An aerial photograph of a two-lane asphalt road winding through a dry, hilly landscape. The terrain is covered in sparse, low-lying vegetation and small trees. The road has a yellow double line down the center and white lines on the edges. The overall color palette is dominated by earthy browns and tans.

“Les Grands Séismes: Observation et  
Modélisation”  
I- Introduction  
Lundi 9 Octobre 2017

*Collège de France, salle Maurice Halbwachs,  
Prof. Barbara Romanowicz, chaire de Physique de l'Intérieur de  
la Terre*



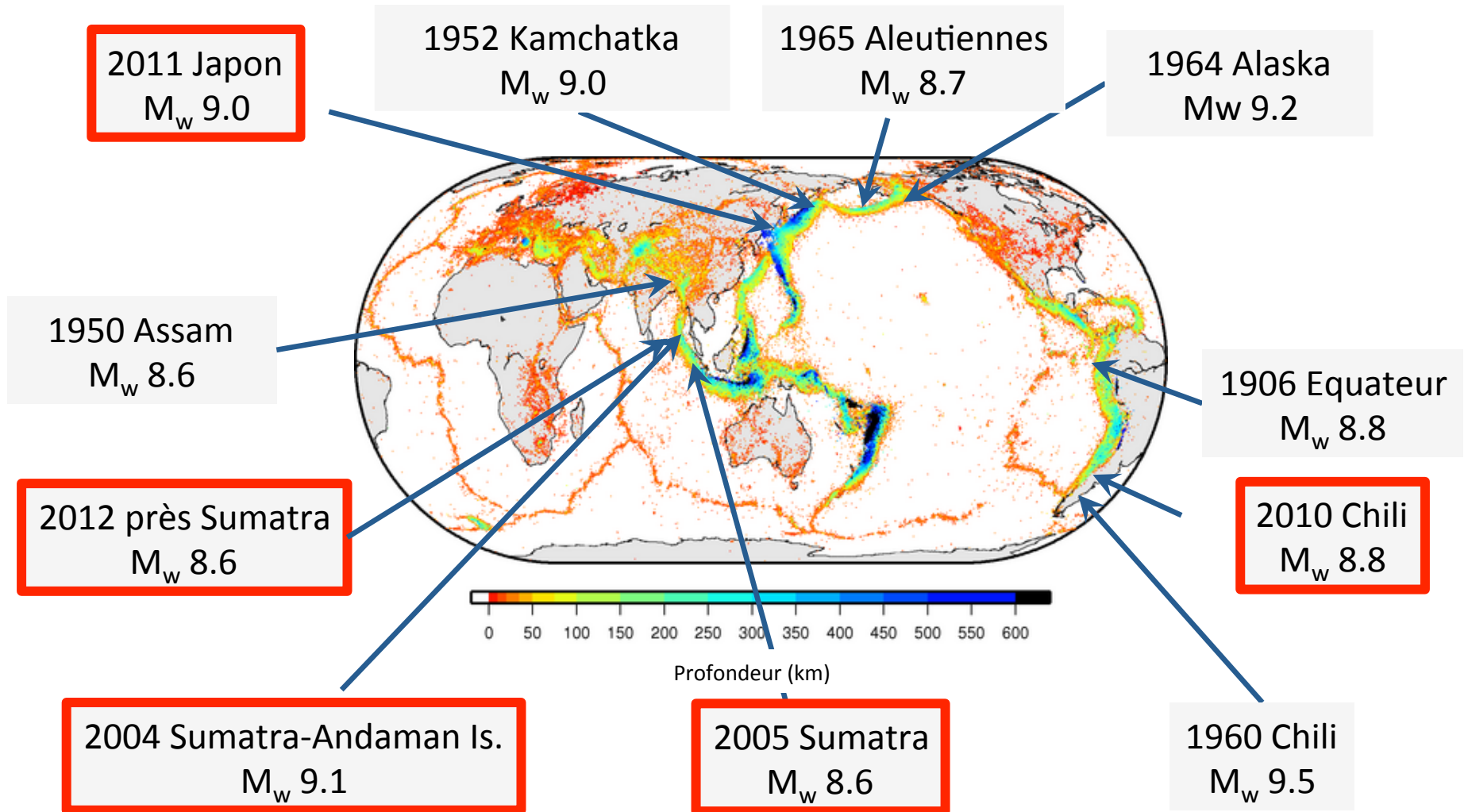
Mexico, 19 Septiembre 2017, Mw 7.1

# Les grands tremblements de Terre: observation et modélisation

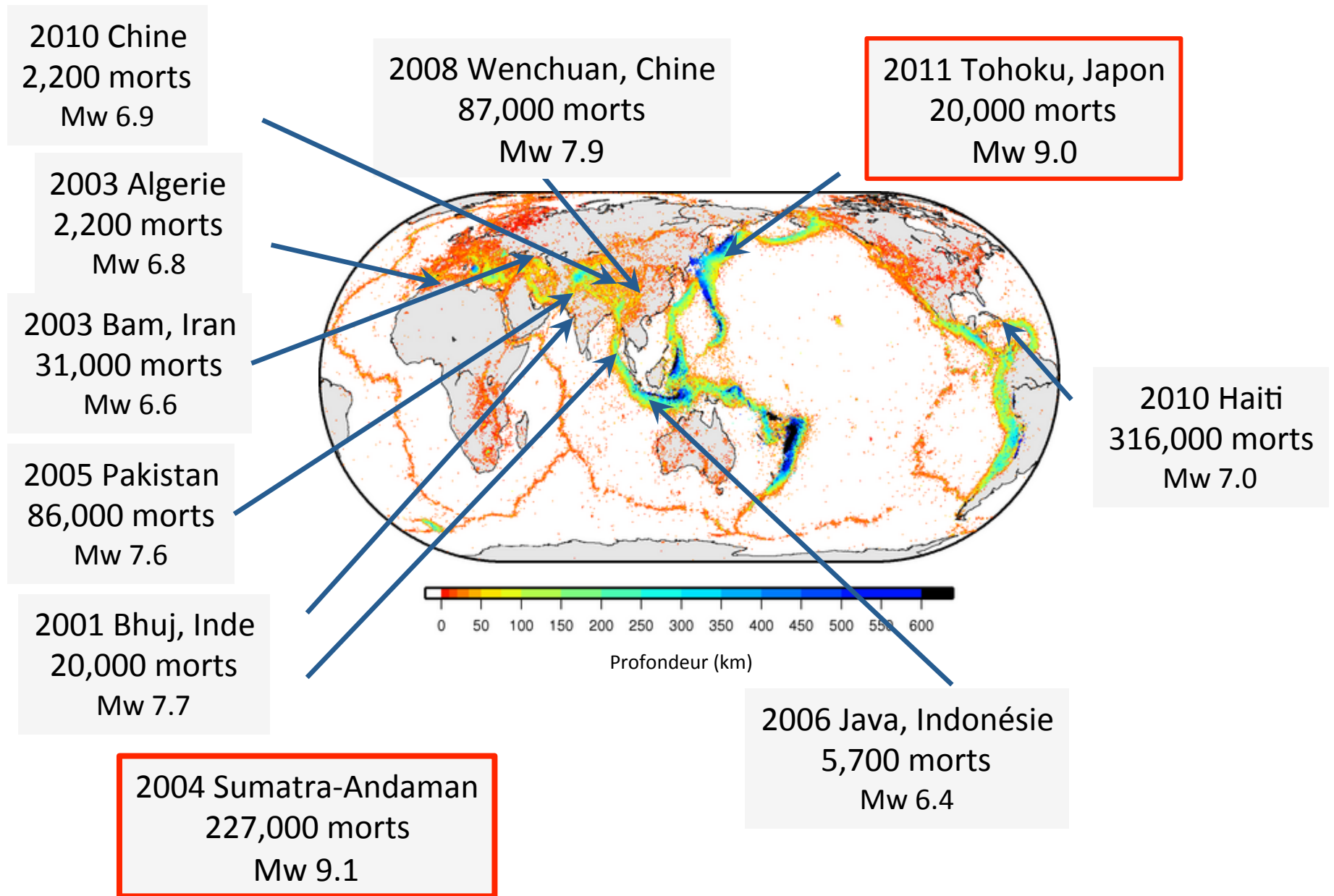
- **Cours les lundis 15h30-17h00**
  - 9,16,23,30 Octobre
  - Pas de Cours le 6 Novembre
  - 13, 20 Novembre
  - Colloque International en Anglais 30 Nov-1er Déc
- **Contenu du Cours:**
  - Introduction: Historique, Notions fondamentales
  - Observations: la rupture sismique
  - Observations: le cycle sismique, phases pre- et post-sismique
    - Séismes lents et tremors non-volcaniques
  - Modélisation en laboratoire et numérique
  - Prédiction, scénarios et alerte sismique

*Collège de France, salle Maurice Halbwachs,  
Prof. Barbara Romanowicz, chaire de Physique de l'Intérieur de  
la Terre*

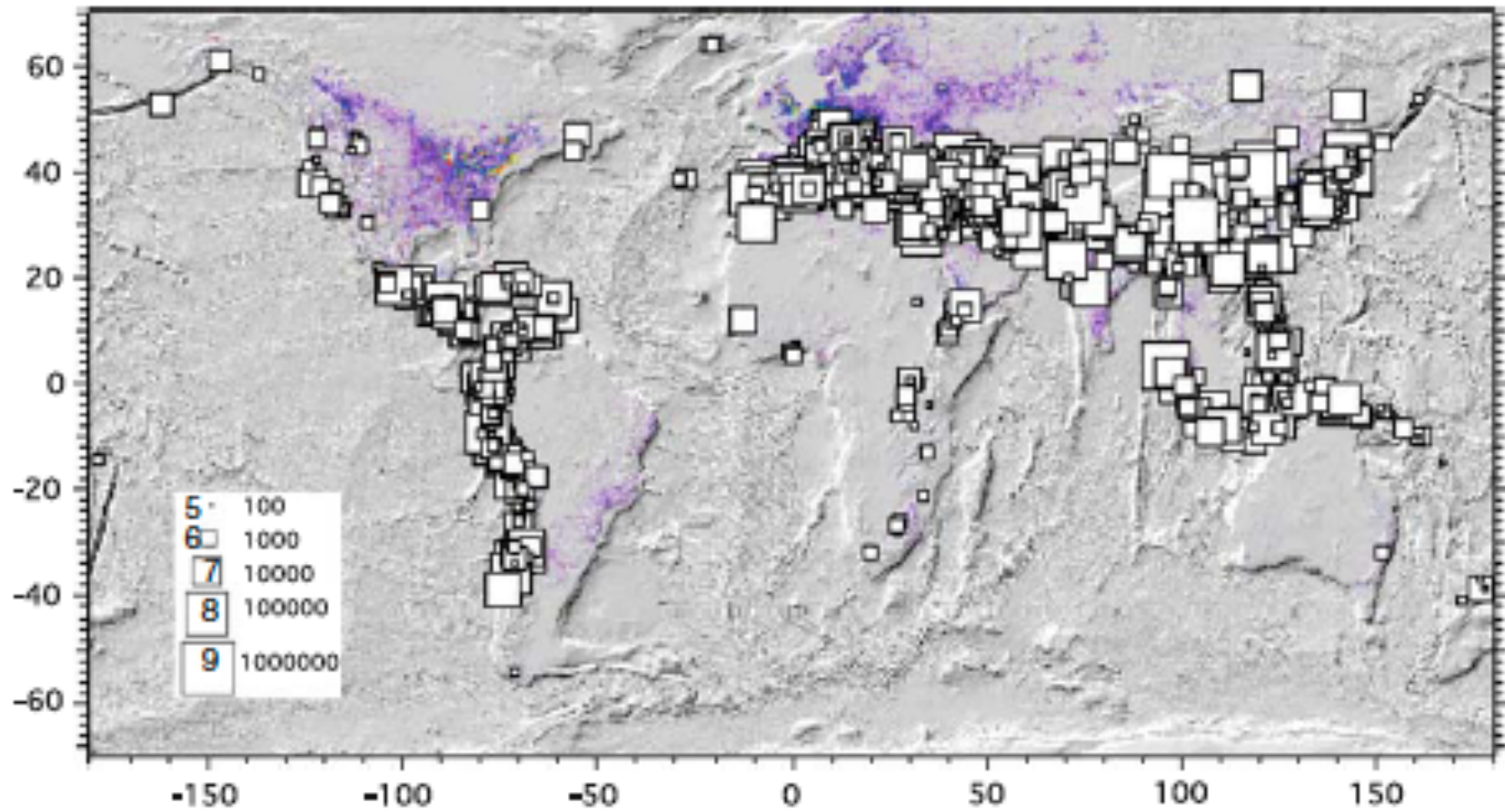
# Les plus forts séismes dans le monde depuis 1900



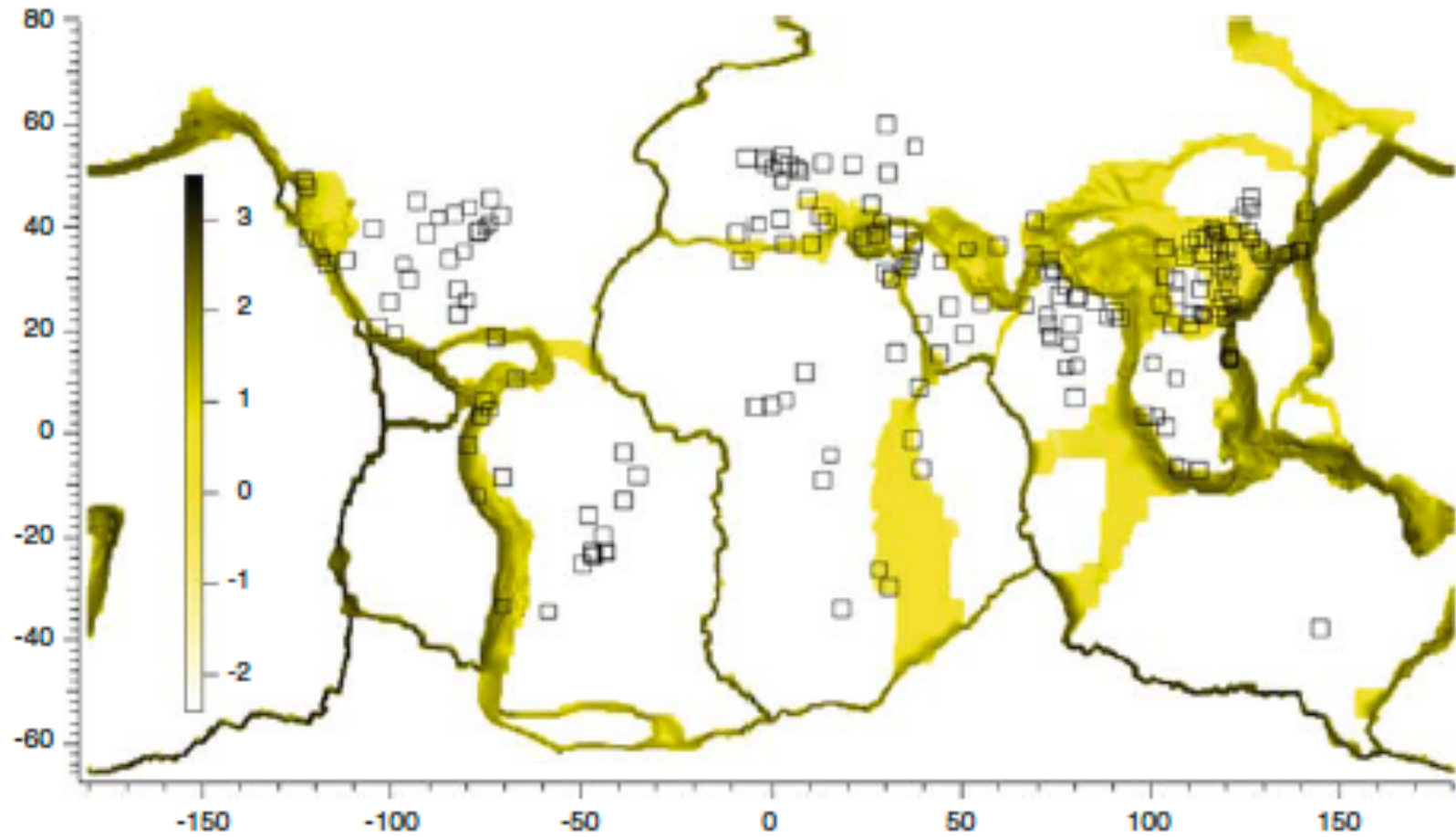
# Les 10 séismes les plus meurtriers du 21<sup>ème</sup> siècle



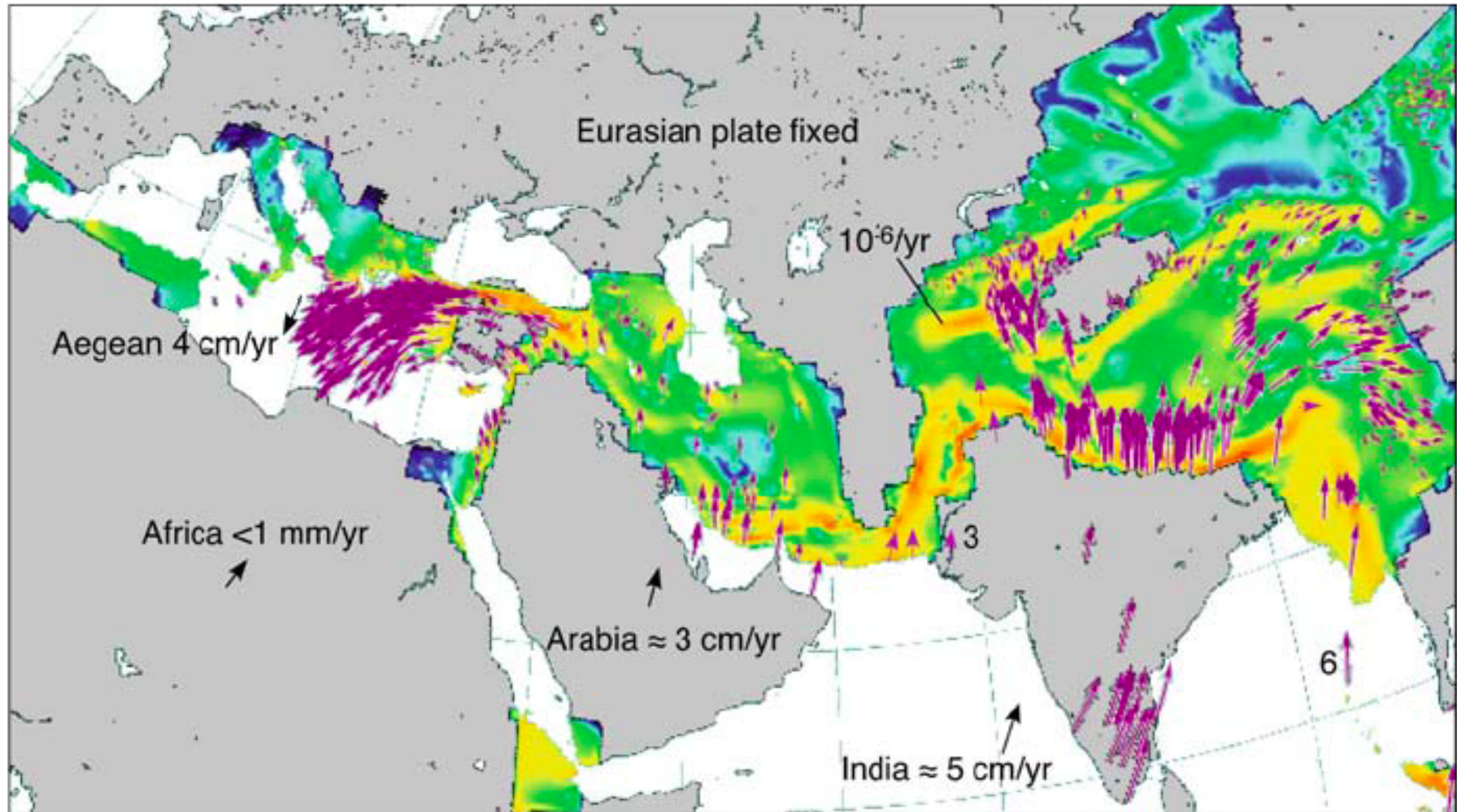
## Séismes meurtriers depuis 1,000 ans



Mégapoles >2M habitants – comparées aux zones de déformation tectonique rapide

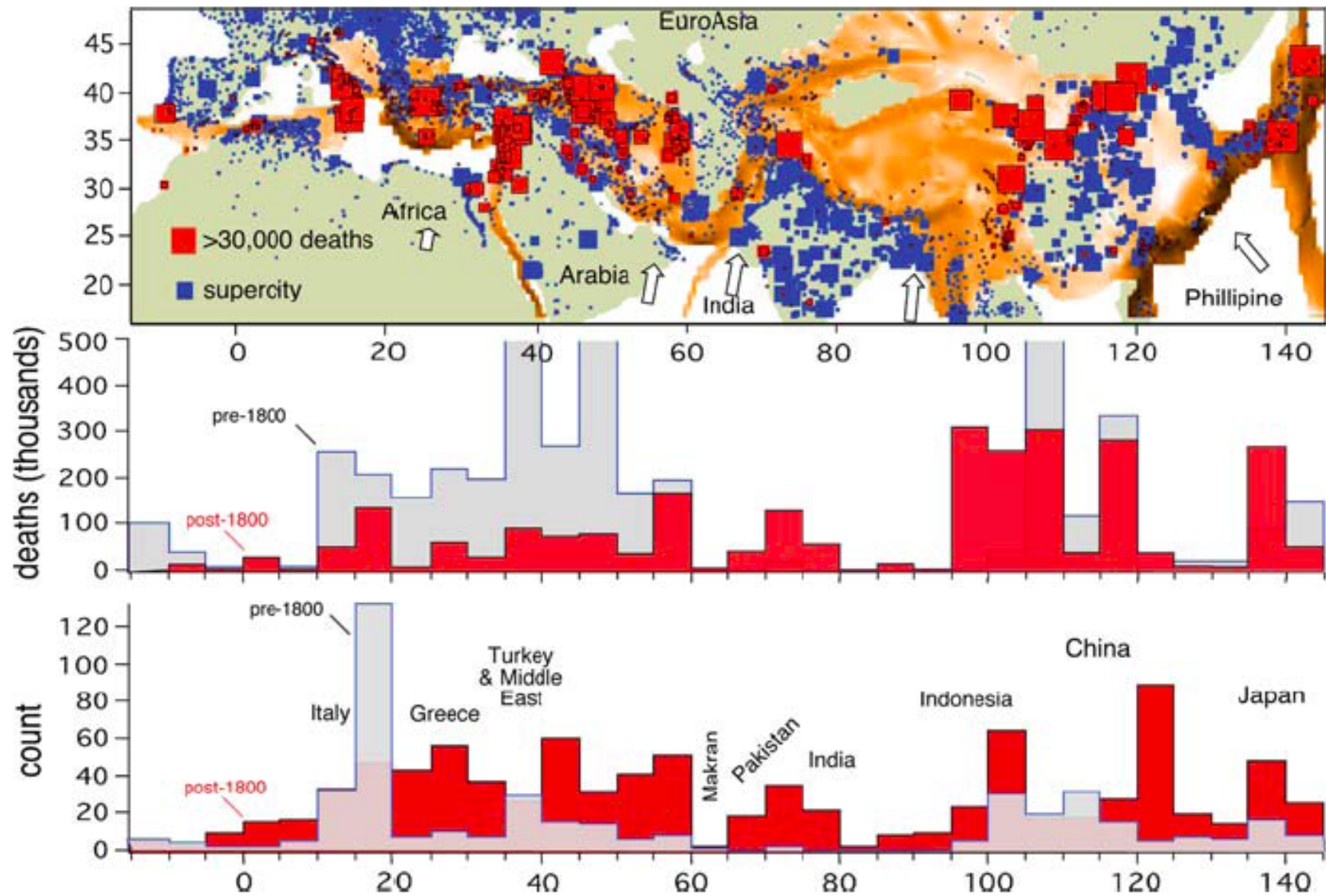


## Vitesses du mouvement des plaques mesurées par rapport à l'Asie

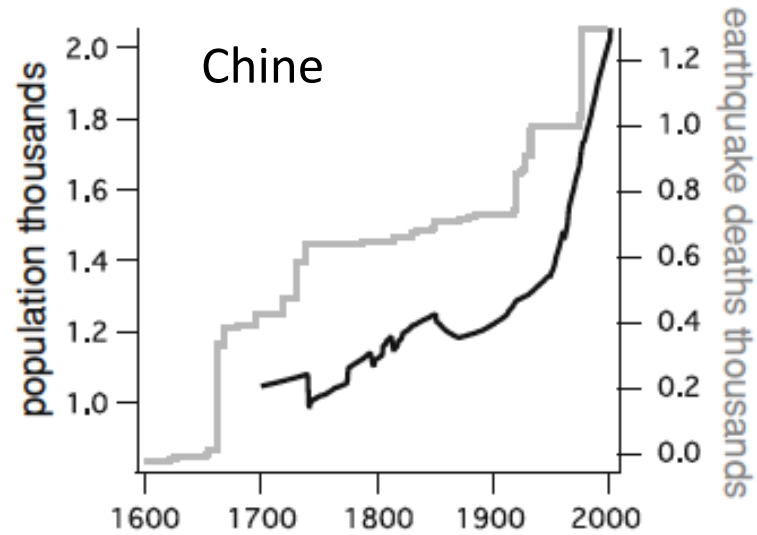
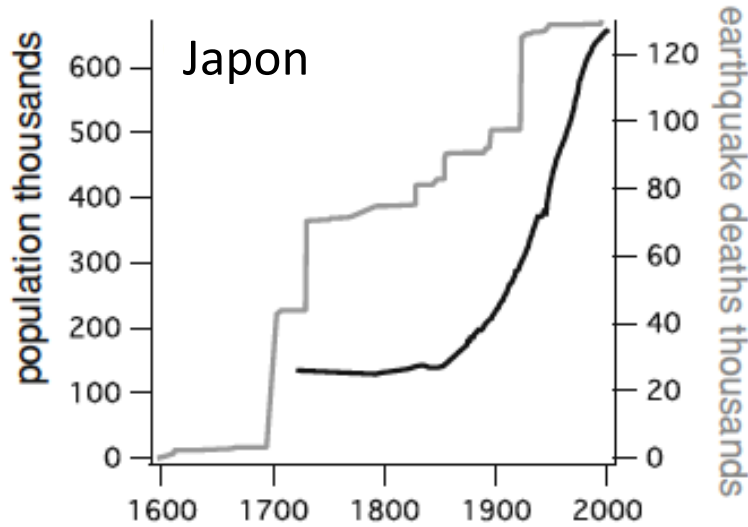
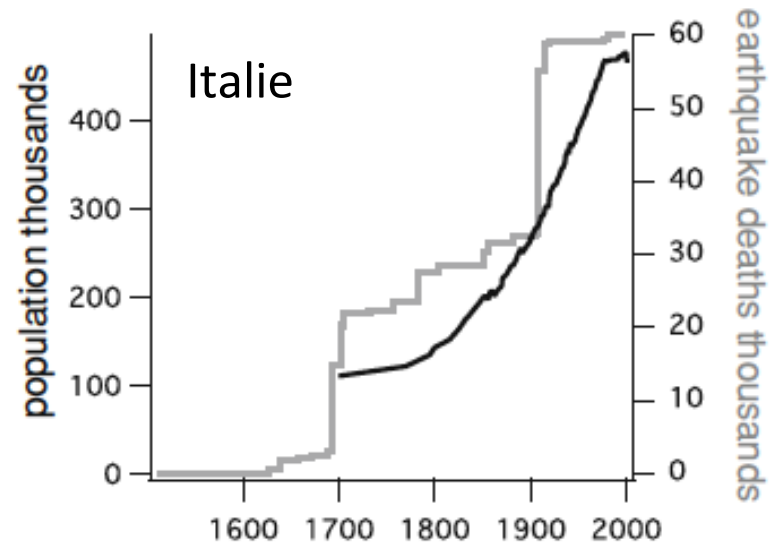
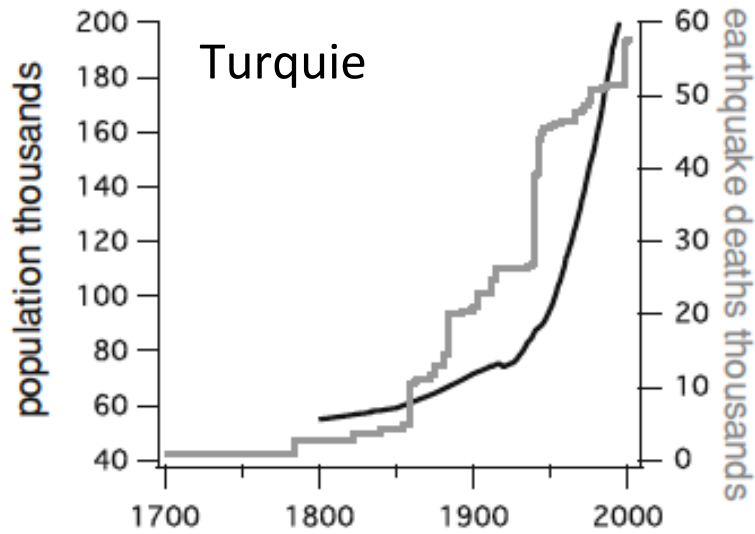


Couleurs: vitesses de deformation – bleu/vert  $<10^{-6}$ /an; jaune =  $10^{-6}$ /an; rouge  $> 10^{-6}$ /an

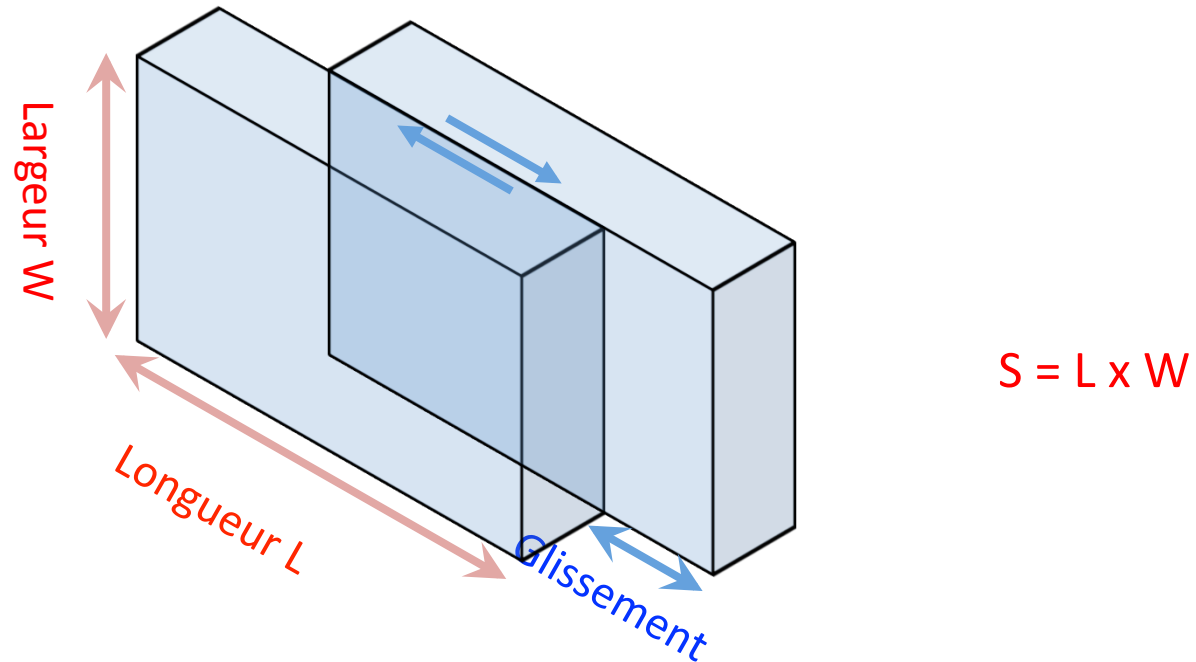




Nombre de morts (gris) comparé au nombre d'habitants (en milliers)  
dans 4 des pays les plus atteints par les séismes



# Mesure moderne de la “taille” d’un séisme: (proportionnelle à l’énergie sismique dégagée)



Potentiel = surface \* (glissement moyen)

Moment sismique ( $M_o$ ) = potentiel \* module de cisaillement

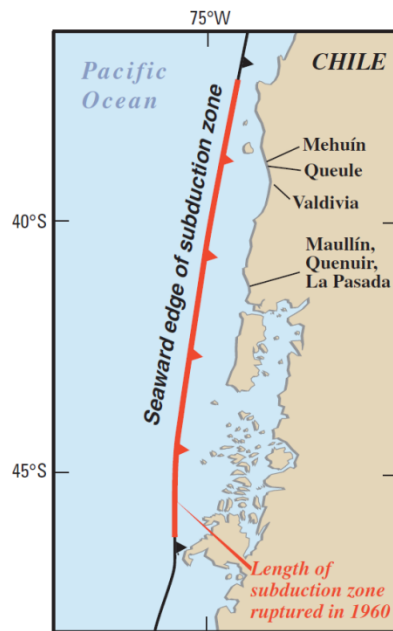
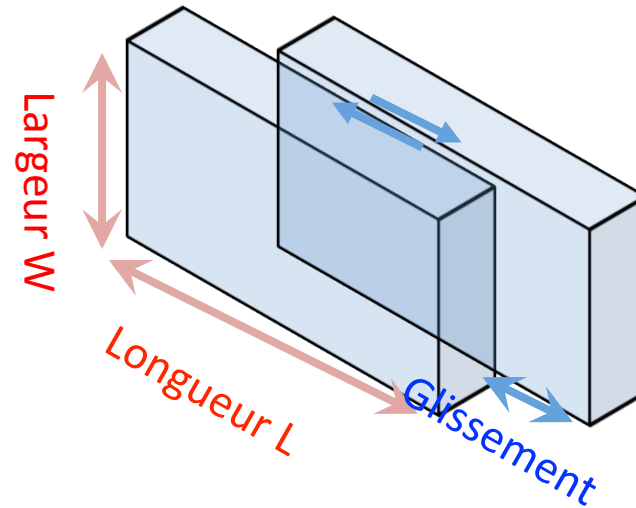
Moment Magnitude =  
 $M_w = 2/3 * \log_{10}(M_o) + \text{constante}$

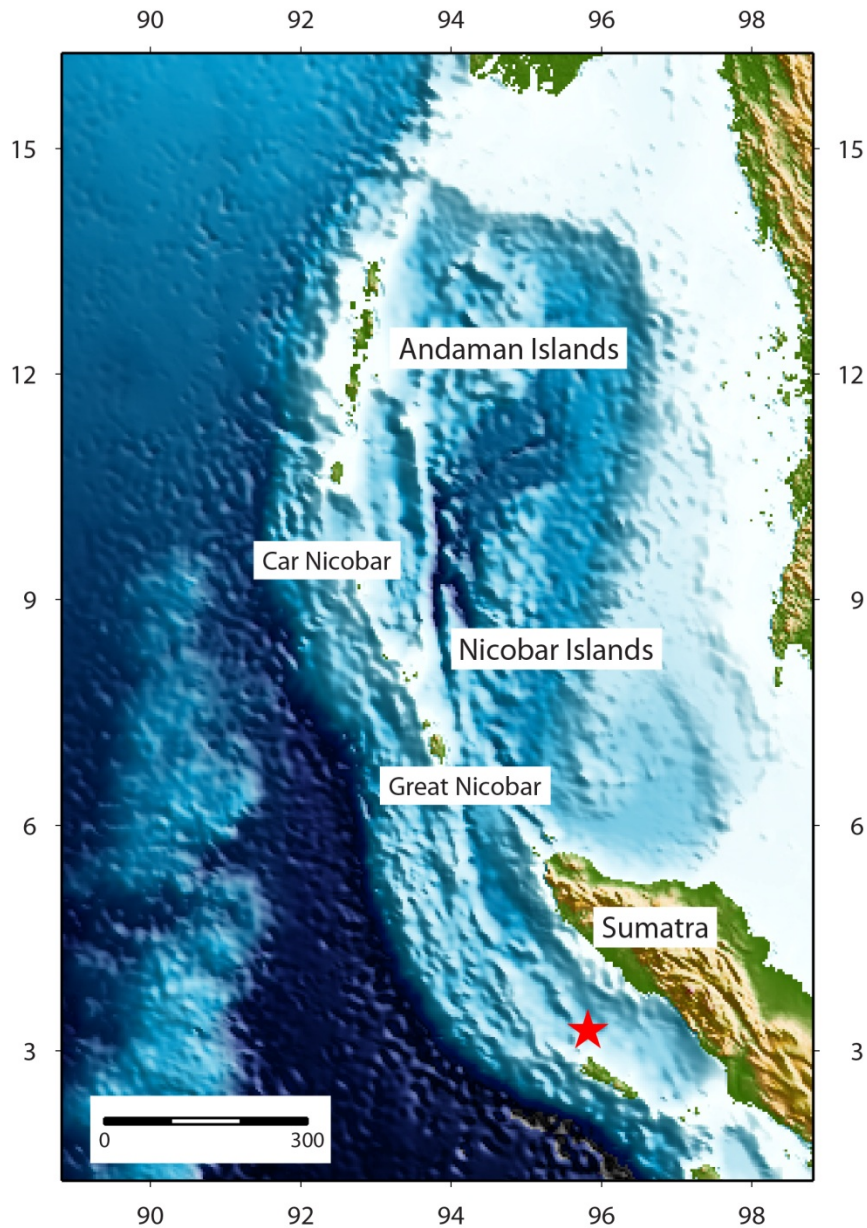
## Exemple: Séisme du Chili de 1960

- 1000 km longueur de rupture
- 150 km largeur de rupture
- 50 m glissement moyen

Potentiel =  $7 \times 10^{12} \text{ m}^3$

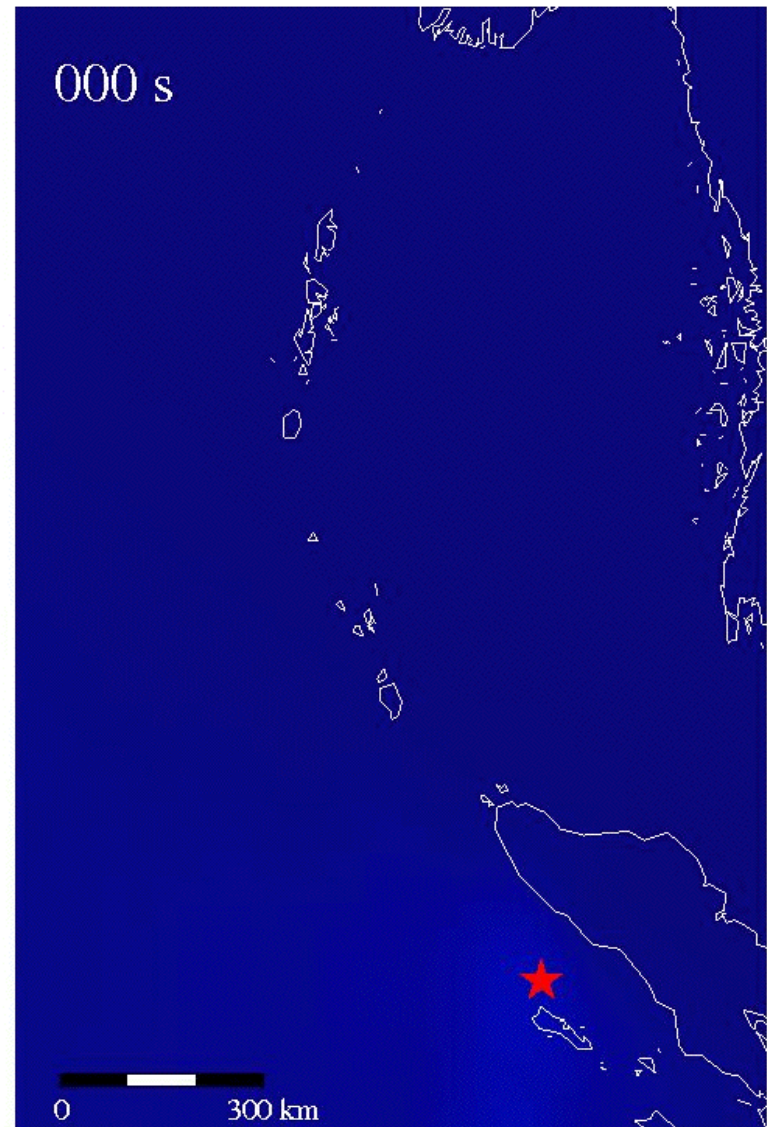
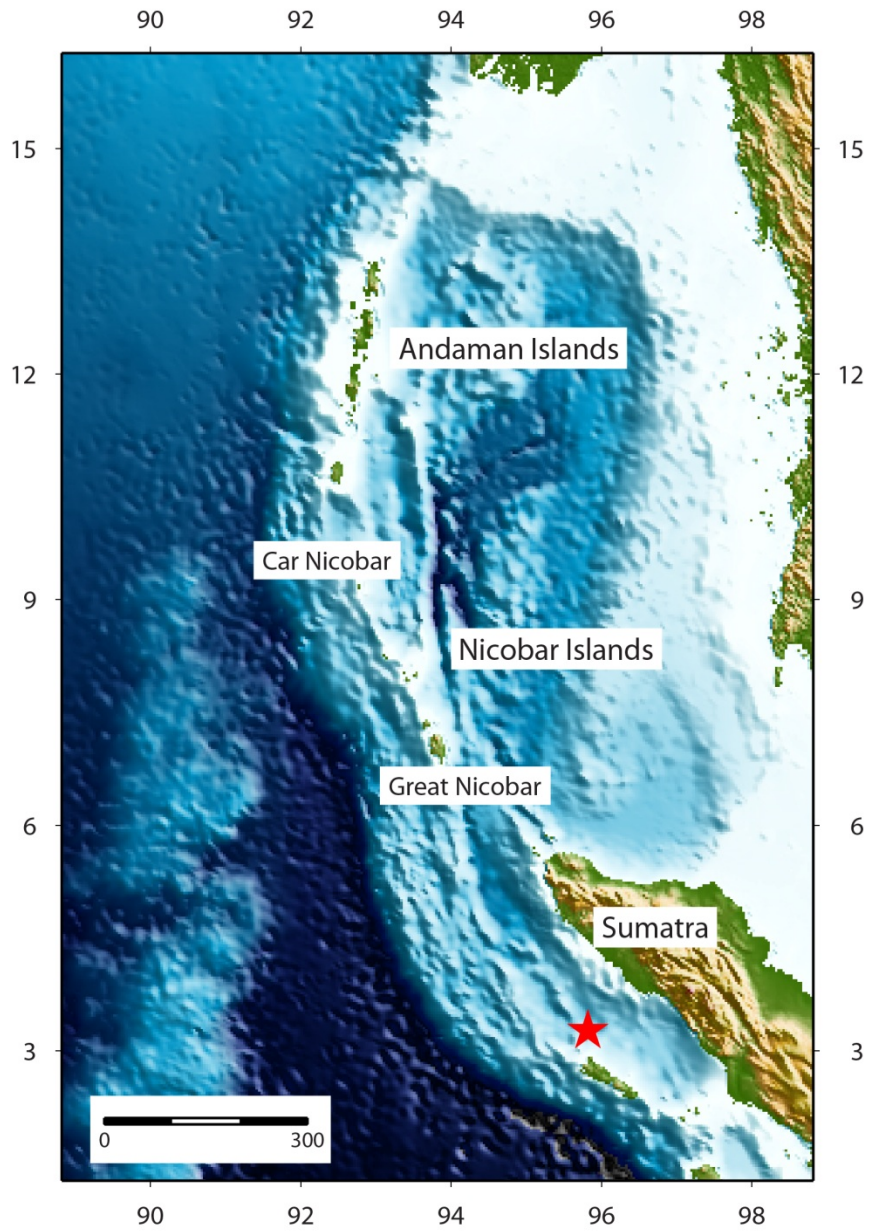
$M_w = 9.5$





## Exemple: Séisme de Sumatra – Andaman 2004 $M_w$ 9.2

- Initiation de la rupture ou hypocentre
- Vitesse de rupture
- Glissement (fonction de la position sur le plan de faille)
- Surface de rupture
- Durée de la rupture



# L'étude des séismes comprend plusieurs éléments:

- 1) La source sismique (sismogénèse):
  - Etude des caractéristiques de la rupture
    - Différentes échelles spatiales et temporelles
    - Complexité du milieu géologique



- 2) Propagation des ondes sismiques entre la source et le lieu d'observation

- 3) Effets de "site"
  - Géologie
  - Densité des structures et leur fragilité

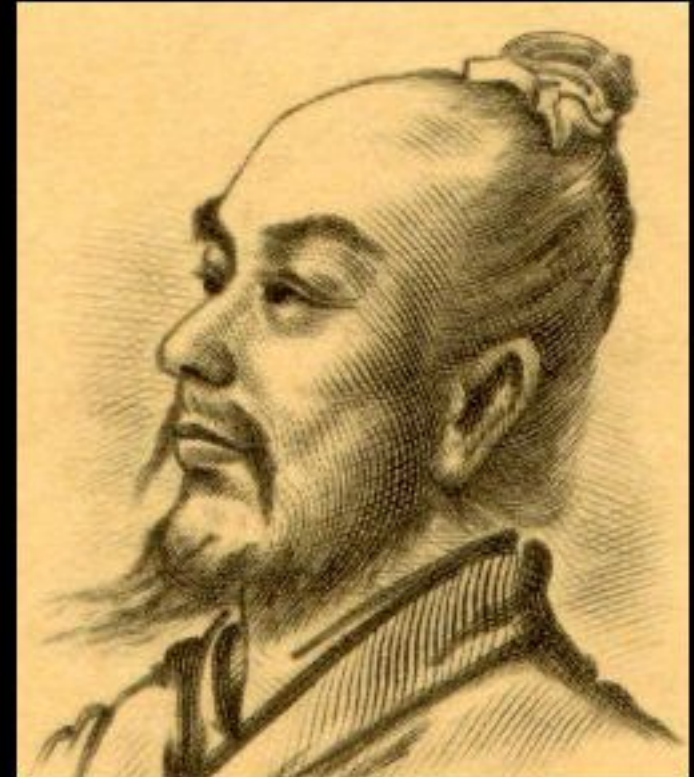


- => *L'étude des séismes, c'est l'étude d'un système naturel complexe*

# Outils modernes pour l'étude des séismes

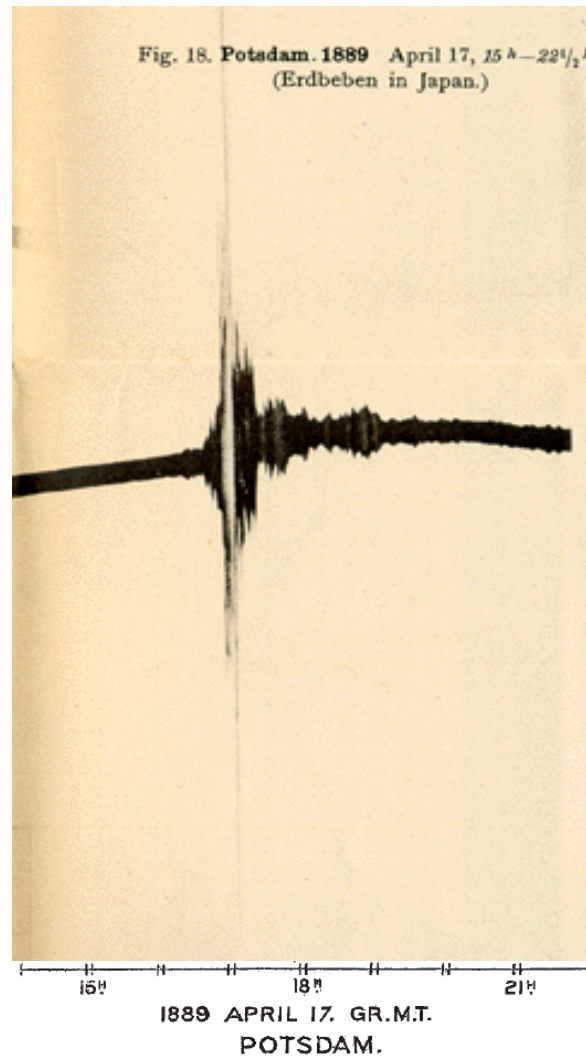
- 1) Réseaux de stations sismiques locaux, régionaux et globaux
- 2) Réseaux de stations géodesiques (GPS)
- 3) Interférométrie radar par satellite (InSAR)
- 4) Observations géologiques de terrain et paléosismologie
- 5) Modélisation numérique et analogique





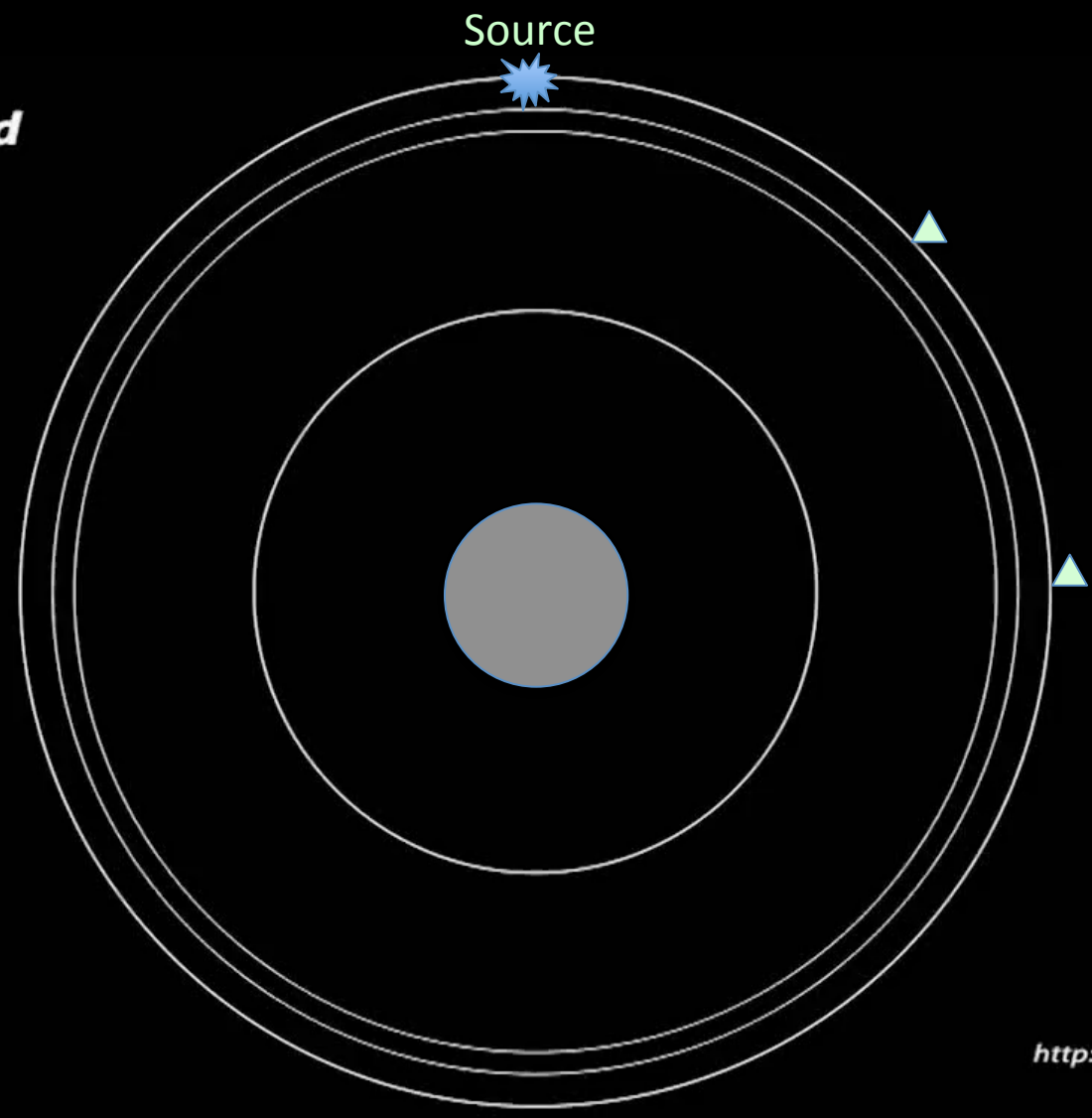
Séismoscope chinois – 2e siècle après J.C.  
Et son inventeur Zhang Heng

von Rebeur Paschwitz  
1889

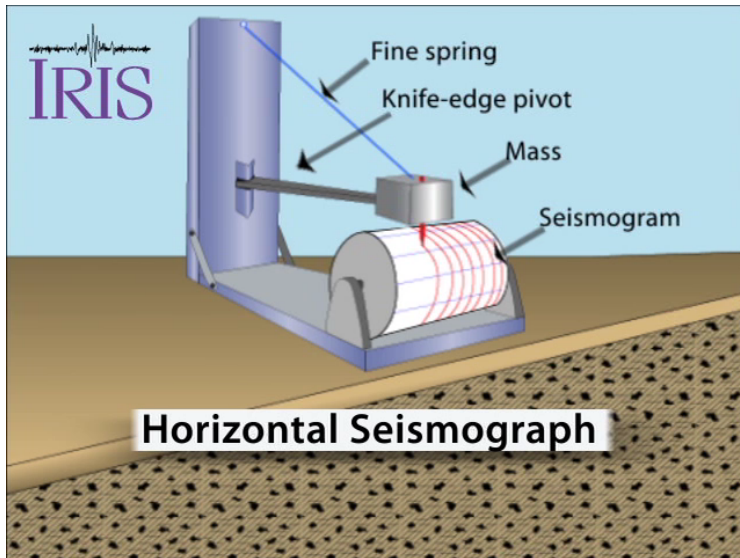
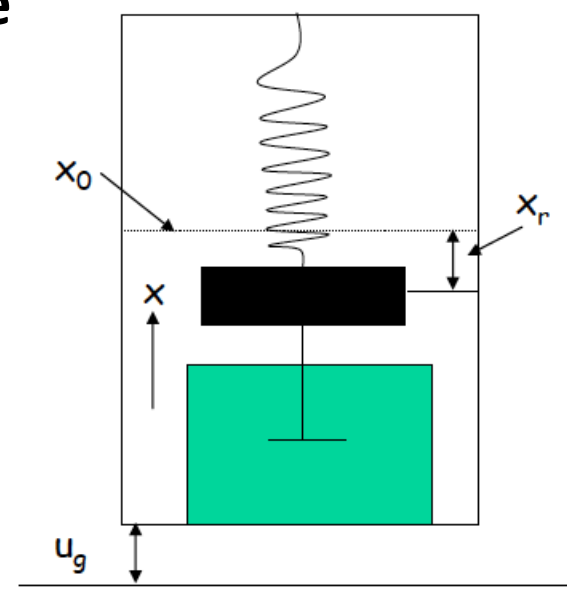
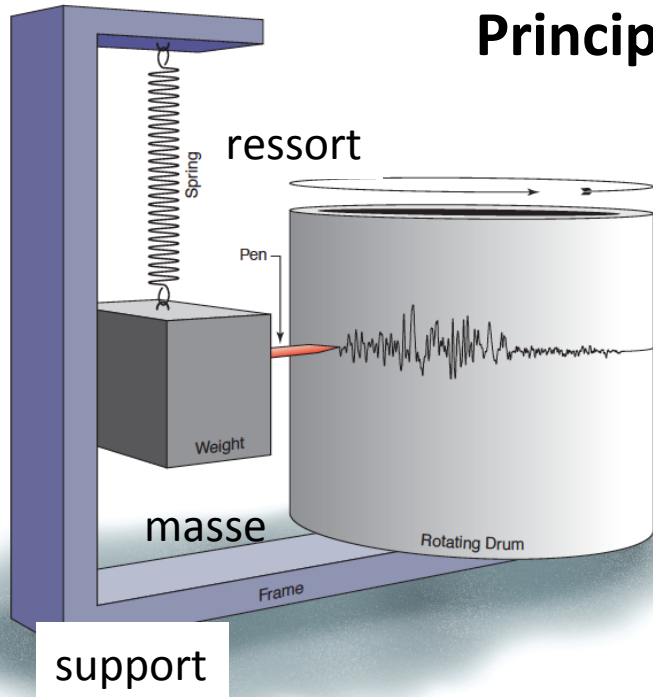


“Reading the report on this earthquake in NATURE (June 13, p. 162), I was struck by its coincidence in time with a very singular perturbation registered by two delicate horizontal pendulums at the Observatories of Potsdam and Wilhelmshaven.”  
*Von Rebeur Paschwitz, E., Nature, 40, July 25, 1889*

***SH-wavefield***  
***Depth: 0 km***  
***T = 15 s***



# Principe du sismomètre

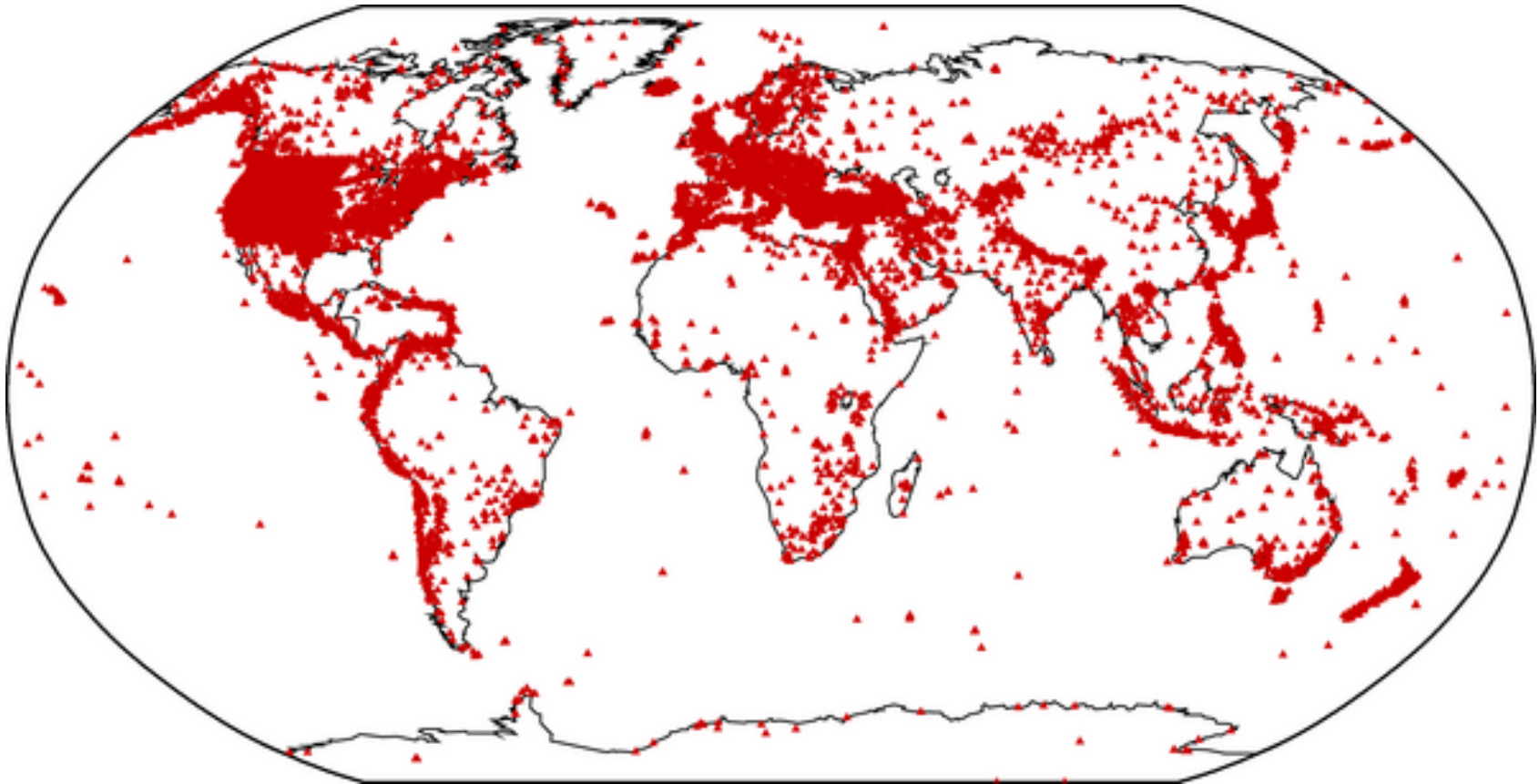


Horizontal Seismograph

$$\ddot{x}_r(t) + 2\varepsilon\dot{x}_r(t) + \varpi_0^2 x_r(t) = -\ddot{u}_g(t)$$

$$\varepsilon = \frac{D}{2m} = h\varpi_0, \quad \varpi_0^2 = \frac{k}{m}$$

# Stations sismiques dans le monde



Un peu d'histoire...

Au Japon on crut longtemps que les séismes étaient provoqués par la colère du poisson géant Nimizu





Athanasius Kircher – (1664) *Mundus subterraneus*



# Le Grand Tremblement de Terre de Huaxian (Jiajing): 23 Janvier 1556

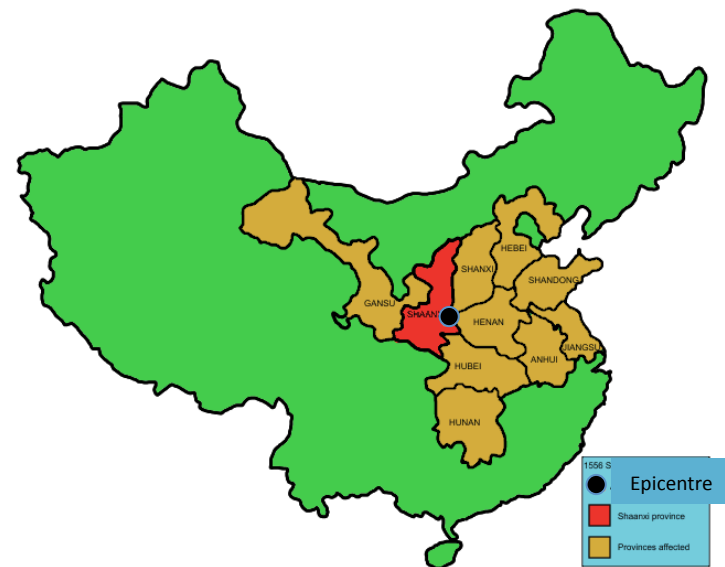


Barrage en pierre sur le fleuve Jaune endommagé à Yongji, province de Shanxi

Considéré comme le plus meurtrier de tous les temps (Talwani, 2014; Poirier, 2017)

Mw ~ 8 – 8.3

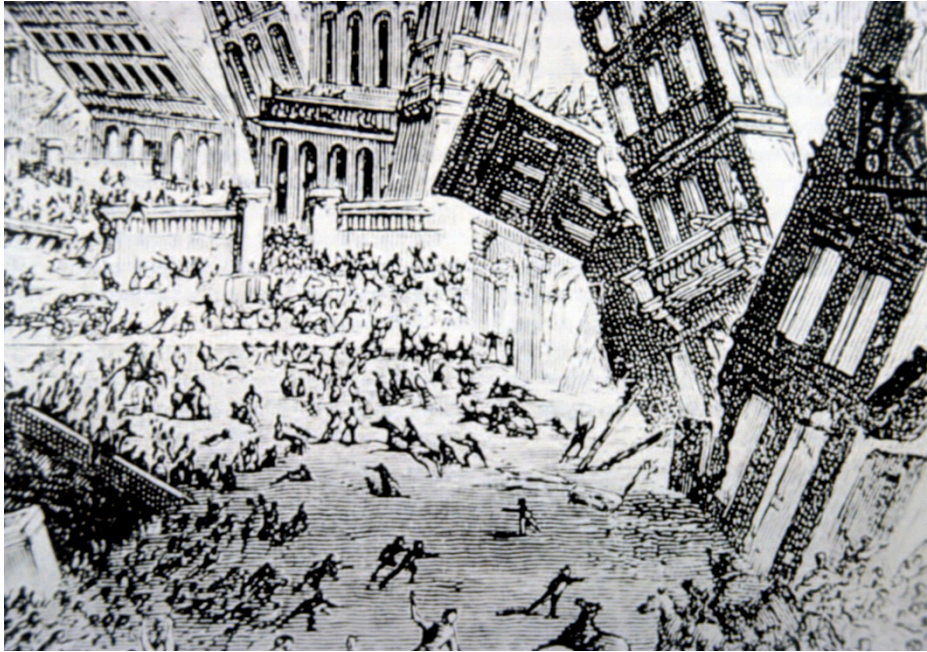
~830,000 morts “de noms connus”  
Répliques 3-5 fois par mois pendant 6 mois et, plus atténuées, pendant encore 5 ans,



Séisme de Bâle de 1356      Mw ~6.2 – 6.9



# Séisme de Lisbonne de 1755 (Jour de la Toussaint)



John Mitchell (astronome à Cambridge, 1760) :

-> “tremulous vibration followed by a wavelike undulation”

-> Séismes dus au déplacement de masses rocheuses à grande profondeur

-> se propagent sous forme d’ondes dans la terre solide

Mw ~ 8.5-9.0

50,000-70,000 morts



*(Musée de la ville de Lisbonne)*

*Extrait du "Poème sur le désastre de Lisbonne"*  
*de Voltaire*

- Ô 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 » ?  
Quel crime, quelle faute ont commis ces enfants  
Sur le sein maternel écrasés et sanglants ?  
Lisbonne, qui n'est plus, eut-elle plus de vices  
Que Londres, que Paris, plongés dans les délices ?  
Lisbonne est abîmée, et l'on danse à Paris.....

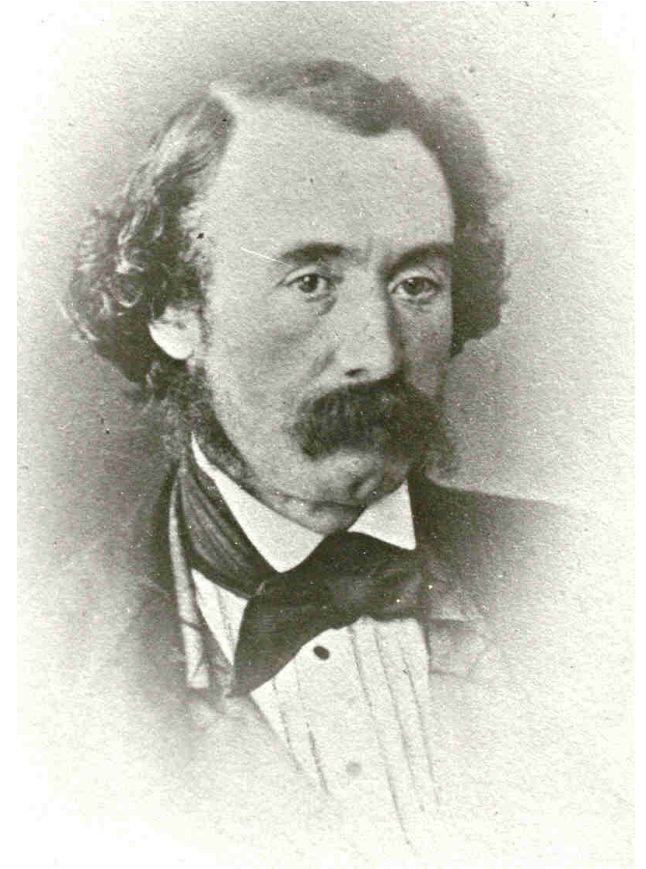
....

# Séismes de Calabre 1783 Mw ~7.0



# Séisme de Naples 1857:

- Robert Mallet (1810-1881)
  - Ingénieur civil irlandais
  - Considéré comme le père de la sismologie moderne
    - “Sur la dynamique des séismes” (1846)
  - Etudie le séisme de Naples du 16 Décembre 1857 (11,000 morts):
    - “Premiers principes de sismologie observationnelle”
    - Reconnaissance de la profondeur de la source sismique (~15 km)
    - Ondes sismiques se propagent à des vitesses différentes dans différents matériaux
    - Ondes sismiques ressemblent aux ondes sonores qui se propagent dans l’air
    - Notion d’intensité sismique





# Intensité sismique

- Mesure pré-instrumentale de la “taille” d’un séisme, uniquement basée sur les effets ressentis
- Diverses échelles établies depuis Mercalli (1883)
- Actuellement MMI – “Modified Mercalli Intensity Scale”
  - 12 degrés (I -> XII)
- Echelle subjective remplacée, depuis l’époque instrumentale, par les échelles de magnitude



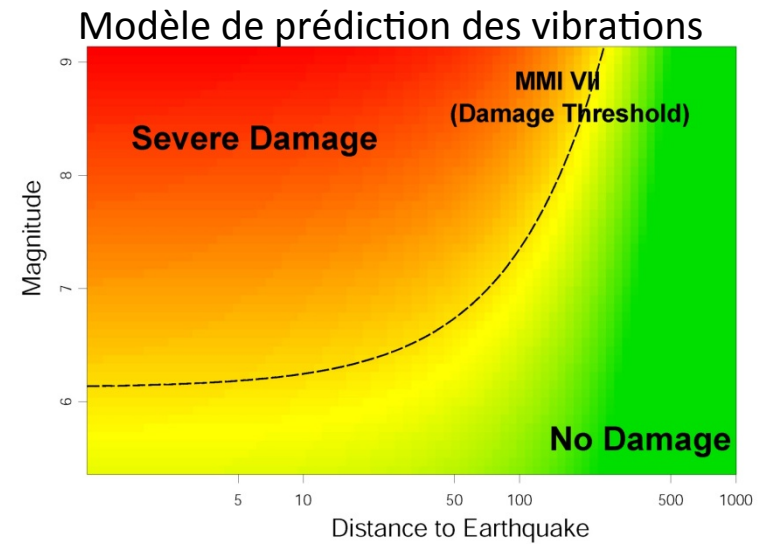
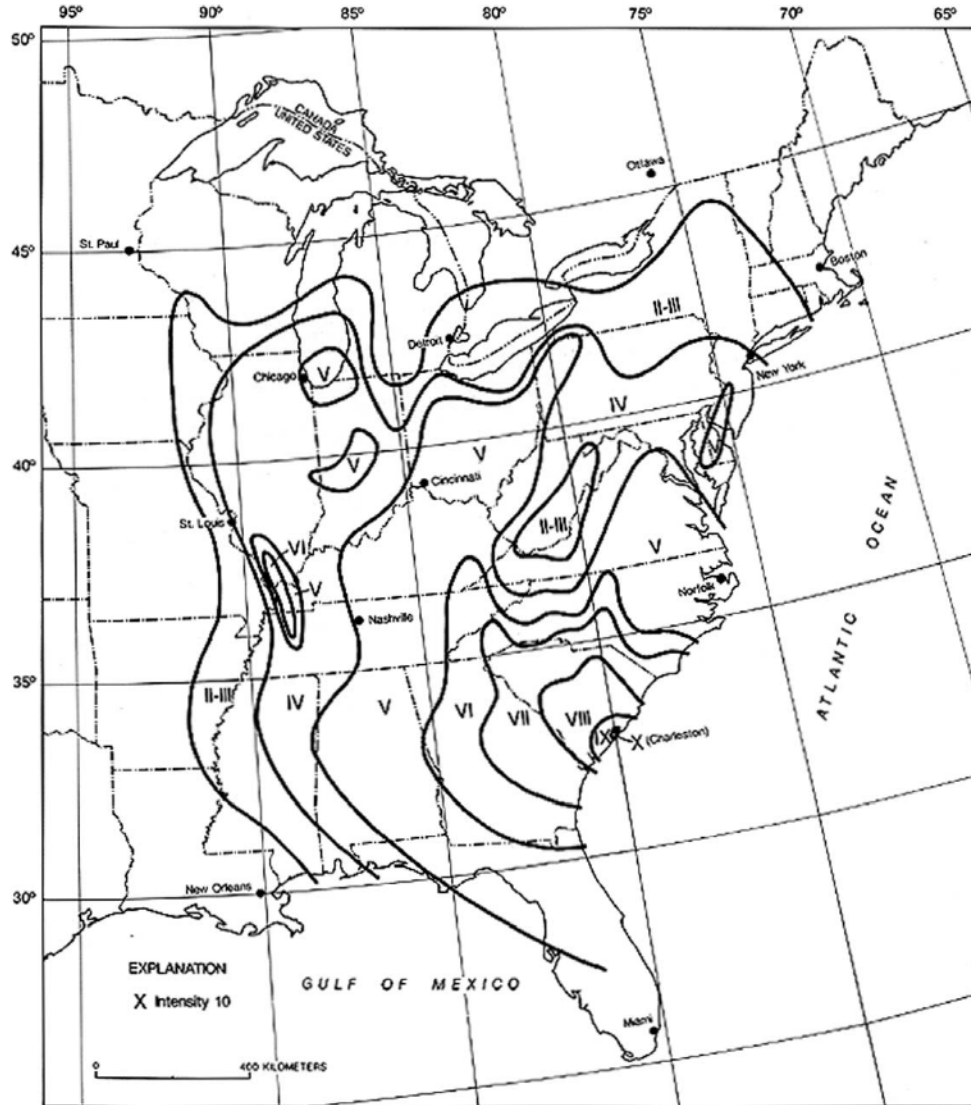
# Echelle d'intensité sismique de Mercalli modifiée (MMI)

Degrés	Étendue des dégâts observés
I	Aucun mouvement n'est perçu. Le séisme n'est détecté que par des instruments sensibles et quelques personnes dans des conditions particulières.
II	Quelques personnes peuvent sentir un mouvement si elles sont au repos et/ou dans les étages élevés de grands immeubles.
III	À l'intérieur de bâtisses, beaucoup de gens sentent un léger mouvement. Les objets suspendus bougent. En revanche, à l'extérieur, rien n'est ressenti.
IV	À l'intérieur, la plupart des gens ressentent un mouvement. Les objets suspendus bougent, mais aussi les fenêtres, plats, assiettes, loquets de porte.
V	La plupart des gens ressentent le mouvement. Les personnes sommeillant sont réveillées. Les portes claquent, la vaisselle se casse, les tableaux bougent, les petits objets se déplacent, les arbres oscillent, les liquides peuvent déborder de récipients ouverts.
VI	Tout le monde sent le tremblement de terre. Les gens ont la marche troublée, les objets et tableaux tombent, le plâtre des murs peut se fendre, les arbres et les buissons sont secoués. Des dommages légers peuvent se produire dans des bâtiments mal construits, mais aucun dommage structural.

---

# Echelle d'intensité sismique de Mercalli modifiée (MMI)

<b>VII</b>	Les gens ont du mal à tenir debout. Les conducteurs sentent leur voiture secouée. Quelques meubles peuvent se briser. Des briques peuvent tomber des immeubles. Les dommages sont modérés dans les bâtiments bien construits, mais peuvent être considérables dans les autres.
<b>VIII</b>	Les chauffeurs ont du mal à conduire. Les maisons avec de faibles fondations bougent. De grandes structures telles que des cheminées ou des immeubles, peuvent se tordre et se briser. Les bâtiments bien construits subissent de légers dommages, contrairement aux autres qui en subissent de sévères. Les branches des arbres se cassent. Les collines peuvent se fissurer si la terre est humide. Le niveau de l'eau dans les puits peut changer.
<b>IX</b>	Tous les immeubles subissent de gros dommages. Les maisons sans fondations se déplacent. Quelques conduits souterrains se brisent. La terre se fissure.
<b>X</b>	La plupart des bâtiments et leurs fondations sont détruits. Il en est de même pour quelques ponts. Des barrages sont sérieusement endommagés. Des éboulements se produisent. L'eau est détournée de son lit. De larges fissures apparaissent sur le sol. Les rails de chemin de fer se courbent.
<b>XI</b>	La plupart des constructions s'effondrent. Des ponts sont détruits. Les conduits souterrains sont détruits.
<b>XII</b>	Presque tout est détruit. Le sol bouge en ondulant. De grands pans de roches peuvent se déplacer.



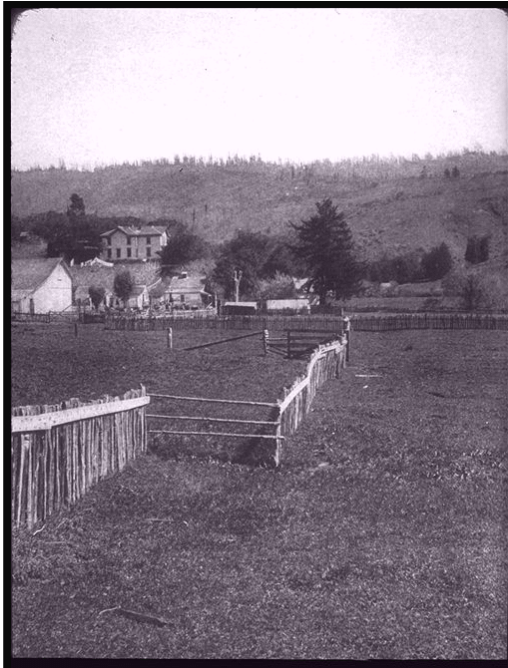
Carte “isosismique” pour le séisme de Charleston, Caroline du Sud, de 1866

*Stover and Coffman (1993) US Geol. Survey Professional Paper 1527*

## Séisme de San Francisco de 1906 (Mw 7.9)

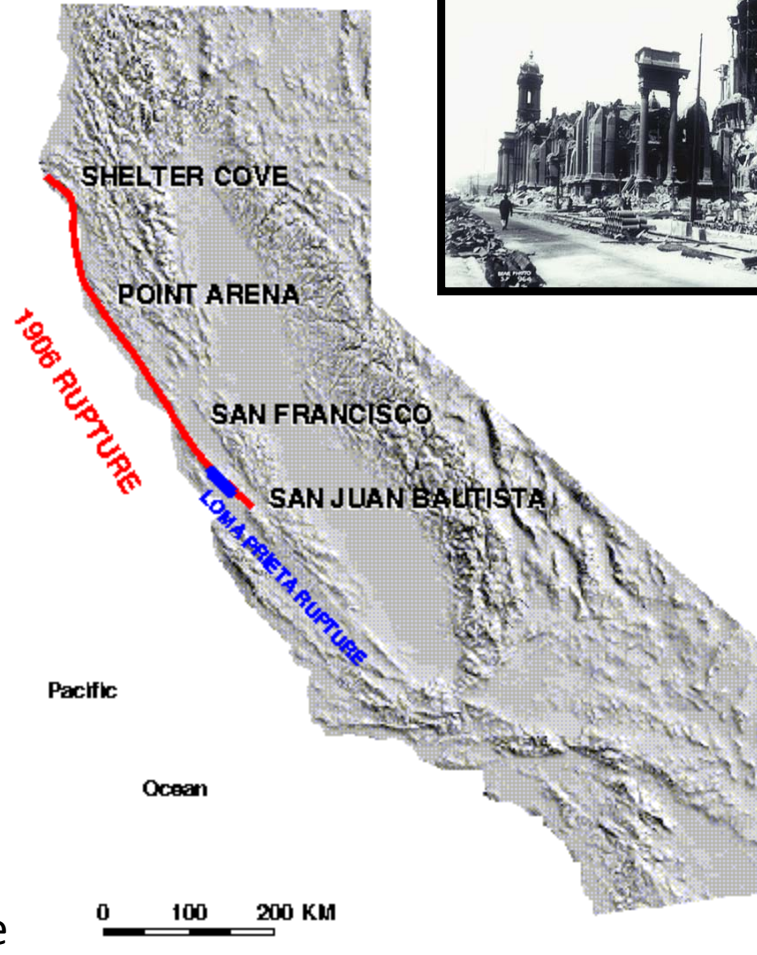


# Séisme de San Francisco de 1906 (Mw 7.8)



Barrière décalée de 6m près de Olema

430 km (290 mi) rupture of the San Andreas fault

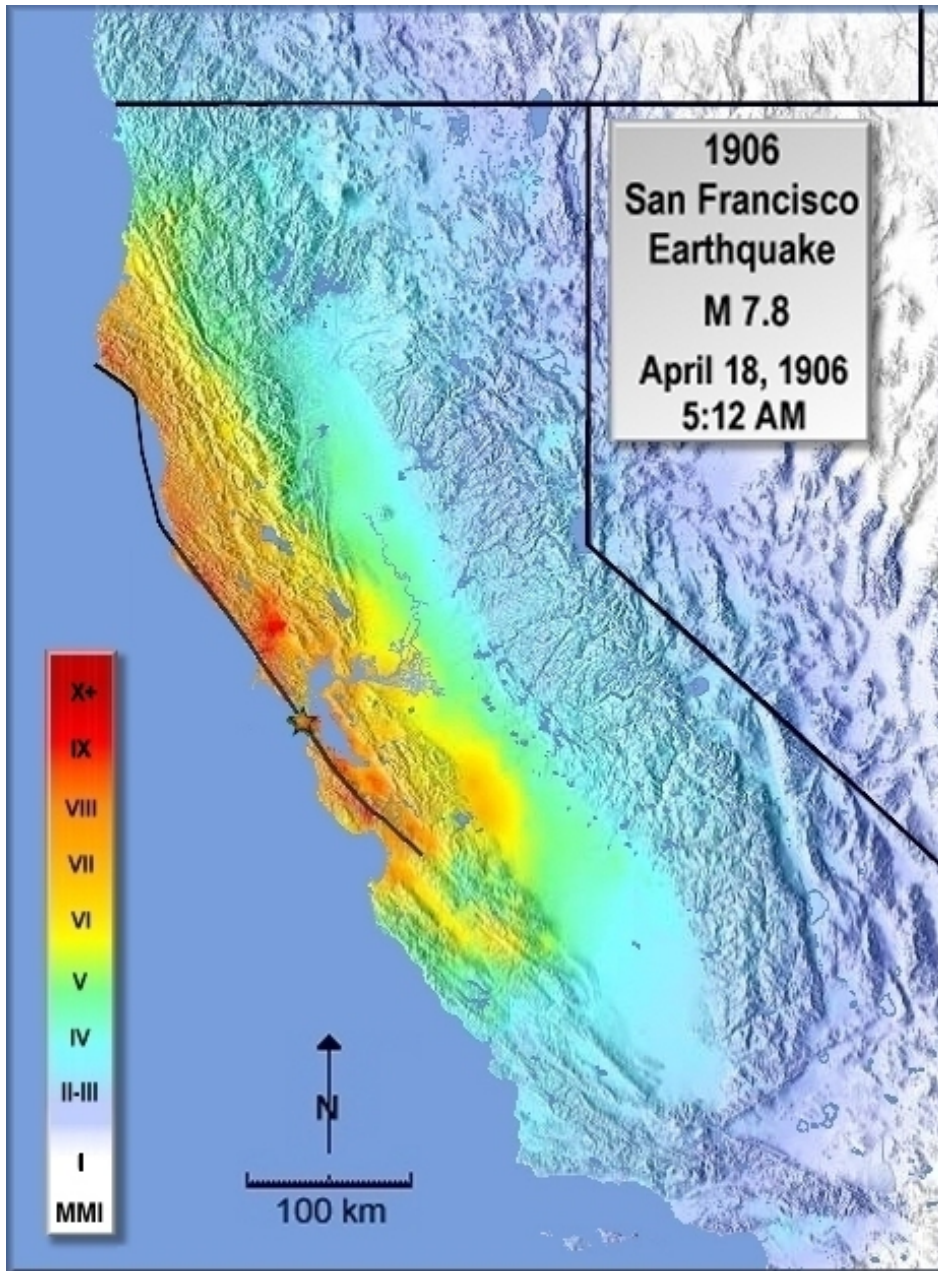


Hotel de Ville de SF

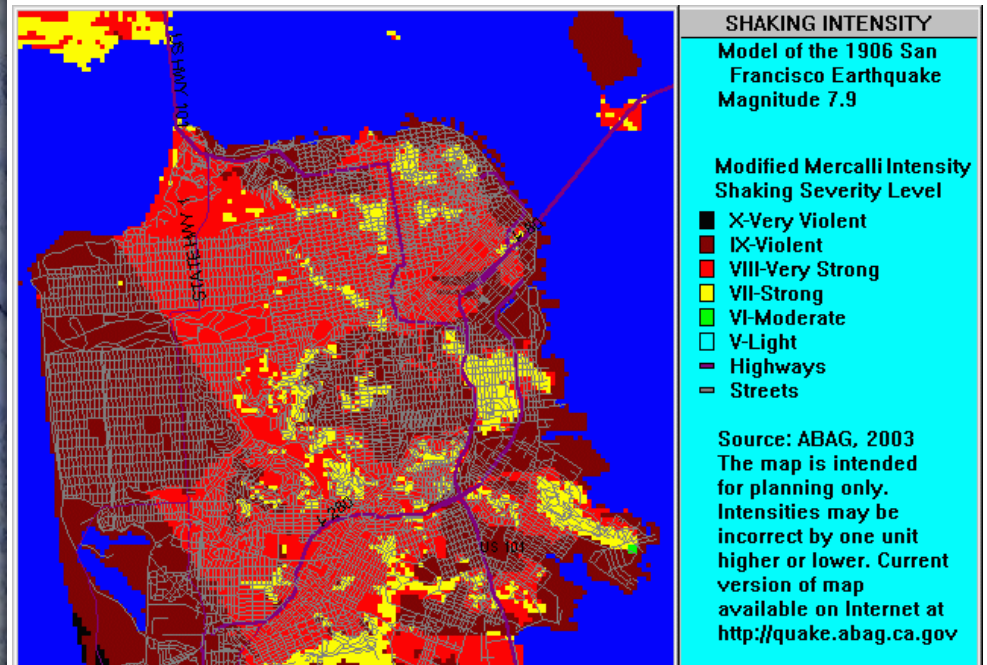


Affaissement du sol au sud Market Ave

# Séisme de San Francisco de 1906



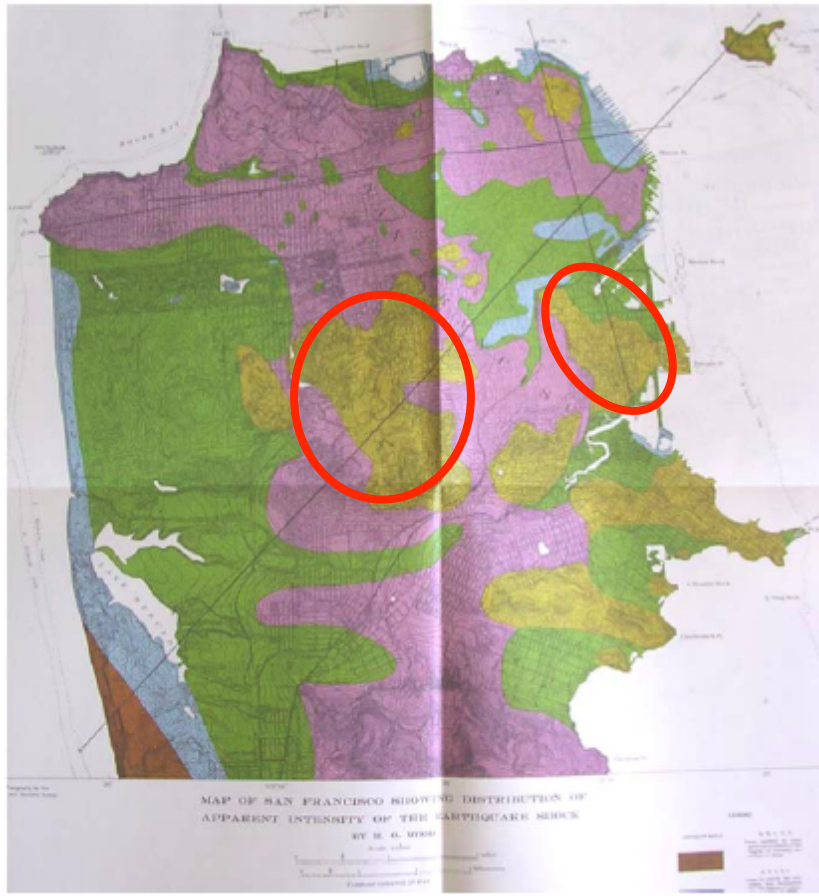
L'intensité des vibrations dépend de la distance à la faille, mais aussi de la nature du sol



# Séisme de San Francisco de 1906 (Mw 7.8)

## Géologie

### Intensité des effets du séisme



Marron: intensité la plus forte  
Decroît: bleu→vert→rose→jaune



Couleurs foncées: socle/roche dure  
Couleurs claires: alluvions ou Remblais.

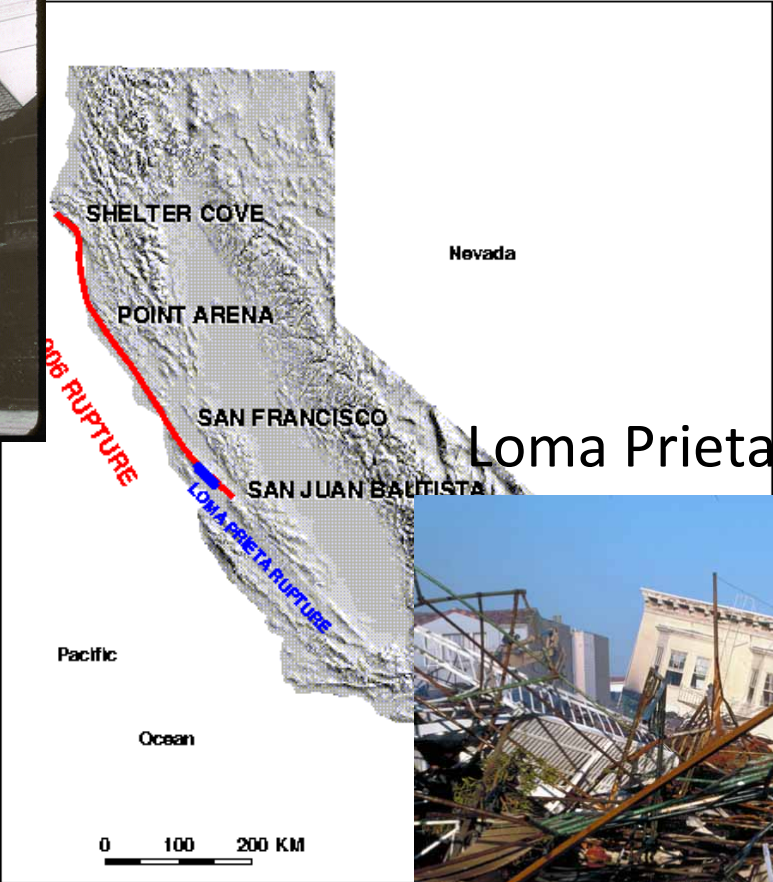
San Francisco, 1906 (Mw 7.8) - Marina District





# Quartier de la Marina, San Francisco

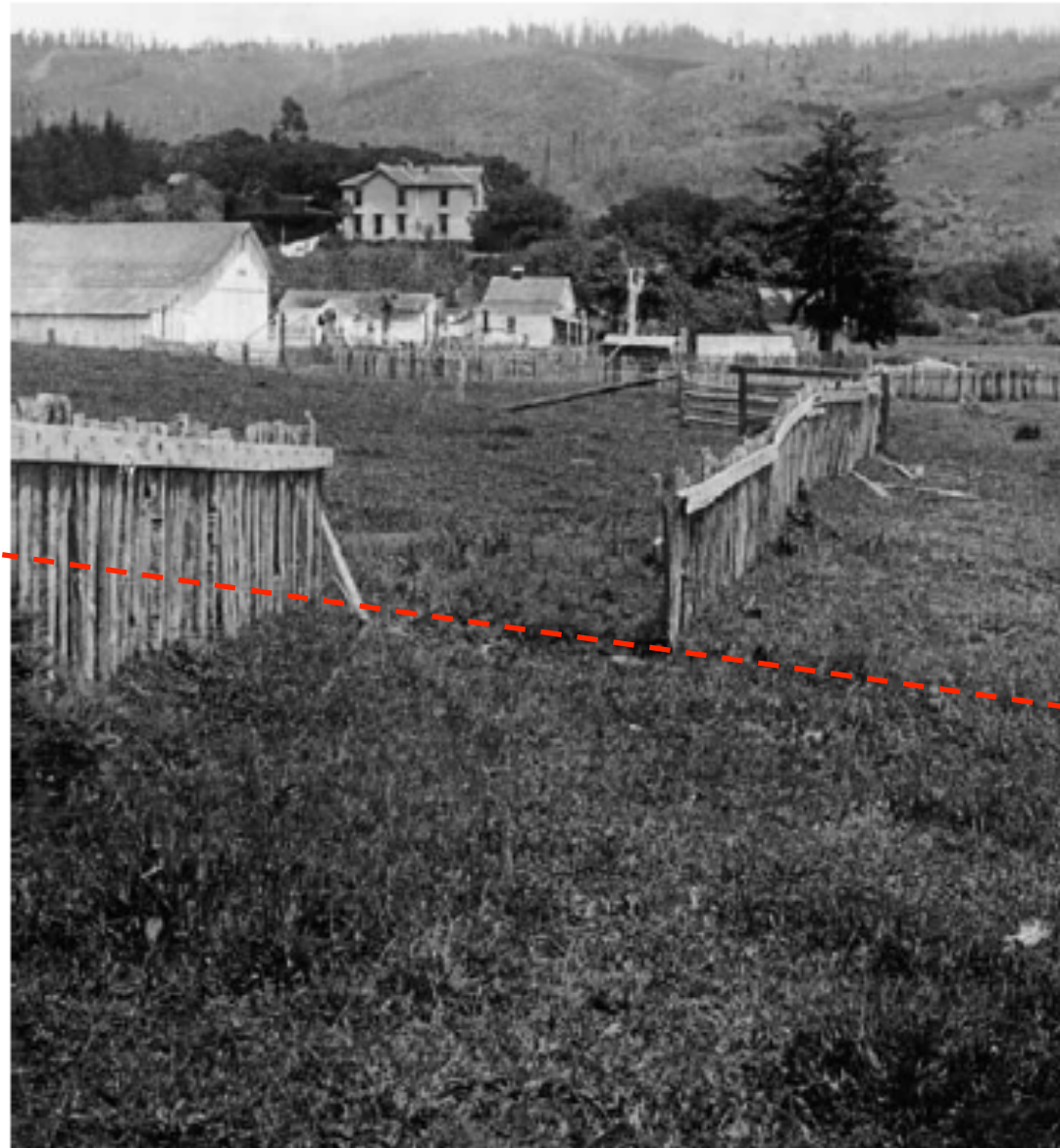
Séisme de San Francisco de 1906 (Mw 7.8)



Loma Prieta 1989 (Mw 6.9)

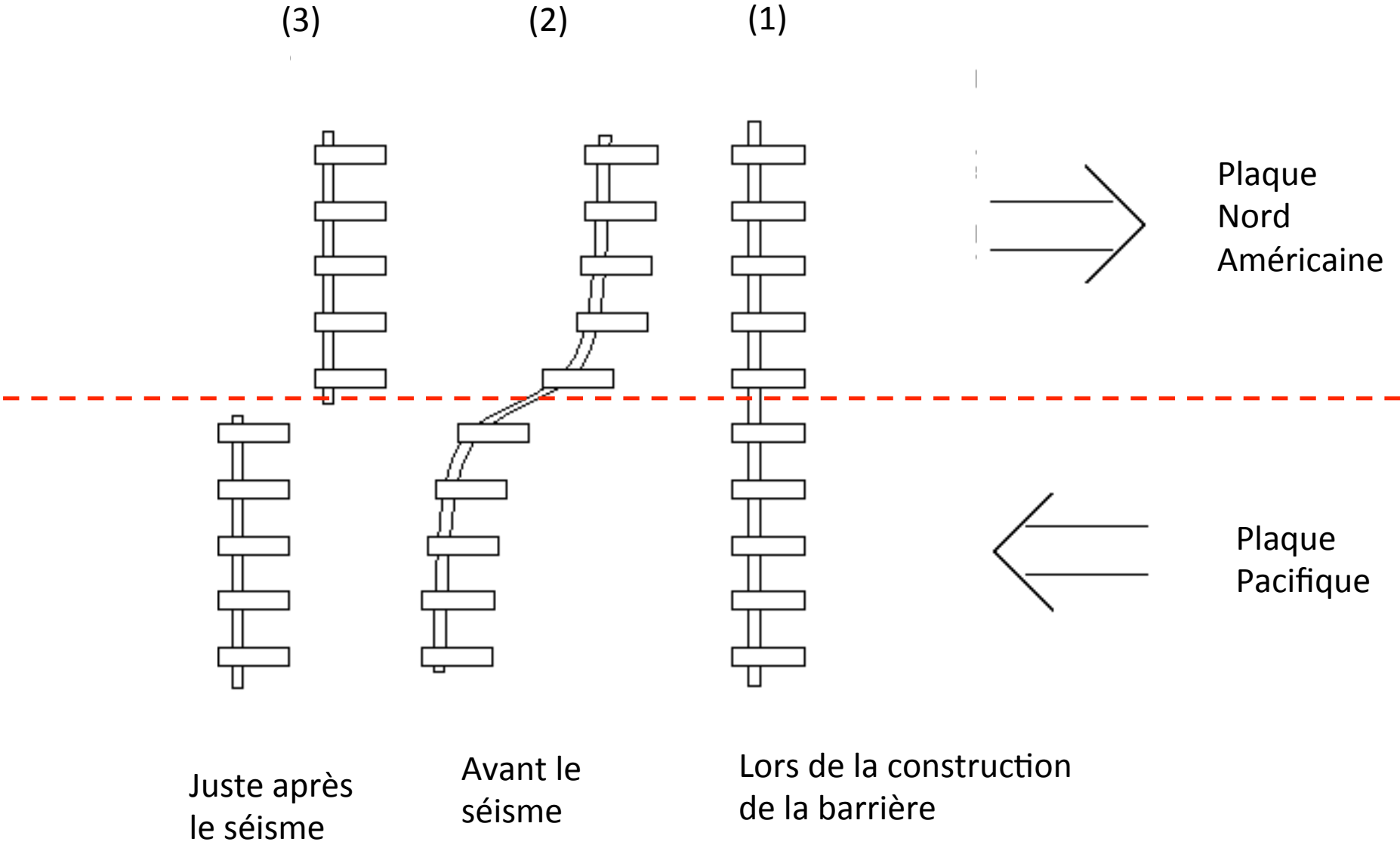


Séisme de San Francisco du 18 Avril 1906

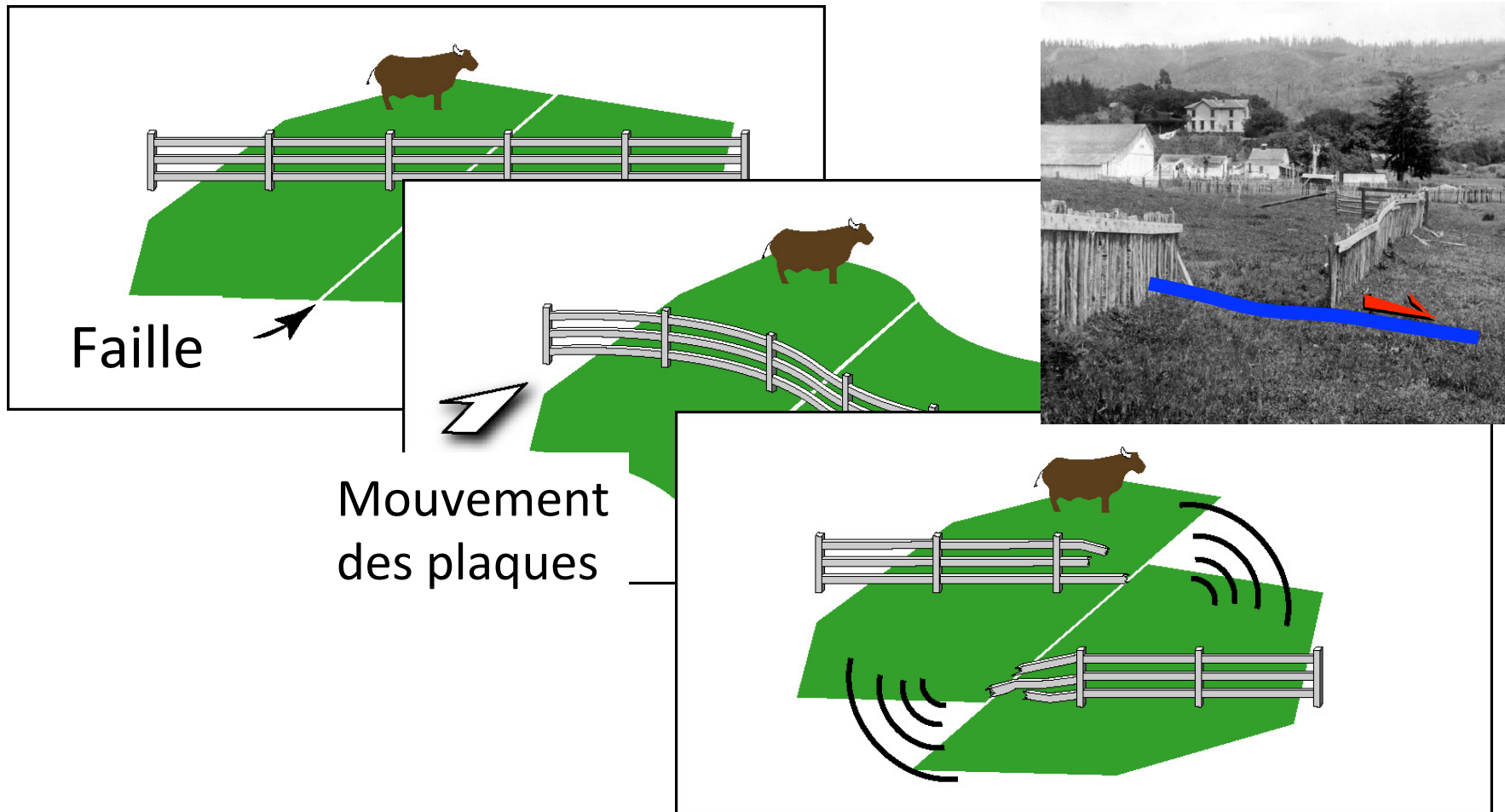


*source;: U.S. Geol. Survey Photogr. Library plate 41*

# Théorie du rebond élastique (H. F. Reid, 1910)

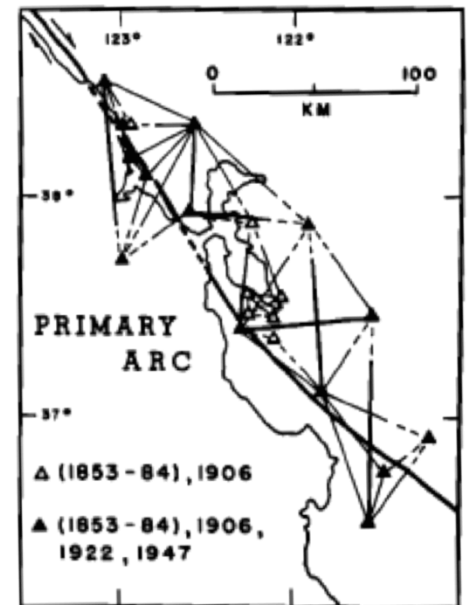
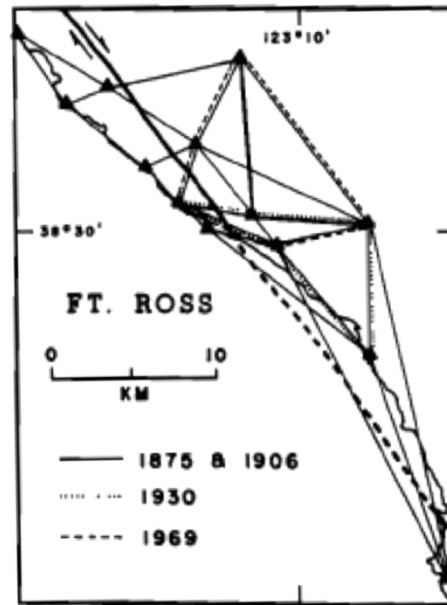
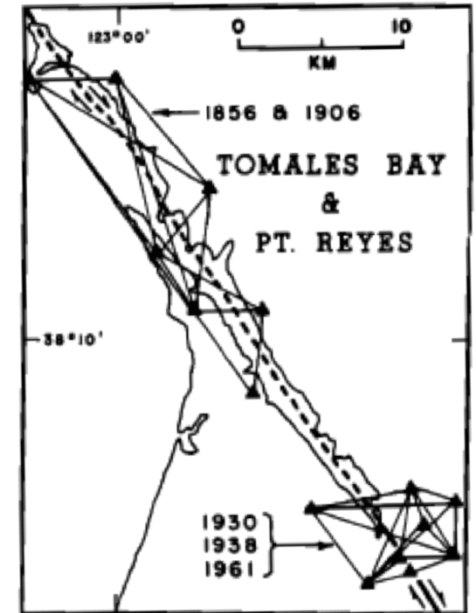
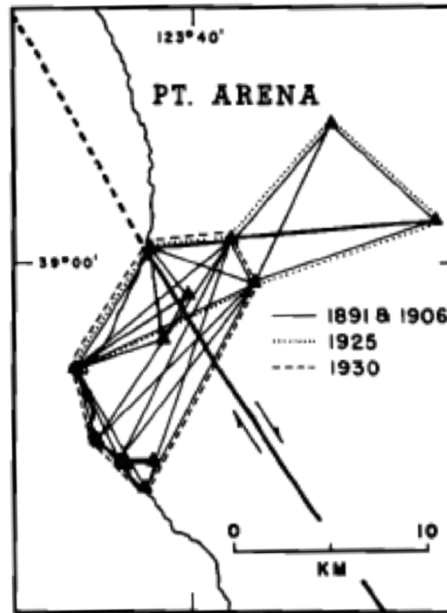
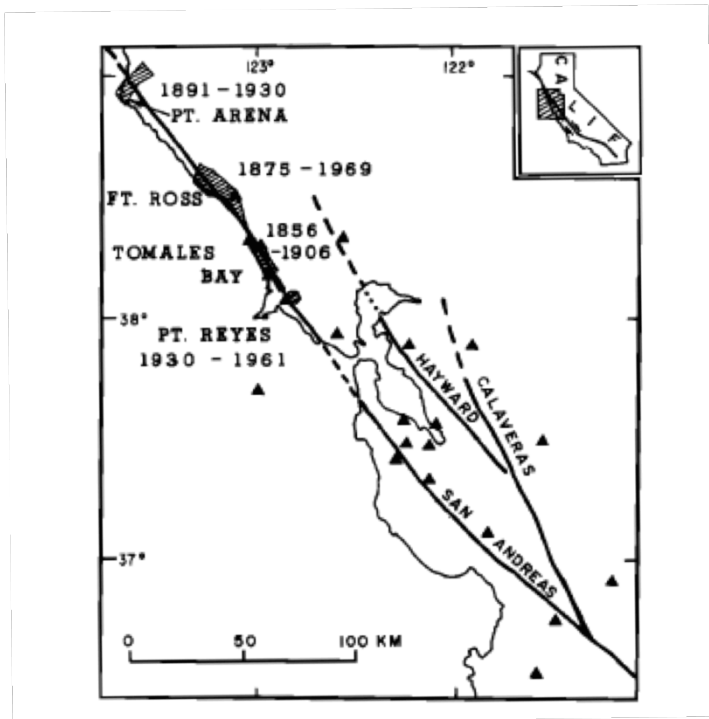


# Théorie du rebond élastique (H. F. Reid, 1910)

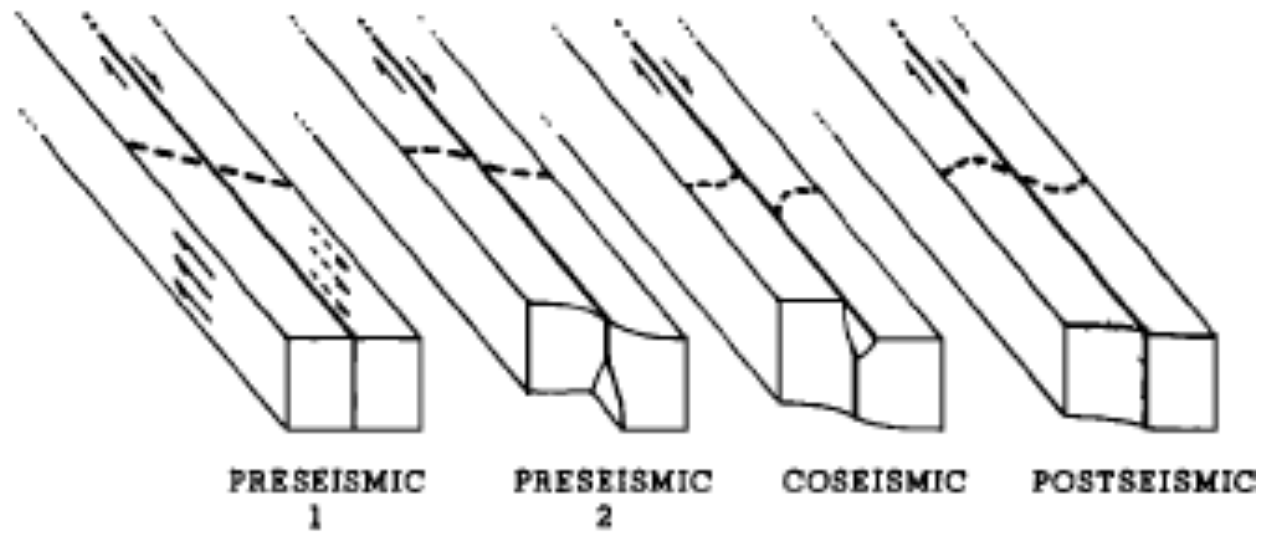


# Séisme de San Francisco de 1906 Mw 7.9

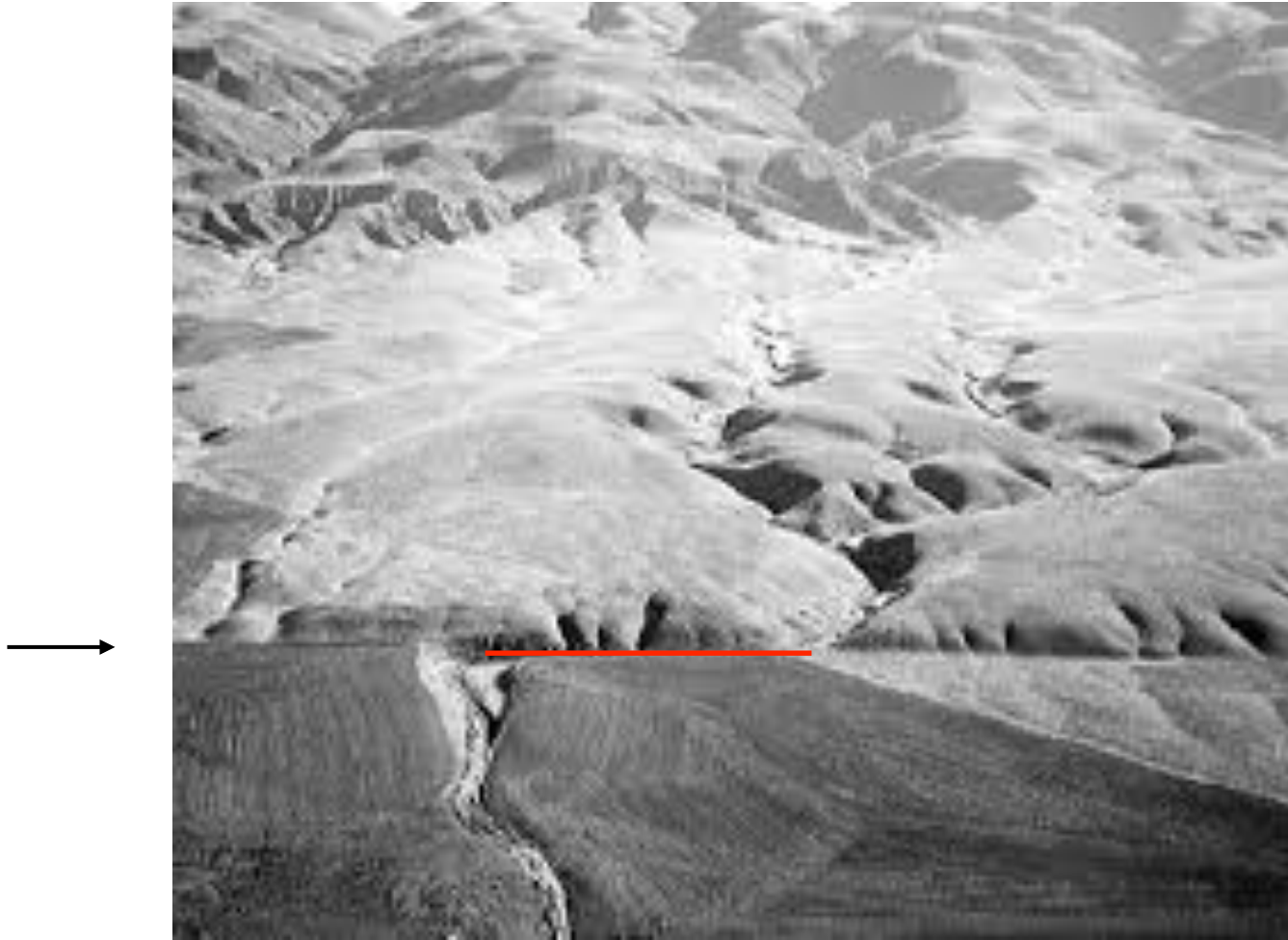
## Réseaux de triangulation



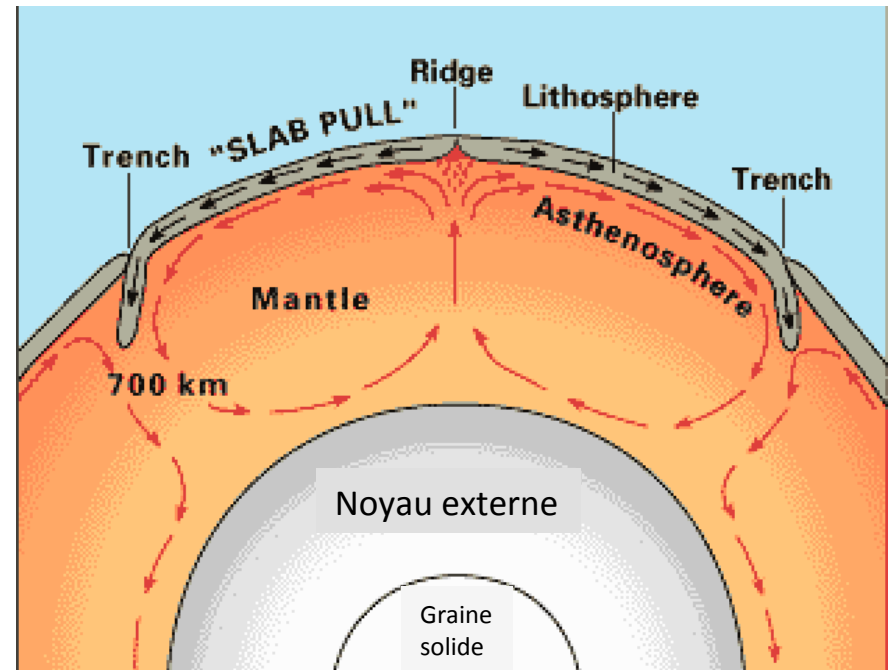
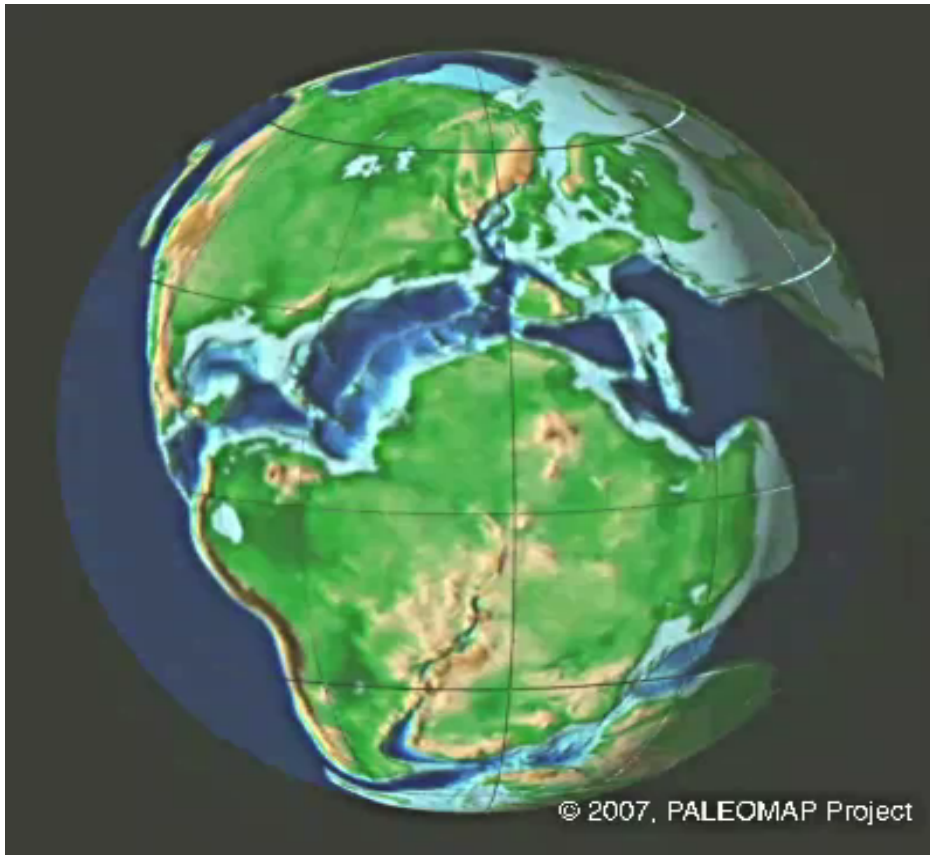
En plus: effets de relaxation post-sismique



## Faille de San Andreas - Plaine de Carrizo

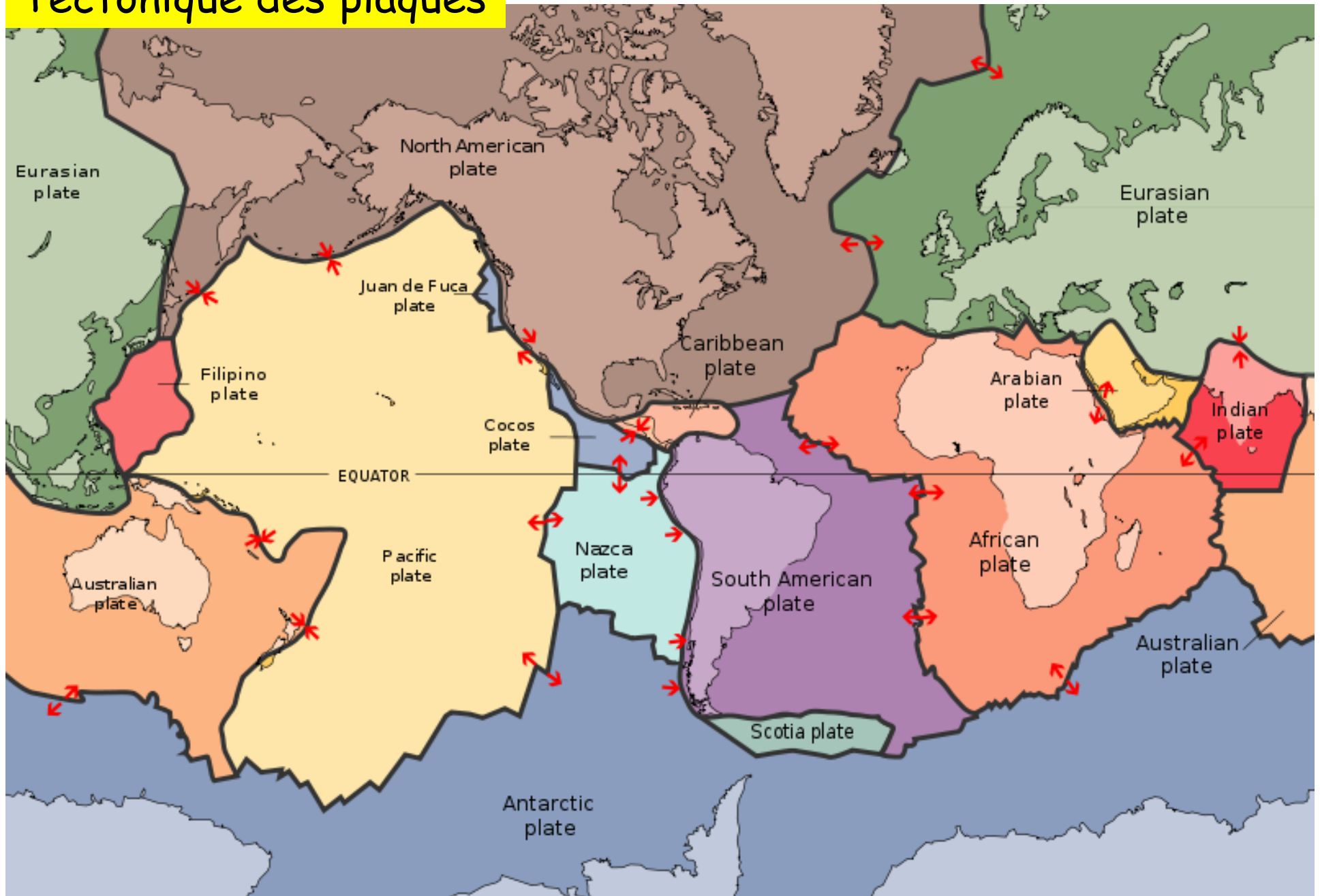


# Dérive des continents (Wegener, 1915)

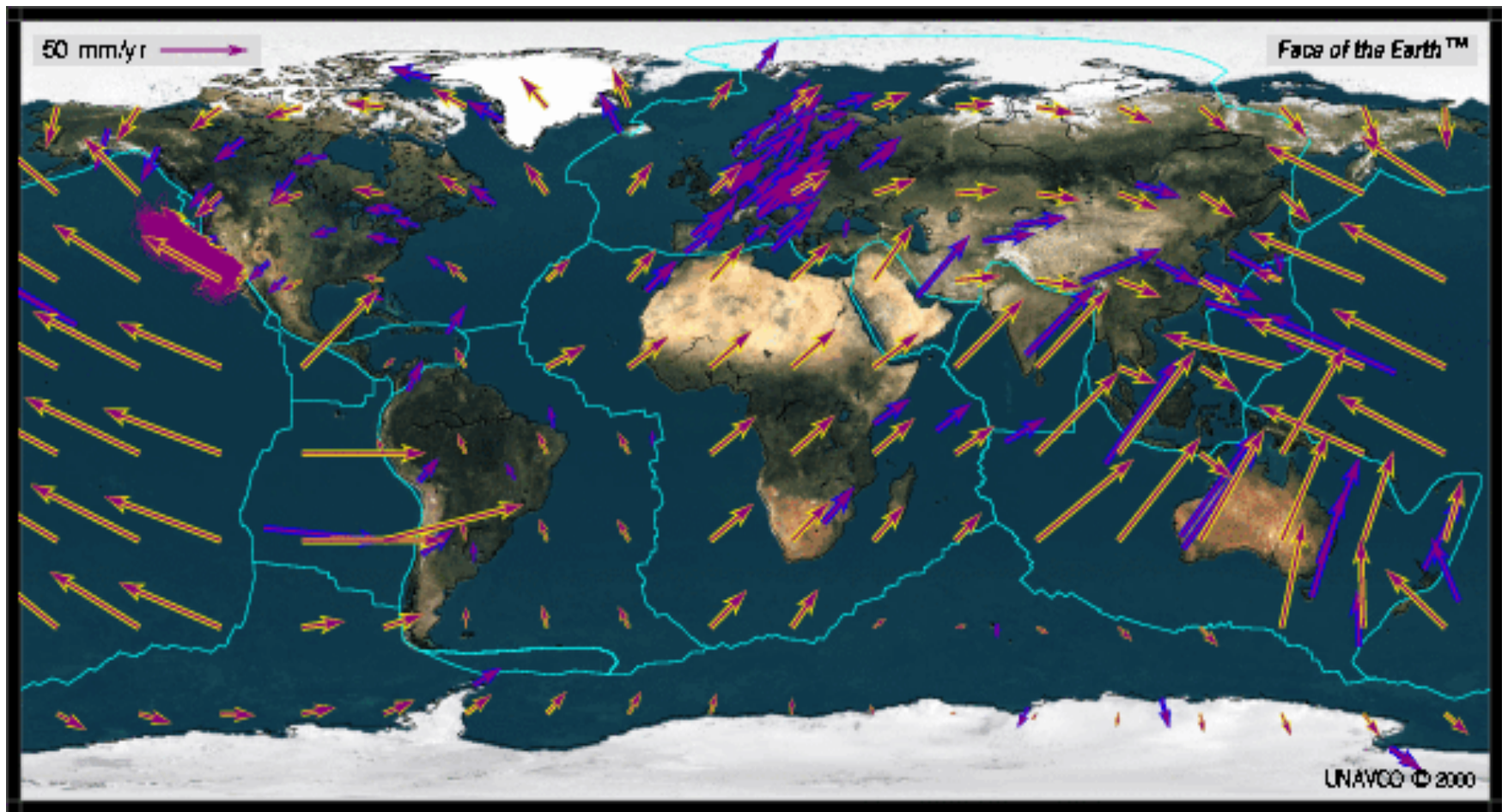




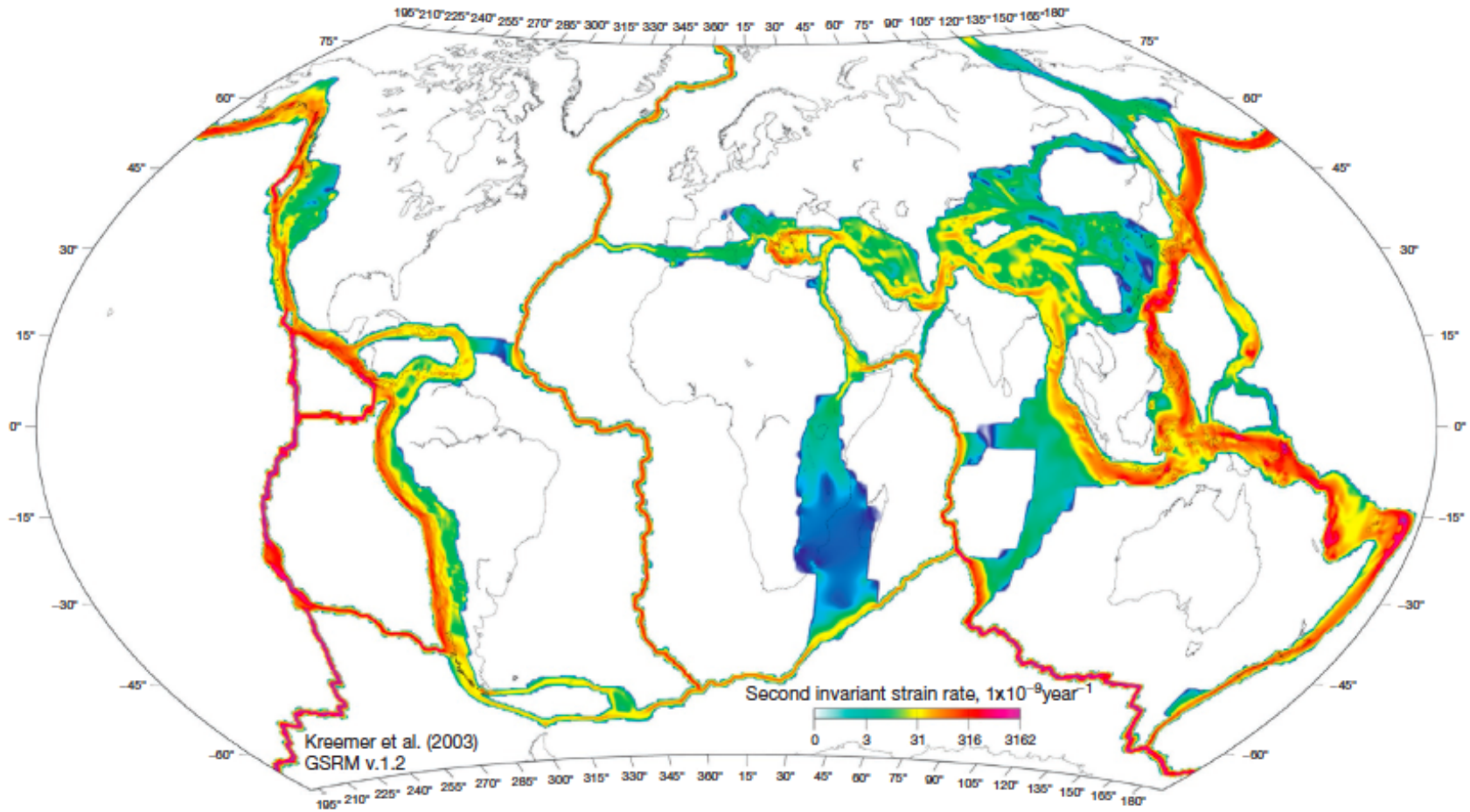
# Tectonique des plaques

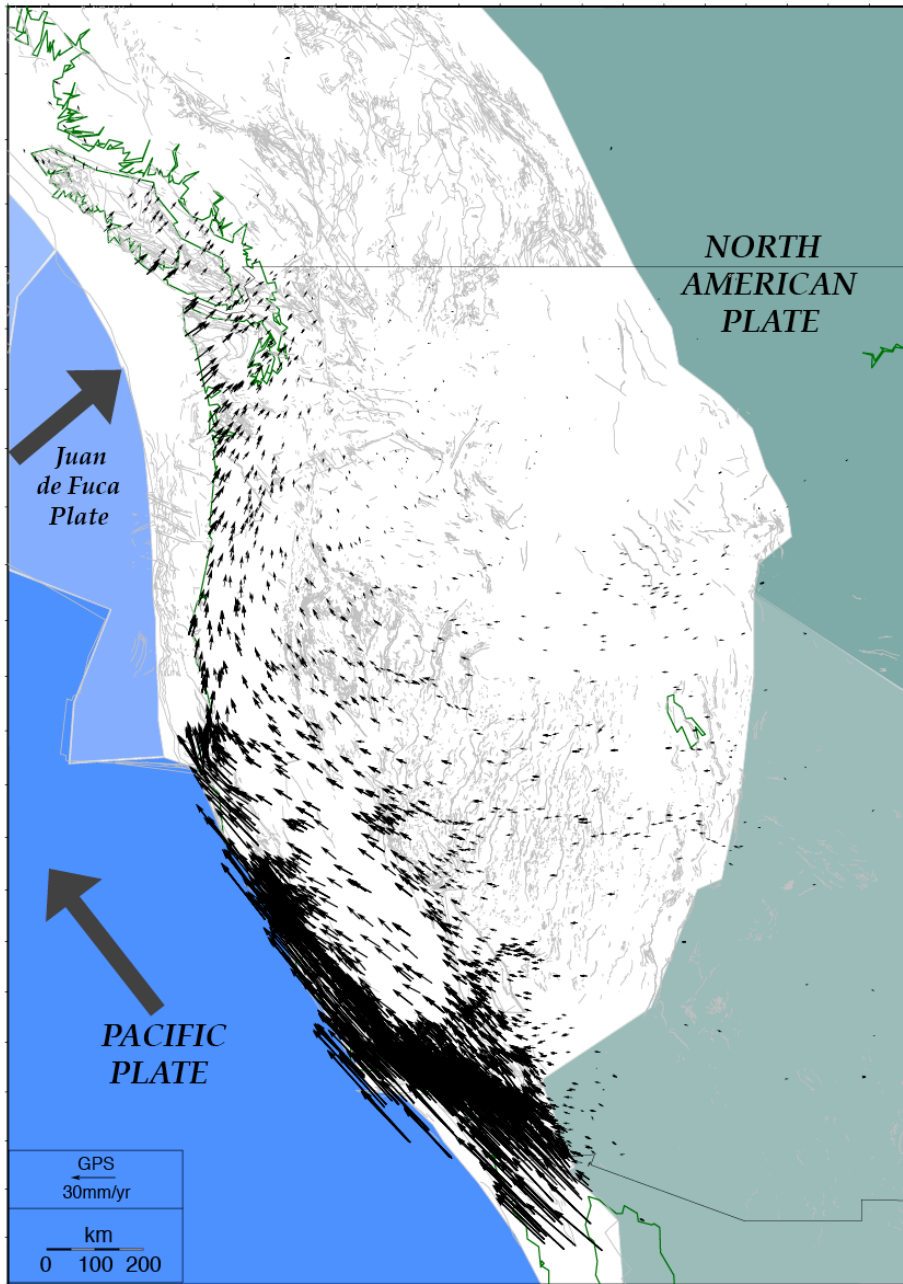


# Plate Tectonic Model: NUVEL1 Plate Motions

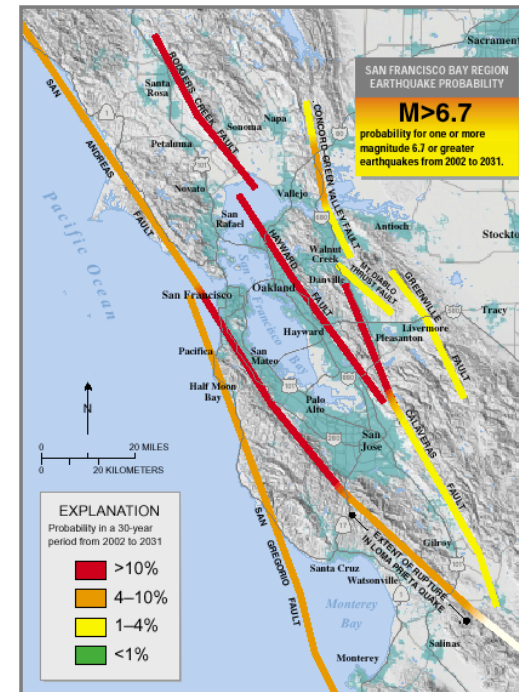
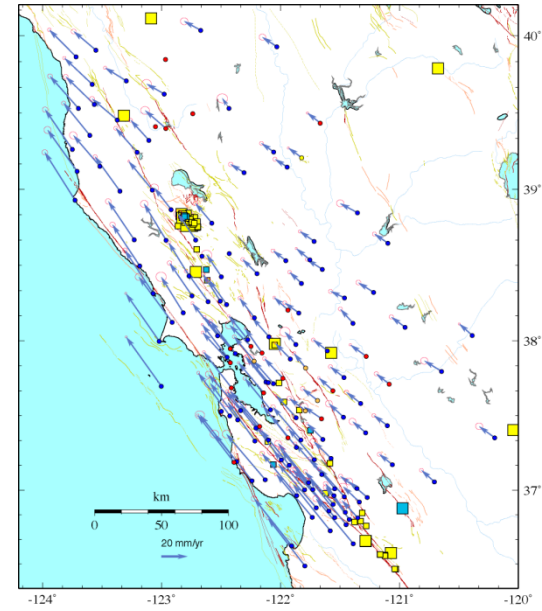


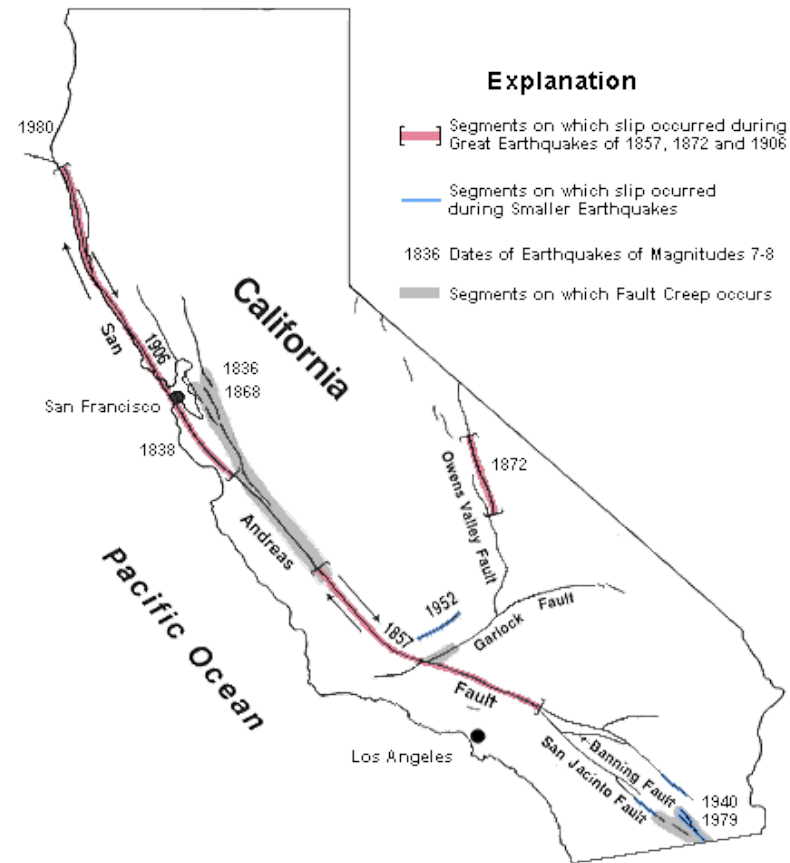
## Carte globale des vitesses de déformations mesurées par la géodésie spatiale



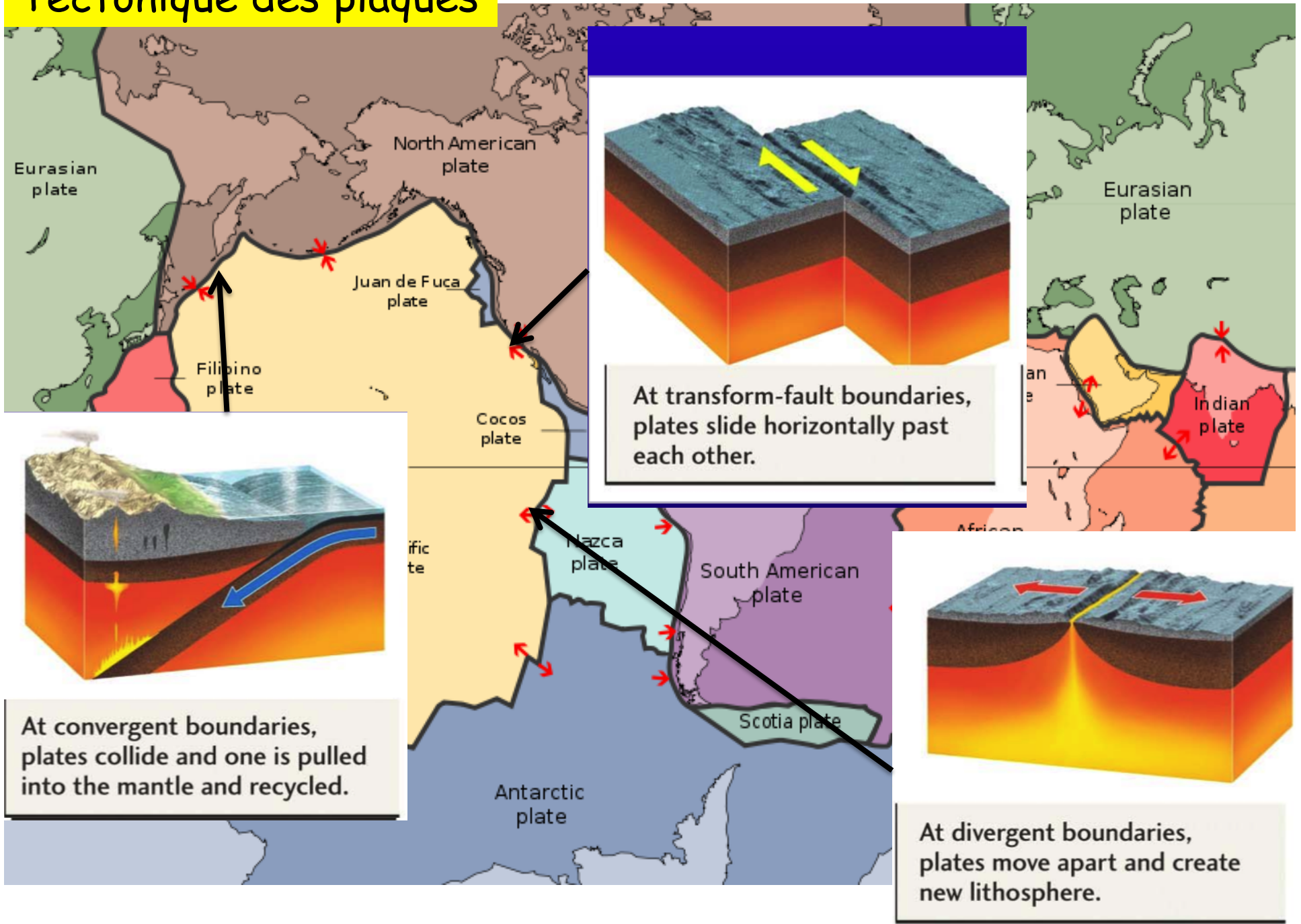


McCaffrey et al. (2008)

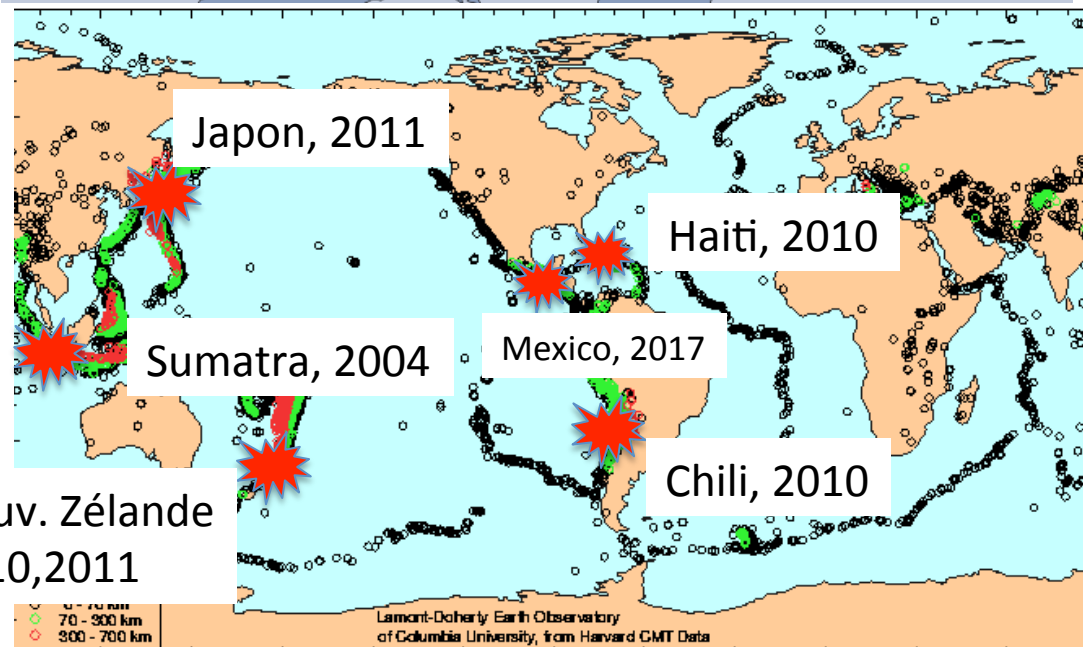
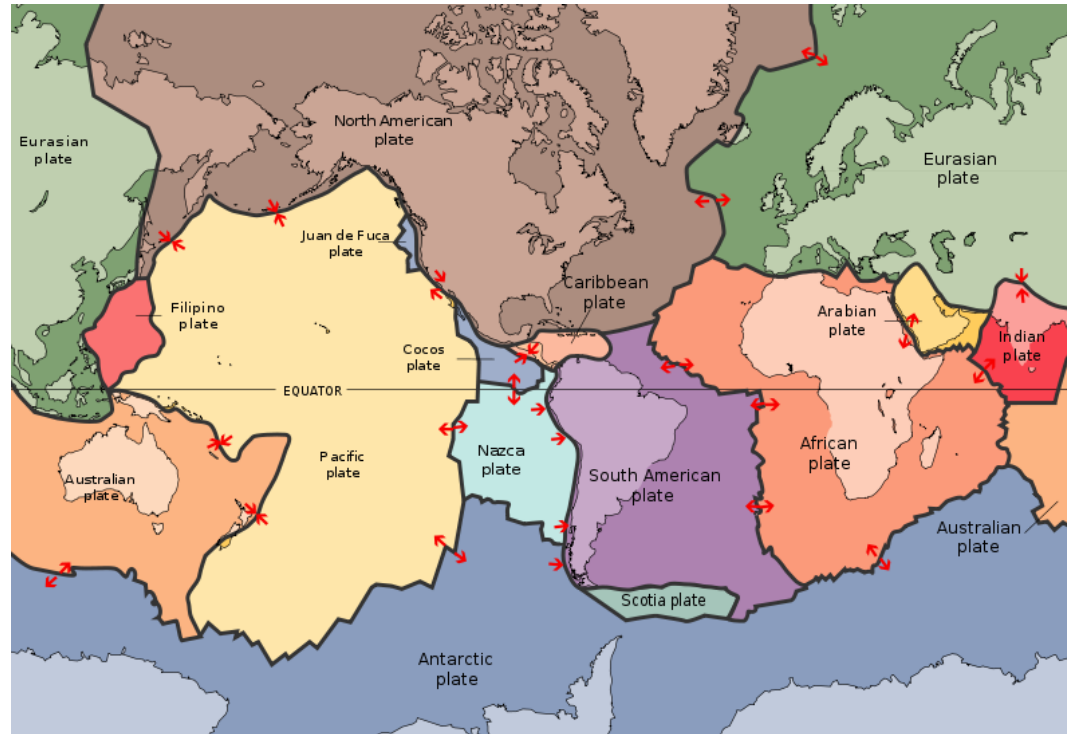




# Tectonique des plaques



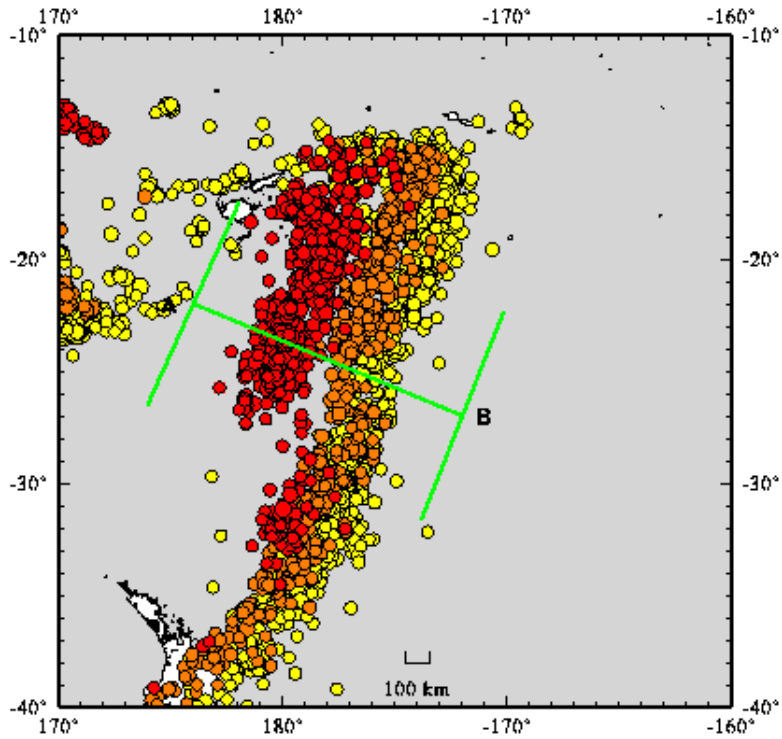
A completér



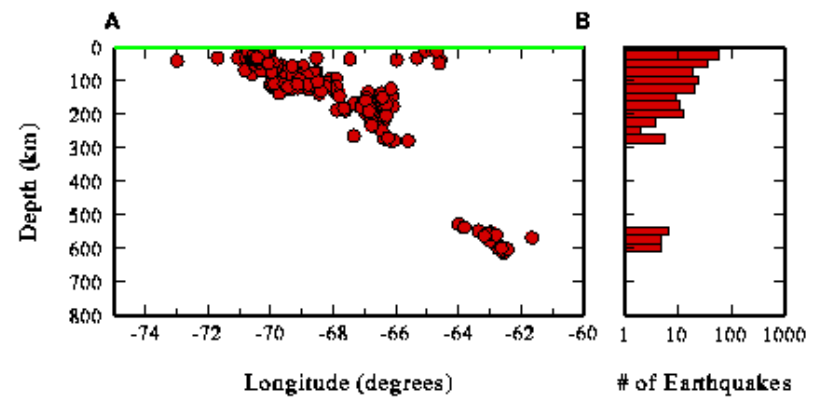
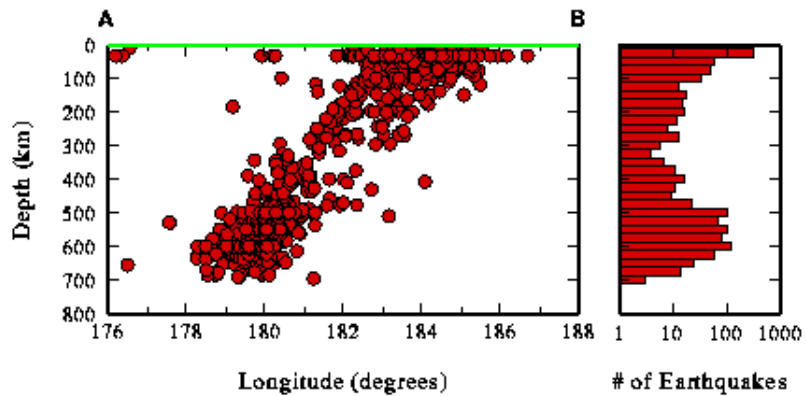
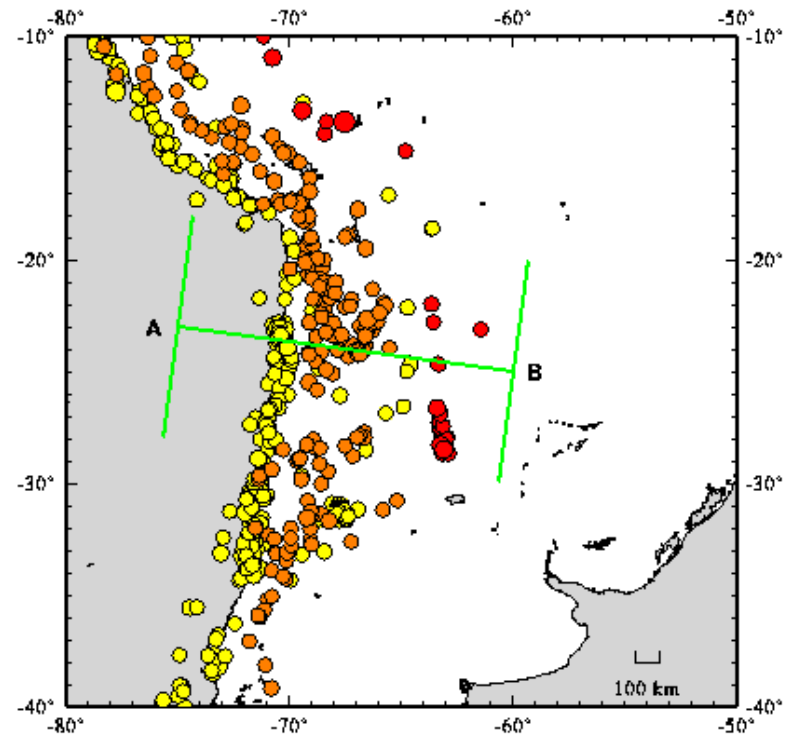
Nouv. Zélande  
2010,2011

# Profondeur des séismes dans les zones de subduction

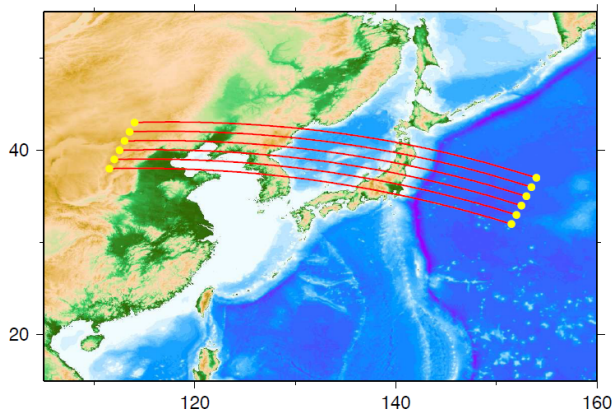
## Tonga



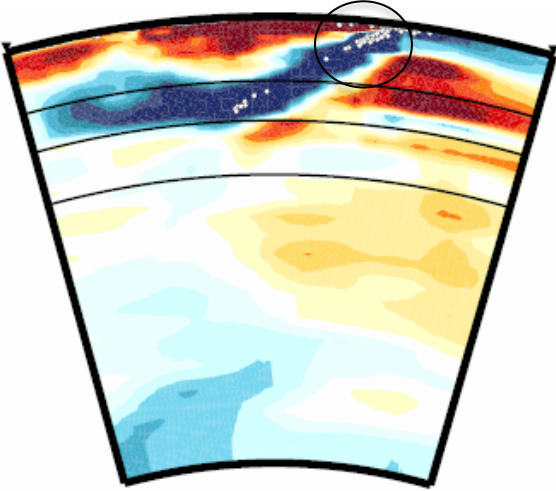
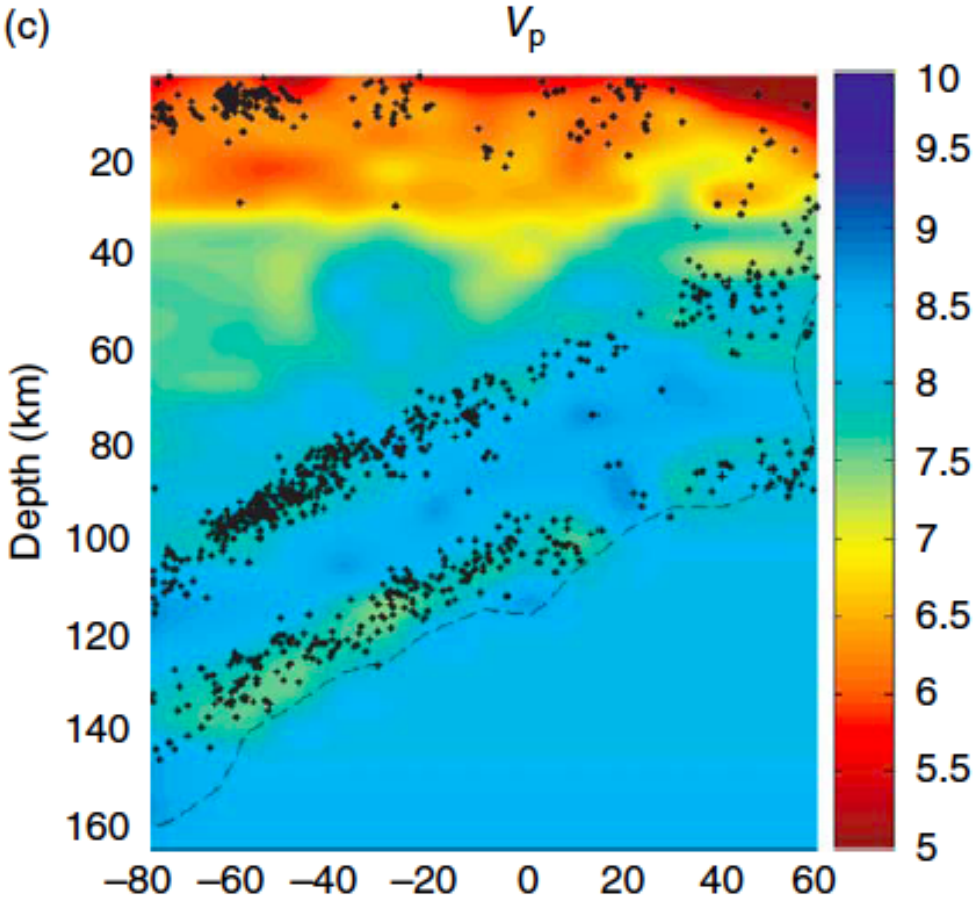
## South America



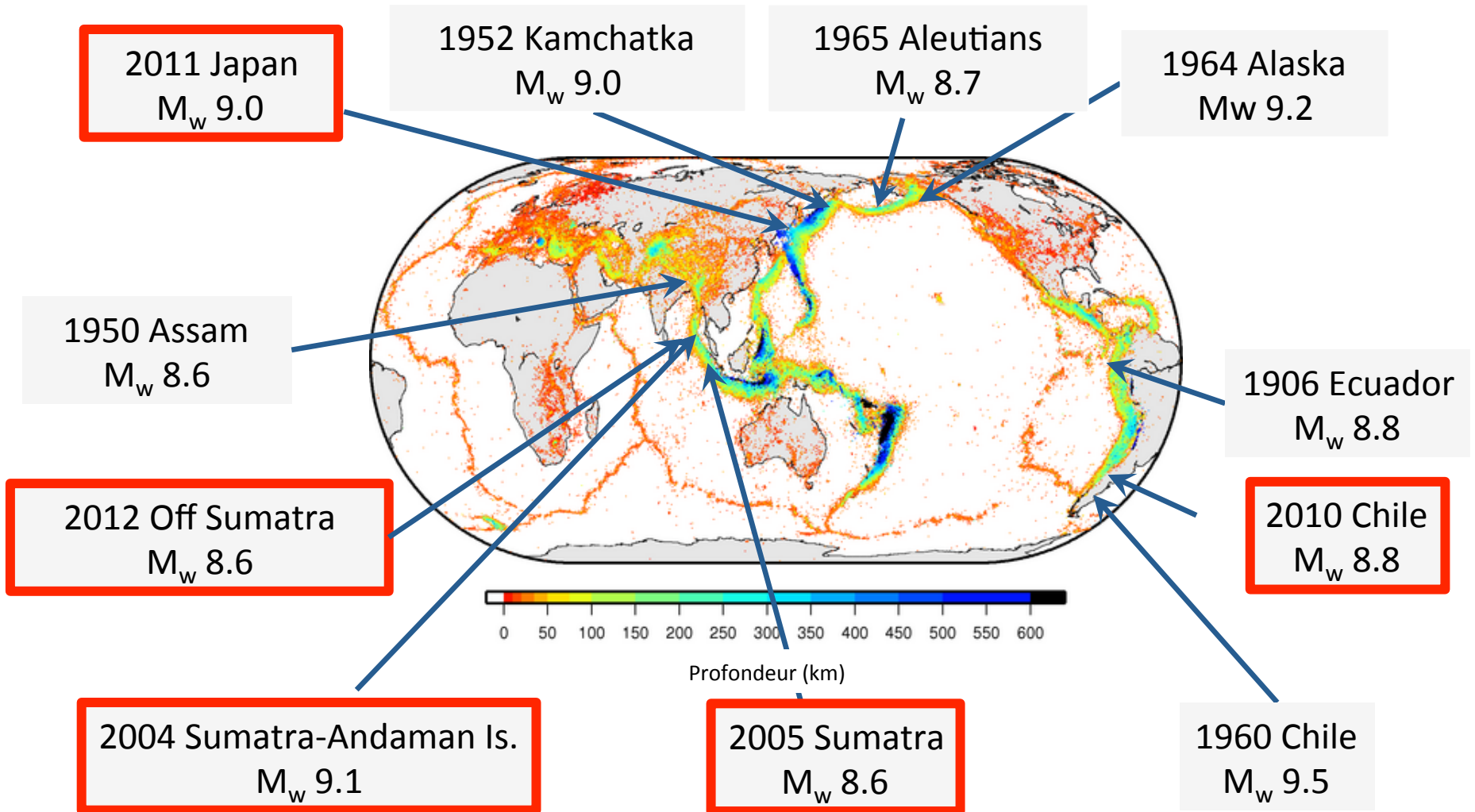




Benioff zone de Benioff "Double"  
 exemple : partie Nord de l'île de Honshu

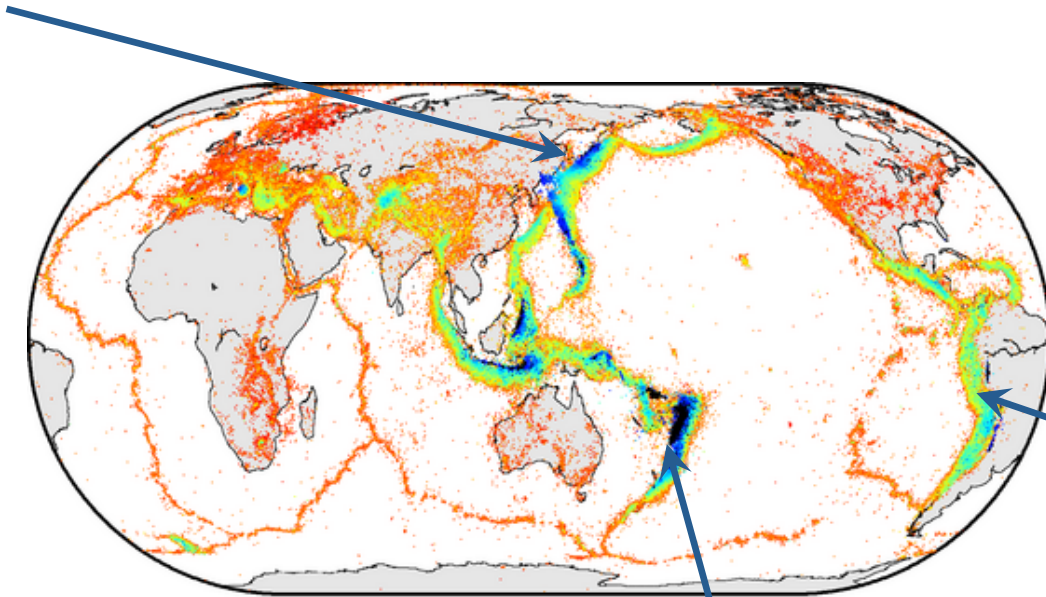


# Les plus forts séismes dans le monde depuis 1900



# Séismes profonds de grande magnitude

Mer d'Okhotsk 2013  
Mw 8.3 profondeur 609 km

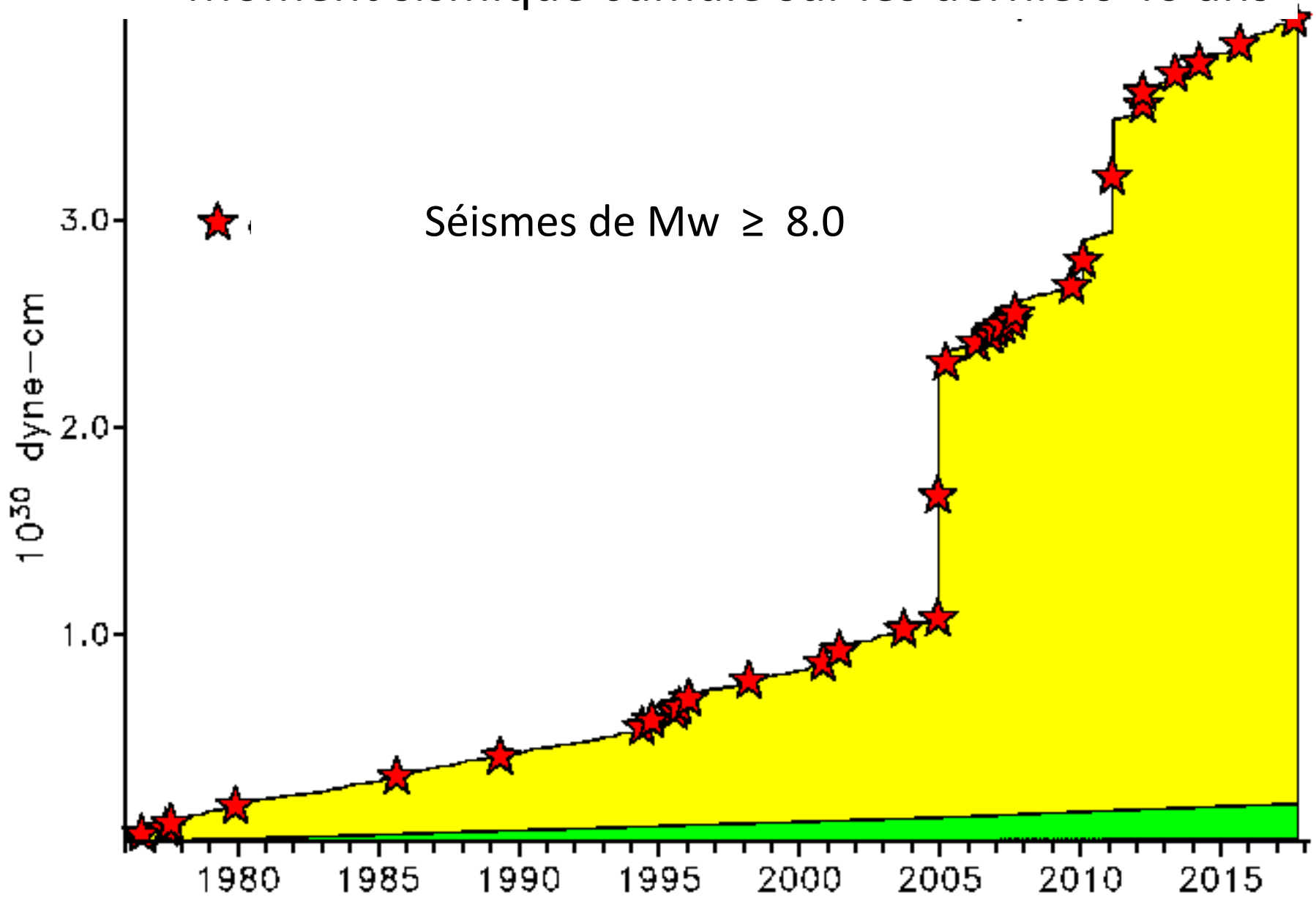


Bolivie 1994  
Mw 8.2  
Profondeur 647 km

Iles Fidji  
Nombreux seismes  
Profonds de Mw > 7.5

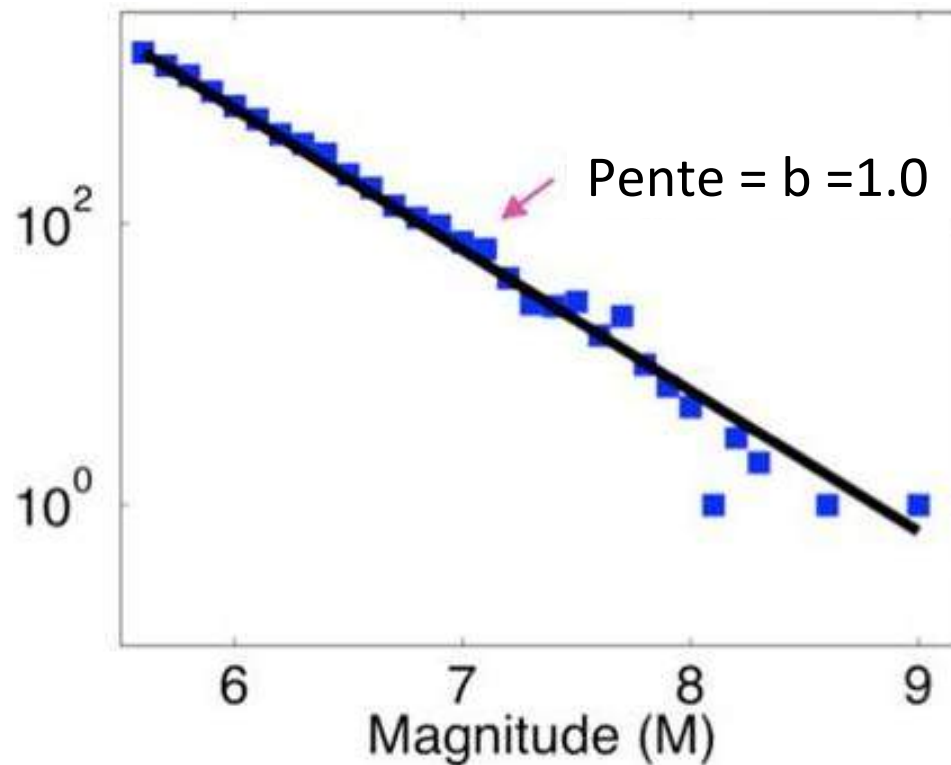


# Moment sismique cumulé sur les derniers 40 ans



# La Loi de Gutenberg-Richter

30 ans de séismes (global) 1985-2005

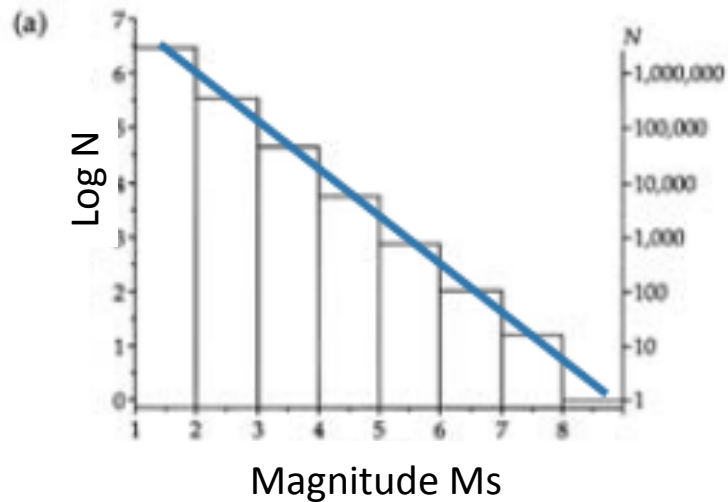


$$\text{Log } N = a - b M$$

⇒ Il y a 10 fois plus de séismes de M 6 que de M 7

# La loi de Gutenberg- Richter

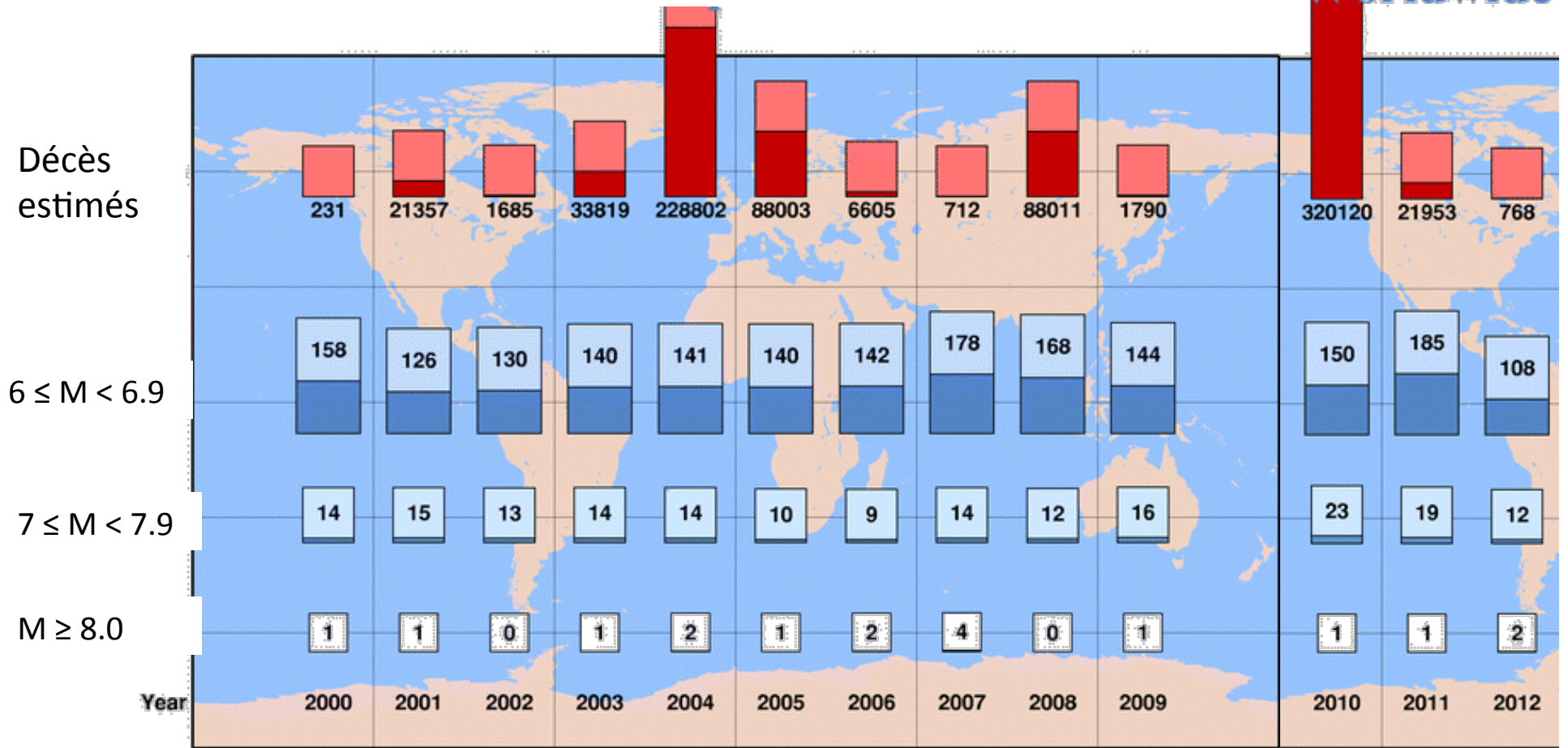
$N$  = nombre de séismes de  
magnitude  $> M$



Magnitude	Nombre de Séismes par an
≥ 8.0	0-1
7-7.9	18
6-6.9	120
5-5.9	800
4-4.9	6,200
3-3.9	49,000
2-2.9	≈350,000
1-1.9	≈3,000,000

# Séismes dans le monde: 2000 – 2012

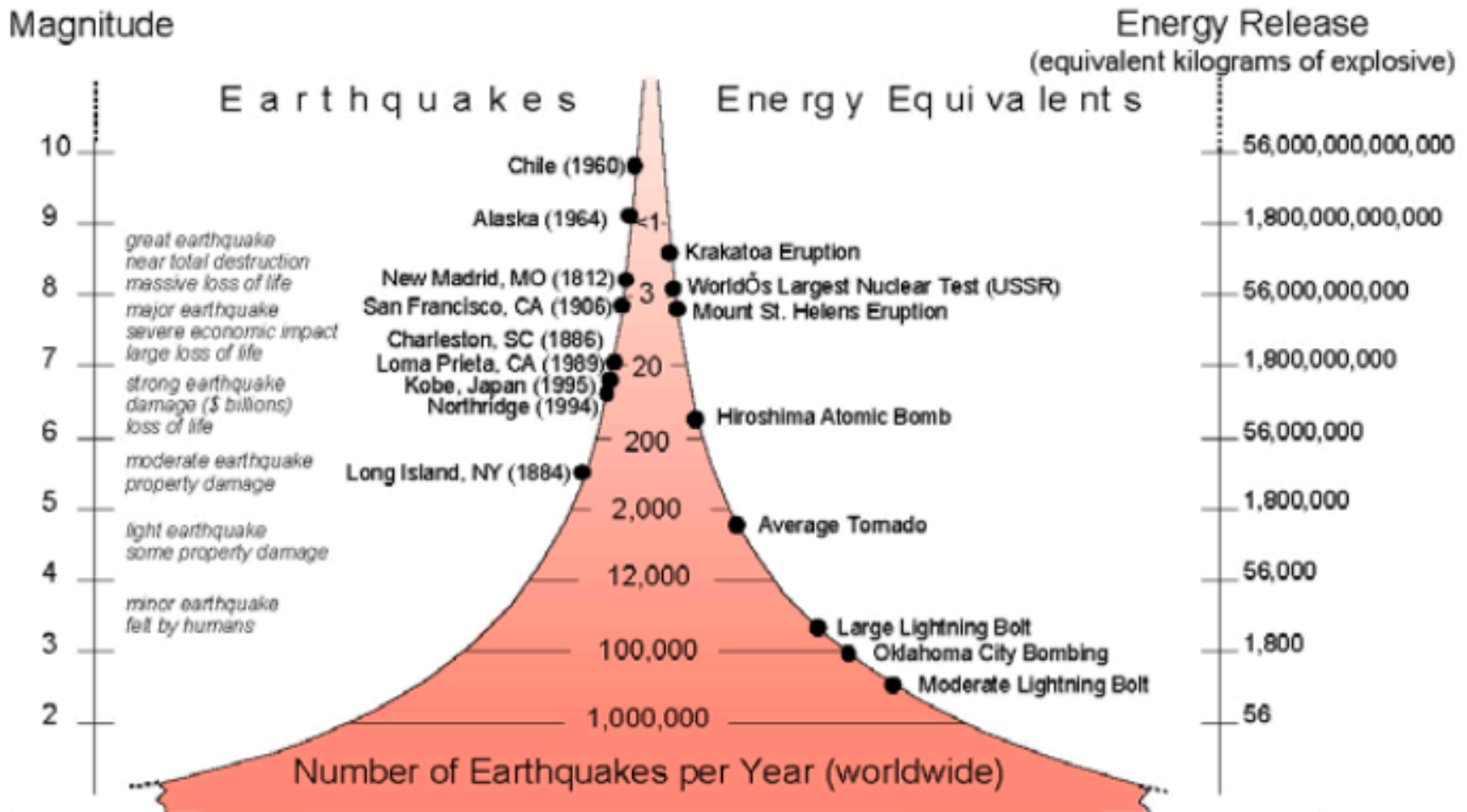
Worldwide



Source: USGS/NEIC



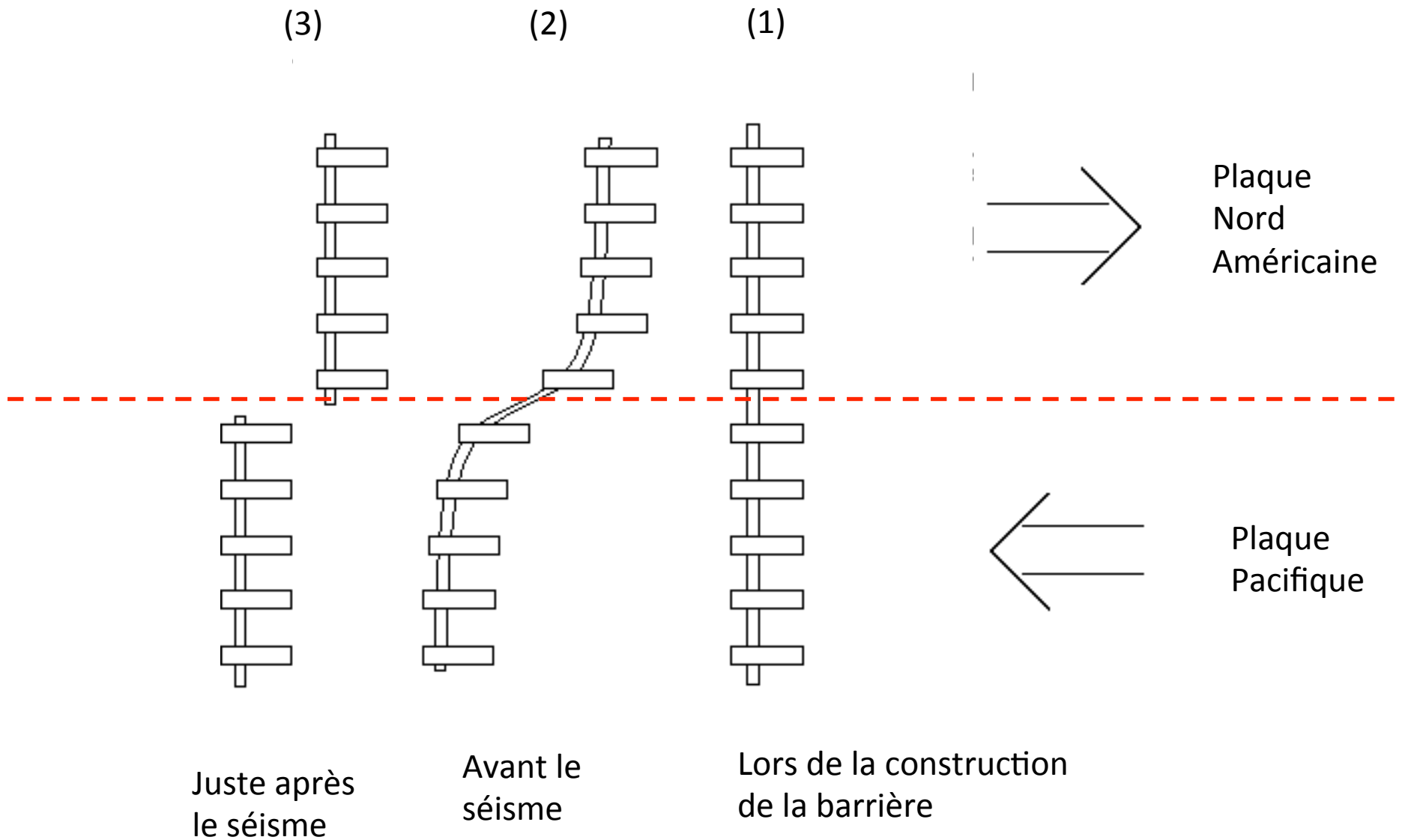
# Magnitude et énergie dégagée



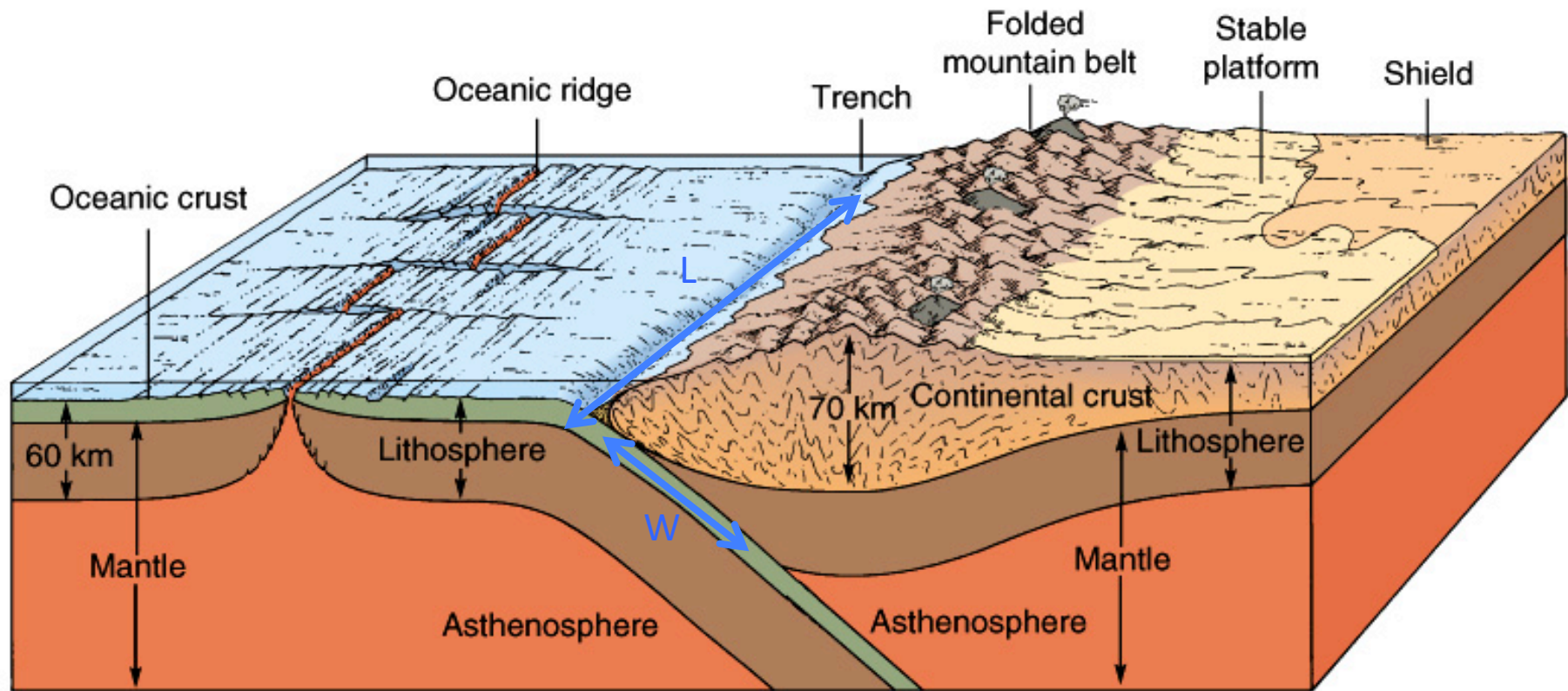
Source: USGS



# Théorie du rebond élastique (Reid, 1910)



# Grands séismes de zones de subduction



$L \sim 500-1000 \text{ km}$

$W \sim 30-150 \text{ km}$

## Période intersismique:

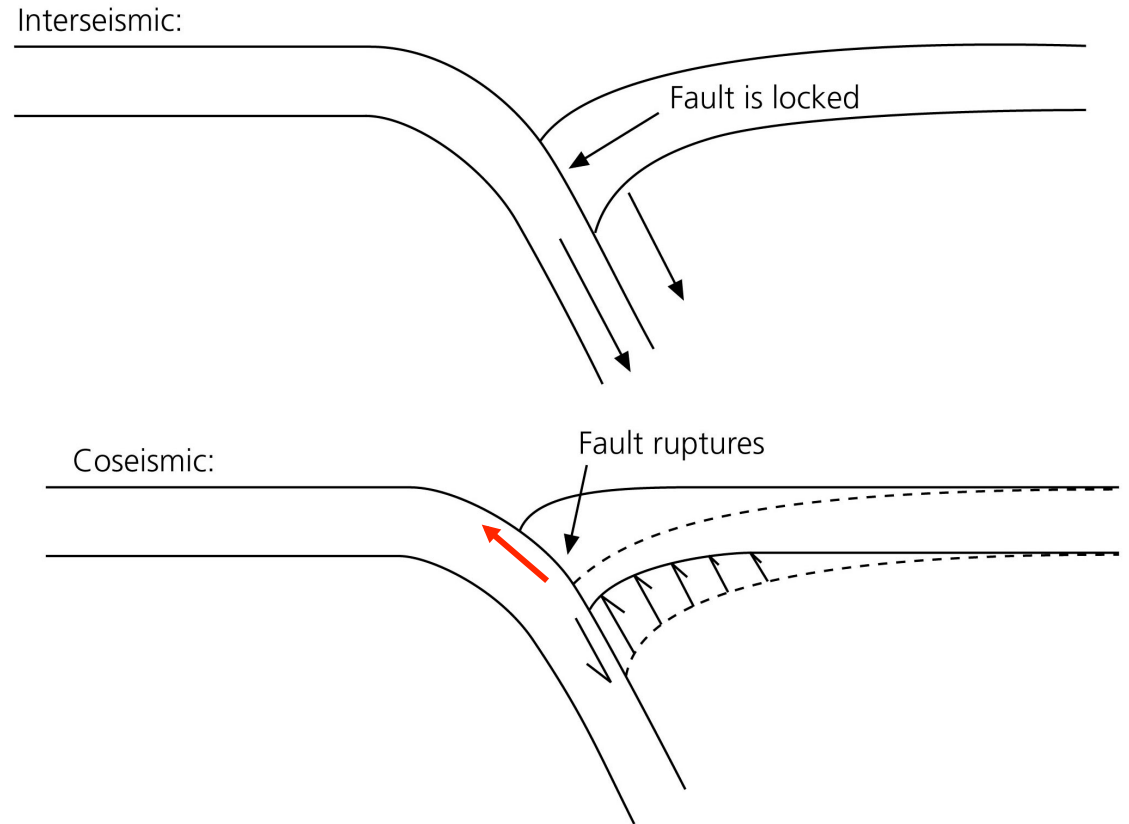
- Faille bloquée
- Accumulation des contraintes dues au mouvement des plaques
- Peut durer quelques centaines d'années

## Période coseismique:

- Rupture le long de la faille
- La plaque surplombante rebondit
- Relachement des contraintes
- dure 10aines-100aines de secondes

## Période postsismique

- Répliques
- Réajustements visco-élastiques



## Exemple:

Glissement de  $\sim 12 \text{ m} = 1200 \text{ cm}$

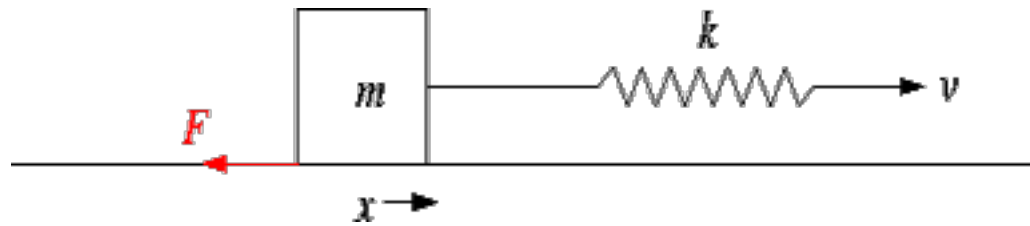
Dans une région de convergence de  $3 \text{ cm/an}$

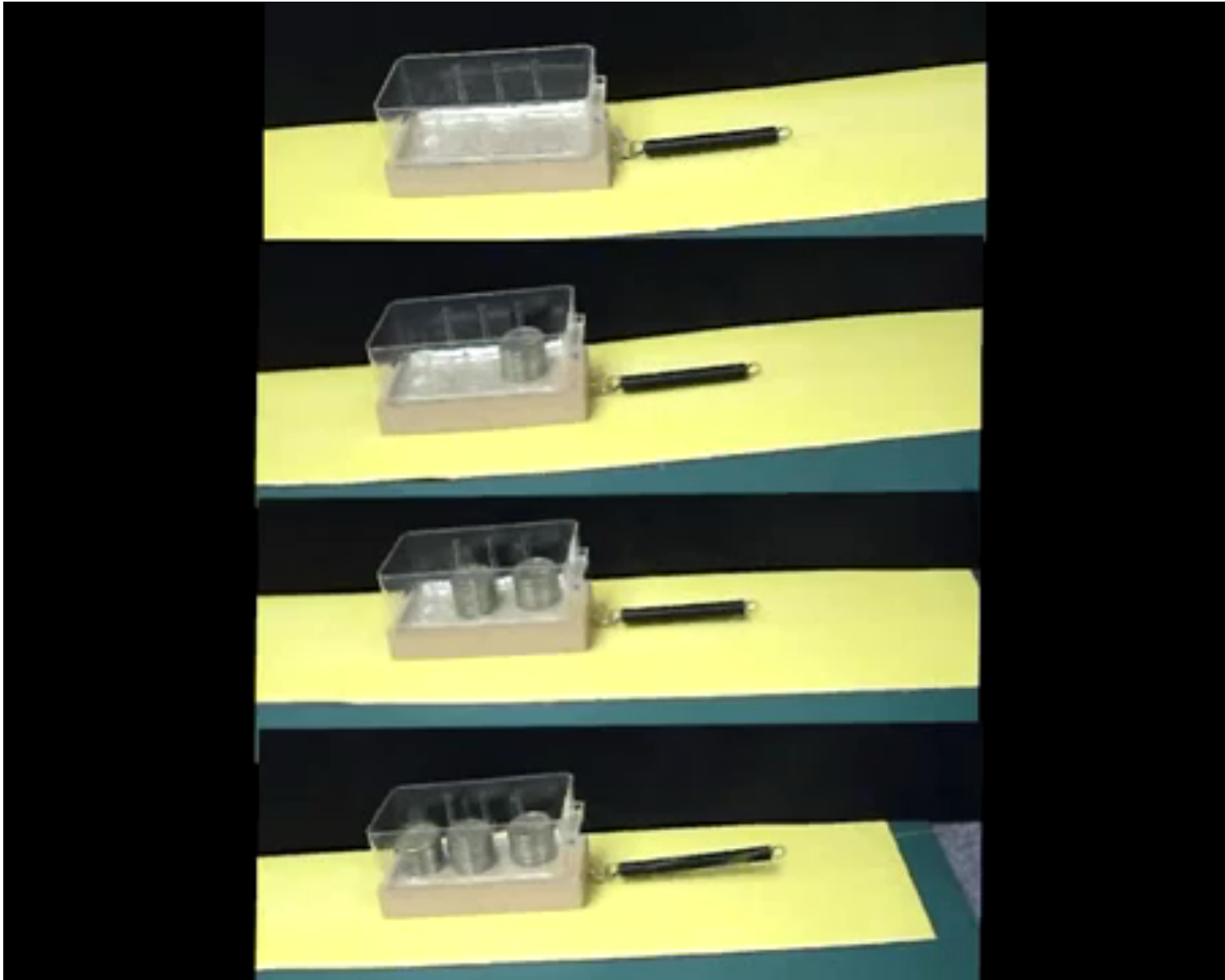
Temps de récurrence =

$$1200 \text{ cm} / 3 \text{ cm/yr} = 400 \text{ yr}$$

**En pratique: Ce phénomène n'est pas exactement périodique**

# Comportement “stick-slip”





[https://www.youtube.com/watch?v=syXTbTSpv\\_A](https://www.youtube.com/watch?v=syXTbTSpv_A)