



# “Les Grands Séismes: Observation et Modélisation”

## 4- Imagerie de la source sismique: exemples

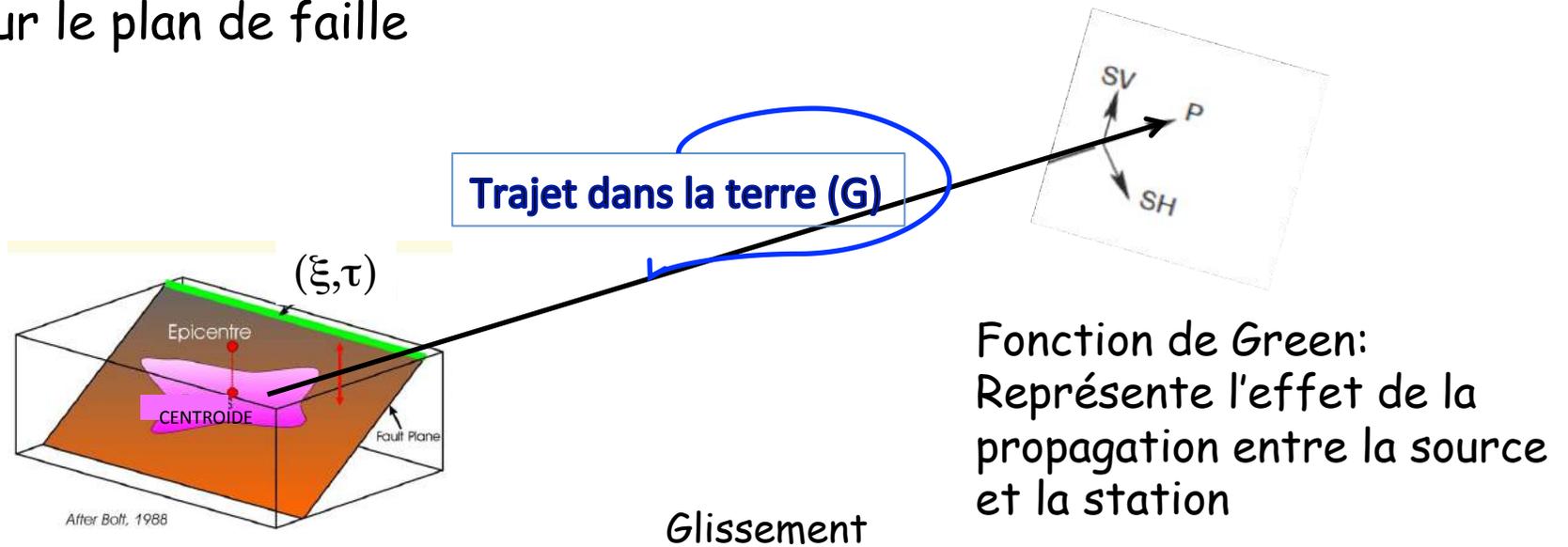
Lundi 30 Octobre 2017

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

# Modèle de glissement au cours d'un séisme:

Propagation d'une discontinuité en déplacement le long d'un plan de faille:

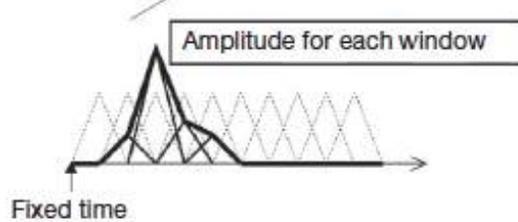
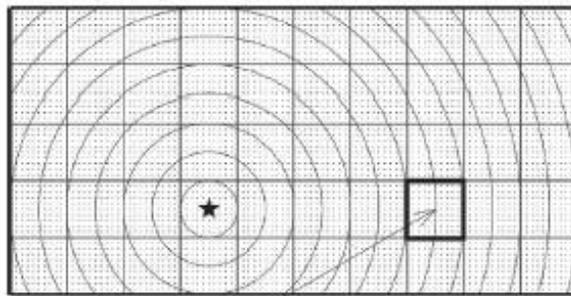
- > Intégration sur la surface de la rupture,
- > Le glissement dépend du temps  $\tau$  et de la position  $\xi$  sur le plan de faille



$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \iint_{\Sigma} \Delta s(\xi, \tau) G(x, \xi, t - \tau) d\Sigma(\xi)$$

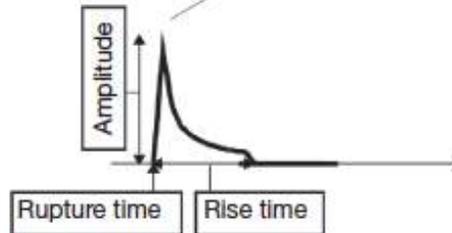
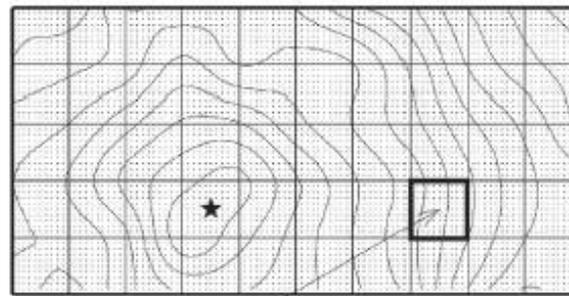
# Paramétrisation du glissement sur le plan de faille: -on suppose le plan de faille connu

Vitesse de rupture constante:  
Cas linéaire



Temps de la rupture en  
chaque point est fixé.  
On inverse pour  
l'amplitude du glissement

Vitesse de rupture variable: problème  
Non-linéaire



Le temps auquel la  
rupture arrive en un point  
donné est aussi une  
inconnue

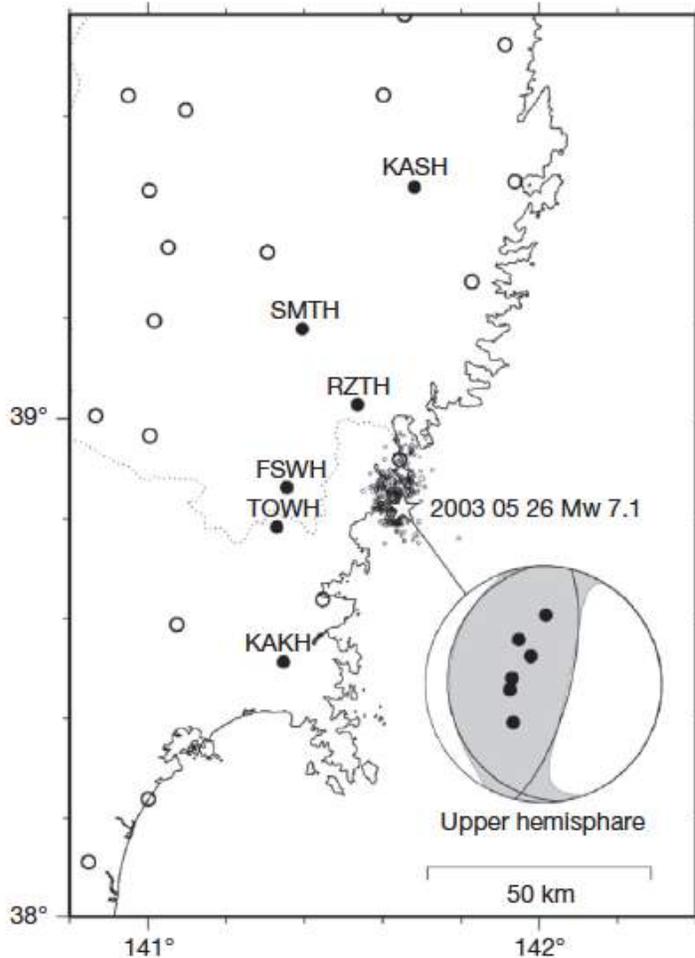
Glissement Fonction de Green

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \iint_{\Sigma} \Delta s(\xi, \tau) G(x, \xi, t - \tau) d\Sigma(\xi)$$

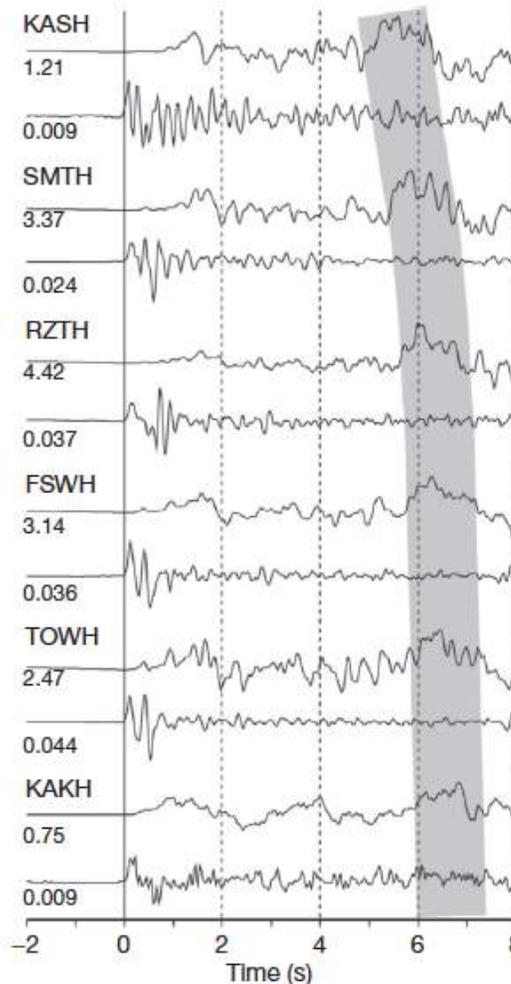
- Fonction de Green: calculée dans un modèle de terre 1D ou 3D ou..
- EGF "Empirical Green's functions" (*Hartzell, 1978*) = *fonctions de Green empiriques*
  - Petit séisme dans la région source (souvent une réplique), durée de la source et propagation de la rupture négligeables, sert de fonction de Green.

- Fonctions de Green empiriques

Miyagi Oki 2003 Mw 7.1



Déplacement



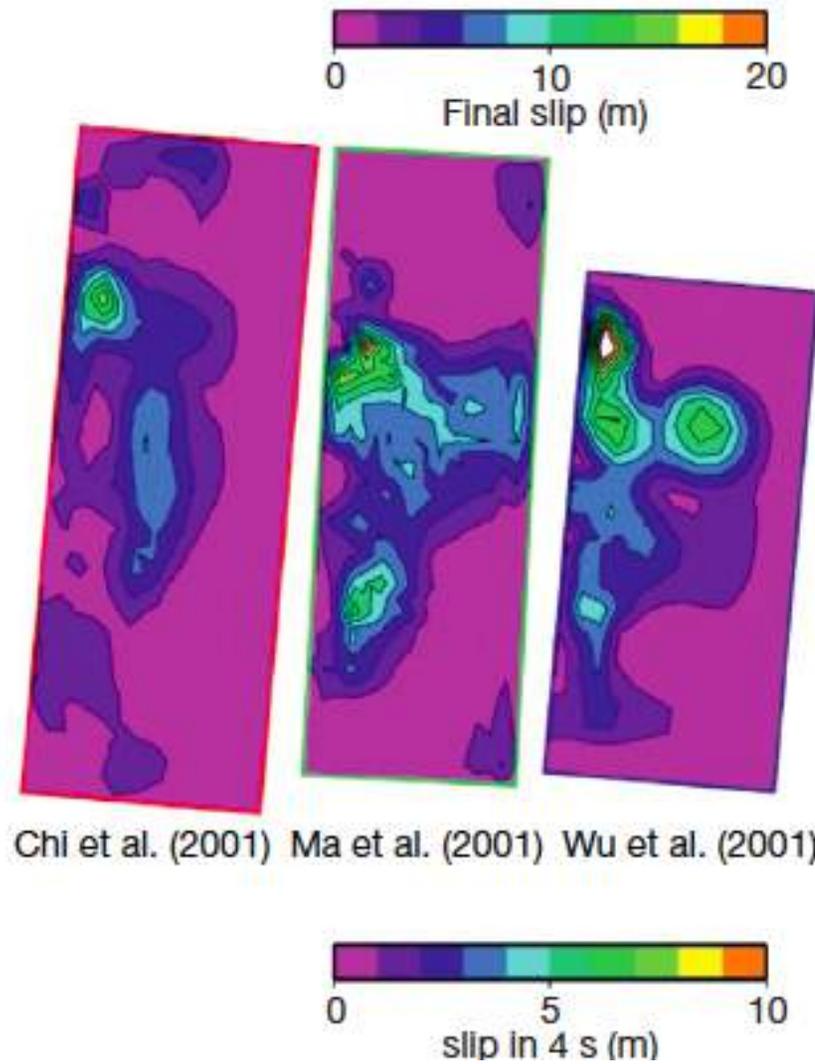
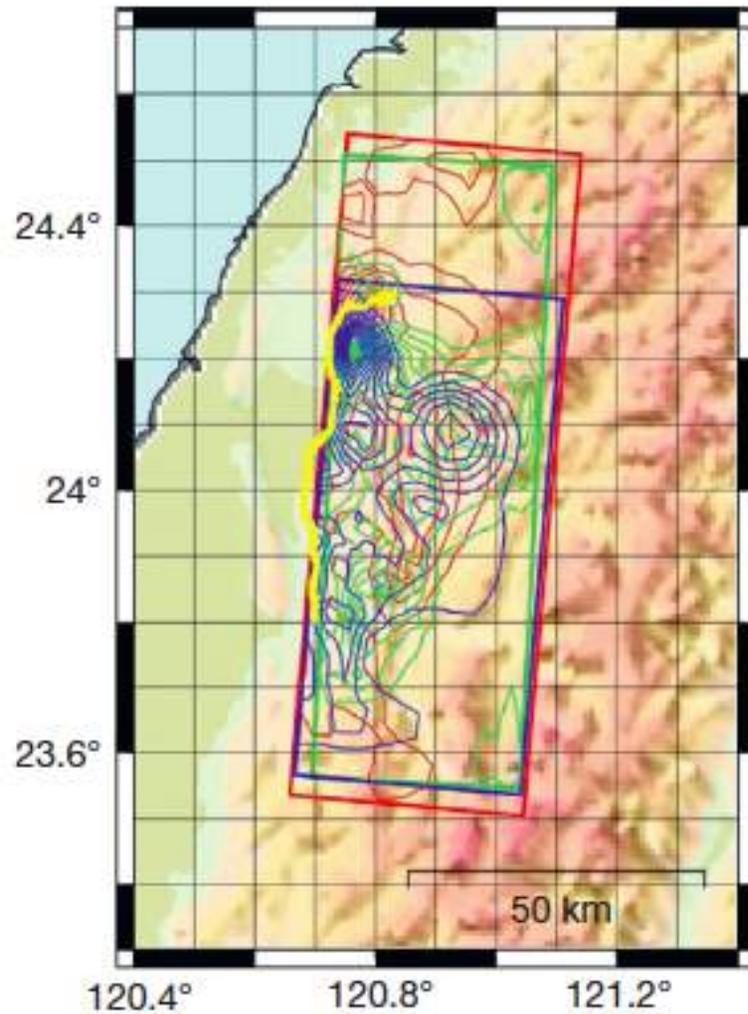
← Source principale

← réplique

Bande grise: 2<sup>e</sup> partie de la rupture:  
Montre la propagation de celle-ci vers le Nord

Traces alignées sur la première arrivée (P) des deux séismes

# Séisme de Chi-Chi (Taiwan) 1999 Mw 7.6



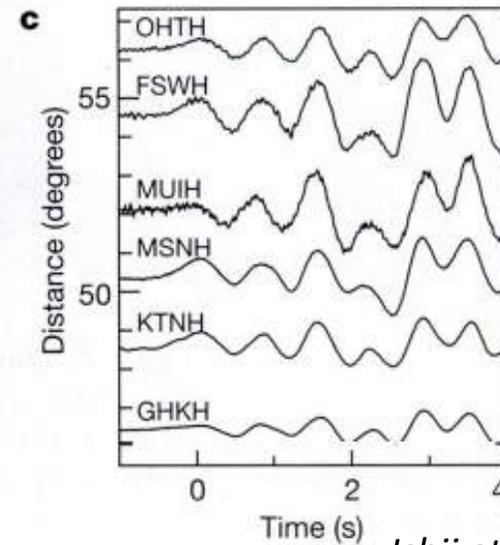
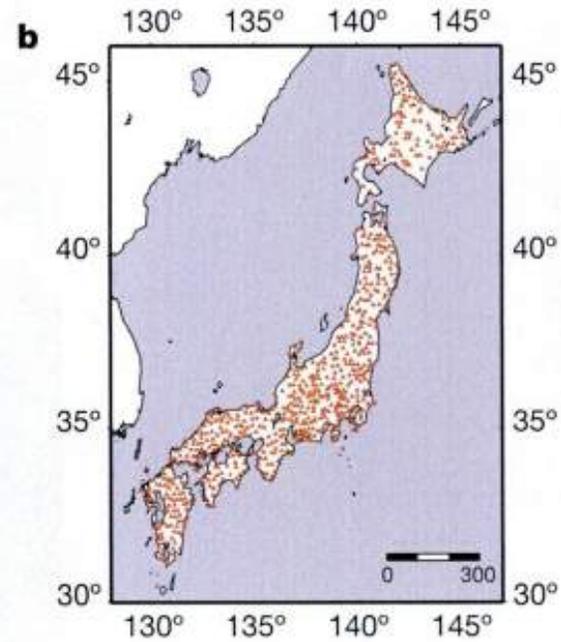
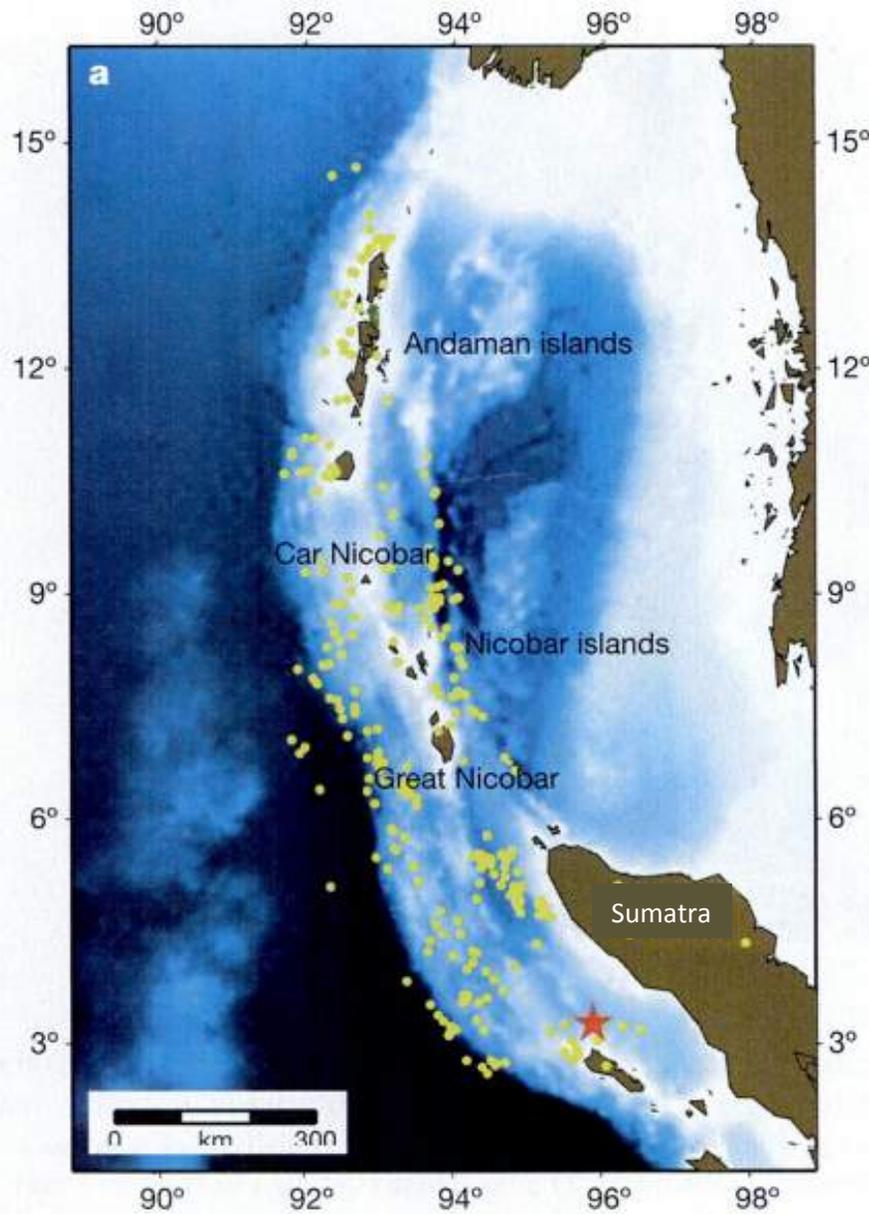
# Rétroprojection de l'énergie radiée sur le plan de faille

- Méthode appliquée sur des données filtrées en bande étroite, à courte période (e.g. 1-5 s)
- Exploite la cohérence des ondes sismiques observées simultanément dans un réseau de stations dense (i.e. HiNet au Japon, USArray aux USA)
- Cartographie en temps et espace de l'énergie sismique radiée sur la faille dans la bande de fréquences considérée

# Séisme de Sumatra 26/12/2004 Mw 9.2

Bande de fréquence 1-5 s

HiNet

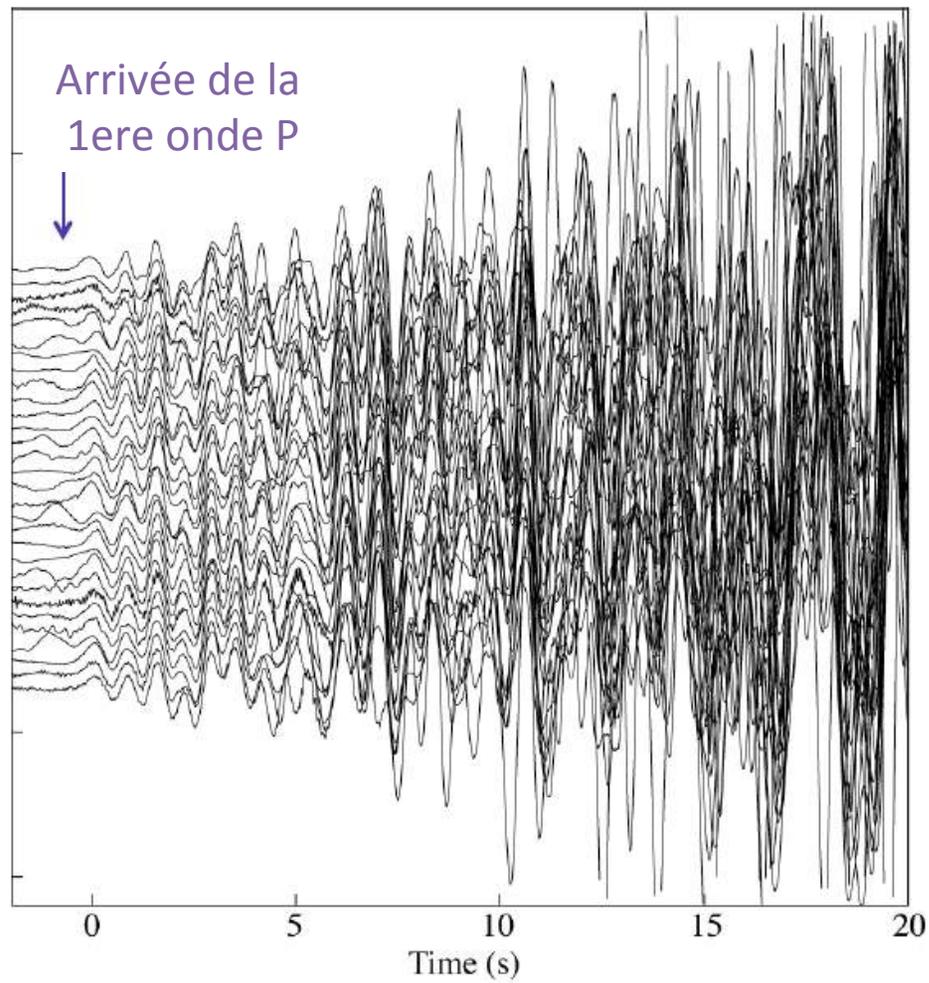


Hypocentre (rouge) et Répliques (jaune)

Ishii et al., Nature, 2005

# Séisme de Sumatra 26/12/2004 Mw 9.2

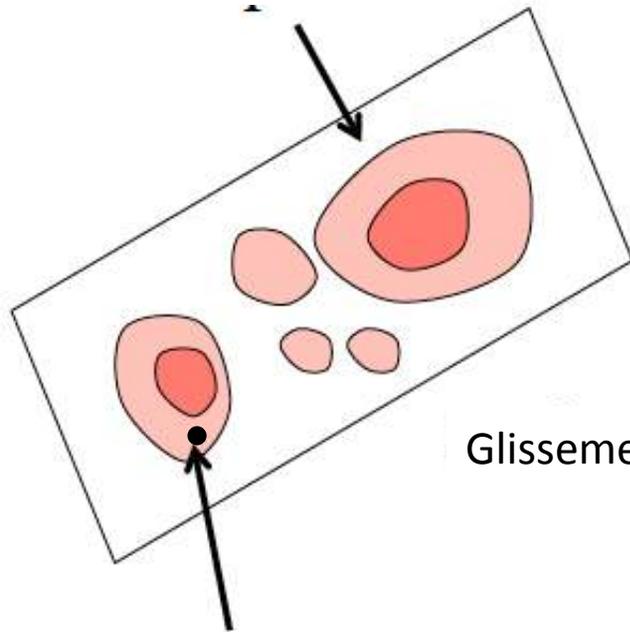
## Ondes P alignées par cross-correlation



Cohérence sur les premières 4 s

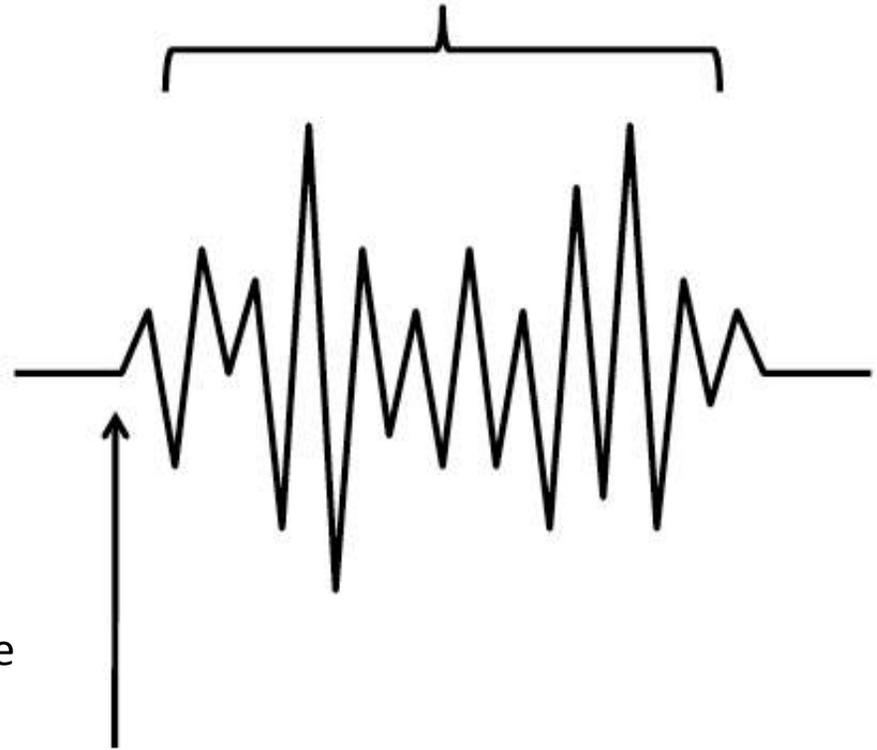
L'énergie plus tardive provient  
des zones de la faille atteintes plus  
tard par la rupture

Parties atteintes  
plus tard par la rupture

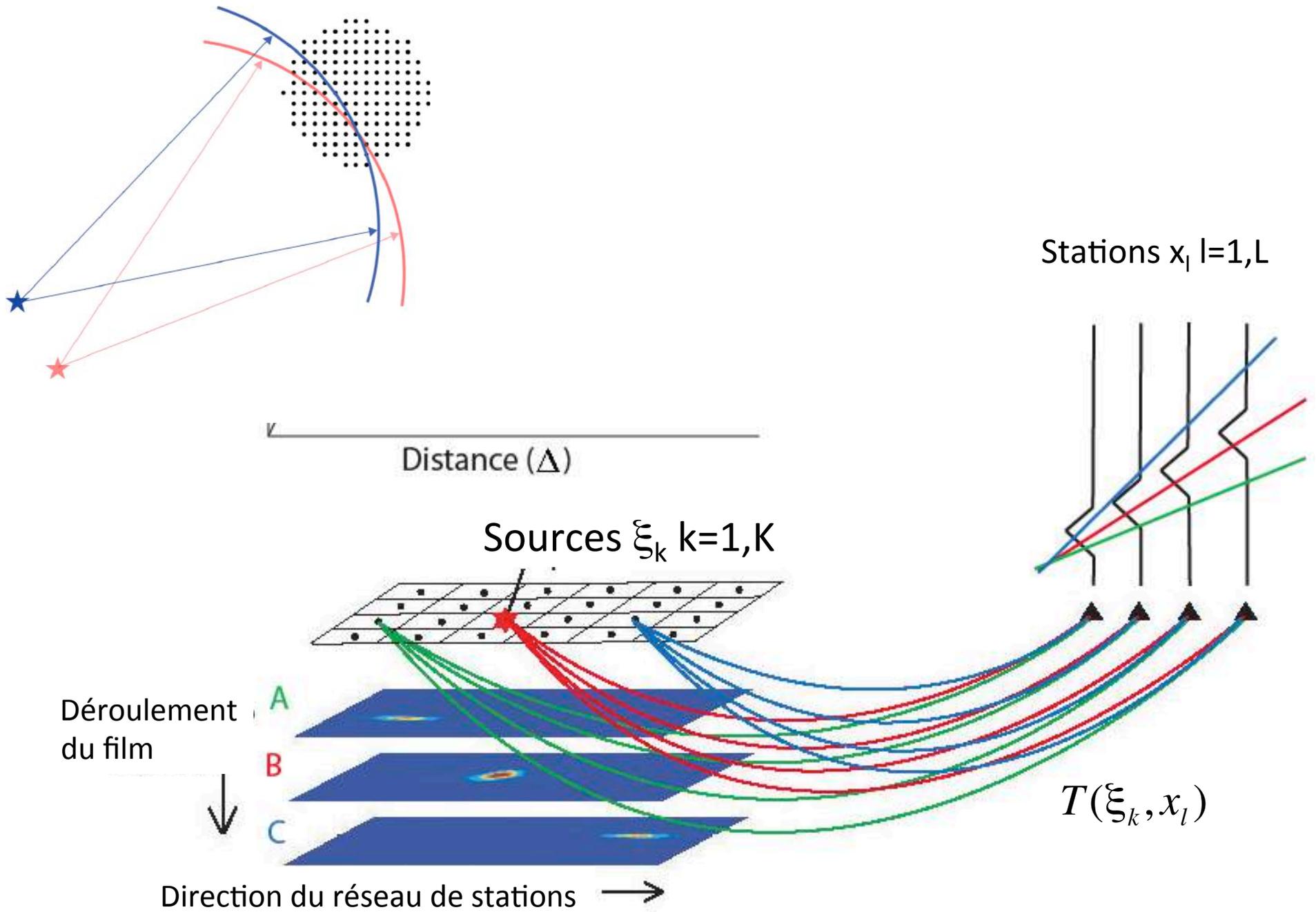


Glissement sur la faille

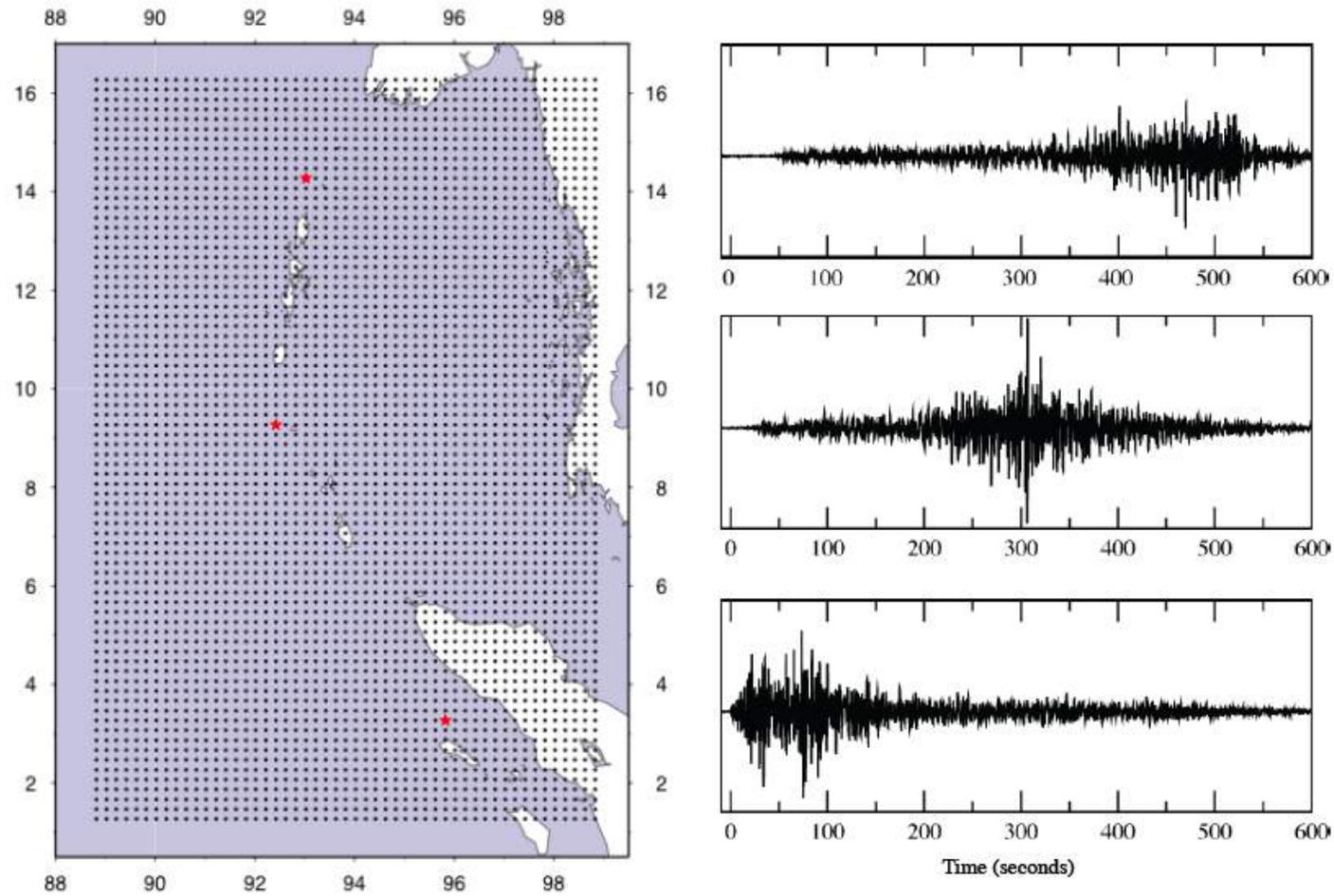
Hypocentre



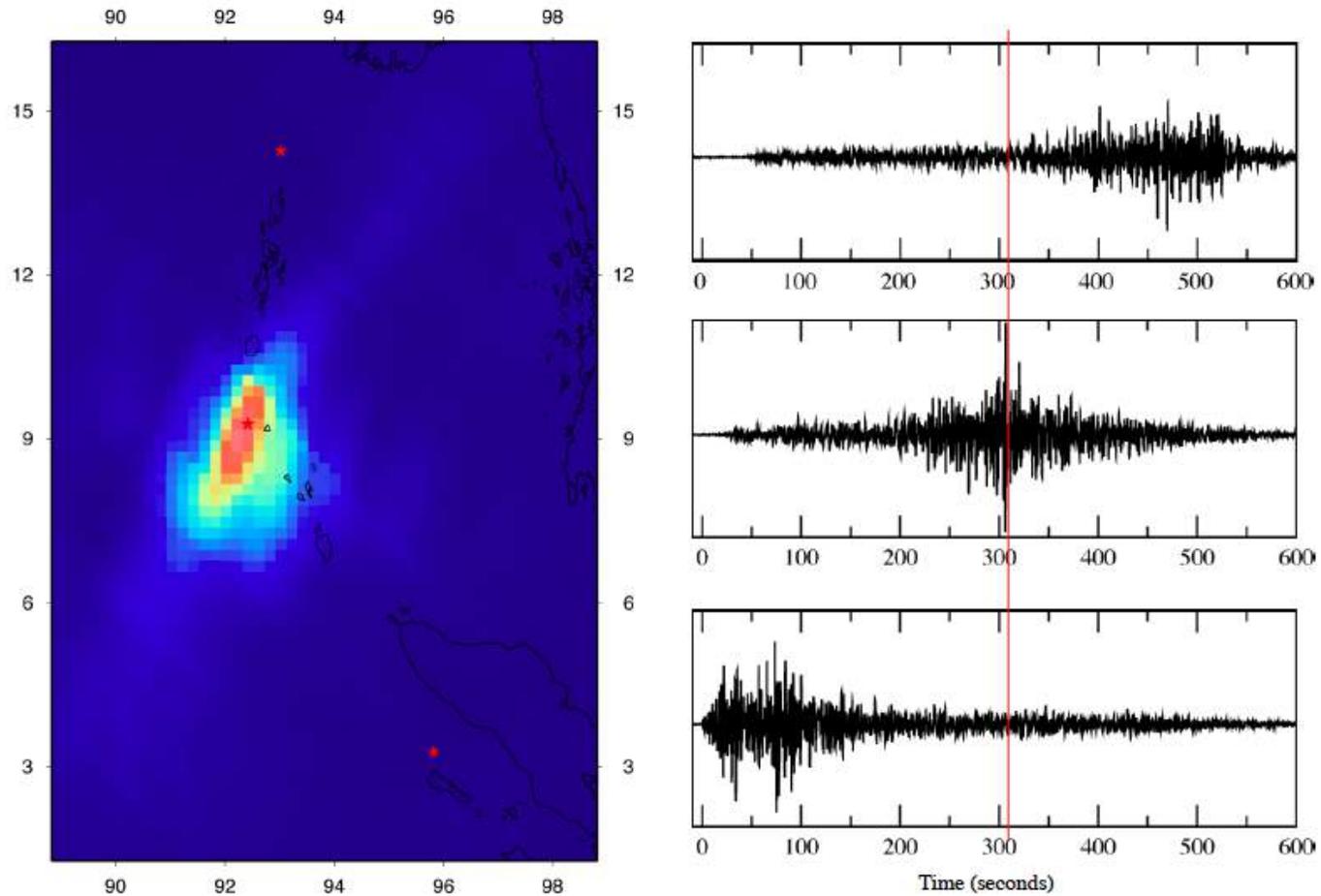
La première arrivée provient  
de l'hypocentre



# Sommation des traces pour différents points source



## Localisation de l'énergie à un instant donné (ici 60 s après le temps origine)



Sources  $k=1, K$  ; Stations  $l=1, L$ :

$T(\xi_k, x_l)$  Temps de propagation  
de la source  $\xi_k$  a la station  $x_l$ .

(1): Sismogramme à la station  $l$ : 
$$u(x_l, t) \approx C \sum_{k=1}^{k=K} \Delta \dot{u}(\xi_k, t - T(\xi_k, x_l))$$

(2): On choisit une source  $q$  ( $\xi_q$ ) et déplace chaque trace en temps:

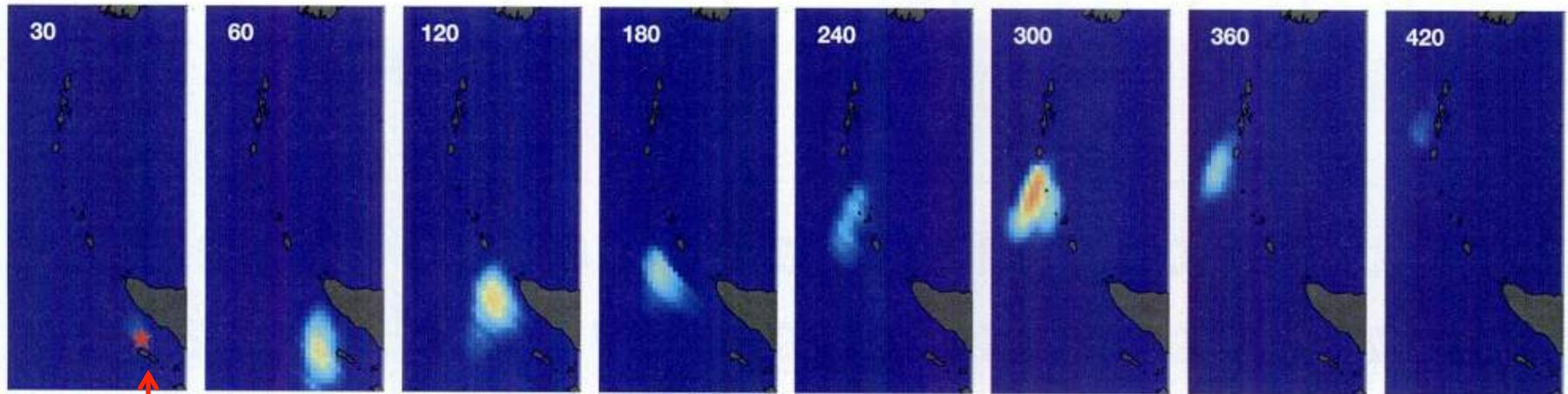
$$u(x_l, t + T(x_l, \xi_q)) \approx C \Delta \dot{u}(\xi_q, t) \quad \text{Terme commun à toutes les stations}$$

Temps de parcours  
de la source  $q$  à la station  $l$   $+ C \sum_{k \neq q} \Delta \dot{u}(\xi_k, t + T(x_l, \xi_q) - T(\xi_k, x_l))$

(3): On somme les  $L$  traces ainsi déplacées:

$$\Delta \dot{u}(\xi_q, t) \approx \frac{1}{CL} \sum_{l=1}^L u(x_l, t + T(x_l, \xi_q))$$

# Séisme de Sumatra 2004 Mw 9.2



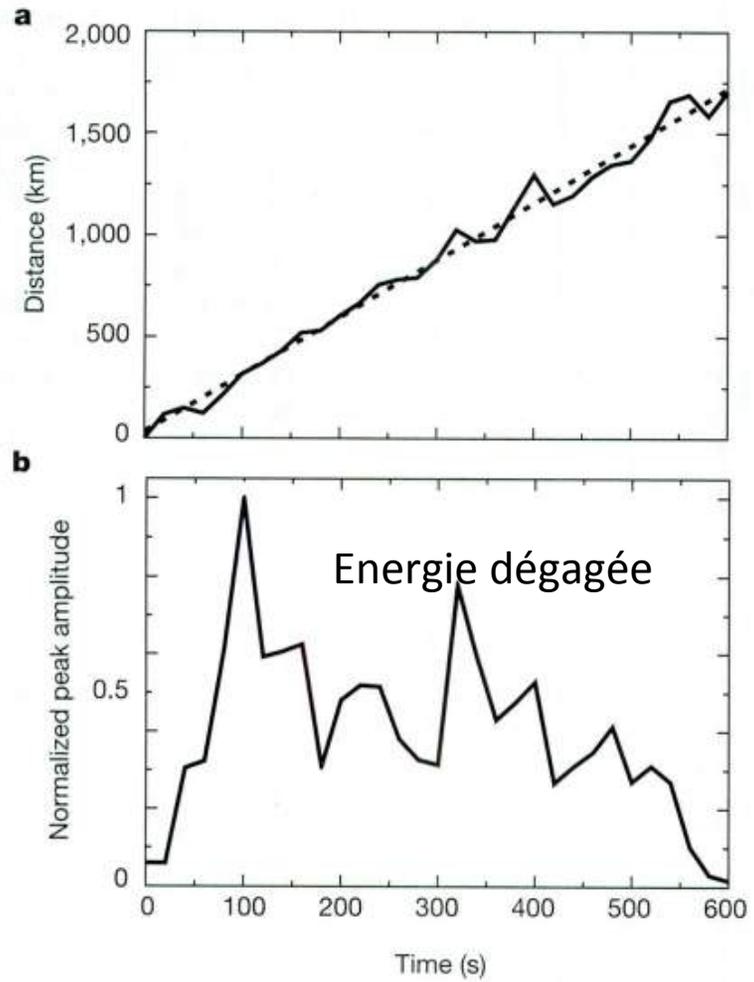
Epicentre

Amplitude au carré de la somme à différents instants après le temps origine (en secondes)

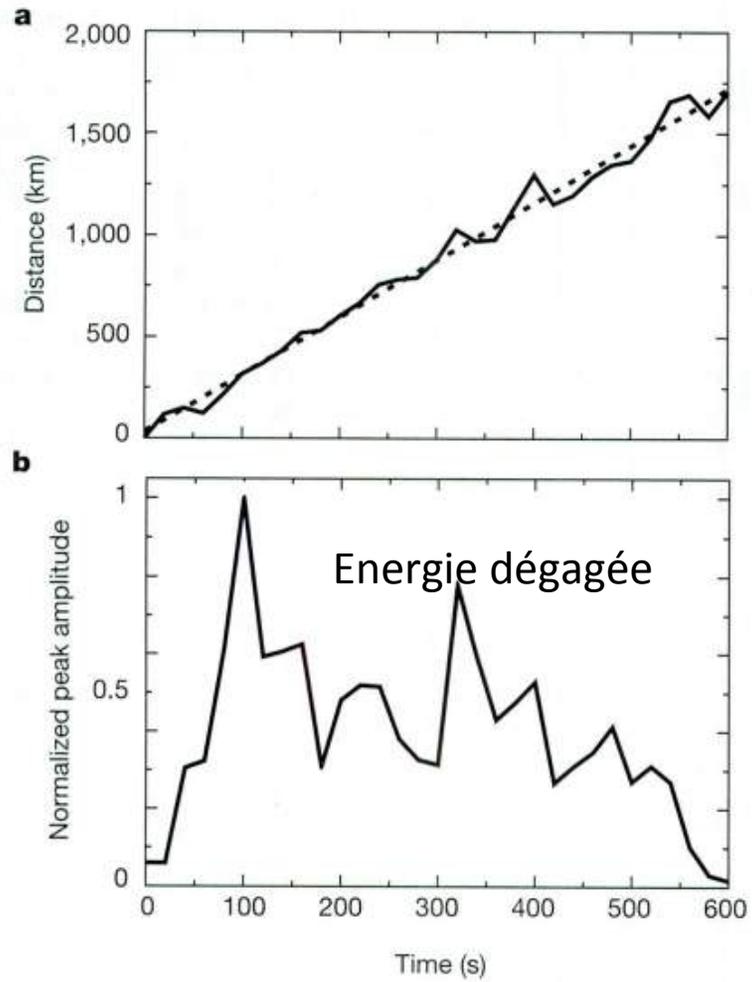
- proportionnelle à l'énergie sismique dégagée dans la bande passante considérée (1-5s)

Sommation sur une grille de  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$

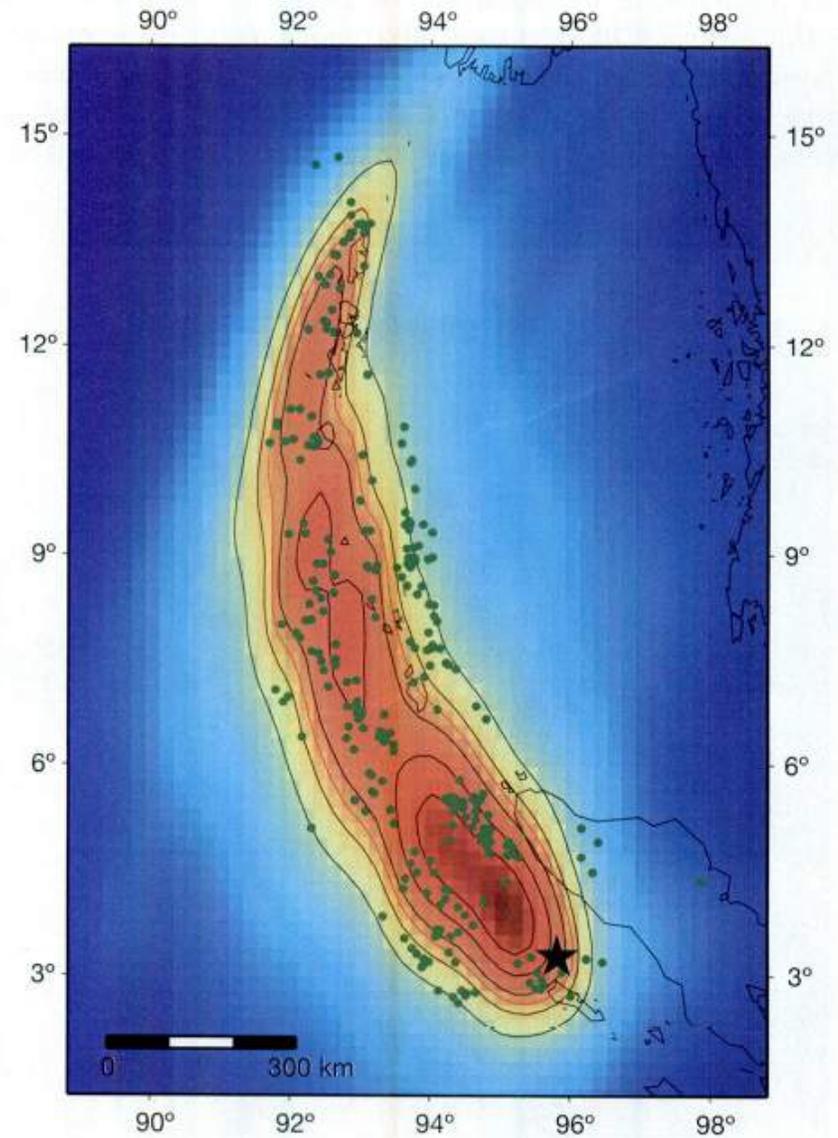
=> Vitesse de rupture  $\sim 2.8\text{km/s}$



=> Vitesse de rupture  $\sim 2.8\text{km/s}$

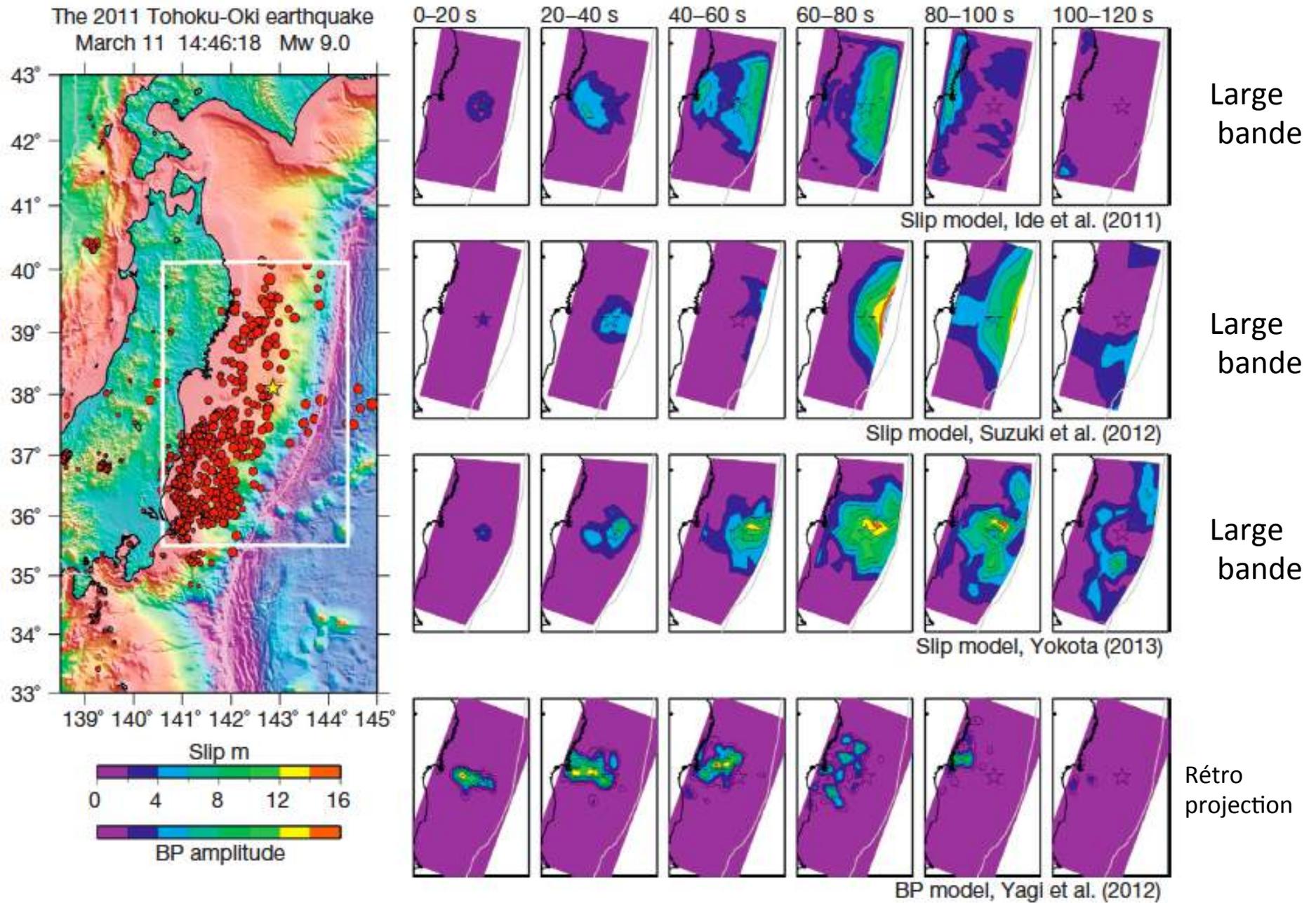


## Energie élastique totale



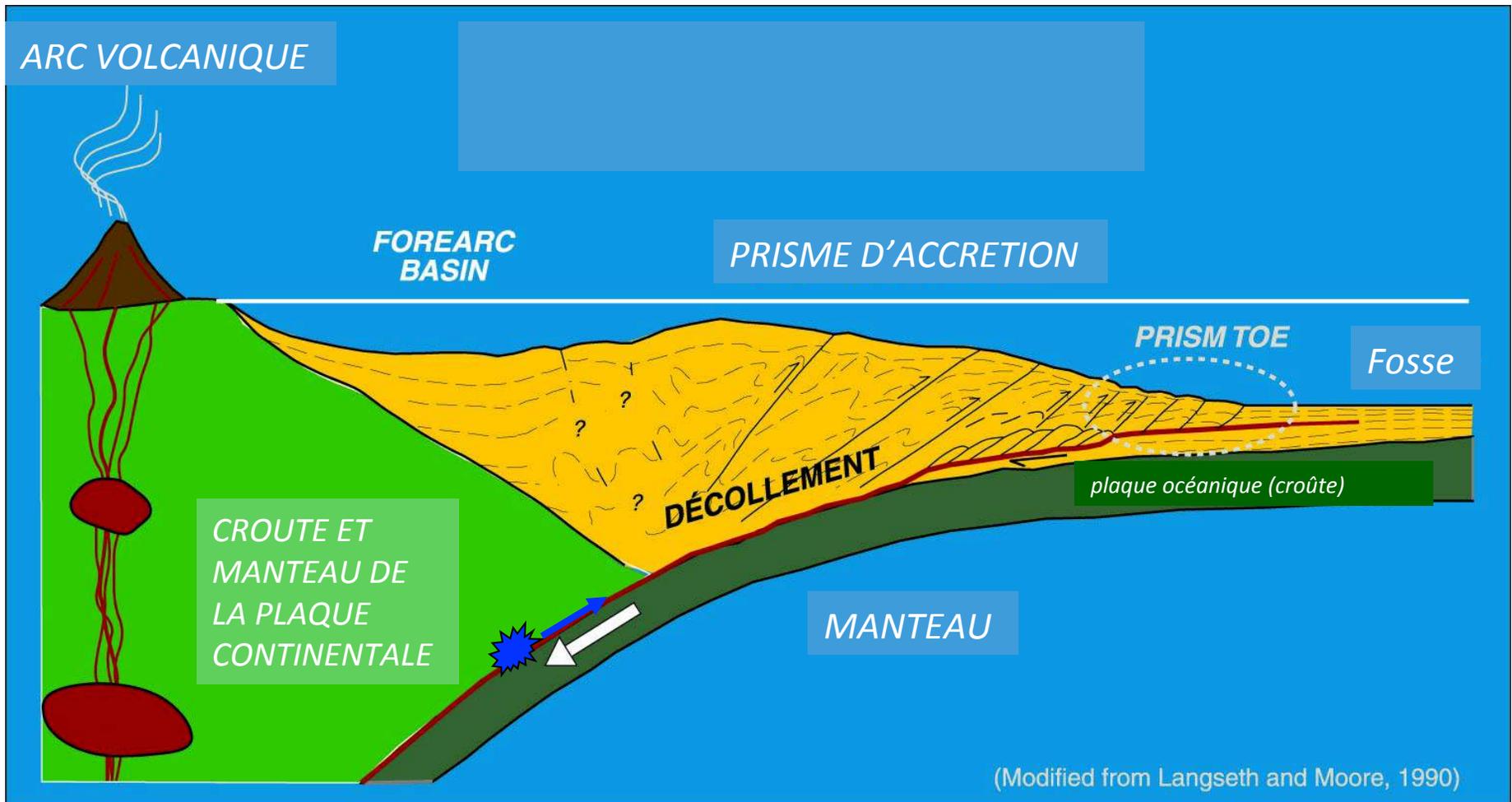
# Rétroprojection à la source

- Méthode très rapide ---> application en temps réel
  - On n'a besoin que de connaître l'hypocentre
  - Image en temps et espace de l'énergie sismique dégagée (pas le glissement)
- Image incomplète:
  - Seulement dans une bande de fréquences étroite
  - Dépend du modèle de terre utilisé pour la rétroprojection
  - Pas de résolution en profondeur pour les séismes superficiels
  - Différentes sources d'erreur rendent les images peu fiables du point de vue quantitatif



Sumatra (2004) Mw 9.2  
Japon (2011) Mw 9.0

# Coupe à travers une zone de subduction

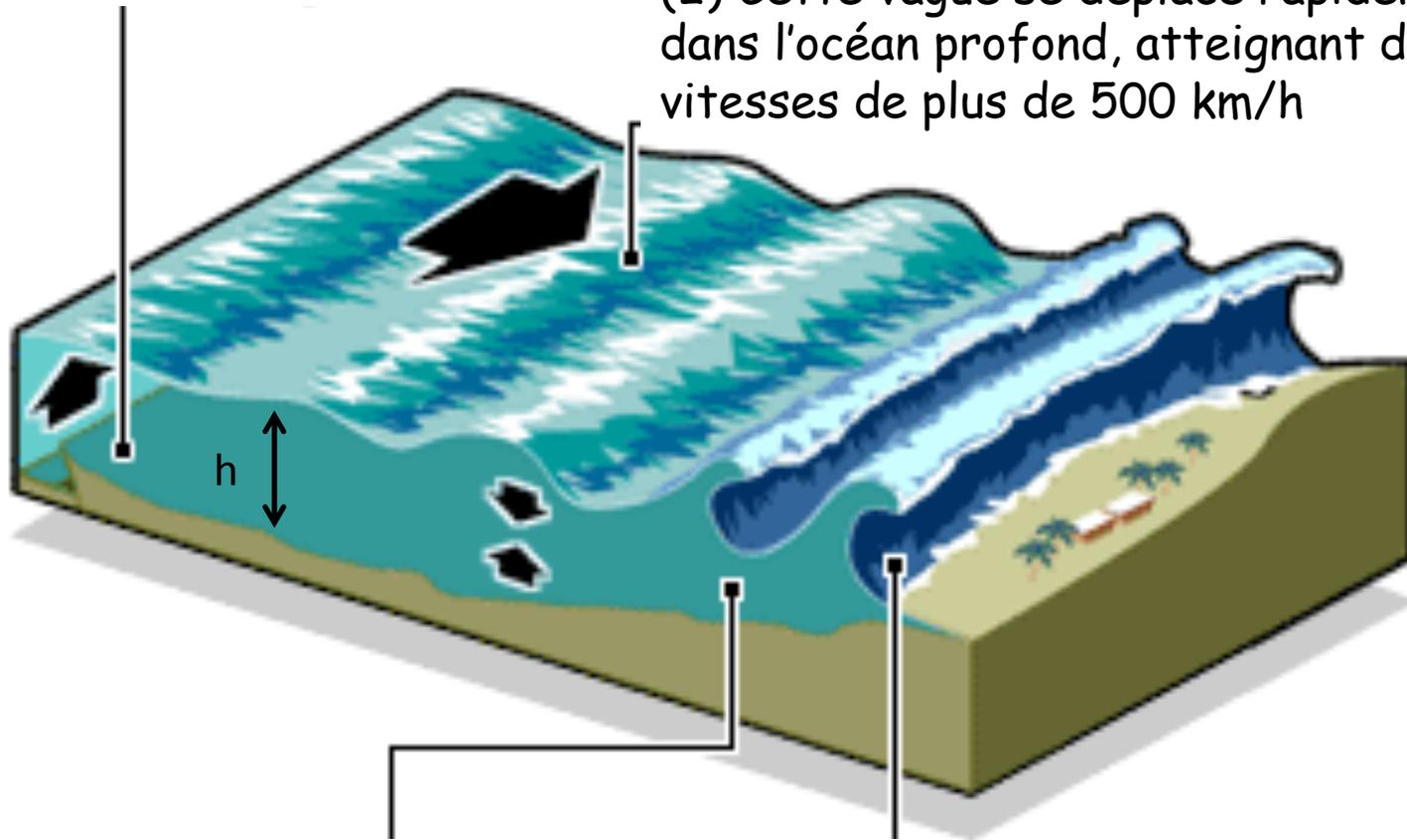


## Tsunami engendré par un séisme

$$V \approx \sqrt{gh}$$

(1) Le soulèvement du fond marin du à la rupture sismique pousse une masse d'eau vers le haut, initiant une vague

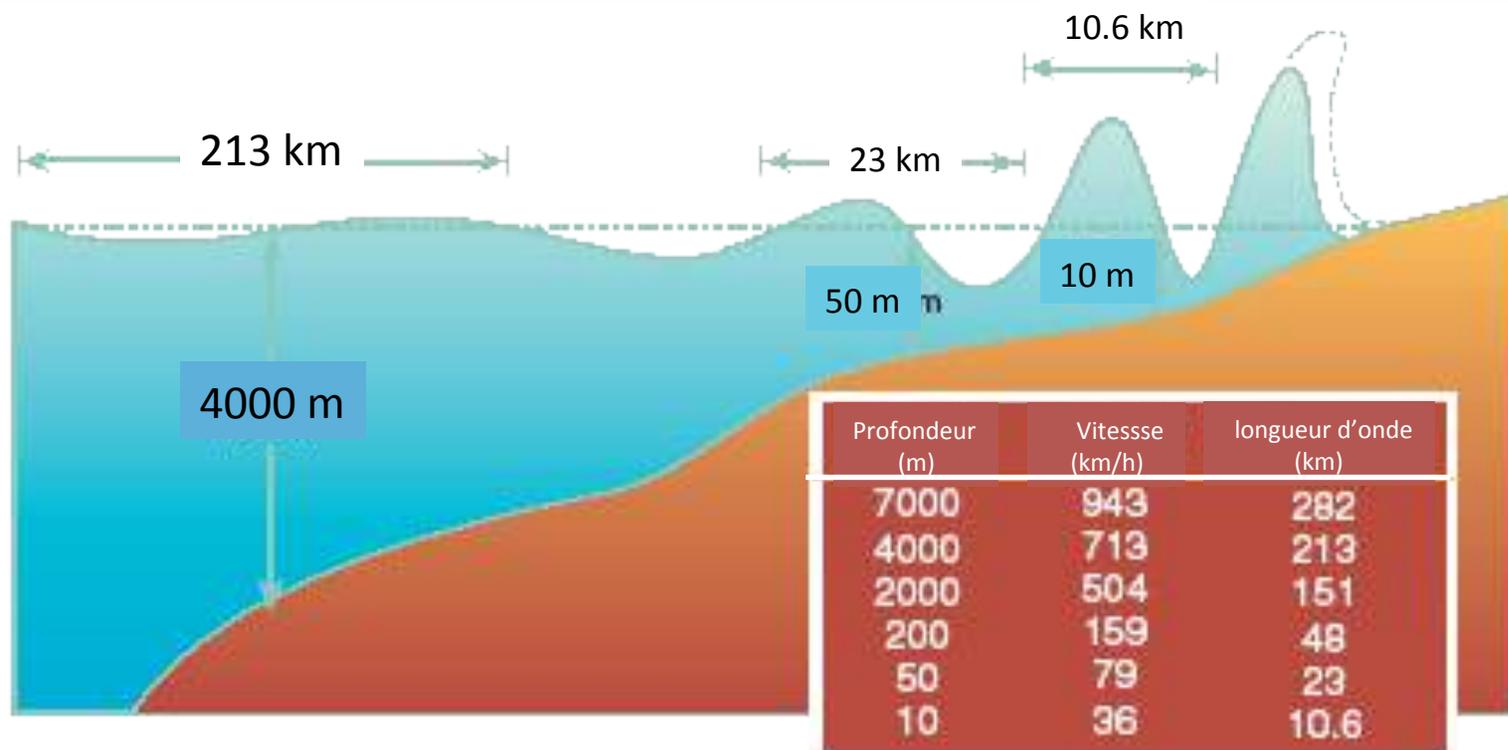
(2) Cette vague se déplace rapidement dans l'océan profond, atteignant des vitesses de plus de 500 km/h



(3) Lorsque la vague s'approche de la côte, elle ralentit, diminue en longueur mais augmente en hauteur

(4) Une succession de vagues s'écrase sur la terre submergée

# Propagation dun tsunami : Longueur d'onde et profondeur du fond marin





Séisme de Sumatra-Andaman  
26 XII 2004, Mw 9.2



**KHAO LAK, THAILAND**  
**01/03/2004**



**KHAO LAK, THAILAND**  
**12/29/2004**

CREDIT: SPACE IMAGING/CRISP-SINGAPORE

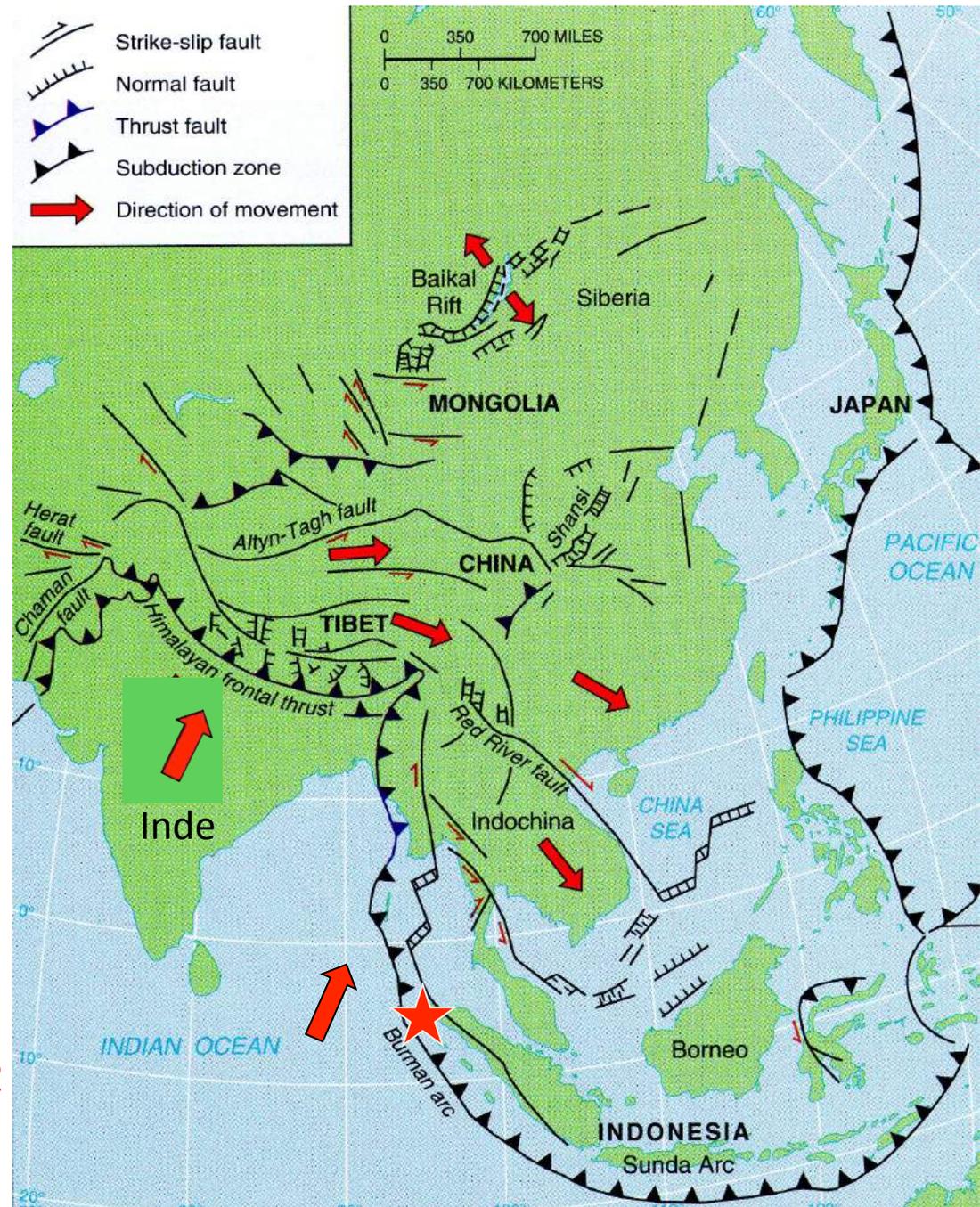
©2005 USC Tsunami Research Group



## Contexte tectonique en Asie du Sud Est

Dominé par le mouvement vers le Nord de la plaque indienne

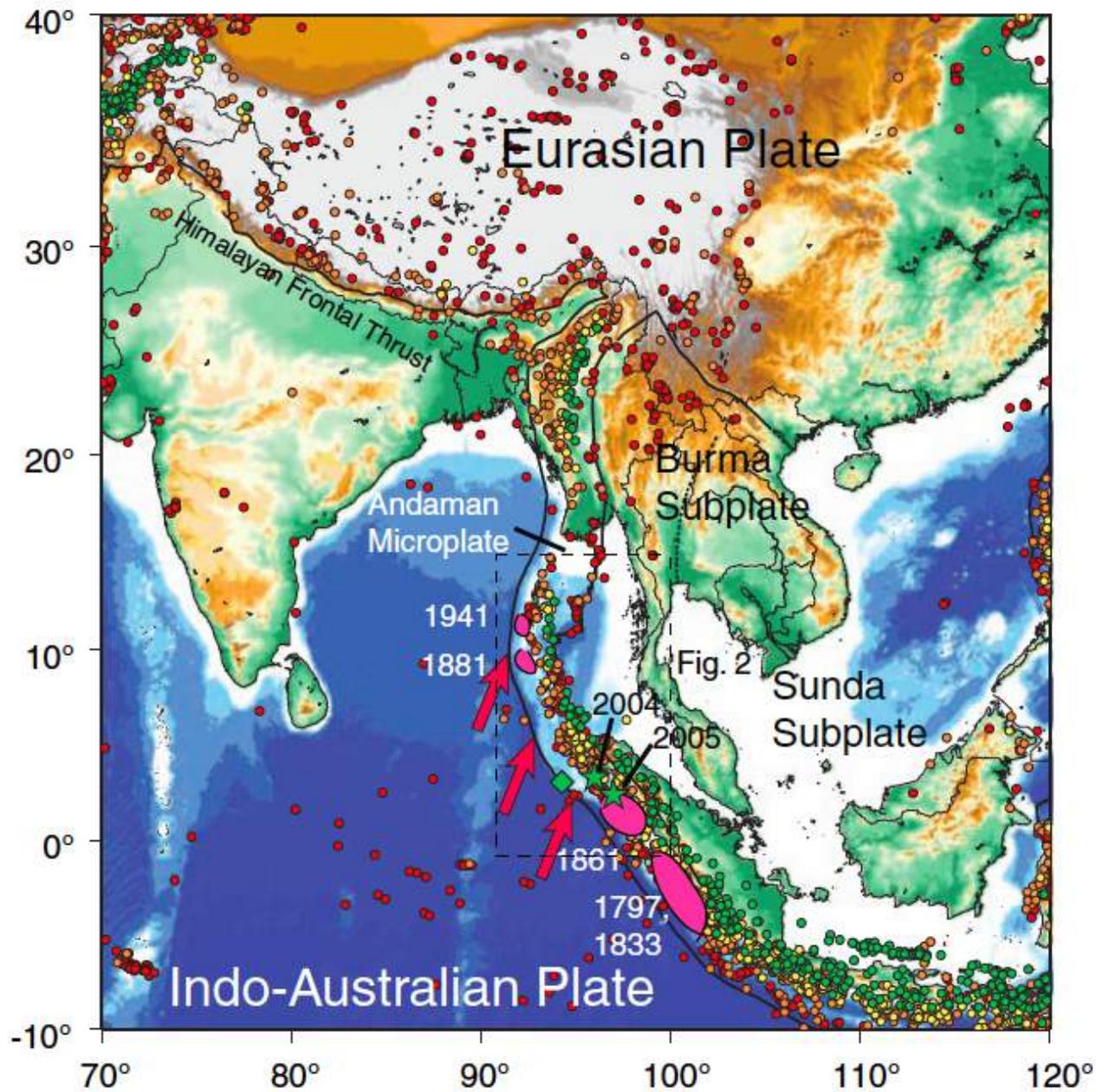
Existence de nombreuses petites plaques et blocs



★ Sumatra 26/12/2004  $M_w$  9.2

D'après Molnar & Tapponnier, 1977

1941 Mw 7.7  
1881 Mw 7.9  
  
1861 Mw >8  
1833 Mw >8



Sismicité: Mw > 5.0 de 1965 au 25/12/2004

Lay et al., 2005, Science

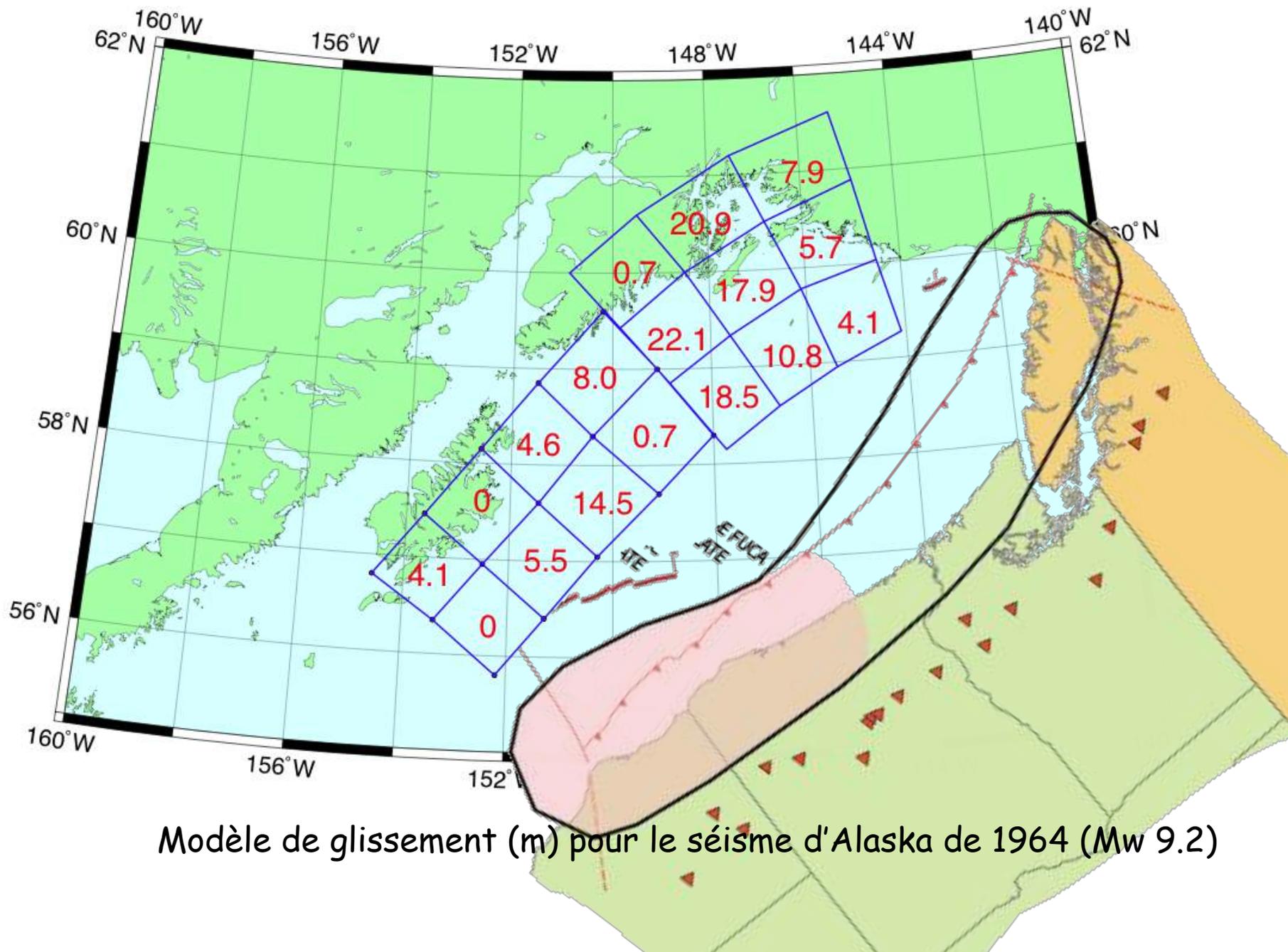
**Séisme du 12/26/04**  
**Sumatra / Andaman**  
**Mw 9.0-9.3**  
**Mw 9.2 (finale)**

-> Zone de  
rupture  
~1300 km

-> Glissement  
de ~15-20m

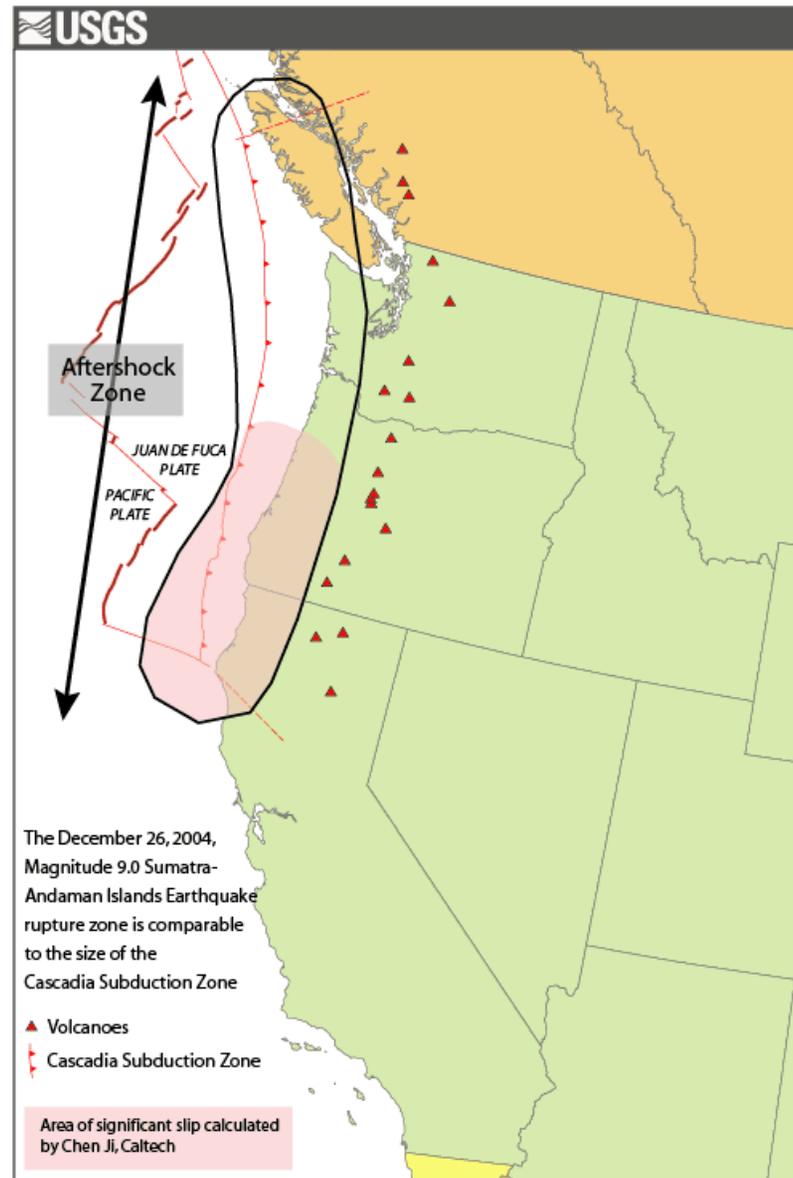
-> Durée de la  
rupture ~  
600 s





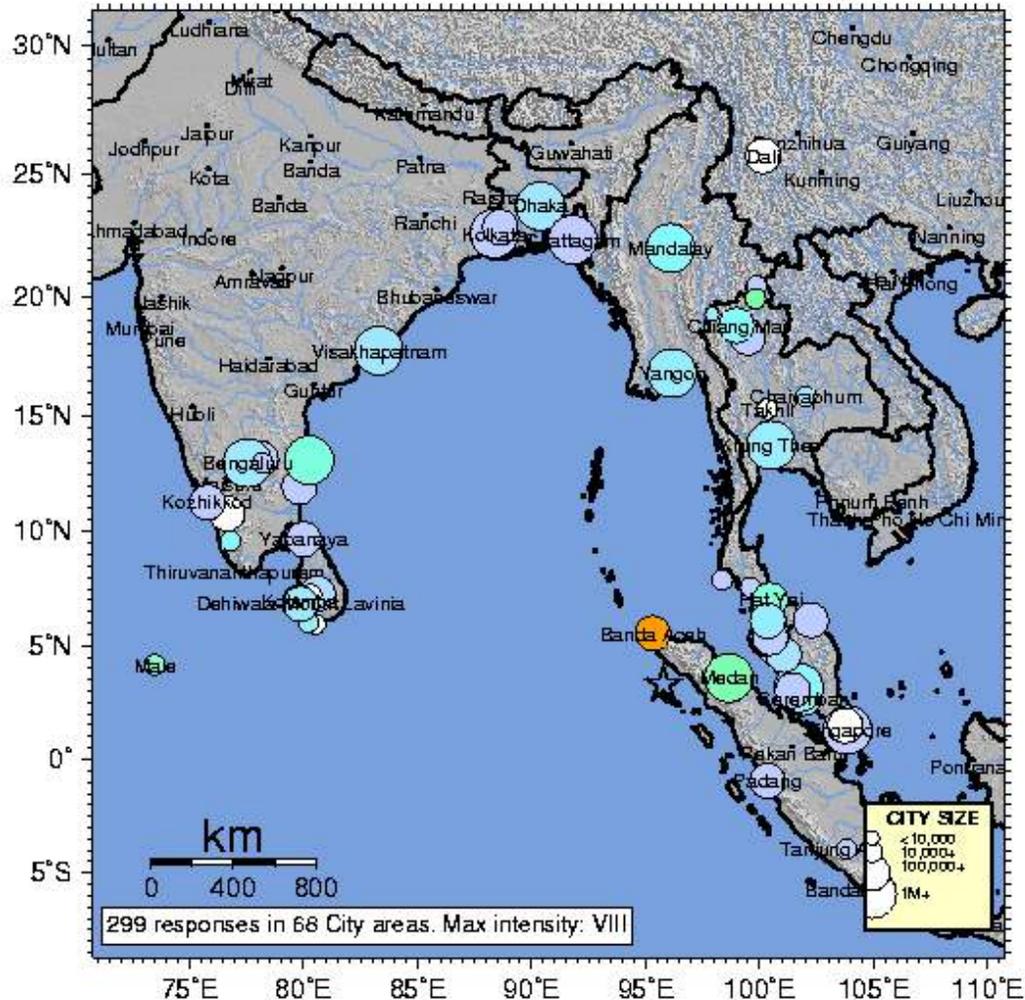
Modèle de glissement (m) pour le séisme d'Alaska de 1964 (Mw 9.2)

# Comparaison de la zone de rupture du séisme de Sumatra(2004, Mw 9.2) avec l'étendue de la zone de subduction du nord-ouest des USA



# Global Did You Feel It?

USGS Community Internet Intensity Map (154 miles S of Banda Aceh, Sumatera, Indonesia)  
ID:slav\_04 00:58:51 GMT DEC 26 2004 Mag=8.9 Latitude=N3.30 Longitude=E95.78



INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+
SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy

<https://earthquake.usgs.gov/data/dyfi/>

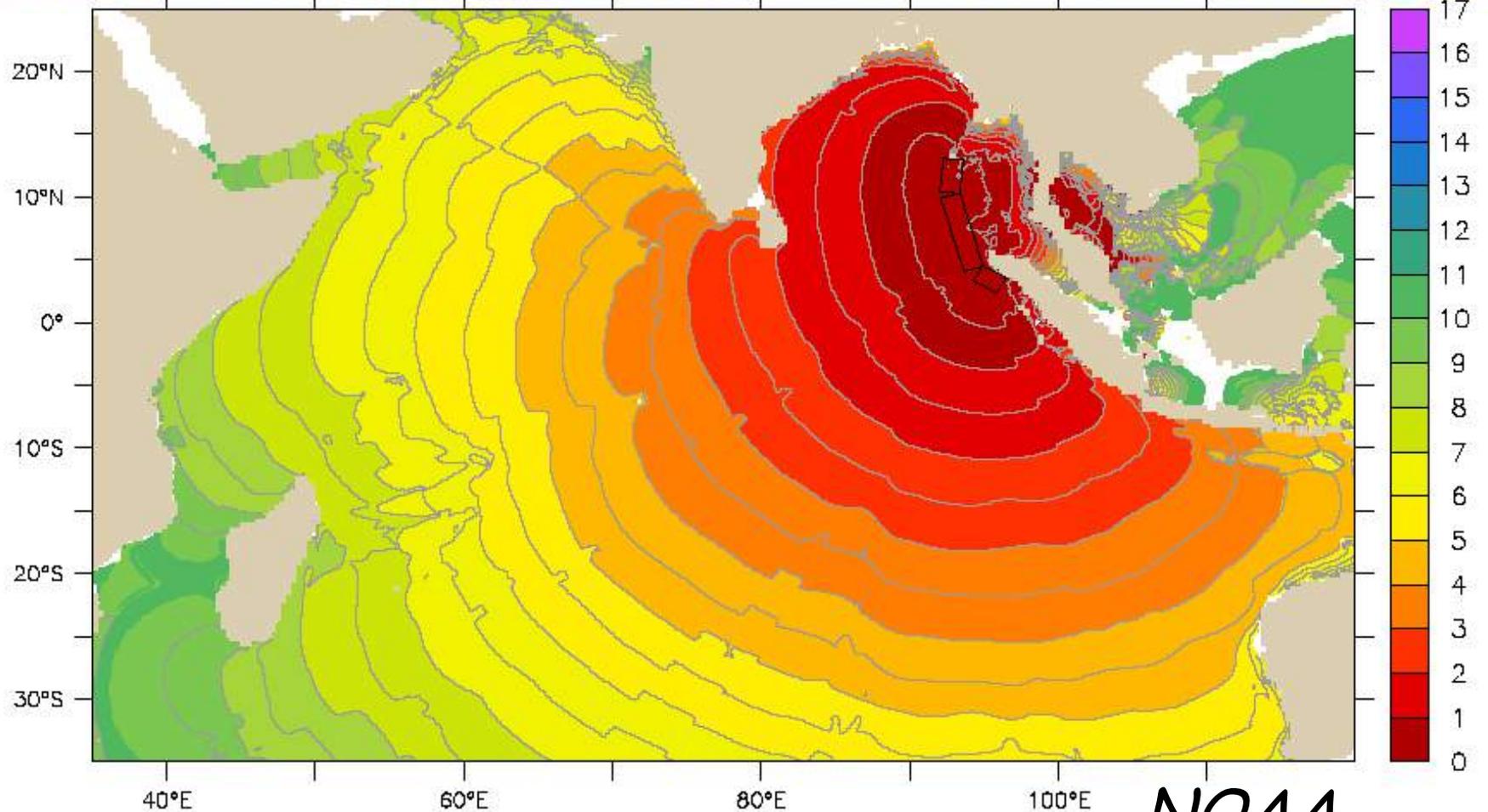
# Temps de propagation du tsunami (simulation)

Facility for the Analysis and Comparison of Tsunami Simulations (FACTS)

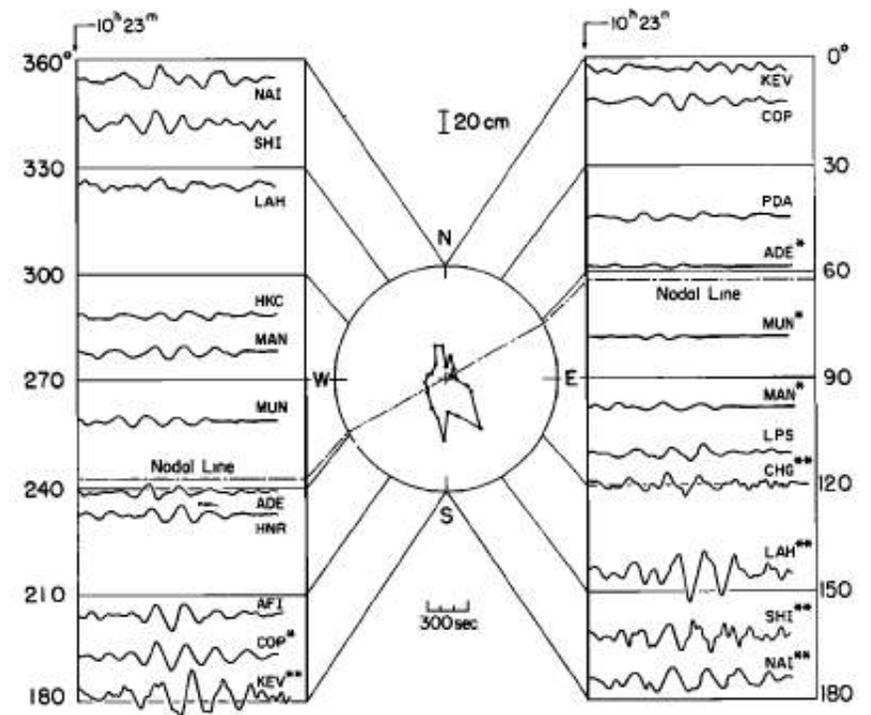
Arrival Time of First Wave(hours) – 2004.12.26 Indonesian Tsunami

T (SECONDS) : -30 to 36030

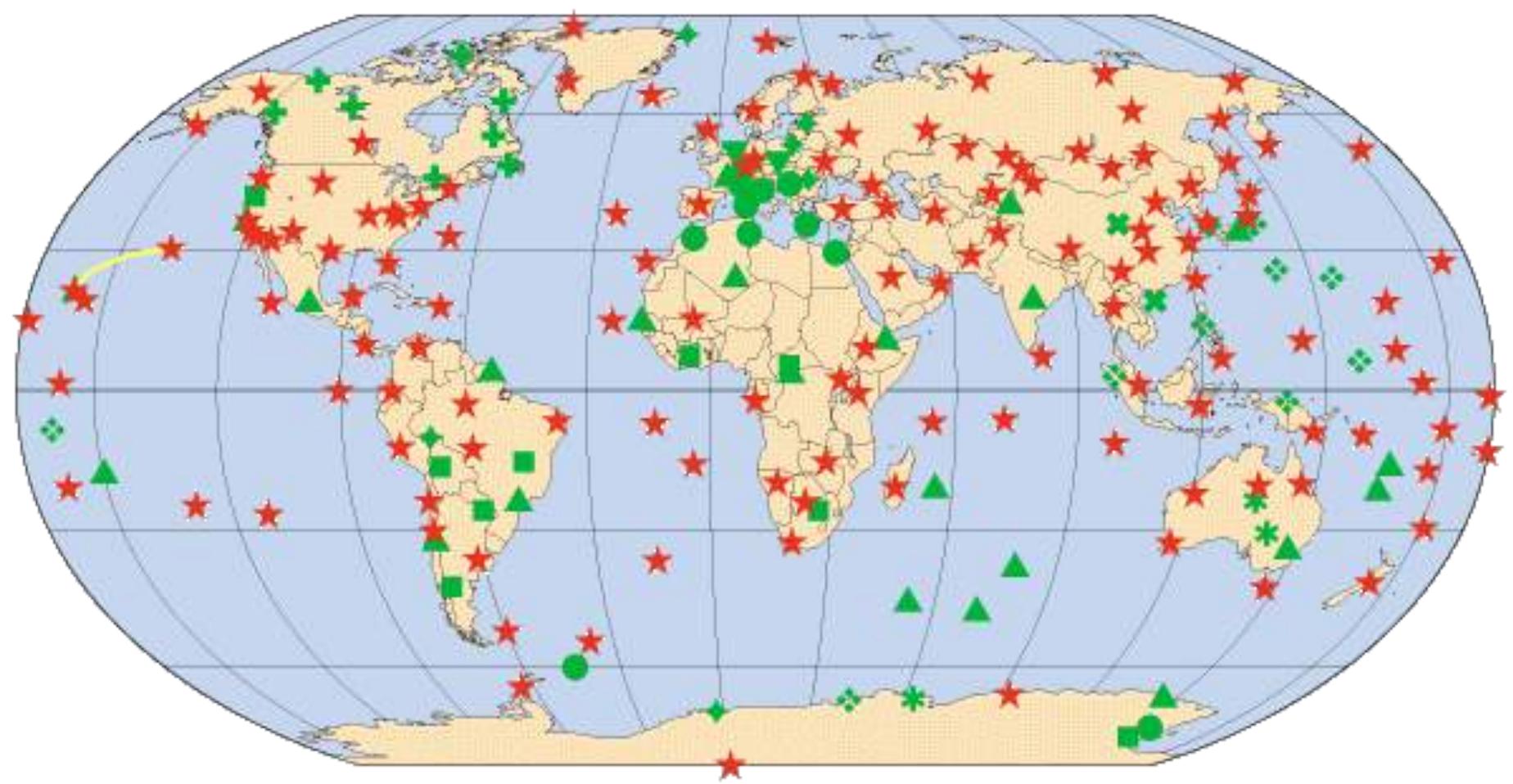
Source: Mw 9.0 (4°N,96.7°E-20m\*(200x150km),90°rake,13°dip,300°strike,5m depth)+(7.3559°N,94.1393°E-20m\*(670x150km),90°rake,13°dip,345°strike,5m depth)+(11.805°N,93.4723°E-20m\*(300x150km),90°rake,13°dip,365°strike,5m depth)



# Séisme d'Alaska du 28/03/1964 Mw 9.2



# GSN & FEDERATION OF DIGITAL BROADBAND SEISMIC NETWORKS (FDSN)

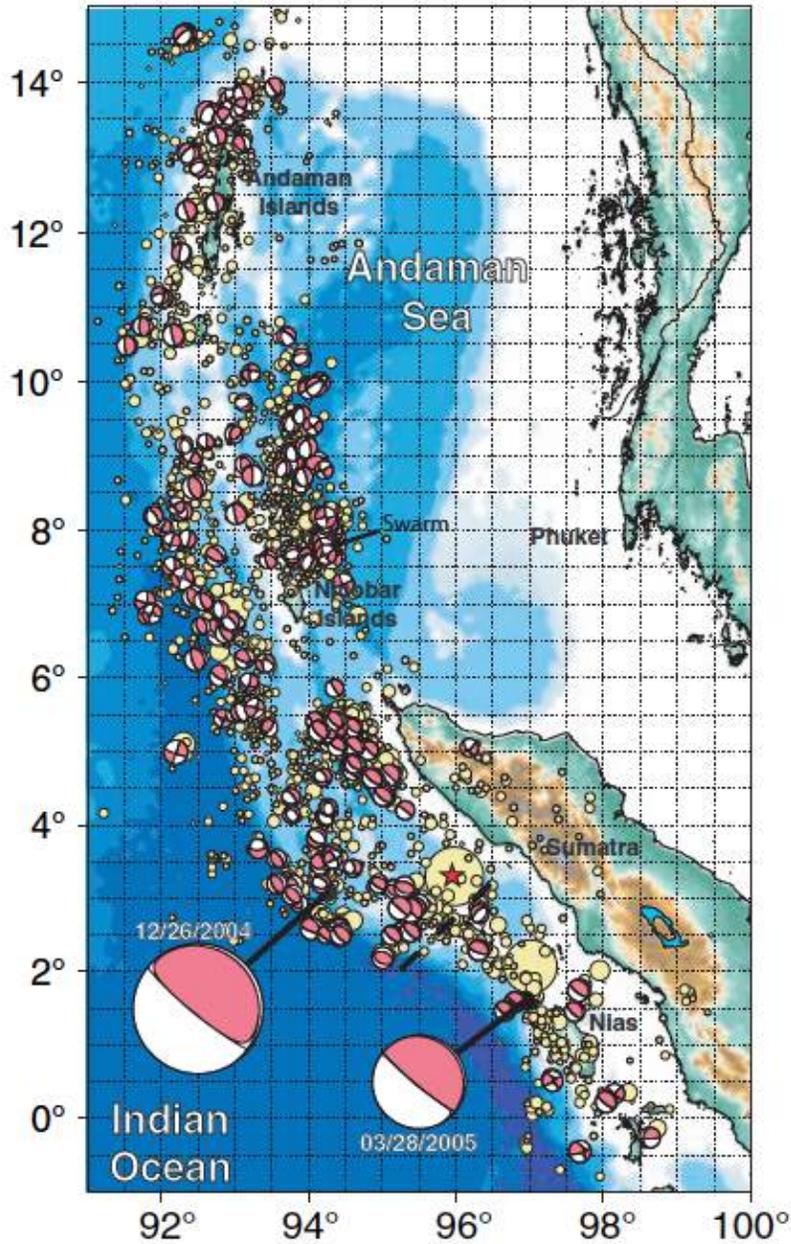


- |          |        |       |       |         |       |           |      |        |       |
|----------|--------|-------|-------|---------|-------|-----------|------|--------|-------|
| IRIS GSN | France | Japan | Italy | Germany | China | Australia | U.S. | Canada | Other |
| ★        | ▲      | ◆     | ●     | ◆       | ✖     | ✱         | ■    | +      | ▼     |

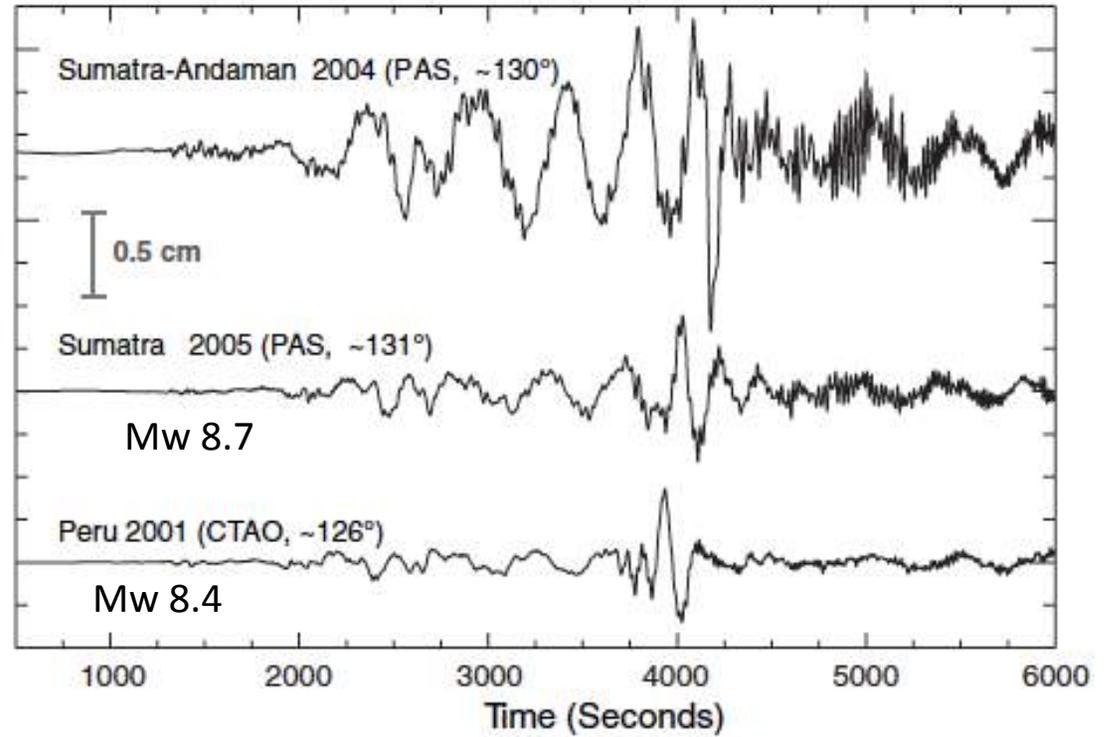
## Sismomètres STS-1



*Ref: Wielandt et Steckel, 1975*



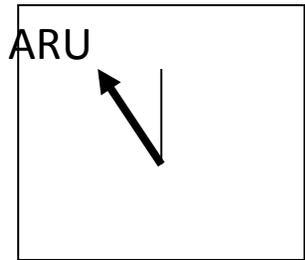
Sumatra-Andaman 26/12/2004 Mw 9.2  
 Sumatra-Nias 28/03/2005 Mw 8.7



Composante verticale du déplacement

Directivité

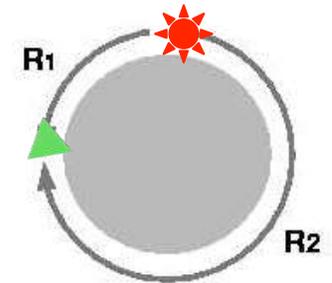




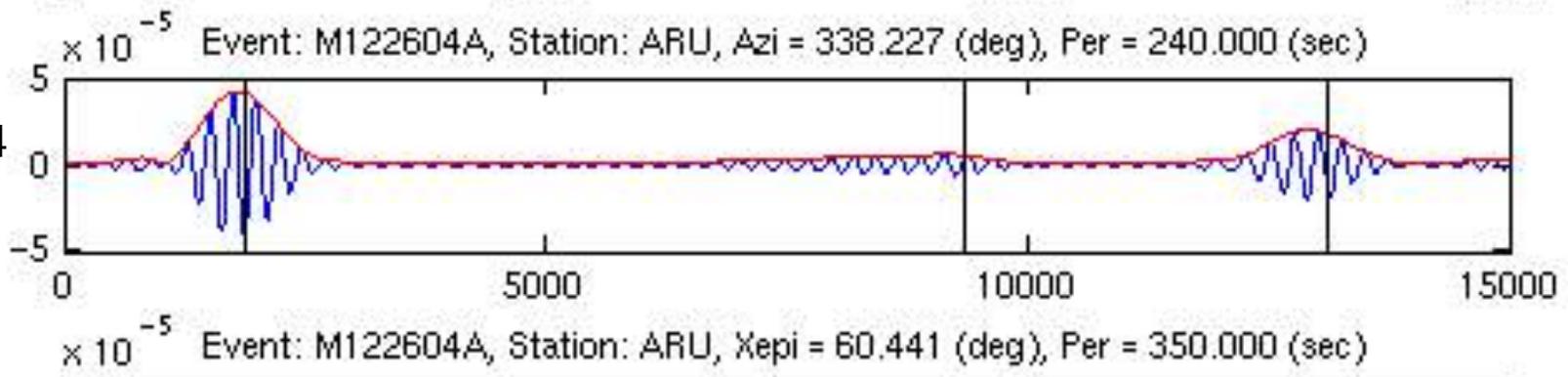
ARU

Distance = 6705 km

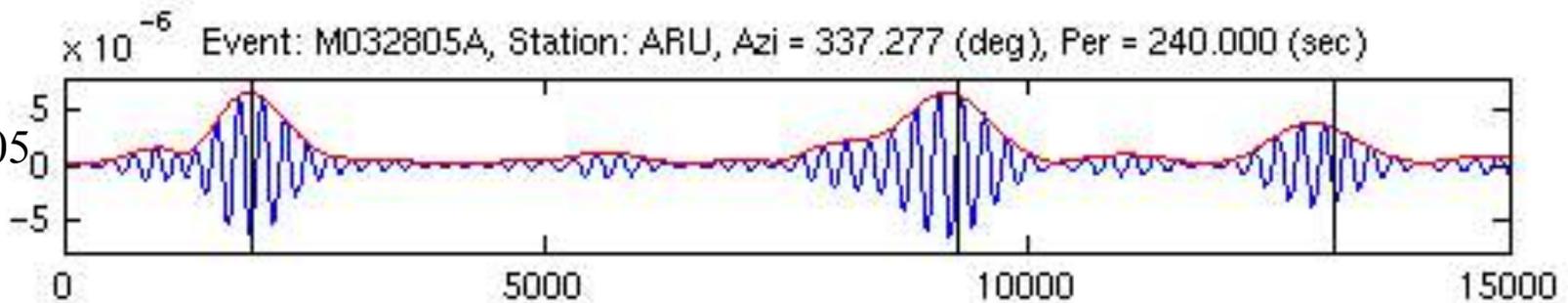
Azimuth = 337°



Dec. '04  
event



March '05  
event

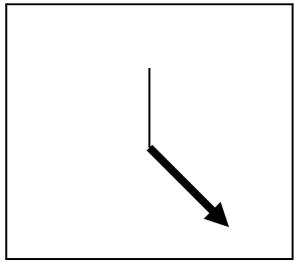


R1

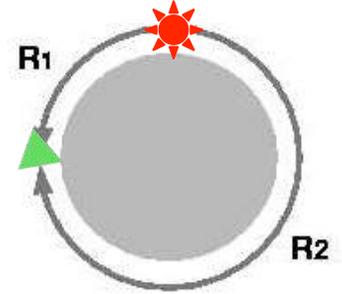
R2

R3

Effet de la directivité de la source

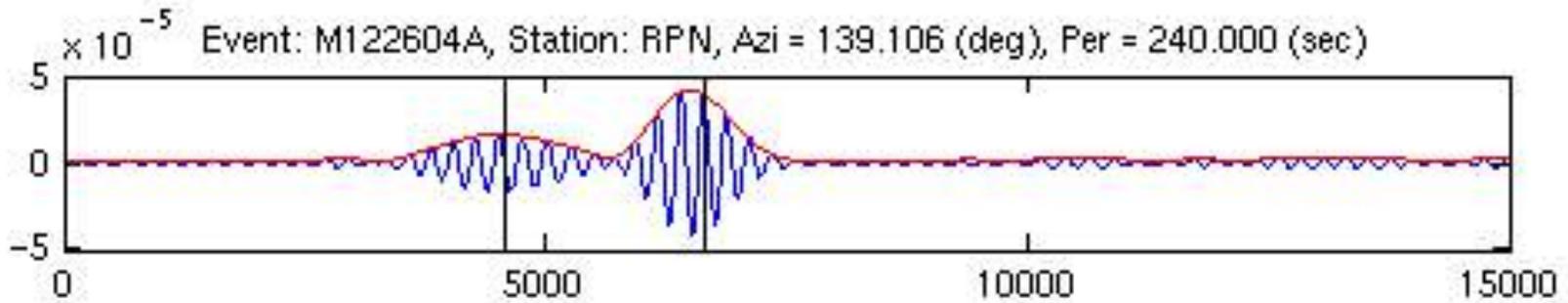


RPN  
Distance 16360 km  
Azimuth 137°

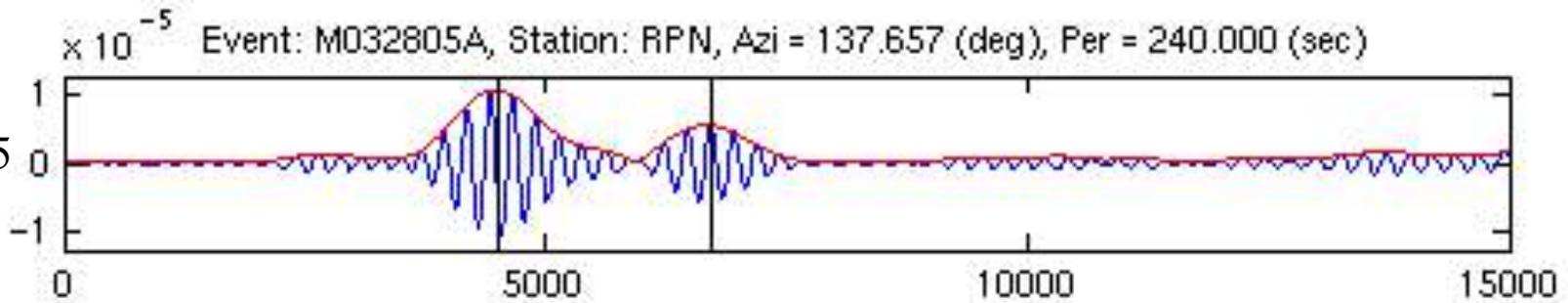


RPN

Dec.' 04  
event



March' 05  
event



R1 R2

# Séisme de Sumatra-Andaman 26/12/2004 Mw 9.2: chronologie

- Après le temps initial de la rupture (hypocentre):
  - 15mn: Détermination automatique de la magnitude  $m_b = 6.2$  (USGS)
  - ~1h 15mn:  $M_s = 8.5$  (USGS)
  - Alerte internationale, en particulier le PTWC (Pacific Tsunami Warning Center)
  - Peu de temps après
    - Modèle de glissement rapide (C. Ji, Caltech) durée de rupture 200 s, longueur: 300 km,  $V_r = 2$  km/s
    - Détermination rapide CMT  $M_w \sim 9.0$
- Au début: controverse sur la longueur de la rupture:
  - ondes de volume et temps de parcours des tsunamis : 600-800 km
  - Enregistrements hautes fréquences  $\rightarrow$  1300 km.
- Révisé depuis: Mw 9.2 et longueur de rupture 1300 km
- La source du tsunami a-t-elle impliqué la longueur totale de la rupture?

## Magnitude 9.0 OFF THE WEST COAST OF NORTHERN SUMATRA Sunday, December 26, 2004 at 00:58:53 UTC

### Preliminary Earthquake Report

U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center  
World Data Center for Seismology, Denver

#### Preliminary Rupture Model

Contributed by Chen Ji, Caltech

#### DATA Process and Inversion

We used the GSN broadband data downloaded from the IRIS DMC. We analyzed 15 teleseismic P waveforms and 13 SH waveforms selected based upon data quality and azimuthal distribution. Waveforms are first converted to displacement by removing the instrument response and then are used to constrain the slip history based on a finite fault inverse algorithm (Ji et al, 2002). We use the hypocenter from the USGS (Lon.=95.78 deg.; Lat.=3.30 deg.). The fault planes are defined by slightly modifying the quick moment tensor solution from HARVARD (strike=320 deg. and dip =11 deg.)

#### Result

The seismic moment release on this plane is  $3.57 \times 10^{29}$  dyne.cm using a 1D crustal model interpolated from CRUST2.0 (Bassin et al., 2000). The total rupture duration is 200 sec and the peak slip is about 20 m. The rupture propagates northwestward for nearly 400 km with a speed of 2.0 km/sec.

#### Cross-section of slip distribution

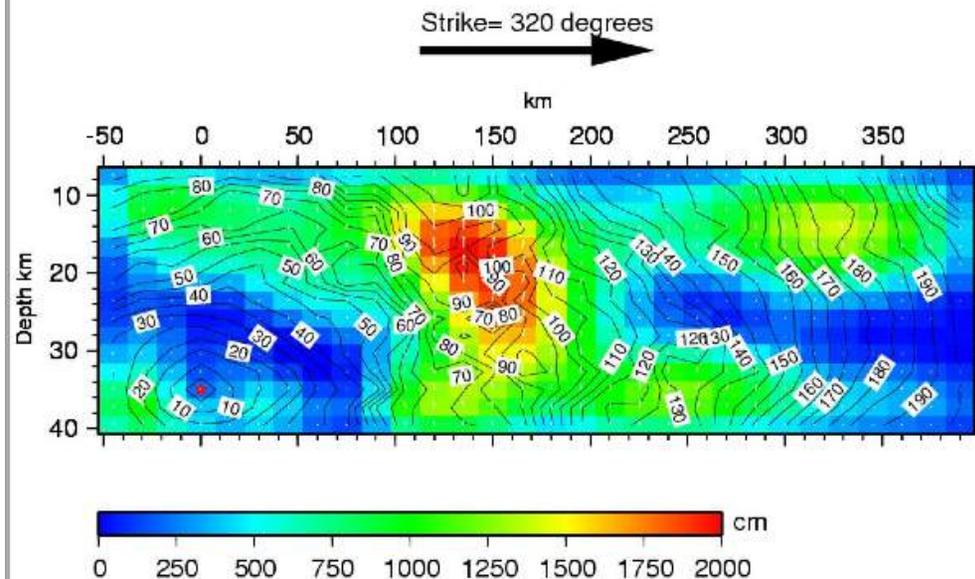
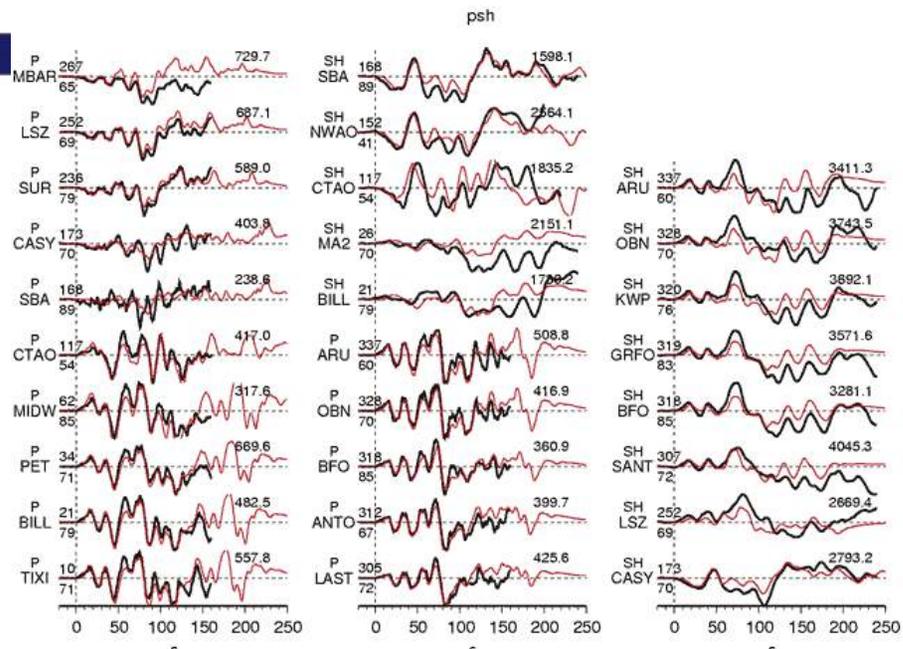
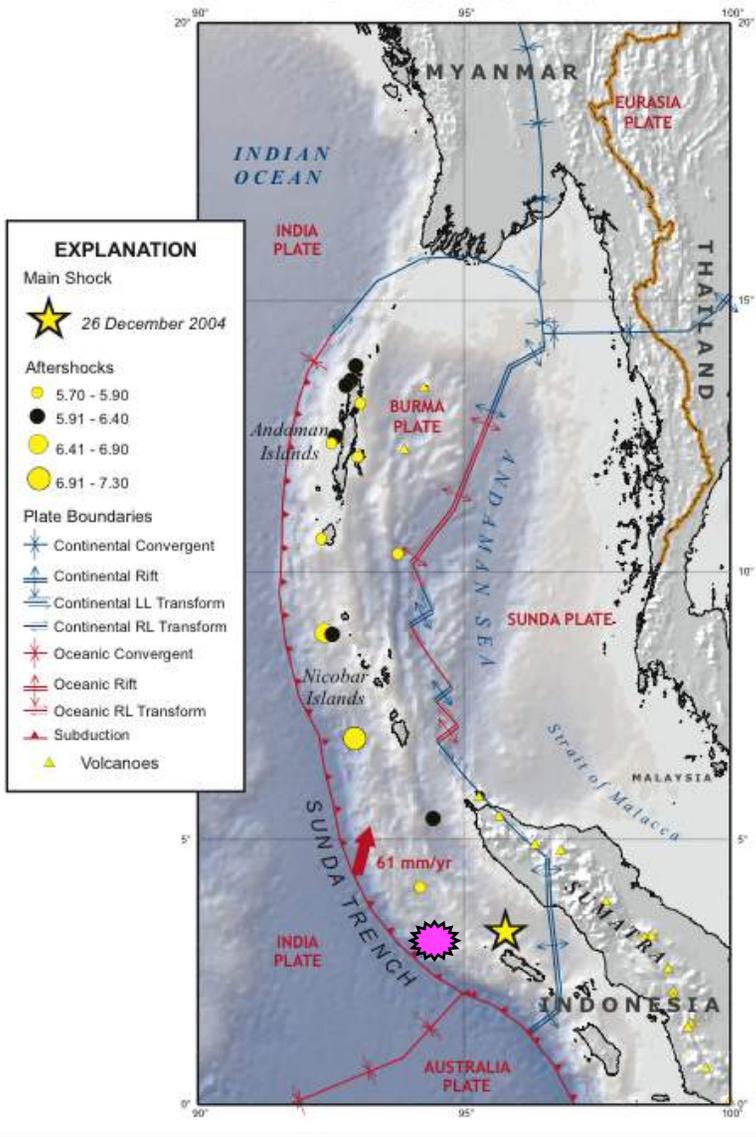
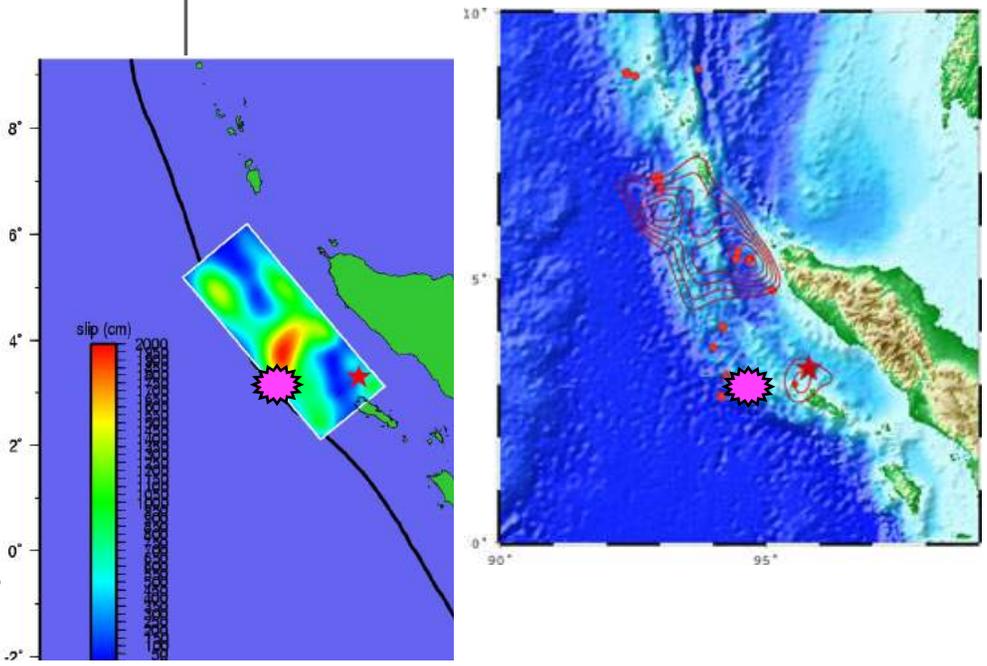


Figure: The big black arrow shows the fault's strike. The colors show the slip amplitude and white arrows indicate the direction of motion of the hanging wall relative to

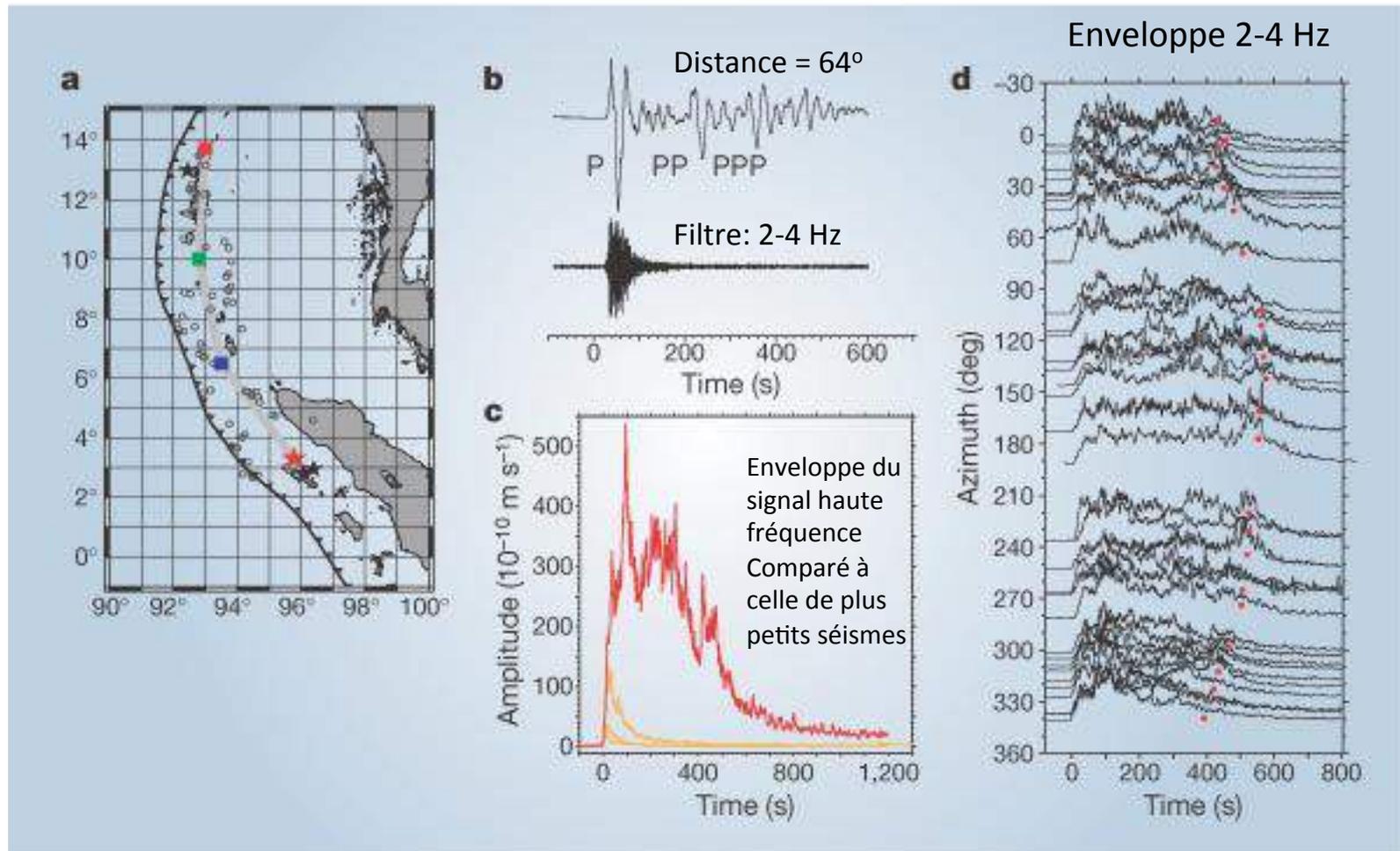
# M9.0 Andaman - Nicobar Islands Earthquake of 26 December 2004



Harvard CMT (Mw 9.0, strike=329)



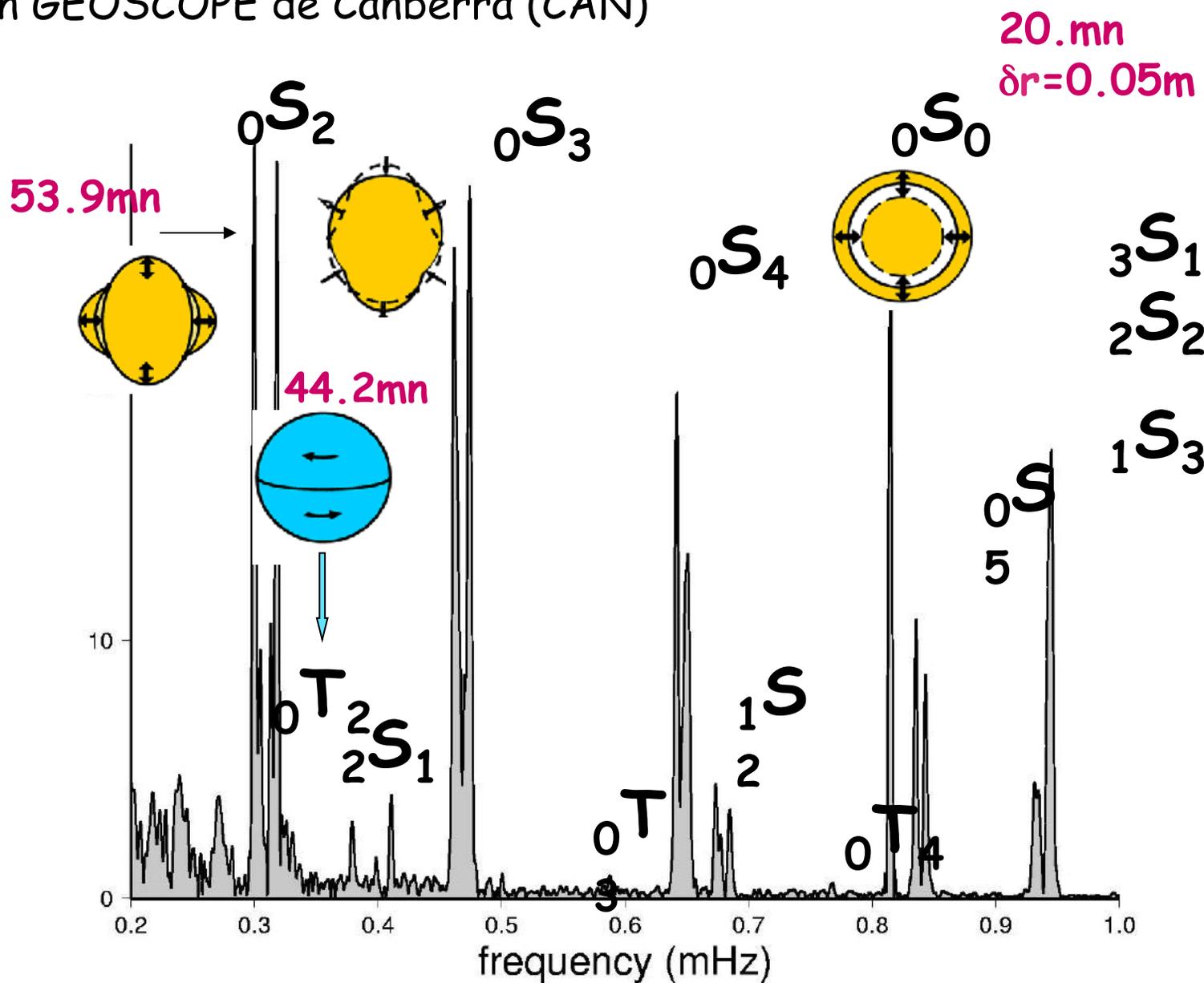
## Vue de la rupture à haute fréquence



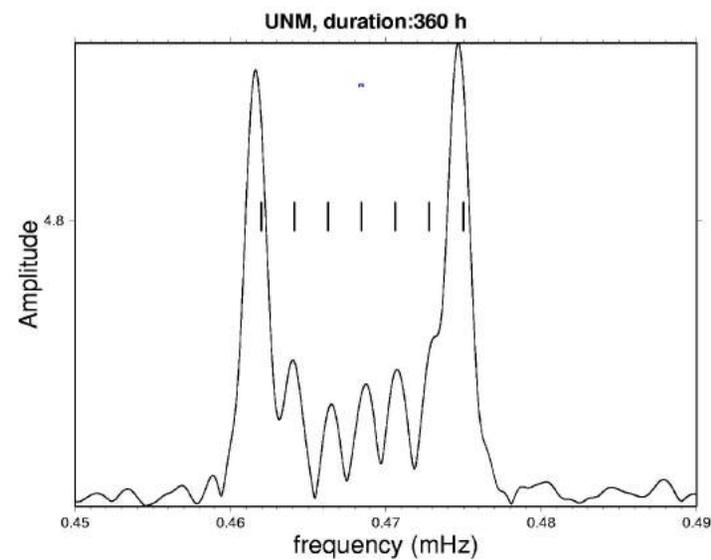
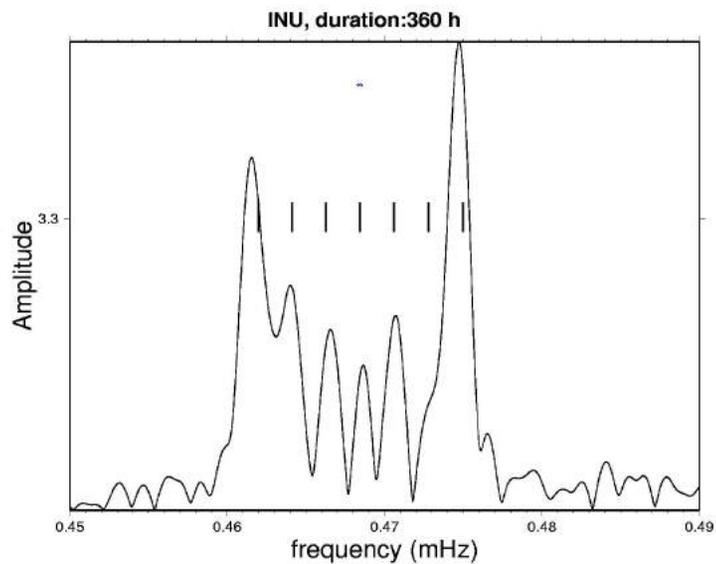
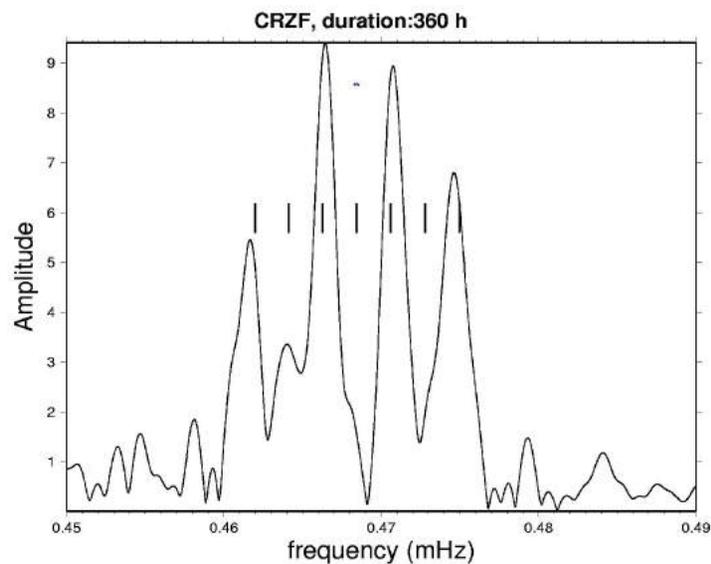
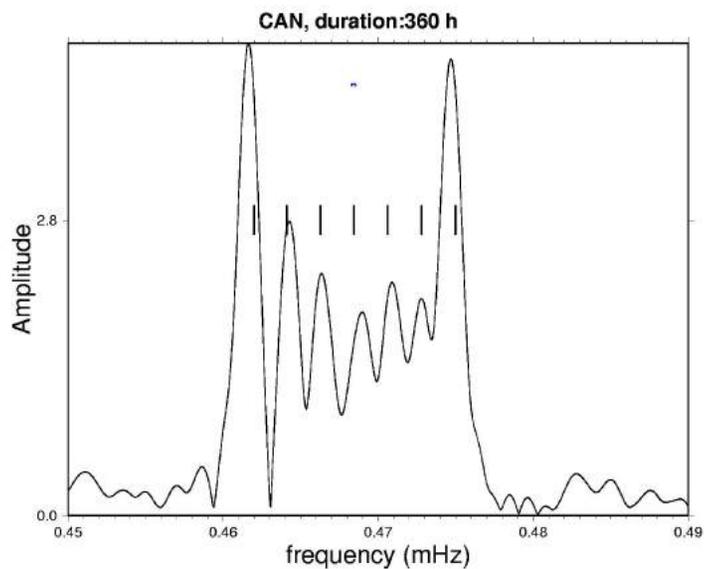
- Fin de la rupture - Ondes de volume 10-50s (durée d'enregistrement trop courte)
- Fin de la rupture – hautes fréquences

-> longueur de la rupture ~ 1200 km, vitesse de la rupture moyenne 2.5 km/s:

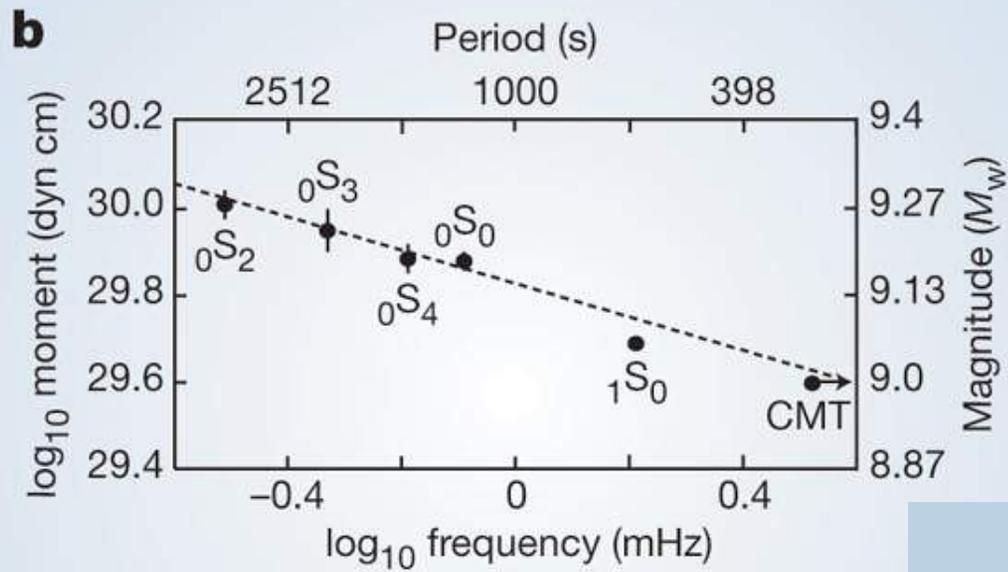
Sumatra-Andaman 26/12/2004 Mw 9.2  
 station GEOSCOPE de Canberra (CAN)



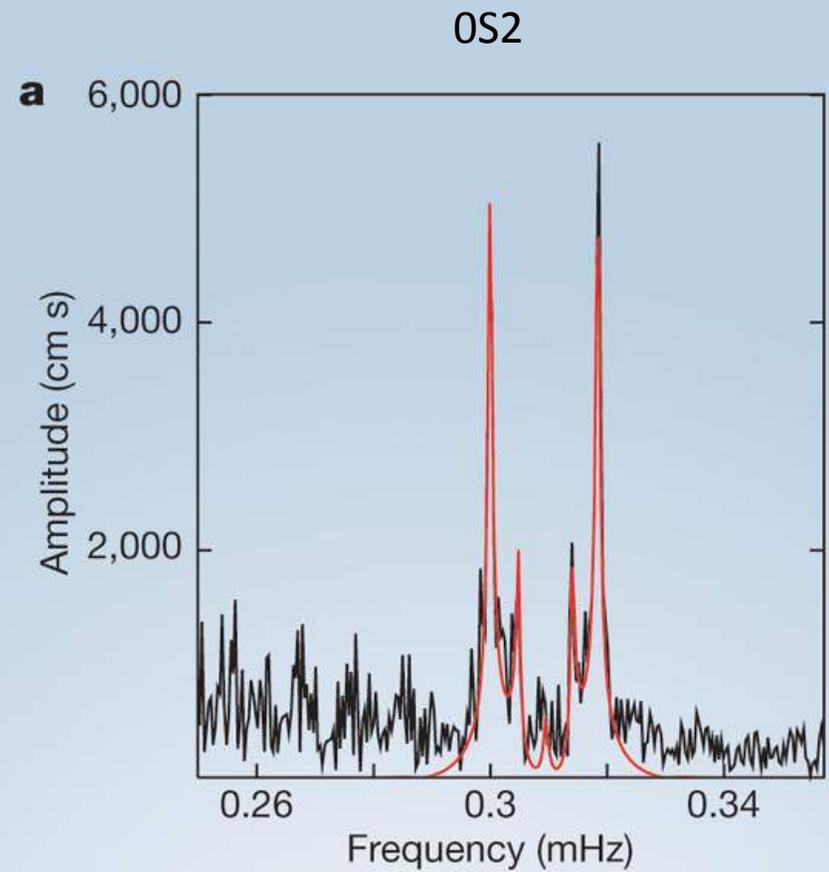
mode  ${}_0S_3$  7 singlets



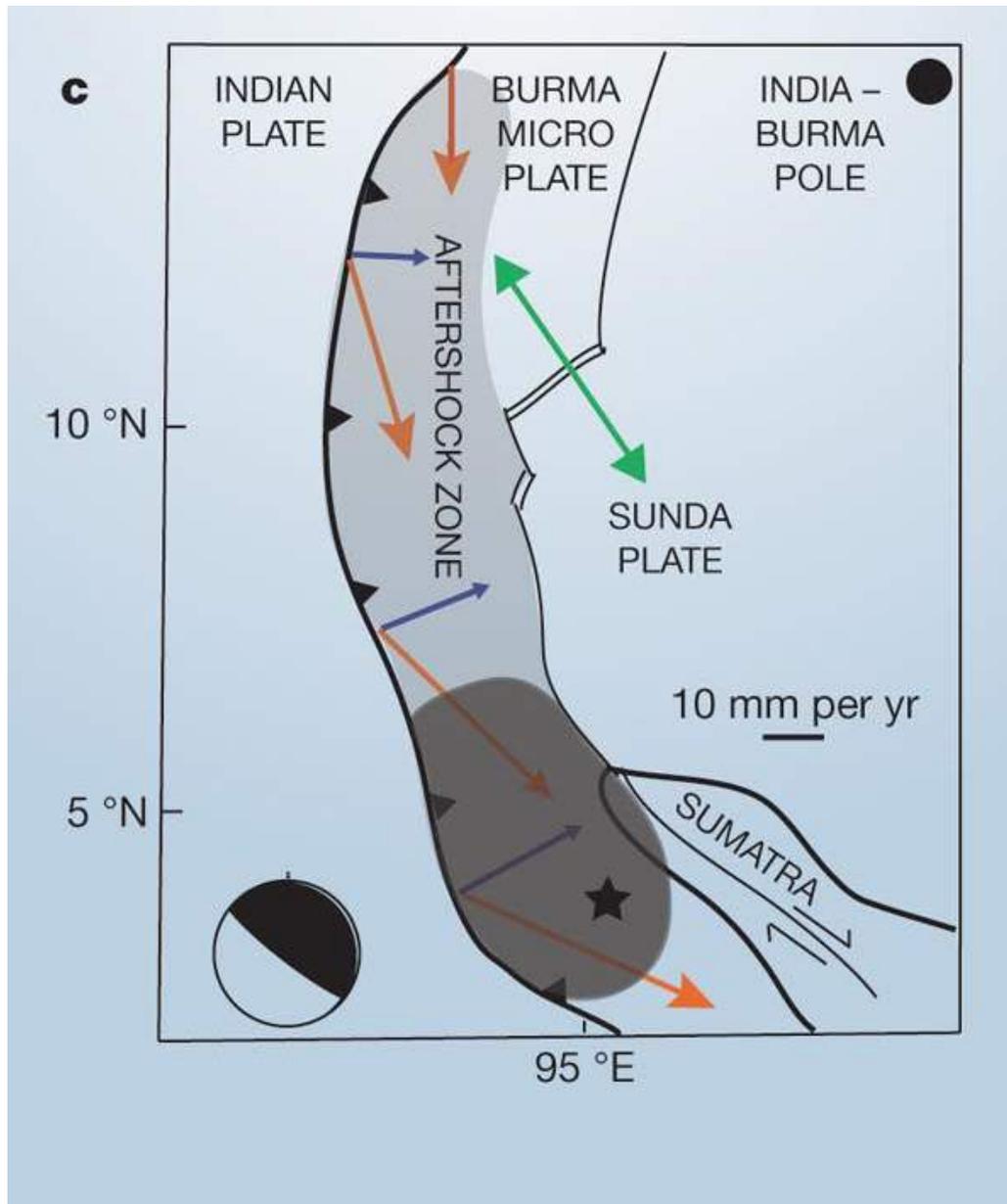
Mode  ${}_nS_l$  Composé de  $2l+1$  "singlets"



$M_0 \sim 10^{30}$  dyne-cm  
 $M_w \sim 9.3$



*Stein and Okal, Nature, 2005*



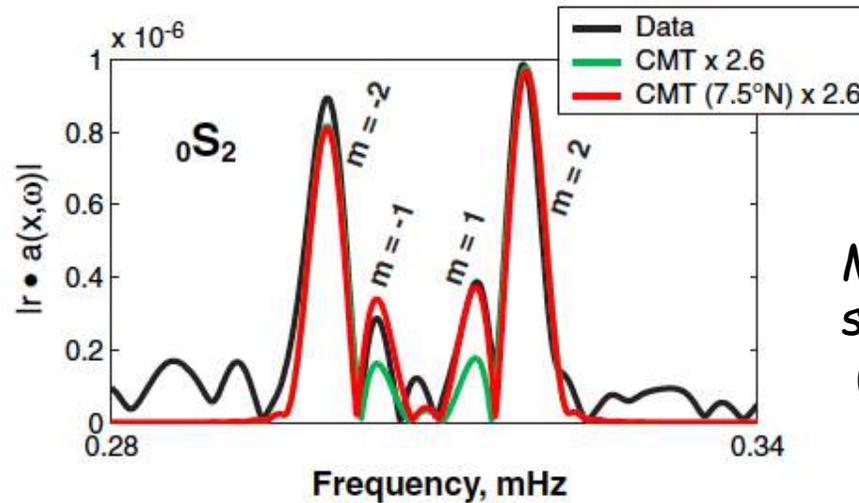
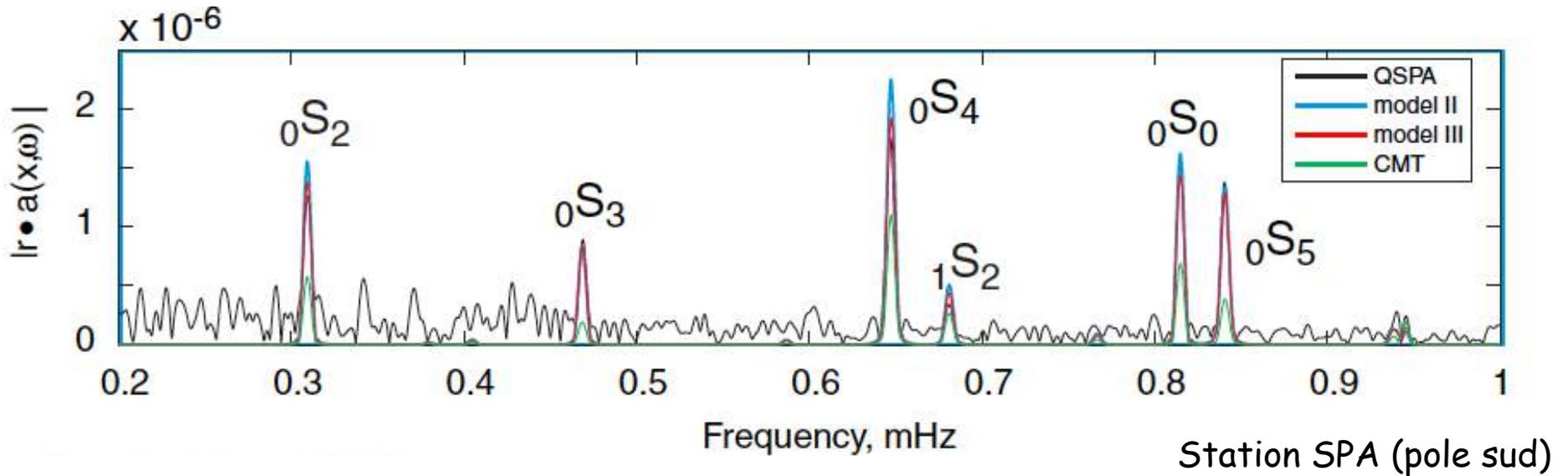
Moment total Mw 9.3

Glissement lent sur 2/3 de la rupture

Glissement rapide sur 1/3 de la zone de rupture  
Mw 9.0

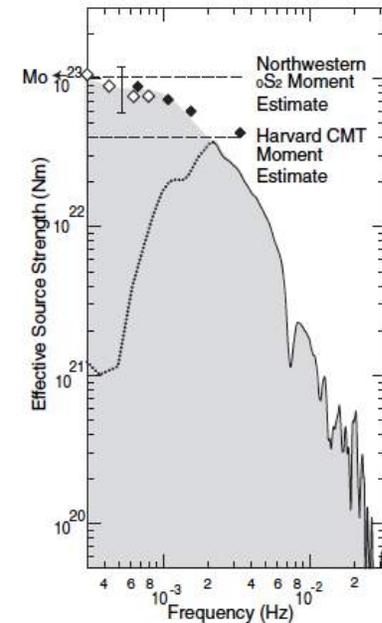
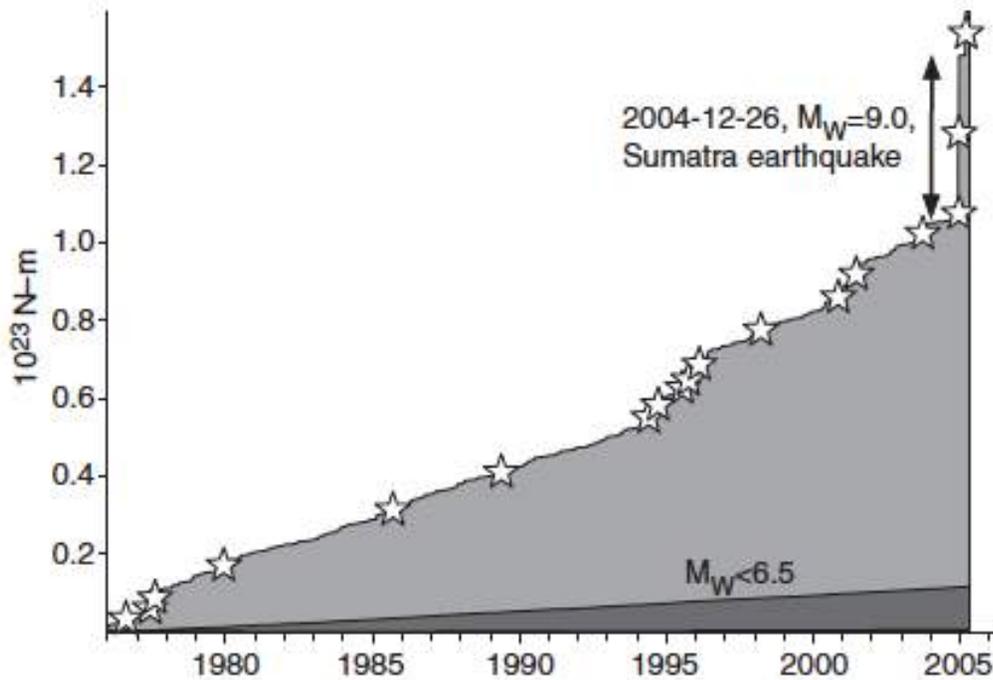
*Stein and Okal, 2005*

## Spectres observés et calculés pour différents modèles



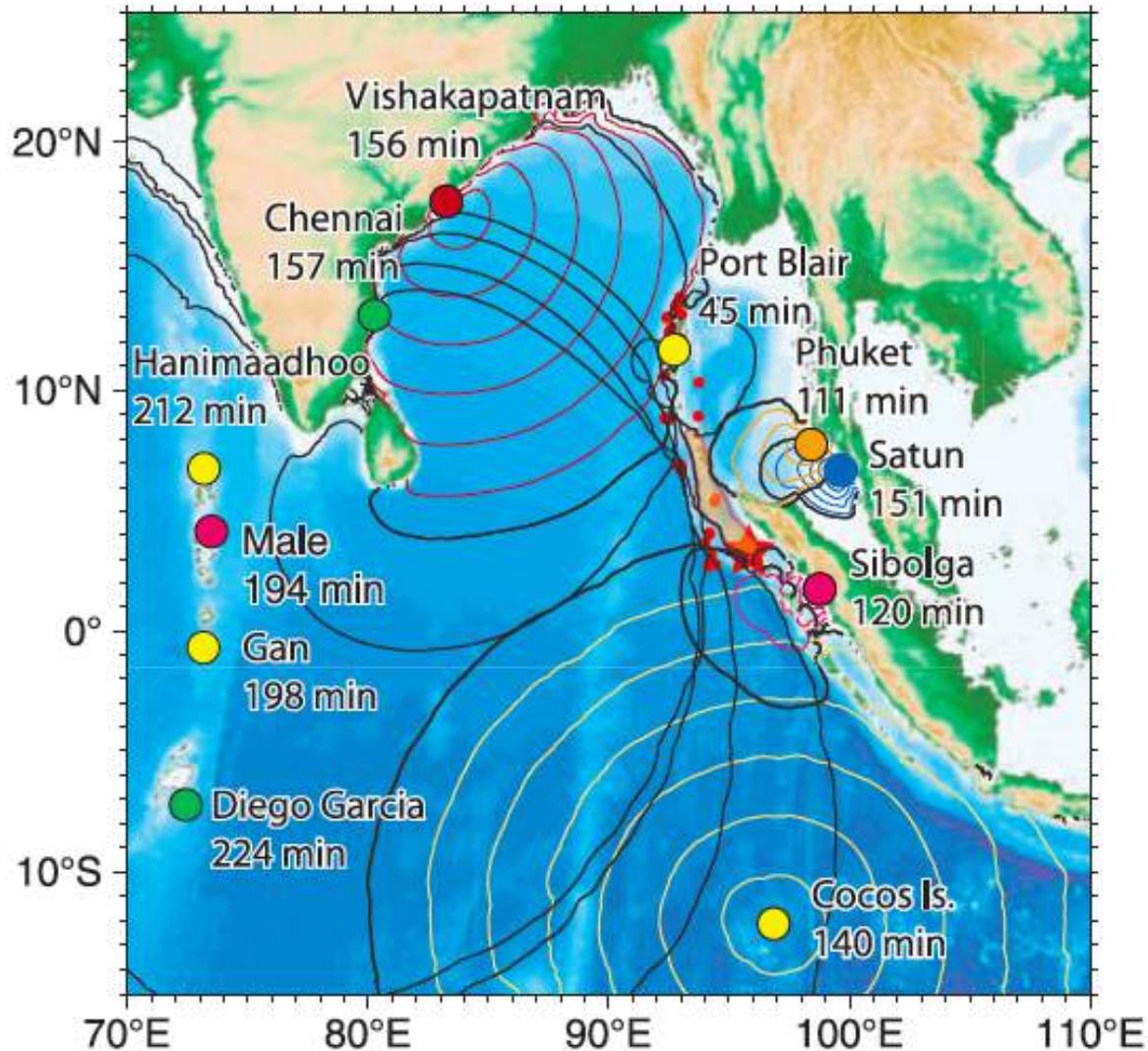
Mode  ${}_0S_2$   
station OSI  
(Osito, Californie)

Le moment sismique du séisme de Sumatra de 2004 est comparable à la somme des moments sismiques de tous les séismes des 10 années précédentes



Spectre de la source estimé par les ondes de surface (stack de R1 sur plus de 200 stations)  
En grisé= spectre composite

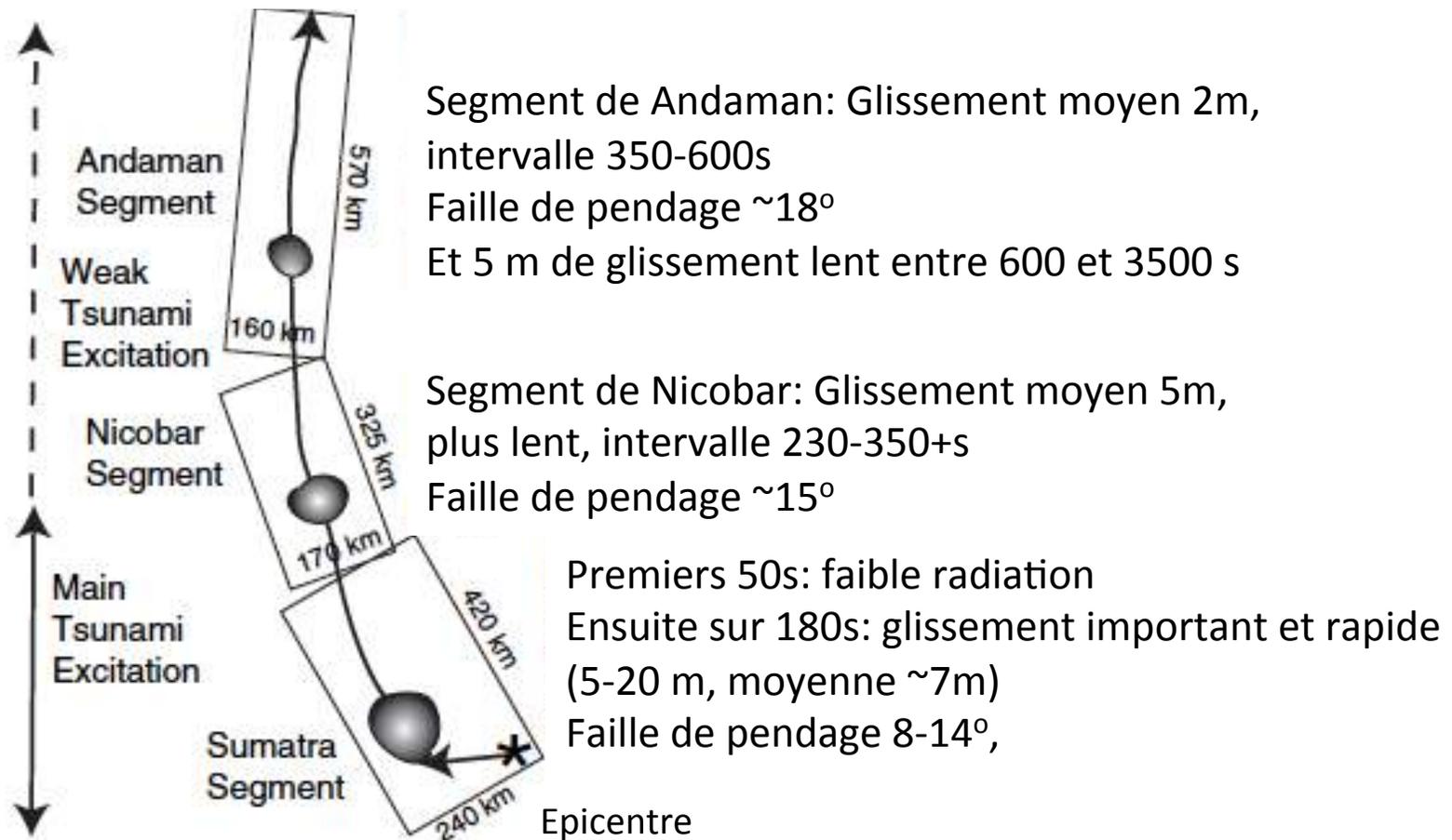
## Localisation de la source du tsunami à partir du temps d'arrivée à différents points autour de l'océan indien



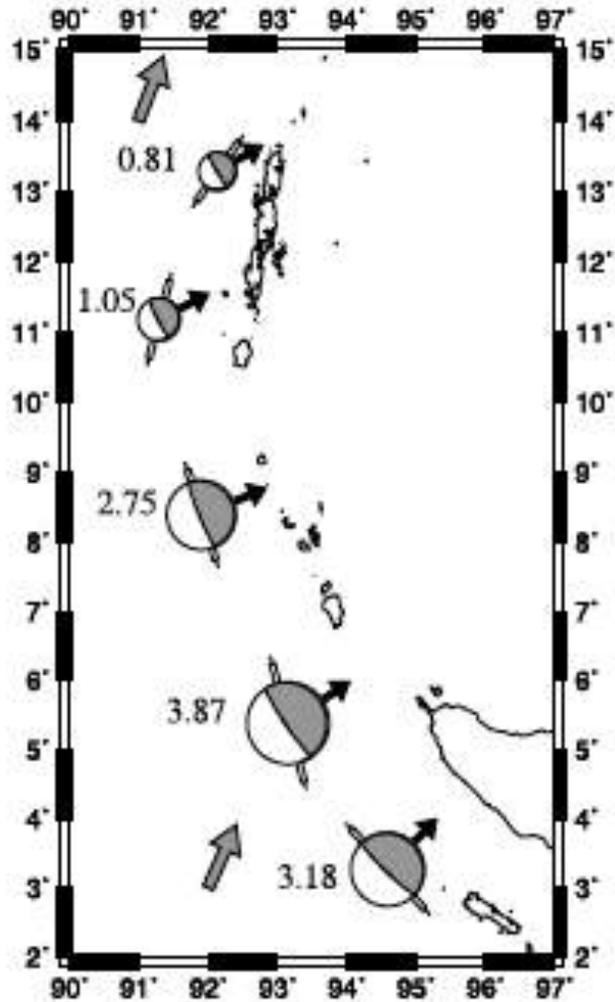
*Résultats préliminaires:*  
La zone de rupture engendrant le tsunami semble s'étendre seulement 600-800 km depuis l'épicentre

# Séisme de Sumatra 26/12/2004 Mw 9.2

## Schéma de déroulement de la rupture



# Sumatra 2004 Mw 9.2



*Tsai et al., 2005, GRL*

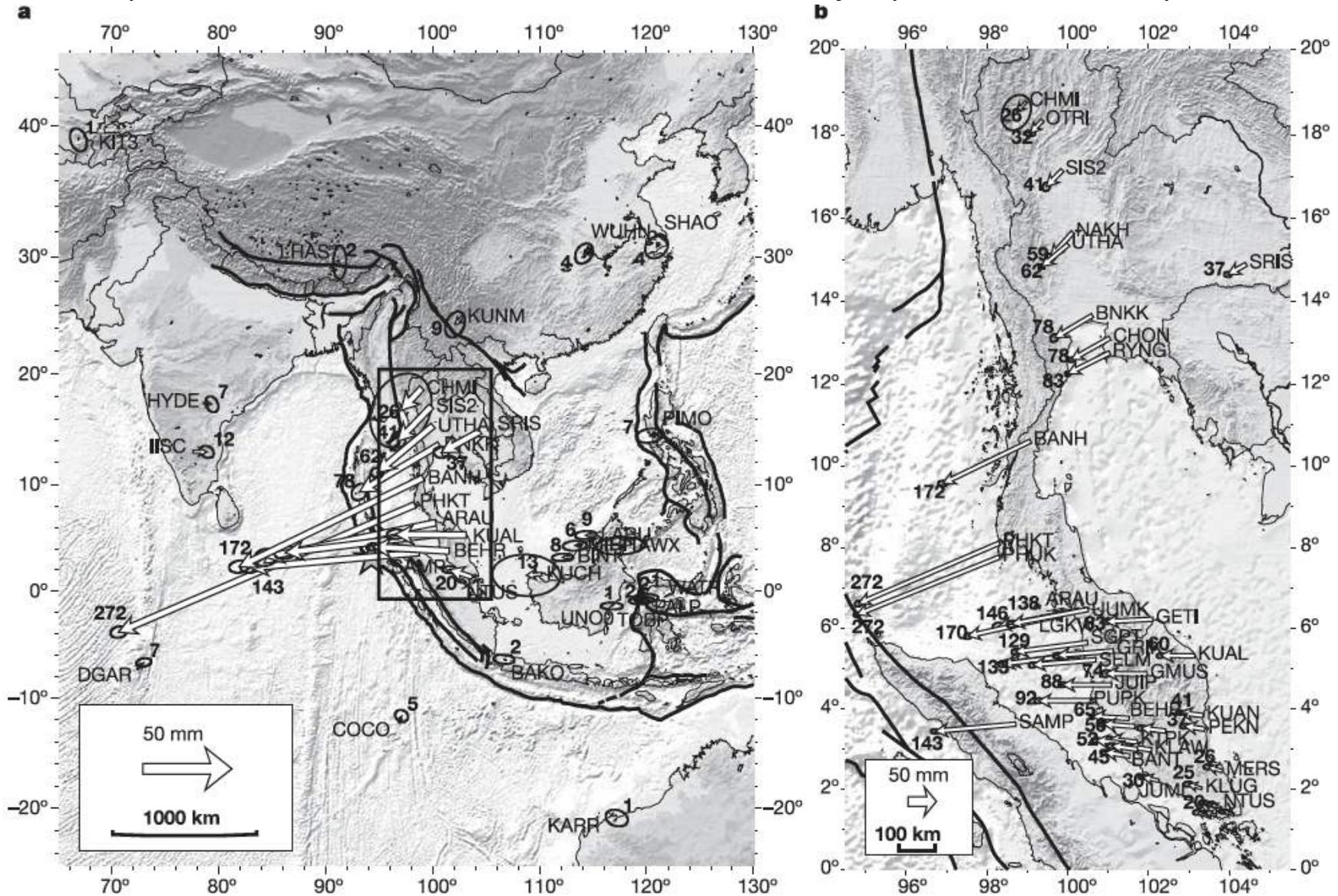
Méthode CMT – source multiple



*Ishii et al., 2005*

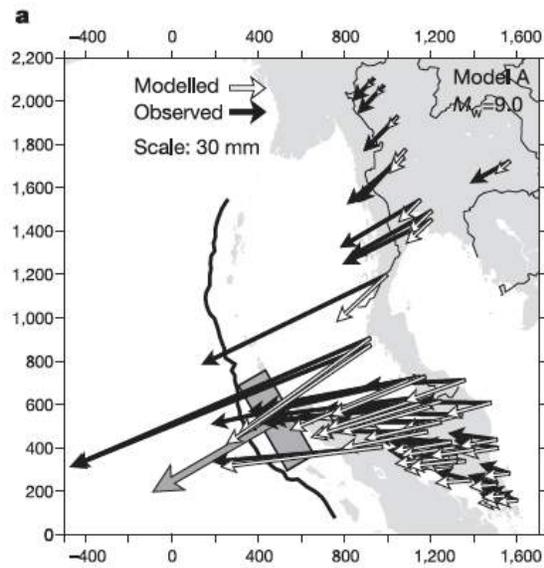
Rétroprojection

## Déplacements horizontaux dans 60 stations GPS – jusqu'à 3000 km de l'épicentre

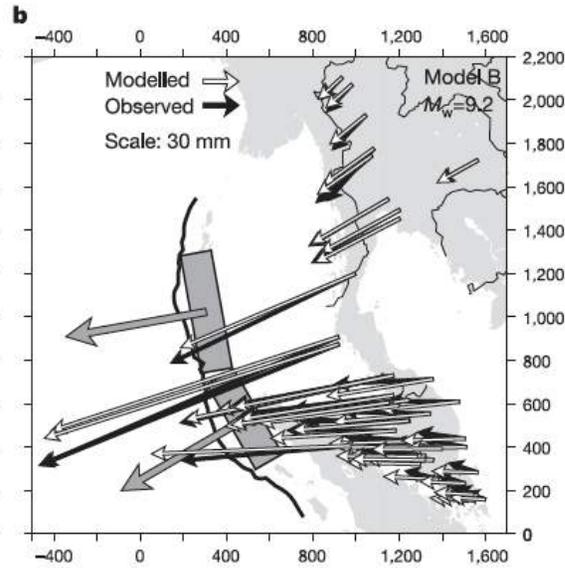


Rupture sur au moins 1000 km, centroïde à 200 km au nord de l'épicentre  
 Glissement de vitesse variable nécessaire

*Vigny et al., 2005*



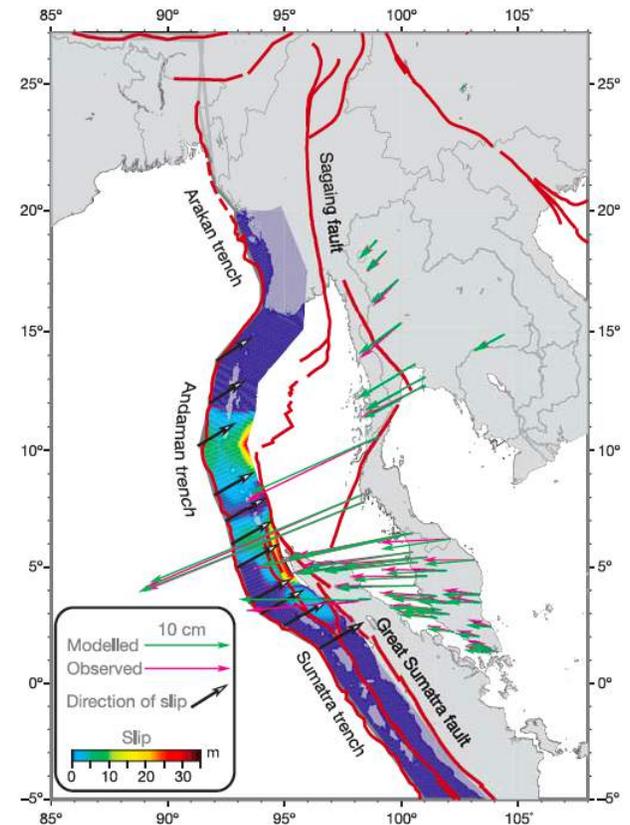
Modèle à 1 segment



Modèle à 2 segments  
d'orientation différente

## Modélisation des données GPS

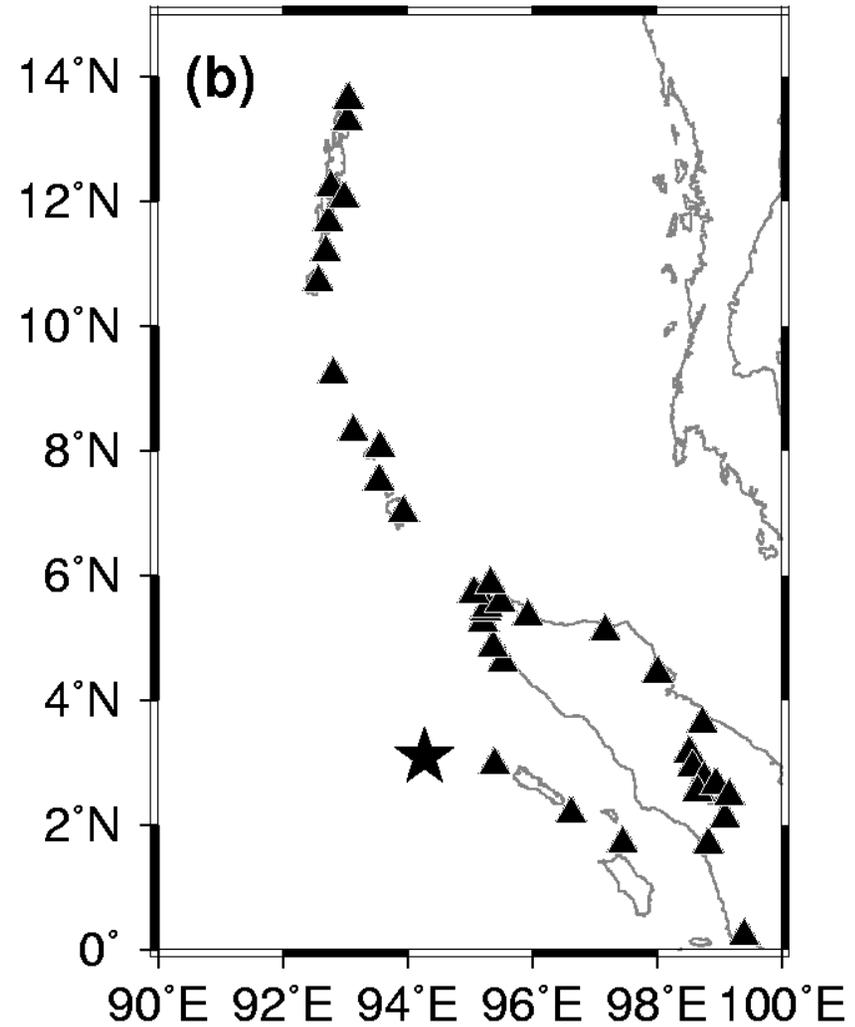
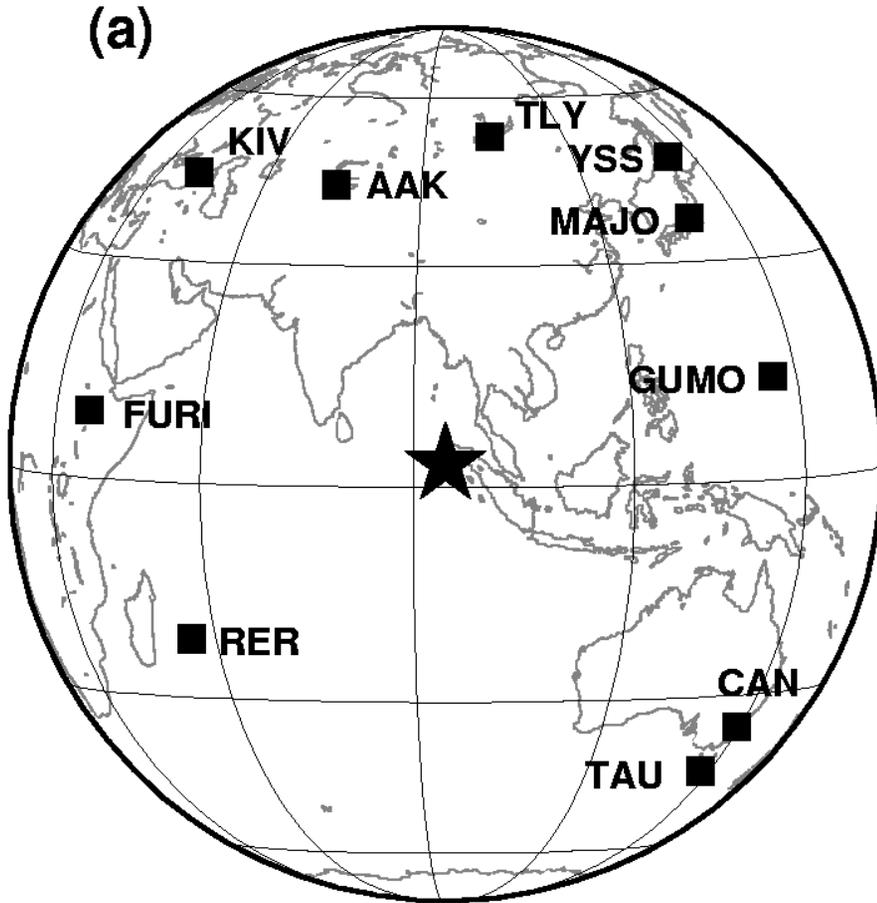
### Modèle à glissement variable



Inversion conjointe de données sismiques large bande et de données GPS

stations large bande STS-1

stations GPS



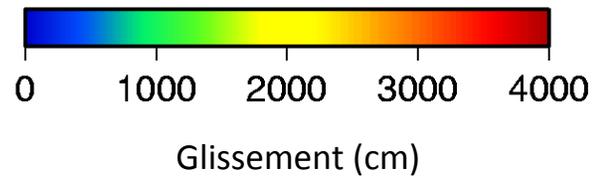
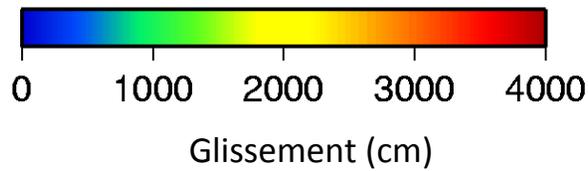
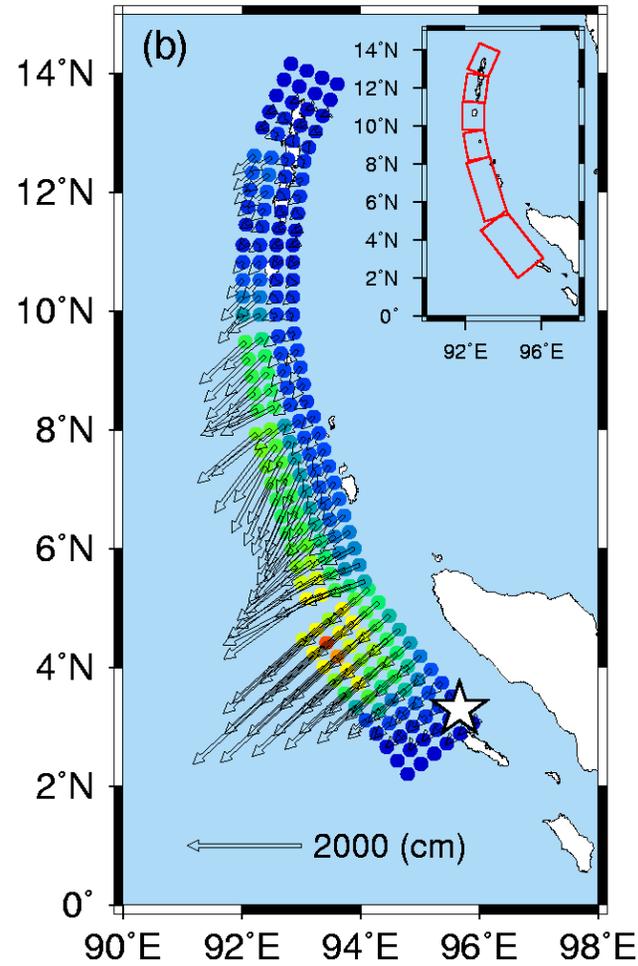
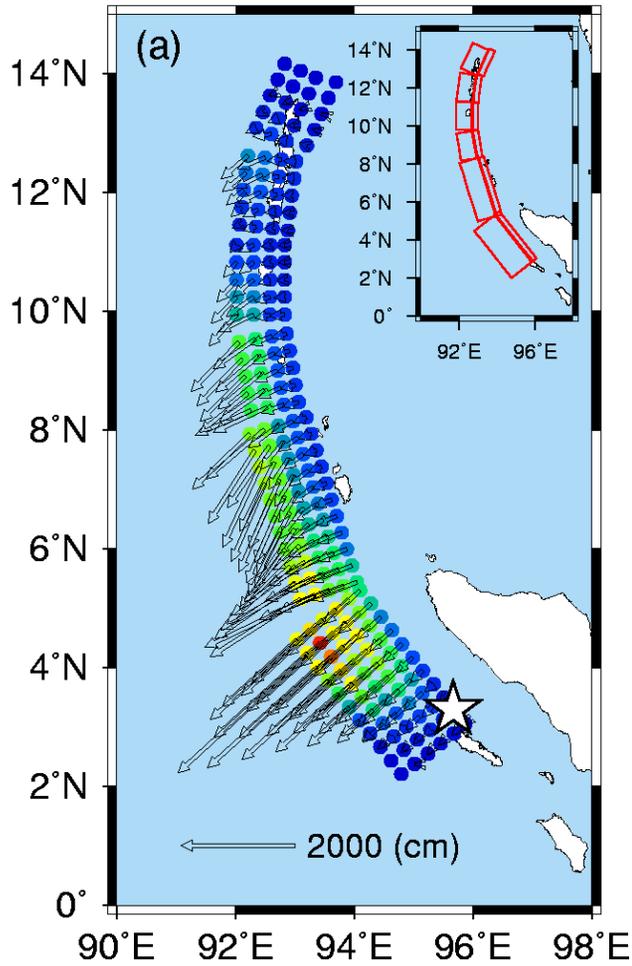
★ Epicentre  
Sumatra 26/12/2004 Mw 9.2

Slip Model AS

Slip Model BS

Mw =  
9.14

Mw =  
9.12

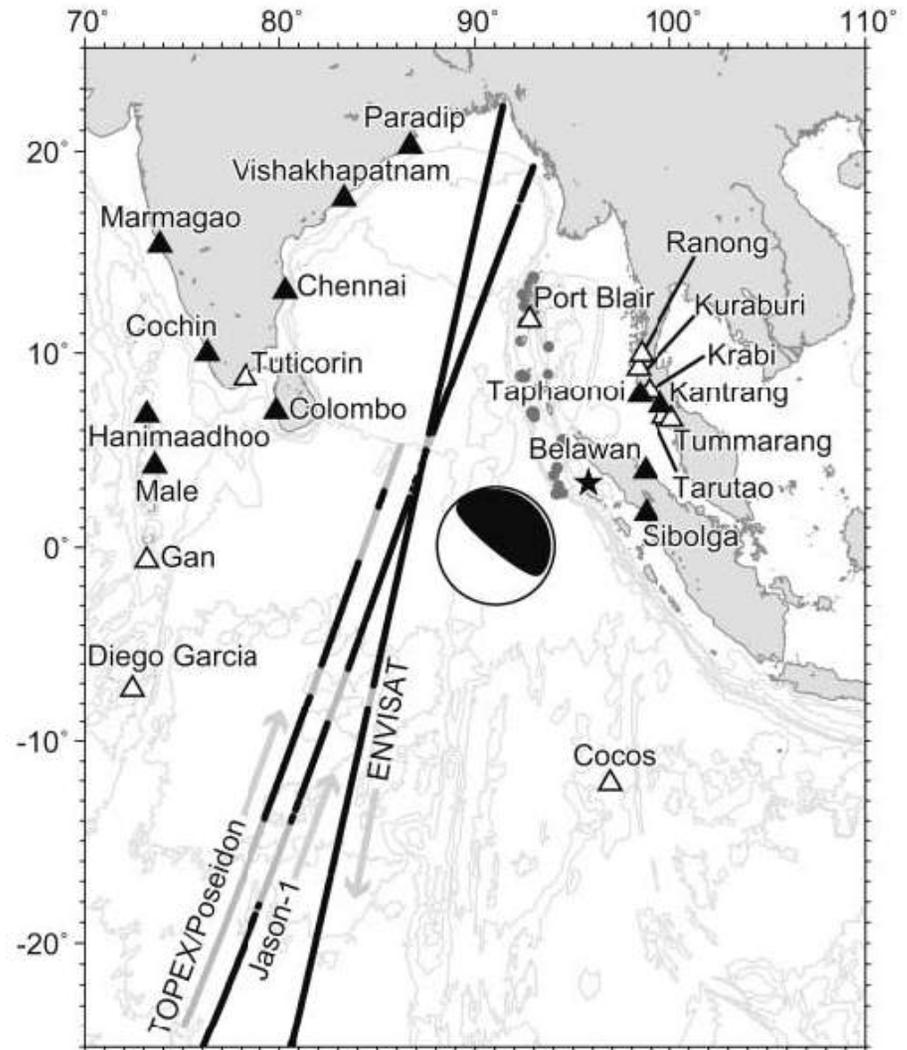


Vitesse de rupture constante 2.5 km/s

Rhie et al., 2007, BSSA

Modélisation de la source du tsunami du 26/12/2004:  
données de marégraphes + données satellitaires

- Source du tsunami pas bien résolue dans la partie Nord
- 12 marégraphes autour de la source
- Hauteur de la surface de la mer:
  - Données de 3 satellites: Jason, Topex/Poseidon and Envisat
  - Bathymetrie réaliste ( cartes nautiques et modele ETOPO2 )
  - Jason: 1.9 h apres le temps origine, capte signaux tsunamis pdf 11 mn du Sud au Nord.
  - TOPEX/Poseidon: 2h apres t.o.
  - Envisat: 3.2 h apres t. o.



Fujii and Satake, 2007