

Le risque sismique

ch. vigny

laboratoire de Géologie de l'ENS

<http://www.geologie.ens.fr/~vigny>



St Flour - 24 Août 2006

Risque sismique = Aléa x Vulnérabilité

- Aléa sismique:

Probabilité pour un site de subir un séisme donné (localisation, profondeur, taille, type, etc...) à un instant donné

- Vulnérabilité:

Dépend des personnes et des biens exposés à l'aléa:

De la Population :

- De son niveau d'éducation
- De son niveau économique et social
- De l'existence ou non d'une "culture sismique" des individus et des pouvoirs publics (réflexes, organisation, secours, etc...)

Des constructions:

- Du type et de la qualité des matériaux
- Du mode de construction

- Dans le désert, le risque sismique est négligeable même si l'aléa est élevé.
Exemple: le séisme des îles Balleny, Antarctique, 2004.
- Dans les régions à forte densité de population (et aux constructions précaires), le risque sismique est très élevé même si l'aléa est modéré.
Exemple les séismes de Bâle (Suisse) au 16eme siècle ou de Lisbonne au 17eme siècle.
- La vulnérabilité, **donc le risque** est en augmentation constante dans les pays en voie de développement (surpopulation et paupérisation).

Séisme d'El Asnam (Algérie), le 10 octobre 1980
M = 7,3



Risque sismique négligeable



Risque sismique élevé

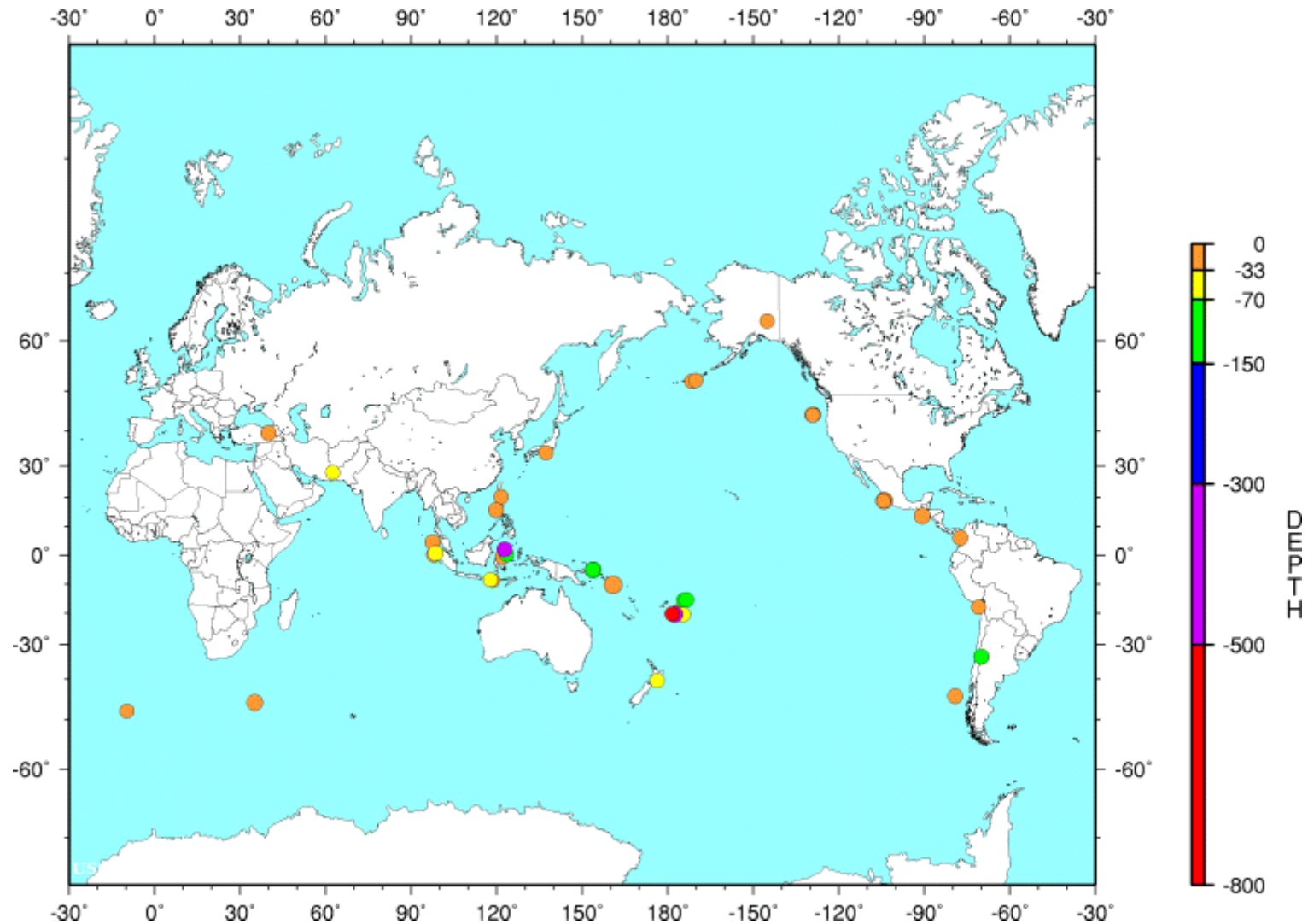
Exemples de vulnérabilité du bâti: étage souple, piliers sous dimensionnés, maçonnerie non chaînée....

Zémmouri-Boumerdes, Algérie Mai 2003 Mw 6.5

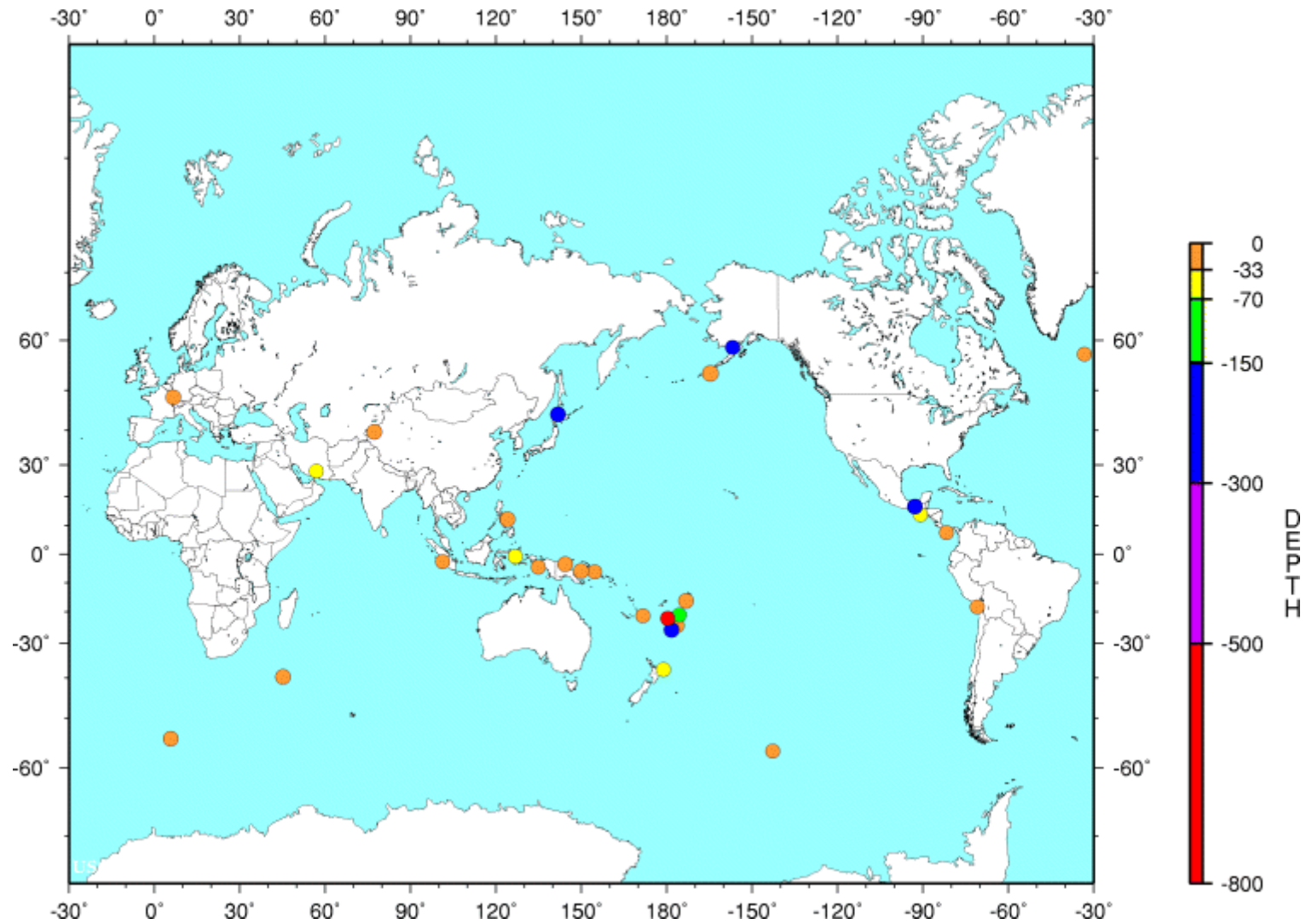


L'Aléa sismique dans le monde

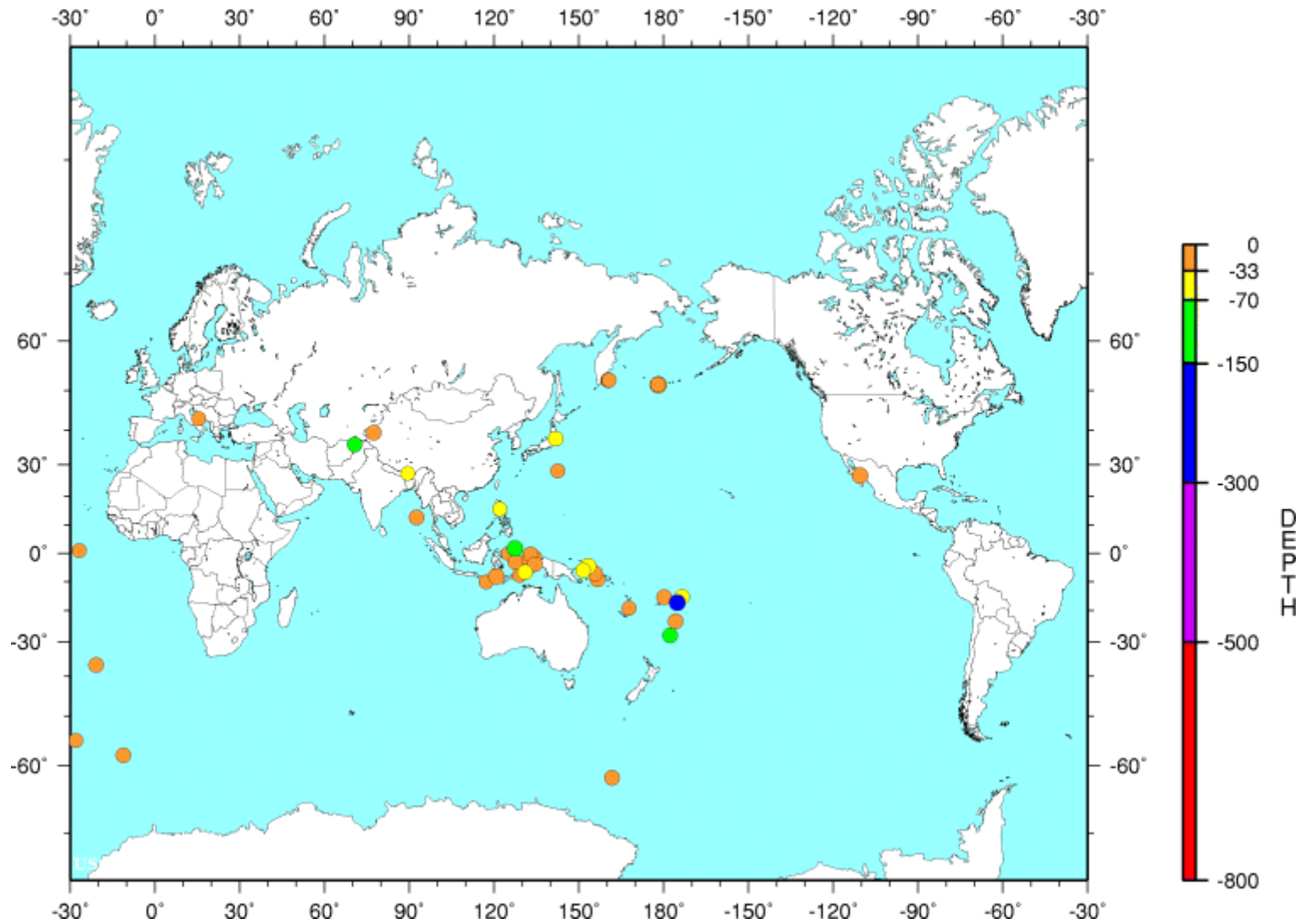
Janvier 2003 : 40 Séismes



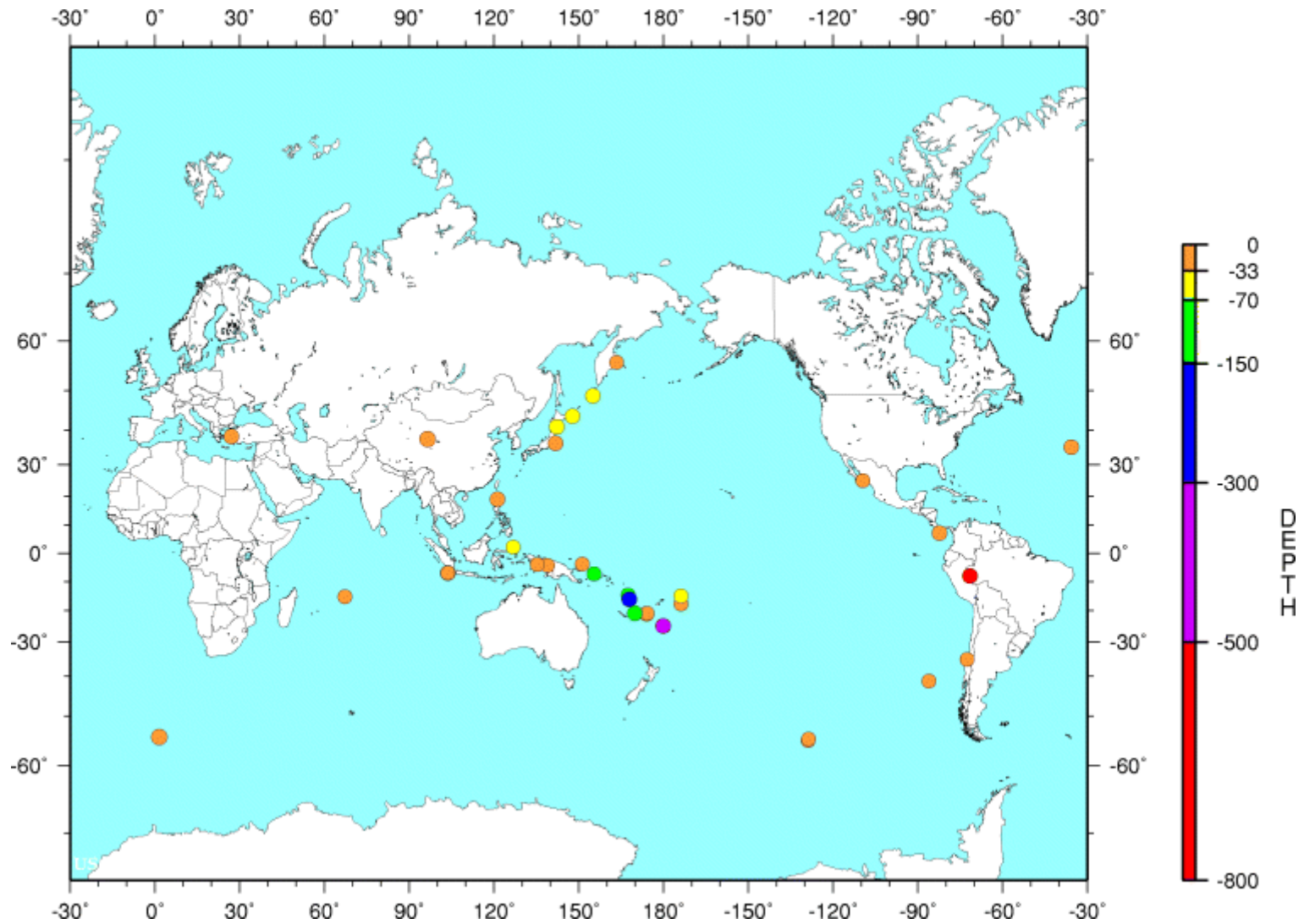
Février 2003 : 29 Séismes



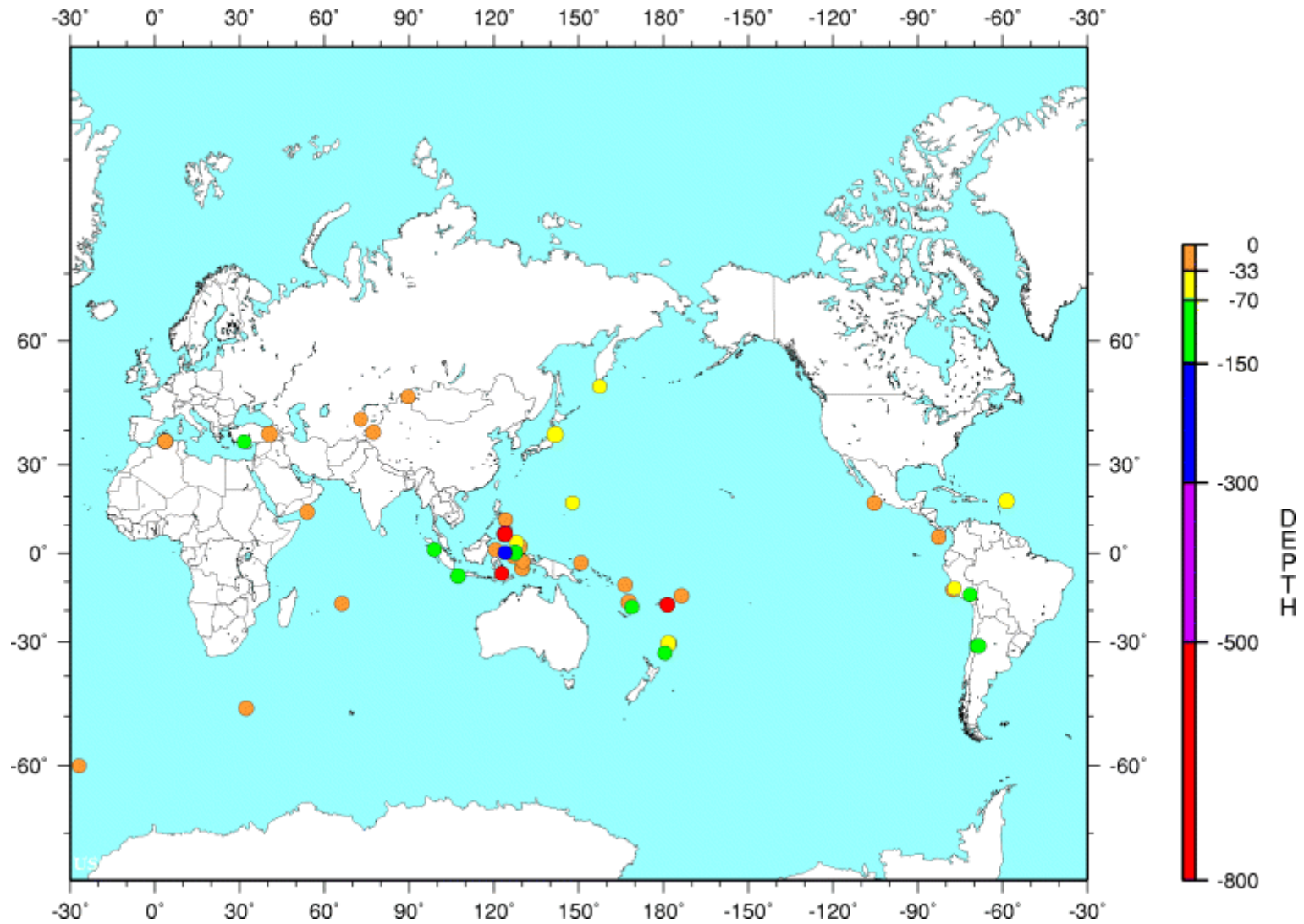
Mars 2003 : 41 Séismes



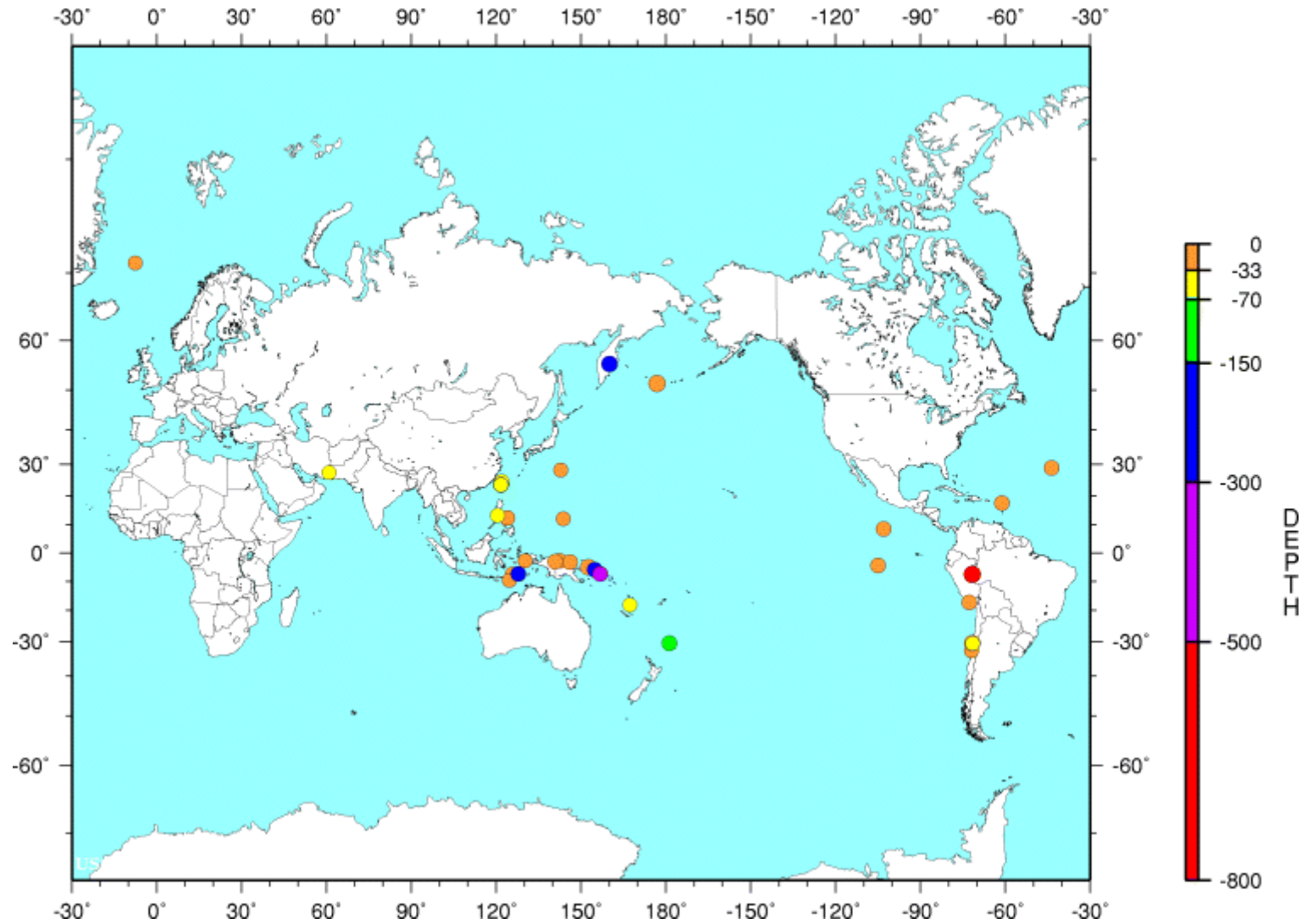
Avril 2003 : 33 Séismes



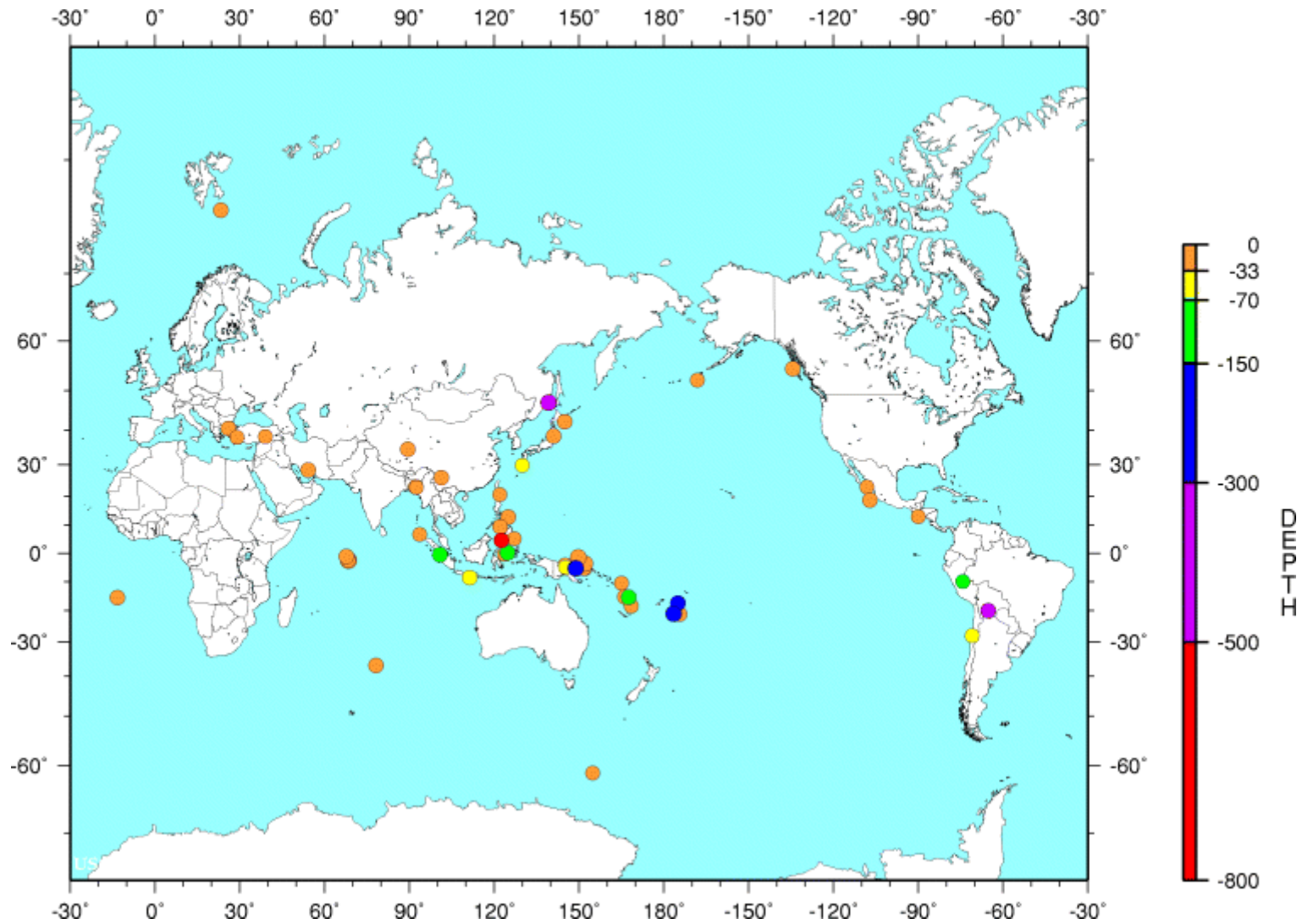
Mai 2003 : 46 Séismes



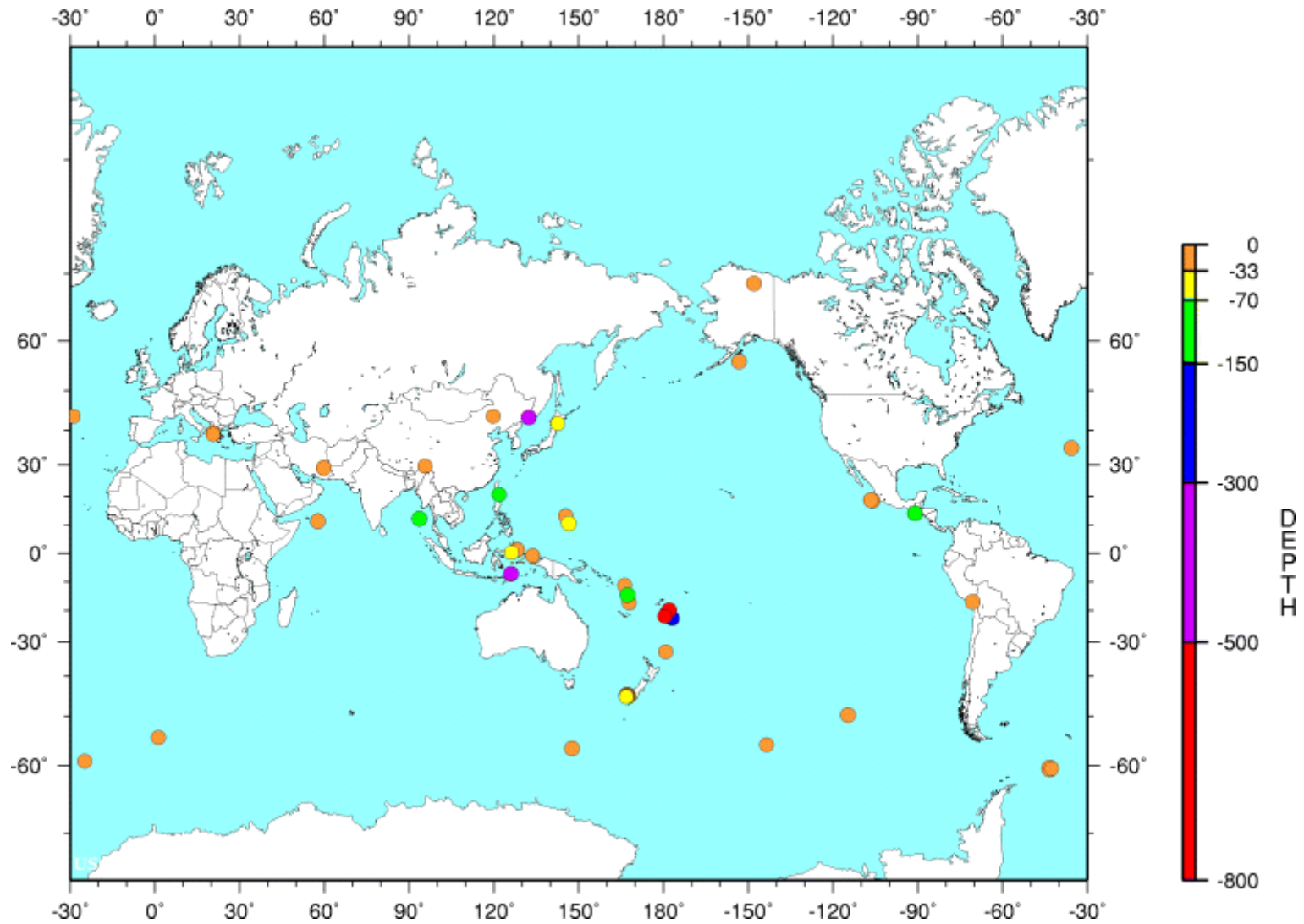
Juin 2003 : 33 Séismes



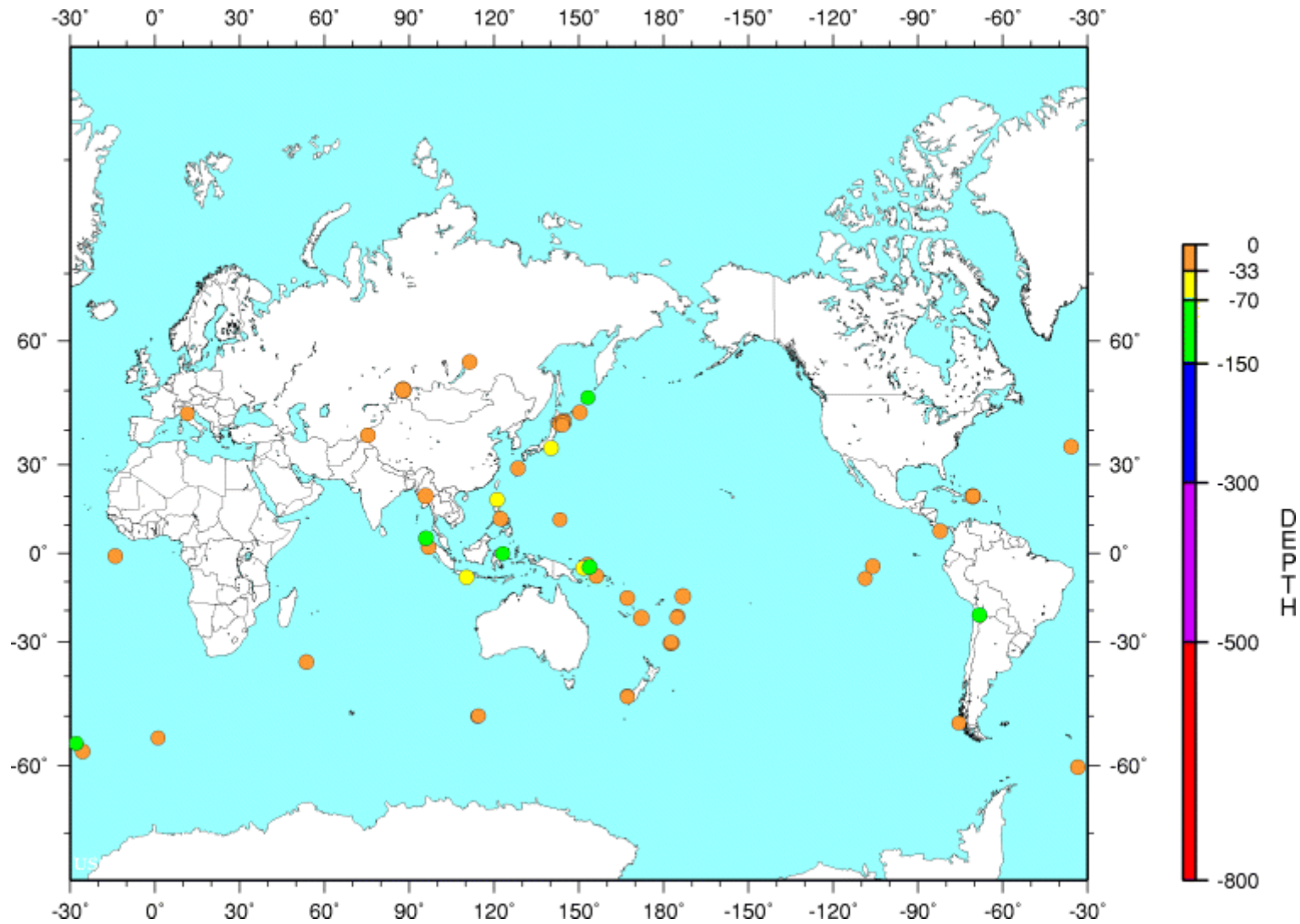
Juillet 2003 : 53 Séismes



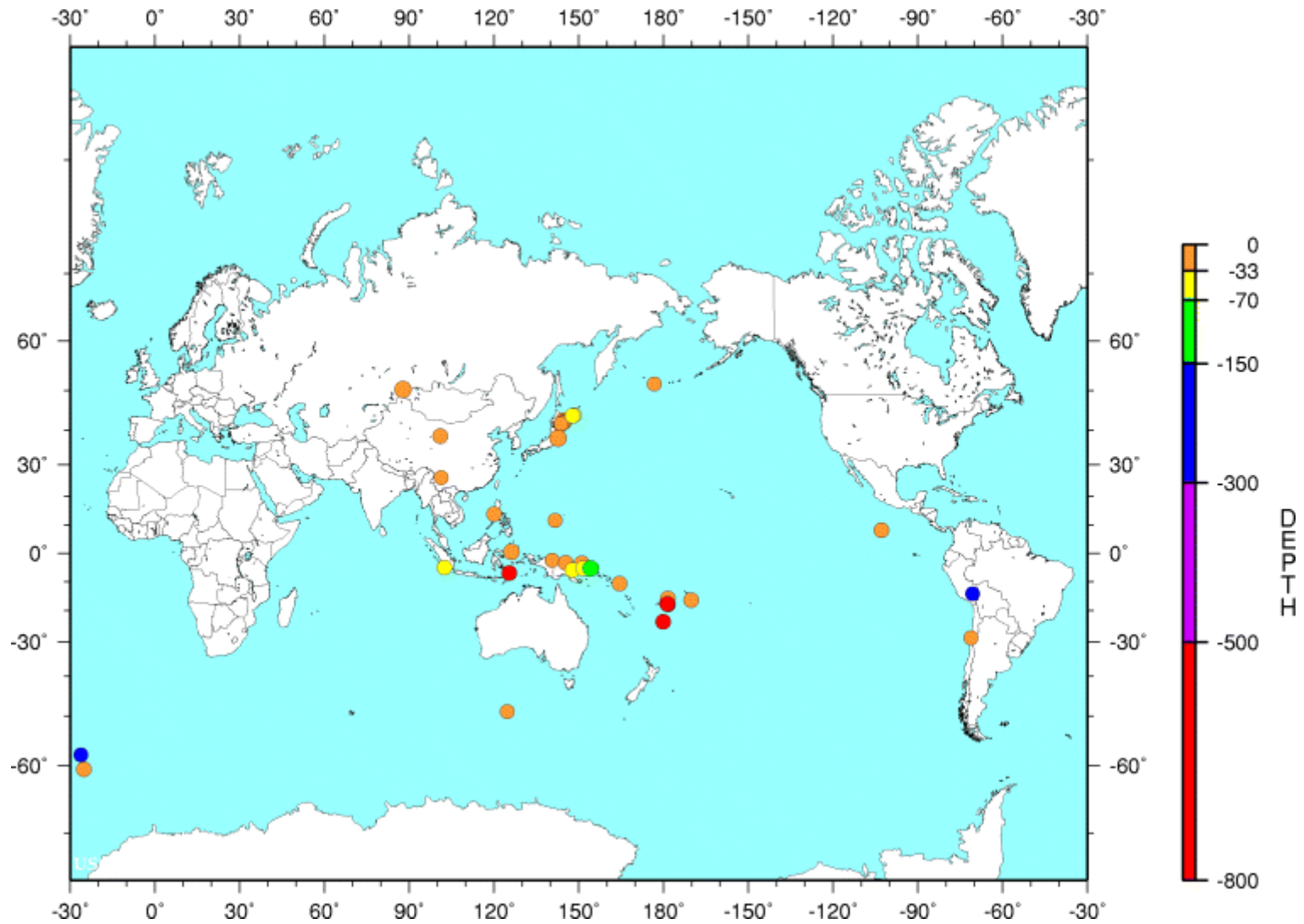
Août 2003 : 47 Séismes



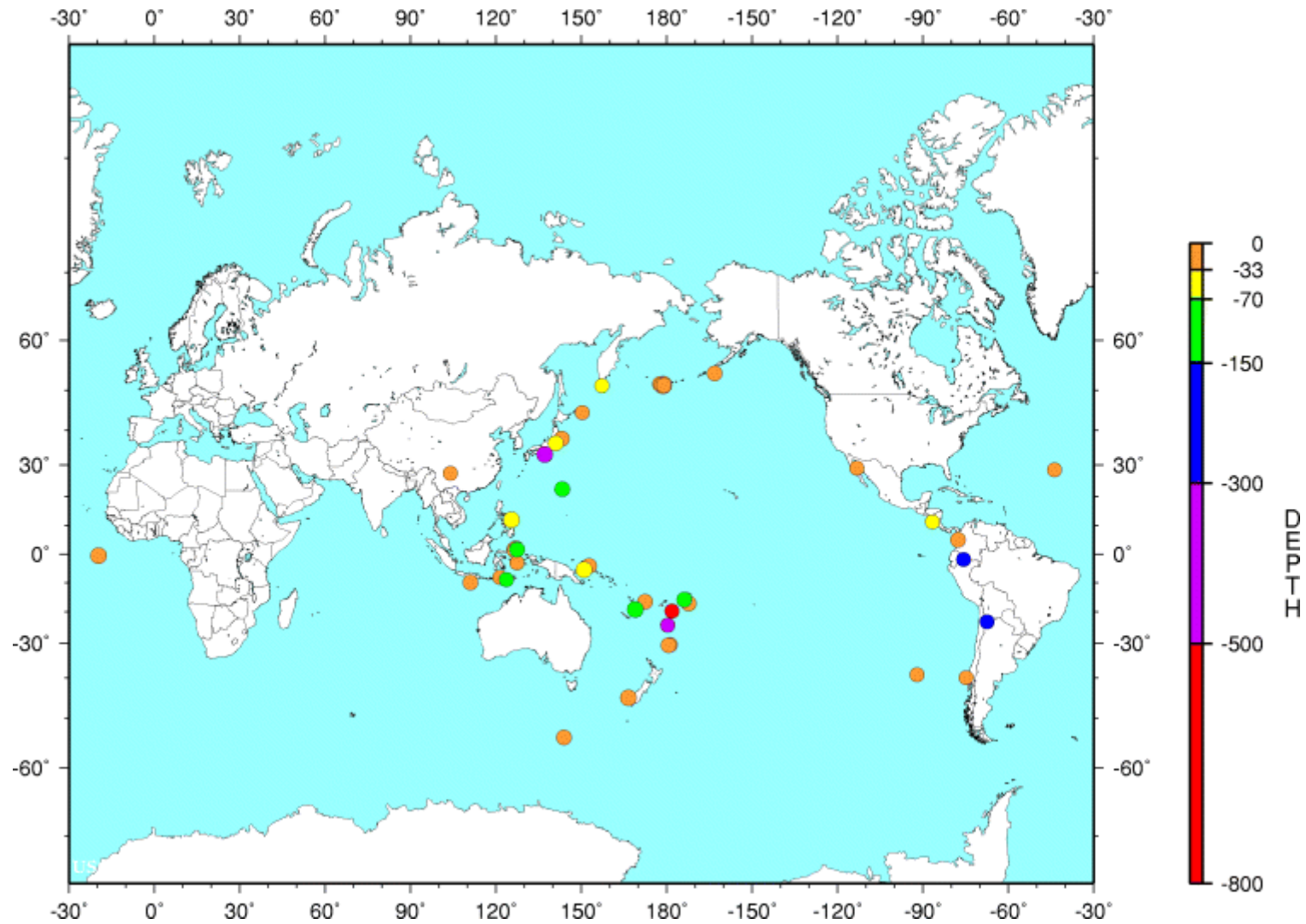
Septembre 2003 : 63 Séismes



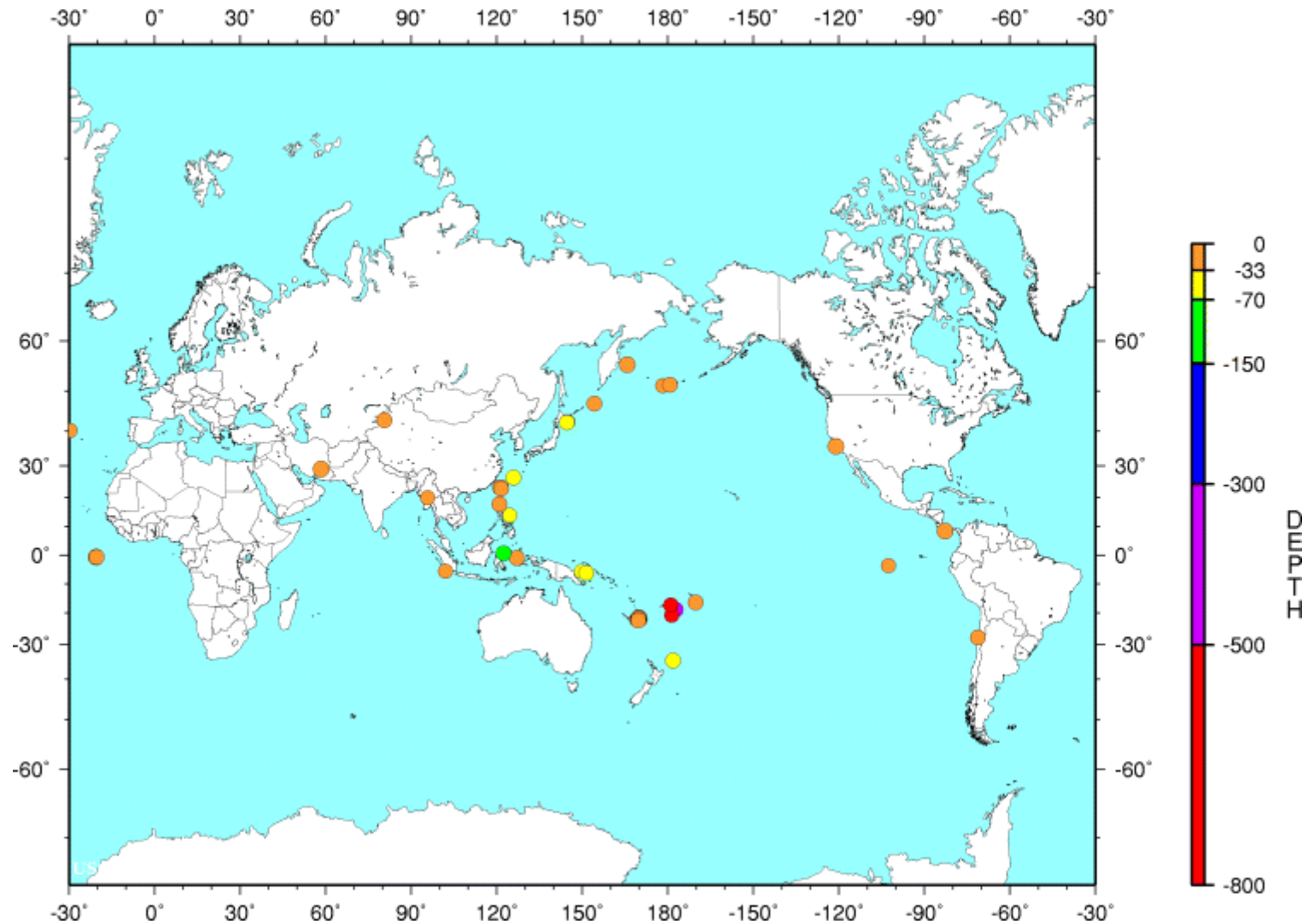
Octobre 2003 : 38 Séismes



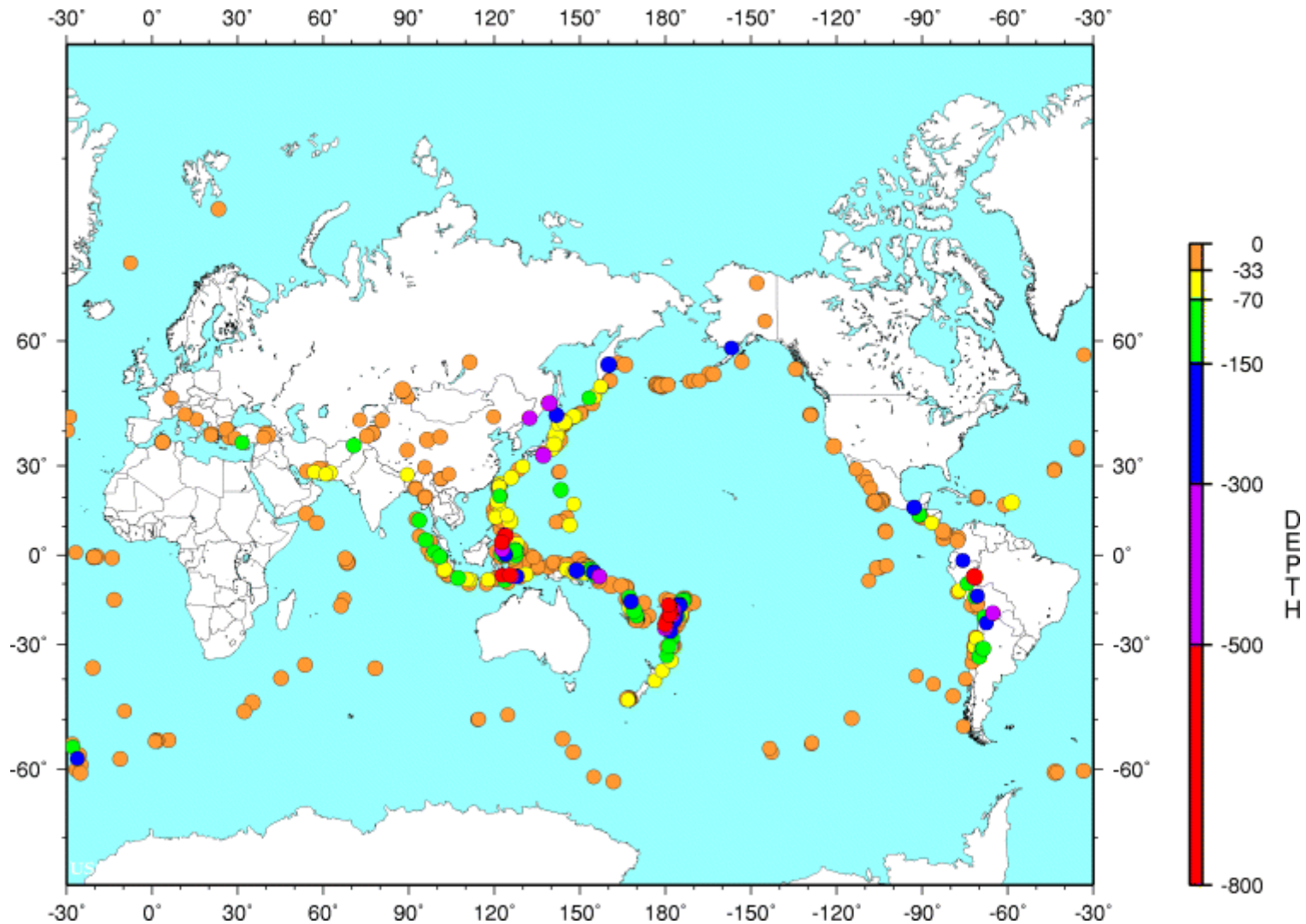
Novembre 2003 : 43 Séismes



Décembre 2003 : 46 Séismes



Année 2003 : 512 Séismes



Question n°1: Combien de séismes ?

Réponse : ça dépend !

Les **petits** (magnitude entre 4 et 5) : **1 par heure**

Les **moyens** (magnitude entre 5 et 6) : **1 par jour**

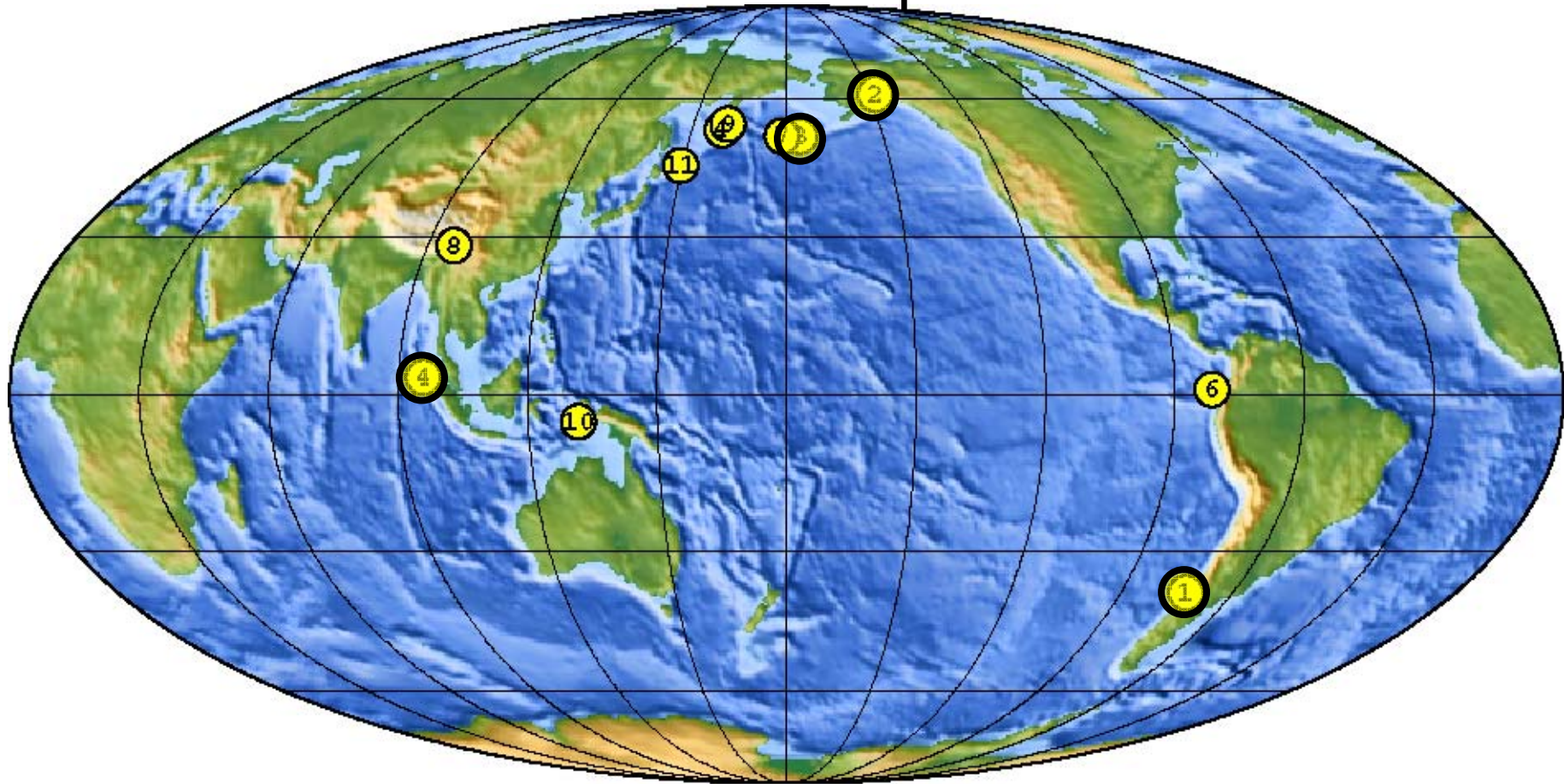
Les **gros** (magnitude entre 7 et 8) : **1 par mois**

Les **très gros** (magnitude entre 8 et 9) : **1 par an**

Les **énormes** (magnitude > 9) : **1 tous les 10 ans**

Les plus gros séismes en 50 ans

4: c'est bien environ 1 par décennie



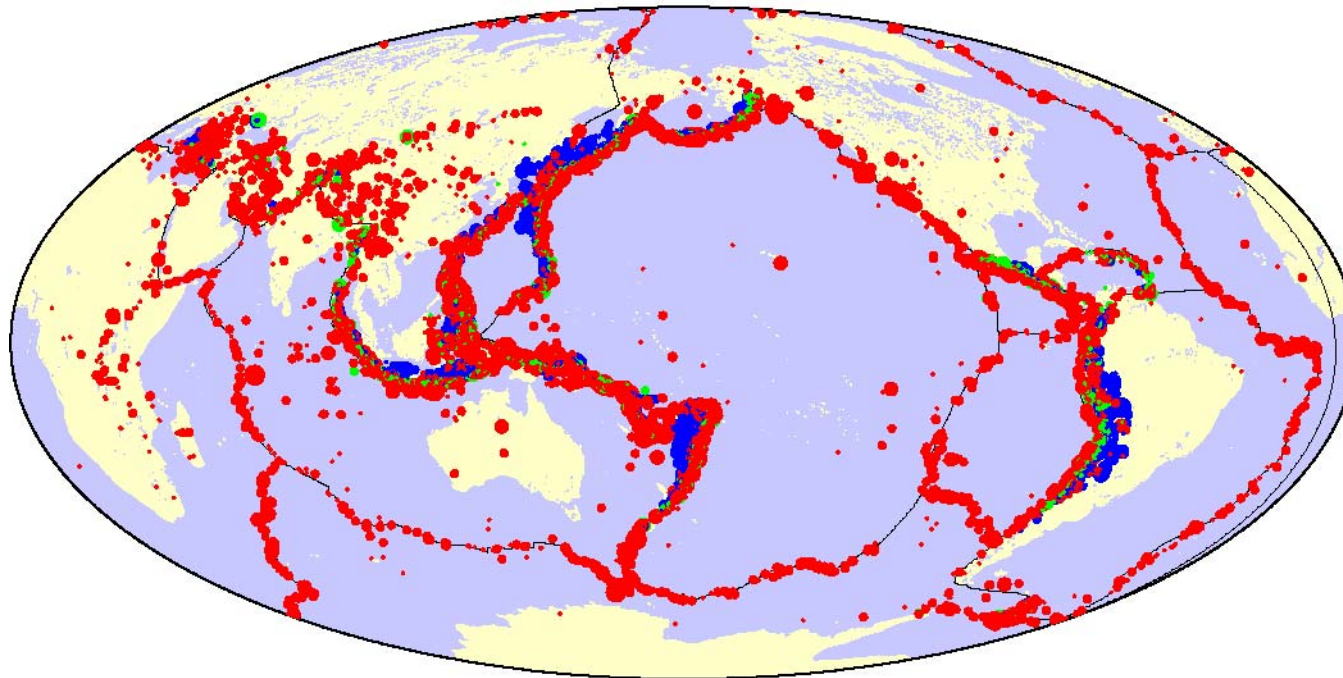
1 : Valdivia 1960: 9,6 3 : Iles Aléoutiennes 1957: 9,2

2 : Alaska 1964: 9,4 4 : Sumatra 2004: 9,0

Question n°2: où sont ils ?

Réponse : pas n'importe où !

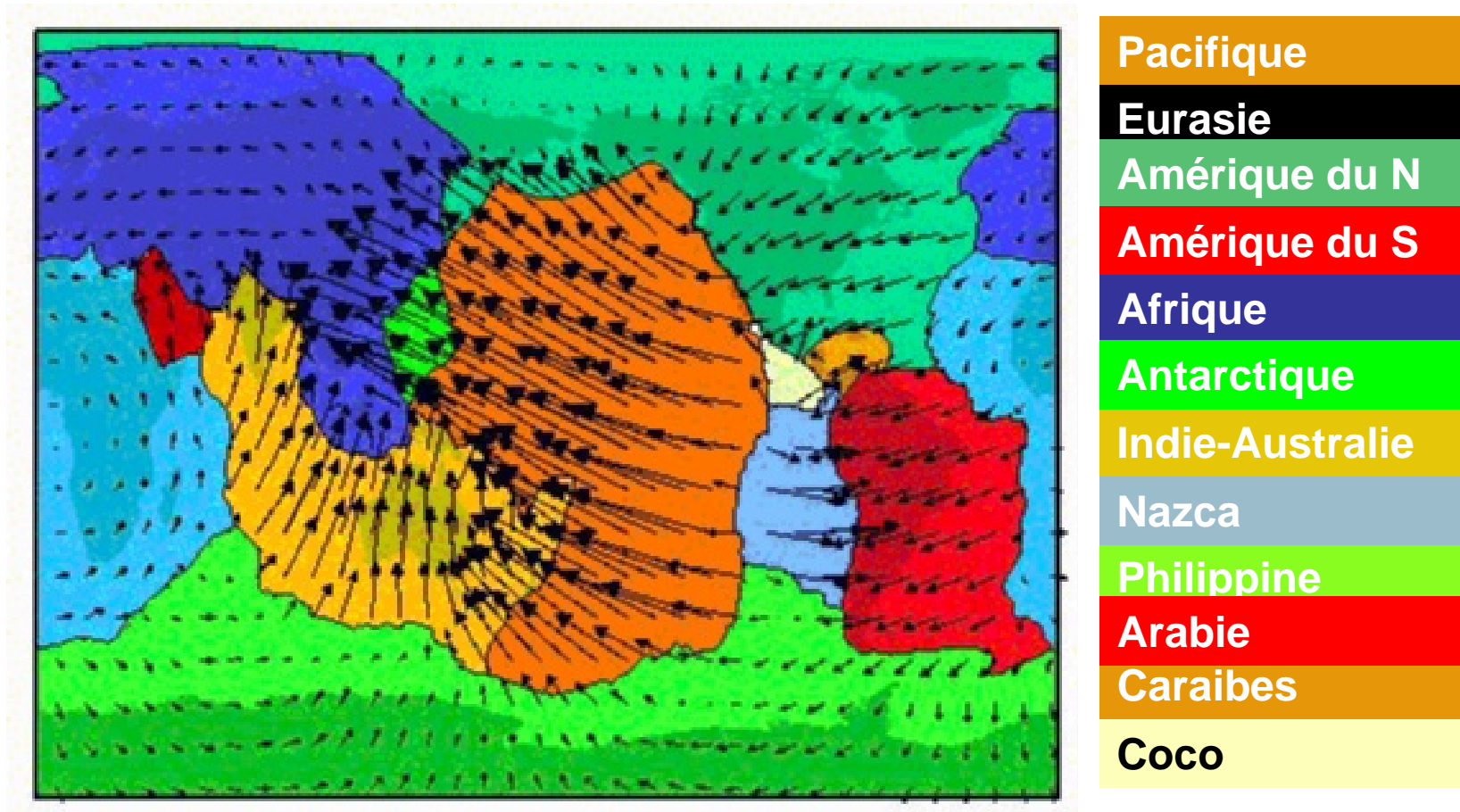
SISMICITE MODIALE : 30 ans - 17 000 seismes de magnitude superieure à 4.5



• PETITS : M 4.5 - 5.5 • MOYENS : M 5.5 - 6.5 • GROS : M 6.5 - 7.5 • TRES GROS : M 7.5 - 8.5
• profondeur < 50km • profondeur 50km - 100km • profondeur > 100km

Question n°3: pourquoi ?

Réponse : à cause de la tectonique des plaques



Il y a 12 grandes plaques Et elles bougent ! C'est la **tectonique des plaques**

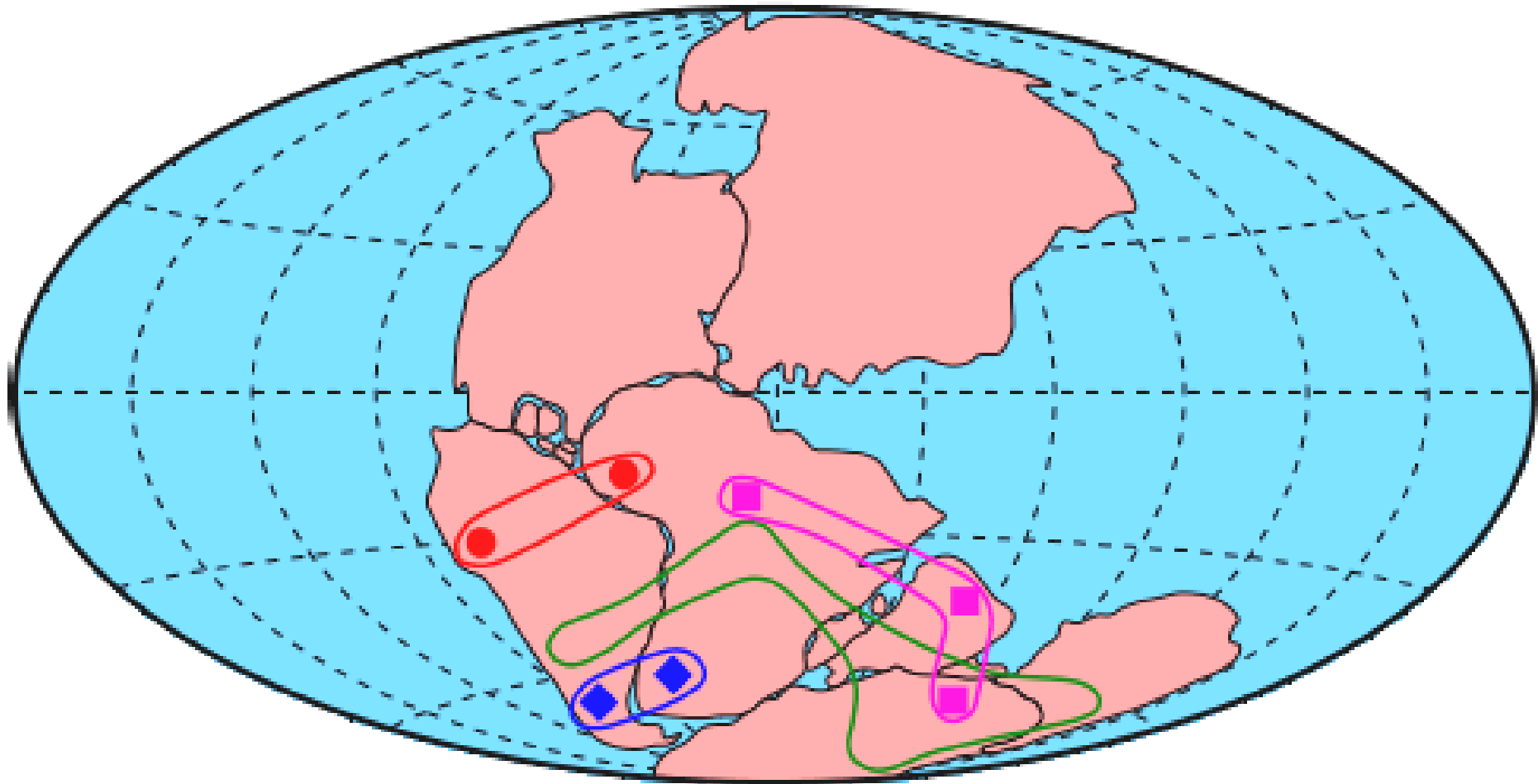
● **Cynognathus**: reptile prédateur terrestre ayant vécu il y a 240 Ma

◆ **Mesosaurus**: petit reptile de lacs d'eau douce, il y a 260 Ma

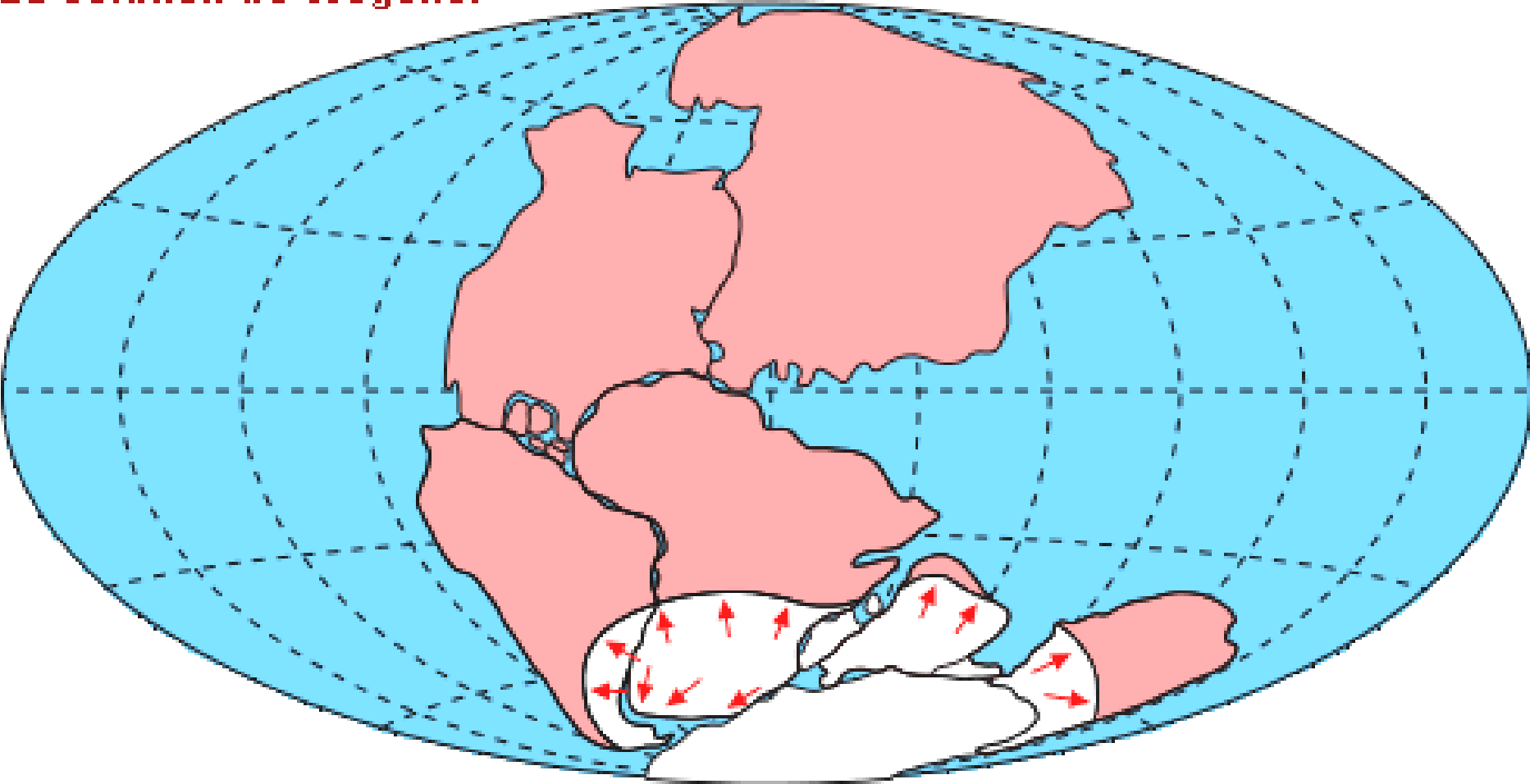
■ **Lystrosaurus**: reptile terrestre ayant vécu il y a 240 Ma

♣ **Glossopteris**: plante terrestre d'il y a 240 Ma

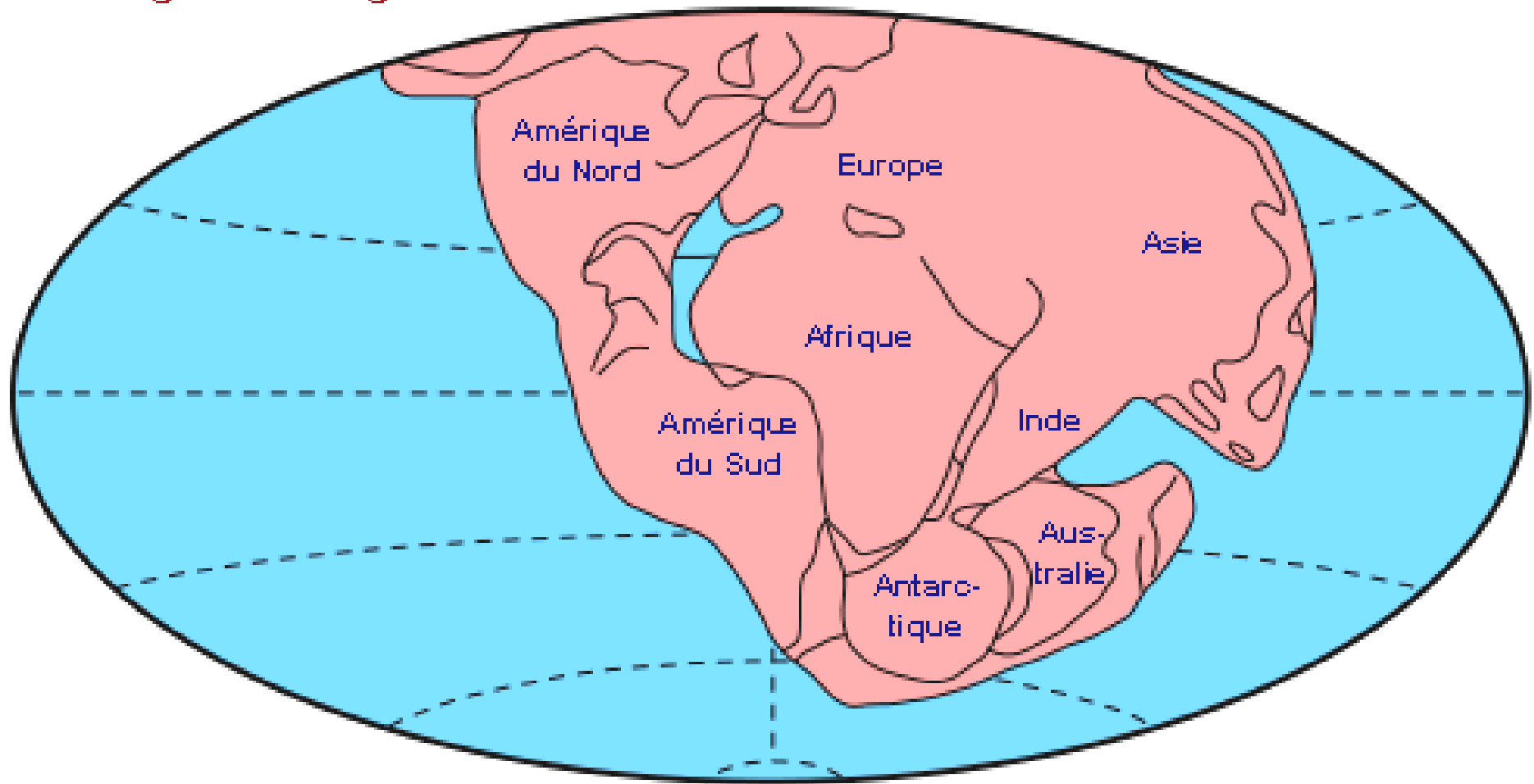
La solution de Wegener



La solution de Wegener



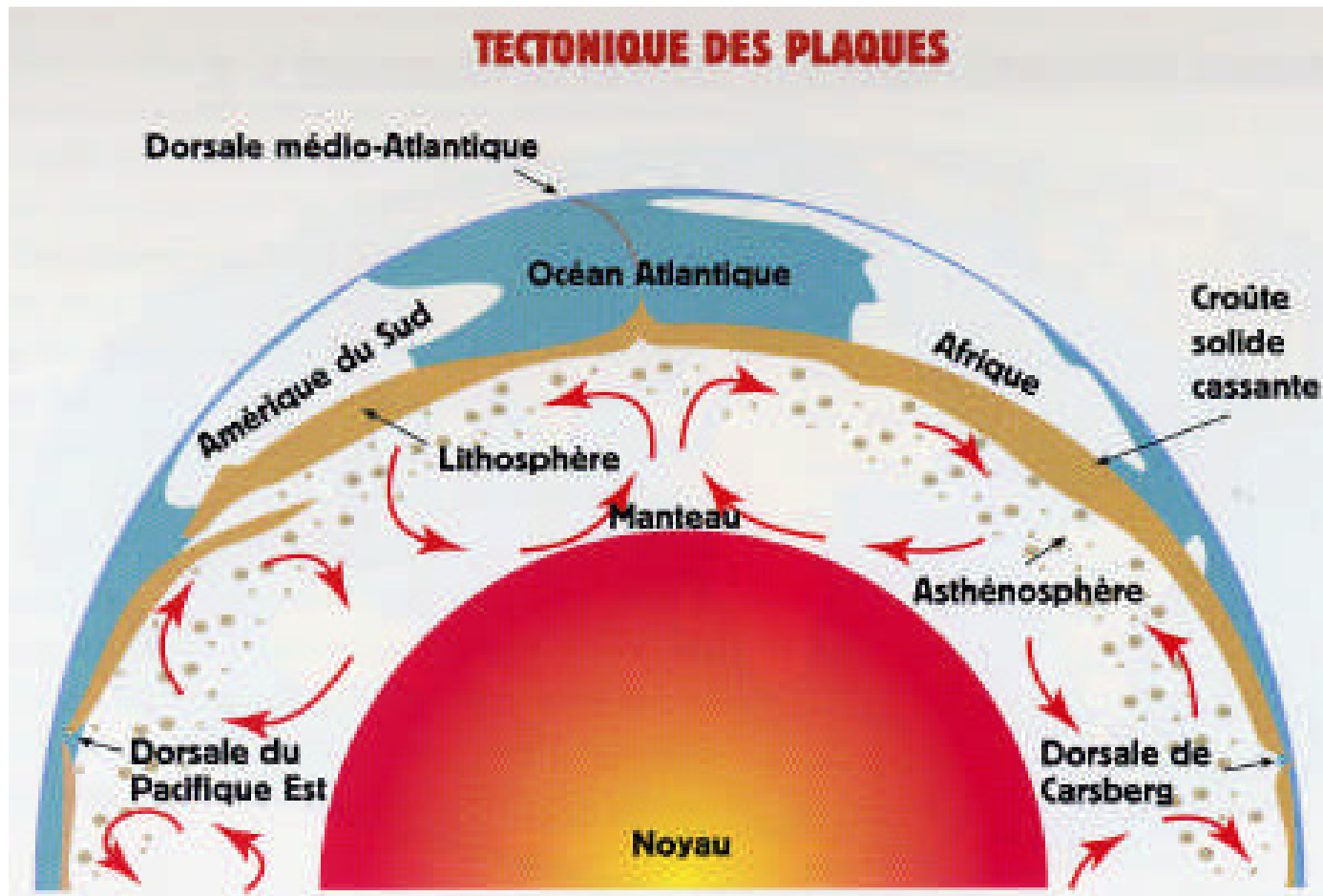
Position actuelle des continents
La Pangée de Wegener



Il y a 480 Ma
Il y a 600 Ma
(Fin Précambrien)

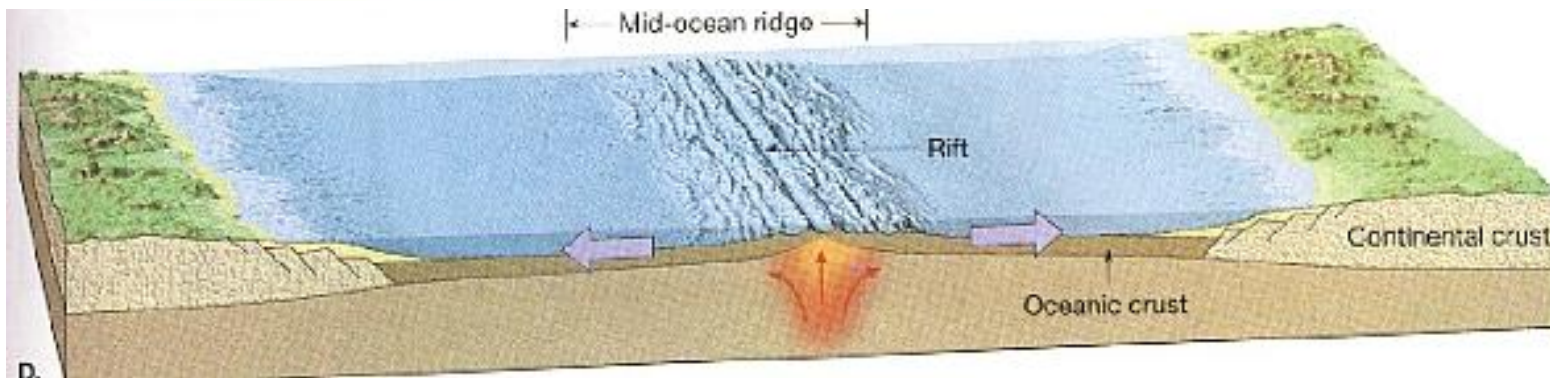
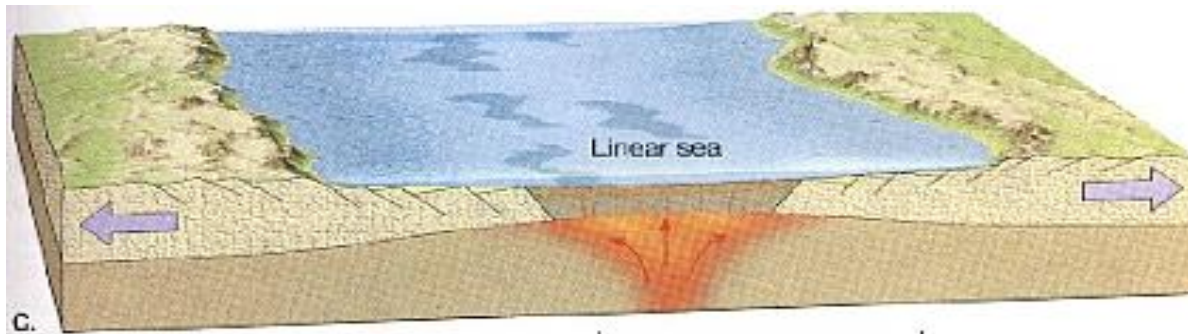
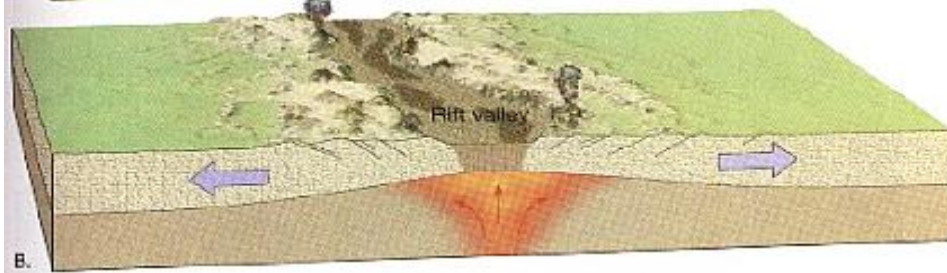
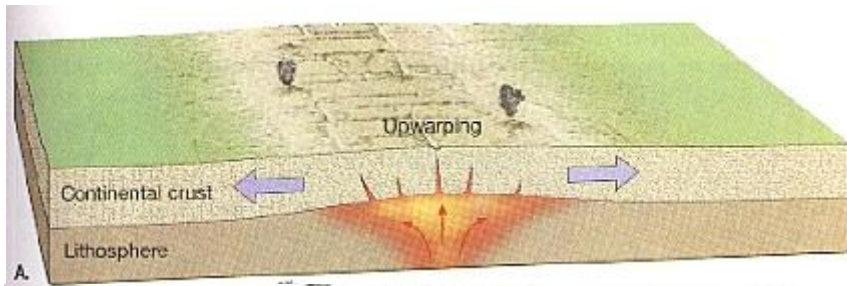


Le moteur de la tectonique est la convection mantellique.
Son carburant est la radioactivité naturelle des roches.



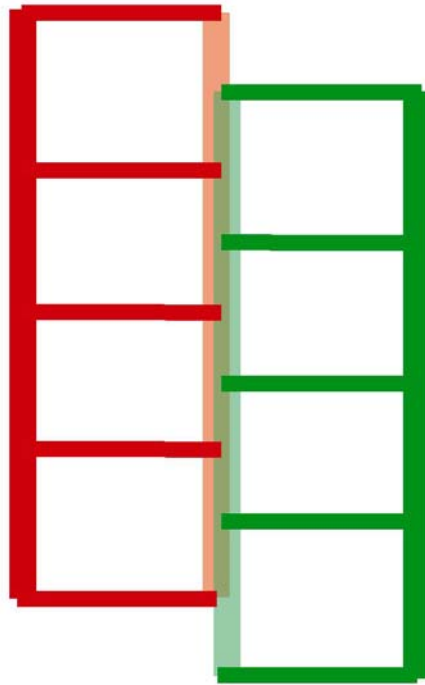
Comment “casser”
un continent :

Un rift devient un
océan

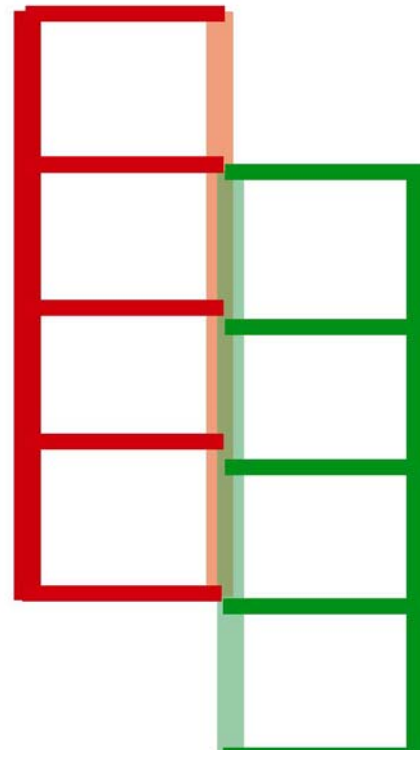


Question n°4 : Comment ?

Réponse : ça frotte et ça casse !

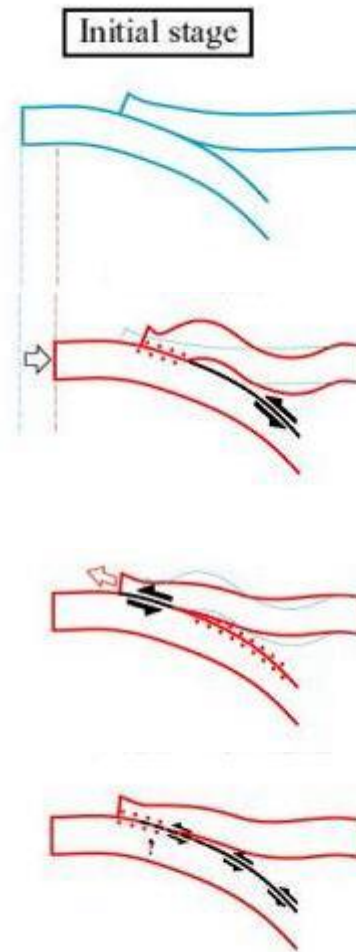
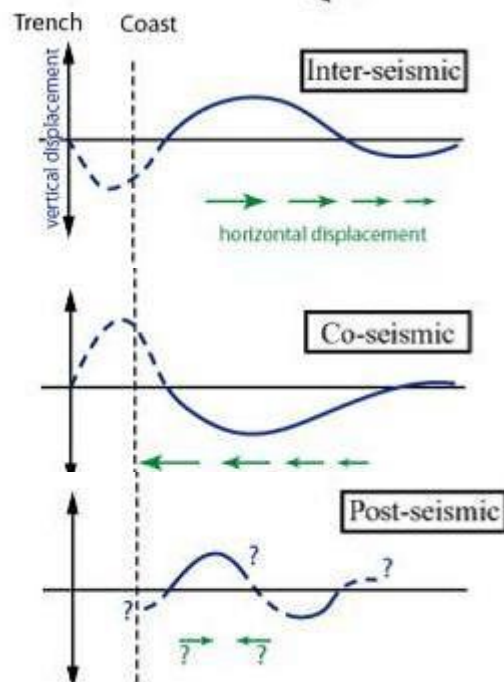
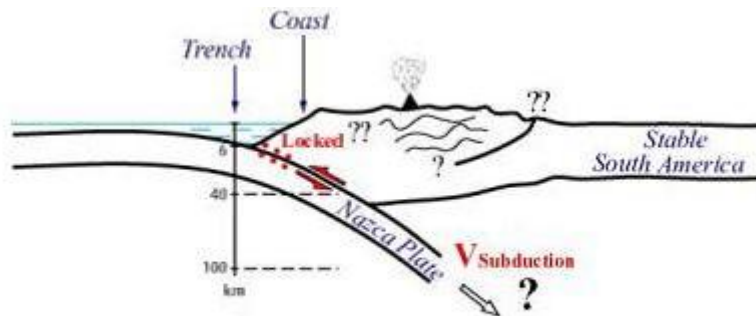


séisme



séisme

Un très très gros ressort !!!



Centaines d'années

Quelques secondes quelques minutes

Des mois des années

La taille d'un séisme

La taille d'un séisme (le moment sismique M_0) est proportionnel à:

- La quantité de glissement (U)
 - vitesse des plaques (V) x temps entre deux séisme(Δt)
- Taille de la surface de rupture (S)
 - longueur de la rupture (L) x profondeur (d)

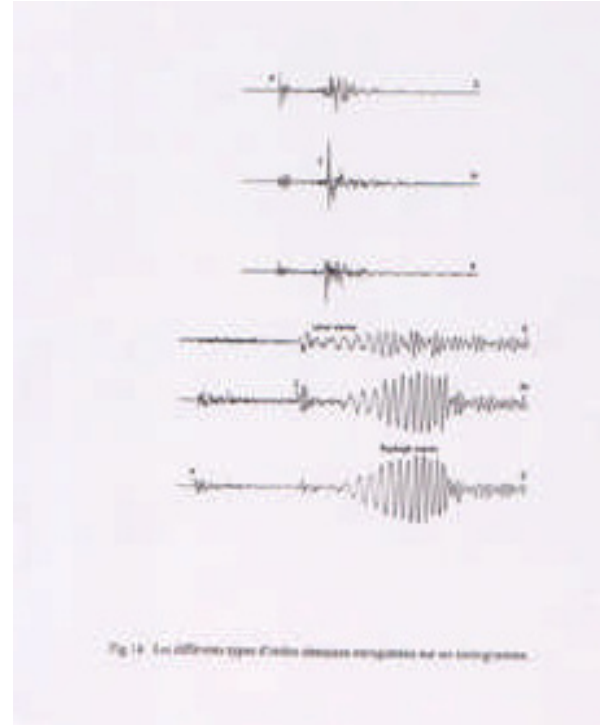
$$\Rightarrow M_0 = \mu \times S \times U = \mu \times L \times d \times V \times \Delta t$$

Magnitude :

$$M_w = \frac{2}{3} \text{Log} (M_0) - 10.7$$

Pourquoi un séisme produit il des dommages ?

À cause de l'énergie rayonnée sous forme d'ondes sismiques



L'énergie émise est bien sur reliée à la taille de la rupture (au moment sismique), *mais pas seulement*. Elle dépend aussi de la vitesse à laquelle la « déchirure » se propage.....

Kobé, Japon (17/01/1995) – Mw 7.5

- Les dommages au bâti sont surtout causés par les mouvements horizontaux du sol (ondes S) dans la gamme de période de 1 seconde à 0,1 seconde qui correspond aux résonnances de la plupart des bâtiments



- La chute opposée de deux rangées de vélos permet de déterminer la demi longueur d'onde du mouvement horizontal (onde S)

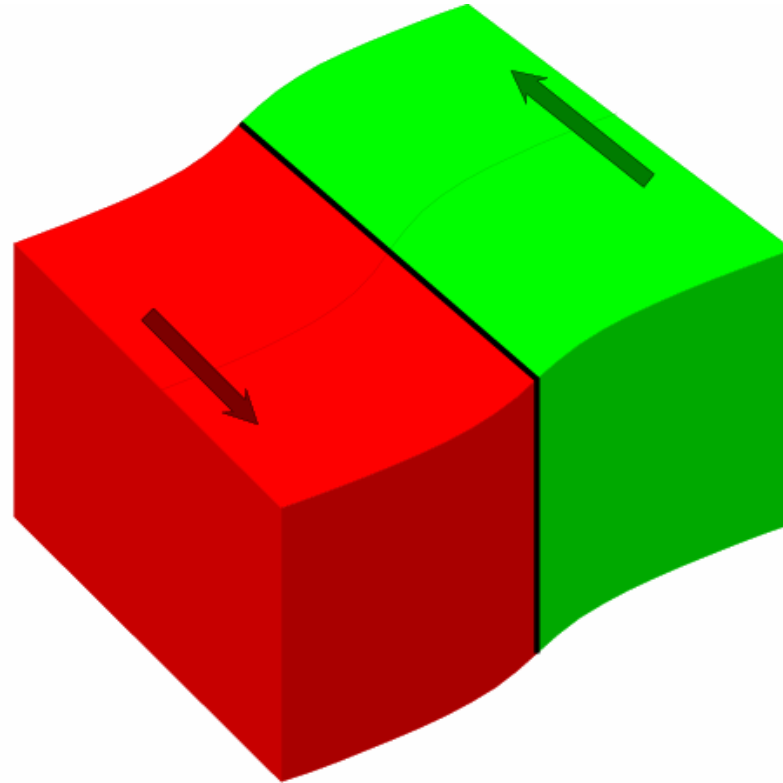


- Effets indirects : liquéfaction du sol
- Caracas, Venezuela 29/07/1967 Mw 6.6

*Phénomène de
liquéfaction responsable
du basculement et de
l'enfoncement d'un
immeuble à Caracas
(Venezuela), lors du séis-
me du 29 juillet 1967
(magnitude 6,6).
(Collection NT144)*



Comment prévoir la taille d'un futur séisme ?
En quantifiant la déformation du sol avant



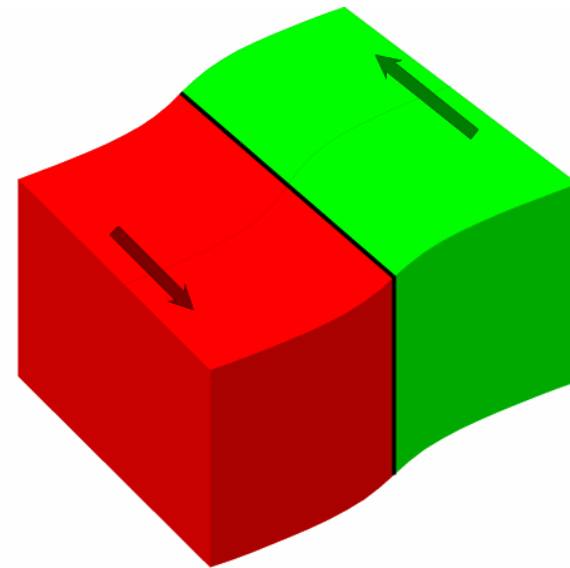
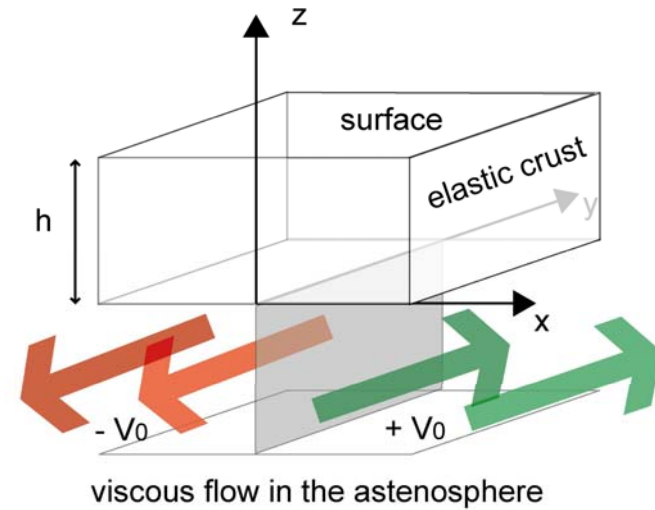
La déformation n'est pas quelconque. Elle obéit à une loi mathématique

Formulation mathématique

$$U_y = K \arctang (x/z)$$

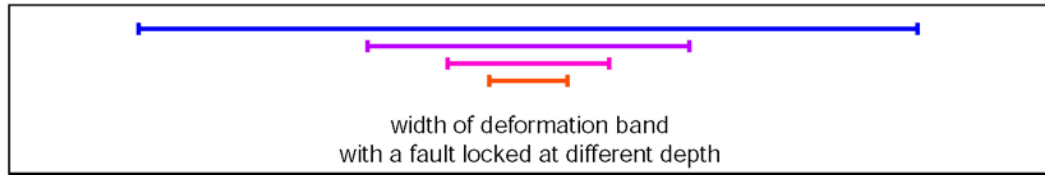
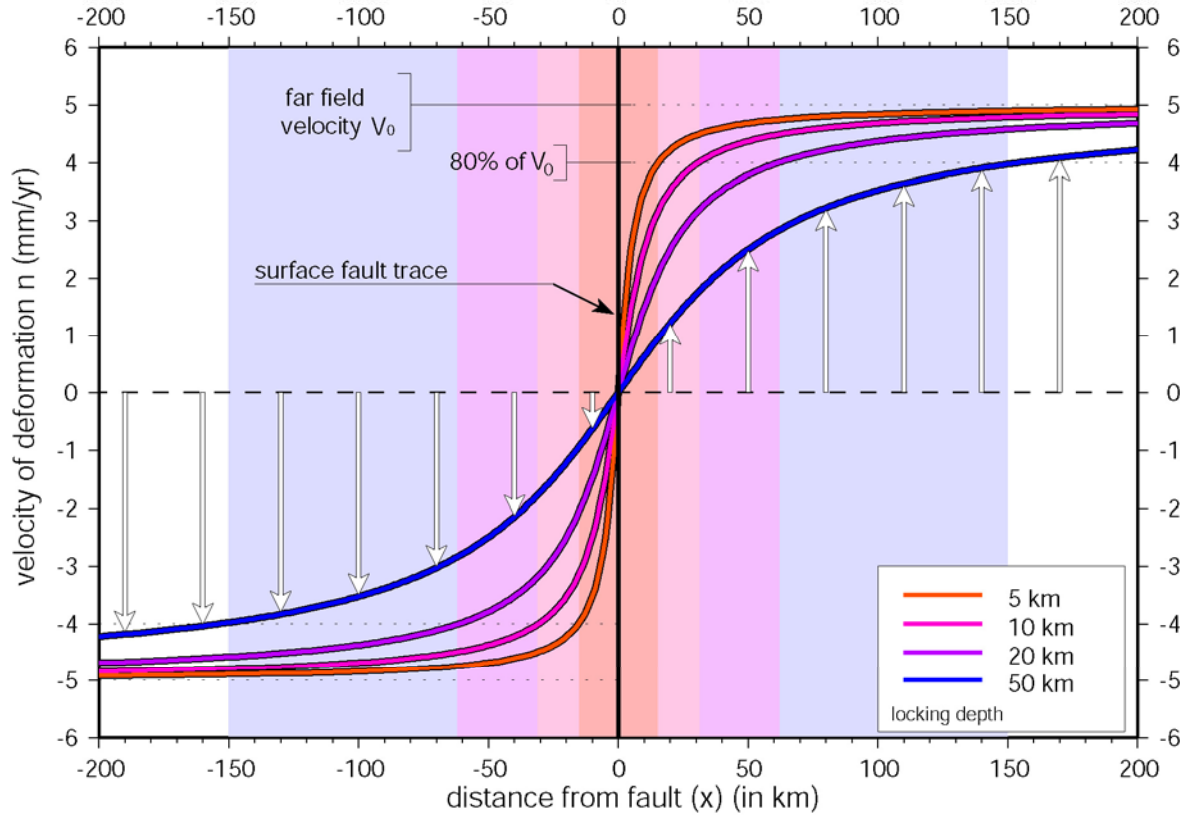
À la surface ($z=h$)

$$U_y = 2 \cdot V_0 / \Pi \arctang (x/h)$$

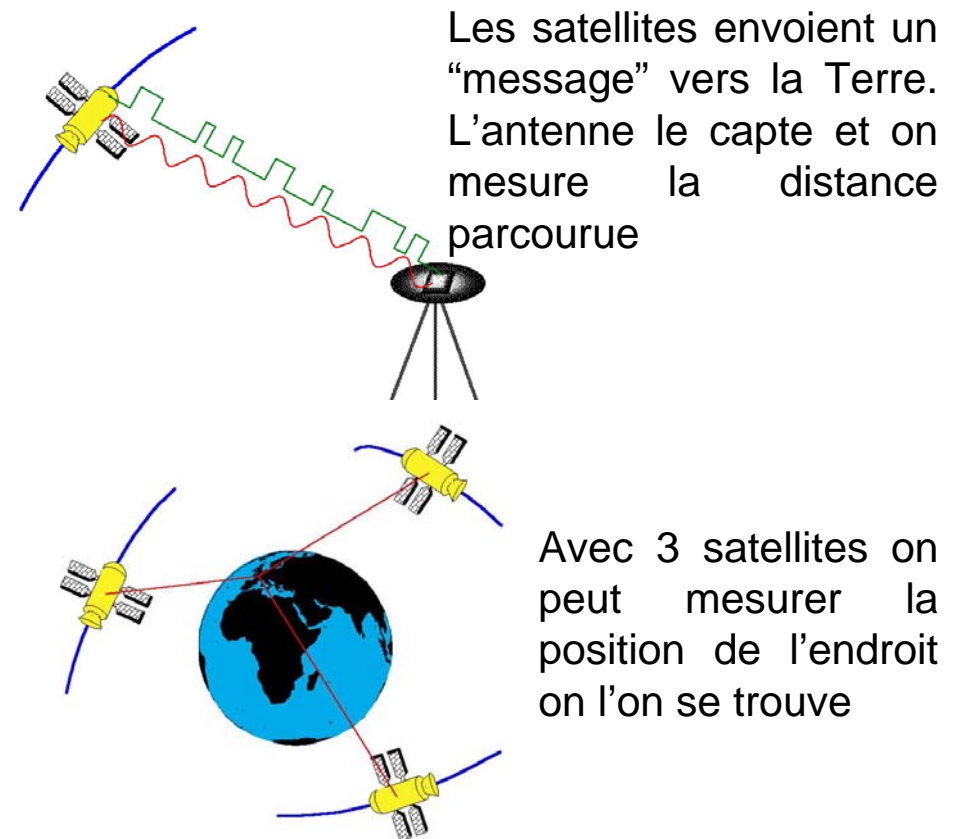
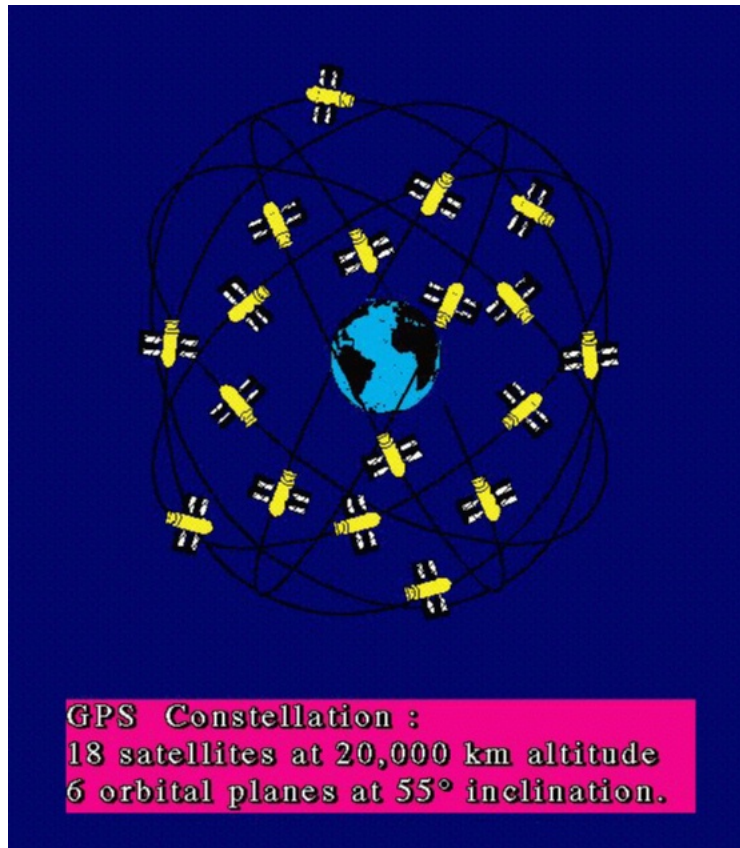


profils Arc tangentes
 dépendant de l'épaisseur de
 la profondeur de la faille,
 c'est-à-dire de la taille du
 contact

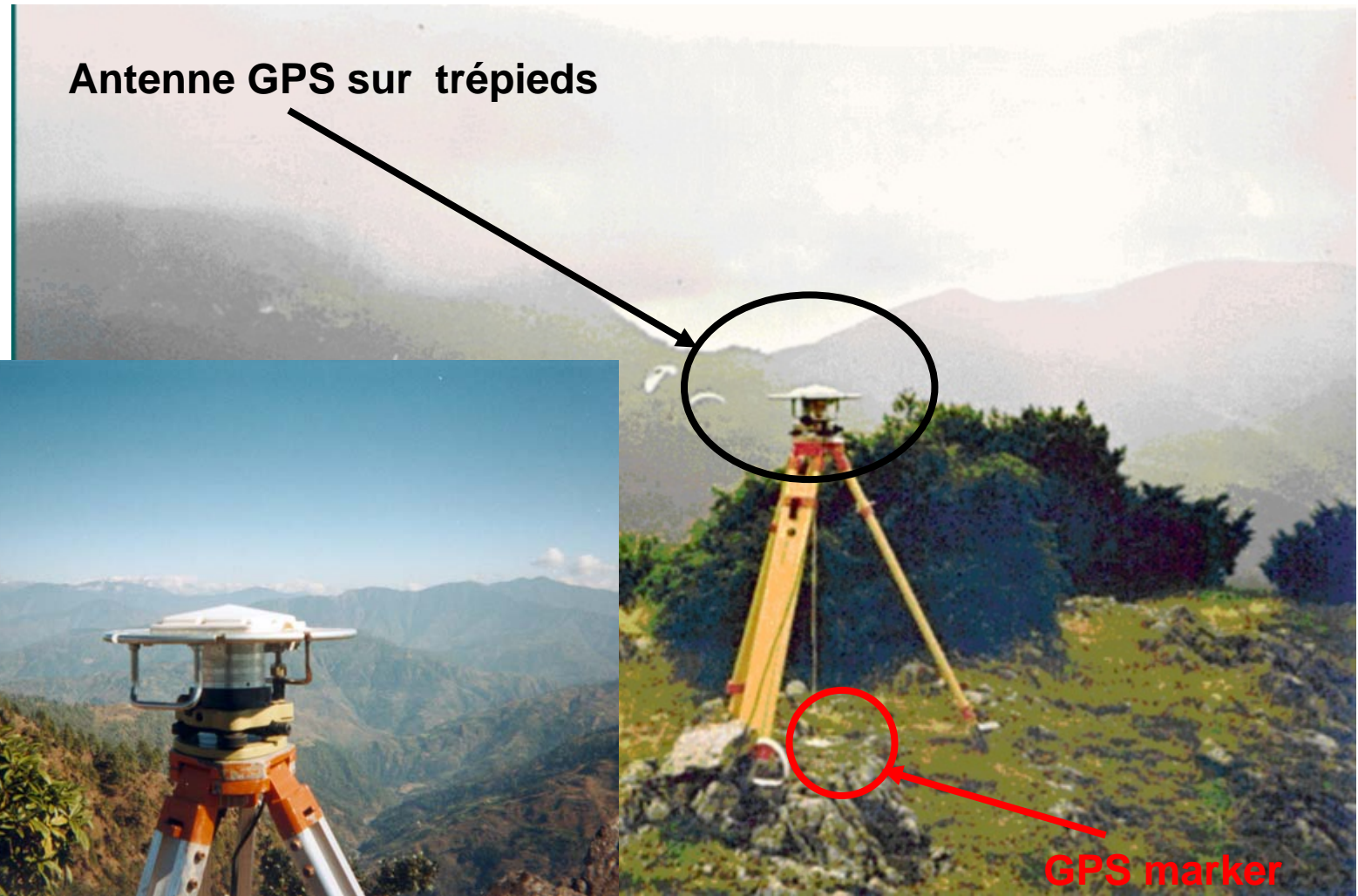
$$U_y = 2 \cdot V_0 / \pi \arctang(x/h)$$



Comment mesurer cette déformation du sol ?
Grâce à la géodésie spatiale (par exemple),
entre autres le GPS (Global Positioning
System)

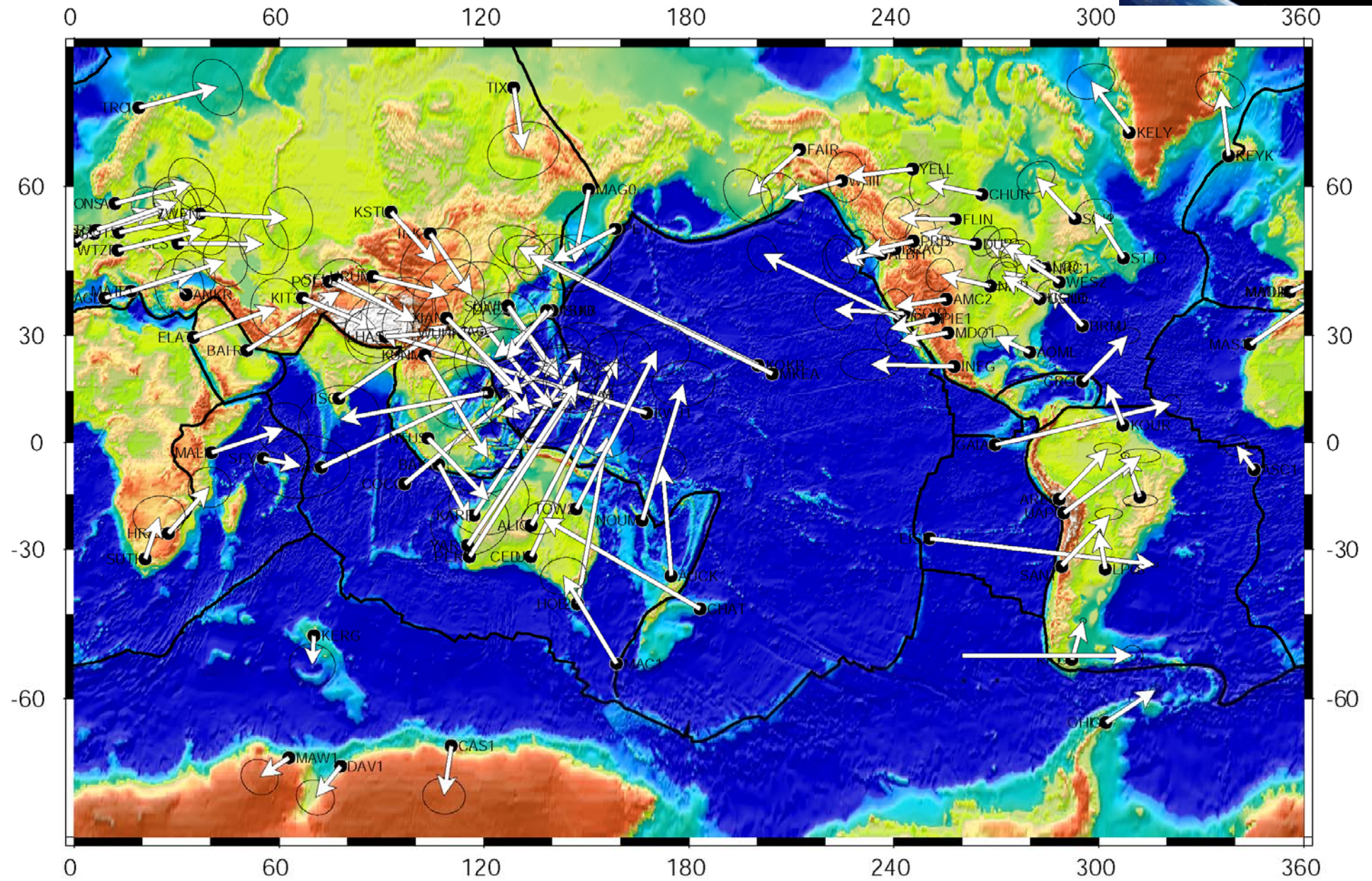


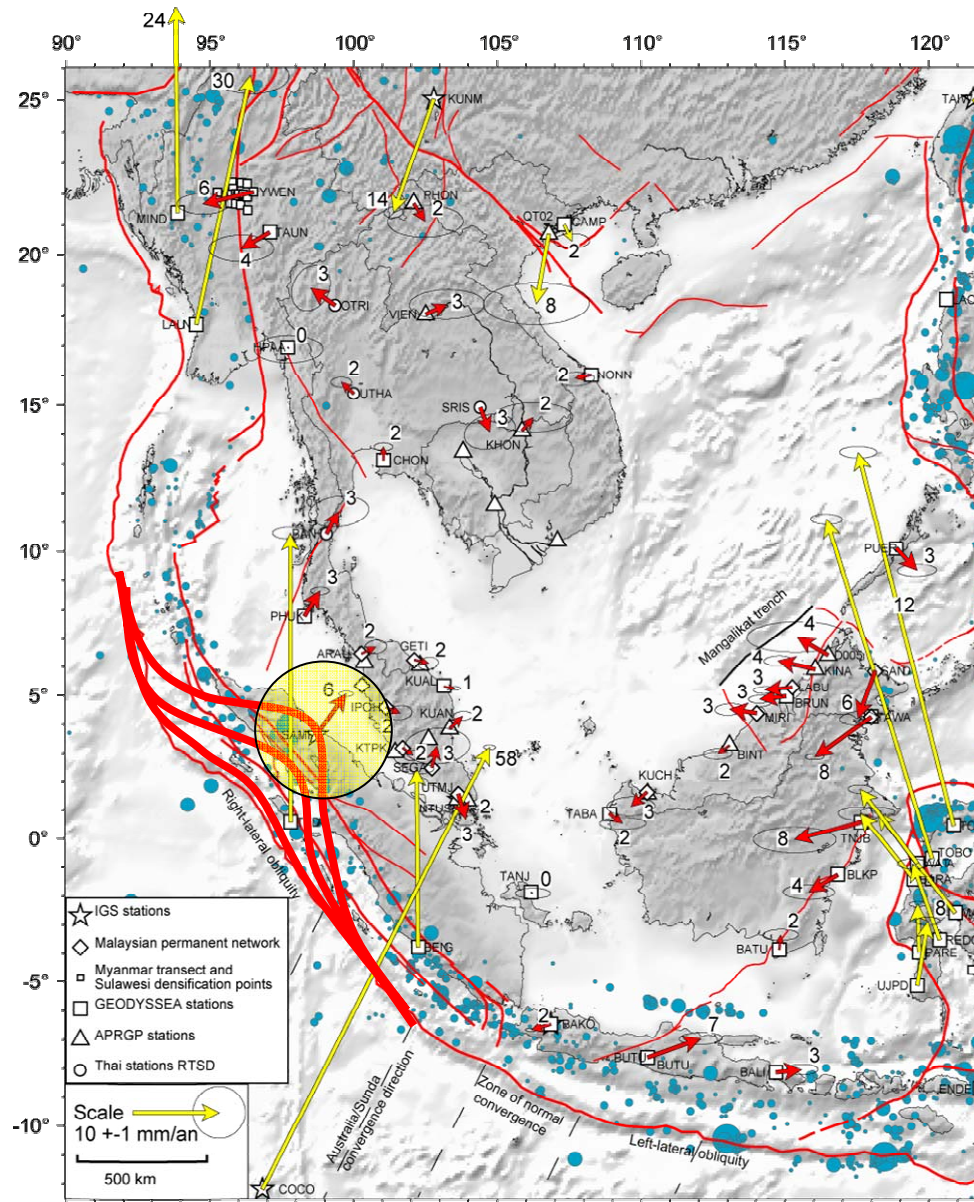
GPS (Global Positioning System)



Antenne GPS sur trépieds

GPS marker

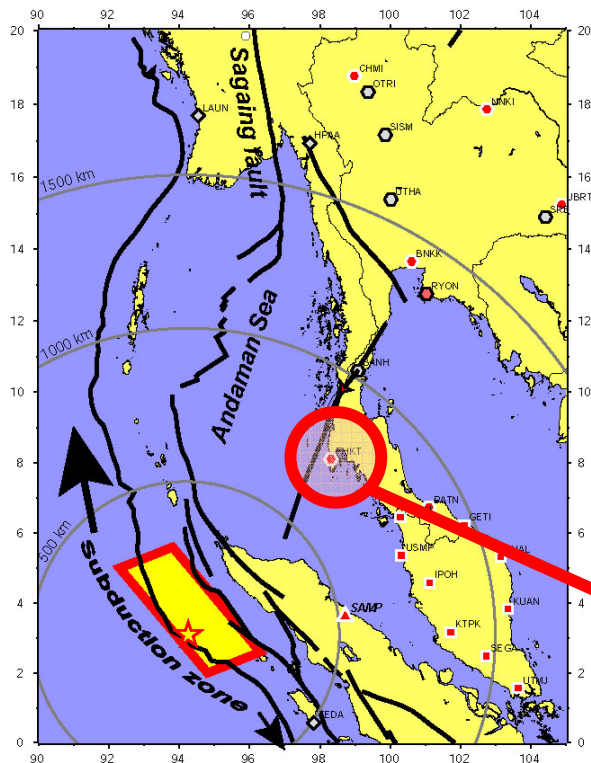




Exemple:
Sumatra le
26/12/2004

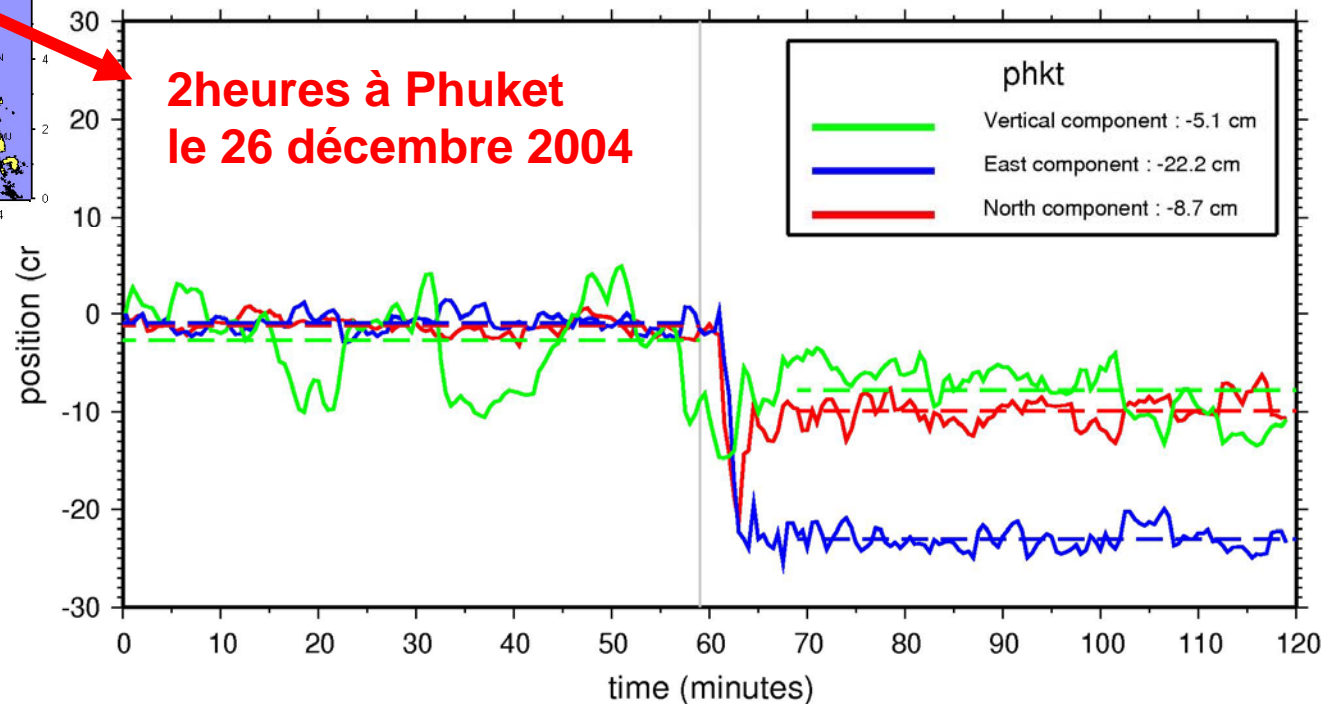
Un séisme dans
cette région était
inévitabile et
attendu:

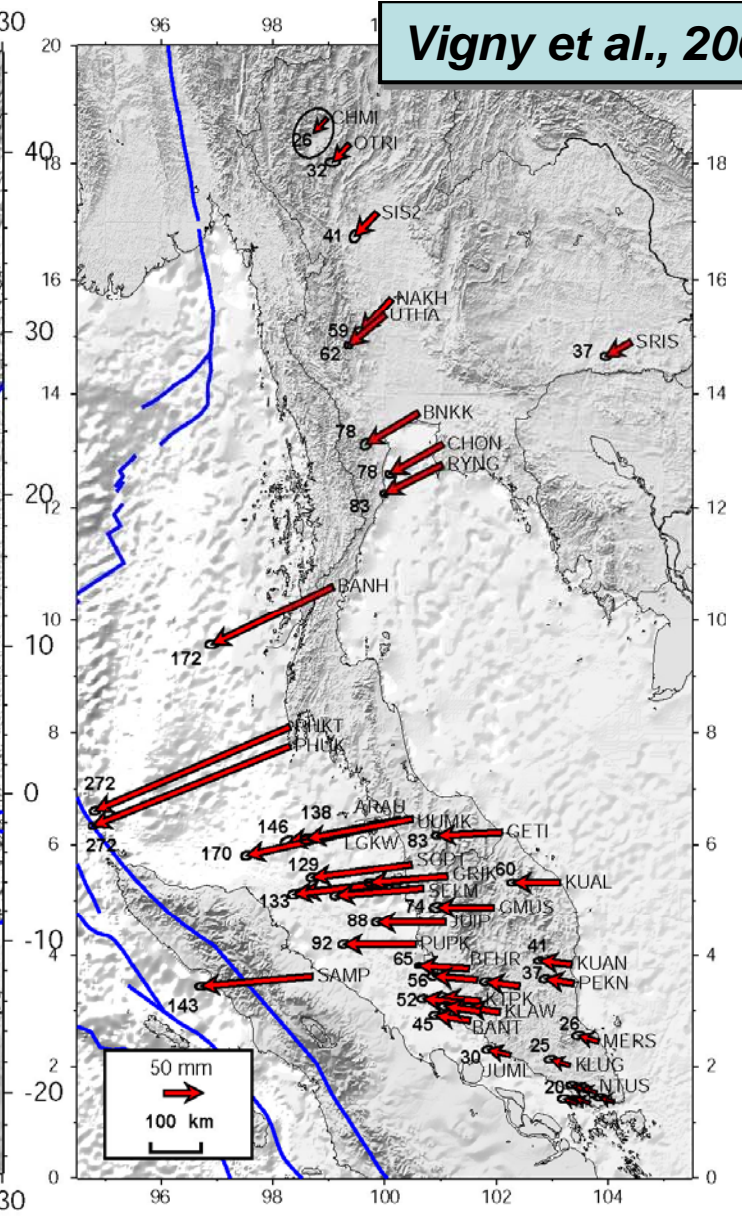
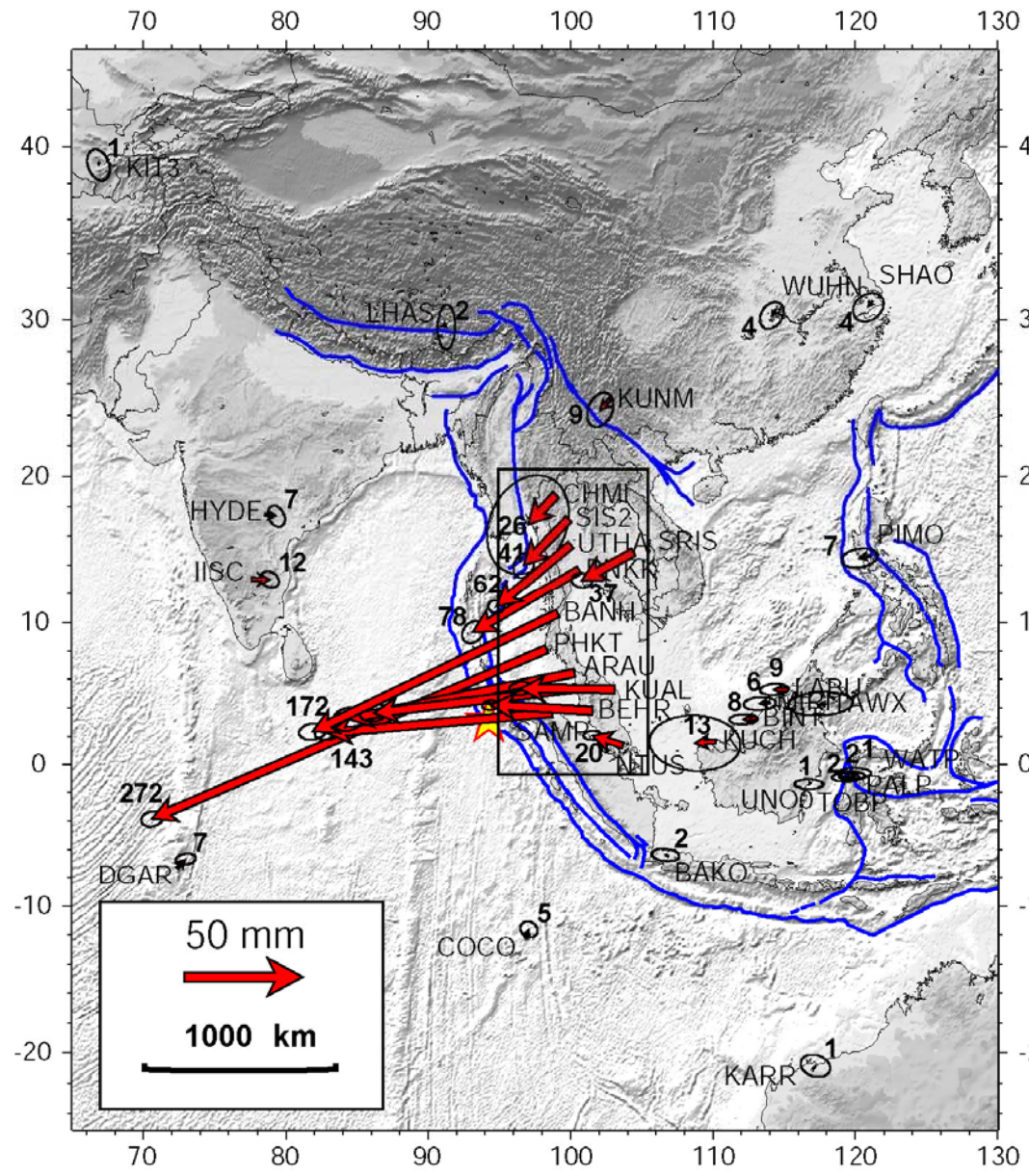
6 mm/an de
déformation à 400 km
du contact => 3 cm/an
d'accumulation sur la
faille)

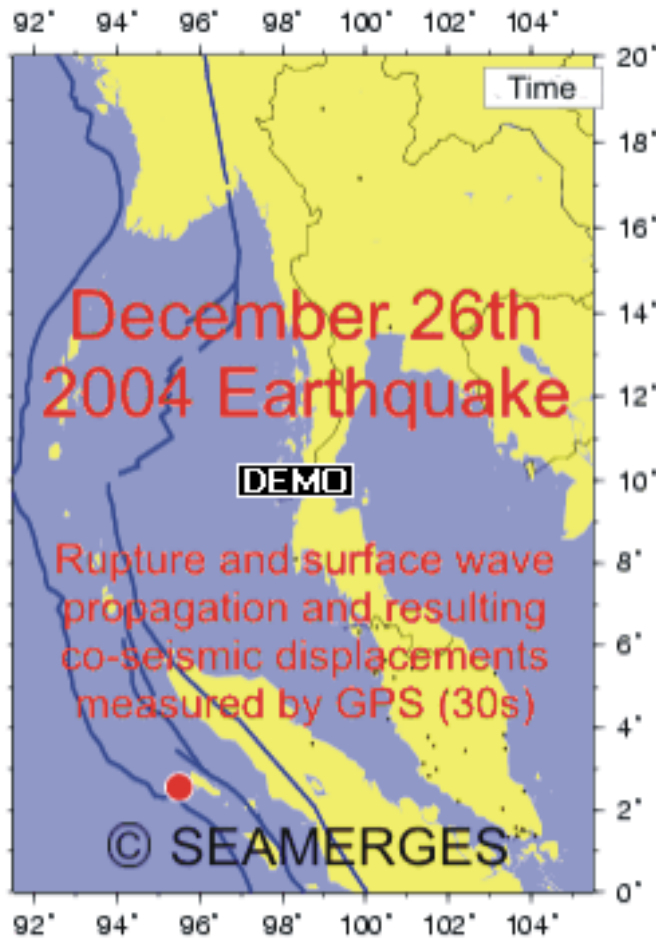


Positionnement « cinématique » cGPS

Permet de déterminer la position de la station en continu, à la fréquence de l'acquisition du signal GPS: 30s en général..... à quelques détails techniques près quand même.....



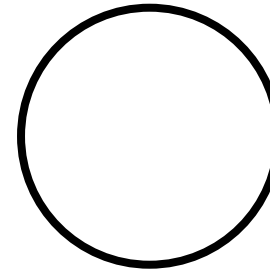




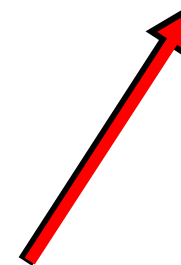
<http://www.deos.tudelft.nl/seamerges>



rupture



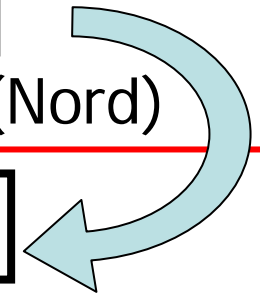
Propagation des ondes de surface
(3.7 km/s)



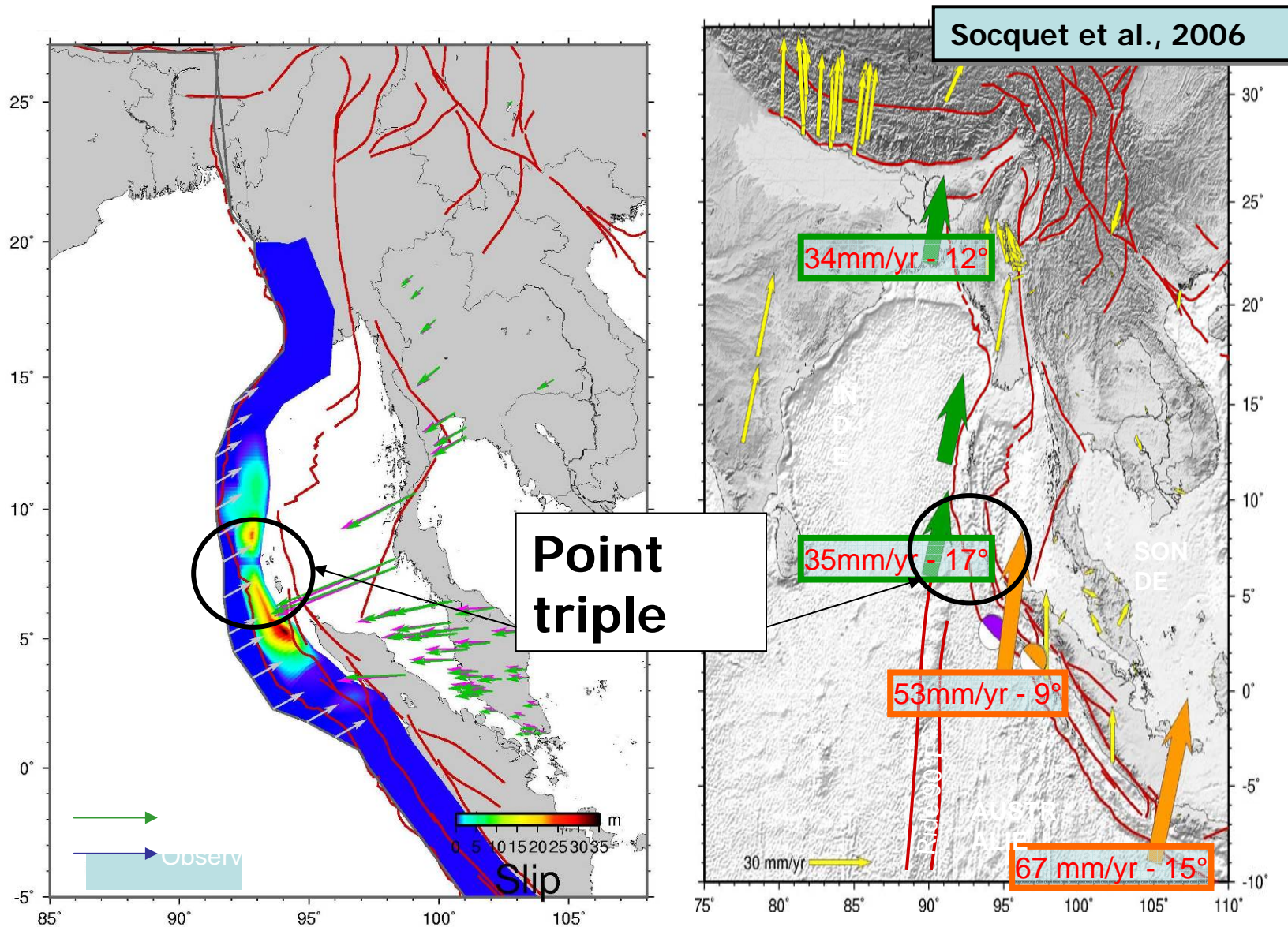
Déplacement des stations GPS

Propagation de la rupture
3.7 km/s initialement (Sud)
30s stop ~ 8° lat
1.8 km/s ensuite (Nord)

Déclenchement de la rupture du segment Nord ?



L'analyse du glissement sur la faille montre deux séismes, le second déclenché par le premier



La modélisation de la rupture est très importante pour l'aléa:

→ **Tsunami**: déplacement vertical prédit du plancher océanique

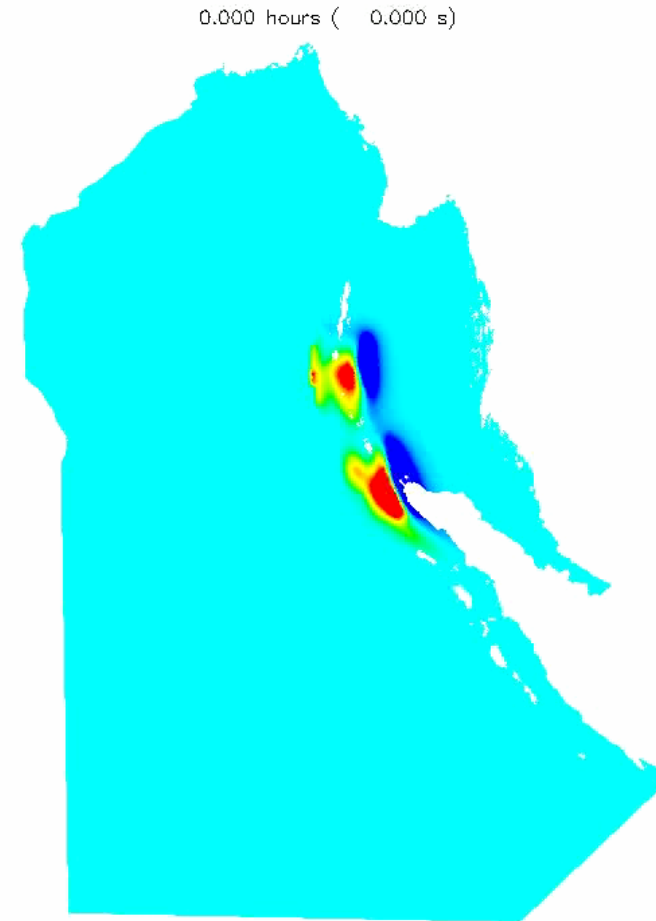
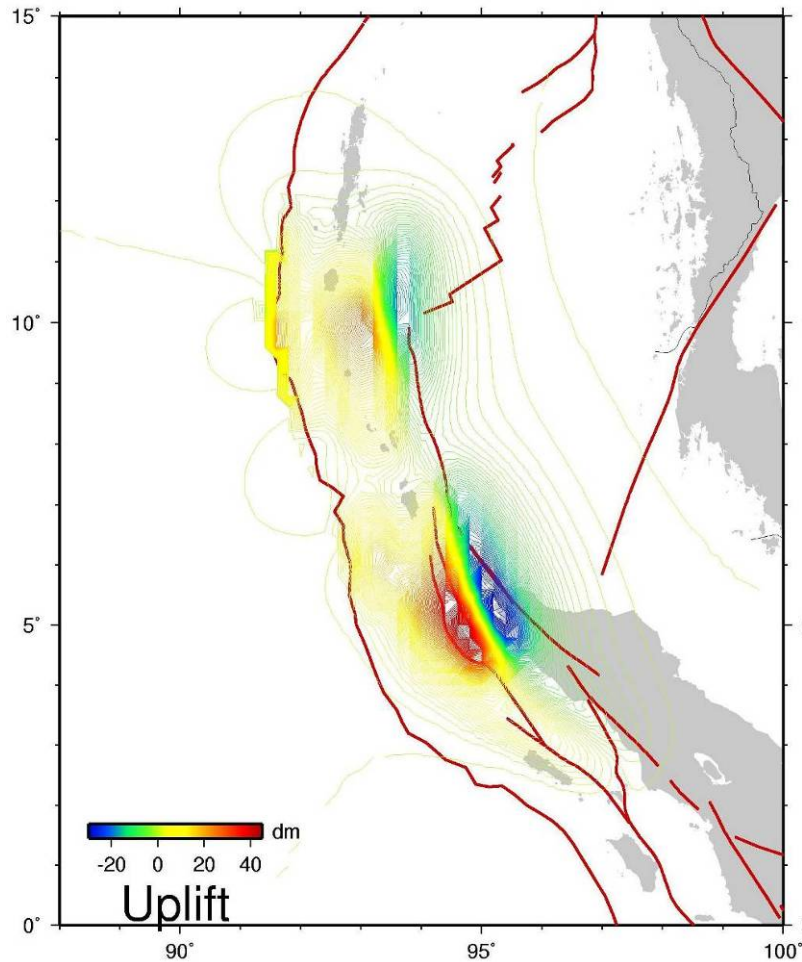
➤ 4 m of uplift

➤ 2 m of subsidence

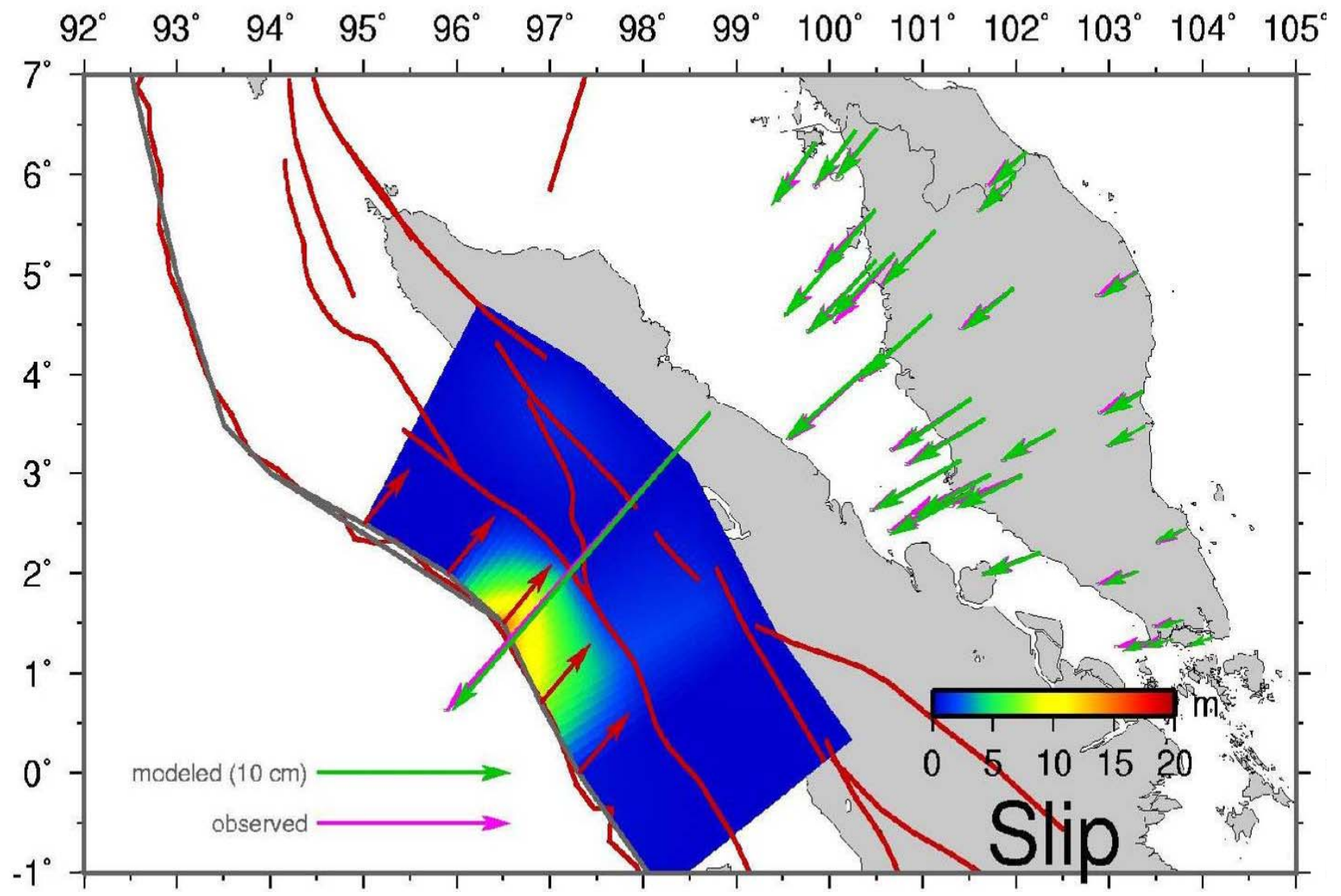


Tsunami modélisation

Pietrzack et al., in prep



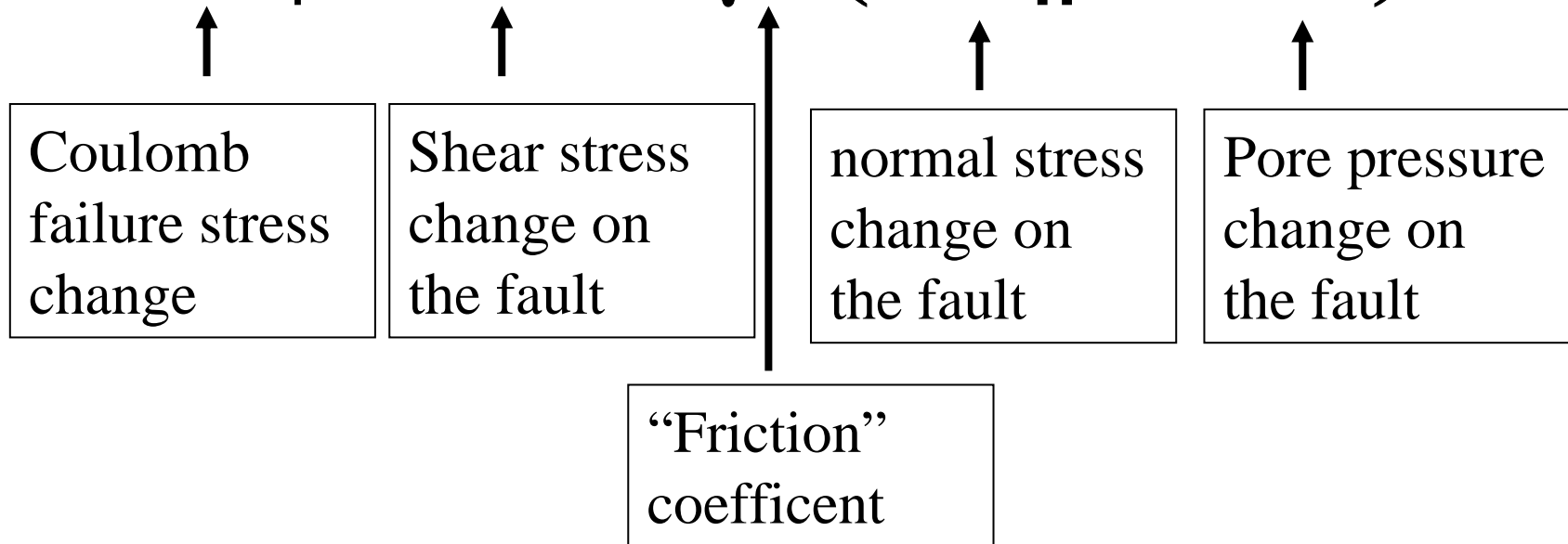
Et un 3^{eme} : Nias 28 Mars 2005 : MW 8.7



Déclenchement par augmentation des contraintes au voisinage

Coulomb stress increase

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau + \mu (\Delta\sigma_n + \Delta P)$$

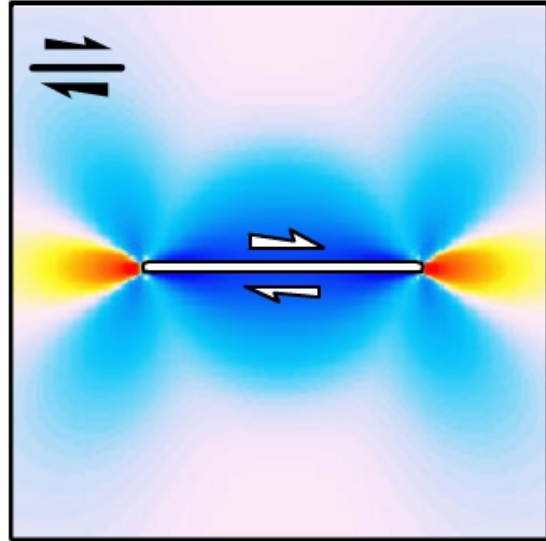


Failure is promoted if ΔCF increases

Pore pressure (> with pressure) counteracts normal stress (> if unclamped)

How the Coulomb Stress Change is Calculated

Stress ■ Rise ■ Drop



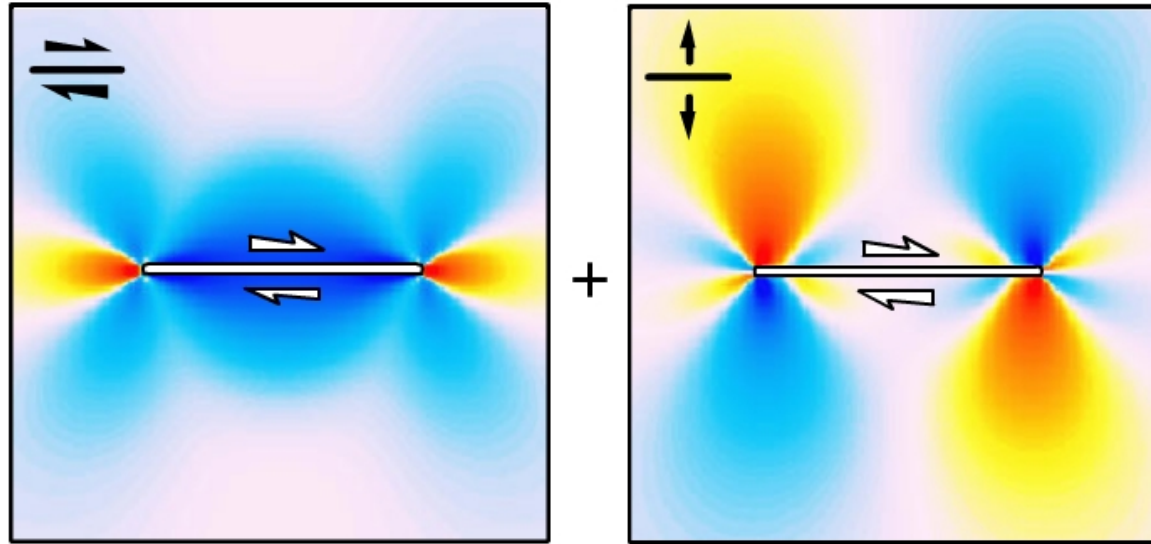
Shear stress
change

$$\Delta\tau_s$$

- Example calculation for faults parallel to master fault

How the Coulomb Stress Change is Calculated

Stress ■ Rise ■ Drop



Shear stress
change

+

Friction coefficient x
normal stress change

$$\Delta\tau_s$$

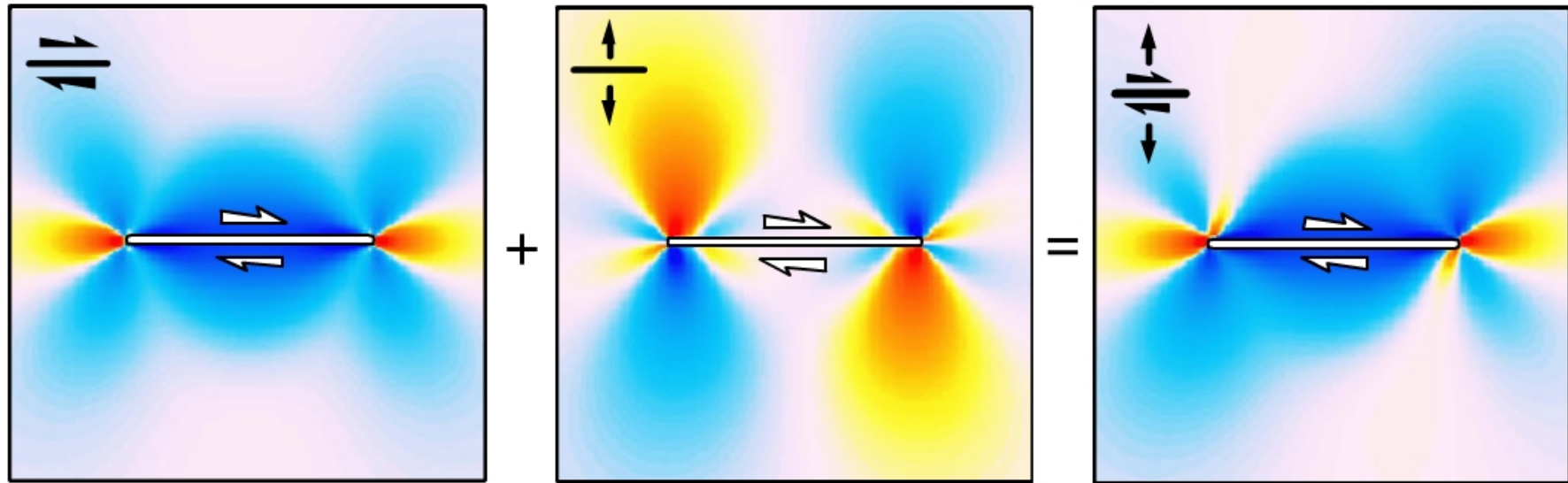
+

$$\mu' (\Delta\sigma_n)$$

- Example calculation for faults parallel to master fault

How the Coulomb Stress Change is Calculated

Stress ■ Rise ■ Drop



Shear stress
change

+

Friction coefficient x
normal stress change

=

Coulomb failure
stress change

$$\Delta\tau_s$$

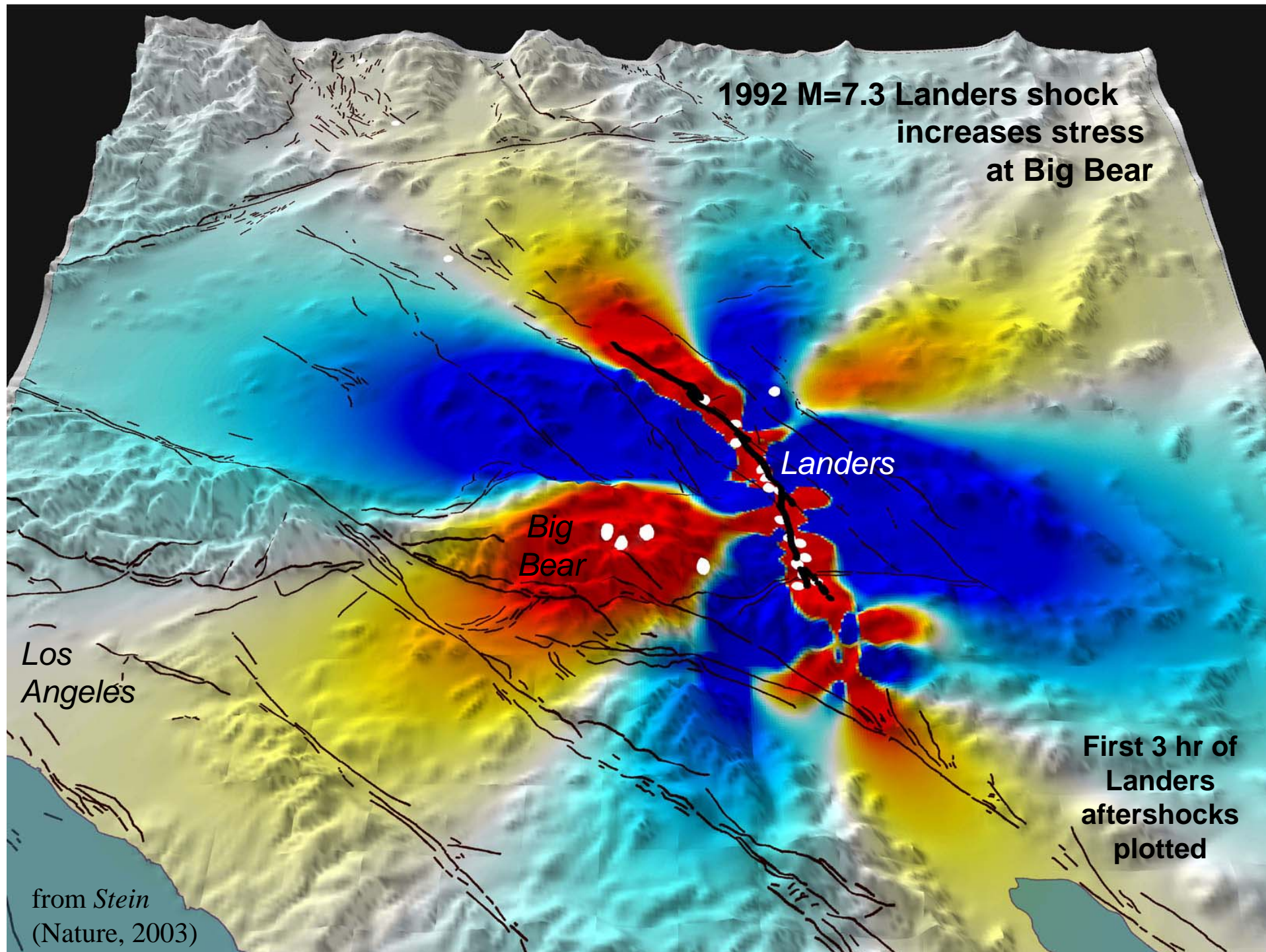
+

$$\mu' (\Delta\sigma_n)$$

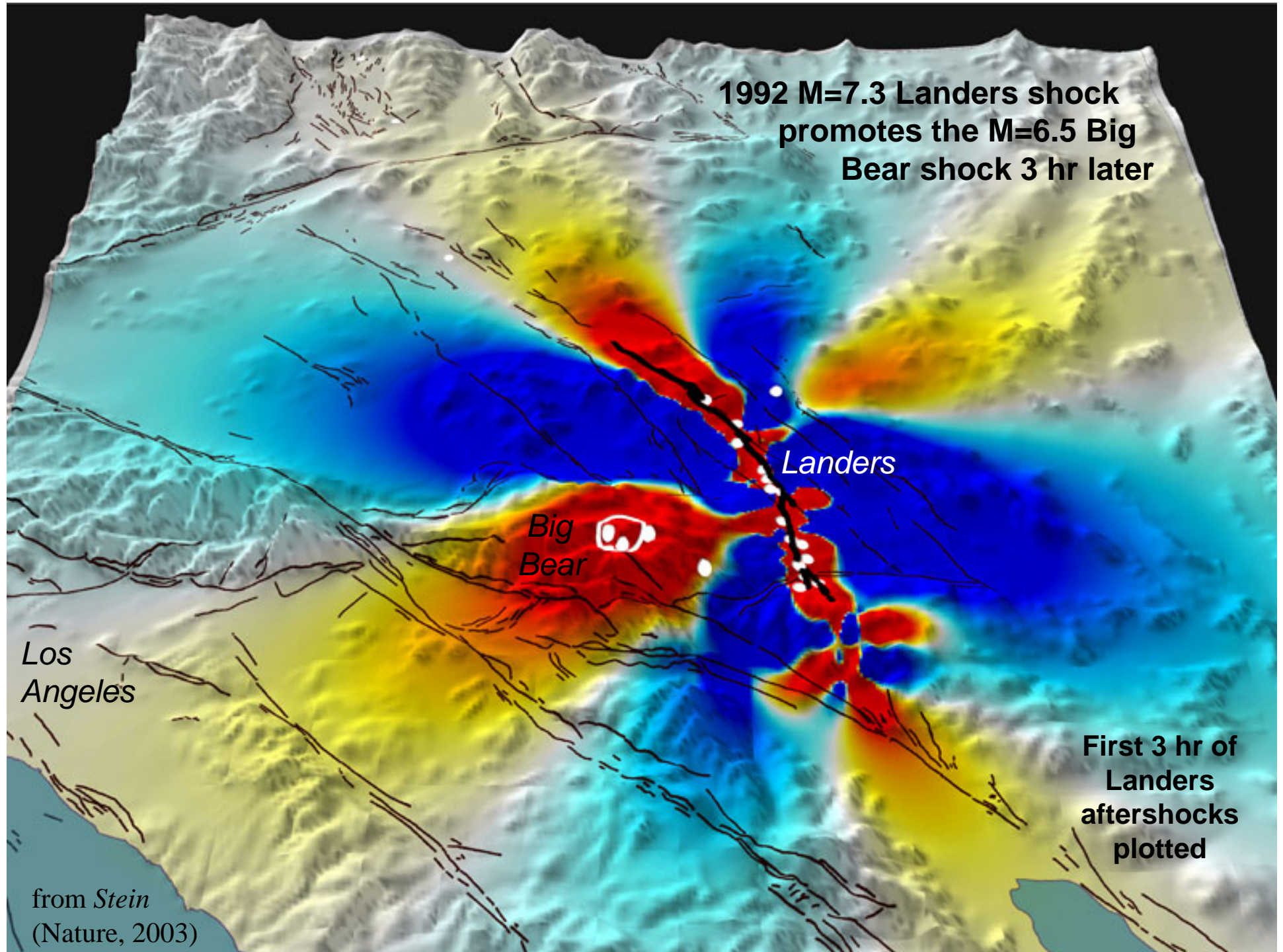
=

$$\Delta\sigma_f$$

- Example calculation for faults parallel to master fault



1992 M=7.3 Landers shock
promotes the M=6.5 Big
Bear shock 3 hr later



Landers

Big
Bear

Los
Angeles

First 3 hr of
Landers
aftershocks
plotted

from Stein
(Nature, 2003)

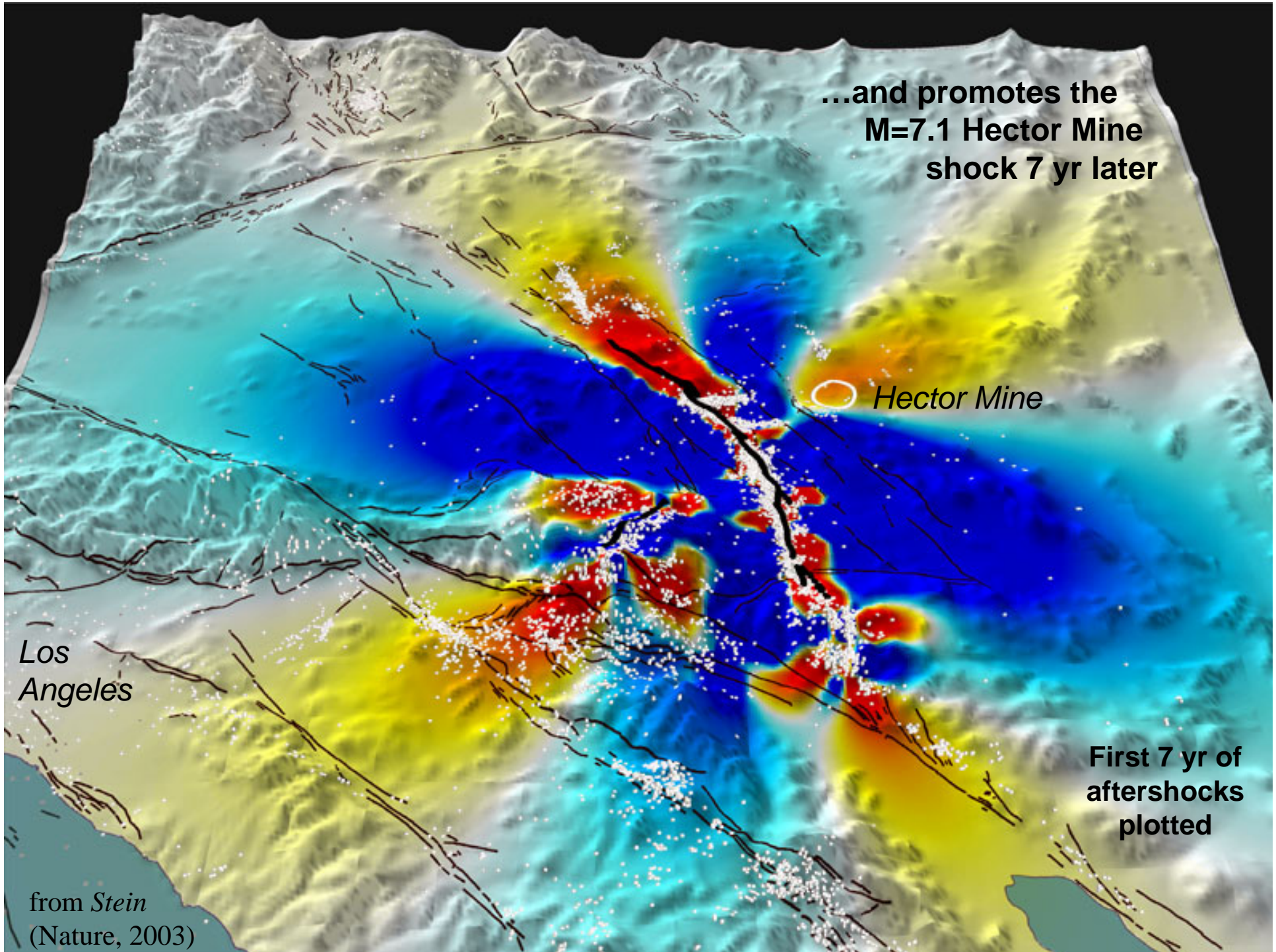
...and promotes the
M=7.1 Hector Mine
shock 7 yr later

 Hector Mine

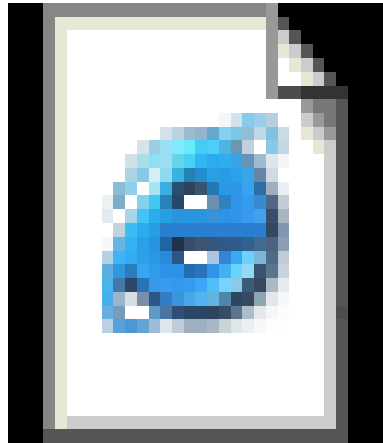
Los
Angeles

First 7 yr of
aftershocks
plotted

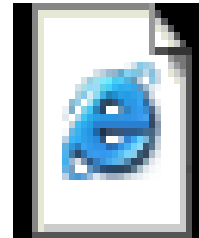
from Stein
(Nature, 2003)



NAF migration and Marmara sea Coulomb stress increase



Slip.swf

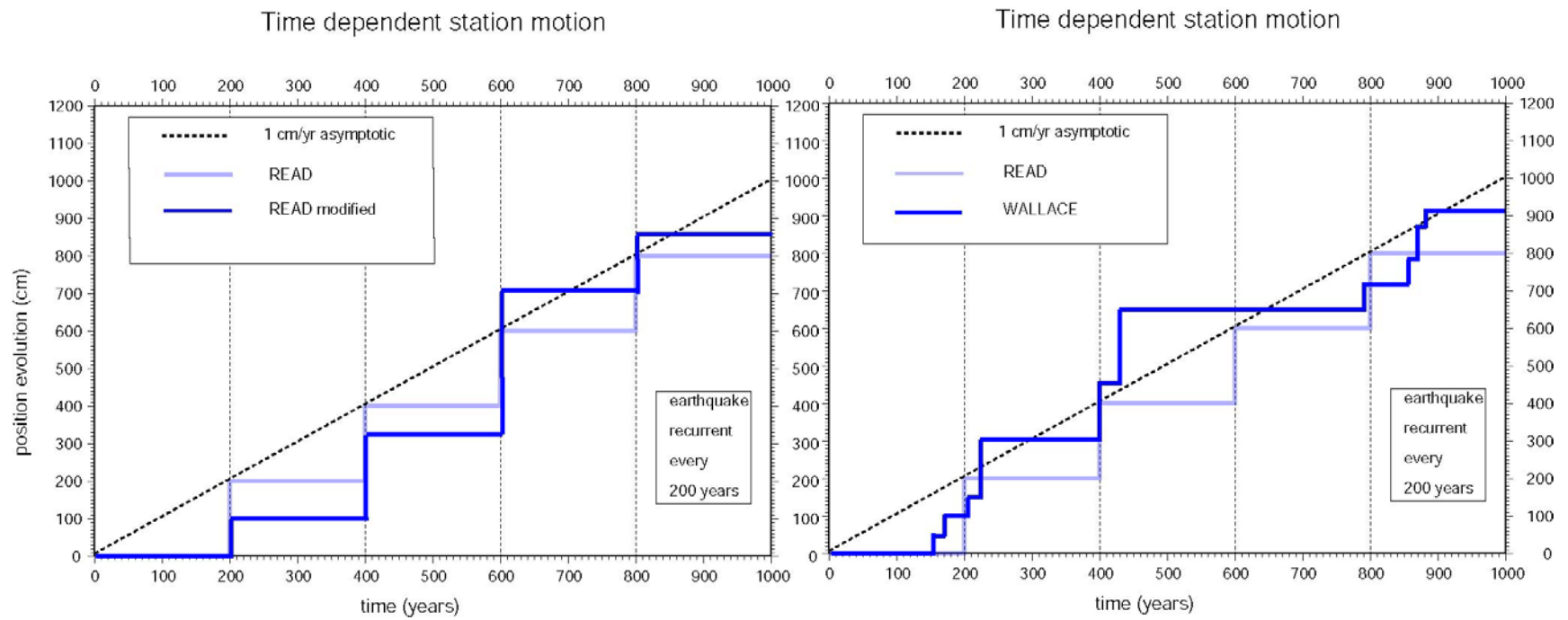


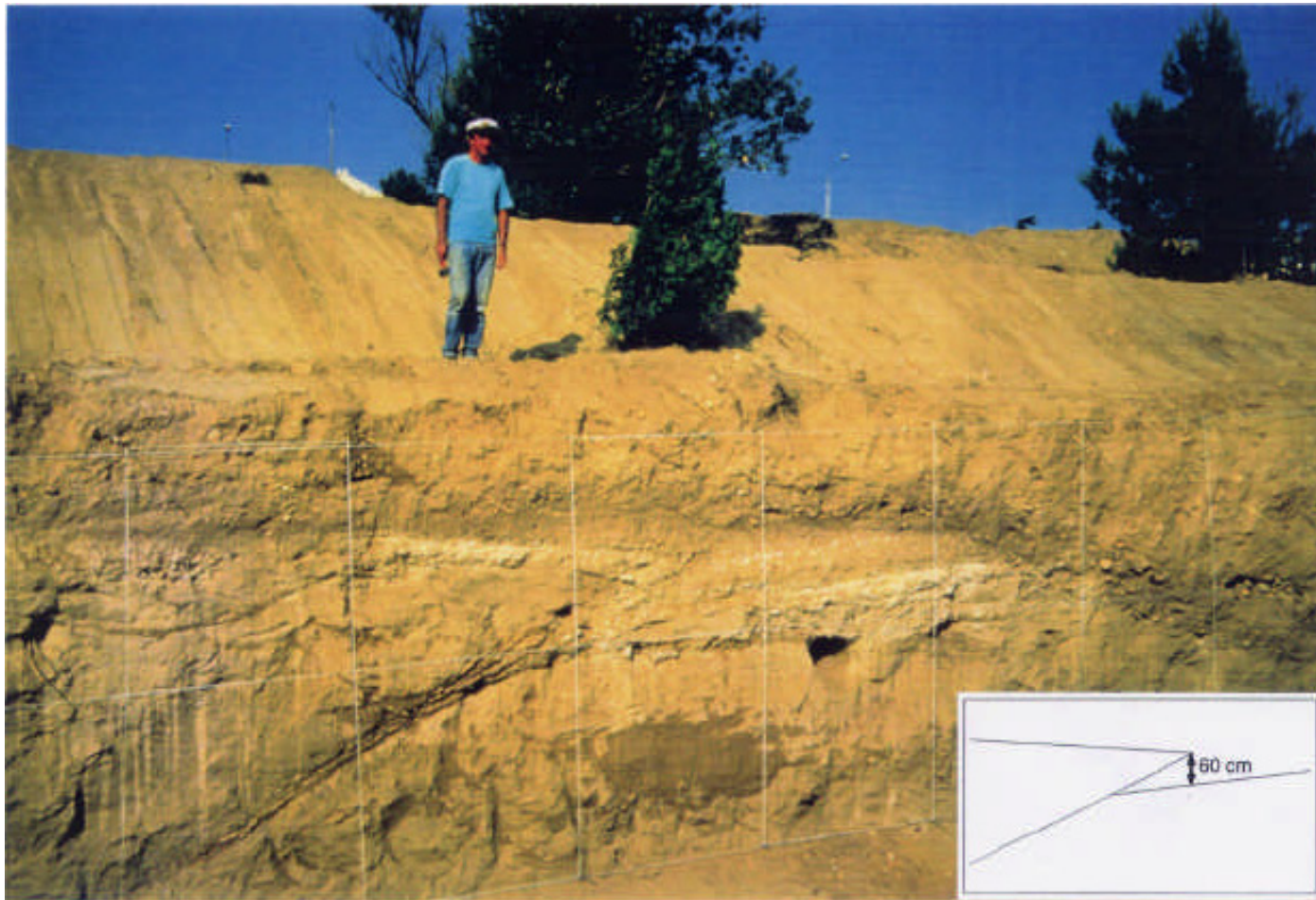
marmara_sea.swf

Donc, il n'est pas très difficile de savoir où un séisme va se produire et il est possible d'estimer sa taille et ses caractéristiques probables.

Reste à savoir quand il va se produire....

Le cycle sismique : Read and Wallace models





Trace d'un paléoséisme à Courthézon (Vaucluse) sur la faille de Nîmes. La coupe met en évidence une faille décalant des couches déposées il y a moins de 300 000 ans.

Les difficultés de la prévision sismique

Même si une faille donnée produit un séisme caractéristique à intervalle de temps plus ou moins régulier, la prédiction reste difficile parce que :

1. Le temps de récurrence peut être inconnu, en particulier s'il est très long (> 1000 ans)
2. Le temps de retour du séisme caractéristique peut être régulier, **plus ou moins plusieurs décennies (voir siècles...)**
3. Les conditions physiques (le frottement en particulier) peuvent changer avec le temps, en particulier à cause des séismes eux-mêmes...

En résumé, on peut savoir si les conditions requises sont remplies pour qu'une faille rompe (dernier séisme connu très ancien, accumulation rapide sur la faille, profondeur donnée, ...), mais on ne connaît toujours pas le facteur déclenchant et on ne peut toujours pas prédire d'instant précis pour la future rupture

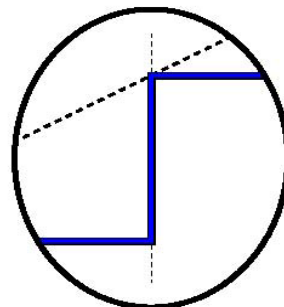
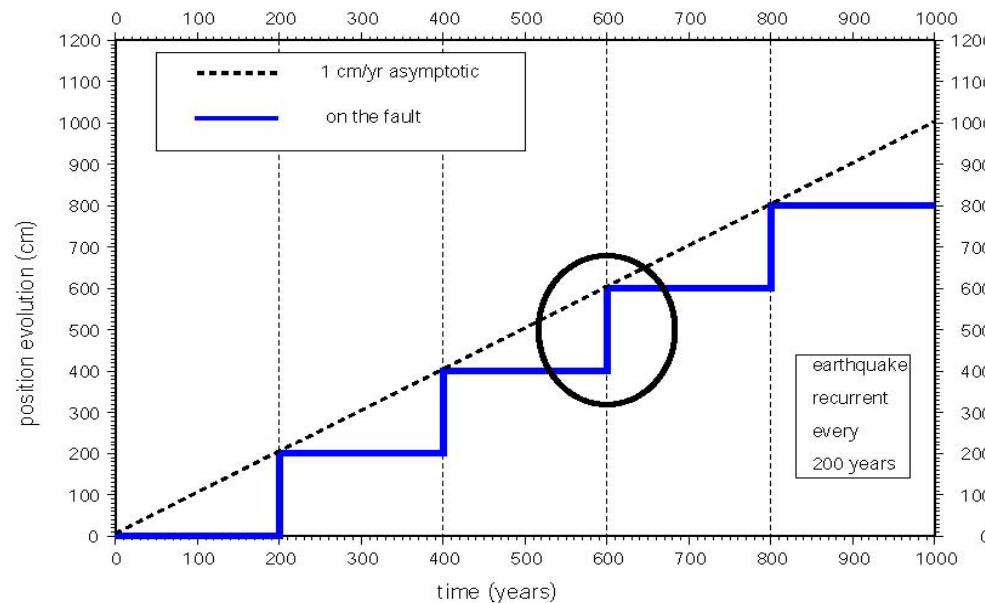
LOI D'ÉCHELLE DES RUPTURES SISMQUES

Magnitude	Longueur de faille	Couissement 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

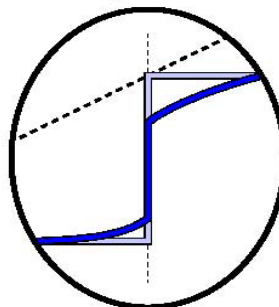
Variabilité : 50%

Une perspective: voir venir un séisme en regardant ce qui se passe précisément avant pendant et après (la « météorologie » des séismes.....)

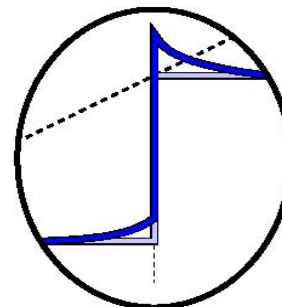
Time dependent station motion
Time dependent station motion



100% co-sismique

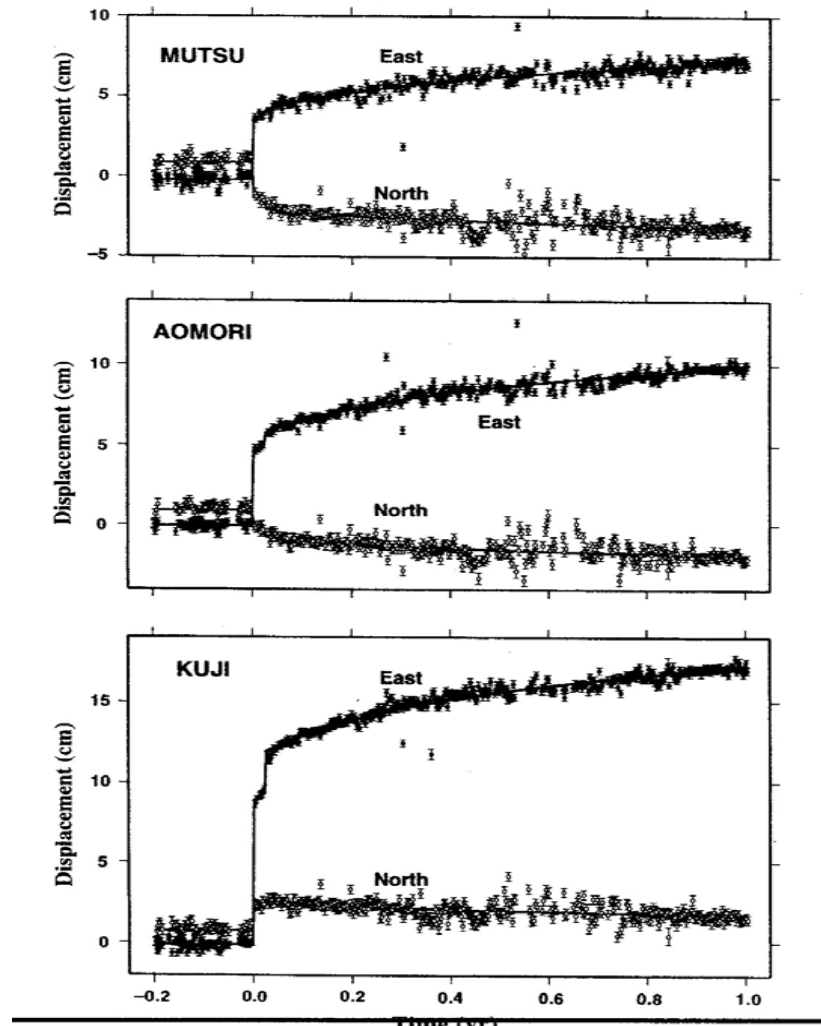


pre-co- et post-sismique



overshoot

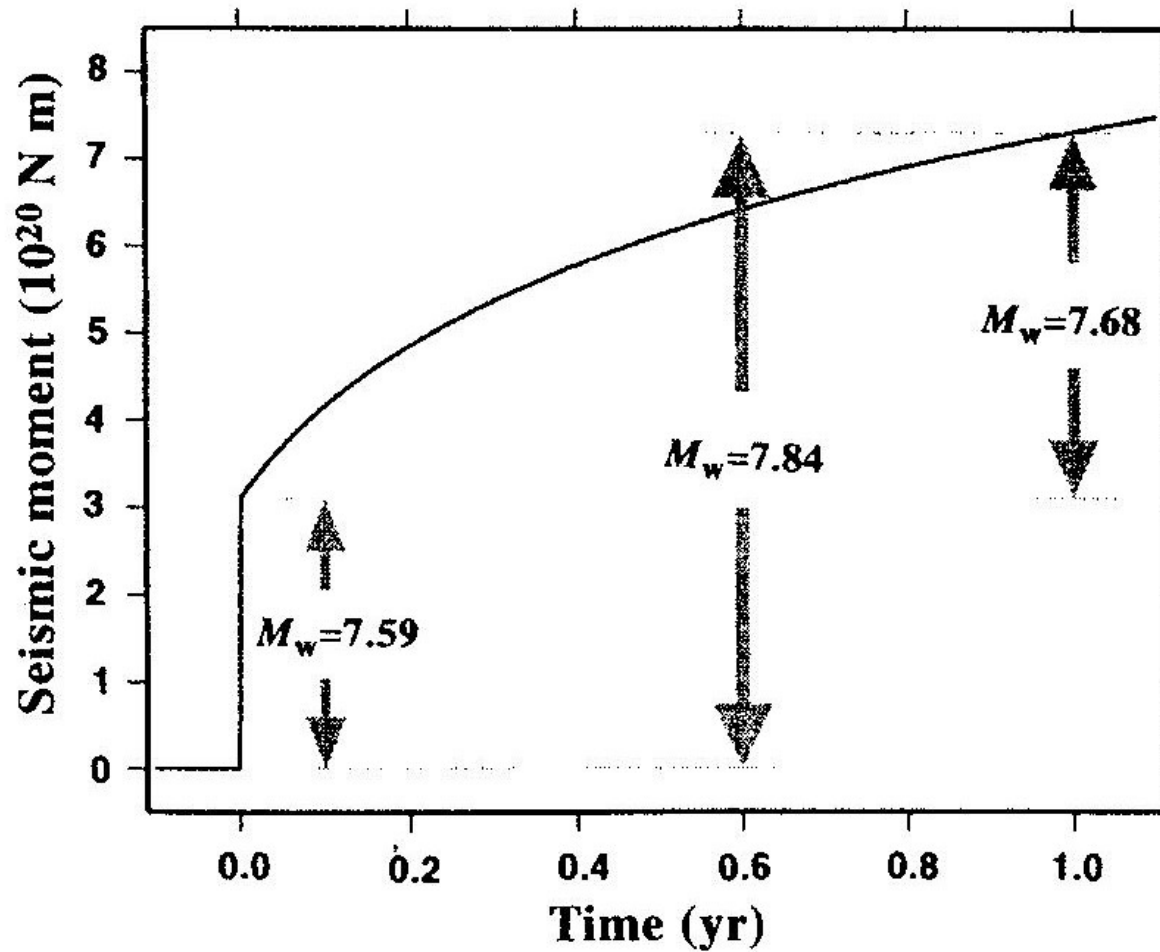
Post-seismic : K. HEKI, Nature 1997



Silent fault slip **following** an interplate thrust earthquake at the Japan trench

Horizontal coordinate time series before and after the **1994 Sanriku-haruka-Oki earthquake** observed at three GPS stations : Mutsu, Aomori and Kuji. Dots denote north and east components. Black lines are the model curves (stationary for $t < 0$, logarithmic decay for $t > 0$, discontinuity for $t = 0$).

Sanriku-Haruka-Oki sequence



En attendant : une carte de probabilité pour la prochaine décennie

GLOBAL SEISMIC HAZARD MAP

Produced by the Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP),
a demonstration project of the UN/International Decade of Natural Disaster Reduction, conducted by the International Lithosphere Program.

Global map assembled by D. Giardini, G. Grÿnthal, K. Shedlock, and P. Zhang
1999

