



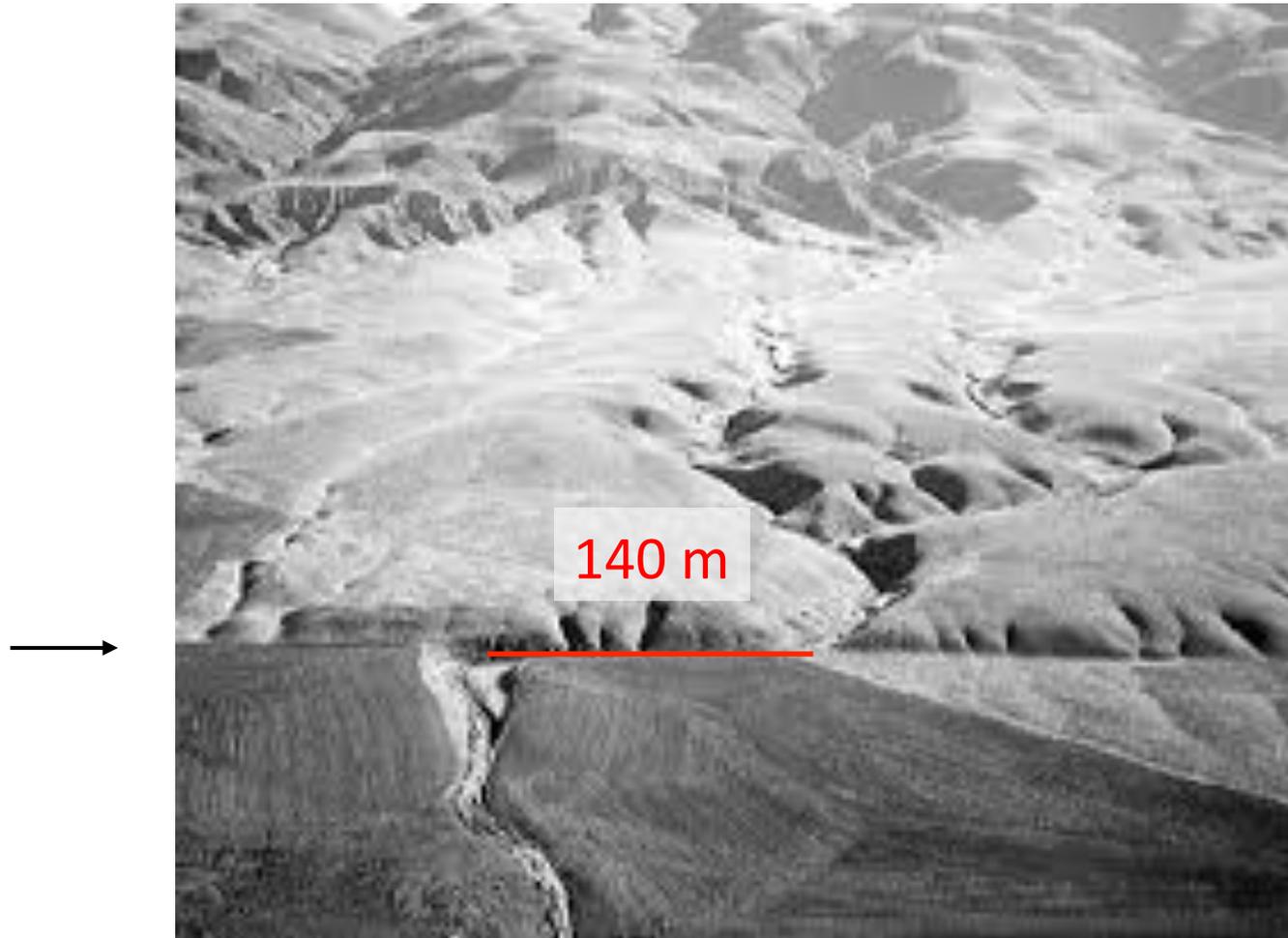
“Les Grands Séismes: Observation et Modélisation”

2- Introduction (suite)

Lundi 16 Octobre 2017

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

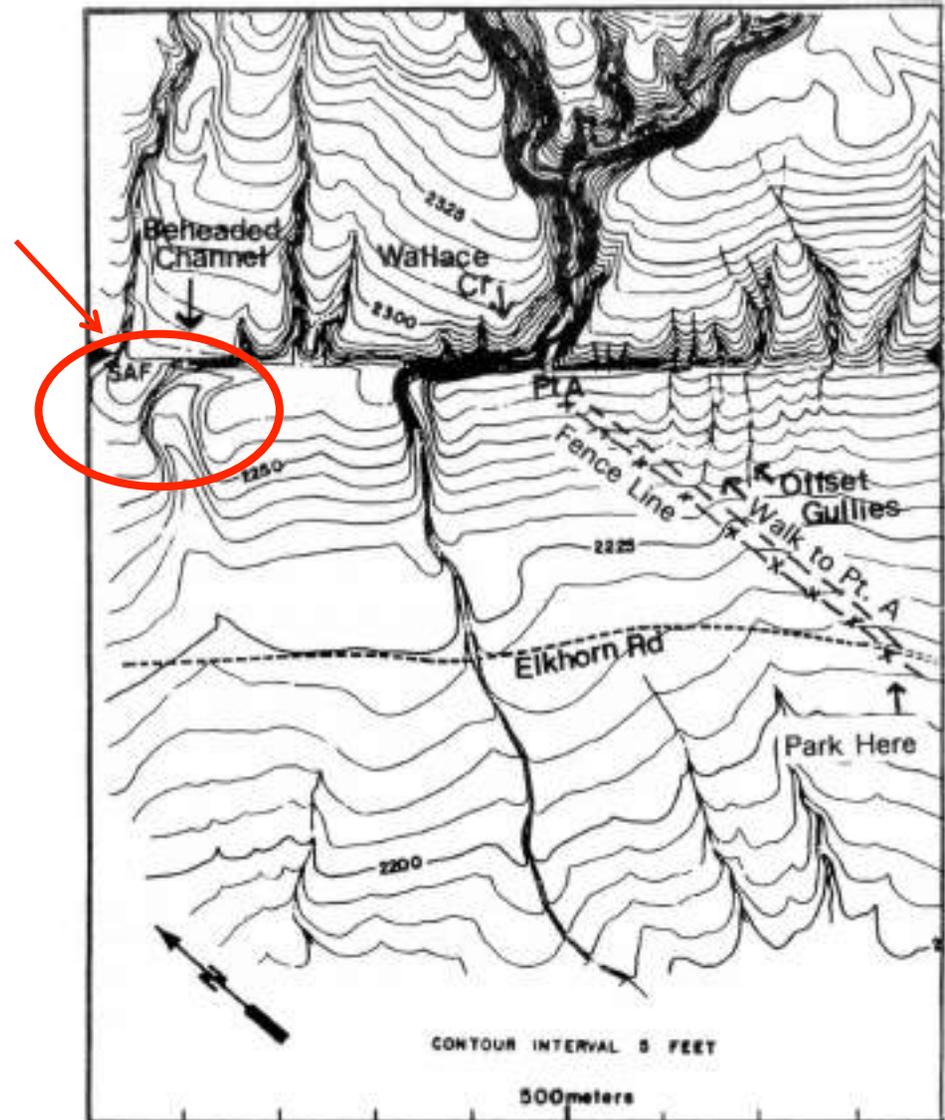
Faille de San Andreas - Plaine de Carrizo (Wallet Creek)



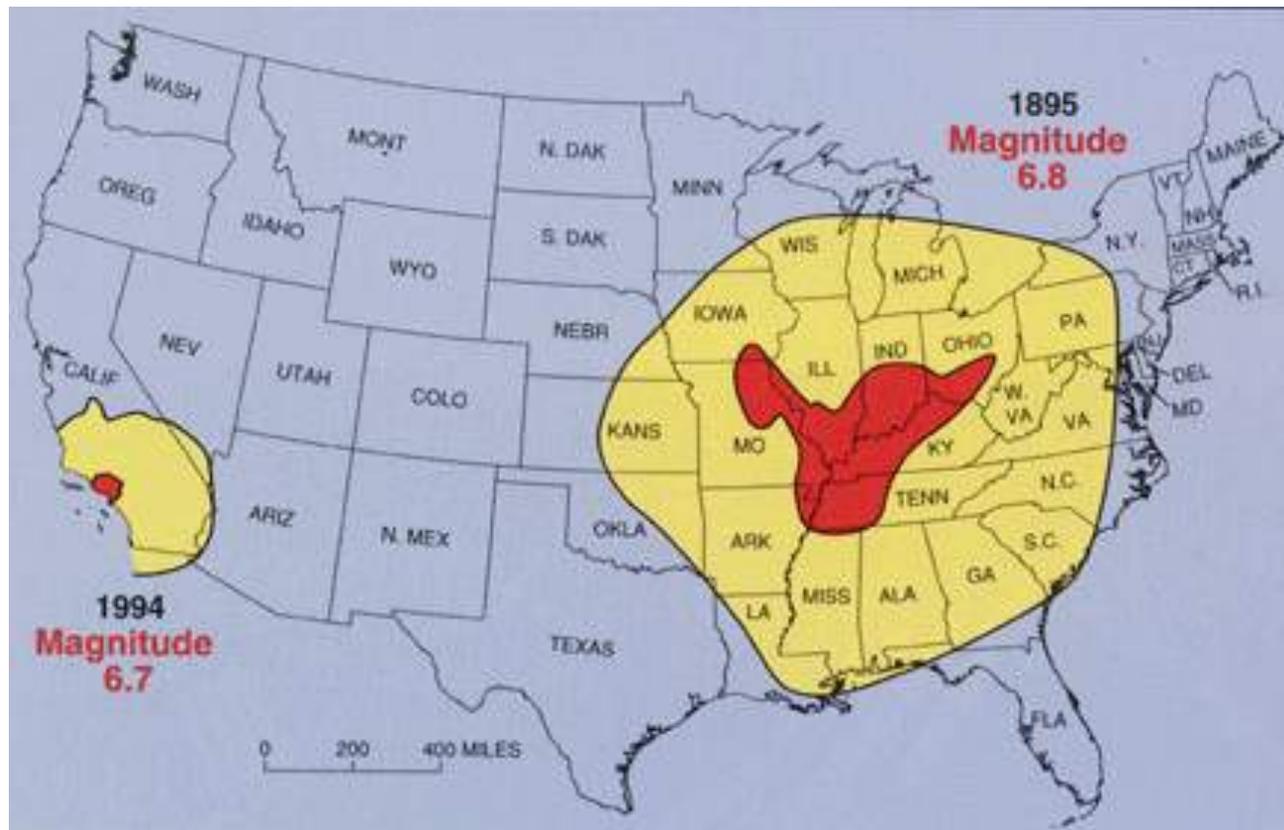
Déplacement en ~3700 ans

Faille de San Andreas - Plaine de Carrizo (Wallet Creek)

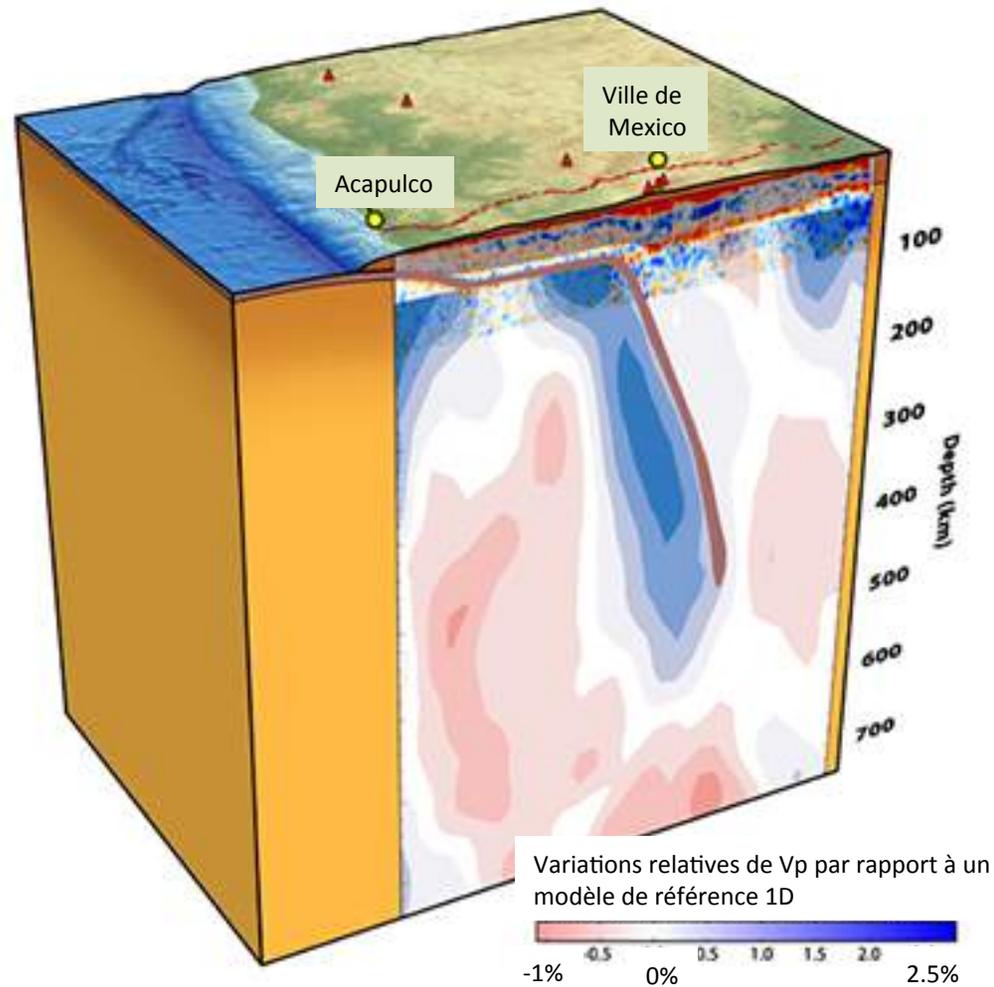
Lit de rivière abandonné
Il y a ~ 10,000 ans



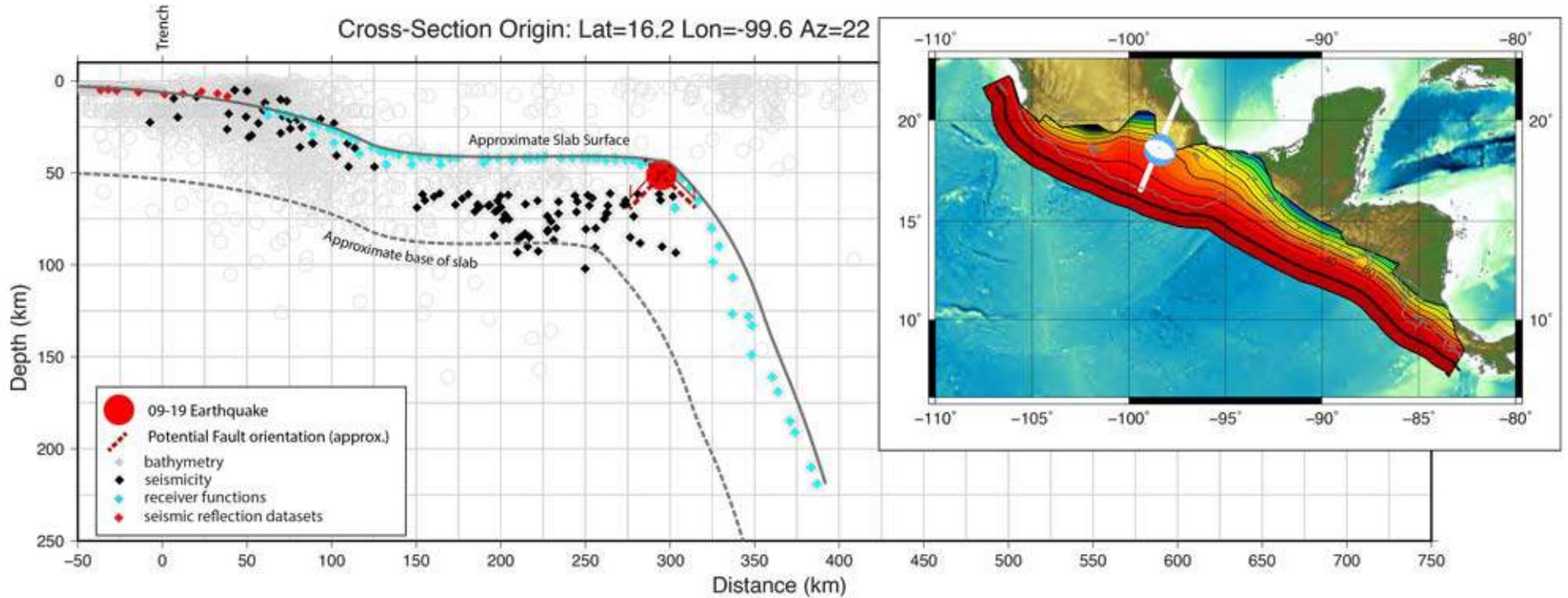
Intensité des vibrations dépend non seulement de la distance
mais aussi de la géologie, des effets de site,
et de la qualité des constructions



Tomographie sismique (ondes P) de la plaque Cocos plongeant sous la plaque Amerique du Sud



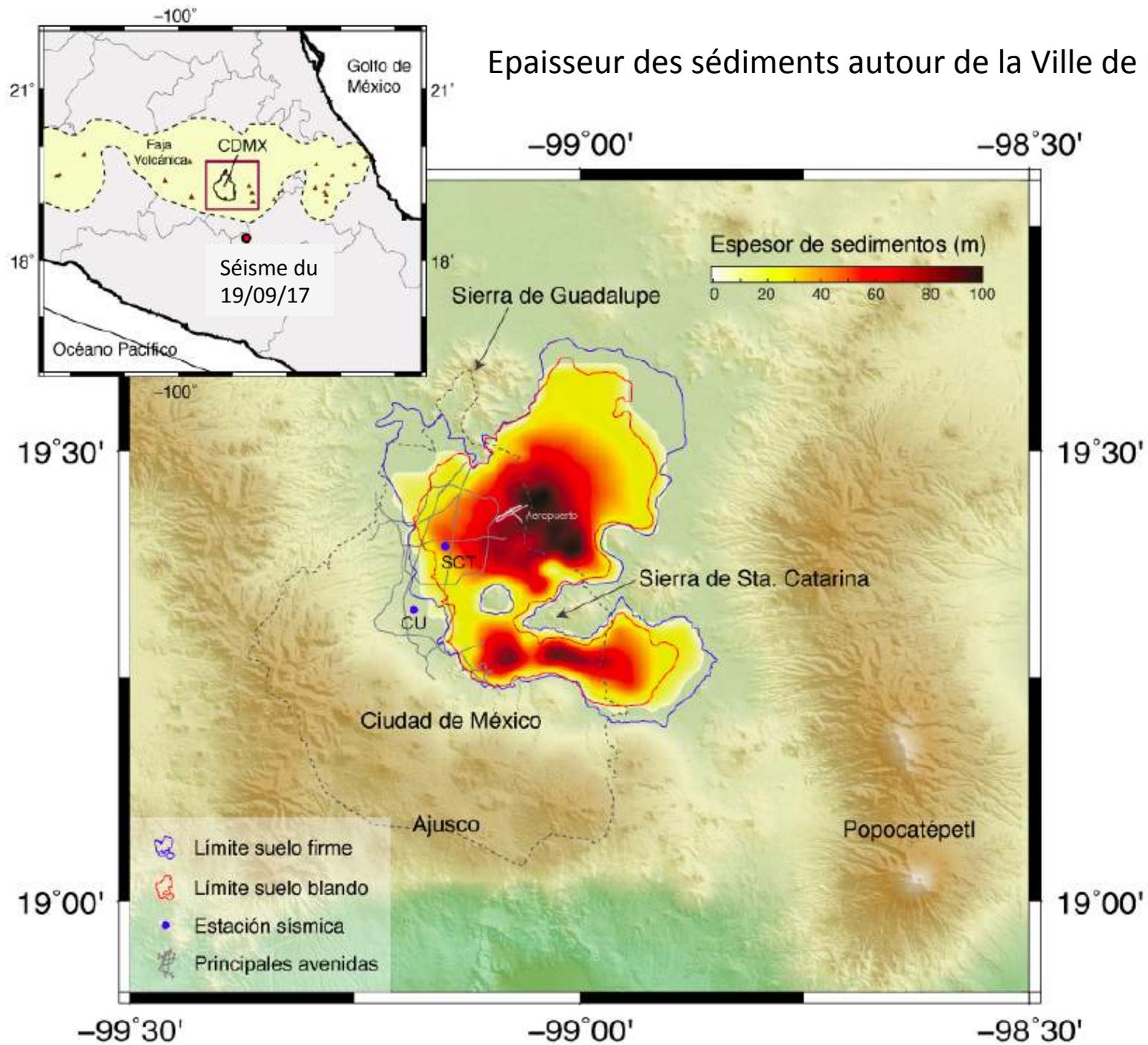
Mexico: 19 Sept 2017, M 7.1: séisme intraplaque



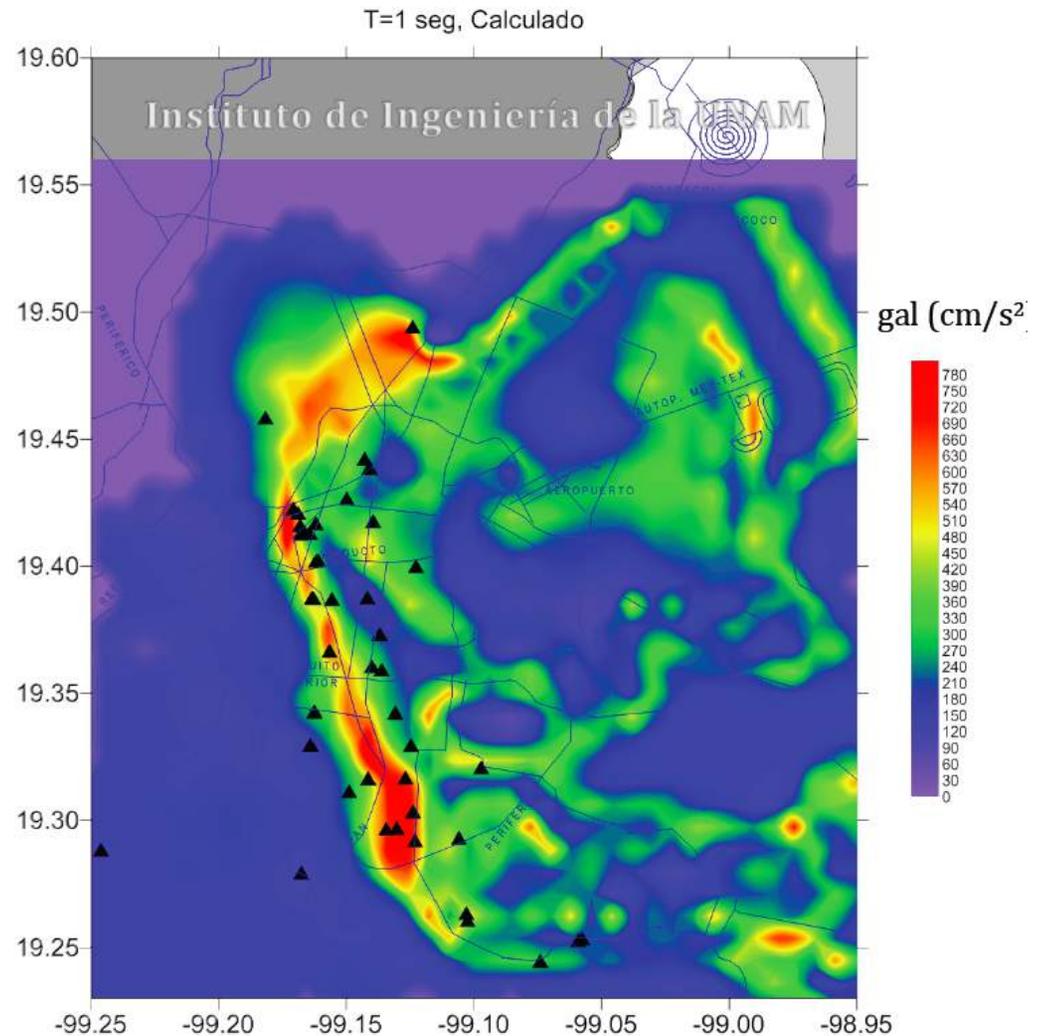
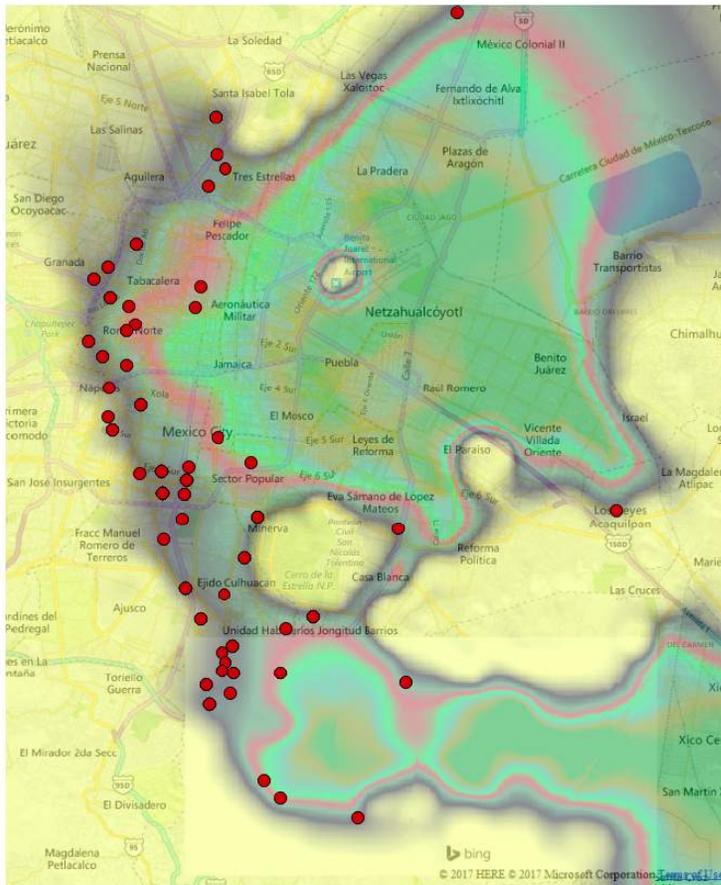
Vitesse de convergence des plaques: 76mm/an

Source: USGS

Epaisseur des sédiments autour de la Ville de Mexico



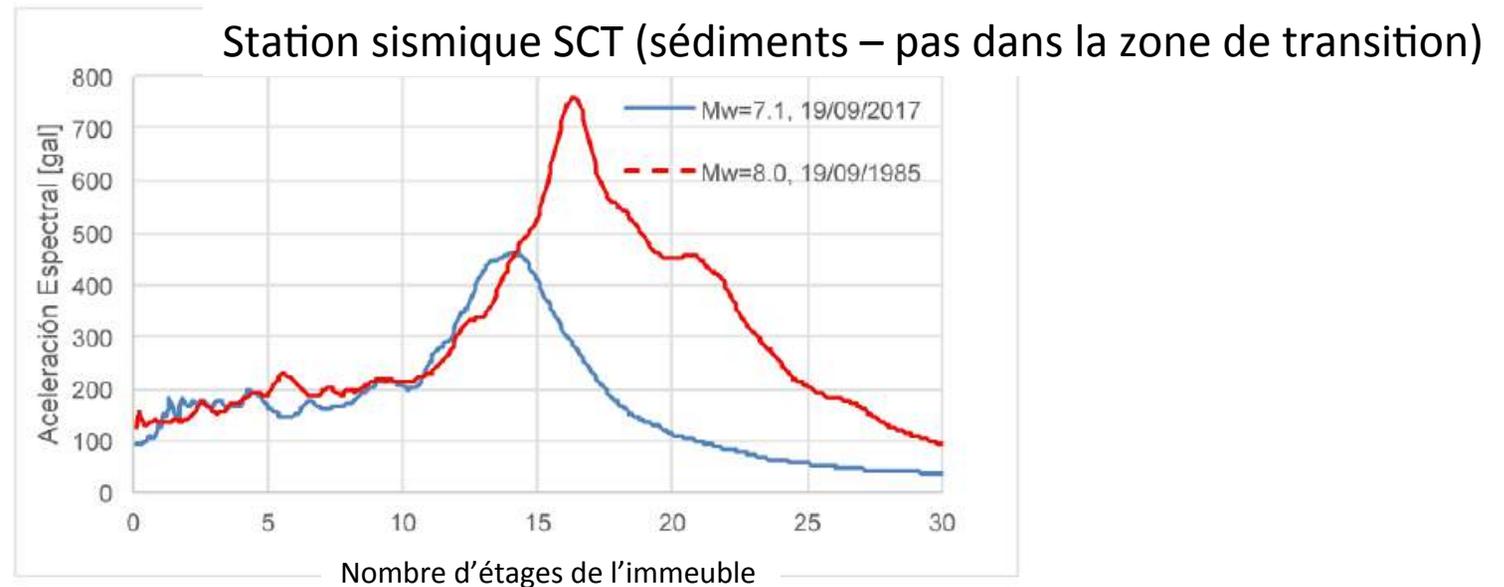
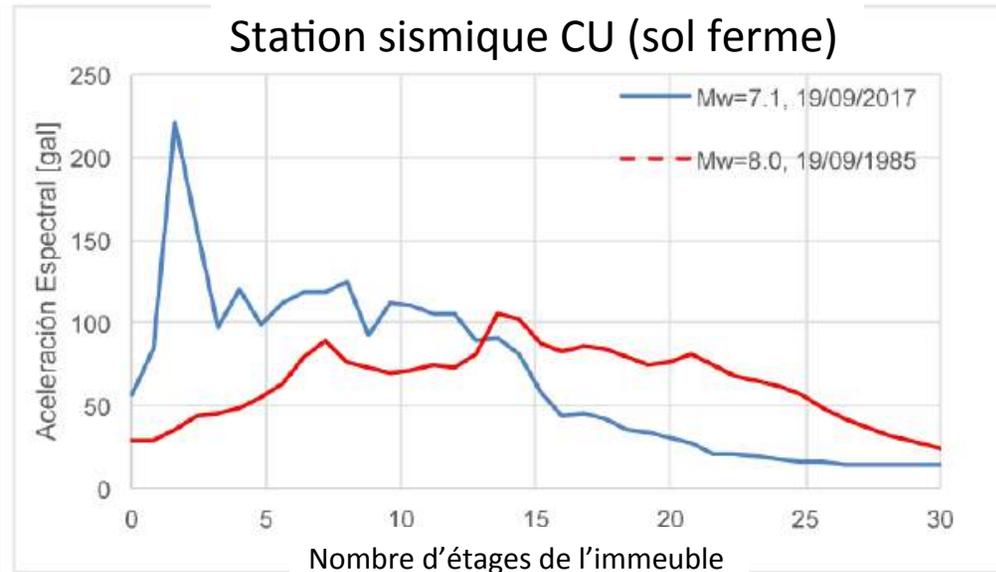
Séisme de Mexico 19/09/2017



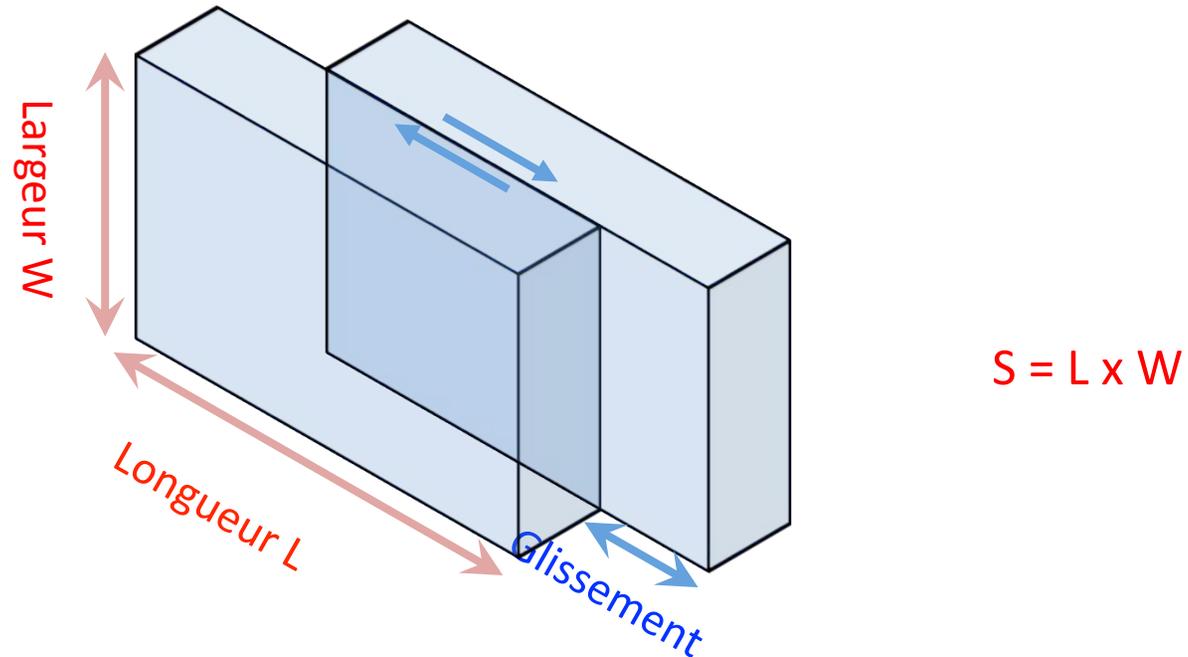
- Localisation des dégâts importants Séisme du 19/09/17

▲ Edifices détruits

Accélérations spectrales calculées sur les toits d'immeubles, comparaison entre le séisme du 19/09/2017 et celui du 19/09/1985 (séisme de Michoacan)



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



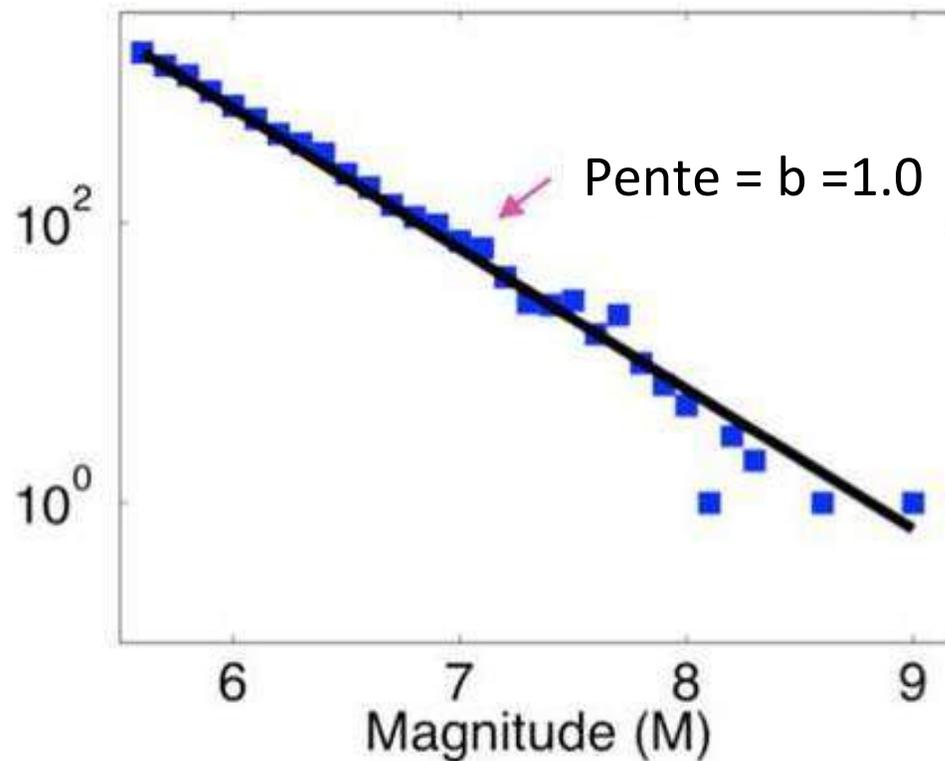
Potentiel = surface * (glissement moyen)

Moment sismique (M_o) = potentiel * module de cisaillement

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

La Loi de Gutenberg-Richter

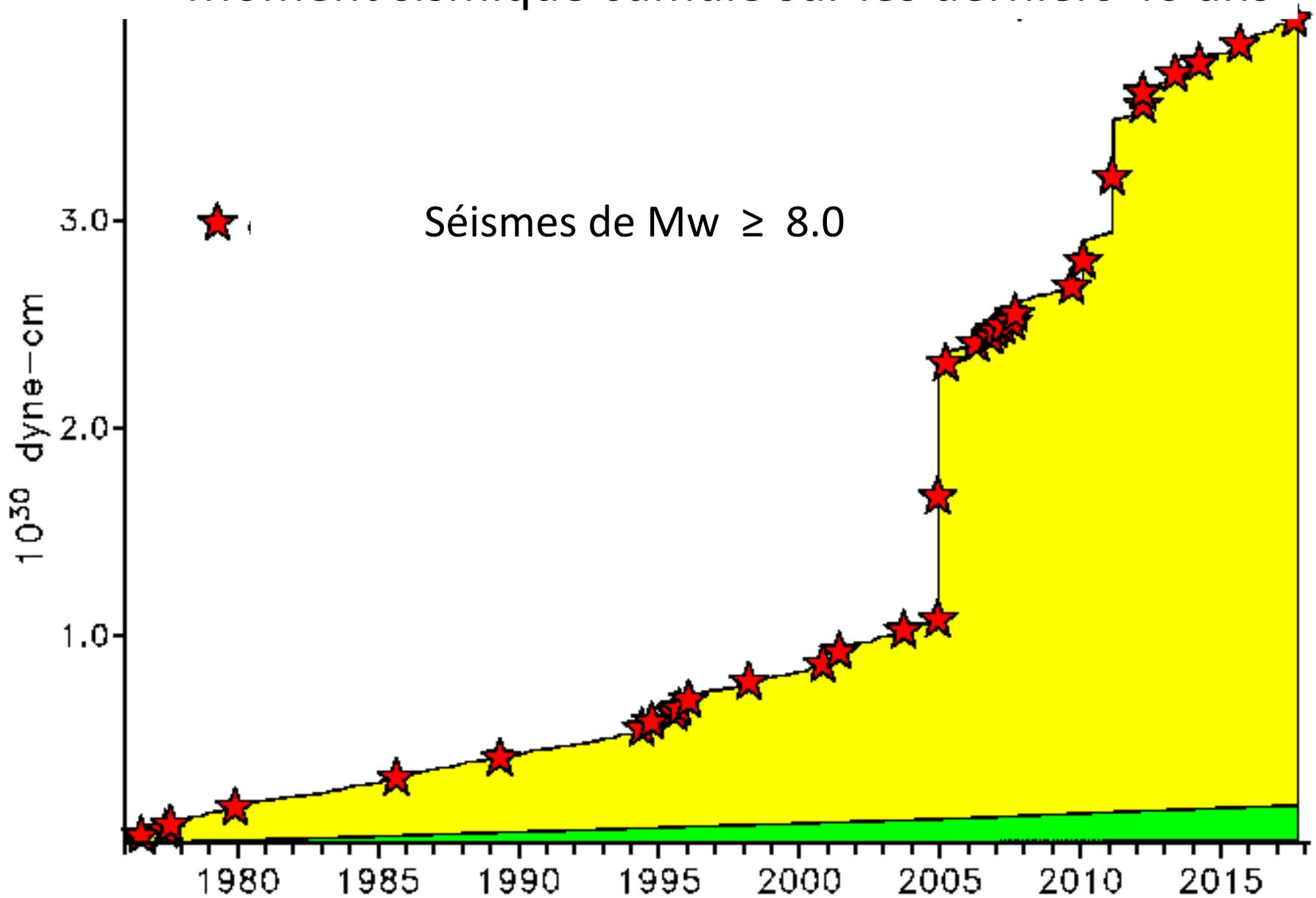
30 ans de séismes (global) 1985-2005



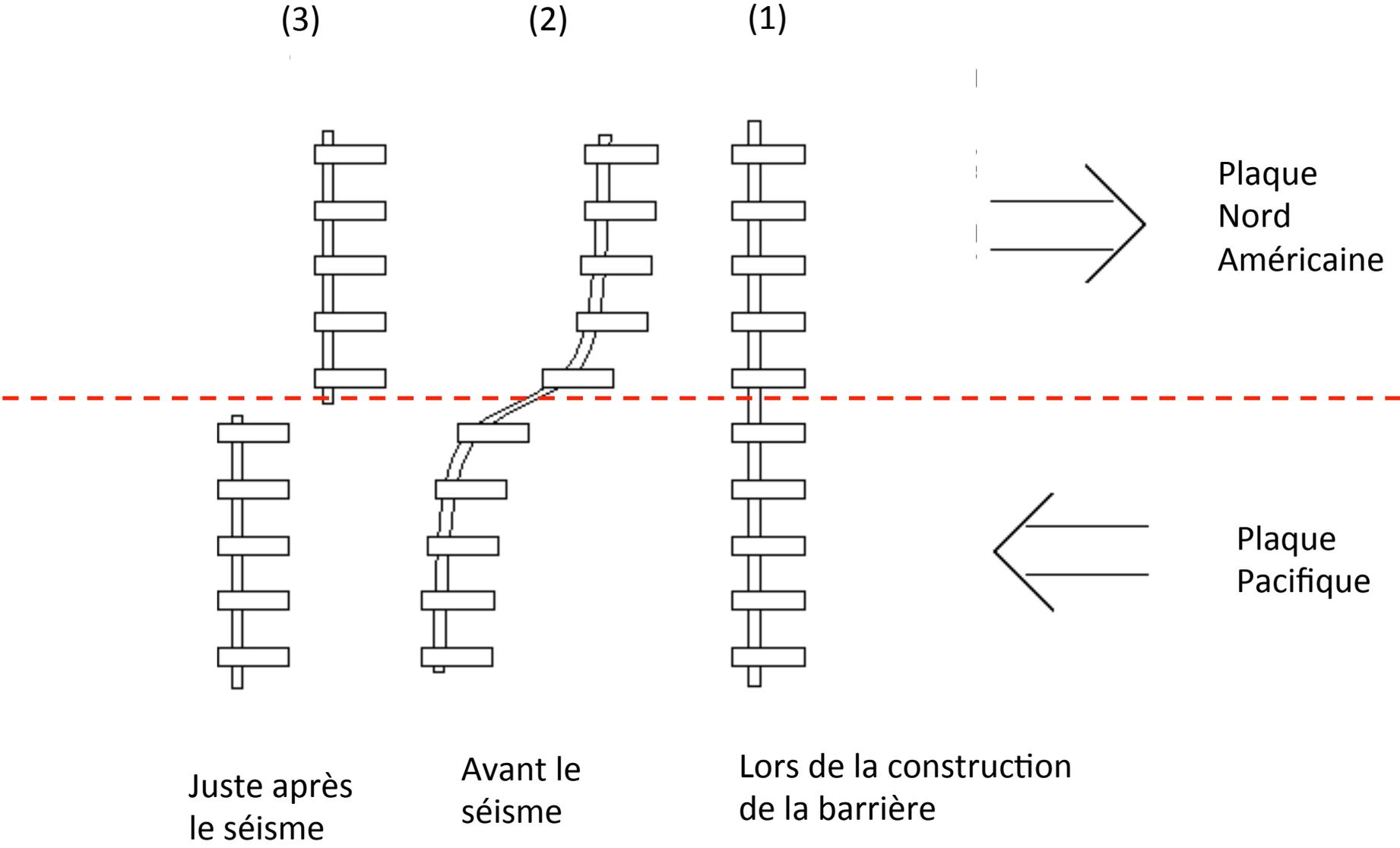
$$\text{Log } N = a - b M$$

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

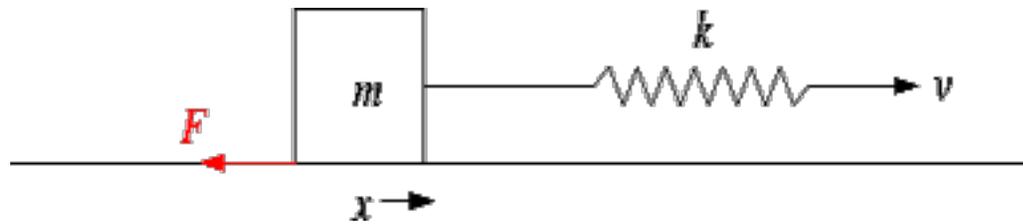
Moment sismique cumulé sur les derniers 40 ans

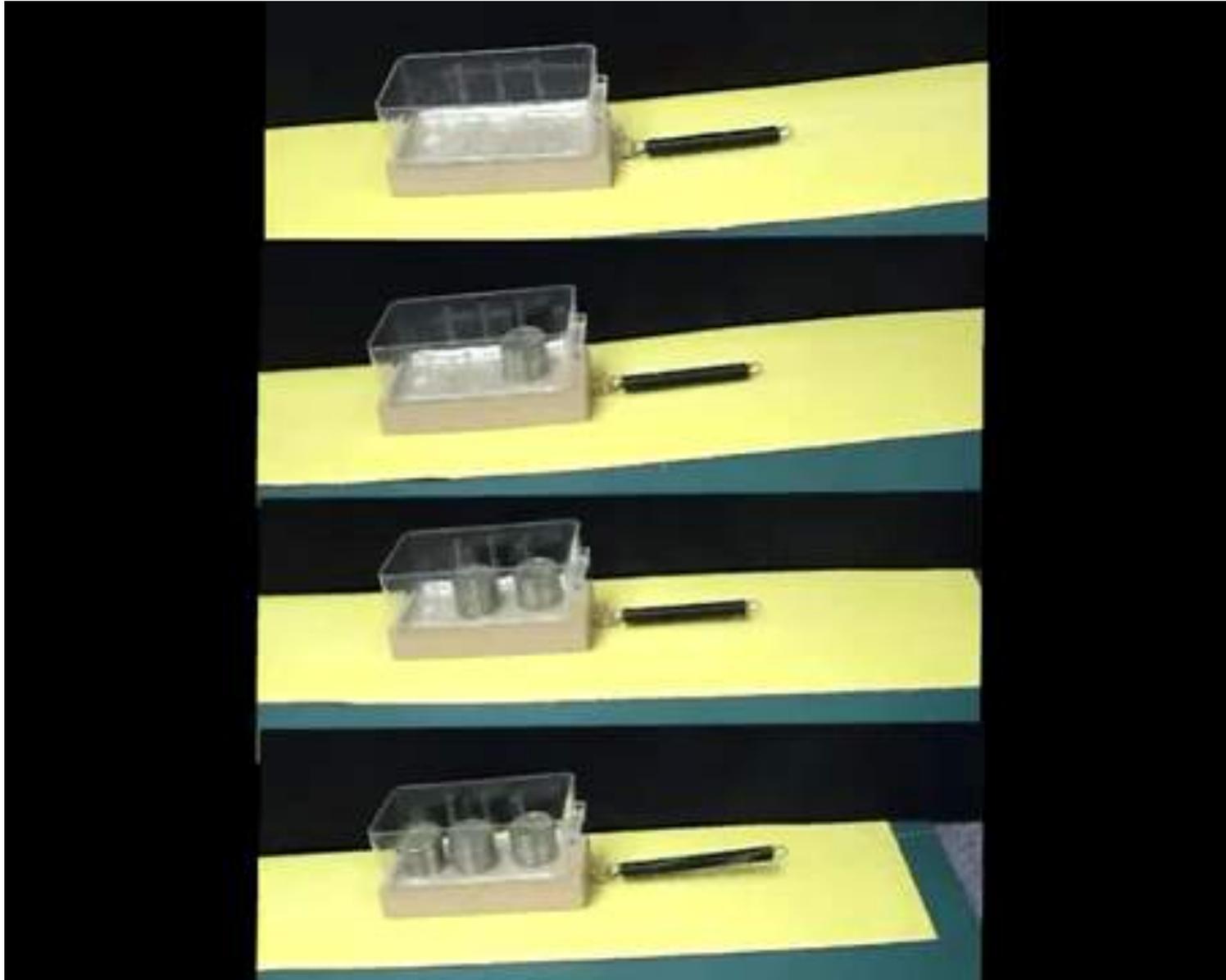


Théorie du rebond élastique (H. F. Reid, 1910)



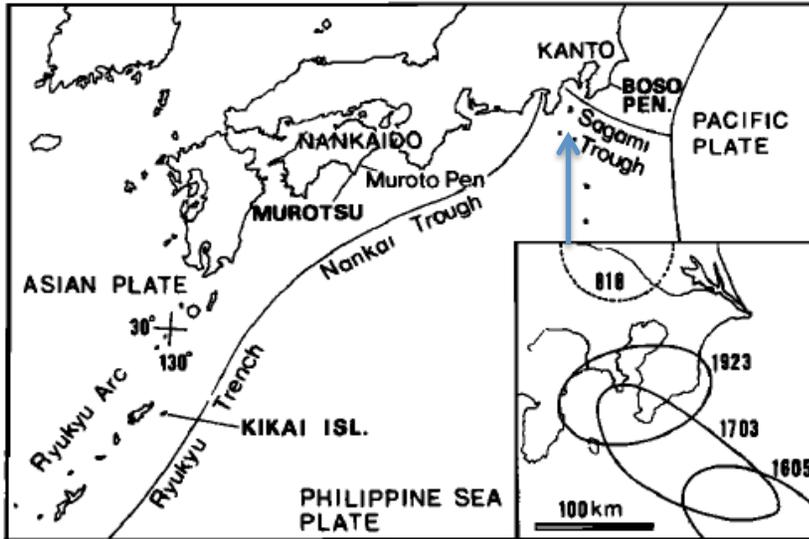
Comportement “stick-slip”





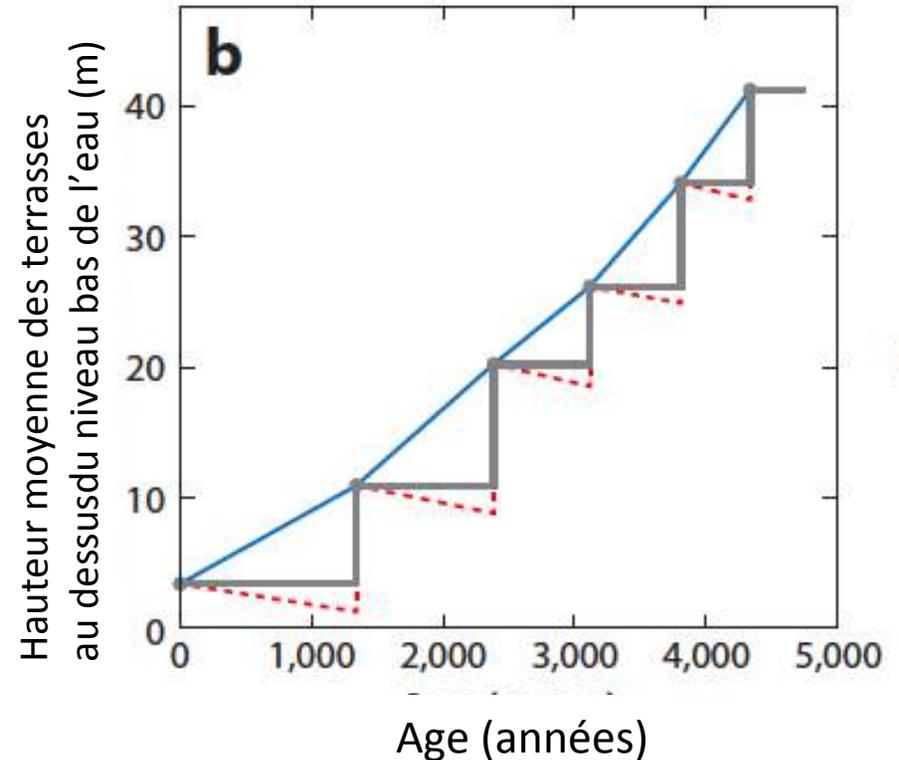
https://www.youtube.com/watch?v=syXTbTSpv_A

Datation de terrasses élevées à la suite de séismes dans la péninsule de Boso (Japon), et des récifs de coraux dans l'île de Kikai (Kyushu)



Surface estimée de rupture des séismes de Kanto de 818, 1605, 1703, et 1923

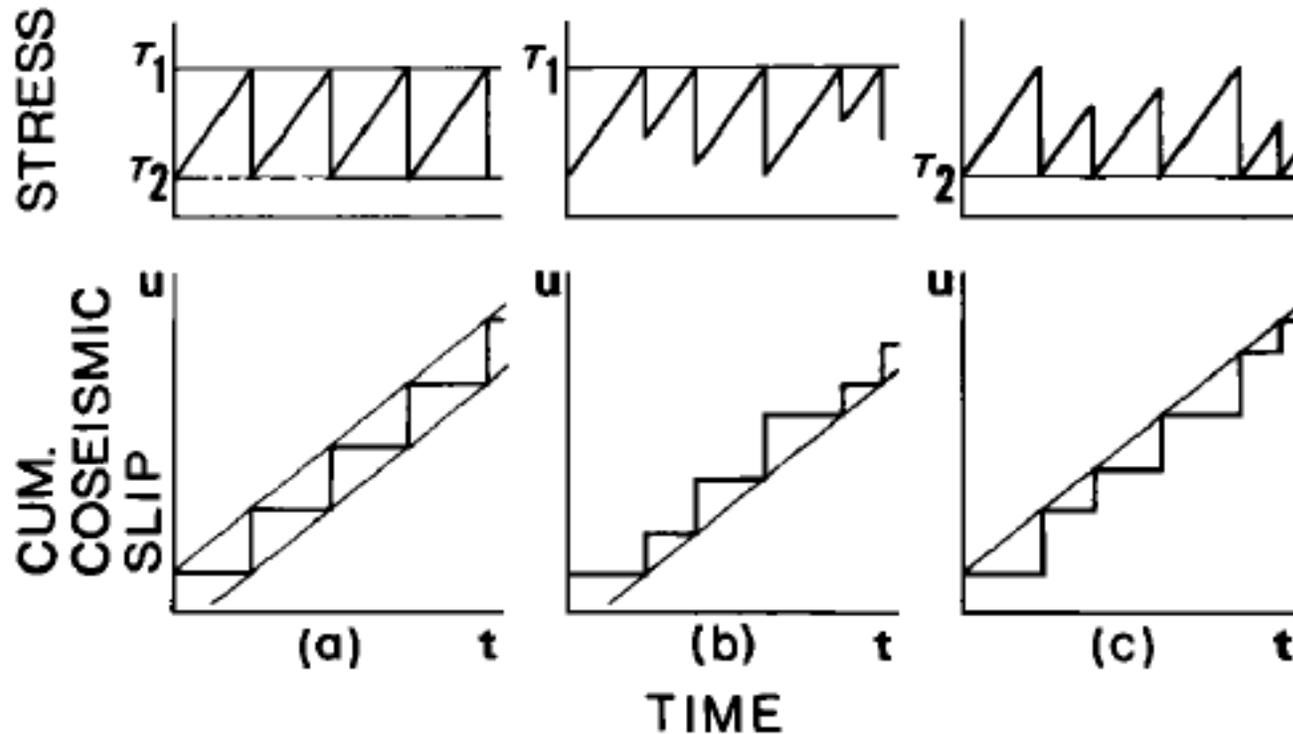
Shimazaki et Nakata (1980)



Kanamori, 2013 d'après Shimazaki et Nakata (1980)

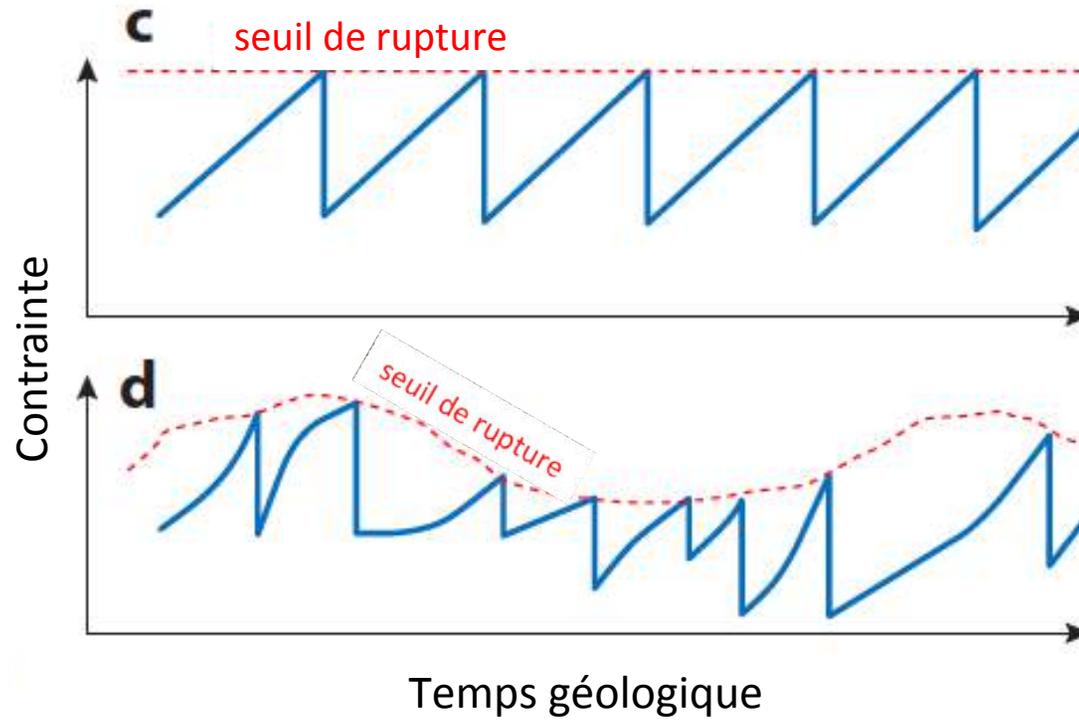
Plus le séisme est fort et plus est long l'intervalle de temps qui le sépare du suivant:
-> Modèle "time-predictable"

Le "cycle sismique": schémas classiques de modèles de récurrence



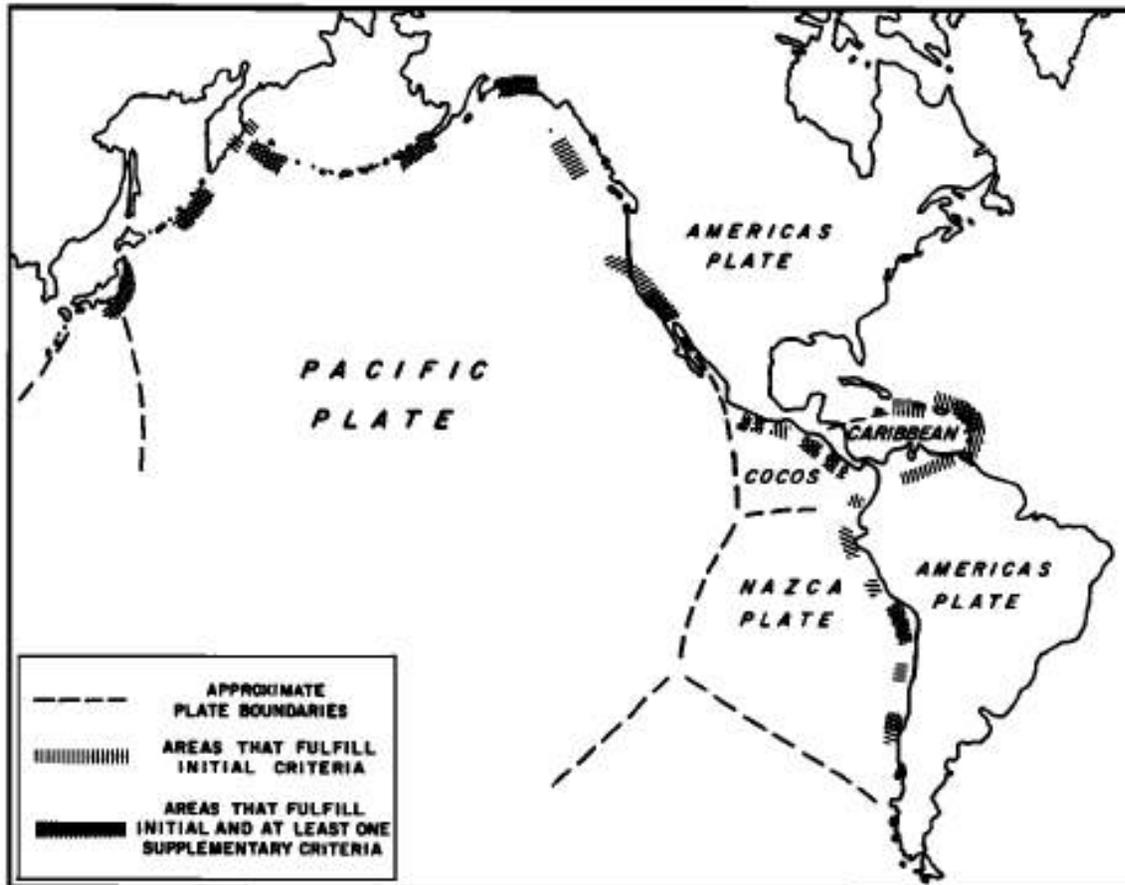
- (a) Strictement périodique
- (b) Temps prévisible du prochain séisme
- (c) Glissement prévisible du prochain séisme

En réalité:



Théorie des “lacunes” sismiques

Théorie des "lacunes sismiques" (Seismic gap theory)



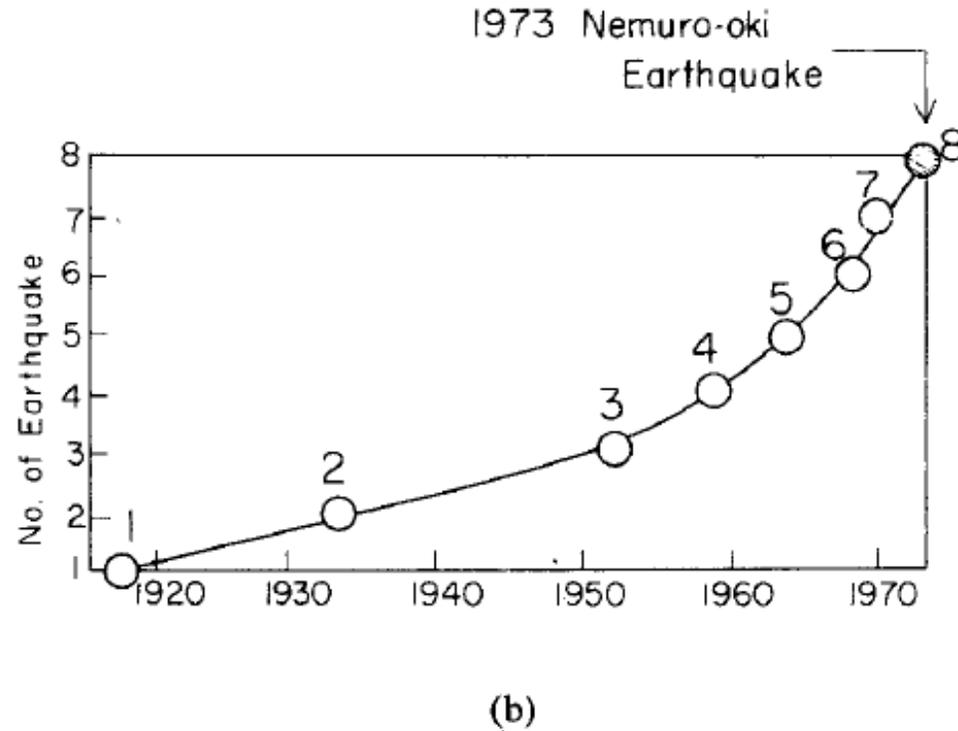
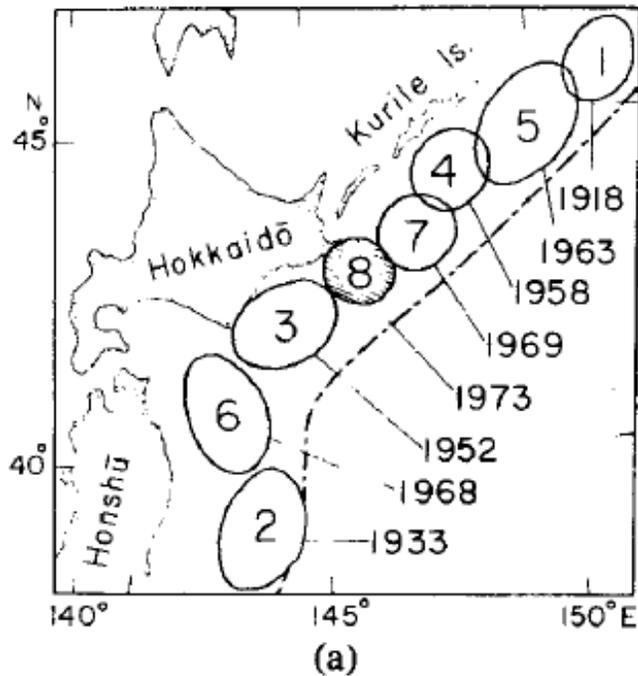
Critères principaux:

- 1) sur une zone sismique d'activité importante
- 2) Le segment n'a pas cassé depuis au moins 30 ans

Critères supplémentaires:

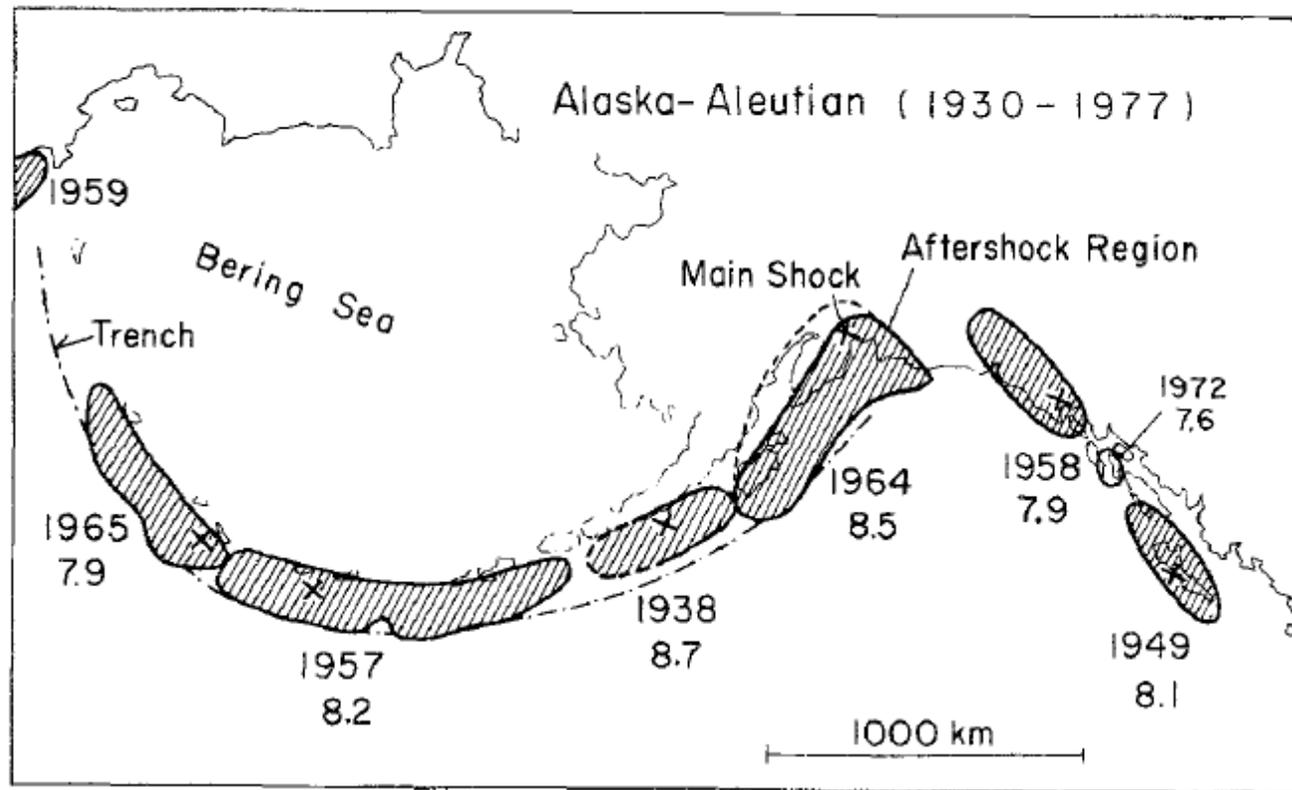
- Séismes historiques forts documentés sur ce segment
- Temps de recurrence basé sur les données historiques est proche de l'intervalle de temps écoulé depuis le dernier séisme connu
- Le segment paraît être l'endroit où pourrait avoir lieu le prochain séisme dans une série régulière de séismes

Séismes de magnitude $M > 7.7$ sur la région des Iles Kouriles et du Japon au 20^e siècle (avant 1979)



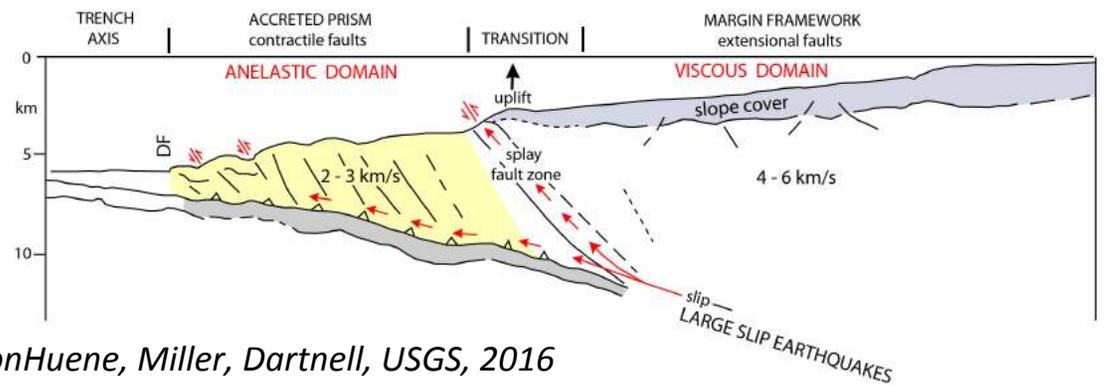
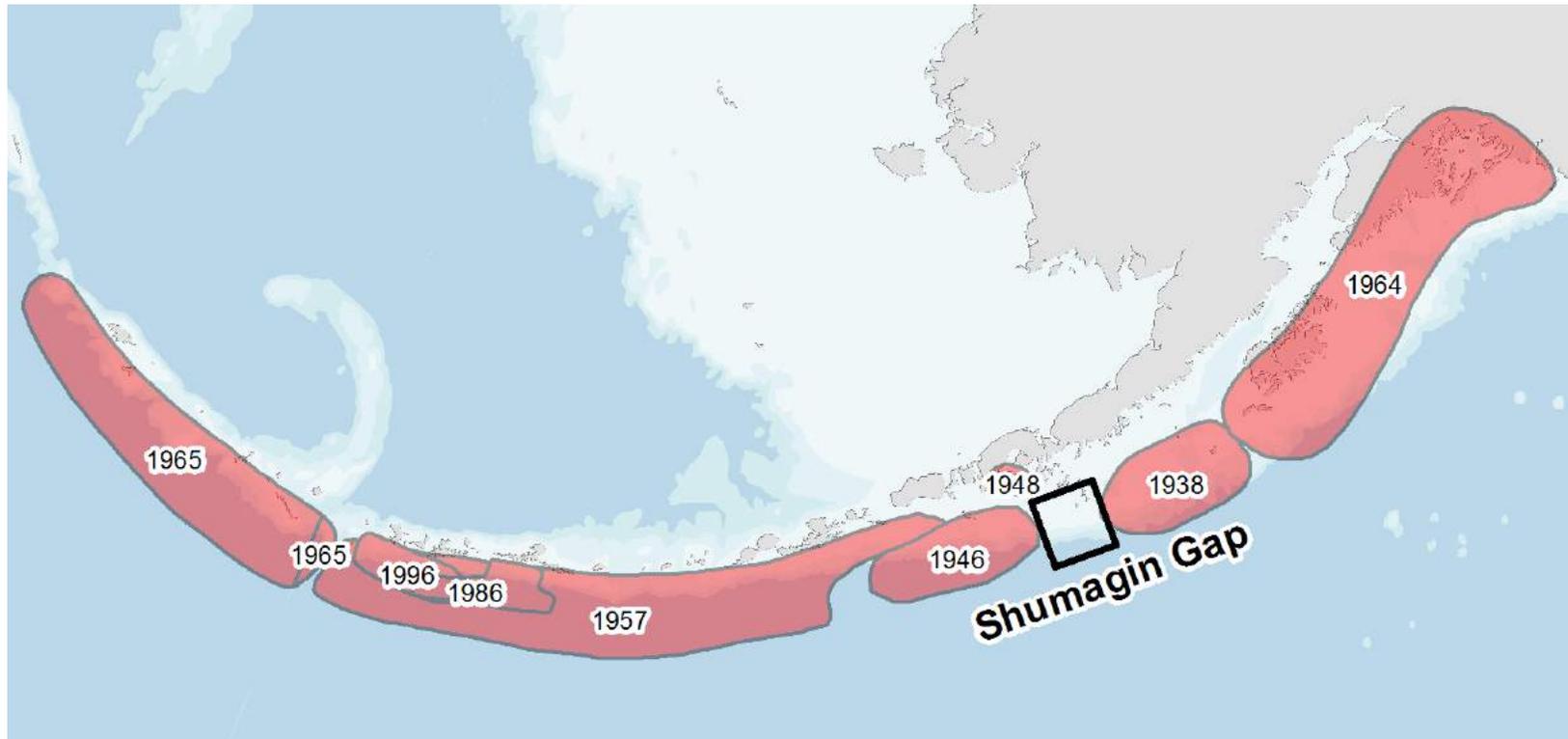
Mogi (1979) note que l'intervalle de temps entre les séismes successifs décroît systématiquement, et que le séisme de 1973 (no 8) se place dans l'extrapolation de la courbe du nombre cumulatif de séismes en fonction du temps (b)

Zones de rupture des séismes superficiels de $M > 7.7$ dans la région de l'Alaska et des îles Aléoutiennes (1930-1977)

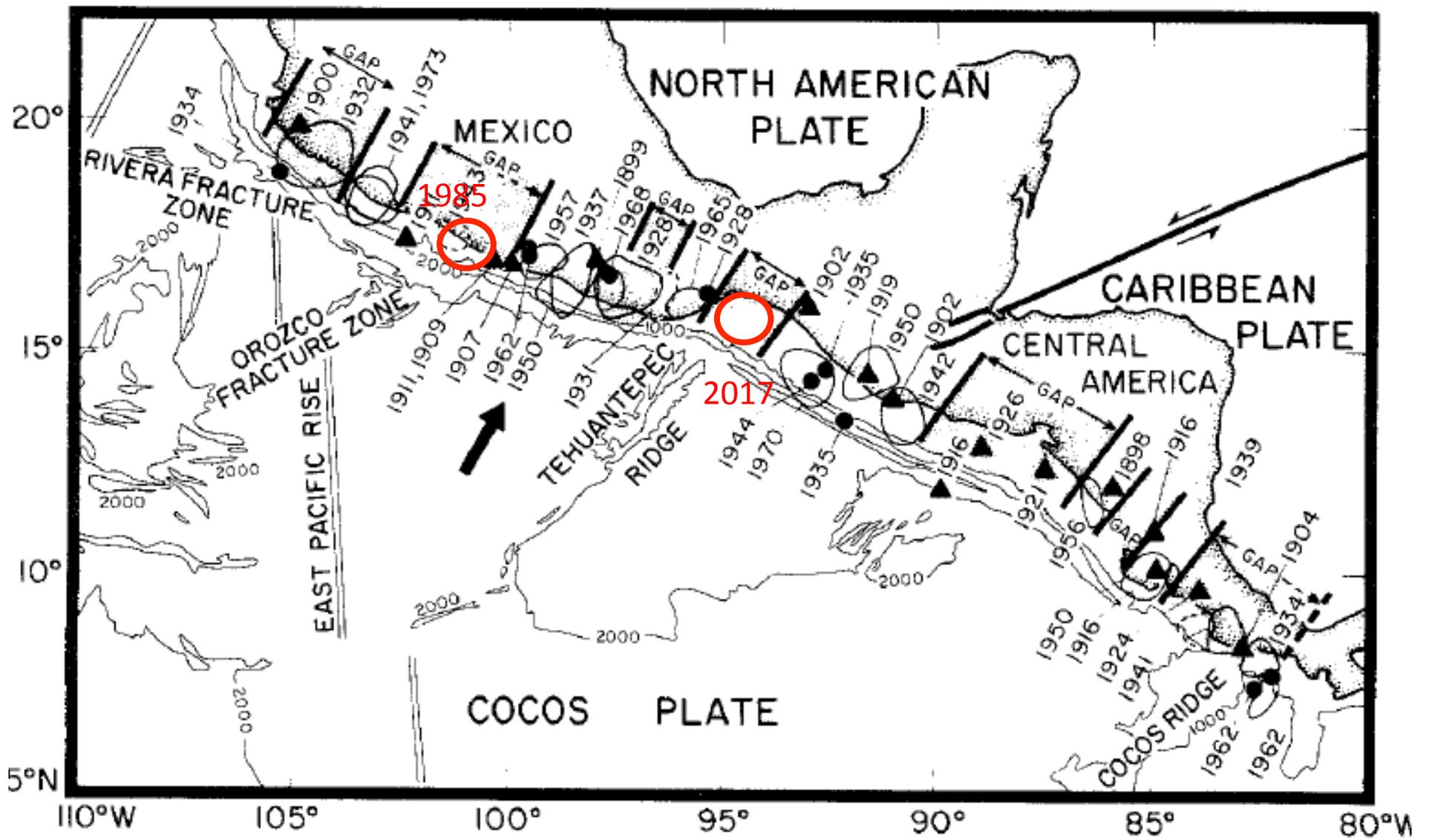


Sitka 1972:
Remplit une
lacune

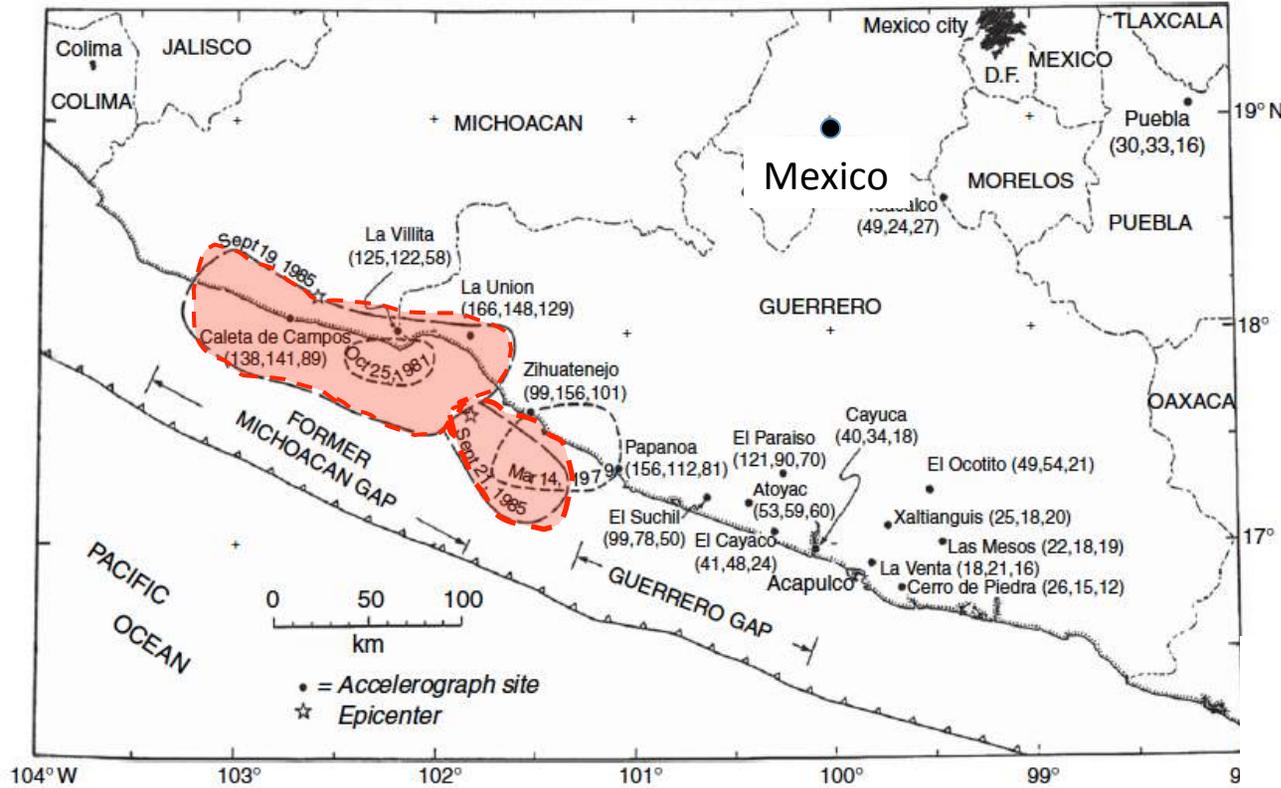
Lacune sismique potentielle en Alaska/Aléoutiennes



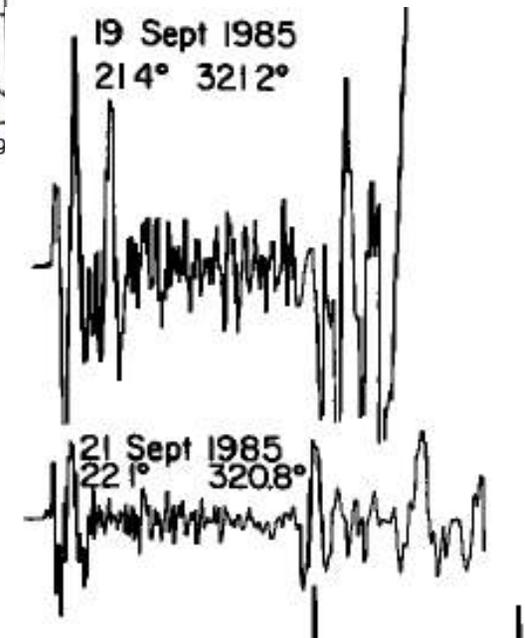
vonHuene, Miller, Dartnell, USGS, 2016



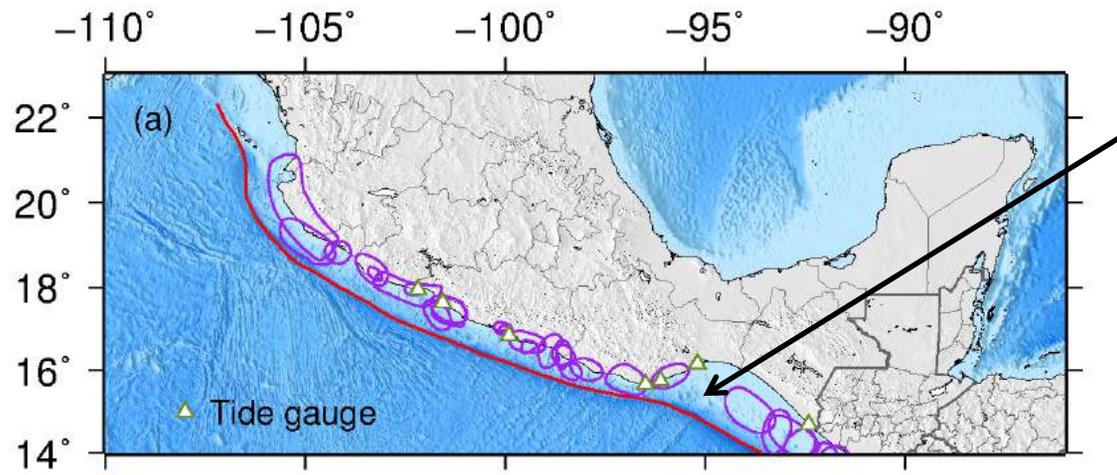
Lacunes sismiques en Amérique Centrale



Zones de rupture du séisme de Michoacan du 19 Sept 1985 (Mw 8.1) et de sa réplique du 21 Sept 1985 (Mw 7.6)

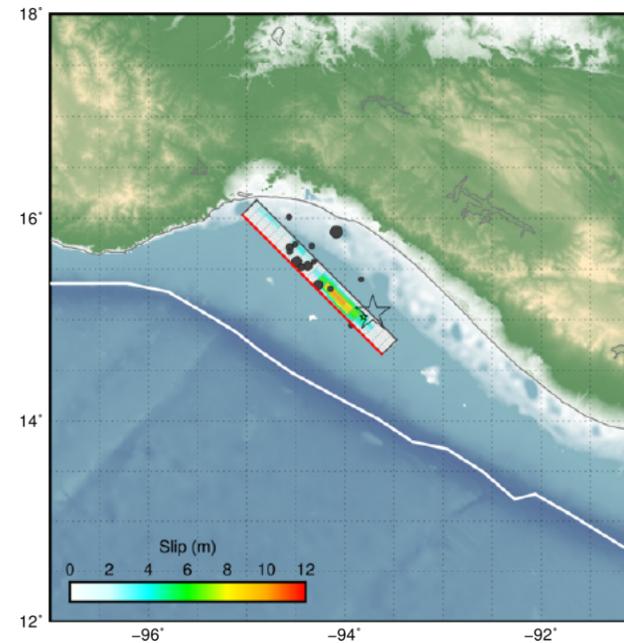


Séisme de Chiapas (Mexique) de Mw 8.1, 8 Septembre 2017



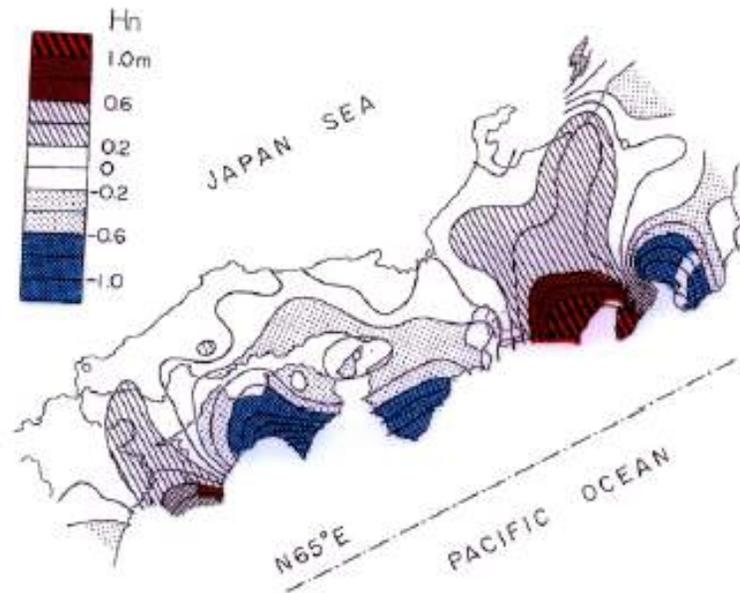
Lacune de Tehuantepec

Distribution du glissement

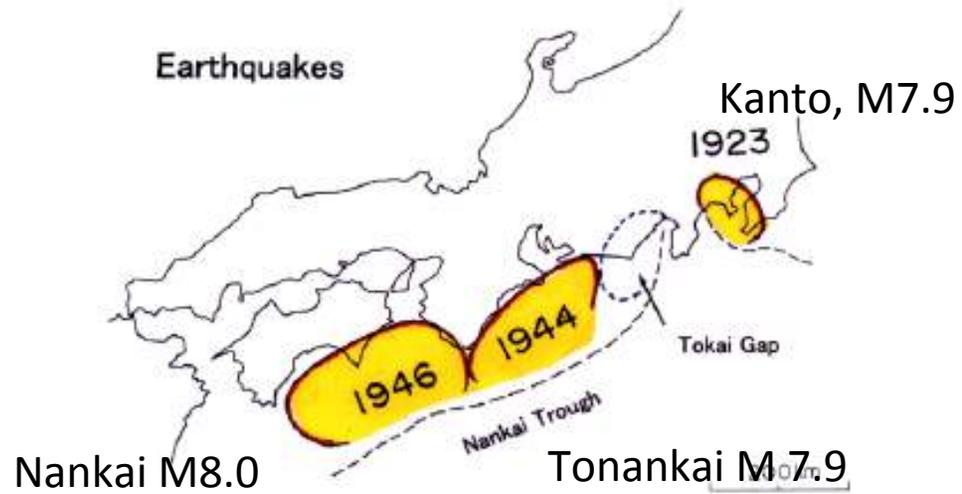


Source: USGS

Horizontal Displacements Normal to the
Trend of Nankai Trough (Mogi, 1970)

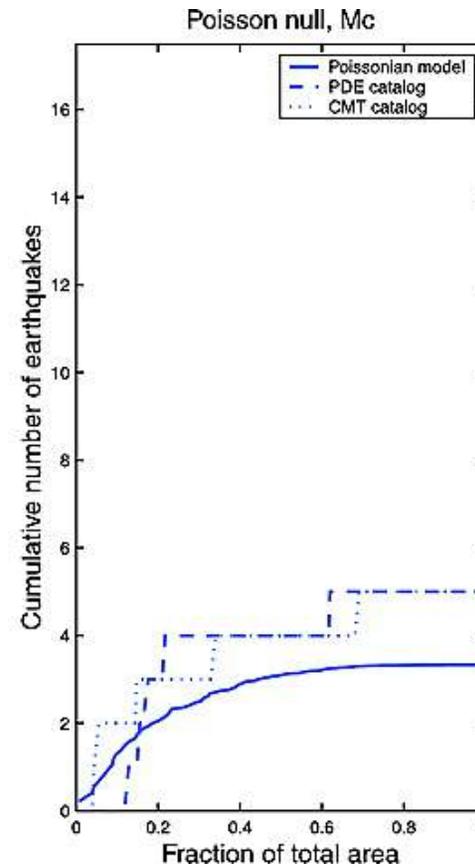
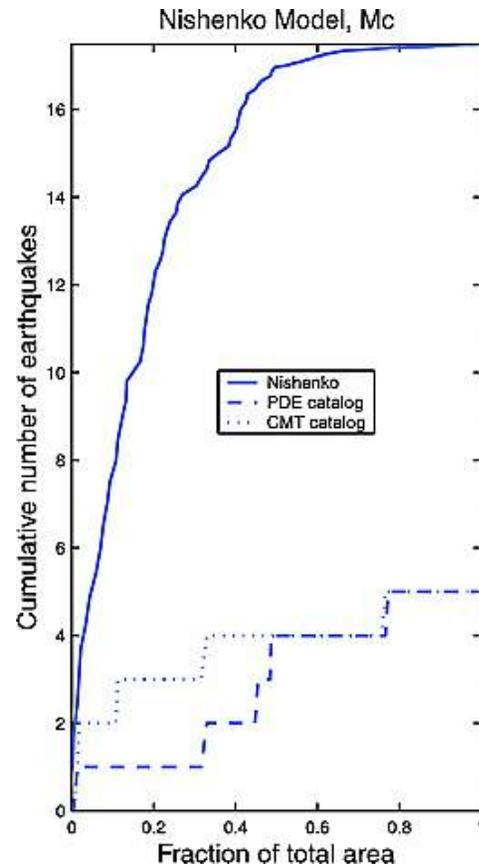


Earthquakes



Lacunes sismiques et séismes: tests statistiques 1990-1999

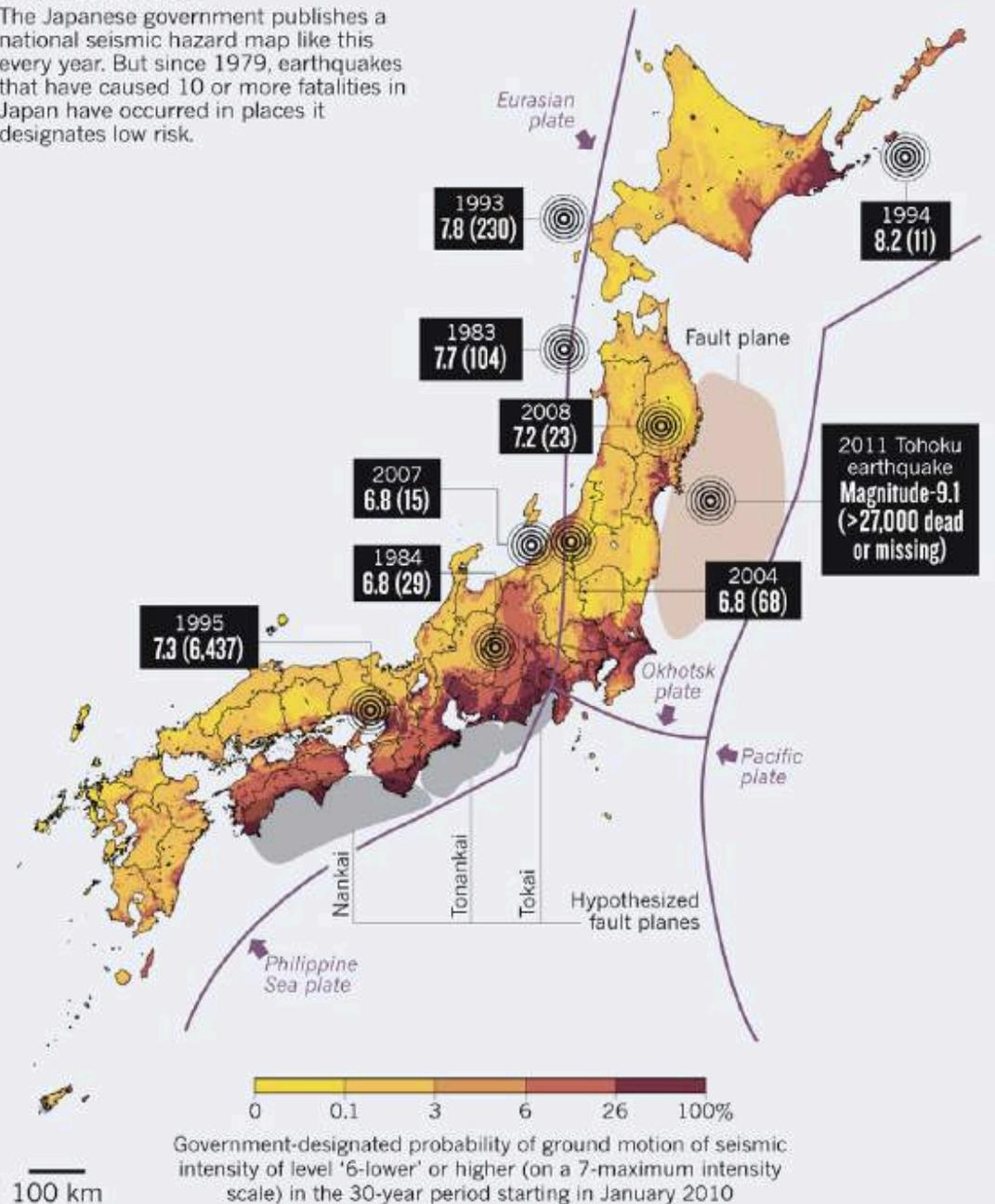
125 zones
autour du
Pacifique



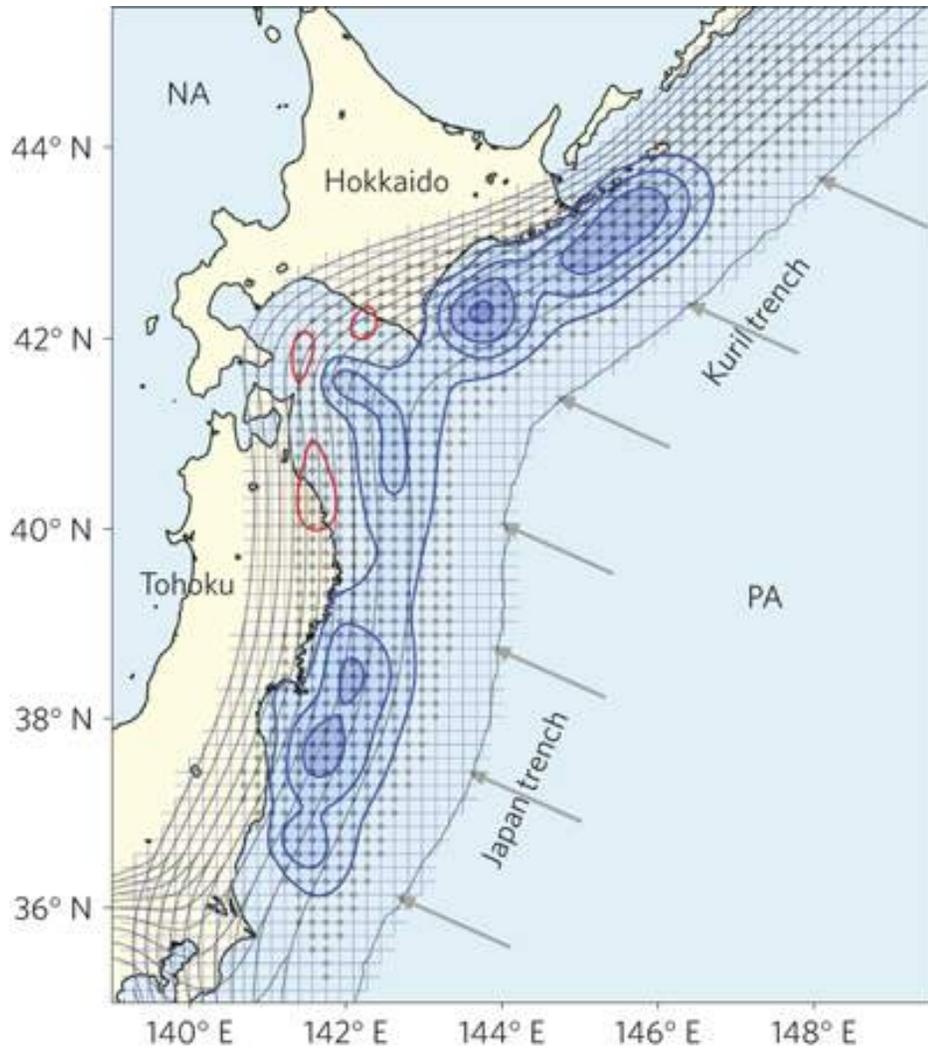
Distribution de Poisson estimée
à partir du catalogue pour les années
1977-1988

REALITY CHECK

The Japanese government publishes a national seismic hazard map like this every year. But since 1979, earthquakes that have caused 10 or more fatalities in Japan have occurred in places it designates low risk.

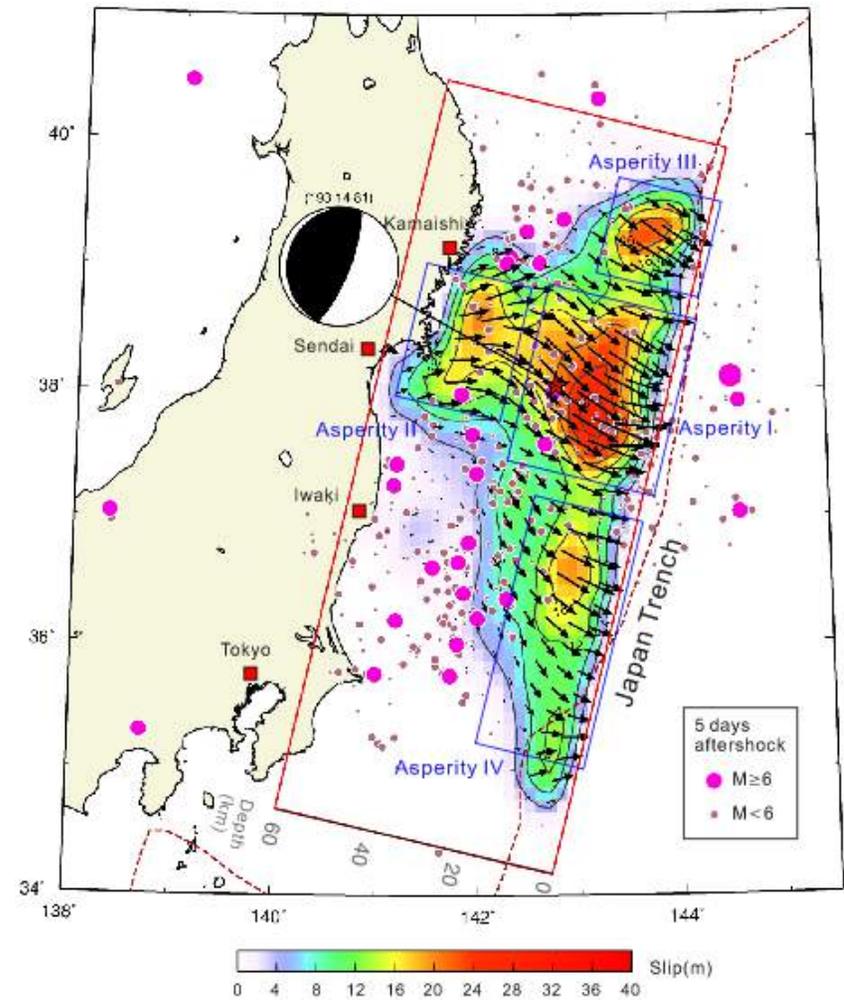


Carte officielle de
Risque
Sismique
2010



Slip deficit rate (blue) – contours: 3cm/yr
Hashimoto et al. (2000)

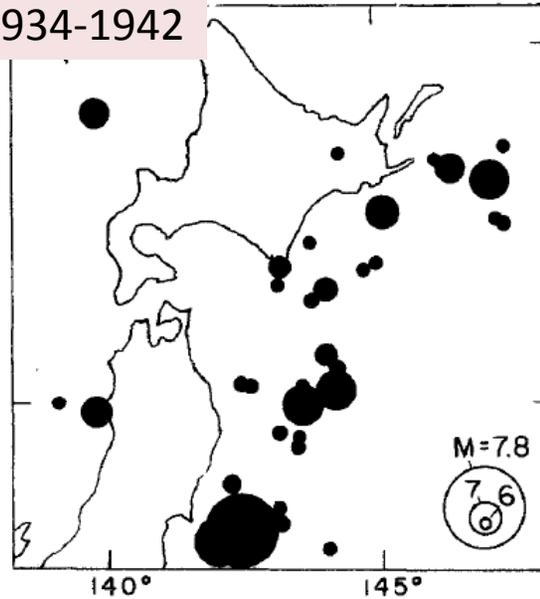
Tohoku, 11 Mars 2011, M9.0



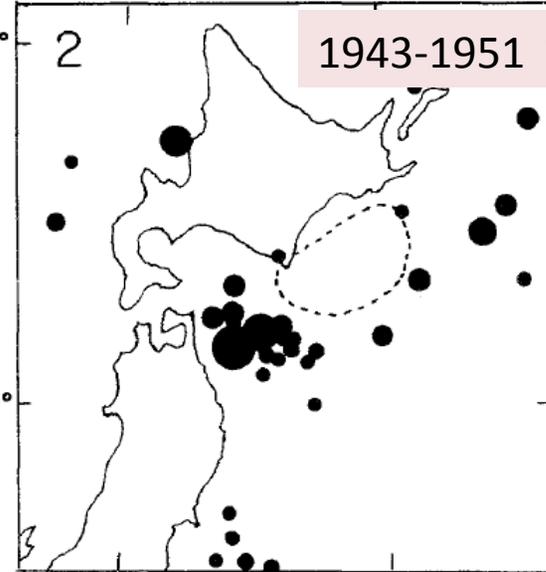
Séismes de $M > 6.0$
autour du seisme de
Tokachi-Oki du
4 Mars 1952 (M 8.1)

Lacune sismique de
"2e type"

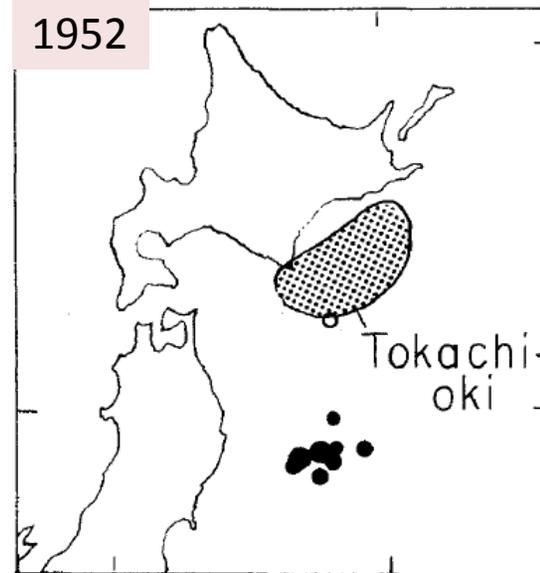
1934-1942



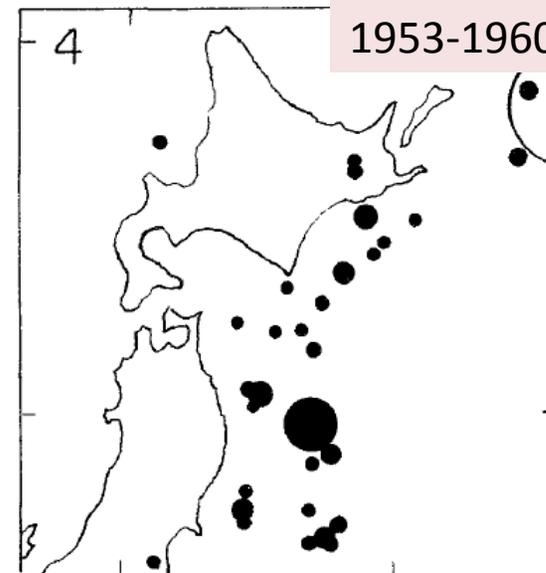
1943-1951



1952

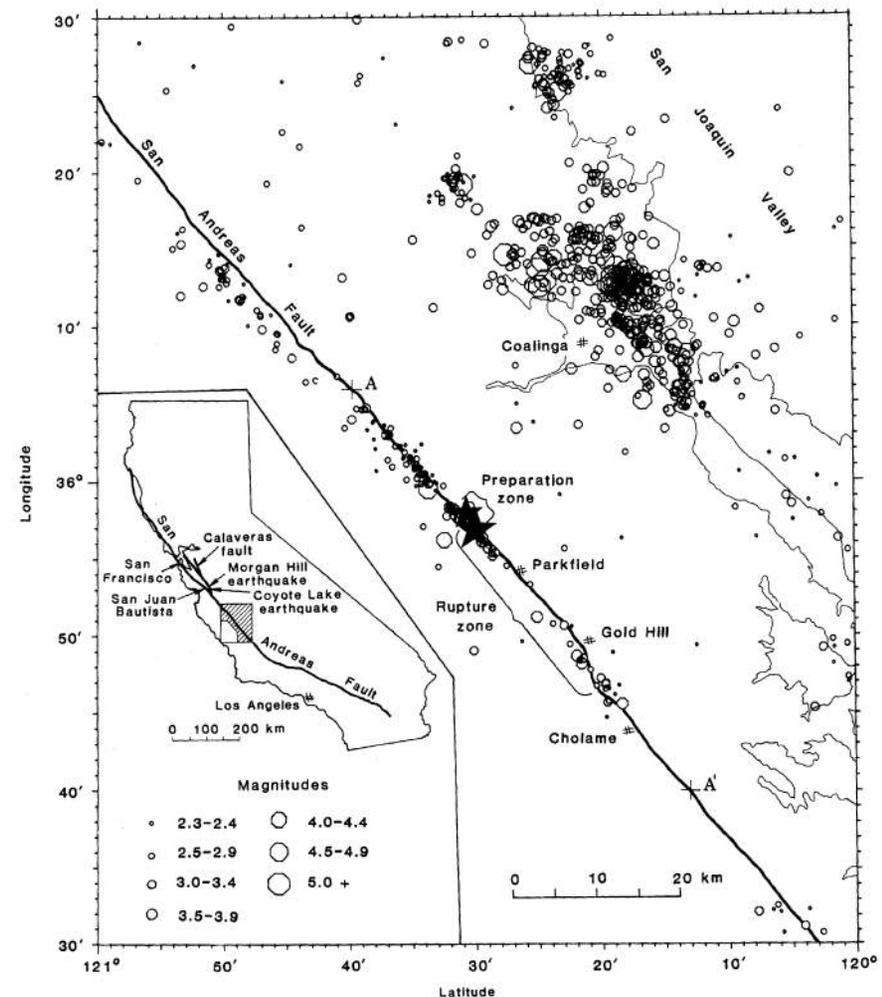


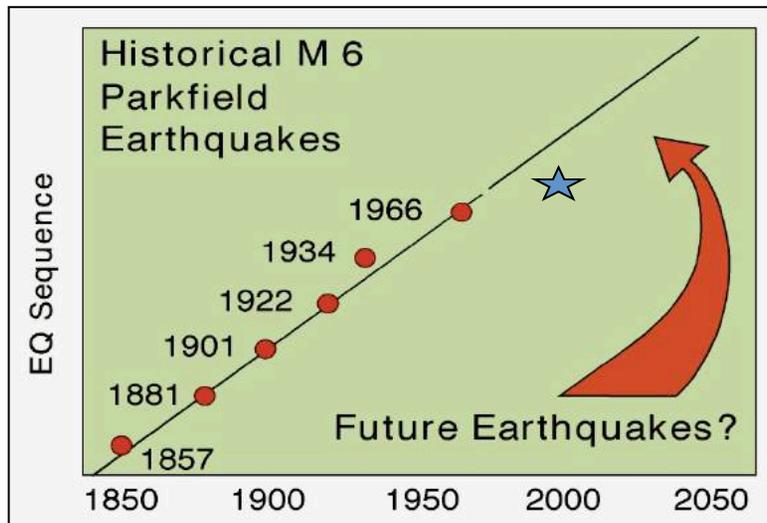
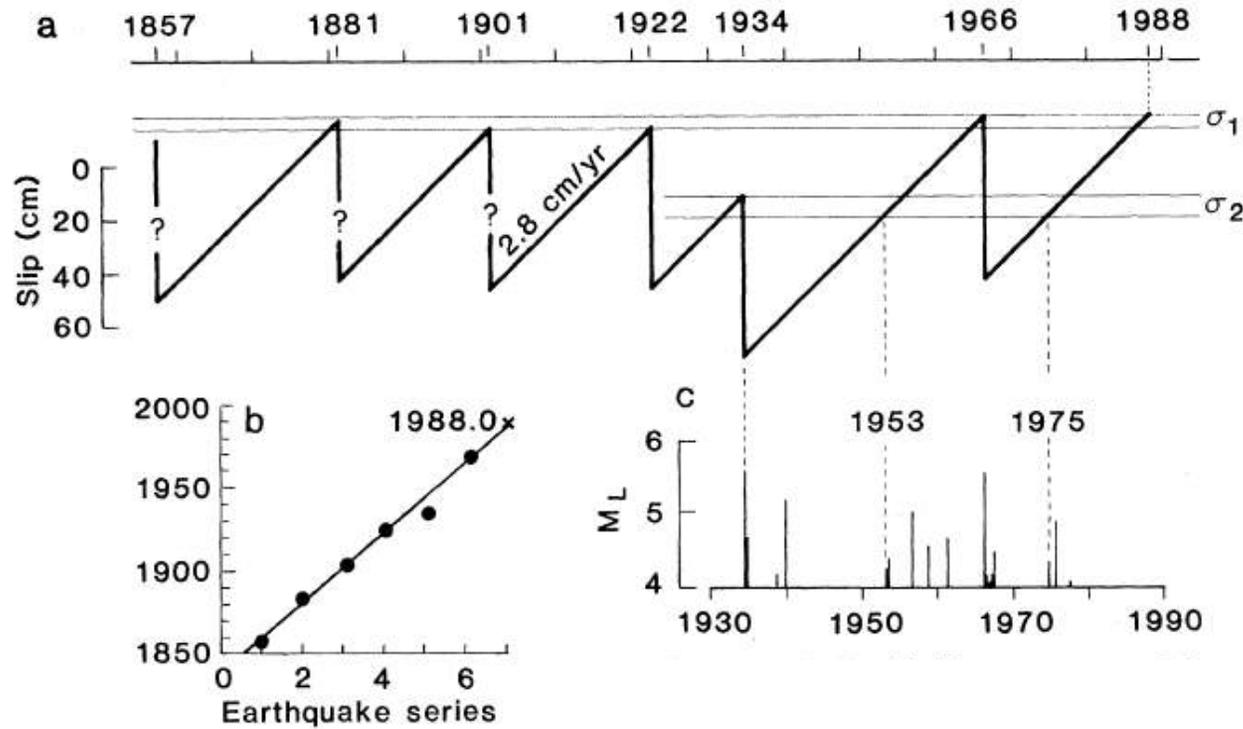
1953-1960



Théorie du "séisme caractéristique"

- Séquence de 5 séismes de M 6 à intervalles réguliers à Parkfield (Californie centrale)
- Tous les 21 +/- 3.9 ans
- (1857), 1881, 1901, 1922, 1934, 1966
- Sismogrammes remarquablement similaires pour les 3 derniers
- Prédissent un séisme de ce type d'ici 1992 (1988 +/- 4 ans)
- Déploient une instrumentation intense pour essayer de capturer des signes précurseurs du séisme suivant.
- Ce séisme n'a pas eu lieu. Il y en a eu un en 2004 (Mw 6.1), mais qui n'a pas exactement eu lieu au même endroit.



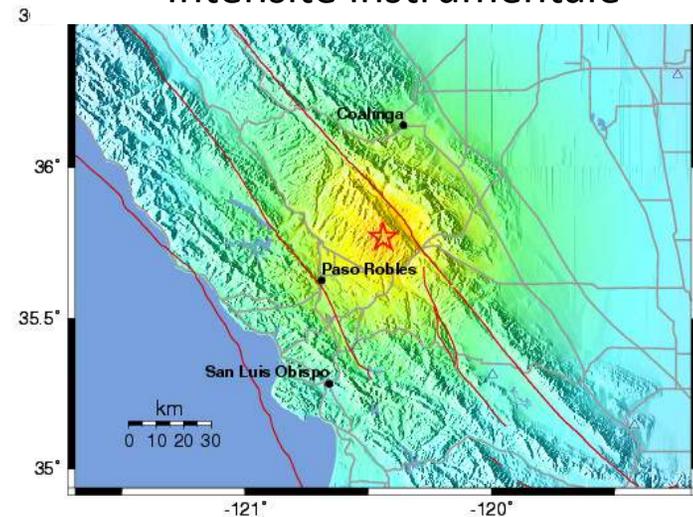


- Proposent un modèle “time predictable” modifié, où la contrainte maximale σ_1 est fixe, où la chute de contraintes est fixe, et de temps en temps la rupture a lieu pour lorsqu’une contrainte $\sigma_2 < \sigma_1$ est atteinte

Théorie du "séisme caractéristique"

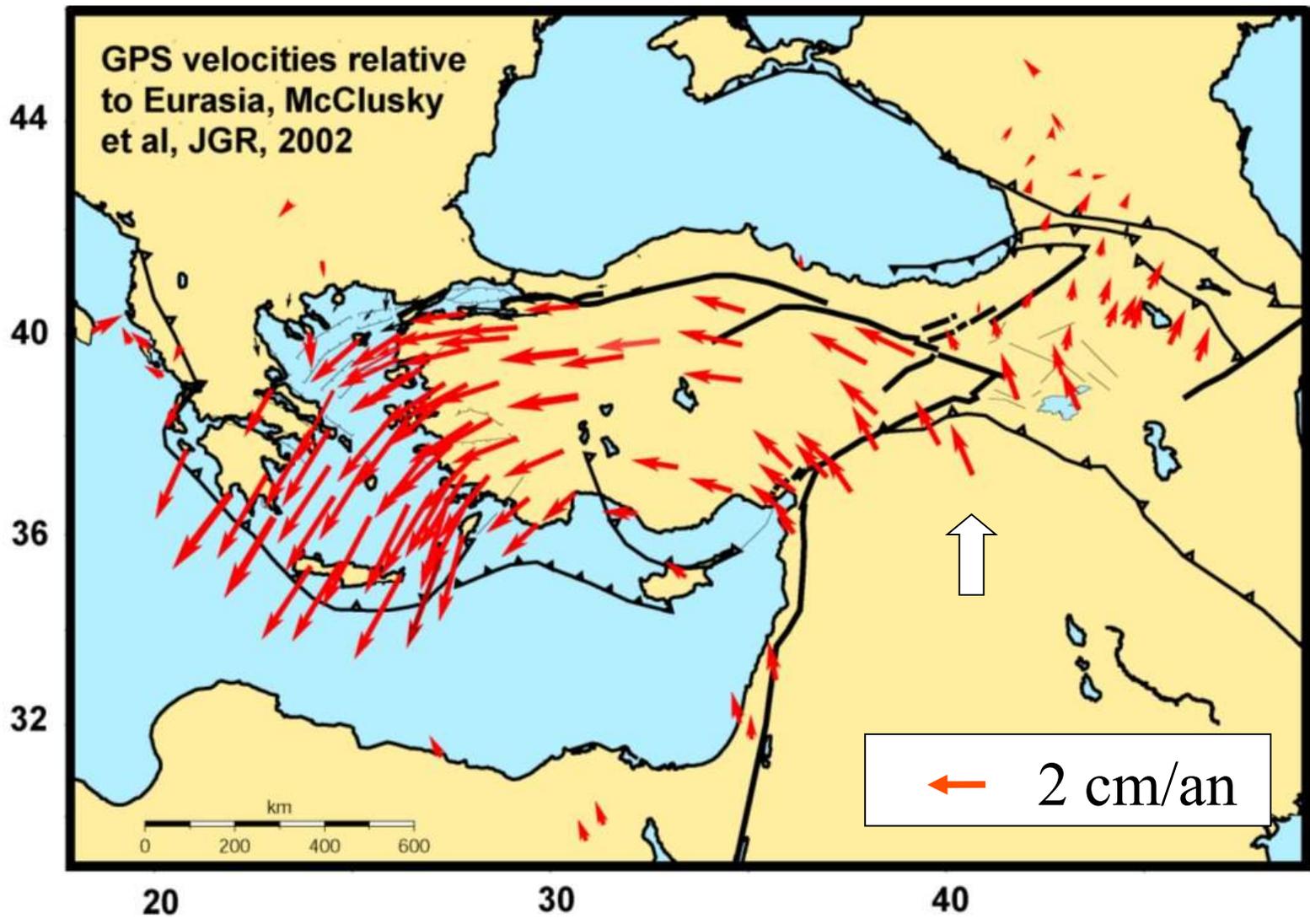
- Séquence de 5 séismes de M 6 à intervalles réguliers à Parkfield (Californie centrale)
- Tous les 21 +/-3.9 ans
- (1857), 1881, 1901, 1922, 1934, 1966
- Sismogrammes remarquablement similaires pour les 3 derniers
- Prédissent un séisme de ce type d'ici 1992 (1988+/- 4 ans)
- Déploient une instrumentation intense pour essayer de capturer des signes précurseurs du séisme suivant.
- **Ce séisme n'a pas eu lieu. Il y en a eu un en 2004 (Mw 6.1), mais qui n'a pas exactement eu lieu au même endroit.**

Séisme de Parkfield du 28/09/2004
Intensité instrumentale

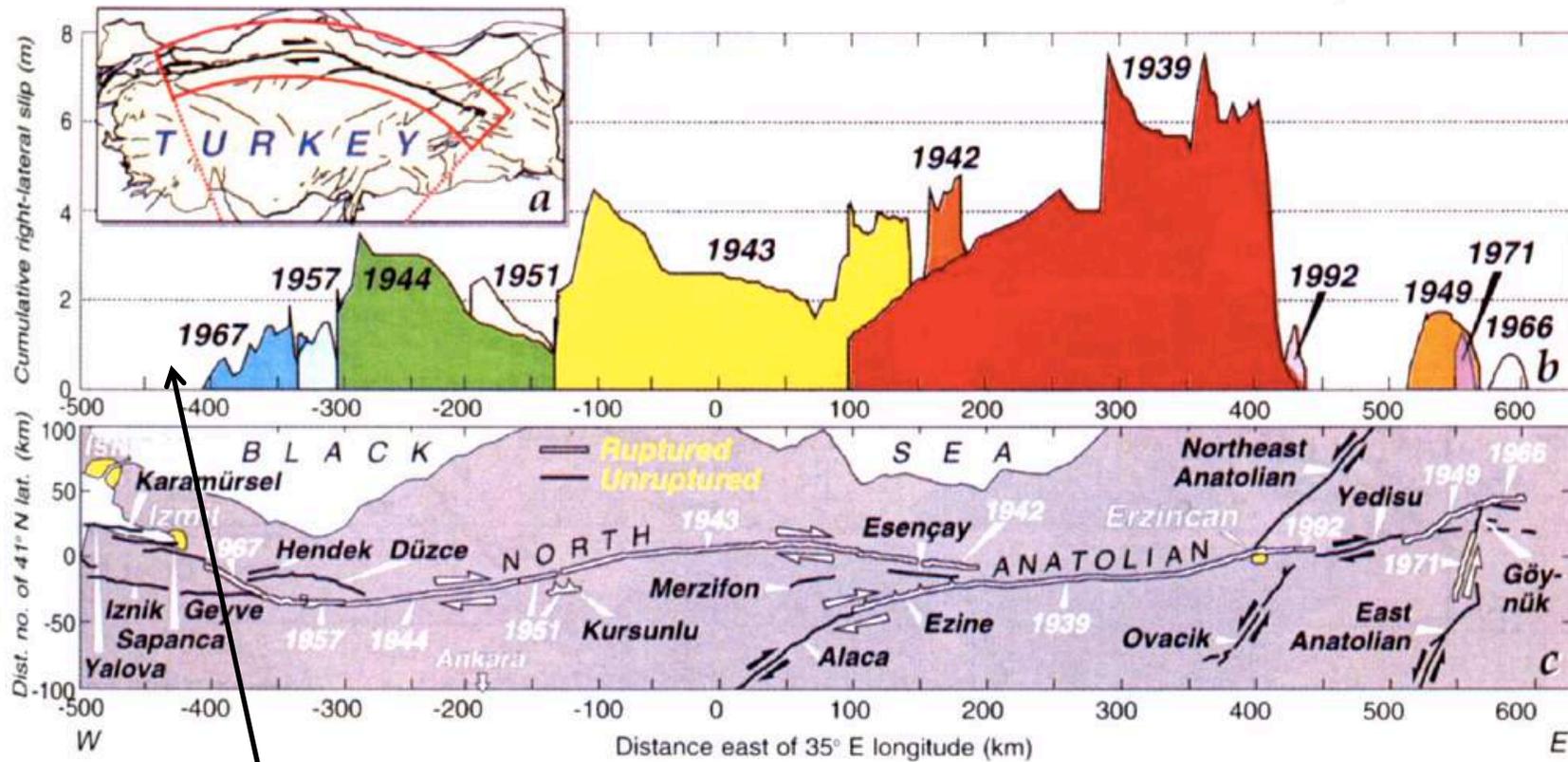


Processed: Tue Sep 28, 2004 10:33:44 AM PDT, -- NOT REVIEWED BY HUMAN

| PERCEIVED SHAKING | Not felt | Weak | Light | Moderate | Strong | Very strong | Severe | Violent | Extreme |
|------------------------|----------|---------|---------|------------|--------|-------------|----------------|---------|------------|
| POTENTIAL DAMAGE | none | none | none | Very light | Light | Moderate | Moderate/Heavy | Heavy | Very Heavy |
| PEAK ACC.(%g) | <.17 | .17-1.4 | 1.4-3.9 | 3.9-9.2 | 9.2-18 | 18-34 | 34-65 | 65-124 | >124 |
| PEAK VEL.(cm/s) | <0.1 | 0.1-1.1 | 1.1-3.4 | 3.4-8.1 | 8.1-18 | 18-31 | 31-60 | 60-110 | >110 |
| INSTRUMENTAL INTENSITY | I | II-III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X+ |

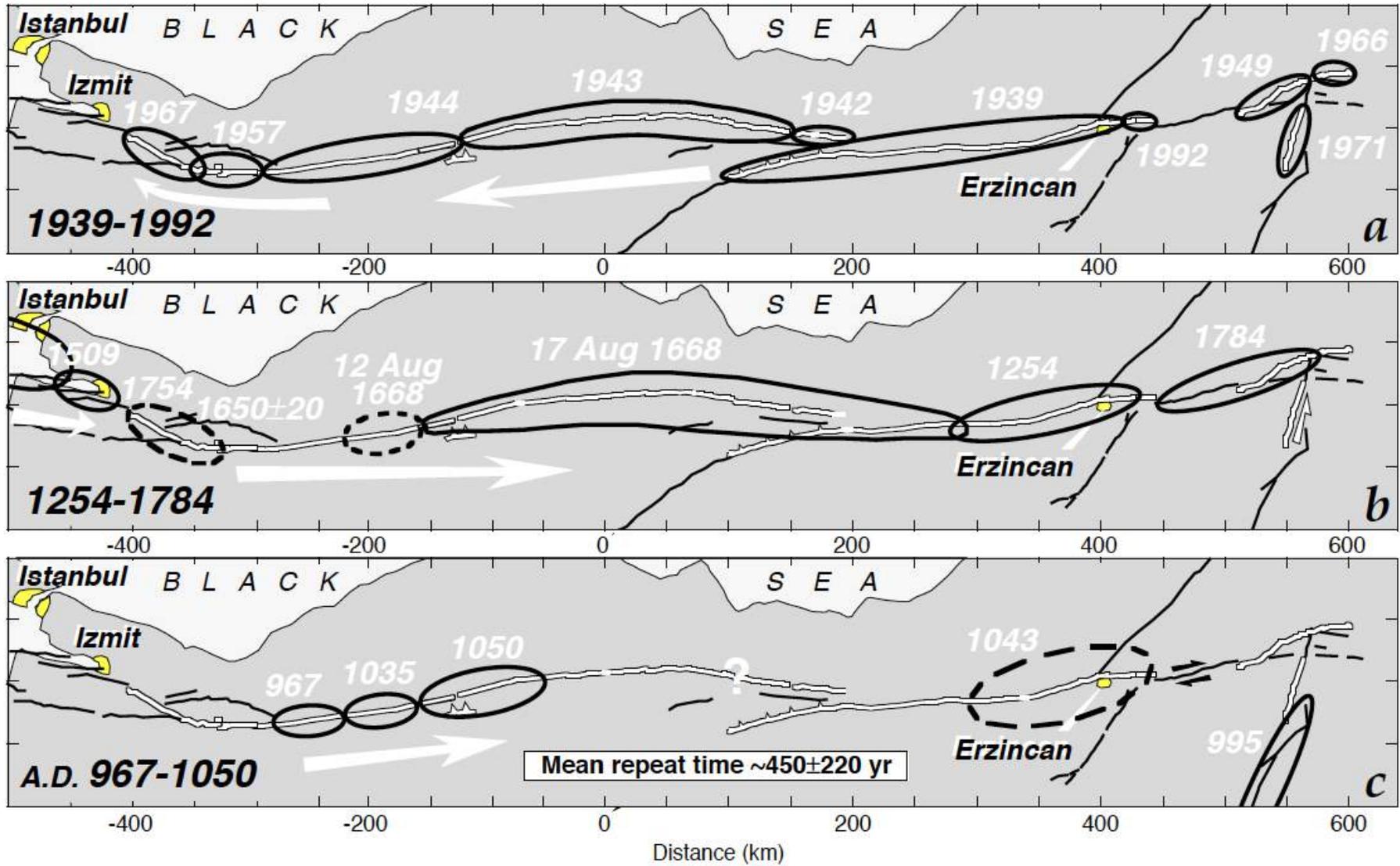


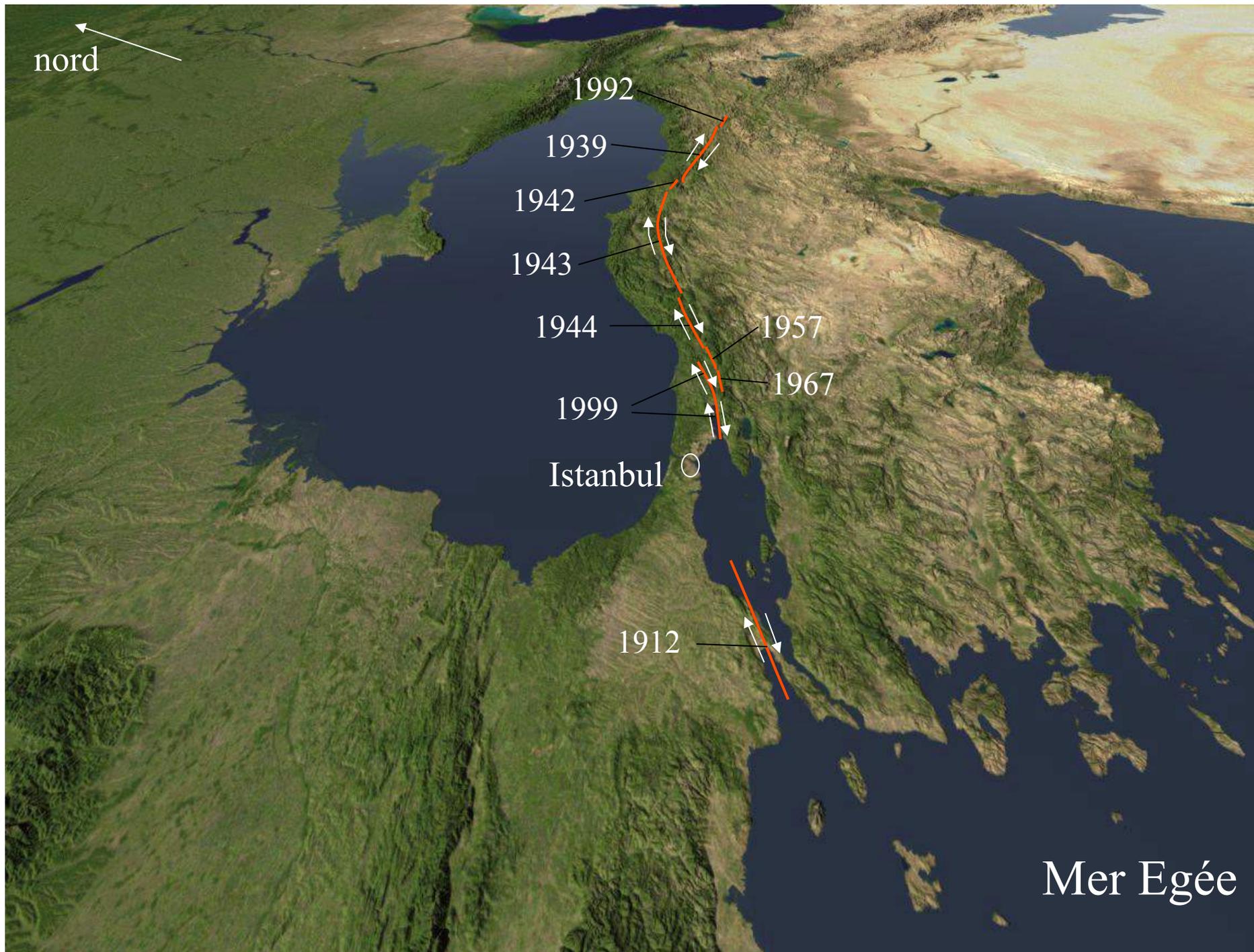
Glissement accumulé au cours de la dernière séquence de séismes en Turquie (avant Le séisme d'Izmit de 1999, Mw 7.6, en fonction de la position sur la faille anatolienne



Izmit, 1999 Mw 7.6

Séries de séismes progressifs sur la faille nord- Anatolienne (Turquie)





Changement cumulatif des contraintes sur la faille anatolienne du aux séismes successifs depuis 1939 jusqu'en 1997

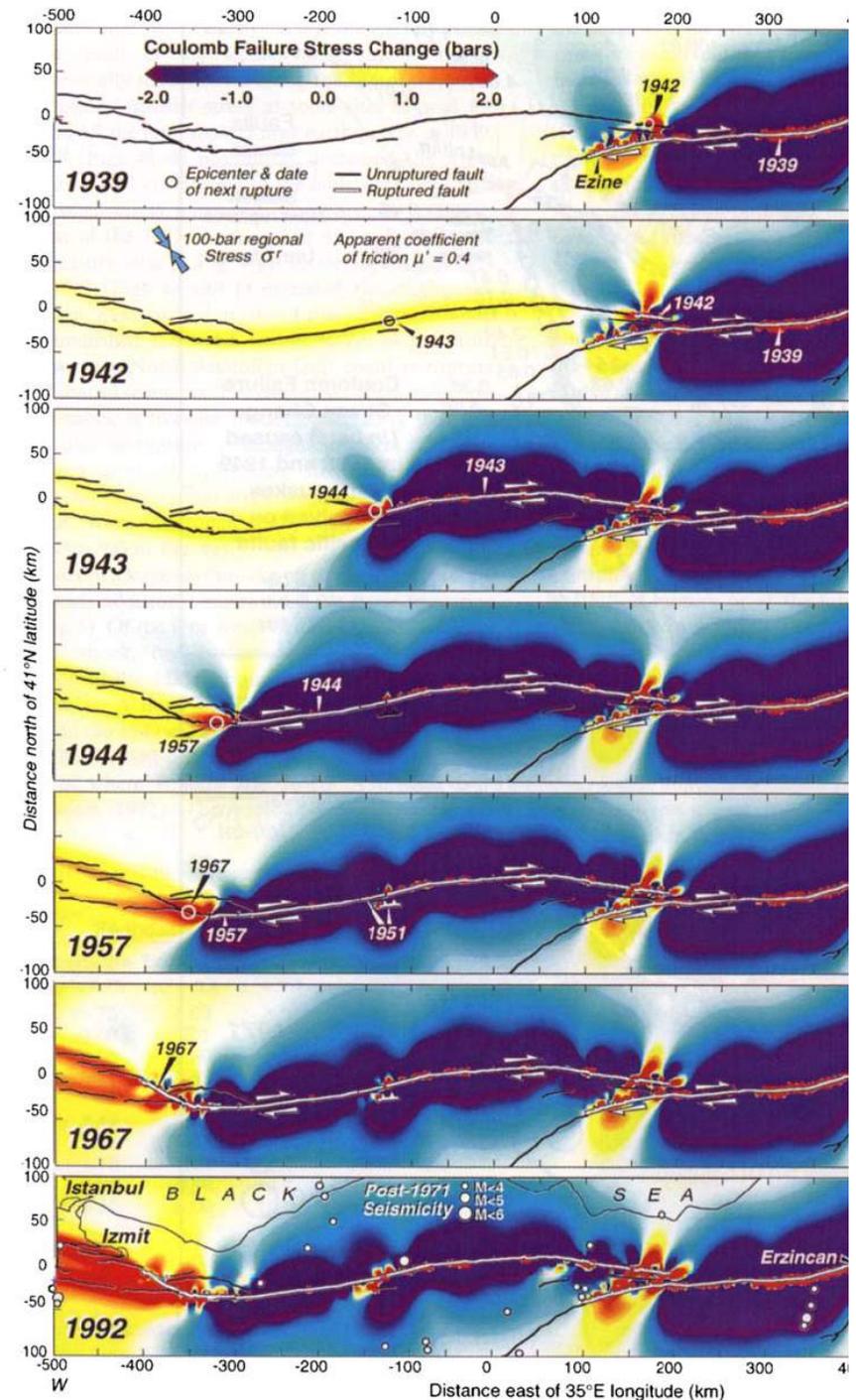
Une rupture se produit lorsque la contrainte de Coulomb C_f dépasse un certain seuil:

$$C_f = \tau_\beta + \mu(\sigma_\beta + p)$$

Coef. de friction μ
 Pression interstitielle p
 Contrainte normale σ_β
 Contrainte en cisaillement sur la faille τ_β

Contrainte en cisaillement sur la faille

Stein et al., 1997

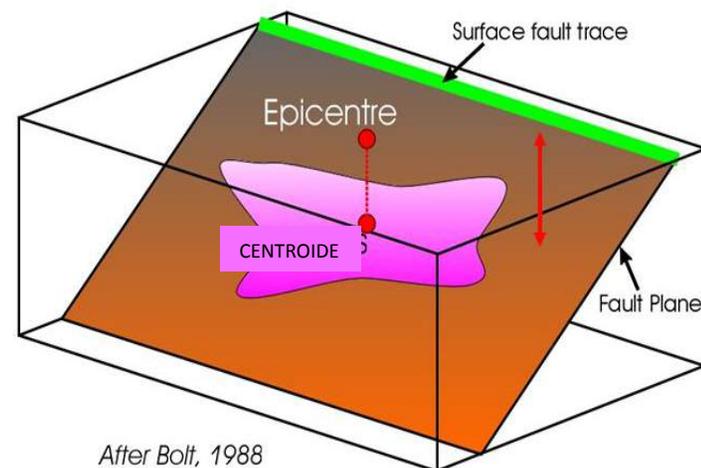
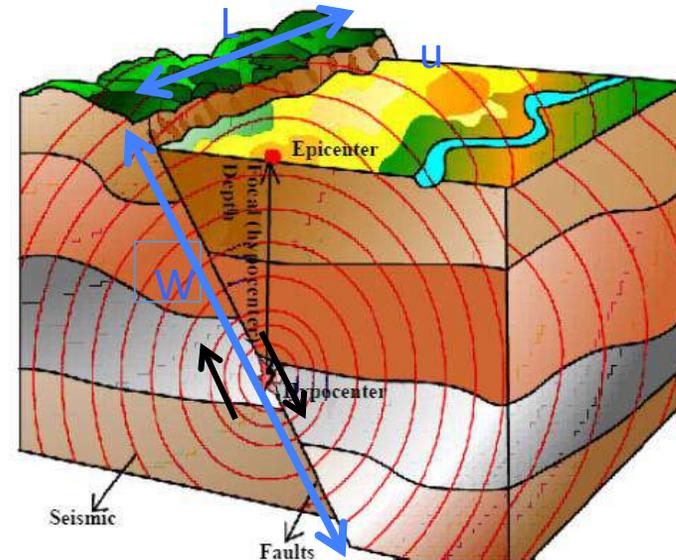


"Quantification" des séismes

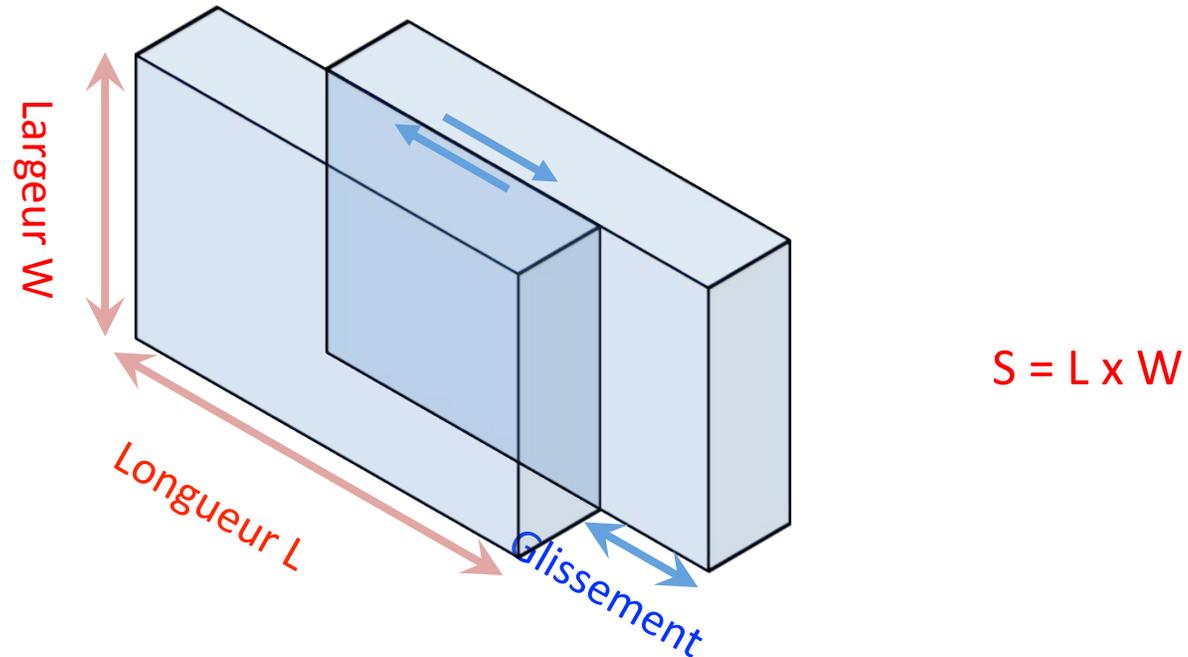
Hypocentre et centroïde

Les séismes se produisent sur des plans de failles, et l'énergie dégagée est proportionnelle à la surface $S = L \times W$ de la rupture, ainsi qu'au déplacement u final.

- ◆ *Hypocentre ou foyer*
 - ◆ Point d'initiation de la rupture
- ◆ *Epicentre:*
 - Projection de l'hypocentre à la surface de la terre
- ◆ Pour les séismes de faible magnitude ($L, W < \text{qqes km}; M < \sim 6-7$), vu de loin: point source
- ◆ Pour les forts séismes on ne peut pas négliger l'étendue spatiale et temporelle de la source, on définit le "centroïde" = barycentre de la rupture en temps et espace



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



Potentiel = surface * (glissement moyen)

Moment sismique (M_0) = potentiel * module de cisaillement

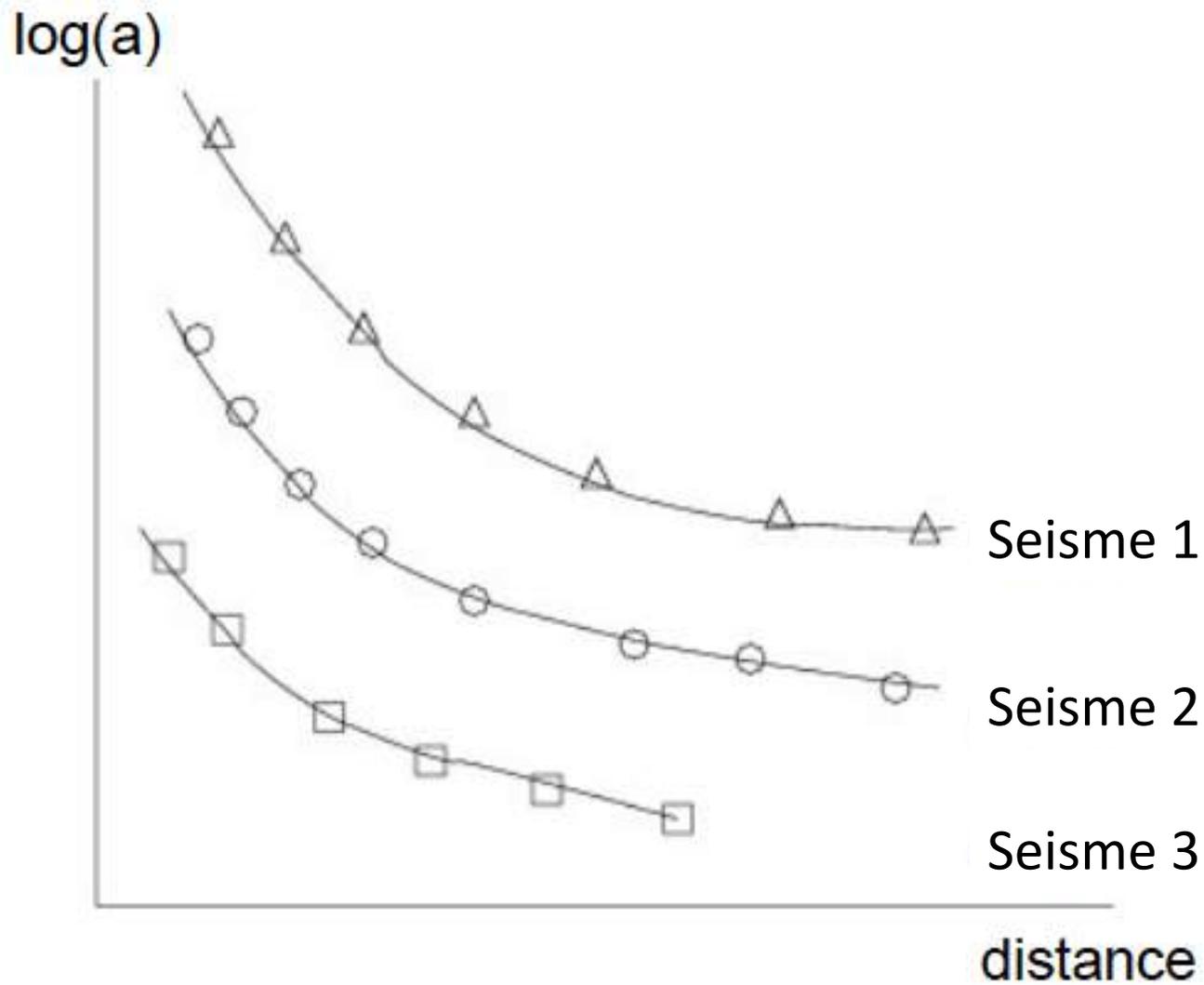
$$\text{Moment Magnitude} = \\ M_w = 2/3 * \log_{10}(M_0) - 10.7$$

Autres définitions de la magnitude d'un séisme

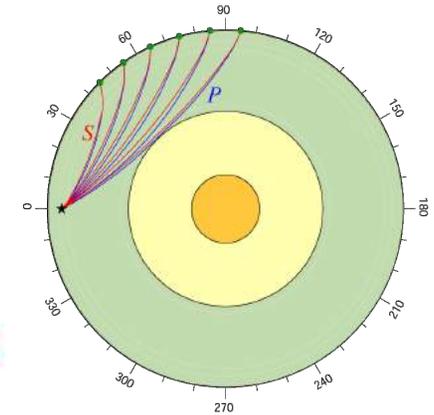
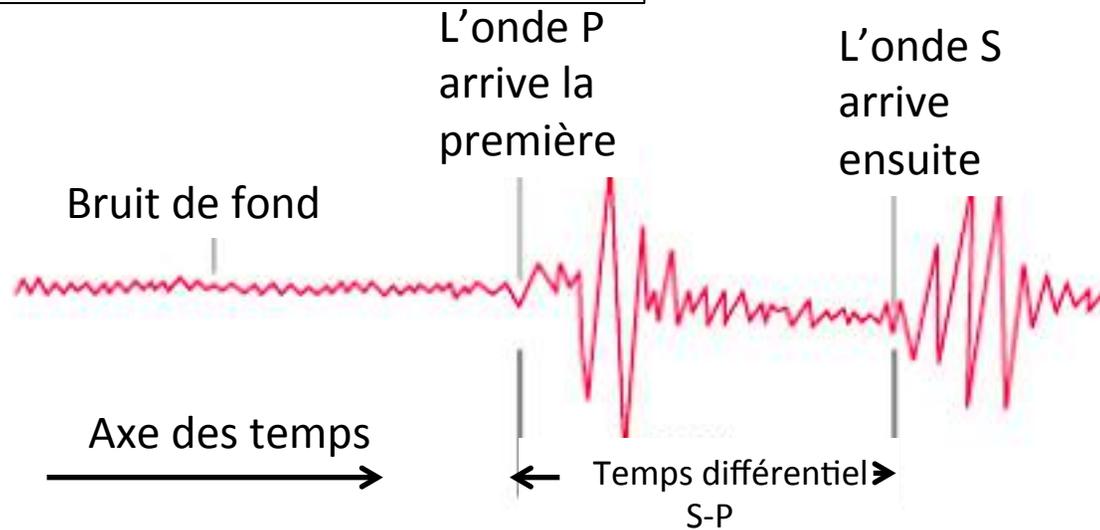
- M_L : Magnitude "locale"
 - La **vraie** magnitude de Richter
 - Valable pour des distances < 1000 km
- m_b : Magnitude "des ondes de volume"
 - > Mesurée à partir de l'amplitude des ondes P
 - > Sature pour $m_b > 7$
- M_s : Magnitude "des ondes de surface"
 - > mesurée à partir de l'amplitude des ondes de surface à une période de 20 s
 - > Sature pour $M_s > \sim 8.0$

Principe: Décroissance de l'amplitude de l'onde considérée en fonction de la distance

Décroissance de l'amplitude des vibrations avec la distance



Détermination de la distance épicentrale D



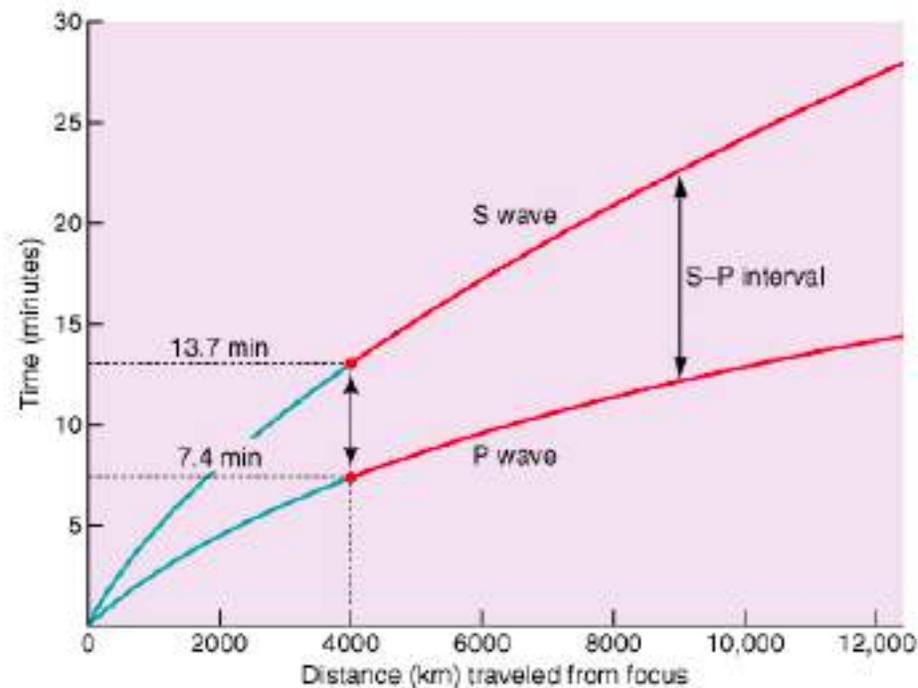
α = vitesse de propagation des ondes P

β = vitesse de propagation des ondes S

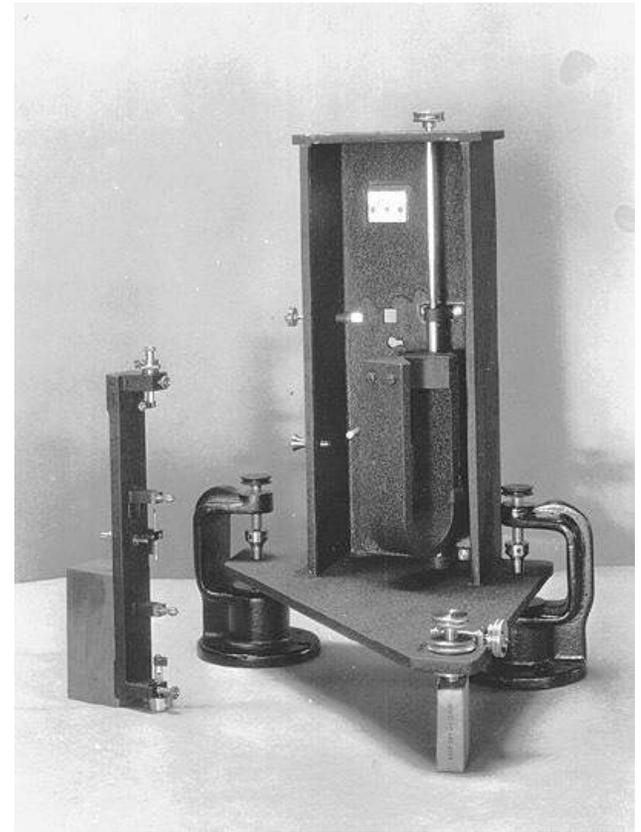
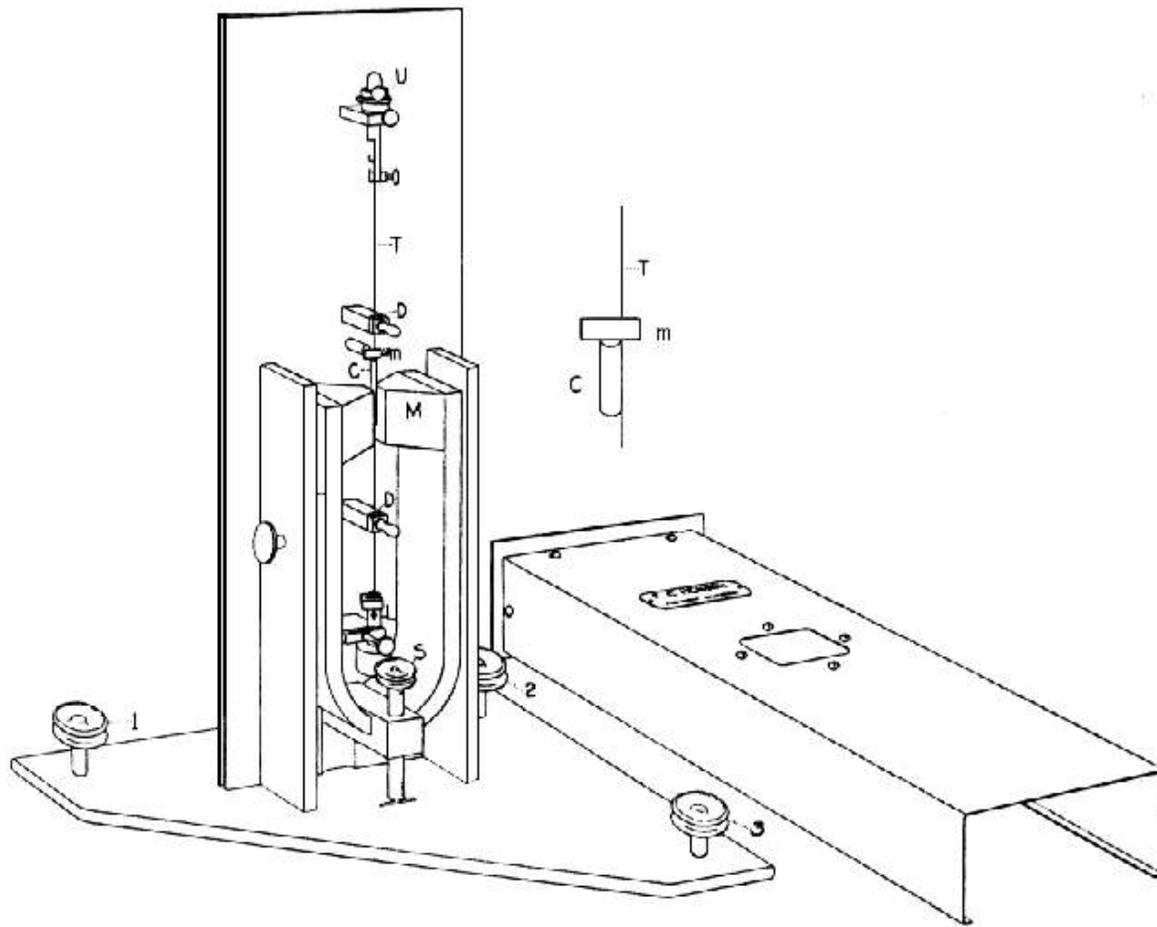
$$t_{S-P} = \frac{D}{\beta} - \frac{D}{\alpha}$$

D'où la distance:

$$D = t_{S-P} \alpha \beta / (\alpha - \beta)$$



Sismomètre de Wood Anderson



Rotation d'une petite masse inertielle S fixée sur un fil métallique fin T sous tension amorti par des aimants M

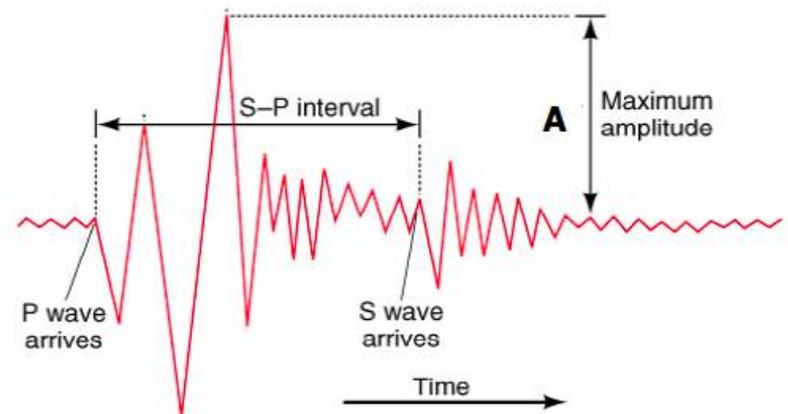
On envoie un faisceau lumineux qui se réfléchit sur un miroir attaché à la masse et est enregistré sur papier photographique

Aujourd'hui en Californie, pour mesurer la magnitude de Richter, on utilise des instruments modernes qui ont été calibrés par rapport aux sismomètres de Wood-Anderson

- On mesure l'amplitude maximum sur le sismogramme
- On applique une correction de distance
- On obtient ce qu'on appelle la "magnitude locale" M_L

$$M_L = \log_{10} A - (\text{correction de distance})$$

$$M_L = \log_{10} A - 2.48 + 2.76 \log \Delta$$

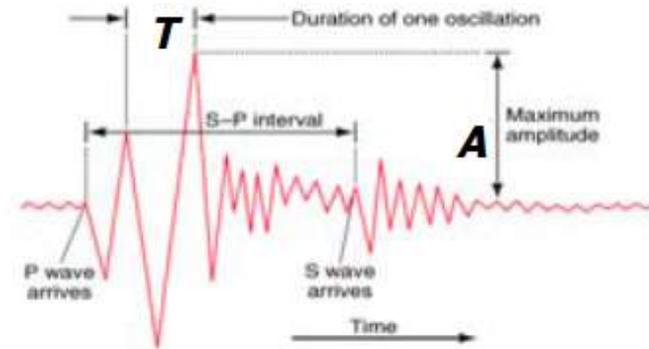


M_L est valable pour des distances < 1000 km
Et pour $M_L < \sim 7$ (saturation de l'échelle pour les plus forts séismes)

II- Magnitude basée sur les ondes de volume m_b :

Conçue pour les séismes de profondeur intermédiaire et grande:

On mesure l'amplitude de l'onde P à des distances télésismiques



$$m_b = \log_{10} A - \log_{10} T + Q$$

A amplitude

T période

Q facteur de correction pour la profondeur et la distance épacentrale

-> Saturation au delà de $m_b \sim 7$

*Autres échelles de magnitude basées sur les observations
télésismiques :*

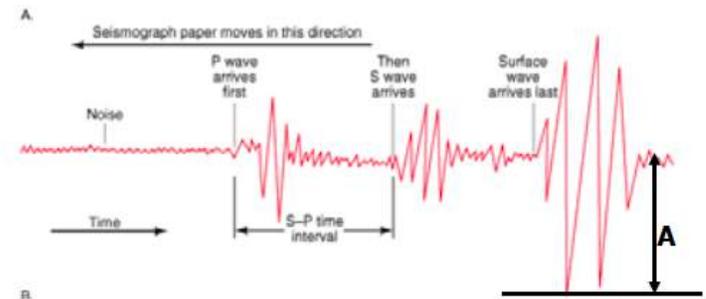
I- Magnitude basée sur les ondes de surface: M_s

A l'origine: On mesure l'amplitude des ondes de surface amplitude à 20 s, à distances télésismiques ($> \sim 3000$ km)

->Utilisée pour les séismes peu profonds

-> Définition moderne:

$$M_s = \log_{10} (A / T_{\max}) + 1.66 \log_{10} \Delta + 3.3$$



A= amplitude maximale sur la composante verticale

Δ = distance epicentrale angulaire

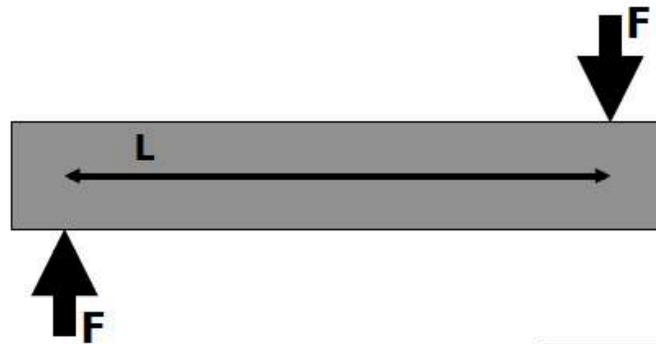
Echelle plus robuste que m_b , mais sature au delà de $M_s \sim 8$

Moment sismique: proportionnel à l'énergie élastique dégagée au cours du séisme

$$M_0 = \mu \cdot \underbrace{L \cdot W \cdot u}_{\text{volume}} = \mu \cdot S \cdot u$$

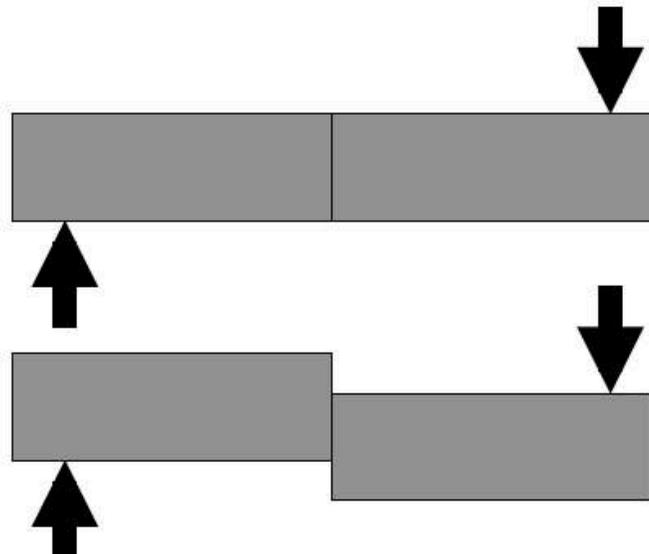
Rigidité du milieu
Pascals = force/surface

x volume = Force x longueur = moment



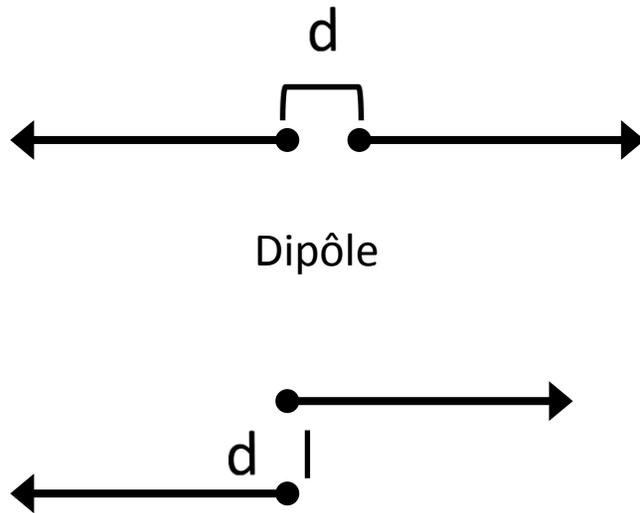
Unités= N-m

ou dyne-cm ($\times 10^7$)

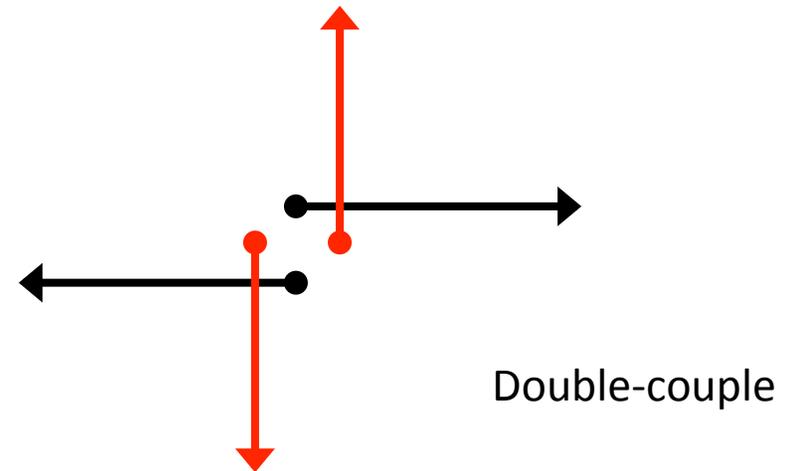


Source sismique (cisaillement sur une faille) représentée en première approximation par un "double couple" de forces

Représentation d'une source sismique (ponctuelle) par un "double couple" de forces



Forces internes doivent agir en directions opposées, et être égales en valeur absolue pour conserver le moment cinétique



Produit exactement le même champ de déplacements qu'un glissement sur une faille dans la terre (Burridge and Knopoff, 1964)

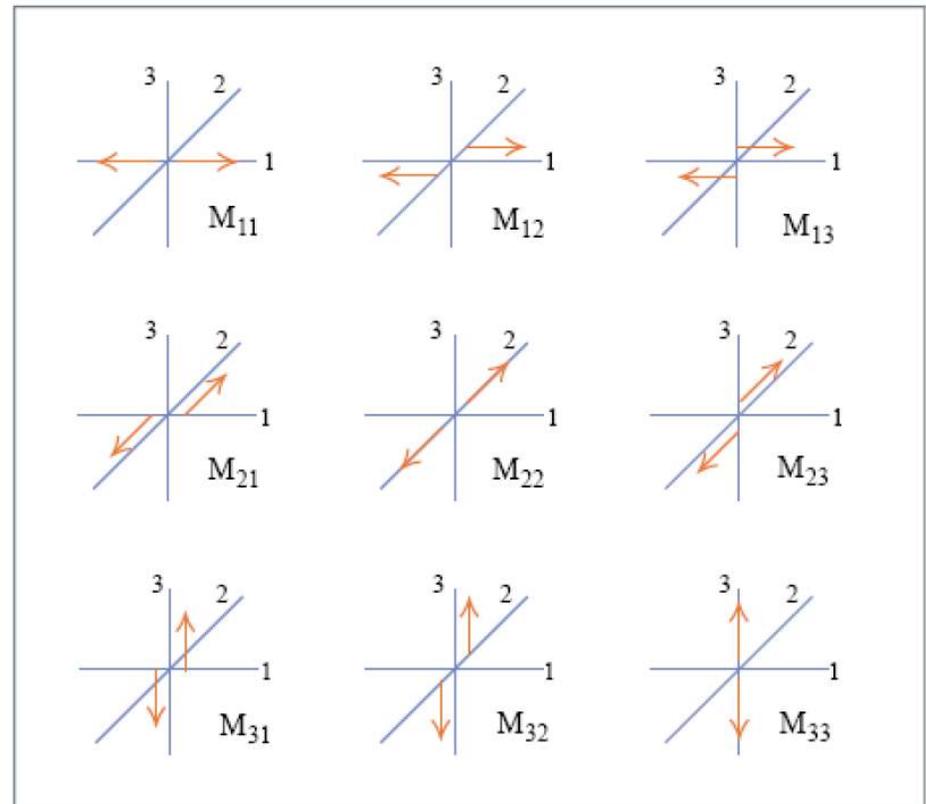
On définit le couple de forces M_{ij} (référentiel cartésien)
Orientation dans la direction i
Séparées dans la direction j

- On définit ainsi le tenseur des moments:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}$$

Conservation du moment cinétique
 Implique que M est symétrique:

$$M_{ij} = M_{ji}$$



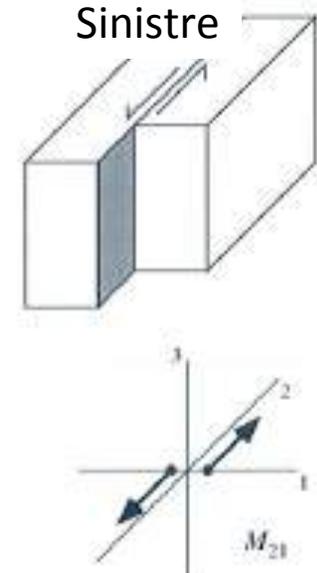
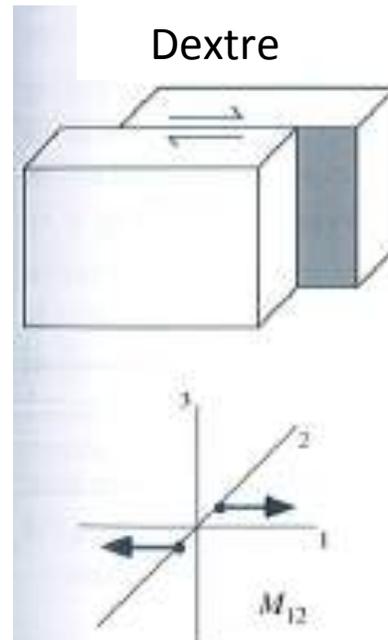
6 éléments indépendants

- Par exemple :
 - Faille verticale, glissement en décrochement dextre dans la direction x_1 :

$$M = \begin{bmatrix} 0 & M_0 & 0 \\ M_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Où M_0 est le moment sismique:

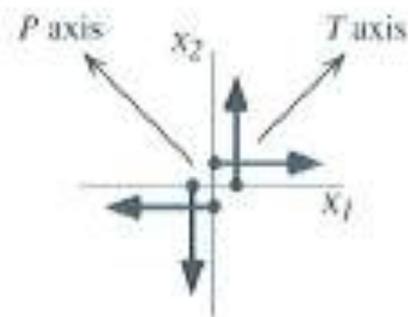
$$M_0 = \mu \cdot S \cdot u$$



Ambiguïté
fondamentale dans
l'interprétation des
données sismologiques

- Tenseur des moments peut être diagonalisé pour obtenir les directions des axes principaux P (axe de compression) et T (axe de tension)

$$M = \begin{bmatrix} 0 & M_0 & 0 \\ M_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \longrightarrow \quad M = \begin{bmatrix} M_0 & 0 & 0 \\ 0 & -M_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Systemes de force equivalents

Trace du tenseur est nulle pour un double couple parfait

- Par exemple pour une explosion:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} \end{bmatrix}$$

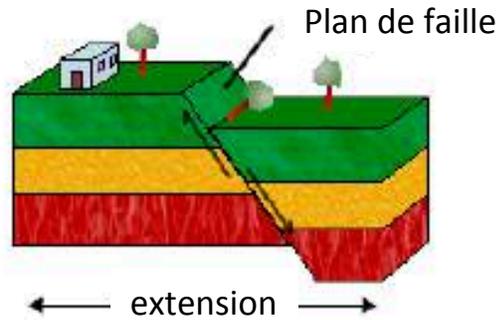
$$M_{11} = M_{22} = M_{33}$$

- Pour une source “mixte” on peut décomposer en une somme de source isotrope et source à trace zéro, elle même décomposée en la somme d’un double couple et d’un CLVD (Compensated linear vector dipole)

Différents types de failles

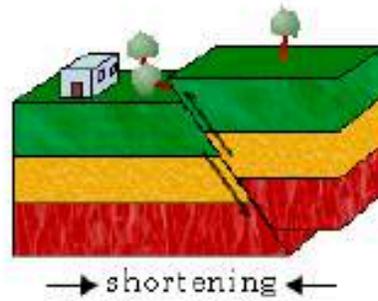
Faille normale:

Dorsales océaniques



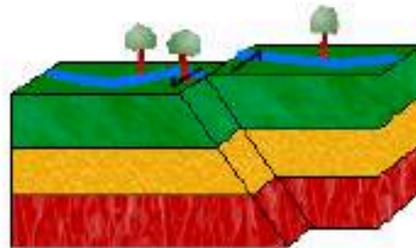
Faille inverse:

Zones de subduction



Faille transformante:

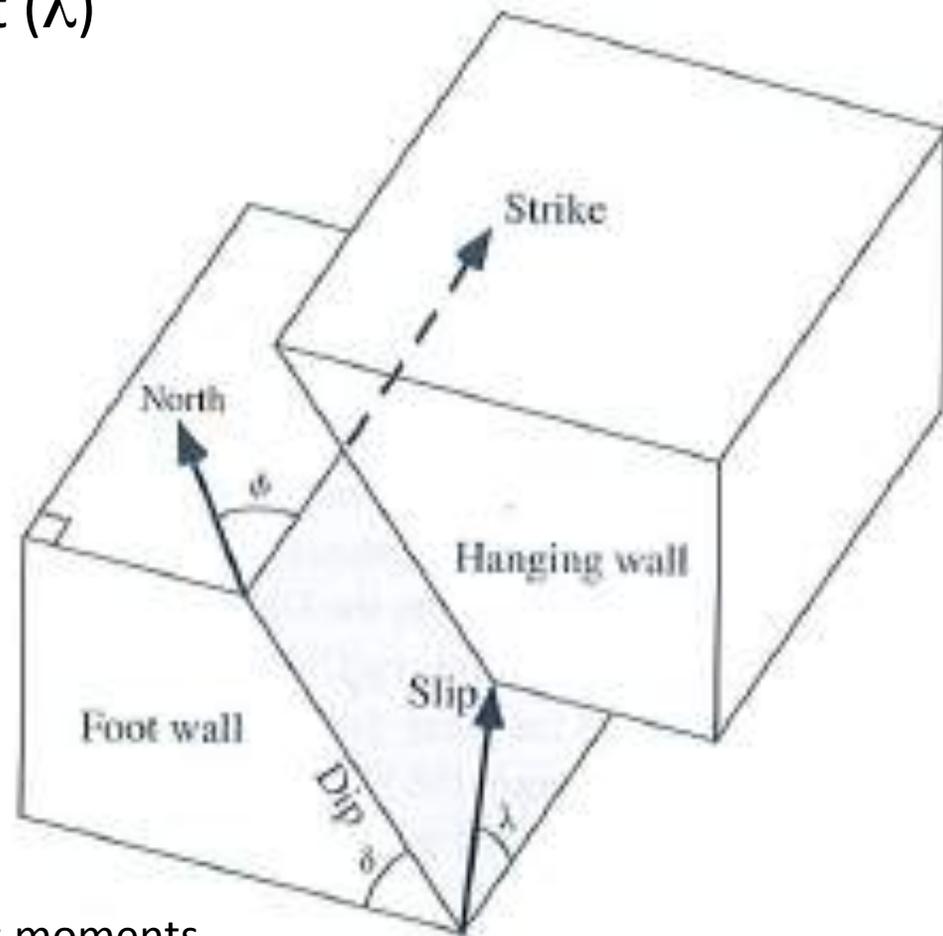
e.g. Faille de San
Andreas, Californie



Géométrie de la faille: définie par 3 angles

- orientation de la trace en surface de la faille par rapport au Nord (ϕ)
- pendage du plan de faille (δ)
- direction du glissement (λ)

Ces trois angles et l'amplitude du glissement définissent le "mécanisme au foyer"



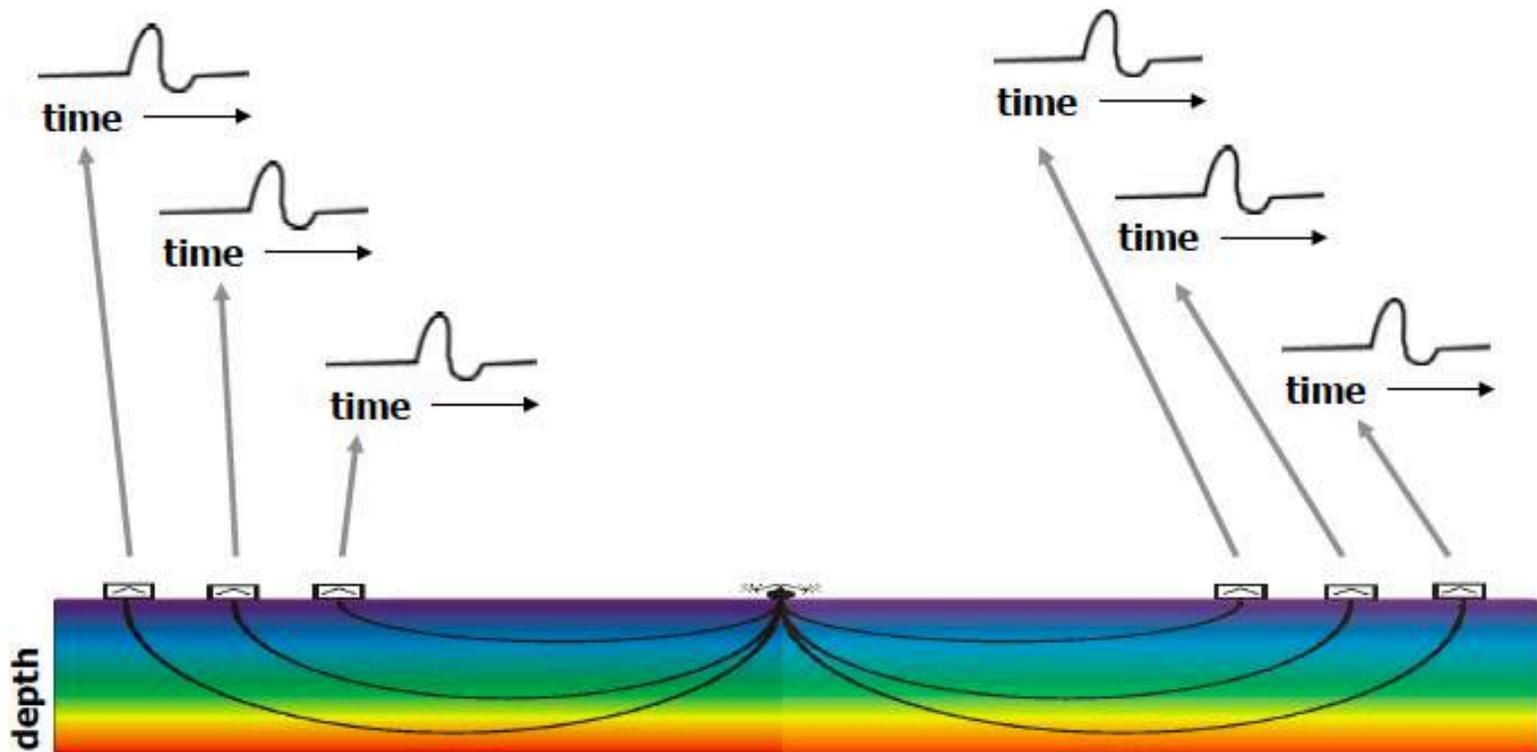
Peut être représenté par un "double couple" de forces -> tenseur des moments

Diagramme de premier mouvement

Le premier mouvement observé dans de nombreuses stations lointaines nous renseigne sur le type de rupture

1- Cas d'une source explosive:

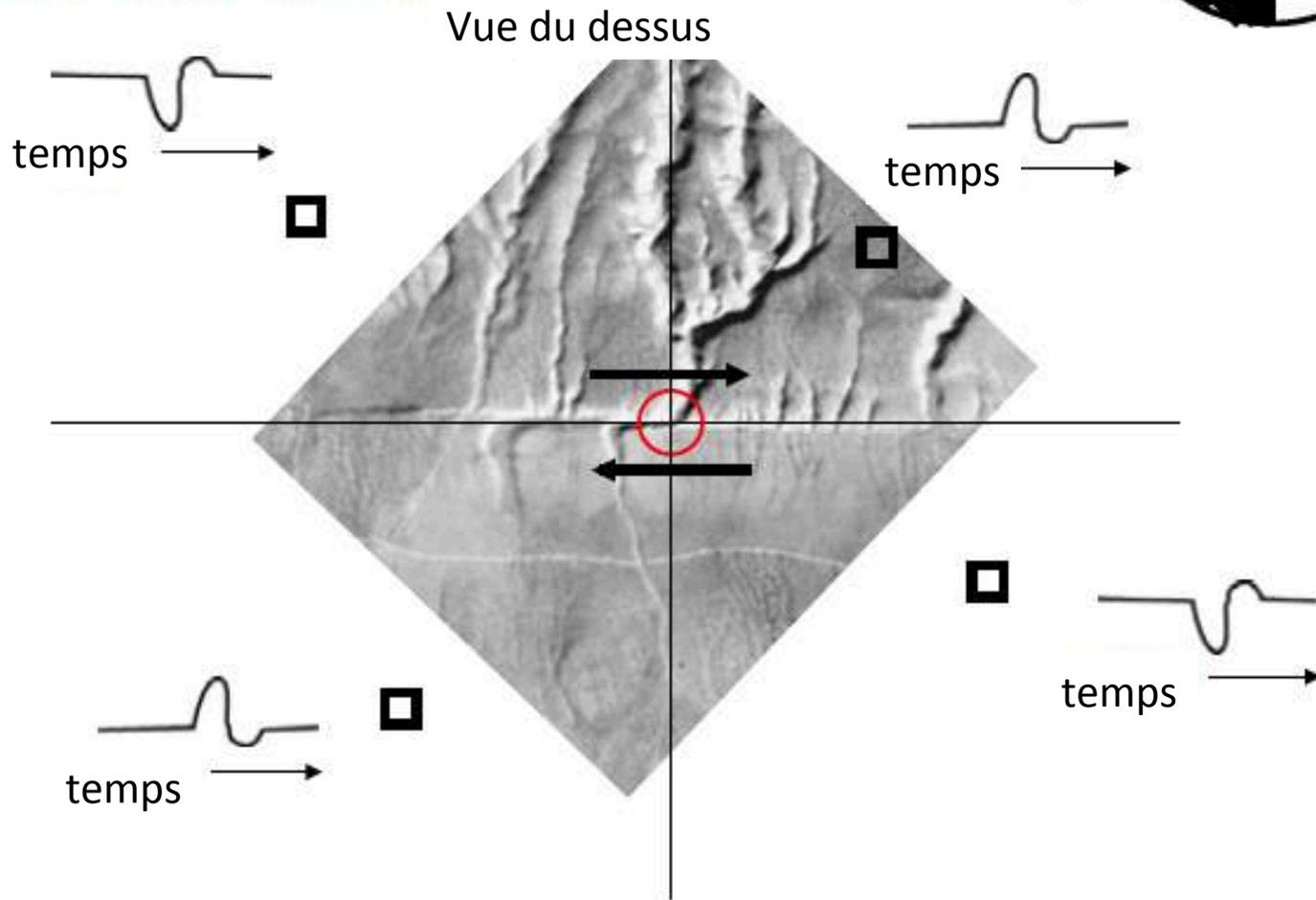
Forme d'onde de l'onde P

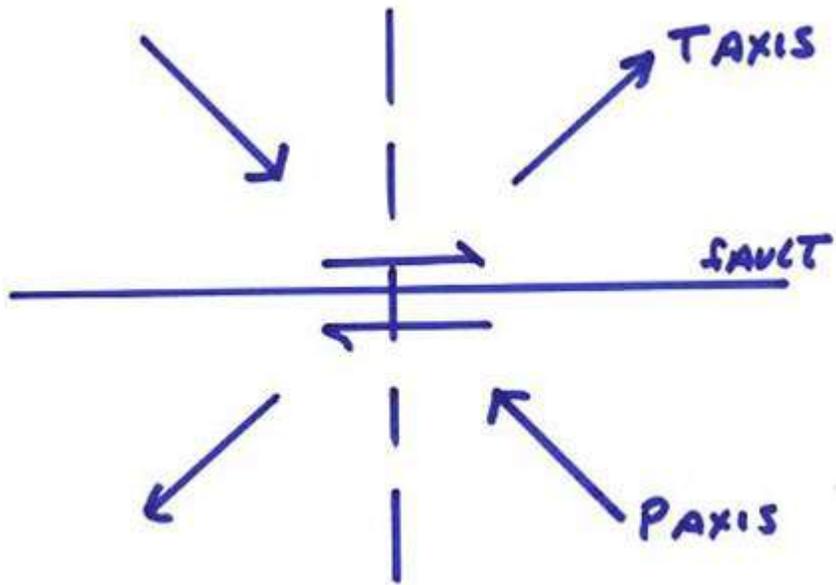


Sur la faille de San Andreas:

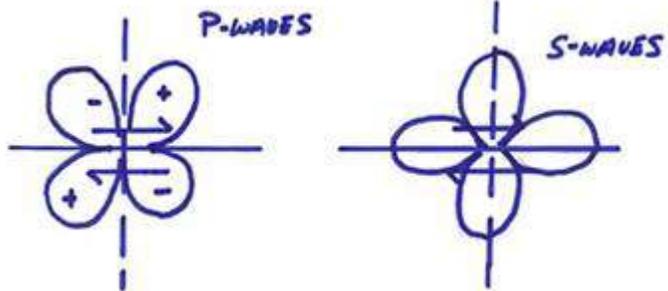
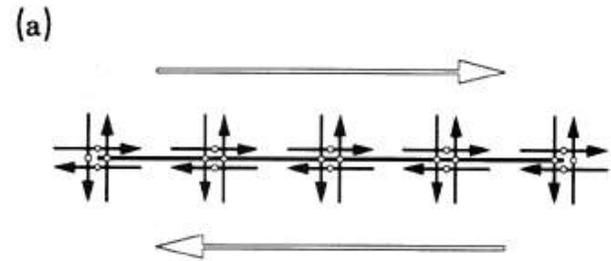
Séisme en décrochement:

Forme d'onde des ondes P:

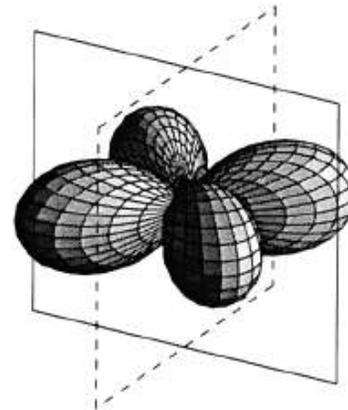




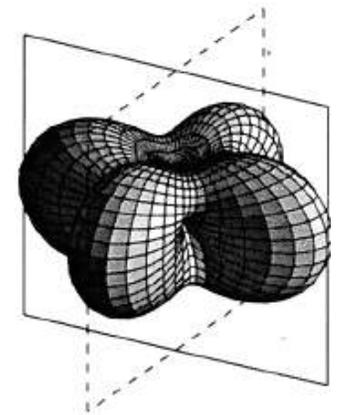
Faïlle verticale, cisaillement horizontal



(b)



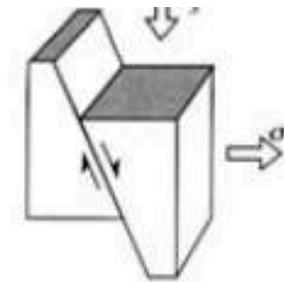
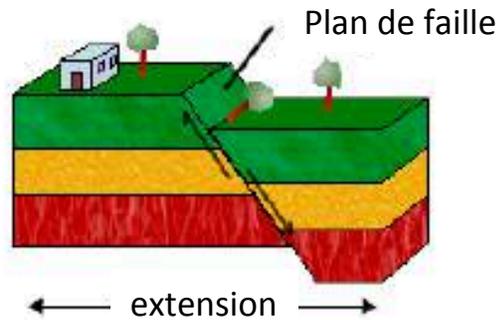
(c)



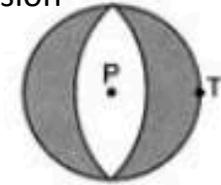
Mécanisme a la source et régime de contraintes

Faille normale:

Dorsales océaniques

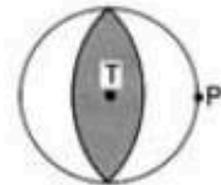
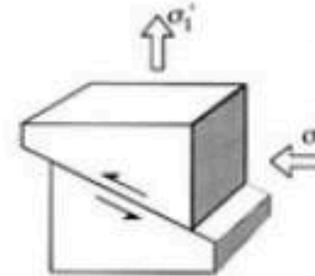
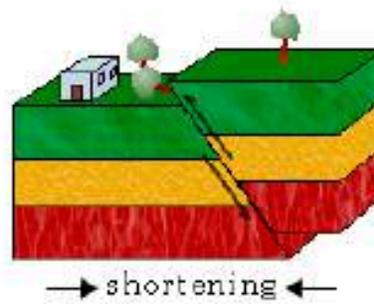


Orientation des axes de compression et de tension



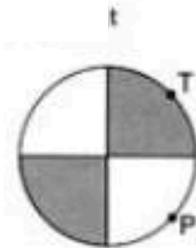
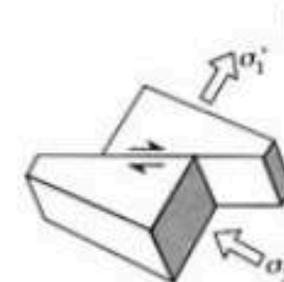
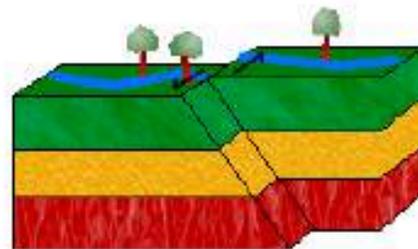
Faille inverse:

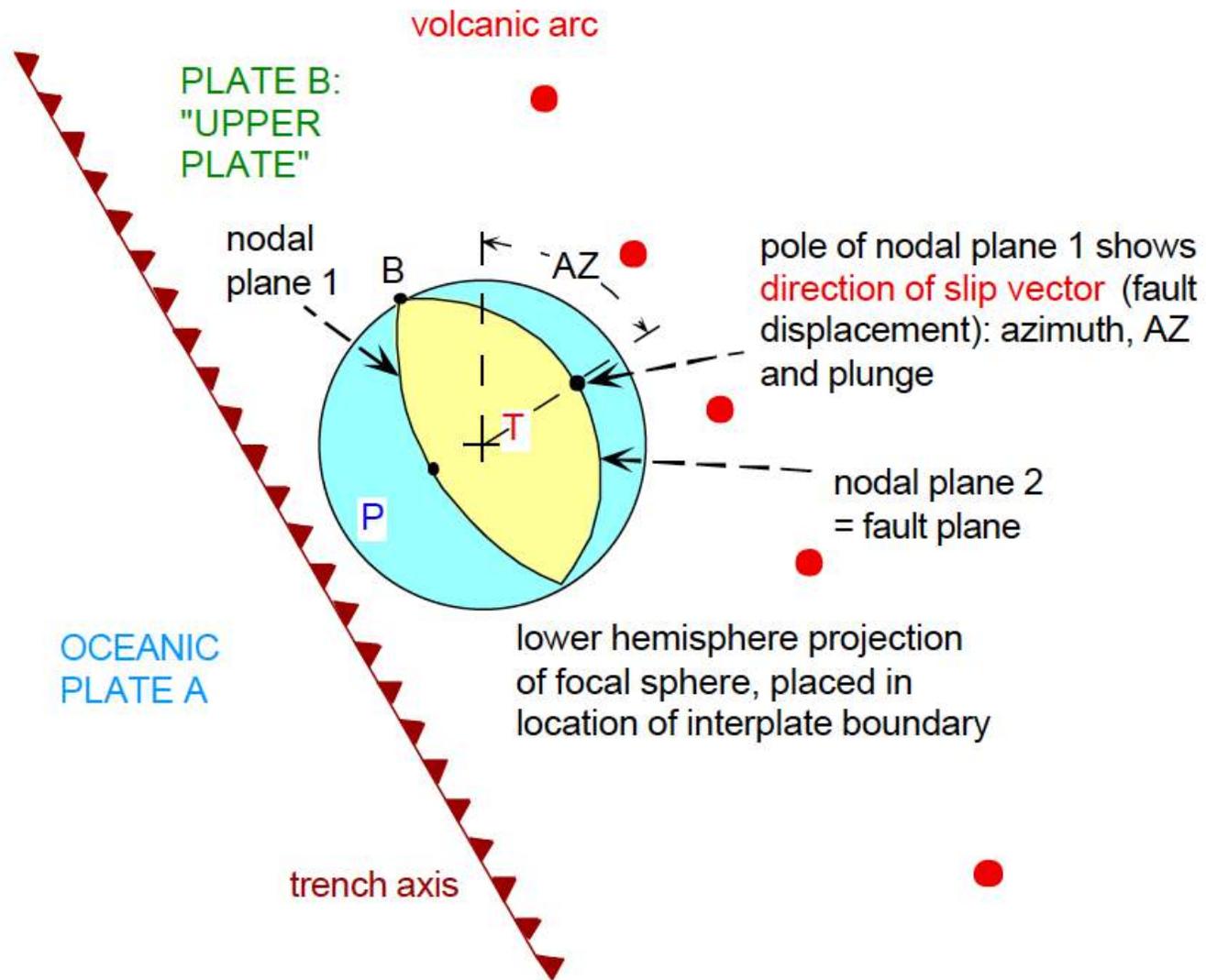
Zones de subduction



Faille transformante:

e.g. Faille de San Andreas, Californie

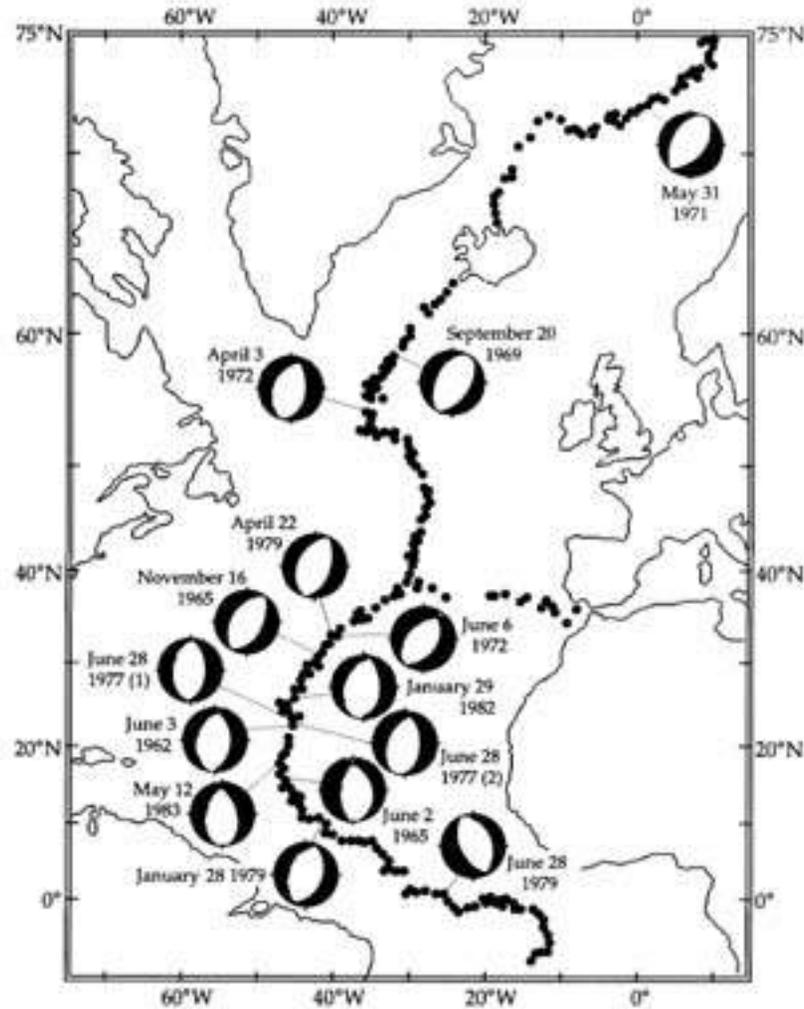




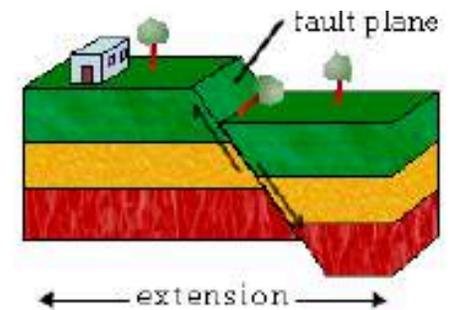
Dorsales
océaniques:

-> régime
d'extension

-> failles normales

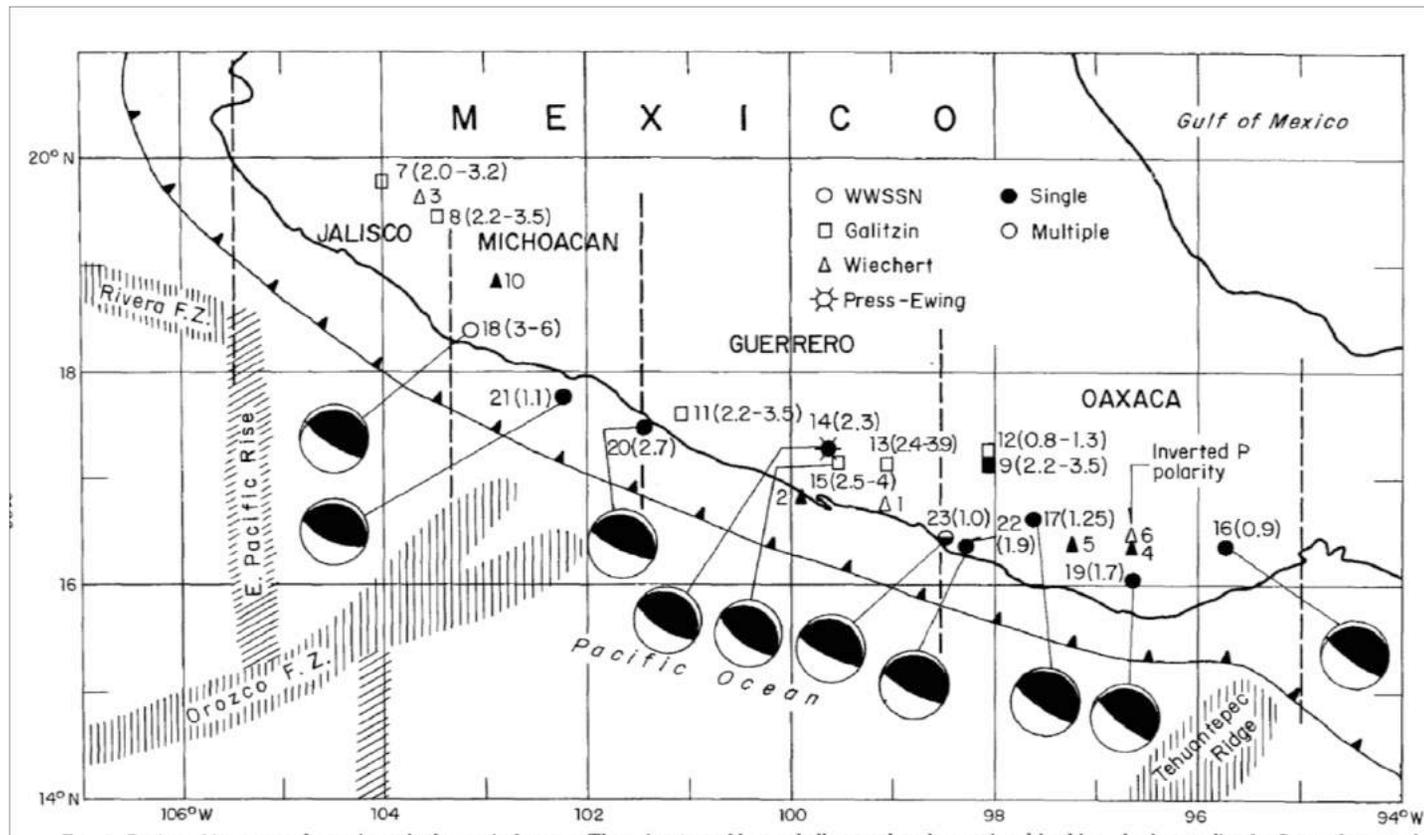
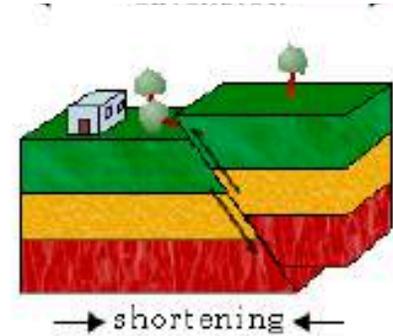


Le long de la dorsale médio-Atlantique



D'après Huang et al., 1986

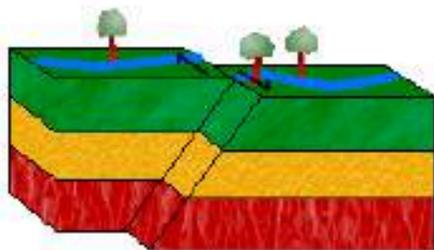
Zones de Subduction :
 Régime de compression
 Failles inverses



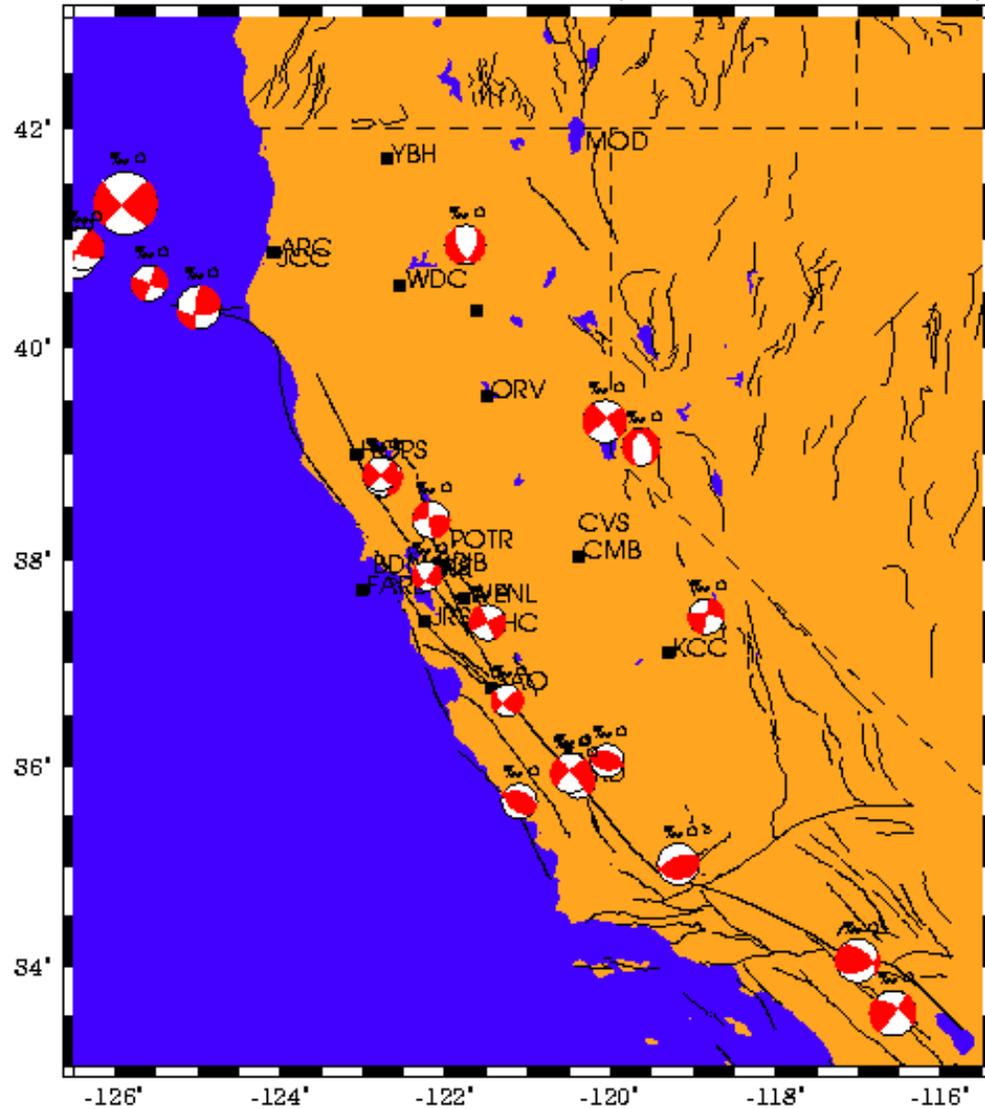
Singh et al., 1984

Californie:

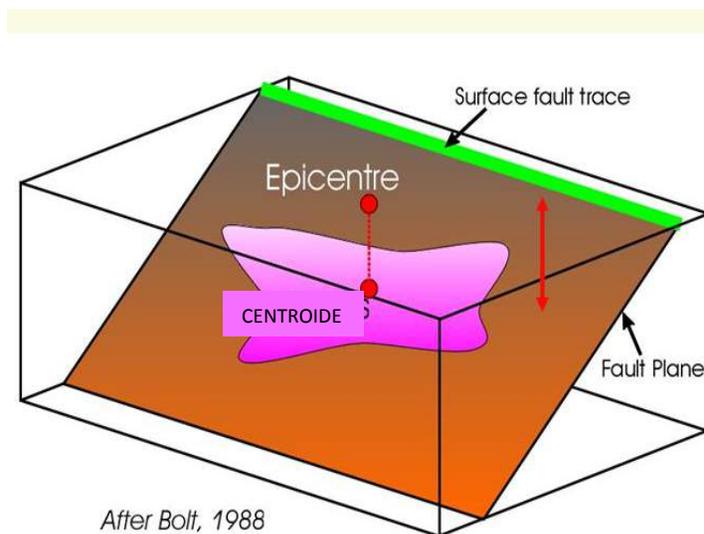
Failles transformantes



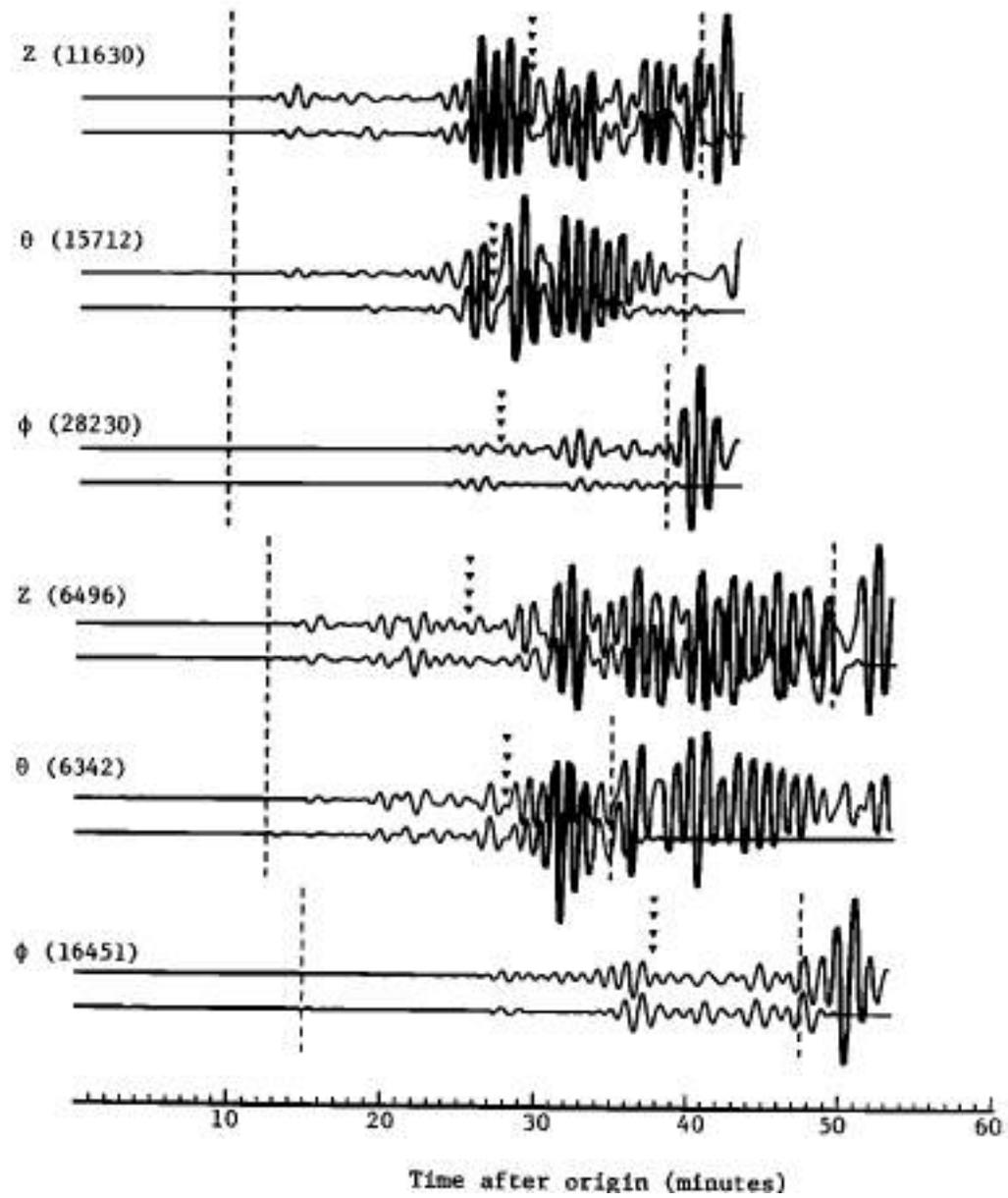
BSL Moment Tensors 2005 (Jan 1 to Dec 31)

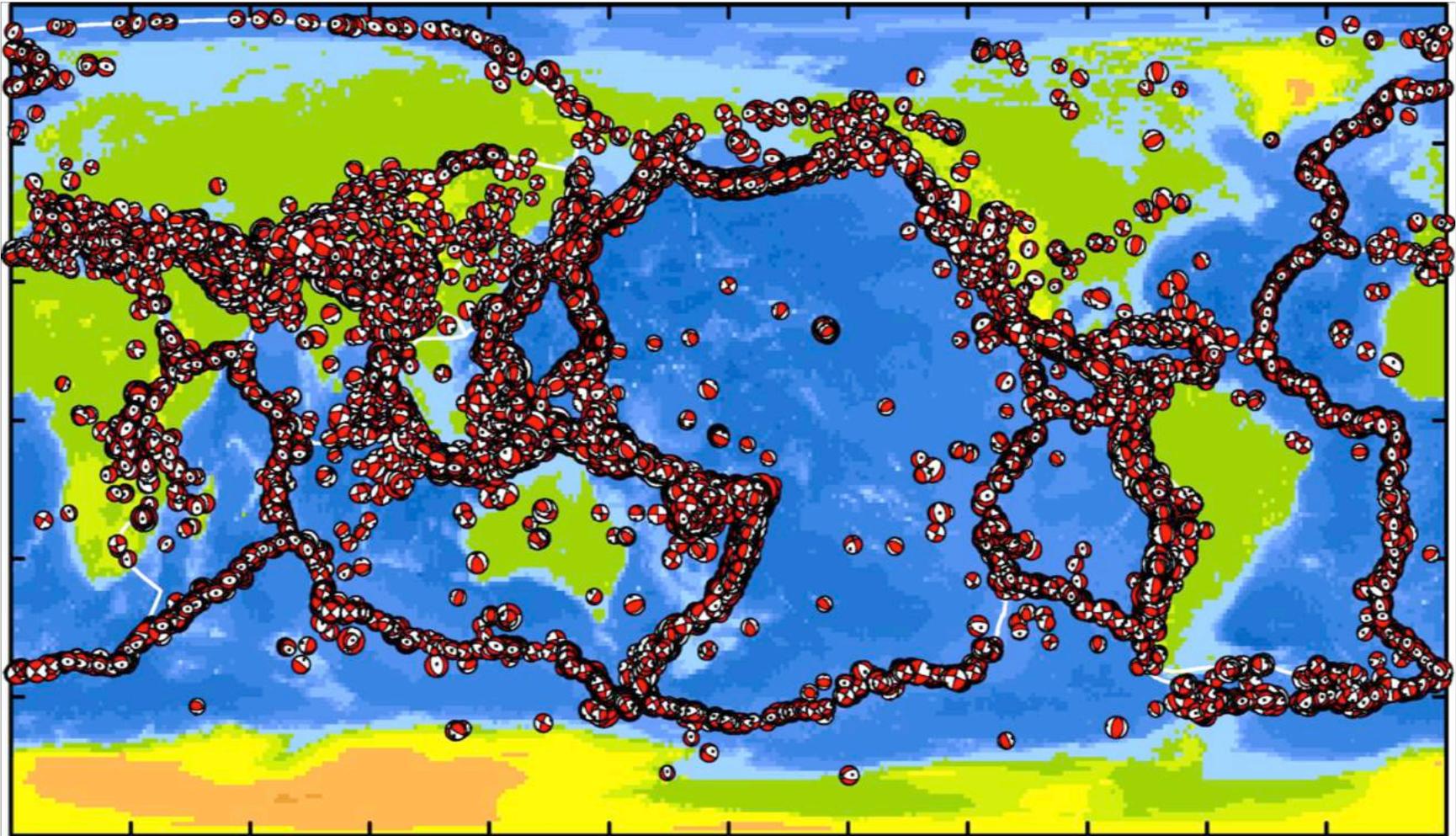


- Détermination du tenseur des moments par la méthode CMT (Centroid Moment Tensor, Dziewonski, Chou and Woodhouse, 1981)
 - Données télésismiques globales large bande
 - Périodes >30 s
 - Centroïde de la source en espace et en temps et tenseur des moments



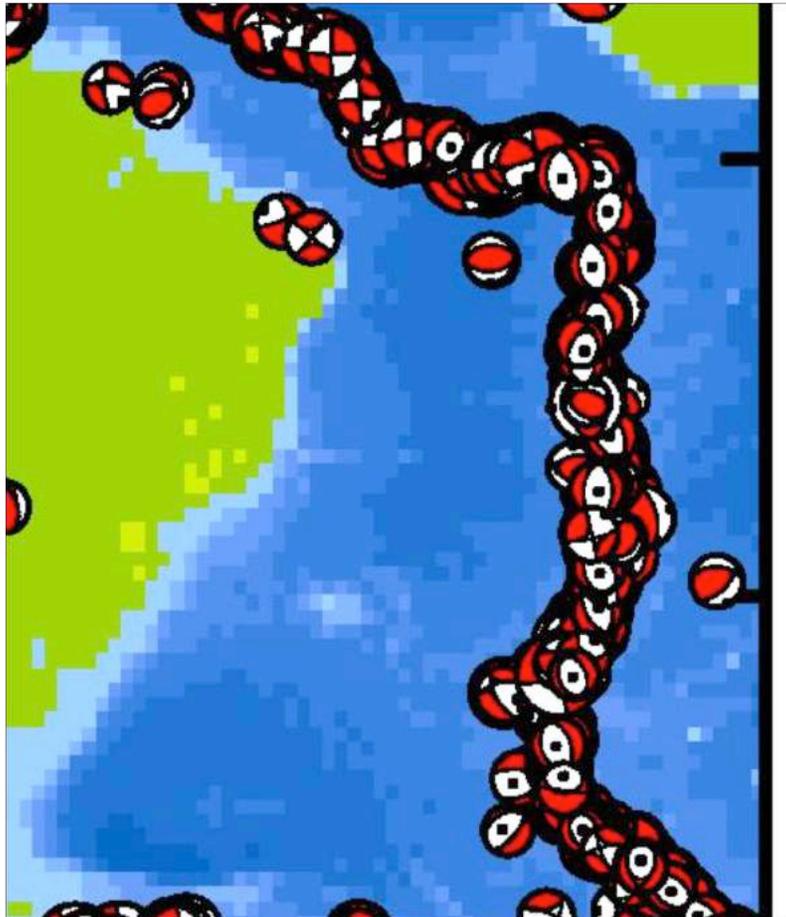
ANMO
 Δ 94.9°
Az 55.4°





Globalcmt.org (courtesy of M. Nettles and G. Ekström)

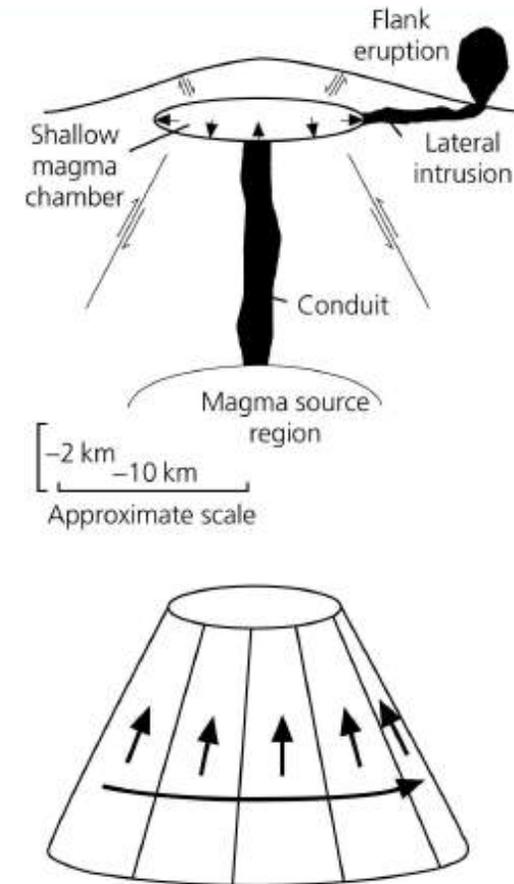
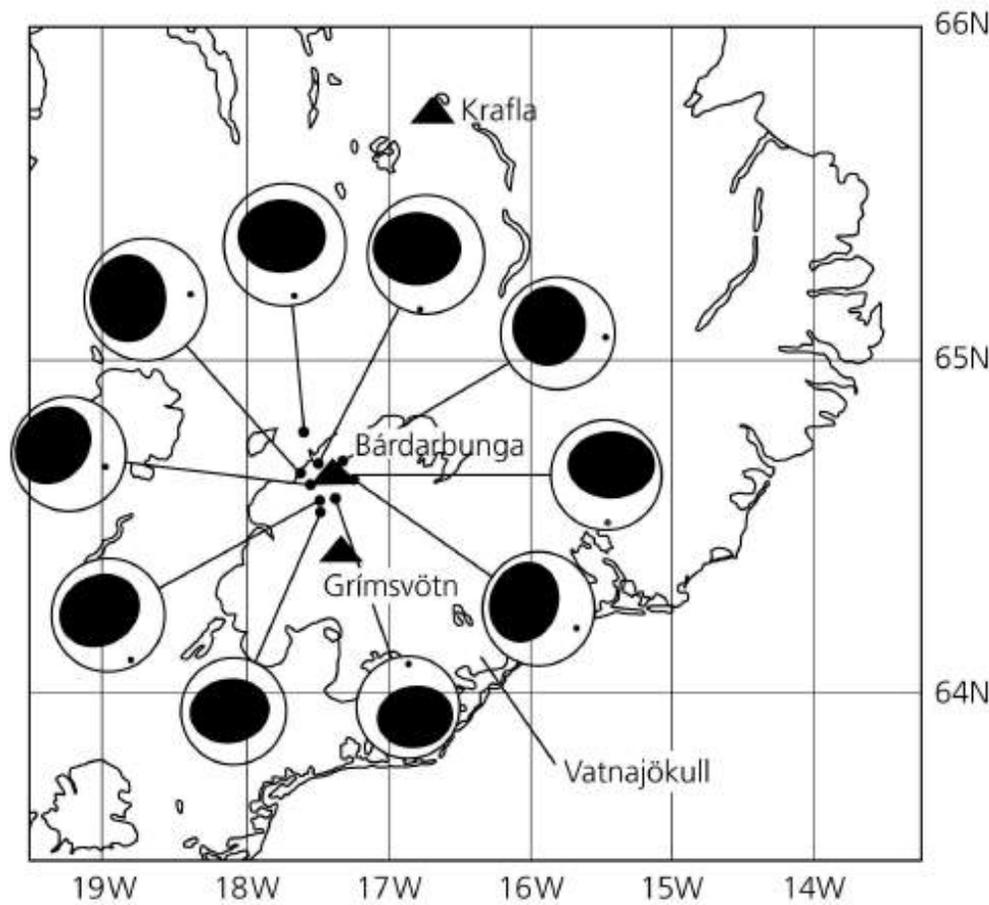
Dorsale médio-atlantique



Zones de subduction de Fiji-Tonga/Indonésie



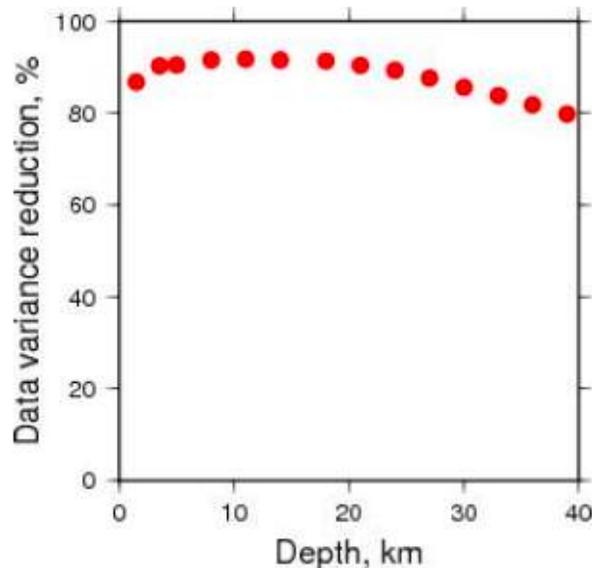
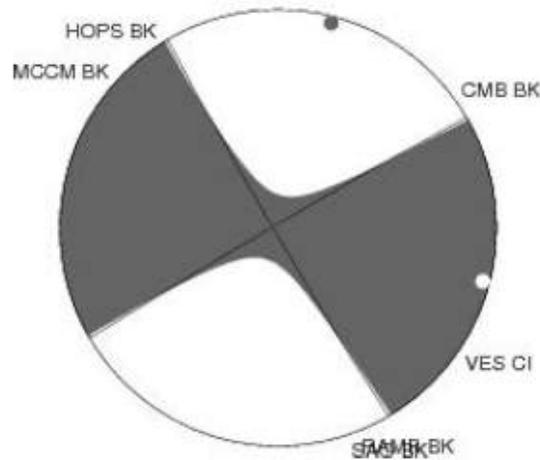
Séismes “volcaniques” près du volcan Bardarbunga, Islande



Détermination du tenseur des moments en temps réel au niveau régional

NCSS Moment Tensor Solution

Solution reviewed by Alex Robson



Hypocentral Location:

Event ID 72906781
 Origin Time 2017/10/10 00:53:18
 Latitude 37.3103
 Longitude -121.6795
 Depth (TT) 7.9 km
 Depth (MT; not authoritative) 11 km

Magnitudes:

Md 4.17 (not authoritative)
 MI 4.39 (not authoritative)
 Mw 4.09 (authoritative)

Principal Axes:

Scale 1.0E+22 Dyne-cm

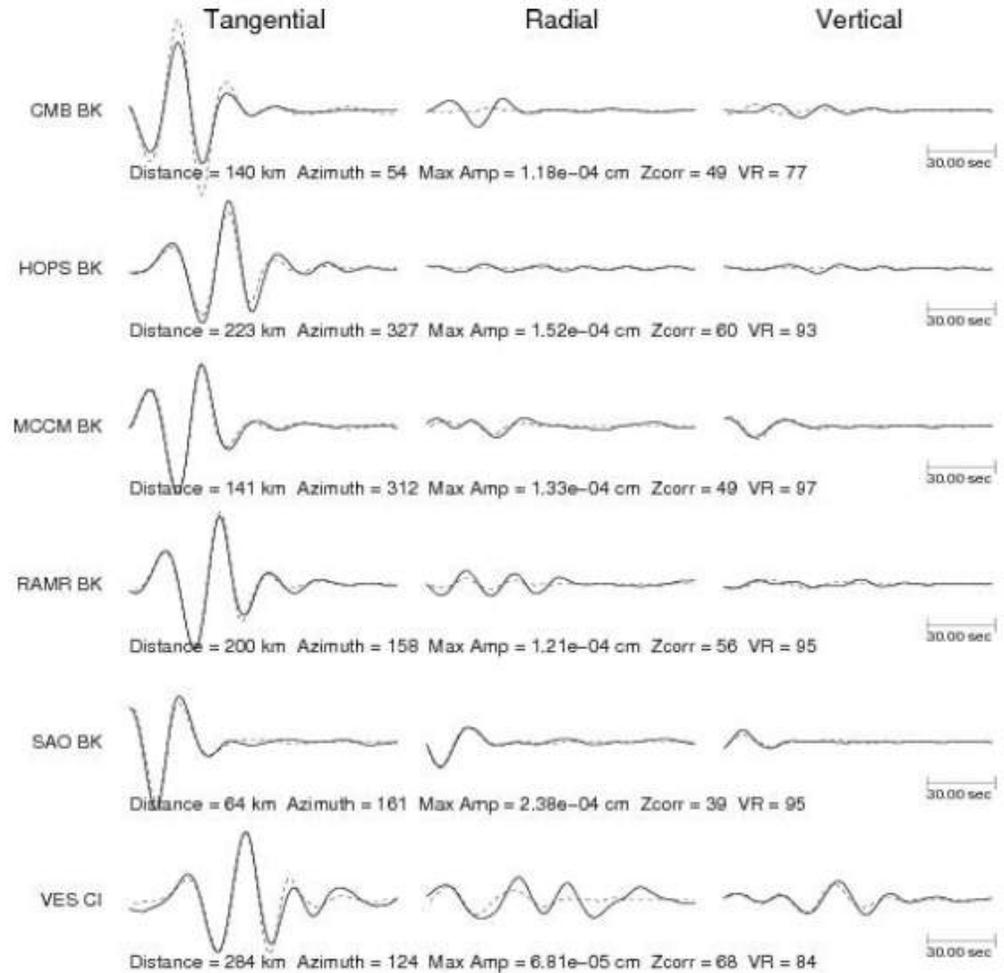
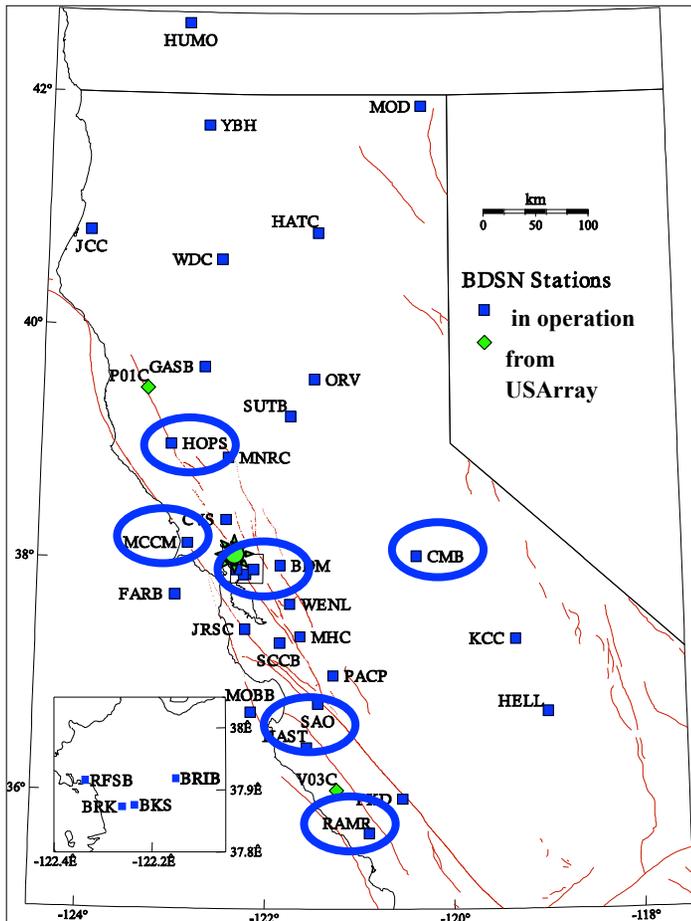
| Axis | Value | Plunge | Azimuth |
|------|--------|--------|---------|
| T | 1.652 | 2.046 | 104.574 |
| N | 0.082 | 87.938 | 277.413 |
| P | -1.734 | 0.257 | 14.565 |

Source Composition:

| Type | Percent |
|------|---------|
| DC | 91 |
| CLVD | 9 |
| Iso | (null) |

*U.C. Berkeley
 Seismological Laboratory*

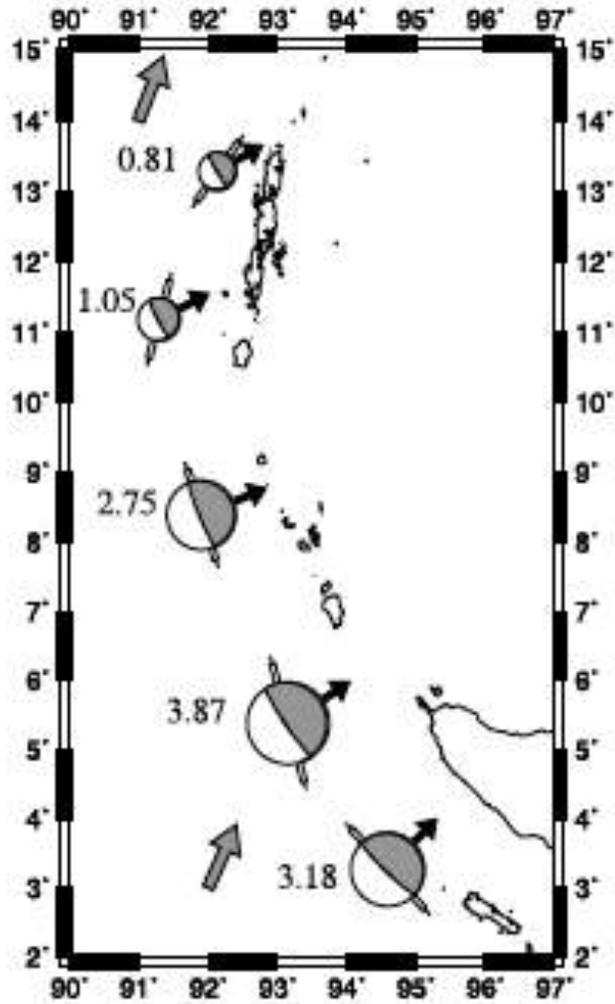
Alum Rock 10/10/2017 00:53:18 lat 37.31° long -121.68° depth 7.9 km



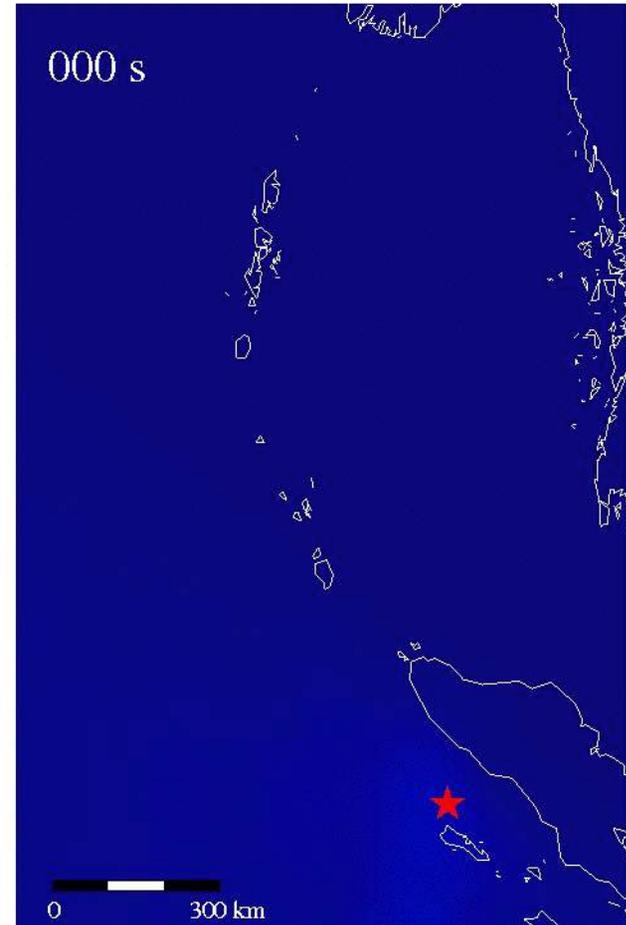
————— Données
 - - - - - Synthétiques

Berkeley Seismological Laboratory (BSL)

Sumatra 2004 Mw 9.2

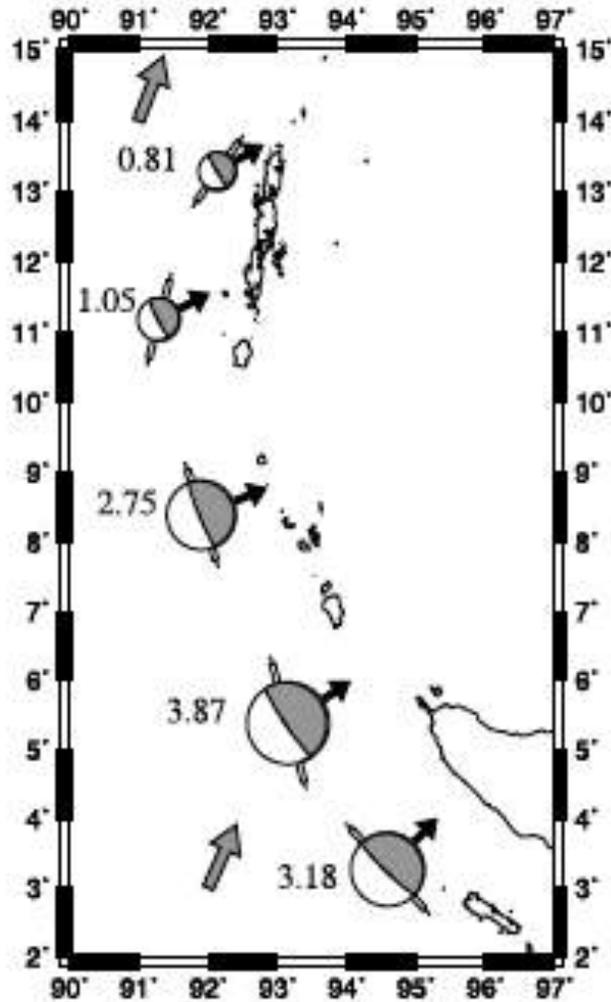


Tsai et al., 2005, GRL

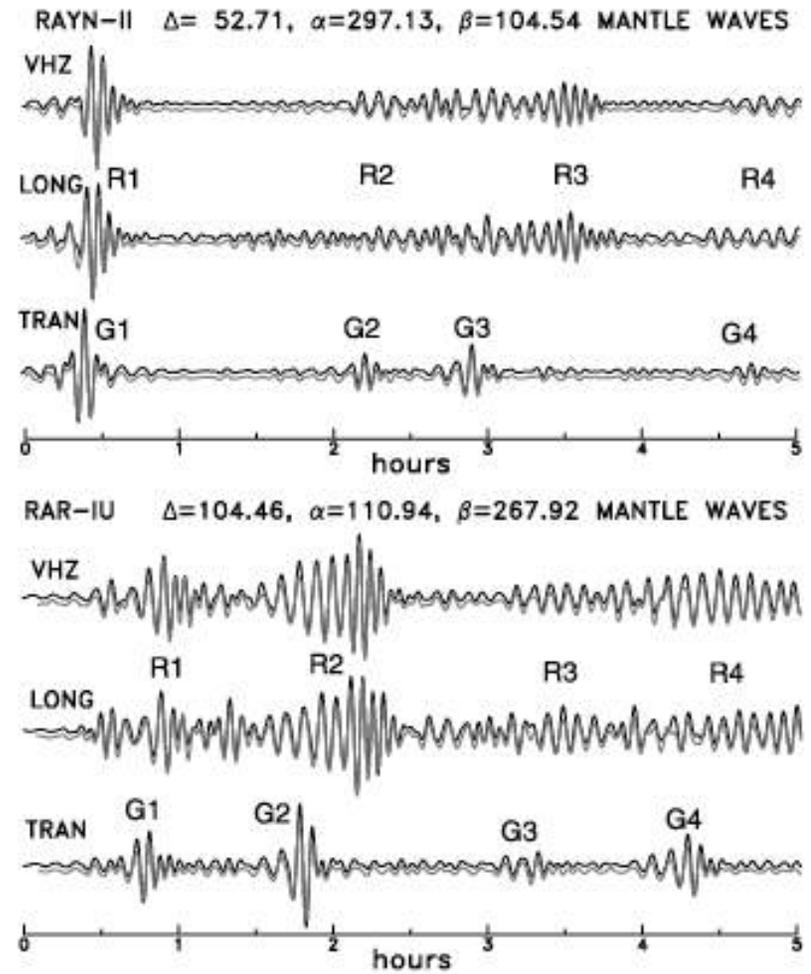


Ishii et al., 2005

Sumatra 2004 Mw 9.2



Tsai et al., 2005, GRL



Filtrage: Périodes: 200-500s