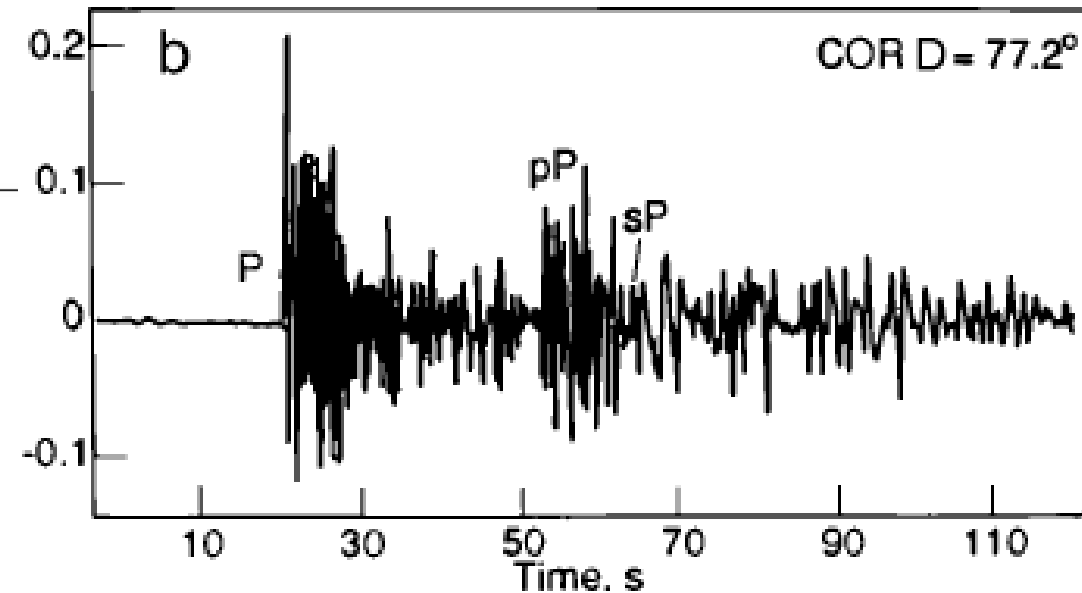
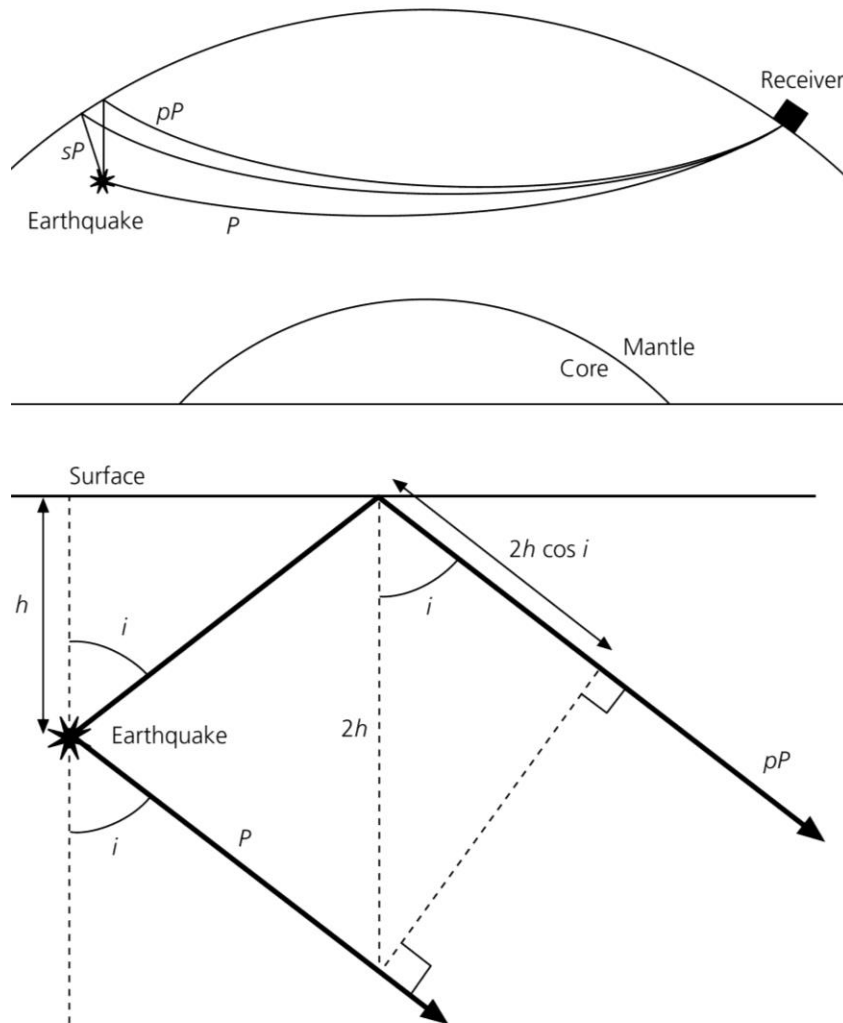


● Sismomètres



Détermination de la profondeur focale

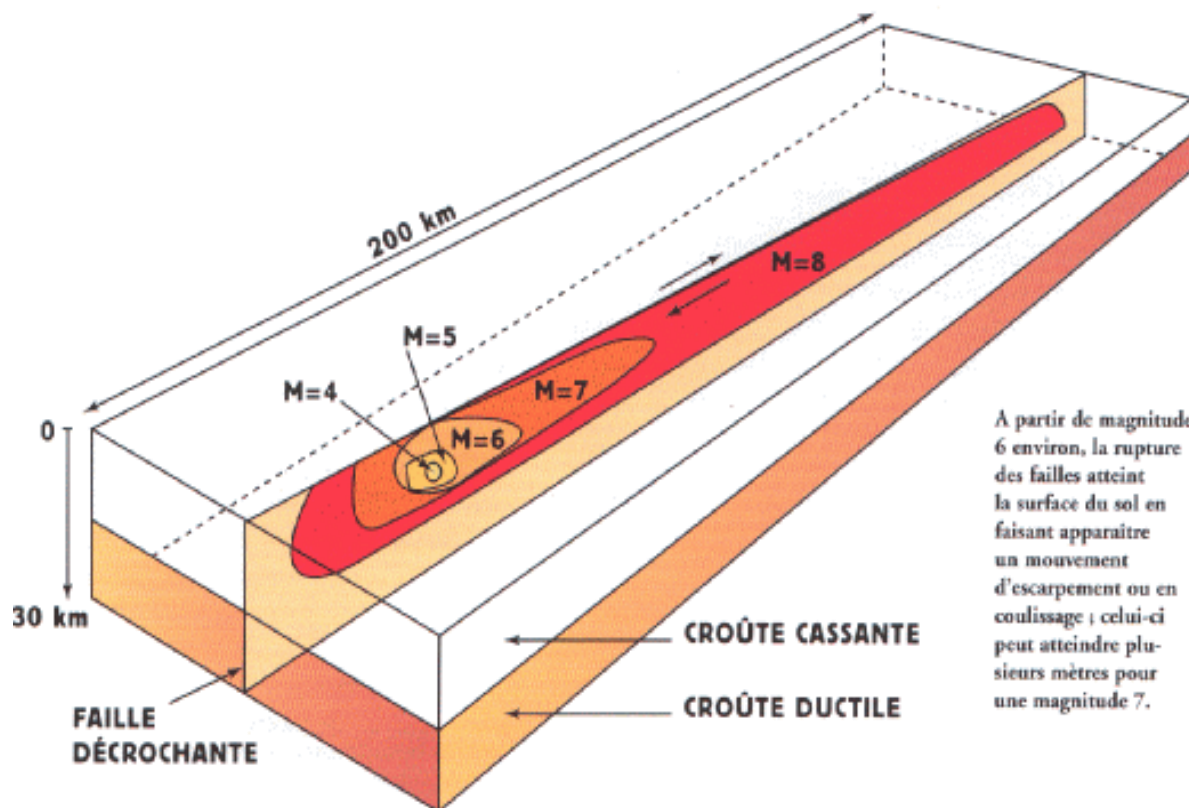
- A distance téléseismique, l'analyse des phases pP et sP
 - permet de mieux déterminer la profondeur hypocentrale



La magnitude

Magnitude

- La magnitude dépend directement :
- de la **surface** du plan de faille
- de la **longueur du déplacement** sur la faille
- La magnitude sert à quantifier l'énergie libérée par les séismes.



A partir de magnitude 6 environ, la rupture des failles atteint la surface du sol en faisant apparaître un mouvement d'escarpement ou en coulissage ; celui-ci peut atteindre plusieurs mètres pour une magnitude 7.

Magnitude	Longueur de faille	Coulissage moyen	Durée de rupture
9	800 km	15 m	250 s
8	200 km	5 m	60 s
7	50 km	1 m	15 s
6	10 km	20 cm	3 s
5	3 km	5 cm	1 s
4	1 km	1 cm	0,3 s

Variabilité : 50%

Analogie Magnitude et Spaghettis



Séisme el Mayor, Mexique 2010 (Mw 7,2)



Séisme du Kunlun, Chine 2001 (Mw 7,8)

450 km de rupture
Jusqu'à 7 m de glissement en surface



Séisme de Denali, Alaska 2002 (Mw 7,9)

340 km de rupture



Magnitudes

- La magnitude est une notion empirique introduite par Richter en 1935
 - C'est une échelle ouverte (il existe des magnitudes négatives...)
 - La limite inférieure est fixée par le seuil de détection du capteur et au niveau de bruit de fond à la station sismique.
 - La limite supérieure observée sur terre est de 9,5 (1960, Chili)
 - un gain de 2 unités sur la magnitude correspond à une multiplication de l'énergie d'un facteur 1000.
- Il existe en fait plusieurs formules de calcul spécifiques à **l'onde sismique** utilisée, à la **fréquence** de cette onde, à la **distance épacentrale**, au **niveau d'énergie de la source**...
 - Magnitude locale M_L
 - Magnitude de durée M_D
 - Magnitude des ondes de Volume m_b
 - Magnitude des ondes de Surface M_S
 - Magnitude du moment sismique M_W
 - ...

Magnitudes : principales formules

M_L Magnitude locale (ondes S, période ~ 1 s, $\Delta < 20^\circ$)

- $M_L = \log_{10} A_{\max}(\Delta) - \log A_0(\Delta)$ (définition de Richter, 1935)
- $M_L = \log_{10} (A_{\max}/T) + C_0(\Delta)$ (C_0 : correction de distance)

M_D Magnitude de durée (t : durée du signal, $\Delta < 300$ km)

- $M_D = a + b \log_{10}(t) + c(\Delta)$ (remplace M_L si saturation)

m_b Magnitude de volume (ondes P, période ~ 1 s, $\Delta > 20^\circ$)

- $m_b = \log_{10}(A_{\max}/T) + Q(\Delta, h)$

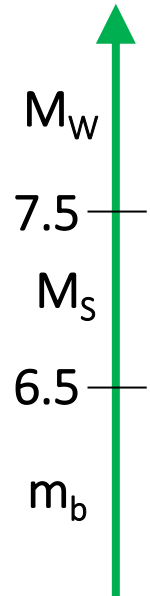
M_S Magnitude de surface (ondes R, période ~ 20 s, $20^\circ < \Delta < 90^\circ$)

- $M_S = \log_{10}(A_{\max}/T) + 1,66 \log_{10}(\Delta) + 3,3$ ($h < 80$ km)

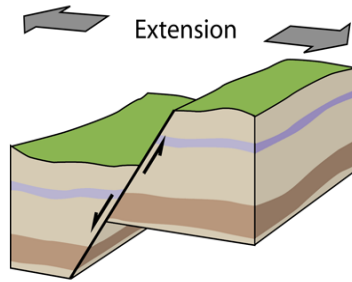
M_W Magnitude de moment (Kanamori, 1977)

- $M_W = 2/3 \log_{10}(M_0) - 6,06$ (M_0 : moment sismique en N.m)
- avec $M_0 = \mu \cdot S \cdot \Delta u$ (μ : rigidité, S : surface de la faille, Δu : glissement).

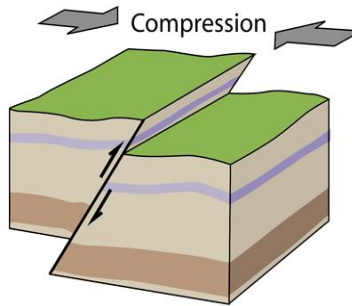
Magnitude



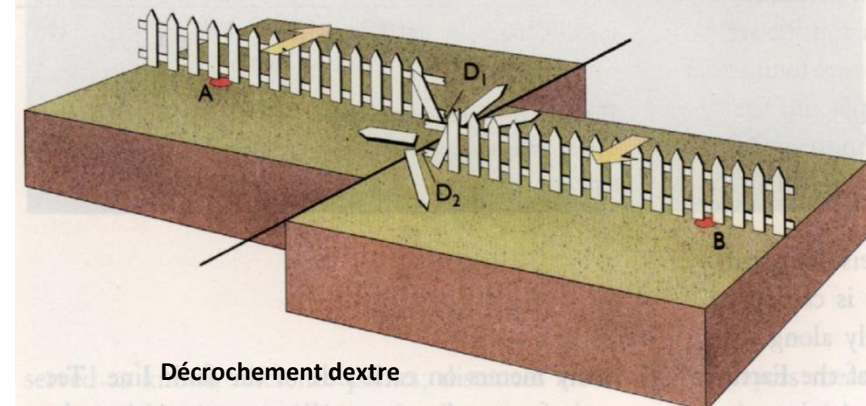
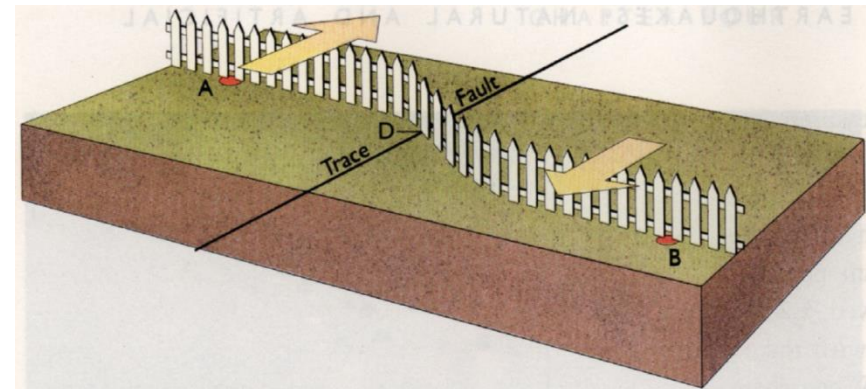
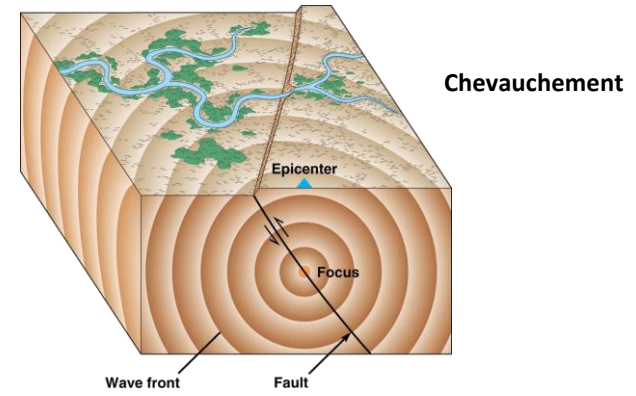
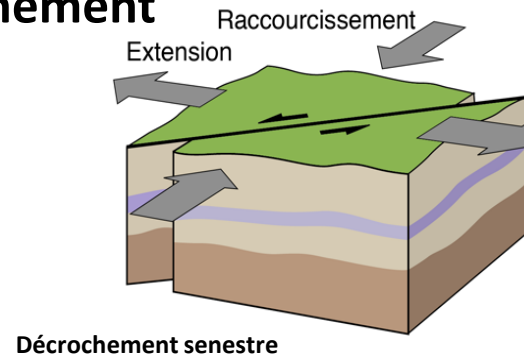
● **Faille normale**



● **Faille inverse**



● **Décrochement**



Géométrie de la faille : cas d'une faille plane

- Quand on regarde la faille selon son azimut, elle pend sur la droite (Footwall à gauche et Hanging wall à droite).

- Azimut $[0^\circ, 360^\circ[$

- 0° : N

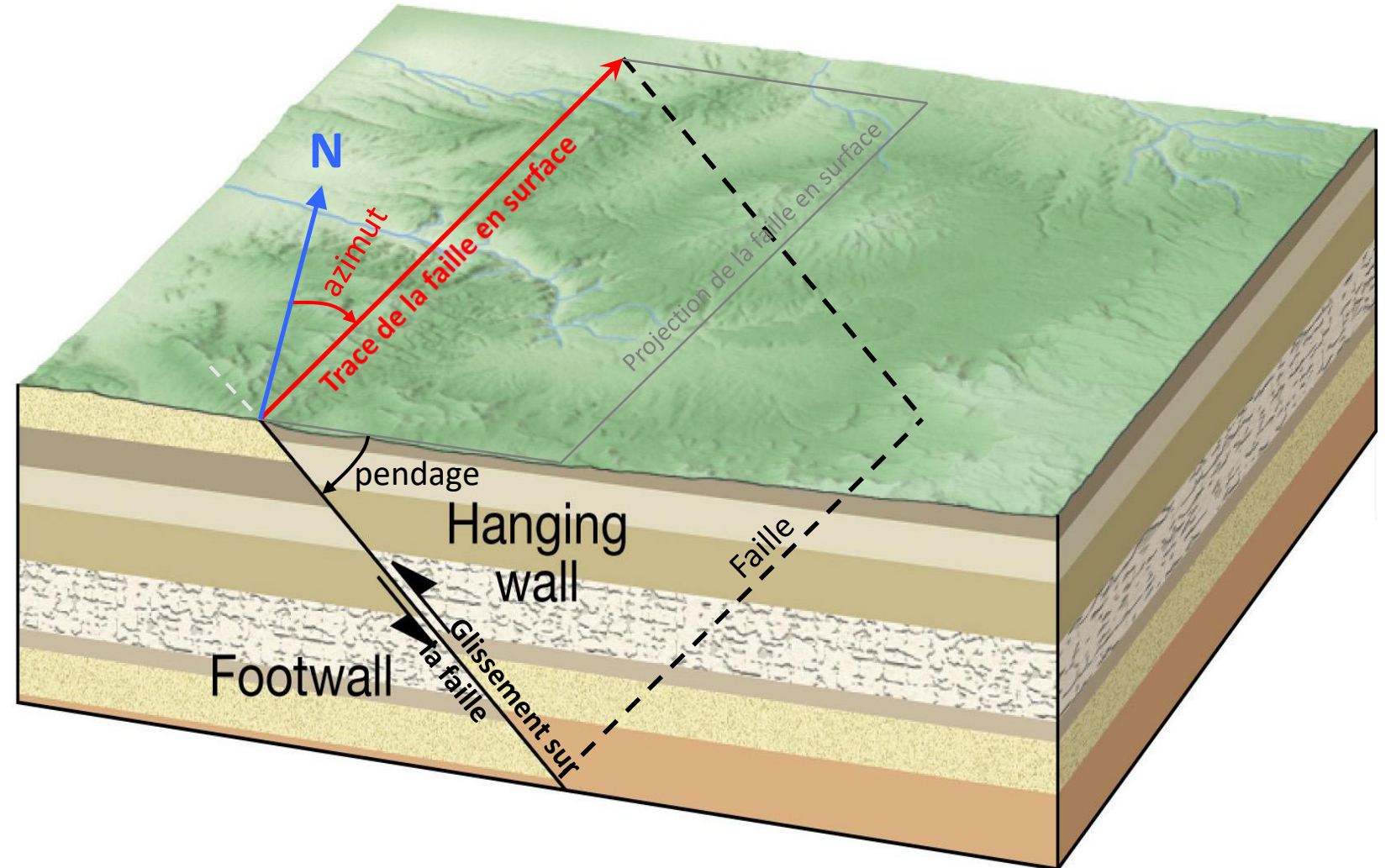
- 45° : NE

- 90° : E

- Pendage $[0^\circ, 90^\circ[$

- 0° : horizontale

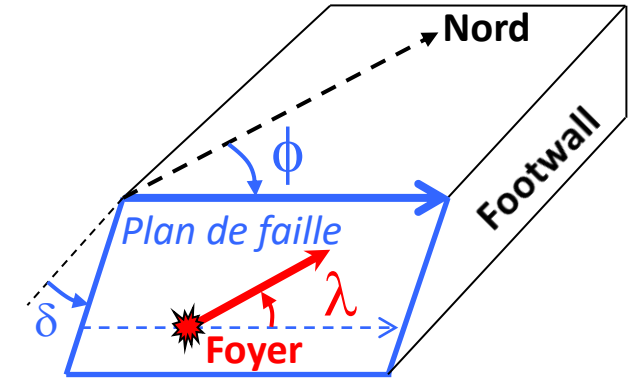
- 90° : verticale



Mécanisme au Foyer : conventions

Géométrie de la faille, 2 angles ϕ et δ :

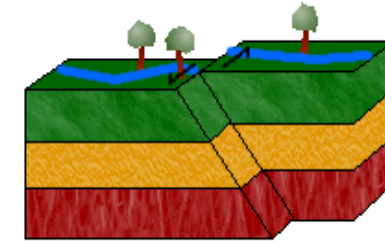
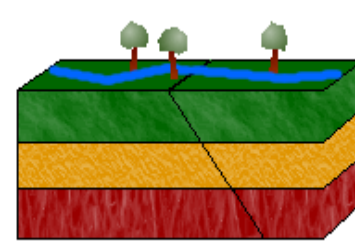
- ϕ : Azimut $[0^\circ, 360^\circ[$ (strike)
- δ : Pendage $[0^\circ, 90^\circ]$ (dip)
 - λ (rake) : angle du glissement (du hanging wall par rapport au footwall) dans le plan de faille $]-180^\circ, 180^\circ]$
 - $\lambda = 90^\circ$: pur mécanisme en faille inverse
 - $\lambda = -90^\circ$: pur mécanisme en faille normale
 - $\lambda = 0^\circ$: pur mécanisme en décrochement sénestre
 - $\lambda = 180^\circ$: pur mécanisme en décrochement dextre
 - $\lambda > 0^\circ$: composante inverse
 - $\lambda < 0^\circ$: composante normale
 - $90^\circ < \lambda < 180^\circ$: composante sénestre
 - $-180 < \lambda < -90^\circ \cup 90^\circ < \lambda < 180^\circ$: composante dextre



Mécanisme au Foyer : exemples

- Mécanisme décrochant

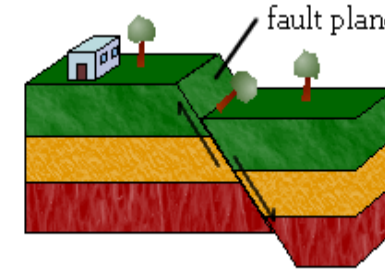
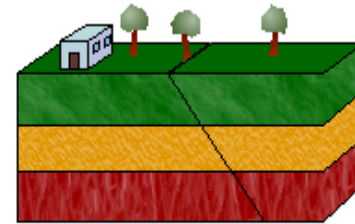
- $\lambda = 0^\circ$: sénestre pur



Décrochement sénestre

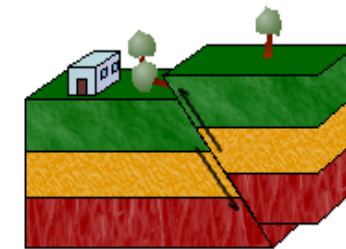
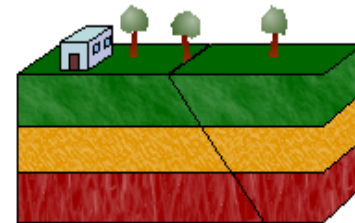
- Mécanisme normal

- $\lambda = -90^\circ$: normal pur



- Mécanisme inverse

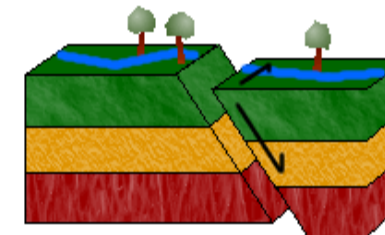
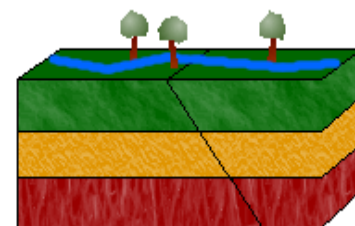
- $\lambda = 90^\circ$: inverse pur



Chevauchement

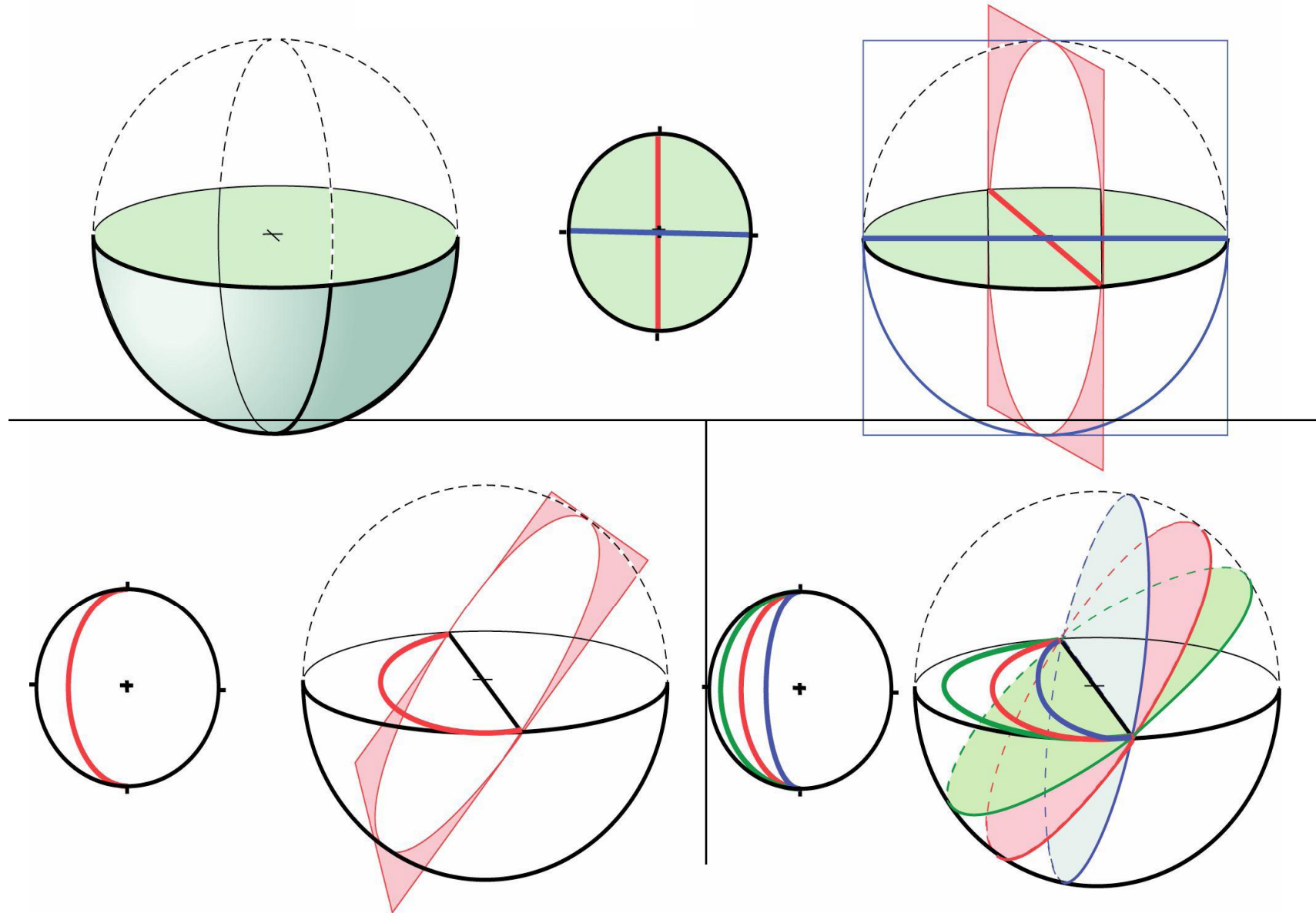
- Mécanisme oblique

- $\lambda = -45^\circ$: normal sénestre

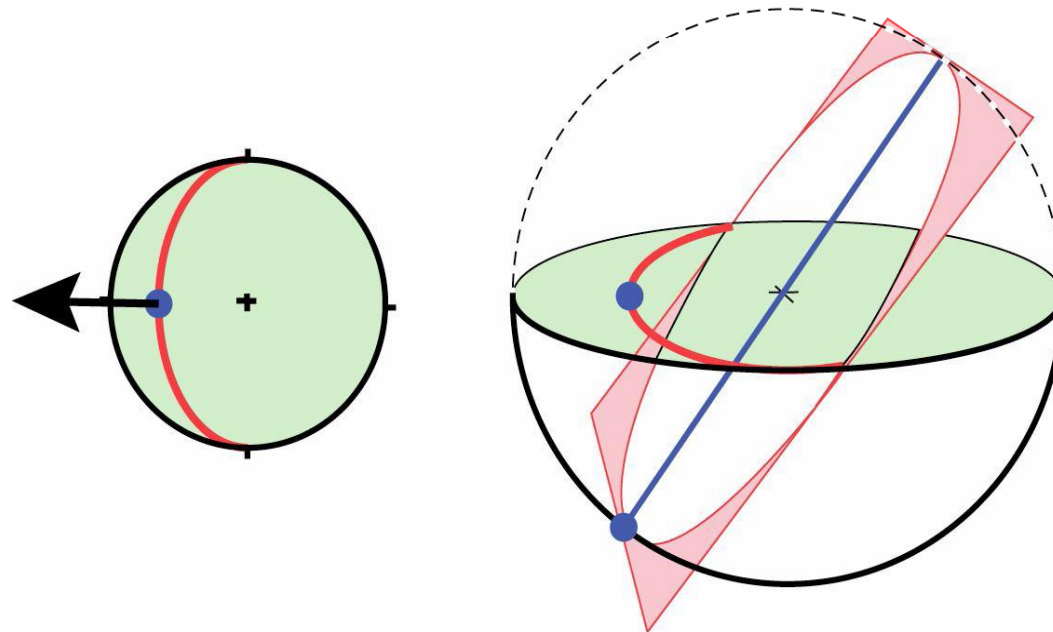
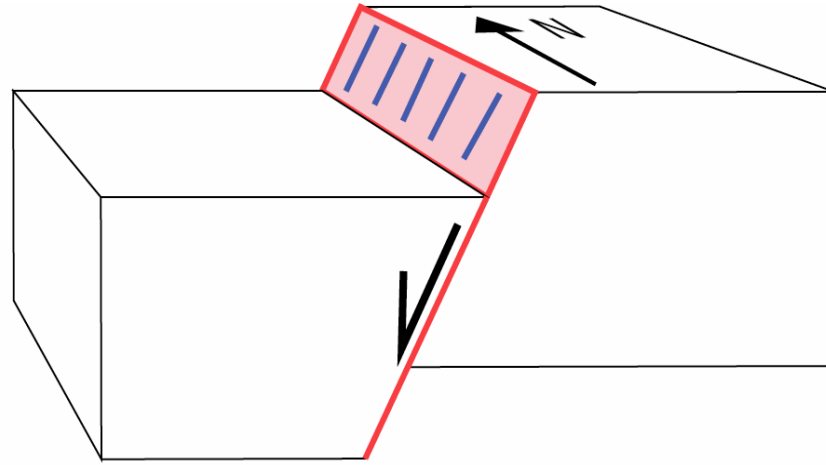


Normal sénestre

Projection stéréographique : géométrie du plan de faille

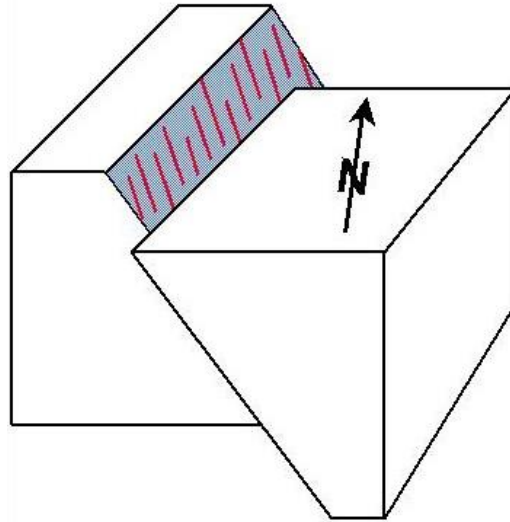


Projection stéréographique : direction du glissement

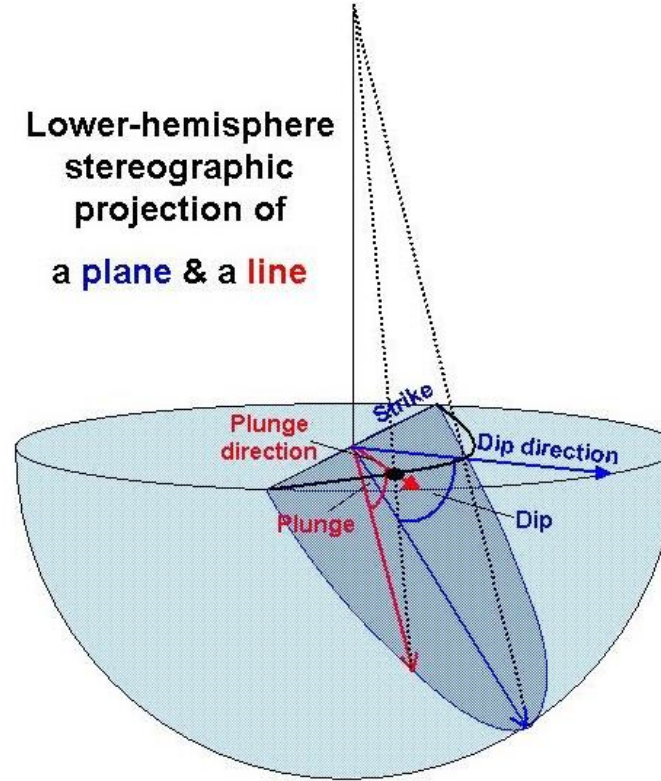


Projection stéréographique : direction du glissement

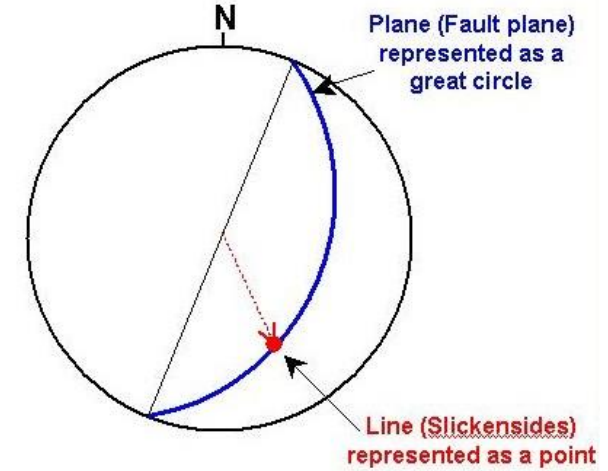
Oblique normal fault with **slickensides** on the fault plane



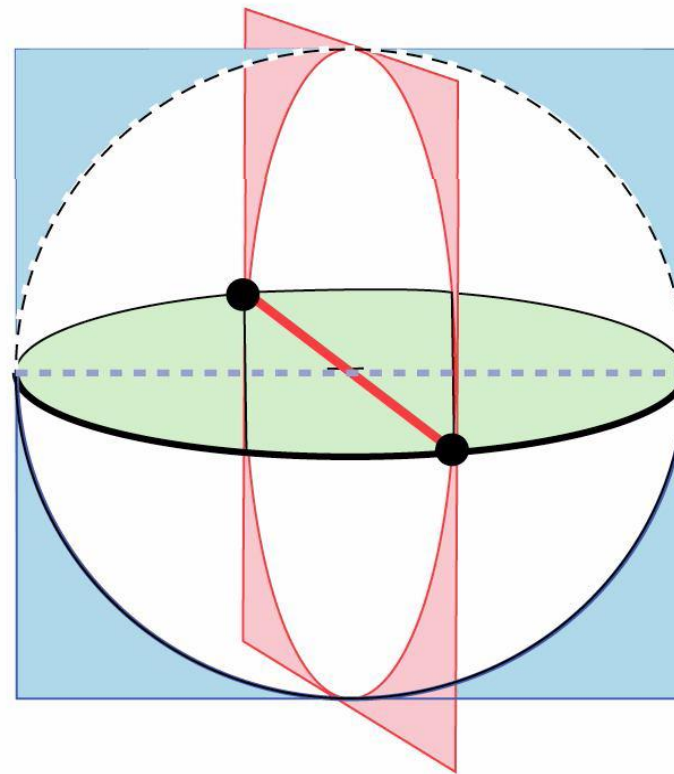
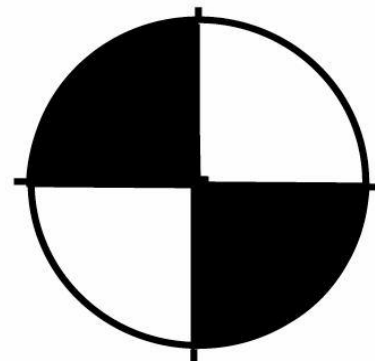
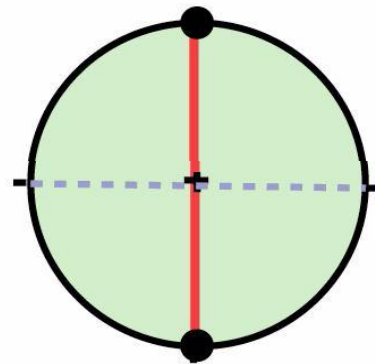
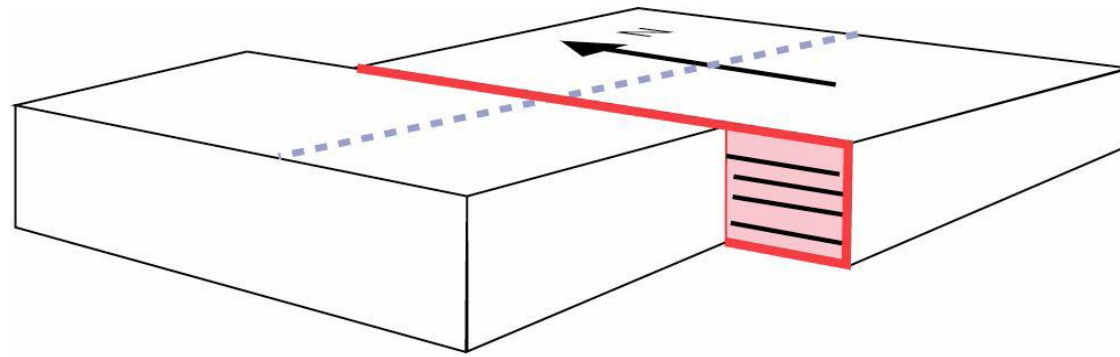
Lower-hemisphere stereographic projection of a plane & a line



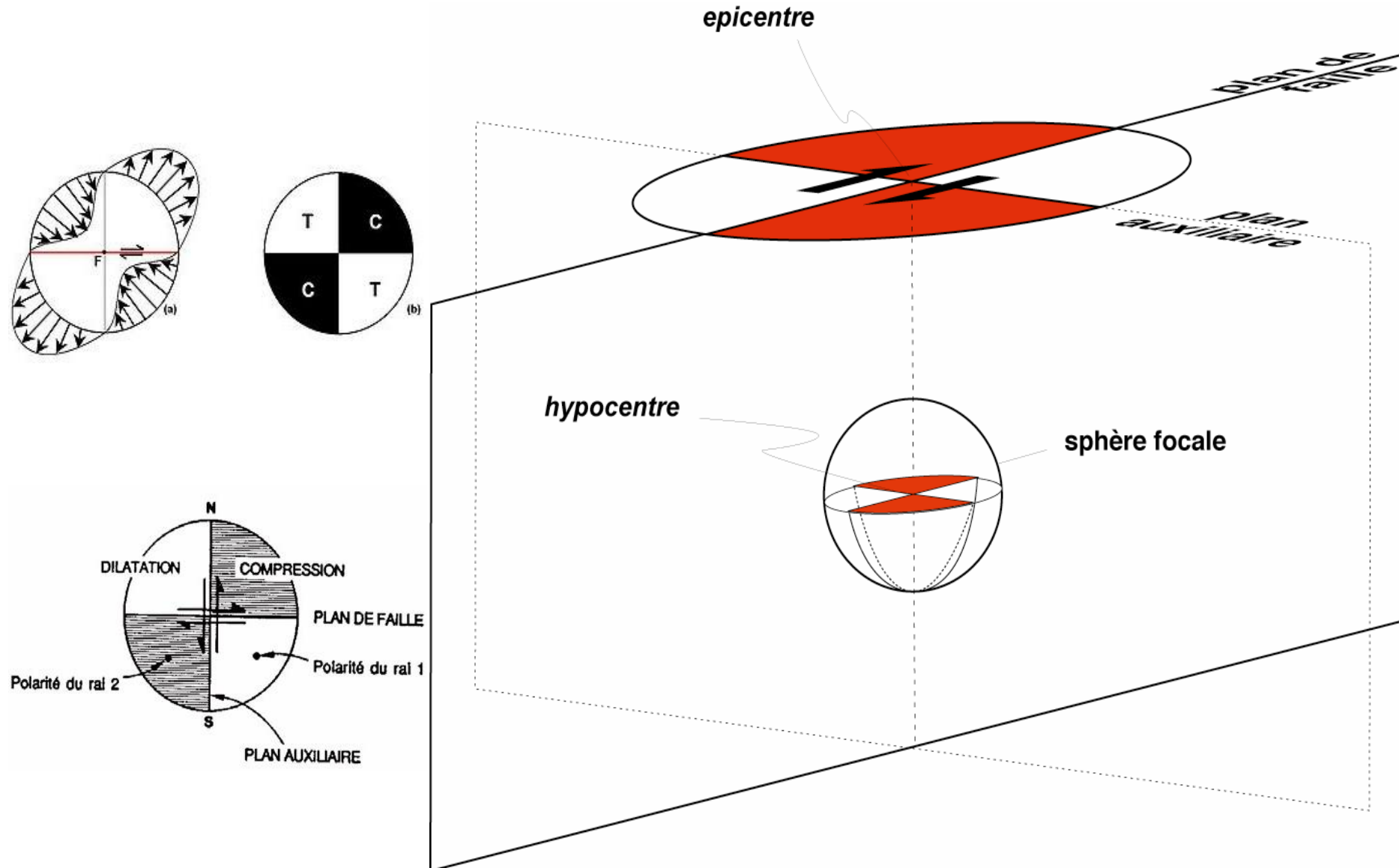
Representation of 3D structures on a plane



Projection stéréographique : mécanisme au foyer

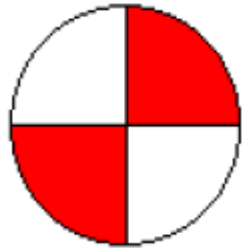


Projection stéréographique : direction du glissement

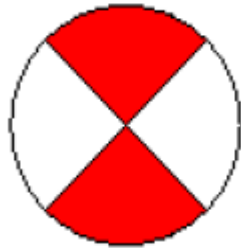


Tenseur des moments et sphère focale

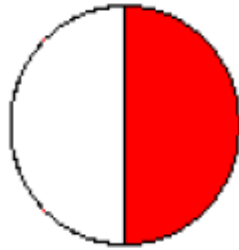
Correspondance entre le tenseur des moments et la sphère focale



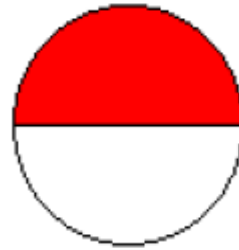
M1



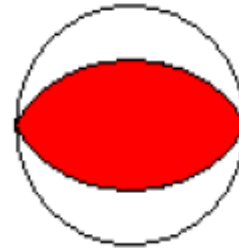
M2



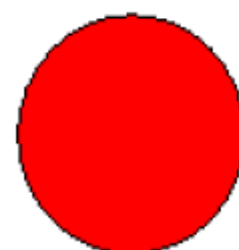
M3



M4



M5

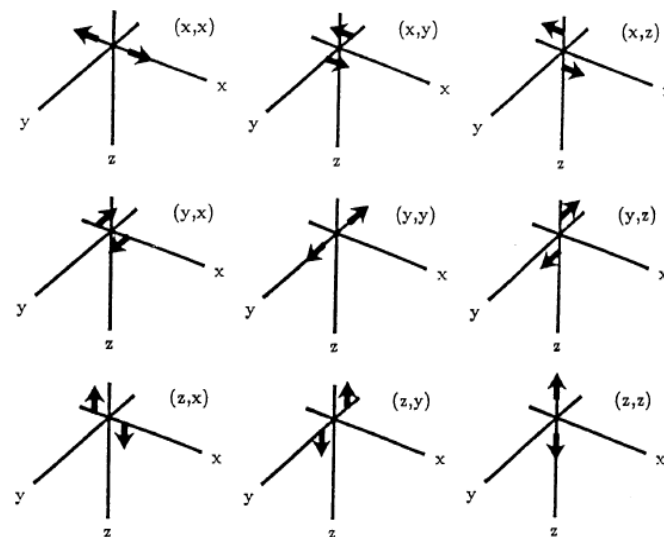


M6

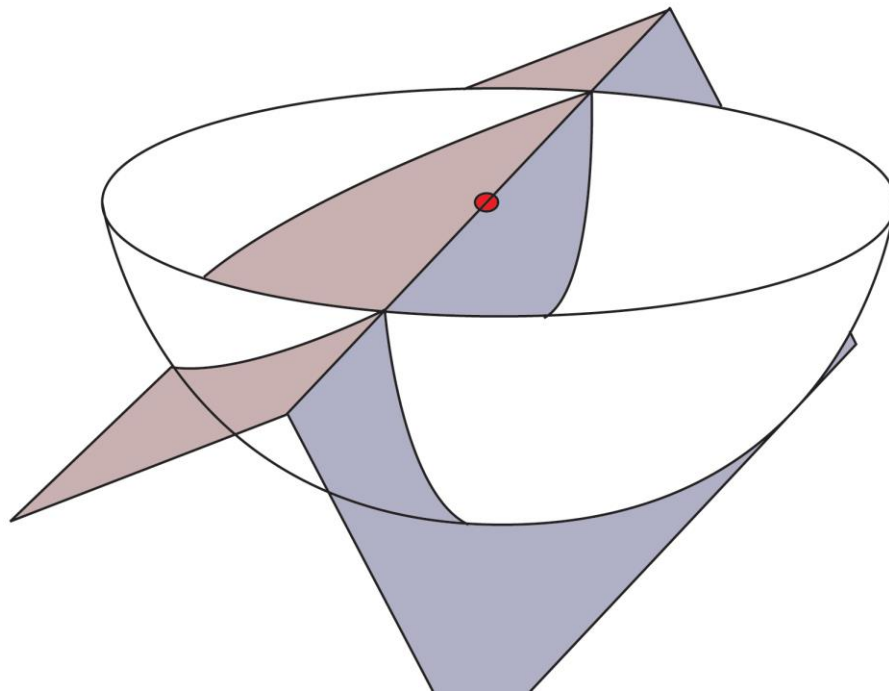
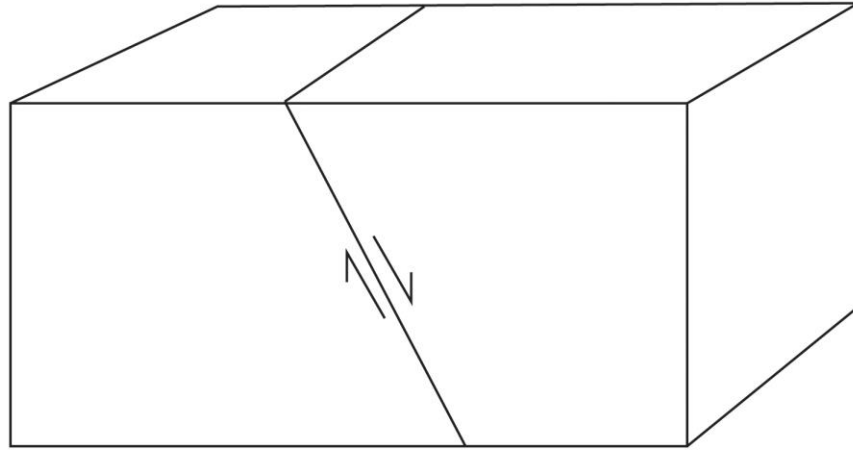
$$M_1: \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad M_2: \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad M_3: \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_4: \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad M_5: \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_6: \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

moments élémentaires



Projection stéréographique : mécanisme au foyer



Radiation des ondes à la source

- Séisme – glissement sur une faille

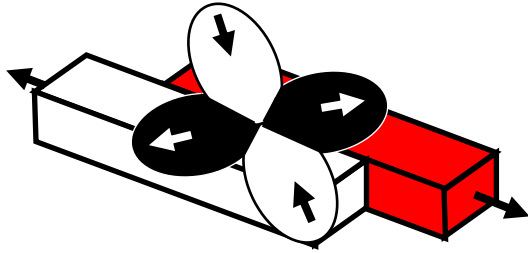


Diagramme de radiation
compression (ondes P)

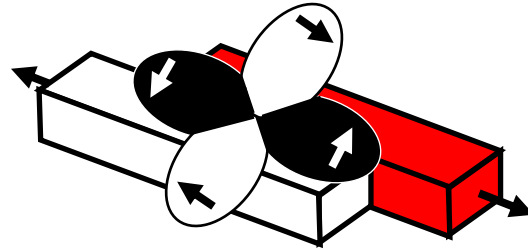
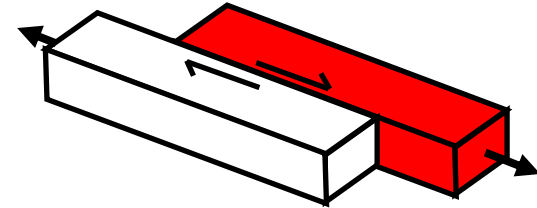
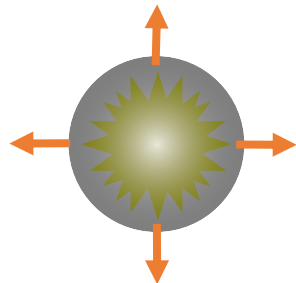


Diagramme de radiation
cisaillement (ondes S)



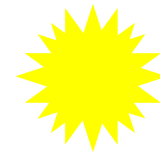
Pas de changement de
volume

- Explosion – compression radiale



Compression
(ondes P)

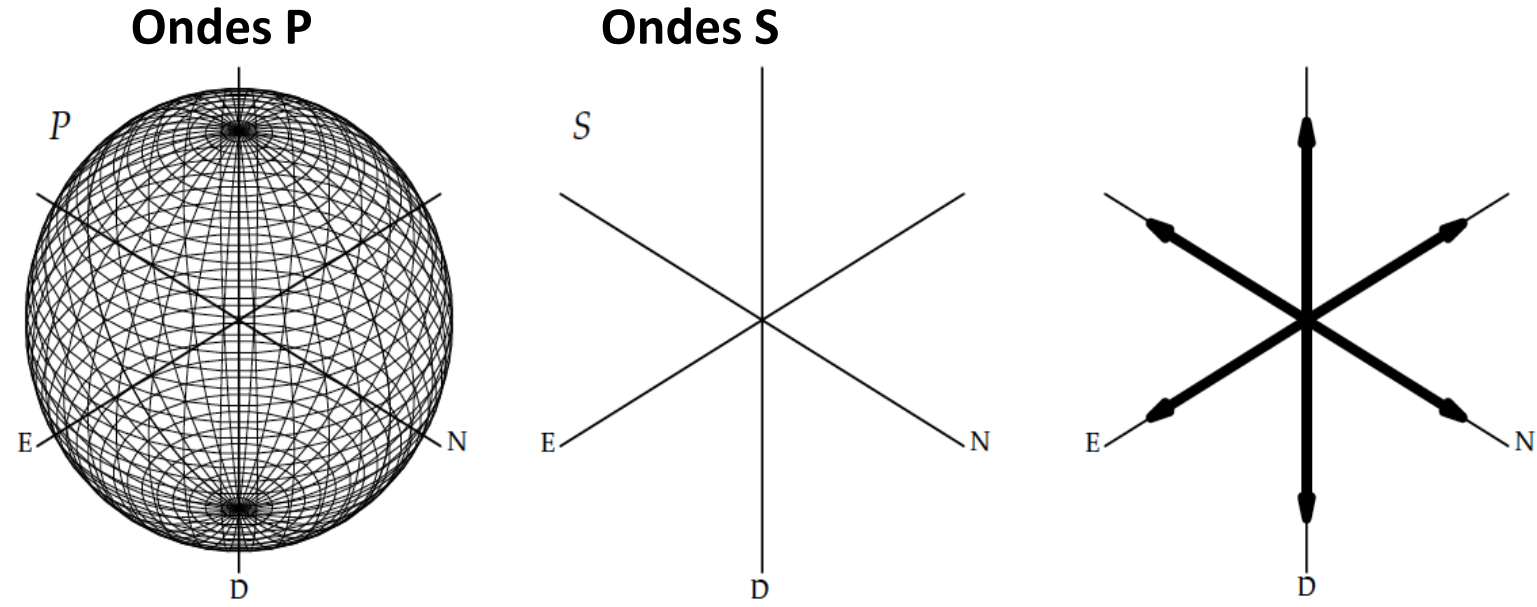
Pas de radiation en
cisaillement



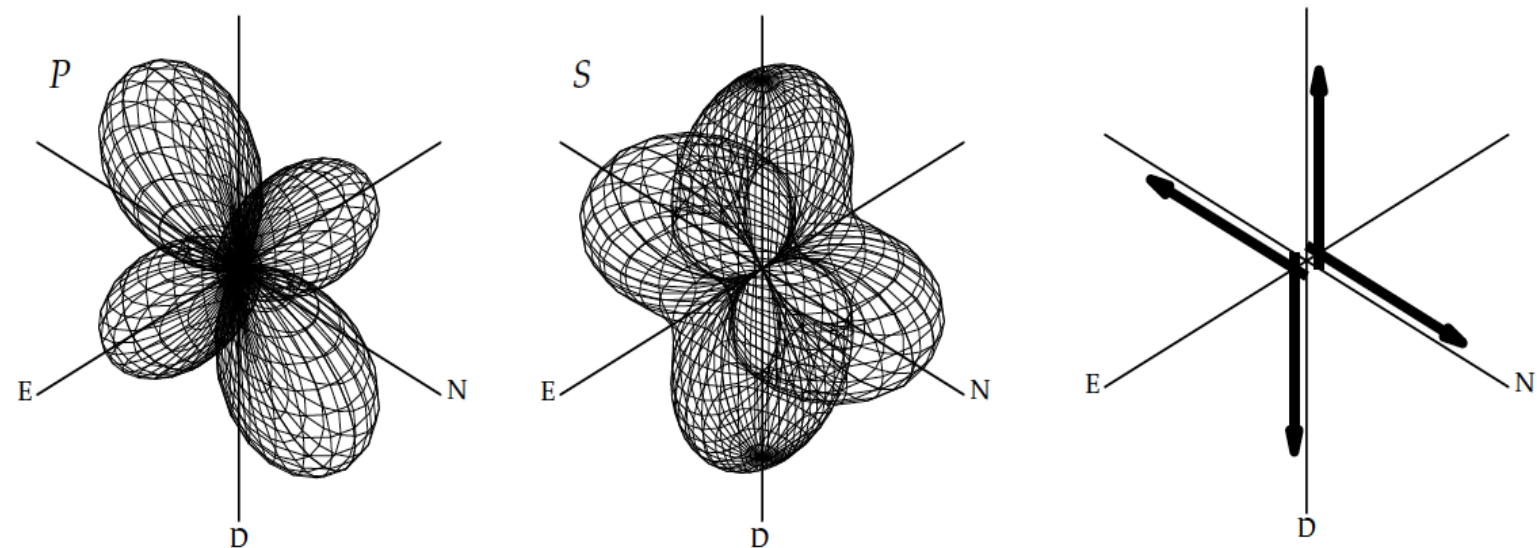
Changement de volume

Radiation des ondes P et S : cas de sources ponctuelles

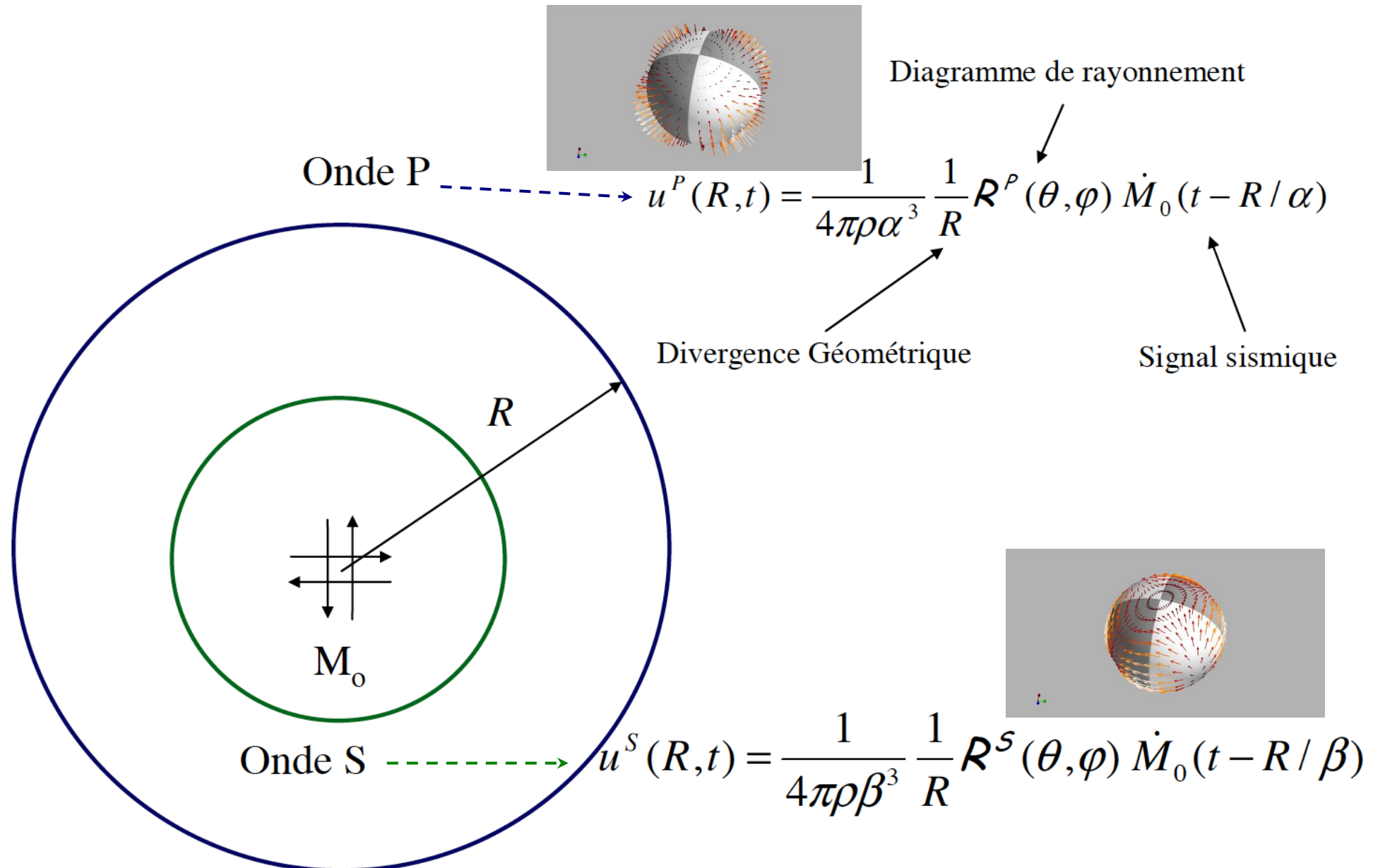
● Explosion



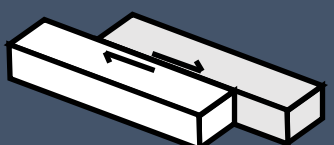
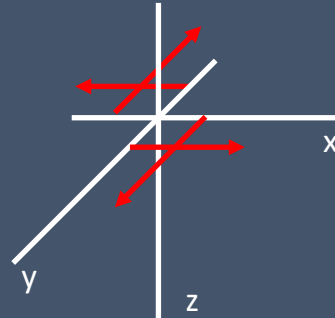
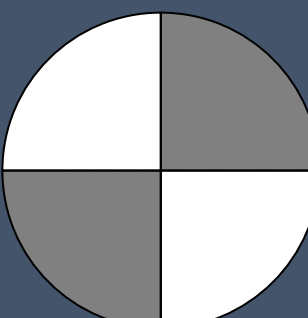

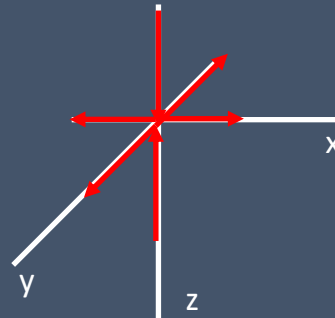
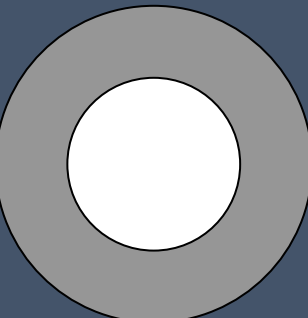

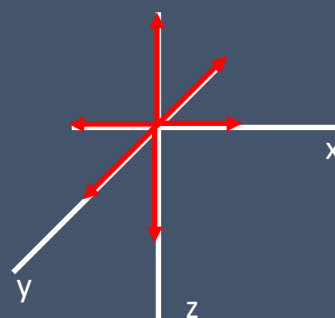
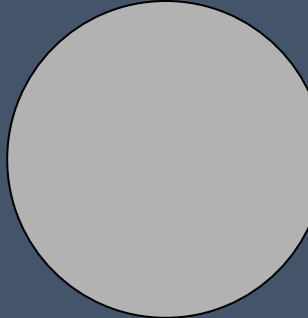
● Double couple



Rayonnement de ondes sismiques



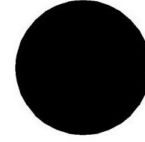
Tenseur des moments sismiques

Modèle	Source	Tenseur M	Couples	Mécanisme
 Décrochement Strike-slip	DC (Double-couple)	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		
 Ring Fault	CLVD (Compensated linear vector dipole)	$\begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$		
 Explosion	Isotrope	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		

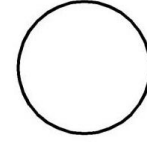
Tenseur des moments et mécanismes

Explosion - Implosion

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$$-\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

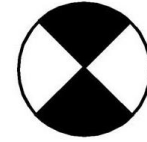


Double couple (séismes)

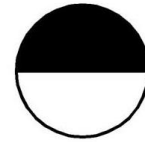
$$-\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



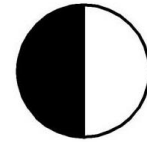
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



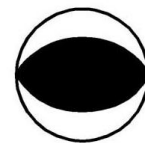
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



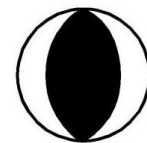
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$



$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

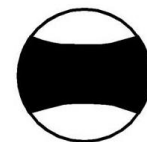


CLVD

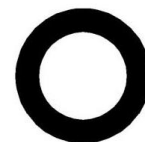
$$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



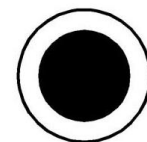
$$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

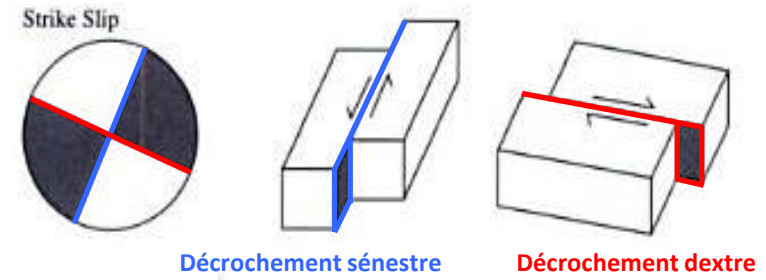


$$-\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

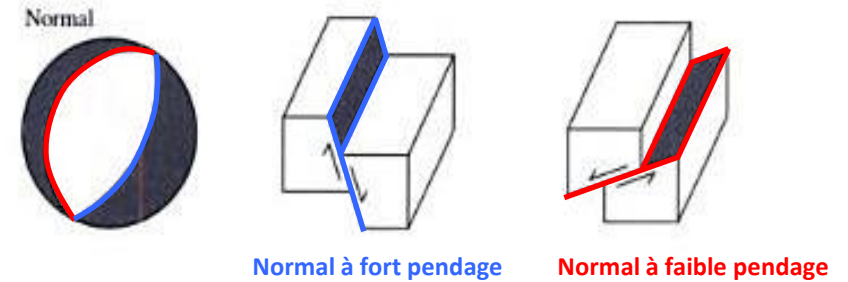


Mécanisme au foyer et sphère focale

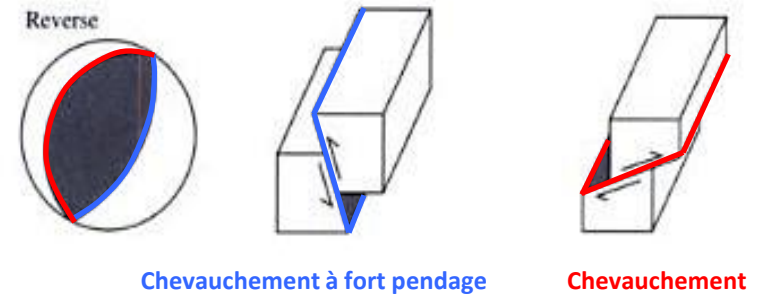
- Mécanisme décrochant



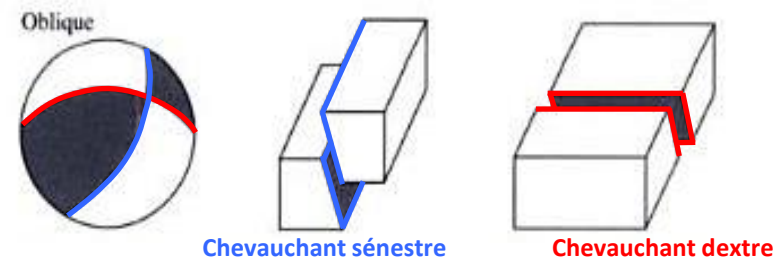
- Mécanisme normal



- Mécanisme inverse

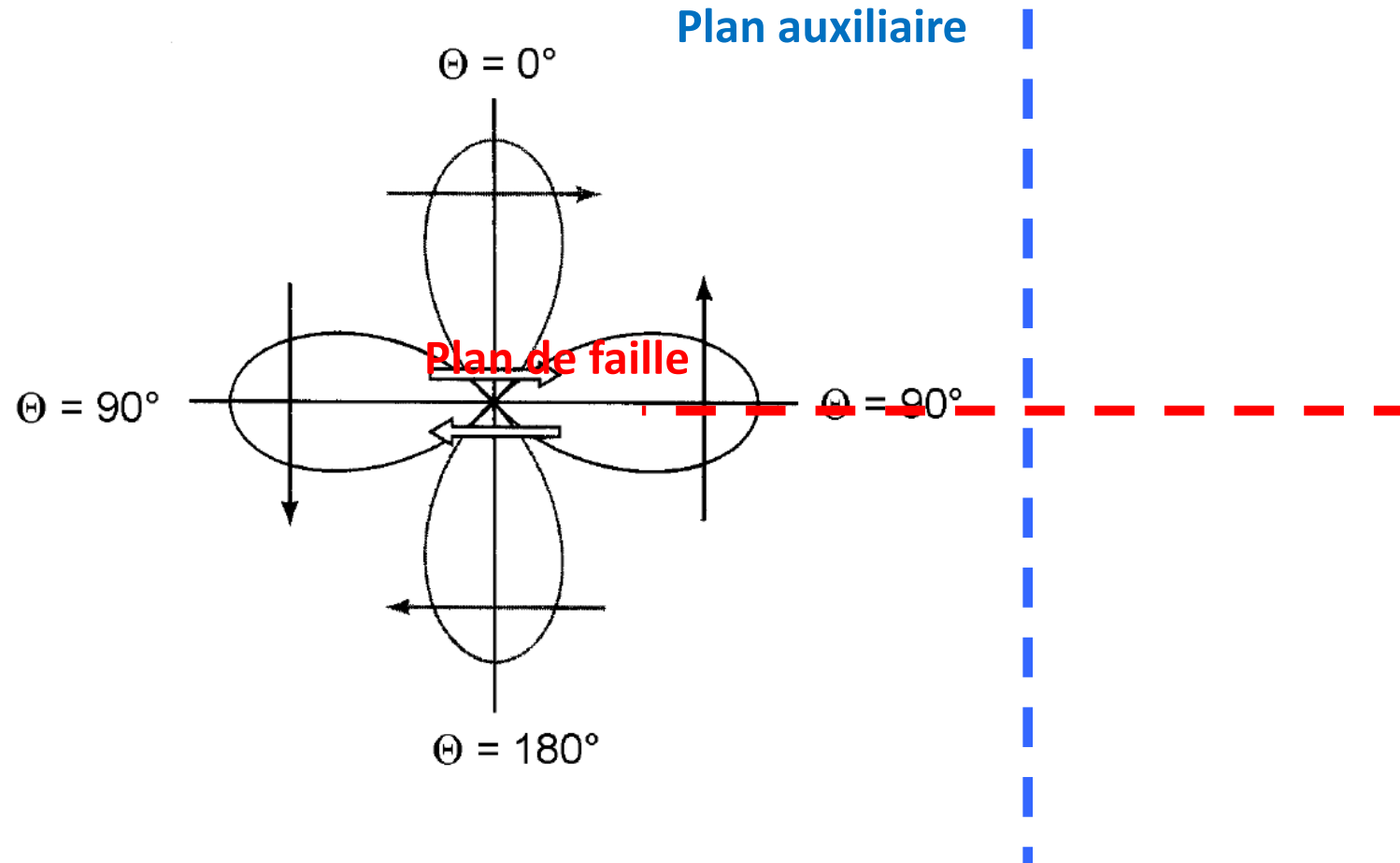


- Mécanisme oblique

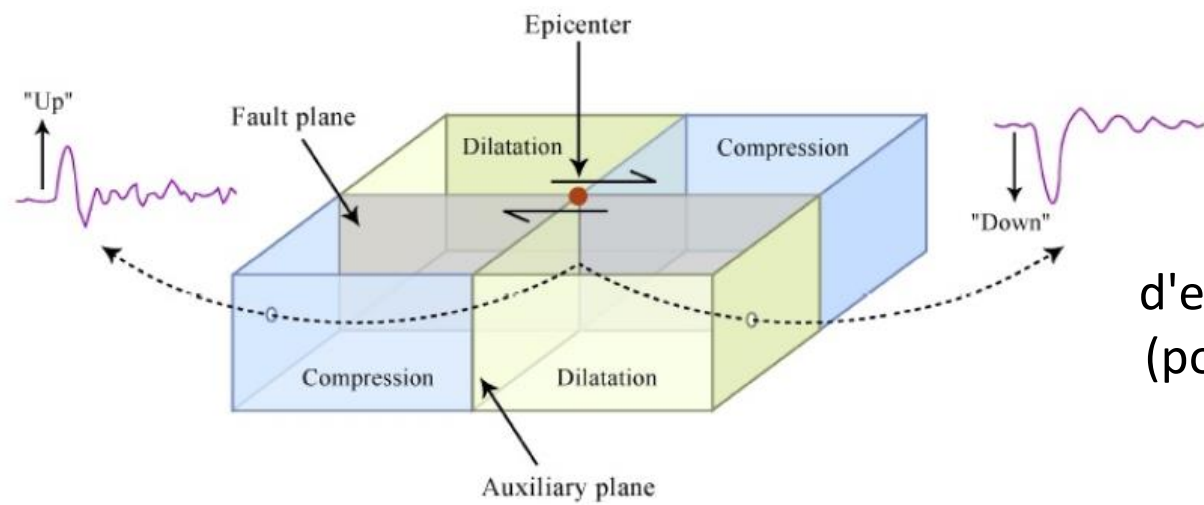


Le double couple

Deux plans nodaux perpendiculaires (plan de faille et plan auxiliaire)

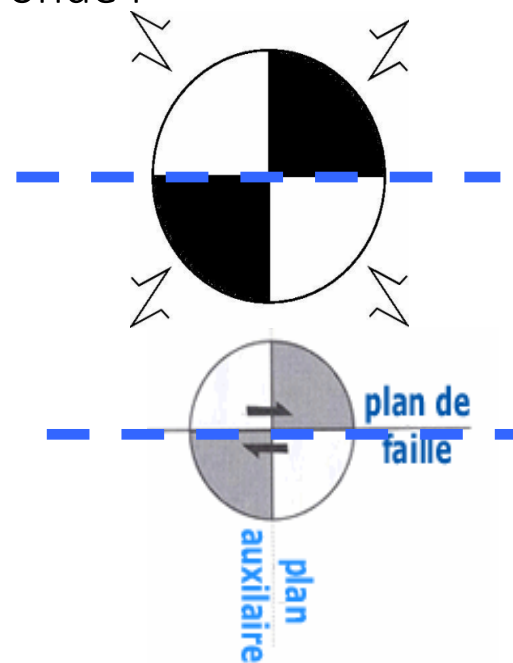
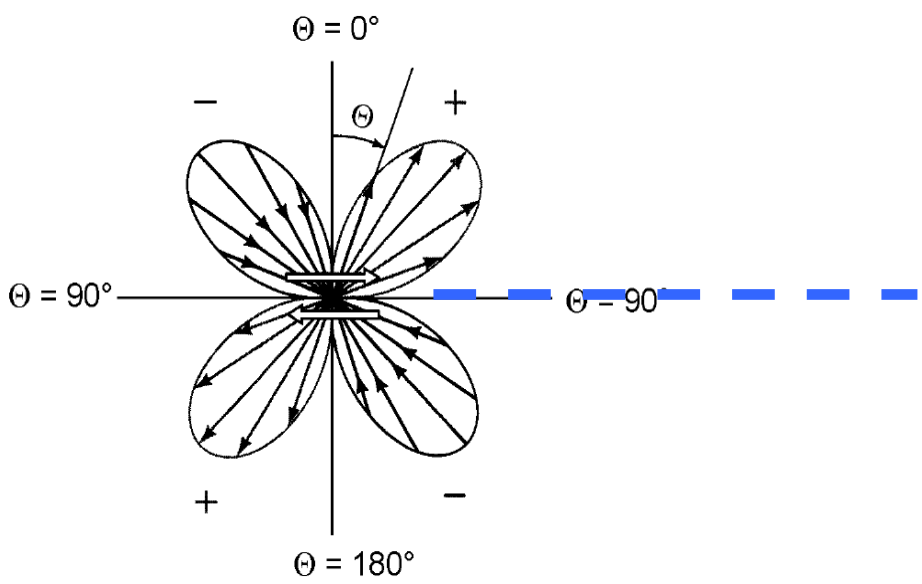


Mécanisme au foyer et sens de premier mouvement



Mouvement des stations d'enregistrement lors d'un séisme (polarité de premier mouvement)

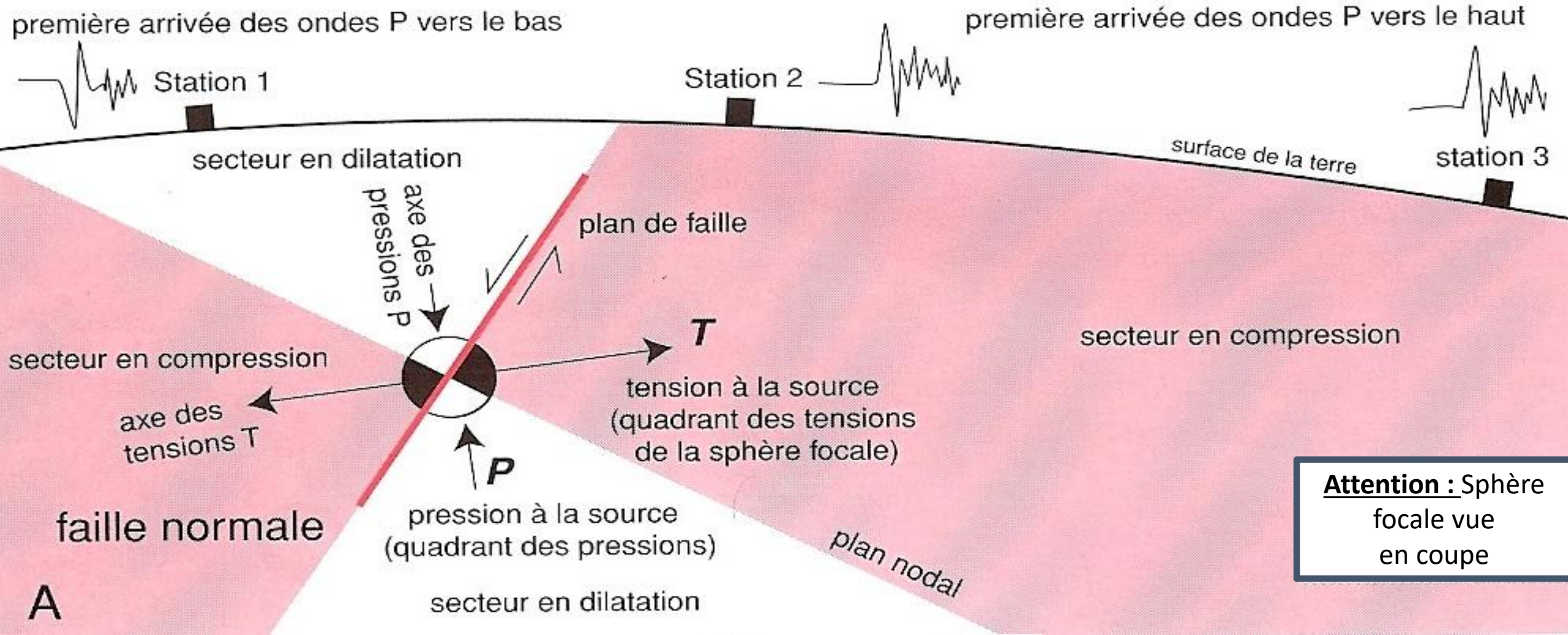
Diagramme de radiation de l'onde P



Si le premier pic reçu sur le sismogramme est vers le haut, alors le premier mouvement est en compression.

- 2 quadrants en compression (en noir)
- 2 quadrants en dilatation (en blanc)

Mécanisme au foyer et sens de premier mouvement



Sphère focale vue en carte (de dessous)

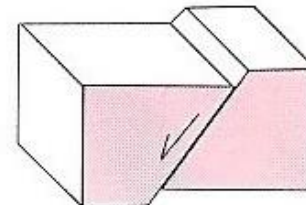
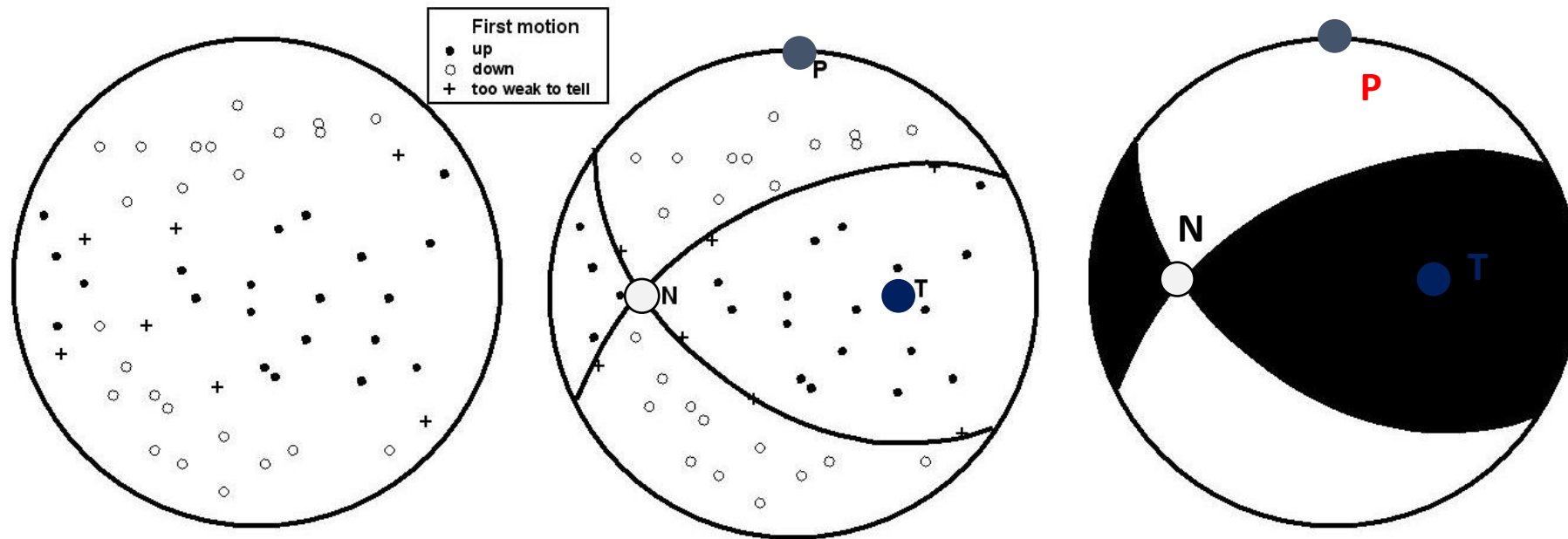


Diagramme 3D

Détermination des plans nodaux et des axes P, T et N

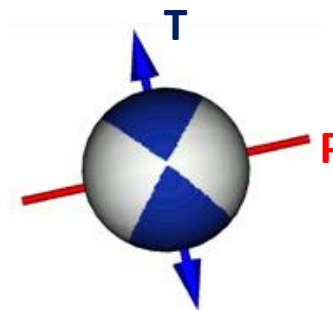


First motion data for a hypothetical earthquake from various seismograph stations

Nodal planes and N, P & T axes fitted to the data

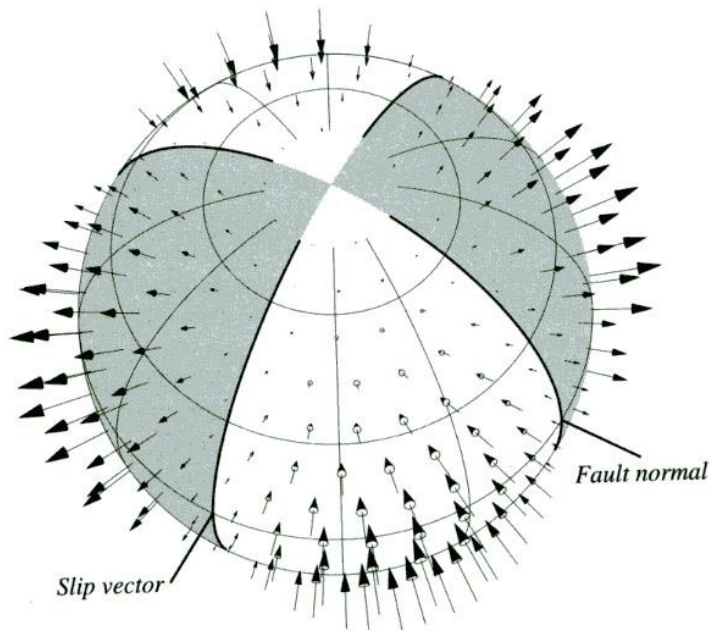
Resultant 'beachball' plot showing that the earthquake resulted from reverse oblique movement on a fault of one of

axe P : au centre du secteur blanc,
axe T : au centre du secteur sombre,
Axe N : intersection des plans nodaux



Mécanisme au foyer et sens de premier mouvement

A partir des polarités des ondes P, on peut déterminer le mécanisme au foyer.

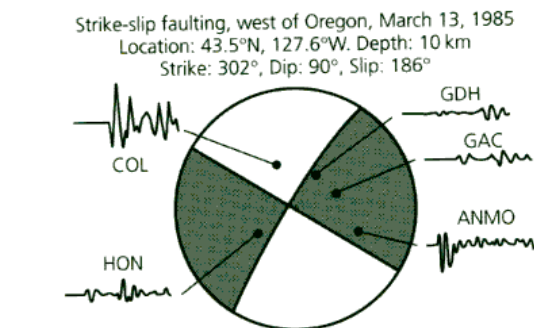
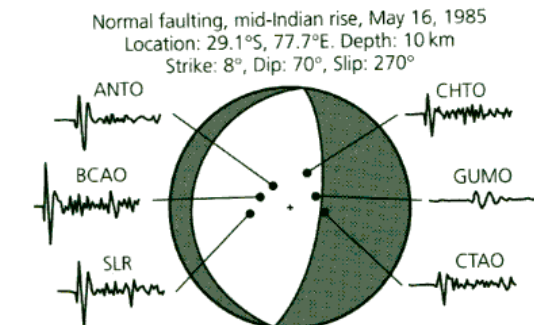
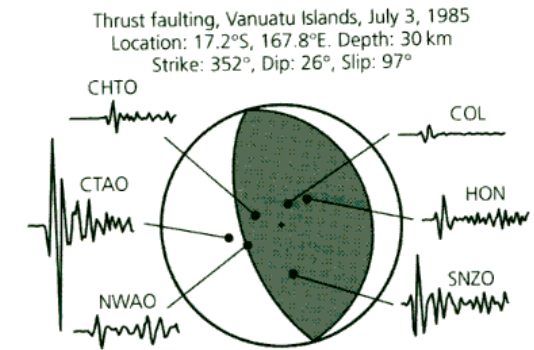


amplitudes des ondes P

● **Faille inverse**

● **Faille normale**

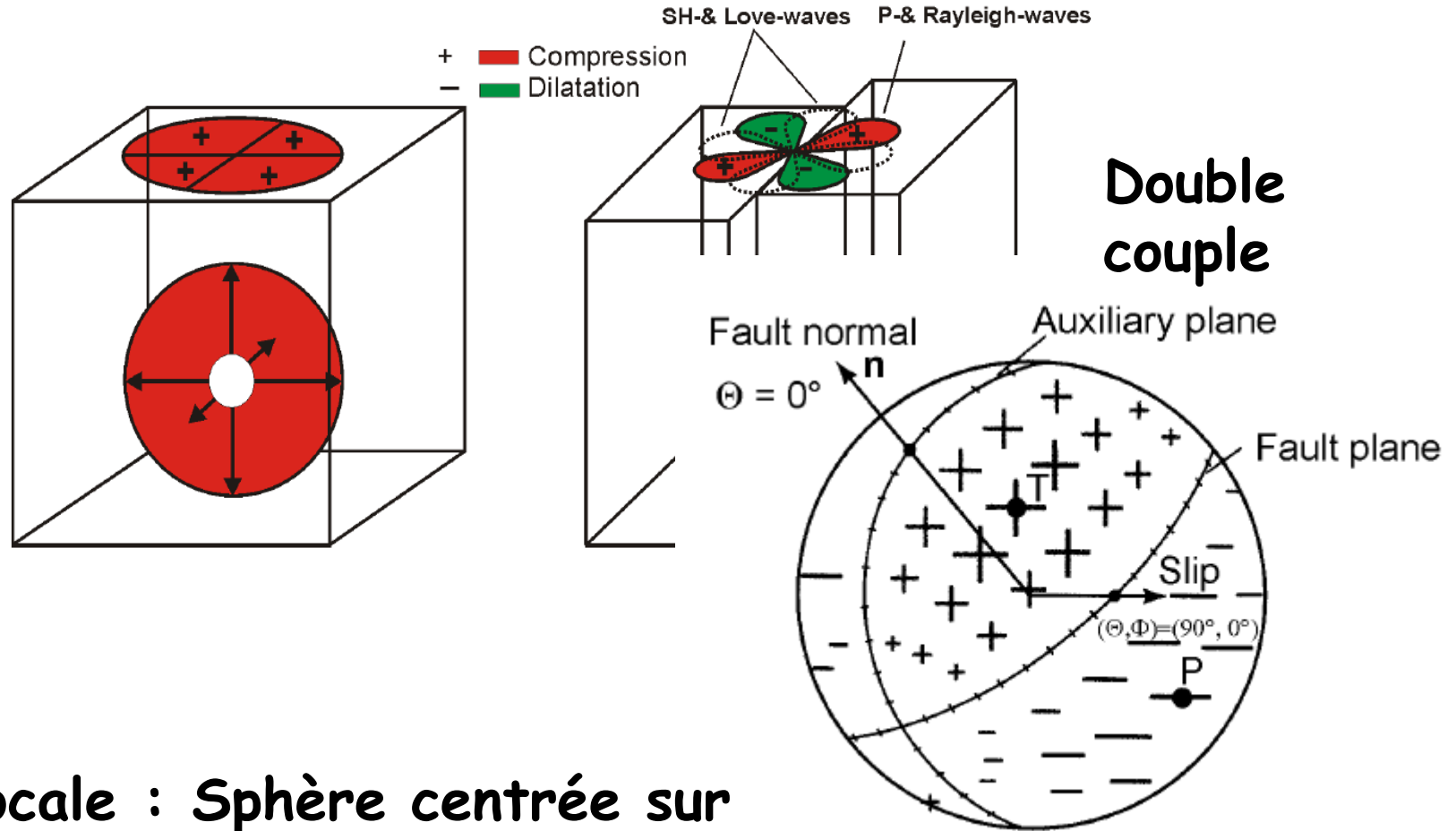
● **Décrochement**



0 120 240
(s)

Mécanisme au foyer et sphère focale

Explosion



Sphère focale : Sphère centrée sur la source et découpée en secteurs compressifs (+) et extensifs (-)

Exemple de mécanisme au foyer

04/12/26 00:58:50.76
OFF W COAST OF NORTHERN SUMATRA
Epicenter: 3.298 95.778
MW 8.2

USGS MOMENT TENSOR SOLUTION
Depth 7 No. of sta: 31
Moment Tensor; Scale 10**21 Nm
Mrr= 0.91 Mtt=-0.89
Mff=-0.02 Mrt= 1.78
Mrf=-1.55 Mtf= 0.47
Principal axes:
T Val= 2.53 Plg=55 Azm= 50
N 0.09 8 308
P -2.61 34 213

Best Double Couple:Mo=2.6*10**21
NP1:Strike=274 Dip=13 Slip= 55
NP2: 130 79 98

```
-----  
-----  
---#####  
--#####  
##-#####  
#----#####  
-----#####  
-----##### T #####  
-----#####  
-----#####  
-----#####  
-----#####  
-----#####  
-----#####  
-----#####  
----- P -----#####  
-----  
-----  
-----
```

Tenseur des moments sismiques

Expression des moments sismiques pour une source sismique double-couple en fonction des paramètres de la source

(Aki et Richards, 1980)

$$M_{xx} = -M_0(\sin\delta \cos\lambda \sin 2\phi + \sin 2\delta \sin\lambda \sin^2\phi)$$

$$M_{xy} = M_0(\sin\delta \cos\lambda \cos 2\phi + 0.5 \sin 2\delta \sin\lambda \sin 2\phi)$$

$$M_{xz} = -M_0(\cos\delta \cos\lambda \cos\phi + \cos 2\delta \sin\lambda \sin\phi)$$

$$M_{yy} = M_0(\sin\delta \cos\lambda \sin 2\phi - \sin 2\delta \sin\lambda \cos^2\phi)$$

$$M_{yz} = -M_0(\cos\delta \cos\lambda \sin\phi - \cos 2\delta \sin\lambda \cos\phi)$$

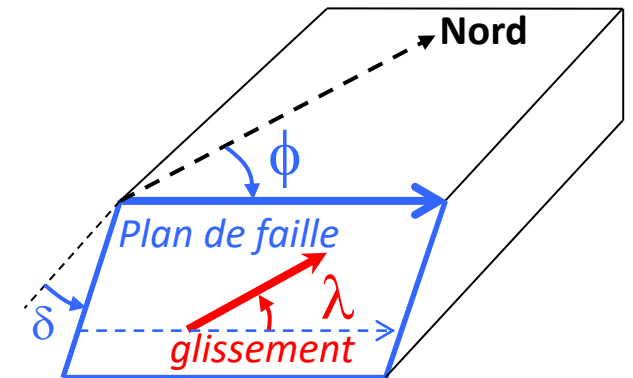
$$M_{zz} = M_0 \sin 2\delta \sin\lambda$$

δ : Pendage (dip)

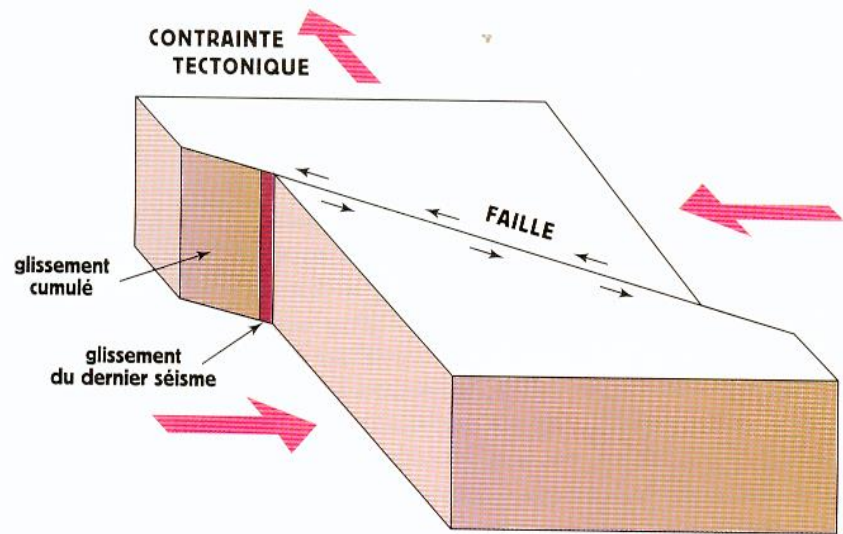
ϕ : Azimut (**strike**)

λ : Glissement dans le plan de faille (**rake**)

M_0 : Moment sismique



Faille décrochante

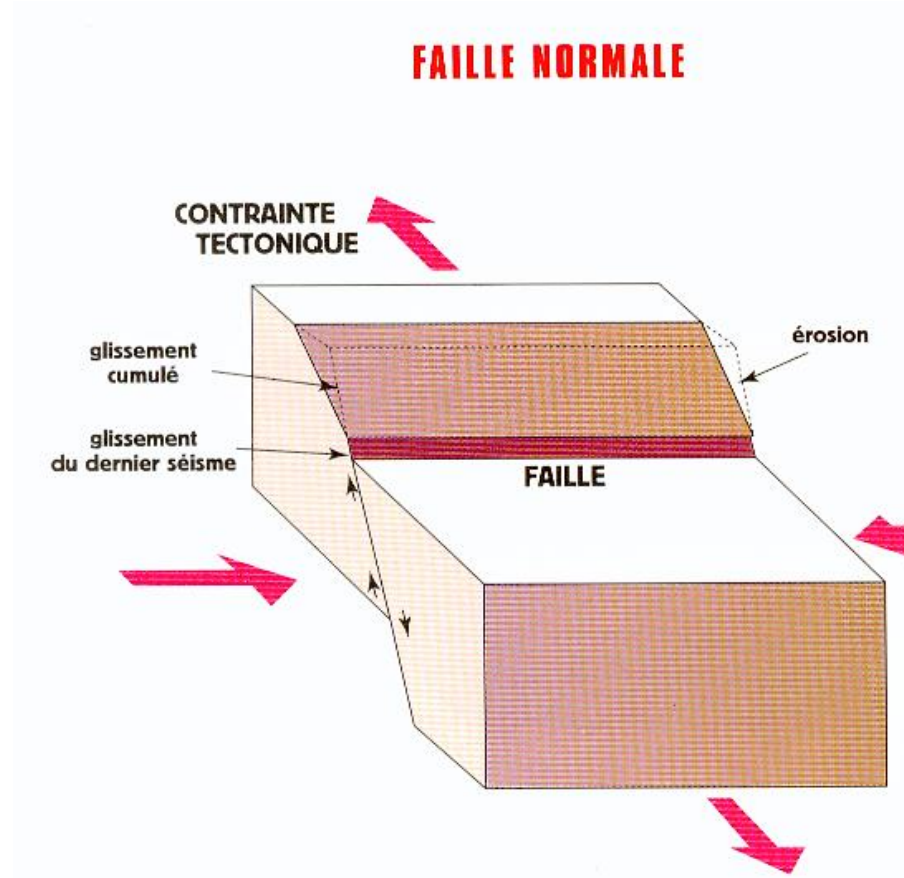


Strike Slip

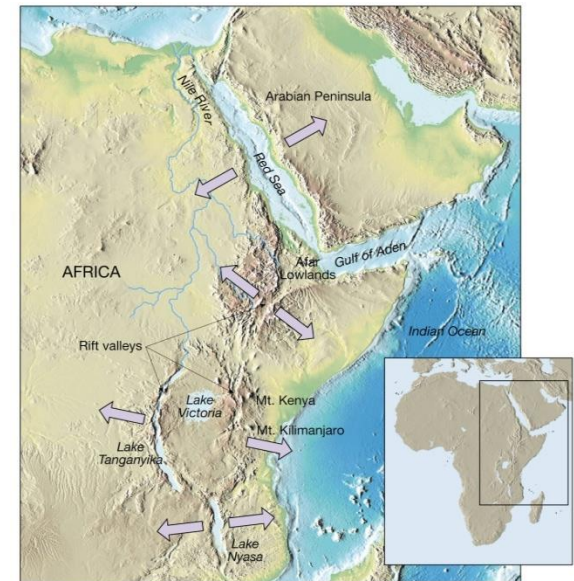


Faïlle normale

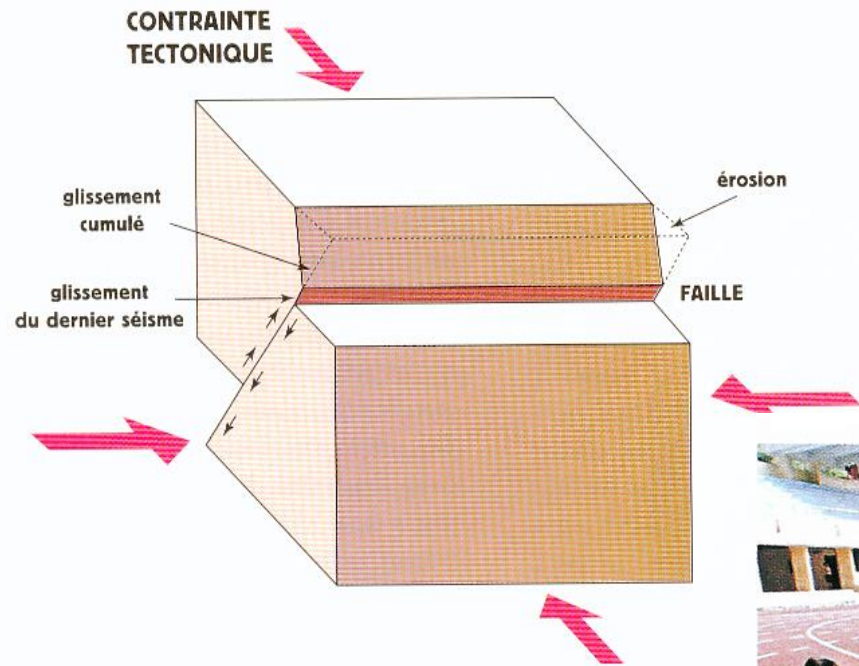
Normal



Rift est-africain



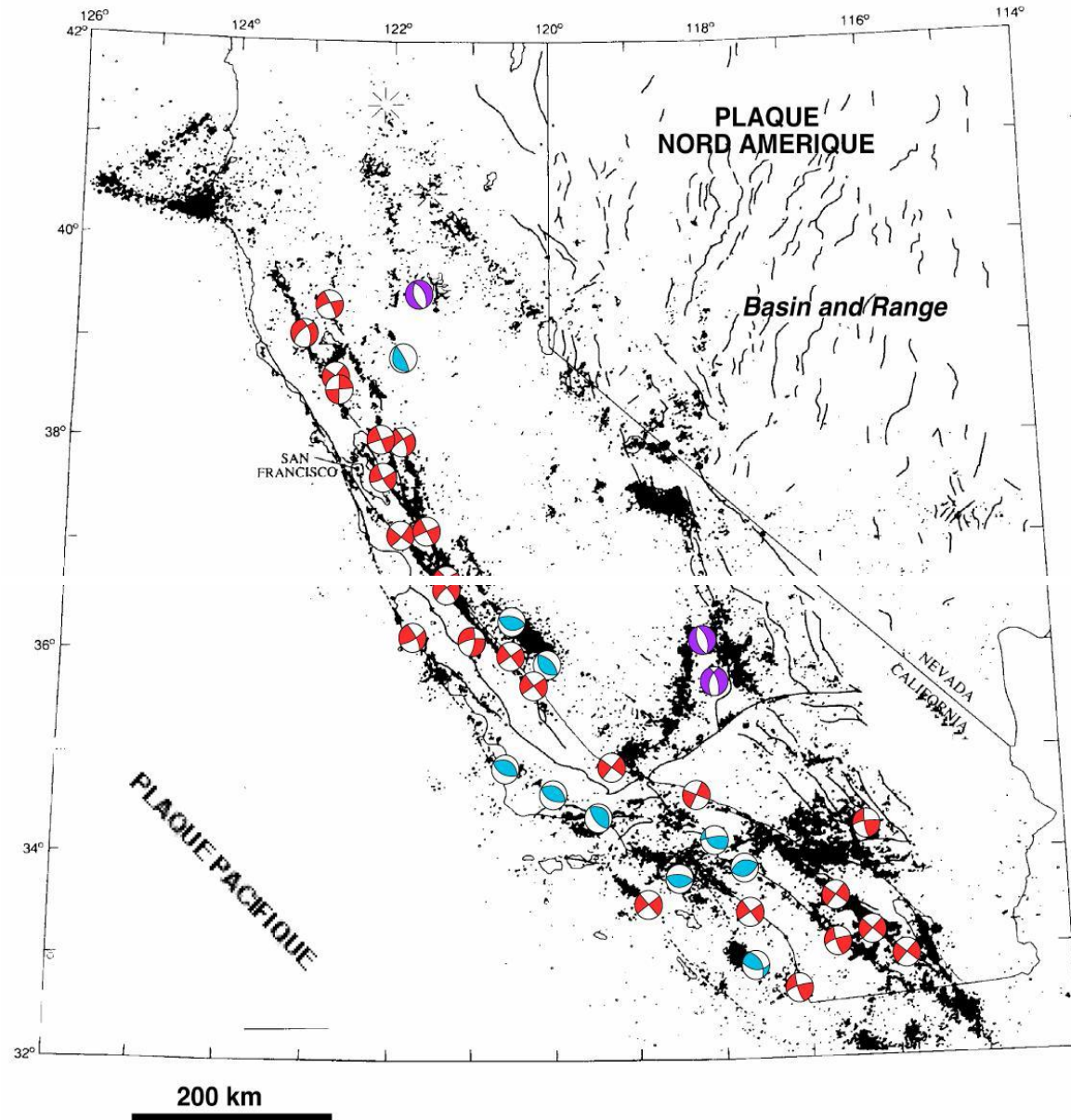
Faille inverse- Chevauchement



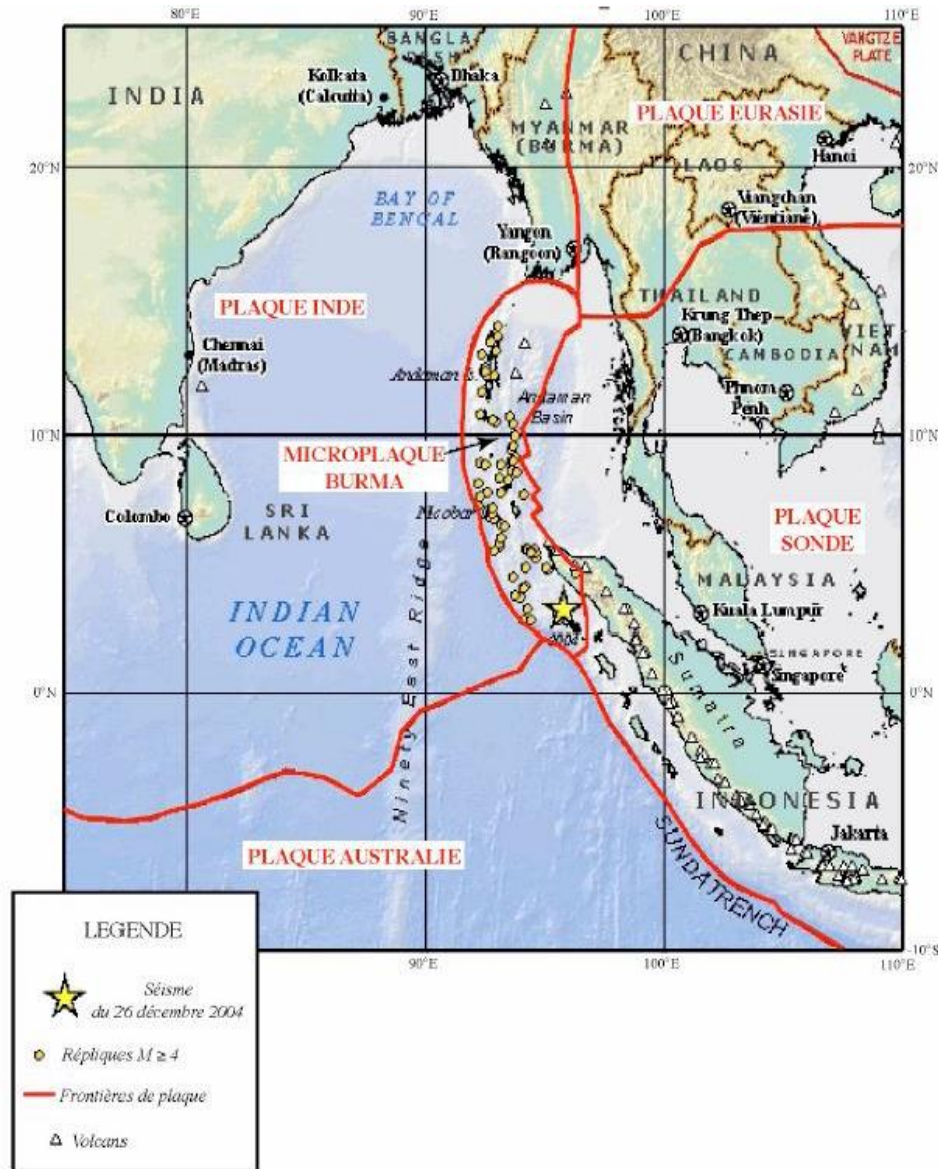
Reverse



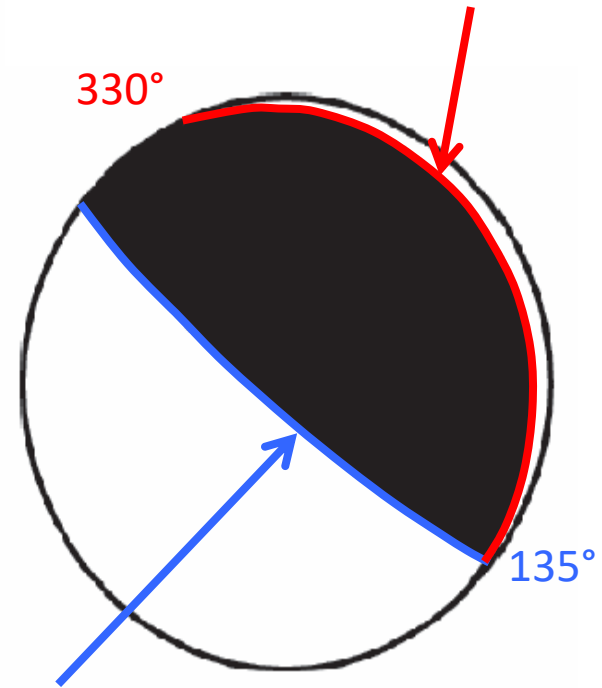
Décrochement dextre (Faille de San Andreas)



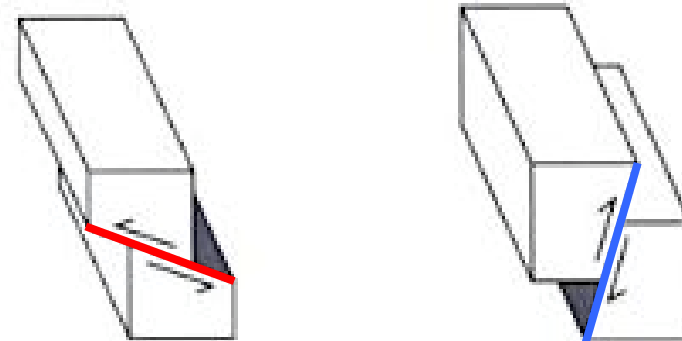
Subduction - Sumatra



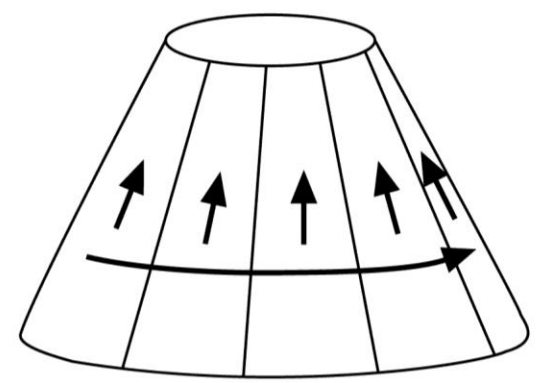
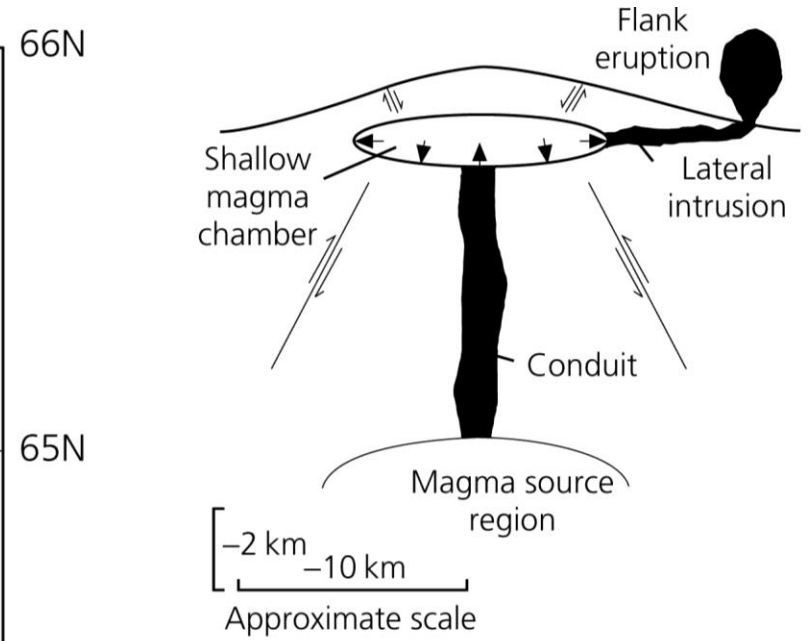
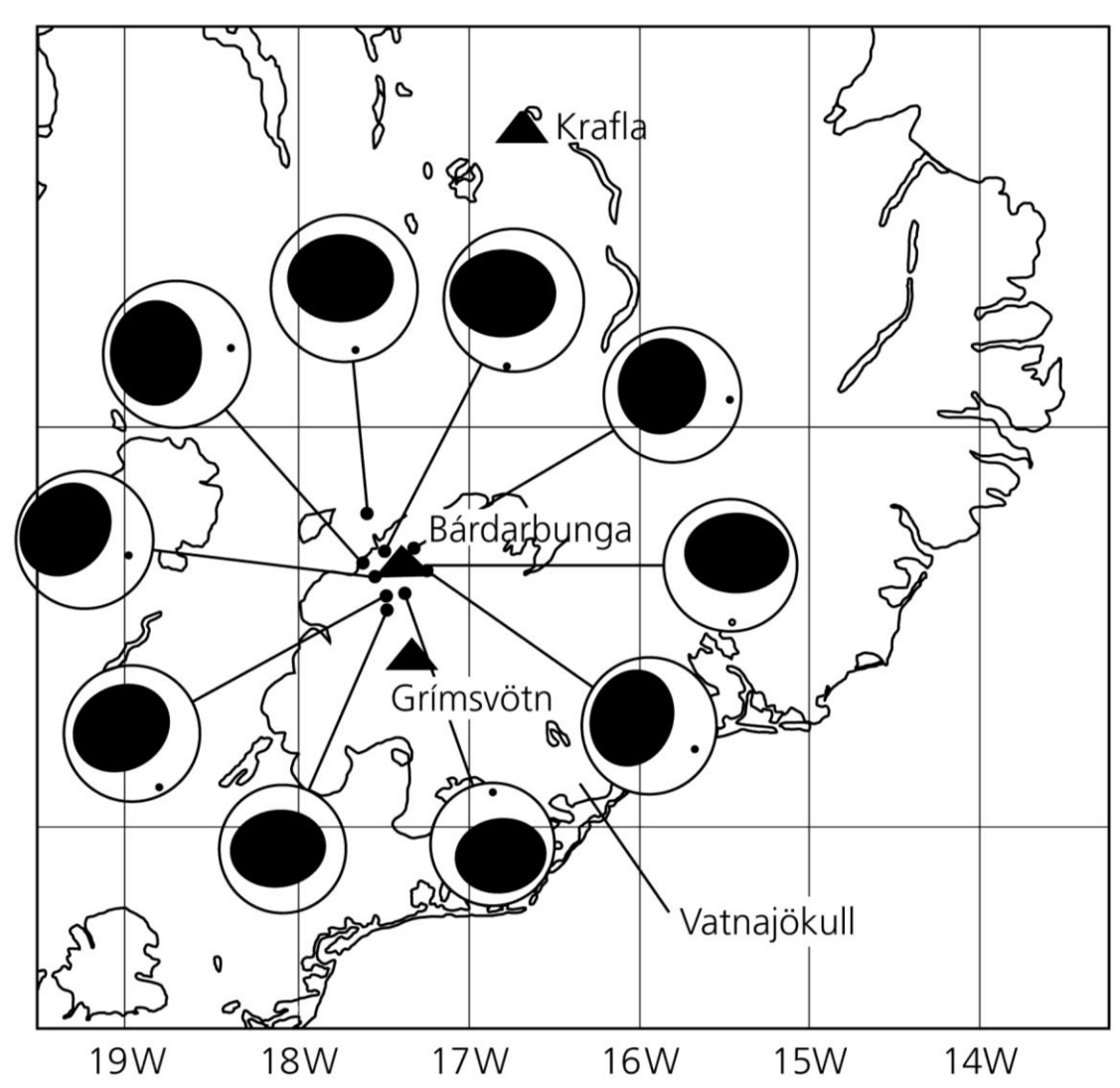
Plan nodal 1: $330^\circ 10^\circ$



Plan nodal 2: $135^\circ 85^\circ$

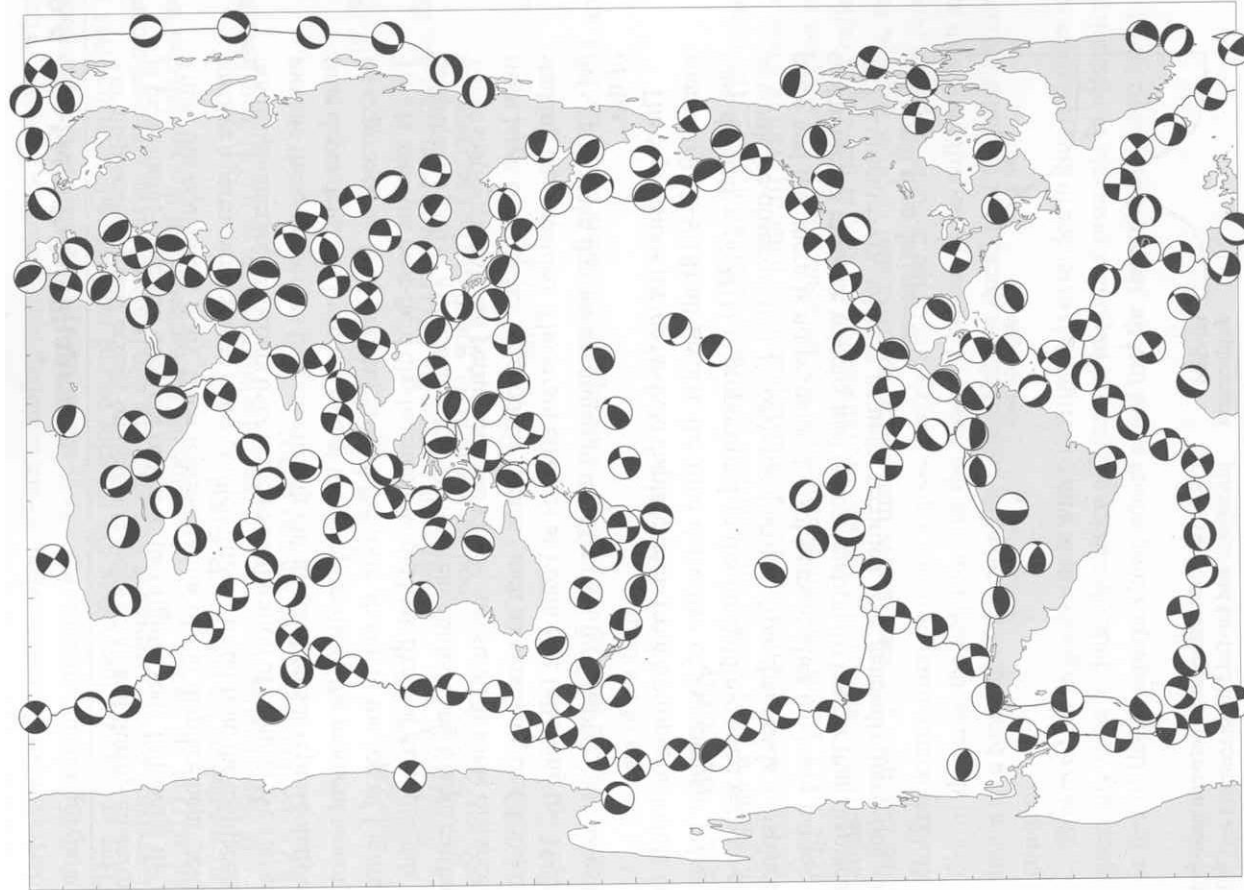


Exemple de mécanisme de type CLVD

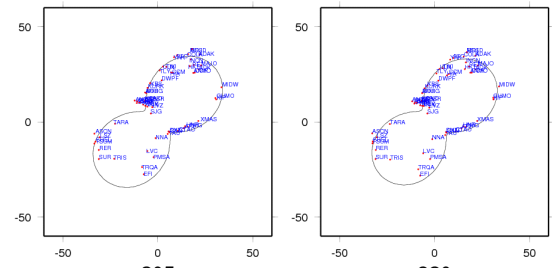


Nettles and Ekstrom, 1998

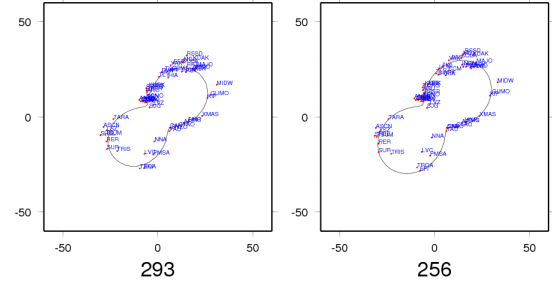
Séismes mondiaux - sphères focales



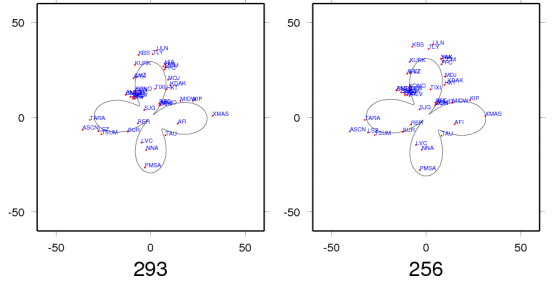
Inversion du diagramme de rayonnement des ondes de Rayleigh et de Love



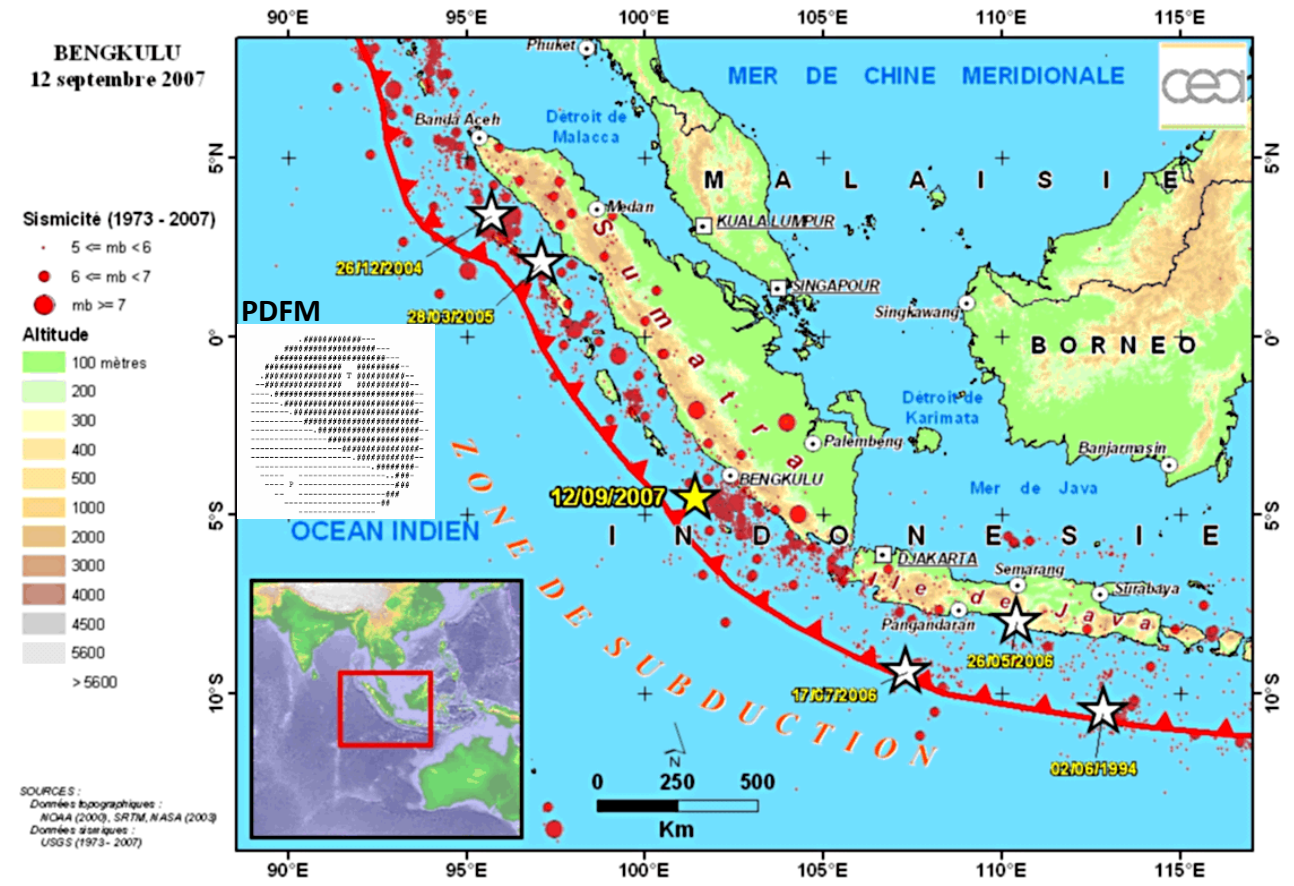
Ondes de Rayleigh



Ondes de Love



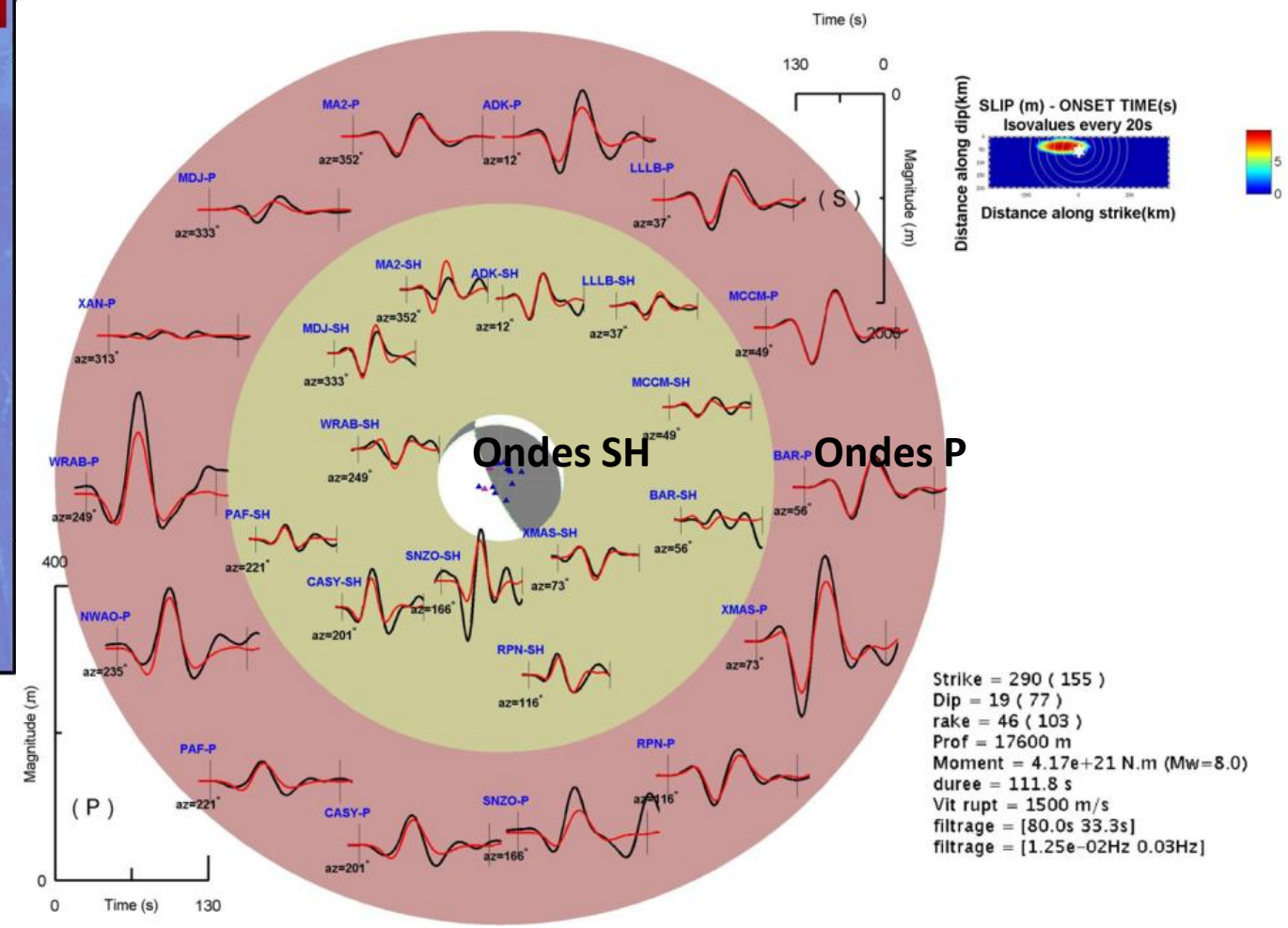
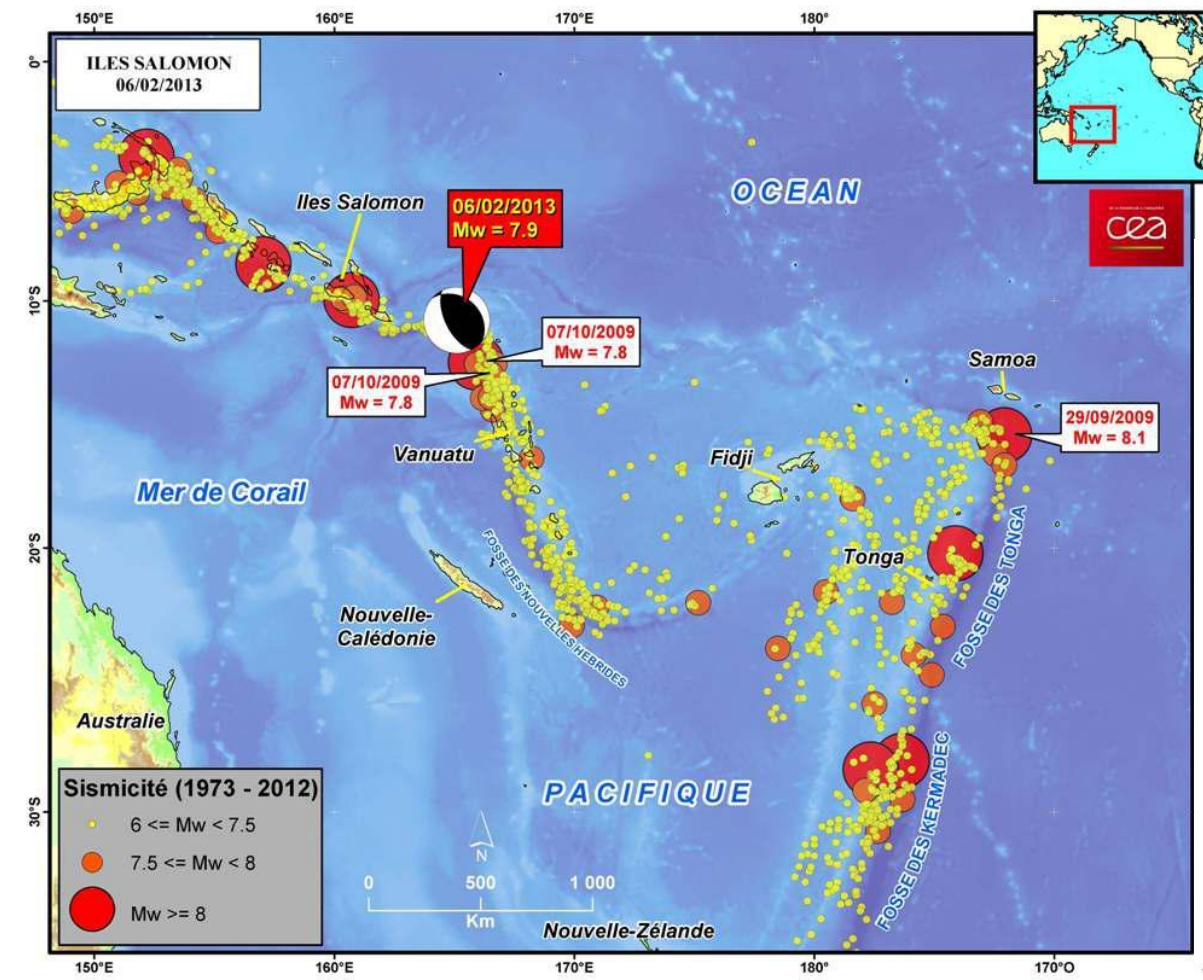
Séisme de Sumatra du 12 septembre 2007 Mw 8,4



Diagrammes de rayonnement des ondes de Rayleigh (en haut) et de Love (en bas) à diverses périodes.

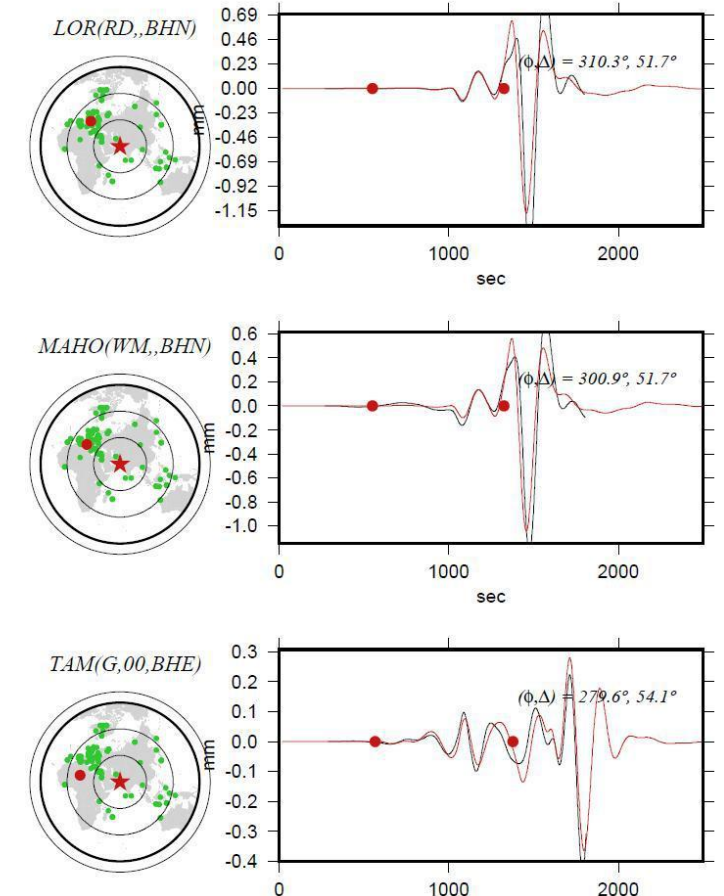
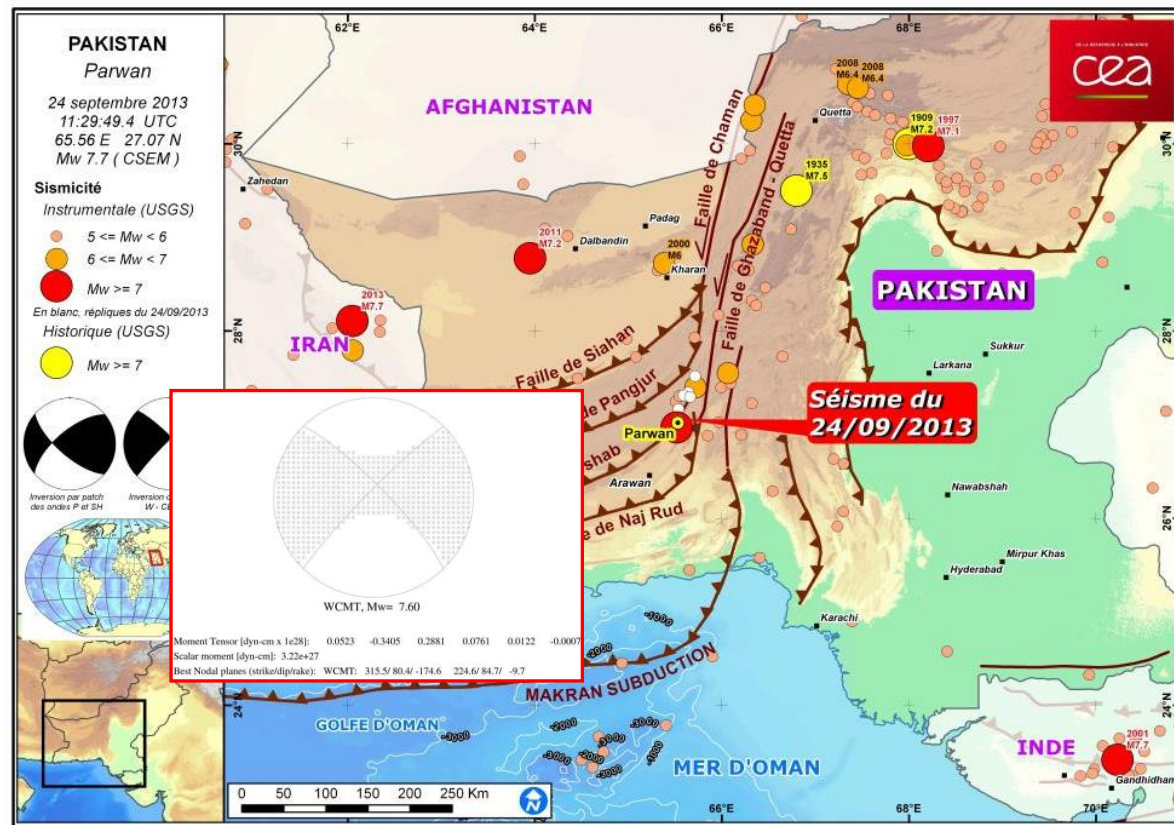
- Traits continus (modèle de source - solution PDFM).
- Points (modules spectraux observé aux stations).

Mécanisme et distribution du glissement sur la faille par inversion des sismogrammes



Détermination du CMT par inversion de la phase W

Inversion de la phase W (phase longue période au début du signal – typiquement 100s-1000s) à distance téléseismique.

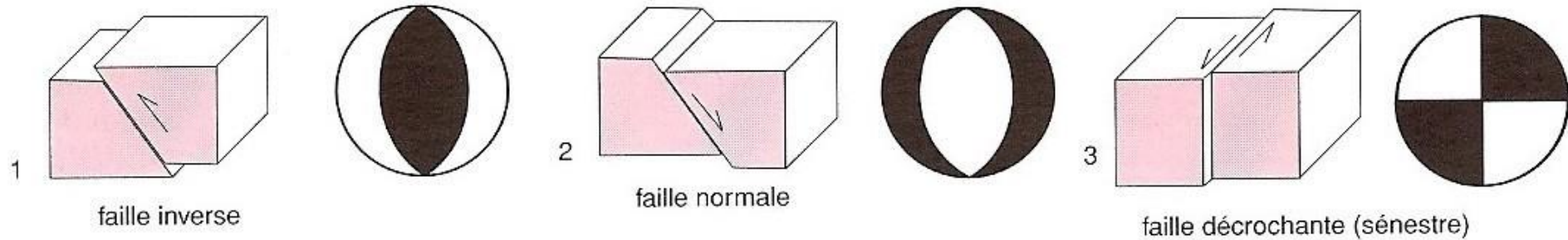


Par sa nature longue période et parce qu'elle précède les ondes de surface, la phase W permet d'obtenir une solution rapide du CMT d'un événement important alors que d'autres méthodes demandent plusieurs heures pour déterminer les paramètres de source d'un très grand séisme (Mw>8.5).

Le Sismologue

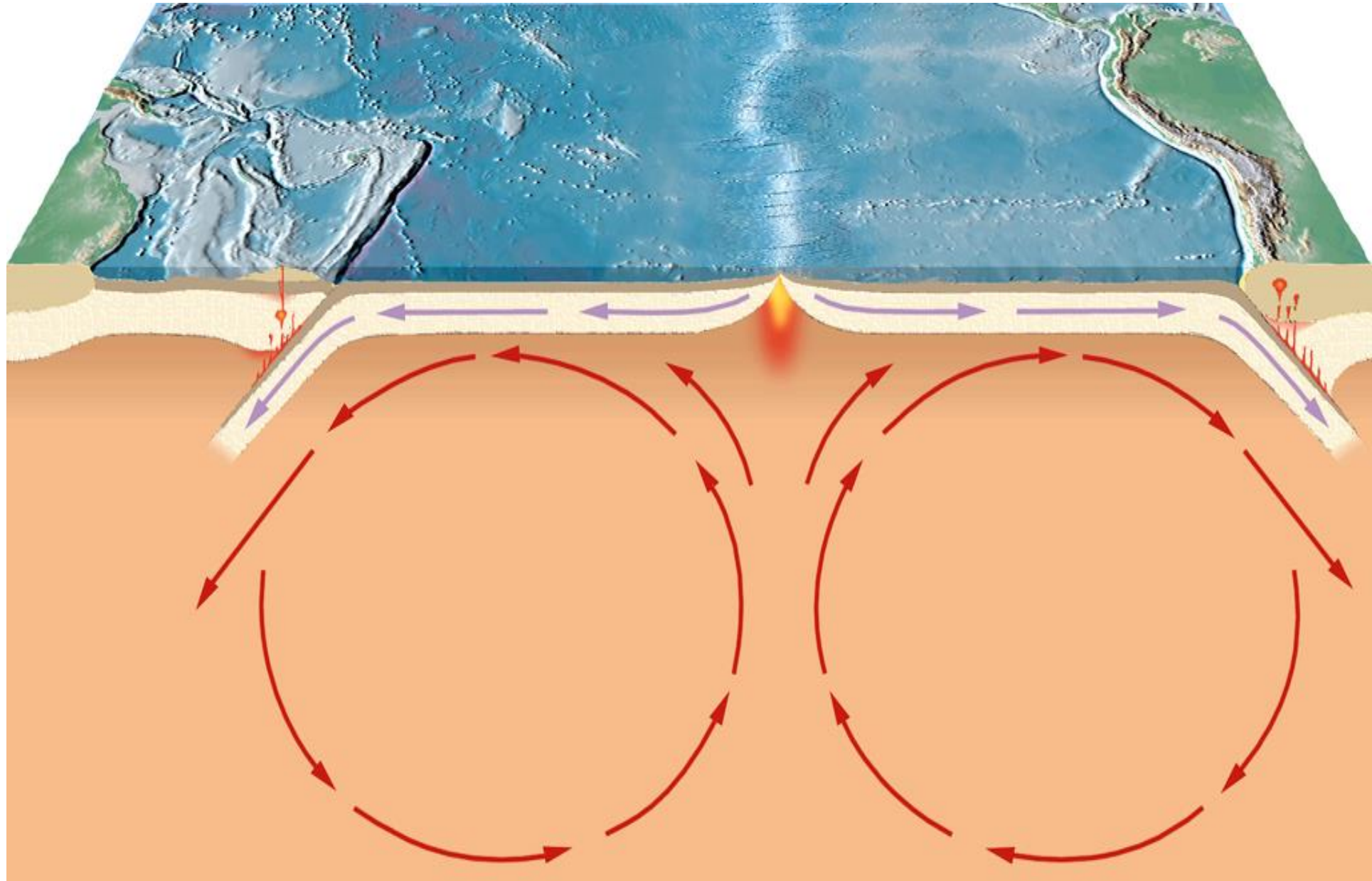
utilise les ondes sismiques pour :

- Localiser le tremblement de terre
- Caractériser le type de mouvement sur la faille
- Estimer la magnitude

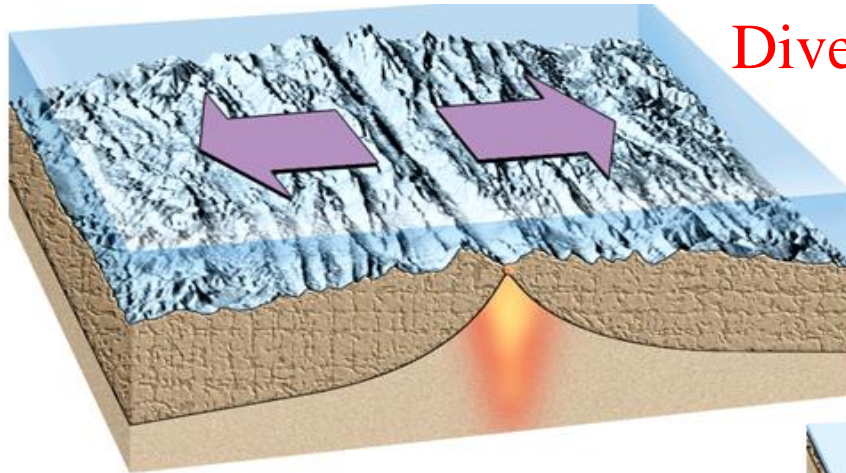


Les failles

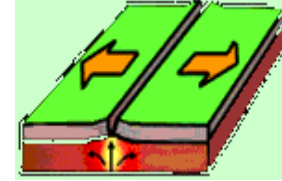
Convection dans le manteau



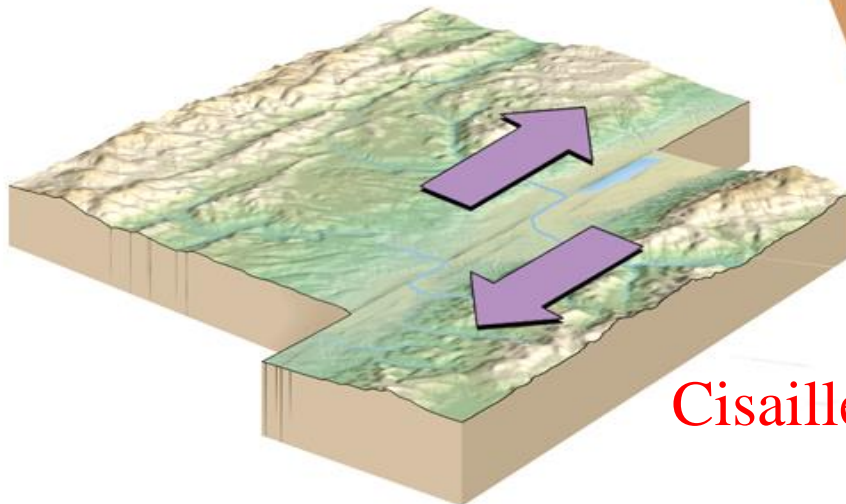
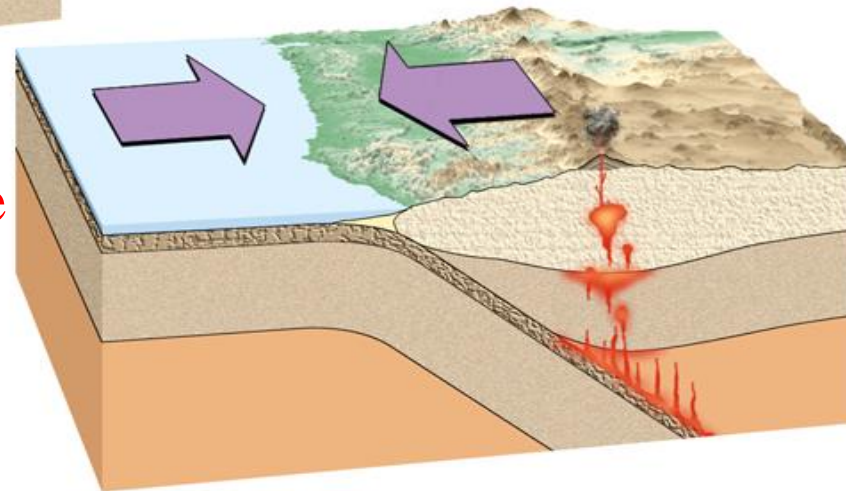
Mouvements des plaques tectoniques



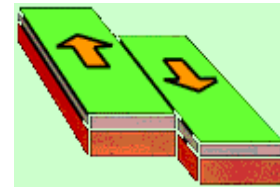
Divergence



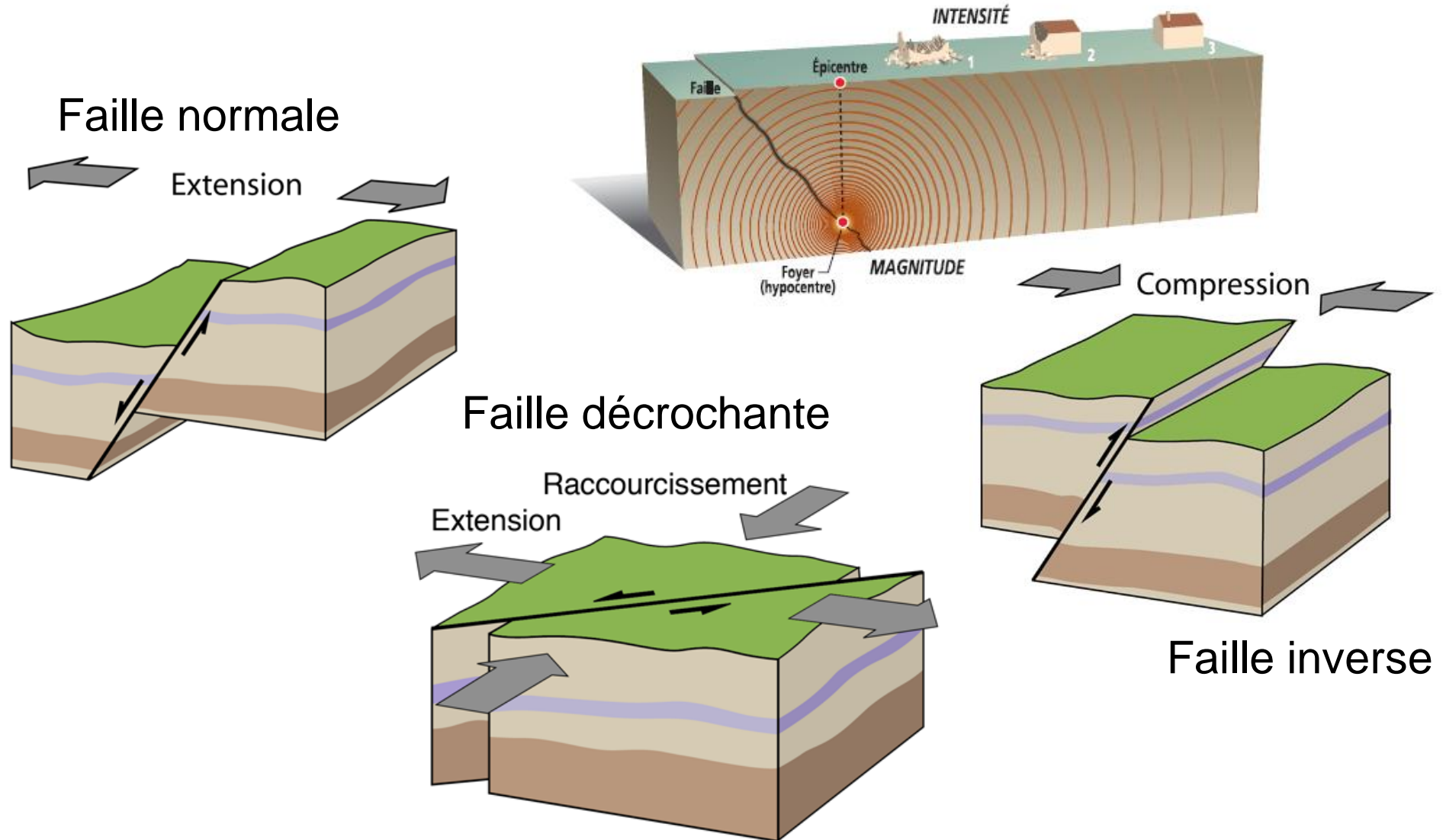
Convergence



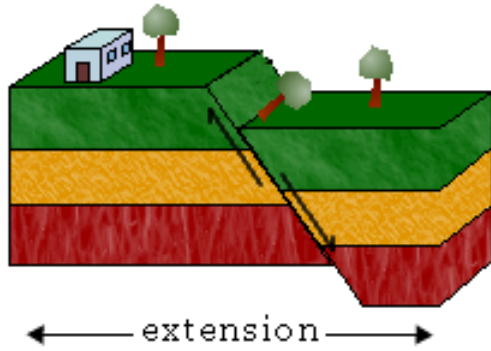
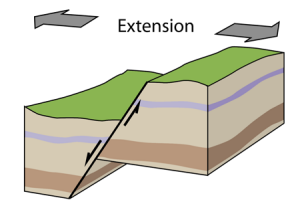
Cisaillement



Les séismes se produisent sur des failles



Failles normales



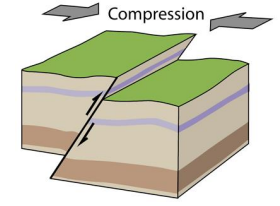
Fuyun, 11/08/1931, Chine, Magnitude 8,0



Graben, Þingvellir, Islande

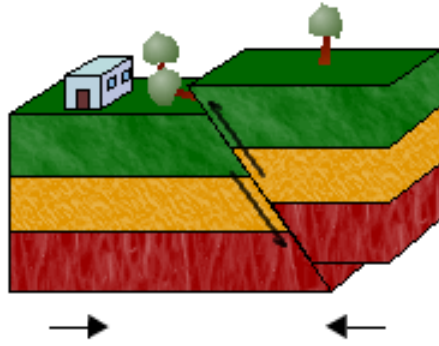


Rift Africain

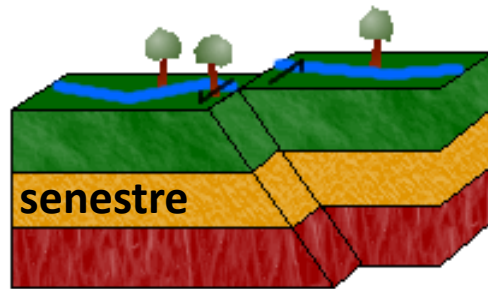
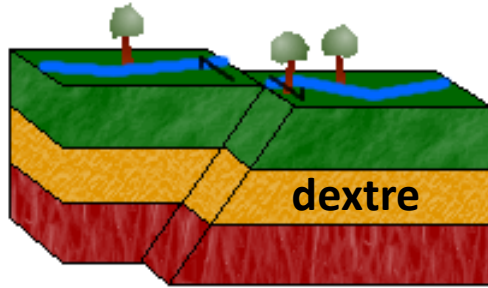
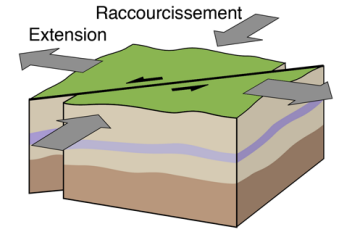


Failles inverses

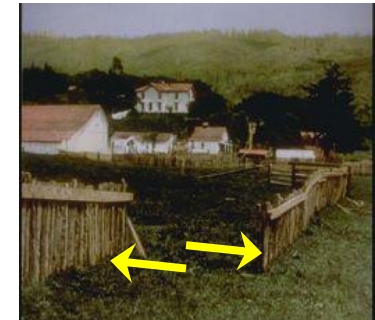
Chichi, Taiwan,
21/09/1999,
Magnitude 7,3



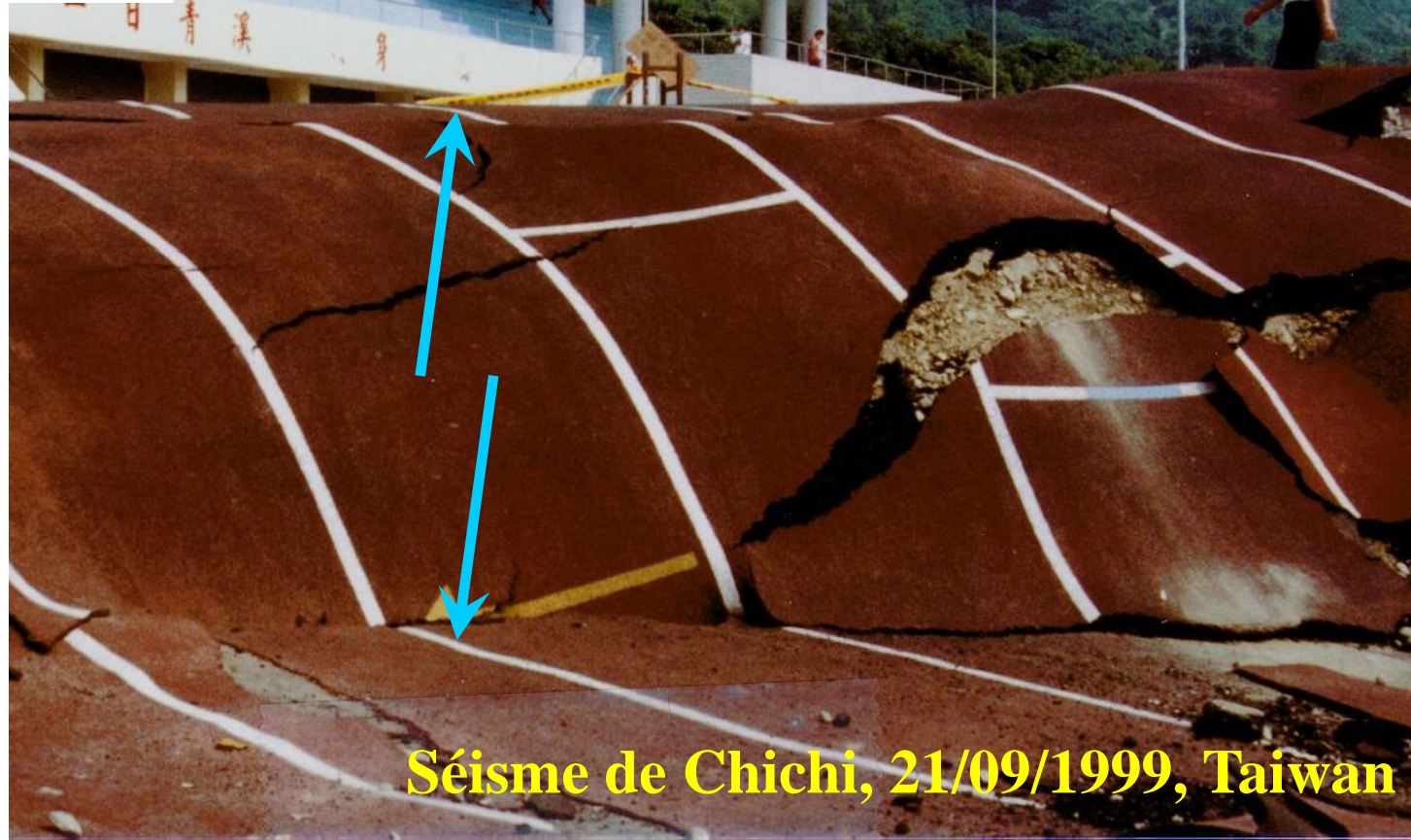
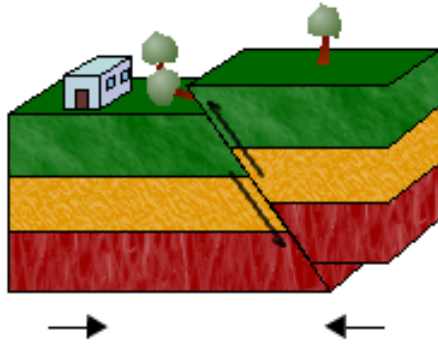
Failles décrochantes



San Francisco, 18/04/1906,
Magnitude 8,2
Faille décrochante dextre.

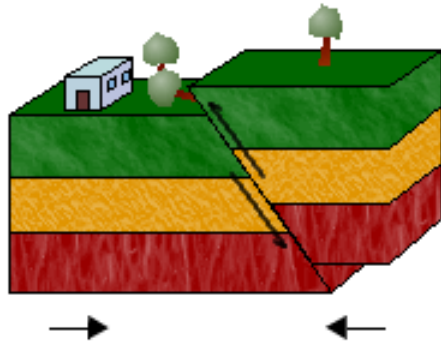


Faille inverse



Séisme de Chichi, 21/09/1999, Taiwan

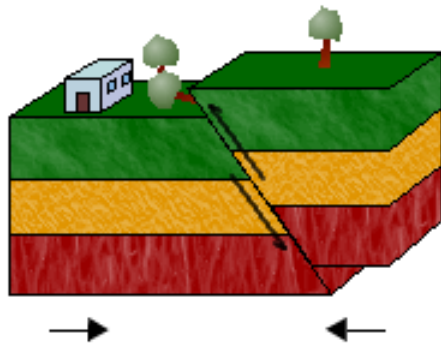
Faille inverse



Séisme de Chichi, 21/09/1999, Taiwan

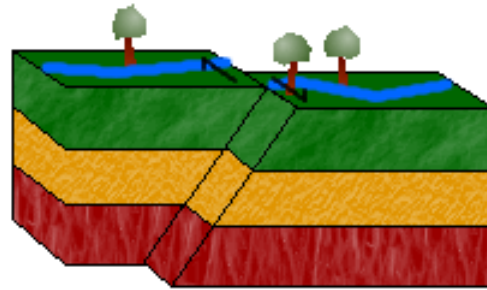
Faïlle inverse

Séisme de Chichi, 21/09/1999, Taiwan



Décrochement dextre

Séisme d'Izmit, 17/08/1999, Turquie

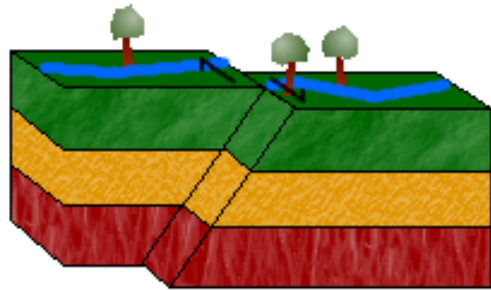


Arbre coupé en deux
par la faille du séisme



Décrochement dextre

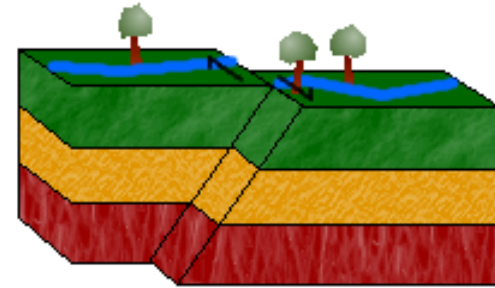
Séisme d'Izmit,
17/08/1999,
Turquie



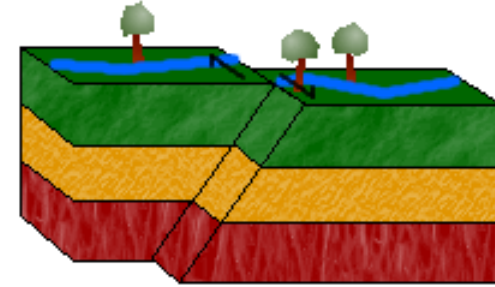
Arbre coupé en deux par la faille du séisme

Décrochement dextre

Séisme d'Izmit, 17/08/1999, Turquie



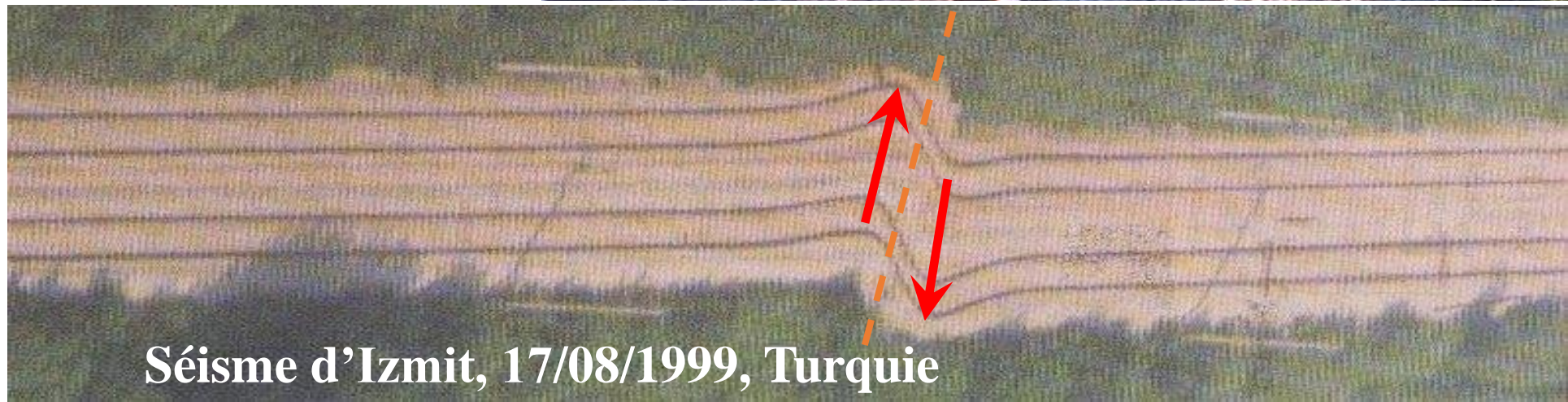
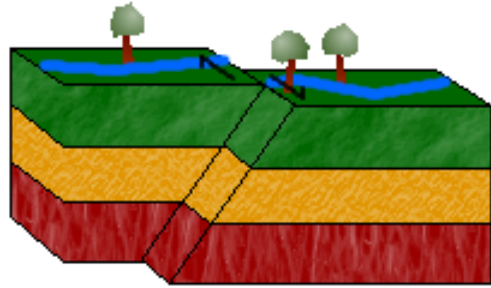
Décrochement dextre



Séisme d'Izmit, 17/08/1999, Turquie



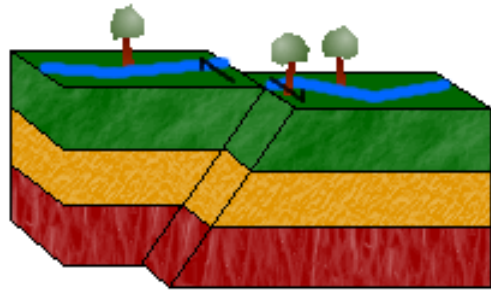
Décrochement dextre



Séisme d'Izmit, 17/08/1999, Turquie

Décrochement dextre

Séisme d'Izmit,
17/08/1999,
Turquie

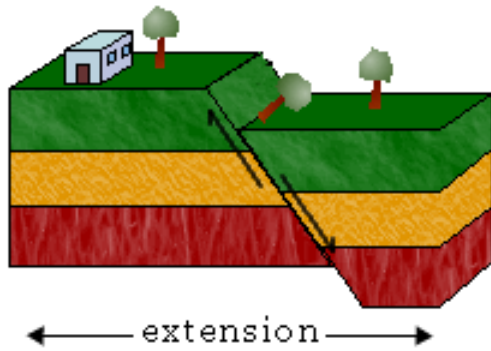


Décrochement dextre



Séisme d'Izmit, 17/08/1999, Turquie

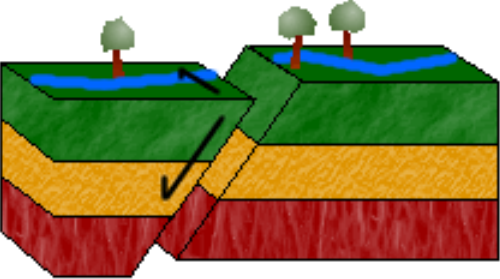
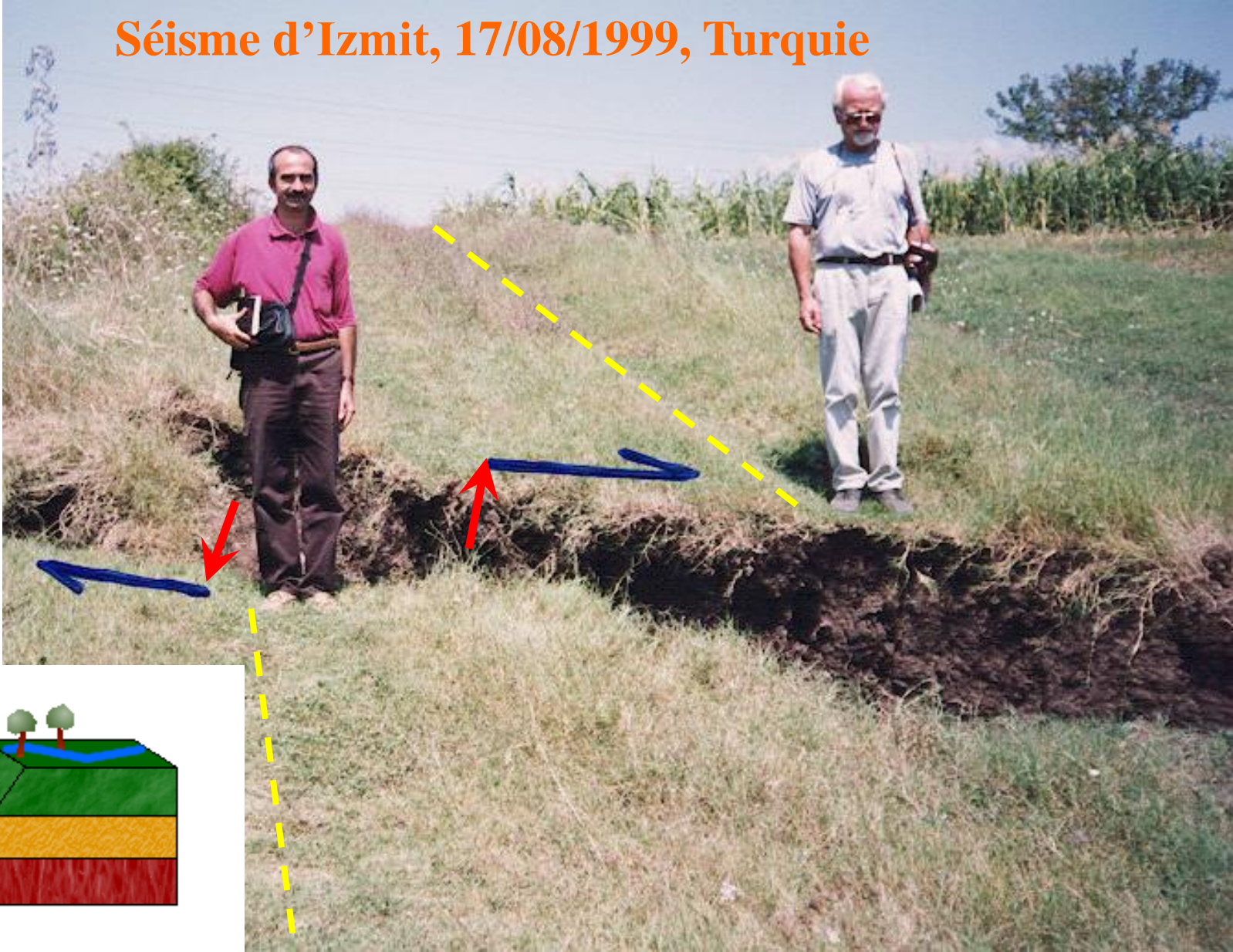
Faille normale



Séisme d'Izmit, 17/08/1999, Turquie

Glissement oblique (dextre+normal)

Séisme d'Izmit, 17/08/1999, Turquie

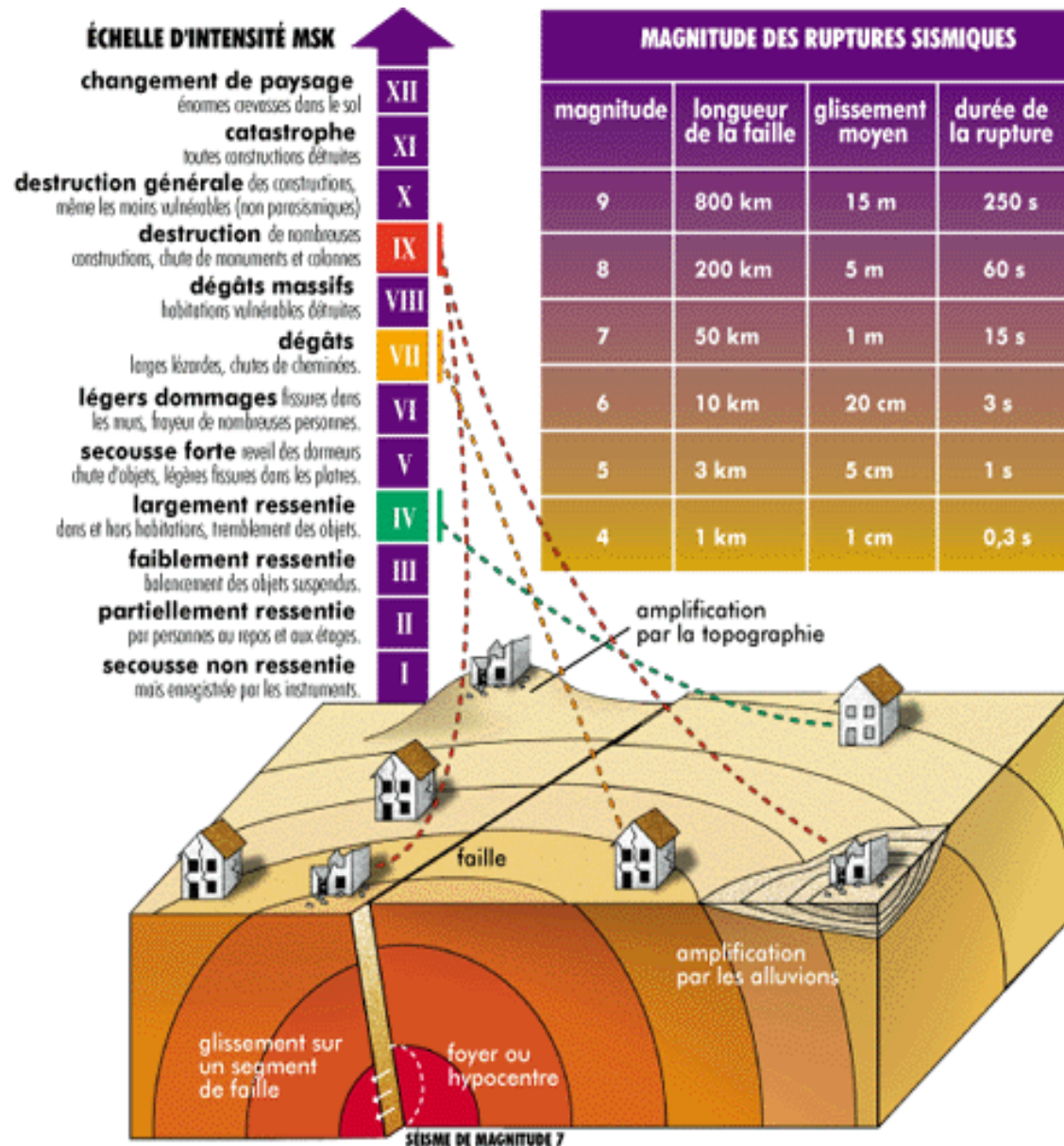


Les intensités macrosismiques

Sismicité et intensités macrosismiques

- Période récente
 - Sismicité (Magnitude, lat, lon, prof, to...) connue instrumentalement.
- Période historique
 - Recherche et analyse de témoignage (patrimoine littéraire).
 - Ces témoignages constituent la base de la macrosismicité (description des effets de la sismicité).
 - Plusieurs échelles d'intensités macrosismiques
 - Mercalli développée en 1902 et modifiée en 1956 (MMI)
 - MSK (Medvedev, Sponheuer et Karnik, 1964) + EMS-98
 - Ces deux échelles comportent douze degrés notés généralement en chiffres romains de I à XII
 - L'intensité est déterminée à partir de :
 - Ampleur des dégâts causés par un séisme
 - perception de la population
 - Echelle subjective

Intensité



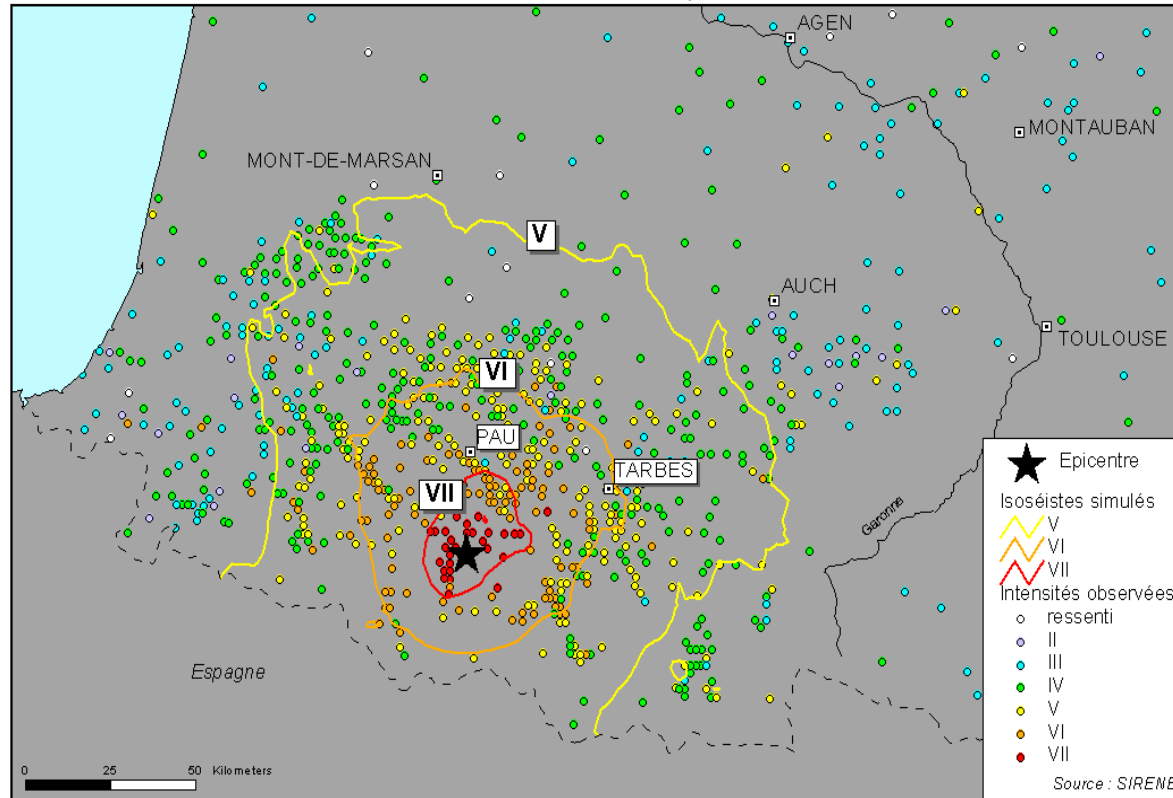
L'échelle M.S.K.

- Degré I : seuls les sismographes très sensibles enregistrent les vibrations.
- Degré II : secousses à peine perceptibles ; quelques personnes au repos ressentent le séisme.
- Degré III : vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un petit camion.
- Degré IV : vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un gros camion.
- Degré V : séisme ressenti en plein air. Les dormeurs se réveillent.
- Degré VI : les meubles sont déplacés.
- Degré VII : quelques lézardes apparaissent dans les édifices.
- Degré VIII : les cheminées des maisons tombent.
- Degré IX : les maisons s'écroulent. Les canalisations souterraines sont cassées.
- Degré X : destruction des ponts et des digues. Les rails de chemin de fer sont tordus.
- Degré XI : les constructions les plus solides sont détruites. Grands éboulements.
- Degré XII : les villes sont rasées. Bouversements importants de la topographie.

Intensités macrosismiques

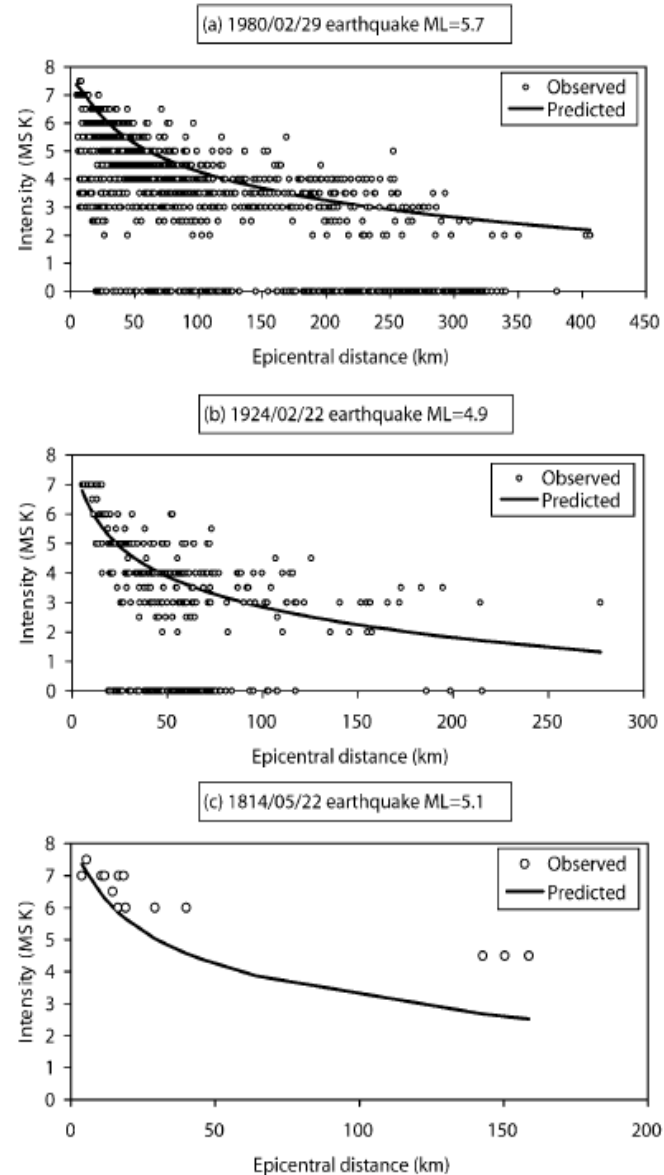
- **Données historiques**
 - Base de données SISFRANCE
- **Enquêtes contemporaines**
 - Réalisées par le BCSF

Séisme du 29 Février 1980, vallée d'Ossau
 I_0 =VII-VIII M_I =5.7 $prof.$ =12km



Carte d'intensités
macrosismiques
et courbes isoséistes
(ligne iso-intensités)
d'après témoignages

Intensités macrosismiques



● Données macrosismiques

■ ère instrumentale (50 ans)

■ ère des enquêtes macrosismiques du BCSF (100 ans)

■ ère pré-enquête ($I > IV$) seuls les effets les plus importants restent écrit (quasiment pas d'information sur les faibles intensité pour ces séismes anciens)

463-1961 : La période historique

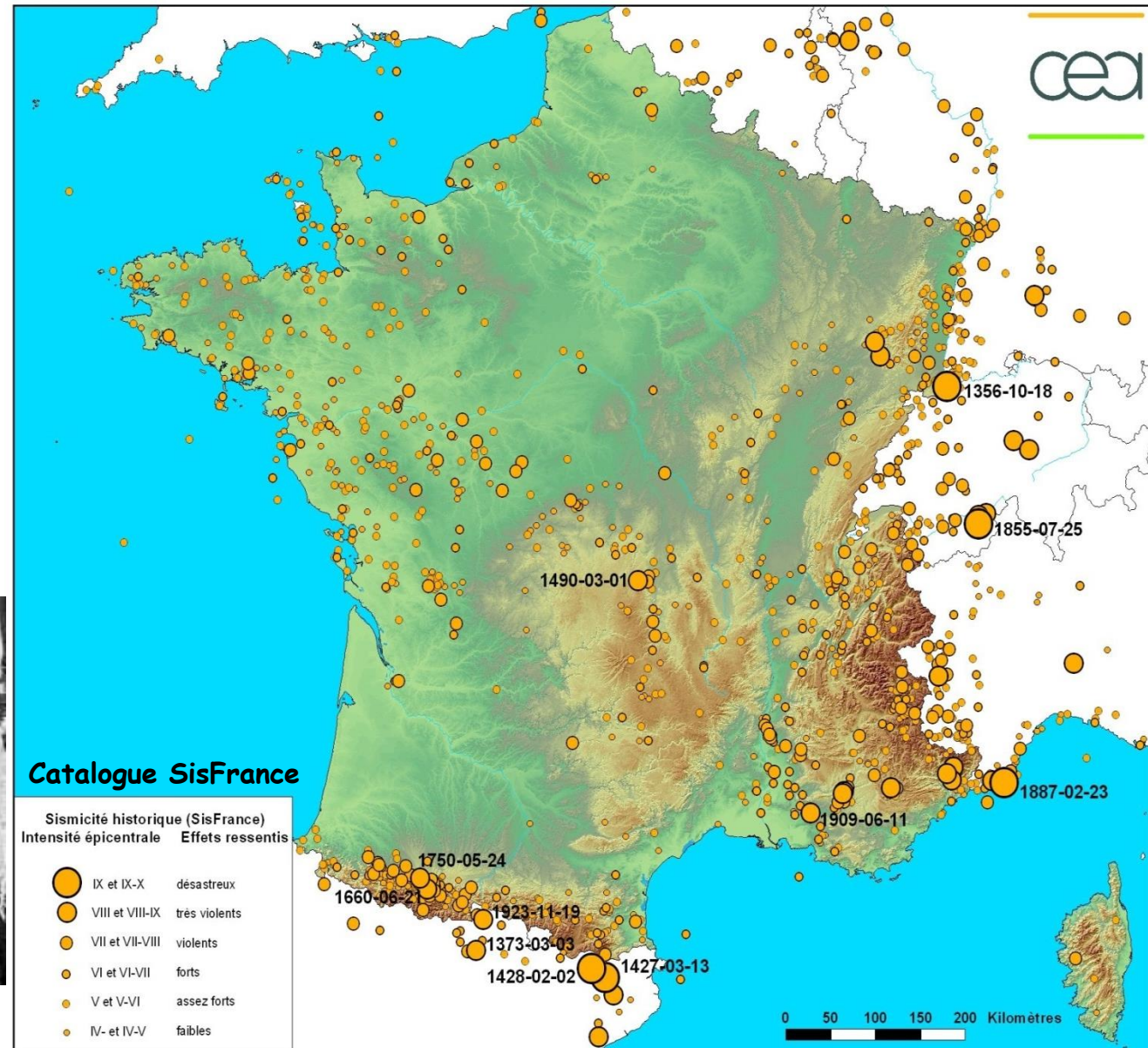
● Témoignages

« En l'an de grâce 1356, le jour de la Saint-Luc, avant vêpres, il y eut à Bâle et dans ses environs jusqu'à une distance de deux milles un tremblement de terre qui provoqua la chute de nombreux bâtiments, églises et châteaux et la mort de nombreuses personnes . . . »

Alphabetum Narrationum de K. von Waltenkofen (en latin).



Le séisme du 11 juin 1909 à Lambesc (Bouches-du-Rhône) causa la mort de 44 personnes



Séismes très anciens

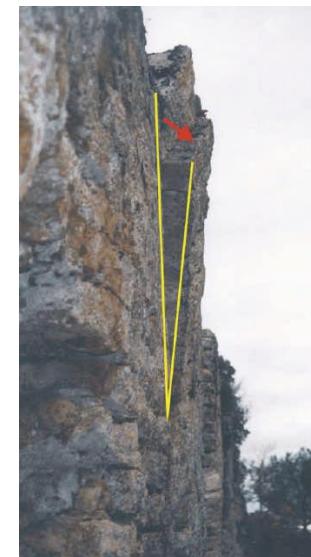
Séisme très anciens

● Archéosismicité

- Les traces laissées dans les vestiges archéologiques ou sur le bâti ancien complètent les données quand les sources écrites font défaut.
- De nombreuses traces d'archéoséismes ont été identifiées dans le bassin méditerranéen (Italie, Grèce, Turquie, Israël, Jordanie, Magrheb et associés à des séismes rapportés dans des supports écrits les premiers datent de 3 000 ans av. J. C. en Mésopotamie).



Claveaux de fenêtre descendus à Saint Martin les Eaux probable suite au séisme de 1708.

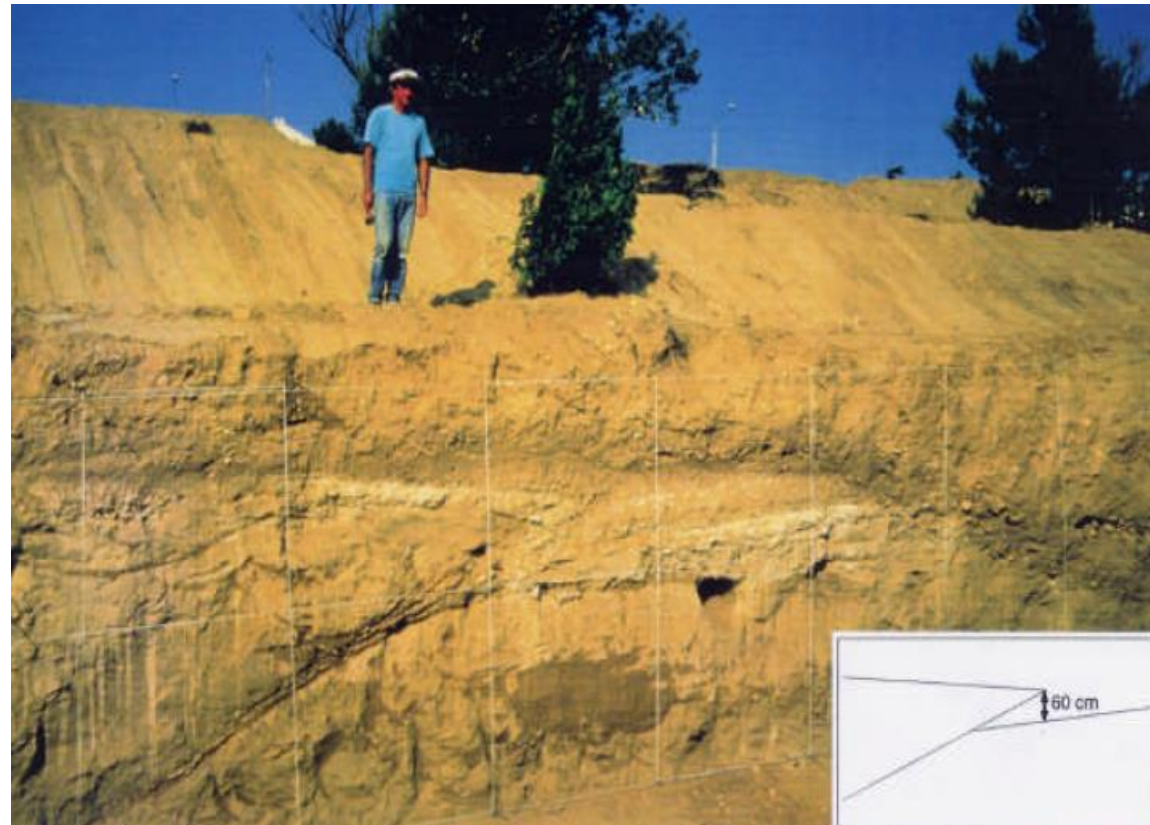


Déplacement d'un mur de l'aqueduc romain de Nîmes (origine sismique possible)

Séisme très anciens

- Paléosismicité

- L'étude des traces de déplacement des failles dans les terrains récents permettent d'améliorer la connaissance des failles actives, la période de retour et le niveau envisageable du séisme maximal plausible.

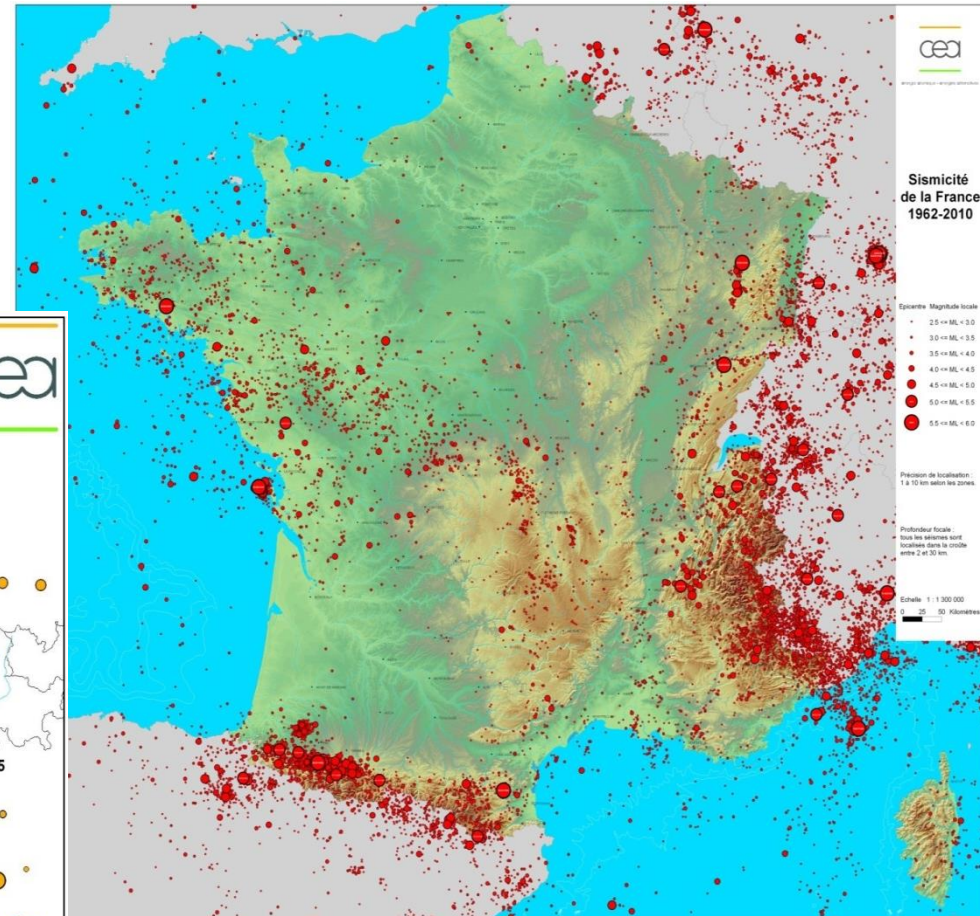
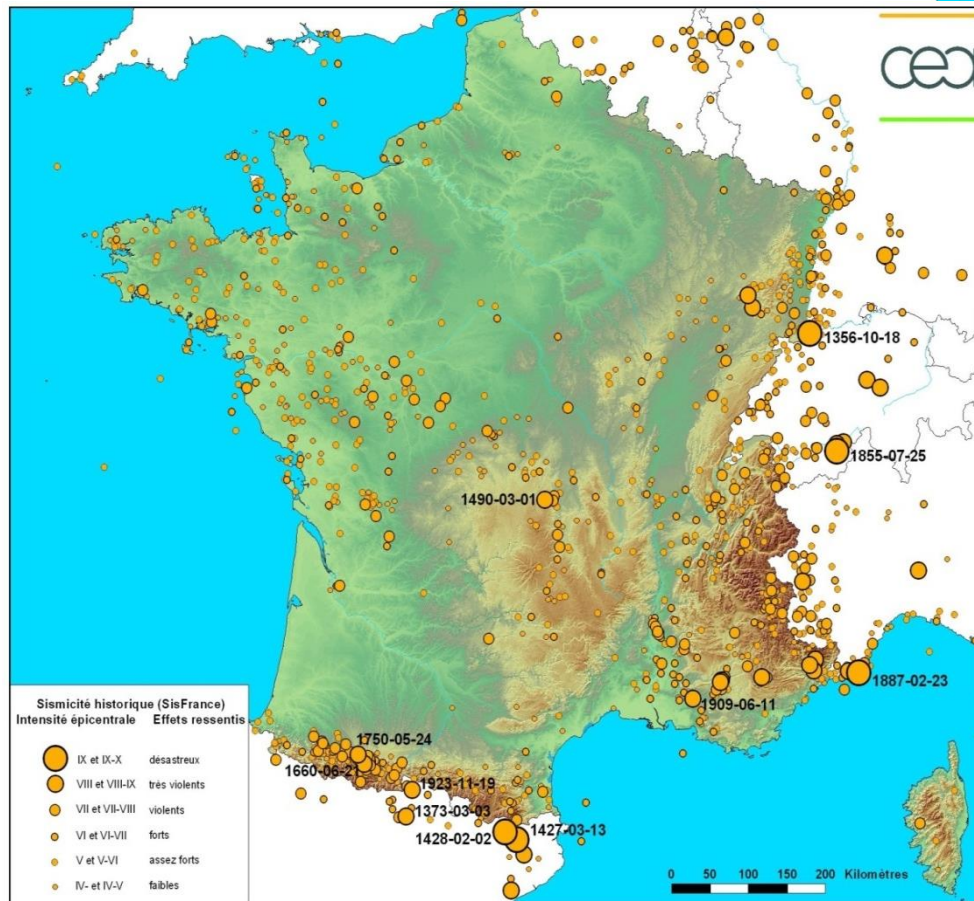


Trace d'un paléoséisme à Courthésion (Vaucluse - faille de Nîmes). La coupe met en évidence une faille décalant des couches déposées il y a moins de 300 000 ans. (Photo de D. Carbon)

Sismicité de la France

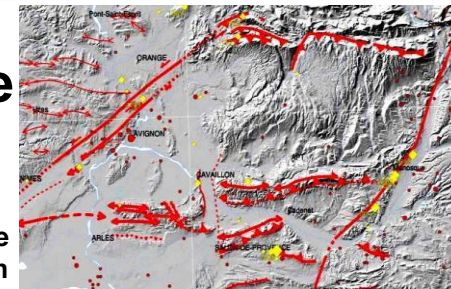
1962-Aujourd'hui

463-1961



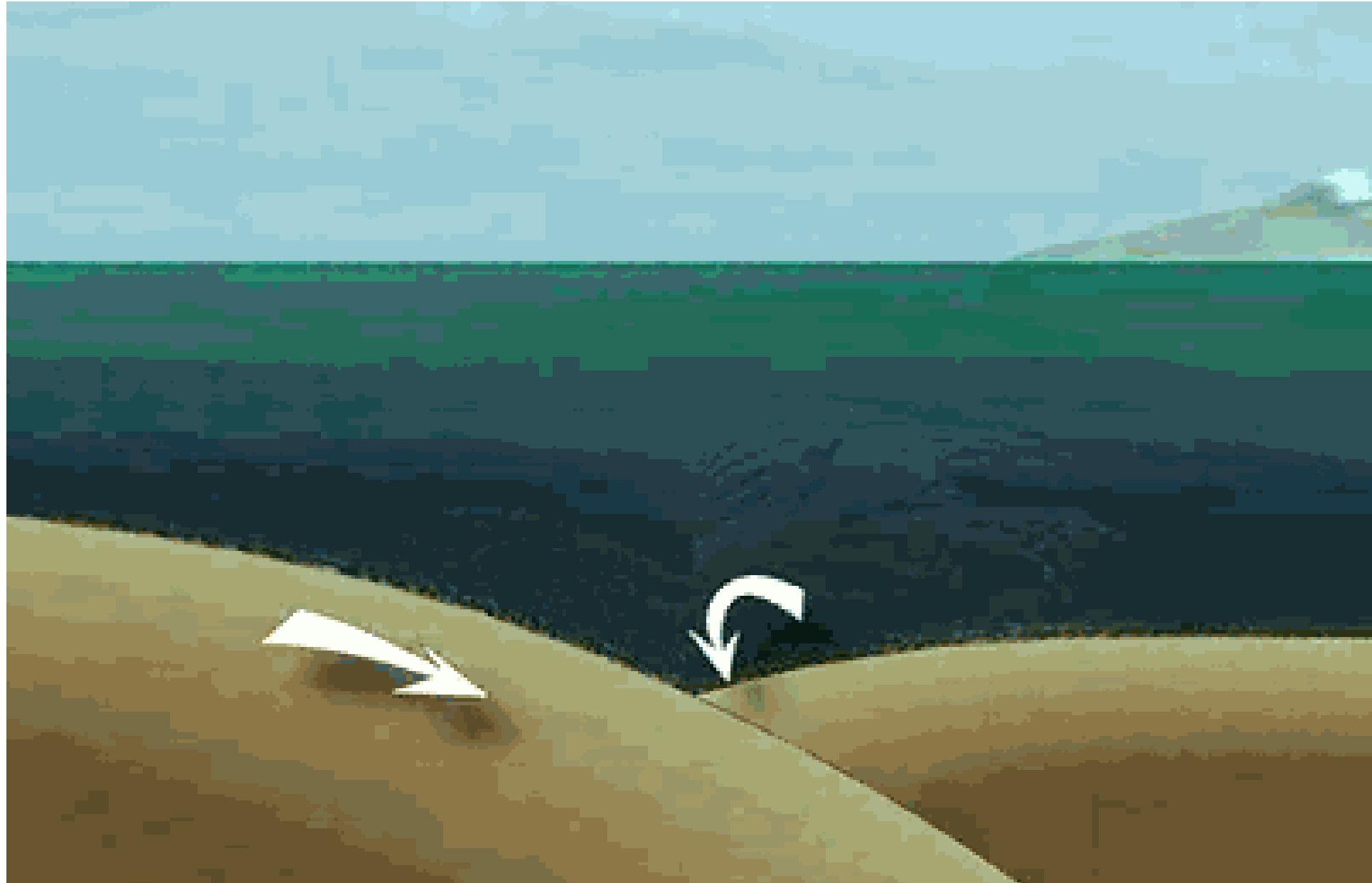
Néotectonique

Carte sismotectonique de la région d'Avignon

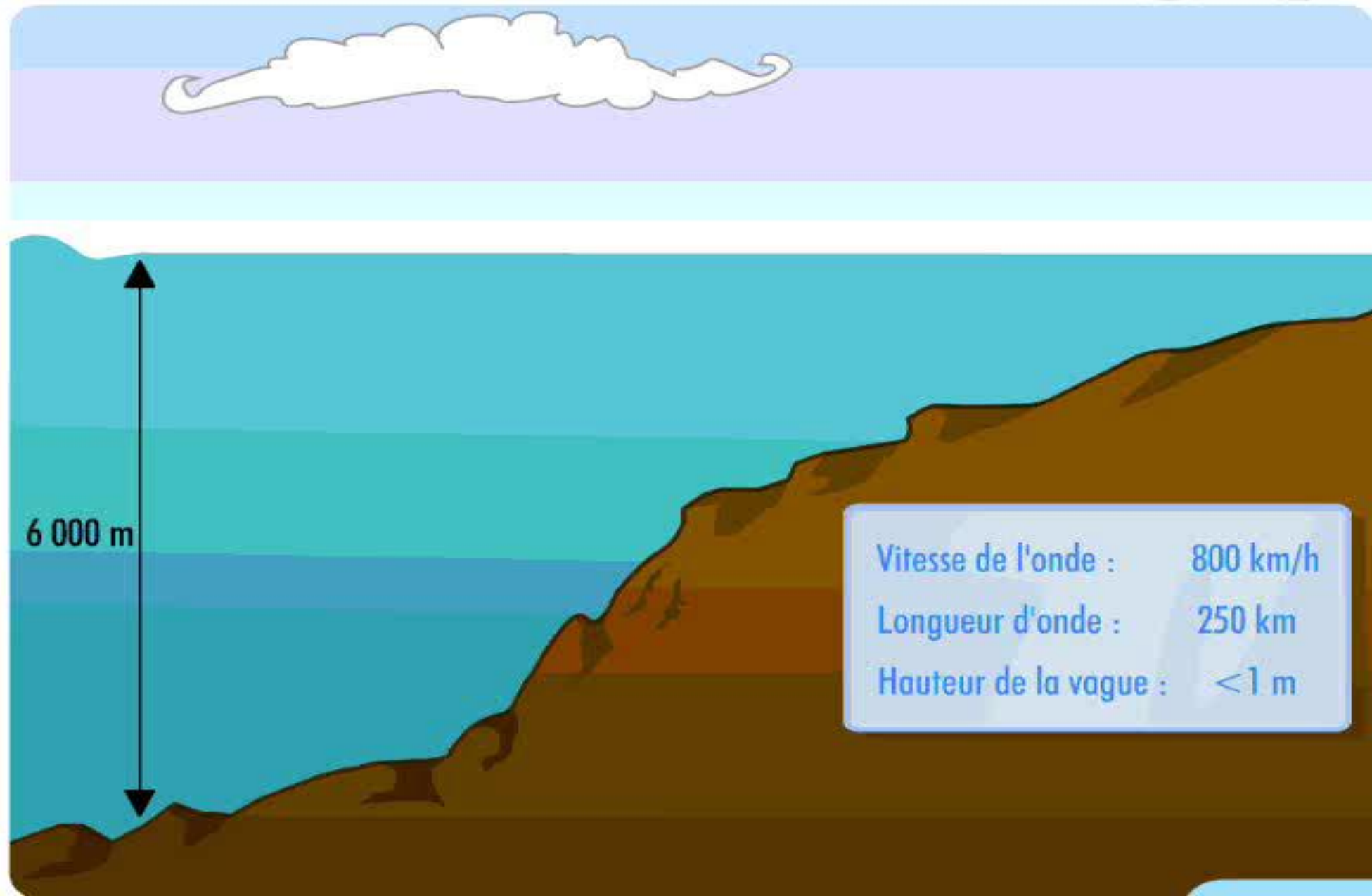


Les tsunamis

Les tsunamis

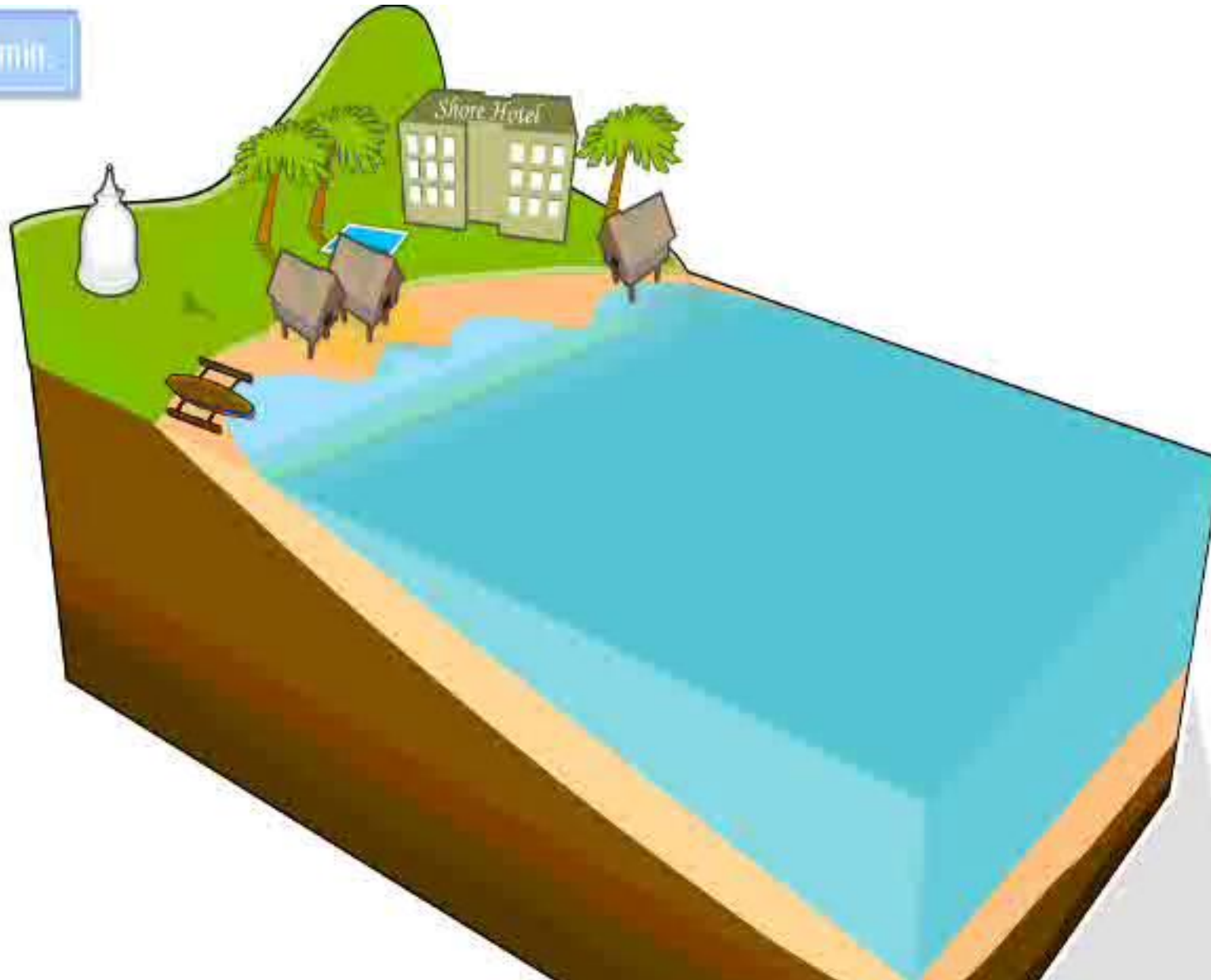


Les tsunamis

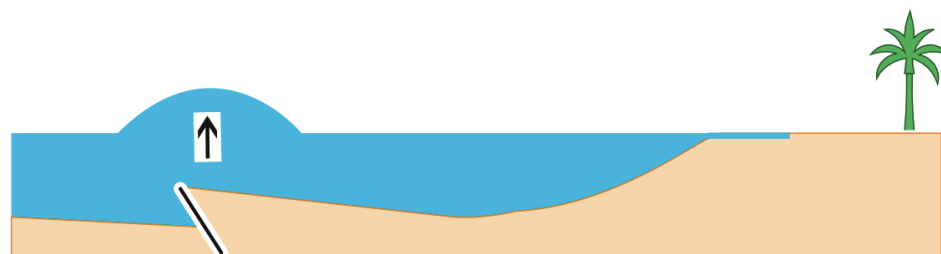


Les tsunamis

00 min.

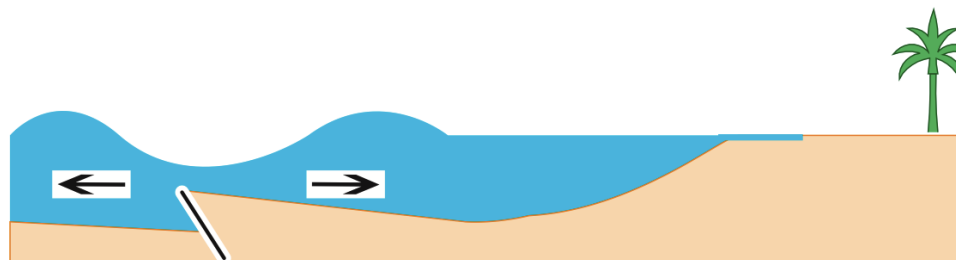


La source tectonique des tsunamis

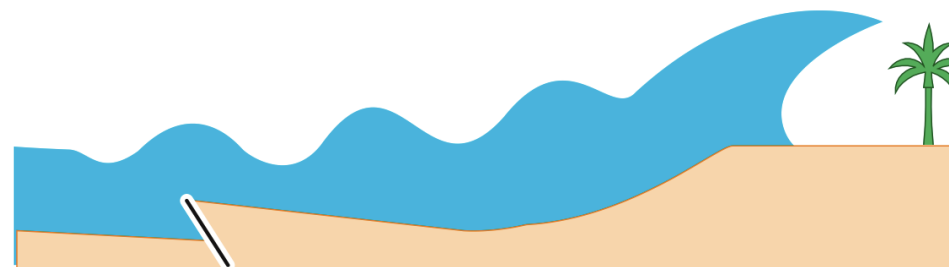


une importante masse d'eau se déplace brusquement à la verticale

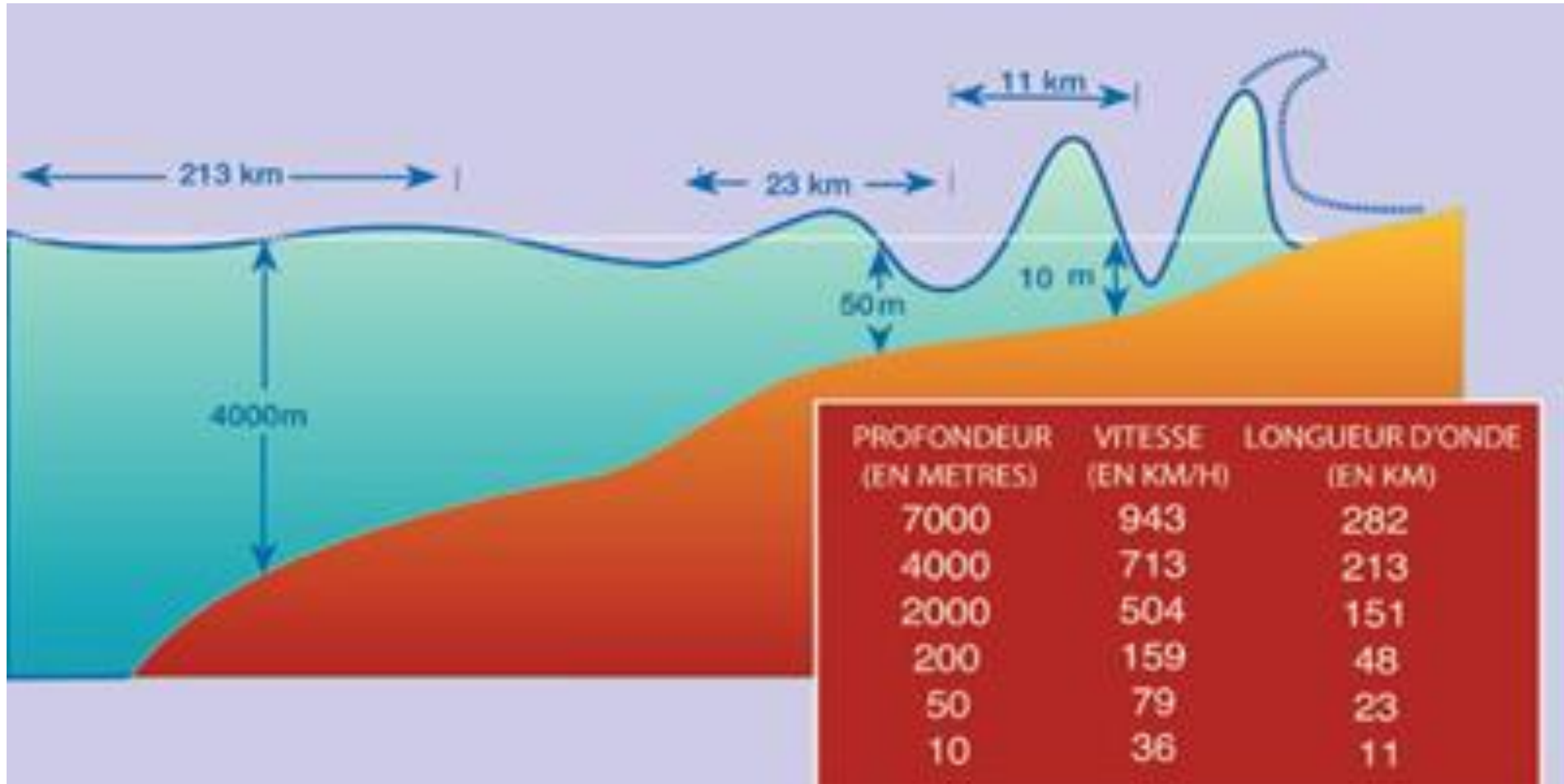
et produit une impulsion qui se propage



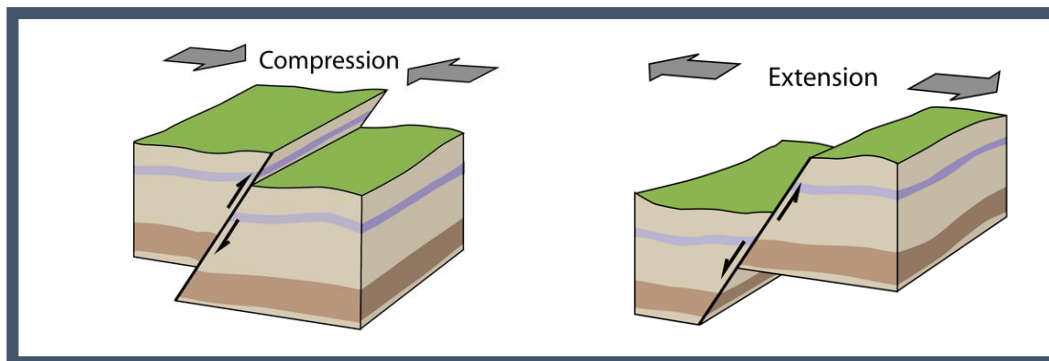
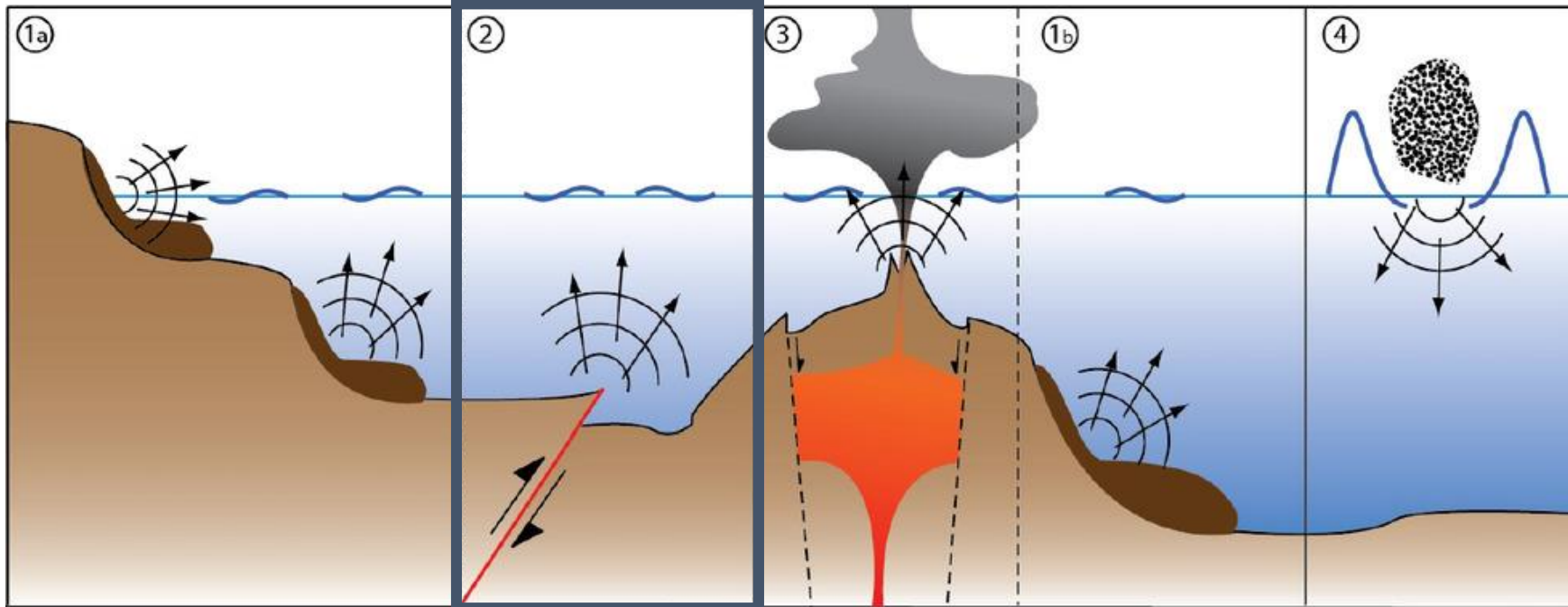
en arrivant à la côte, les vagues tsunamis grossissent et submergent les zones basses



Vitesse de propagation des tsunamis



Différents types de sources Tsunami



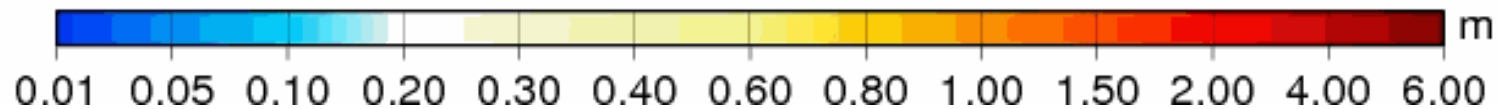
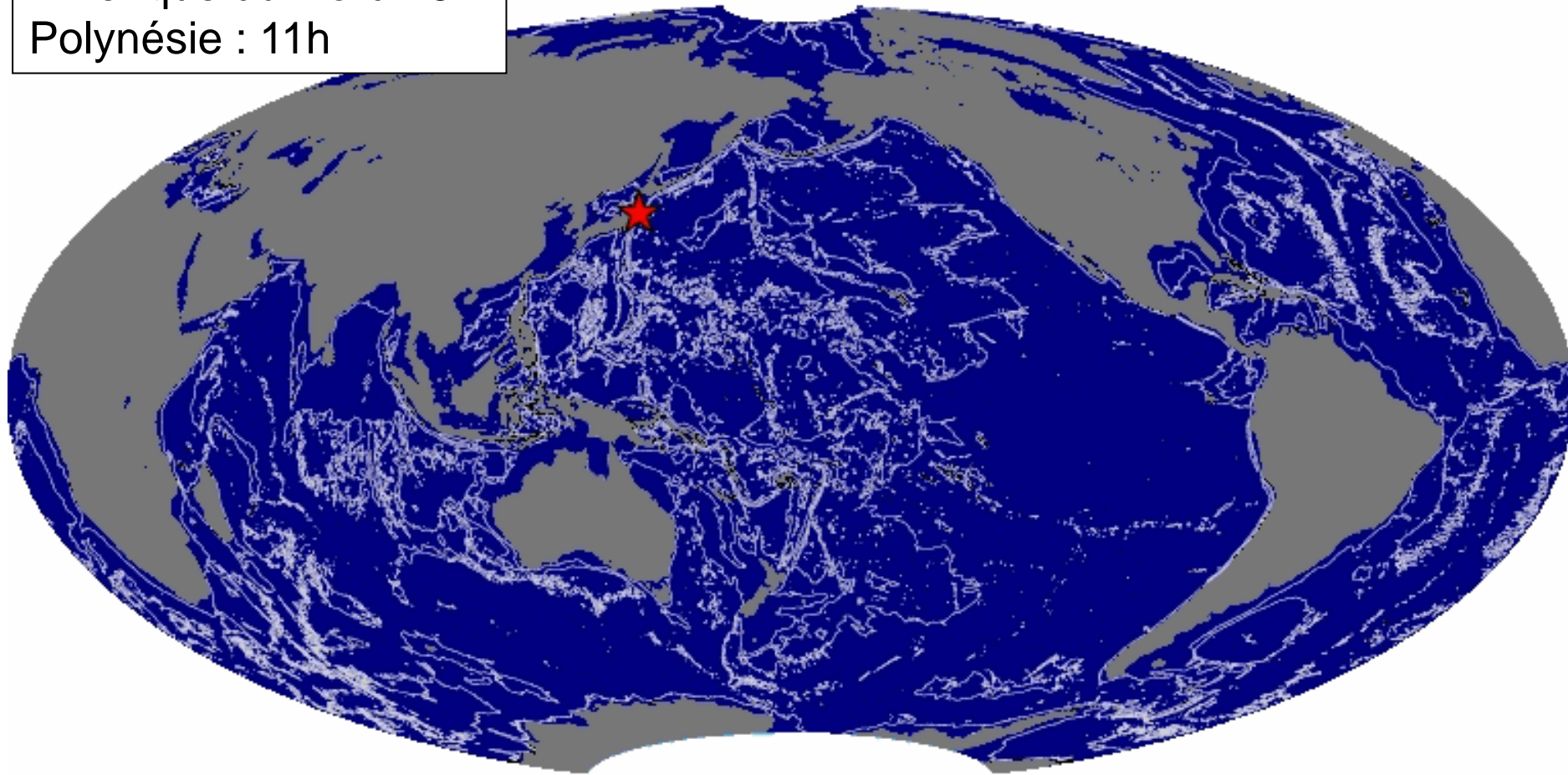
Les failles qui produisent un fort mouvement vertical

Une forte directivité

Délai de propagation :
Amérique du Nord : 8h
Polynésie : 11h

Tohoku-oki 2011

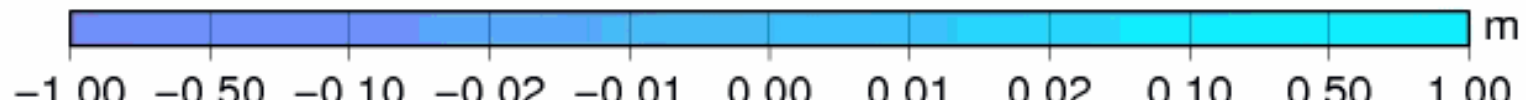
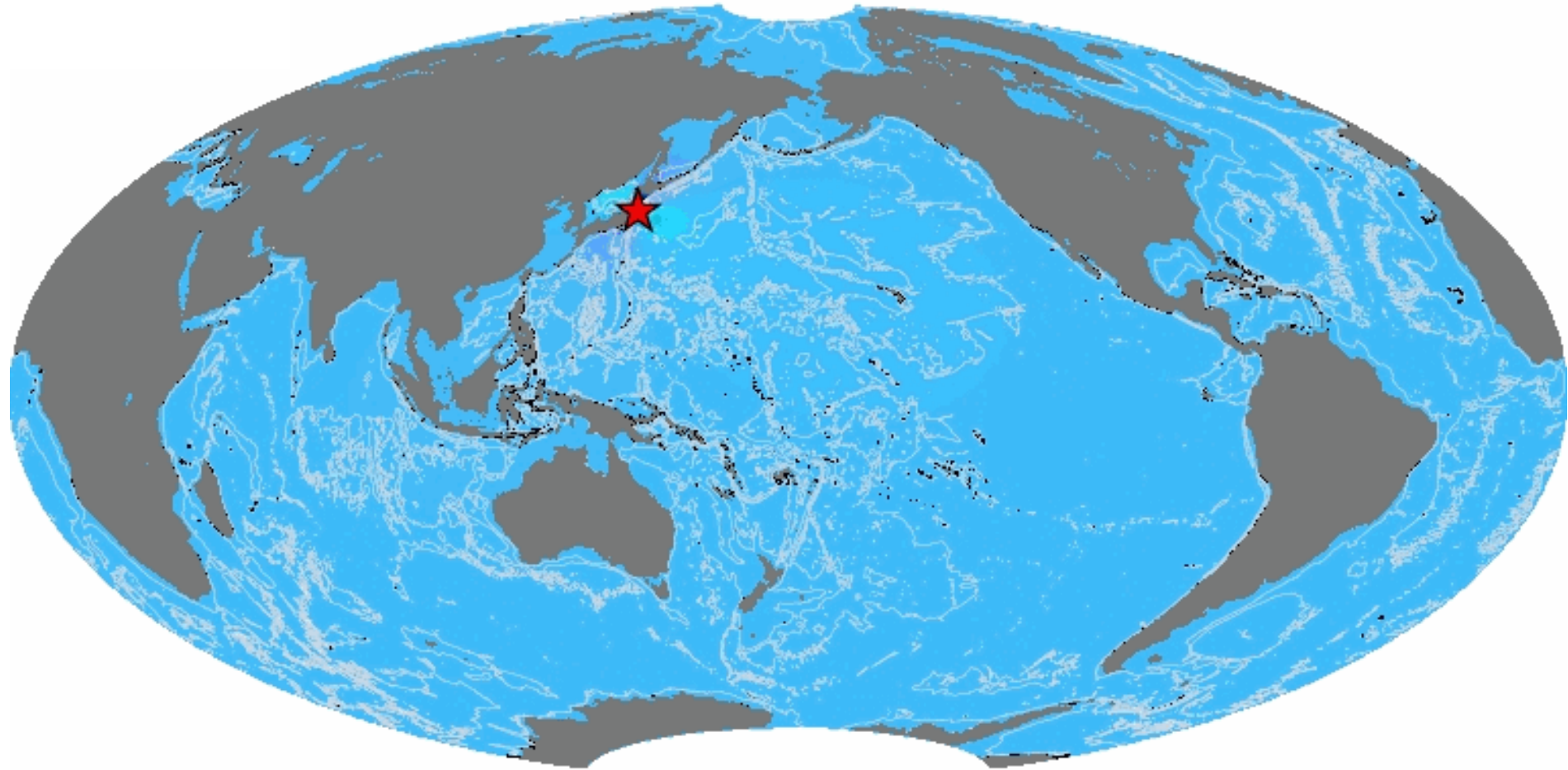
00 h 00 min



Propagation et réflexion des ondes

Tohoku-oki 2011

00 h 00 min

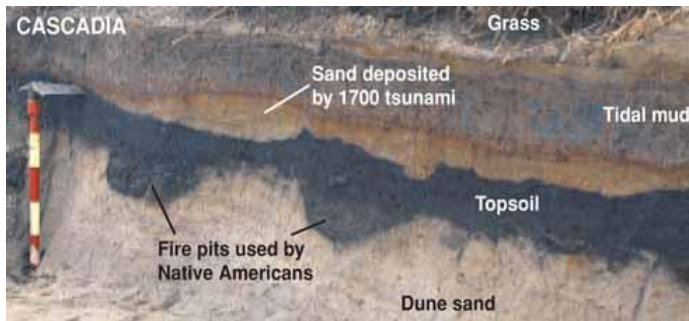


Tsunamis très anciens

- Paléotsunamis

- Grâce à des analyses stratigraphiques, il est parfois possible de déterminer la récurrence des tsunamis et d'estimer localement leur hauteur et leur étendue parfois sur plusieurs millénaires.

Cascades



Chili



Sédiments d'un estuaire au sud du Chili contenant des dépôts du tsunami généré par le séisme de 1960 (Mw9.5) et d'autres dépôts de tsunamis plus anciens. (B. Rhodes)

Origine du mot tsunami

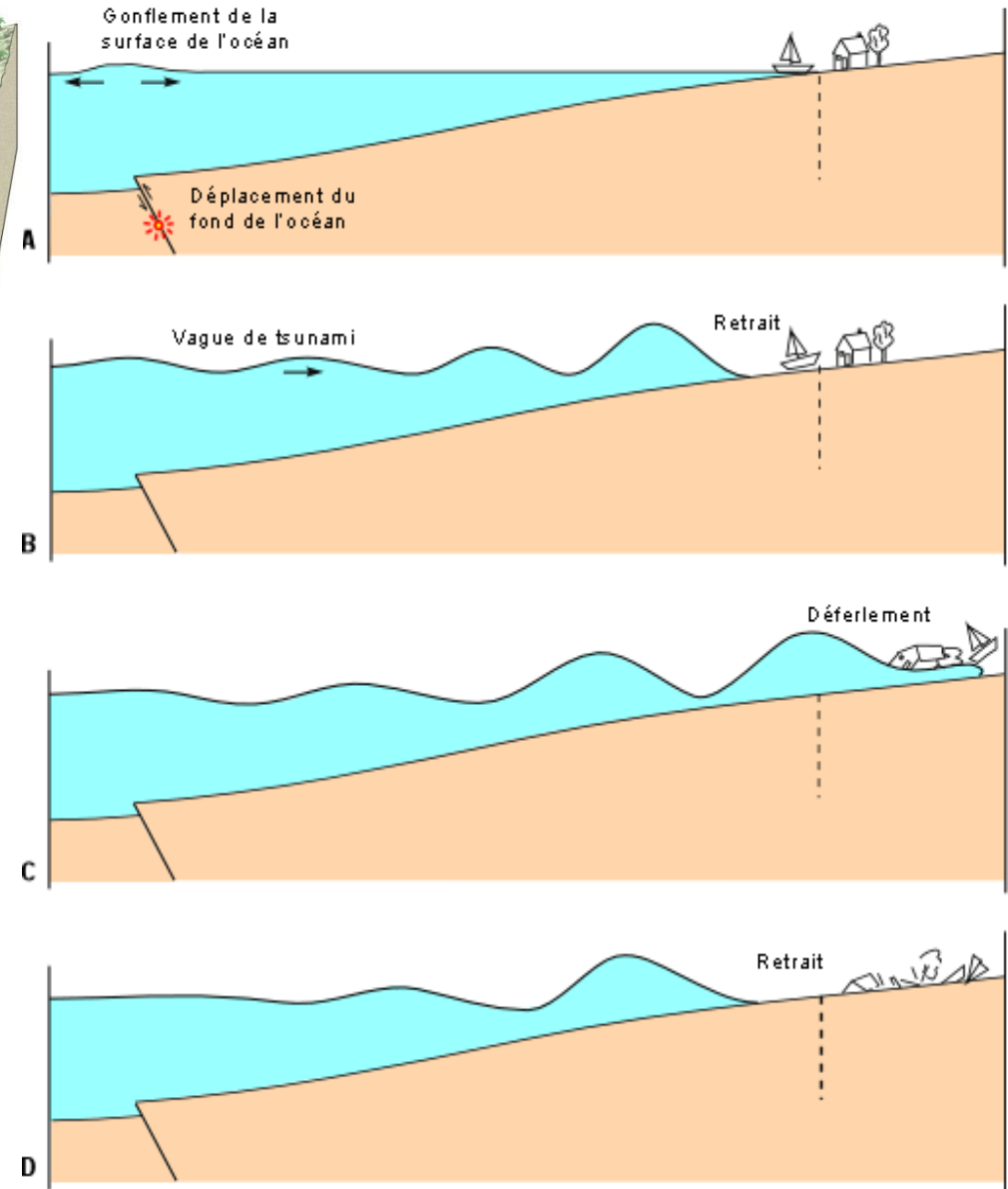
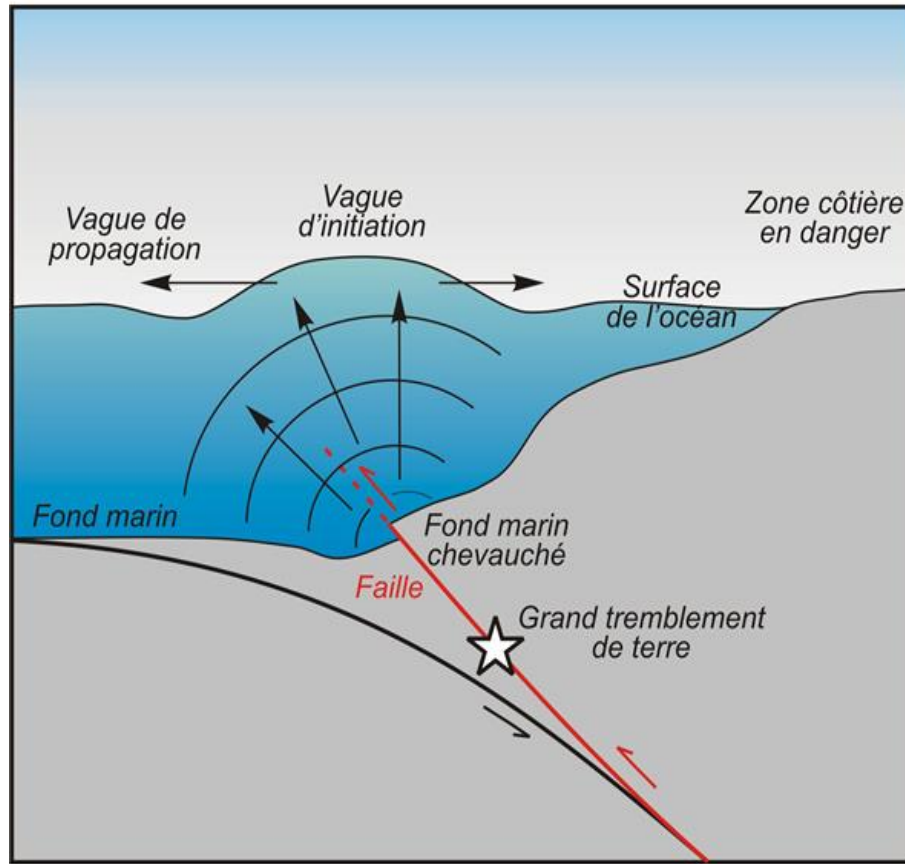
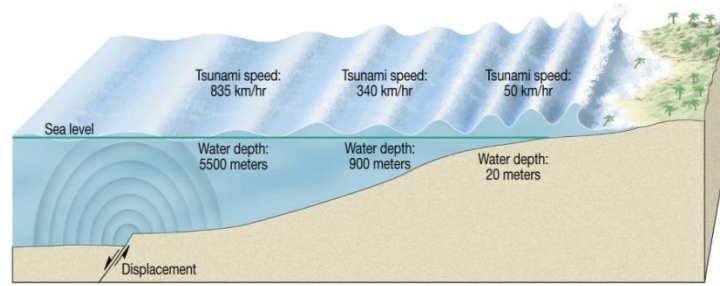
津 : *Tsu* = *port*

波 : *Nami* = *vague*

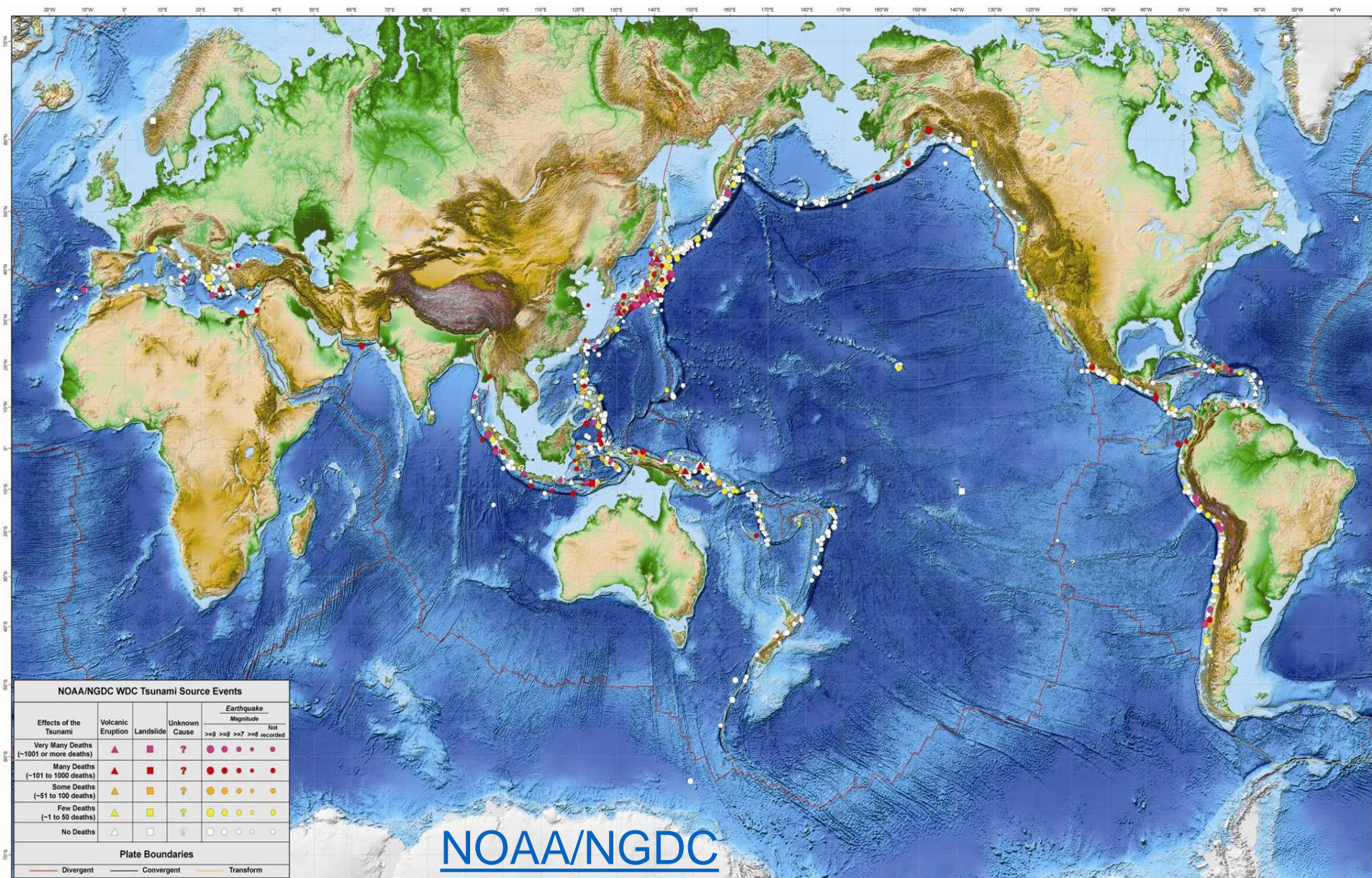


« la grande vague » Gravure sur bois par Hokusai faisant référence au Tsunami d'Iwo en 1703 : 100 000 morts. Petite précision cependant : la grande vague, dont il est question, est souvent référencée comme tsunami (津波), alors qu'il faudrait la qualifier d'okinami (沖波), une grande vague du large.

Tsunamis d'origine sismique



Sources tsunami à l'échelle du globe depuis -1650



Tsunamis parmi les plus meurtriers

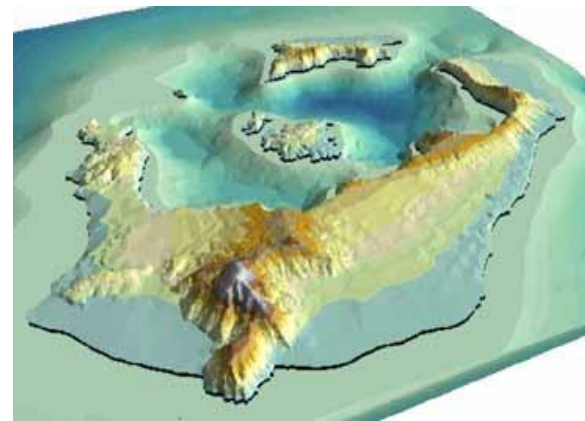
- -1650 *l'éruption du Santorin provoque un tsunami qui anéanti la civilisation minoenne*
- 365/7/21 Crète Grèce 6 000 morts ou disparus
- 1498/9/20 Enshunada Japon 30 000
- 1586/1/18 Ise Japon 8 000
- 1605/2/3 Nankaido Japon 5 000
- 1611/12/2 Sanriku Japon 5 000
- 1687/10/20 Sud Pérou Pérou 5 000 (bilan avec séisme)
- **1693/1/11 Catane Italie 60 000 (bilan avec séisme)**
- 1703/12/30 Boso Peninsula Japon 5 233 (bilan avec séisme)
- 1707/10/28 Nankaido Japon 30 000
- **1755/11/1 Lisbonne Portugal 60 000 (bilan avec séisme)**
- 1771/4/24 Ryukyu Japon 13 486
- **1783/2/5 Calabre Italie 30 000 (bilan avec séisme)**
- 1883/8/27 Krakatoa Indonésie (volcan) 36 000
- 1896/6/15 Sanriku Japon 27 122 (bilan avec séisme)
- **1908/12/28 Messine Italie 95 000 (bilan avec séisme)**
- 1941/6/26 Mer d'Andaman Inde 5 000
- 2004/12/26 Banda Aceh Indonésie 230 000 (bilan avec séisme)
- 2011/3/10 Tohoku Japon 23 500 morts et disparus

Tsunamis meurtriers à plus de 1000 km de la source

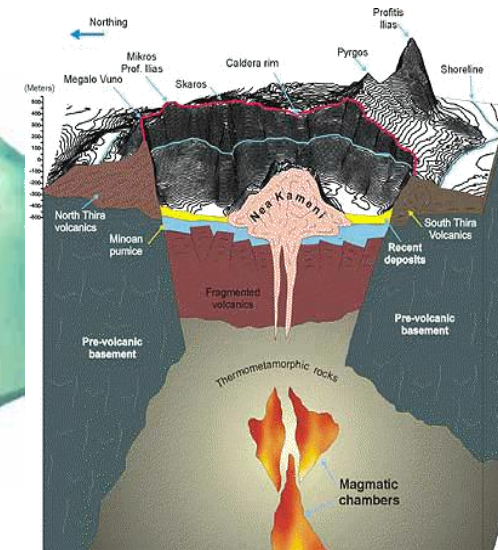
- **1877/5/10 Nord Chili**
 - Des centaines de victimes localement
 - Des milliers de victimes au Japon, Fiji, Perou, USA (Hawaii)
- **1946/4/1 Unimak Island, Alaska, USA**
 - 5 victimes en Alaska
 - 160 victimes à Hawaii et en Californie
- **1960/5/22 Centre Chili**
 - ~ 1 000 victimes au Chili
 - 283 victimes au Japan, Philippines, USA (California, Hawaii)
- **1964/3/28 Prince William Sound, Alaska, USA**
 - 106 victimes en Alaska
 - 18 victime en California et Oregon
- **2004/12/26 Banda Aceh, Indonésie**
 - 175 827 victimes en Indonésie (en partie à cause du séisme)
 - 52 071 victimes au Bangladesh, Inde, Kenya, Maldives, Myanmar, Seychelles, Somalie, Afrique du Sud, Sri Lanka, Tanzania, Yemen

Eruption du Santorin

- **Vers -1650 le volcan Santorin entre en éruption.**
 - Durant deux jours, cendres et particules s'expulsent avec fracas.
 - Les poussières obscurcissent totalement le ciel de la Crète.
 - Le climat s'en trouve perturbé pendant une dizaine d'années.
 - Le volcan s'effondre sur lui-même pour former une caldeira, entraînant un tsunami qui ravage les côtes méditerranéennes.
 - Les estimations sur la hauteur des vagues restent très approximatives, de 40 à 200 mètres selon les sources.



Le Santorin aujourd'hui



Tsunamis associés à l'éruption du Krakatoa

- L'éruption du Krakatoa survenue en 1883 est une éruption volcanique cataclysmique.
- Elle remodela la forme du volcan.
- Elle provoqua :
 - des bruits effroyables
 - des nuages noctulescents
 - des tsunamis (36 000 morts).

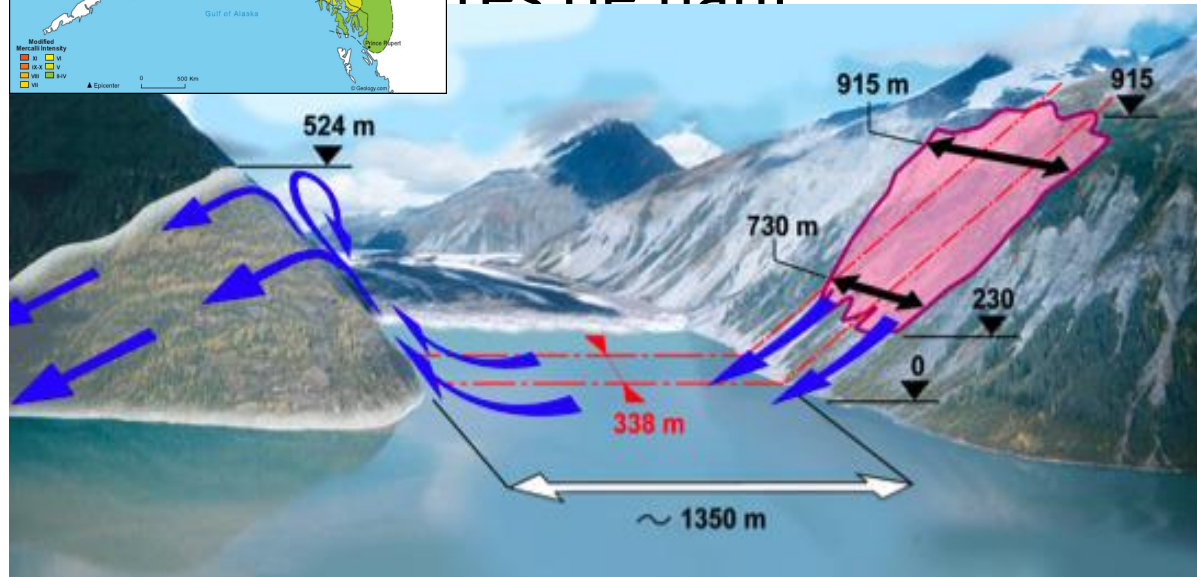
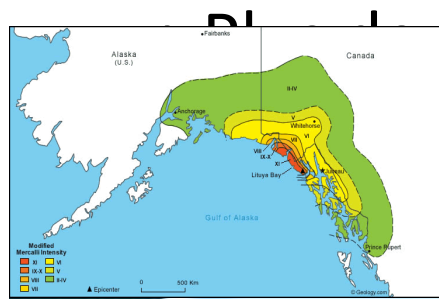


Lithographie (éruption du Krakatoa en 1883)



Le Méga tsunami du 9 juillet 1958

- Un séisme ($M_w 7,7$) à 20 km de Lituya Bay provoque un glissement de terrain de plus de 30 millions de m^3 depuis 900 m de haut. Ceci a déclenché le plus gros tsunami connu sur terre.



Plus de 520 mètres de haut.

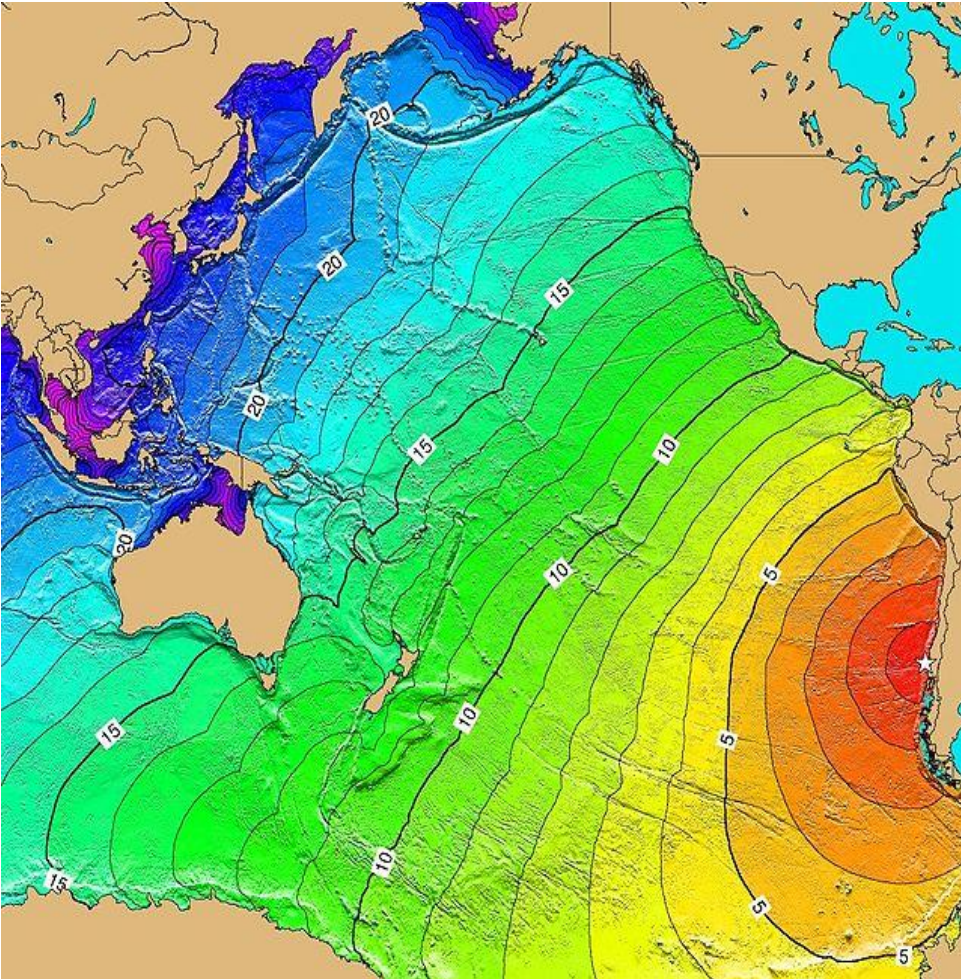
Les vagues secondaires ont dépassé 900 mètres de haut.

distanc

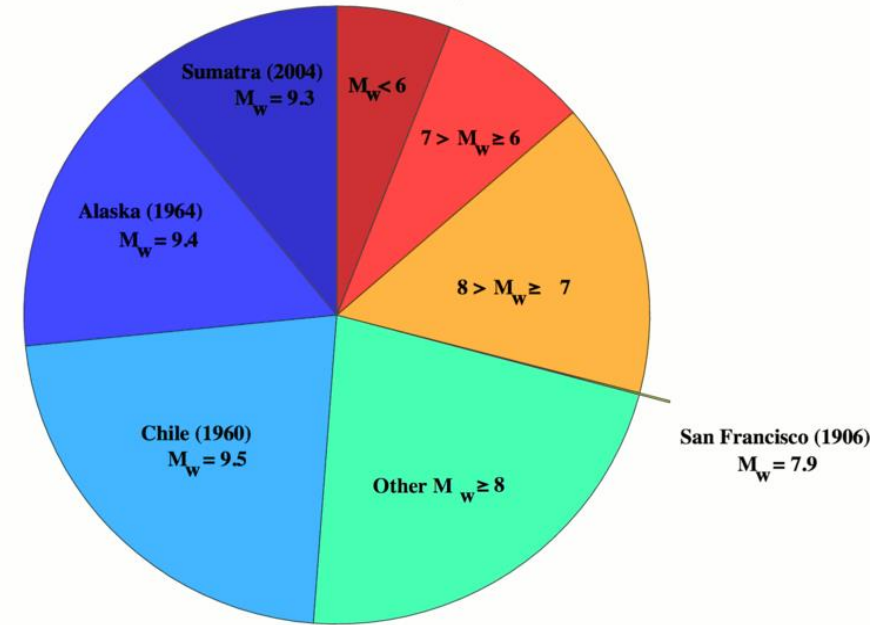
Séisme chilien du 22 mai 1960

Tsunami transpacifique

- Le plus gros séisme instrumental connu ($M_w 9,5$)



Global Seismic Moment Release January 1906 - December 2005

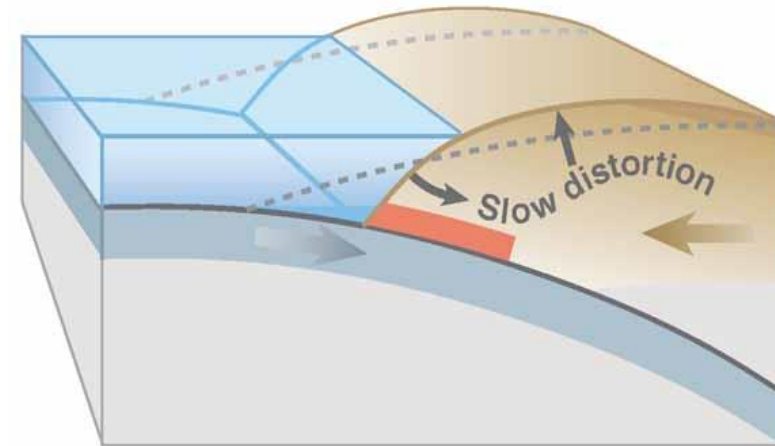


Total Moment: 1.0×10^{24} Newton-meters

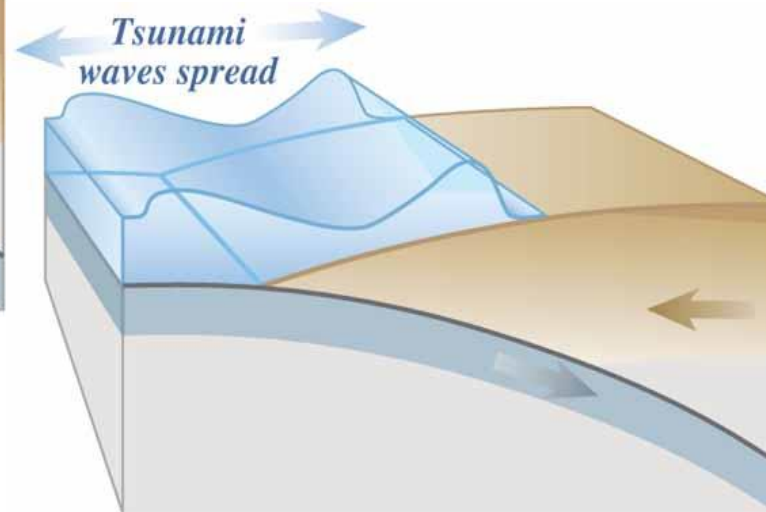
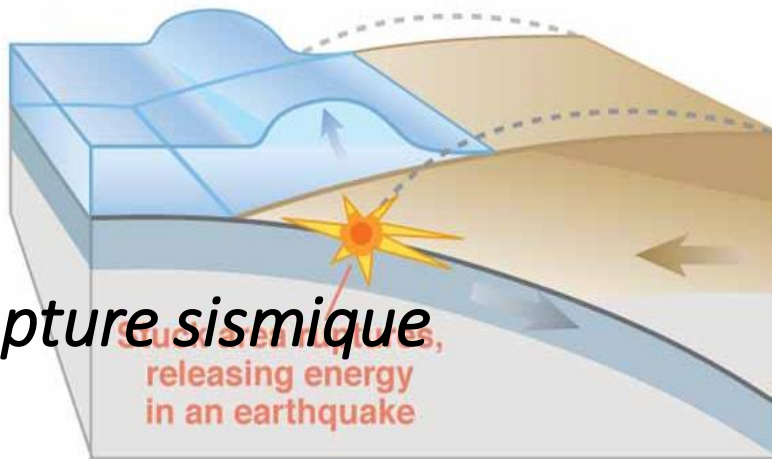
Séisme chilien (22 mai 1960)

Tsunami

- **Chargement intersismique**



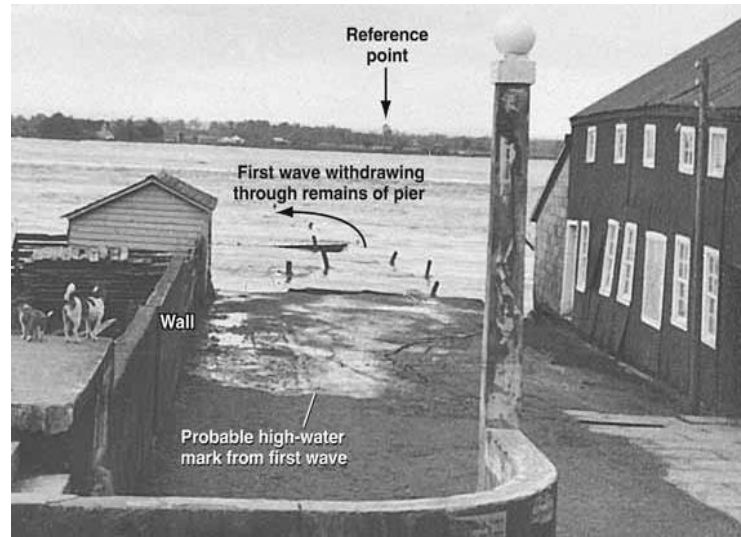
- **Rupture sismique**



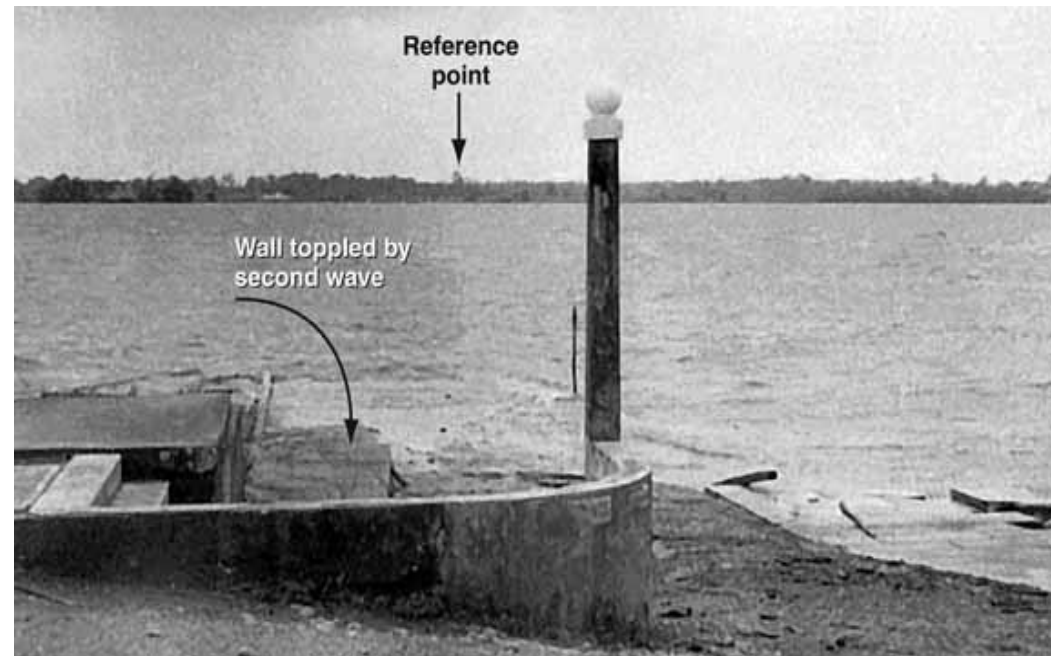
Plantation de pins transformée en près salés

Séisme chilien du 22 mai 1960 et tsunami

- Tsunami local (*Photos à Maullín*)
 - Juste après la première vague



- Après la seconde vague
 - plus d'entrepôt

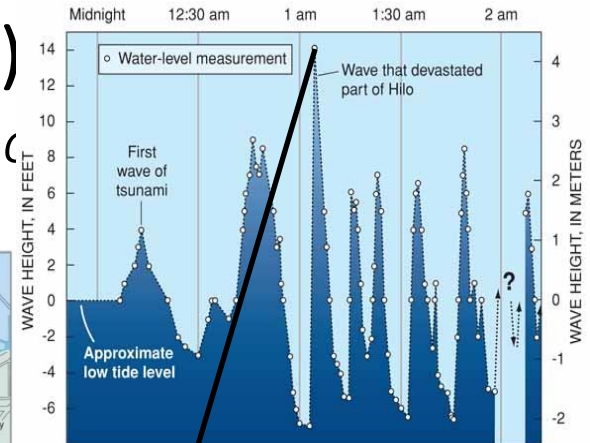
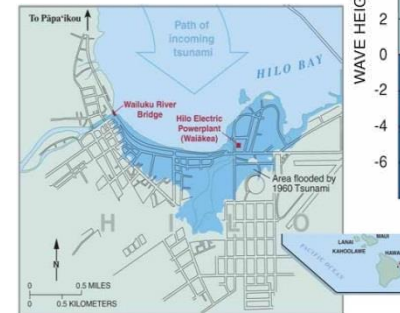


Séisme chilien (22 mai 1960) – Tsunami transpacifique

- Le plus gros séisme instrumental connu (Mw9,5)
- en 15 h (61 m)



en 15 h (61 m)



TSUNAMI OF MAY 23, 1960, ON THE ISLAND OF HAWAII

Vague tardive de 4 m à 1h04min

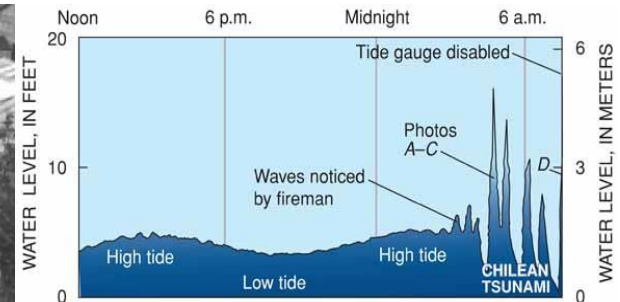


Séisme chilien (22 mai 1960) – Tsunami transpacifique

- Le plus gros séisme instrumental connu (Mw9,5)

- *Le tsunami atteint le Japon (17 000 km) en 22 h*

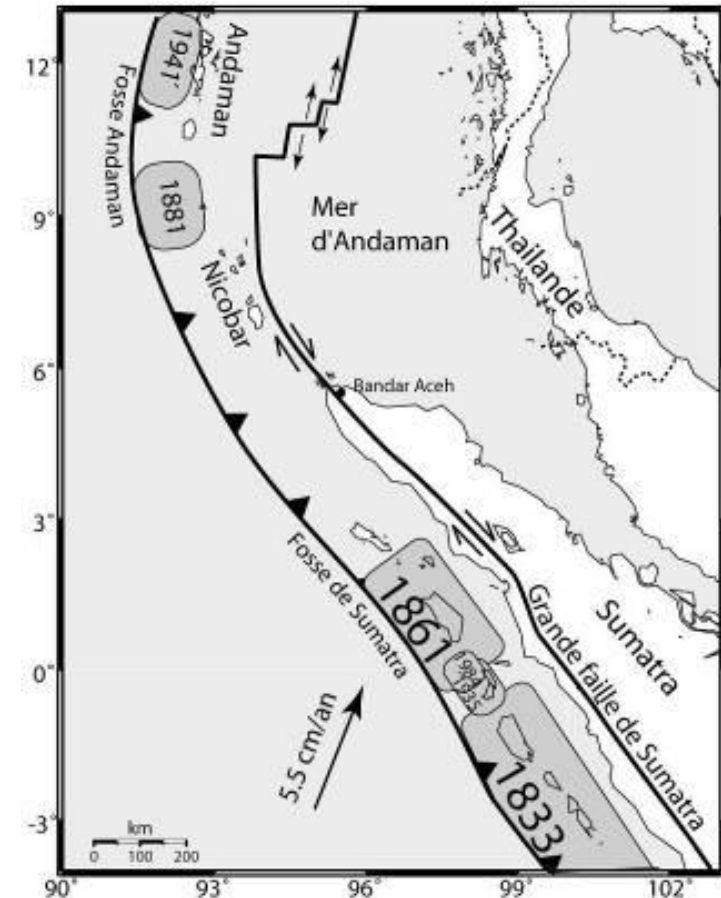
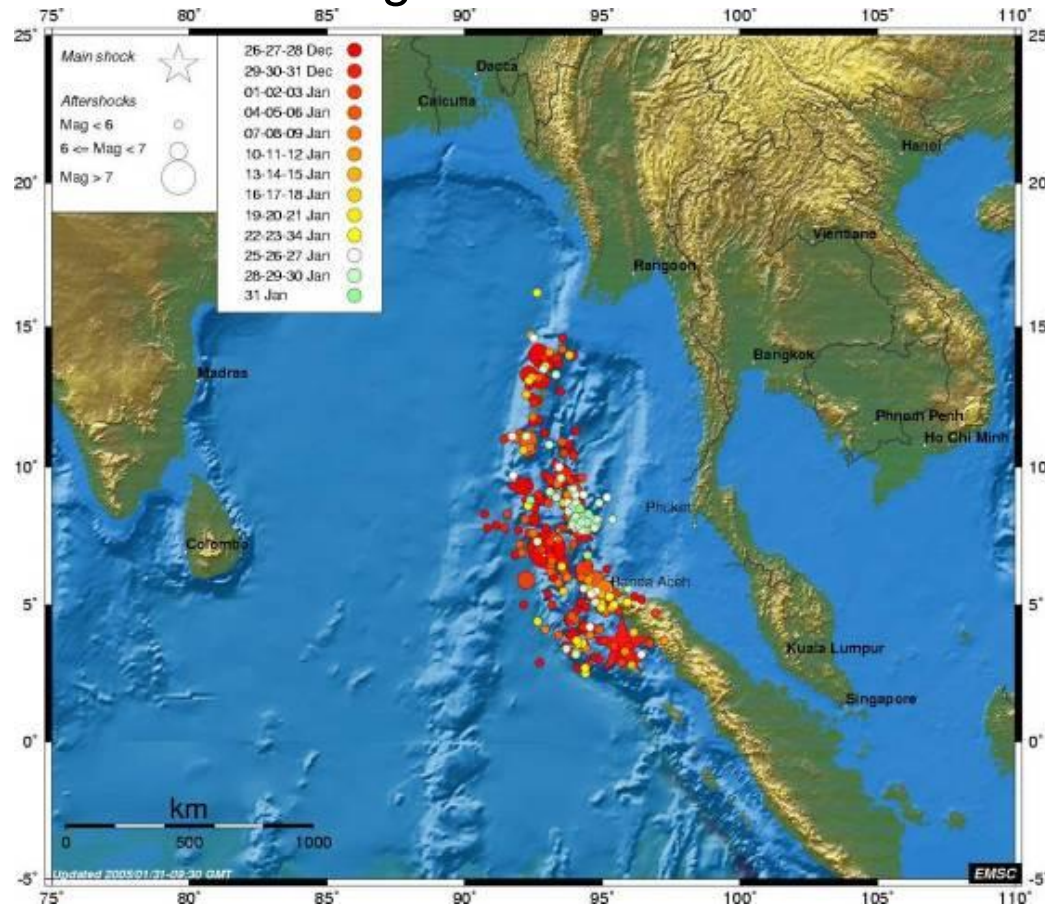
- *3 m, 122 morts, 5000 maisons détruites*



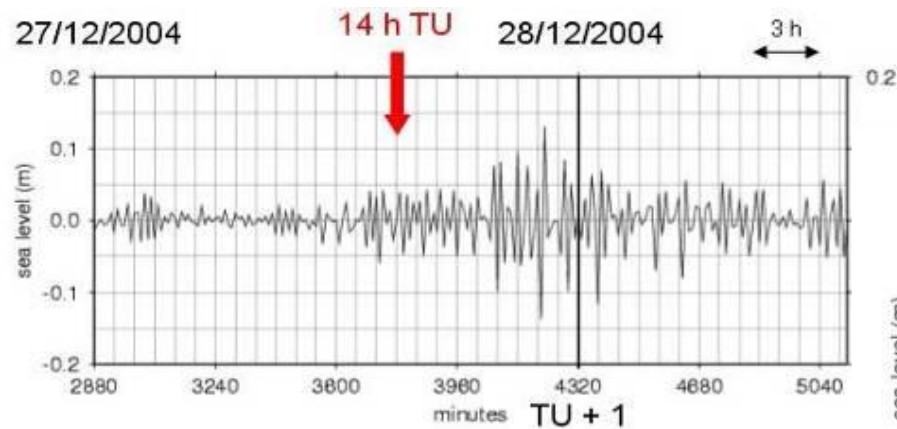
Onagawa,
Japon, 1960

Sumatra, 26 décembre 2004

- Séisme de subduction majeur ($M_w \sim 9.2$) → tsunami majeur
 - pas "attendu" dans l'Océan Indien
 - touche des zones très peuplées (dont touristes...)
 - enregistrements "modernes" innombrables

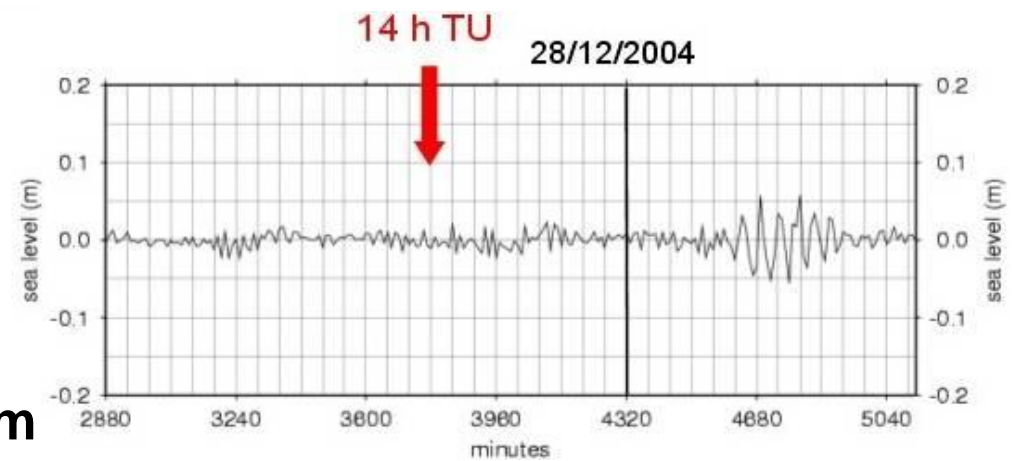


SUMATRA, 26 DÉCEMBRE 2004

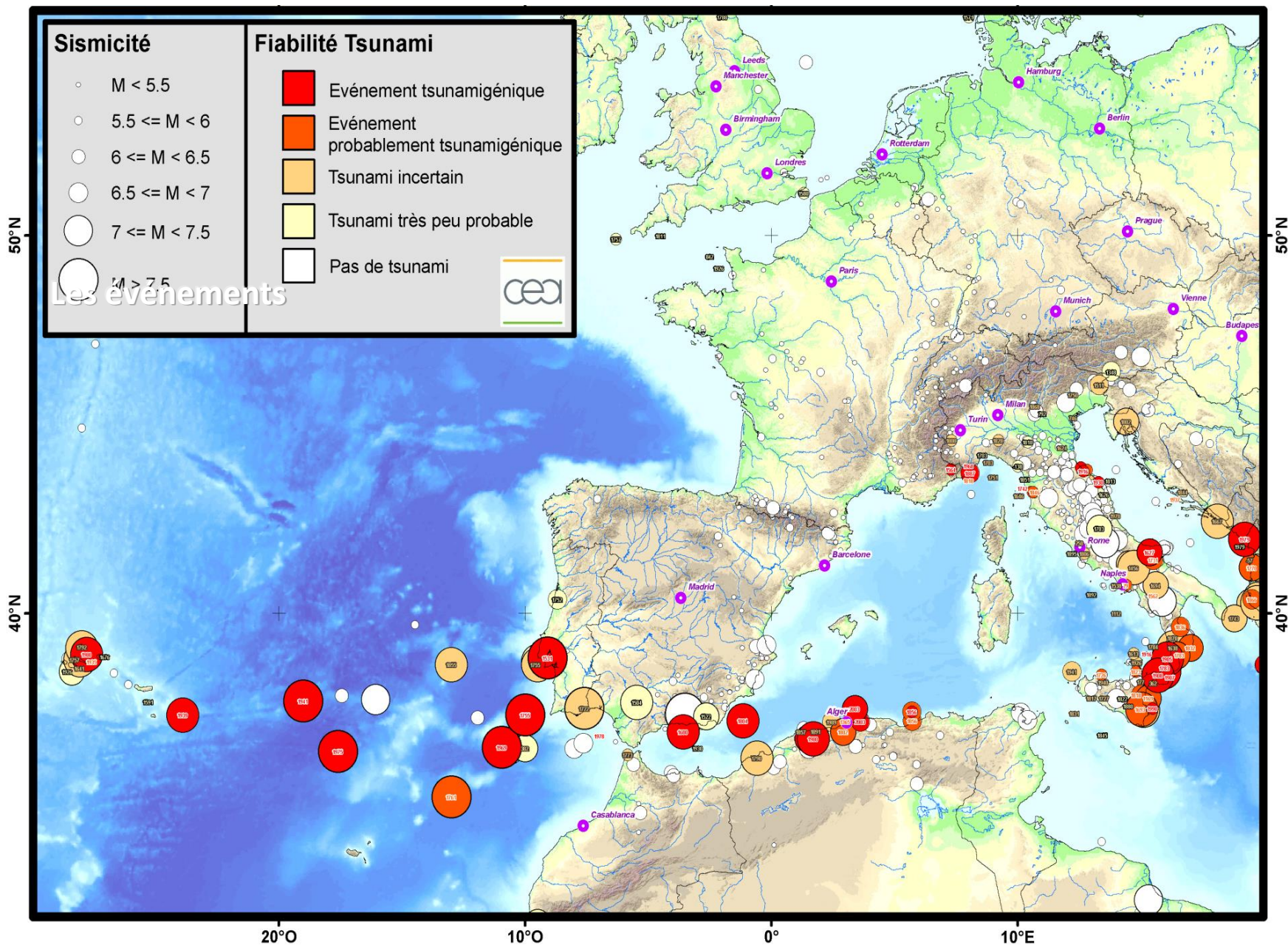


Concarneau ~ 20 cm

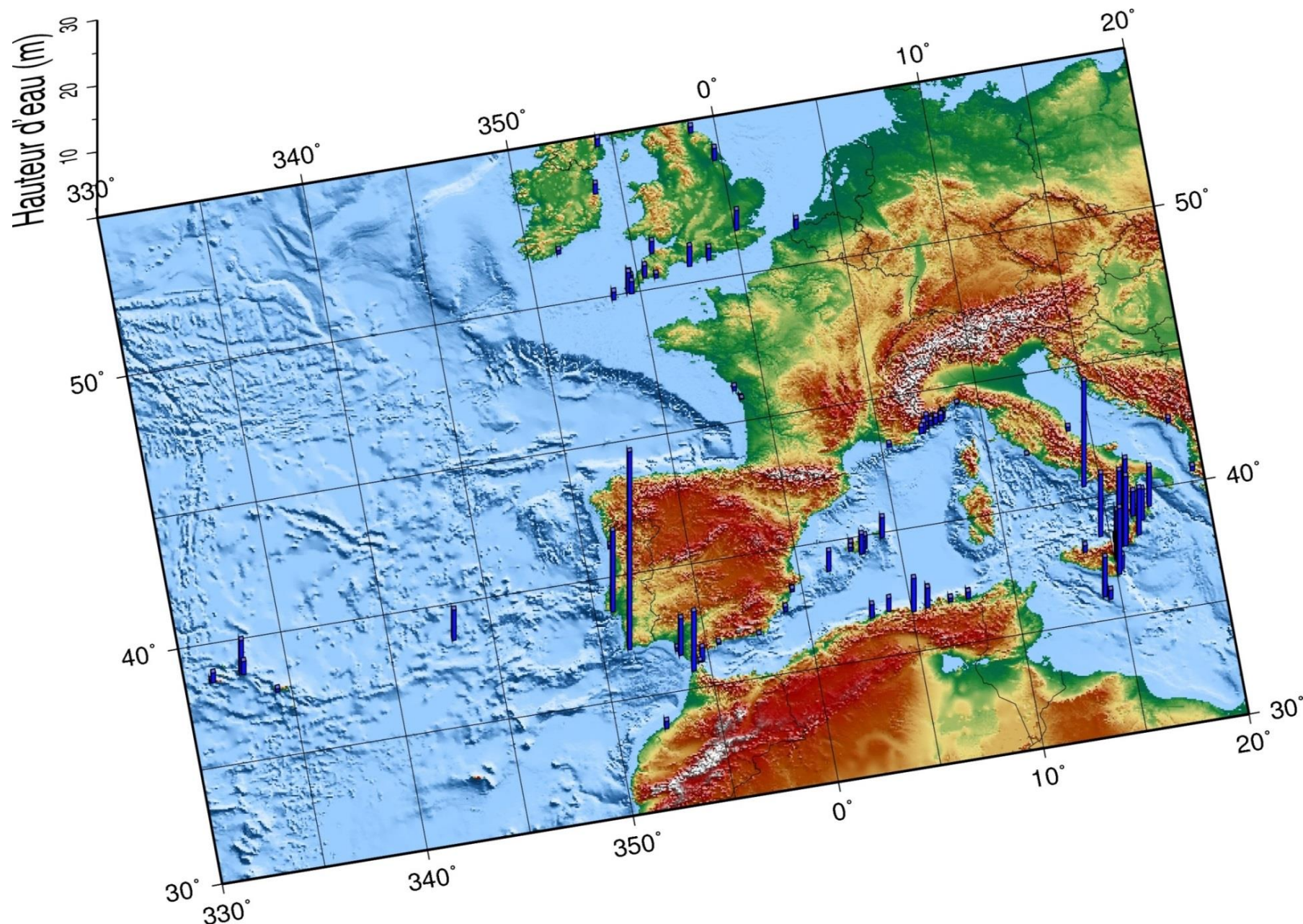
Le Havre ~ 10 cm



Atlantique Nord Est et Méditerranée Occidentale

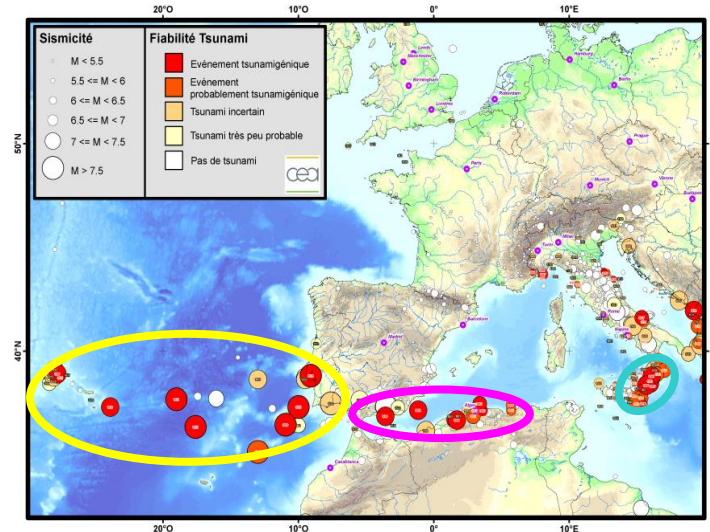


Les hauteurs d'eau



Zoom sur les événements majeurs

- Bilan humain
 - 1755 (Lisbonne) 60 000 victimes
 - 1783 (Calabre) 1 500 victimes (50 000)
 - 1908 (Messine) 220 victimes (110 000)
 - 1979 (Nice) 9 victimes ... 1887
- Les plus gros événements
 - Top 10 en magnitude :



<i>Fiabilité Tsunami</i>	<i>année</i>	<i>m</i>	<i>j</i>	<i>h</i>	<i>min</i>	<i>s</i>	<i>lat</i>	<i>lon</i>	<i>prof</i>	<i>lieu</i>	<i>Mag</i>
4	1908	12	28	4	20	24,0	38,18	15,68	10,0	Italie - Méditerranée - Messine	7,2
4	1980	10	10	12	25	26,0	36,28	1,68	15,0	Méditerranée - El Asnam - Algérie	7,3
3	1693	1	11	13	30		37,17	15,02	15,0	Italie - Méditerranée - Sicile - Catane	7,4
2	1722	12	27	17	30		37,20	-7,60	15,0	Portugal - Atlantique - Cadix - Algarve	7,5
4	1531	1	26	5			38,70	-9,10	15,0	Portugal - Atlantique - Lisbonne	7,7
4	1969	2	28	2	40	32,0	36,02	-10,95	22,0	Atlantique - Gorringe Bank	7,8
4	1975	5	26	9	11	50,0	35,90	-17,60	5,0	Atlantique - Açores - Gloria Fault	7,9
4	1941	11	25	18	3	59,0	37,42	-19,02	25,0	Atlantique - Portugal - Gloria fault	8,2
3	1761	3	31	12	5		34,50	-13,00	15,0	Portugal - Atlantique - Gloria fault	8,5
4	1755	11	1	9	50		37,00	-10,00	15,0	Portugal - Atlantique - Lisbonne	8,5

Séisme et tsunami du 1^{er} novembre 1755



Lisbonne 1755. Eau forte par Pearson

- Le jour de la Toussaint, la capitale du Portugal est presque entièrement détruite par un séisme, un tsunami puis un incendie.

- Retrait de la mer de 2 km
- 18 vagues successives
- Hauteur de **5/15 m**
- 90 000 morts

- Événement qui bouleversa l'histoire de l'Europe

Cette gravure du XVIII^{ème} siècle montre le tsunami qui ravagea Lisbonne le 1^{er} novembre 1755, consécutif au séisme survenu le même jour, d'une magnitude estimée à 8,5.

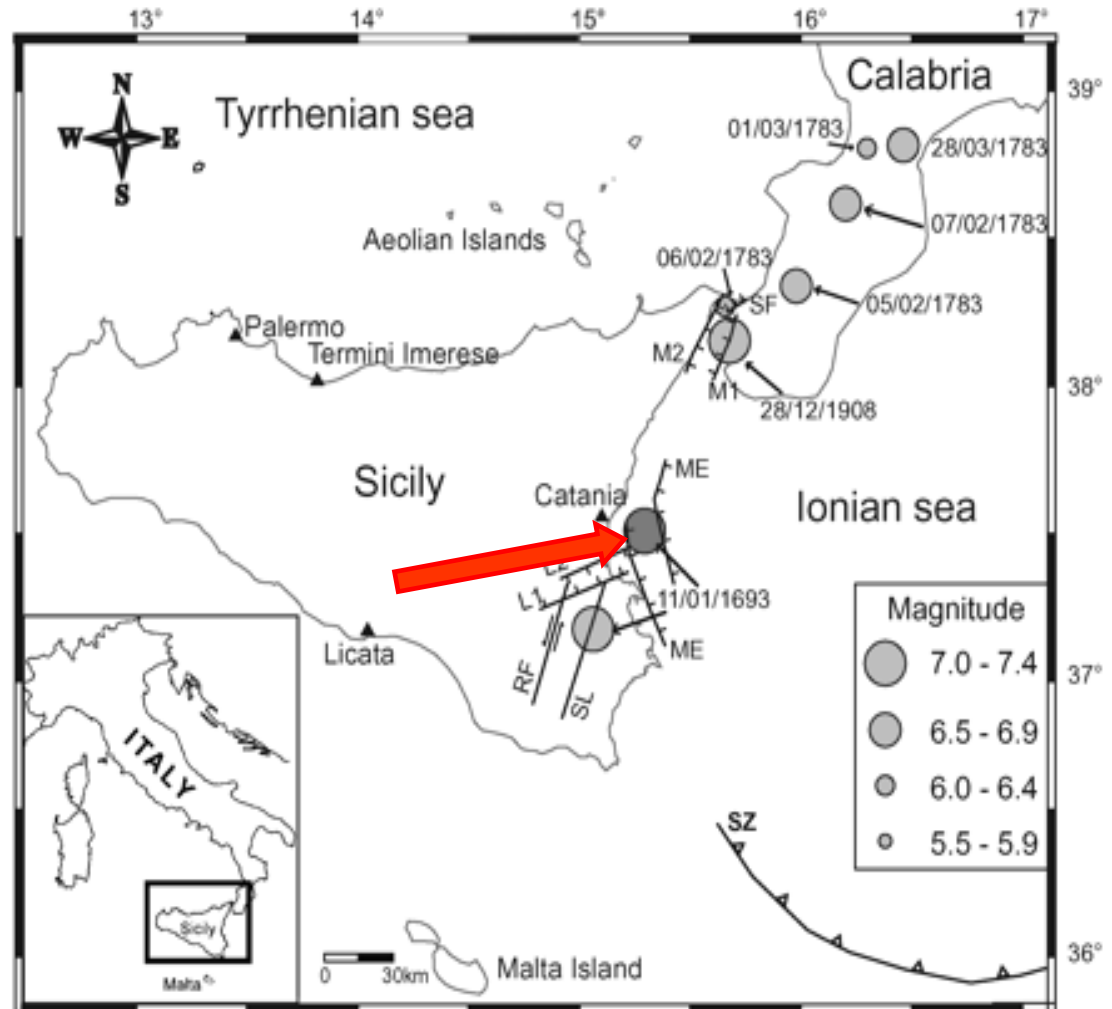
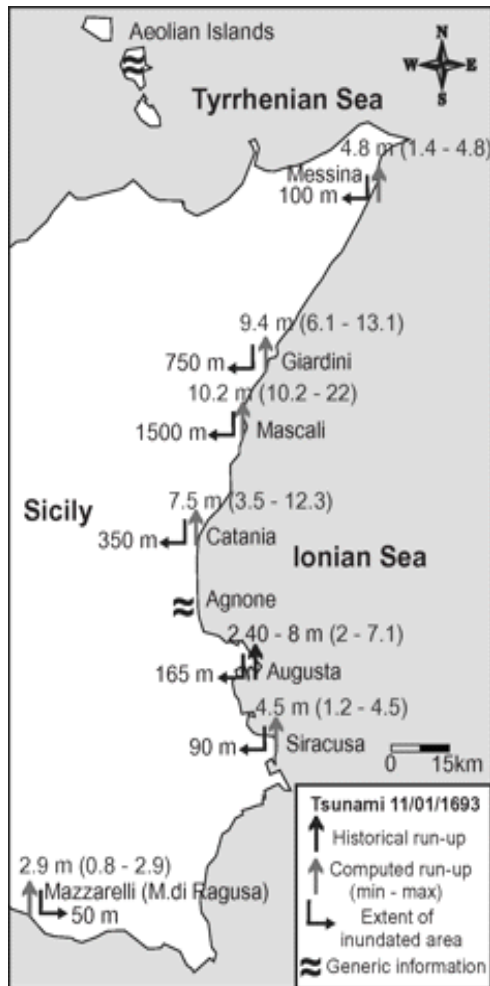


Séisme du 28 février 1969 au large du Maroc

- Magnitude 7,8. Beaucoup de Marocains et d'Espagnols ont encore en mémoire ce séisme, qui a donné naissance à un tsunami de faible amplitude mais notable : 1,2 m à Casablanca (Maroc), 0,2 m à Séville (Espagne).
- Rien sur les marégrammes des côtes françaises
- A noter un autre fort séisme en 1975 entre Gibraltar et les Açores
- **Tsunamis type 1969 :**
 - Période de retour 200 ans (10% de chances en 20 ans)
 - Hauteur maximale 1m (côte Ouest du Maroc)
- **Tsunamis type 1775 :**
 - Période de retour de l'ordre de 1000 ans.

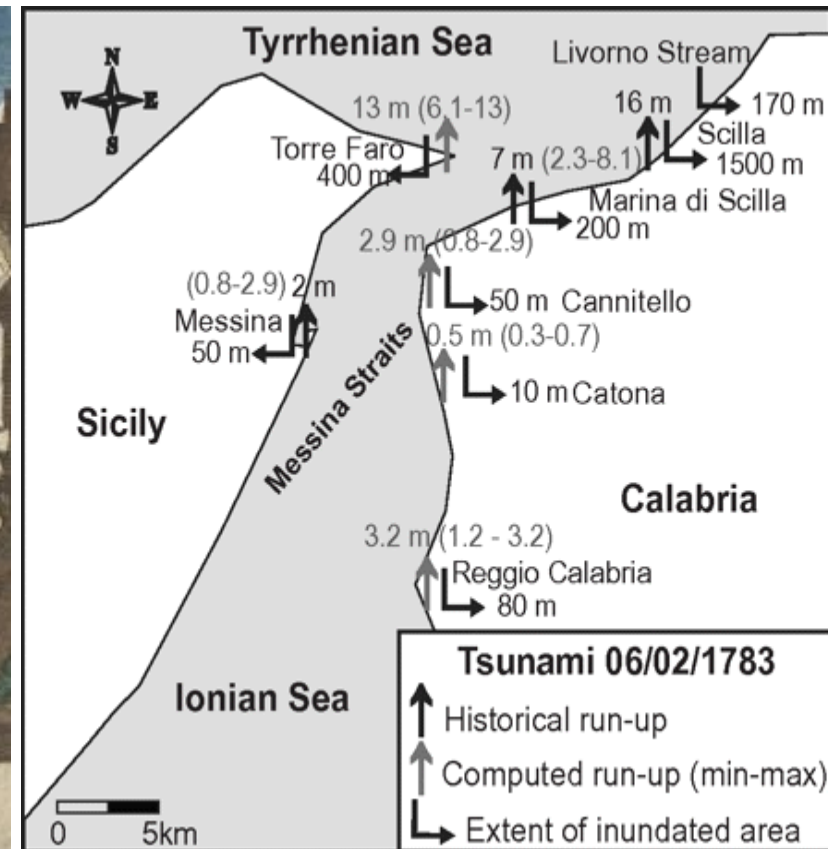
Séisme du 11 janvier 1693

- Le séisme a fait 60 000 victimes
- Il a généré un tsunami de 5 à 10 m

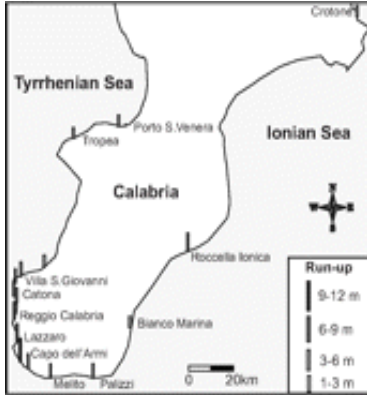


Séisme et tsunami du 6 février 1783

Le sud de la Calabre et la zone du détroit de Messine sont des zones de forte sismicité. Historiquement, elles ont connu au moins 8 séismes de magnitude $>$ à 6. Le risque y est élevé étant donné la proximité de Messine et Reggio de Calabre



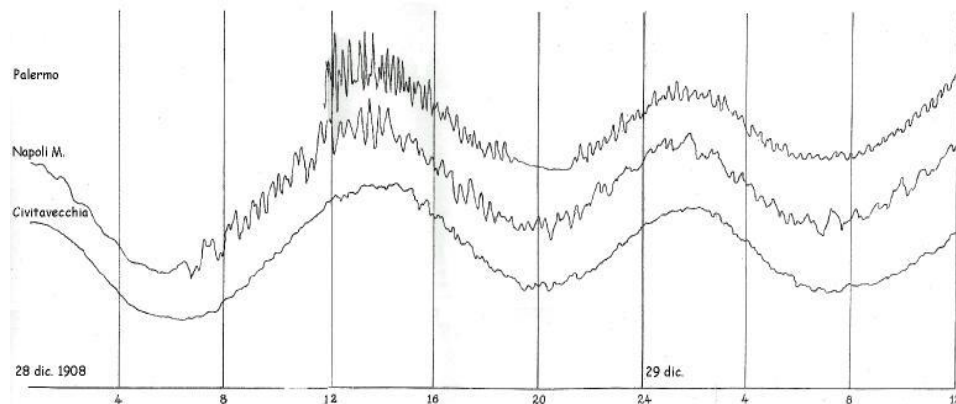
Séisme du 28 décembre 1908 à Messine



Le séisme a été doublé d'un tsunami, détruisant les villes de Messine et de Reggio di Calabre, faisant environ 100 000 morts.



Messine 1908



Pellaro 1908

Observations sur les côtes métropolitaines

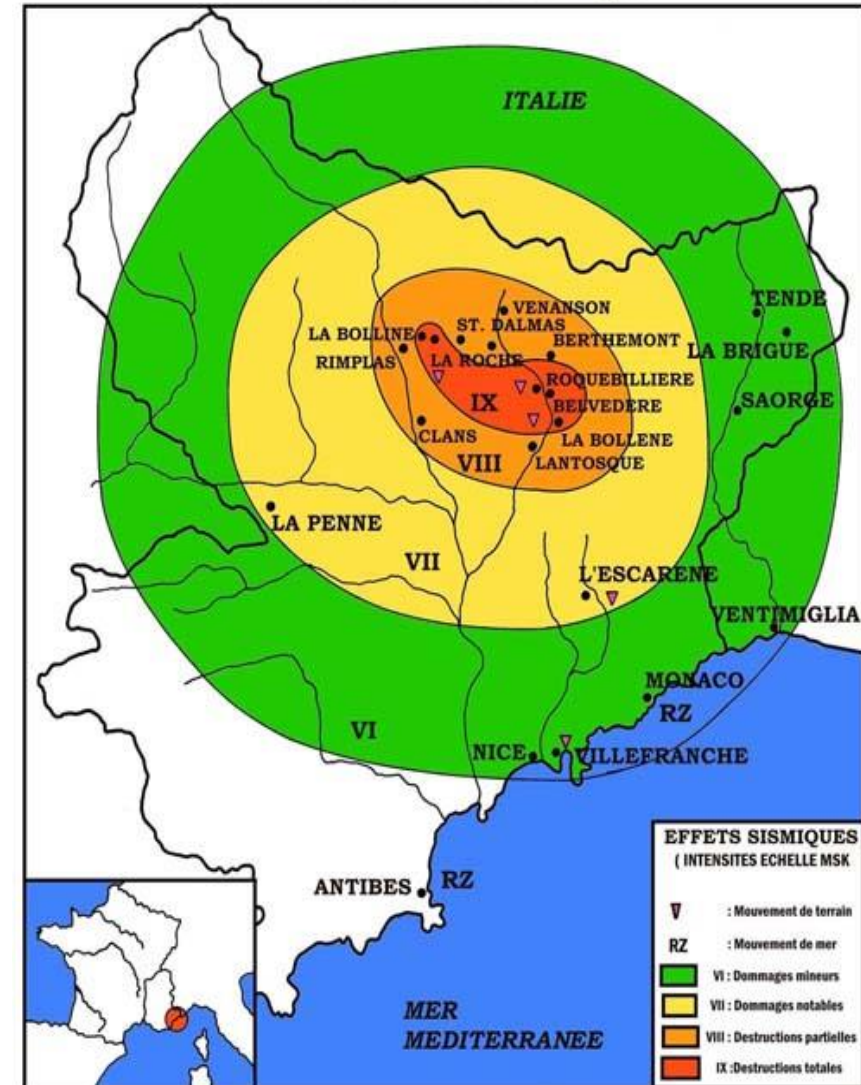
- Le BRGM recherche les tsunamis susceptibles d'avoir été observés sur les côtes de France (www.tsunamis.fr).
- Parmi les dizaines de tsunamis recensés sur les côtes métropolitaines seuls 4 sont, selon le BRGM, liés à l'occurrence de séismes en méditerranée occidentale ou en atlantique nord-est :
 - 20 juillet 1564 (séisme puis éboulement sous-marin puis tsunami ?),
 - **23 février 1887 (séisme)**,
 - 7 septembre 1972 (probablement une seiche),
 - 21 mai 2003 (tsunami de faible amplitude),
- De nombreux tsunamis dans cette base sont des vagues observées seulement à Marseille ou à Cherbourg d'origine inconnue.
- En ce qui concerne les tsunamis ayant pour origine des glissements de terrain, le seul événement certain et marquant est l'événement de 1979.



Séisme nissart du 20 juillet 1564

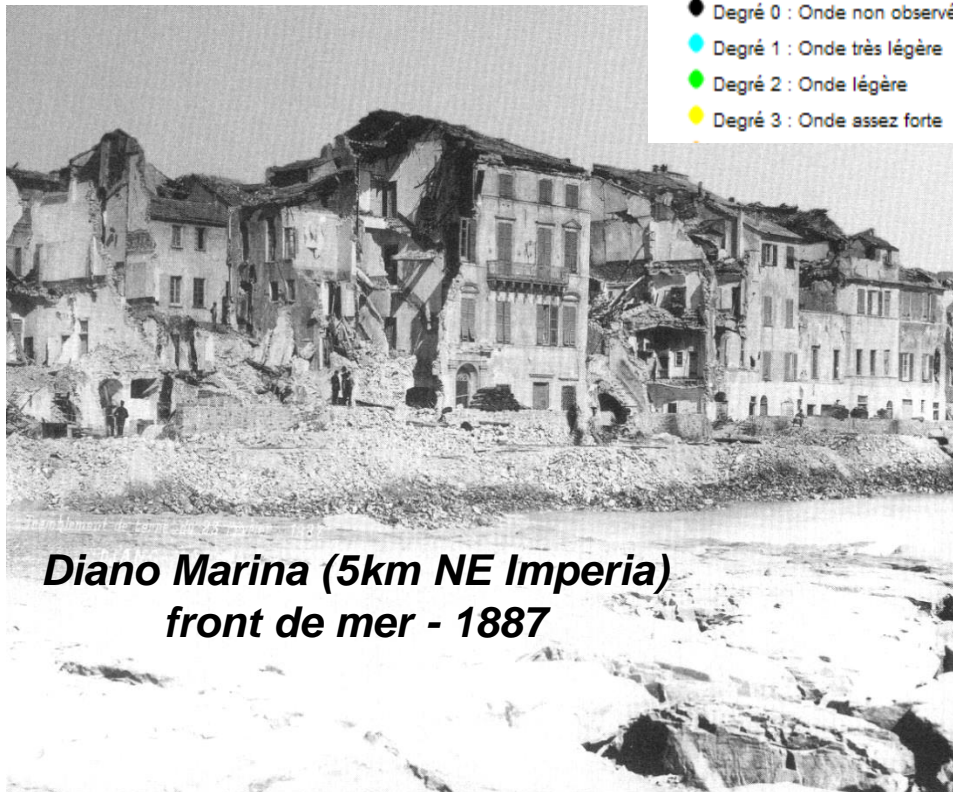
- On constata un abaissement sensible du niveau de la mer à :
 - Nice,
 - Villefranche
 - et Monaco.
- Il est peu probable que ce séisme ait généré un tsunami car l'épicentre se trouvait à terre à environ une quarantaine de kilomètres de la côte.
- Il faut, je pense, attribuer à ces mouvements de mer des éboulements sous-marins engendrés par le séisme.

TREMBLEMENT DE TERRE DU 20 JUILLET 1564
Simulation macrosismique

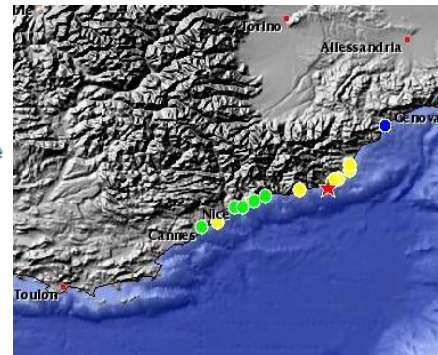


Séisme du 23 février 1887 en mer Ligure et tsunami

- Le 23 février 1887 à 5 h 43 s'est produit un séisme en mer Ligure. Son épicentre se situe en mer, entre Diano Marina et Imperia.



- ★ Epicentre du séisme
- Intensité
- Inconnue
- Degré 0 : Onde non observée
- Degré 1 : Onde très légère
- Degré 2 : Onde légère
- Degré 3 : Onde assez forte

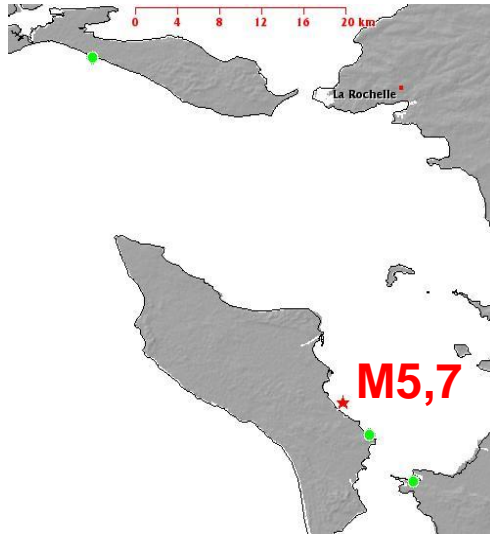


- Tsunami avec des vagues de 2m qui ont percuté les côtes de Cannes à Gênes
- Deux marégrammes disponibles :
 - à Nice
 - et à Gênes.

7 Septembre 1972 – Séisme d'Oléron M5.7

Oléron
Un marin pêcheur qui rentrait au port l'autre nuit, à bord d'une barque, a déclaré qu'il avait vu soudain les vagues grossir près du rivage et qu'il avait très bien senti les effets du tremblement de terre.

- Tsunami selon base BRGM
- En fait plutôt une seiche cosmismique



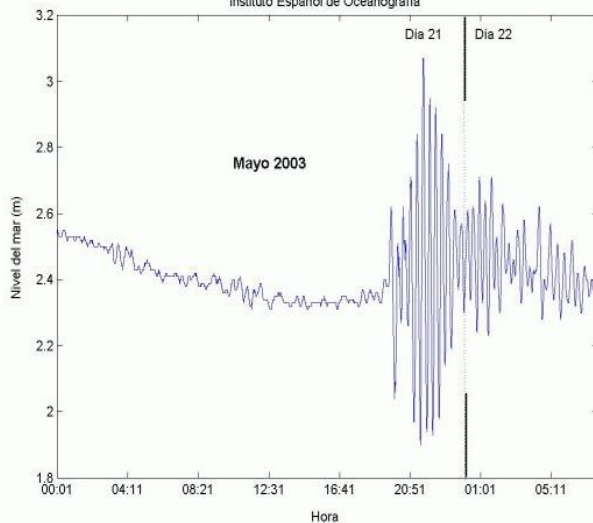
J.P. ROTHE : Sismicité de la France entre 1971 et 1977, Annales de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, 1983

- B) Observations de vagues anormales (« tsunami » ?)
- 1) La mairie de La Couarde (canton d'Ars-en-Ré) a signalé les faits suivants : des personnes de La Couarde, pêchant sur des rochers, ont perçu, malgré le ressac, un grondement et ont senti le tremblement du sol ; subitement le niveau de l'eau (la mer était basse) s'est élevé de plus de 60 cm. Par ailleurs, un marin pêcheur qui débarquait au lieu-dit « Goisy » a entendu le grondement et perçu les secousses ; il a constaté une élévation du niveau de l'eau tandis qu'une multitude de poissons sautaient hors de l'eau.
 - 2) Le maire de Bourcefranc (canton de Marennnes), signale une légère montée de l'eau de mer au moment du séisme.
 - 3) D'après des renseignements fournis par M. Ruzé, de Royan (lettre du 5 janvier 1973), des bateaux de pêche ont senti en mer à l'heure du séisme des vagues anormales.

Séisme de Boumerdès 21 mai 2003 Mw6.9 et tsunami

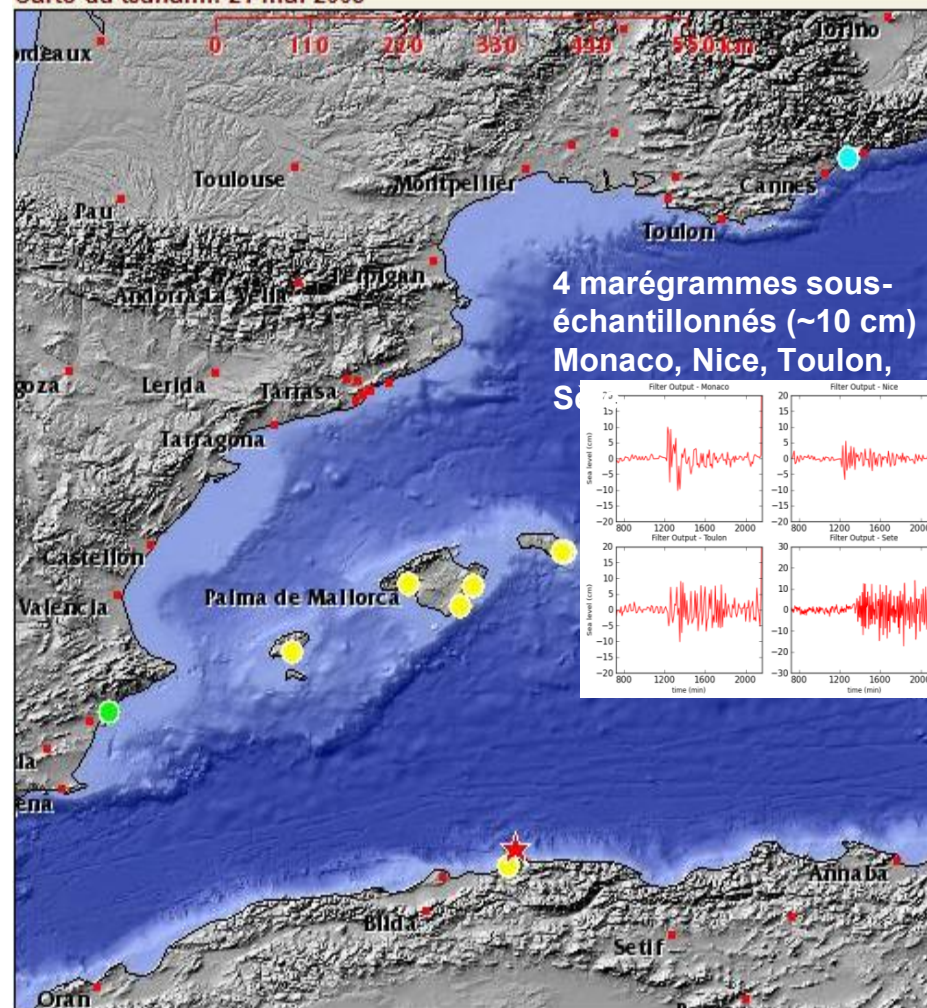


Mareógrafo de Palma de Mallorca
Instituto Español de Oceanografía

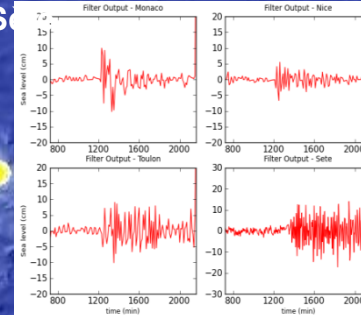


- Sur la côte d'Azur :
- 8 ports touchés, 4 marégrammes

Carte du tsunami: 21 mai 2003

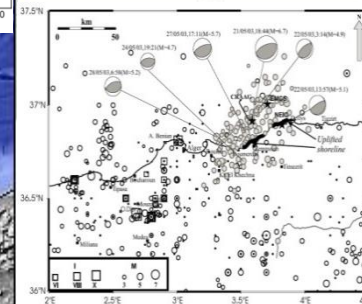


4 marégrammes sous-échantillonnés (~10 cm)
Monaco, Nice, Toulon, Sete



Légende

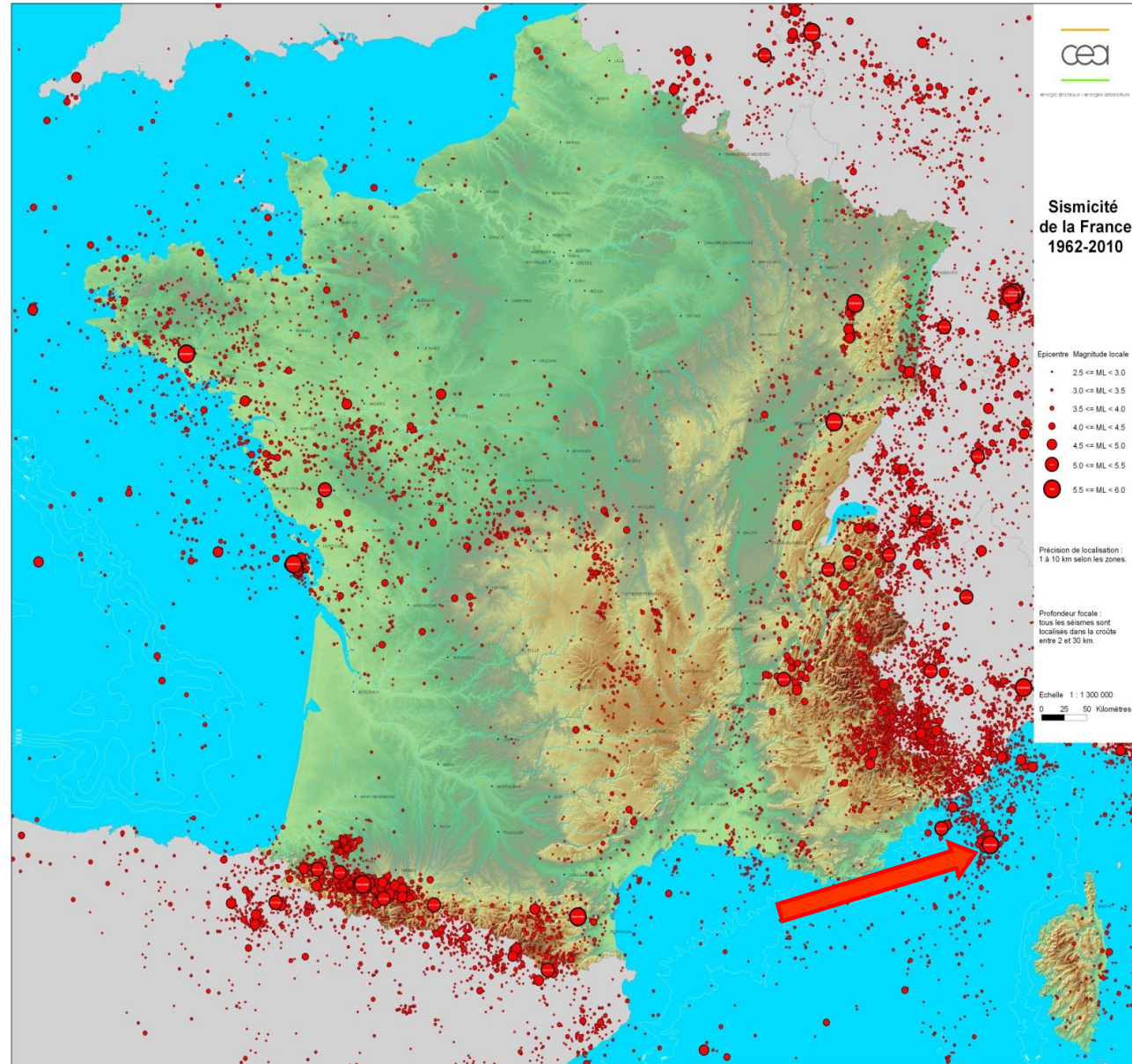
- Préfectures
- ★ Epicentre du séisme
- Intensité**
- Inconnue
- Degré 0 : Onde non observée
- Degré 1 : Onde très légère
- Degré 2 : Onde légère
- Degré 3 : Onde assez forte
- Degré 4 : Onde forte
- Degré 5 : Onde très forte
- Degré 6 : Onde désastreuse
- Villes
- Trait de côtes
- Bathymétrie
- M.N.T. (Relief indicatif)(*)
- Scans IGN(*)



Ayadi et al., 2003

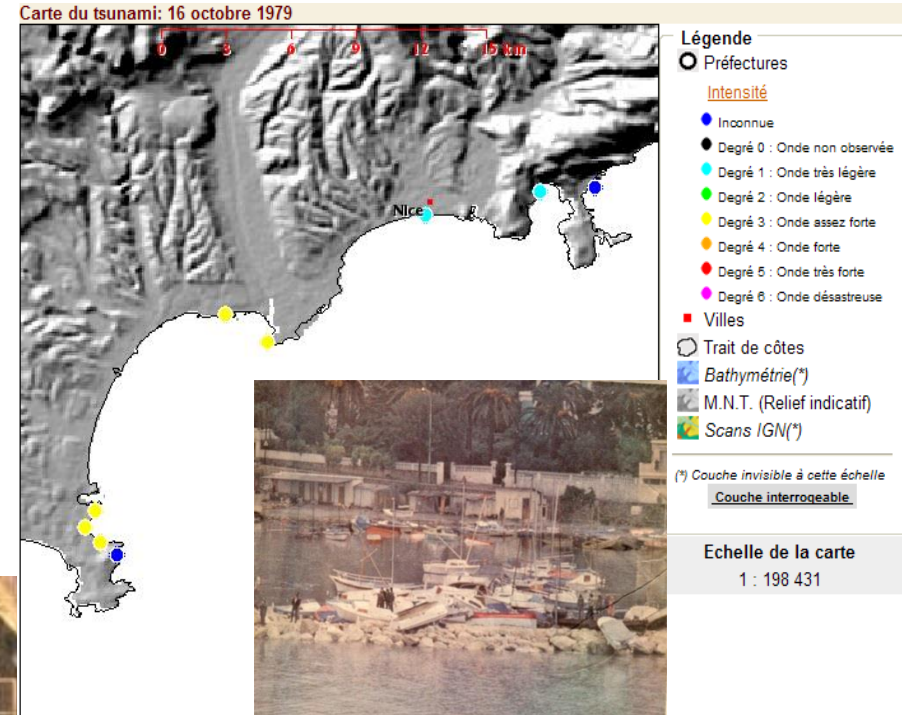
Séisme du 19 juillet 1963 (M5,8)

- Plus gros séisme instrumental métropolitain (M5,8).
- Fortement ressenti sur la côte d'Azur.
- Pas d'observations tsunami (faux tsunami dans base BRGM tsunamis.fr)
- Déferlement de vagues (Cogolin)



Tsunami de 1979 à l'aéroport de Nice

- Nice 16 octobre 1979
- Glissement sous-marin
- 11 morts
- Vagues de 3 mètres
- Aéroport emporté

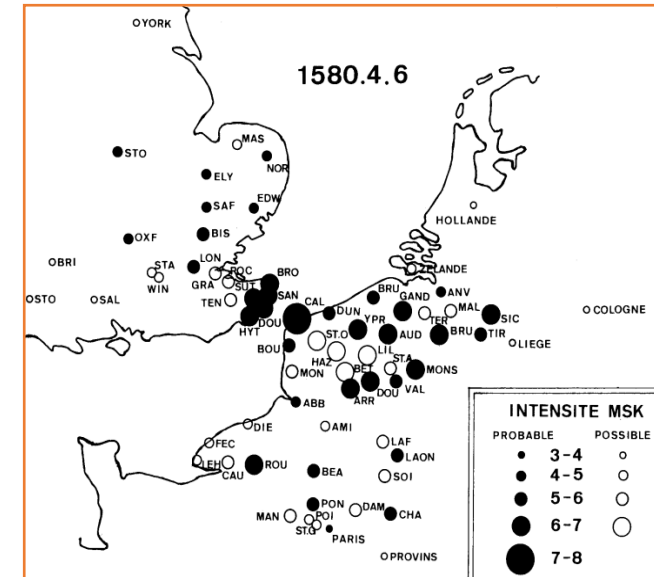


Tremblement de terre du 6 avril 1580

- Bien que les séismes sévères soient rares dans le Nord de la France, et au Sud du Royaume-Uni, des secousses modérées sont relativement fréquentes.
- Le séisme qui a le plus marqué les chroniqueurs, dans cette région s'est produit le 6 avril 1580 à 6h du soir. On situe aujourd'hui l'épicentre de ce séisme dans le pas de Calais.
- Sur les côtes française des inondations tuent des gens et une grande quantité de bétail. il pourrait ne pas s'agir d'un tsunami, mais de la résultante d'effondrement de digues de polders et des grandes marées

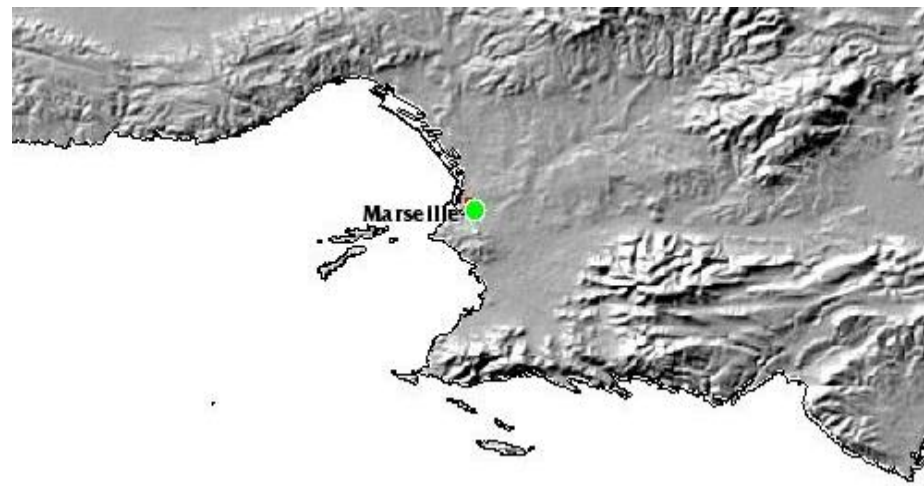


Château de Saltwood, rendu inhabitable par le tremblement de terre, jusqu'à ce qu'il soit réparé au XIX^{ème} siècle (ici dessiné en 1830).



Evènement du 27 juin 1812 à Marseille

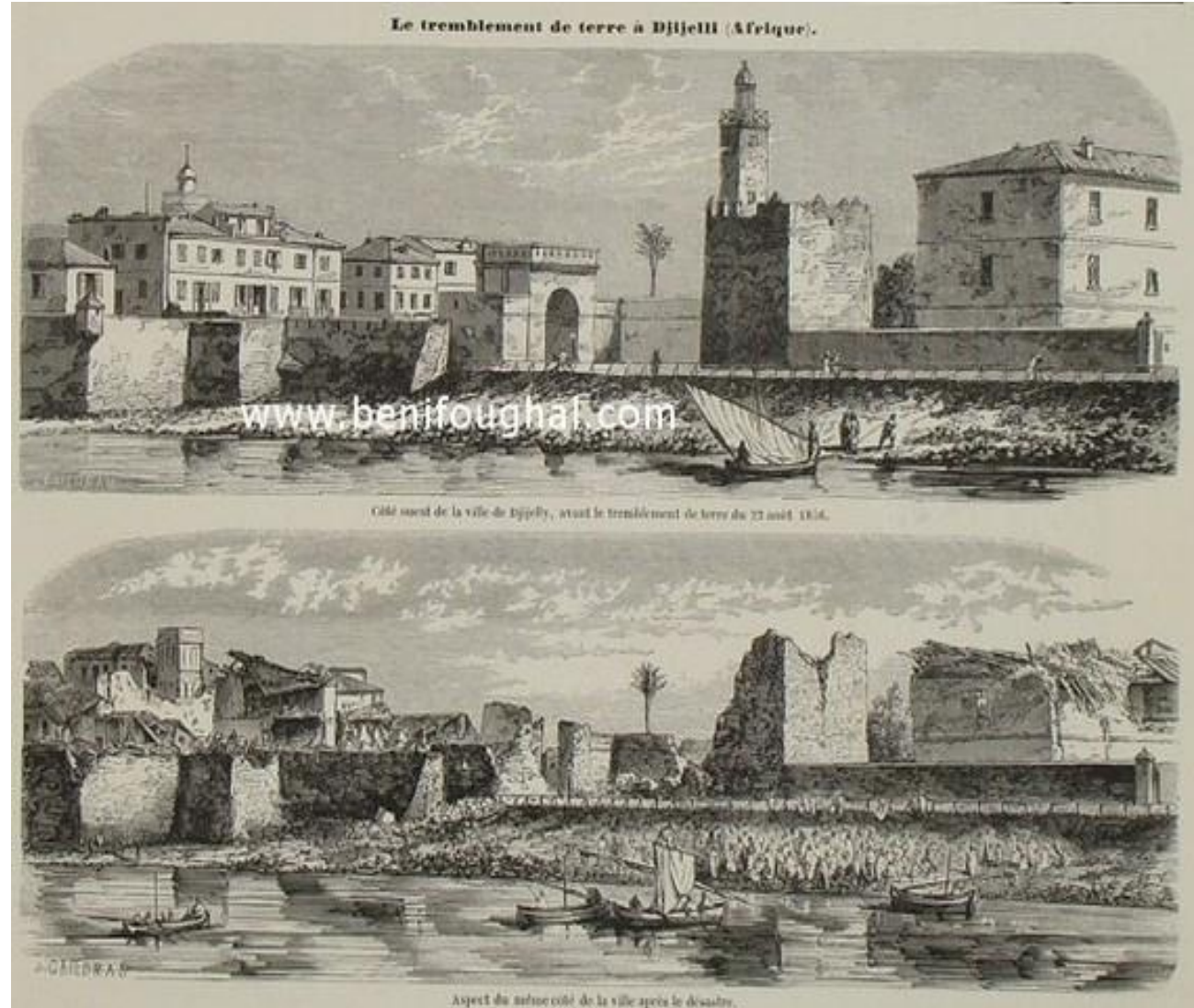
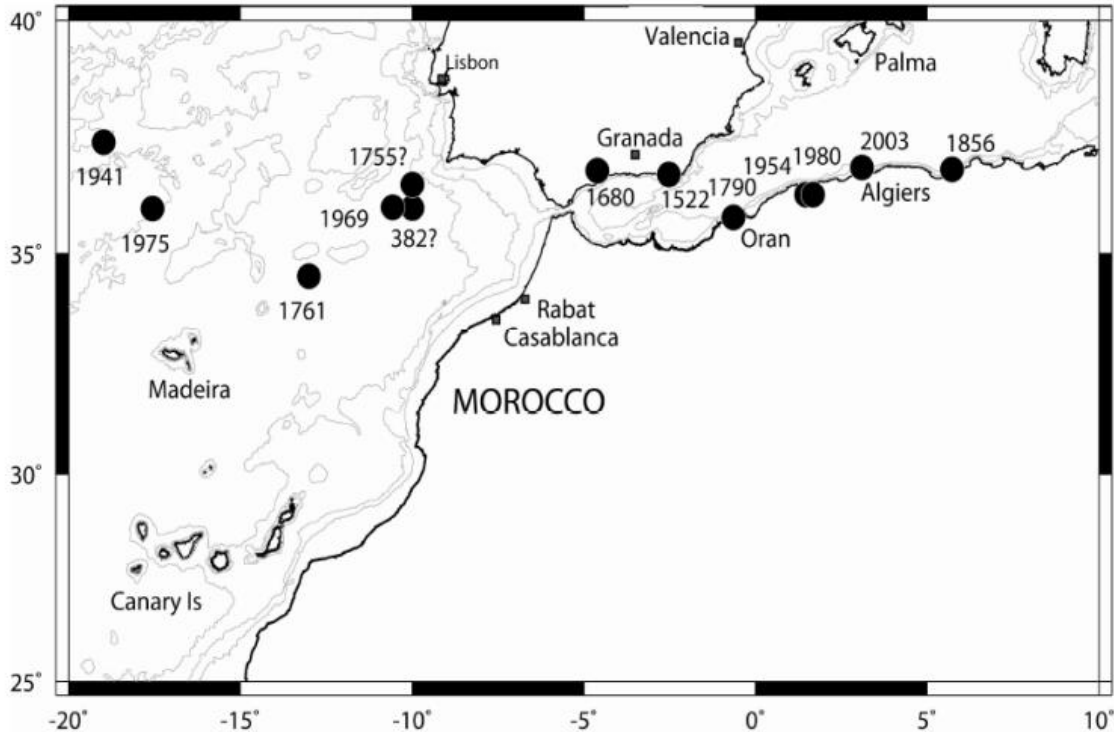
- Plusieurs témoignages contemporains sur cet événement survenu à Marseille le 27 juin 1812, et notamment un rapport du contre-amiral L'Hermitte (*Ms, Correspondance au Ministre, Service historique de la Défense, département Marine, Toulon, 2 A 159*).
- À Marseille, la mer s'est retirée sur une distance de presque six mètres. Dans le port, en partie mis à sec, des navires ont été endommagés.



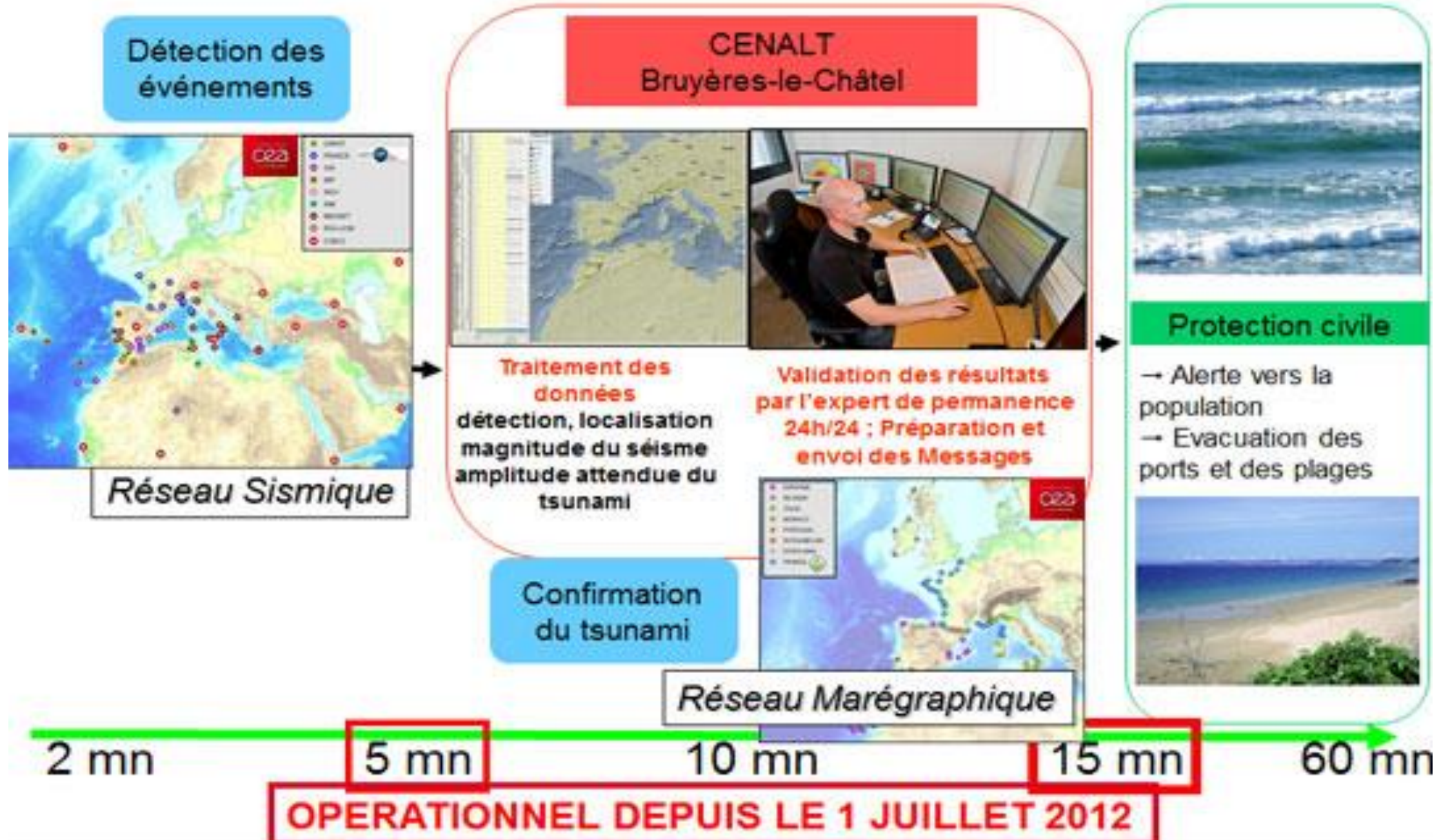
- Aucun séisme fut-il lointain n'ayant été découvert à ce jour en relation avec ce tsunami.
- Le BRGM suggère que cet événement puisse avoir une origine gravitaire.

Séisme du 21 août 1856 à Djijeli

- Nombreux dégâts causés par le tsunami sur la côte algérienne.
- Pas de témoignages disponibles ailleurs.



Le système d'alerte du CENALT



Modélisation de la source sismique

Déformation géodésique

$$V_i(\omega = 0) = \sum_{k=1}^N Am_k \cdot u_{ki}(\omega = 0)$$

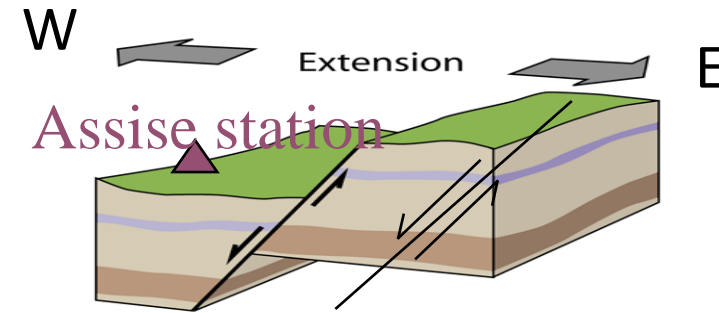
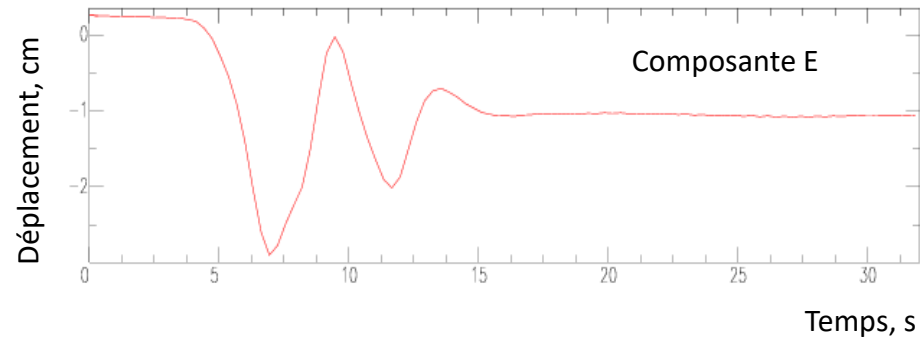
Mouvement sismique

$$V_i(\omega) = \sum_{k=1}^N \left(Am_k \cdot S(rt_k, \omega) \cdot e^{-i\omega t_k} \right) u_{ki}(\omega)$$

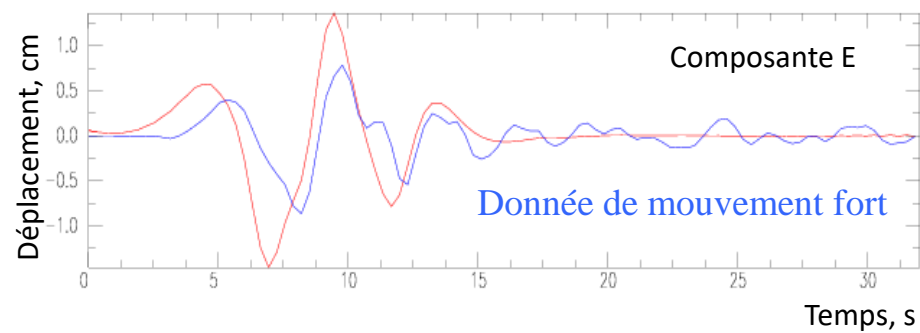
Calcul direct

forward model

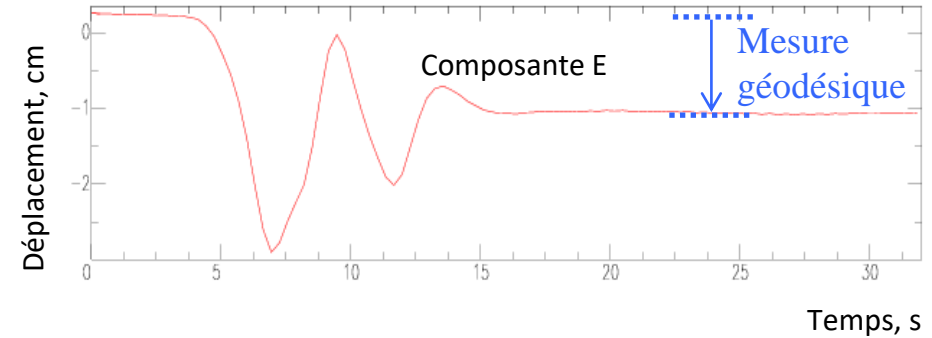
Synthétiques [0 ; 1,5] Hz



Mouvement sismique ([0,1 ; 1,5] Hz)



Déformation géodésique (f # 0 Hz)



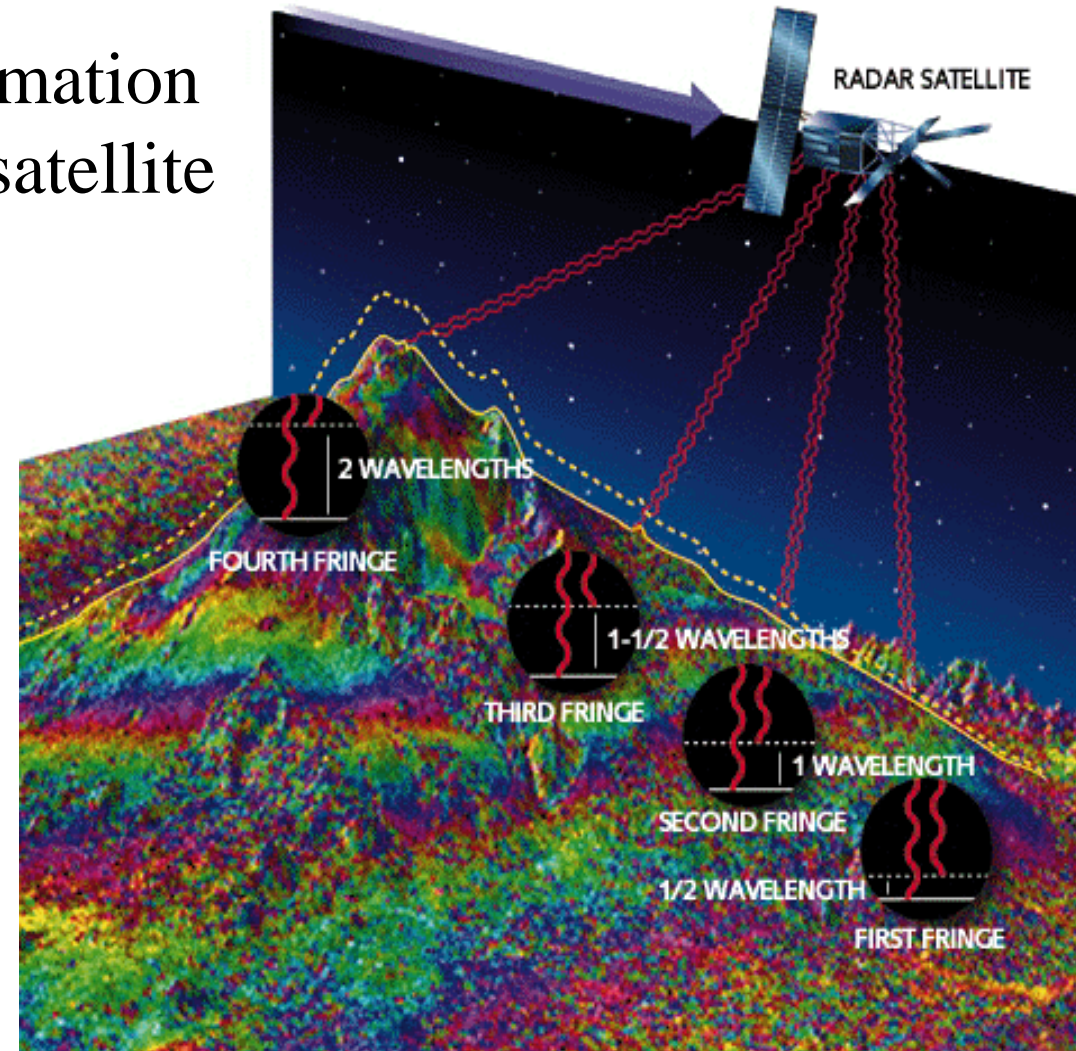
La rupture du séisme de Landers (1992)

Qu'apportent les données SAR ?

Radar interferometry

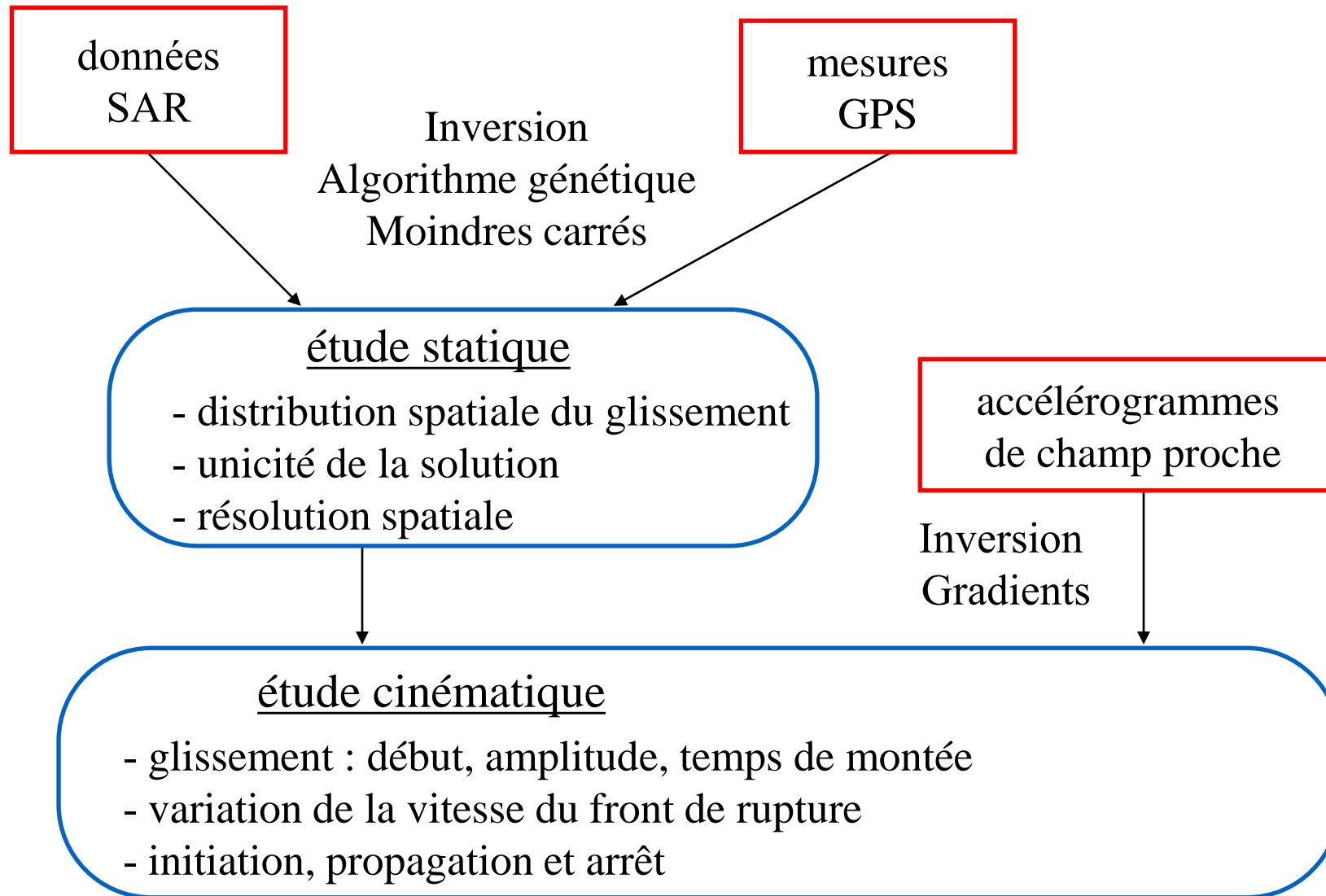
Mesure du champ de déformation cosismique dans l'axe sol-satellite

- Localisation
- Géométrie
- Distribution du glissement
- Libération de la vitesse de rupture



Imagerie de la source sismique en deux étapes

Kinematic of the source



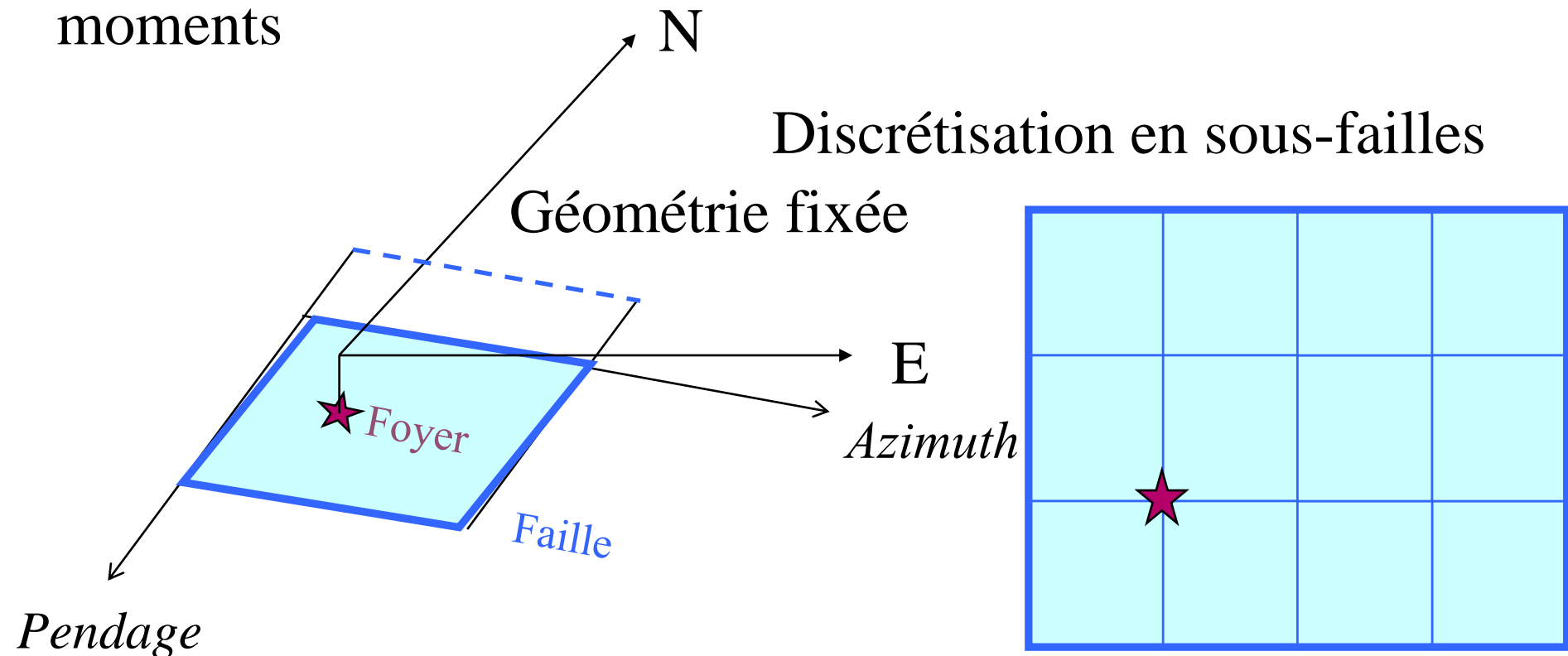
Géométrie et discrétisation de la source

fault model

Localisation de l'hypocentre

Distribution des répliques

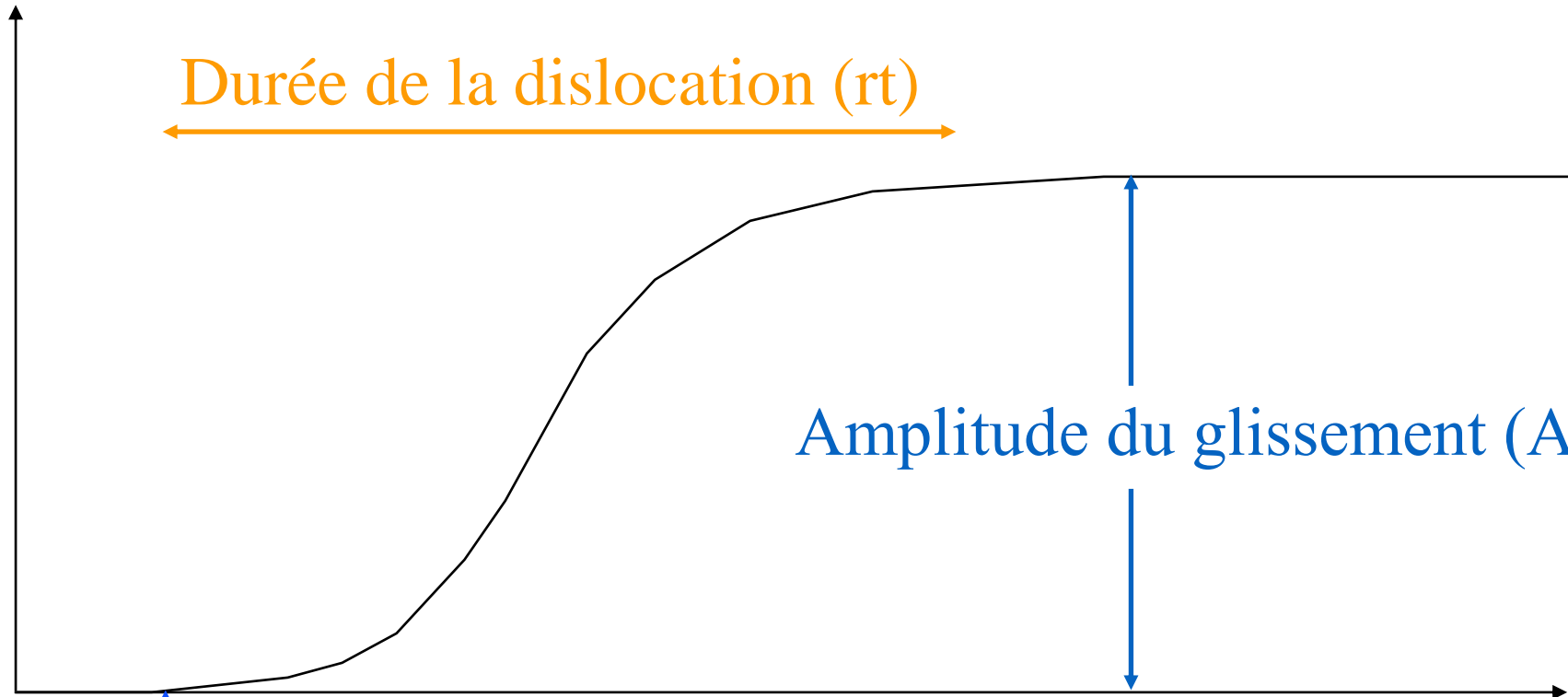
Solutions du tenseur des moments



Fonction source associée à chaque sous-faïlle

Source function

Glissement



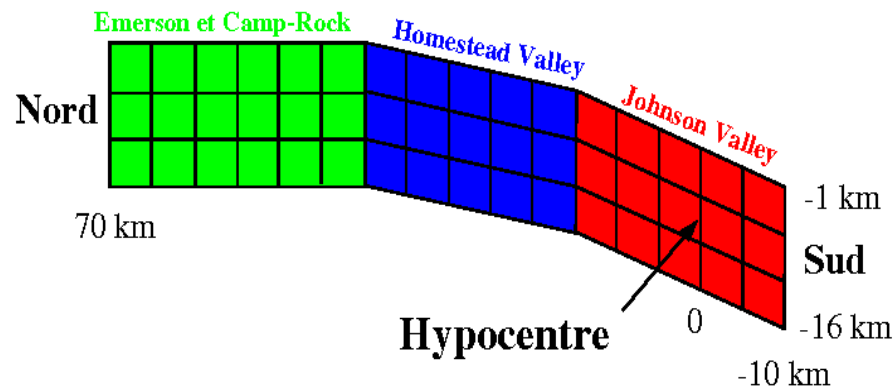
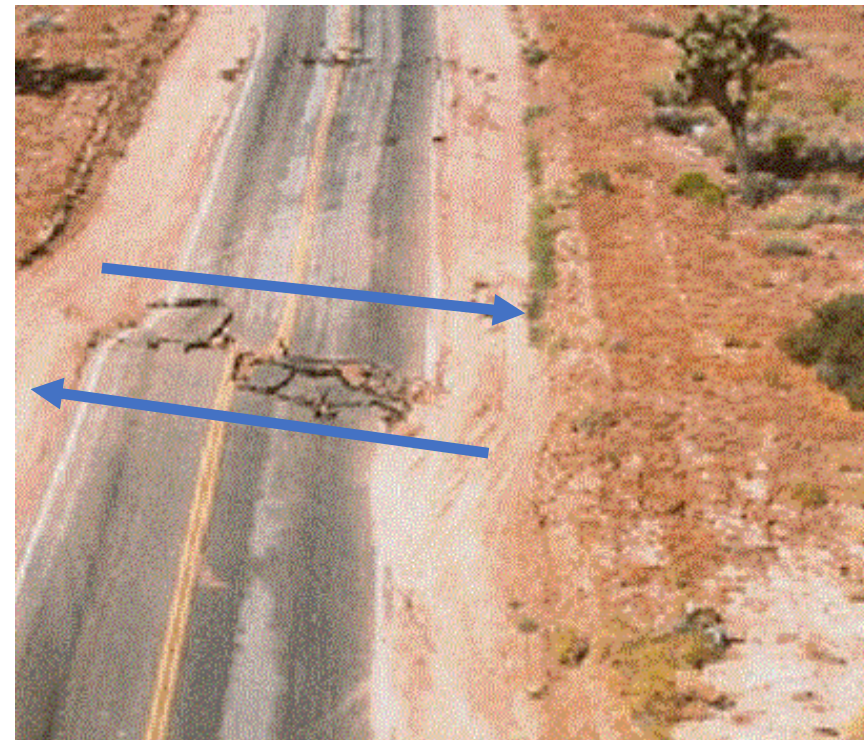
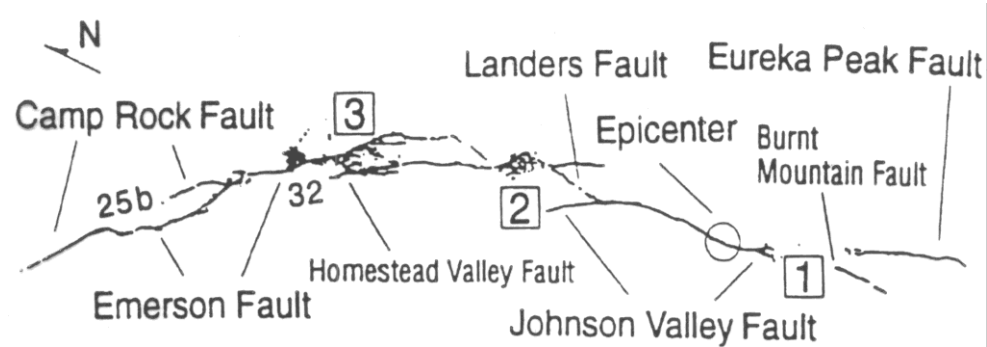
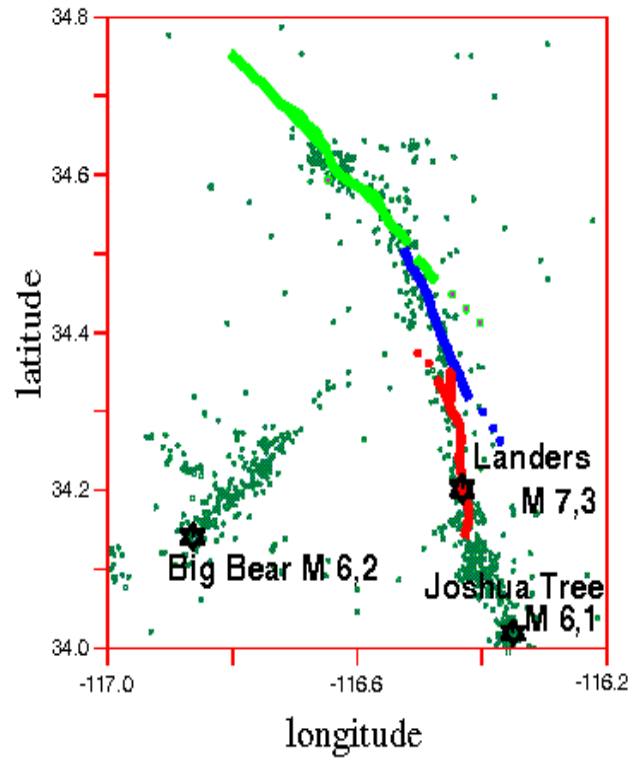
Durée de la dislocation (rt)

Amplitude du glissement (A_m)

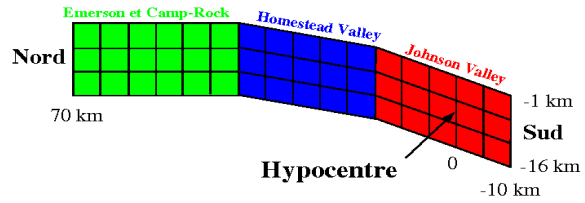
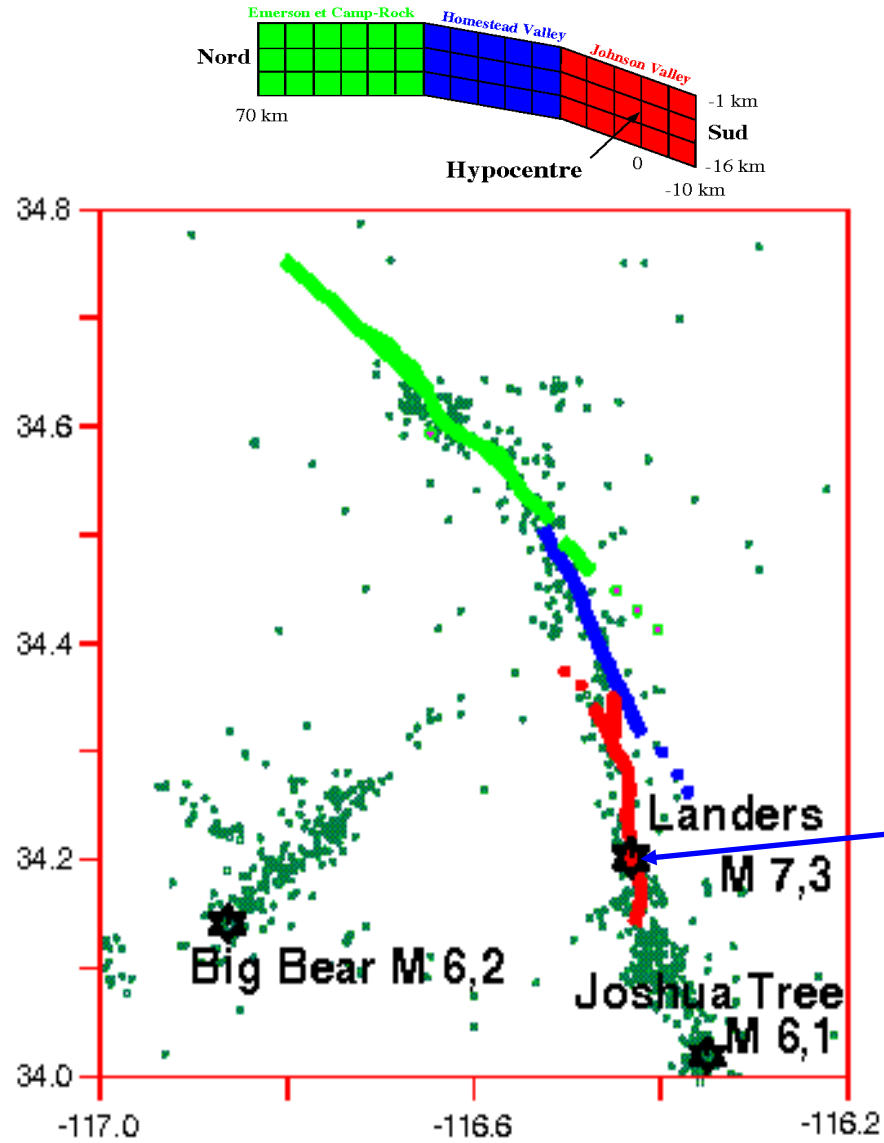
Temps de début de rupture (t)

Temps

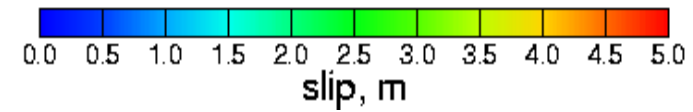
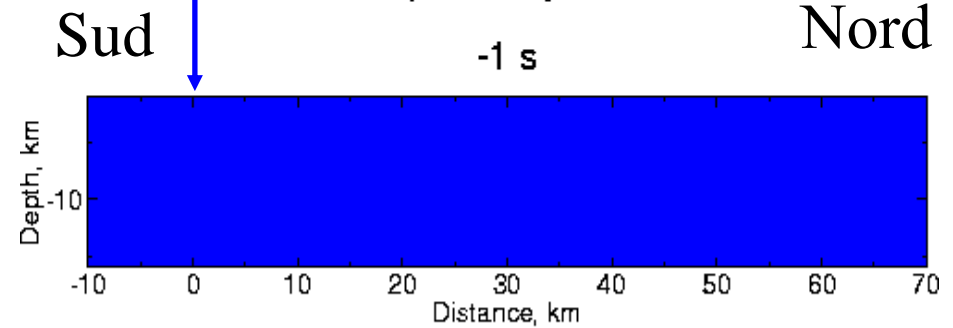
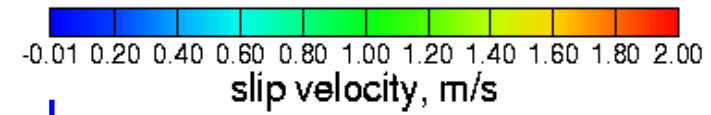
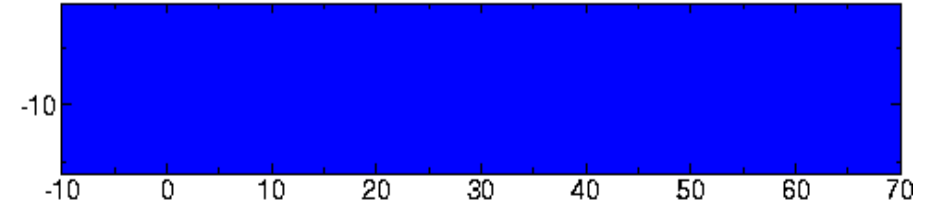
Source inversion : an example



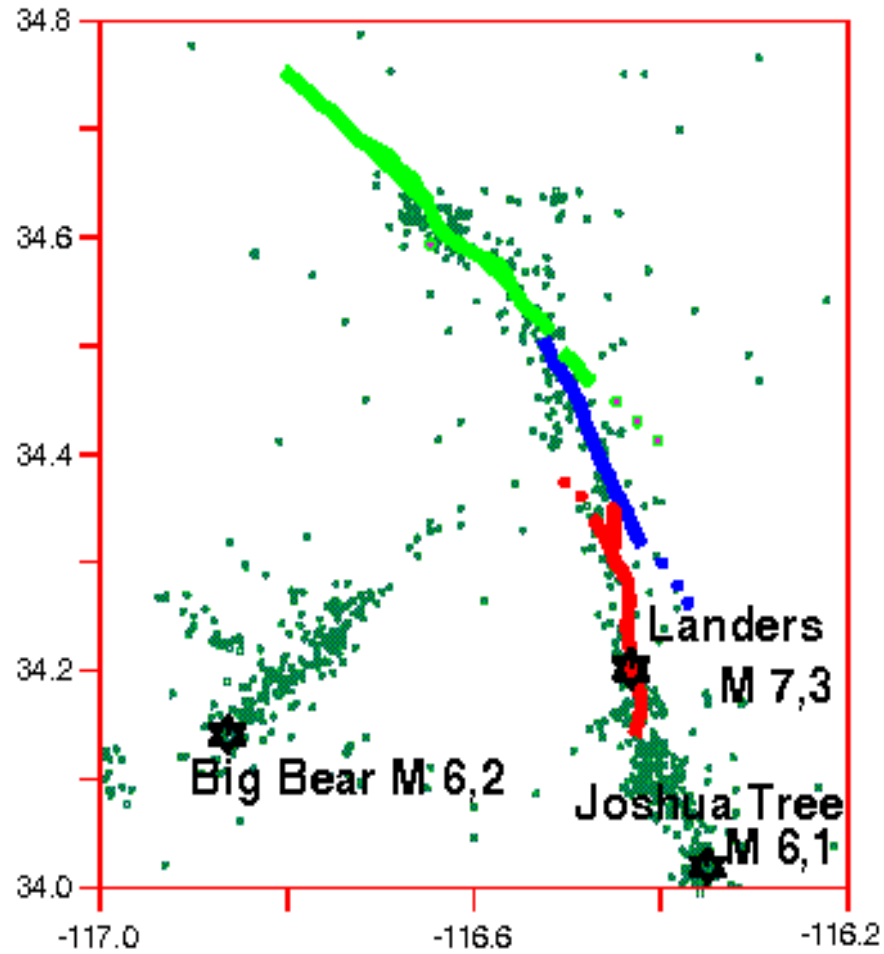
Kinematic inversion



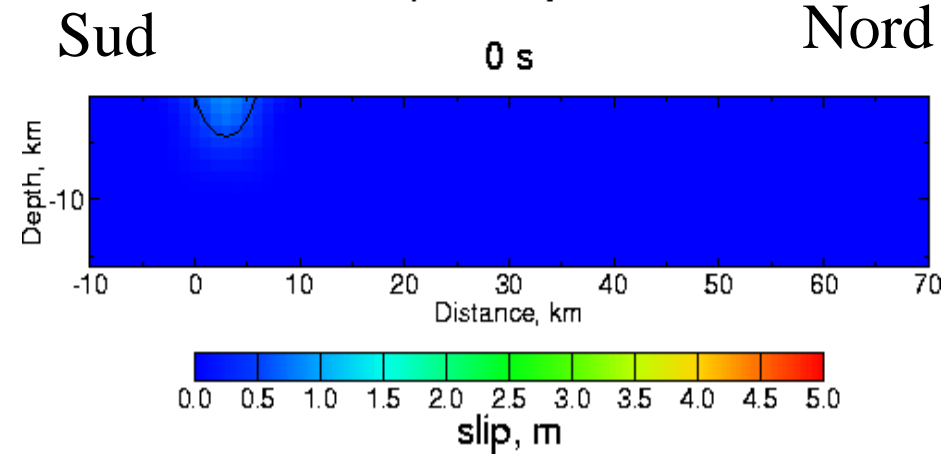
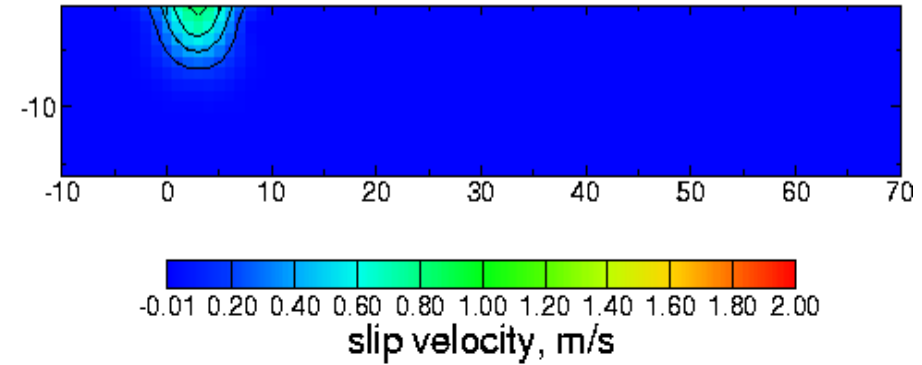
Landers earthquake



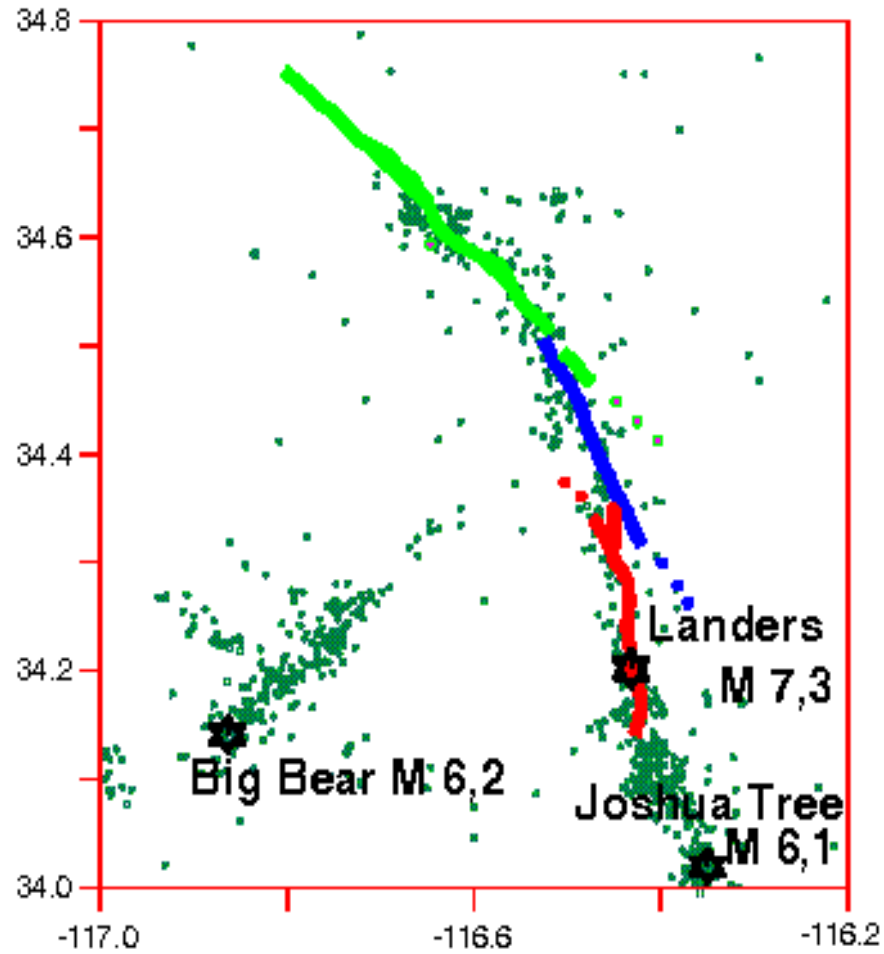
Kinematic inversion



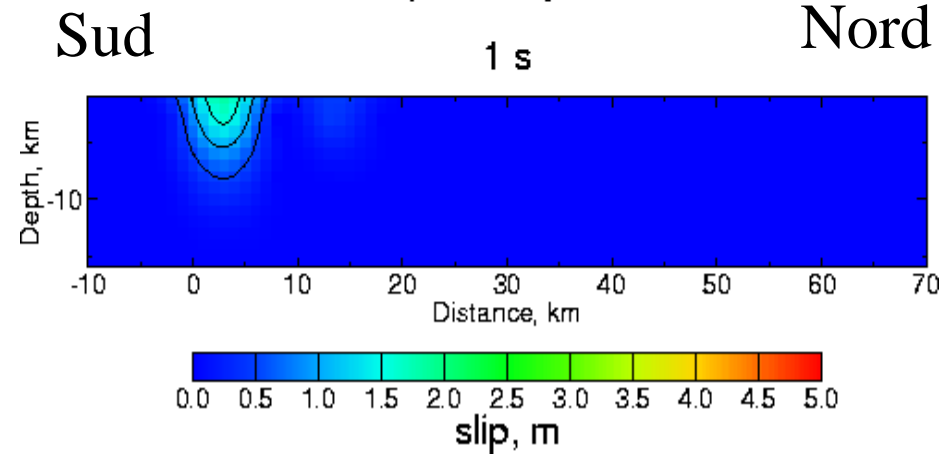
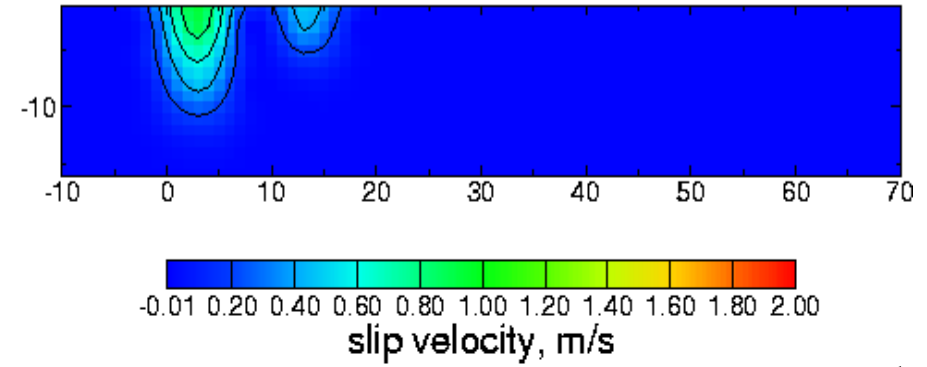
Landers earthquake



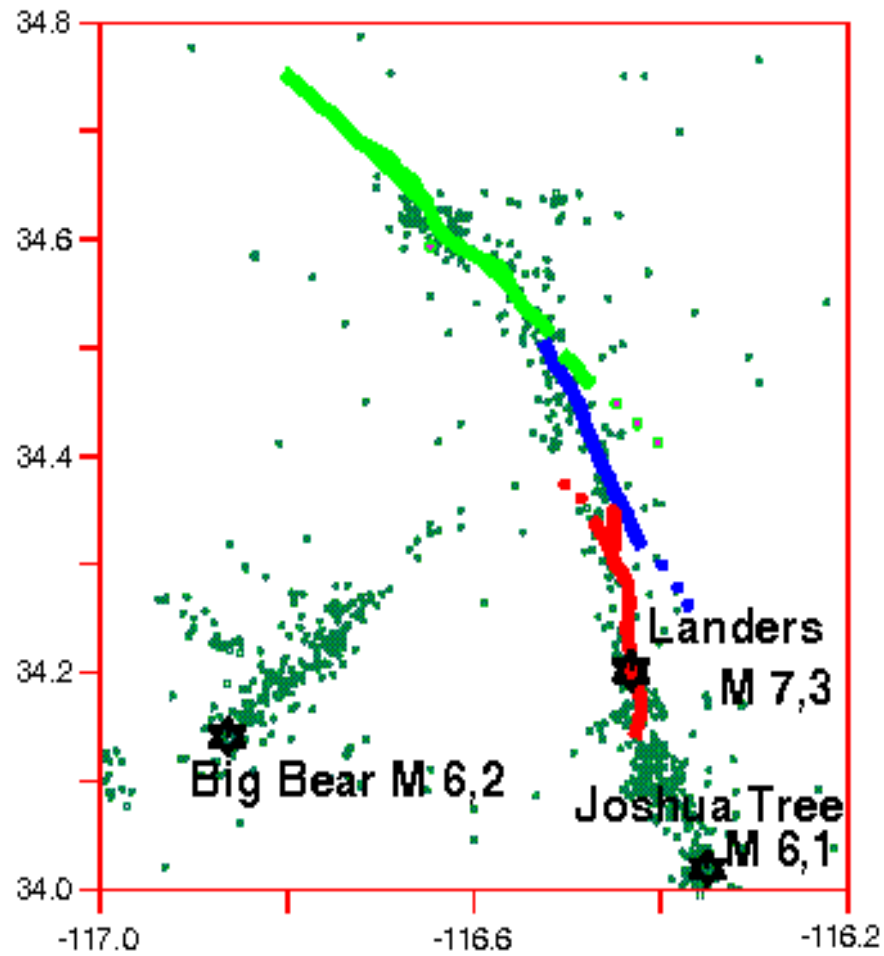
Kinematic inversion



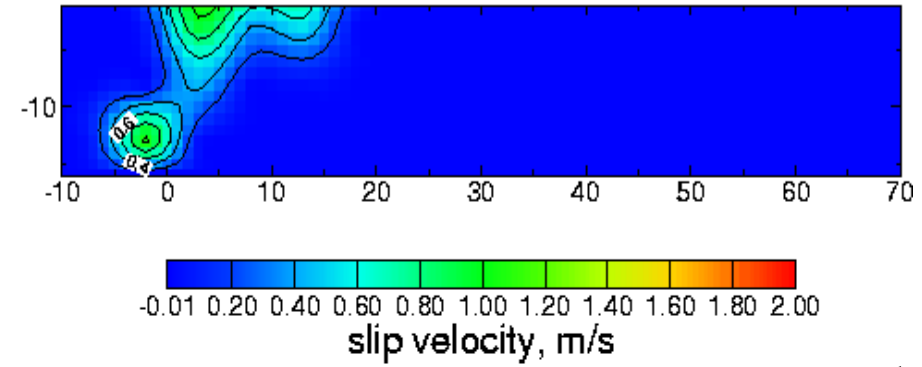
Landers earthquake



Kinematic inversion



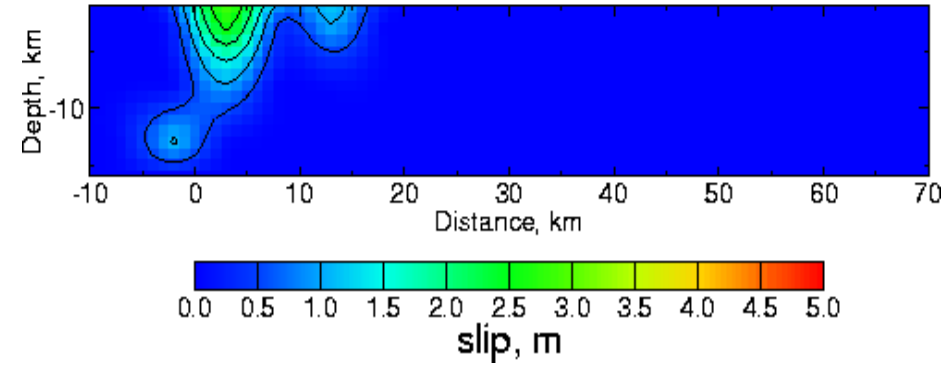
Landers earthquake



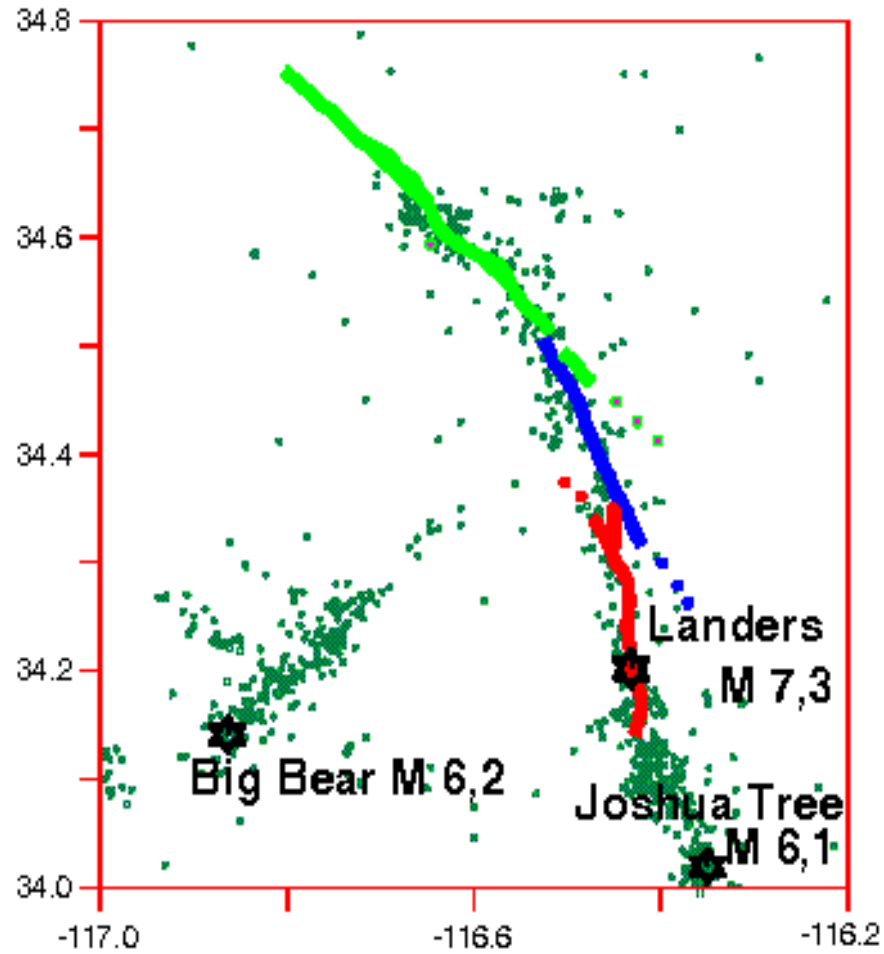
Sud

2 s

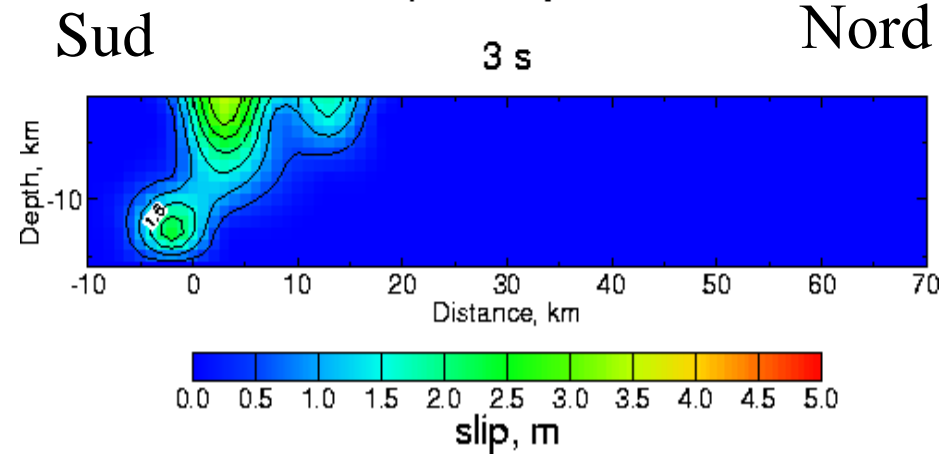
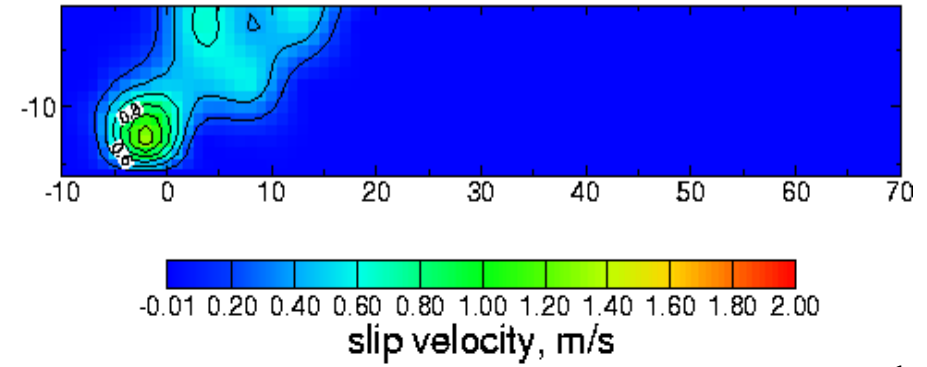
Nord



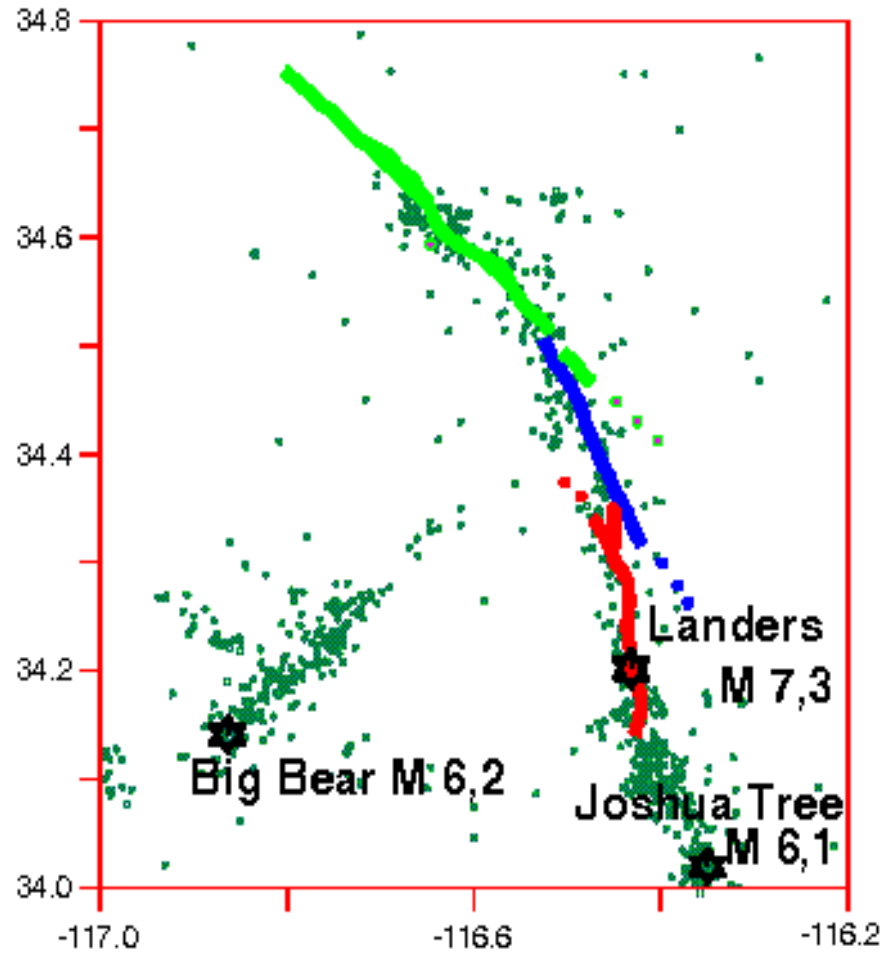
Kinematic inversion



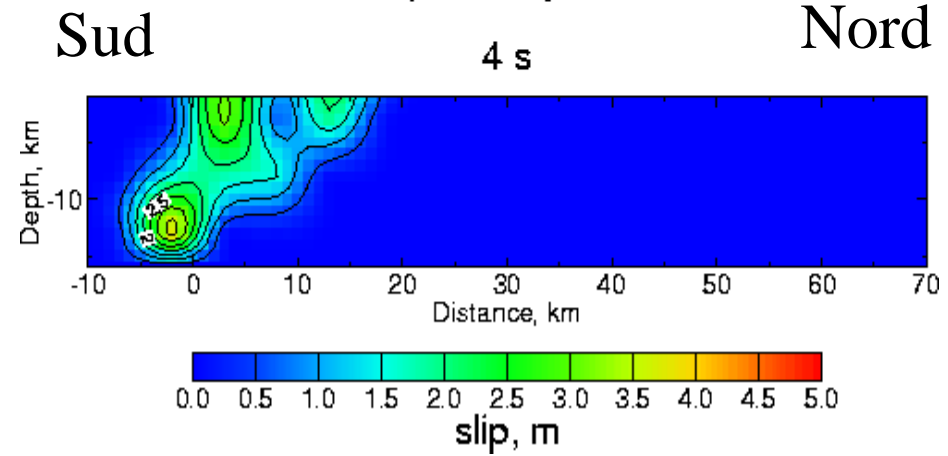
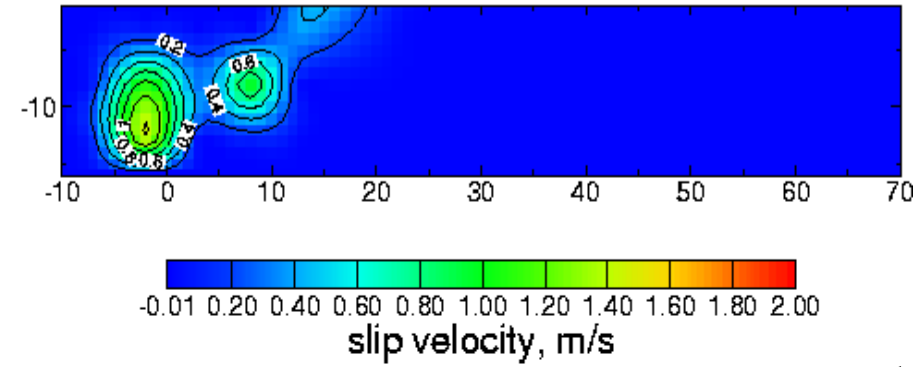
Landers earthquake



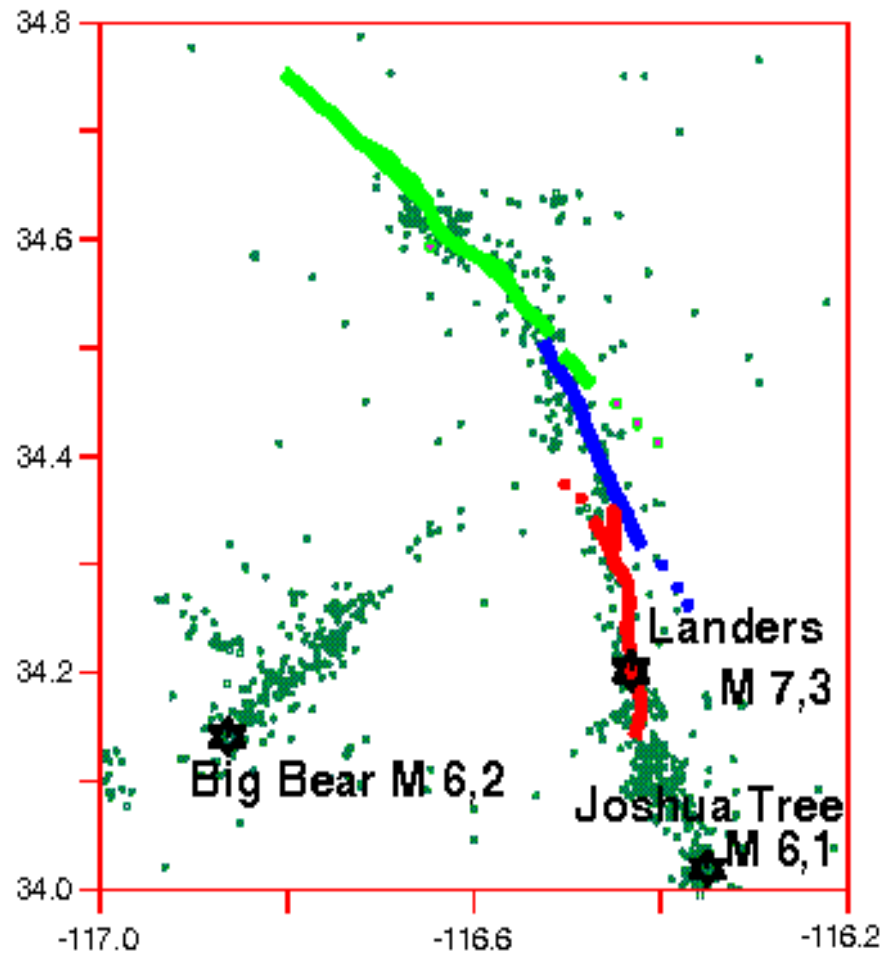
Kinematic inversion



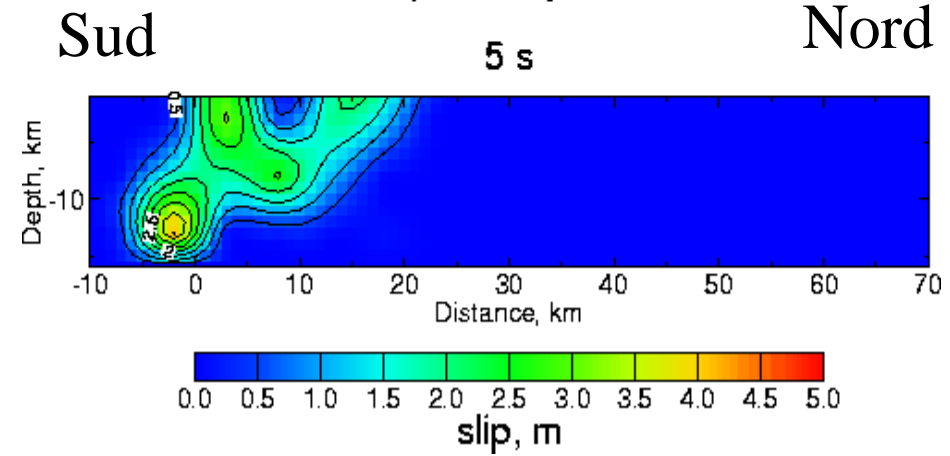
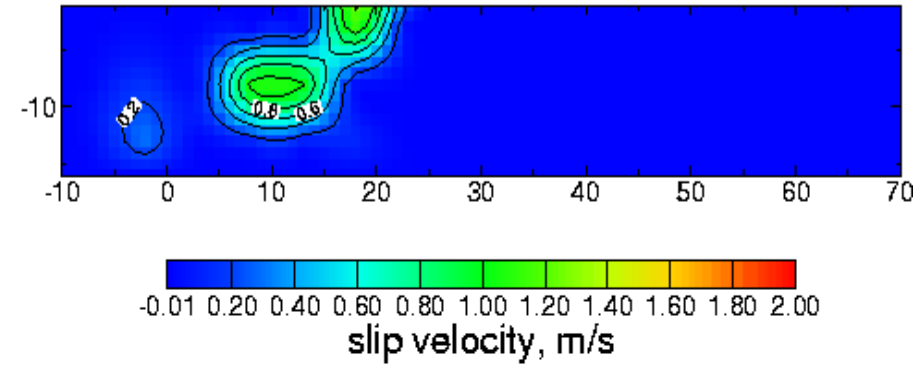
Landers earthquake



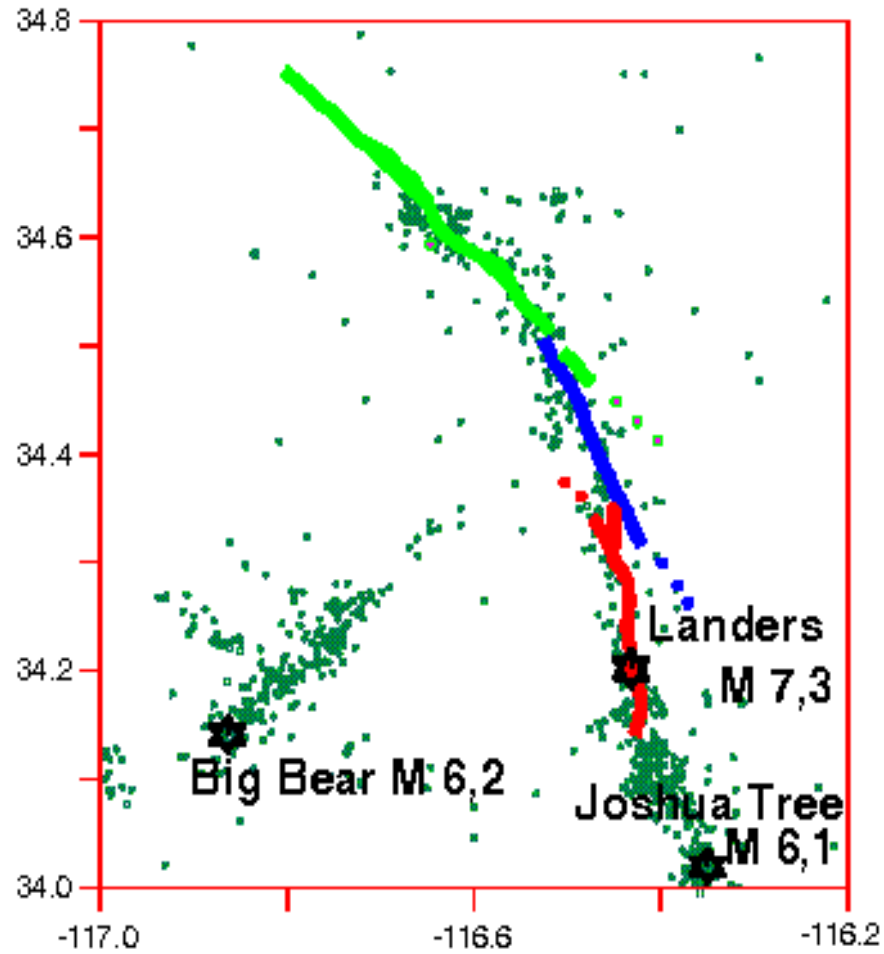
Kinematic inversion



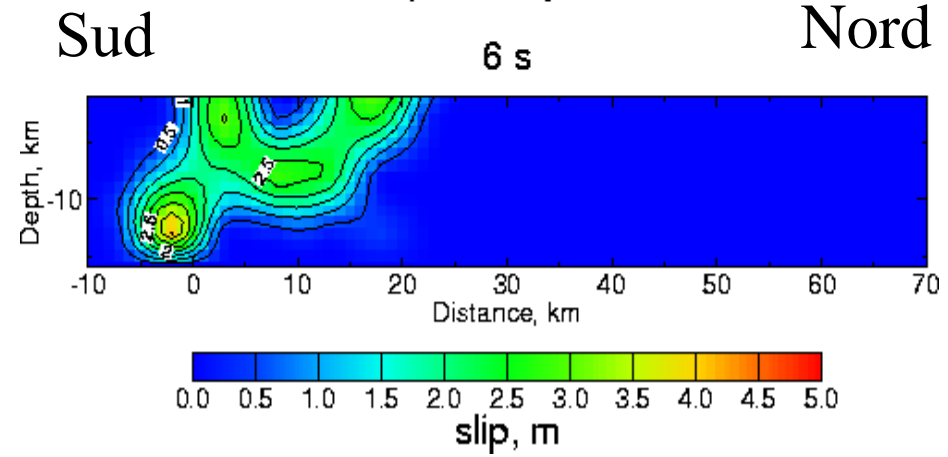
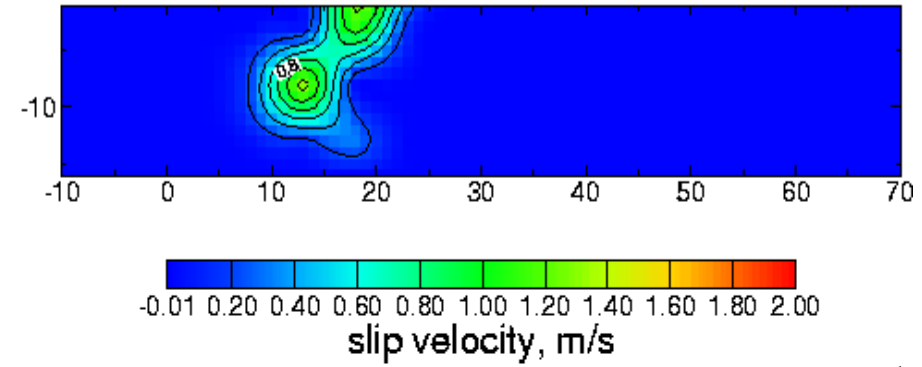
Landers earthquake



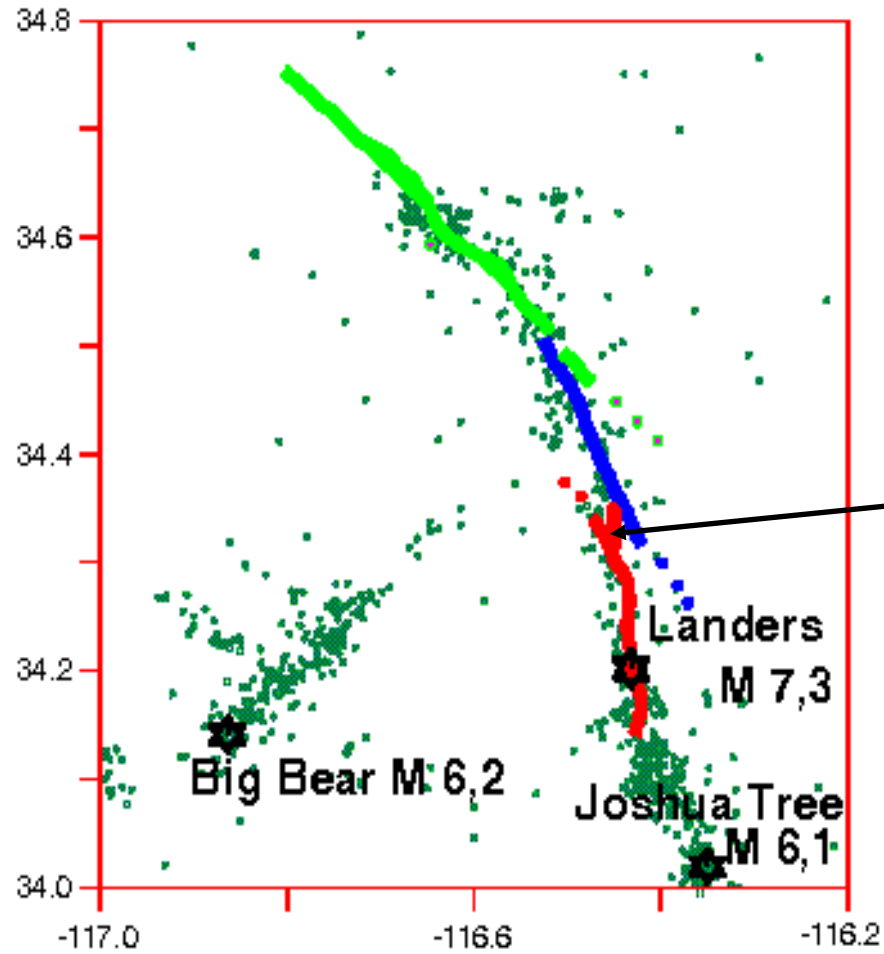
Kinematic inversion



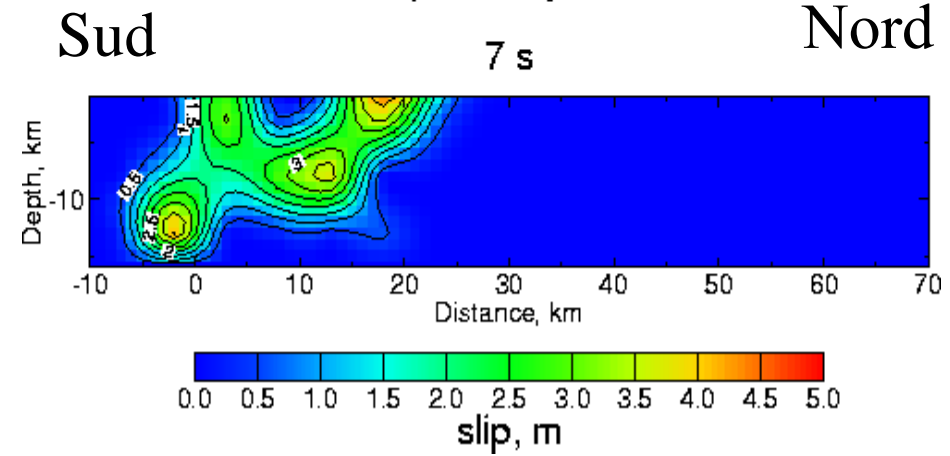
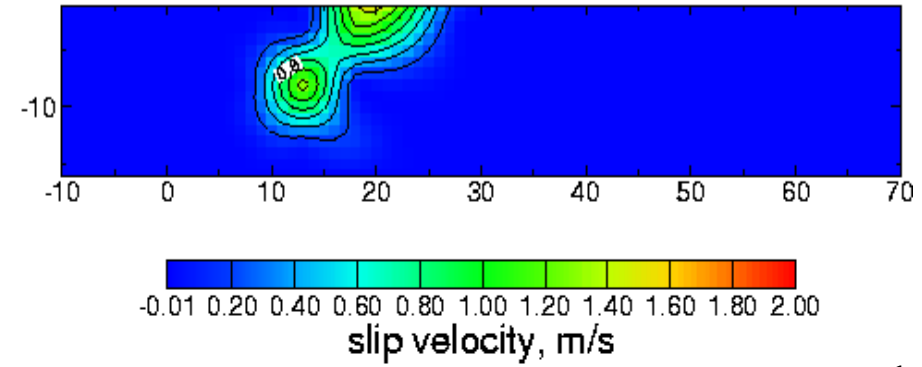
Landers earthquake



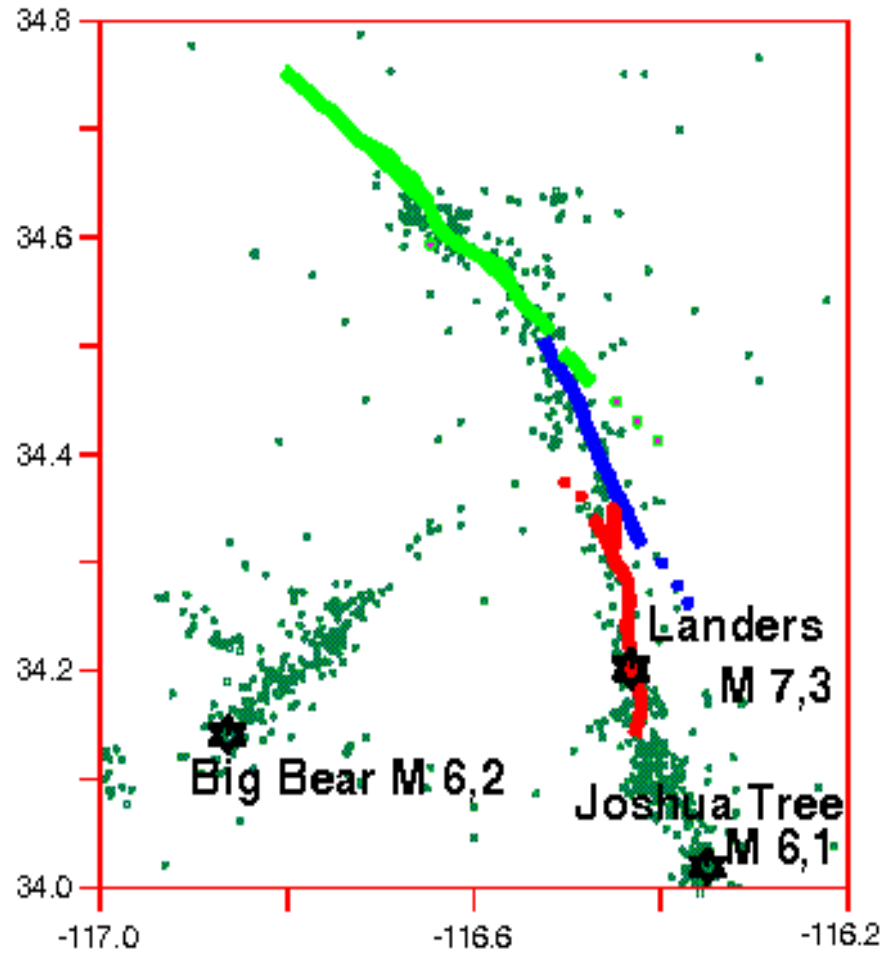
Kinematic inversion



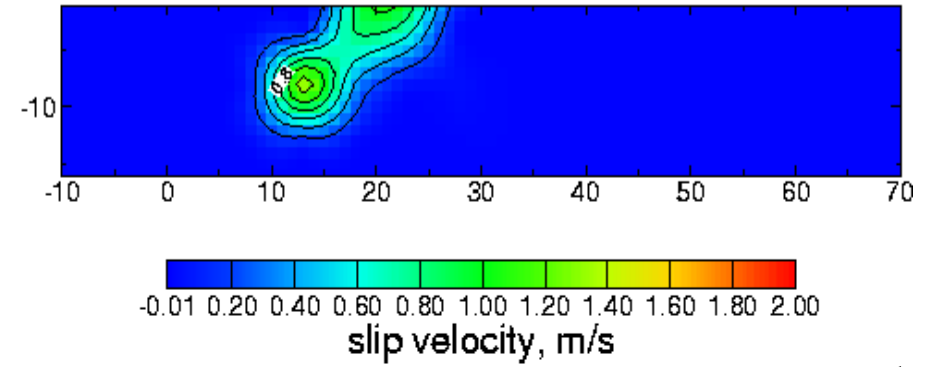
Landers earthquake



Kinematic inversion



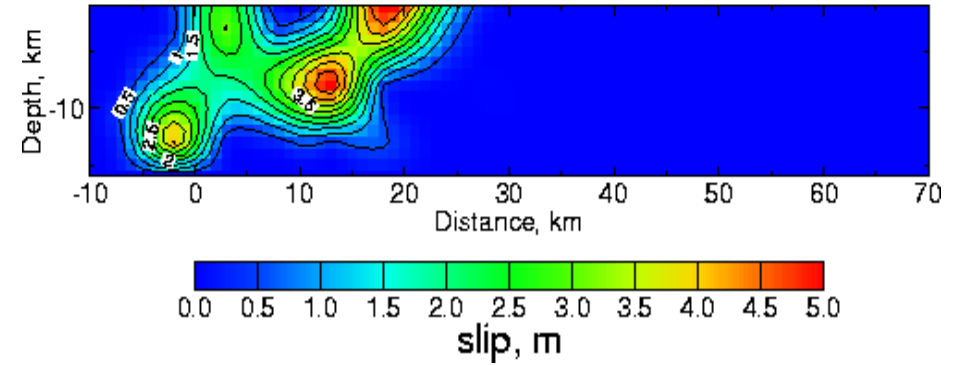
Landers earthquake



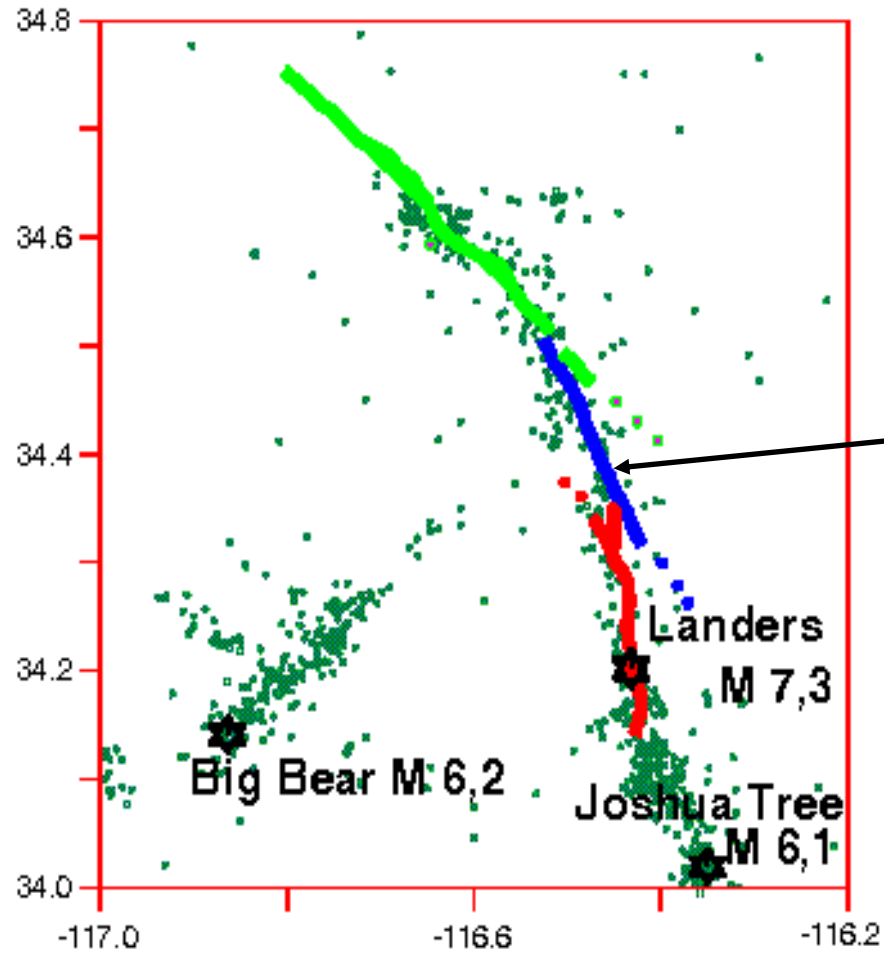
Sud

8 s

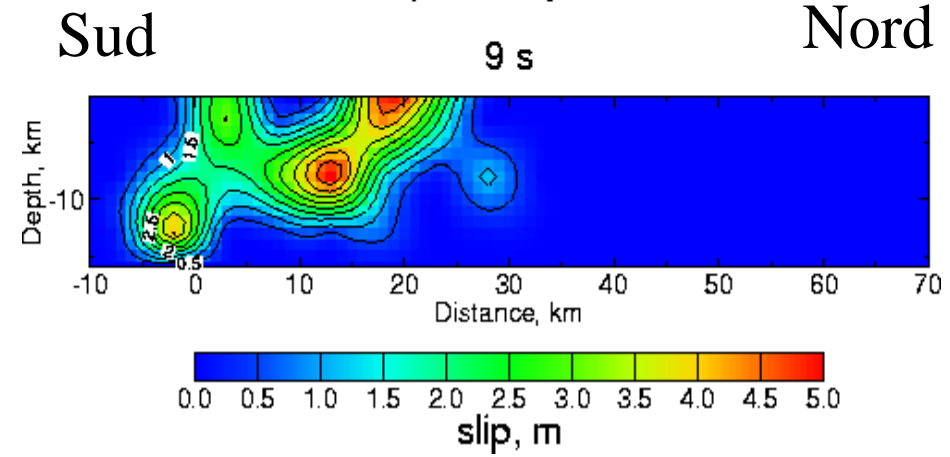
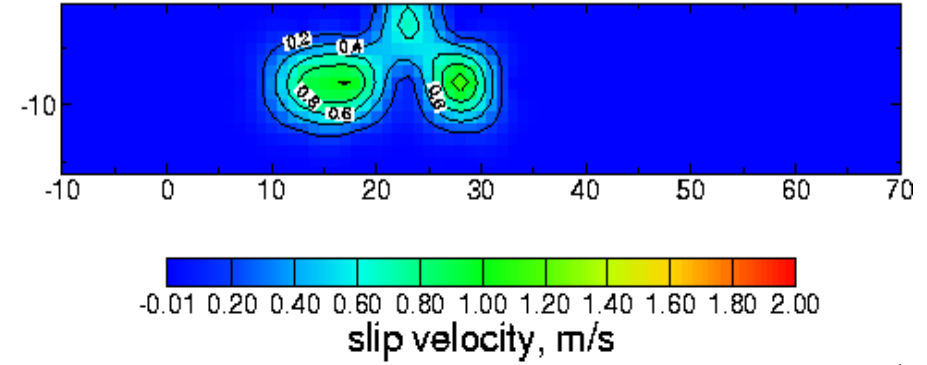
Nord



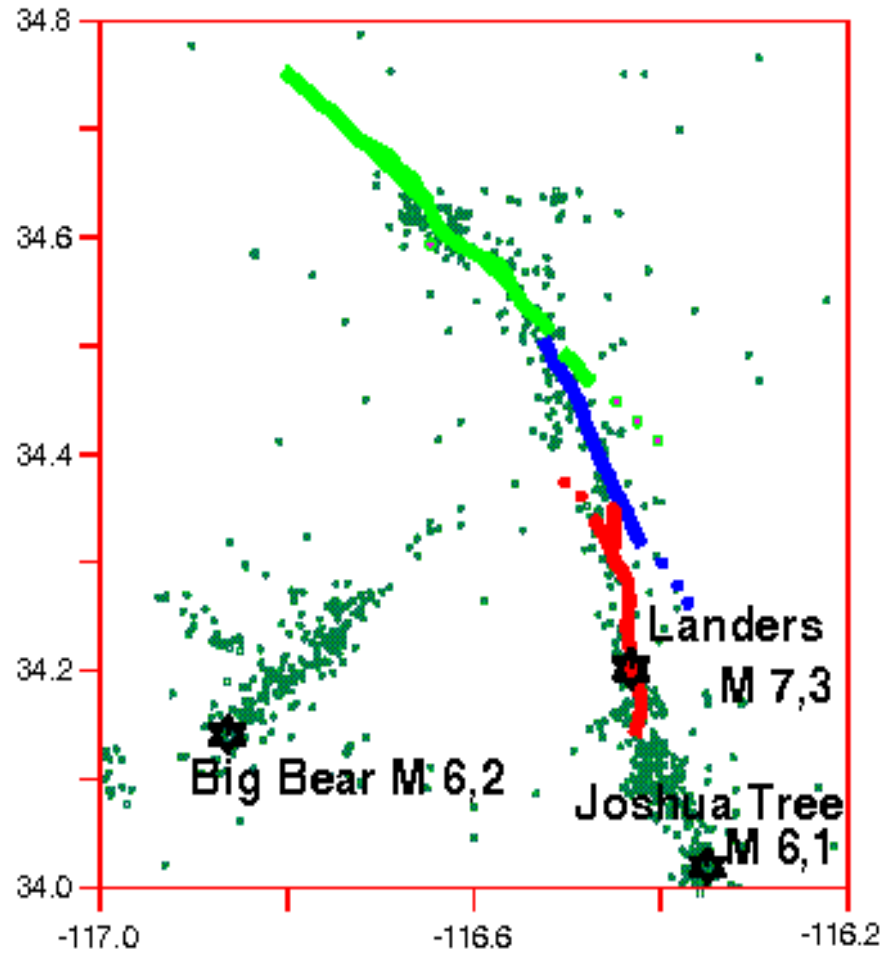
Kinematic inversion



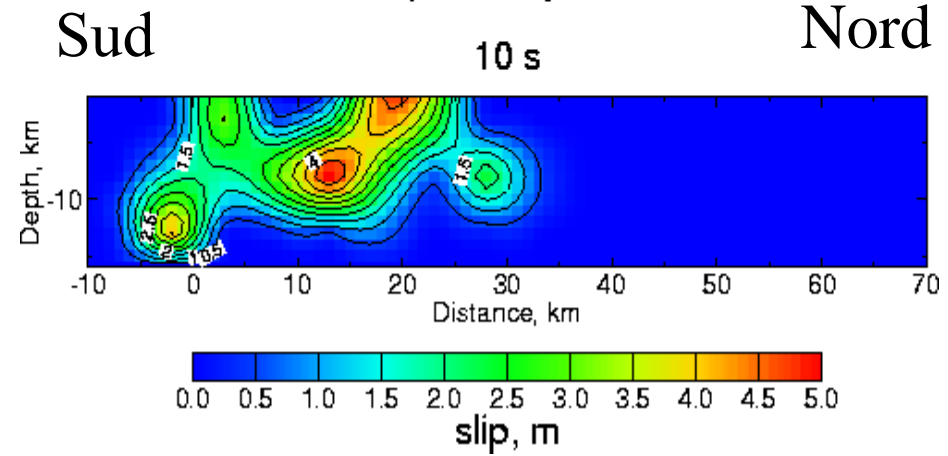
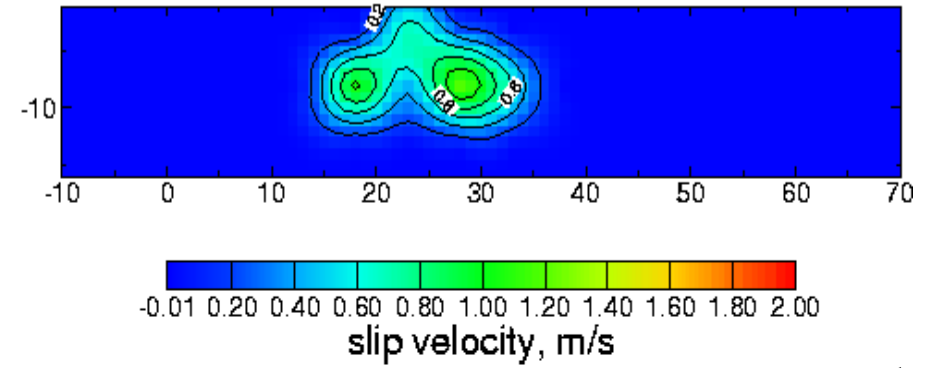
Landers earthquake



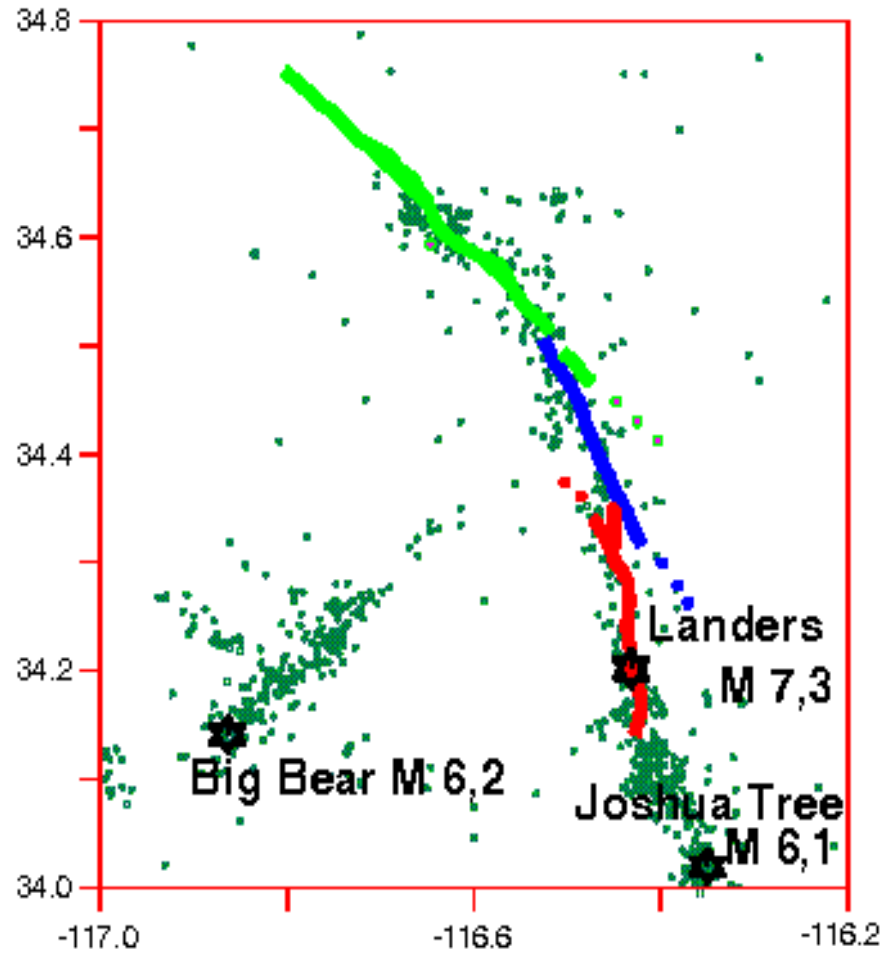
Kinematic inversion



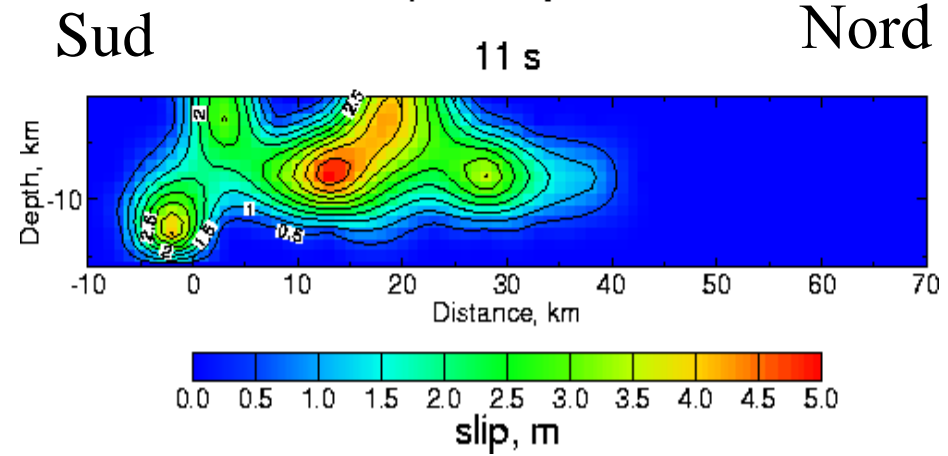
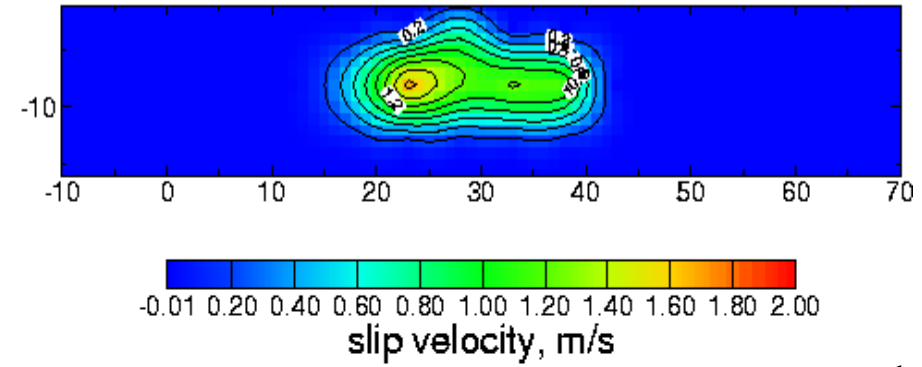
Landers earthquake



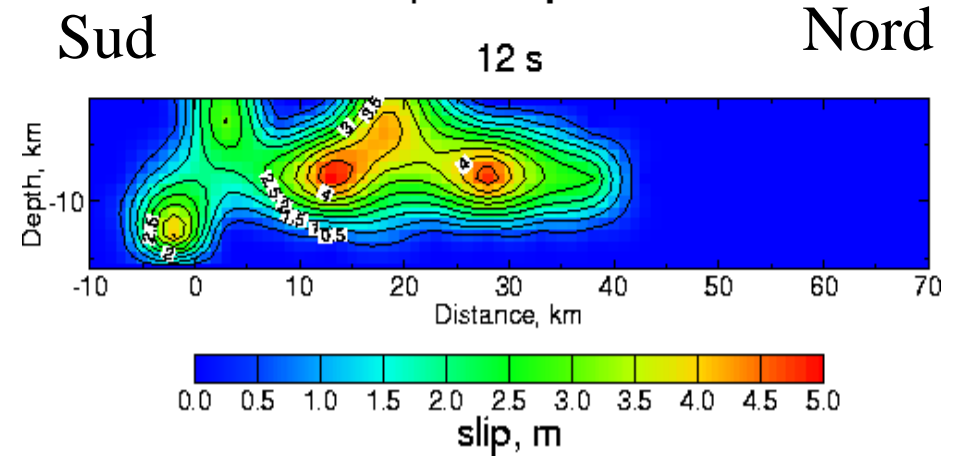
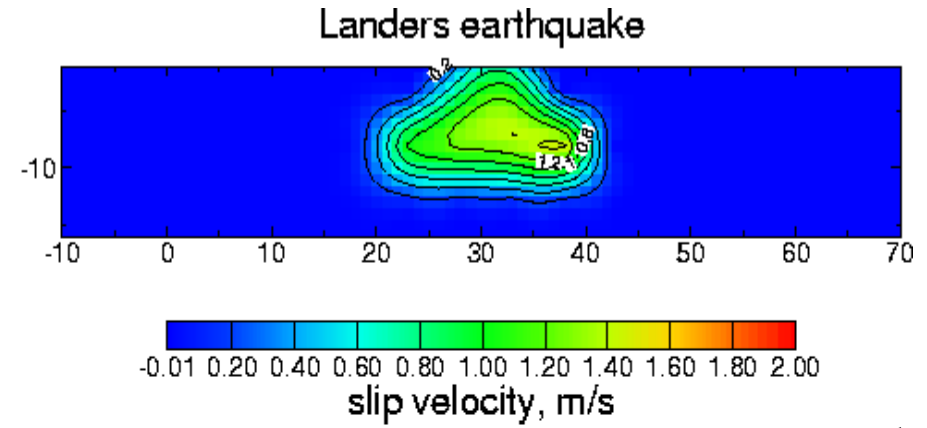
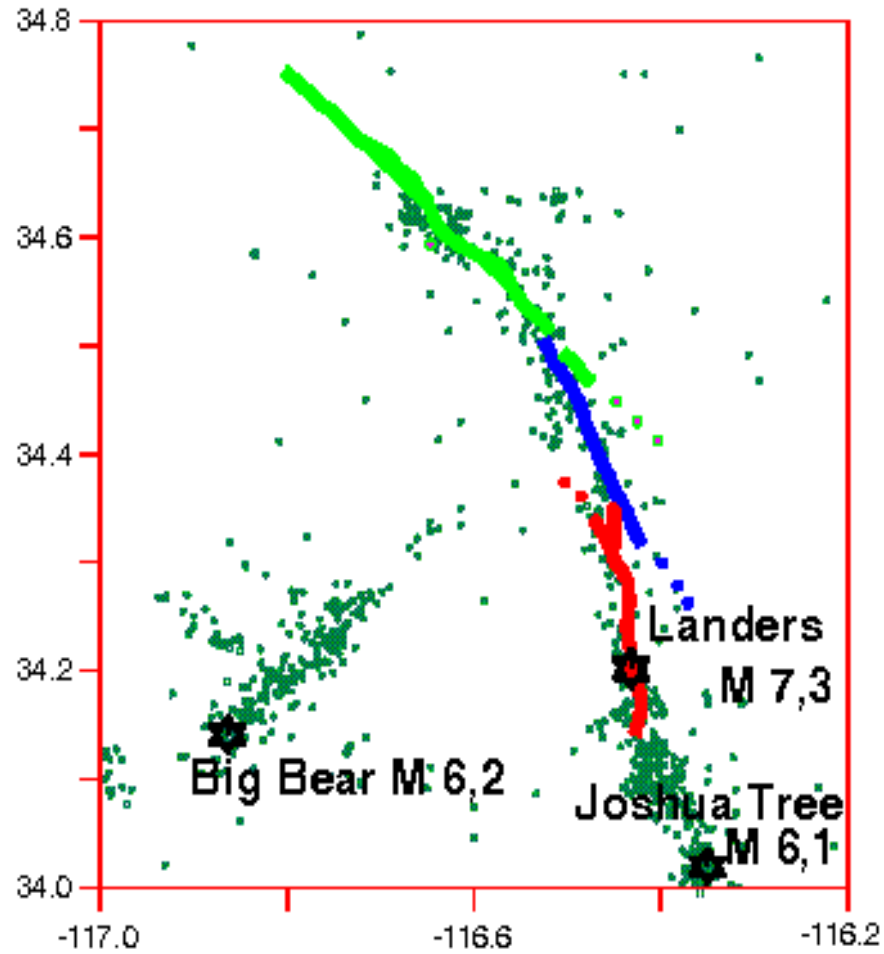
Kinematic inversion



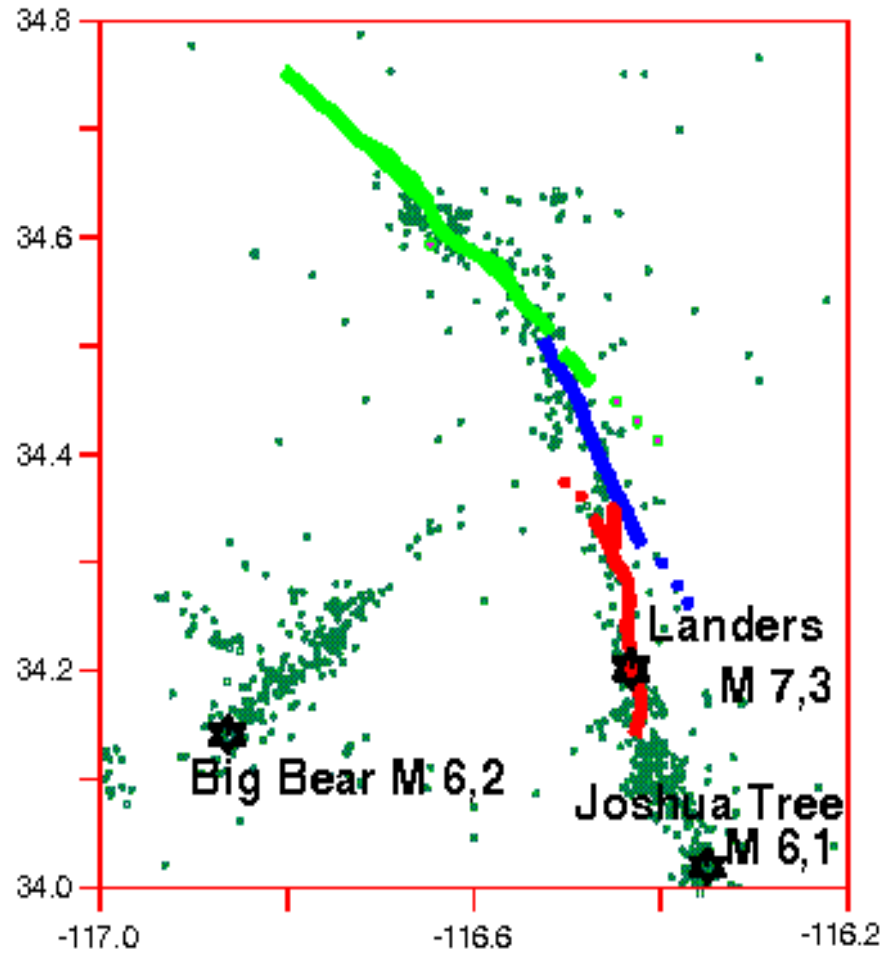
Landers earthquake



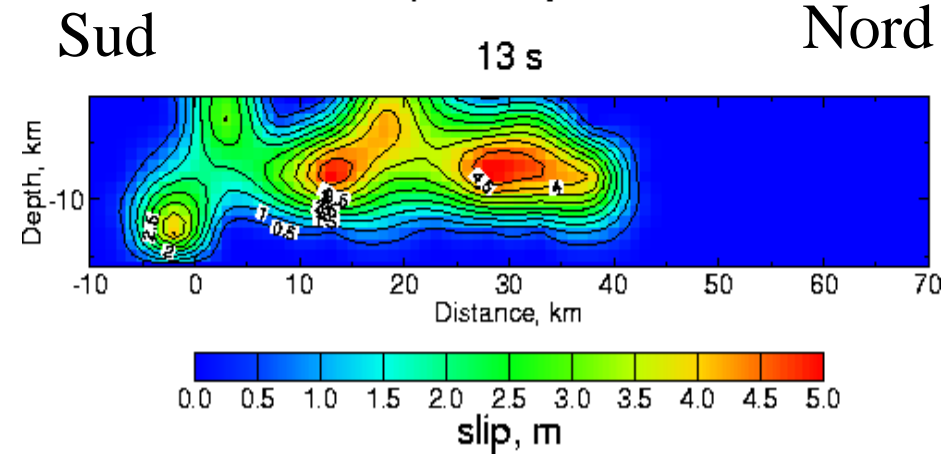
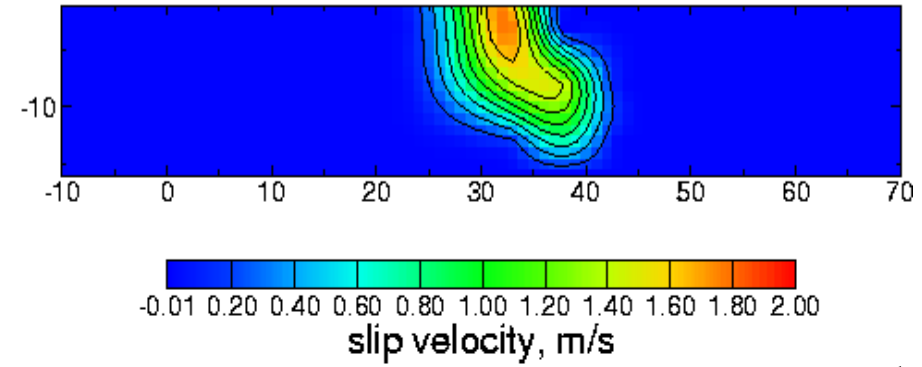
Kinematic inversion



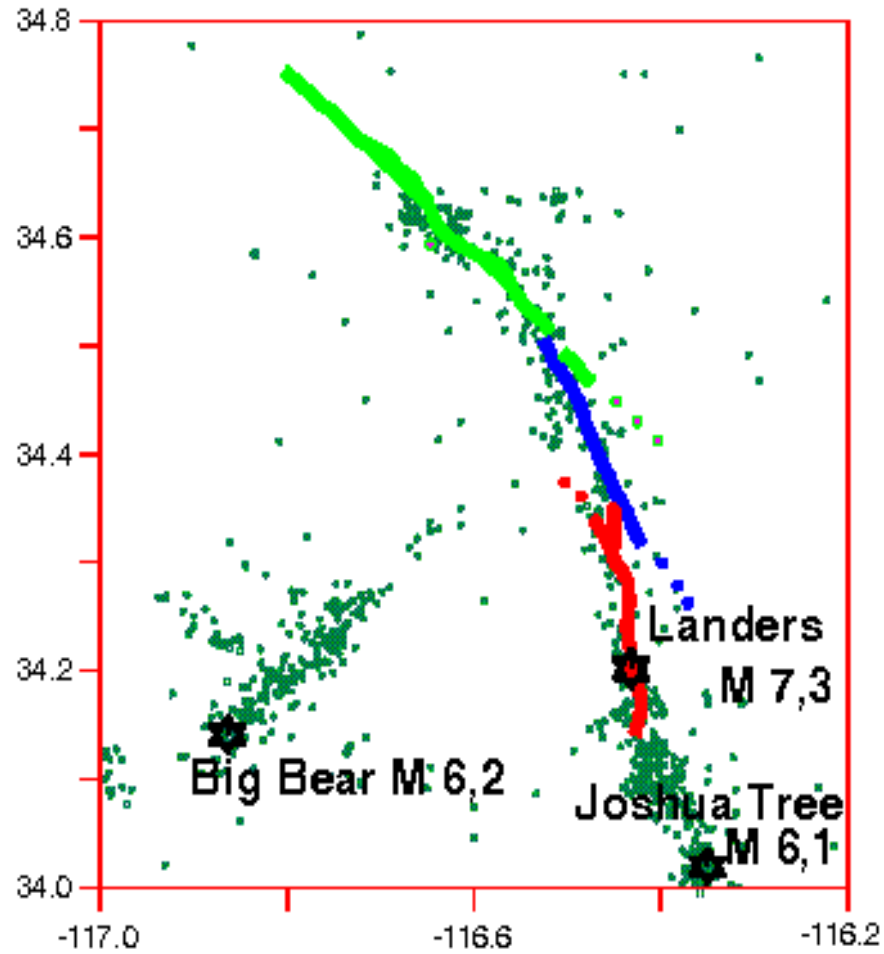
Kinematic inversion



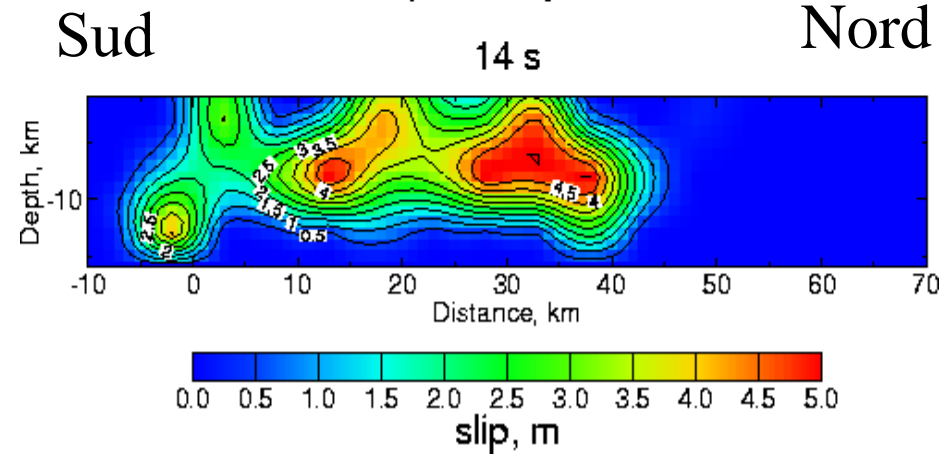
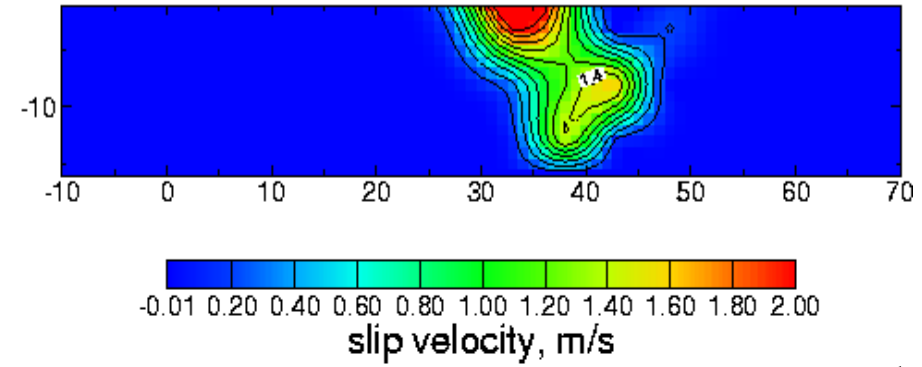
Landers earthquake



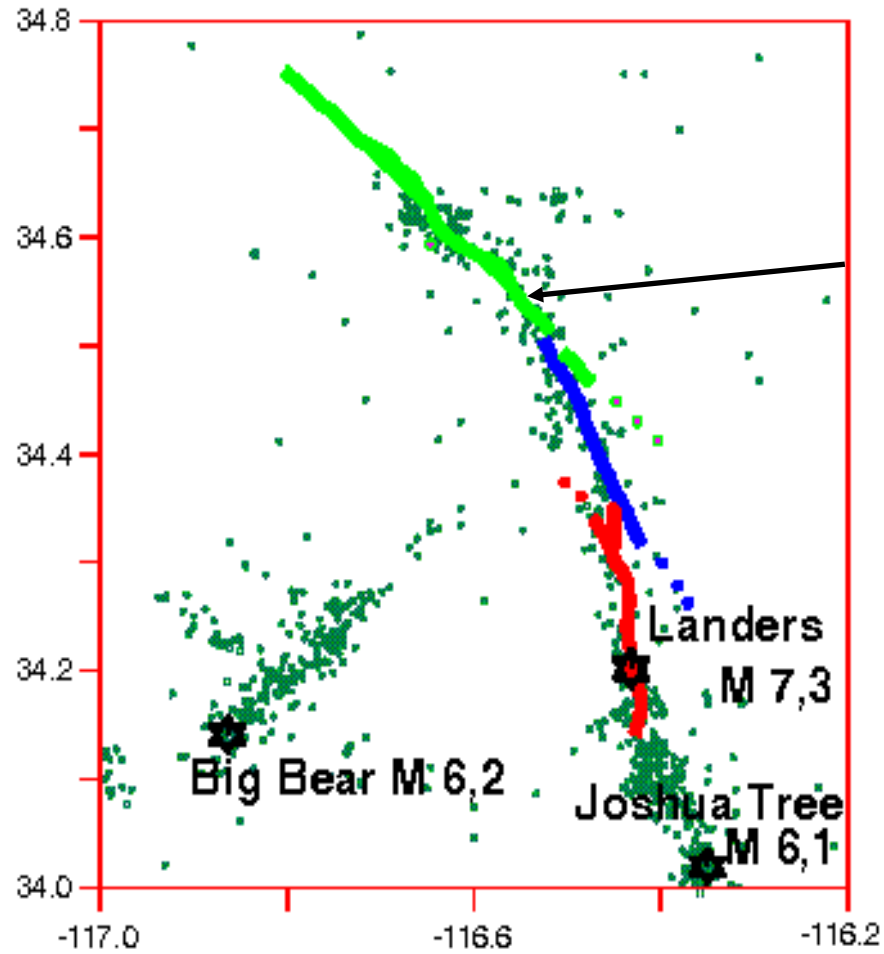
Kinematic inversion



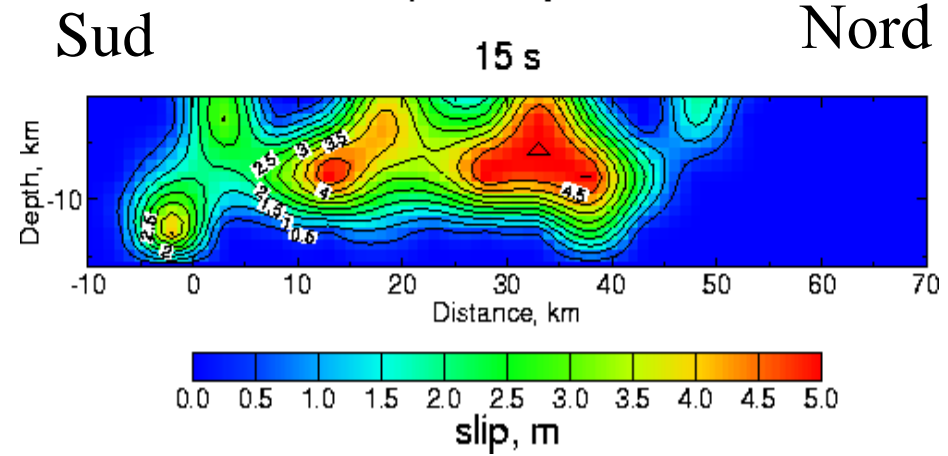
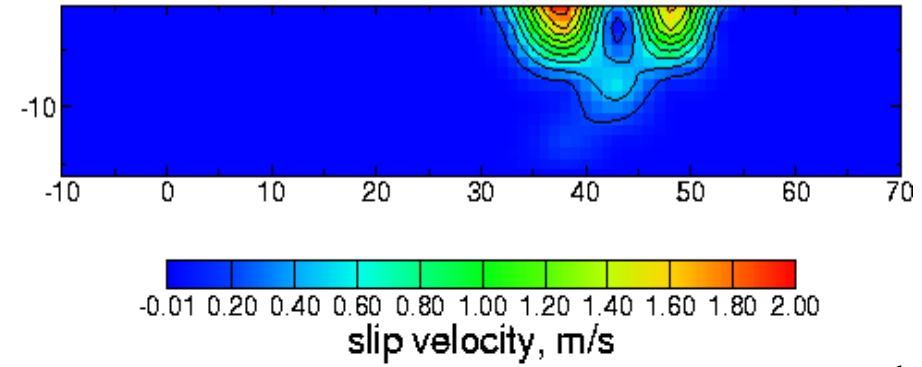
Landers earthquake



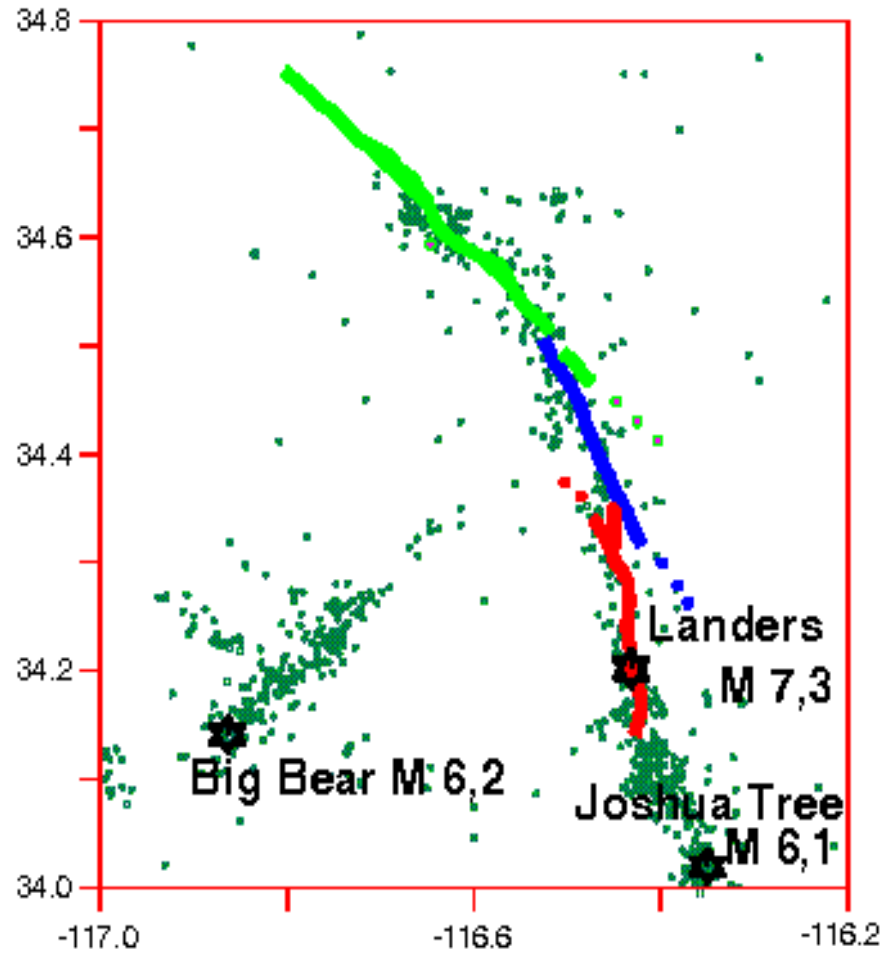
Kinematic inversion



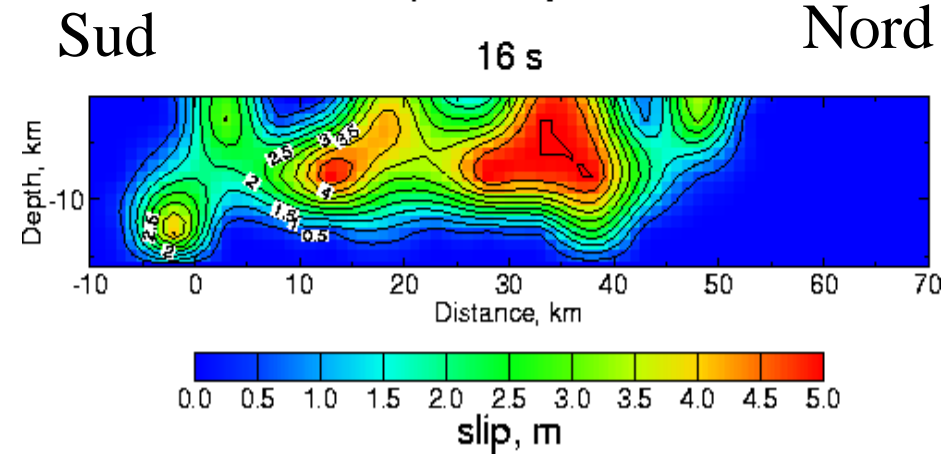
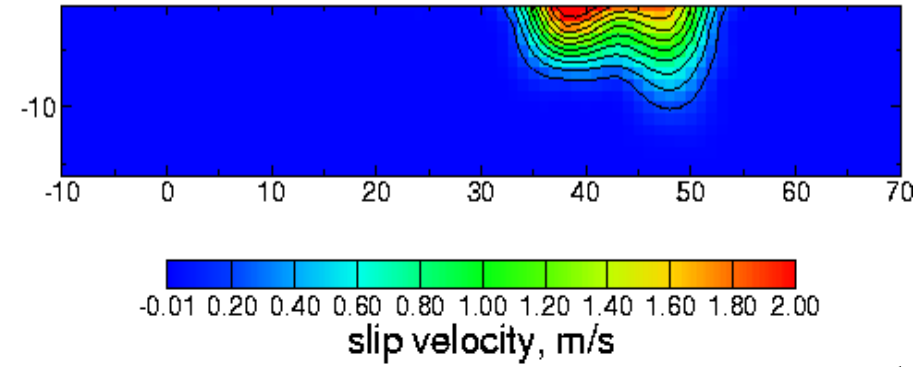
Landers earthquake



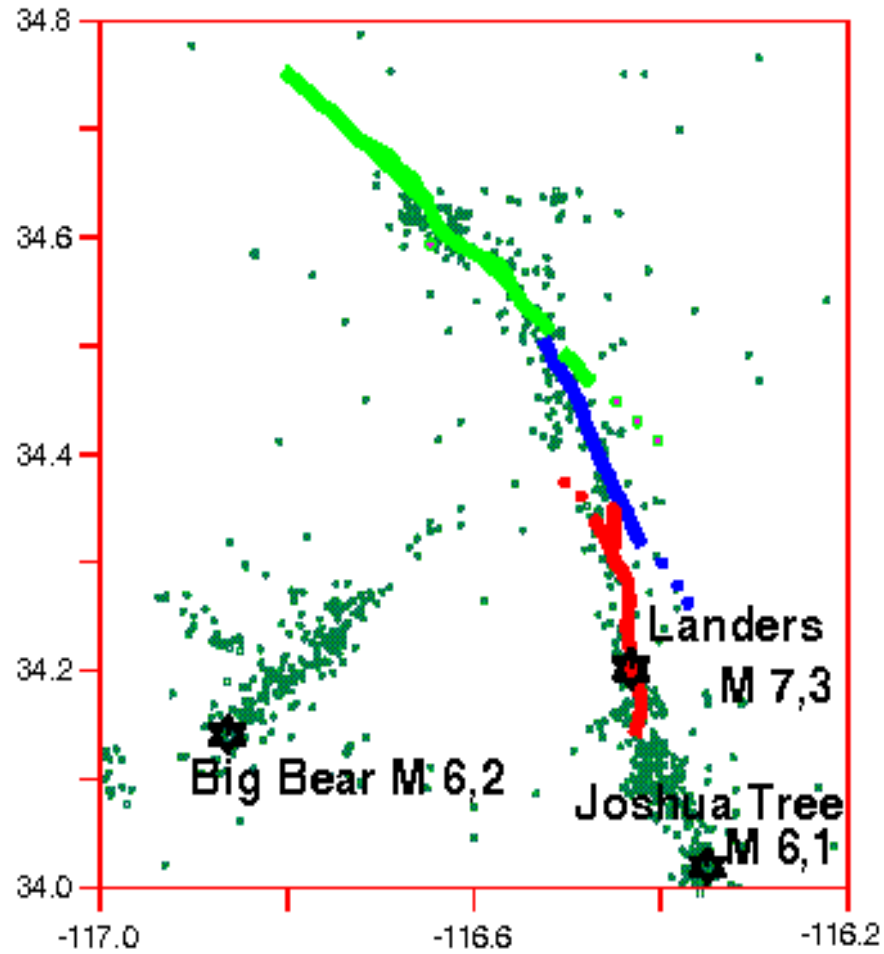
Kinematic inversion



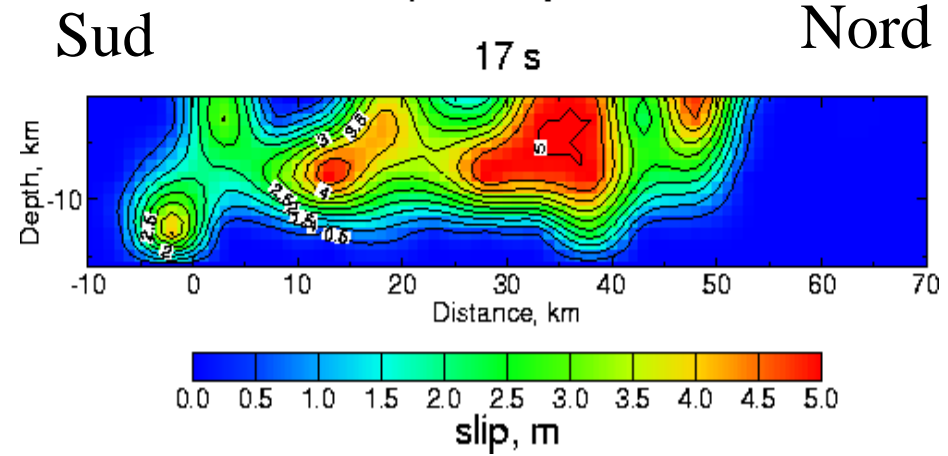
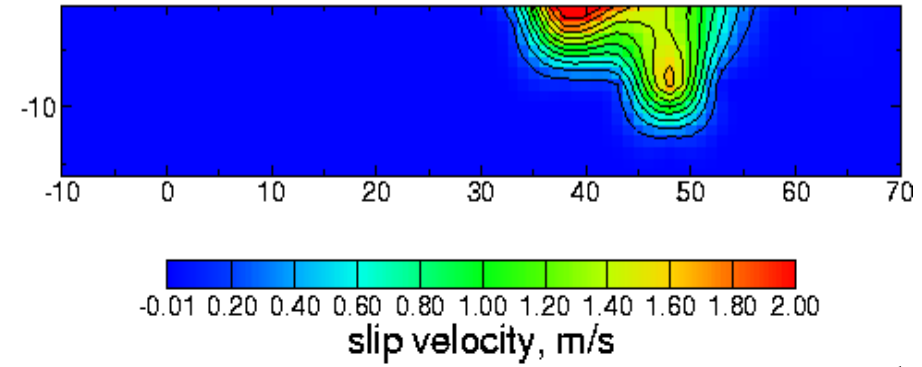
Landers earthquake



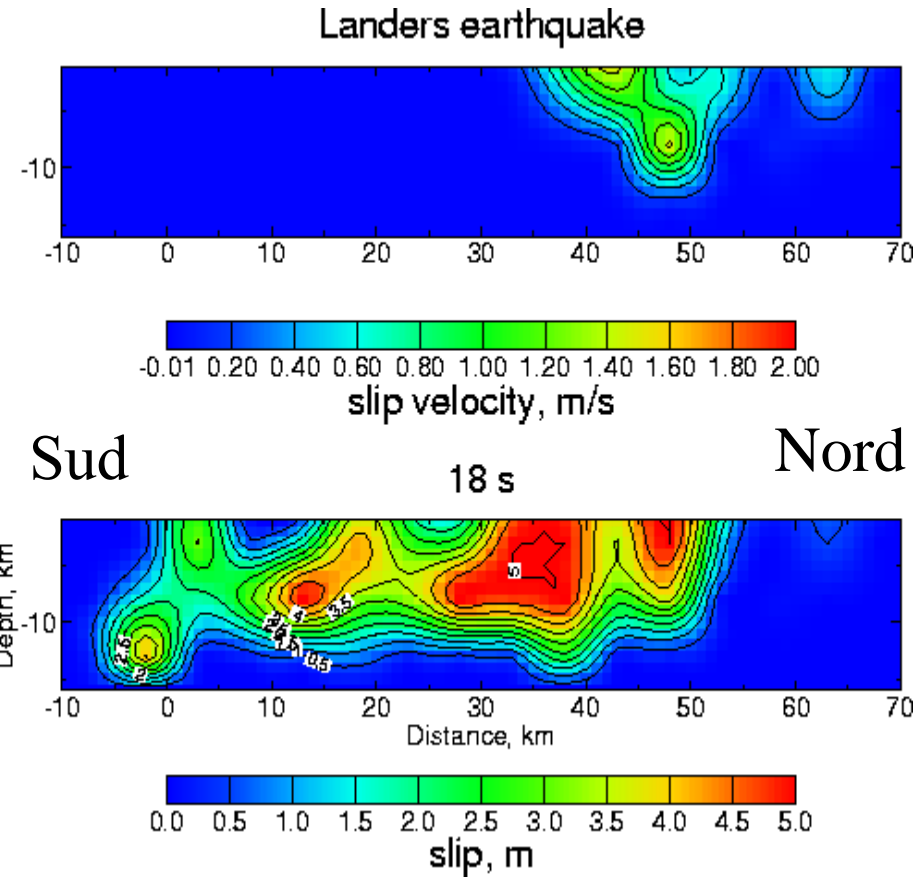
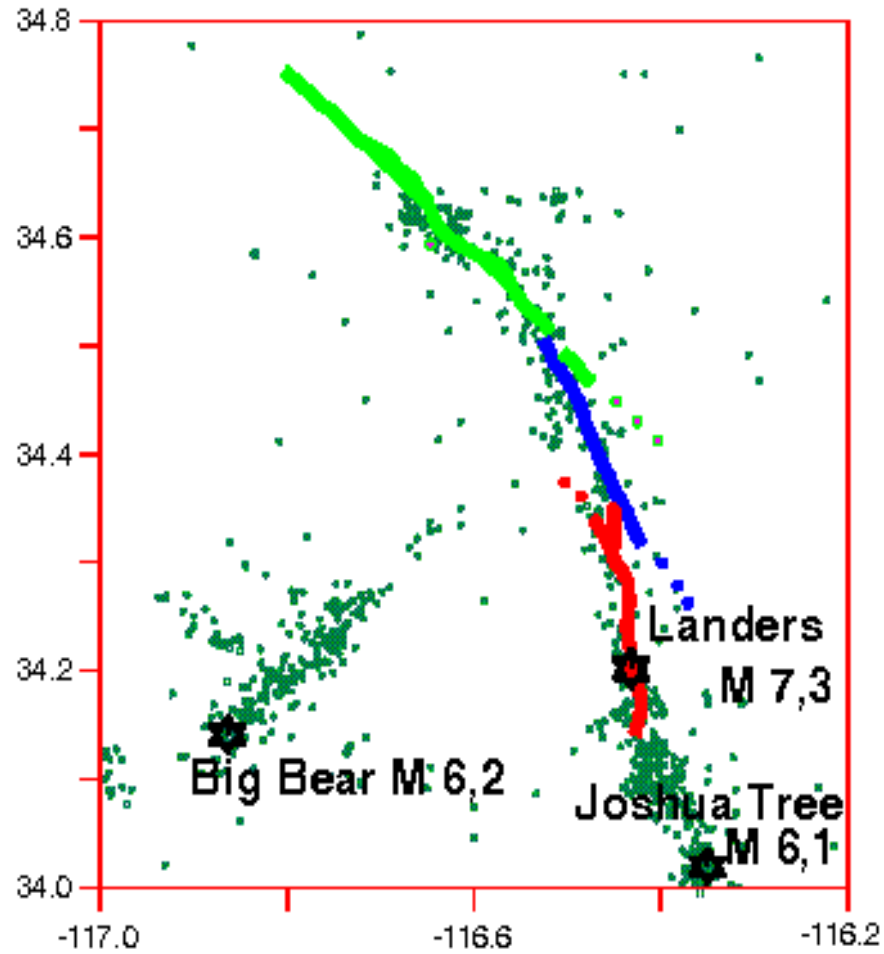
Kinematic inversion



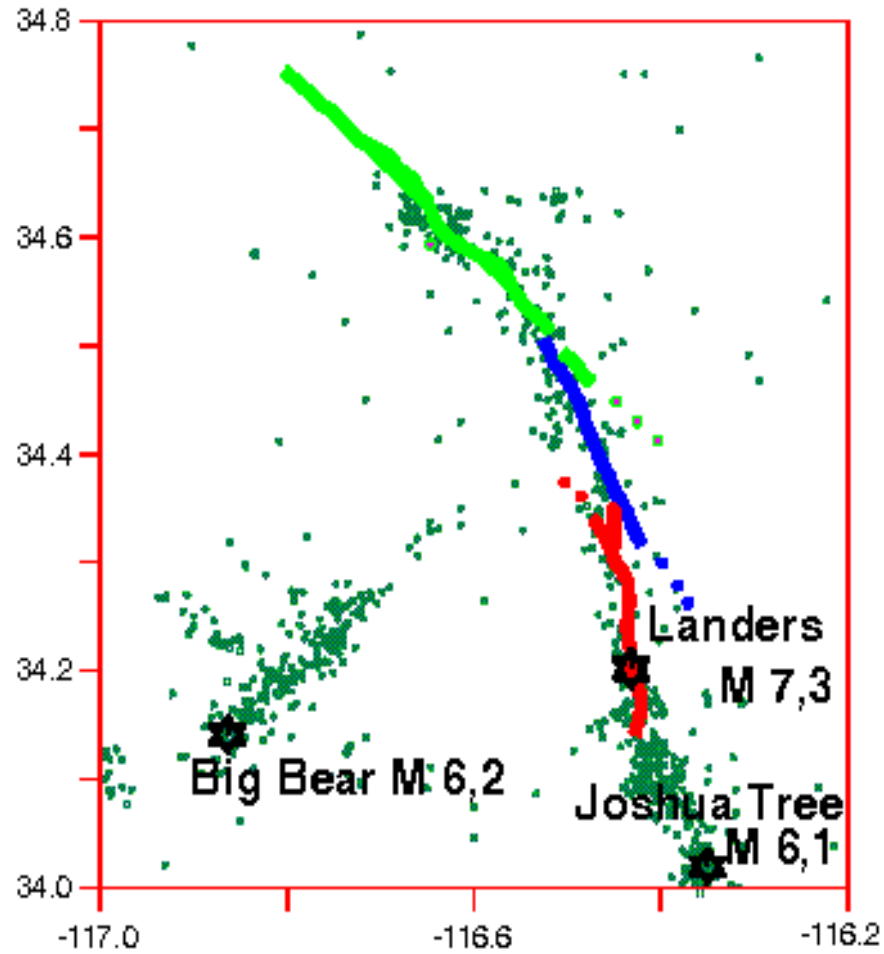
Landers earthquake



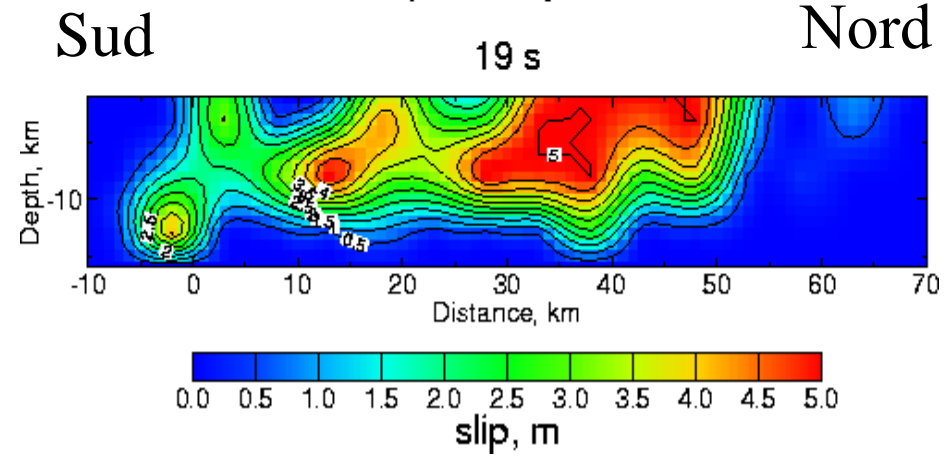
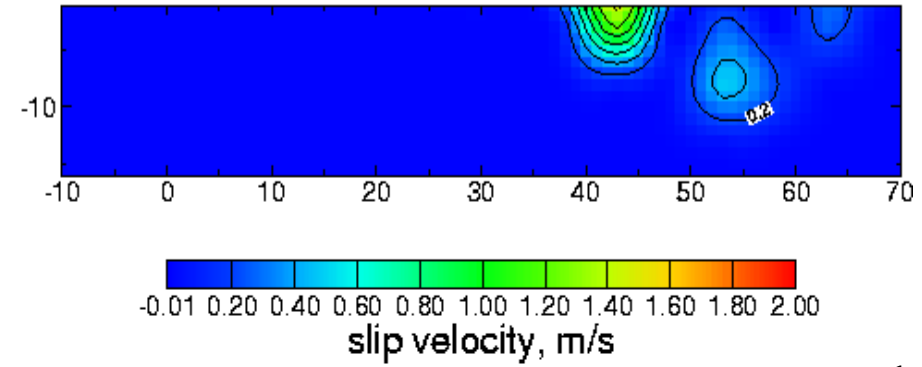
Kinematic inversion



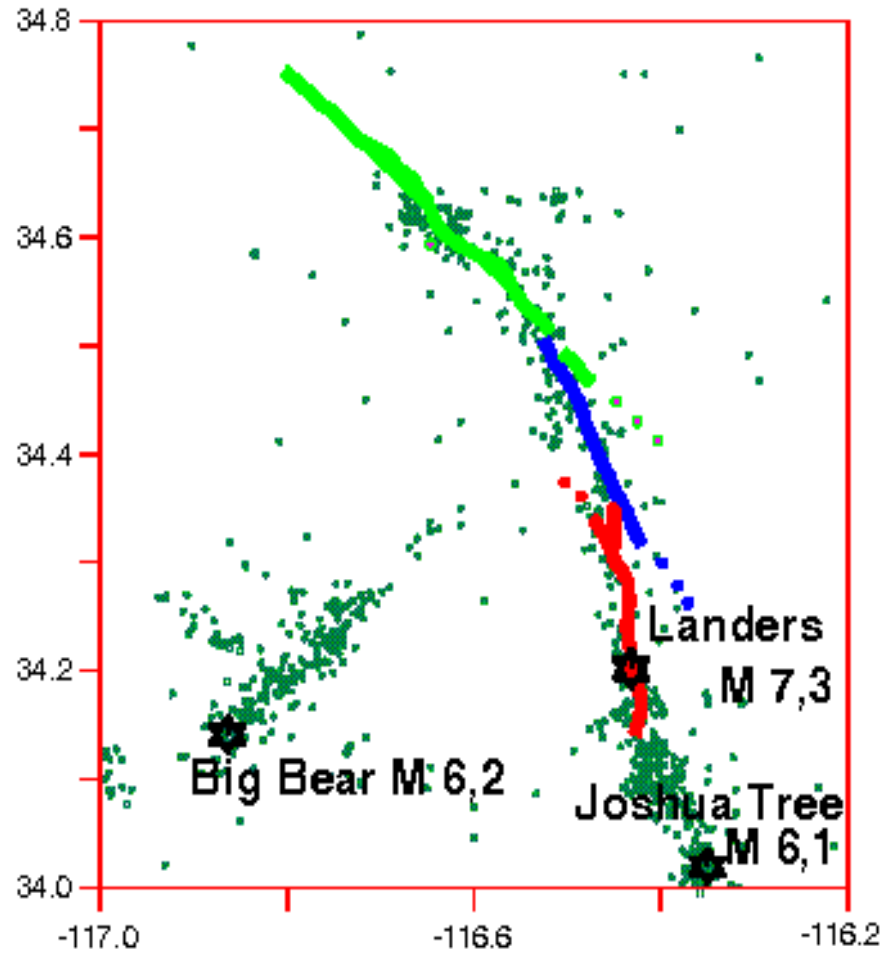
Kinematic inversion



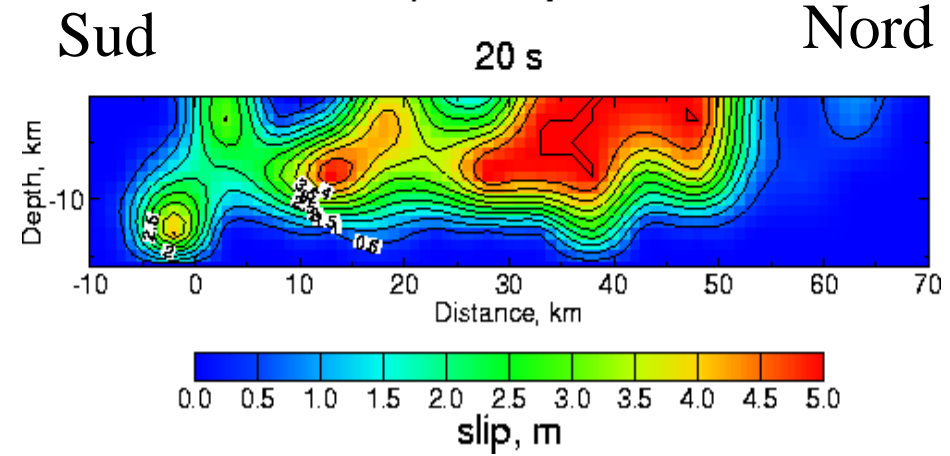
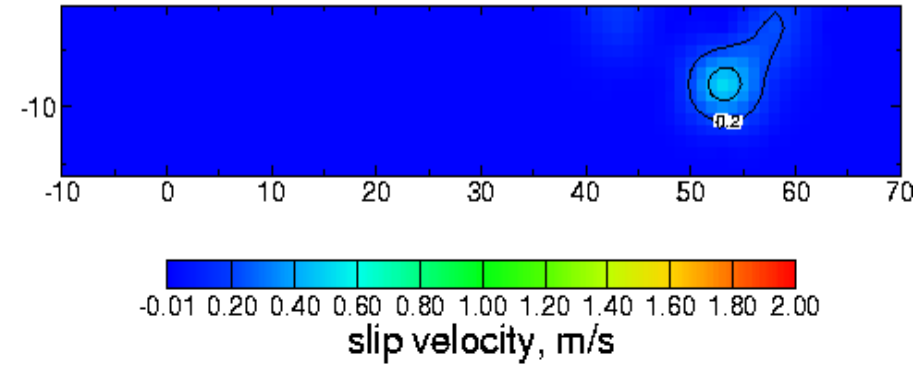
Landers earthquake



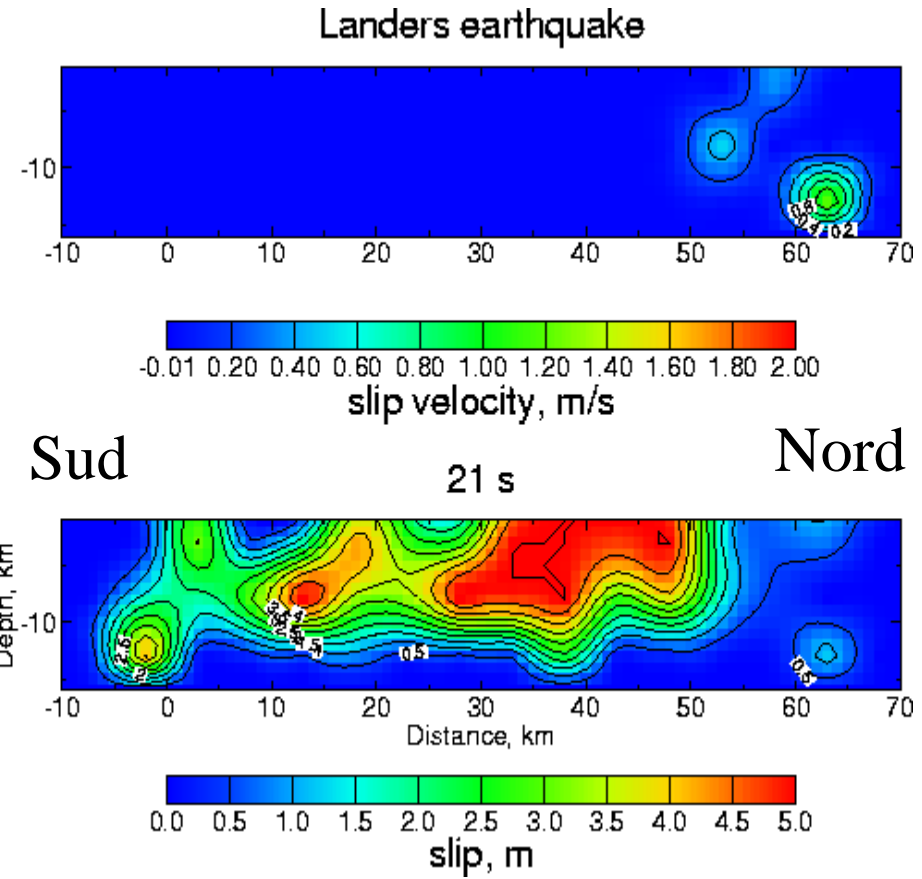
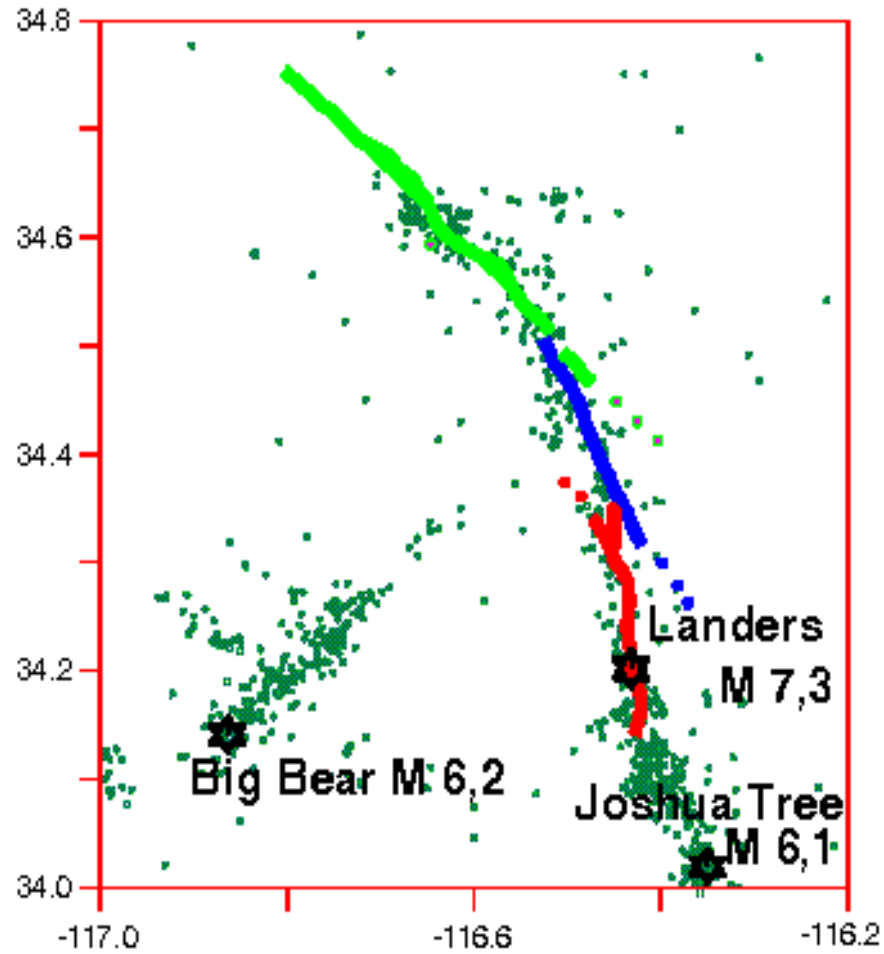
Kinematic inversion



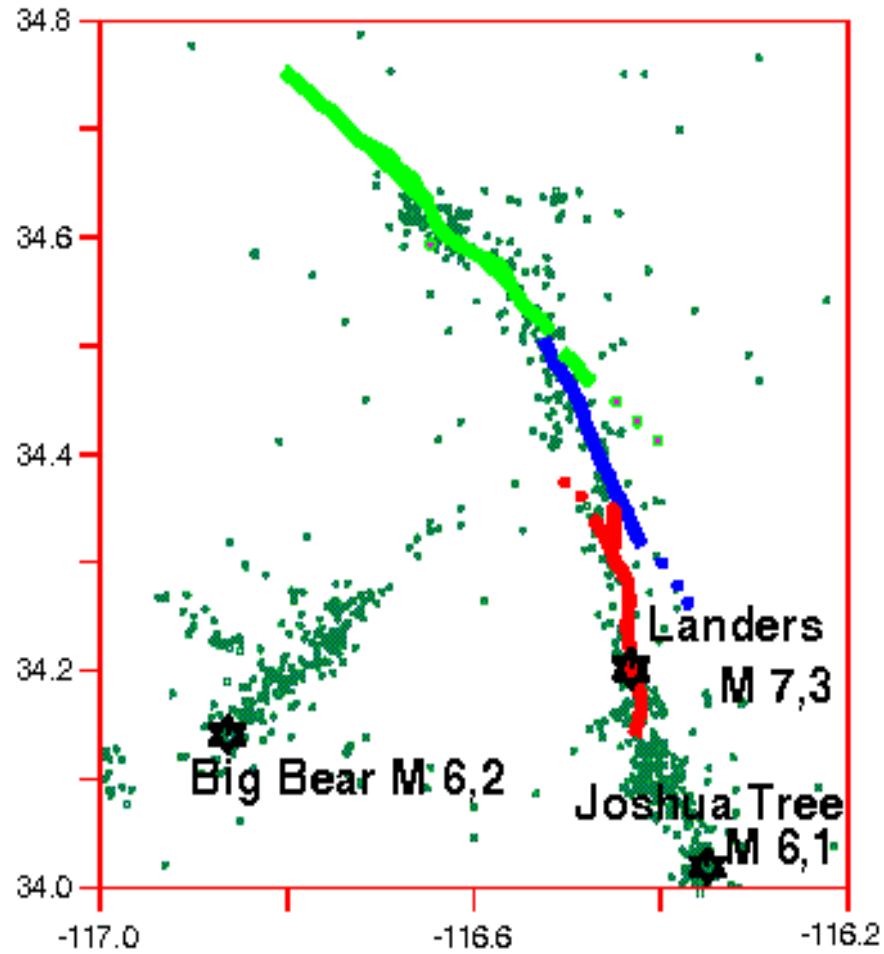
Landers earthquake



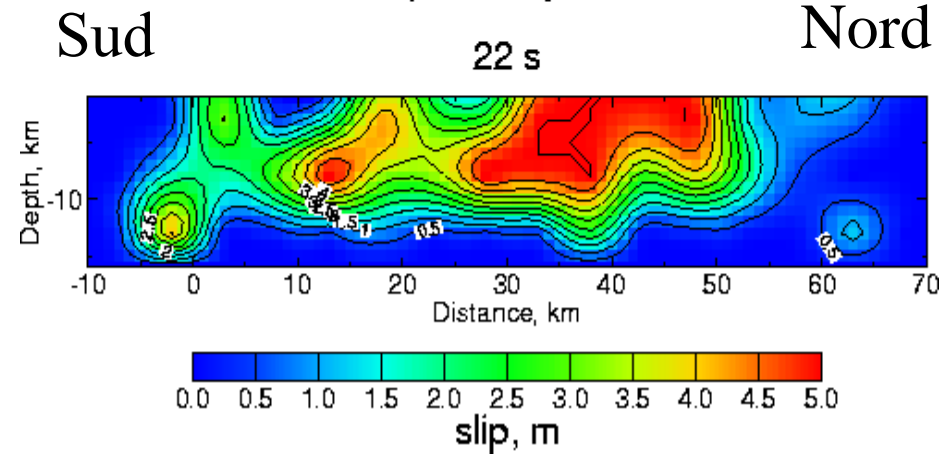
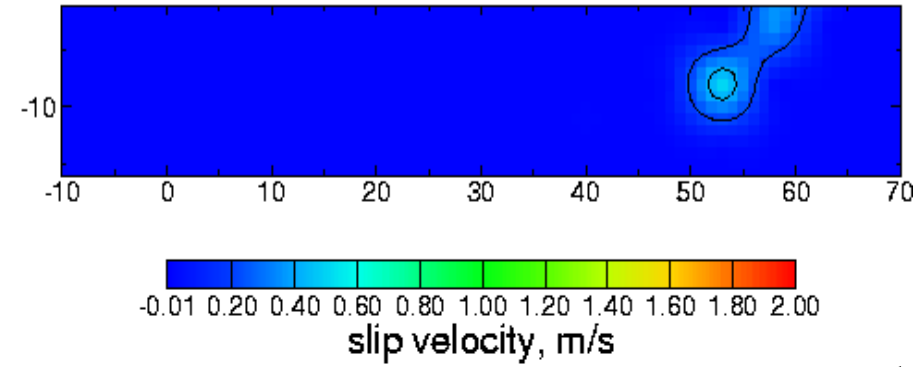
Kinematic inversion



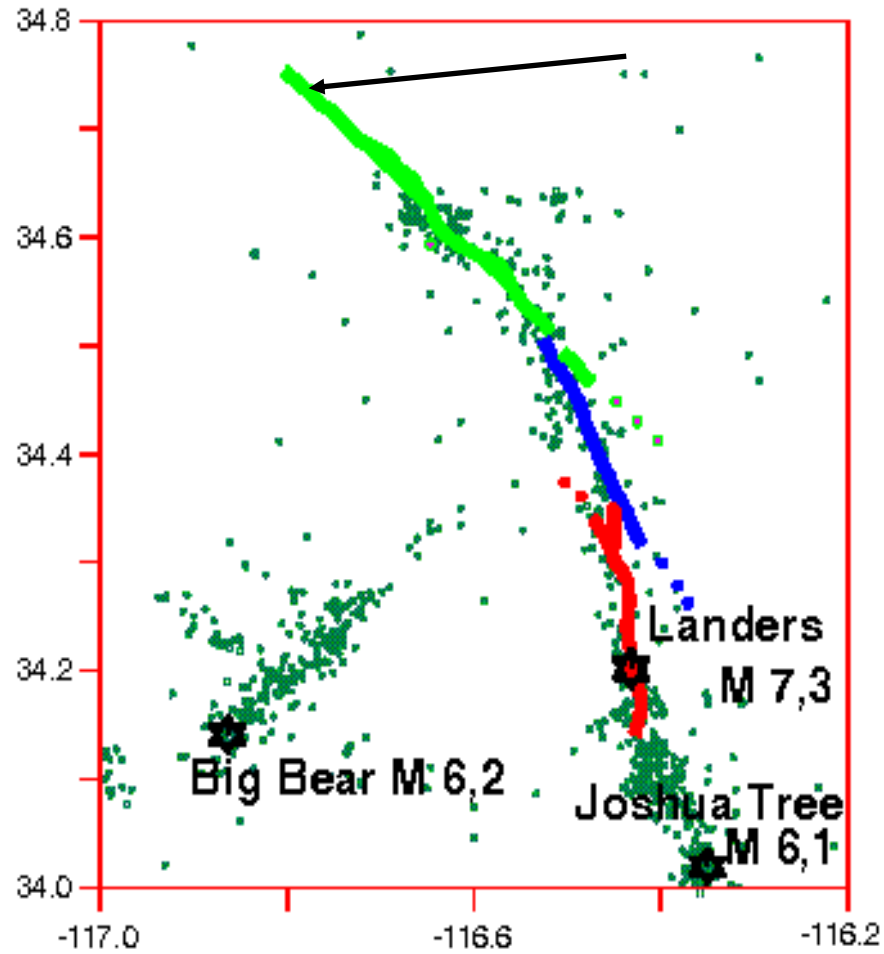
Kinematic inversion



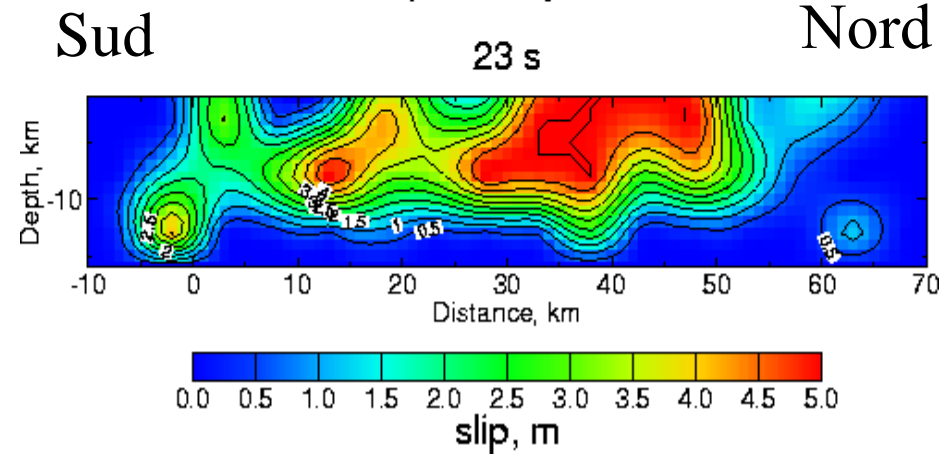
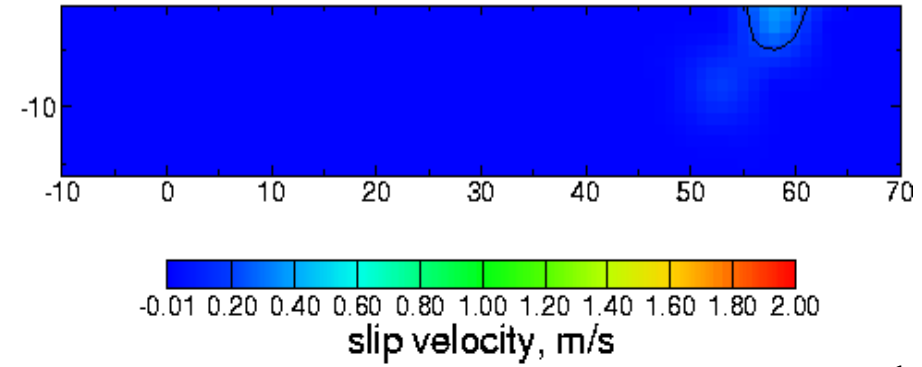
Landers earthquake



Kinematic inversion

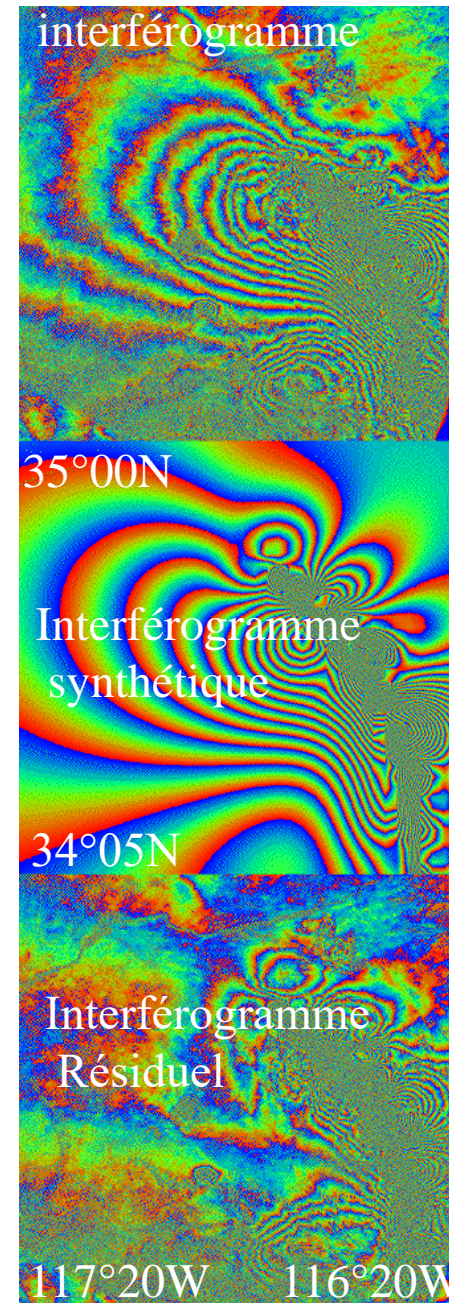
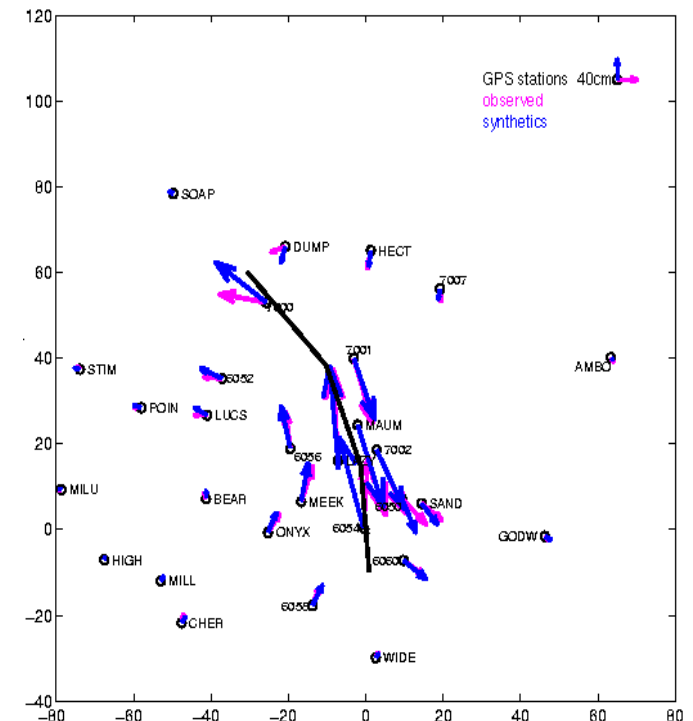
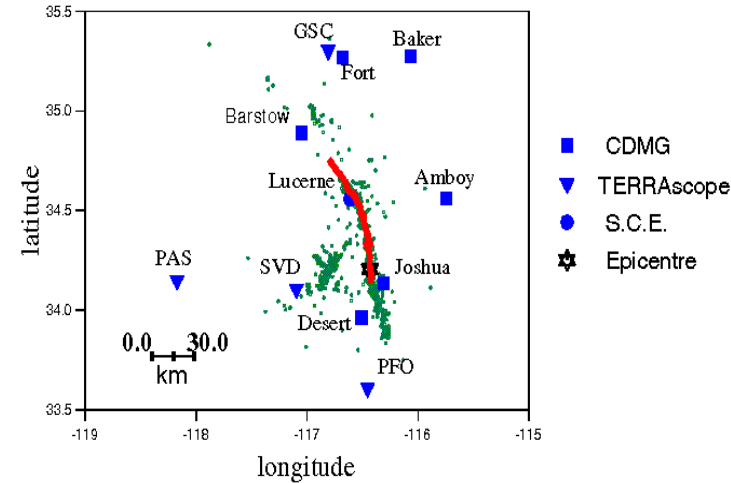
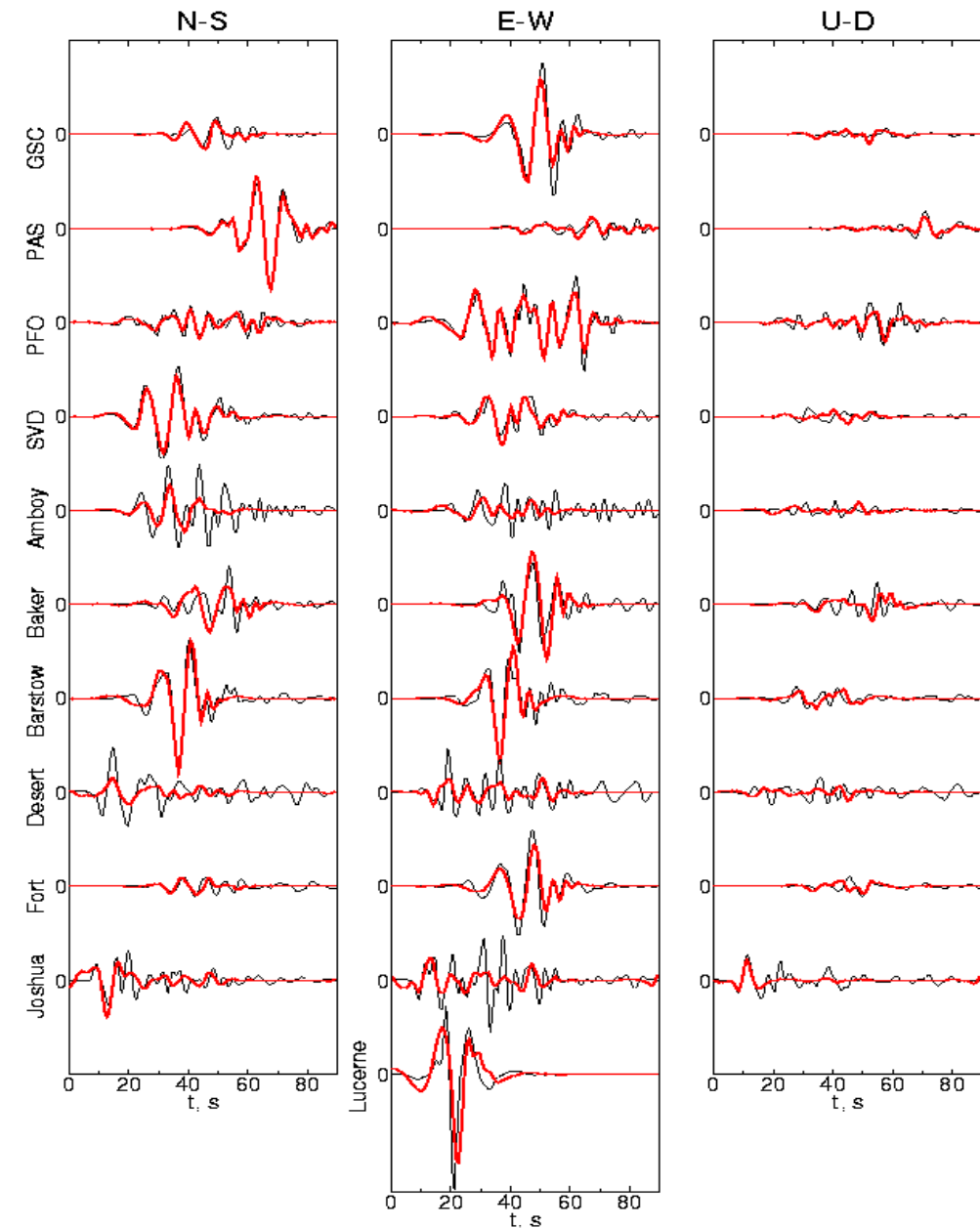


Landers earthquake



Propagation de la rupture sismique

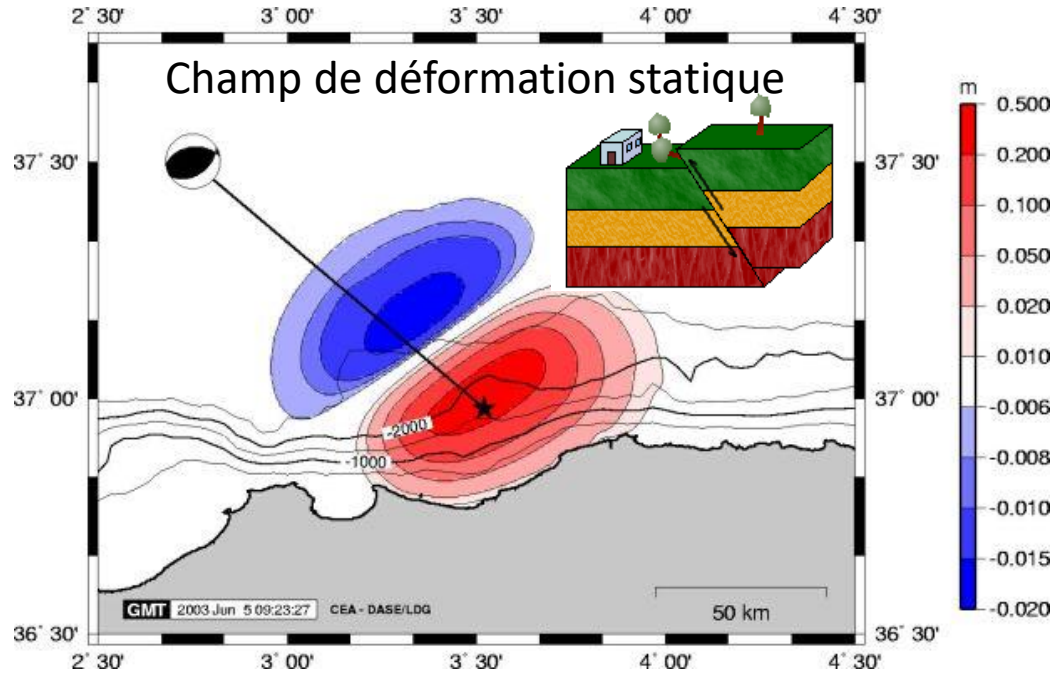
Data fit



Paramètres de la source pour les simulations tsunami

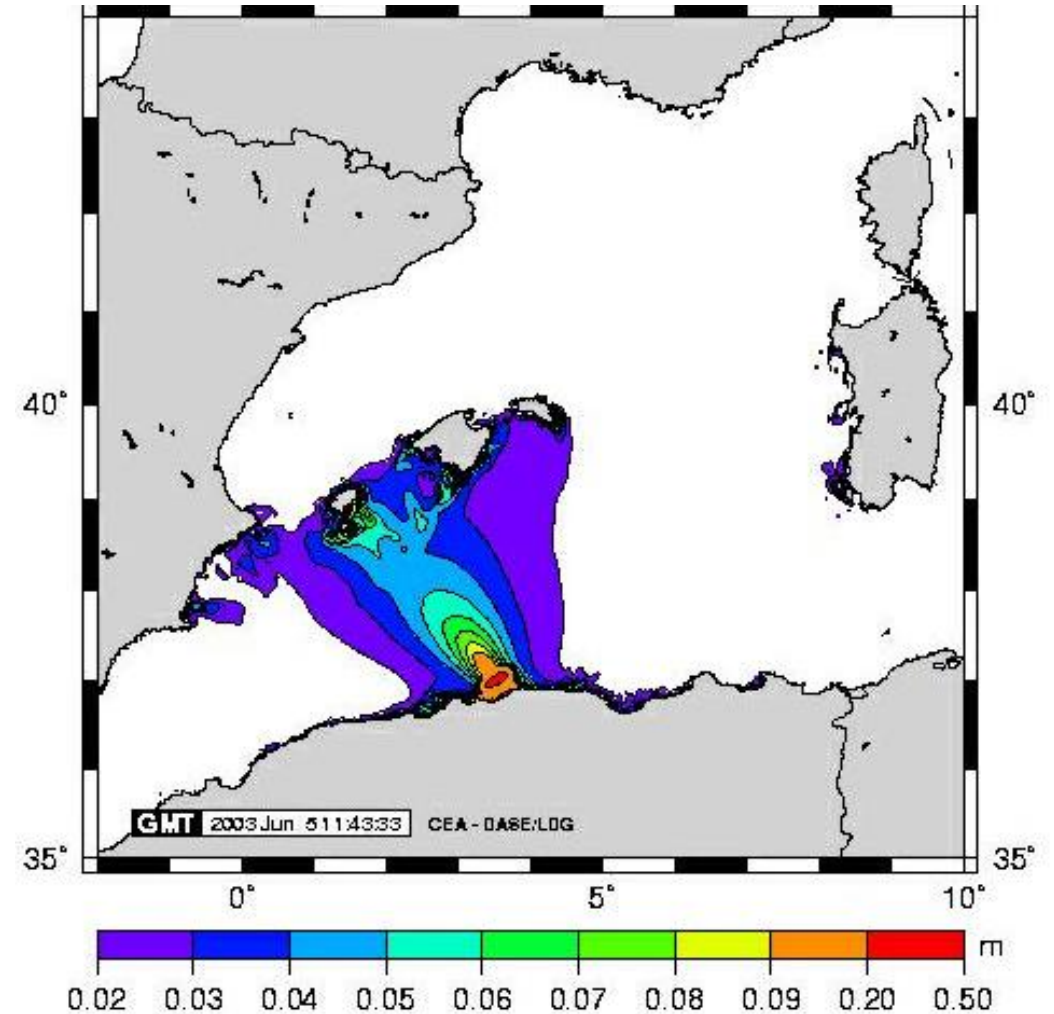
Déformation cosismique de la surface terrestre

Static deformation field



Tsunami du 21 mai 2003

Simulation des hauteurs d'eau maximales atteintes après 1h30 min de propagation



Dimensions de la faille	40 x 20 km ²
Strike, dip, rake	56°, 46°, 71°
Moment sismique	0,2x10 ²⁰ Nm
Module de cisaillement	30x10 ⁹ N/m ² = 30 GPa
Epicentre	3.52°E - 36.98°N
Profondeur	17 km

Modélisation dynamique de la rupture sismique

Objectif : simuler la propagation de la rupture sismique sur une faille

Propriétés du Milieu :

Équation de l'élastodynamique :

- loi de Hooke

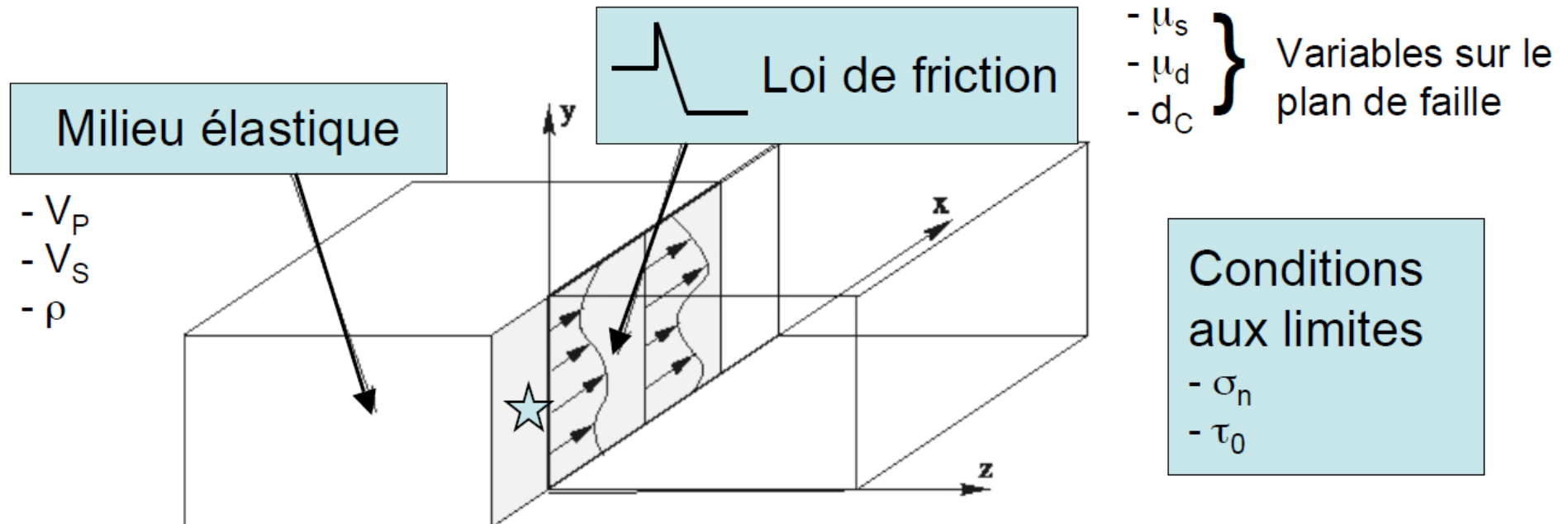
- loi de la dynamique

$$\tau_{ij} = \lambda u_{k,k} \delta_{ij} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i})$$

$$\rho \ddot{u}_i = \tau_{ij,j} + f_i$$

Caractéristiques de l'interface :

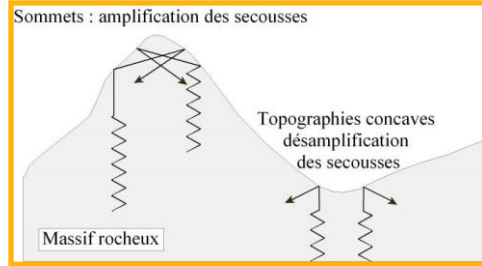
- loi de friction (chute de la résistance au frottement de la faille en fonction du glissement)



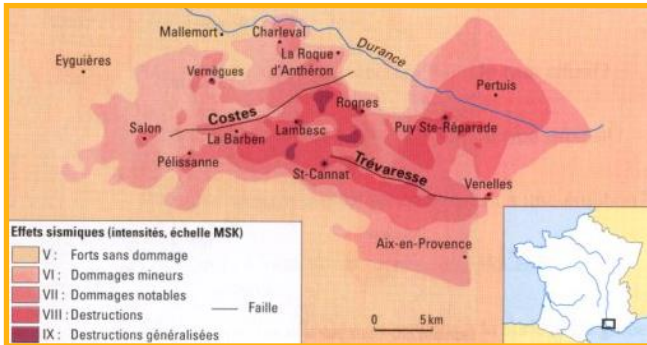
Les effets des séismes

Les effets de site

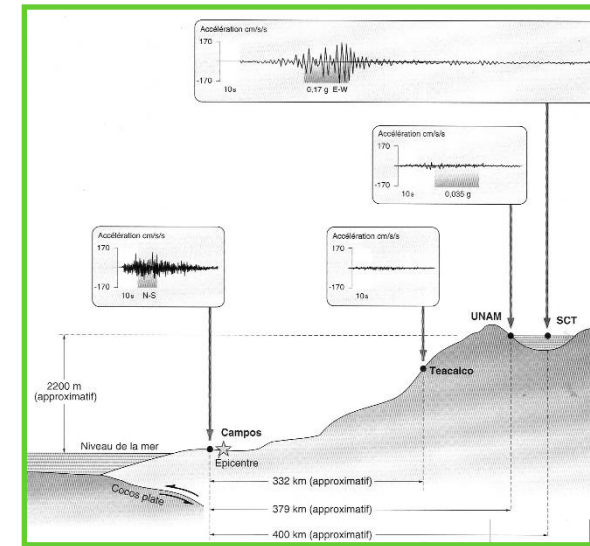
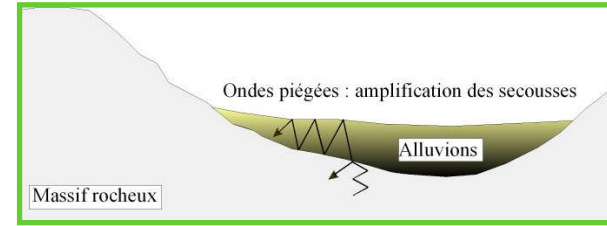
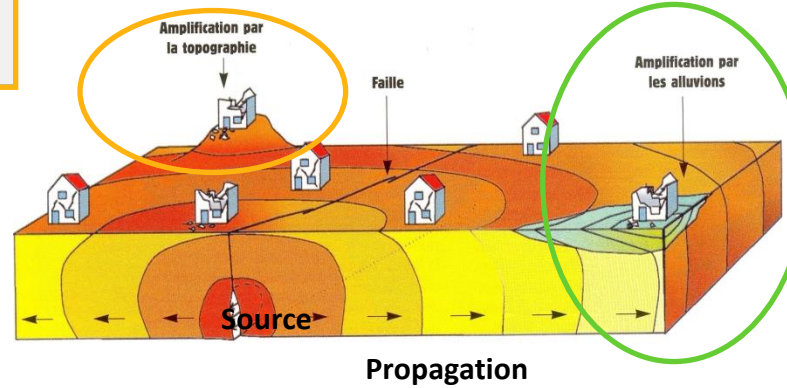
Effet de site topographique



Rognes, 1909

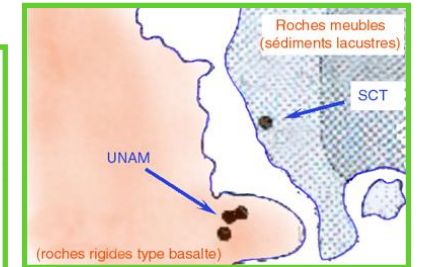


Remplissage sédimentaire



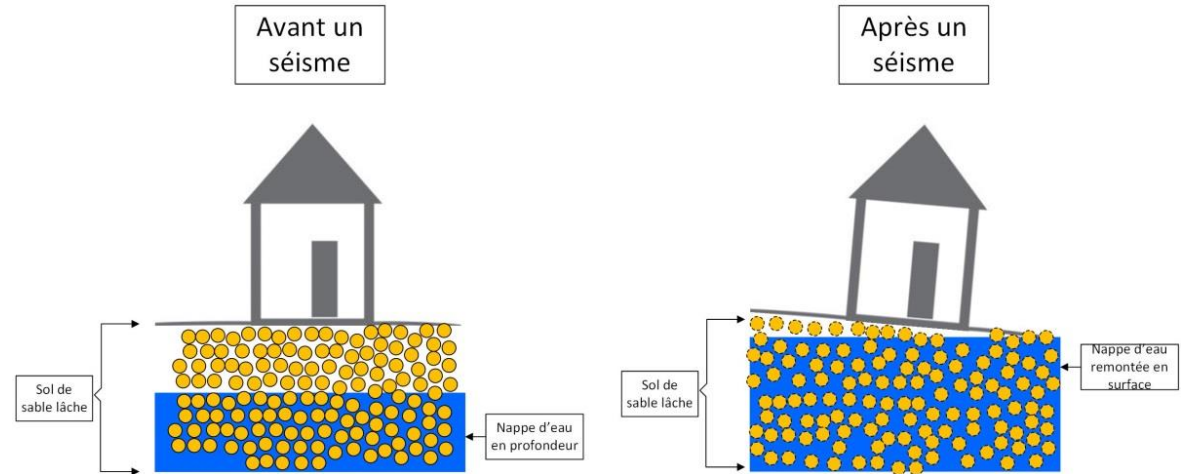
Michoacán

Mexico, 1985



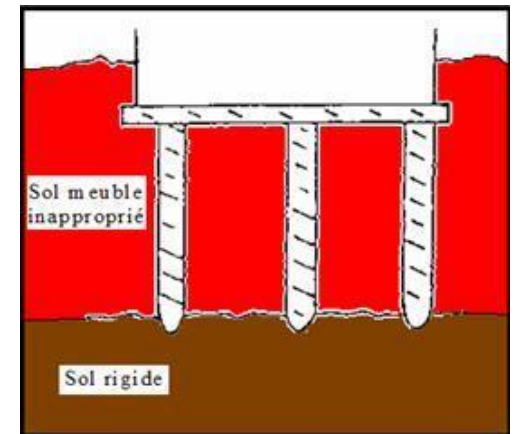
Effets provoqués par les séismes

Liquéfaction des sols



Séisme de 1964 à Niigata (Japon) Mw = 7,5

fondations profondes



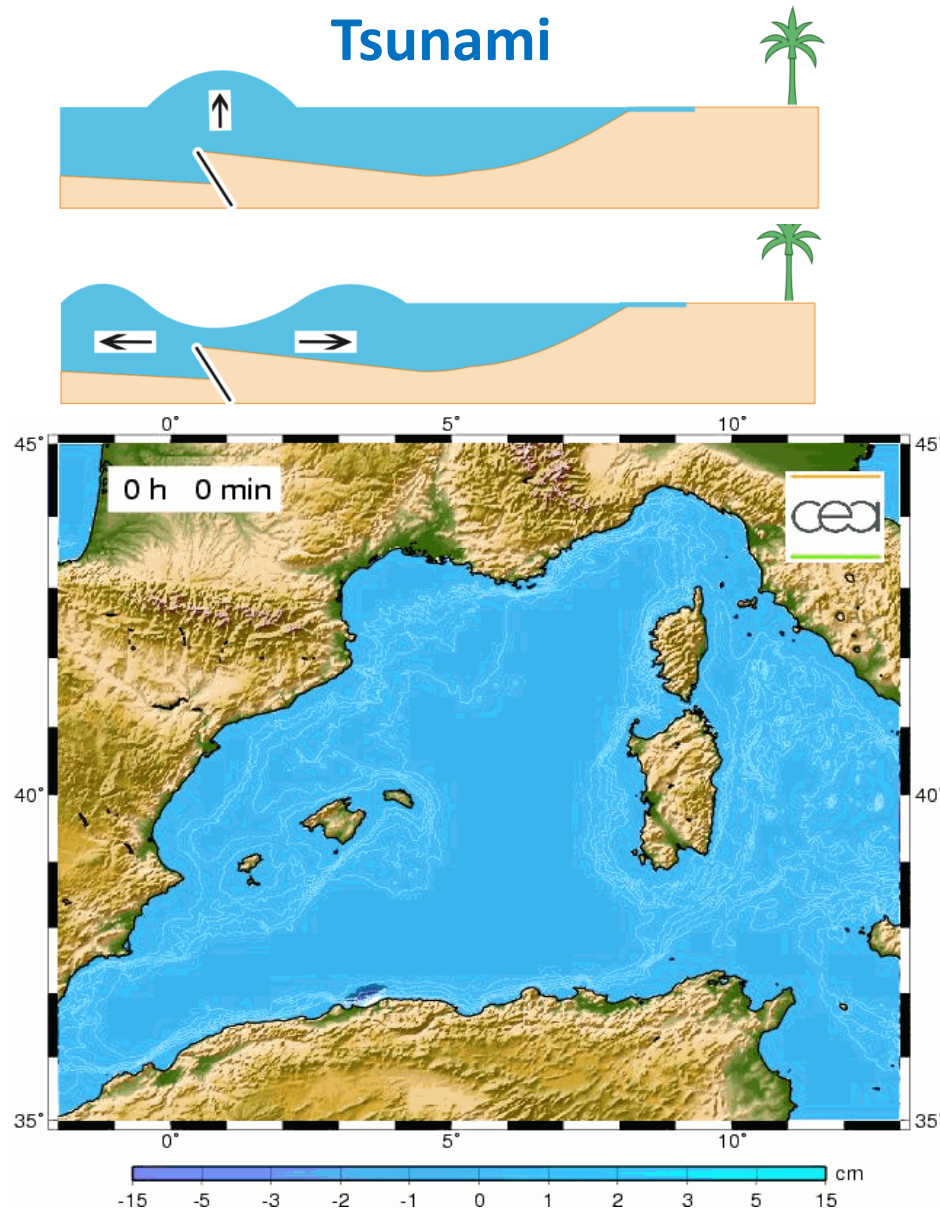
Effets provoqués par les séismes

Glissements de terrain,
éboulements,
chutes de blocs

Glissement de terrain suite au séisme de Santa Tecla, Mw = 7,7 Salvador.



Effets provoqués par les séismes



Alerte



Evacuation



Effets provoqués par les séismes

Incendies (rupture conduite de gaz)



18 avril 1906, San
Francisco, Mw =
8,2

Comment se protéger des effets des séismes ?

- par des constructions **parasismiques**

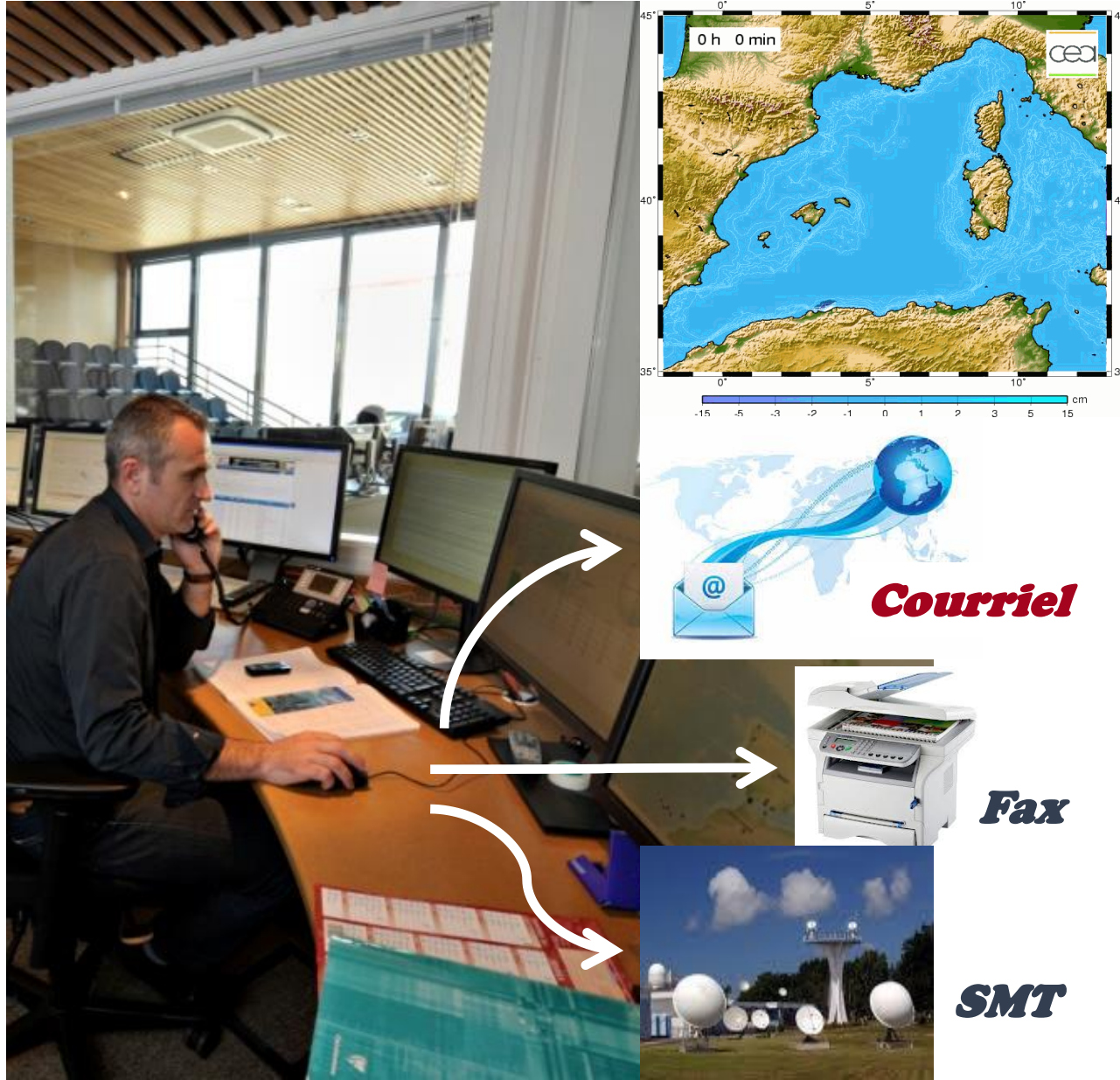
- par des **systèmes d'alerte**

(pompiers ...)

ou des systèmes d'**arrêt d'urgence**



Les alertes sismiques et tsunami



Le CEA assure :

⇒ l'alerte aux tsunamis en Méditerranée occidentale et en Atlantique Nord Est depuis 2012

⇒ l'alerte rapide aux forts séismes depuis 1981

⇒ l'alerte aux tsunamis en Polynésie Française depuis la fin des années 60

Que faire en cas de séisme ?

Pendant les secousses :

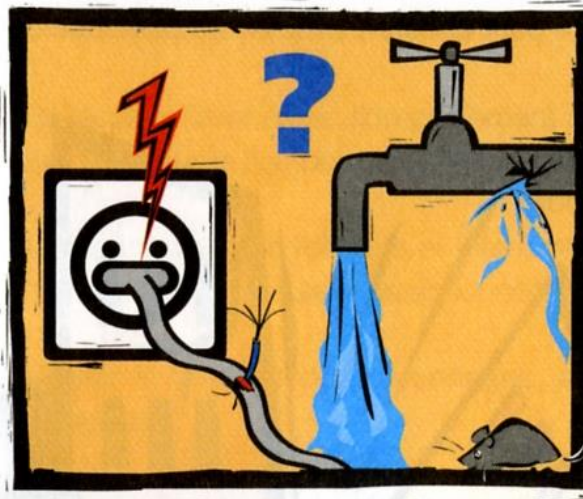


▶ A l'extérieur: se tenir à distance des bâtiments



▶ Dans des locaux: se mettre à l'abri (encadrement de porte, table massive...)

Après les secousses :



▶ Contrôler l'état des conduites de gaz, d'eau et d'électricité



▶ Ecouter la radio et suivre les consignes

Merci de votre attention

<http://bhernand.chez.com>

<http://www-dase.cea.fr>

<http://www.info-tsunami.fr>

<http://www.emsc-csem.org>