

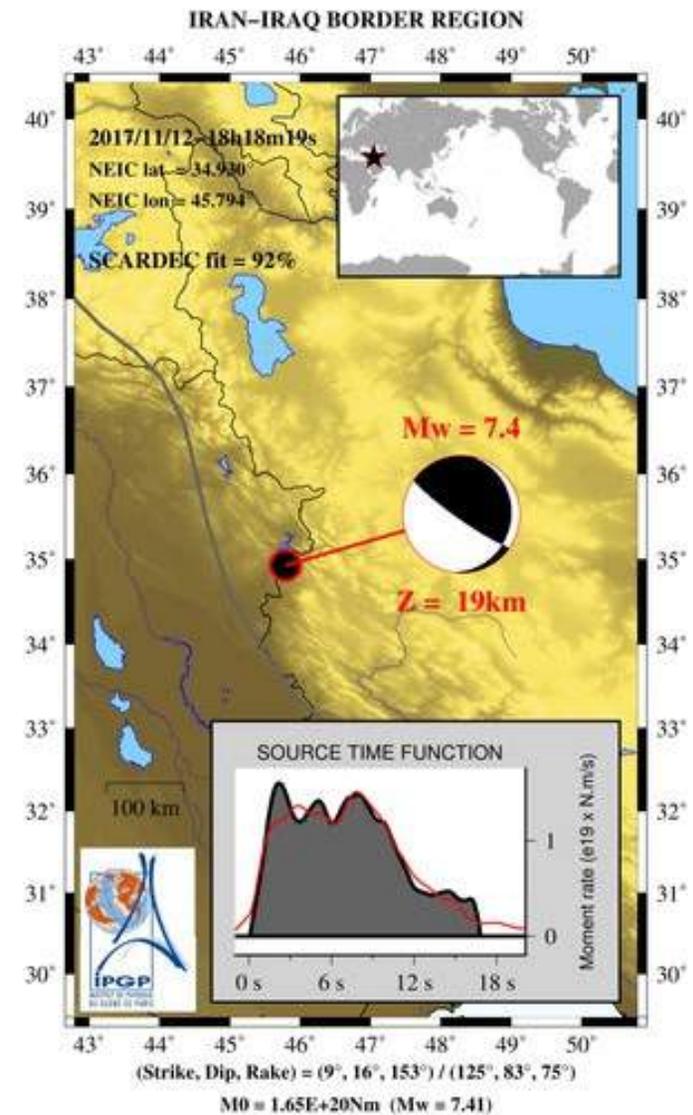
# “Les Grands Séismes: Observation et Modélisation”

5- Imagerie de la source sismique (fin)  
Le séisme de Fukushima (Tohoku) de 2011  
Mw 9.0

Lundi 13 Novembre 2017

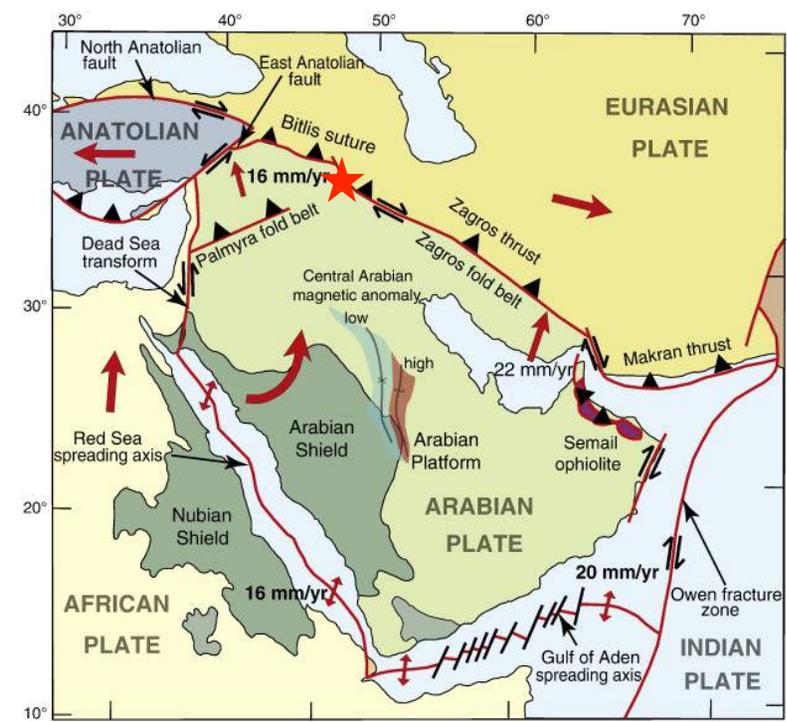
*Collège de France, salle Maurice Halbwachs,  
Professeur: Barbara Romanowicz,  
chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre*

# Paramètres à la source du séisme Iran/Irak du 12/11/2017 Mw 7.4



Méthode SCARDEC, réseau GEOSCOPE  
IPG de Paris

- 6 évènements de Mw >7 en 2017 (déficit?)
- 12/11/2017 Mw 7.4 Iran/Iraq (d= 19 km)
  - 19/09/2017 Mw 7.1 Mexico (d= 48 km)
  - 08/09/2017 Mw 8.2 Mexico (d = 47.4 km)
  - 17/07/2017 Mw 7.7 Russie (d = 10.0 km)
  - 22/01/2017 Mw 7.9 Nouvelle Guinée (d=135 km)
  - 10/01/2017 Mw 7.3 Philippines (d = 627.2 km)



Convergence ~ 26 mm/an

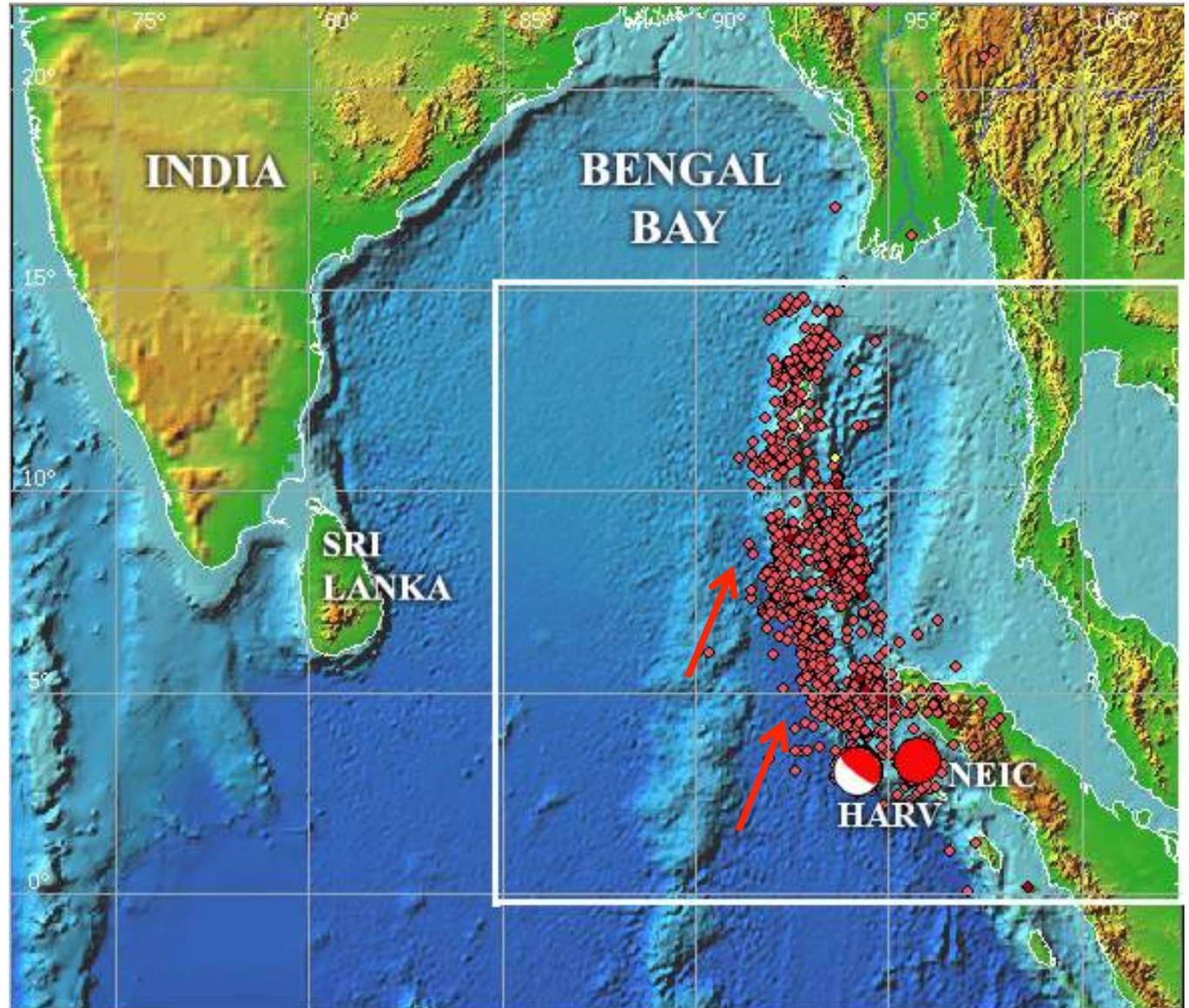
**Séisme du 12/26/04**  
**Sumatra / Andaman**  
**Mw 9.0-9.3**  
**Mw 9.2 (finale)**

-> Zone de  
rupture  
~1300 km

-> Glissement  
de ~15-20m

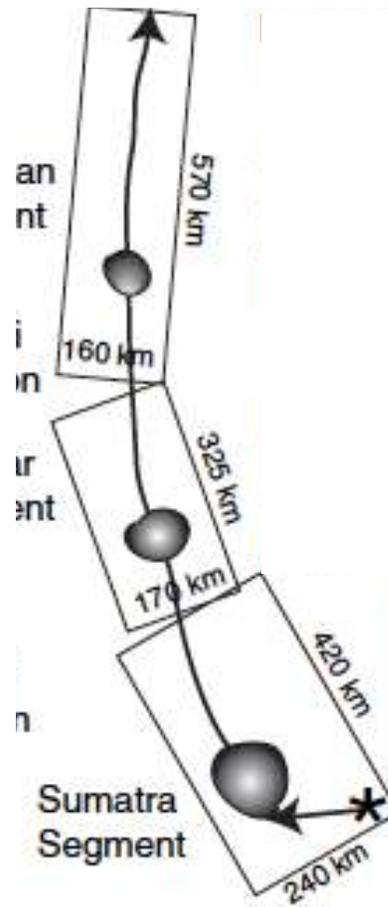
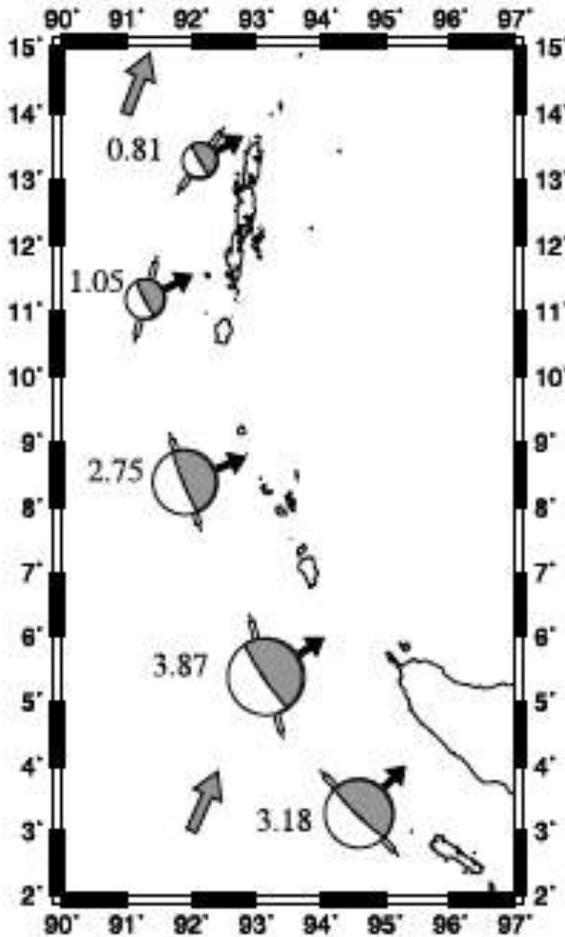
-> Durée de la  
rupture ~  
600 s

-> vitesse de  
rupture  
moyenne 2.4  
km/s



# Séisme de Sumatra 26/12/2004 Mw 9.2

## Schéma de déroulement de la rupture



350-600s: Glissement moyen 2m, Faille de pendage  $\sim 18^\circ$

Et.. 5 m de glissement lent entre 600 et 3500 s

-----

230-~350 s: Glissement  $\sim 5$ m, plus lent, Faille de pendage  $\sim 15^\circ$

-----

0- 50s: faible radiation

50-230 s: glissement important et rapide (5-20 m, moyenne  $\sim 7$ m)

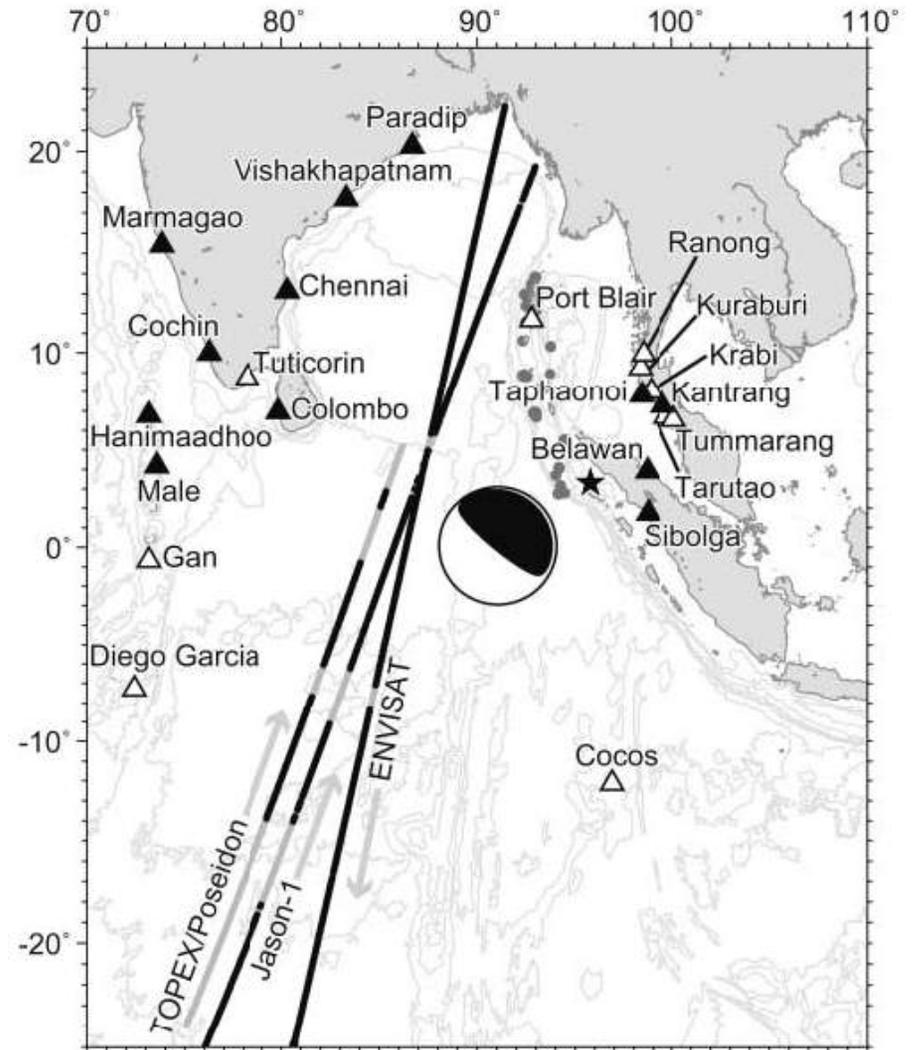
Faille de pendage  $8-14^\circ$ ,

-----

Epicentre

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

- *Source du tsunami peu 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 et Envisat
  - Jason: 1.9 h après le temps origine, capte signaux tsunamis pdt 11 mn du Sud au Nord.
  - TOPEX/Poseidon: 2h après t.o.
  - Envisat: 3.2 h après t. o.
  - Bathymetrie réaliste ( cartes nautiques et modèle ETOPO2 )



*Fujii and Satake, 2007*

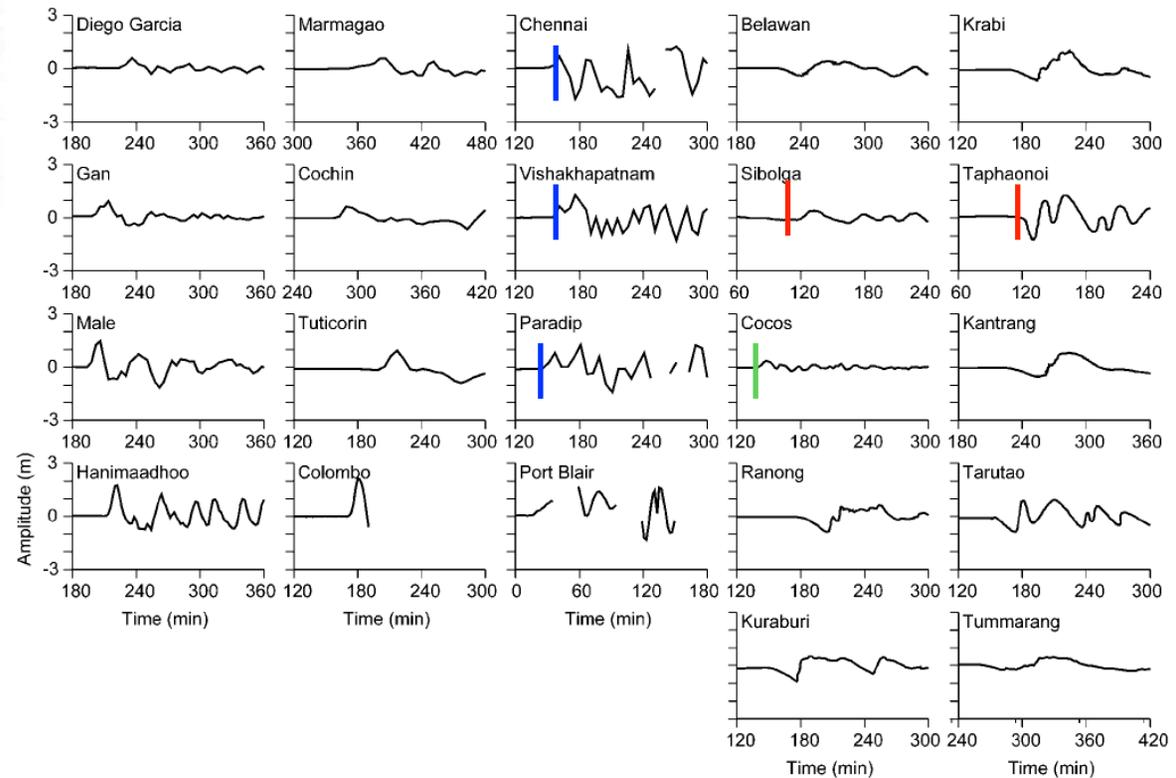
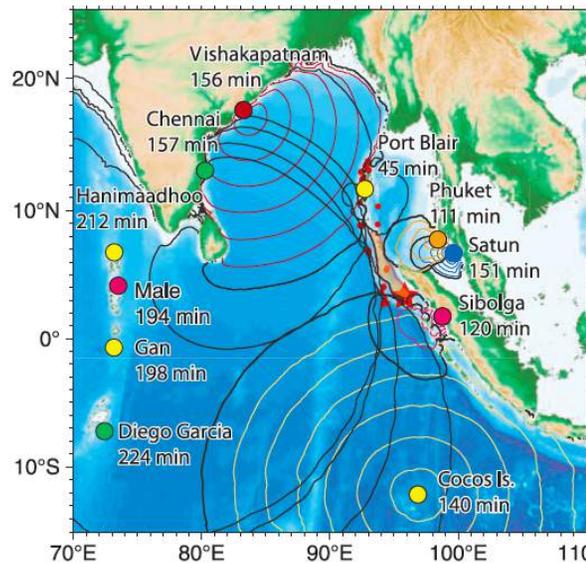
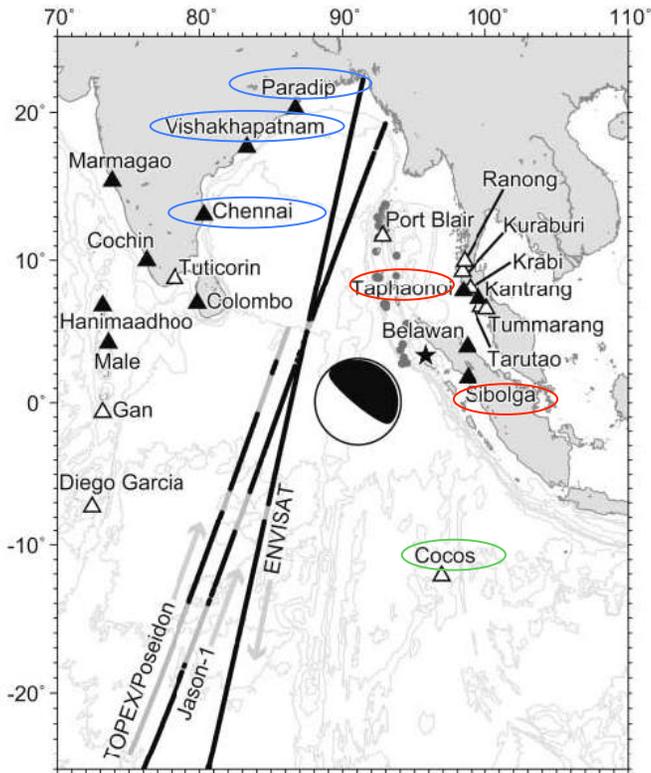
# Données de marégraphes

-> 1<sup>eres</sup> arrivées 120 mn après l'initiation de la rupture sismique à Sibloga et Taphaonoi ( Phuket)

-> Cocos 140 mn

-> Côte est de l'Inde 150 mn

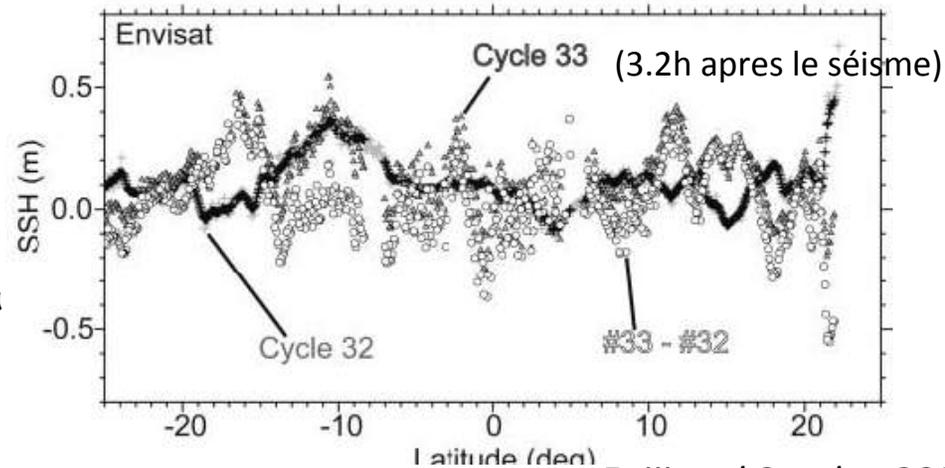
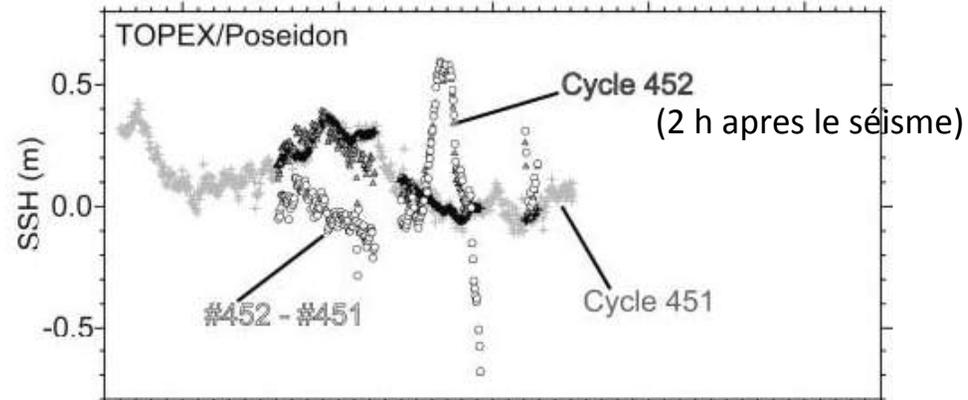
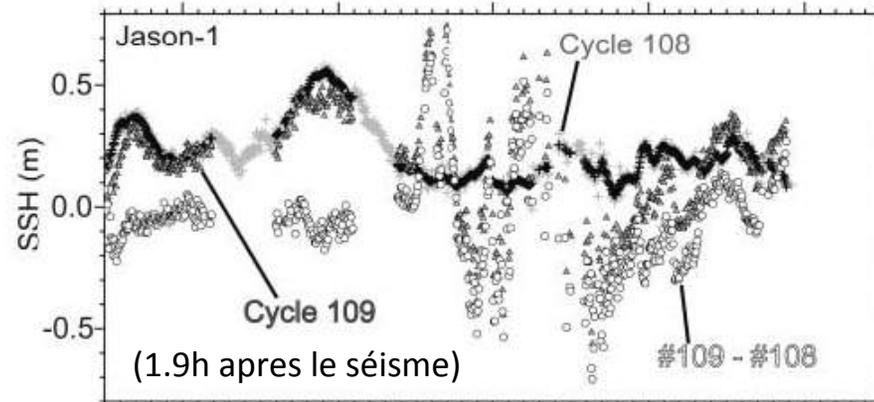
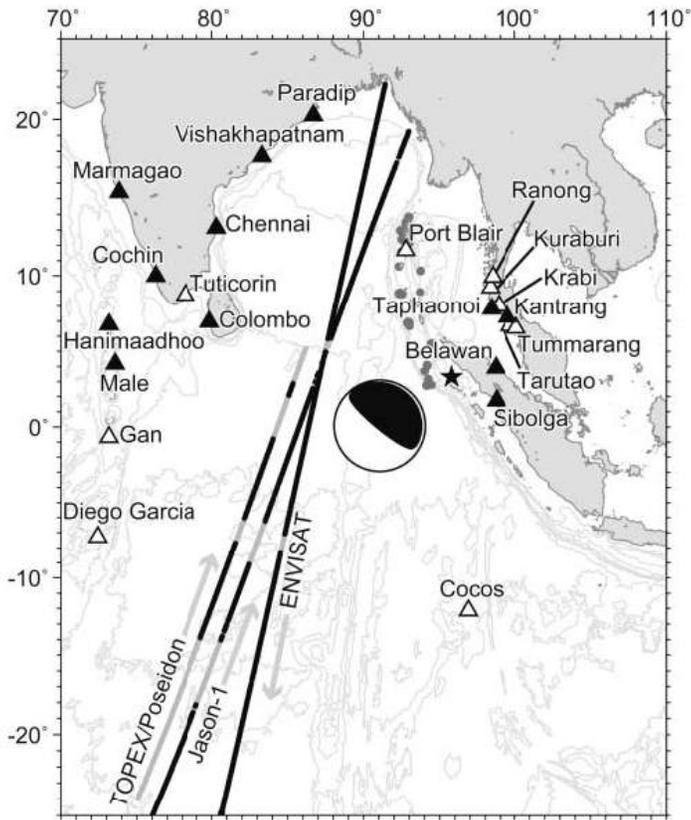
-> Période de la 1<sup>ere</sup> vague > 20mn, amplitude cm->2m



Lay et al., 2005

Fujii and Satake, 2007

# Hauteur de la surface de l'eau observées par satellite



+ observations durant le passage précédant le séisme (Nov/dec 2004)

▲ Passage du satellite après le séisme

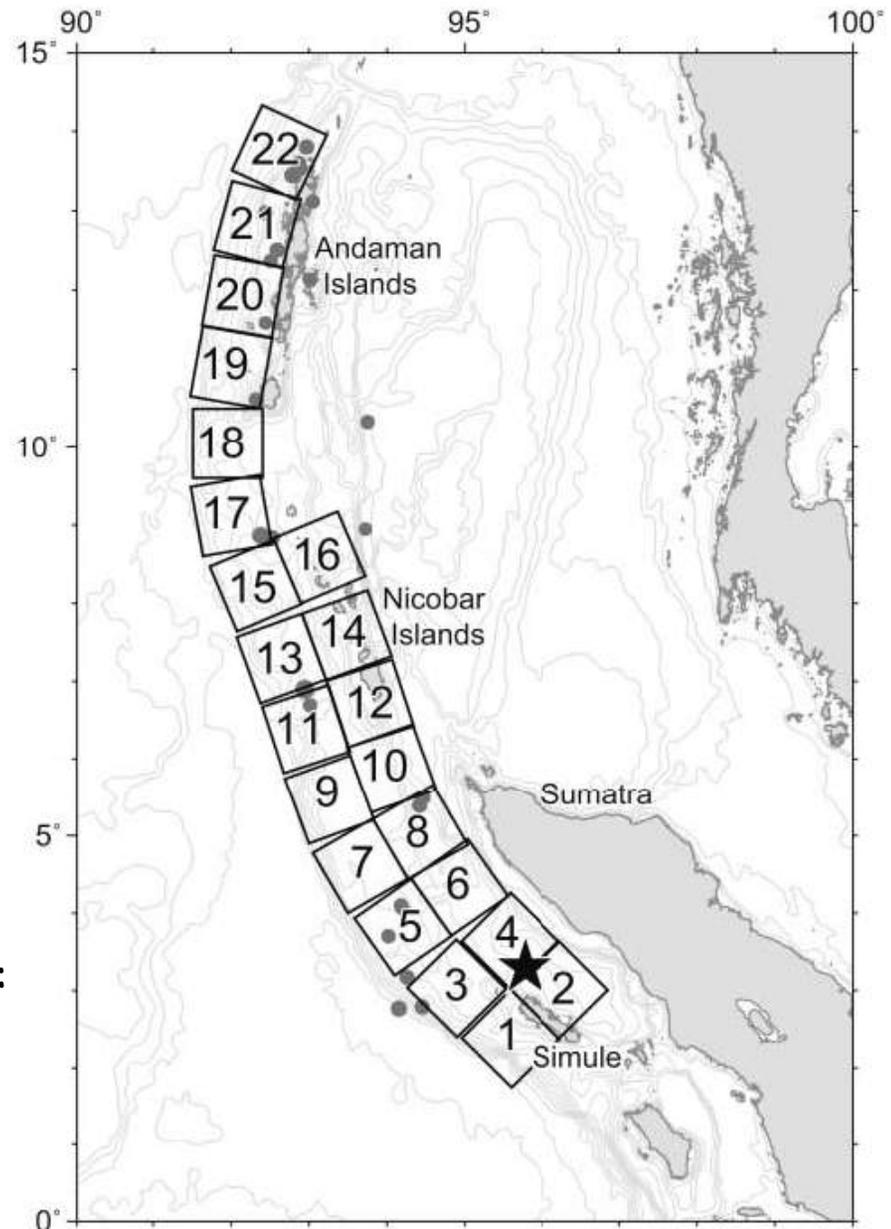
□ Signaux dus au tsunami obtenus en faisant la différence entre les deux passages

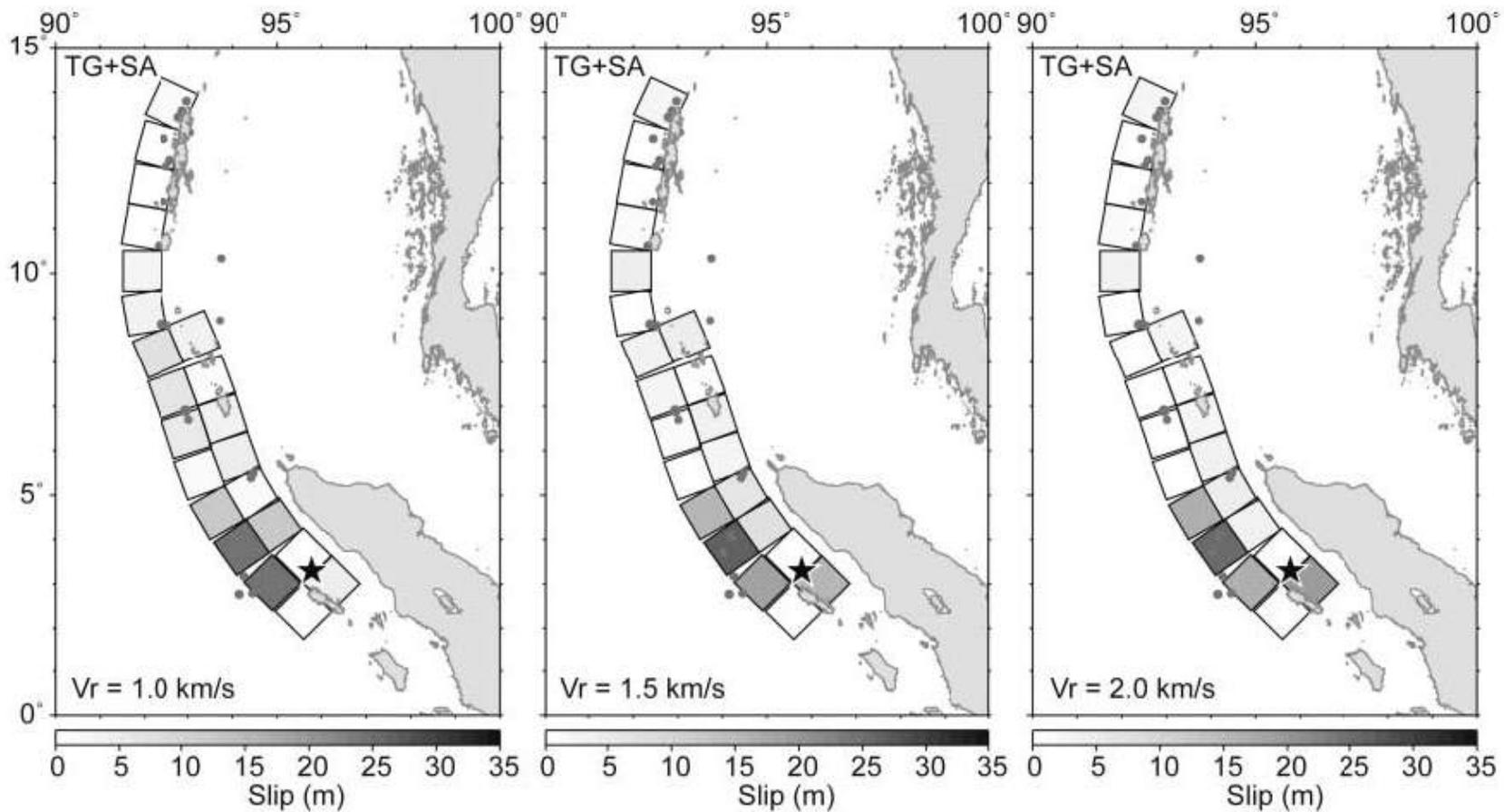
Pendage de la faille 10 deg:  
- d'après la zone de répliques

Direction de glissement  
- d'après la solution CMT composite

Rupture commence à l'épicentre  
- propagation unilatérale vers le NNE  
(supposé à vitesse constante:(1, 1.5,  
2.5 km/s)

- Les données satellitaires préfèrent 1km/s
- Les marégraphe préfèrent : 2.5 km/s:
  - Vitesse de rupture variable non résolue par ces données
- Source du tsunami atteint 900 km au nord de l'épicentre





Glissement maximum en accord avec les données sismiques

Peu de déformation dans les îles Andaman, contrairement aux observations de subsidence

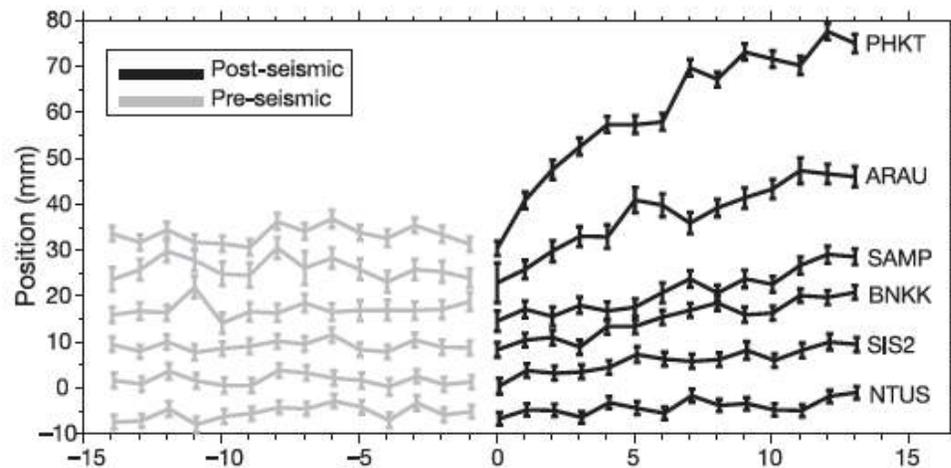
→ Glissement lent à des périodes plus longues que le tsunami, ou glissement post-sismique après le passage du tsunami et avant les mesures de terrain, montrant une surélévation de 1.5 m dans la partie nord des îles Andaman et une subsidence de 1m dans la partie Sud

## Relaxation post-sismique - Sumatra 2004

Données GPS montrent la présence de glissement post-sismique

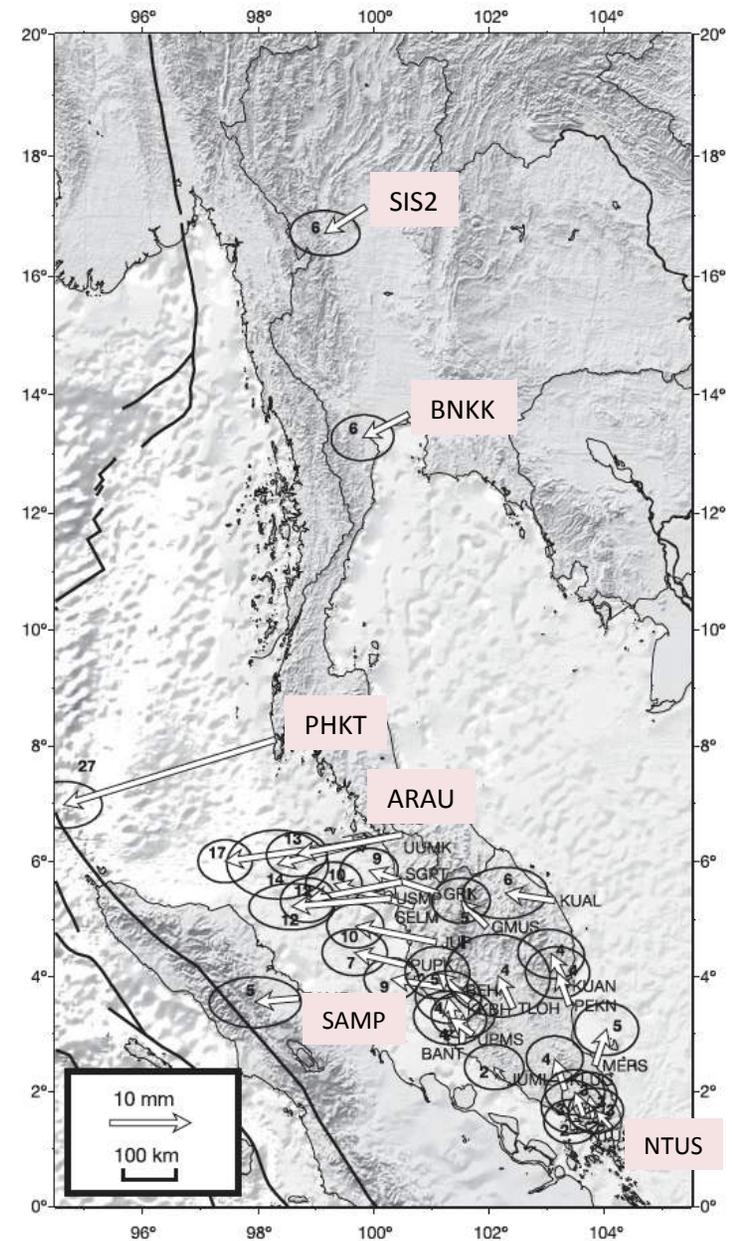
-> 4cm pendant 2 semaines suivant le séisme à PHKT (et 34 cm au bout de 50 jours)

->attribué au glissement a-sismique dans les couches sédimentaires non consolidées au dessus de la faille (et non aux répliques)



Séries temporelles journalières  
(Saut co-sismique soustrait)

## Champ de déplacement moyenné sur 5 jours après le séisme

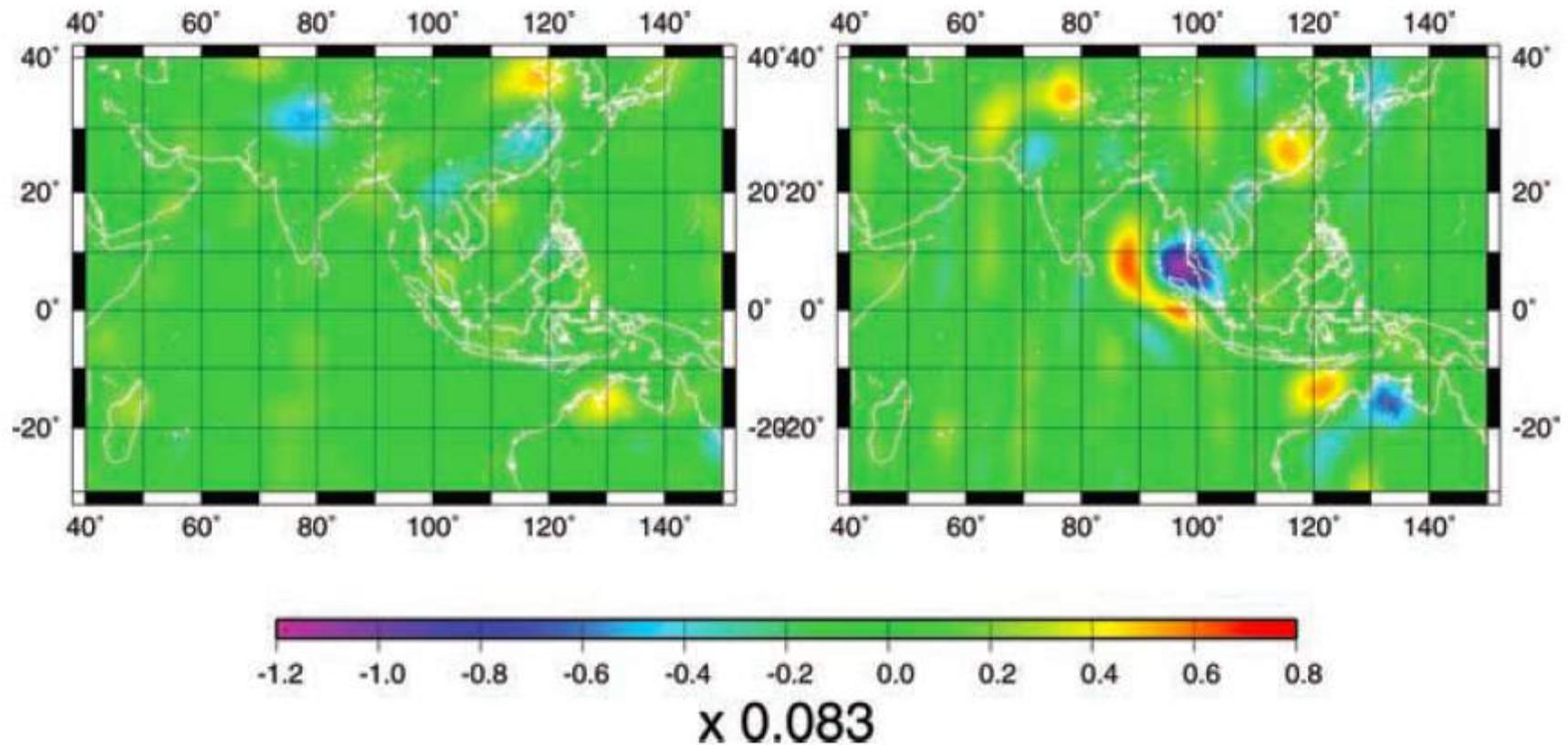


## Anomalies du géoïde au dessus de la région de Sumatra

Différences entre le géoïde filtré  $\sim 500$  km de longueur d'onde  
Cumulées sur 9 mois (Janvier-Sept)  
Données satellitaires GRACE

Avant les séismes:2004-2003

Après les séismes:2005-2004

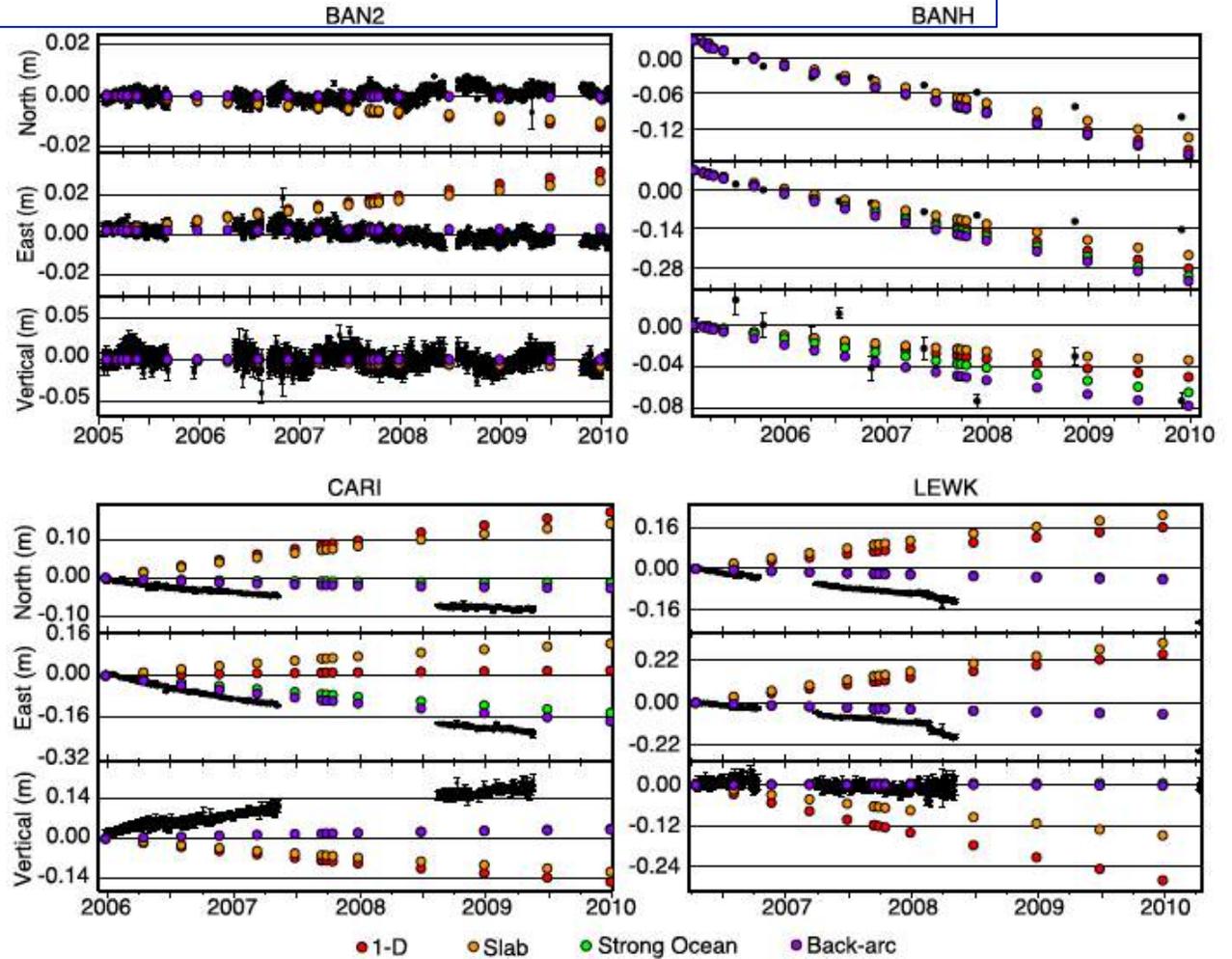
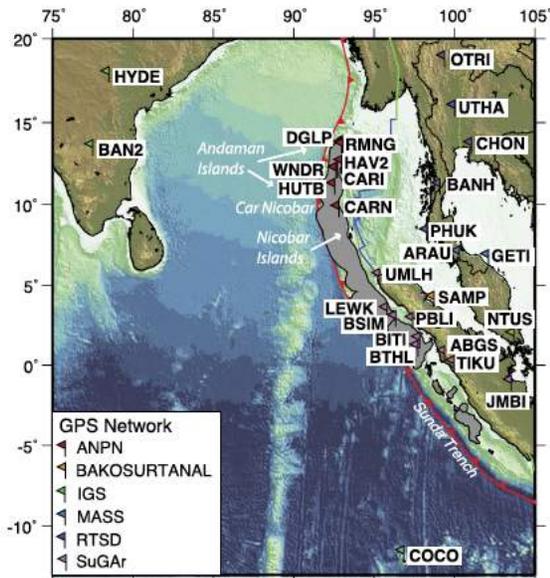


Anomalie négative dans la mer d'Andaman (Bassin de Mergui)  
Anomalie positive en 2 parties associée à la zone de subduction

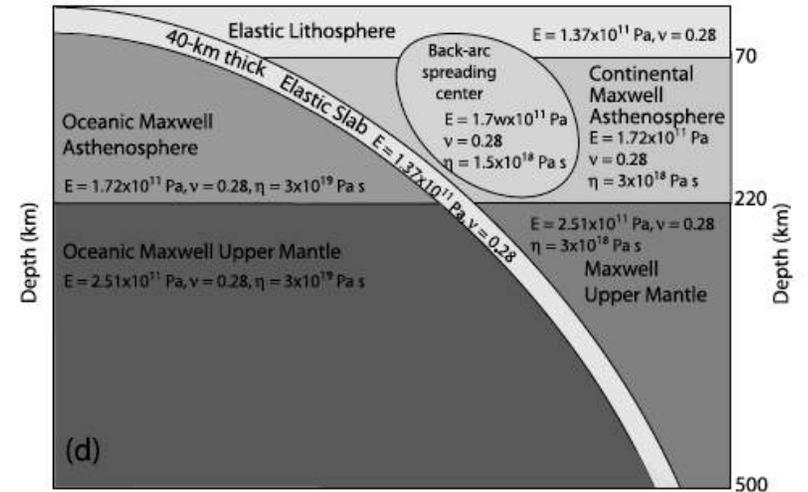
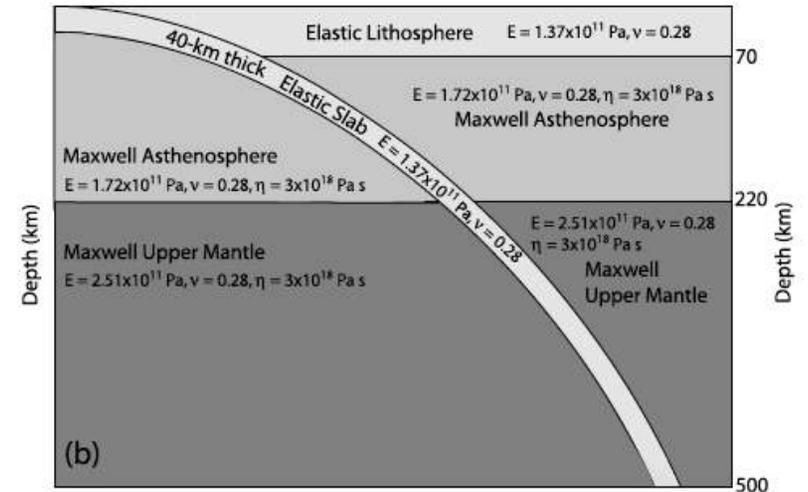
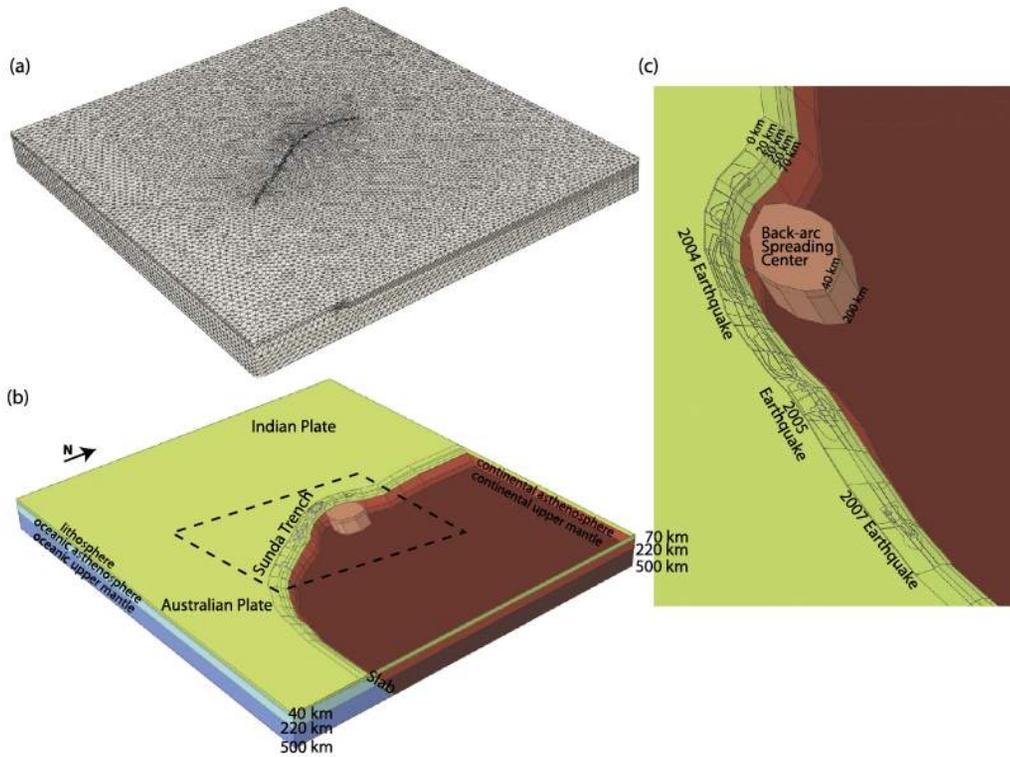
*Panet et al., 2007*

# Exemples de séries temporelles GPS 2005-2010 et prédictions de différents modèles visco-élastiques

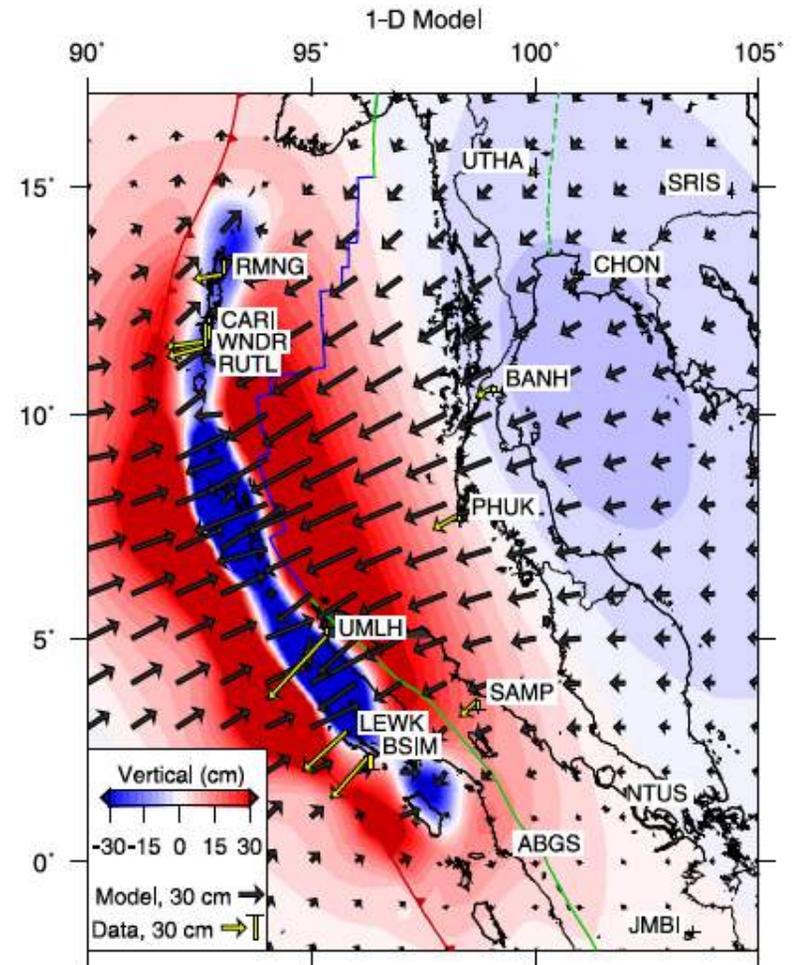
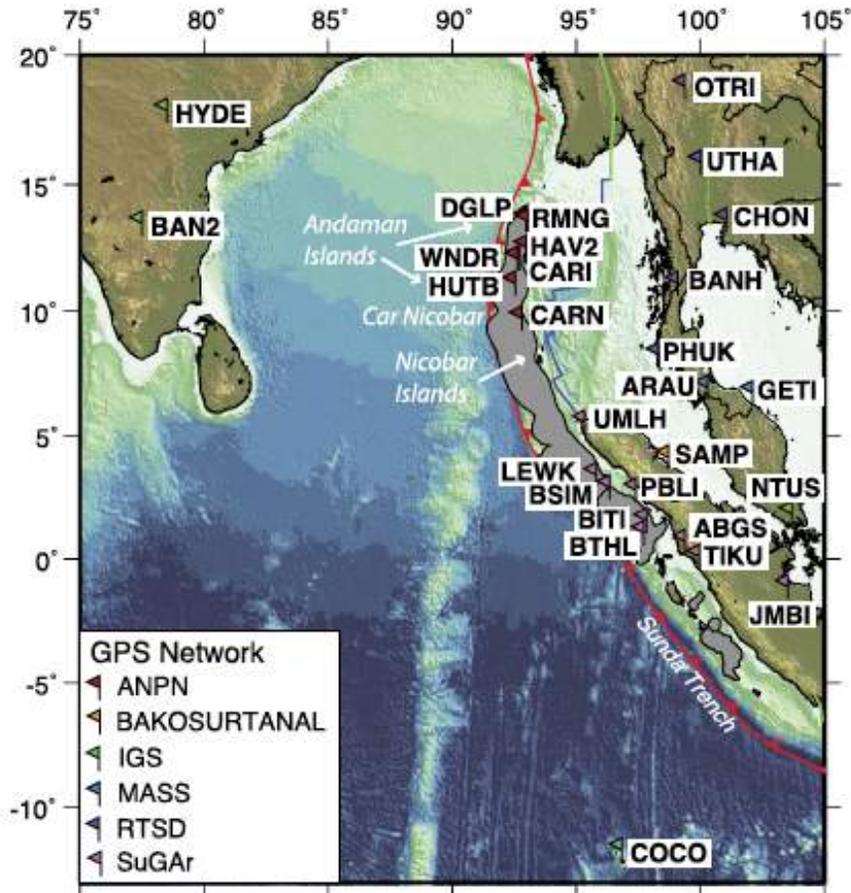
Séismes de 2004, 2005 (Mw 8.7, Nias) et 2007 (Mw 8.4 Bengkulu)



# Géométrie du modèle viscoélastique en éléments finis



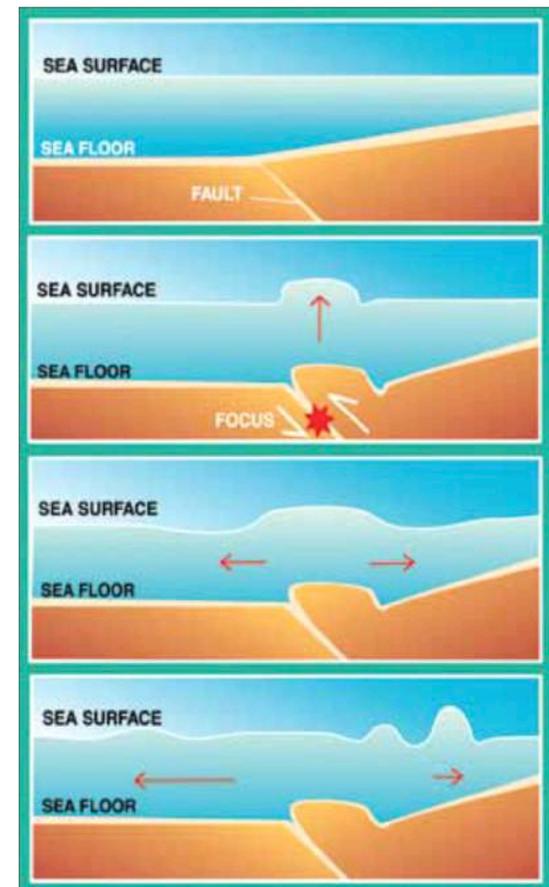
# Déplacements cumulés sur 5 ans (2005-2010) associés aux séismes de subduction de 2004, 2005 (Mw 8.7, Nias) et 2007 (Mw 8.4 Bengkulu)



→ Données horizontales  
→ Prédiction du modèle viscoélastique en couches

Couleurs: prédiction mouvement vertical

# Le séisme de Fukushima, Japon (Tohoku) 11/03/2011 $M_w$ 9.0



Convergence:  $\sim 8$  cm/an



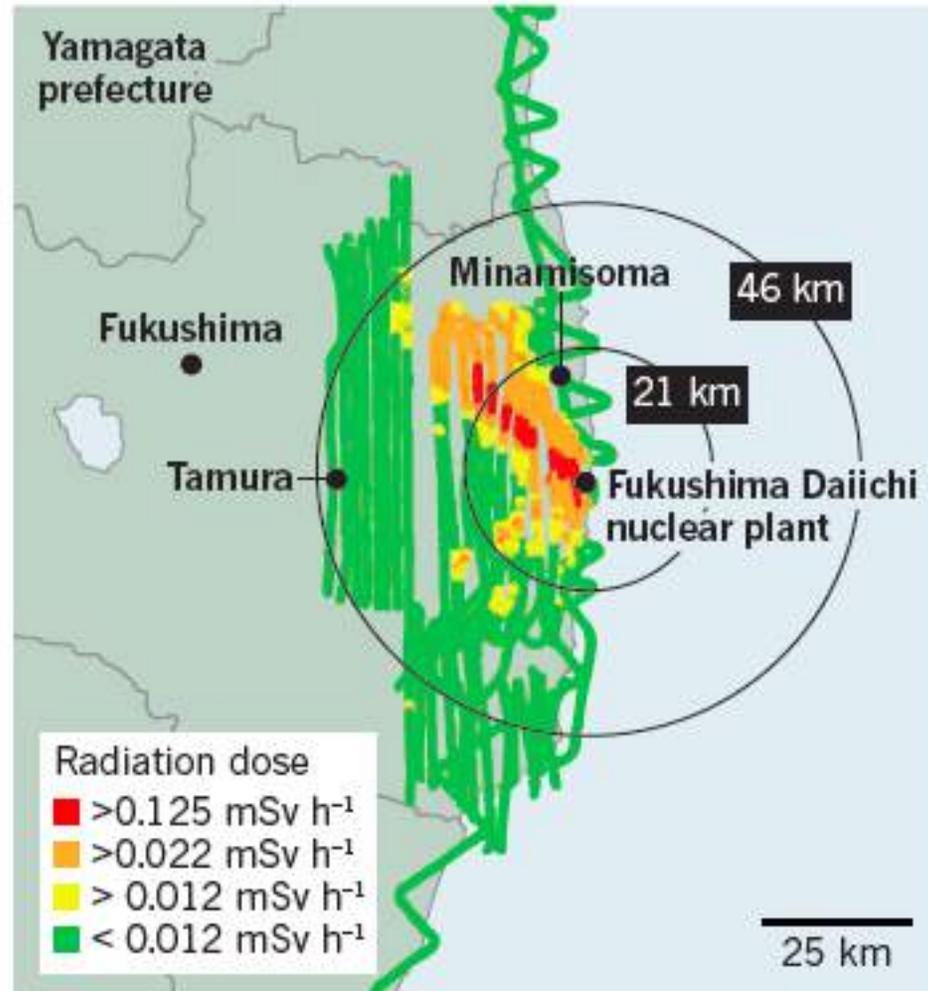
## 2011 Tohoku Tsunami

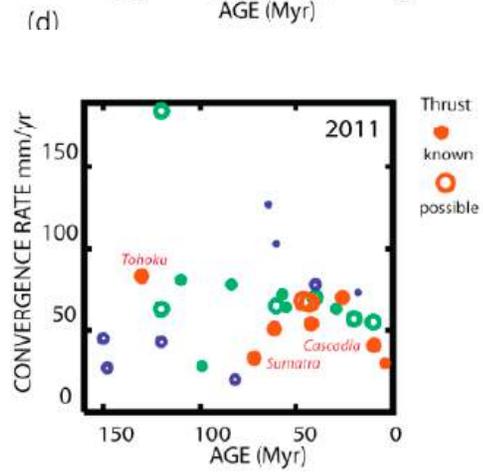
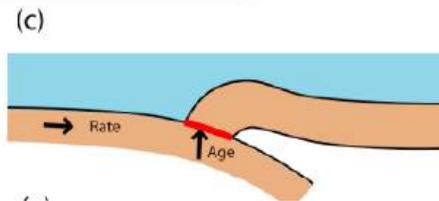
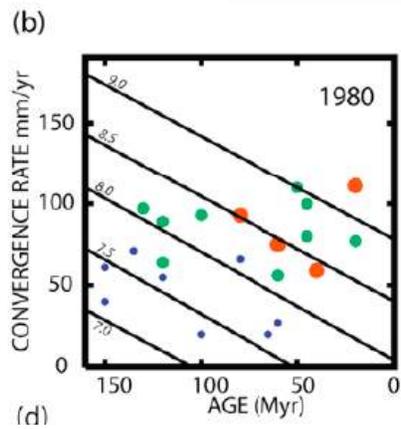
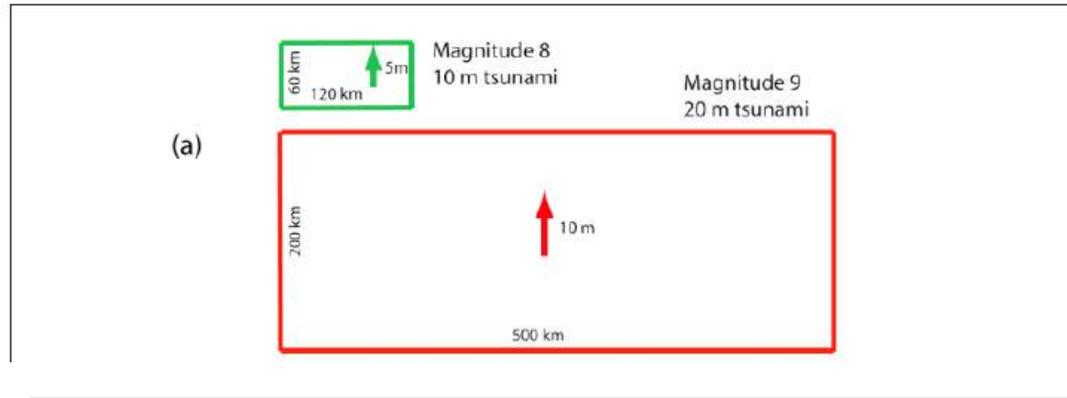


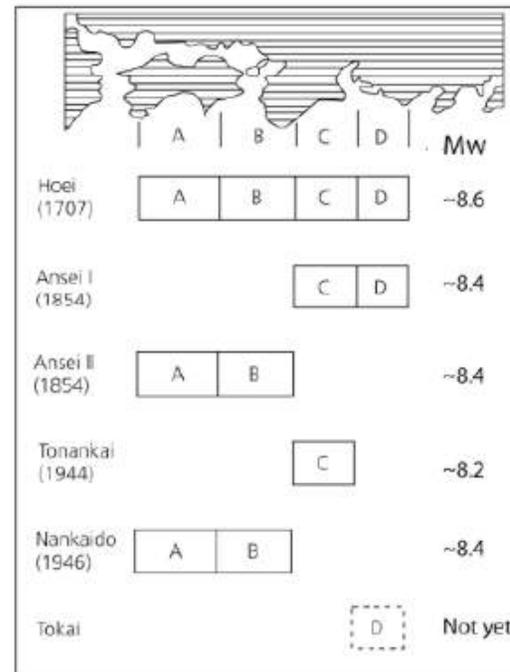
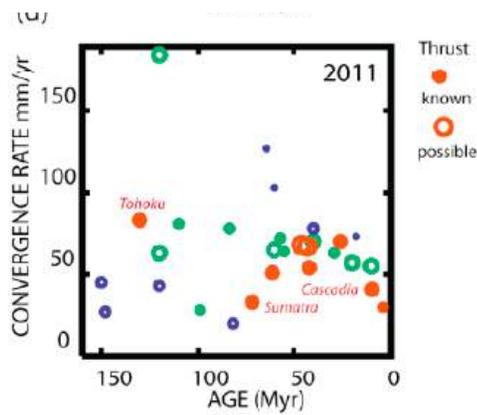
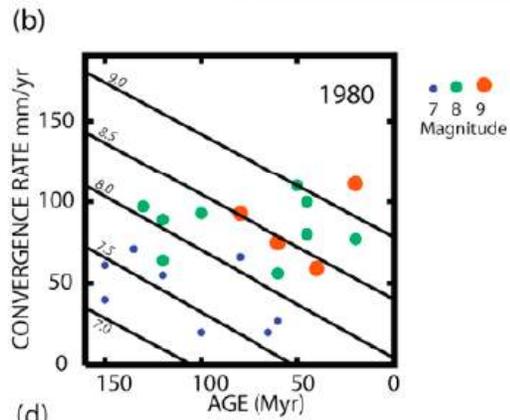
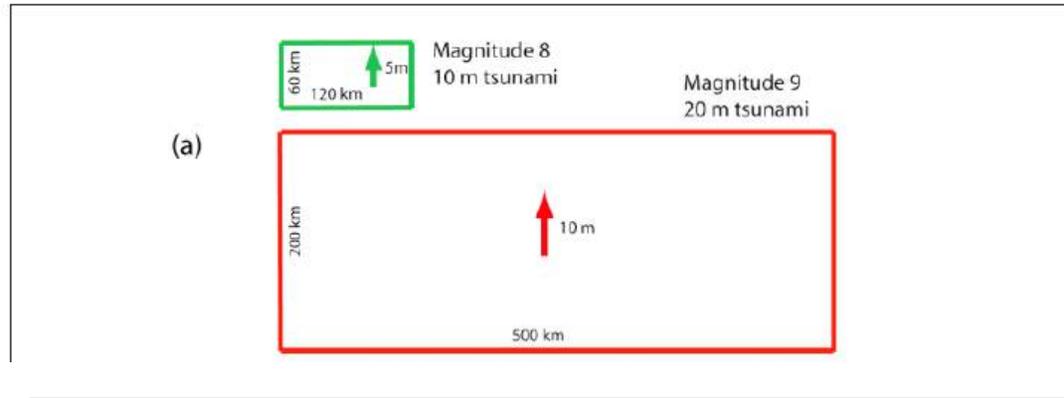
Iwate prefecture

## FUKUSHIMA'S FALLOUT

Data from air and ground monitoring show that highly radioactive fallout is largely localized within a narrow band northwest of the stricken plant.



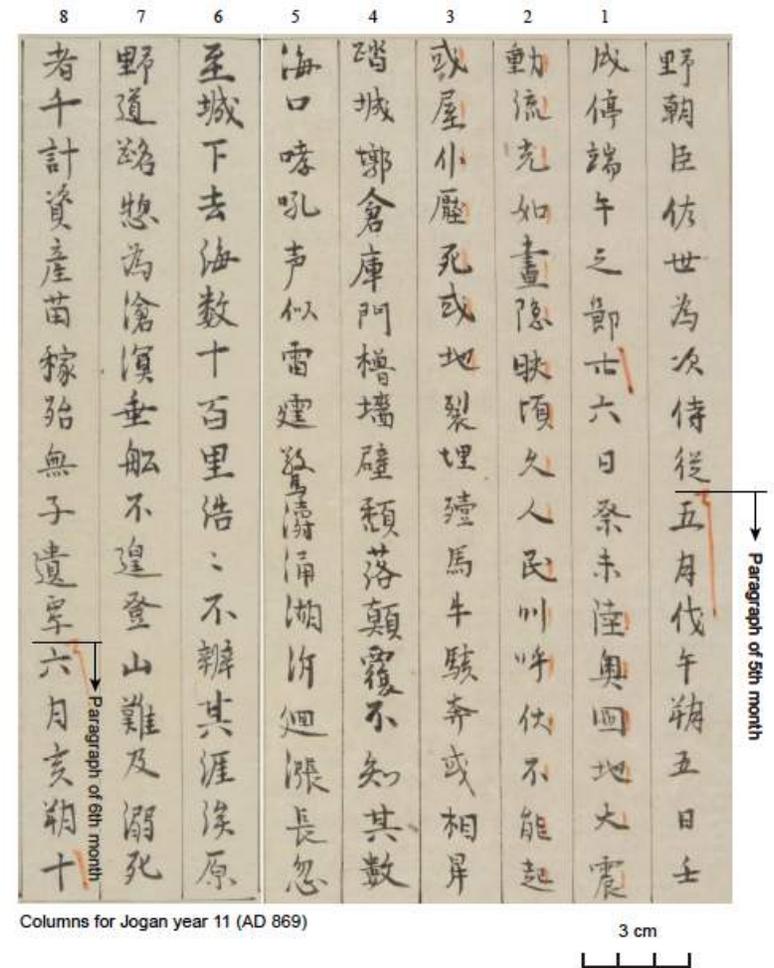




# Séisme et tsunami de 869 (Jogan)

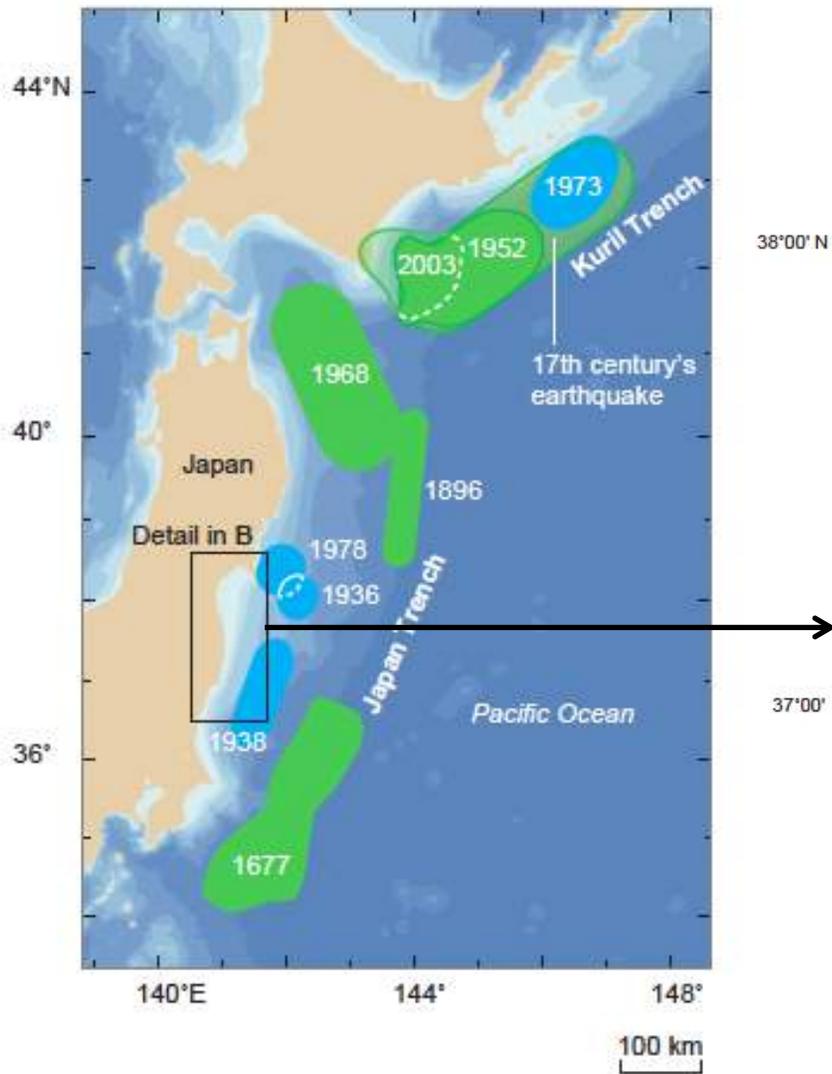
- Etudes stratigraphiques: Découverte d'une couche de sable associée à ce tsunami (e.g. Abe et al., 1990)
- Documents historiques
  - Le tsunami pénètre plus loin à l'intérieur des terres que tout autre jusqu'en 2011.
- Carte de risque sismique du Japon de Mai 2010
  - Prévission dans la région de Sendai: Pas de séismes plus forts que les séismes historiques depuis 400 ans
- Etude de la taille du séisme de 869 entreprise en 2004 et publiée en 2007-2010
  - (en Anglais: Sawai et al., 2012).

"Nihon Sandai Jitsuroku", mamscript from Keicho year 19 (AD 1614)

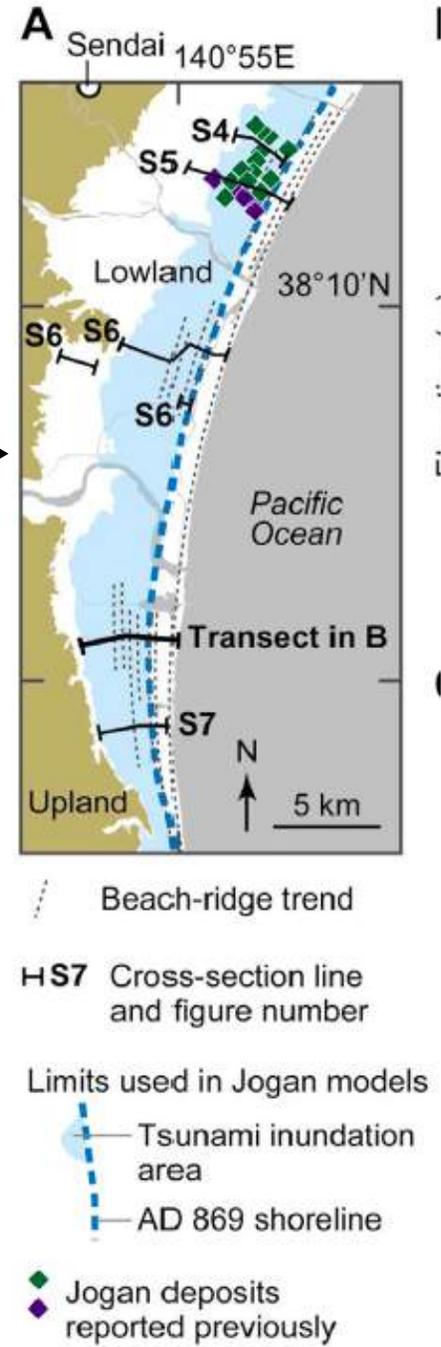
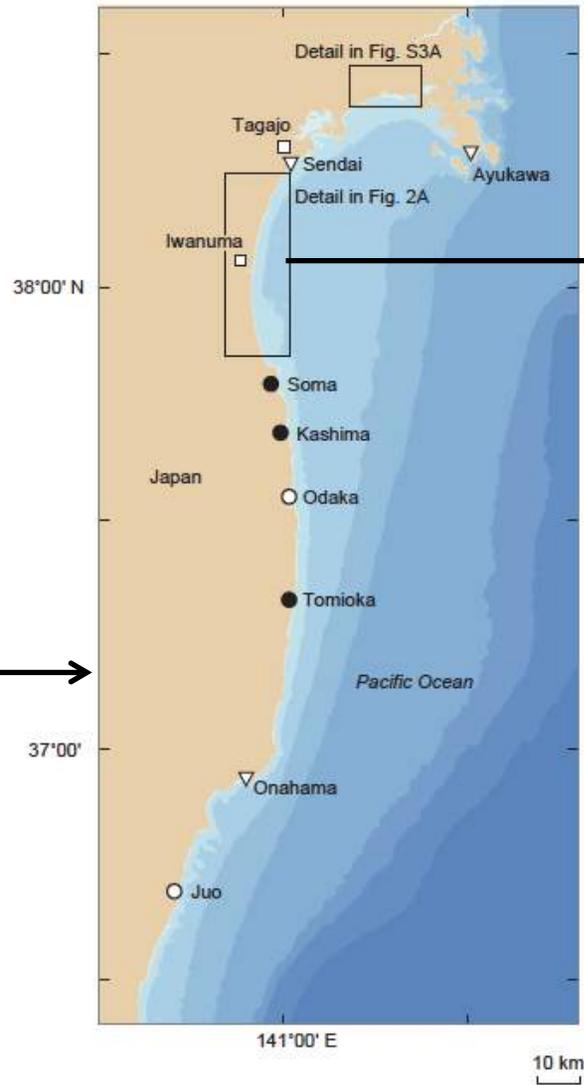


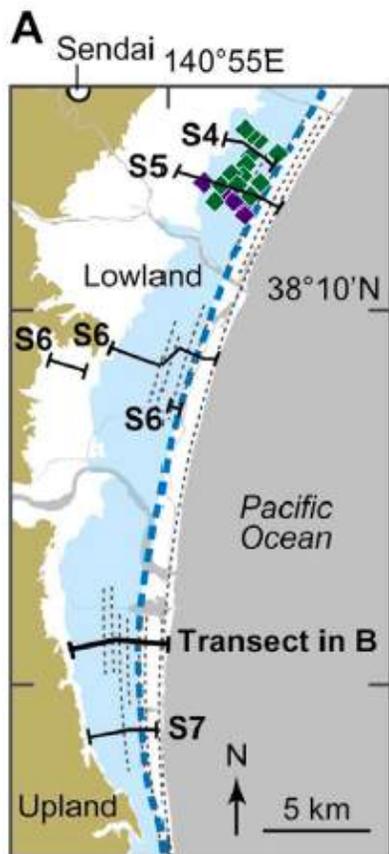
# Séismes récents au Japon

Bleu: M 7; vert M 8

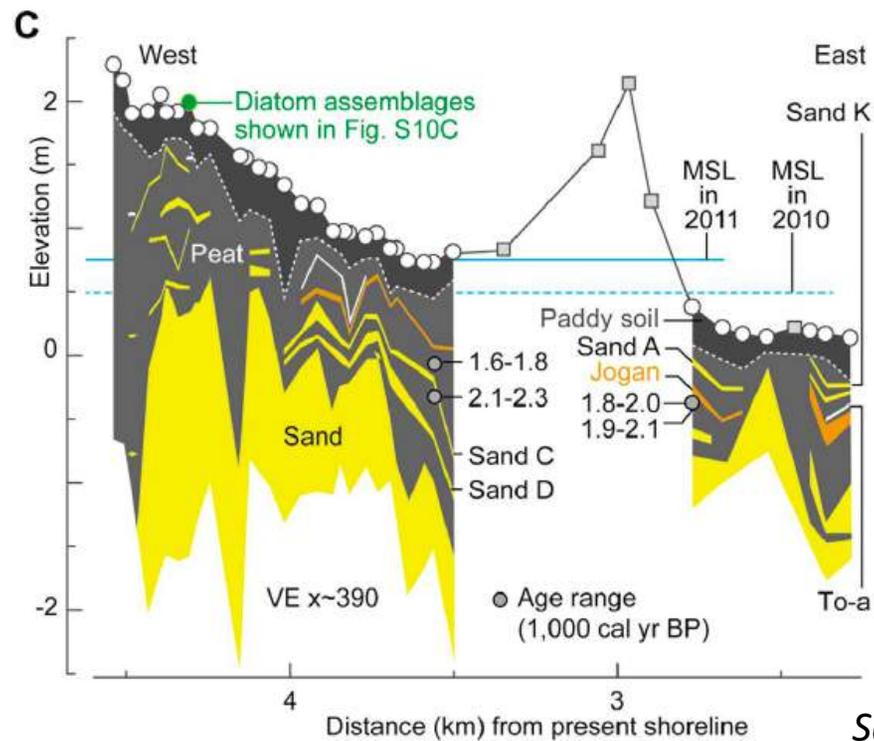
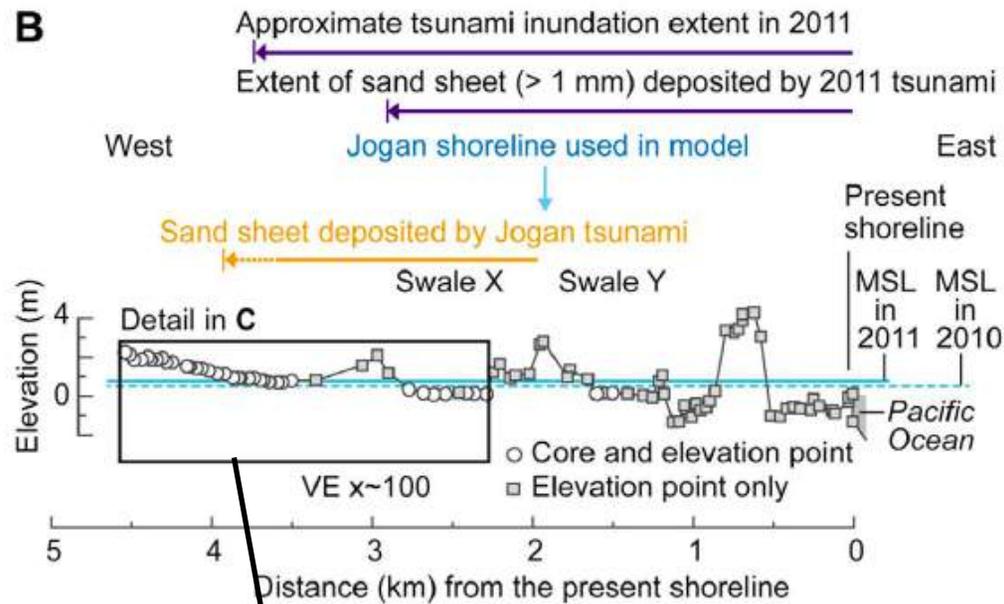


# Etudes stratigraphiques dans la region de Sendai

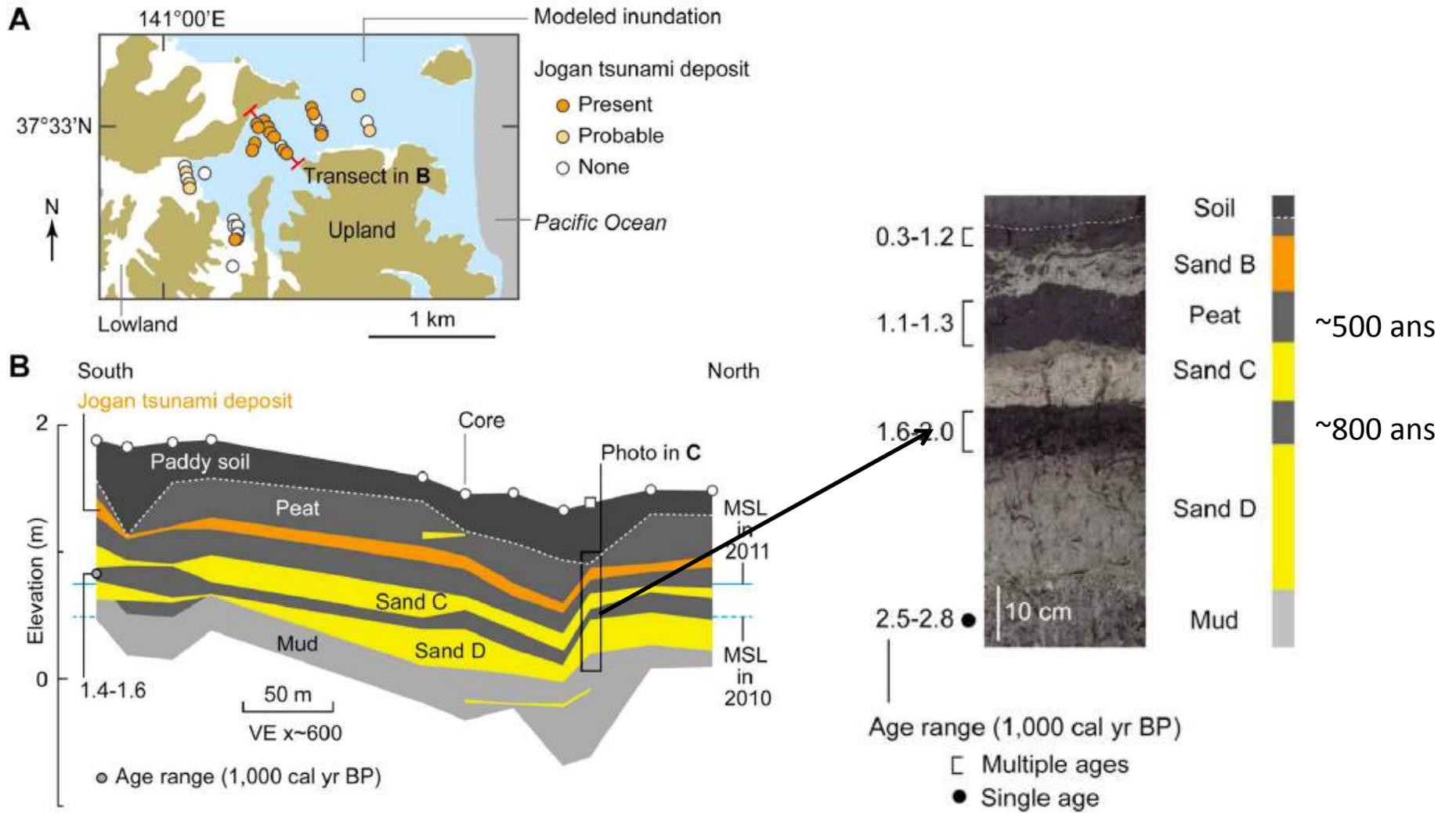




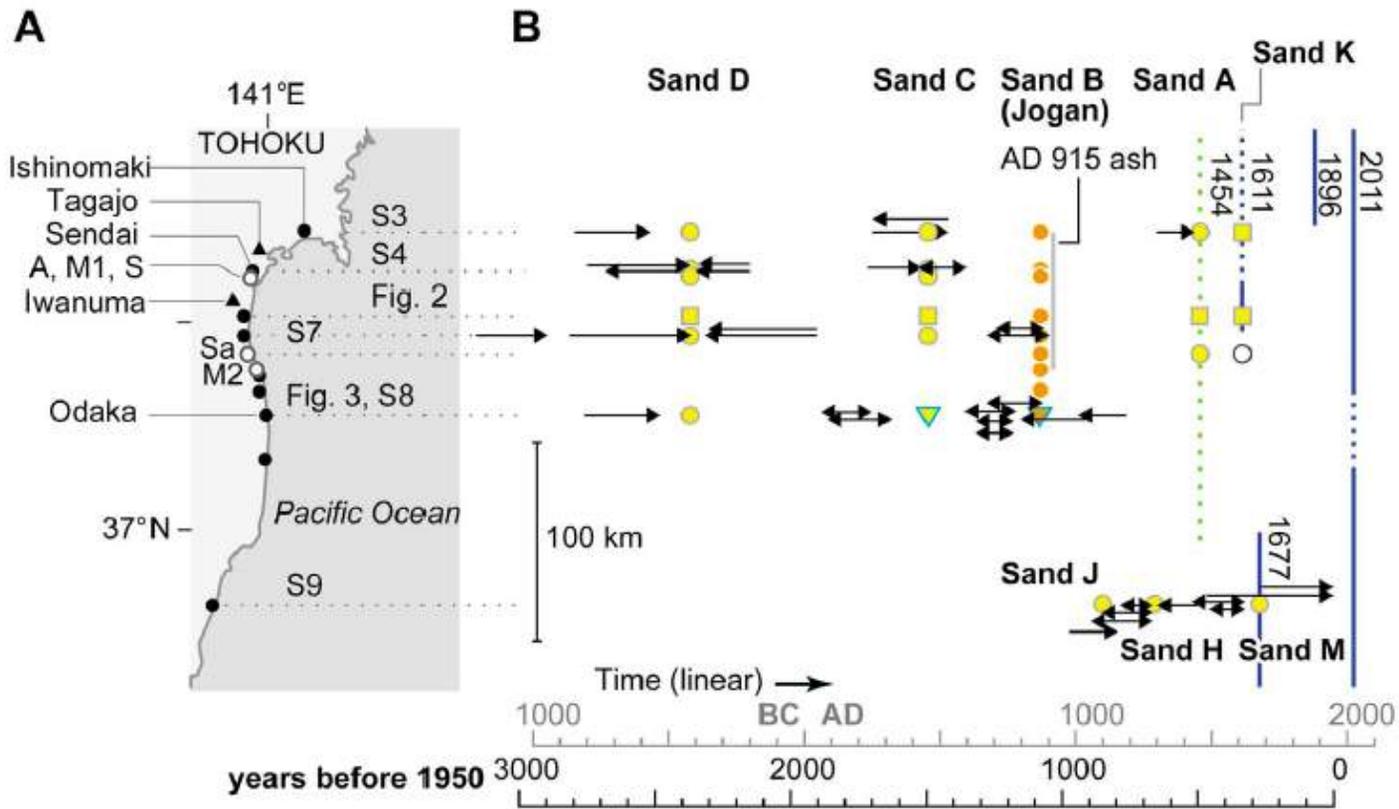
- Beach-ridge trend
- HS7 Cross-section line and figure number
- Limits used in Jogan models
- Tsunami inundation area
- AD 869 shoreline
- ◆ Jogan deposits reported previously



A ->1454



*Odaka*



Tsunami deposit

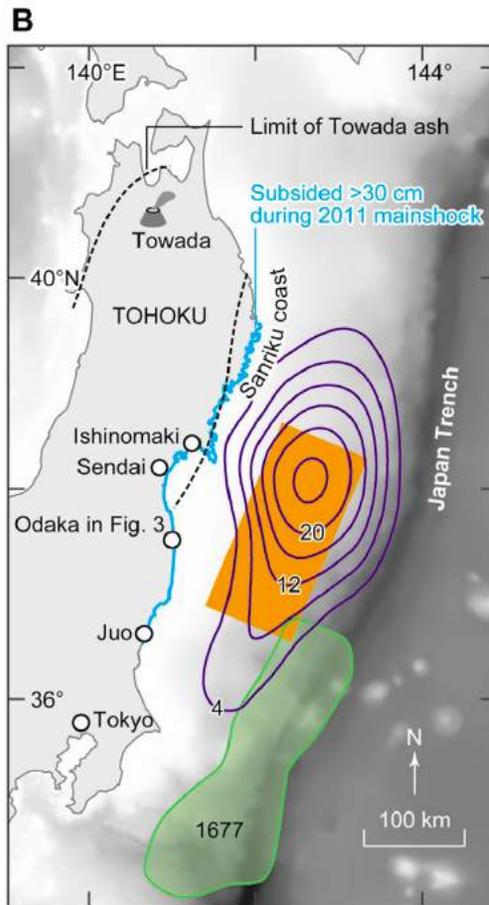
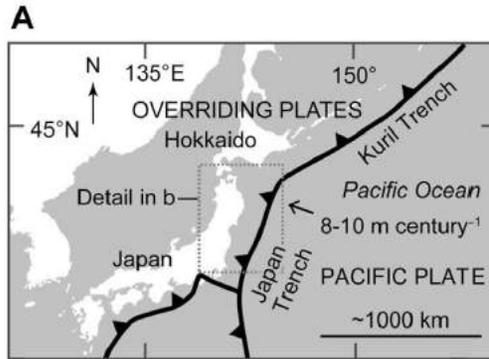
- Jogan
- Other tsunamis
- Other tsunamis (stratigraphic correlation)
- ▼ With coastal subsidence

- Age of historical and recent tsunamis
- ⋯ 1611 Run-up heights greater than 5 m
- Possible greater than 5 m
- ⋯ Possible latitudinal range of historical accounts

Range of calibrated <sup>14</sup>C age;  
bar spans two standard deviations

- Material dated is older than sand sheet
- ← Material dated is younger than sand sheet
- ↔ Age is either greater or less than that of sand sheet

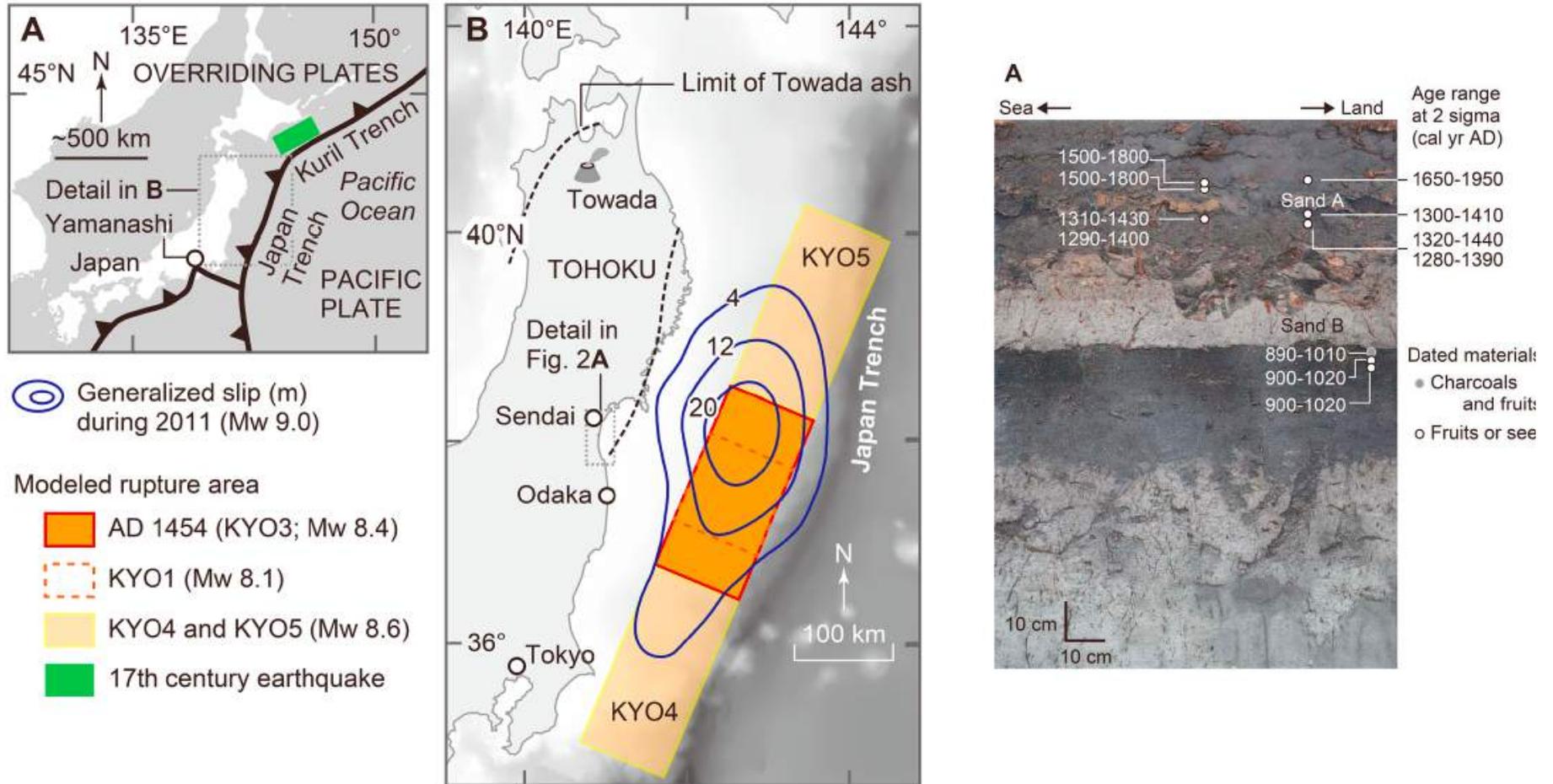
# Tsunami de 869



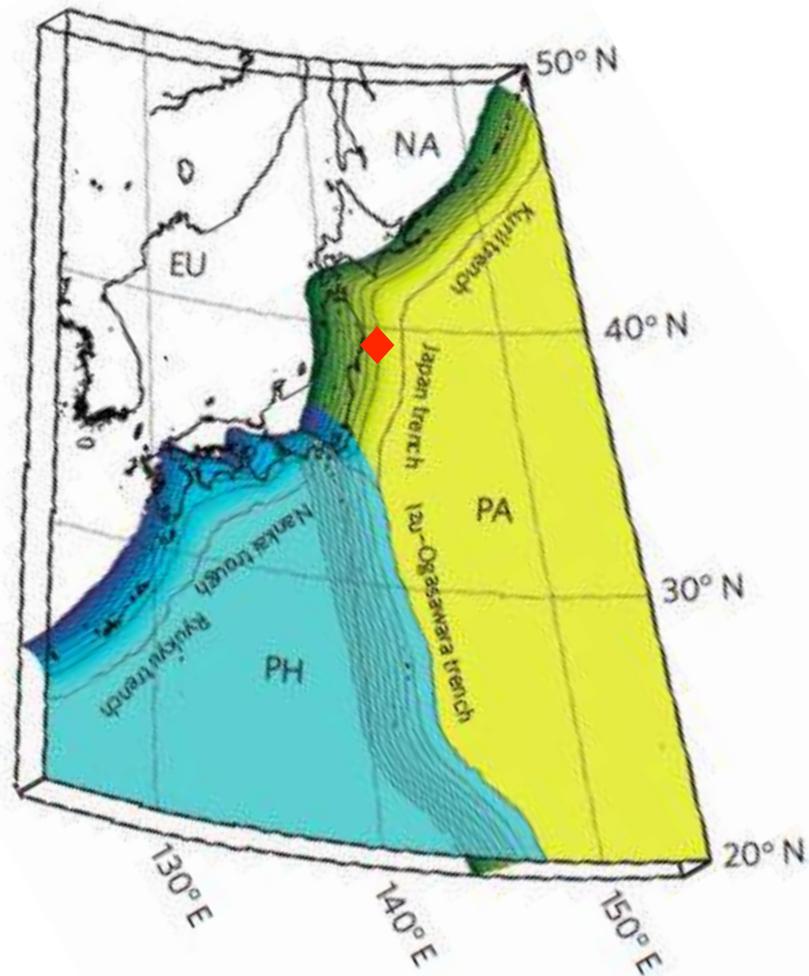
- Generalized slip (m) during 2011 earthquake of M 9.0
- Modeled rupture area for AD 869 earthquake of M 8.4

- Datation couche de sable
- En plus: subsidence associée aux dépôts B et C ( plus de diatomés d'eau saline)
  - permet de distinguer la provenance de la couche de sable de celle d'une origine atmosphérique (tempête..), ou d'un tsunami d'origine lointaine
- Modélisation
  - Simulation de tsunami
  - 14 modèles différents de source
  - Données; subsidence, limites d'inondation, ligne de côte (contrainte par le dépôt de cendres de Towata 915)
  - Rupture de 100 km de large et 200 km de long, glissement moyen de 7m → Mw 8.4
  - Limite nord contrainte par Towata
  - Limite sud peu contrainte
- Données existantes ne nécessitent pas de glissement énorme près de la fosse comme en 2011
- Données stratigraphiques ne permettent pas de distinguer une rupture continue d'une série de ruptures sur des segments plus courts.
- Malgré ces incertitudes, l'information aurait pu être utile pour augmenter la perception du risque de tsunami dans la région

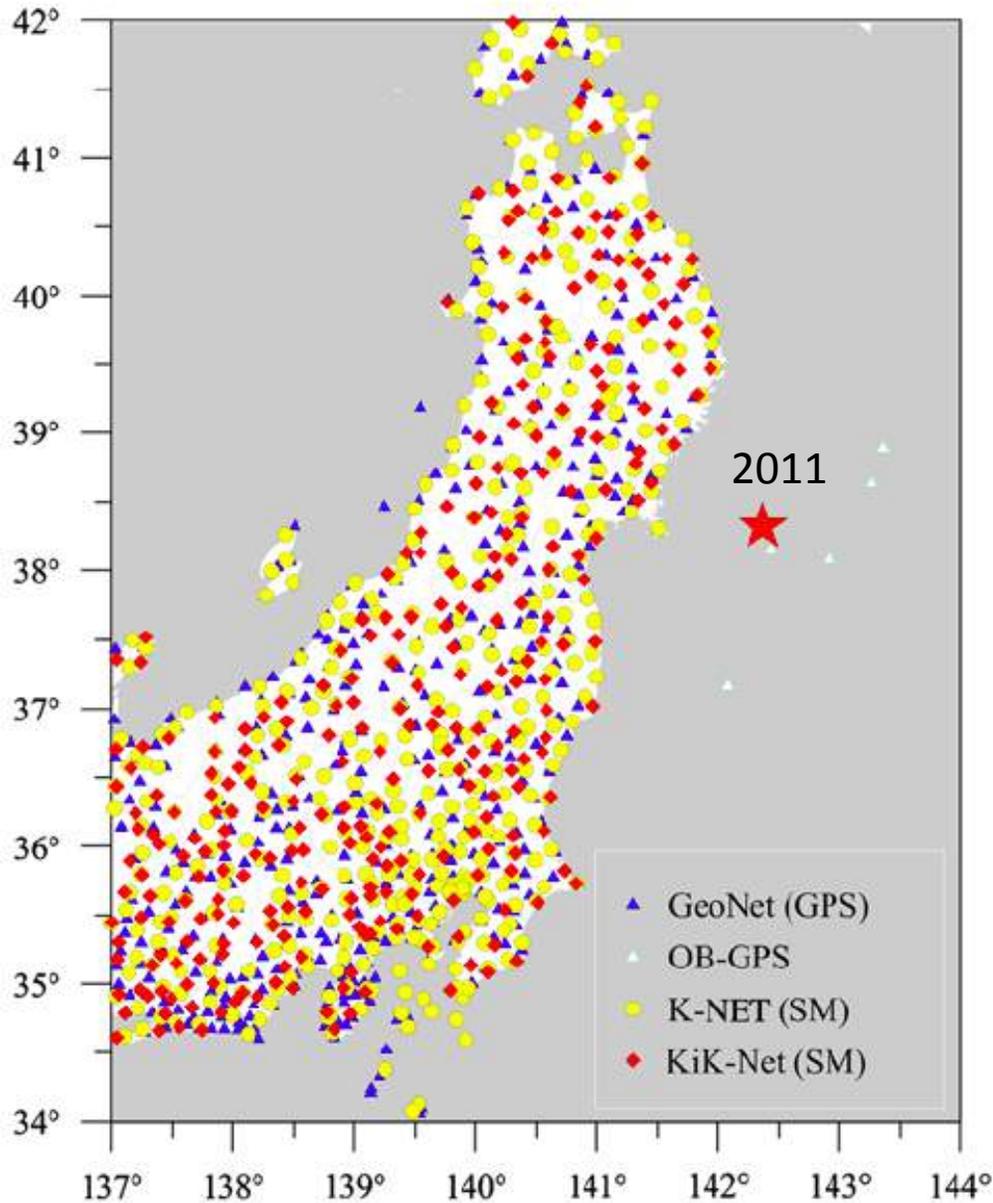
L'étude récente du tsunami de 1454 réduit peut-être encore le temps de récurrence moyen de séismes à tsunamis géants dans la région de Sendai



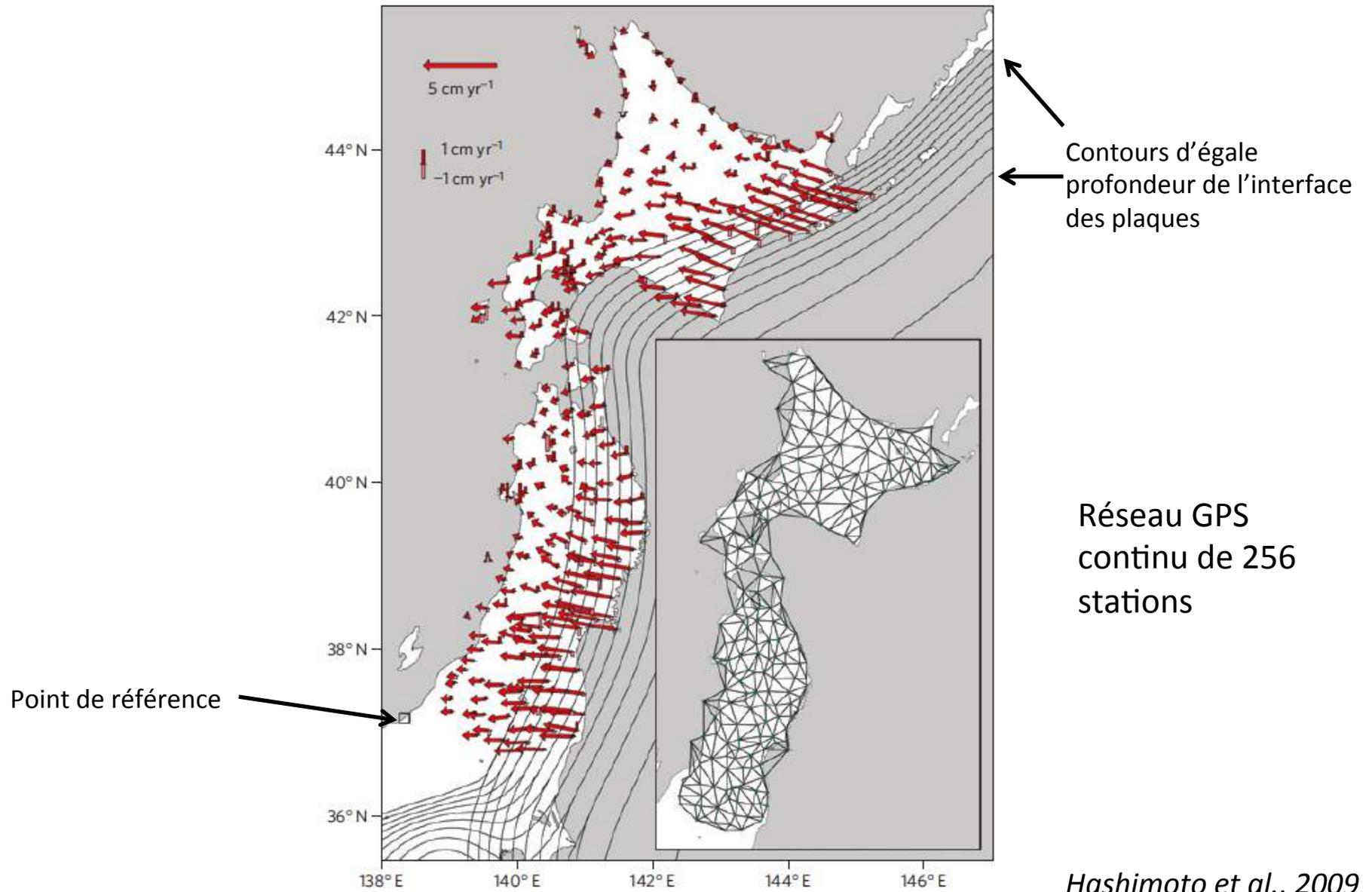
# Situation tectonique autour du Japon



# Réseaux géophysiques en activité en 2011, installés à la suite du séisme de Kobe (Hansin) de 1995 (Mw 6.9)

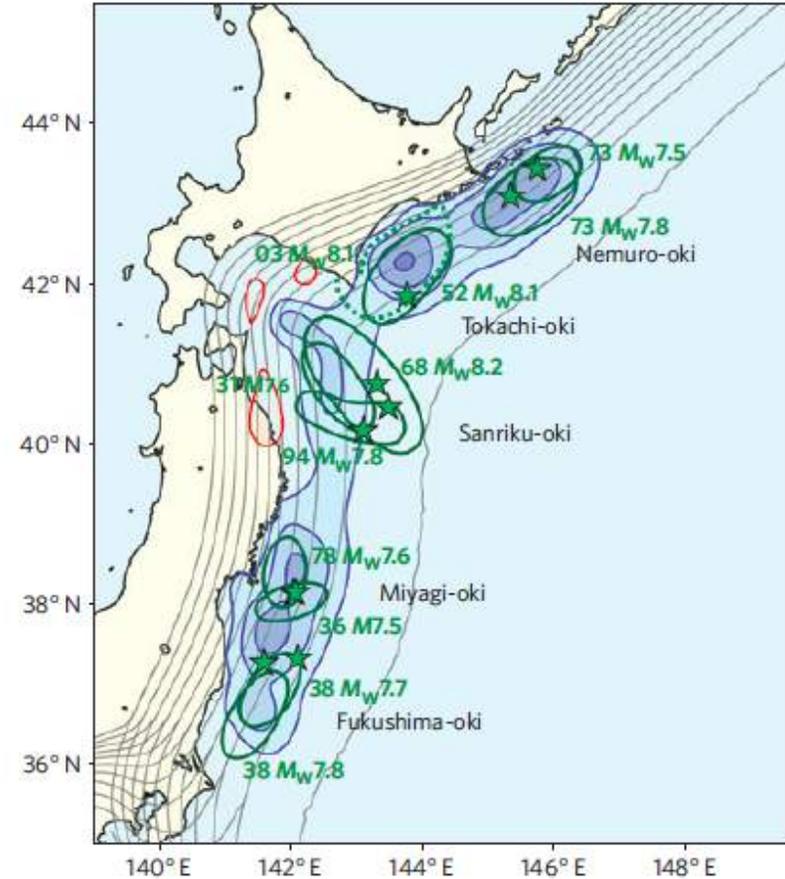
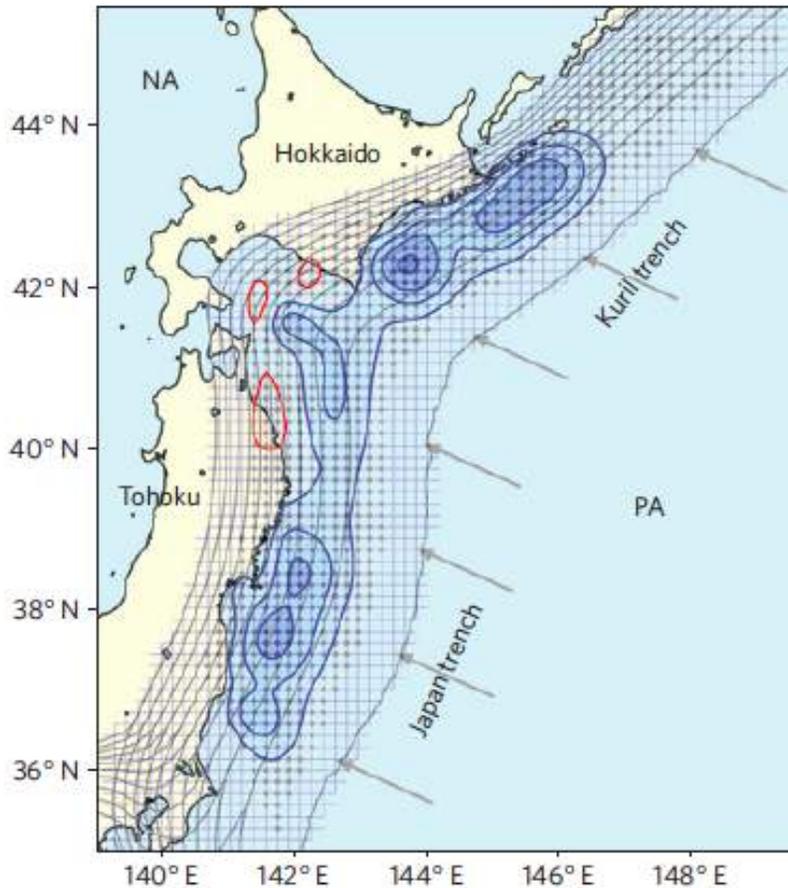


# Vitesses intersismiques horizontales et verticales 1996-2000

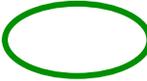


## Niveau de Couplage interplaque

## Epicentres et zones de rupture des séismes de $M_w > 7.5$ depuis 1900.

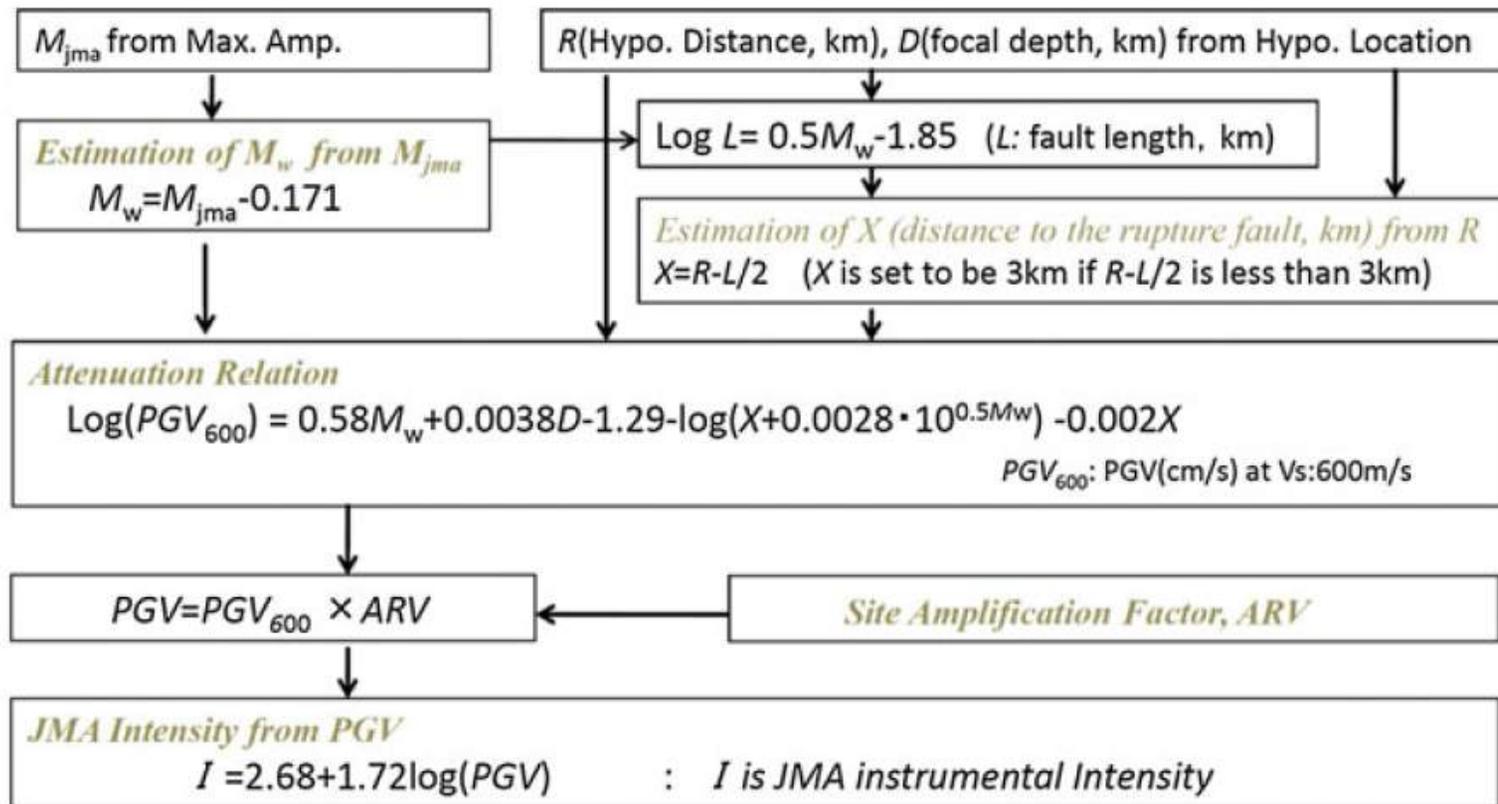


 Déficit de glissement - contours 3 cm/an par rapport au mouvement relatif des plaques calculé dans le modèle NUVEL-1A

 Régions sources des tsunamis associés à ces séismes

Systeme d'alerte rapide au Japon:  
Performance - séisme Mw 9.0  
11/03/2011

## Alerte rapide JMA -2011



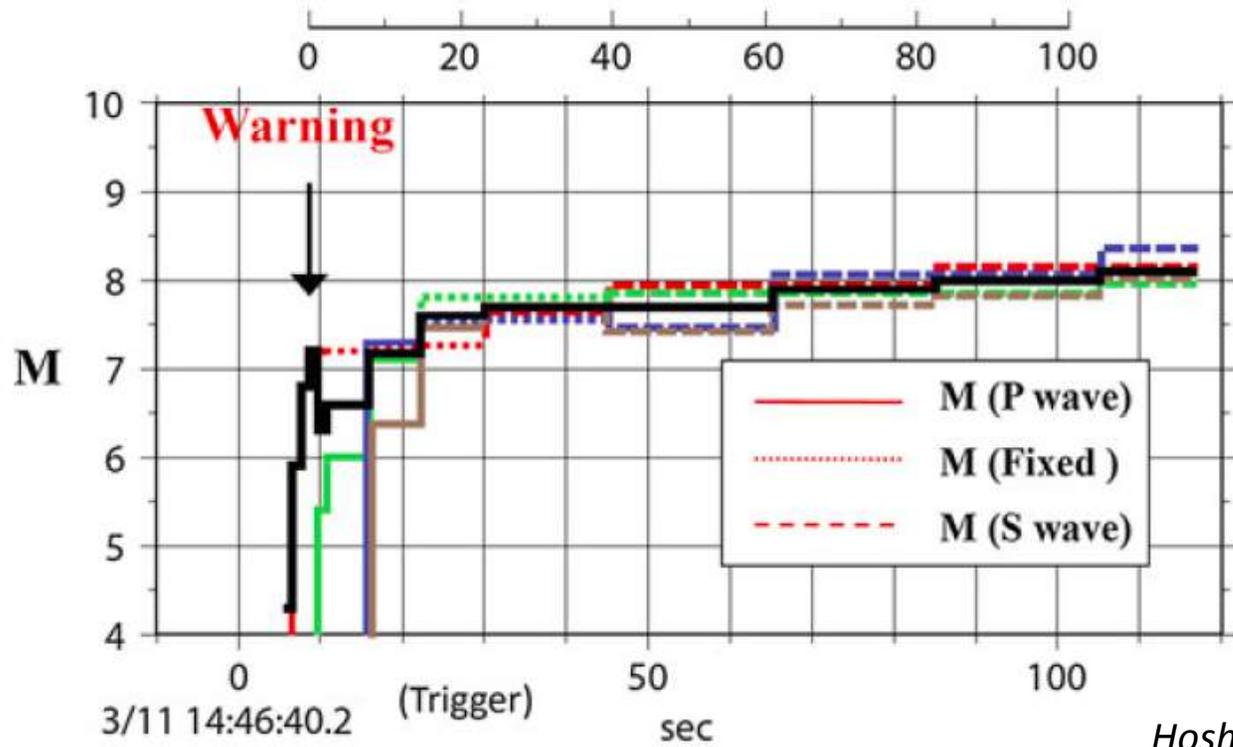
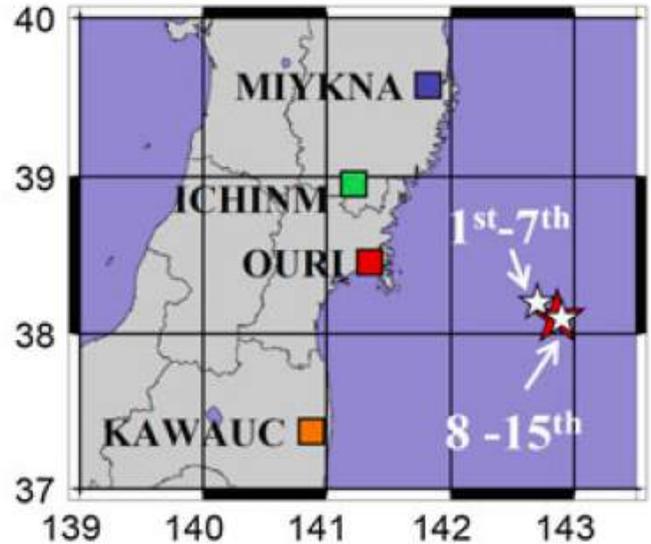
Diffusé par TV, radio et site web de JMA  
2 mn après le temps origine et reactualise  
ensuite  $I > 4$

- 4,300 sites au Japon ->

Hoshiba and Ozaki, 2014

Séisme du Japon  
du 11/03/2011

- M in EEW
- OURI
- ICHINM
- MIYKNA
- KAWAUC

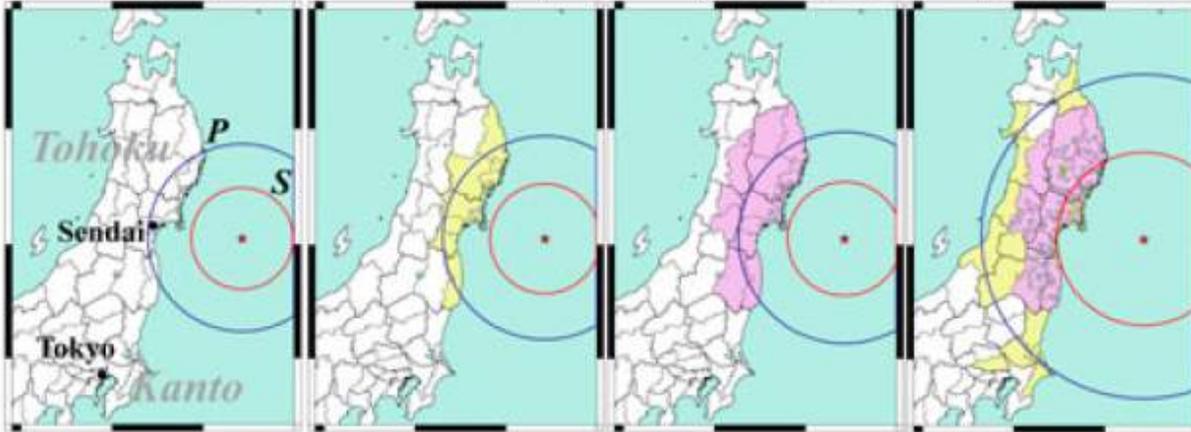


A: 28 s from O.T.  
EEW No. 1/15 (M4.3)

B: 30 s  
No. 3/15 (M6.8)

C: 31 s  
No. 4/15 (M7.2)

D: 45 s  
No. 9/15 (M7.6)

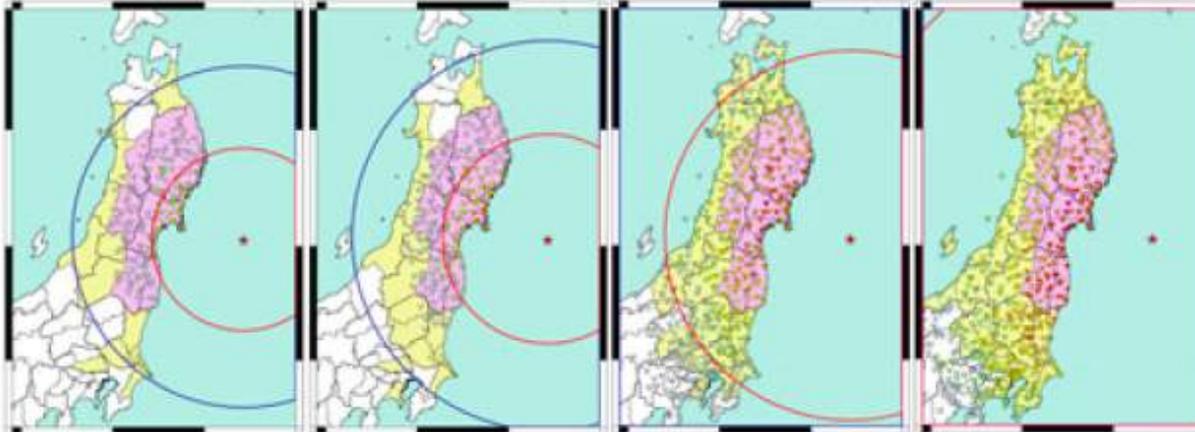


E: 47 s  
No. 9/15 (M7.6)

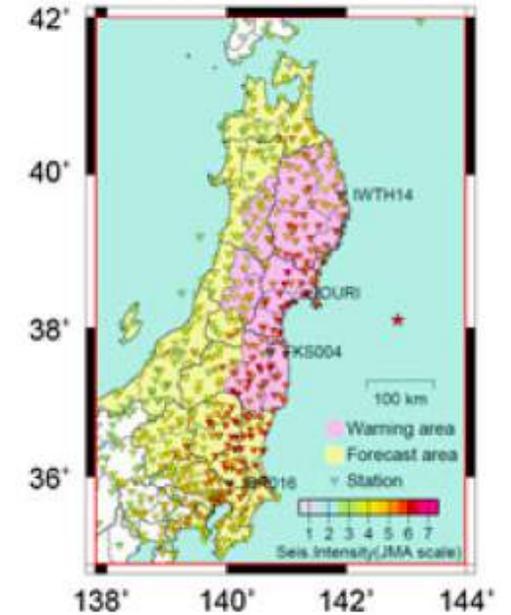
F: 53 s  
No. 10/15 (M7.7)

G: 88 s  
No. 12/15 (M7.9)

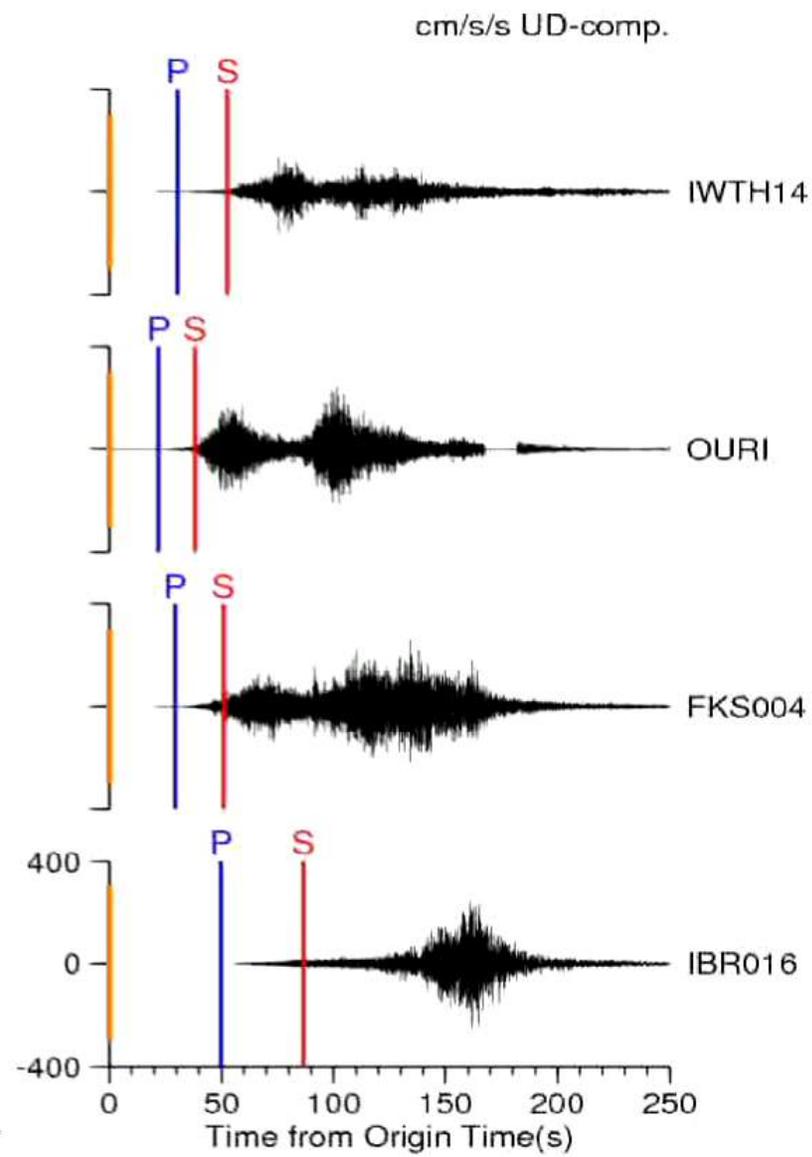
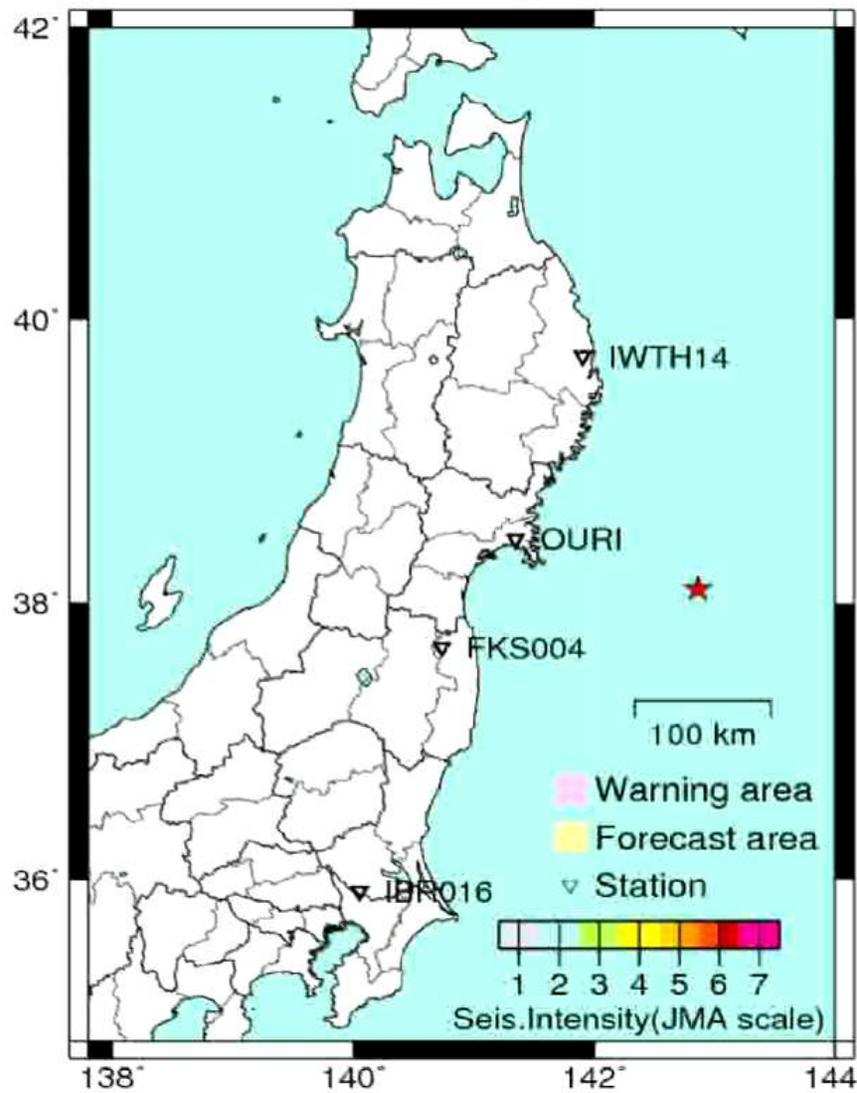
H: 139 s  
No. 15/15 (M8.1)



I:  
Final observed Intensity

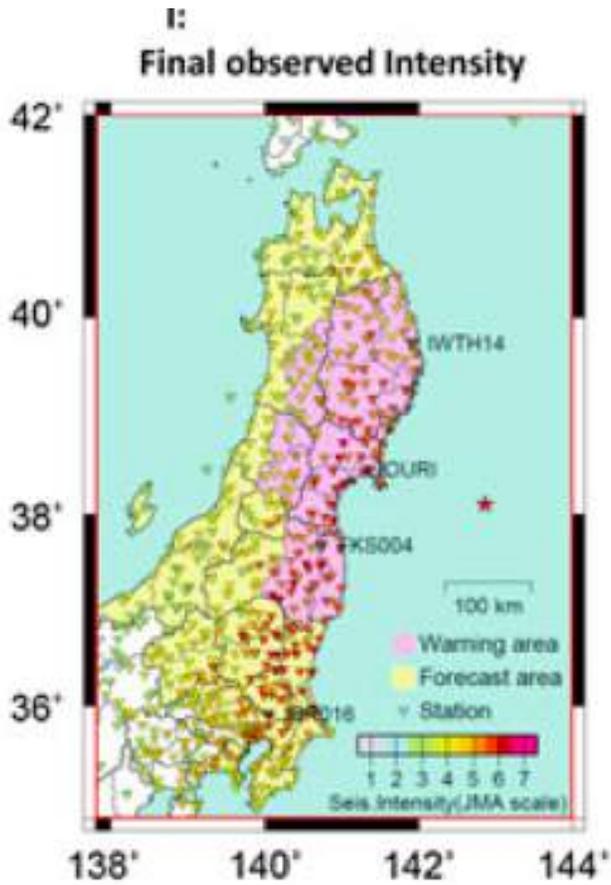


0 s from Origin Time (2011/03/11 14:46:18.1)  
 -27.5 s from Forecast  
 -30.7 s from Warning  
 EEW No. 0/15 (M---)

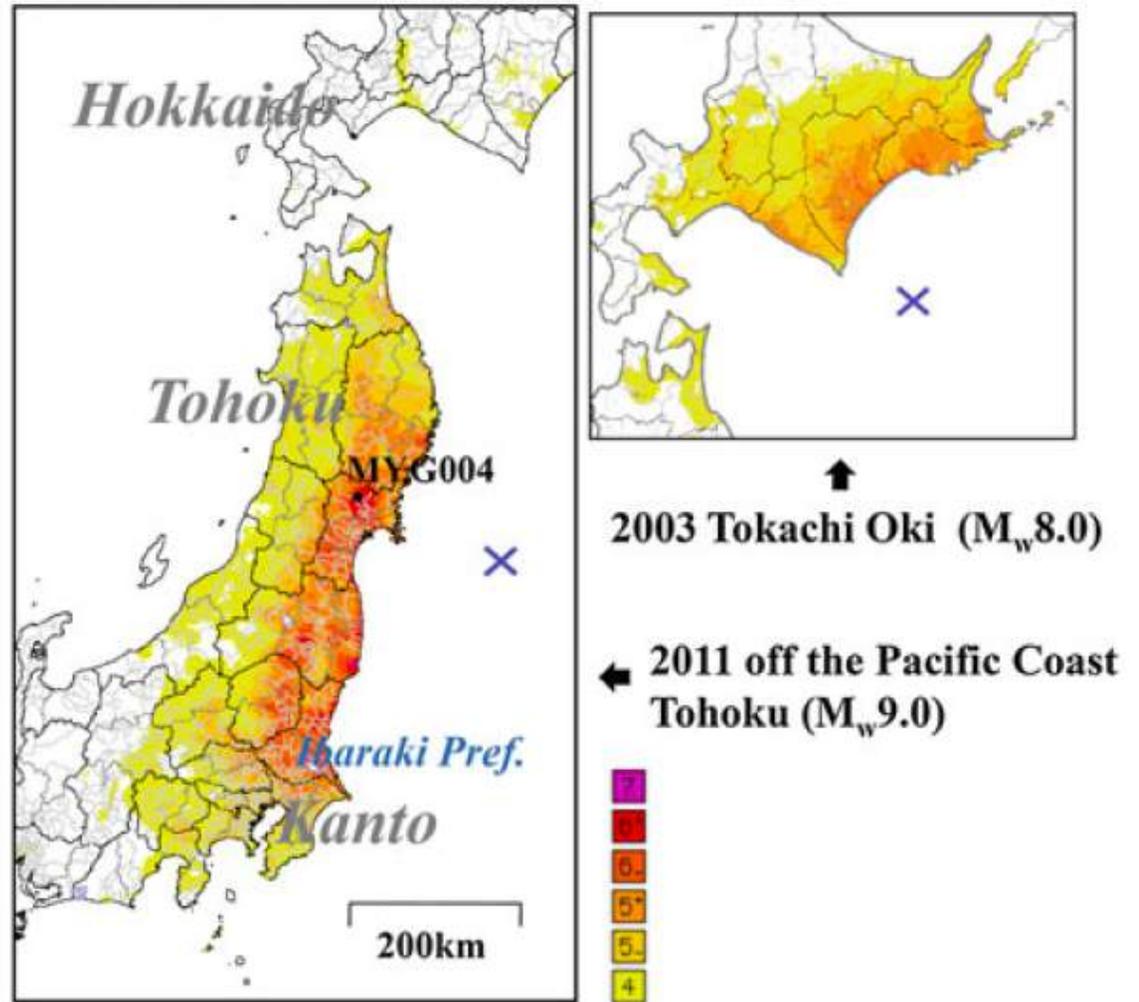


Made by MRI using data from JMA and NIED(KiK-net,K-NET)

Intensité finale  
Système d'alerte  
rapide

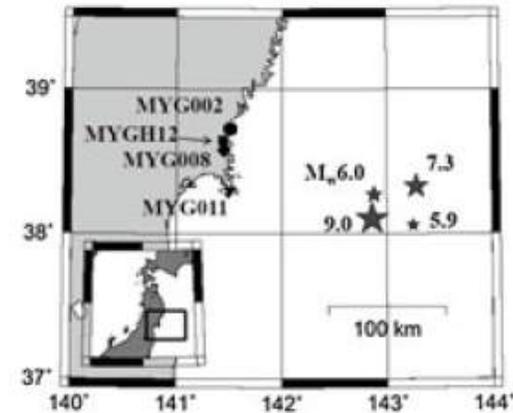
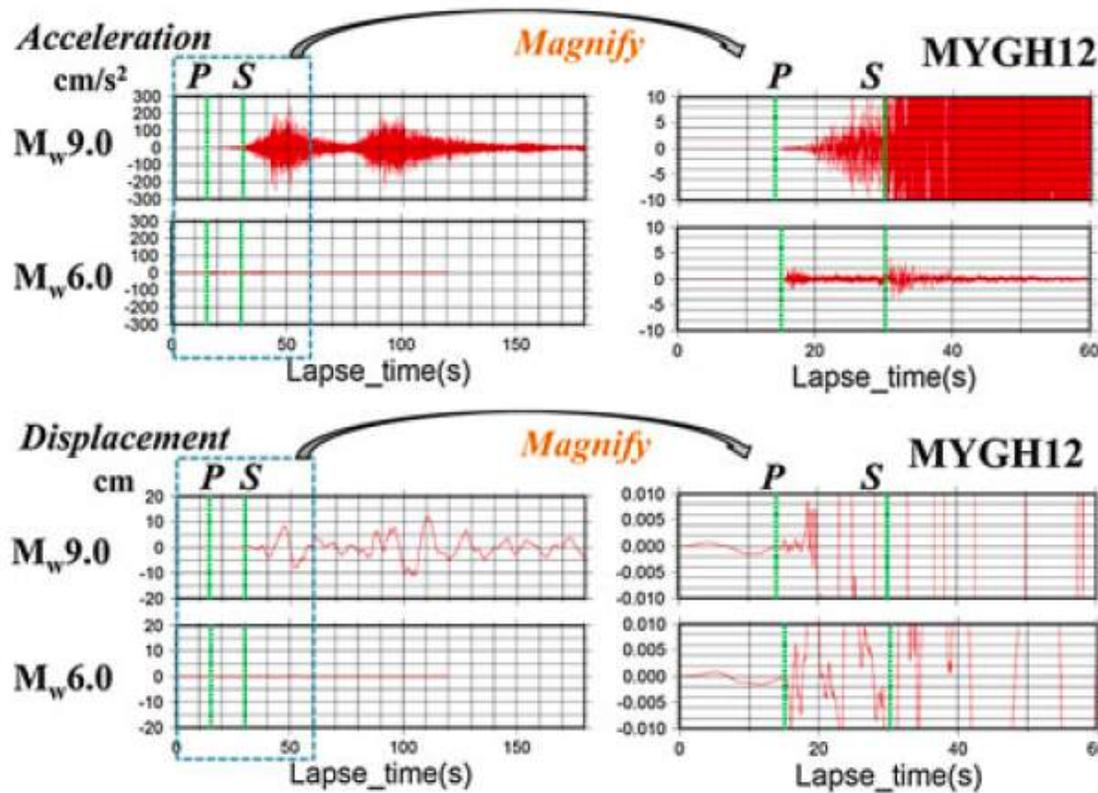


Intensité réelle



Sous estimation du  
mouvement fort dans le district de Kanto

Pouvait on estimer dès le début la grande magnitude du séisme?  
 Comparaison avec le foreshock de Mw 6.0

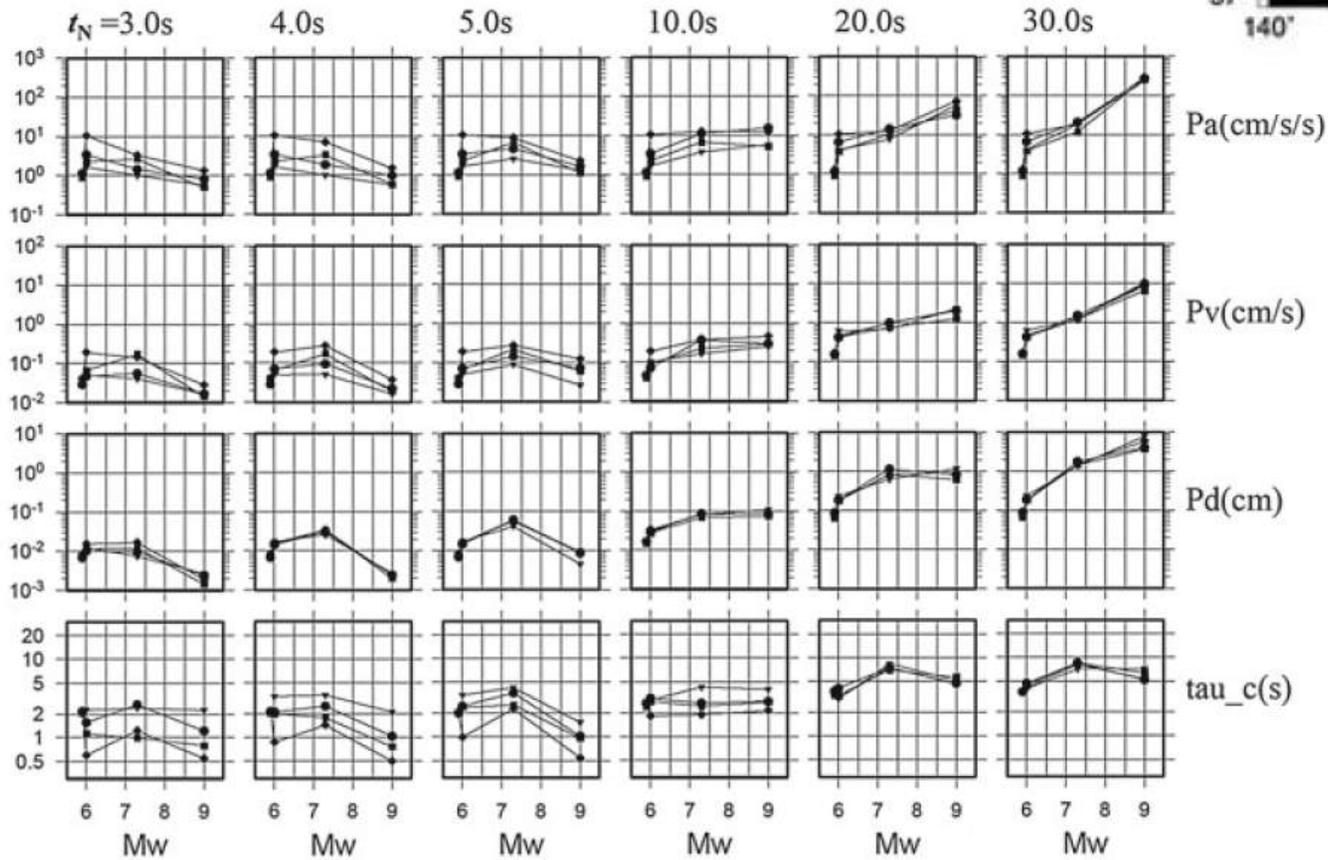
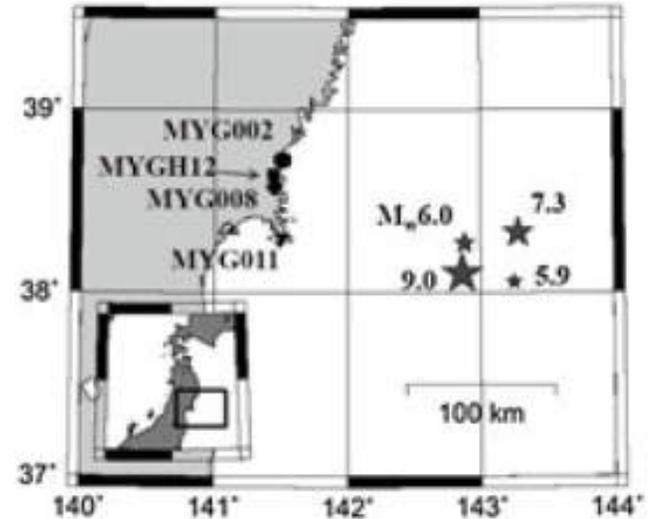


On estime: déplacement max Pd  
 vitesse Pv  
 accélération Pa

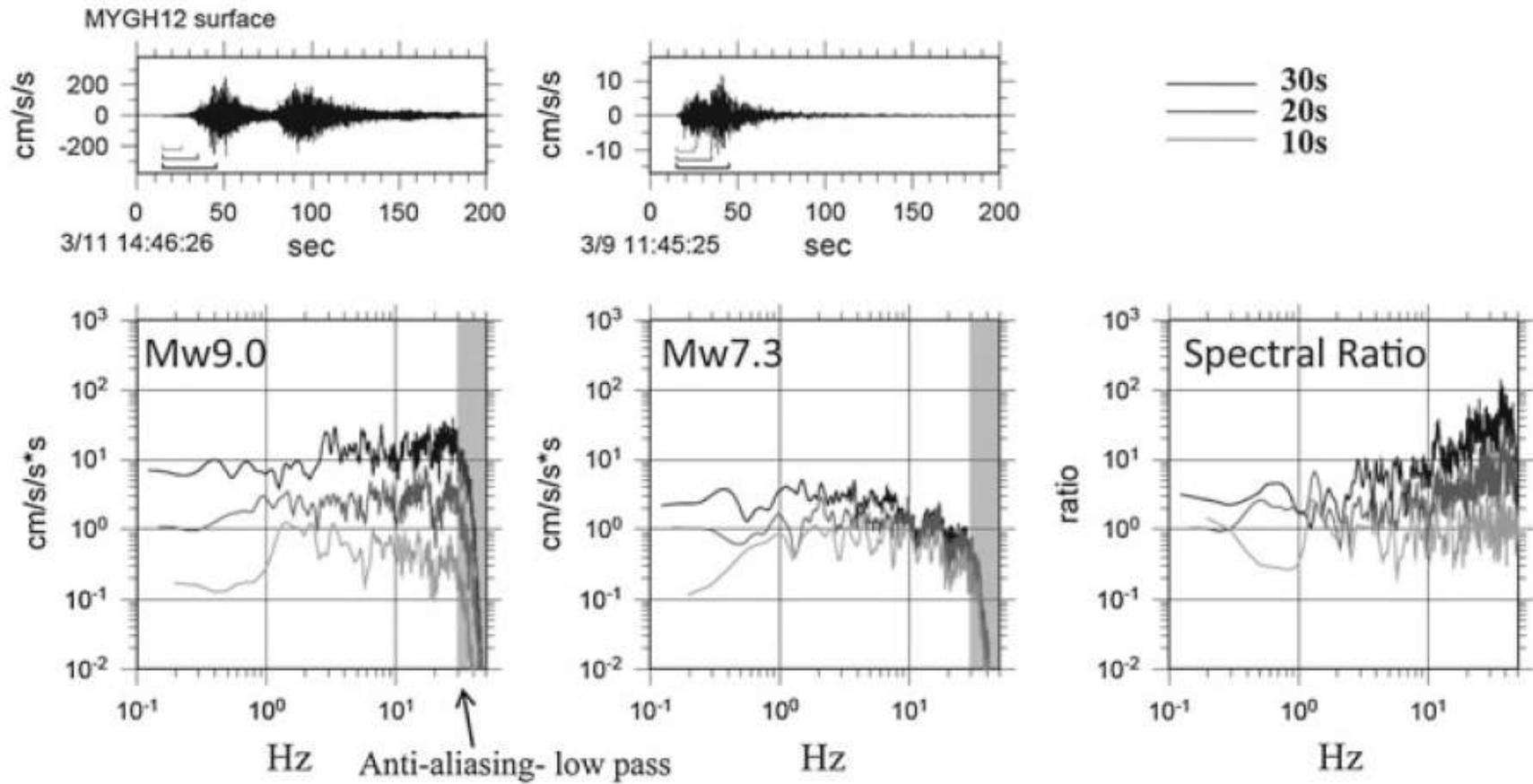
$$\tau_c$$

$$\tau_c = 2\pi \sqrt{\int_{t_p}^{t_p+t_N} u_d^2(t) dt / \int_{t_p}^{t_p+t_N} u_v^2(t) dt}$$

- MYG002    ▽ MYG011
- MYG008    ▣ MYGH12



# Comparaison des spectres pour différentes valeurs de $t_N$



## Alerte au tsunami - Japon 2011

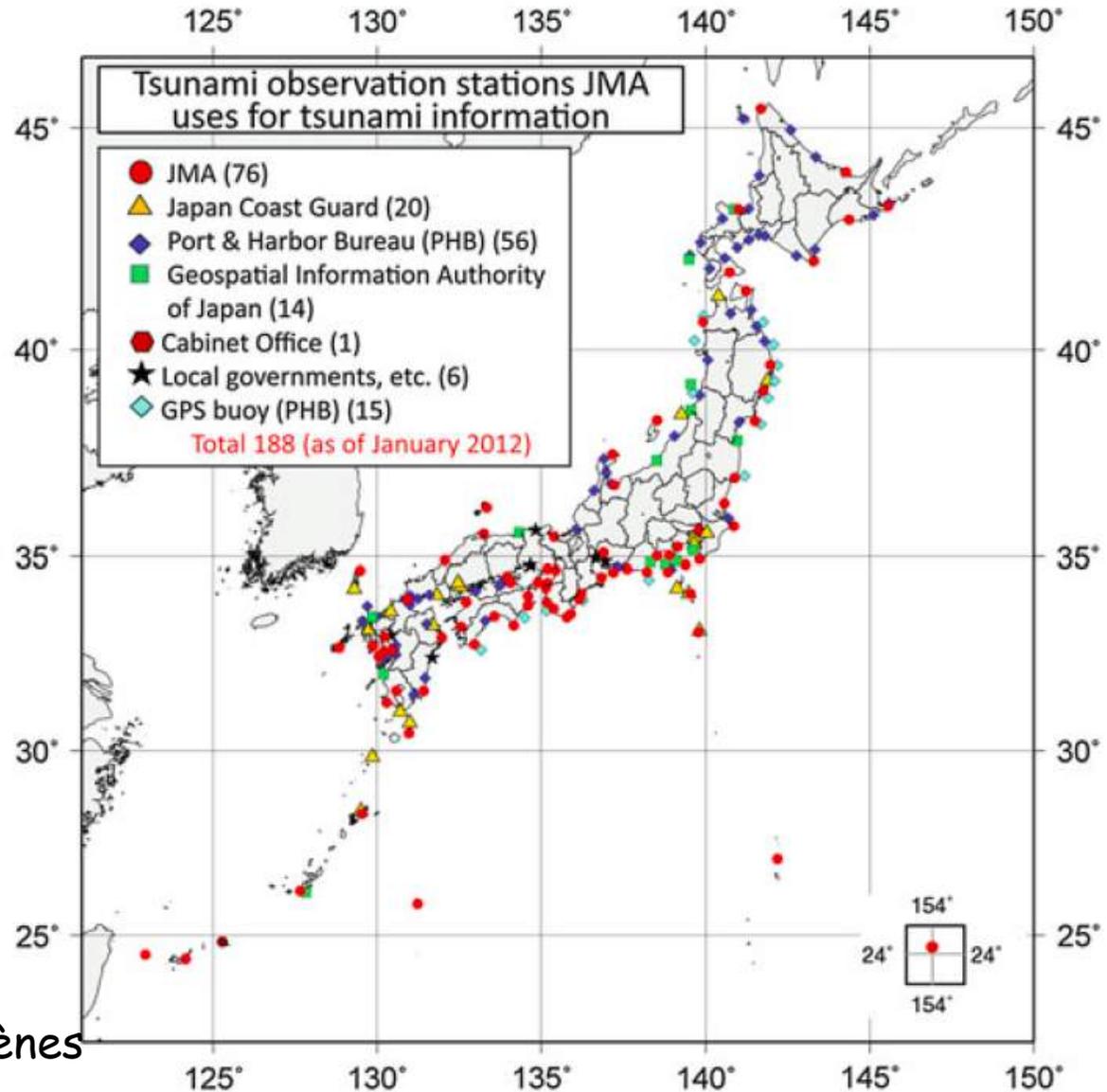
173 méregraphes  
15 bouées GPS (10-20 km  
au large de la côte)

Niveaux d'alerte:

Tsunami Majeur: > 3m  
Tsunami 1-2 m,  
Tsunami advisory > 0.5 m

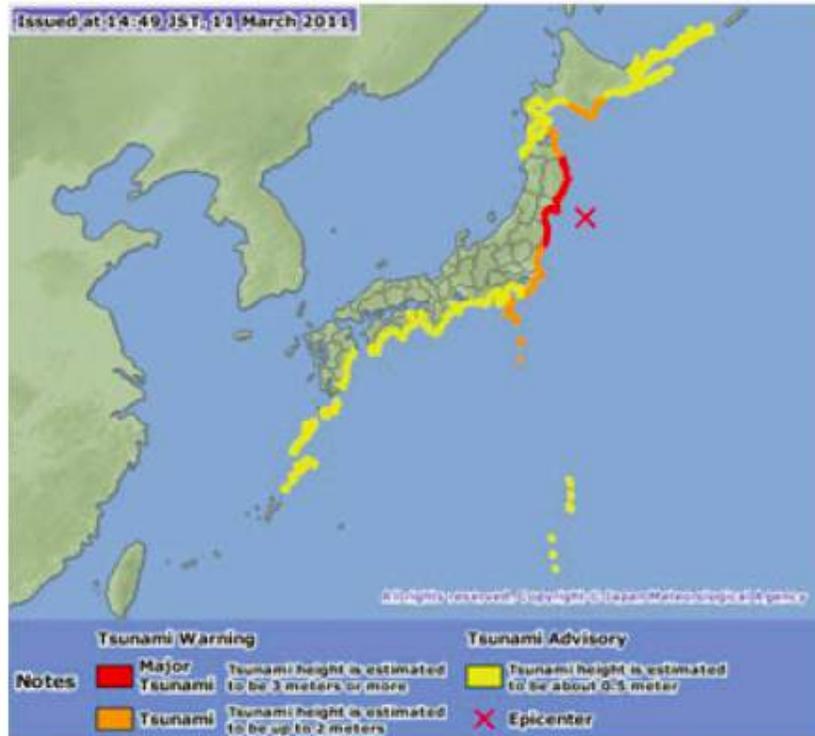
66 régions côtières

Annonce par TV, radio, sirènes  
et hauts-parleurs.

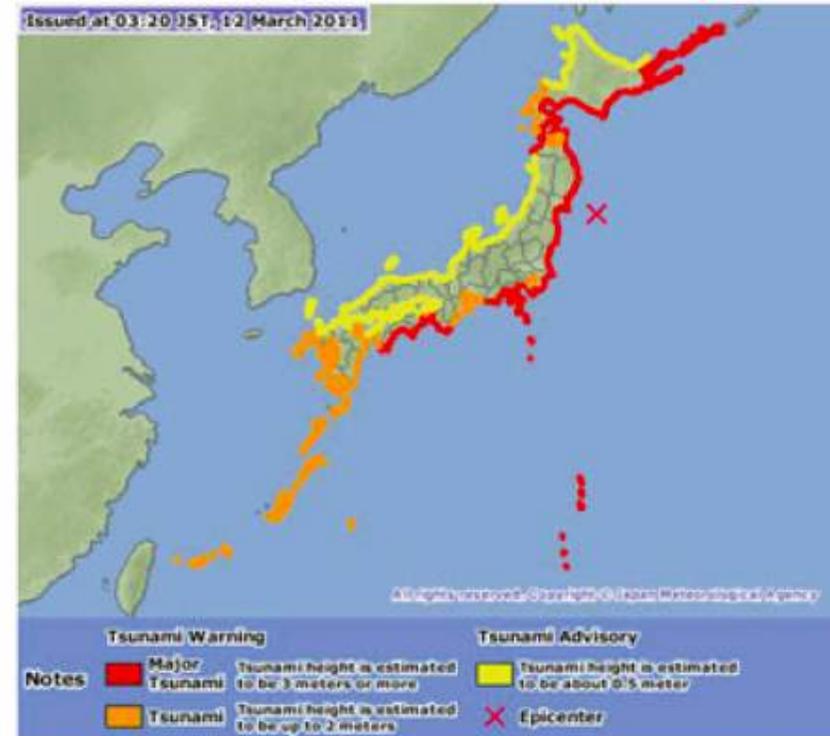


# Tohoku, Japon 11/03/2011, 14h46

(a) 14:49, March 11 (JST)



(b) 3:20, March 12

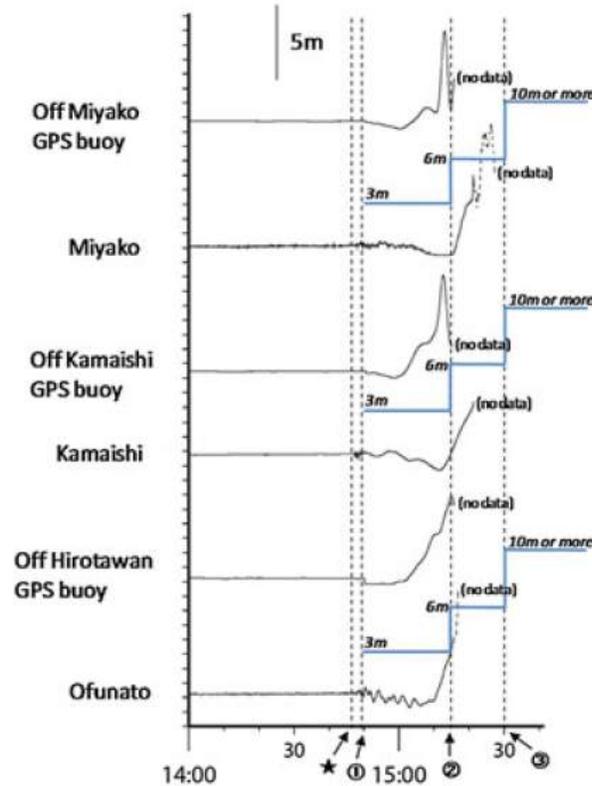
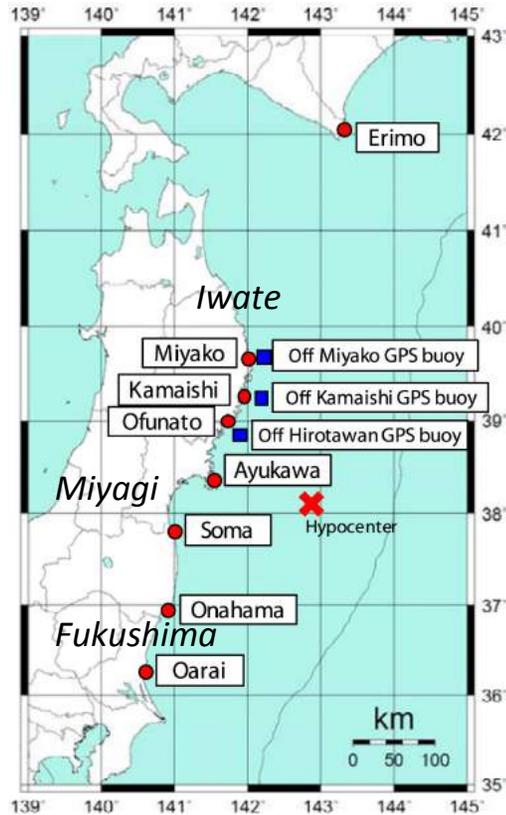


Premier bulletin d'alerte au tsunami  
Estimé sur la base d'une mag. 7.9

Bulletin no 8  
3h20 le 12 Mars

6m Miyagi Pref  
3 m Iwate, Fukushima

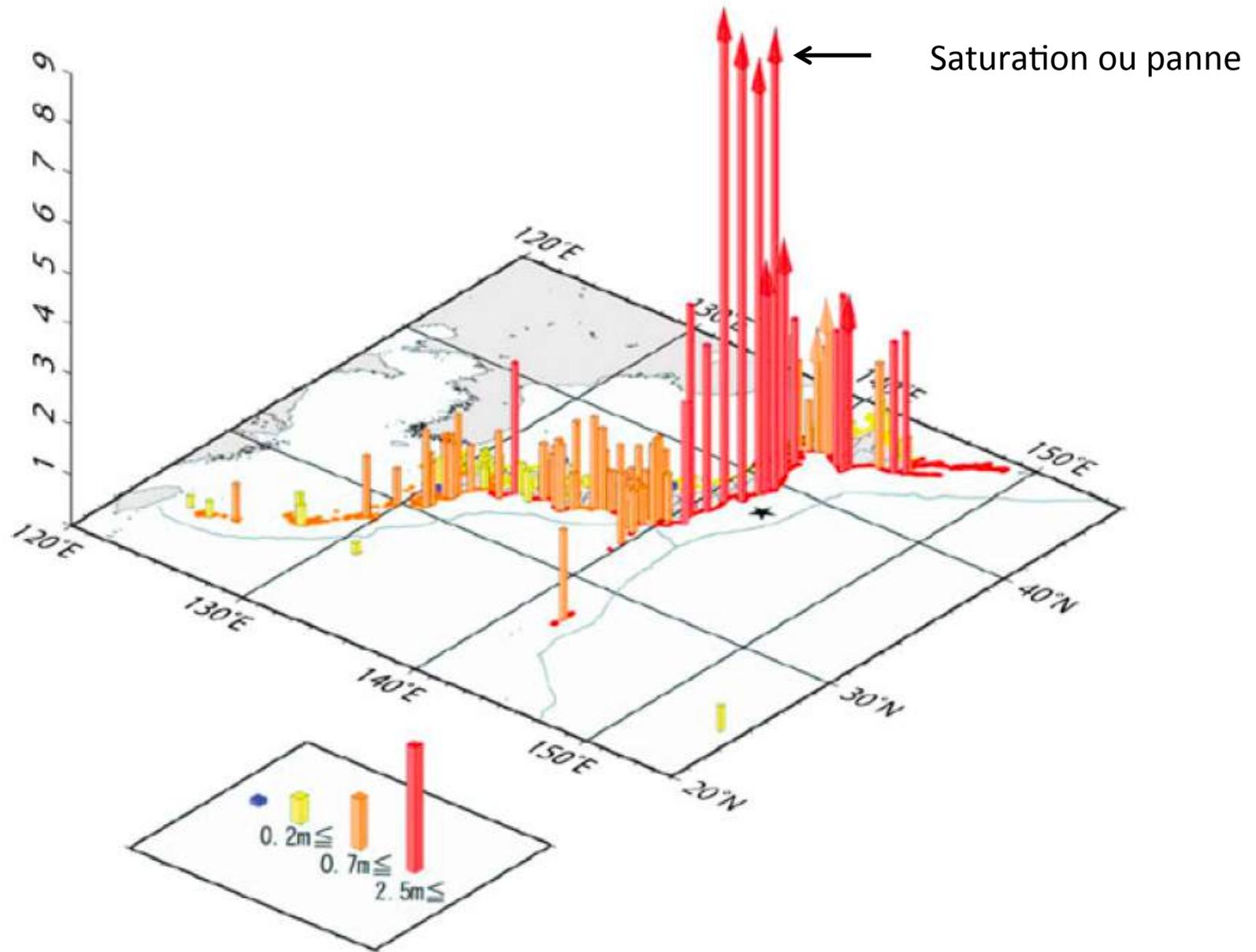
## Observations du tsunami dans les stations utilisées par JMA



- ★ 3.11 14:46 Earthquake occurred
- ① 14:49 Tsunami warning (1st bulletin)  
14:50 Tsunami height estimation  
(Iwate 3m, Miyagi 6m)
  - ② 15:14 Tsunami warning (2nd bulletin)  
Tsunami height estimation  
(Iwate 6m, Miyagi 10m or more)
  - ③ 15:30 Tsunami warning (3rd bulletin)  
15:31 Tsunami height estimation  
(Iwate and Miyagi 10m or more)

- Legend**
- Sea level data which was reported on a real-time basis
  - - - Sea level data salvaged after the event
  - Tsunami height estimation

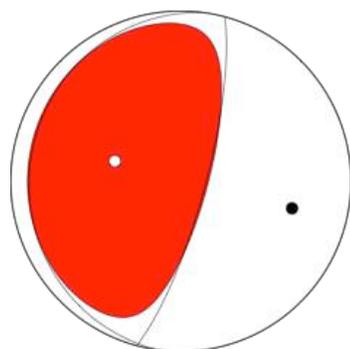
# Hauteurs de tsunami maximales observées



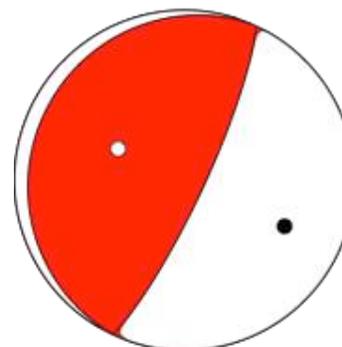
## Conclusions sur le fonctionnement du système d'alerte

- Le système d'alerte sismique a bien fonctionné
- Magnitude initiale de  $M$  7.9 sous-estimée
  - Saturation de l'échelle de magnitude ( $\sim M_s$ )
  - retard dans l'évacuation
    - > alerte sera donnée avec la magnitude max. crédible dans la région
    - > hauteurs qualitatives plutôt que numériques pour mieux sensibiliser le public
  - Estimer mieux la magnitude  $M_w$ :
    - Beaucoup de sismomètres large-bande ont saturé
    - Installer 80 sismomètres large-bande de plus grande dynamique pour calculer  $M_w$  en moins de 15 mn.
    - Implémenter une méthodologie d'inversion rapide de la source du tsunami
    - Installation de réseaux cablés de mesure de pression et sismomètres en fond de mer.

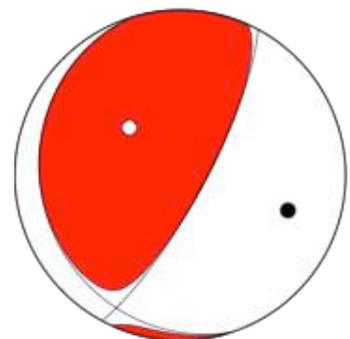
# Séisme de Tohoku 12/03/2011: Solutions pour le tenseur des moments (mécanismes focaux)



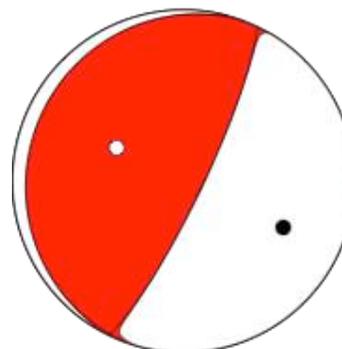
USGS Research Centroid  
Moment Tensor  
Mw 8.9  
Distributed ~34 minutes  
after OT  
(Jascha Polet, Cal Poly Pomona)



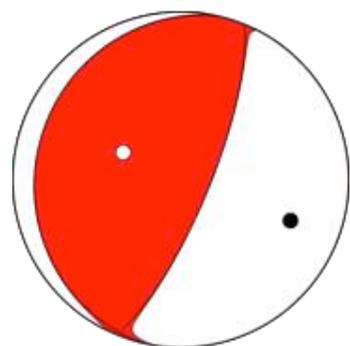
global Centroid Moment  
Tensor V1  
Mw 9.1  
Released 7 hrs after OT



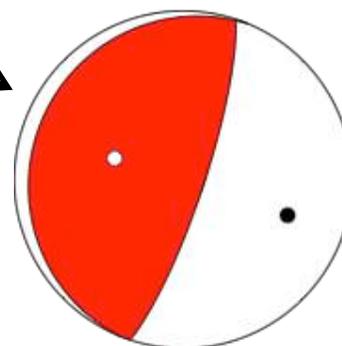
USGS W-Phase V1  
Mw 8.9  
Released 1 hr after OT



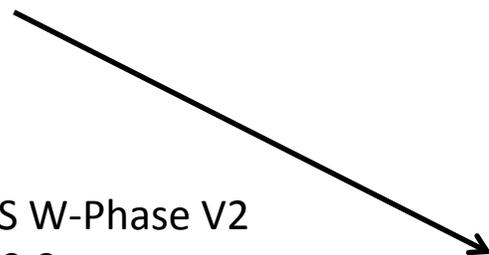
global Centroid Moment Tensor  
V2  
Mw 9.1  
Released ~ 3 days after OT



USGS W-Phase V2  
Mw 9.0  
Released 6 hrs after OT



Earthquake Research Institute,  
Japan, CMT V1  
Mw 9.0 1 day after OT  
 $V_0$  Mw 8.8 2.7 hrs after OT

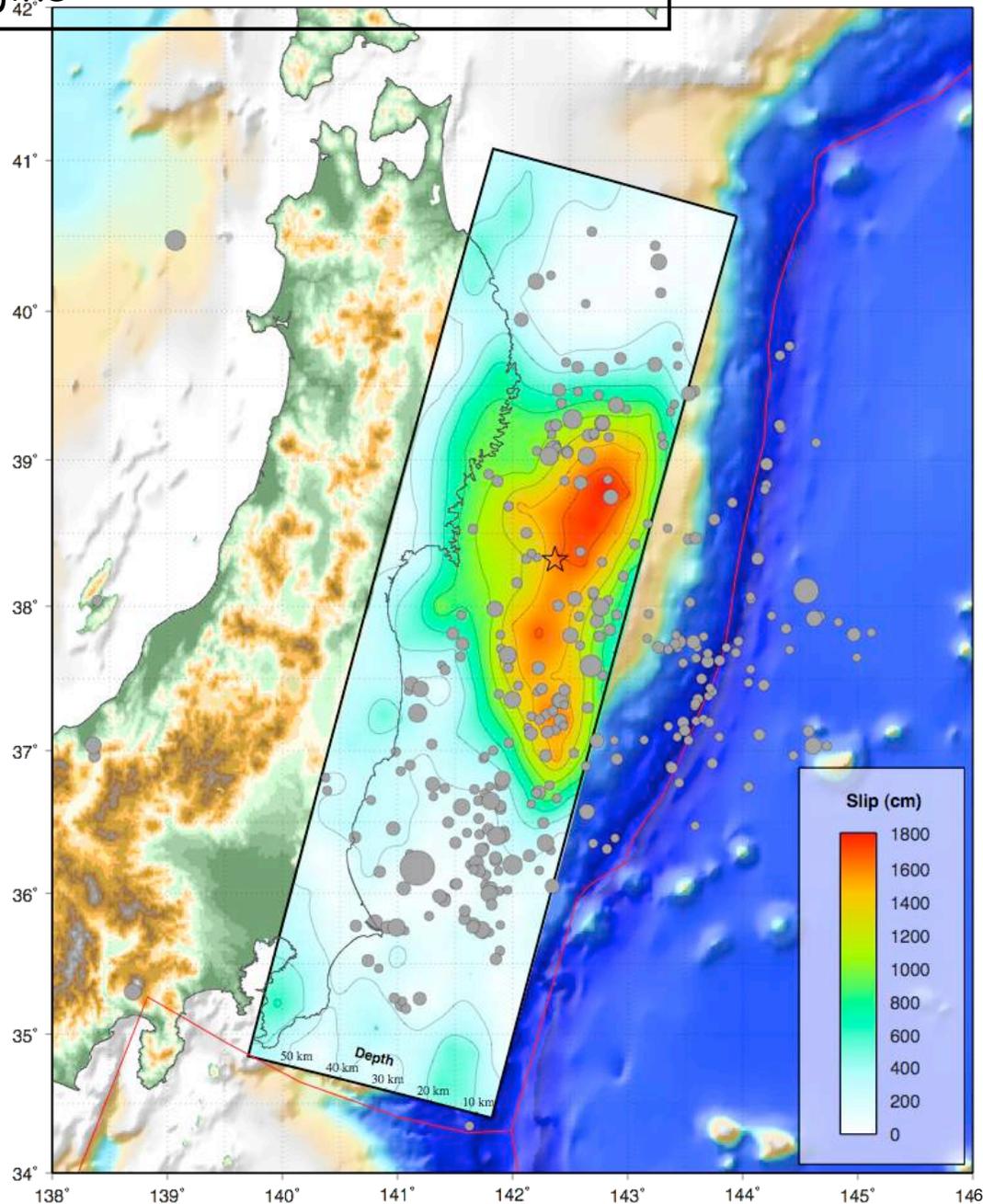


# Séisme de Tohoku, Japon, 12 Mars 2011: Modèle de glissement USGS V1 - 7 hr après le temps origine

- Rupture "compacte", bilatérale autour de l'épicentre, glissement maximal plus près de la surface que l'hypocentre.

- Rupture principalement dans la partie peu profonde de la fosse, les données GPS suggèrent que la rupture n'a pas atteint la profondeur de la limite de plaque sous la côte

= Glissement maximum: 30m ou plus

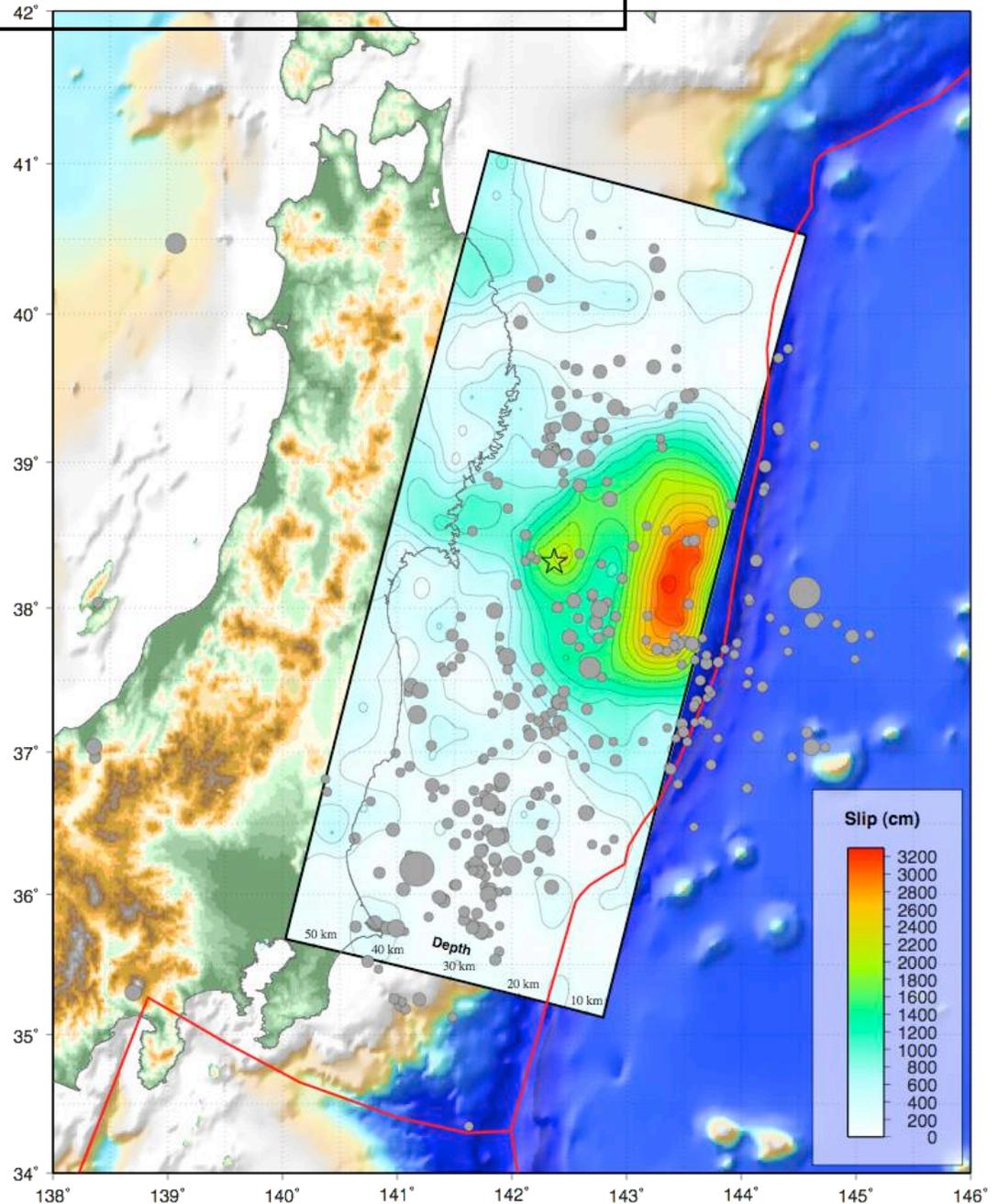


# Séisme de Tohoku, Japon, 12 Mars 2011: Modèle de glissement USGS V2 - 18/03/2011

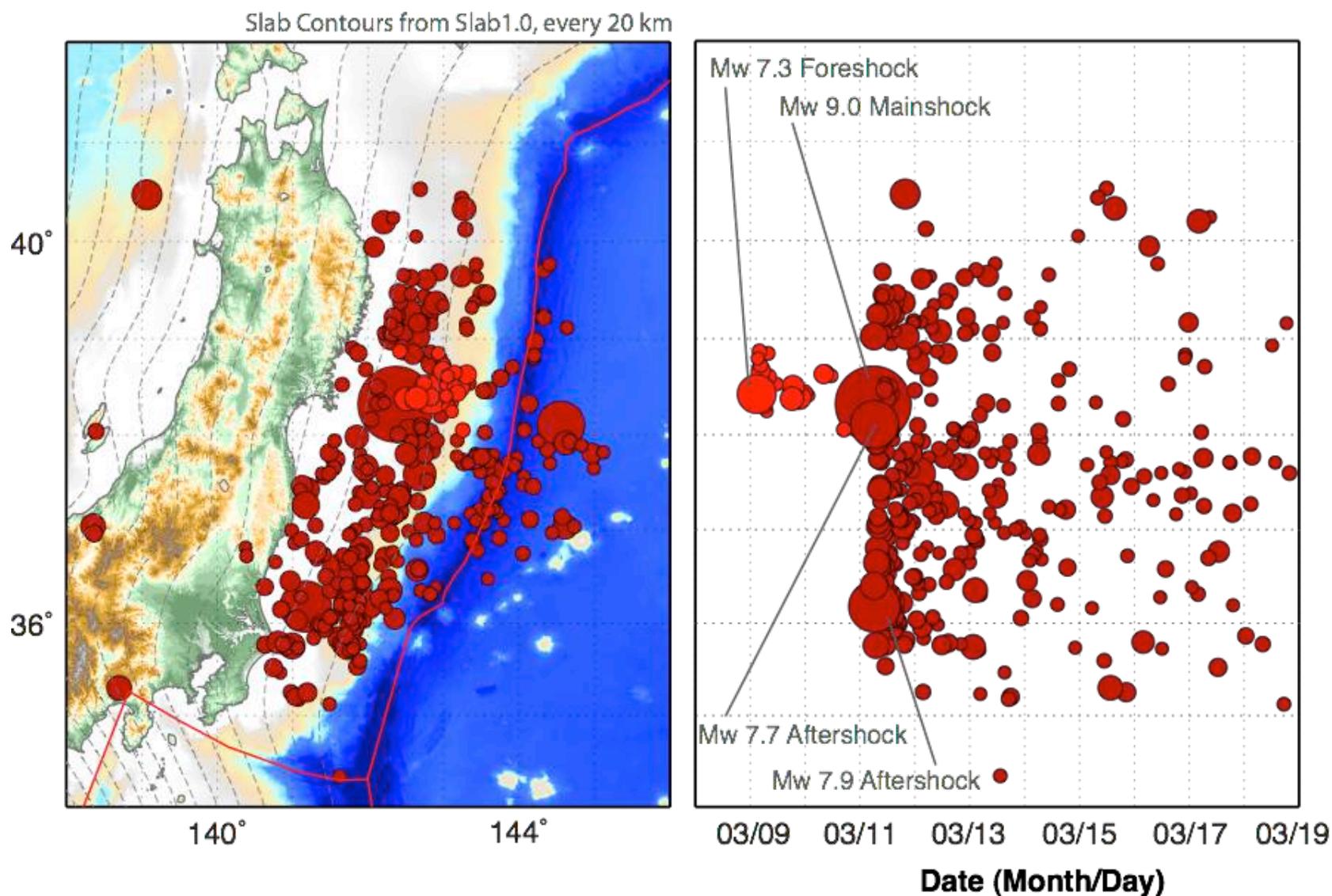
Glissement max. de plus de 30 m, suivant la paramétrisation de la vitesse de glissement (1.25 - 3 km/s)

Pour une vitesse de rupture constante, glissements de 40-50 m à faible profondeur.

Régions de faible glissement aux bords de la zone de rupture (mal résolu)

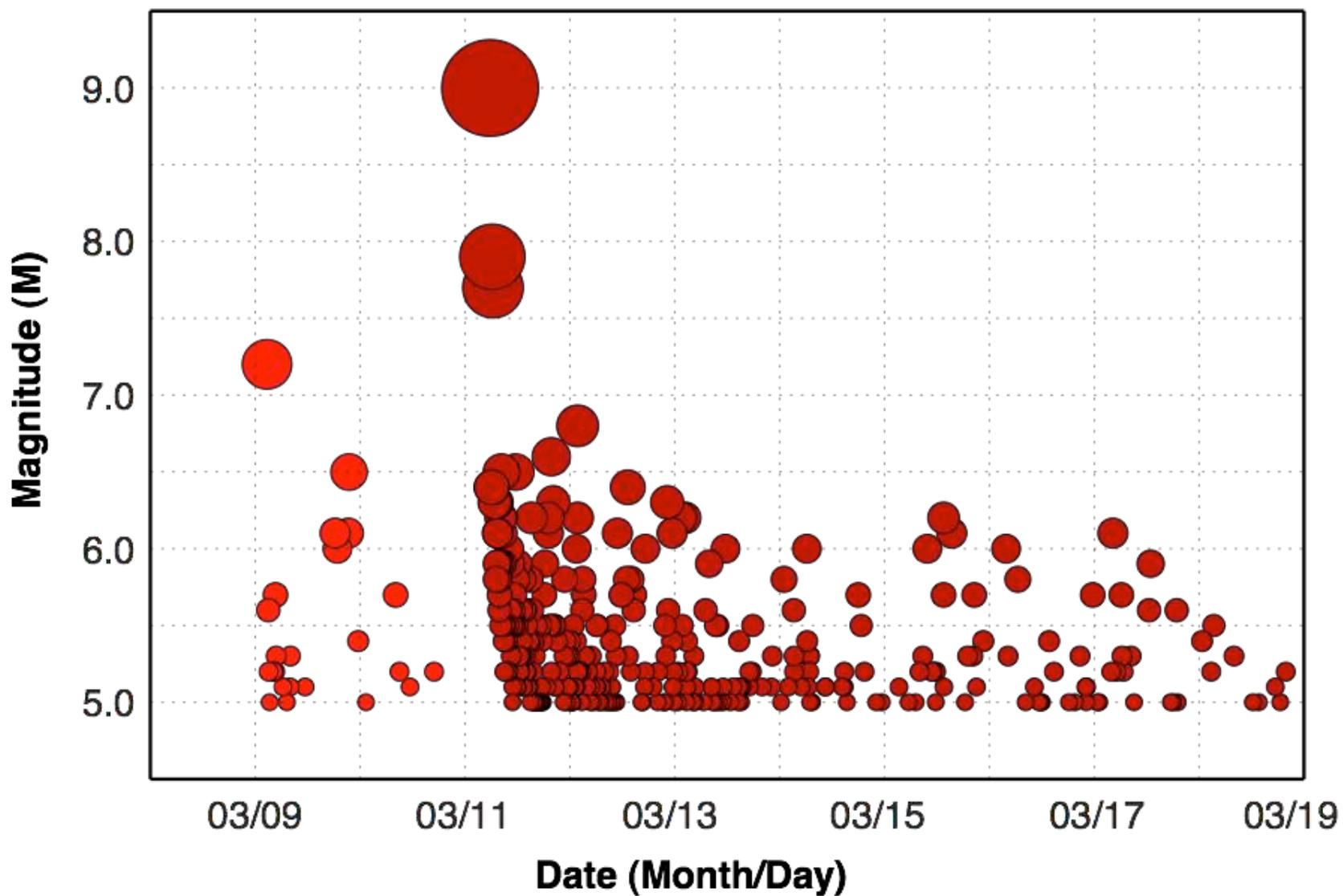


# Distribution spatio-temporelle des répliques 03/08/11 - 03/16/11

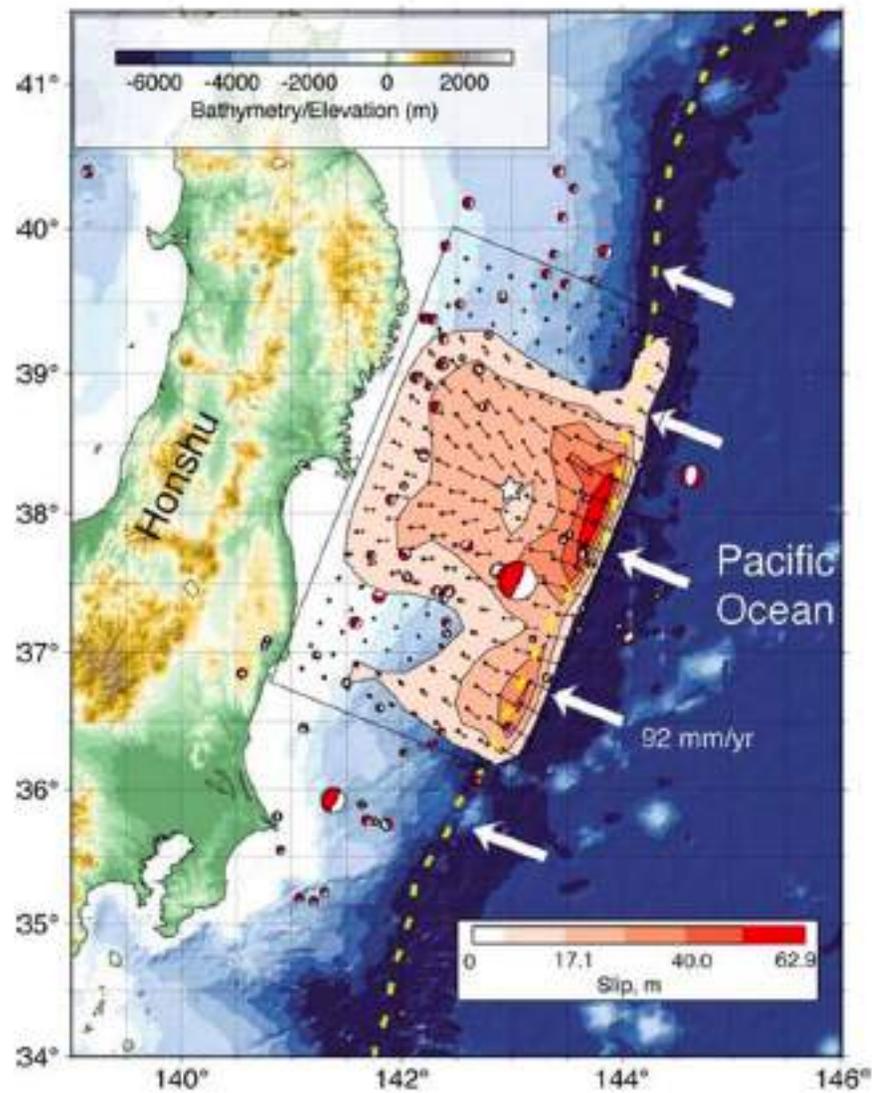


Note that the magnitudes of the 2011/03/11 06:15 (Mw 7.9) and 2011/03/11 06:25 (Mw 7.7) aftershocks were updated from earlier, lower estimates. Updates occurred on 03/16 and 03/18, respectively.

# Tohoku, Japan Earthquake: Aftershock (and Foreshock) Sequence, M:Time History



## Distribution du glissement pour le séisme de Tohoku 2011 Mw 9.0

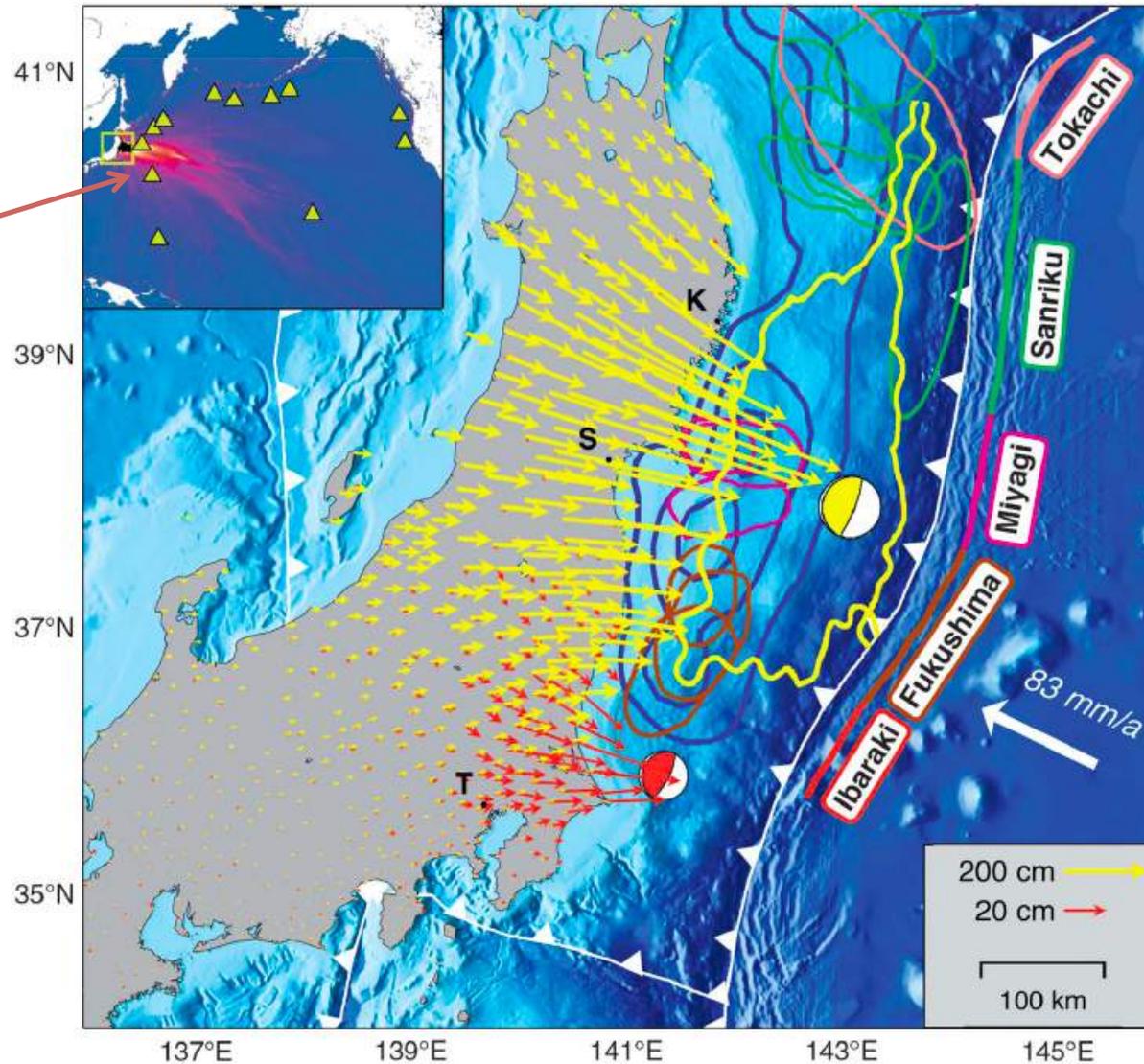


Ondes P télésismiques

*Lay et al., 2011, EPS*

# Composante horizontale du déplacement GPS

Hauteur de tsunami prédite par modèle conjoint GPS+ tsunami

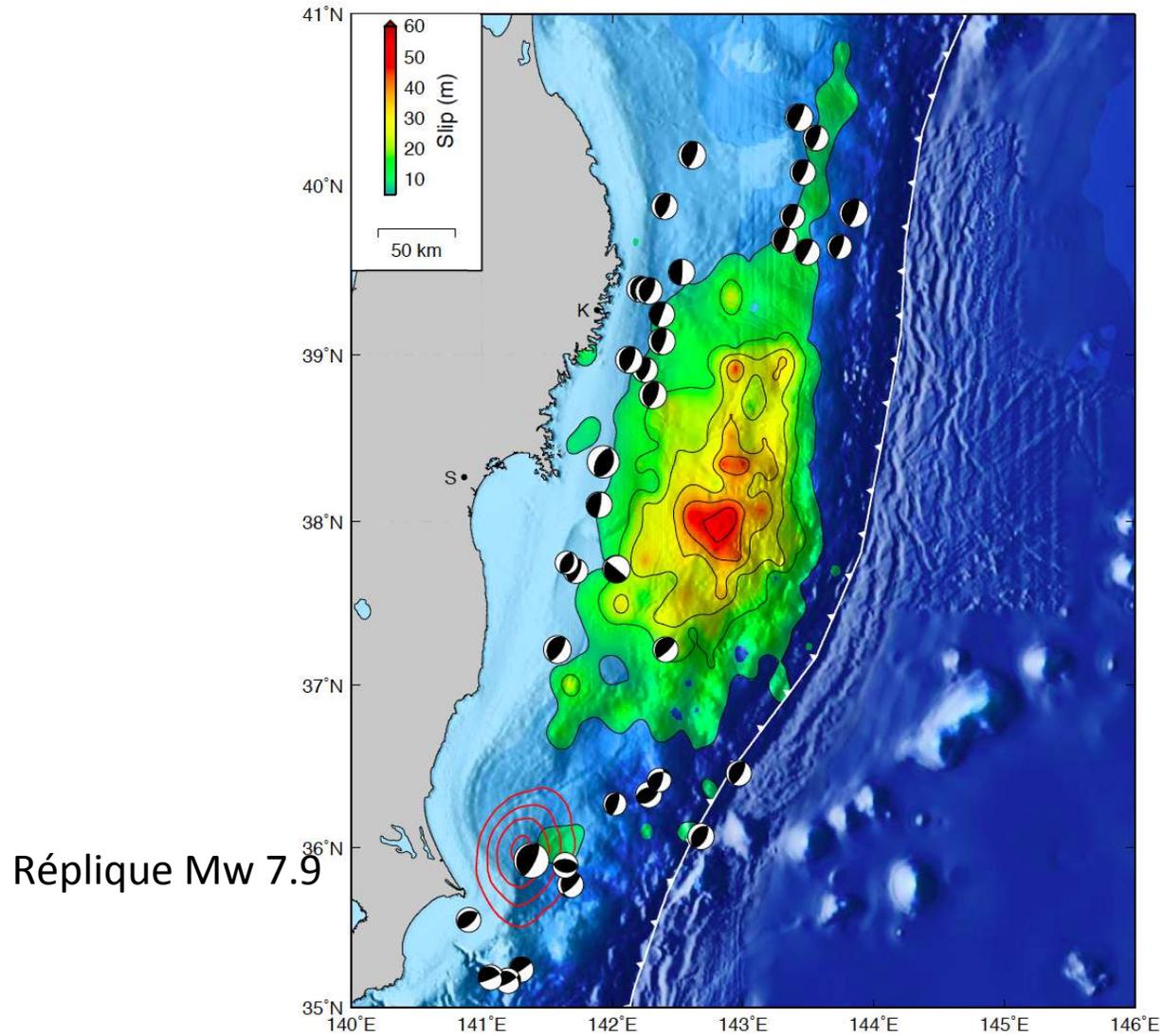


— Choc principal

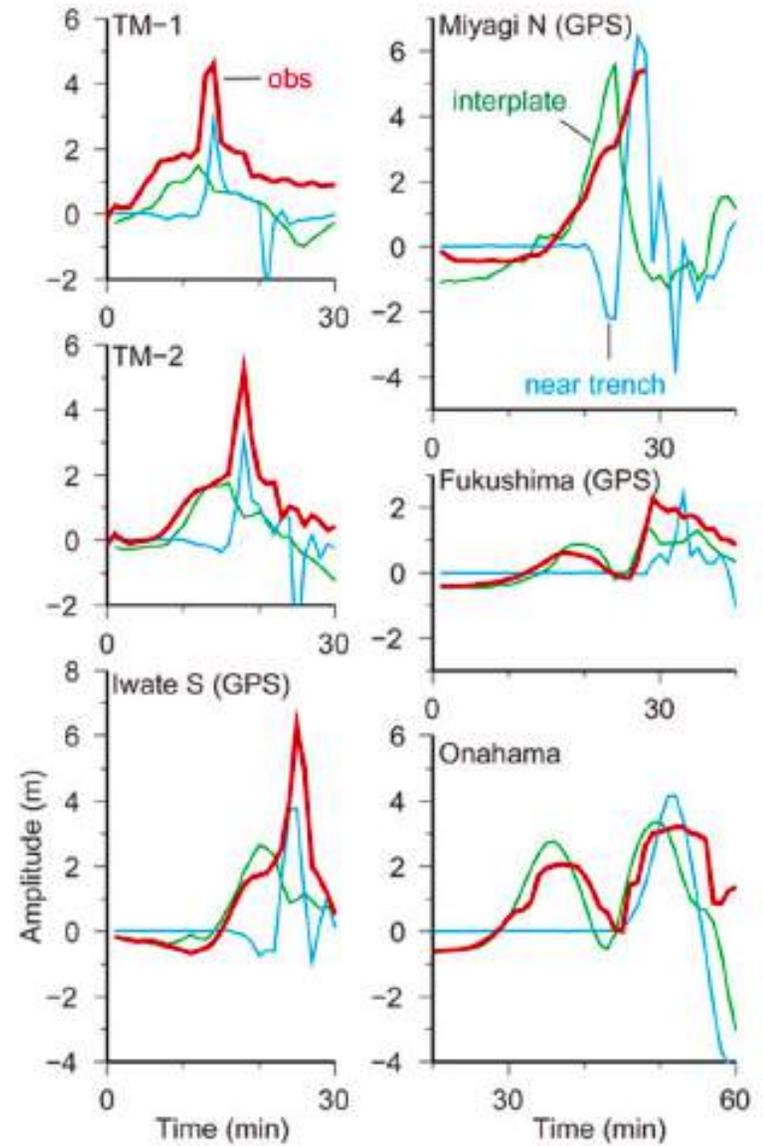
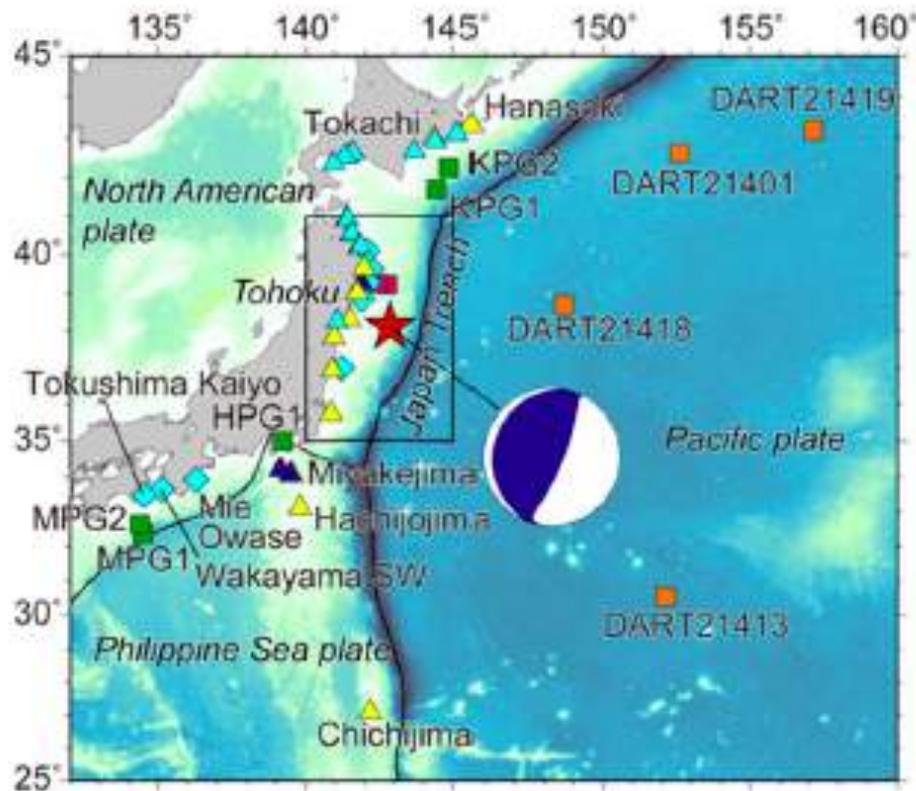
— Réplique Mw 7.9 (30 mn plus tard)

— Couplage estimé (Hashimoto et al., 2009)

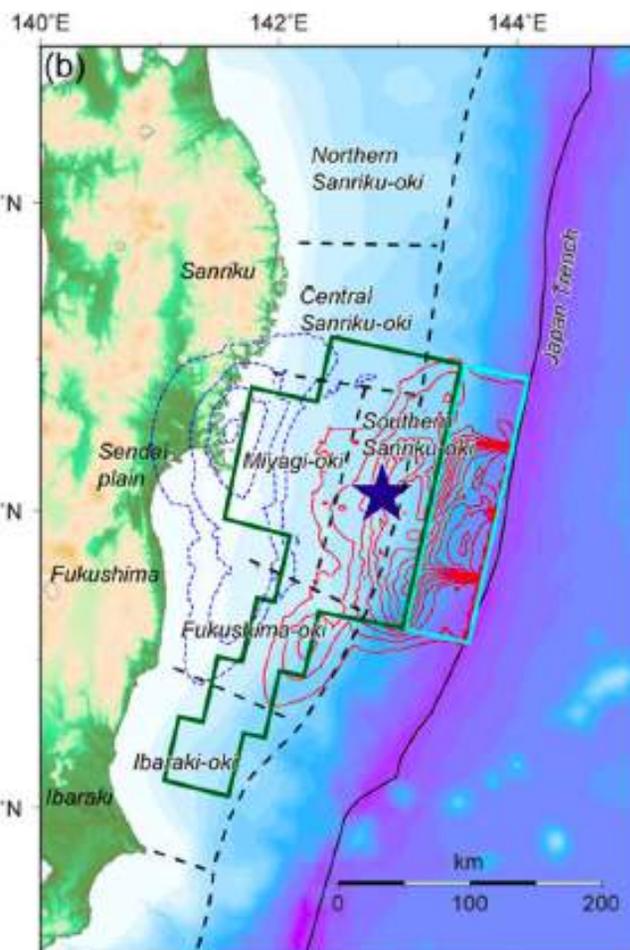
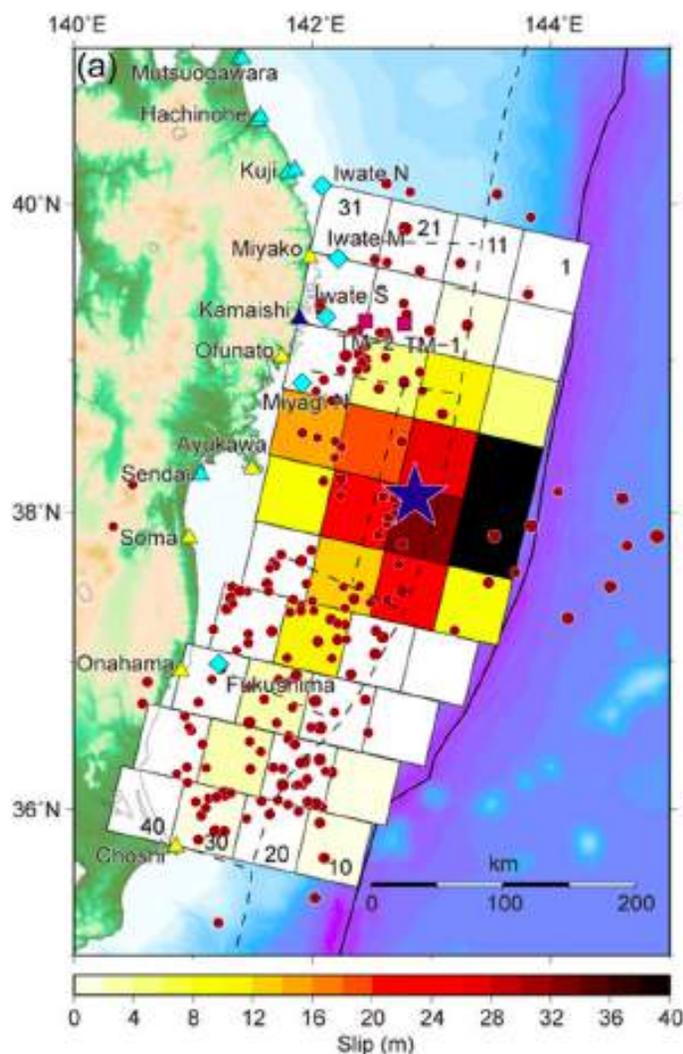
# Modèle de glissement à partir des données GPS et tsunami



# Enregistrement du tsunami



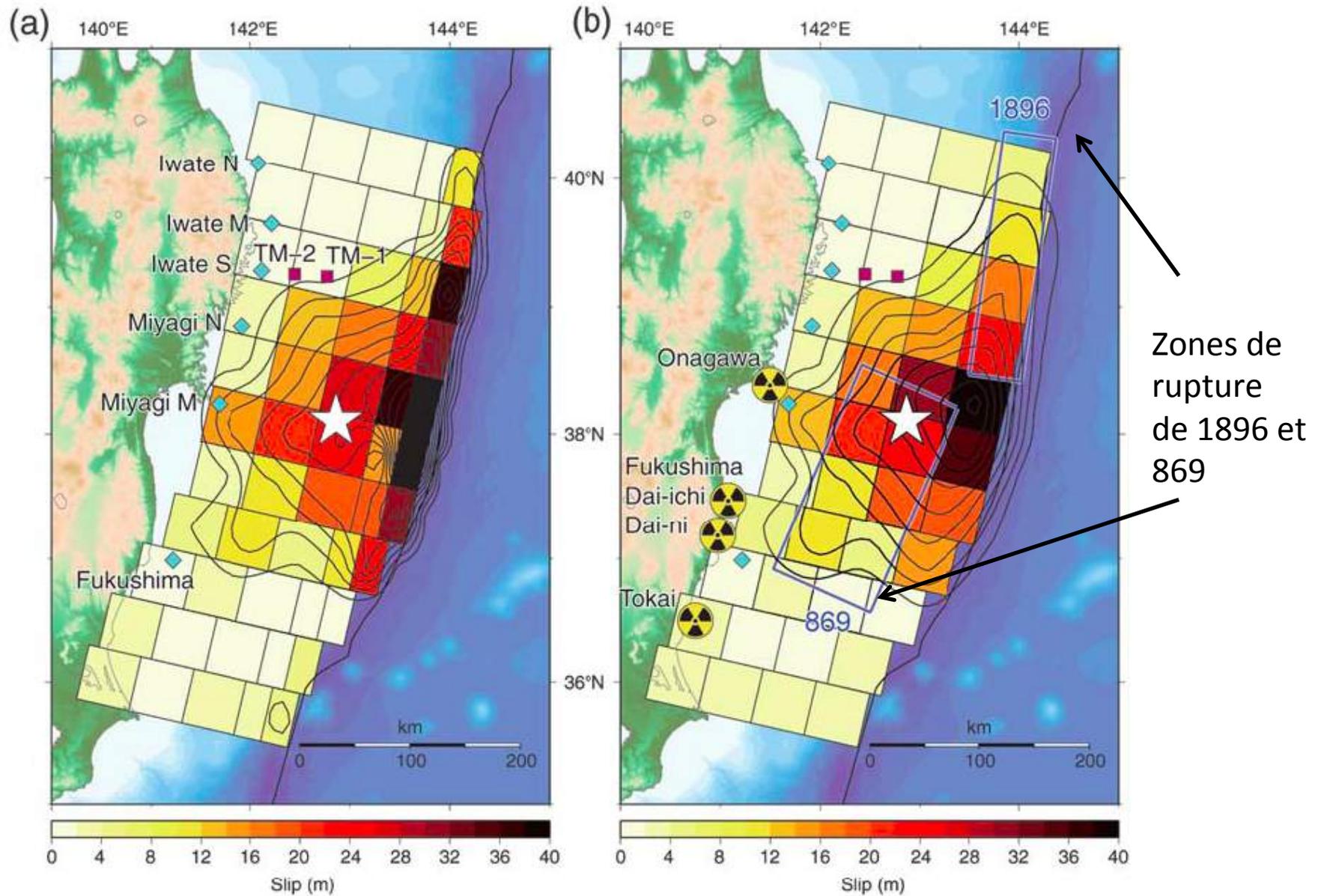
# Distribution du glissement par inversion des formes d'ondes du tsunami



Déformation du fond marin estimé  
Rouge: soulèvement (contours: 1m)  
Bleu: subsidence (contours 0.5m)

- Répliques < 1 jour après le séisme principal

# Inversion de formes d'onde des données de tsunami

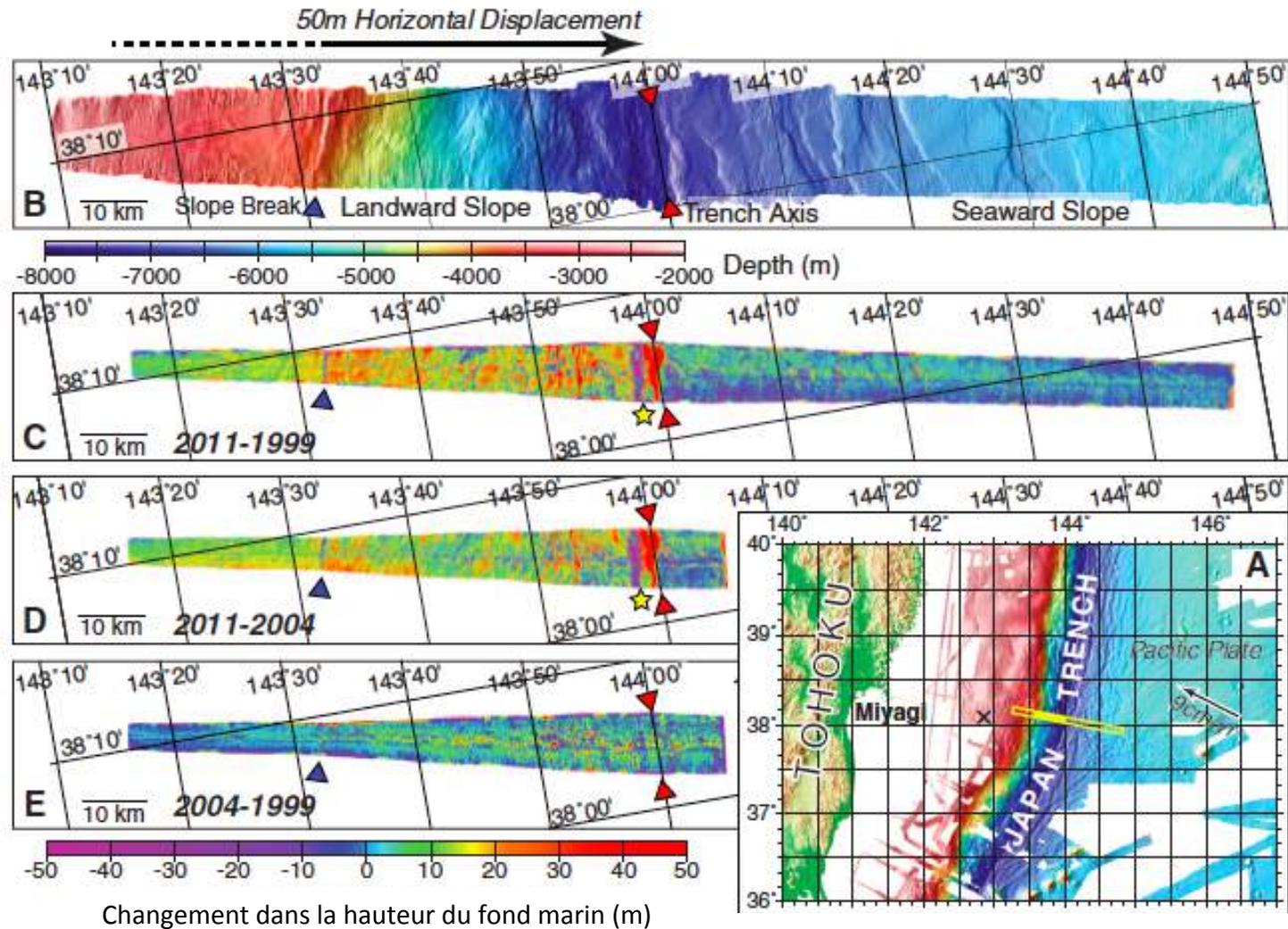


Paramétrisation en 55 zones

Paramétrisation en 44 zones

*Satake et al. 2013*

# Différences dans la hauteur du fond marin avant et après le séisme de Tohoku 2011

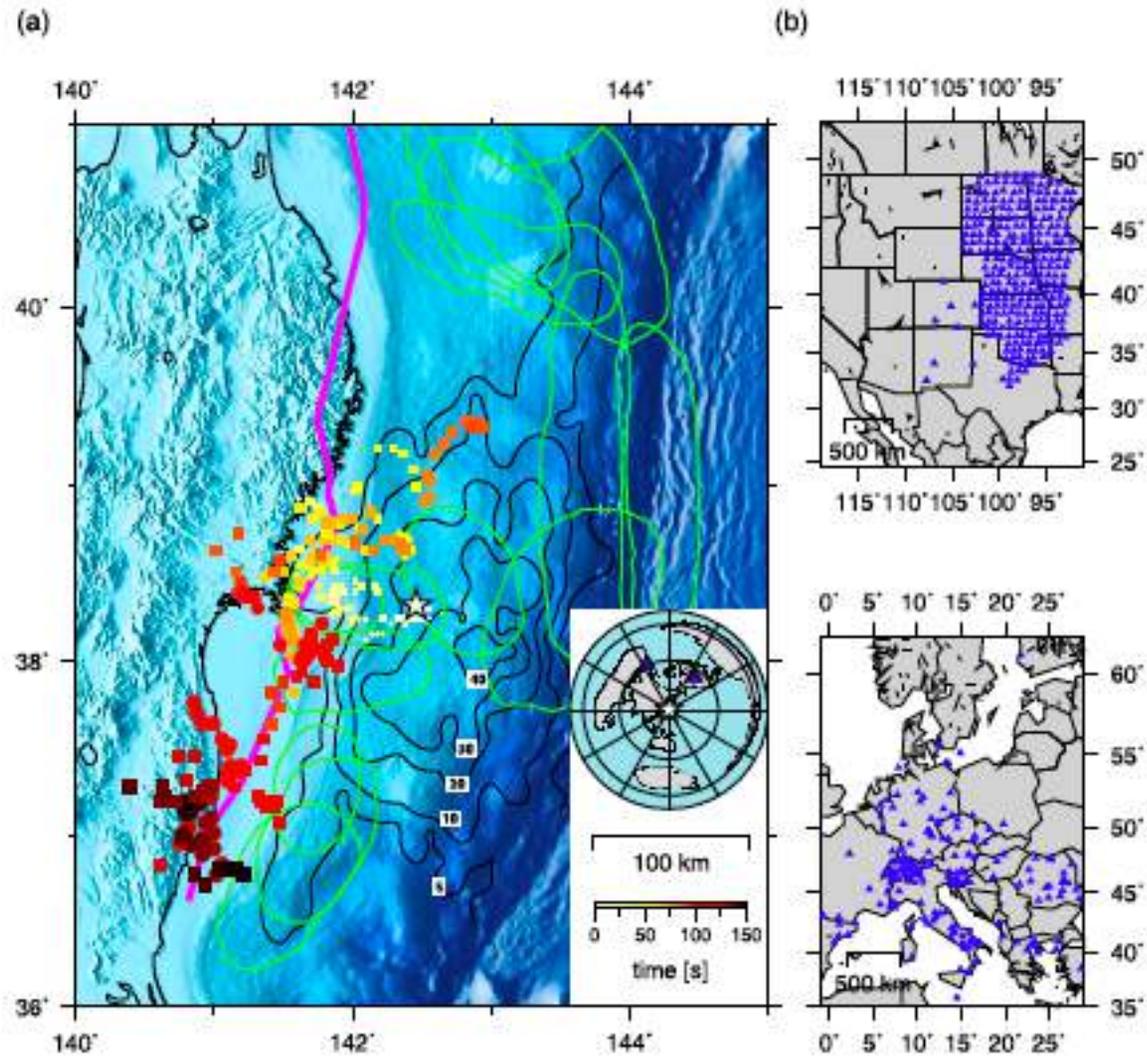


▲ Axe de la fosse

Campagnes de bathymétrie multi-beam en 1999, 2004, 2011

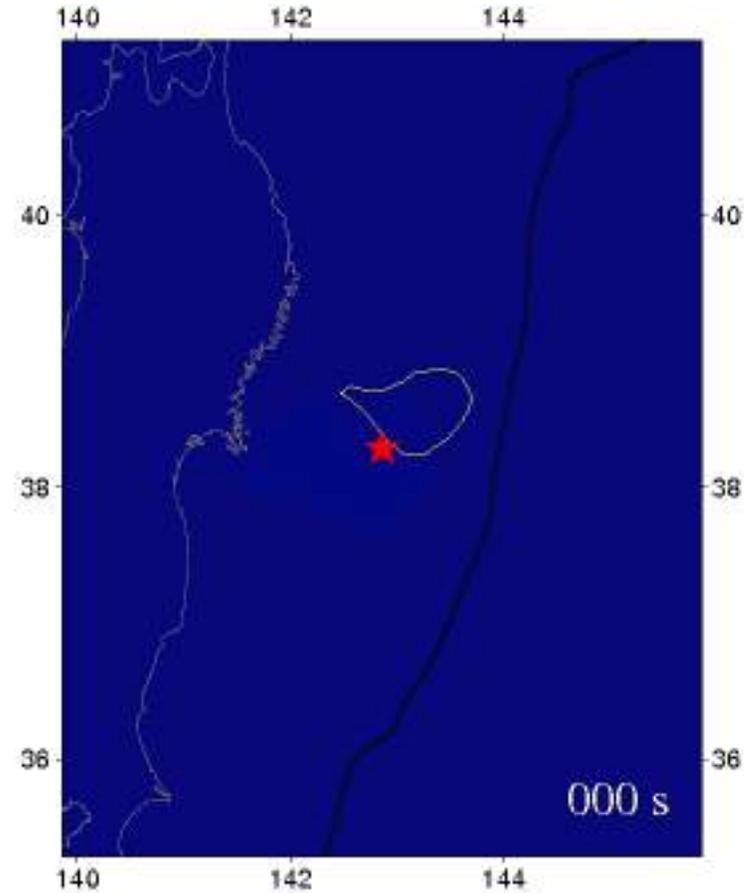
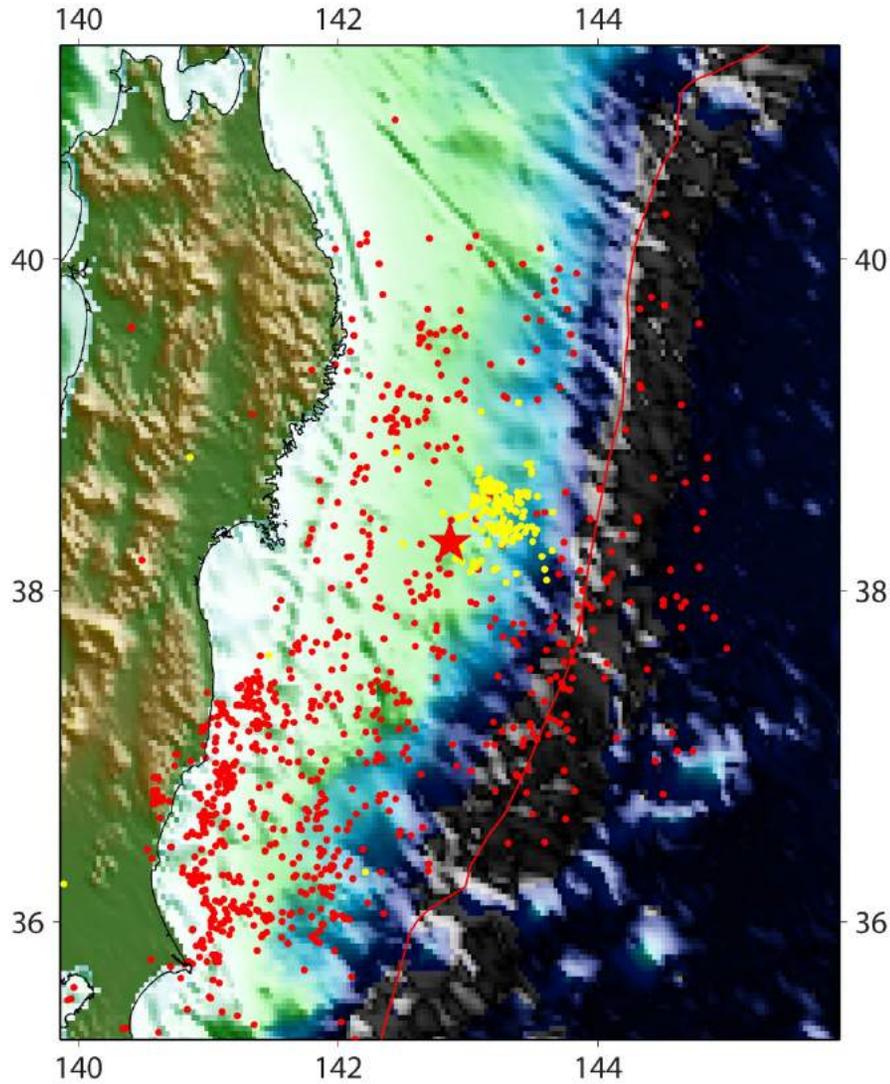
Fujiwara, 2011, Science

# Rétroprojection de l'énergie haute fréquence

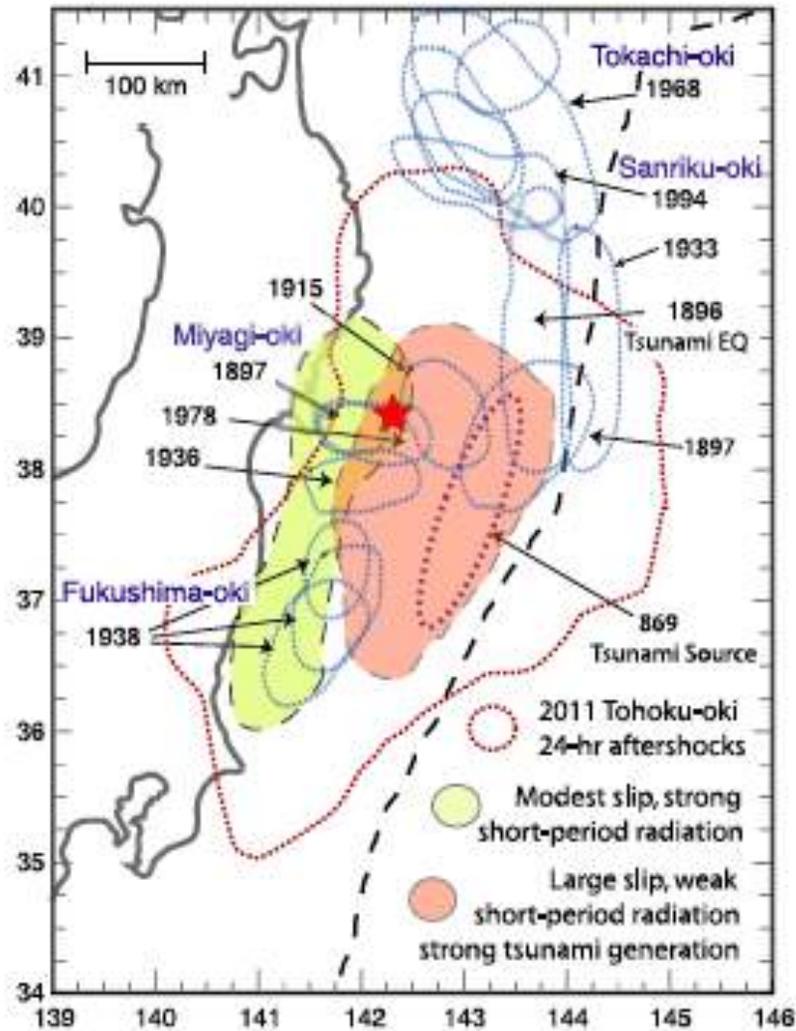


# $M_w$ 9.0 2011 Tohoku Japon

Rétroprojection: sources d'énergie haute fréquence

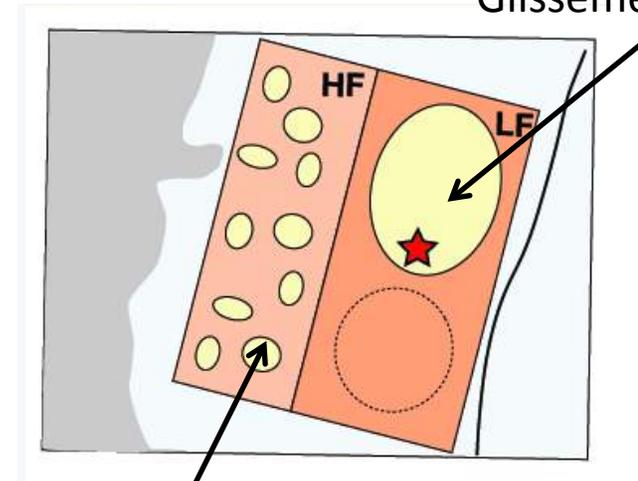


## Résumé: rupture du séisme de Tohoku du 12/03/2011 Mw 9.0



*Koper et al., 2011*

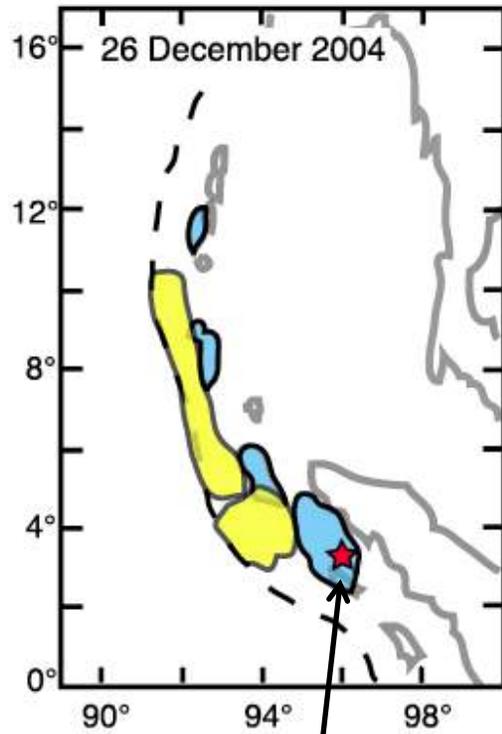
Plusieurs épisodes: 90% du moment sismique, et tsunami  
Glissement lent



Plusieurs aspérités  
hautes fréquences: vibrations du sol fortes

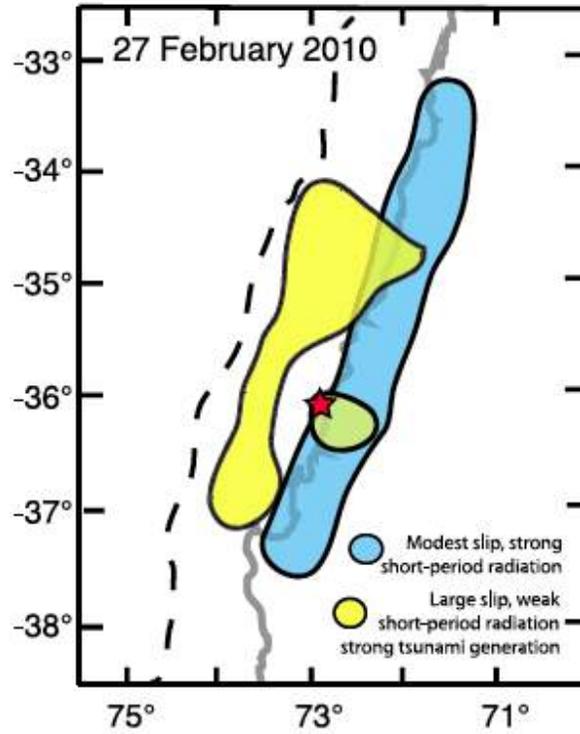
=> Hétérogénéité de la zone de subduction  
et de la nature du couplage inter-plaque:  
géométrie  
structure thermique  
hétérogénéités de composition.

Sumatra Mw 9.2



Hypocentre

Chili (Maule) Mw 8.8



Tohoku Mw 9.0

