

Equation d'onde

$$\exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t))$$

$$\exp(-az) \exp(i(kx - \omega t))$$

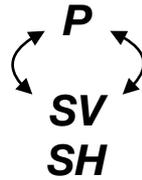
Solutions Ondes Planes

P

S

Ondes de volume

Réflexion Transmission

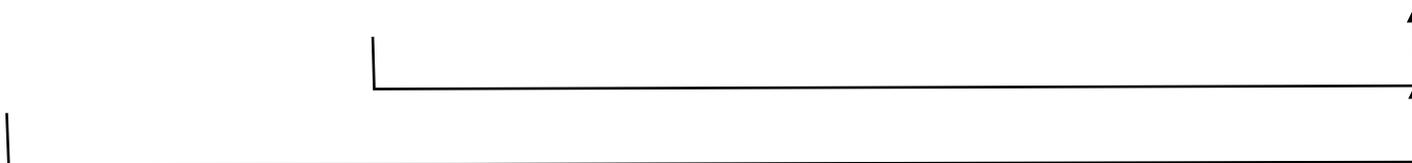
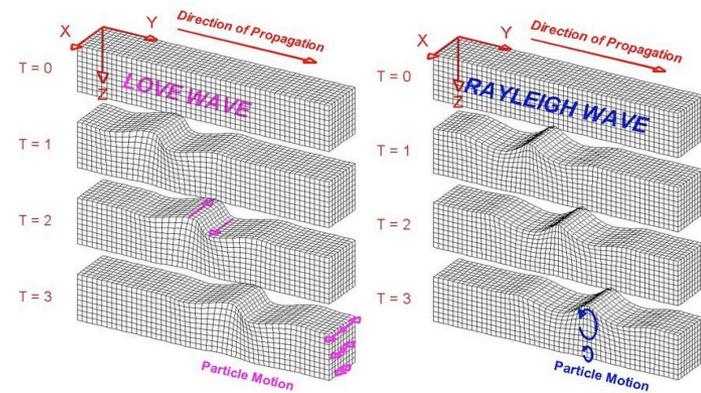
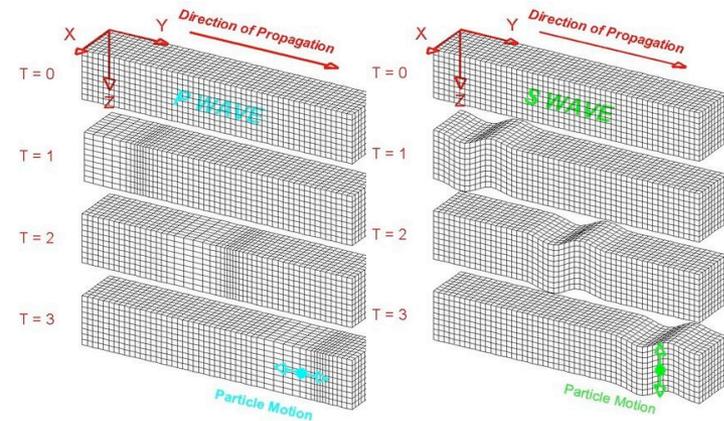


Ondes de surface

Rayleigh (P-SV = houle)

Love

Ondes de surface



Equation d'onde

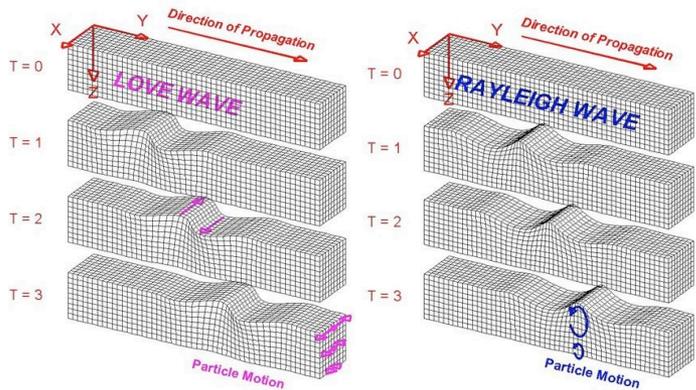
$$\exp(-az) \exp(i(kx - \omega t))$$

Ondes de surface

Rayleigh (P-SV = houle)

Love

Ondes de surface

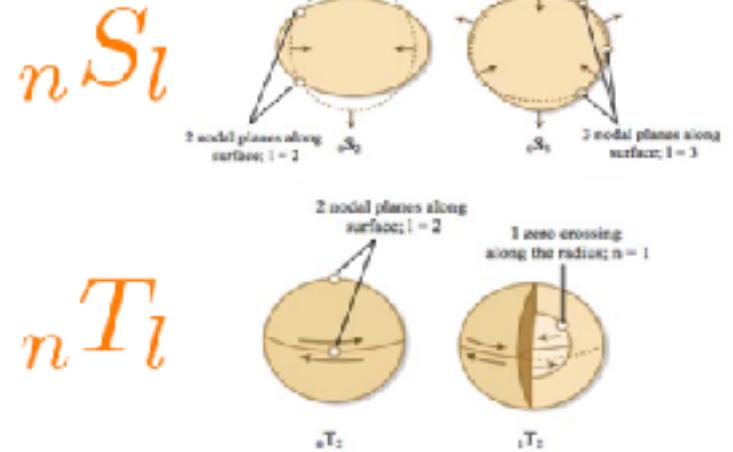


$$\exp(i\omega_{nlm}^m t) A_{nlm}(r, \theta, \phi)$$

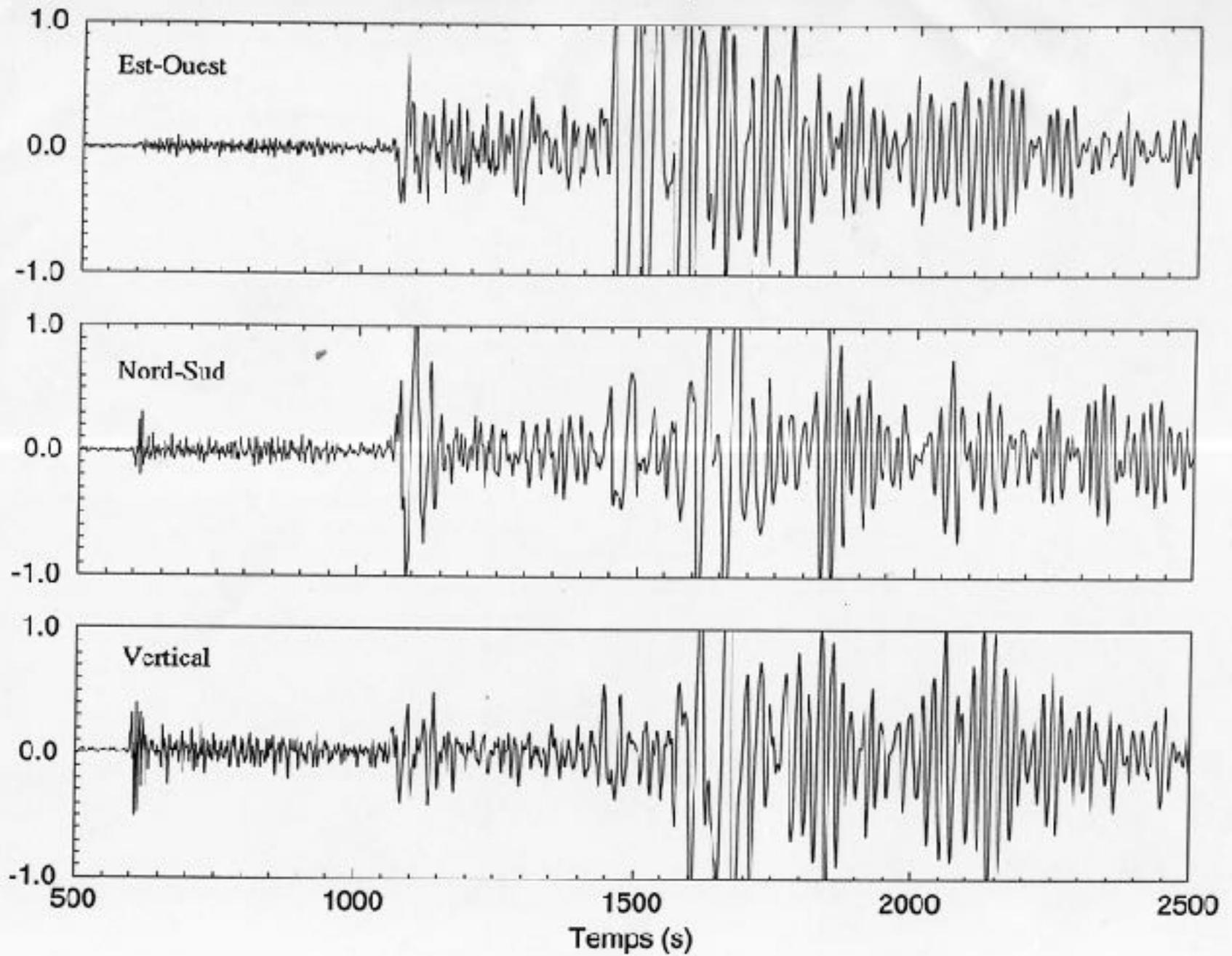
Modes $|nlm\rangle$

Modes Sphéroïdaux

Modes Toroïdaux



Charter Towers, Australie



*Comment en disposant des
hodochrones et d'un minimum de
connaissances géologiques, déterminer
l'épicentre d'un séisme avec un seul
enregistrement 3D ?*

Tsunami

On va rechercher la vitesse d'une onde se propageant à la surface d'un océan de profondeur H un tsunami. On néglige la viscosité. On travaille à 2D.

On admet que H reste petit devant les longueurs d'onde du tsunami. Pourquoi ?

On considère que la vitesse est essentiellement horizontale, U . Les frottements à la surface du fond de l'océan sont négligeables. La surface de l'océan présente une topographie $h(x, t)$. Montrer que la conservation de l'eau incompressible implique

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} = 0$$

Montrer que la conservation de la quantité de mouvement implique

$$\frac{\partial Uh}{\partial t} = -\frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x}$$

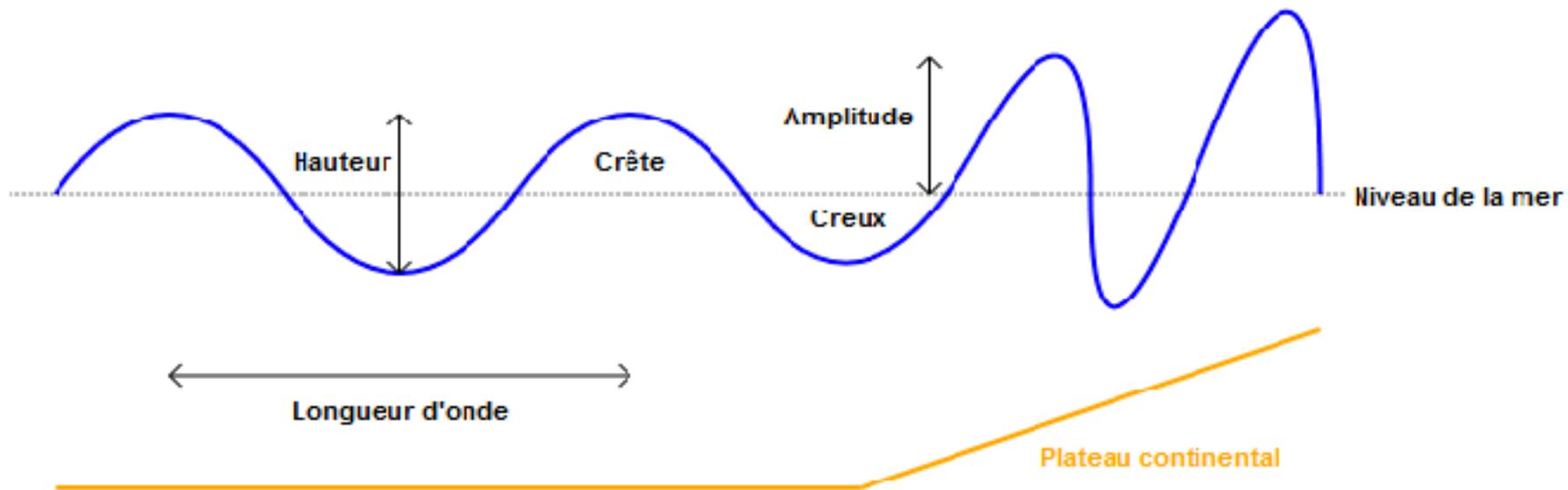
Vous avez établi une version simplifiée des équations de Saint-Venant.

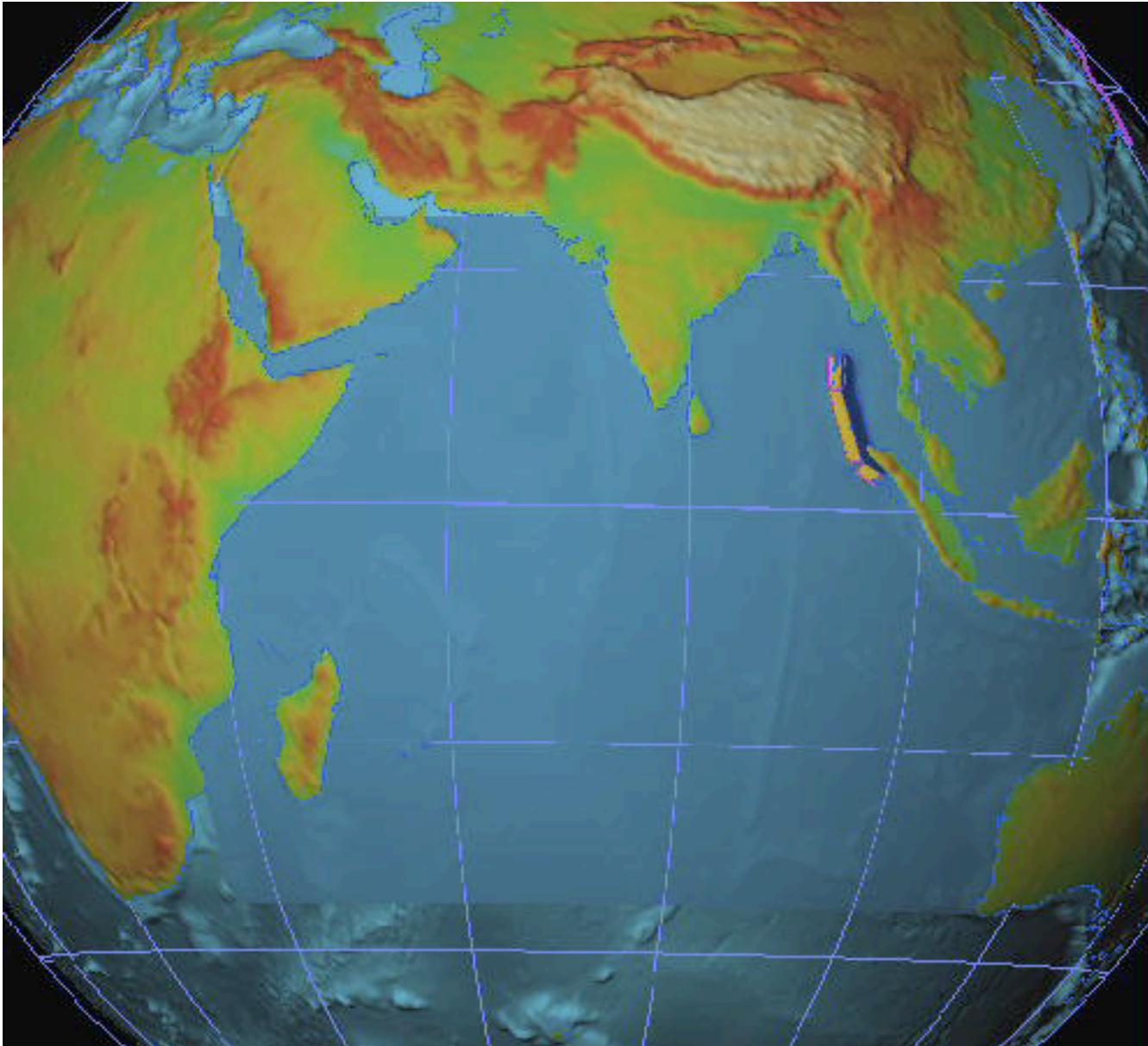
On se place dans le cas $h = h_0 + \delta h$ et $U = 0 + \delta U$. A quelle vitesse se propage le tsunami ?

Tsunami

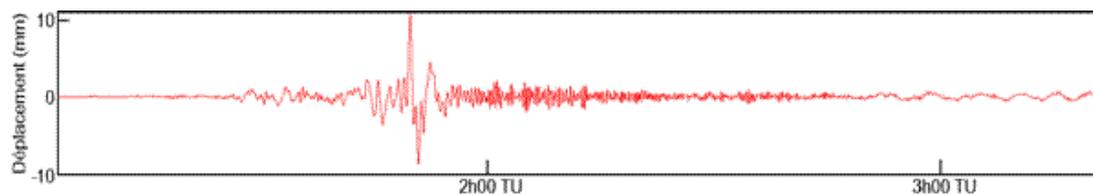
Eau profonde $c = \sqrt{gh}$

$$c \approx 200m/s = 720km/h$$





*Enregistrement
vertical France*





Tsunami (Miyako 2011)

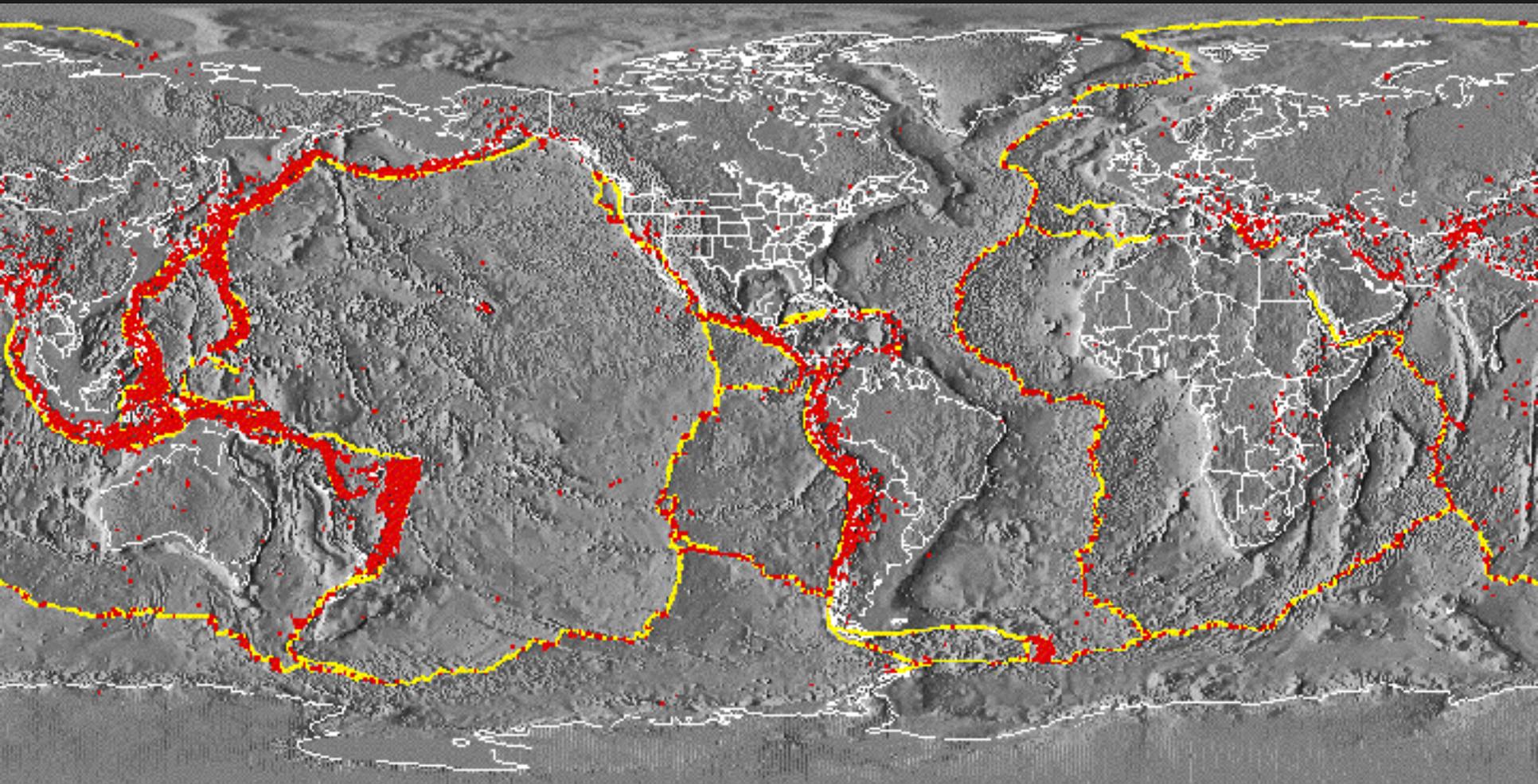


1755

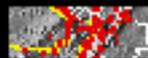
O malheureux mortels! ô terre déplorable!
O de tous les mortels assemblage effroyable!
D'inutiles douleurs éternel entretien!
Philosophes trompés qui criez: "Tout est bien"
Accourez, contemplez ces ruines affreuses
Ces débris, ces lambeaux, ces cendres malheureuses,
Ces femmes, ces enfants l'un sur l'autre entassés,
Sous ces marbres rompus ces membres dispersés;
Cent mille infortunés que la terre dévore,
Qui, sanglants, déchirés, et palpitants encore,
Enterrés sous leurs toits, terminent sans secours
Dans l'horreur des tourments leurs lamentables jours!
Aux cris demi-formés de leurs voix expirantes,
Au spectacle effrayant de leurs cendres fumantes,
Direz-vous: "C'est l'effet des éternelles lois
Qui d'un Dieu libre et bon nécessitent le choix" ?
Direz-vous, en voyant cet amas de victimes:
"Dieu s'est vengé, leur mort est le prix de leurs crimes"?

Sismologie
énergie, risque, tomographie...

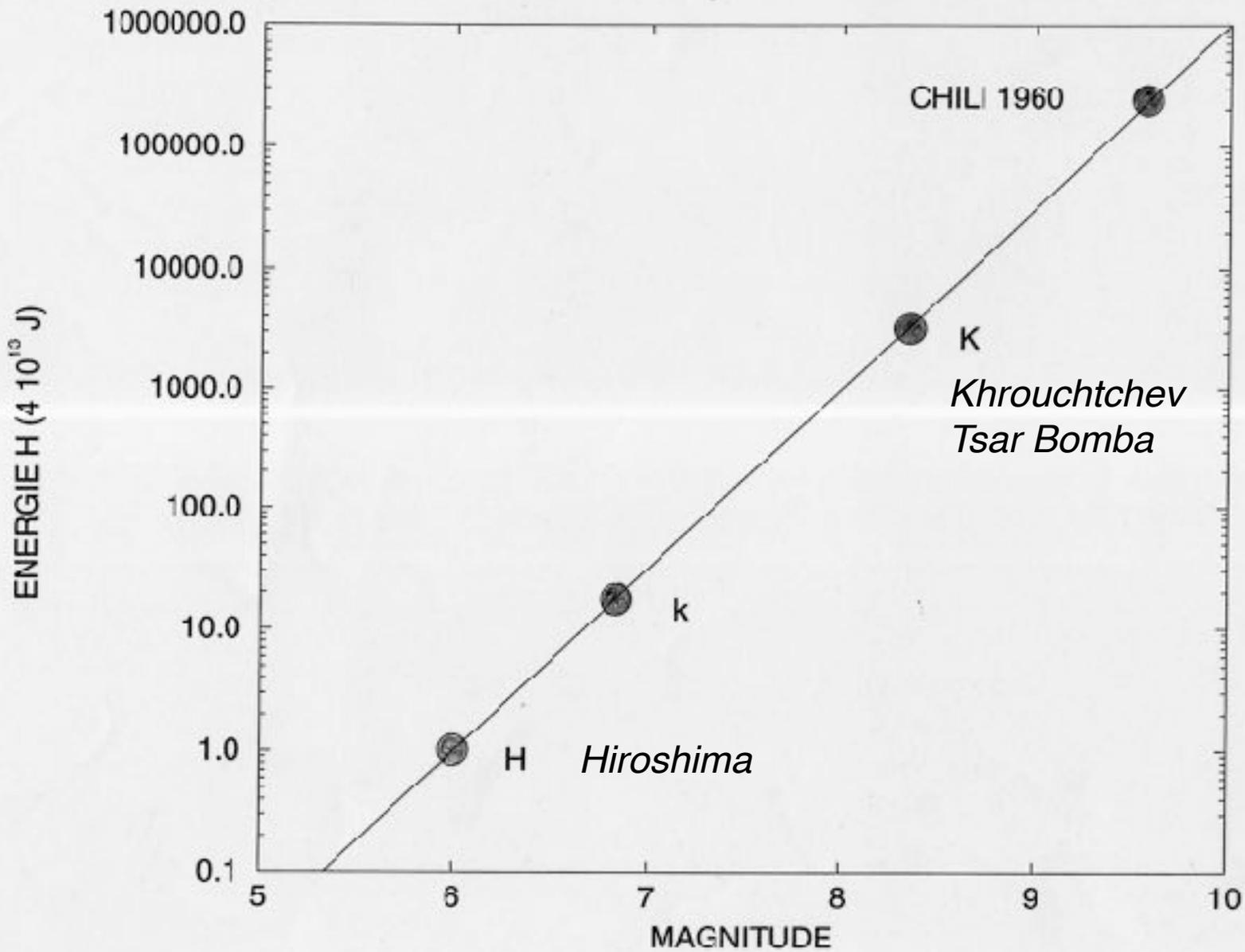
Subduction Zone Earthquakes



Crustal Plate Boundaries



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



$$\log_{10}(\text{Energie}) = 4.8 + 1.5 \text{ Magnitude}$$

Un magnitude n est 32 fois plus énergétique qu'un magnitude $n-1$

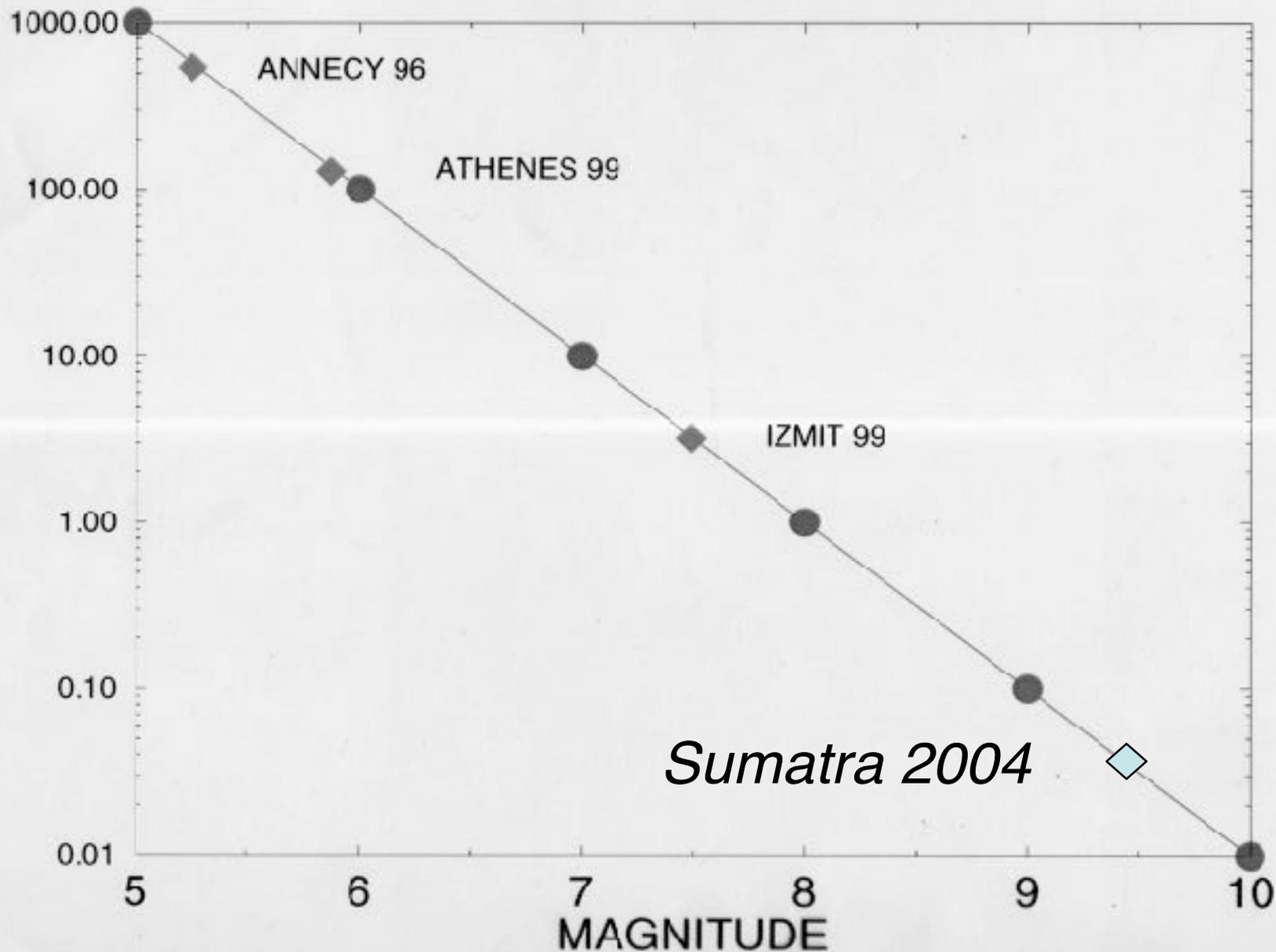
$$\log_{10}(M) = 9.1 + 1.5 \text{ Magnitude}$$

$M = \text{moment sismique} = \text{rigidité} \times \text{surface} \times \text{déplacement}$

Typiquement : un Magnitude 8 correspond à un moment

de $1.2 \cdot 10^{21}$ N m, soit un déplacement de 12 m sur une faille de 120 km de long et 30 km de large.

NOMBRE DE SEISMES PAR AN



Tsunami

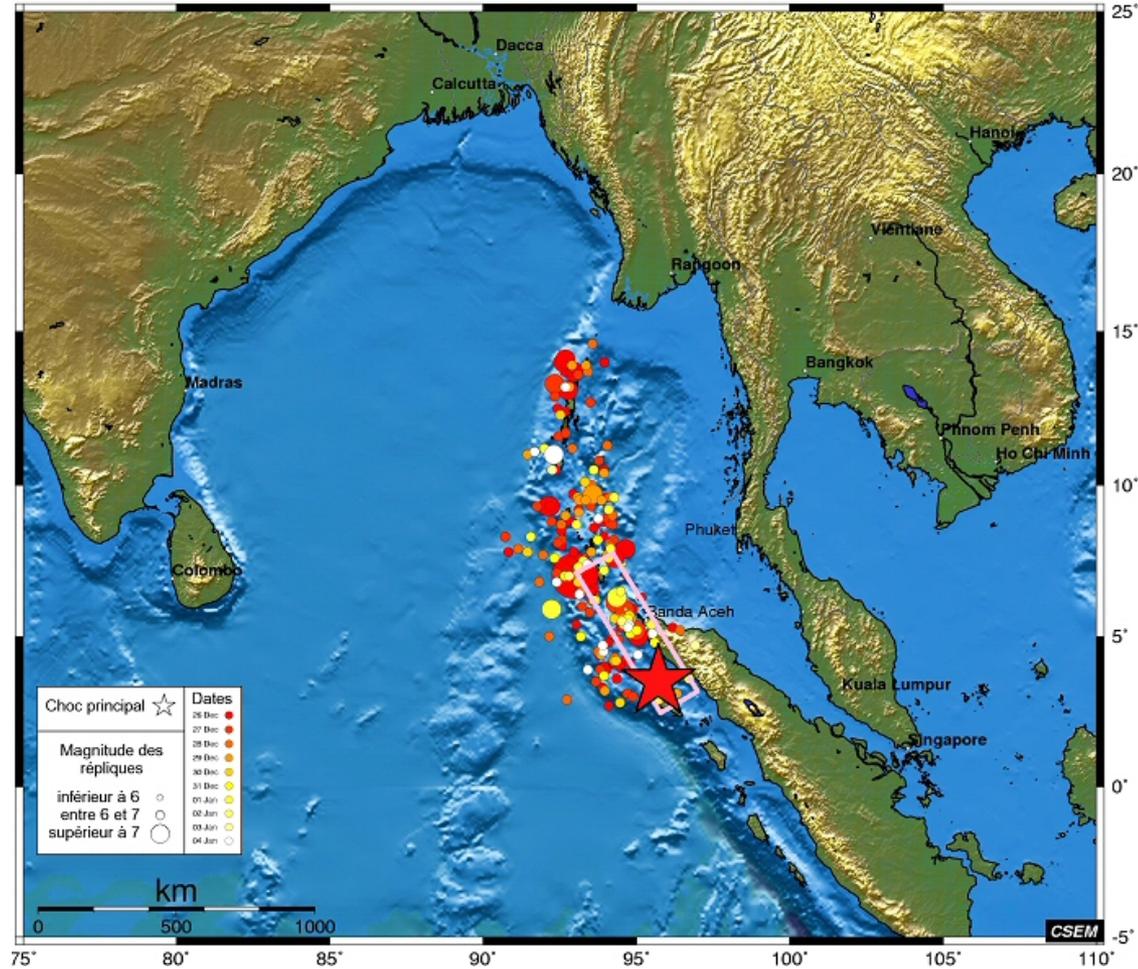
<i>Tohoku 2011</i>	<i>20 000 morts</i>
<i>Sumatra 2004</i>	<i>285 000</i>
<i>Messine 1908</i>	<i>95 000</i>
<i>Lisbonne 1755</i>	<i>90 000</i>

Tremblements de Terre

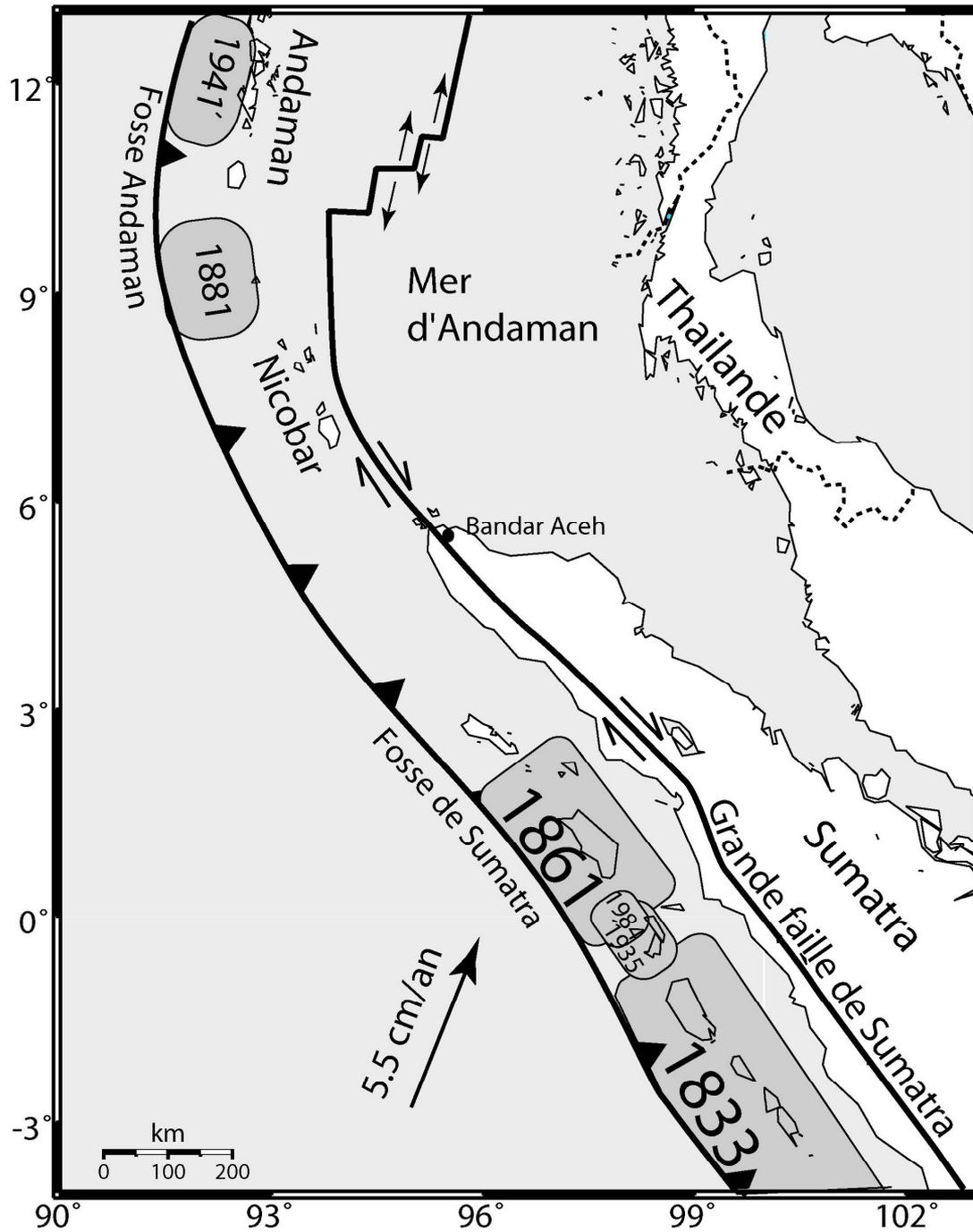
<i>Turquie/Syrie</i>	<i>50 000</i>
<i>Haiti 2010</i>	<i>280 000</i>
<i>Tangshan 1976</i>	<i>250 000</i>
<i>Chimbote 1970</i>	<i>66 000</i>
<i>Tokyo 1923</i>	<i>143 000</i>
<i>Shaanxi 1556</i>	<i>830 000</i>

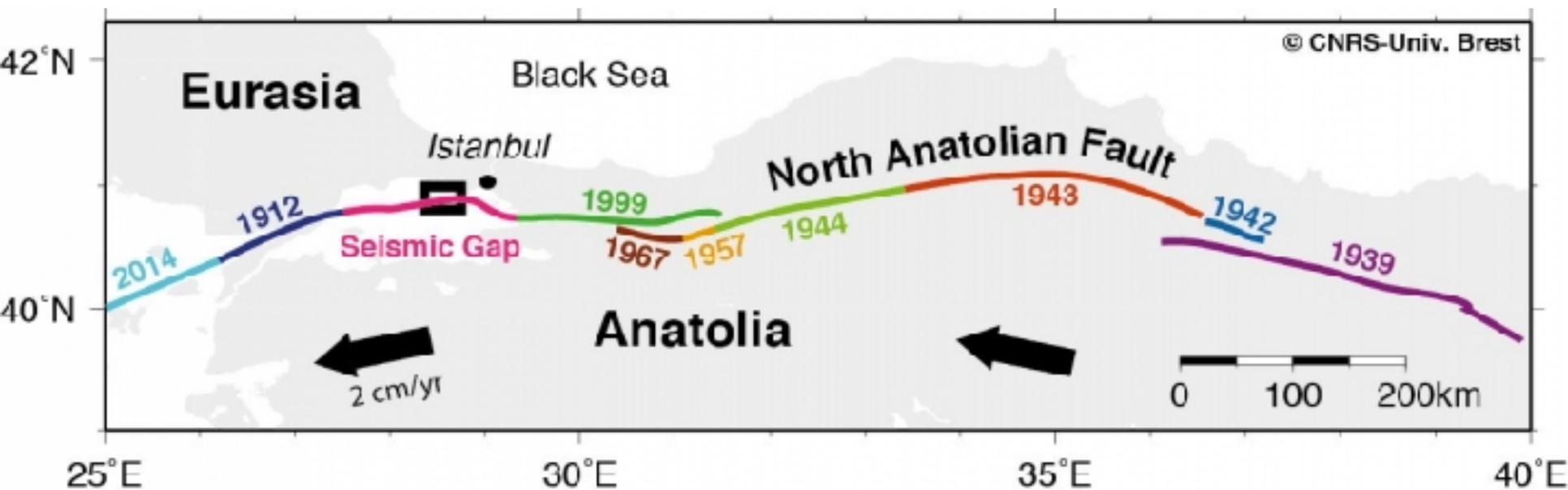
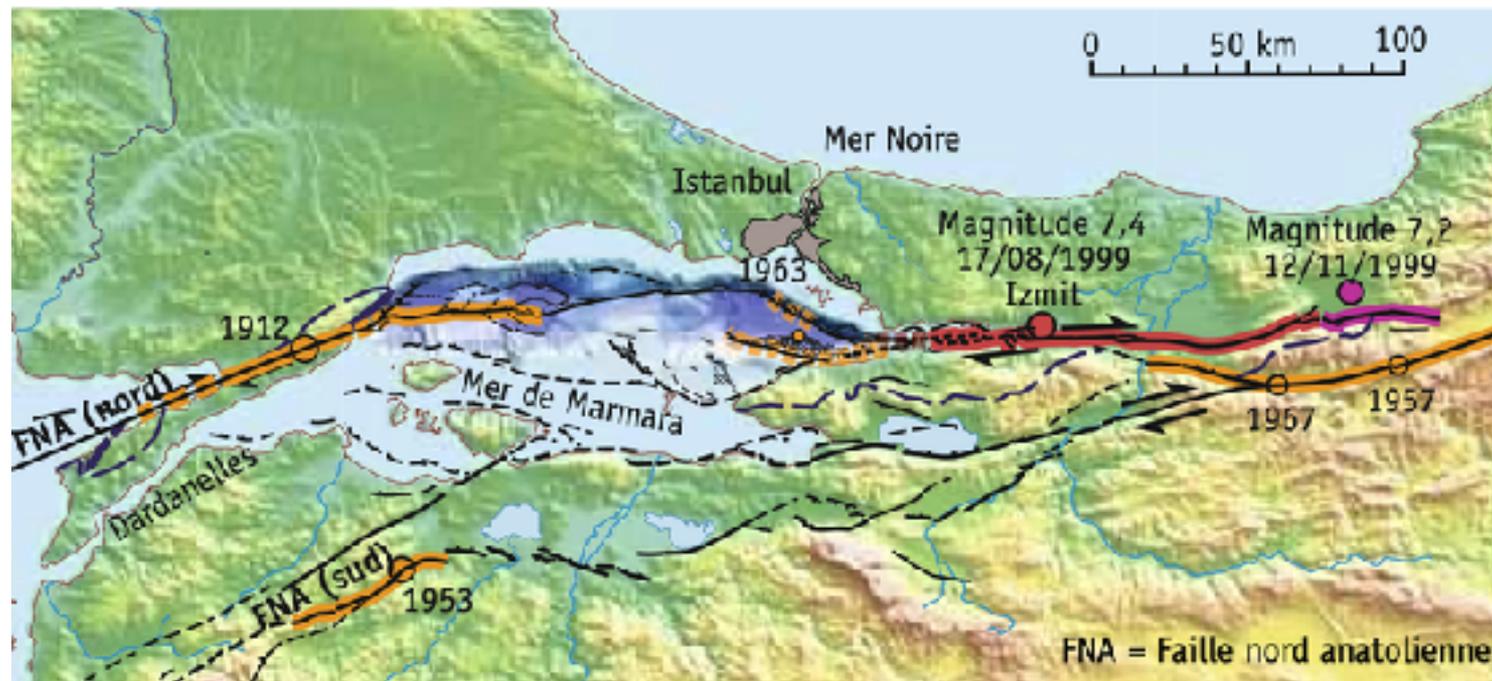
Prédiction??

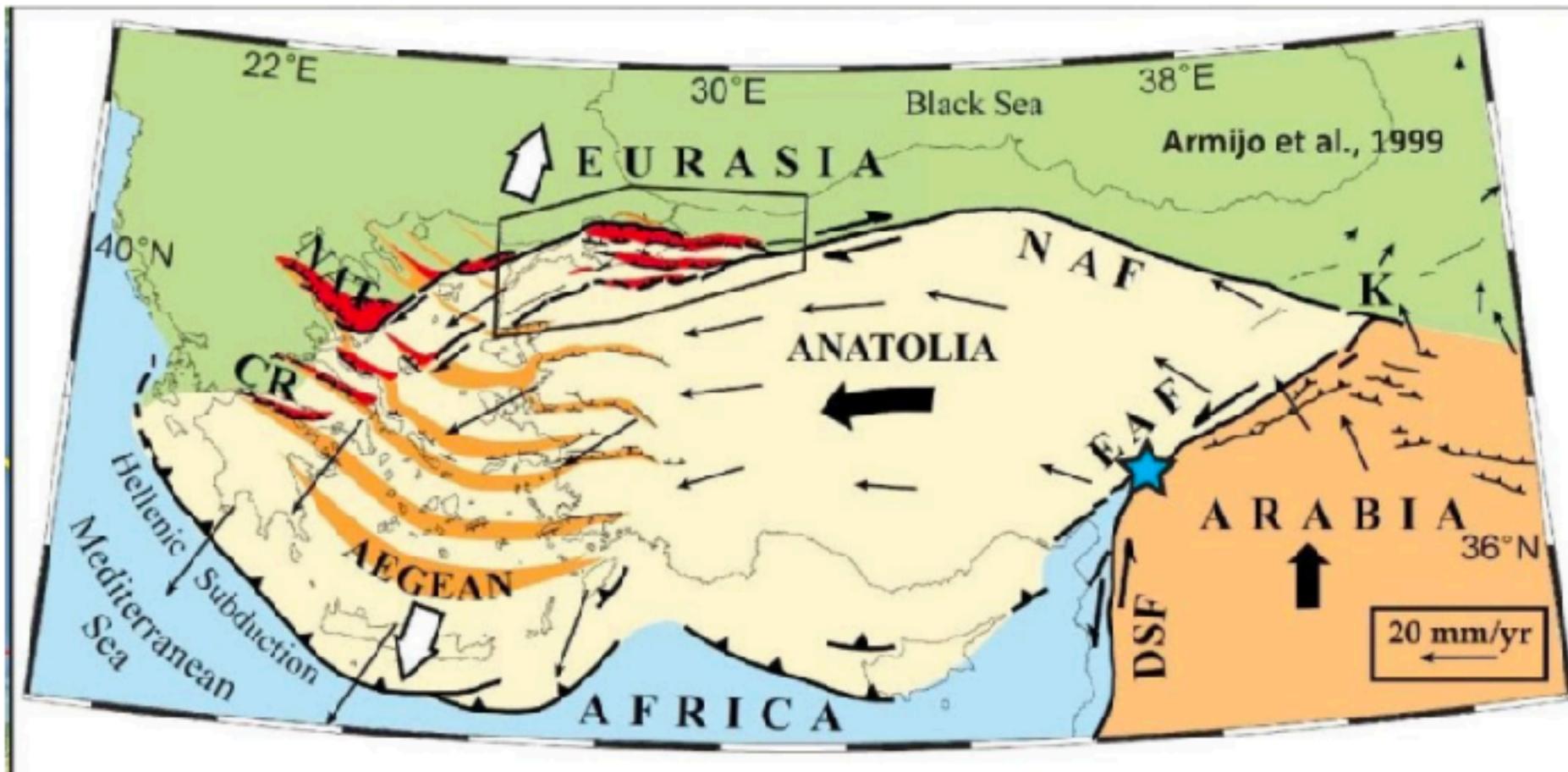
Le gap sismique



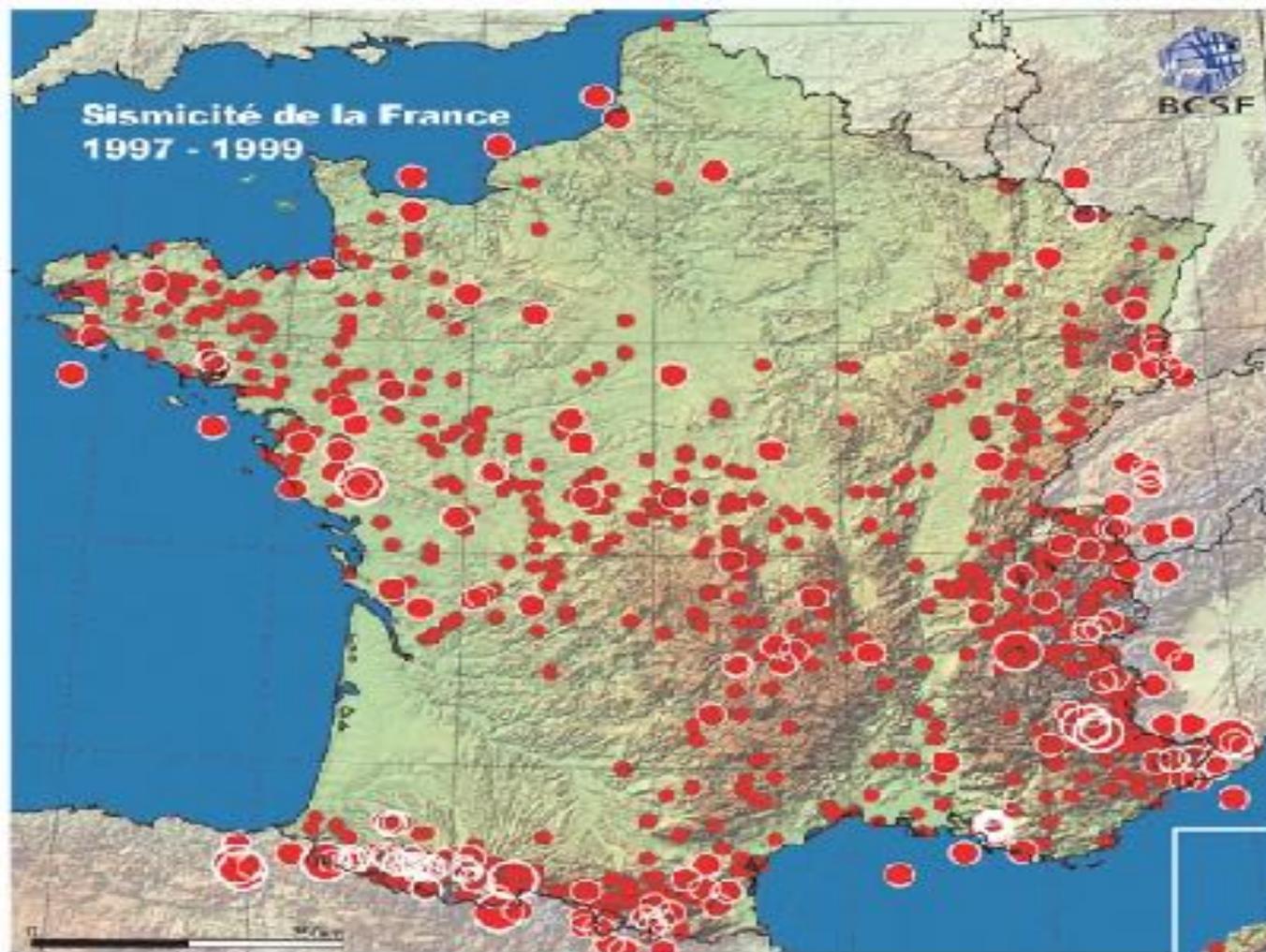
Le gap sismique







Armijo et al. , 1999



**Sismicité de la France
1997 - 1999**



Magnitude des séismes

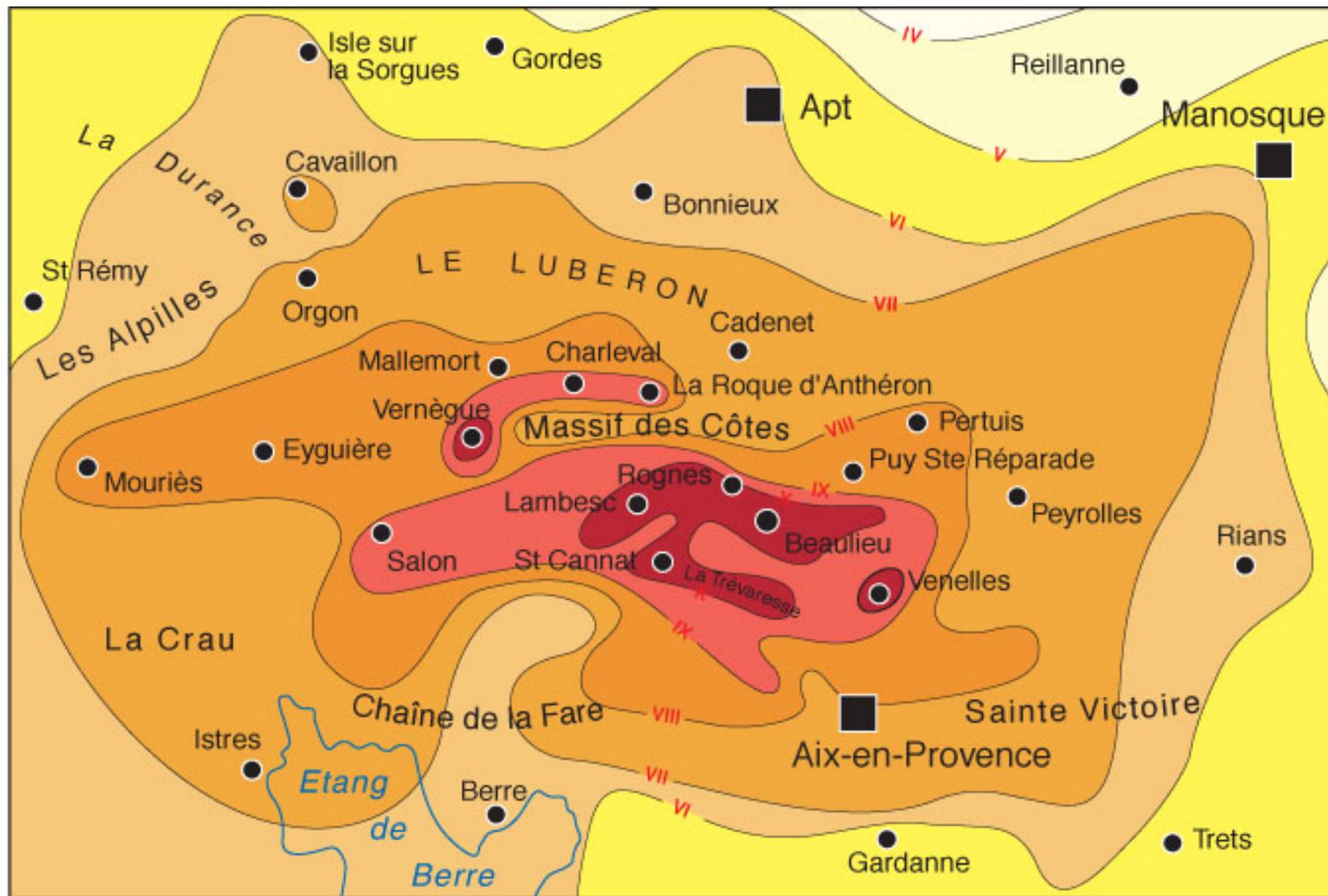
-  de 4 à 5 ML
-  de 3 à 3,9 ML
-  de 2 à 2,9 ML

seuls les séismes de magnitude supérieure à 3,0 ML ont été répertoriés dans les 50 premiers kilomètres à l'extérieur des frontières françaises.

@Dorineas BCSF 2001



Carte d'isoséiste du séisme de Lambesc 1909, Intensité de Mercalli



Dégâts à Rogne

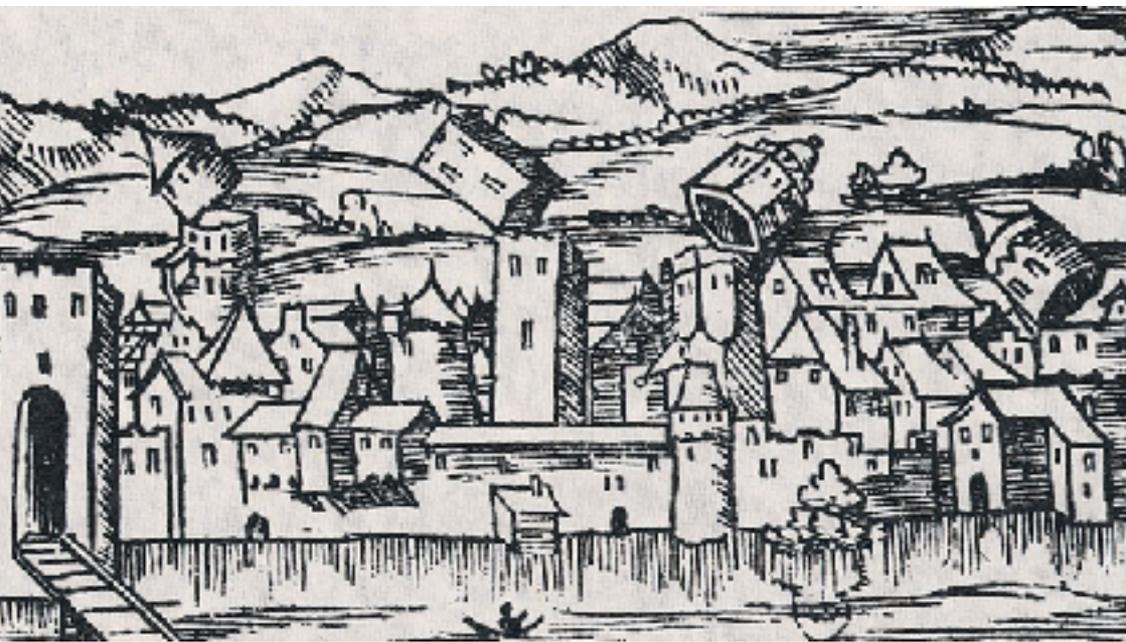


Dégâts à Lambesc

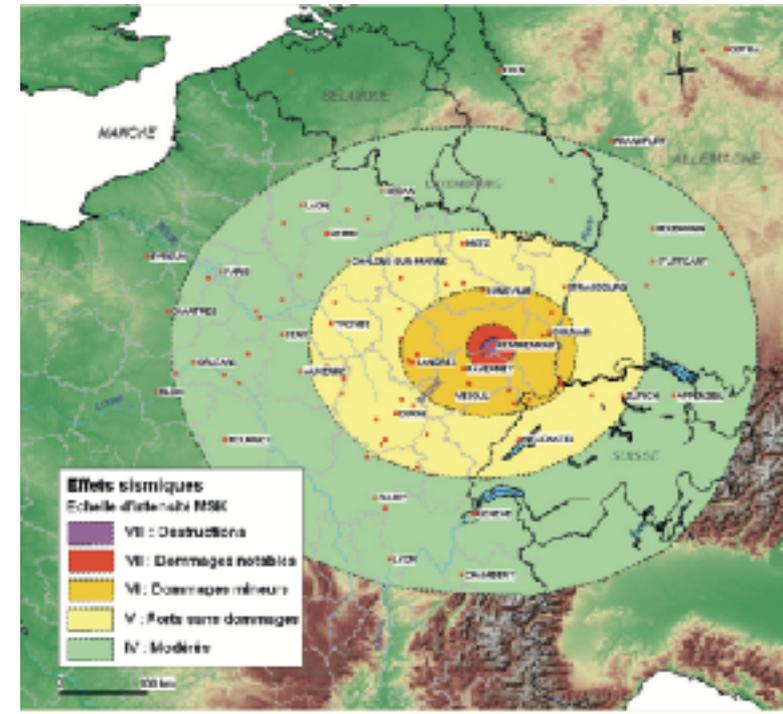


Séisme de 1909	Simulation de 1982 (estimation)
Victimes	
46 morts 250 blessés	400 à 970 morts 1850 à 5650 blessés
Domages aux habitations	
Plusieurs milliers de logements détruits ou endommagés gravement (dont 1500 à Aix-en-Provence). Village de Lambesc entièrement détruit.	(25 420 bâtiments sur la zone étudiée) 450 bâtiments entièrement détruits. 21850 endommagés. 315 intacts
Coûts directs (reconstruction ou réparation)	
800 à 1200 M € (millions d'euros)	Habitations : 1500 M € Autres bâtiments : 900 M € Equipements et infrastructures : 70 M € Moblier : 70 M € Total : 2540 M €

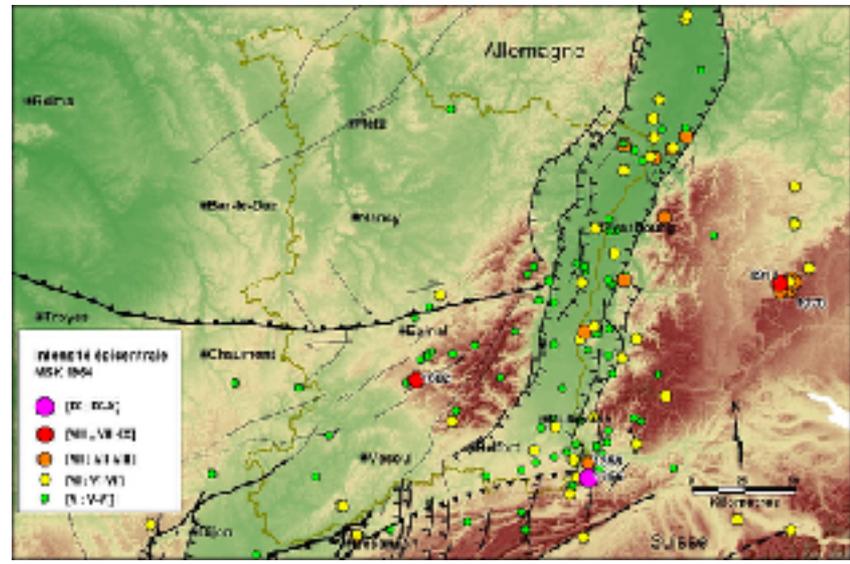
D'après Le risque sismique, Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, 1982. Il s'agit des dégâts correspondant à la situation économique de 1982, mais les sommes (indiquées en francs, valeur de 1982 sur le document original, ont été modifiées en tenant compte (approximativement) de l'inflation entre 1982 et 2009, et en les convertissant en euros. Cette simulation montre que les dégâts dus à ce séisme représenteraient 0,7% du budget de l'état et 600% du budget de la région P.A.C.A. en 1982, et ceci pour un tremblement de terre somme toute mineur, touchant une région relativement peu urbanisée et industrialisée. La très forte croissance économique de la région entre 1982 et aujourd'hui fait que les dégâts humains et matériels seraient beaucoup plus élevés aujourd'hui.



Séisme de Bâle 1356



Séisme de Remiremont 1682



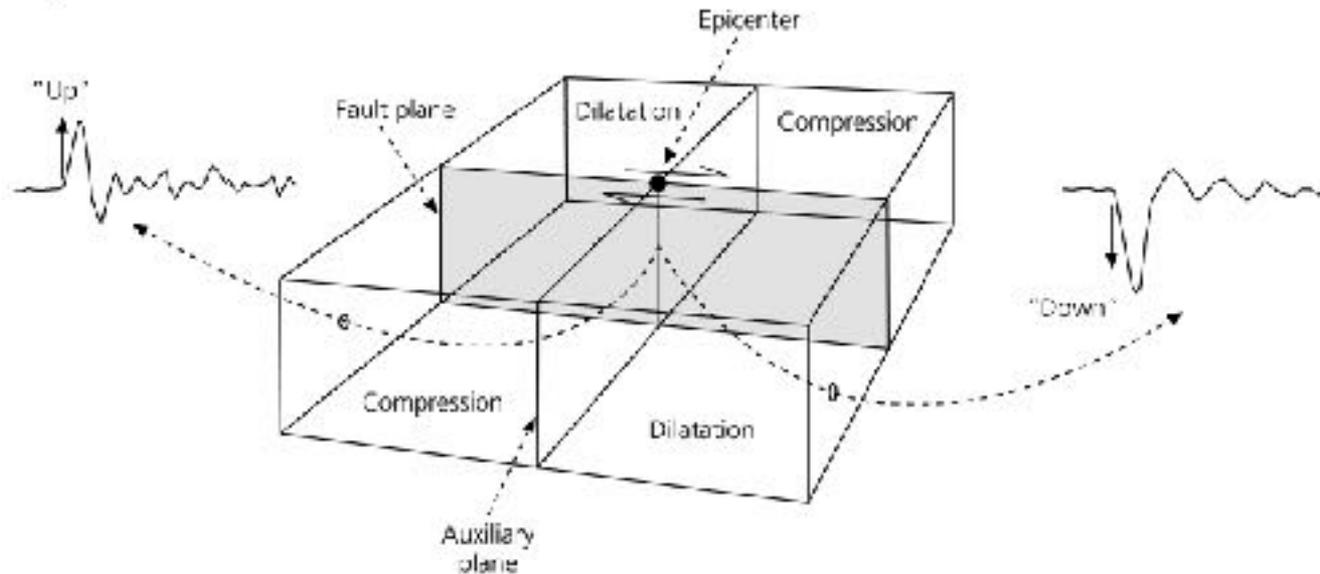
1.8 Mécanisme au foyer :

La géométrie d'une faille pendant un séisme peut se retrouver à partir des sismogrammes enregistrés à différentes distances et azimuts.

La polarité de l'onde P directe enregistrée varie avec la distance et l'azimut.

Le premier mouvement est soit en compression (vers la station), soit en dilatation. Il définit quatre quadrants divisés par **le plan de faille** et un plan qui lui est perpendiculaire qui est le **plan auxiliaire**. Ces deux plans sont les **plans nodaux**.

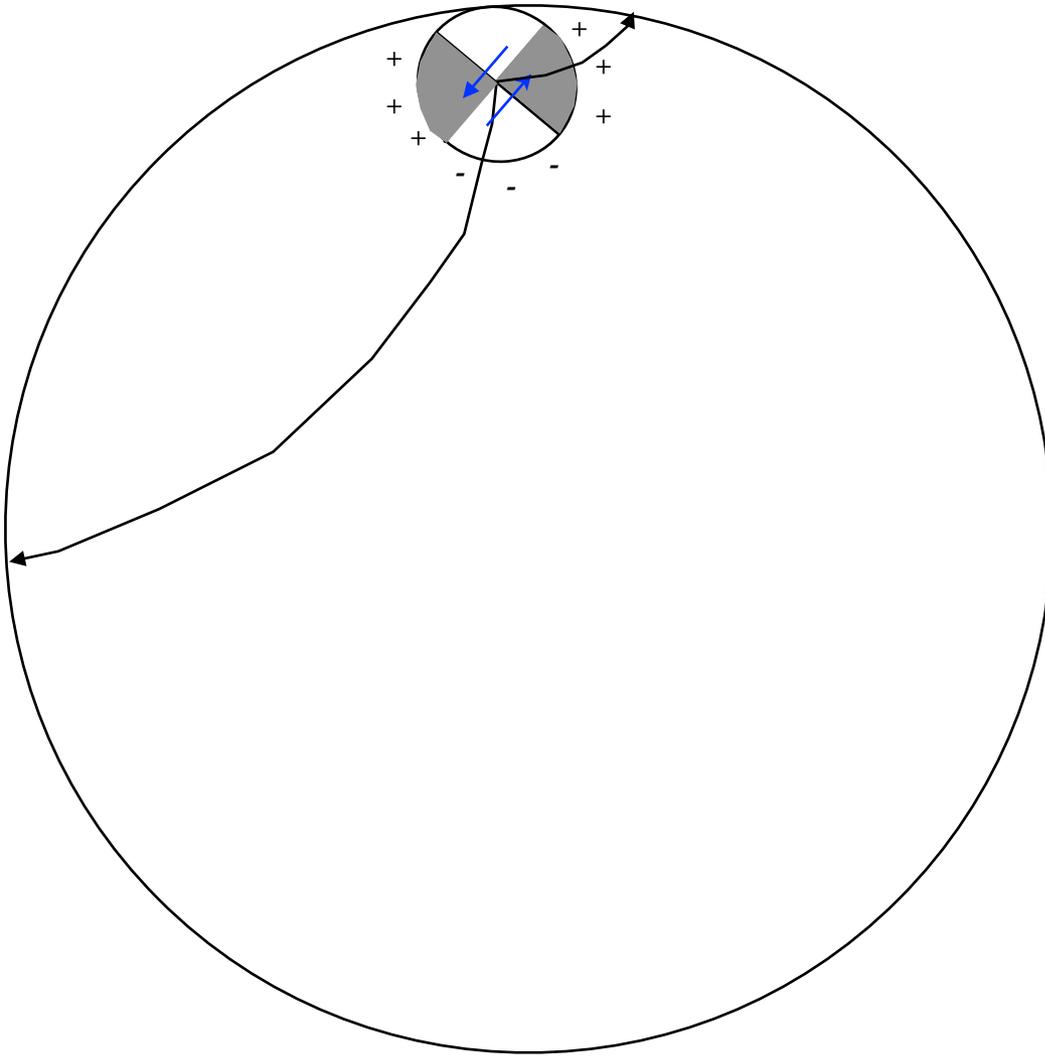
Figure 4.2-4: First motions in relation to fault orientation.



On ne peut en pratique pas distinguer les deux à l'aide des premières arrivées. Pour trouver la faille :

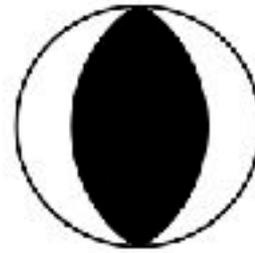
- Aller sur le terrain
- regarder la distribution des répliques.

En 3D : Les quadrants noirs et blancs correspondent aux compressions et dilatations



Dip-slip faults

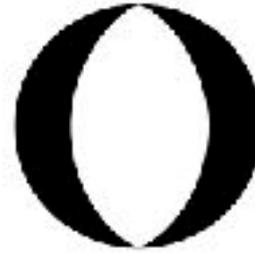
Thrust fault



Focal sphere side view



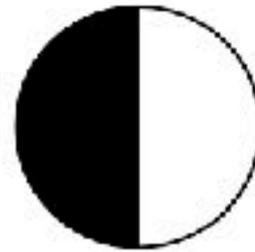
Normal fault



Focal sphere side view



Vertical d-slip

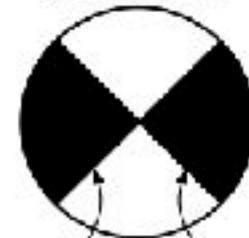


Focal sphere side view



Figure 4.2-14: Focal mechanisms for various fault mechanisms.

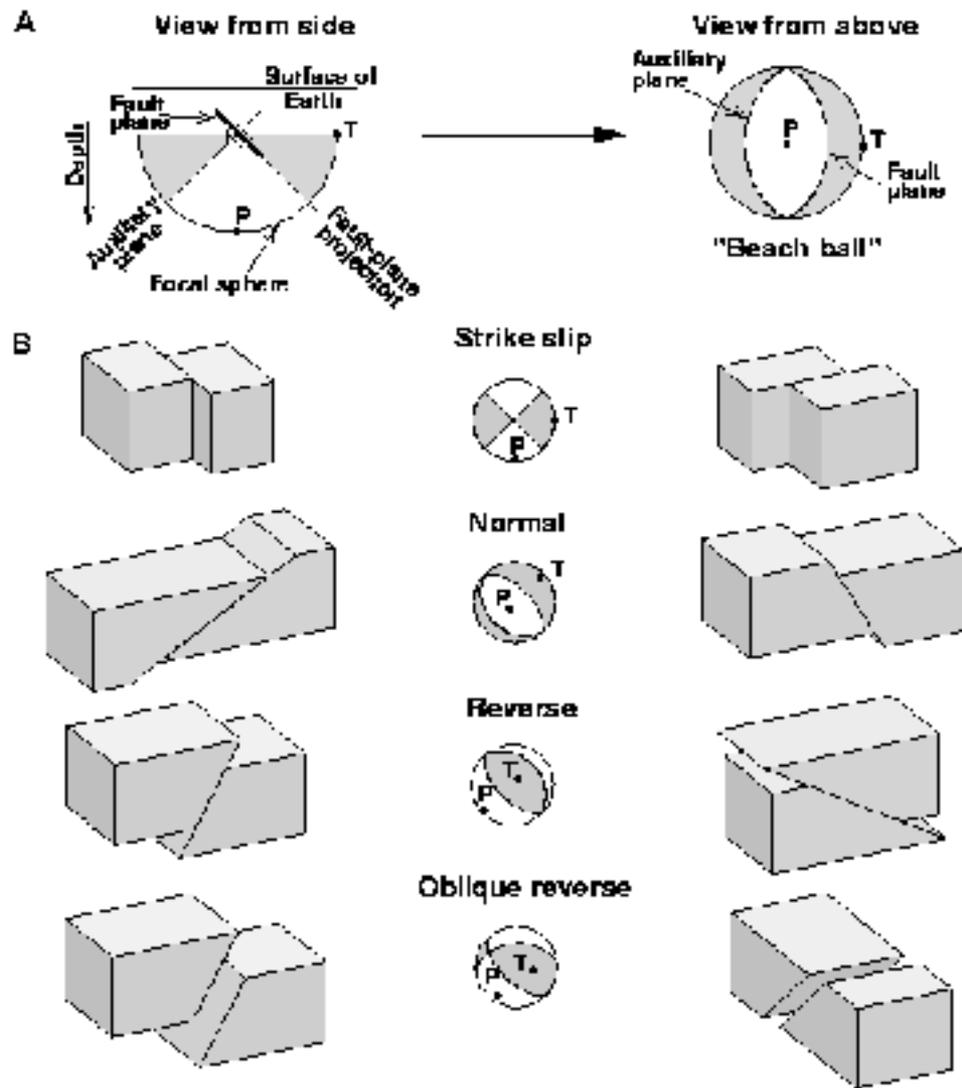
Strike-slip fault



Left-lateral on this plane

Right-lateral on this plane

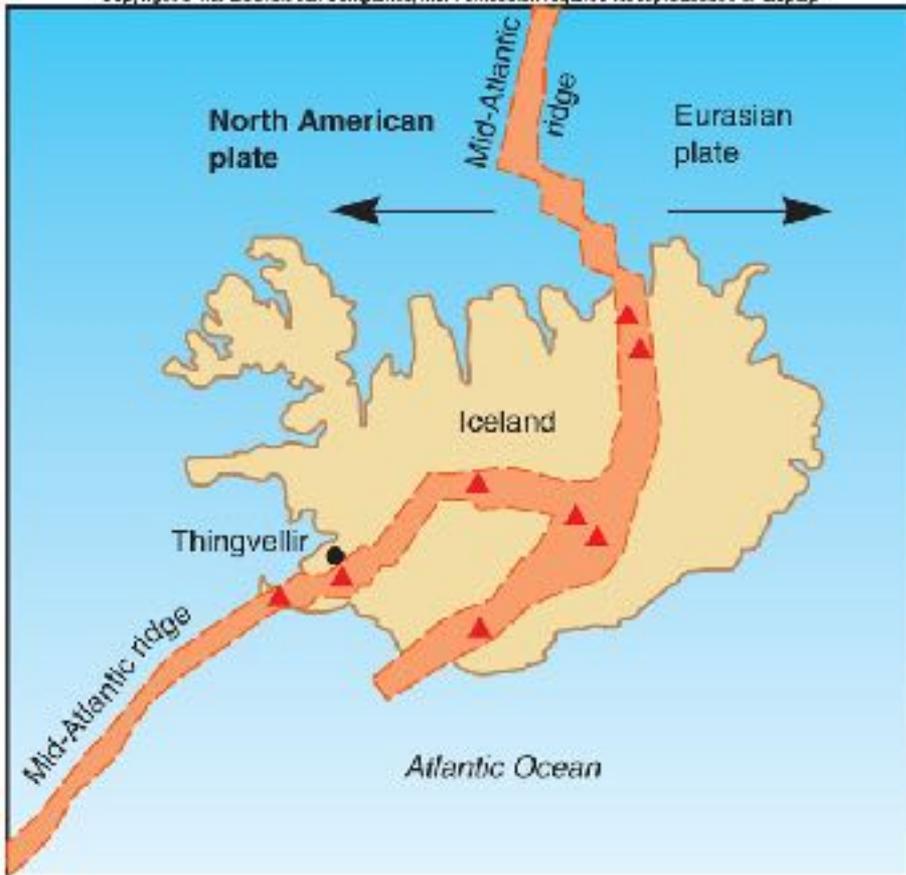
Schematic diagram of a focal mechanism



Failles « Normales »

Une dorsale océanique

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



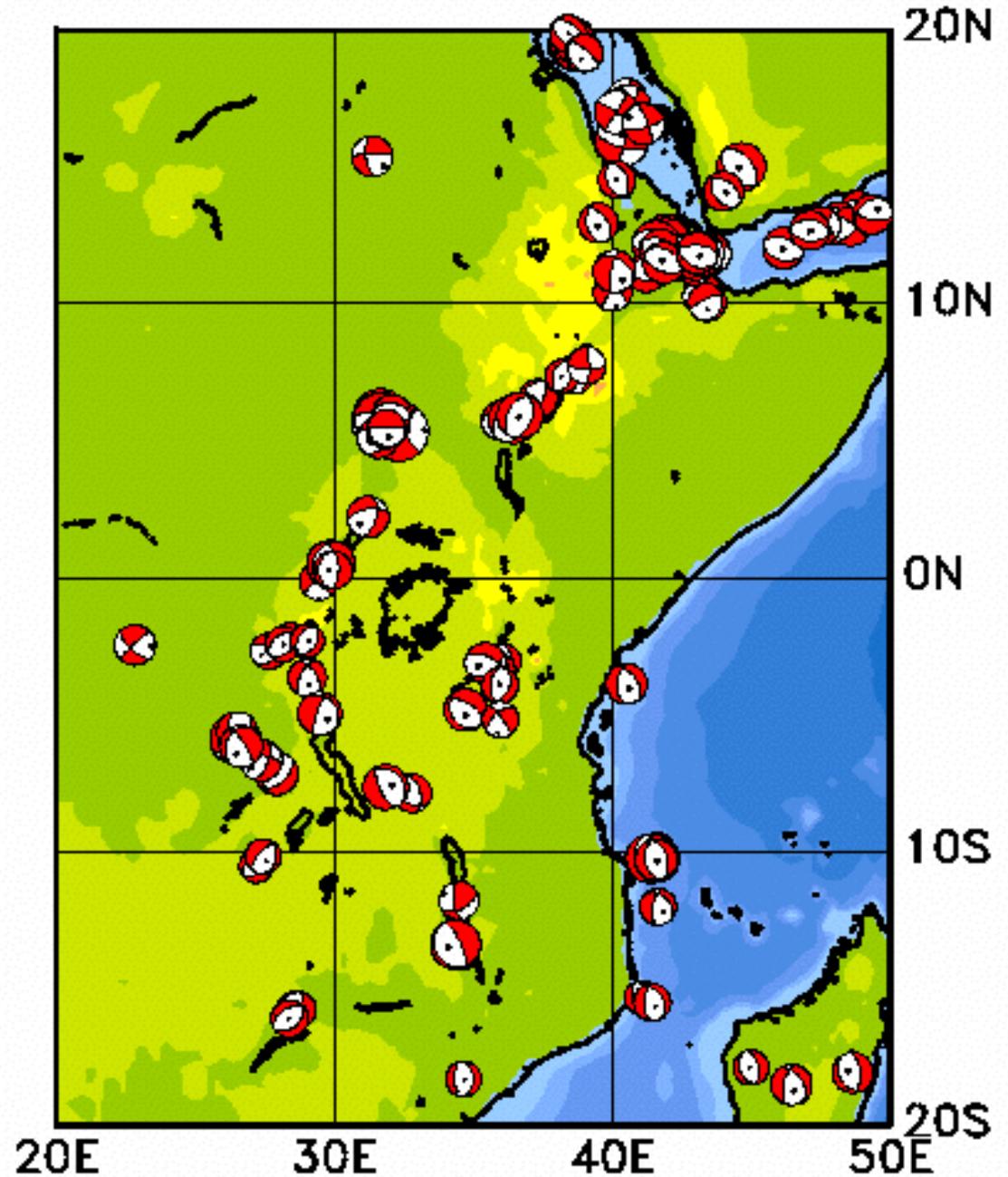
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.





Grindavik 11 nov 2023

Failles « Normales »
Le rift africain
Le grabben d'Alsace



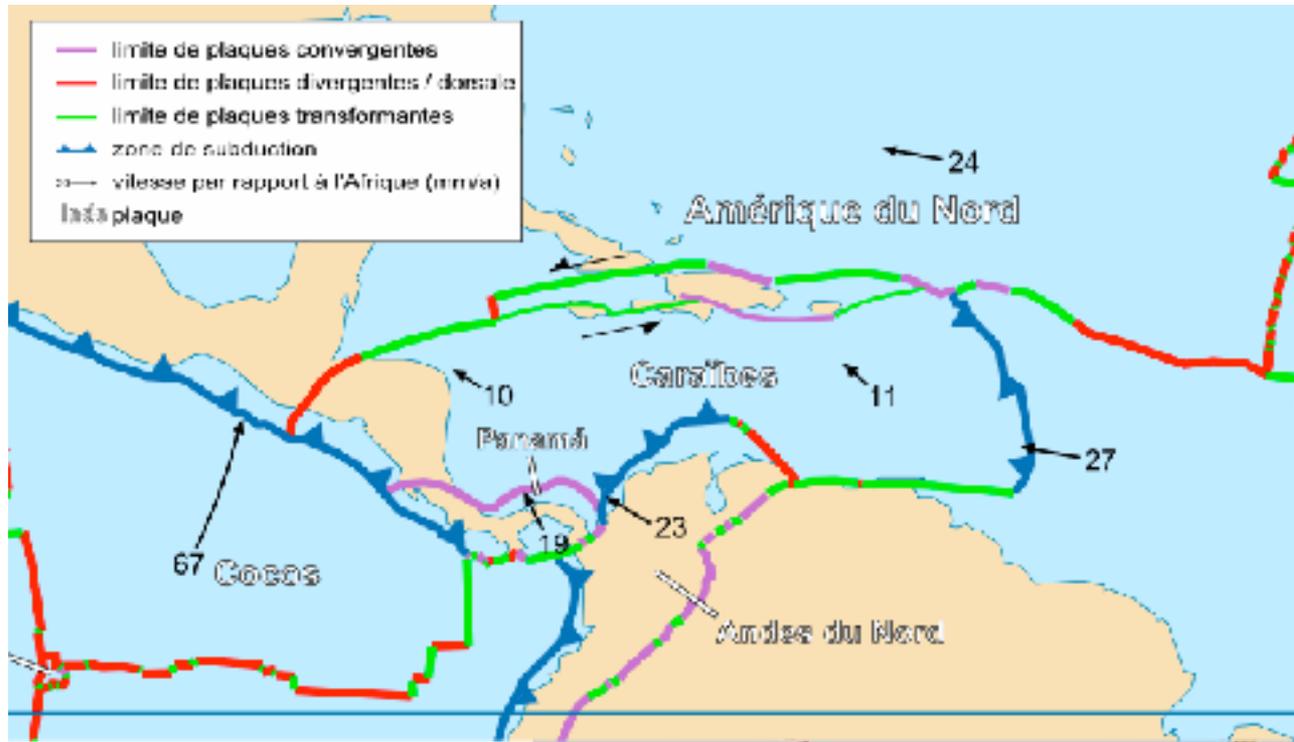


Une faille cisailante
San Andreas

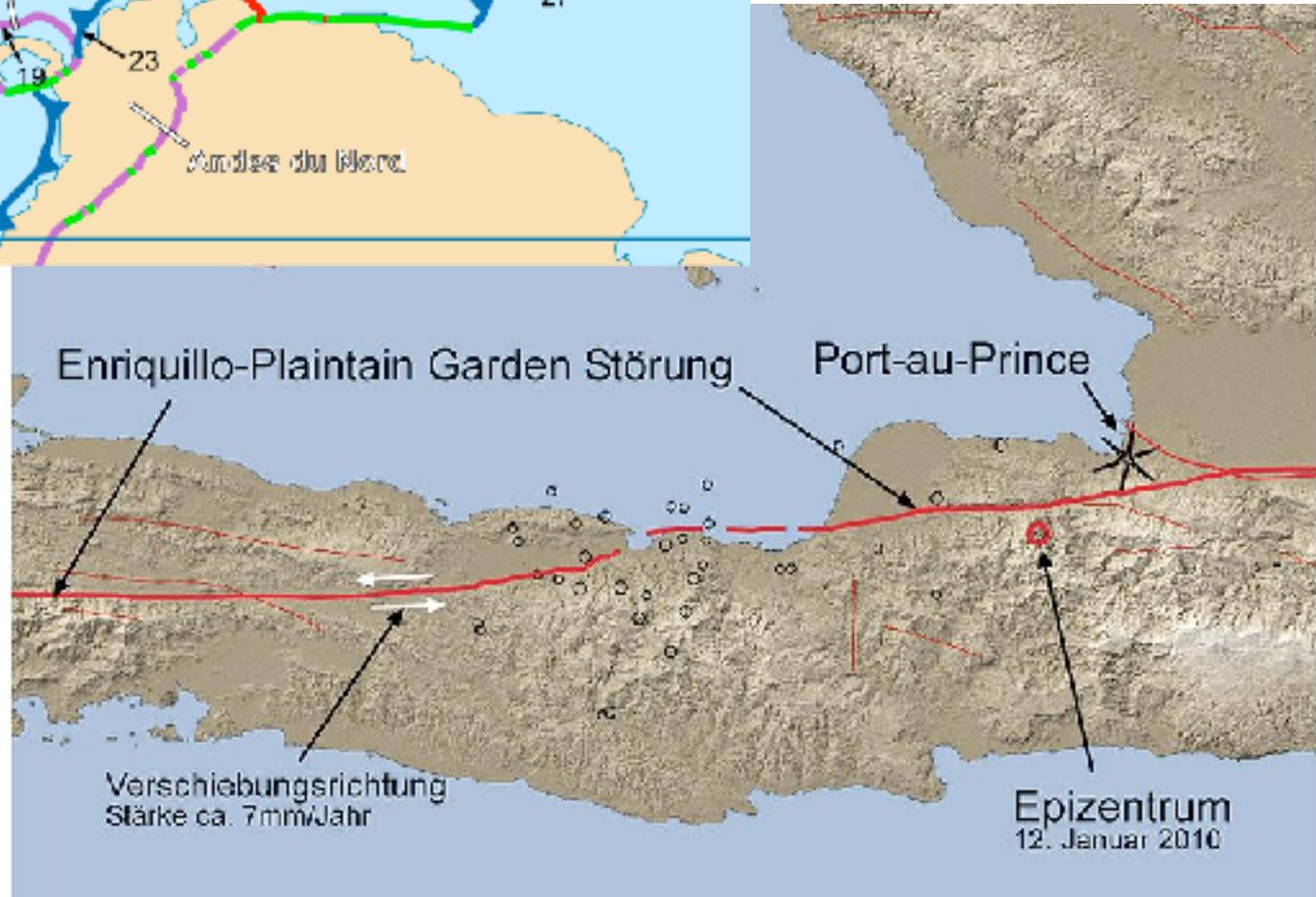


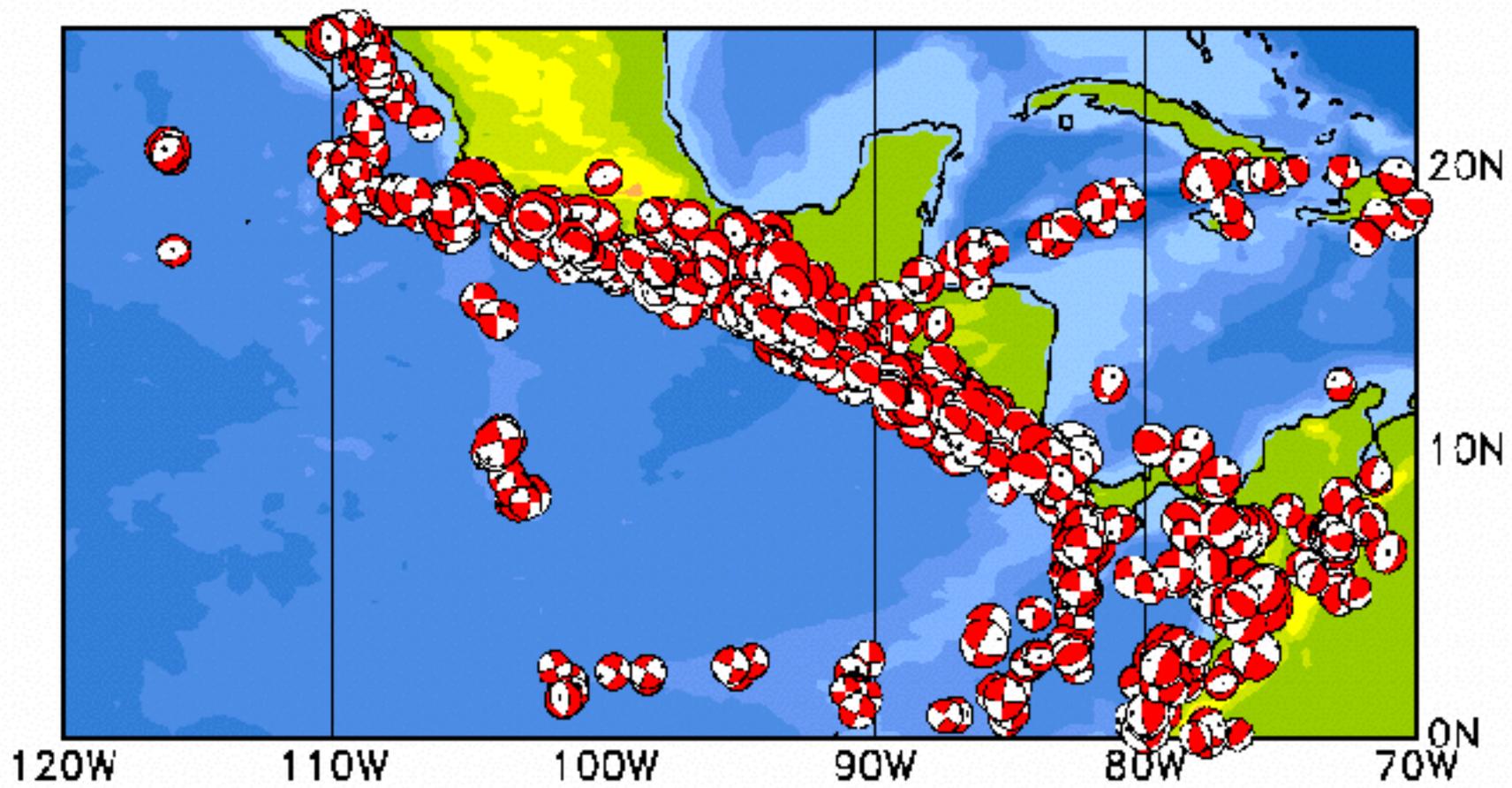
Faille de la Morte Morte

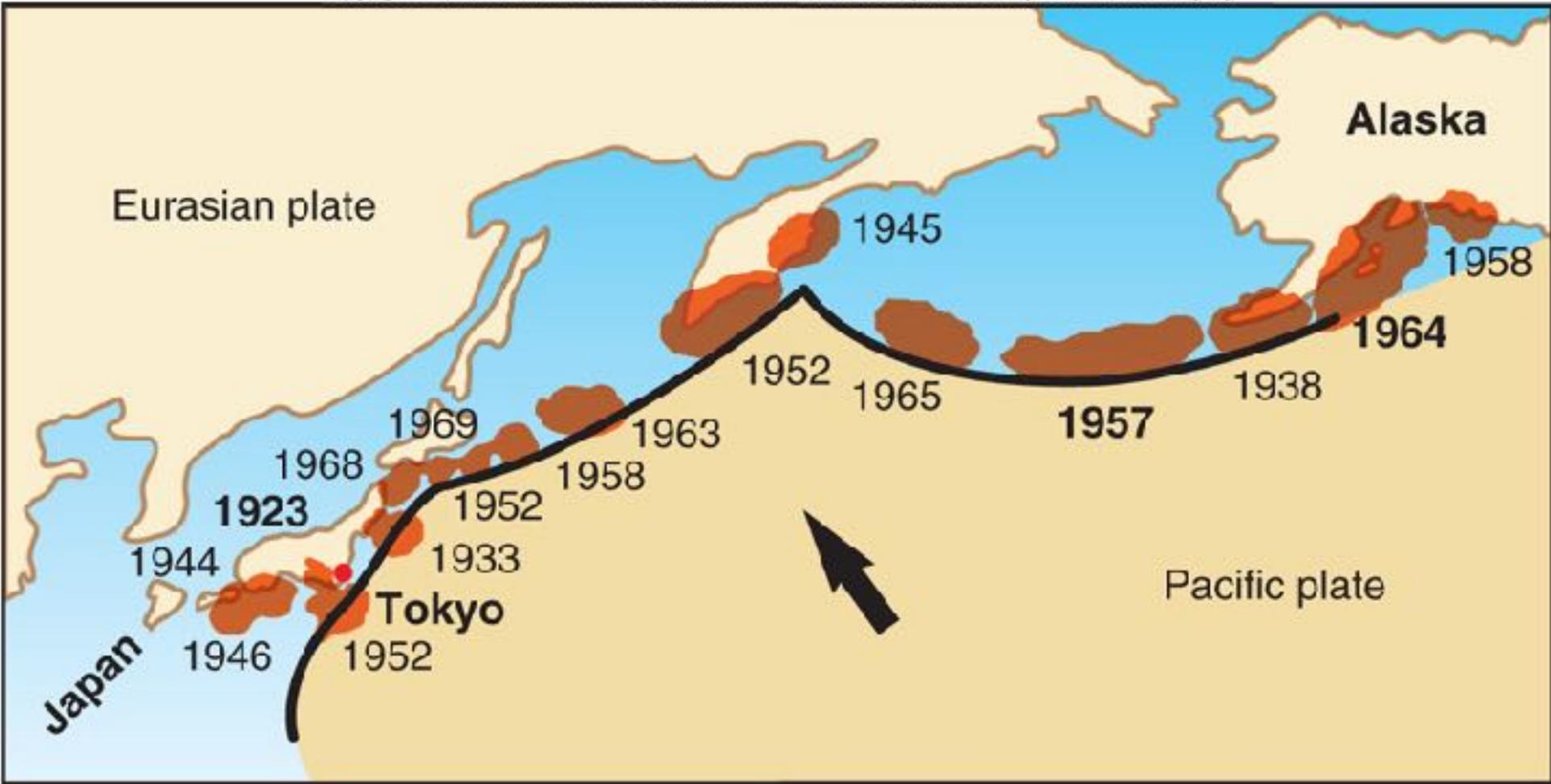




Haiti
 12 January 2010
 Magnitude 7
 250000 people
 killed





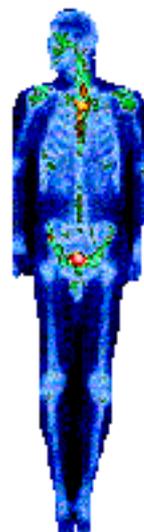


Faille « inverse »

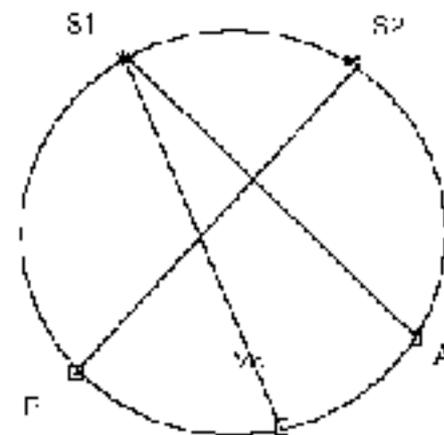


*Seichuan 12 may 2008
M=7.9 80000 people killed*

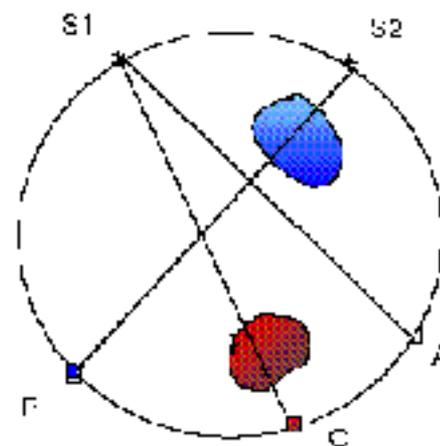
Medical Imagery



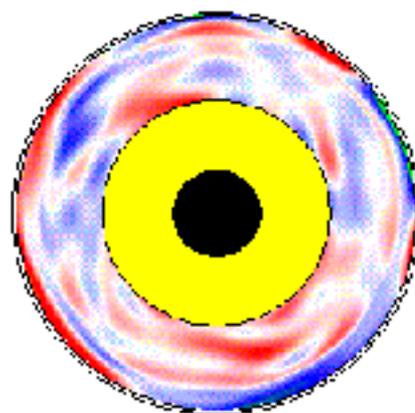
Homogeneous Body



Body with inhomogeneities



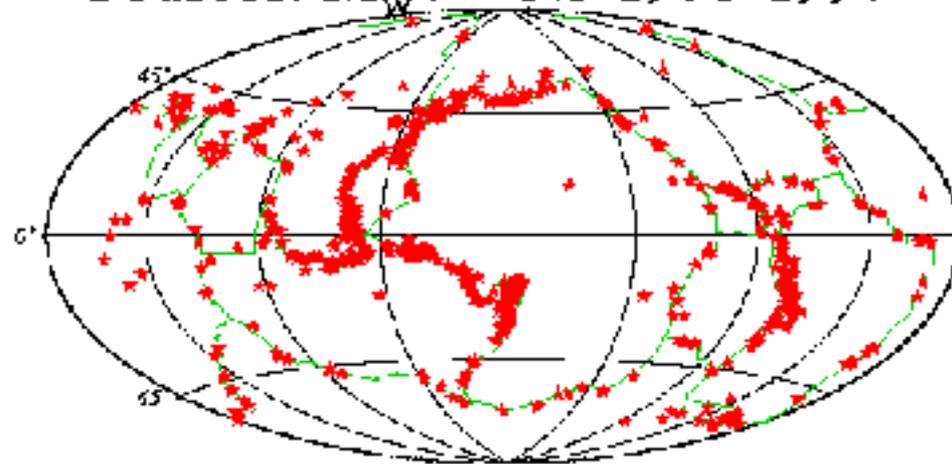
Slow



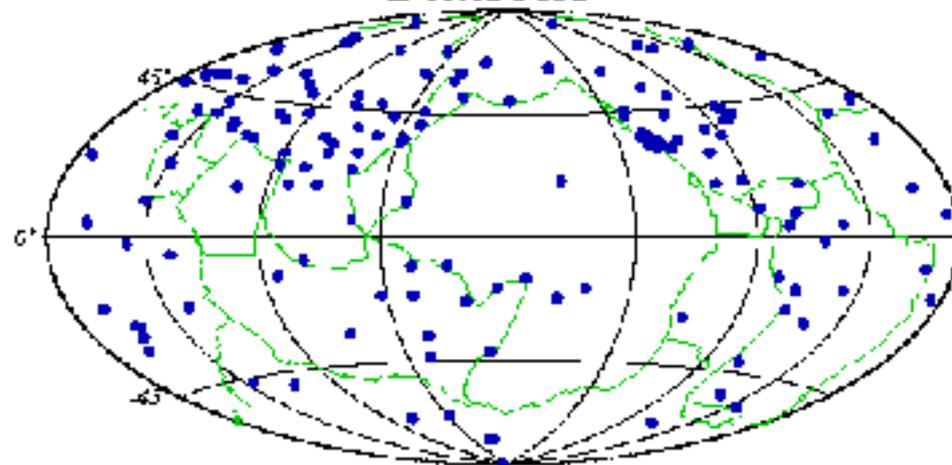
Fast

Seismic Tomography

Sources: $M_w \geq 5.5$ 1976-1997



Stations



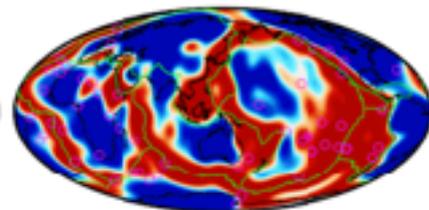
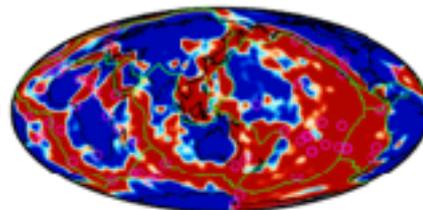
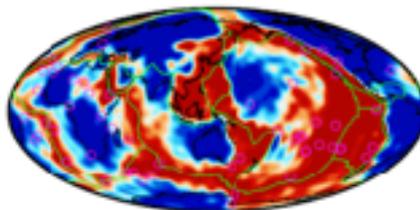
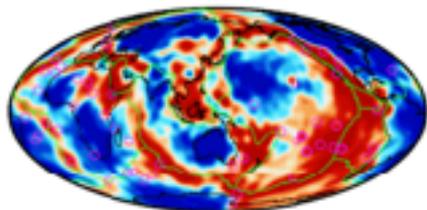
SEISGLOB2
Durand et al. (2017)

S40RTS
Ritsema et al. (2011)

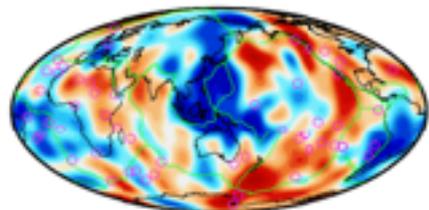
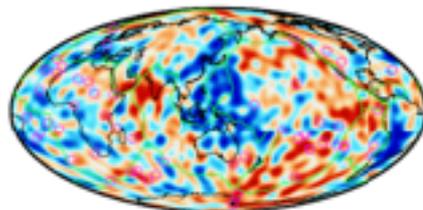
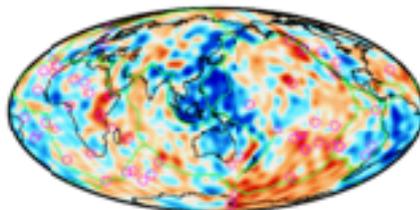
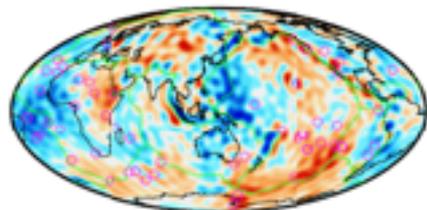
SEMUCB-WM1
French & Romanowicz (2014)

S362WMANI+M
Moulik & Ekström (2014)

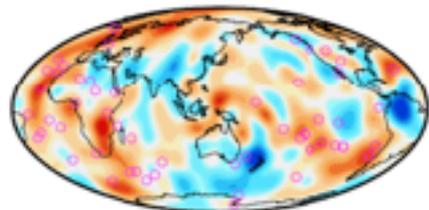
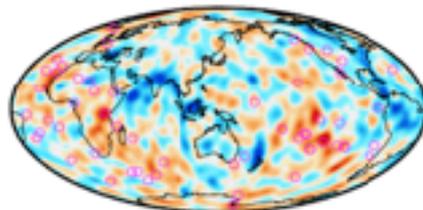
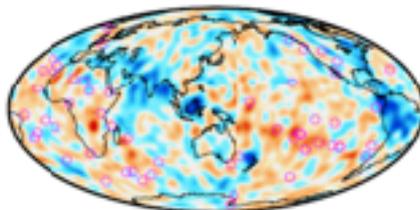
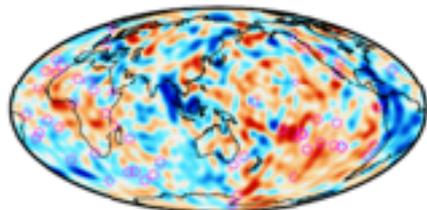
100km



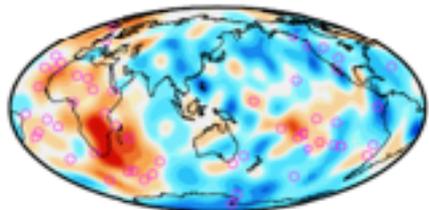
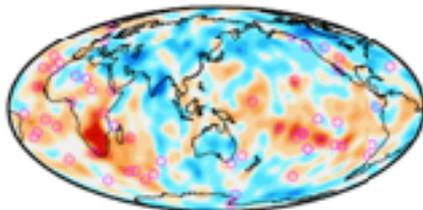
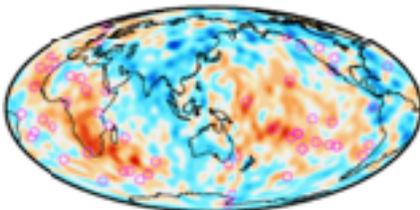
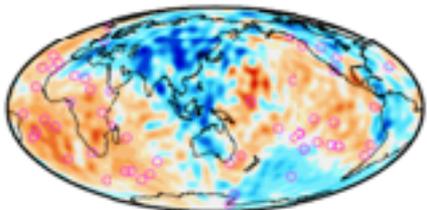
670km



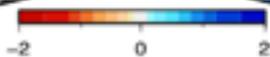
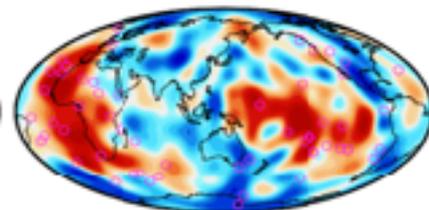
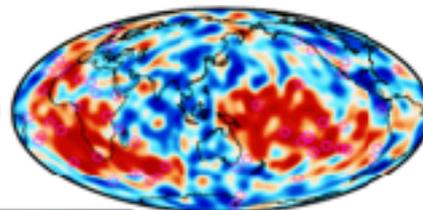
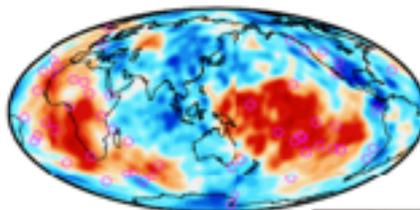
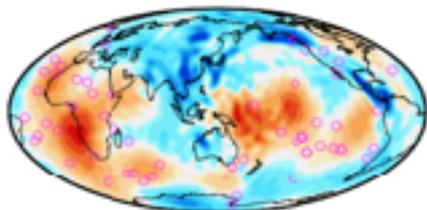
1200km

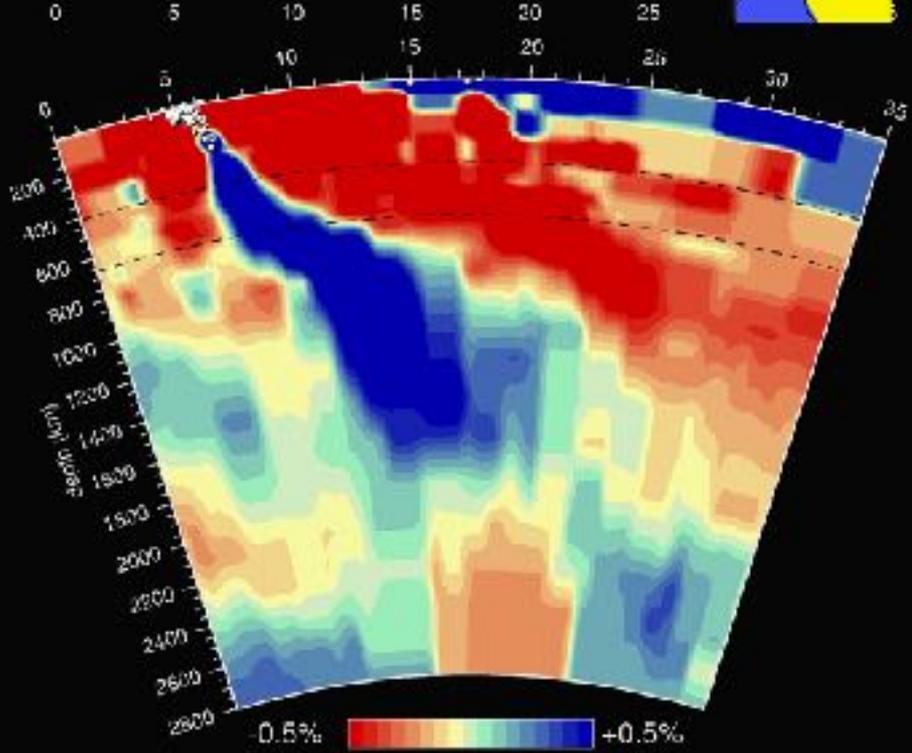
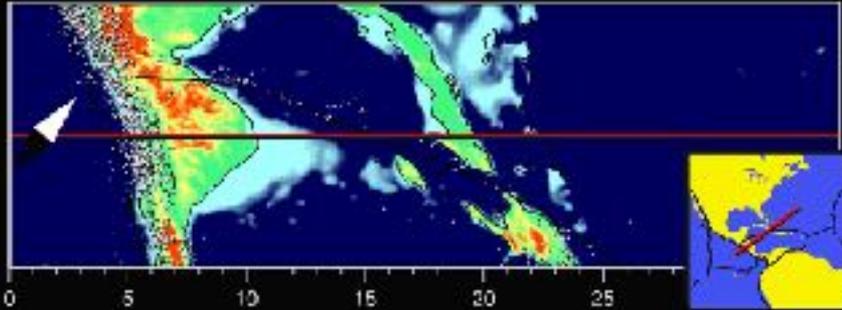


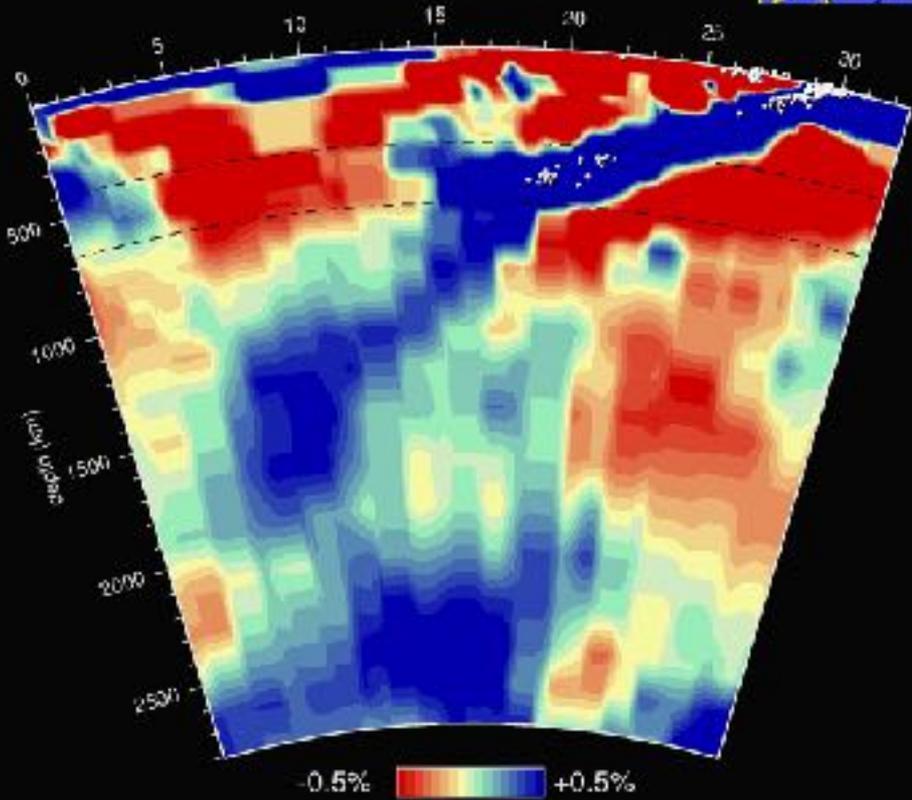
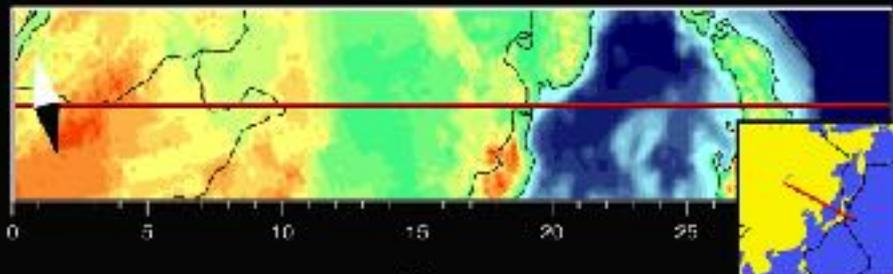
1800km

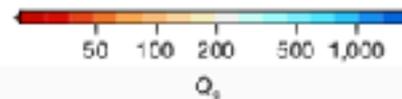
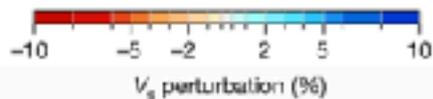
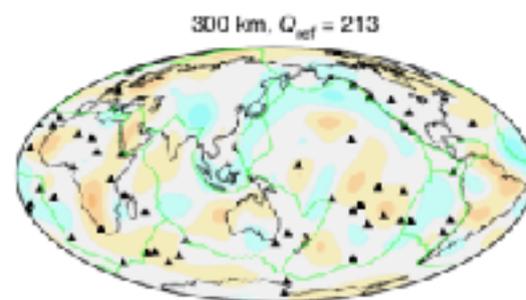
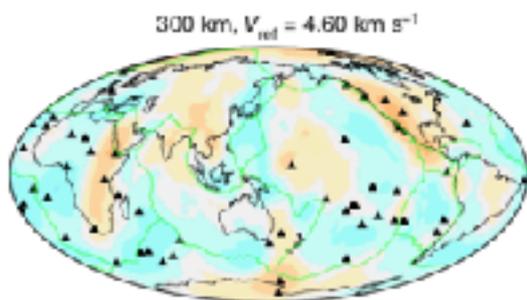
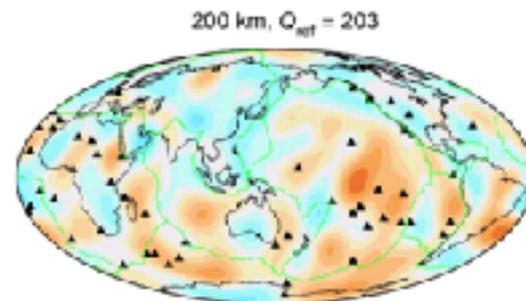
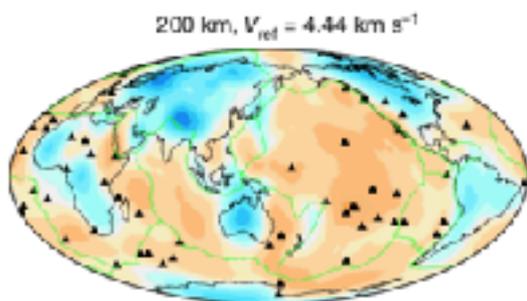
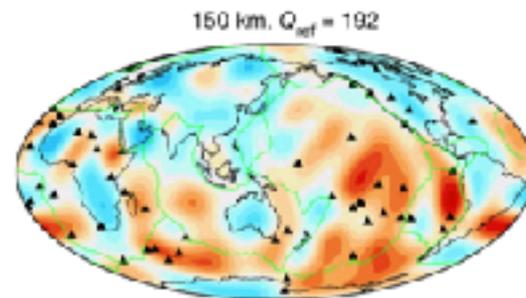
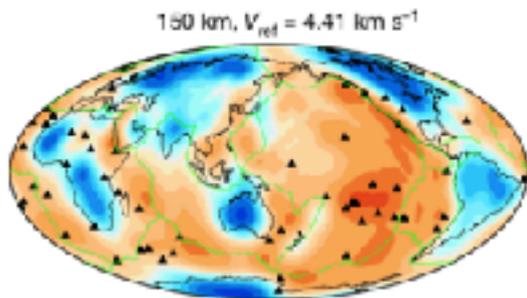
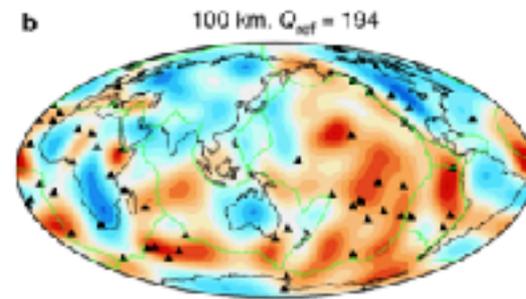
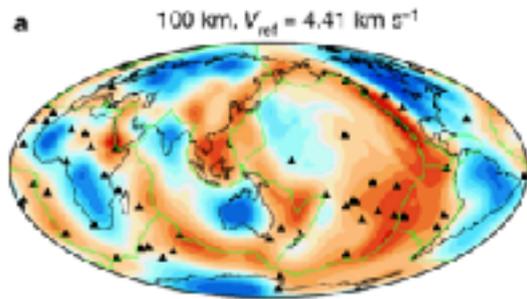


2800km









Vitesse S

Attenuation

*Debaille
& Ricard
Nature,
2020*

